

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ŞEBEKE İLE SENKRON ÇALIŞMADA ÇOK SEVİYELİ GÜÇ ELEKTRONİĞİ
DEVRELERİ ÜZERİNDEN OKYANUS DALGA ENERJİSİNİN
DÖNÜŞTÜRÜLMESİNİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİNE KATKILAR**

DOKTORA TEZİ

İlknur ÇOLAK

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

ARALIK 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ŞEBEKE İLE SENKRON ÇALIŞMADA ÇOK SEVİYELİ GÜÇ ELEKTRONİĞİ
DEVRELERİ ÜZERİNDEN OKYANUS DALGA ENERJİSİNİN
DÖNÜŞTÜRÜLMESİNİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİNE KATKILAR**

DOKTORA TEZİ

**İlknur ÇOLAK
(504062004)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ

ARALIK 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504062004 numaralı Doktora Öğrencisi İlknur ÇOLAK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ŞEBEKE İLE SENKRON ÇALIŞMADA ÇOK SEVİYELİ GÜÇ ELEKTRONİĞİ DEVRELERİ ÜZERİNDEN OKYANUS DALGA ENERJİSİNİN DÖNÜŞTÜRÜLMESİNİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİNE KATKILAR” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Faik MERGEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İbrahim ŞENOL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof.Dr. Kamuran Nur Bekiroğlu
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Onur Gülbahçe
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 2 Ağustos 2021
Savunma Tarihi : 29 Aralık 2021





Sevgili aileme,



ÖNSÖZ

Bu çalışma, dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinde kullanılmak üzere tasarlanmış salınlımlı su kolonu (OWC) ve Wells türbininin analiz edilmesi, dalga dönüşüm sisteminin hidrolik ve pnömatik modellenmesi yapılarak türbin çıkışının bir elektrik generatörüne akuple edilmesi ve generatör çıkışından elde edilen elektrik enerjisinin en yeni güç elektroniği topolojileri ve sofistike kontrol yöntemleri kullanılarak şebekeye aktarılmasını konu almaktadır.

Tez danışmanlığımı üstlenen, her aradığımda telefonun diğer ucunda beni sabırla dinleyen, bilgisini ve insani ilgisini esirgemeyen, tezin planlanma, yürütülme ve hazırlanma süreçlerinde yapıcı yaklaşım ve önerilerinin yanı sıra, yönlendirmeleriyle de bu çalışmanın bilimsel temeller ışığında şekillenmesini sağlayan değerli tez hocam Sayın Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Her altı ayda bir yapılan toplantılar süresince bilgi ve tecrübeleri ile bana sürekli destek olan değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Faik MERGEN ve Sayın Prof. Dr. İbrahim ŞENOL'a gönülden şükranlarımı sunarım.

Lisans ve yüksek lisans eğitim hayatım boyunca değerli bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Deniz YILDIRIM'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tezin alt yapı hazırlıklarının gerçekleştiği yer olan CERN (The European Organization for Nuclear Research) TE-EPC-MPC (Medium Power Converter Section) laboratuvarlarına çalışmalarım süresince yaptıkları katkılardan dolayı çok teşekkür ederim.

Üniversite eğitim hayatımın başlangıcından itibaren karşılaştığım her probleme pozitif bir enerji ve sistematik bir şekilde yaklaşmamı sağlayan, yönlendirmeleriyle araştırmacı kişiliğimin öne çıkmasını sağlayarak akademik düşünce ve ilkelere bağlı bir bilim insanı olarak yetişmemde büyük katkısı olan ve bir üyesi olmaktan gurur duyduğum, başta Elektrik Mühendisliği Fakültesi olmak üzere İstanbul Teknik Üniversitesi çatısı altındaki olan tüm değerli hocalarıma bana kattıkları vizyondan ötürü teşekkürü bir borç bilirim.

Bu yorucu ve bir o kadar da keyifli keşif yolculuğumun başlangıcından sonuna kadar tanıklık eden ve benden hiçbir desteği esirgemeyen başta kardeşim Zeliha ÇOLAK olmak üzere tüm aileme ve motivasyonlarından ötürü arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Ağustos 2021

İlknur ÇOLAK
(Elektrik Mühendisliği)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER.....	xi
KISALTMALAR.....	xv
SEMBOLLER.....	xvii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xxi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xxiii
ÖZET.....	xxxix
SUMMARY.....	xxxv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Kapsam	5
1.3 Özgün Değer.....	6
1.4 Literatür Araştırması	7
2. GENEL BİLGİLER	9
2.1 Okyanus Sularından Elektrik Enerjisi Elde Etmenin Yolları	9
2.1.1 Yüzeysel suları ile derin sular arasındaki sıcaklık farkından yararlanan teknolojiler.....	9
2.1.1.1 Kapalı çevrim santraller (CC-OTEC).....	11
2.1.1.2 Açık çevrim santraller (OC-OTEC)	12
2.1.2 Gelgit enerjisinden yararlanan sistemler	13
2.1.2.1 Baraj yöntemi	14
2.1.2.2 Akıntı enerjisi yöntemi	15
2.1.3 Yüzeysel suları ile derin sular arasındaki tuzluluk farkından yararlanan sistemler.....	17
2.1.4 Dalga enerjisinden yararlanan sistemler.....	20
2.1.4.1 Kıyı şeridi (shoreline) uygulamaları	23
2.1.4.2 Kıyıya yakın (near shore) uygulamalar	32
2.1.4.3 Kıyıya uzak (off-shore) uygulamalar	34
2.2 Dalga Enerjisinin Matematiksel Modellemesi	41
2.2.1 Dalgaların oluşumu ve dalga karakteristikleri.....	41
2.2.2 Dalgaların spektrumu	44
2.3 Salınlımlı Su Kolonunun (OWC) Matematiksel Modellemesi	53
2.3.1 Salınlımlı su kolonunun (OWC) çalışma şekli.....	54
2.3.2 Salınlımlı su kolonunda kullanılan kendinden doğrultmalı hava türbinleri	55
2.3.2.1 Wells türbinleri.....	56
2.3.2.2 Impulse türbinleri	58
2.3.2.3 Radyal tip türbinler.....	61
2.4 Çok Seviyeli Çevirici Güç Elektroniği Devreleri.....	62
2.4.1 İki seviyeli gerilim kaynaklı çevirici.....	64

2.4.2 Kaskat bağı çok seviyeli köprü çevirici	68
2.4.3 Kondansatör kenetlemeli çevirici	72
2.4.4 Diyot kenetlemeli evirici (NPC-neutral point clamped inverter)	76
3. DALGA ENERJİSİNİN MODELLENMESİ.....	83
3.1 Generatör Edeğer Devresi.....	104
4. ÜÇ SEVİYELİ AKTİF DOĞRULTUCUNUN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ.....	111
4.1 Üç Seviyeli Aktif Doğrultucunun Çalışma Şekli.....	113
5. ÜÇ SEVİYELİ EVİRİCİNİN NTV-SV-PWM METODU İLE KONTROLÜ VE DC BARA ORTA NOKTASININ DENGELENMESİ.....	121
5.1 Üç Seviyeli Eviricinin NTV-SV-PWM Metodu ile Kontrol Edilmesi	121
5.1.1 Üç seviyeli çeviricinin anahtarlama kombinasyonlarına göre vektör tipleri	122
5.1.1.1 Büyük vektörler	126
5.1.1.2 Orta vektörler	129
5.1.1.3 Küçük vektörler	131
5.1.1.4 Sıfır vektörler	135
5.1.2 Vektör büyüklüklerinin bulunması	136
5.1.2.1 Büyük vektörlerin büyüklüklerinin bulunması	137
5.1.2.2 Orta vektörlerin büyüklüklerinin bulunması.....	137
5.1.2.3 Küçük vektörlerin büyüklüklerinin bulunması	138
5.1.3 En yakın üç vektör - uzay vektör modülasyonu (NTV – SV – PWM) ..	140
5.1.3.1 Sektörlerin Belirlenmesi	142
5.1.3.2 En Yakın Üç Vektörün Tespiti	142
5.1.3.3 Anahtarlama Sürelerinin Hesaplanması.....	151
5.1.3.4 Vektörlerin Anahtarlama Sıralamasının Belirlenmesi	158
5.2 Doğru Gerilim Barası Orta Noktasının NTV-SV-PWM Metodu ve Veri Arama Tablosu Yardımı ile Dengelenmesi.....	159
6. MODEL KURULUMU VE BENZETİM ÇALIŞMALARI	179
6.1 Model Kurulumu.....	179
6.1.1 Düzenli dalgaların MATLAB'de modellenmesi	182
6.1.2 Salınımlı su kolonunun MATLAB'de modellenmesi	182
6.1.3 Üç seviyeli aktif doğrultucu (3L-AFE) ve S-PWM kontrol metodunun MATLAB’de modellenmesi	188
6.1.4 Üç Seviyeli Evirici (3L-NPC) ve NTV-SV-PWM Kontrol Metodunun MATLAB’de Modellenmesi.....	194
6.2 Benzetim Sonuçları.....	203
6.2.1 Dalga karakteristiklerinin ve wells türbinine aktarılan gücün farklı parametrelere göre değişiminin analiz edilmesi.....	203
6.2.1.1 Türbin çapının etkisi	208
6.2.1.2 Salınımlı su kolonu hava çıkış haznesi genişliğinin etkisi.....	211
6.2.1.3 Salınımlı su kolonu uzunluğunun etkisi.....	215
6.2.1.4 Dalga frekansının etkisi	219
6.2.1.5 Dalga yüksekliğinin etkisi.....	223
6.2.1.6 Salınımlı su kolonunun farklı akış oranlarındaki davranışı	226
6.2.2 Salınımlı su kolonu, doğrultucu ve eviricinin bir arada çalıştırılmasının analiz edilmesi	228
6.2.2.1 Eviricinin test edilmesi	229
6.2.2.2 Doğrultucunun test edilmesi	234
6.2.2.3 Salınımlı su kolonu, wells türbini, senkron generatör, evirici ve	

doğrultucunun birarada test edilmesi	237
7. SONUÇLAR.....	251
KAYNAKLAR.....	261
EKLER.....	267
ÖZGEÇMİŞ.....	291





KISALTMALAR

AC	: Alternative Current
AWS	: Archimedes Wave Spring
CC-OTEC	: Closed Cycle Ocean Thermal Energy Conversion
CERN	: European Nuclear Research Center
DC	: Direct Current
GCT	: Gate Commutated Thyristor
GTO	: Gate Turn-off Thyristor
HCA	: Hierarchical Cluster Analysis
IEC	: International Electrotechnical Commission
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEGT	: Injection Enhanced Insulated Gate Bipolar
IFREMER	: French Research Institute for Exploitation of the Sea
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor
IGCT	: Integrated Gate Commutated Thyristor
JAMSTEC	: Japan Agency for Marine Earth Science and Technology
MW	: MegaWatt
NEL	: National Energy Laboratory
NIOT	: National Institute of Ocean Technology
NPC	: Neutral Point Clamped
NTV	: Nearest Three Vector
NTV-SV-PWM	: Nearest Three Vector Space Vector Pulse Width Modulation
OC-OTEC	: Open Cycle Ocean Thermal Energy Conversion
OSPREY	: Ocean Swell Powered Renewable Energy
OTEC	: Ocean Thermal Energy Conversion
OWC	: Oscillating Water Column
PLL	: Phase Locked Loop
PWM	: Pulse Width Modulation
SOA	: Safe Operating Area
SPWM	: Sinusoidal Pulse Width Modulation

SV-PWM	: Space Vector Pulse Width Modulation
TEPCO	: Tokyo Electric Power Services Company
THD	: Total Harmonic Distortion
3L-NPC	: Three Level Neutral Point Clamped
3L-AFE	: Three Level Active Front End
UMN	: University of Minnesota



SEMBOLLER

A_a	: Silindirik bölgenin kesit alanı
A_t	: Türbin çıkışındaki bölgenin kesit alanı
B_m	: Türbin sürtünme faktörü
C	: Dalga hızı
C_g	: Dalga grup hızı
E_F	: Dalganın türbülans hareketi ve vizkositesinden dolayı OWC duvarlarında ve su yatağında meydana gelen sürtünme enerjisi
E_K	: Dalga kinetik enerjisi
E_T	: Toplam dalga enerjisi
E_P	: Potansiyel dalga enerjisi
E_R	: Gelen dalganın salınımlı su kolonunun duvarlarında yansımından dolayı meydana gelen yansıma enerjisi
E_W	: Salınımlı su kolonuna gelen dalga enerjisi
dA	: Havanın yüzey alanı; türbinin yer aldığı silindir içerisindeki türbin şaftının alanı çıkarıldıktan sonra kalan alan
C_{d1}	: Üst kol kondansatörü
C_{d2}	: Alt kol kondansatörü
d_{xxx}	: En yakın üç vektöre ait çevrim oranları (x : p, o, n)
d'_{xxx}	: En yakın üç vektöre ait doğru gerilim barası orta nokta dengesizliği durumundaki çevrim oranları (x : p, o, n)
D_h	: Pervane çapı
D_t	: Wells türbininin çapı
f	: Dalga frekansı
g	: Yerçekimi kuvveti
h	: Su derinliği
H	: Dalga yüksekliği
H_{xy}	: Anahtarlama durumu (x : a,b,c), (y : 1,2,3)
k	: Dalga sayısı
n	: Çevirici seviyesi

n	: Bir koldaki alt iki anahtarın aynı anda doğru gerilim barasının negatif noktasına bağlandığı durum
N_t	: Wells türbini kanat uçlarındaki rotasyonel hız
m	: Kütle
$\dot{m}$	: Kütle akış oranı
m_1, m_2, m_{12}	: Sektör ve bölgeleri belirlemek için kullanılan eşitlikleri basitleştirmek için kullanılan değişkenler
o	: Bir koldaki orta iki anahtarın aynı anda nötr noktasına bağlandığı durum
p	: Bir kolun üst iki anahtarının aynı anda doğru gerilim barasının pozitif noktasına bağlanma durumu
P	: Hava haznesindeki hava basıncı
P_{in}	: Türbine aktarılan toplam pinomatik güç
P_t	: Türbin gücü
Q	: Eksenel hava akış hızı
r	: Türbin yarıçapı
D_X	: Diyot elemanı ($x: 1,2,3,\dots$)
S_X	: Anahtarlama elemanı ($x: 1,2,3,\dots$)
T	: Dalga periyodu
T_{mech}	: Türbin torku
T_a, T_b, T_c	: Referans vektöre en yakın üç vektörün uygulanma süreleri
T_{me}	: Elektromanyetik tork
T_f	: Sürtünme torku
T_j	: Atalet torku
V_a, V_b, V_c	: Faz-nötr gerilimleri
V_{c1}	: Üst kol kondansatör gerilimi
V_{c2}	: Alt kol kondansatör gerilimi
V_d	: Doğru gerilim bara değeri
V_{owc}	: Su yüzeyinde meydana gelen hız
V_m	: Gerilim maksimum değeri
V_{ref}	: Referans gerilim vektörü
$V_{ref\alpha}$	: Referans gerilim reel bileşeni
$V_{ref\beta}$	: Referans gerilim imajiner bileşeni
V_t	: Wells türbinindeki hava hızı
$y(t)$	: Dalga hareketinin anlık dikime yer değiştirmesi

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_{12}$	: Referans vektörün hangi bölgede olduğunu belirlemek için kullanılan sınır değerler
λ	: Dalga boyu, m
η_t	: Türbin verimi
ρ	: Dalga yoğunluğu, kg/m
ρ_a	: Hava yoğunluğu
γ_1, γ_2	: Doğru gerilim barası orta noktasındaki dengesizlik durumunda modülasyon işlemini belirlemek üzere kullanılan değişkenler
$\delta_1, \delta_2, \delta_3$	: Doğru gerilim barası orta noktasındaki dengesizlik durumunda çevrim oranlarının hesaplamasında kullanılan değişkenler
ω	: Açısal hız
Ψ	: Basınç
$\emptyset$	: Hava akış oranı
θ	: Faz açısı
Π	: Tork sabiti
J	: Atalet



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Anahtarların iletim durumlarına göre iki seviyeli bir çeviricinin çıkışında meydana gelen gerilim değerleri.....	67
Çizelge 2.2 : Anahtarların iletim durumlarına göre beş seviyeli kaskat çeviricinin çıkışında meydana gelen gerilim değerleri.....	70
Çizelge 2.3 : Anahtarların iletim durumlarına göre beş seviyeli kondansatör kenetlemeli eviricinin A fazında meydana gelen gerilim değerleri.....	73
Çizelge 2.4 : Anahtarların iletim durumlarına göre diyot kenetlemeli üç eviricinin çıkışında meydana gelen gerilim değerleri.....	79
Çizelge 4.1 : Anahtarlama durumlarına göre gerilim değerleri.....	115
Çizelge 5.1 : Üç seviyeli çeviricinin anahtarlama durumlarının ve üç geriliminin tanımı.....	124
Çizelge 5.2 : Vektör büyüklükleri.....	140
Çizelge 5.3 : Sektör büyüklükleri.....	142
Çizelge 5.4 : Vektör konumunun belirlenmesi.....	151
Çizelge 5.5 : Birinci bölgede uygulanan vektörler.....	153
Çizelge 5.6 : İkinci bölgede uygulanan vektörler.....	154
Çizelge 5.7 : Üçüncü bölgede uygulanan vektörler.....	155
Çizelge 5.8 : Dördüncü bölgede uygulanan vektörler.....	156
Çizelge 5.9 : Referans geriliminin bulunduğu eşkenar bölgelere göre iletim sürelerinin hesaplanması.....	157
Çizelge 5.10 : Birinci bölümün bütün sektörler için onüç kademeli anahtarlama durumu.....	158
Çizelge 5.11 : Nötr akımının uzay vektörlerine bağlı olarak değişimi.....	164
Çizelge 5.12 : Vektör tipi ve akım yönüne göre kondansatör şarj/deşarj durumları.....	165
Çizelge 5.13 : Dengesizlik durumuna göre yeniden düzenlenen anahtarlama süreleri.....	174
Çizelge 5.13 (devam) : Dengesizlik durumuna göre yeniden düzenlenen anahtarlama süreleri.....	175
Çizelge 5.13 (devam) : Dengesizlik durumuna göre yeniden düzenlenen anahtarlama süreleri.....	176
Çizelge A.1 : Sektör II'ye ait anahtarlama süreleri.....	268
Çizelge A.2 : Sektör III'e ait anahtarlama süreleri.....	269
Çizelge A.3 : Sektör IV'e ait anahtarlama süreleri.....	270
Çizelge A.4 : Sektör V'e ait anahtarlama süreleri.....	271
Çizelge A.5 : Sektör VI'ya ait anahtarlama süreleri.....	272
Çizelge C.1 : Dengesizlik durumuna göre yeniden düzenlenen çevrim oranları	281

Çizelge C.1	Dengesizlik durumuna göre yeniden düzenlenen çevrim	282
(devam) :	oranları	
Çizelge C.1	Dengesizlik durumuna göre yeniden düzenlenen çevrim	283
(devam) :	oranları	
Çizelge C.1	Dengesizlik durumuna göre yeniden düzenlenen çevrim	284
(devam) :	oranları	
Çizelge C.1	Dengesizlik durumuna göre yeniden düzenlenen çevrim	285
(devam) :	oranları	
Çizelge D.1 :	Orta nokta gerilim değişimine ve faz akımları arasındaki	286
	bağıntıya bağlı olarak anahtarlama sıralamasının belirlenmesi..	
Çizelge D.1	Orta nokta gerilim değişimine ve faz akımları arasındaki	287
(devam) :	bağıntıya bağlı olarak anahtarlama sıralamasının belirlenmesi..	
Çizelge D.1	Orta nokta gerilim değişimine ve faz akımları arasındaki	288
(devam) :	bağıntıya bağlı olarak anahtarlama sıralamasının belirlenmesi..	
Çizelge D.1	Orta nokta gerilim değişimine ve faz akımları arasındaki	289
(devam) :	bağıntıya bağlı olarak anahtarlama sıralamasının belirlenmesi..	
Çizelge D.1	Orta nokta gerilim değişimine ve faz akımları arasındaki	290
(devam) :	bağıntıya bağlı olarak anahtarlama sıralamasının belirlenmesi..	

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 :	Dalga enerjisinden elektrik enerjisi elde etme yöntemleri.....	2
Şekil 1.2 :	Dalga dönüşüm sistemi blok diyagramı.....	2
Şekil 1.3 :	Dalga enerjisinden elektrik enerjisi üretim diyagramı.....	3
Şekil 1.4 :	Güç koşullandırma birimi blok diyagramı.....	7
Şekil 2.1 :	Deniz sularındaki sıcaklık dağılımı	10
Şekil 2.2 :	Kapalı çevrim OTEC modeli	12
Şekil 2.3 :	Açık çevrim OTEC modeli	13
Şekil 2.4 :	Gelgit enerjisi ile çalışan bir türbinin gösterilimi	14
Şekil 2.5 :	La Rance santralinden bir görüntü	15
Şekil 2.6 :	Denizdeki akıntılardan elektrik enerjisi üreten türbinlere ait bir gösterilim	16
Şekil 2.7 :	Akıntı türbini tarlası	16
Şekil 2.8 :	2007 yılında New York'daki bir türbinin kurulumuna ait bir görüntü	17
Şekil 2.9 :	Osmotik güç üretim santralinin prototipi	18
Şekil 2.10 :	Temel osmotik güç prosesi yapısı	19
Şekil 2.11 :	Yüksek verimle çalışan kapalı çevrim osmotik güç prosesi yapısı	20
Şekil 2.12 :	Dalgaların oluşumu.	21
Şekil 2.13 :	Dönüşüm sistemlerinin bulundukları yere göre sınıflandırılması.....	22
Şekil 2.14 :	Daralan kanal modelinin kanal yapısı.	23
Şekil 2.15 :	Tapchan modelinin genel yapısı	24
Şekil 2.16 :	Tofteshallen'deki sistemin su girişi	25
Şekil 2.17 :	Tofteshallen'deki sistemin su kanalının farklı bir açıdan görünüşü	26
Şekil 2.18 :	OWC modelinin temel çalışma prensibi.	27
Şekil 2.19 :	JAMSTEC araştırma merkezinin ürettiği Wells türbininin rotoru	28
Şekil 2.20 :	Kvaerner-Brug'ın ürettiği 500kW'lık salınımlı su kolonu türbini	29
Şekil 2.21 :	Pico adasındaki 400kW'lık türbine ait bir görüntü	29
Şekil 2.22 :	LIMPET türbinine ait bir görüntü	30
Şekil 2.23 :	500kW'lık LIMPET türbininin çalışma prensibi	30
Şekil 2.24 :	500kW'lık LIMPET türbininin üretim safhasından bir görüntü..	31
Şekil 2.25 :	Sarkaçlı enerji dönüşüm sistemi	32
Şekil 2.26 :	Dalga şamandırası enerji dönüşüm sistemi	33
Şekil 2.27 :	Dalga motoru enerji dönüşüm sistemi	34
Şekil 2.28 :	McCabe dalga pompası yöntemi.	35

Şekil 2.29 : Pelamis sisteminin hareket yönü (yandan görünüş).....	36
Şekil 2.30 : Pelamis sisteminin iç yapısı	37
Şekil 2.31 : Salter's Duck sisteminin genel yapısı.	38
Şekil 2.32 : AWS çalışma prensibi	39
Şekil 2.33 : AWS sisteminin lineer generatörle çalıştırılmasına dair örnekler.	40
Şekil 2.34 : Leixoes limanındaki AWS türbini	40
Şekil 2.35 : Rüzgara bağlı olarak farklı su derinliklerindeki dalga profili	41
Şekil 2.36 : Derin (kaotik) sulardaki dalga profili	42
Şekil 2.37 : Yapıcı, bozucu ve kompleks dalga girişimleri.....	43
Şekil 2.38 : Derin ve sığ sularda dalga oluşumu	44
Şekil 2.39 : Pierson ve Maskowitz modeline göre dalga spektrumu	45
Şekil 2.40 : Sığ ve derin sularda dalgaların hareketi	47
Şekil 2.41 : Derinliklerine göre dalgaların sınıflandırılması.....	49
Şekil 2.42 : Dalga hızının dalga boyuna ve deniz derinliğine bağlı olarak değişmesi (derin sular, orta derinlikteki sular ve sığ sular).....	50
Şekil 2.43 : Oregon'da yapılan bir ölçüme göre dalga gücünün aylara bağlı olarak	51
Şekil 2.44 : Dalga gücünün global olarak dağılımı, kW/m	52
Şekil 2.45 : Salımlı su kolonu (OWC) dalga enerjisi dönüşüm sistemi.....	53
Şekil 2.46 : Kılavuz kanatları olmayan Wells türbini	56
Şekil 2.47 : Kılavuz kanatlarına sahip Wells türbini	57
Şekil 2.48 : Kendinden açılı kontrollü Wells türbini	57
Şekil 2.49 : Çift kanatlı ve kılavuz kanatlı Wells türbini	58
Şekil 2.50 : Ters dönüş yönlü kanatlara sahip Wells türbini	58
Şekil 2.51 : Kendinden açılı kontrollü kılavuz kanatlarına sahip Impulse türbini yapısı	59
Şekil 2.52 : Sabit kılavuz kanatlı Impulse türbini	59
Şekil 2.53 : Impulse türbininin kılavuz kanatları ve pervanesiyle üç boyutlu gösterilimi	60
Şekil 2.54 : Impulse türbini ve Wells türbininin verim / akış oranı eğrilerinin karşılaştırılması	60
Şekil 2.55 : McCormick türbini	61
Şekil 2.56 : Radyal hava türbini	62
Şekil 2.57 : Gerilim ara devreli topolojilerin tek fazlı olarak gösterilimi.....	63
Şekil 2.58 : Üç fazlı iki seviyeli çevirici bloğu.	65
Şekil 2.59 : İki seviyeli çeviricinin anahtarlama durumlarına göre akım yolları. (a) Pozitif yarım dalga. (b) Negatif yarım dalga.....	67
Şekil 2.60 : Yarı iletken anahtarların kayıpları. (a) Pozitif yarım dalga. (b) Negatif yarım dalga.	68
Şekil 2.61 : Tek fazlı tam köprü çevirici bloğu.	69
Şekil 2.62 : Kaskat bağlı çeviricinin çalışma modları.....	71
Şekil 2.63 : Beş seviyeli kondansatör kenetlemeli çevirici.....	72
Şekil 2.64 : Anahtarlama durumlarına göre yarı iletken anahtarların kayıpları.....	74
Şekil 2.65 : Üç fazlı üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici.....	76
Şekil 2.66 : Diyot kenetlemeli üç seviyeli eviricinin anahtarlama durumlarına göre akım yolları.	78

Şekil 2.67 :	Diyot kenetlemeli üç seviyeli eviricinin anahtarlama durumları.....	79
Şekil 2.68 :	Anahtarlama durumlarına göre yarı iletken anahtarların kayıplarının gösterilimi.	80
Şekil 3.1 :	Salınımlı su kolonu dönüşüm sistemlerinde enerji zinciri.....	83
Şekil 3.2 :	Dalga karakteristikleri.....	84
Şekil 3.3 :	Salınımlı su kolonunda enerji dönüşümü.....	89
Şekil 3.4 :	Salınımlı su kolonu boyutları.....	91
Şekil 3.5 :	Salınımlı su kolonunda meydana gelen basınç değerlerinin gösterilimi.....	98
Şekil 3.6 :	Wells türbini üzerinde meydana gelen güç dağılımı.....	103
Şekil 3.7 :	Senkron generatörün Wells türbini ile birlikte çalıştırılması.....	105
Şekil 3.8 :	Silindirik rotorlu senkron generatörün üç fazlı edeğer devresi devresi.....	106
Şekil 3.9 :	Generatör fazör diyagramı. a). Omik yükleme durumu. b). Endüktif yükleme durumu. c). Kapasitif yükleme durumu.....	109
Şekil 3.10 :	Senkron generatörün güç/yük açısı karakteristiği.....	109
Şekil 4.1 :	Üç fazlı üç seviyeli çeviricinin kontrol blok diyagramı.....	112
Şekil 4.2 :	Üç fazlı üç seviyeli aktif doğrultucu yapısı.....	114
Şekil 5.1 :	Üç fazlı eviriciye ait kontrol blok diyagramı.....	122
Şekil 5.2 :	Üç fazlı ortadan diyot kenetlemeli eviriciye ait topoloji.....	123
Şekil 5.3 :	NPC topolojisinin üç kutuplu anahtarları.....	125
Şekil 5.4 :	Üç seviyeli çeviricinin anahtarlama durumlarına göre vektör konumları.	126
Şekil 5.5 :	Büyük vektörleri oluşturan anahtarlama konumları, büyük vektörlerin gösterilimi ve anahtarlama durumuna göre akım yönleri. (a) ppn vektörü. (b) pnp vektörü. (c) pnn vektörü. (d) npp vektörü. (e) npn vektörü. (f) nnp vektörü.....	127
Şekil 5.5 (devam):	Büyük vektörleri oluşturan anahtarlama konumları, büyük vektörlerin gösterilimi ve anahtarlama durumuna göre akım yönleri (devam). (a) ppn vektörü. (b) pnp vektörü. (c) pnn vektörü. (d) npp vektörü. (e) npn vektörü. (f) nnp vektörü.....	128
Şekil 5.6 :	Orta vektörleri oluşturan anahtarlama konumları, orta vektörlerin gösterilimi ve anahtarlama durumuna göre akım yönleri. (a) pon vektörü. (b) opn vektörü. (c) npo vektörü. (d) nop vektörü. (e) onp vektörü. (f) pno vektörü.	129
Şekil 5.6 (devam):	Orta vektörleri oluşturan anahtarlama konumları, orta vektörlerin gösterilimi ve anahtarlama durumuna göre akım yönleri (devam). (a) pon vektörü. (b) opn vektörü. (c) npo vektörü. (d) nop vektörü. (e) onp vektörü. (f) pno vektörü.....	130
Şekil 5.6 (devam):	Orta vektörleri oluşturan anahtarlama konumları, orta vektörlerin gösterilimi ve anahtarlama durumuna göre akım yönleri (devam). (a) pon vektörü. (b) opn vektörü. (c) npo vektörü. (d) nop vektörü. (e) onp vektörü. (f) pno vektörü.....	131
Şekil 5.7 :	Küçük vektörleri oluşturan anahtarlama konumları, küçük vektörlerin gösterilimi ve anahtarlama durumuna göre akım yönleri. (a) poo ve onn vektörleri. (b) ppo ve oon vektörleri. (c)	132

	oop ve nno vektörleri. (d) pop ve ono vektörleri. (e) opo ve non vektörleri. (f) opp ve noo vektörleri.....	
Şekil 5.7 (devam):	Küçük vektörleri oluşturan anahtarlama konumları, küçük vektörlerin gösterilimi ve anahtarlama durumuna göre akım yönleri (devam). (a) poo ve onn vektörleri. (b) ppo ve oon vektörleri. (c) oop ve nno vektörleri. (d) pop ve ono vektörleri. (e) opo ve non vektörleri. (f) opp ve noo vektörleri.....	133
Şekil 5.7 (devam):	Küçük vektörleri oluşturan anahtarlama konumları, küçük vektörlerin gösterilimi ve anahtarlama durumuna göre akım yönleri (devam). (a) poo ve onn vektörleri. (b) ppo ve oon vektörleri. (c) oop ve nno vektörleri. (d) pop ve ono vektörleri. (e) opo ve non vektörleri. (f) opp ve noo vektörleri.....	134
Şekil 5.8 :	Sıfır vektörlerinin anahtarlama konumları ve akım yönleri. (a) ppp vektörü. (b) ooo vektörü. (c) nnn vektörü.	135
Şekil 5.9 :	(a) Üç seviyeli NPC çeviricisinin vektörlerinin ve vektör genliklerinin gösterilimi. (b) Küçük vektörler. (c) Orta vektörler. (d) Büyük vektörler.	139
Şekil 5.10 :	Üç seviyeli çeviricinin altı eşgen sektör bölgesi.....	141
Şekil 5.11 :	Vektör diyagramında anahtarlama bölümlerinin gösterilimi.....	143
Şekil 5.12 :	Referans geriliminin reel kısmının $V_d/\sqrt{3}$ geriliminden küçük olduğu durum.	144
Şekil 5.13 :	Referans geriliminin reel kısmının $V_d/\sqrt{3}$ geriliminden büyük olduğu durum.	145
Şekil 5.14 :	Anahtarlama sürelerinin α - β düzleminde hesaplanması.....	153
Şekil 5.15 :	Üç seviyeli çeviricinin uzay vektör modülasyonunda anahtarlama sırası.	159
Şekil 5.16 :	Doğru gerilim barası orta noktasının dengede olmaması durumunda vektör genliklerinde ve açılarında meydana gelen değişim. (a) $VC1 > VC2$. (b) $VC1 < VC2$	161
Şekil 5.17 :	Pozitif ve negatif küçük vektörlerin orta nokta akımına etkisi (a) Pozitif küçük vektör (onn). (b) Negatif küçük vektör (poo).....	163
Şekil 5.18 :	Doğru gerilim barası orta nokta gerilimini belirleyen vektörler ve bunlara ilişkin akım yönleri.	165
Şekil 5.19 :	Doğru gerilim barasının orta nokta gerilim dengesizliği durumunda seçilen küçük vektöre göre bölgeleri belirleyen üçgenlerin değişimi. (a) Durum 1. (b) Durum 2. (c) Durum 3. (d) Durum 4.	167
Şekil 5.20 :	Doğru gerilim barasının orta nokta gerilimindeki sapmaya göre birinci sektördeki gerilimlerin genliklerinin sapması ($VC1 > VC2$).....	168
Şekil 5.21 :	Referans vektörünün üçüncü bölgede yer aldığı durum.....	170
Şekil 5.22 :	Referans vektörünün dördüncü bölgede yer aldığı durum için vektörlerin α ve β bileşenlerinin bulunması.	172
Şekil 6.1 :	Sistemin kapalı çevrim blok diyagramı.....	180
Şekil 6.2 :	Sistemin kapalı çevrim modeli.	181
Şekil 6.3 :	Dalga karakteristiğinin MATLAB’de oluşturulması.....	182
Şekil 6.4 :	Salımlı su kolonu kontrol bloğu.....	183
Şekil 6.5 :	Salımlı su kolonundan basınç, güç ve akış oranı değerlerinin elde edildiği kontrol bloğu.....	184

Şekil 6.6 :	Wells türbini ve generatör bloklarının salınımlı su kolonu çıkışına adapte edildikleri kontrol bloğu.....	185
Şekil 6.7 :	Generatör eşdeğer devresinin modellenmesi.....	186
Şekil 6.8 :	Generatör kayıplarının ilave edildiği ve generatör uç gerilimlerinin elde edildiği kontrol bloğu.....	187
Şekil 6.9 :	SPWM modülatörü.	188
Şekil 6.10 :	S-PWM metodu ile kontrol edilen 3L-AFE'nin MATLAB kontrol bloğu.	189
Şekil 6.11 :	Üç seviyeli doğrultucu kontrol bloğu.	190
Şekil 6.12 :	abc -> dq dönüşümü.	191
Şekil 6.13 :	dq -> abc dönüşümü.	192
Şekil 6.14 :	Doğrultucu anahtarlama sinyallerinin oluşturulması.....	193
Şekil 6.15 :	NTV-SV-PWM metodu ile kontrol edilen 3L-NPC'nin MATLAB kontrol bloğu.....	195
Şekil 6.16 :	Üç seviyeli evirici kontrol bloğu.....	196
Şekil 6.17 :	Şebeke geriliminin PLL bloğu ile ölçülmesi.....	197
Şekil 6.18 :	α ve β açılarının bulunması.....	197
Şekil 6.19 :	Referans vektörün bulunduğu sektör bilgisinin elde edilmesi.....	198
Şekil 6.20 :	Referans vektörün bulunduğu bölge bilgisinin elde edilmesi.....	199
Şekil 6.21 :	Vektörlerin anahtarlama sürelerinin hesaplanması - 1.....	200
Şekil 6.22 :	Vektörlerin anahtarlama sürelerinin hesaplanması - 2.....	201
Şekil 6.23 :	Vektörlerin anahtarlama sıralamasının belirlenmesi.....	202
Şekil 6.24 :	Farklı dalga periyotlarına bağlı gelen dalgada meydana gelen anlık güç değişimi.....	203
Şekil 6.25 :	Farklı dalga genliklerine bağlı olarak gelen dalgada meydana gelen anlık güç değişimi.....	204
Şekil 6.26 :	Ortalama dalga gücünün dalga periyodu ve dalga yüksekliğine bağlı olarak değişimi.....	205
Şekil 6.27 :	Gelen dalga ile su kolonu içerisindeki dalga hızının gösterilimi. (a). Su kolonuna gelen dalganın hızı. (b). Su kolonu içerisindeki dalganın hızı.....	206
Şekil 6.28 :	Su kolonuna gelen dalga ile su kolonu içerisindeki dalga gücünün anlık değişimi. (a). Su kolonuna gelen dalganın anlık güç değişimi. (b). Su kolonu içerisindeki dalganın anlık güç değişimi.....	207
Şekil 6.29 :	Wells türbini üzerinde meydana gelen anlık basıncın farklı türbin çaplarına göre zamana bağlı değişimi.....	209
Şekil 6.30 :	Wells türbinine aktarılan anlık gücün farklı türbin çaplarına göre zamana bağlı değişimi.....	209
Şekil 6.31 :	Anlık hava akış oranının farklı türbin çaplarına bağlı olarak değişimi.....	210
Şekil 6.32 :	Wells türbinine aktarılan ortalama gücün farklı türbin çaplarına bağlı olarak değişimi.....	210
Şekil 6.33 :	Wells türbini üzerinde meydana gelen anlık basıncın farklı hava çıkış haznesi genişliğine göre zamana bağlı değişimi.....	211
Şekil 6.34 :	Wells türbinine aktarılan anlık gücün farklı hava çıkış haznesi genişliğine göre zamana bağlı değişimi.....	212
Şekil 6.35 :	Anlık hava akış oranının farklı hava çıkış haznesi genişliğine bağlı olarak değişimi.....	213

Şekil 6.36 :	Wells türbinine aktarılan ortalama gücün farklı hava çıkış haznesi genişliğine bağlı olarak değişimi.....	214
Şekil 6.37 :	Wells türbini veriminin salınımlı su kolonu hava aralığı genişliğine bağlı olarak değişimi.....	215
Şekil 6.38 :	Wells türbini üzerinde meydana gelen anlık basıncın farklı su kolonu uzunluğuna göre zamana bağlı değişimi.....	216
Şekil 6.39 :	Wells türbinine aktarılan anlık gücün farklı su kolonu uzunluğuna göre zamana bağlı değişimi.....	217
Şekil 6.40 :	Anlık hava akış oranının farklı su kolonu uzunluğuna bağlı olarak değişimi.....	217
Şekil 6.41 :	Wells türbinine aktarılan ortalama gücün farklı su kolonu uzunluğuna bağlı olarak değişimi.....	218
Şekil 6.42 :	Wells türbini veriminin salınımlı su kolonu uzunluğuna bağlı olarak değişimi.	219
Şekil 6.43 :	Wells türbini üzerinde meydana gelen anlık basıncın farklı dalga frekanslarına bağlı olarak değişimi.....	220
Şekil 6.44 :	Wells türbinine aktarılan anlık gücün farklı dalga frekanslarına bağlı olarak değişimi.....	220
Şekil 6.45 :	Anlık hava akış oranının farklı dalga frekanslarına bağlı olarak değişimi.....	221
Şekil 6.46 :	Wells türbinine aktarılan ortalama gücün farklı dalga frekanslarına bağlı olarak değişimi.....	222
Şekil 6.47 :	Wells türbini veriminin salınımlı su kolonu uzunluğuna bağlı olarak değişimi.....	222
Şekil 6.48 :	Wells türbini üzerinde meydana gelen anlık basıncın farklı dalga yüksekliklerine bağlı olarak değişimi.....	223
Şekil 6.49 :	Wells türbinine aktarılan anlık gücün farklı dalga yüksekliklerine bağlı olarak değişimi.....	224
Şekil 6.50 :	Anlık hava akış oranının farklı dalga yüksekliklerine bağlı olarak değişimi.....	224
Şekil 6.51 :	Wells türbinine aktarılan ortalama gücün farklı dalga yüksekliklerine bağlı olarak değişimi.....	225
Şekil 6.52 :	Wells türbini veriminin salınımlı su kolonu içerisindeki dalganın genliğine bağlı olarak değişimi.....	225
Şekil 6.53 :	Salınımlı su kolonu çıkışında meydana gelen basıncın farklı akış oranlarındaki davranışı.....	227
Şekil 6.54 :	Salınımlı su kolonu çıkışında meydana gelen gücün farklı akış oranlarındaki davranışı.....	227
Şekil 6.55 :	Referans gerilime ait sektör ve bölge durum bilgisi.....	230
Şekil 6.56 :	Evirici kapı sürme sinyalleri.....	230
Şekil 6.57 :	Evirici terminallerinden elde edilen üç faz gerilimleri.....	231
Şekil 6.58 :	Yüke aktarılan faz arası gerilim dalga şekilleri.....	231
Şekil 6.59 :	Yüke aktarılan faz akımı dalga şekilleri.....	232
Şekil 6.60 :	Evirici çıkışı filtre öncesi ve sonrası tek faz akımı.....	232
Şekil 6.61 :	Evirici çıkışındaki filtre üzerindeki gerilim.....	233
Şekil 6.62 :	Doğru gerilim barasından çekilen akım dalga şekli.....	233
Şekil 6.63 :	Yüke aktarılan tek faz anlık çıkış gücü.....	234
Şekil 6.64 :	Doğrultucu kapı sürme sinyalleri.....	235
Şekil 6.65 :	Doğrultucu üç faz giriş gerilim dalga şekilleri.....	236
Şekil 6.66 :	Doğrultucu giriş tek faz akımı.....	236

Şekil 6.67 :	Doğrultucu girişinden çekilen anlık güç.....	237
Şekil 6.68 :	Salınlımlı su kolonu içerisinde hareket eden dalgaya ait hız ve yer değiştirme dalga şekilleri.....	238
Şekil 6.69 :	Salınlımlı su kolonu içerisinde hava hızının zamana bağlı değişimi.....	238
Şekil 6.70 :	Wells türbini hızının zamana bağlı değişimi.....	239
Şekil 6.71 :	Wells türbinine aktarılan basınç dalga şekli.....	239
Şekil 6.72 :	Hava akış oranı.....	240
Şekil 6.73 :	Wells türbinine aktarılan anlık güç değişimi.....	240
Şekil 6.74 :	(a) Dalga hızı ve dalga yer değişimi. (b) Akış oranı. (c) Türbine aktarılan güç ve türbin çıkışından elde edilen güç dalga şekilleri.....	241
Şekil 6.75 :	Generatöre endüklenen üç faz gerilim dalga şekli.....	242
Şekil 6.76 :	Doğrultucu üç faz giriş gerilim dalga şekilleri	242
Şekil 6.77 :	Doğrultucu giriş tek faz akımı.....	243
Şekil 6.78 :	Doğrultucu girişinden çekilen anlık güç	243
Şekil 6.79 :	Doğru gerilim barasından çekilen akım dalga şekli.....	244
Şekil 6.80 :	Doğru gerilim barasından çekilen akım dalga şekli.....	244
Şekil 6.81 :	Evirici terminallerinden elde edilen faz gerilimleri (filtresiz). (a) Doğru bara dengeleme yöntemi aktif duruma getirilmeden önce. (b) Doğru bara dengeleme yöntemi aktif duruma getirildikten sonra.....	245
Şekil 6.82 :	Evirici çıkışı filtre öncesi ve sonrası tek faz akımı.....	246
Şekil 6.83 :	Evirici çıkışındaki filtre üzerindeki gerilim.....	246
Şekil 6.84 :	Yüke aktarılan faz arası gerilim dalga şekilleri. (a) Rezistif yük durumunda. (b) Endüktif yük durumunda.	247
Şekil 6.85 :	Yüke aktarılan faz akımı dalga şekilleri. (a) Rezistif yük durumunda. (b) Endüktif yük durumunda.....	248
Şekil 6.86 :	Yüke aktarılan anlık çıkış gücü. (a) Rezistif yük durumunda. (b) Endüktif yük durumunda.....	249
Şekil 6.87 :	(a) Evirici çıkış akımı, (b) Evirici çıkış gerilimi harmonik spektrumları.....	250
Şekil B.1 :	$m = 0.8$ ve $\theta = 15^\circ$ olması durumunda vektörlerin konumları....	273
Şekil B.2 :	$m = 0.8$ ve $\theta = 15^\circ$ için anahtarlama süreleri ve anahtarlama durumlarının gösterilimi.	274
Şekil B.3 :	$m = 0.8$ ve $\theta = 25^\circ$ olması durumunda vektörlerin konumları....	275
Şekil B.4 :	$m = 0.8$ ve $\theta = 25^\circ$ için anahtarlama süreleri ve anahtarlama durumlarının gösterilimi.	276
Şekil B.5 :	$m = 0.4$ ve $\theta = 45^\circ$ olması durumunda vektörlerin konumları....	277
Şekil B.6 :	$m = 0.4$ ve $\theta = 45^\circ$ için anahtarlama süreleri ve anahtarlama durumlarının gösterilimi.	278
Şekil B.7 :	$m = 0.9$ ve $\theta = 45^\circ$ olması durumunda vektörlerin konumları....	279
Şekil B.8 :	$m = 0.9$ ve $\theta = 45^\circ$ için anahtarlama süreleri ve anahtarlama durumlarının gösterilimi.	280



ŞEBEKE İLE SENKRON ÇALIŞMADA ÇOK SEVİYELİ GÜÇ ELEKTRONİĞİ DEVRELERİ ÜZERİNDEN OKYANUS DALGA ENERJİSİNİN DÖNÜŞTÜRÜLMESİNİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİNE KATKILAR

ÖZET

Son yıllarda dünyadaki enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla yapılan çeşitli araştırmalar içinde yer alan dalga enerjisinden yararlanma fikri, günümüz koşullarında her geçen gün daha da önem kazanmaktadır. Son yarım asırdır artan petrol krizi ile birlikte doğal enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimi popüler hale gelmiş ve dünya genelindeki pek çok ülkenin 2030 yılı itibarıyla karbondioksit ve benzeri diğer zehirli gazların emisyonunu %50'ye düşürme hedefleri sayesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması zorunlu hale gelmiştir. Güneş ve rüzgar enerjisine kıyasla kendine küçük de olsa bir yer edinen dalga enerjisi, konunun karmaşıklığı, üretiminin zor olması ve uygun uygulama alanı bulma konusundaki zorluklar nedeniyle halen prototip safhasını aşmış, ticari boyut kazanamamıştır.

Dalga enerjisinden elektrik enerjisi üretimi konusunda yapılan çalışmalarda gelişmiş güç elektroniği topolojilerinin ve kontrol yöntemlerinin uygulanması konusunda geniş çaplı araştırmalar yapılmamıştır. Bu nedenle bu tez çalışmasında ilk olarak dalga enerjisinden Wells türbini yardımıyla elektrik enerjisi üretiminin matematiksel analizi yapılmıştır. Sistemin ve sistem bileşenlerin ayrı ve bütünsel matematiksel modelleri elde edilmiştir. Dalgadan elde edilen enerjinin şebekeye aktarılması için üç seviyeli aktif doğrultucu ve üç seviyeli evirici kullanılmış ve sistem kapalı modellenmesi benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir.

Denizdeki rüzgar dalgalarının enerjisi dağıtım ağındaki elektriğe dönüşene kadar, genel olarak dört aşamadan geçer. İlk aşamada, dalgadaki enerjiyi bir mekanik harekete dönüştürmek gerekir. Ortaya çıkan bu mekanik enerji, denizdeki dalgaların karakteristiği gereği, büyük genlikli, düşük hızlı hareketlerdir. İkinci aşamada mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi gerekir. Şebekede kullanıma uygun olmayan bu enerjinin, sabit frekans ve sabit genlikli gerilime dönüştürülmesi gerekir. Elektrik üretimine uygun hızlara getirilmiş hareketten elektriğin üretilmesi ve üretilen elektriğin dağıtım şebekesine aktarılacak kaliteye getirilmesi de üçüncü aşamada çözümlenir. Son aşamada ise üretilen elektriğin, özellikle çok sayıda birimden oluşan sistemlerde, genel dağıtım ağı ile entegre edilmesi söz konusudur.

Dalga enerjisinden enerji üretimi konusundaki en büyük zorluklardan biri olan dalga dönüşüm tipinin belirlenmesi ve belirlenen sistemin hidrolik ve pnömatik çevrim analizlerinin yapılarak sistem matematiksel modellenmesinin gerçekleştirilmesidir. Bu çalışmada dalga enerjisi çevrim sistemi için salınlı su kolonu (OWC) sistemi kullanılmış ve pnömatik enerjinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi için de en basit ve güvenilir kendinden doğrultmalı hava türbini olan Wells türbini kullanılmıştır.

Türbin/generatör grubunun çıkışındaki gerilimin doğrultulmasında kullanılan aktif doğrultucu, üç fazlı, üç seviyeli ortadan kenetlemeli çevirici (3L-AFE) topolojisi olup, çevirici sinüs biçimli darbe genlik modülasyonu (SPWM) metodu ile kontrol edilmiştir. Doğrultucunun çift yönlü akım akıtma yeteneğine sahip olması sayesinde, generatörden çekilen reaktif gücün kontrolü, toplam harmonik akım kompanzasyonu, generatörün ilk kalkış anındaki tahrik geriliminin sağlanması mümkün olmaktadır.

Doğru gerilimin alternatif gerilime çevrilmesinde kullanılan ve gerilim kaynağı olarak çalıştırılan üç seviyeli evirici (3L-NPC), güç elektroniği uygulamalarında henüz çok yeni bir kontrol yöntemi olan üç seviyeli NTV-SV-PWM (nearest three vector - space vector - pulse width modulation) metodu ile kontrol edilmiştir. Uzak vektör modülasyon yöntemi gerilimin daha geniş bir aralıkta kontrol edilmesini sağlarken aynı zamanda çıkıştaki harmoniklerin düşürülmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada amaç farklı disiplinlerdeki yenilikleri bir araya getirerek yenilenebilir enerji kaynakları uygulamalarına yenilikçi bir açısı ile özgün bir katkıda bulunmaktır.

Uzak vektör modülasyon yöntemi, ölçülen anlık referans vektöre en yakın üç vektörün belirlenmesi ve yarı iletken anahtarların bu vektör değerlerini oluştururken anahtarlama kayıplarını en düşük seviyede tutacak sıra ve sürede (dwell time) uygulanmasına dayanır. Bu yöntem ile evirici anahtarlama kayıpları minimumda tutulurken evirici çıkışının şebeke gerilimine senkronize edilmesi de sağlanmış olur.

Doğru gerilim barasının kontrolünde vektörlerin büyüklüklerindeki ve açılarındaki sapma ve doğru gerilim barası orta noktasının akım yönü bilgisi kullanılır. Bu bilgilere göre anahtarların anahtarlama sırasının önceden kestirimi yapılır ve bir veri arama tablosu (look-up table) oluşturulur. Bu sayede kontrol döngülerinin azaltılması ve sistem cevabının hızlandırılması sağlanmış olur.

Aynı doğru gerilim barası ile birbirine bağlı üç seviyeli aktif doğrultucu ve üç seviyeli eviricinin görev dağılımları aşağıdaki gibidir.

Aktif doğrultucu:

- Alternatif gerilimin doğru gerilime çevrilmesi
- Doğru gerilim barasının gerilim değerinin sabit tutulması
- Çift yönlü akım geçişinin sağlanması (S-PWM kontrolü)
- Akım harmoniğinin düşürülmesi
- Doğrultucunun alternatif gerilim uçlarında üç seviyeli faz arası gerilimlerinin oluşturulması
- Alternatif gerilim girişinden sinüzoidal akım çekerek güç faktörünün bire yakın tutulması

Üç seviyeli evirici:

- Doğru gerilimin alternatif gerilime çevrilmesi
- Çift yönlü akım geçişinin sağlanması (NTV-SV-PWM kontrolü)
- Akım harmoniğinin düşürülmesi
- Gerilim harmoniğinin düşürülmesi
- Doğru gerilim barası nötr noktasının kontrolü

- Çıkış geriliminin şebekeye senkron çalıştırılması

Bu çalışmada salınlı su kolonu (OWC), Wells türbini, senkron generatör, doğrultucu ve eviriciden oluşan dalga enerjisinden elektrik enerjisine dönüşüm sisteminin tekil matematiksel modellemesi detaylandırılmış ve karmaşık girişli, karmaşık sistemin bütünleşik matematiksel modellerine katkıda bulunacak sonuçlar elde edilmiştir. Dalgalardan elektrik enerjisi üretimi konusuna duyulan ilgi dünya genelinde artmakta olup, çalışmalar henüz yeni yaklaşımlar üretmek düzeyindedir. Bu nedenle bu tez çalışmasının sonuçları ciddi bir dalga enerjisi potansiyeline sahip olan Türkiye'nin enerji politikalarının başarısı ve bu konuda uluslararası platformlarda yer edinmesi açısından büyük önem taşınmaktadır. Ayrıca bu proje Türkiye'nin yenilenebilir enerji konusundaki antlaşmalarda üstlendiği yükümlülüklerin yerine getirilmesi açısından da katkı sağlamaktadır.





CONTRIBUTIONS TO THE MATHEMATICAL MODELLING OF THE OCEAN WAVE ENERGY CONVERSION THROUGH MULTILEVEL POWER ELECTRONICS CONVERTERS FOR ON-GRID OPERATION

SUMMARY

In the recent years, there is an increasing research trend on the wave energy conversion to fulfill the energy requirements all around the world. With the increasing oil crisis in the last half century, the generation of electrical energy from natural energy sources has become popular and the use of renewable energy sources has become mandatory, thanks to the targets of many countries around the world to reduce the emission of carbon dioxide and other green energy gases to 50% by 2030. Wave energy, which has a very small portion in the industry compared to solar and wind energy, couldn't improve enough due to complex structure of the system, difficulty of the production and the difficulties in finding a suitable application area. Therefore this technology has still not passed the prototype stage and did not have enough progress to become a commercial equipment that can be widely used.

In studies on the generation of electrical energy from wave energy, there are not extensive researches or applications where the advanced power electronics topologies and the control methodologies are used for the wave energy conversion. For this reason, in this thesis, firstly, the wave energy characteristics are analysed and a mathematical model is generated to simulate the power extraction from wave energy. Discrete and integrated mathematical models of the system and its components were obtained. Following that, three-level active rectifier (3L-AFE) and three-level inverter (3L-NPC) are used to transfer the energy obtained from the wave to the grid, and the closed modeling of the system is implemented in the simulation environment.

The wave energy goes through four stages before is converted into electricity in the distribution network. In the very first step, it is necessary to convert the wave energy into mechanical motion. This resulting mechanical energy is high amplitude, low speed movements due to the characteristics of waves in the sea. In the second step, this slow mechanical movement needs to be converted into electrical energy. This energy, which is not suitable for use in the network, needs be converted to a constant frequency and constant amplitude voltage. Therefore in the third step there needs to be a power conversion system which converts the irregular waveforms into sinusoidal voltage waveforms. In the last stage, the produced electricity is synchronised with the distribution network to comply the grid quality requirements.

One of the biggest difficulties in energy generation from wave energy is to determine the wave conversion type and to perform the mathematical modeling of the system by performing hydraulic and pneumatic cycle analyzes of the determined system. In this research, the oscillating water column (OWC) system was used for the wave energy conversion system and the Wells turbine, which is the simplest and most reliable self-directing air turbine, was used for the conversion of pneumatic energy into mechanical energy.

The output voltage of the turbine/generator group is converted to a DC voltage by using a three-phase, three-level neutral-point clamped rectifier (3L-AFE) which is used as a voltage source in this application. In this application the converter is controlled by the sinusoidal pulse amplitude modulation (SPWM) method. . Thanks to the ability of the rectifier to flow current in two directions, it is possible to control the reactive power drawn from the generator, compensate for the total harmonic current, and provide the drive voltage at the first start of the generator.

Three-level inverter (3L-NPC) is used in the conversion of direct voltage to alternating voltage and operated as a voltage source converter where the control of the inverter is realized with three level NTV-SV-PWM (nearest three vector - space vector - pulse width modulation) method, which is still very new control method in power electronics applications. While the space vector modulation method enables the voltage to be controlled in a wider range, it also plays an important role in reducing the harmonics at the output voltage. By applying this methodology to this system, it is aimed to combine different engineering disciplines into same application and bring a new and sophisticated approach to the renewable energy applications.

The space vector modulation is a control method where the three space vectors which are defined as closest vectors to the measured instantaneous reference vector and used to generate the same amplitude of the reference vector. To have minimum switching losses on the semiconductors these three vectors are applied in a proper order and time (dwell time) while creating the reference vector value. With this method, while the inverter switching losses are kept to a minimum, it is also ensured that the inverter output is synchronized with the utility grid by using PLL (Phase Locked Loop) method.

In this application, the voltage deviation on the space vectors' magnitudes and on their angles are estimated based on the DC link current's direction and the voltage difference between the upper and lower DC link capacitors. According to this information, the switching order of the keys is predicted and a look-up table is created. The selection of the three vectors are based on this new vector table and their adjusted dwell times. By using this solution, the control loops and the iterations are decreased and the system response time is increased accordingly.

In the closed loop control of the system, the duty duty distributions of the three-level active rectifier and three-level inverter connected to each other with the same DC voltage bus are as follows:

Three Level Active Rectifier:

- AC to DC voltage conversion
- Constant DC link voltage
- Bidirectional current flow (S-PWM control method)
- Low current harmonic

- Sinusoidal voltage waveform on the generator terminals
- Unity power factor

Three Level Inverter:

- DC to AC voltage conversion
- Bidirectional current flow (NTV-SV-PWM control method)
- Low voltage harmonic
- DC link mid-point balancing
- Synchronization to utility grid

In this study, the single mathematical modeling of the wave energy to electrical energy conversion system consisting of the oscillating water column (OWC), Wells turbine, synchronous generator, rectifier and inverter has been elaborated and the results which have an important contribution to an integrated mathematical model of a complex system were achieved. The interest in the production of electrical energy from waves is increasing worldwide, and studies are still at the level of producing new approaches. For this reason, the results of this thesis study are of great importance in terms of the success of Turkey's energy policies, which has a serious wave energy potential, and its place in international platforms in this regard. In addition, this project contributes to the fulfillment of Turkey's obligations under the treaties on renewable energy.

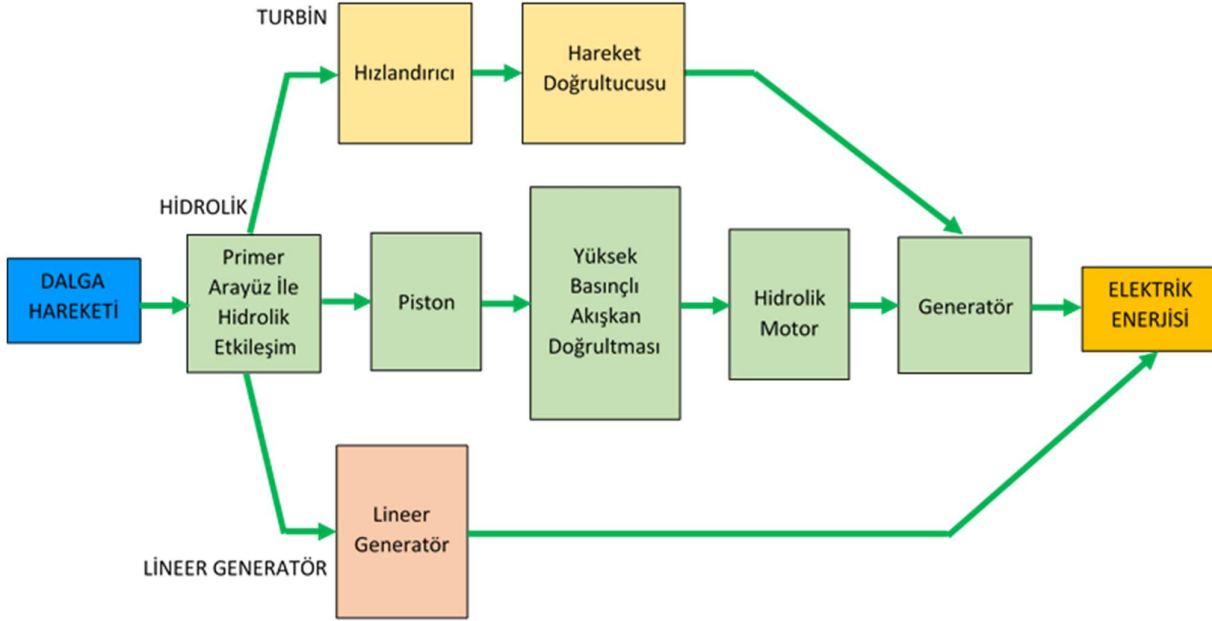


1. GİRİŞ

Ülkemizde ve dünyada en büyük problem olarak yerini alan yeni enerji kaynakları temini çalışmaları yüksek enerji potansiyeline ve yüksek verimliliğe sahip ve çevreyi kirletmeyen teknolojilere yönelmektedir. Birincil enerji kaynağı olarak halen kömür, doğal gaz ve petrol gibi fosil kökenli yakıtlar kullanılmasına rağmen, alternatif enerji kaynakları da artık bu tür kaynaklarla yarışacak kapasiteye gelmeye başlamıştır. Tüketim hızı dikkate alındığında ve gelecekte fosil yakıtların tükenebilirliği göz önünde bulundurularak alternatif enerji kaynaklarına yönelim kaçınılmaz olmaktadır.

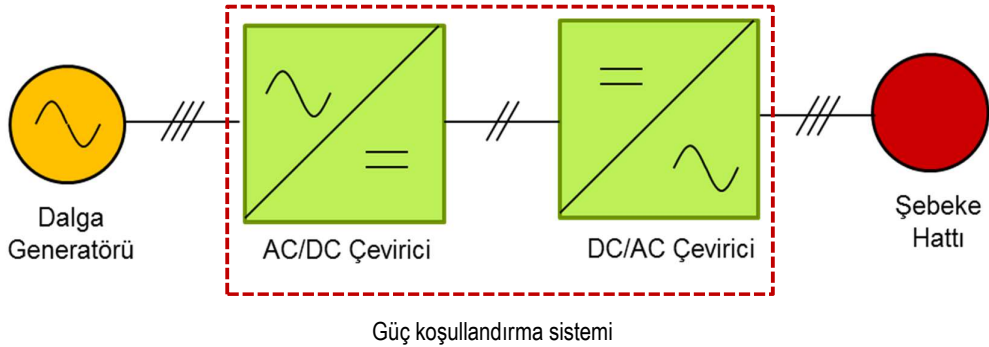
Rüzgar ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimi günümüzde çok yaygın olmasına karşın denizlerden elektrik enerjisi üretimi aynı hızda gelişmemiştir. Ancak dalga enerjisinin çok büyük bir potansiyele sahip olması, önceden kestiriminin yapılabilmesi, sürekli olması ve kendisini meydana getiren rüzgarın şiddeti kesilse dahi uzun süre oluşumuna devam etmesi nedeniyle gelecekte fosil kökenli yakıtlara en büyük alternatif olduğu bilinmektedir 0.

Yapılan araştırmalar dalga enerjisinden elektrik üretmek için aşağıdaki şekilde gösterilen üç temel yöntem olduğunu göstermiştir. Bu yöntemler arasında en yaygın olan uygulamalardan birinin salınlımlı su kolonu metodu (OWC) olduğu bilinmektedir.



Şekil 1.1 : Dalga enerjisinden elektrik enerjisi elde etme yöntemleri.

Deniz dalgaları karmaşık ve düzensiz bir yapıya sahiplerdir, dolayısıyla dalgalardan üretilen elektrik enerjisi de değişken genlik ve frekansa sahip bir yapıdadır. Bu nedenle üretilen enerjinin doğrudan dağıtım şebekesinde kullanılması mümkün değildir. Bu nedenden ötürü dalga generatörü çıkışından elde edilen enerjinin şebekeye aktarılmadan önce 0’de gösterildiği şekilde bir güç koşullandırma sistemi ile şebekede kullanılabilir hale getirilmesi gerekmektedir.

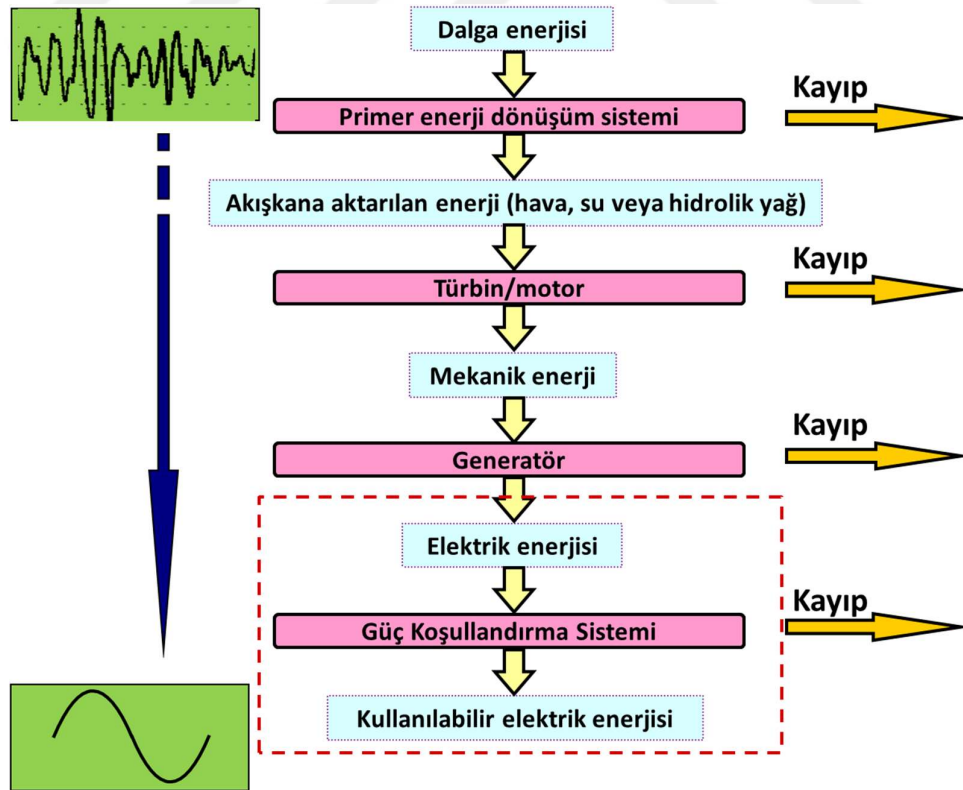


Şekil 1.2 : Dalga dönüşüm sistemi blok diyagramı.

Bu tez çalışmasının asıl konusu olan güç koşullandırma sistemi, dalga enerjisinden elde edilen gücün işlenerek, güvenli bir şekilde ve kullanılabilir kalitede dağıtım şebekesine aktaracak olan birimdir. Üretilen elektrik enerjisinin gerilim bileşenini, en az kayıp ve makul bir maliyetle dağıtım şebekesinin gerilim dalga şekline, genliğine ve frekansına eş bir hale dönüştürülmesi hedeflenmektedir.

1.1 Tezin Amacı

Dalga enerjisinden elektrik enerjisi üretimi 0'te gösterildiği üzere toplam dört aşamadan oluşur. İlk aşamada dalga enerjisi, birincil enerji dönüşüm sistemi ile akışkana aktarılır. İkinci aşamada akışkandaki enerji bir türbin yardımıyla mekanik enerjiye dönüştürülür. Üçüncü aşamada mekanik enerjiden elde edilen enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi için bir generatör kullanılır. Elde edilen bu elektrik enerjisi şebekede kullanılabilecek süreklilikte ve kalitede olmadığı için dördüncü ve son aşamada ise üretilen elektrik enerjisi bir güç koşullandırma sistemi yardımıyla şebekeye aktarılır.



Şekil 1.3 : Dalga enerjisinden elektrik enerjisi üretim diyagramı.

Bu projede öncelikli amaç dalga enerjisinden elektrik enerjisi elde etmek ve üretilen enerjinin kaliteli şekilde şebekeye aktarılması ve şebeke ile senkron çalıştırılması için bütünlük bir matematiksel model elde etmektir. Tasarlanan sistem ile dalga enerjisinden elektrik enerjisi üretimi konsundaki motivasyonun artırılması ve dalga enerjisinden elektrik enerjisi üretiminde kullanılacak olan güç elektroniği uygulamalarında yeni metodların geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Bu nedenle bu çalışmada dalga enerjisinden elektrik enerjisi elde etmede kullanılacak olan güç koşullandırma sisteminin aşağıdaki özellikleri sağlaması amaçlanmaktadır:

- Çift yönlü güç akışını sağlayabilmelidir.
- Üretilen enerjiyi kaliteli olarak şebekeye aktarmalıdır.
- Güç faktörünü birde tutmalıdır.
- Şebeke gerilim harmonik kriterlerini sağlayabilmelidir.
- Düşük THD ve düşük dV/dt özelliğine sahip olmalıdır.
- Giriş ve çıkış akımları sinusoidal olmalıdır.
- Dinamik cevabı hızlı olmalıdır.
- Maliyeti düşük olmalıdır.
- Verimi yüksek olmalıdır.
- Gerekli koruma önlemlerini içermelidir.

Tasarlanan bu sistemdeki teknolojinin günlük hayata uygulanması sayesinde uzun vadede,

- Atmosfere zehirli gazların salınımının önlenmesi,
- Enerji üretim maliyetlerinin düşürülmesi,
- Enerjinin üretildiği yerde kullanılabilmesi, dolayısıyla iletim ve dağıtım kayıplarının çok düşük seviyelere indirilmesi,
- Önceden kestiriminin yapılabilmesi sayesinde enerji dağıtım sistemlerinde kısa süreli zaman planlamasının yapılabilmesi,
- Şebekeye güvenilir ve sürekli enerji aktarımının sağlanması,
- Enerji tüketiminin fazla olduğu kış aylarında, elektrik üretiminin (kış aylarında dalgadan elektrik enerjisi üretiminin artması nedeniyle) de artırılması,
- Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla, daha küçük hacimde daha yüksek enerji üretiminin sağlanabilmesi (güneş enerjisi = 0.1kW/m^2 , rüzgar enerjisi 1kW/m^2 , dalga enerjisi 10kW/m^2) hedeflenmektedir.

1.2 Kapsam

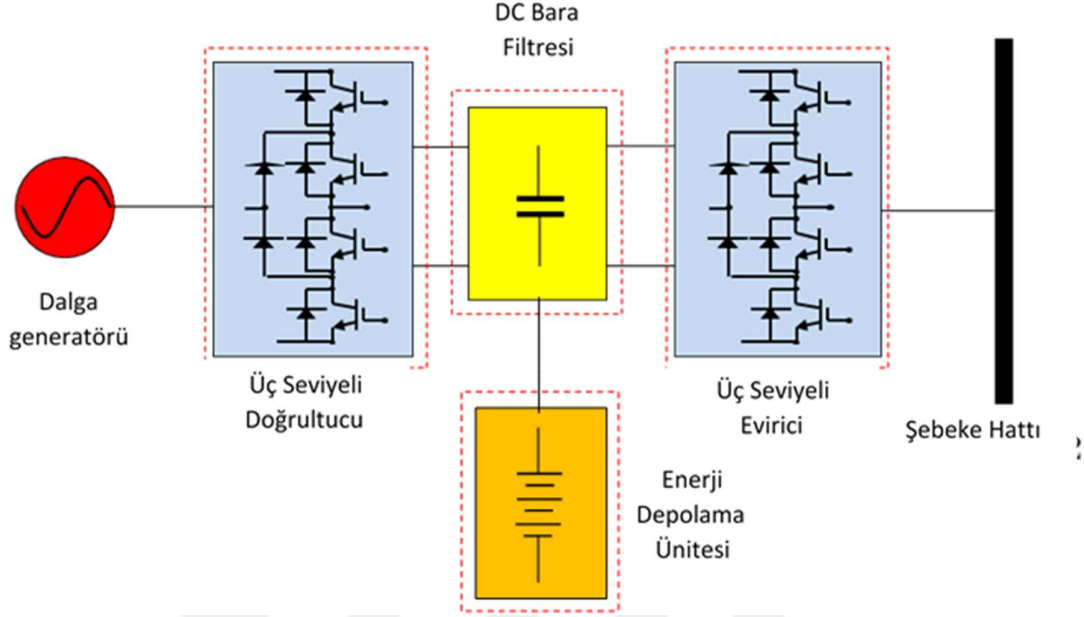
Bu tez çalışmasının kapsamı kısaca aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Denizlerdeki dalga hareketinin araştırılması, matematiksel modellenmesi ve MATLAB’de kurulması.
- Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinin araştırılması, karşılaştırılmasıyla yöntem belirlenmesi ve seçilen yöntemin matematiksel modelinin MATLAB altında kurulması.
- Dalga enerjisinden elde edilen enerjinin mekanik ve sonrasında elektrik enerjisine dönüştürülmesinde kullanılacak olan türbin/generatör tiplerinin araştırılması, uygun türbin tipinin seçilmesi ve seçilen yöntemin MATLAB altında benzetiminin kurulması.
- Türbin/generatör grubu çıkışında elde edilen alternatif gerilimin doğrultulmuş gerilime dönüştürülmesi için kullanılacak olan çok seviyeli çevirici topolojilerinin araştırılması, karşılaştırılarak seçilmesi aktif doğrultucu yapısının tasarımı ve MATLAB’deki modellenmesinin gerçekleştirilmesi.
- Doğrultulmuş gerilimin akım ve gerilim harmonikleri düşük bir alternatif gerilime dönüştürmesi için kullanılacak olan evirici topolojilerinin araştırılması, karşılaştırılarak seçilmesi ve seçilen evirici tipinin tasarımı ve MATLAB’de modellenmesi.
- Evirici çıkışının şebeke ile senkron çalışmasını sağlayacak senkronizasyon ünitesinin tasarımı ve MATLAB altında modelinin kurulması.
- Sistemin efektif şekilde kapalı çevrim çalışmasını sağlayacak kontrol yönteminin geliştirilmesi ve MATLAB altında modelinin kurulması.

1.3 Özgün Değer

0'te blok diyagramı verilen sistemin aşağıdaki özgün değerleri içermesi ön görülmektedir:

- Dalga enerjisinin matematiksel olarak modellenmesi ve ardından dalga hareketinden elde edilen enerjinin suya aktarılması için gereken hidrodinamik tasarım, sudaki enerjinin kapalı alandaki havaya aktarılması için gereken pnömatik tasarım ve hava haznesinden çıkan hava akımının türbine aktarılması için gereken aerodinamik tasarımın modellenmesi.
- Dalga enerjisinden mekanik enerji elde etmek için salınlı su kolonu (OWC) metodunun Wells türbini ile birlikte kullanılması ve türbin/generatör grubu çıkışında elde edilen alternatif gerilimin üç seviyeli aktif doğrultucu ile doğrultulması (Bölüm 3).
- Dalga enerjisi dönüşüm sisteminde kullanılan üç seviyeli aktif doğrultucunun güç faktörünü birde tutacak ve çift yönlü enerji akışını sağlayacak şekilde çalıştırılması (Bölüm 4).
- Dalga enerjisi dönüşüm sisteminde kullanılan üç seviyeli aktif doğrultucunun doğru gerilim barasının toplam değerini kontrol edecek şekilde çalıştırılması.
- Dalga enerjisi dönüşüm sistemi çıkışında aktif doğrultucu ile doğrultulan gerilimin üç seviyeli evirici yardımıyla alternatif gerilime dönüştürülmesi ve üç seviyeli eviricinin en yakın üç vektör - uzay vektör modülasyon (NTV-SV-PWM) metodu ile kontrol edilmesi (Bölüm 5).
- Üç seviyeli doğrultucu ve üç seviyeli eviricinin doğru gerilim barası orta nokta kontrolünün olası vektörlerin kombinasyonu ile elde edilen yeni bir veri arama tablosu ve anahtarlama süreleri tablosu oluşturularak gerçekleştirilmesi (Bölüm 5).
- Üç seviyeli doğrultucu ve üç seviyeli eviricinin dalga generatörü ve şebeke ile kapalı çevrim çalıştırılması.



Şekil 1.4 : Güç koşullandırma birimi blok diyagramı.

1.4 Literatür Araştırması

Deniz enerjisinden elektrik enerjisi elde etmek için tarih boyunca bilim adamları pek çok çalışmalara imza atmıştır. Bu çalışmalar genel olarak yüzey suları ile derin sular arasındaki sıcaklık farkından yararlanan sistemler, gelgit enerjisinden yararlanan sistemler, yüzey suları ile derin sular arasındaki tuzluluk farkından yararlanan sistemler ve dalga enerjisinden yararlanan sistemler olmak üzere dört ana başlık altında toplanabilir. Bu konulardaki çalışmalarla ilgili detaylı bilgi Bölüm 2. 'de ilgili konu başlıkları altında örnekleriyle birlikte verilmiştir.

Güç koşullandırma ünitelerinin topolojileri hakkında literatürde yer alan çalışmalar avantajları, dezavantajları ve çalışma şekilleriyle birlikte Bölüm 2.4'te yer almaktadır.



2. GENEL BİLGİLER

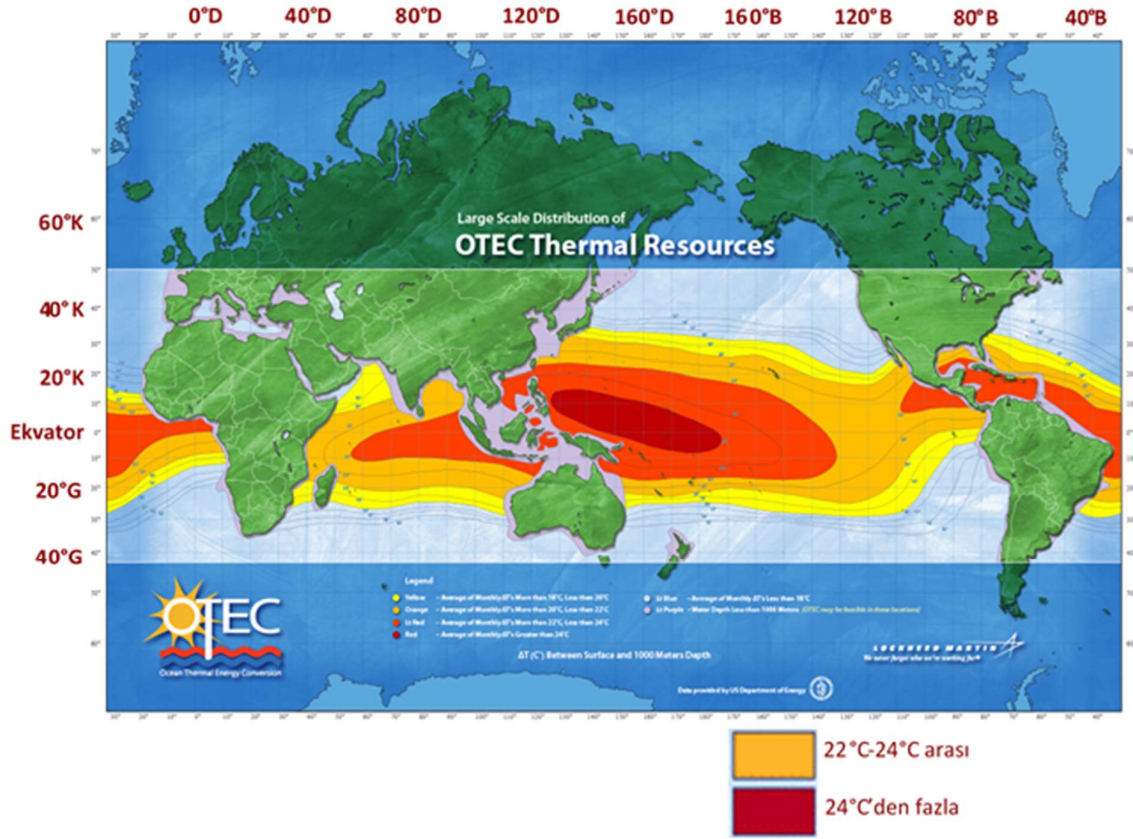
2.1 Okyanus Sularından Elektrik Enerjisi Elde Etmenin Yolları

Dünya üzerinde denizlerin karaya olan oranından yola çıkılarak güneş enerjisinden yeryüzüne gelen ışınların %70'i denizler tarafından tutulduğu bilinmektedir. Uygun yöntemler kullanıldığında iyi bir enerji kaynağı olabilen okyanuslar, enerji kaynağı olarak bilim adamlarının da dikkatini çekmiş ve uzun yıllar önce denizlerden elektrik enerjisi üretimi üzerine çeşitli çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Denizlerdeki enerjinin küçük bir kısmı bile dünyadaki enerji ihtiyacının tamamını karşılayabilecek durumdadır. Denizlerden elektrik enerjisi üretimine yönelik yapılan çalışmalar birkaç başlık altında aşağıdaki şekilde toplanabilmektedir:

- Yüzey suları ile derin sular arasındaki sıcaklık farkından yararlanan teknolojiler
- Gelgit enerjisinden yararlanan sistemler
- Yüzey suları ile derin sular arasındaki tuzluluk farkından yararlanan sistemler
- Dalga enerjisinden yararlanan sistemler

2.1.1 Yüzey suları ile derin sular arasındaki sıcaklık farkından yararlanan teknolojiler

Şekil 2.1'de de gösterildiği üzere yeryüzünde sürekli olarak kutuplardan ekvatora doğru soğuk su akışı olur. Derinden akan bu soğuk sular ile yüzeydeki sıcak sular arasında yaklaşık 28°C sıcaklık farkı oluşur. Oluşan bu sıcaklık farkından elektrik enerjisi üretimi fikri ilk olarak 1881 yılında Fransız fizikçi Jacques Arsène D'Arsonval tarafından gündeme gelmiştir. Ancak D'Arsonval'ın ölümü üzerine taslağın tamamlanması ve Küba'da 22kW'lık ilk prototipin kurulması D'Arsonval'ın öğrencisi Georges Claude tarafından 1930 yılında bulunmuştur. 1935 yılında Claude ikinci türbini Brezilya açıklarında kurmuştur. Ancak her iki türbin de kendini ispatlayamadan hava koşulları ve dalgalar nedeniyle parçalanmıştır [1].



Şekil 2.1 : Deniz sularındaki sıcaklık dağılımı [3].

Diğer bir 3MW'lık OTEC 1956 yılında Fransız araştırmacılar tarafından Fildişi Sahillerinde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Fakat sistem çok pahalı olması ve 1950'li yıllarda petrolün de ucuzlamasıyla tamamlanıp kullanıma alınamamıştır [4].

J. Hilbert Anderson ve James H. Anderson, Jr. Claude'un tasarımı üzerine çalışarak, 1967 yılında geliştirdikleri kapalı çevrim modele patent almışlardır. 1974 yılında Natural Energy Laboratory'nin bu işe dahil olması laboratuvarın OTEC için dünyadaki en büyük test kurumu olmasını sağlamıştır.

Diğer yandan, Japonya OTEC potansiyeli olmamasına karşın diğer ülkelere ihraç etmek için bu konuda önemli ölçüde teknolojik çalışmaları mevcuttur. 1970'lerin başında TEPCO (Tokyo Electric Power Services Company) Nauru adasında kullanılmak üzere 100kW'lık kapalı çevrim OTEC üretmiştir. 1981'de kullanıma açılan türbin ürettiği 120kW'lık enerjinin 90kW'ını kendini beslemek için tüketmekteydi [4].

Her ne kadar sistemin teorik verimi çok düşük (%2-3 civarında) olsa da denizlerde 107MW kadar termal enerji potansiyeli olduğu düşünülmektedir [5].

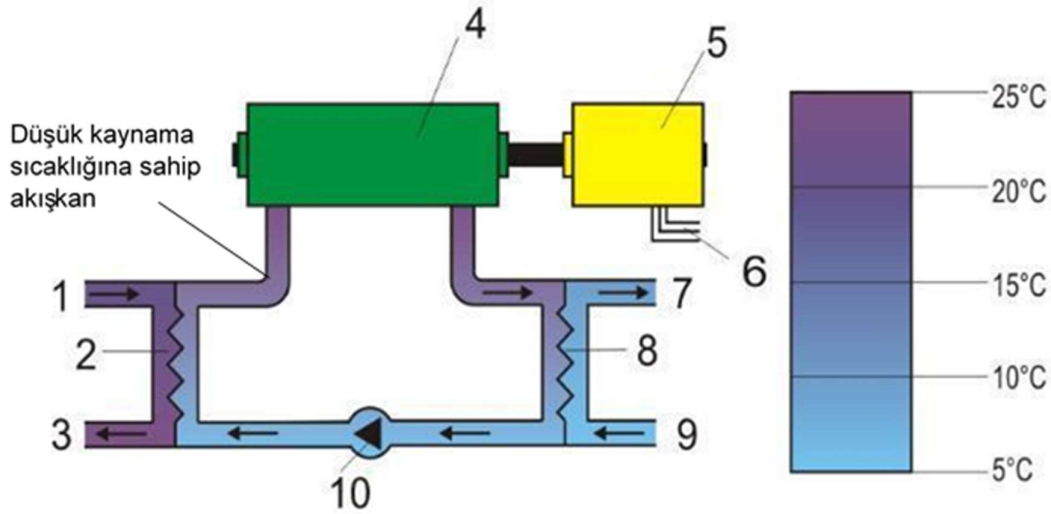
2.1.1.1 Kapalı çevrim santraller (CC-OTEC)

Şekil 2.2’de çalışma şekli gösterilen bu sistemde, türbini çalıştırmak için amonyak gibi düşük kaynama sıcaklığına sahip akışkanlar kullanılır. Yüzeydeki sıcak sular ısı eşanjörü yardımıyla pompalanır ve sıcak suyla karşılaşan akışkan buharlaşmaya başlar. Genleşen buhar basıncı buhar türbinini harekete geçirir. Dipteki soğuk suyun ikinci bir eşanjör ile pompalanmasıyla genleşen su yeniden yoğunlaştırılır. Bu işlem türbini döndürecek şekilde döngüsel olarak devam eder [5].

1979 yılında Natural Energy Laboratory ve çok sayıdaki özel kuruluşun bir araya gelmesiyle ilk kapalı çevrim OTEC sistemi elektrik üretimine başlamıştır. Su giriş çıkış boruları Havai sahillerinin 2.4km açıklarına demirlenen OTEC türbini, bir geminin aydınlatmasını, bilgisayarlarını ve televizyonlarını besleyecek kadar elektrik enerjisi üretebilecek kapasitedeydi. Bu sistemin verimi %3 gibi çok küçük bir değerde kalmıştır.

Natural Energy Laboratory, 1999 yılında ise 250kW gücünde bir kapalı çevrim pilot OTEC test etmiştir. 250kW, bu yöntem için şu ana kadar çalıştırılan en büyük güç değeridir [7].

uygulanabilir olmasına karşın bazı kısıtlamaları nedeniyle pratik olmayan bu yöntemde en önemli sorunlardan biri 300-400 metrelik 2,5m çaplı borulara ihtiyaç duyulmasıdır. Bu durum sistemin konstrüksiyonunu zahmetli ve pahalı bir hale getirmektedir. Diğer yandan yüzey ve derin sular arasında sıcaklık farkını en az 20-C’de tutmak için yüzlerce metre derinden su almak gerekir. Bununla birlikte döngü borularındaki sıvının debisinin saniyede 48 metreküp olması gerekir. Isı eşanjöründe kullanılan metalin türü kapalı çevrim çalışan sistemin verimi açısından çok önemlidir. Ancak türbininin maliyeti de önemli ölçüde bu metalin türüne bağlıdır [7].



- | | |
|--|-------------------------|
| 1. Yüzey suları, sıcak su girişi ~25°C | 6. Elektrik hattı |
| 2. Isı eşanjörü (buharlaştırıcı) | 7. Atık su ~7°C |
| 3. Atık su ~23°C | 8. Yoğunlaştırıcı |
| 4. Türbin | 9. Derin su girişi ~5°C |
| 5. Generatör | 10. Çevrim pompası |

Şekil 2.2 : Kapalı çevrim OTEC modeli [8].

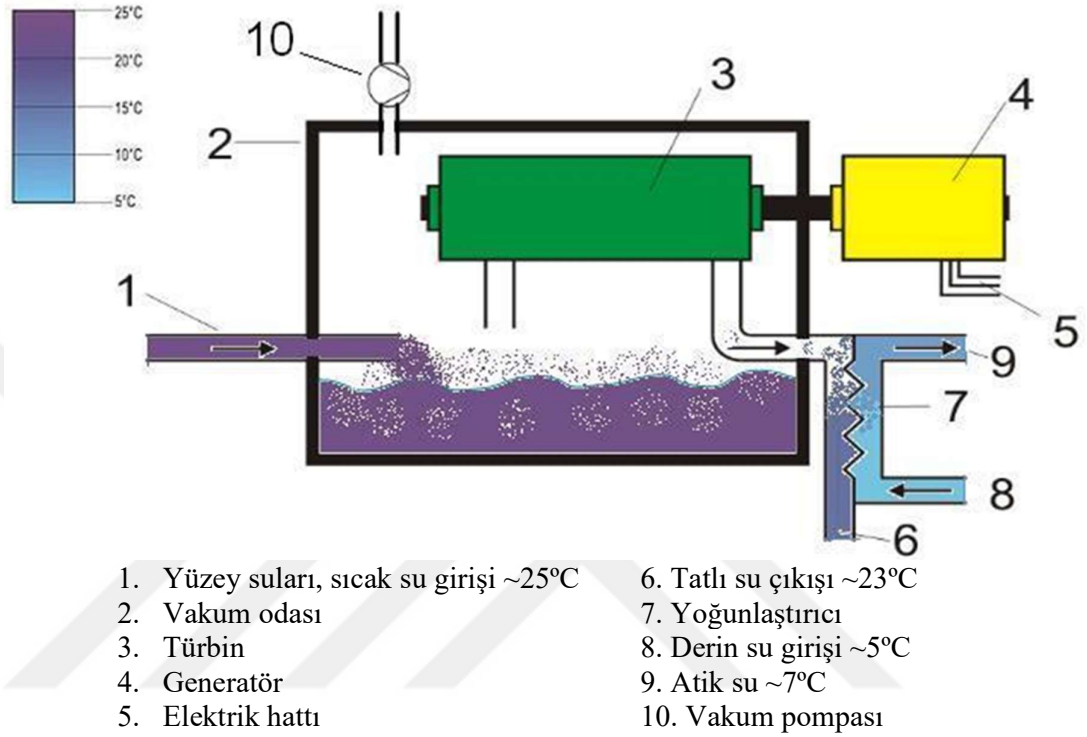
Hindistan'daki National Institute of Ocean Technology (NIOT) ve Japonya'daki Saga üniversitesi 1MW'lık kapalı çevrim OTEC üzerine çalışmalar yürütmektedir. Yapım aşamasında bazı parçaların zarar görmesi ve tamamen parçalanıp denizde kaybolması gibi bir takım sorunlar yaşansa da 2006 yılı başında sistem Tuticorin limanına kurulmayı başarmıştır [9].

2.1.1.2 Açık çevrim santraller (OC-OTEC)

Bu sistemlerde, kapalı çevrim sistemlerinde kullanılan özel bir akışkan yerine su kullanılır ve sistem elektrik üretimi için sıcak yüzey sularını kullanır. Deniz suyunun kaynama sıcaklığı yüksek olduğu için dış basınç düşürülerek düşük sıcaklıklarda kaynama sağlanır. Aynı şekilde yoğunlaştırma işleminde de basınç değiştirilir. Suyun hal değişimlerinde her 1MW için 1500 metreküp su buharlaştırılır. Şekil 2.3'te de gösterildiği gibi açık çevrim santrallerin çıkışında tatlı su elde edilir.

Fransa'daki Denizden Yararlanma Araştırmaları Enstitüsü (IFREMER) 5MW gücündeki bir santrali Tahiti'de açmayı denemiştir. Ama bu ülkenin tatlı suya ihtiyaç duymaması ve yürütülen araştırmanın maliyetinin çok yüksek olması çalışmanın tamamlanamadan yarıda kalmasına neden olmuştur. Ulusal Enerji Laboratuvarı (NEL) 1984'te açık çevrim OTEC santraller için yeni bir pilot uygulama başlatmış ve bu

çalışma sayesinde açık çevrim OTEC santrallerin verimi ciddi oranda yükselmiştir. 1992'den 1998'e kadar çalışan 210kW'lık sistem bilinen en büyük açık çevrim OTEC santralidir [5].



Şekil 2.3 : Açık çevrim OTEC modeli [8].

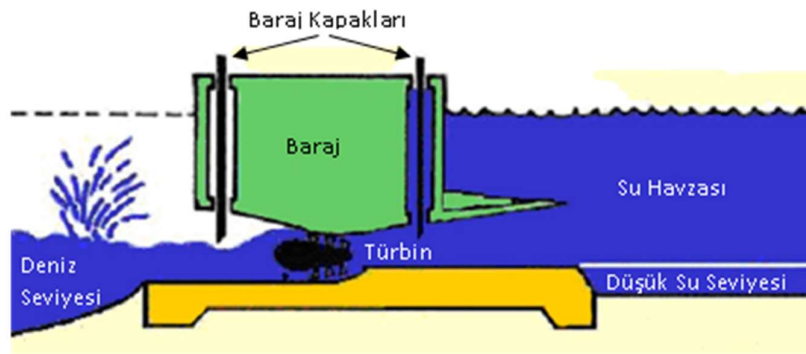
2.1.2 Gelgit enerjisinden yararlanan sistemler

Okyanus enerjisinin bir başka formu da gelgit enerjisidir. Bu sistemler temel olarak gelgit nedeniyle yer değiştiren su kütlelerinin sahip olduğu kinetik veya potansiyel enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülme prensibine dayalı olarak çalışırlar. 11. yüzyıldan bu yana farklı şekillerde kullanılan gelgit enerjisi ilk başlarda su değirmenlerini döndürmek için kullanılmıştır.

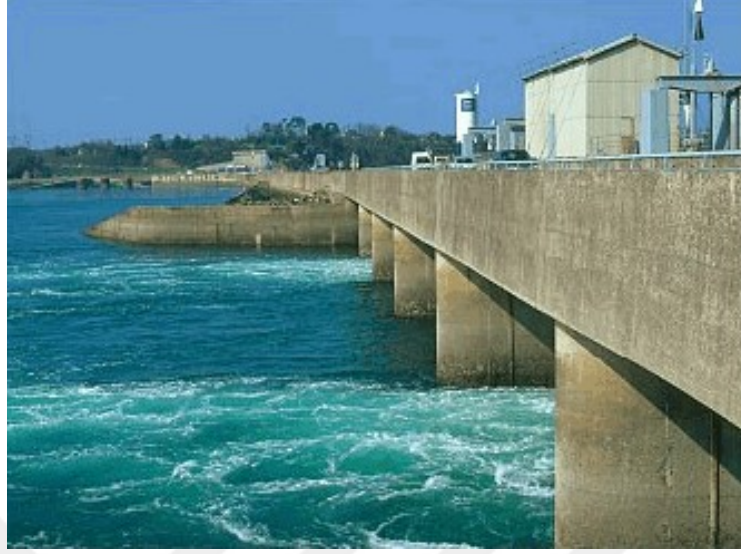
Potansiyel veya kinetik enerjisinin %80'i elektrik enerjisine dönüştürülebilen gelgit enerjisi, rüzgar ve güneş gibi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre çok daha yüksek verime sahiptir. Diğer yandan, 24,8 saatte bir tekrarlanan gelgit hareketleri, önceden güvenilir bir şekilde öngörülebildiği için yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde bu özelliği sayesinde bir adım daha öne çıkmaktadır.

Gelgit esnasında suyun potansiyel enerjisinden faydalanan baraj yöntemi ve gelgit nedeniyle denizde meydana gelen akıntılardan faydalanan akıntı yöntemi olmak üzere gelgitleri elektrik enerjisinde kullanmanın iki temel yolu mevcuttur [10].

Şekil 2.4’te gösterilen baraj yöntemi gelgit enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Gelgit enerjisi için uygun bir koy belirlenerek, koyun ağzı bir barajla kapatılır. Gelgitle birlikte su seviyesi yükseldiğinde, baraj kapakları açılarak gelen su barajda tutulur, su çekildiğinde ise yükseklik farkından yararlanılarak türbinler aracılığıyla elektrik enerjisi üretilir. Elektriğin üretimi denizdeki su seviyesi düştüğünde, santralin normal bir hidroelektrik santral gibi çalışarak suyu dışarıya atmasıyla sağlanır.



Bu prensibe dayanarak elektrik üreten Fransa'daki La Rance santrali (bkz. Şekil 2.5). 1966'dan bu yana elektrik üretmektedir. 240MW'lık enerji üreten santral, normal bir nükleer enerji santralinin veya bir kömür santralinin yaklaşık beşte biri kadar enerji üretim kapasitesine sahiptir [11], [12].



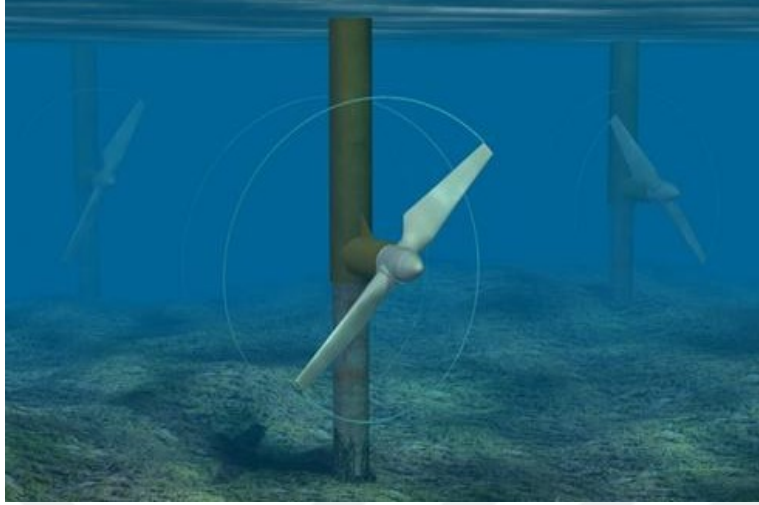
Şekil 2.5 : La Rance santralinden bir görüntü [12].

2.1.2.2 Akıntı enerjisi yöntemi

Gelgitler denizlerde, özellikle de sığ alanlarda çok büyük akıntıların oluşmasına neden olur. Denizlerdeki bu akıntılara ait kinetik enerjinin, deniz tabanına yerleştirilen türbinler aracılığı ile elektrik enerjisine dönüştürülmesi denizlerden elektrik enerjisi elde edilmesinin bir başka yöntemidir.

Gelgit akıntılarını elektrik enerjisine dönüştürme prensibine dayanan sistemler, kıyıdaki sığ sularda kurulur. Akıntılar için kullanılan türbinler rüzgar enerjisinde kullanılan türbinlerin çalışma prensibine oldukça benzemektedir. Bu nedenle rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimi üzerine elde edilen tecrübeler akıntı enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesi çalışmalarında da kullanılmaktadır [13].

Deniz suyu havaya göre 800 kat daha büyük yoğunluğa sahip olduğu ve çok daha yavaş hareket ettiği için denizde kullanılan türbinler, rüzgar enerjisi için kullanılan türbinlere göre daha yüksek momentte çalışır ve daha büyük kuvvete dayanmaları gerekir. Bu da denizdeki türbinin rüzgar türbinlerine göre çok daha küçük kanat çaplı üretilmeleri anlamına gelir. Büyük kanat çaplı türbinlerin aynı anda hem enerji üretip, hem de gelen dalganın gücüne dayanmaları yapısal olarak çok zordur. Gelgit enerjisi ile çalışan bir türbinin kanat yapısı Şekil 2.6’da gösterilmektedir.



Şekil 2.6 : Denizdeki akıntılardan elektrik enerjisi üreten türbinlere ait bir gösterilim [13].

Bu teknoloji, diğer yenilebilir enerji teknolojilerine göre çok daha güvenilir ve öngörülebilir olmasına karşın halen emekleme aşamasındadır. Çevresel ve ekolojik koşullar düşünüldüğünde gelgitlerden kaynaklanan akıntılardan elde edilen enerjinin, gelgitler için kullanılan baraj yöntemine göre daha avantajlı bir yöntem olduğu görülmektedir. Bu teknoloji açık denizde çalışan rüzgar türbinleri ve gelgit enerjisi için kullanılan baraj türbinlerinden daha az tehlike içeren bir yöntemdir. Ancak türbinlerin kurulumunun karmaşıklığı ve zorluğu bu yöntem için önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır .



Şekil 2.7 : Akıntı türbini tarlası [13].



Şekil 2.8 : 2007 yılında New York'daki bir türbinin kurulumuna ait bir görüntü [13].

2.1.3 Yüzey suları ile derin sular arasındaki tuzluluk farkından yararlanan sistemler

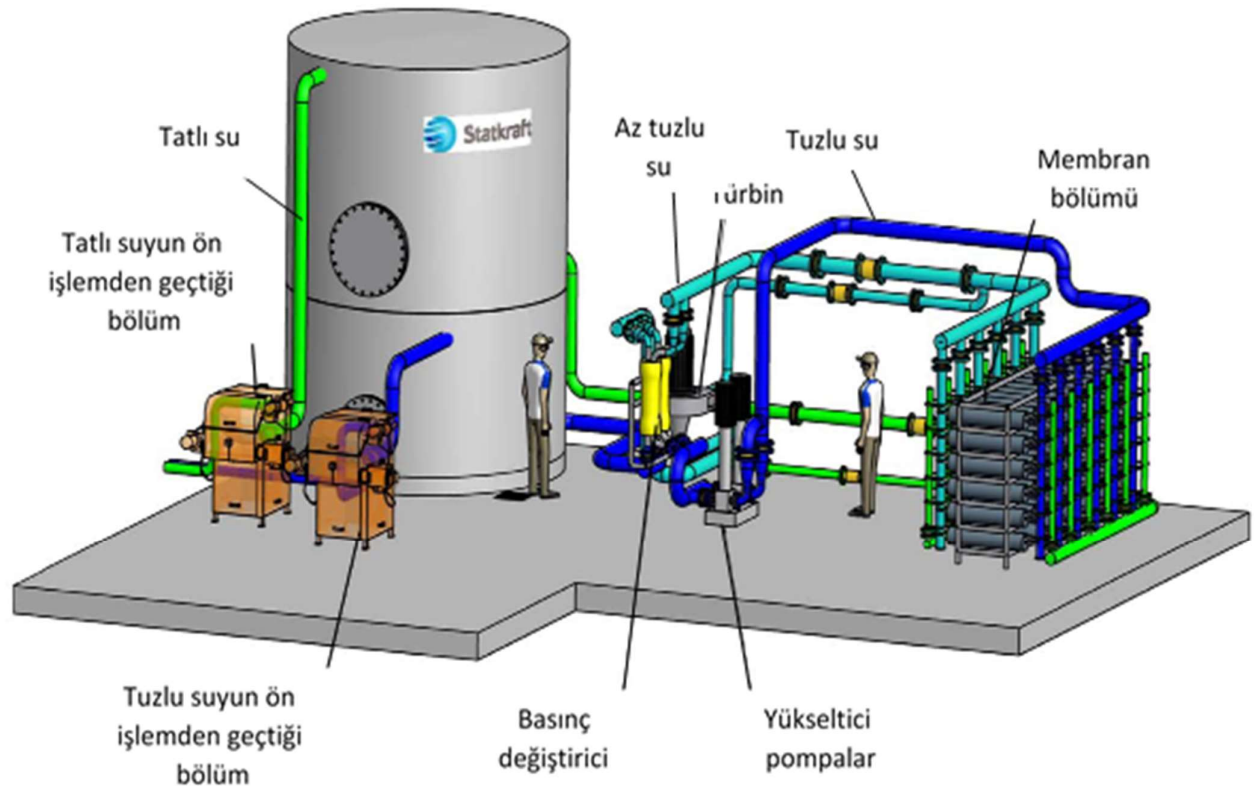
Tuzluluk farkına göre enerji üreten sistemler, okyanus enerjisinden elektrik enerjisi üreten diğer sistemler içerisinde üzerinde en az çalışılmış olanıdır. Ancak araştırmalar yeryüzündeki deniz suları ve tatlı sular kullanılarak tuzluluk farkına göre enerji üretilmesi durumunda 2.6TW'lık bir enerji meydana geleceğini öngörmektedir [7].

Tuzluluk farkından faydalanarak çalışan sistemler temel olarak tatlı su ile deniz suyu arasındaki osmotik basınç farkına dayanarak çalışmaktadır. Osmotik basınç derişik ve seyreltik tuz çözeltilerinin kimyasal potansiyelidir. Yüksek tuz konsantrasyonuna sahip tuz çözeltisi daha yüksek osmotik basınca sahiptir. Tuzluluk farkına göre enerji üreten sistemler, tuzla suyu birbirinden ayırmak için buharlaşma prensibinden yararlanırlar.

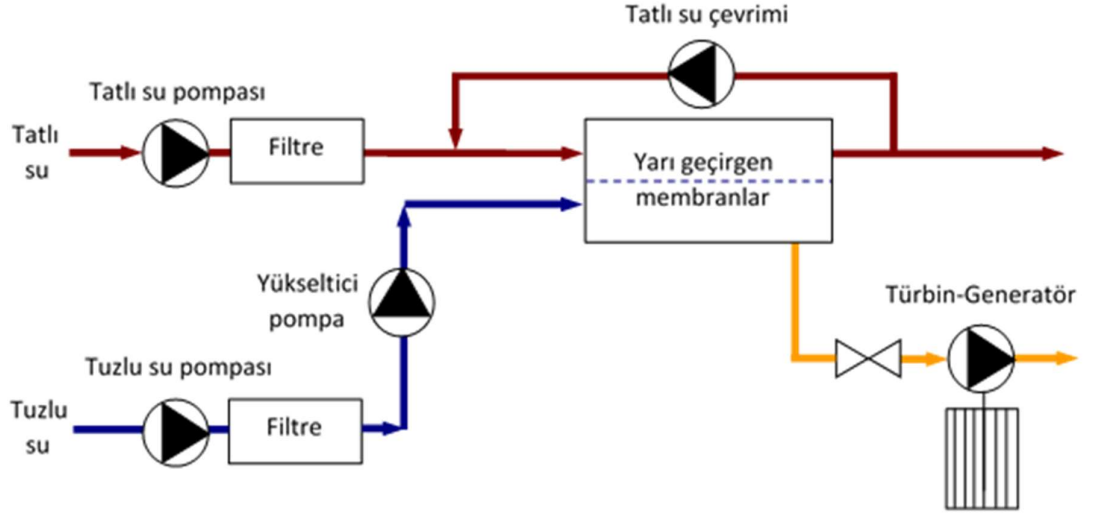
Osmotik basınca göre güç üretilebileceğine dair ilk çalışmalar 1970'li yıllarda Sidney Loeb'in deniz suyunu tuzdan arındırmak için membran teknolojisini geliştirmesiyle başlamıştır. Daha sonra Torleif Holt ve Thor Thorsen 1980'li yıllar boyunca osmotik güç potansiyeli üzerine teorik çalışmalar yapmışlar, ancak 1995 yılına kadar bir fizibilite projesi için finans bulmayı başaramamışlardır [14], [15].

Thorsen'in bu konu üzerine yazdığı ve halen pek çok araştırma çalışmasına referans olan bir rapor üzerine, Statkraft firması Holt ve Thorsen ile iletişim kurarak 1997 yılında ortak bir çalışma yapmaya başlamışlardır. 2001 yılında Avrupa Birliğinin osmotik güç konusundaki araştırma çalışmalarına fon ayırması üzerine bu konudaki çalışmalar da hızlanmıştır. 2008 yılında tuzluluk farkına göre enerji üreten ilk santral Statkraft tarafından Oslo'nun güney batısında kurulmuştur. Santrale ait gösterilim Şekil 2.9'da yer almaktadır [16], [17].

Osmotik basınca göre enerji üreten bir prosesin temel yapısı Şekil 2.10'da görülmektedir. Proseste tuzlu su ve tatlı su pompalar yardımıyla yarı geçirgen membranlarla ayrılmış bir ünitenin içerisine pompalanır. Ünitenin içerisindeki tuzlu suyun olduğu bölümde osmotik basınç %60 ile %85 arasında değişir. Membranın diğer tarafındaki tatlı su ise tuzlu suyu seyrelterek akış hızını artırır. Seyrelmiş tuzlu su ve tatlı su içerisinde çözünmüş tuz, membranlar üzerindeki konsantrasyon değerini düşürür. Bu işleme konsantrasyon polarizasyonu denir [18].



Şekil 2.9 : Osmotik güç üretim santralini prototipi [16].

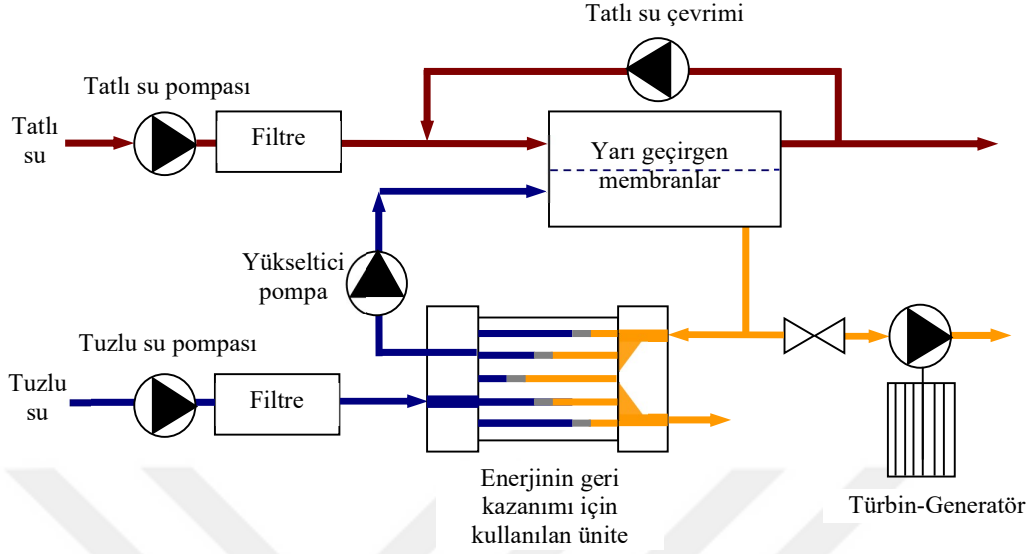


Şekil 2.10 : Temel osmotik güç prosesi yapısı [19].

Membranın her iki yanında konsantrasyon polarizasyonunu minimize etmek ve türbini çalıştıracak osmotik basıncı arttırmak için yeterli akışın sağlanması veya suyun düzenli olarak karıştırılması gerekir. Üretilen net enerji, türbinin ürettiği enerjiden pompaların harcadığı enerji çıkarıldıktan sonra kalan enerjidir. Pompalardan birinin türbin şaftına monte edilmesi sistemin kayıplarını bir miktar azaltır.

Önemli güç tüketimine neden olan yükseltici pompa tarafından tüketilen enerjiyi azaltmanın bir yolu Şekil 2.11’de görüldüğü gibi devreye bir enerji geri kazanım ünitesi eklemektir. Geri kazanım ünitesi, yüksek basınç çevrimindeki basıncın bir kısmını kullanarak tuzlu suyu tatlı su ile seyrelterek potansiyel net osmotik gücü artırır. Tuzlu su, geri kazanım ünitesine düşük basınçla gelir. Membranlardan çıkan az tuzlu suyun bir kısmı da geri kazanım ünitesine gelir ve geri kazanım ünitesi seyreltik tuzlu suyun basıncını tuzlu suya transfer eder.

Öte yandan geri kazanım ünitesi sistemin performansını arttırmak için hidrolik sistemin kontrolünü de kolaylaştırır. Seyreltik tuzlu suyun %0.5 gibi çok küçük bir miktarı geri kazanım ünitesinde kaybolur. Bu nedenle, türbin hızı neredeyse giren suyun hızına eşit olur. Bu yöntem sistemin basınç, tuzlu suyun akış debisi veya seyreltme oranından bağımsız çalışmasını sağlar.



Şekil 2.11 : Yüksek verimle çalışan kapalı çevrim osmotik güç prosesi yapısı [19].

2.1.4 Dalga enerjisinden yararlanan sistemler

İnsanoğlu dalga enerjisine karşı her zaman büyük bir ilgi duymasına karşın dalga enerjisinden faydalanma yolundaki ilk patent 1799 yılında Paris'te yaşayan Girard'lar (baba-oğul) tarafından alınmıştır. Bu patenti, daha sonra Japonya, Kuzey Amerika, Batı Avrupa gibi pek çok bölgeden yüzlerce patent izlemiştir.

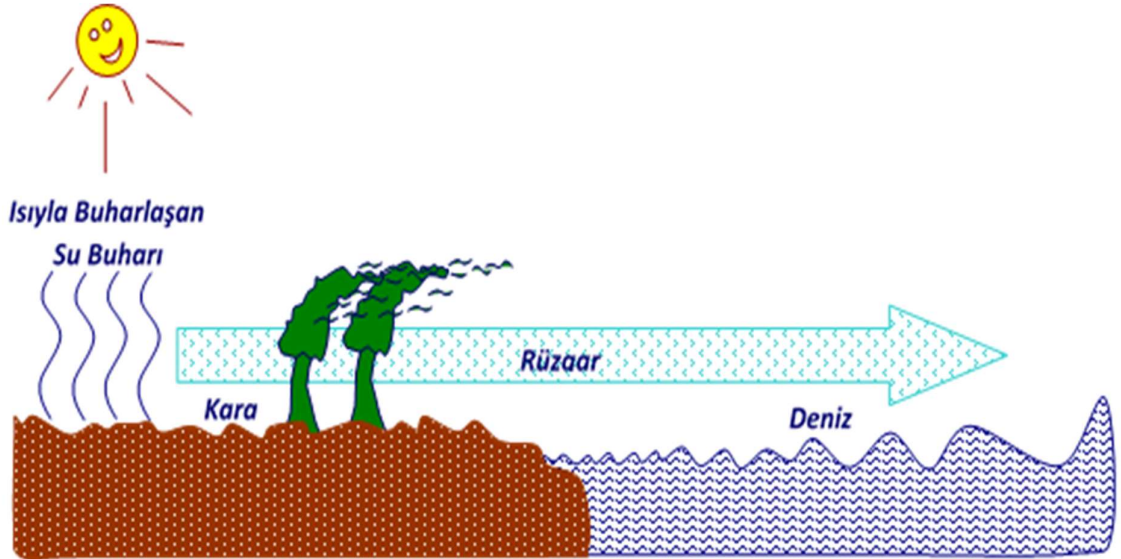
19yy.'da dalganın salınım hareketi makinelerin mekanik hareketine dönüştürülmüştür. 1945 yılından bu yana modern dalga enerjisinin en önemli ismi olan Japon Yoshio Masuda, 1947 yılından itibaren deniz üzerinde çok farklı tiplerde dalga enerjisine dair ürünler denemiştir. Günümüzde sıklıkla kullanılan denizdeki navigasyon sistemlerinin dalga enerjisinden beslenmesi, fikir olarak çok eski olmasına rağmen ancak 1965'ten sonra Masuda'nın testleri referans alınarak gerçekleştirilmiştir [20], [20].

1973 yılında petrol krizinin gündeme gelmesiyle, özellikle petrol kaynakları sınırlı olan Avrupa'da, dalga enerjisi yeniden gündeme gelmiş ve bu alandaki çalışmalar ve yatırımlar hızla artmıştır. 1970'li yıllarda OWC (Oscillating Water Column – Salınımlı Su Kolonu) türbin yapısı çok popüler hale gelmiştir. 1983 yılından sonra Japonya, Norveç, Çin, Hindistan, İngiltere, Amerika, İsveç ve Danimarka'da pek çok dalga enerjisi için prototip sistem kurulmuştur [22].

Ancak sonraki yıllarda güneş ve rüzgar enerjisi konusundaki çalışmalar önemli ölçüde gelişme kaydederken dalga enerjisi popüleritesini bir miktar kaybetmiştir.

1990'lı yıllarda küresel ısınmanın gündeme oturması ile kullanım esnasında fosil yakıtlar gerektirmeyen ve dolayısıyla zehirli gazlar açığa çıkarmayan dalga enerjisinden de yararlanma fikri tekrar canlılık kazanmıştır. Kendisini meydana getiren rüzgar kesilse dahi dalga oluşumunun saatlerce hatta günlerce devam etmesi ve rüzgar ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla çok önceden tahmin edilebilmesi gibi özellikleri nedeniyle son yıllarda bu konuda yoğun bir uluslararası çaba ortaya çıkmıştır. Ancak konunun karmaşıklığı, üretiminin pahalı olması, dalgaya bağlı olarak üretilen enerji değerinin değişken olması gibi dezavantajları ve üzerinde yeterince çalışılmamış olması nedeniyle rüzgar ve güneş enerjileri belirli bir ticari boyuta ulaşırken, dalga enerjisi çalışmaları akademik veya prototip ürün boyutunu ciddi şekilde aşamamıştır.

Şekil 2.12'de gösterildiği gibi okyanus dalgaları güneş ışınlarından gelen enerjinin rüzgara, oradan da suya aktarılmasıyla meydana gelir. Güneş enerjisi rüzgar enerjisini oluşturur, rüzgar da okyanusun üzerinde eserek enerjisini dalgaya aktarır. Dalga enerjisi binlerce kilometreyi çok az bir kayıpla katedebilir. Daha da önemlisi dalga enerjisi varışından günlerce önce tahmin edilebilen düzenli bir enerji kaynağıdır. Dalga enerjisinin çok önceden tahmin edilebilmesi, dalga enerjisinden elektrik enerjisi üretimini, rüzgar ve güneş enerjisine göre çok daha avantajlı hale getirmektedir [10].

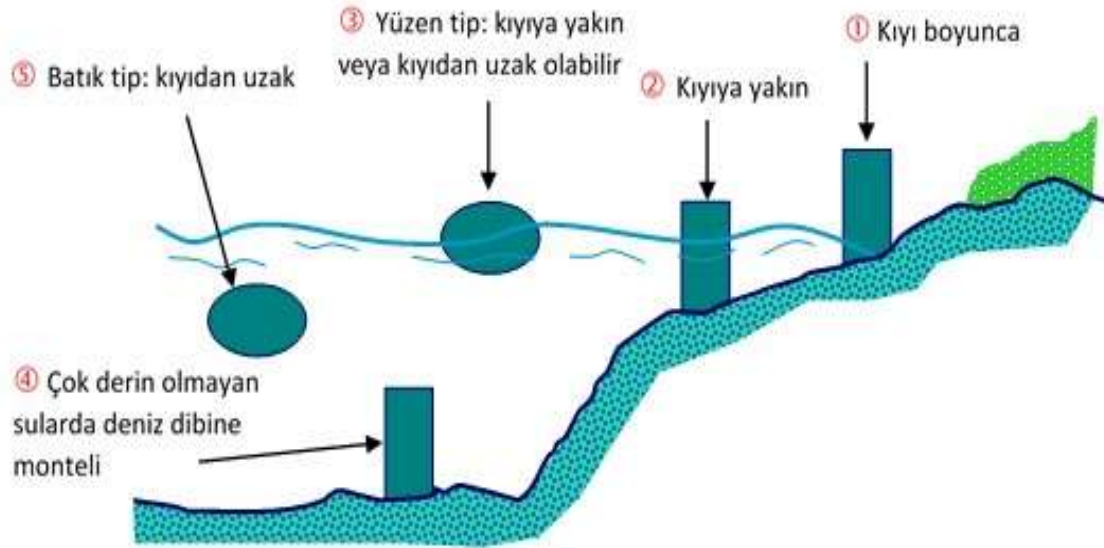


Şekil 2.12 : Dalgaların oluşumu.

Dalga enerjisi özel enerji dönüşüm sistemleri kullanılarak önce mekanik enerjiye, sonra da elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Aktif sistemler olarak nitelendirilen bu sistemlerde türbinin bir veya birden fazla elemanı dalga kuvvetiyle hareket eder ve mekanik enerji üretilir. Pasif sistemler ise çok fazla dalganın bulunduğu sahillerde dalganın itiş gücünün önce hidrolik yükseltiye çevrilmesi ve bir havuzda toplanan suyun yükselerek potansiyel enerji kazanması prensibi ile tanımlanır.

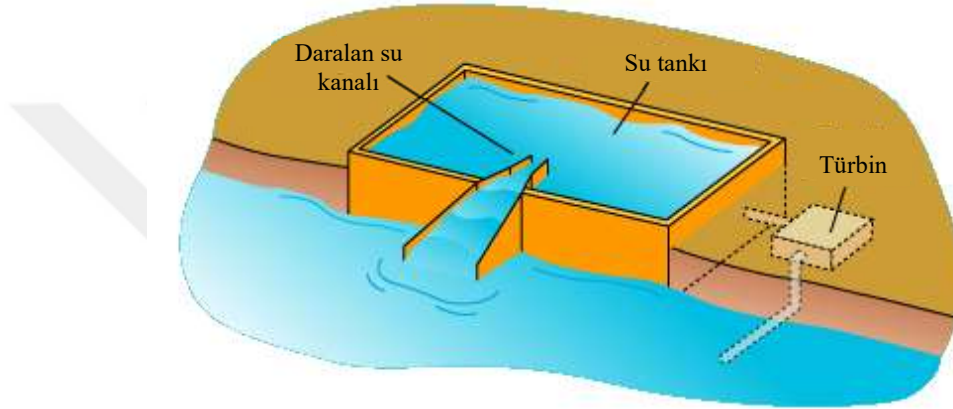
Literatürde dalga enerjisinden elektrik enerjisi üretimi için önerilmiş yüzlerce teklif bulunmasına karşın, dönüşüm sistemleri bir takım özellikleri dikkate alındığında Şekil 2.13'te gösterildiği gibi birkaç başlık altında gruplandırılabilir. Dönüşüm sistemleri aşağıda gösterildiği üzere üç ana başlık altında toplanabilir:

1. Kıyı boyunca kullanılan uygulamalar
2. Kıyıya yakın bölgelerde kurulan uygulamalar
3. Kıyıdan uzak bölgelerde kullanılan uygulamalar



Şekil 2.13 : Dönüşüm sistemlerinin bulundukları yere göre sınıflandırılması.

Dalga kanalın geniş ucundan dar ucuna doğru hareket eder ve sahip olduğu kinetik enerjinin bir kısmını potansiyel enerjiye dönüştürür. Yükselen su kanalın dar ucuna doğru hareket edemeyeceğinden kanalın diğer ucundaki su tankına doğru hareket eder. Deniz seviyesine göre yüksek potansiyel enerjiye sahip olan tanktaki su, boru içerisinde yer alan ve tek yönde hareket edebilen türbini döndürerek denize doğru akar. Şekil 2.15'te gösterildiği gibi türbin ucuna generatör bağlandığında mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüşümü sağlanmış olur [24].



Şekil 2.15 : Tapchan modelinin genel yapısı [24].

İlk Tapchan dönüşüm sistemi örneği 1985 yılında Bergen (Norveç) yakınlarındaki Tofteshallen'de kurulmuştur (Bakınız Şekil 2.16). Daralarak giden kanal nedeniyle bu yapıda su tankı, deniz seviyesinden 3 metre yüksekte kurulmuştur. Deniz seviyesinin 6-7 metre derinliğinden 60 metre genişliğinde başlayan kanal, deniz seviyesinin 3 metre yukarısına geldiğinde 20 santimetreye kadar daralır. Su tankında depolanan su generatör üzerinden şebekeye bağlı olan düşük basınçlı konvansiyonel bir su türbini üzerinden denize geri akar [25].



Şekil 2.16 : Tofteshallen'deki sistemin su girişi [25].

Norwave firmasının kurduğu ve işlettiği Tofteshallen'deki 350 kW'lık güç kapasitesine sahip Tapchan modeli, denizdeki farklı frekans ve genlikteki dalgalardan gelen enerjiyi absorblama kapasitesine sahiptir. Elektrik enerjisine dönüştürülen dalgaların %42 – 43'ünün genliği 55 metreyi bulmaktadır. İşletme 1985 yılından itibaren 6 yıl boyunca kesintisiz şekilde çalışmıştır, ancak 1991 yılında su kanalının yapısını iyileştirme çalışmalarında kaza sonucu ciddi hasar almış ve finans sorunu nedeniyle tekrar onarılamamıştır.

Tofteshallen'den (Bakınız Şekil 2.17) elde edilen deneyimlerle Tapchan yapısının bir benzeri Norwave ve Indonor firmalarının ortak projesiyle 1998'de Endonezya'da kurulmaya başlanmıştır. Cava adasının güney sahilinde yer alan türbinin gücü 1.1MW'tır. Suyun 7 metre derinliğinden başlayan ve 7 metre genişliğinde olan kanal 60m sonunda 25cm'ye düşmektedir. 7500m² alanındaki su havzası deniz seviyesinden 4 metre yüksekliktedir [26].

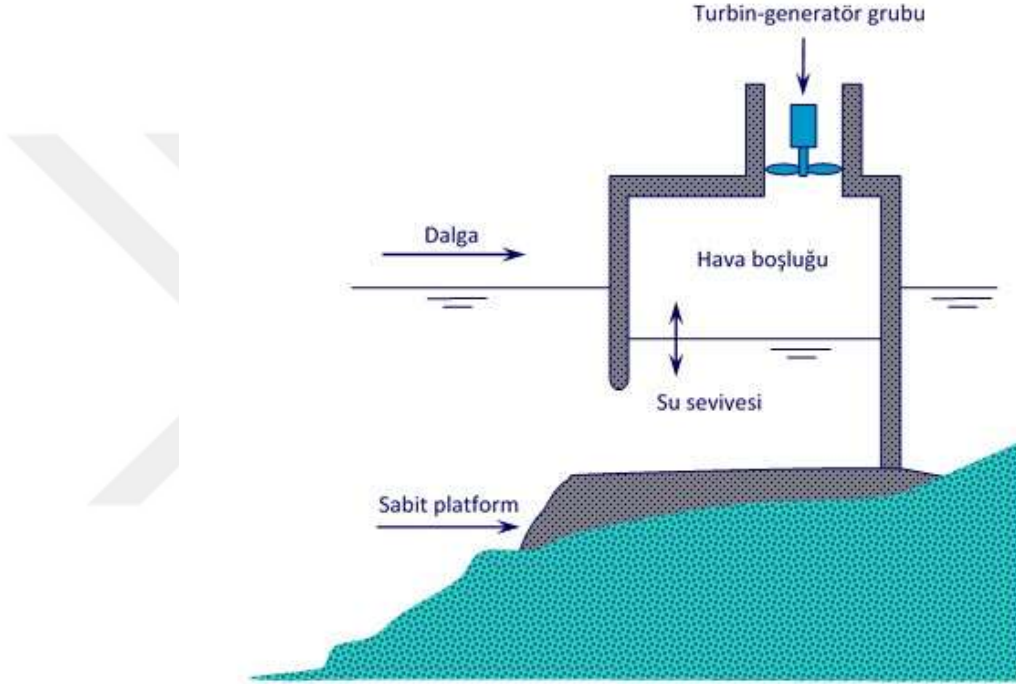


Şekil 2.17 : Tofteshallen'deki sistemin su kanalının farklı bir açıdan görünüşü [26].

Salınlımlı su kolonu (OWC) enerji dönüşüm sistemi

Salınlımlı su kolonu sistemlerinin temel prensibi dalga hareketinin kapalı bir hacimde yaratacağı hava hareketinden faydalanmaya dayanır. Şekil 2.18'de gösterildiği gibi sistemin altta ve üstte olmak üzere iki açıklığı bulunur. Alttaki açıklık deniz seviyesinin altında, üstteki ise deniz seviyesinin üzerinde yer alır. Alttaki açıklıktan giren deniz suyunun bir kısmı ayrılmış bir bölmede hapsedilir. Dalgaların hareketi ile aşağı ve yukarı hareket eden hücre içerisindeki su, havanın genleşmesini veya sıkışmasını sağlayarak türbin üzerinde meydana gelen basıncın artmasına veya azalmasına neden olur [27].

Kolonun üstü atmosfere açık olduğu için dalga tepesi durumunda daralan hacimdeki hava sıkışıp dışarıya atılır. Dalga çukurunda alçak basınç oluşumu sayesinde de kolonun içine hava alınır. Bu sistemin üst tarafında yer alan boşluğa bir türbin monte edilir. Havanın üstteki boşluktan içeri alınımı veya dışarı atılımı esnasında türbin döner ve böylece dalga enerjisi hareket enerjisine dönüşür. Türbinin ucuna bir generatör bağlandığında türbinden elde edilen hareket enerjisi de elektrik enerjisine dönüştürülür [28].



Şekil 2.18 : OWC modelinin temel çalışma prensibi.

Su kolonu enerji dönüşüm sistemlerinde havanın çift yönlü hareket etmesi nedeniyle her iki yönde de enerji üretmek mümkündür. Ancak türbinin bir yönde yol alması, sonra frenleme yapması ve diğer yönde yeniden yol alması işlemleri esnasında elde edilebilecek enerjinin yarısından fazlası kayıp olarak açığa çıkar. Sistemin maksimum enerjiyi üretebilmesi için havanın hem sıkışması hem de genleşmesi esnasında dönebilecek ve üretilen mekanik enerjiyi generatöre aynı yönde iletebilecek bir türbine ihtiyaç duyulur.

Salımlı su kolonu enerji dönüşüm sistemine ait ilk prototip Yoshio Masuda tarafından denenmiş ve alınan sonuçlar günümüzde bu sistemle çalışan bir çok bilim adamına öncülük etmiştir. Masuda prototipinde, hem hava genişirken, hem de hava sıkışırken generatöre tek yönde hareket ileten Wells Türbini'ni kullanılmıştır (Bakınız Şekil 2.19). Wells türbini adını Belfast-Queens University'deki A.A. Wells'den alır. Bu türbinin en önemli özelliği, her bir kanadın kanat merkezinden geçen eksene göre simetrik olmasıdır. Pnömatik güç sağlayan türbin havanın yönünden bağımsız olarak tork üretir. Günümüzde Wells Türbini iki veya üç pervaneli olarak üretilmektedir [29].



Şekil 2.19 : JAMSTEC araştırma merkezinin ürettiği Wells türbininin rotoru [29].

1985 yılında Norveç firması olan Kvaerner-Brug, Toftestallen'de salımlı su kolonu türbinini kurmuştur. Çelik gövdeden oluşan türbinin rotoru Şekil 2.20'de gösterildiği gibi dikey olarak konumlandırılmıştır. 500kW'lık türbin şiddetli bir fırtınada parçalanmadan önce 4 yıl boyunca tam kapasitesinde çalışmıştır [30].



Şekil 2.20 : Kvaerner-Brug'ın ürettiği 500kW'lık salınlımlı su kolonu türbini [30].

Portekiz Azures'daki Pico adasında kurulan 400kW'lık salınlımlı su kolonu sistemi (Bakınız Şekil 2.21) 15 bin adalının yıllık enerji tüketiminin %8-9 kadarını karşılaması planlanmıştır. Finansal ve teknik sorunlar nedeniyle 1998'de tamamlanan sistem 144m²'lik alana sahiptir [31].



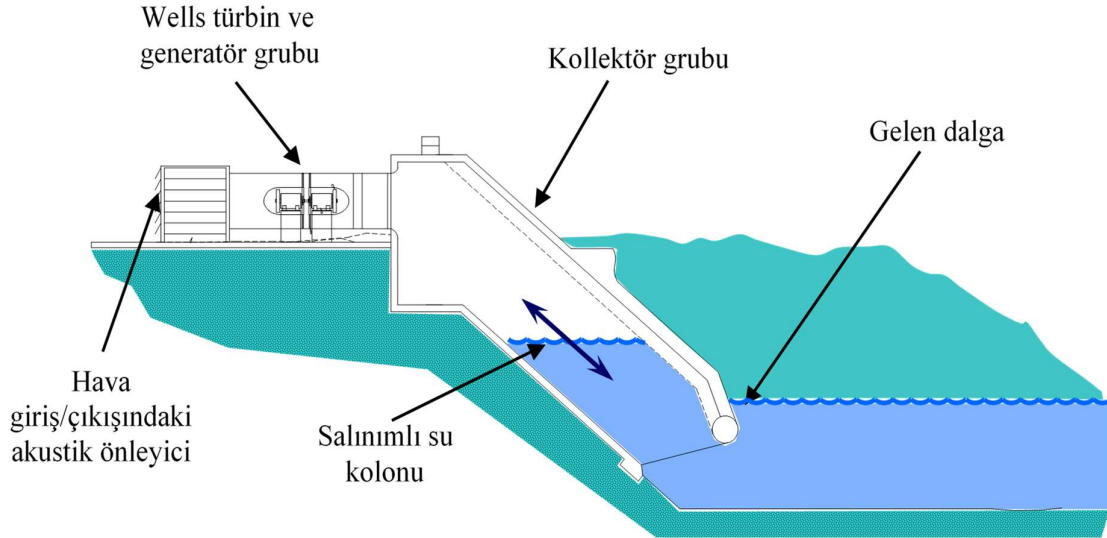
Şekil 2.21 : Pico adasındaki 400kW'lık türbine ait bir görüntü [31].

Salımlı su kolonu enerji dönüşüm sisteminin en önemli örneklerinden biri de Queen's University tarafından 1991 tarihinde Islay adasında kurulan 75 kW'lık prototiptir. Direk şehir şebeke hattına bağlı olarak çalışan sistem bir süre kullanıldıktan sonra yerini daha büyük güçlü başka bir sisteme bırakmıştır [28], [32].



Şekil 2.22 : LIMPET türbinine ait bir görüntü [32].

İlk prototipin kendini ispatlamasından sonra, Şekil 2.22'de gösterilen 500kW'lık ikinci LIMPET türbininin üretimine başlanmıştır. 2000 yılında tamamlanan ve kullanılmaya başlanan türbinin çalışma yapısı Şekil 2.23'te gösterildiği gibidir. Türbinin üretim safhasına ait bir görüntü de Şekil 2.24'te yer almaktadır [33].



Şekil 2.23 : 500kW'lık LIMPET türbininin çalışma prensibi [33].



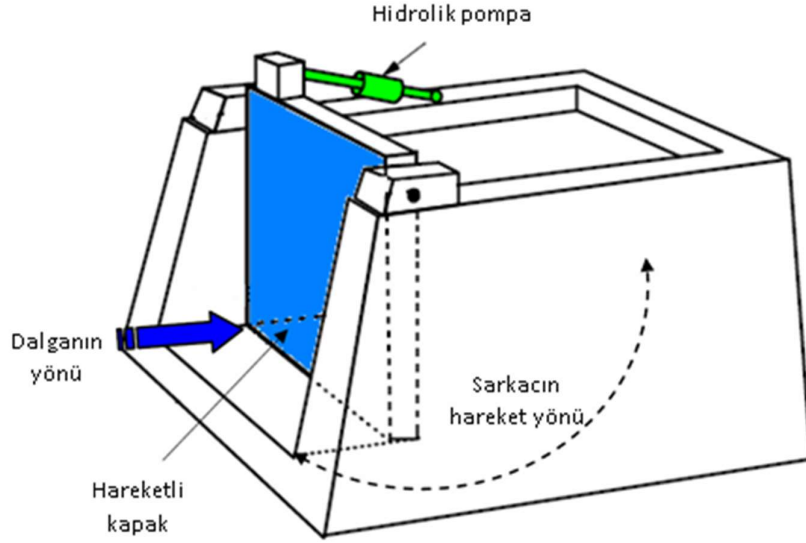
Şekil 2.24 : 500kW'lık LIMPET türbininin üretim safhasından bir görüntü.

Salınımlı su kolonunun (OWC) çalışma prensibine ait bilgi Bölüm 4'te daha detaylı olarak verilecektir.

Sarkaçlı (pendular) enerji dönüşüm sistemi

Bu sistem bir tarafı denize açılan bir tür dalgakıran şeklinde çalışır. Denize açılan kısma sarkaç şeklinde hareket eden bir kapak monte edilmiştir. Hızla gelen dalga kapağa çarparak ileri/geri hareket etmesini sağlar. Kapak gelen dalga ile içeriye doğru hareket ederken türbinin içine bir miktar suyun girmesine de izin verir. Dalga tepesi yerini dalga çukuruna bıraktığında, kapağın ağırlığının oluşturduğu basınç türbin içindeki suyun basıncından yüksek olduğu için kapak suyu türbinden dışarıya doğru atar. Bu hareket gelen dalga ile sürekli ileri/geri devam ettikçe kapağa bağlı olan hidrolik pompa tahrik olarak enerji üretilmesini sağlar [34].

Japonya'daki Muroran Institute of Technology sarkaçlı enerji dönüşüm prensibi ile çalışan 5kW'lık bir türbini ilk kez 1983 yılında çalıştırmaya başlamıştır. O günden bu yana çalışmaya devam eden sistem örnek alınarak daha sonra farklı güçlerde türbinler üretilmeye devam edilmiştir. En son olarak 1994 yılında sarkaçlı dönüşüm sistemleri içerisinde 300kW'lık kapasitesi ile en büyük güce sahip olan türbin 1994 yılında kurulmuştur. Sarkaçlı enerji dönüşüm sisteminin en basit şekilde gösterilimi Şekil 2.25'te verilmiştir [23].



Şekil 2.25 : Sarkaçlı enerji dönüşüm sistemi [34].

2.1.4.2 Kıyıya yakın (near shore) uygulamalar

Bu sistemler kıyıya yakın, 15-25m su derinliklerinde gerçekleştirilmektedir. Bu tür sistemlerde salınlı su kolonu enerji dönüşüm sisteminin farklı tasarımları uygulanmıştır [34].

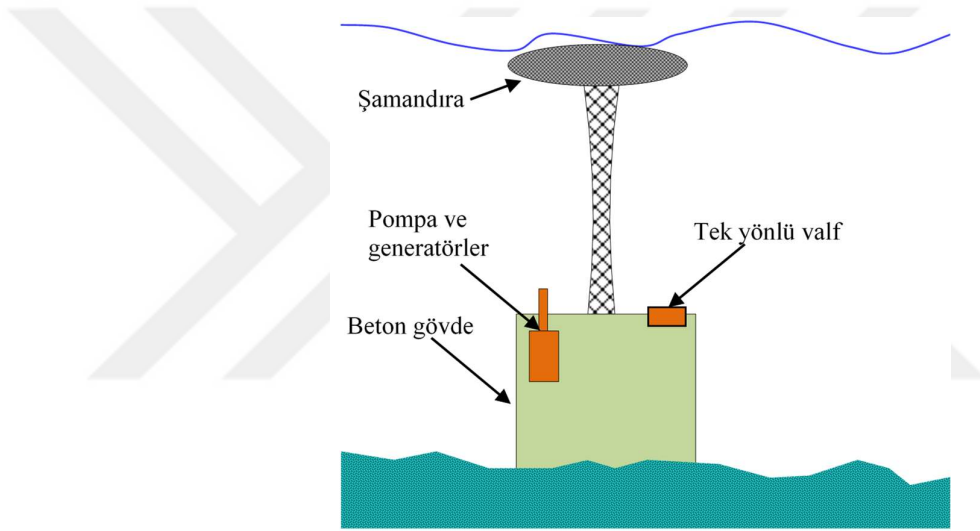
OSPREE enerji dönüşüm sistemi

Kıyıya yakın uygulama türlerinden biri olan OSPREE uygulamasının temeli deniz dibine yerleştirilmiş salınlı su kolonu dönüştürücüsüne dayanır. İskoçya'daki Uygulamalı Araştırma ve Teknoloji (şimdiki adıyla WAVEGEN) şirketi tarafından geliştirilen ilk OSPREE rüzgar/dalga türbini şeklindeydi. İlk prototip olan OSPREE I'in çelik gövdesi kurulum aşamasında (1996) problem yaratmıştır. Üretim ve inşaat maliyeti çok yüksek olan ve bu konudaki maliyetleri düşürmek için hala çalışmaları devam eden türbinin ikinci versiyonu olan OSPREE 2000 ise kompozit malzemeden üretilmiş, bu da maliyetlerin önemli ölçüde düşürülmesini sağlamıştır [35], [36].

Açık denizlerde kısa sürede kurulacak şekilde üretilen 2MW'lık türbin, 15m'lik su derinliğinde ve kıyıdan 1km uzaklıkta çalışmaktadır. Sistemin en önemli özelliklerinden biri de çevreye zarar vermeden ve sessiz çalışmasıdır.

Dalga şamandırası enerji dönüşüm sistemi

En basit dalga pompası sistemlerinden biridir. Sistemin gövdesi deniz dibine Şekil 2.26’da gösterildiği gibi monte edilir. Sistemin üzerinde iki açıklık bulunur, bu açıklıklardan biri sisteme deniz suyu girişini, diğeri ise sistemden su çıkışını sağlamaktadır. Giriş kısmına tek yönlü bir valf, sistem çıkışına da bir türbin konulmaktadır. Türbin bir jeneratöre bağlanmakta, sistemin içerisine giren suyun türbine basılması için gereken enerji piston hareketi ile elde edilmektedir. Söz konusu “piston hareketi” dalga tepe yada çukuruna göre yukarıya veya aşağıya hareket eden şamandıra vasıtasıyla sağlanır [34].

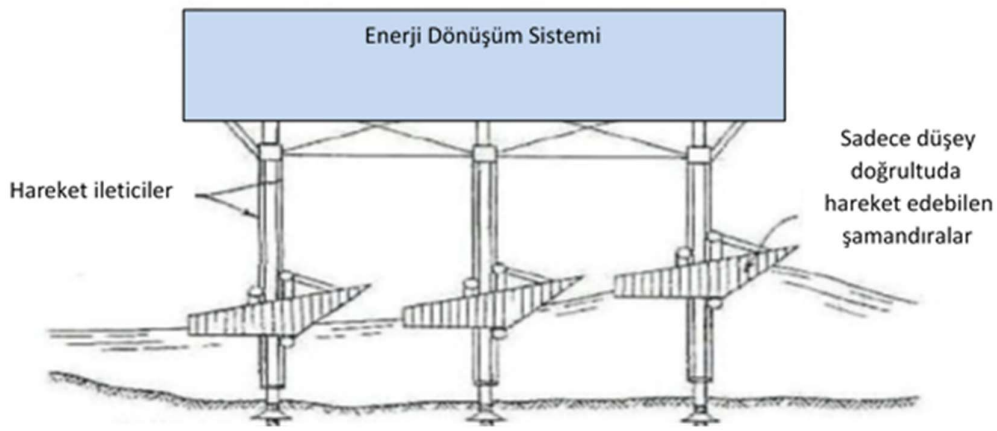


Şekil 2.26 : Dalga şamandırası enerji dönüşüm sistemi [37].

Dalga motoru enerji dönüşüm sistemi

Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinin büyük çoğunluğunda en önemli ve hassas elemanlar olan türbin ve jeneratör gibi üniteler su seviyesinde veya su seviyesinin altında yer almaktadırlar. Bu ünitelerin deniz suyu etkilerine maruz kalmaları ve dalga kuvvetinden olumsuz etkilenmeleri dalga dönüşüm sistemlerinin en önemli problemlerini oluşturmaktadır. Bu olumsuzluk farklı avantajlı sistem arayışlarını sürekli gündemde tutmaktadır. Bu soruna çözüm bulmak amacıyla geliştirilen “dalga motoruna” 20. yüzyılın başlarında P. Wright tarafından patent alınmıştır [38].

Sistemde generatörün deniz seviyesinden yukarıda olması deniz suyunun olumsuz etkilerinin giderilmesinde avantaj sağlamıştır. Şekil 2.27’de gösterildiği gibi deniz dibinde çakılı kazıklara asılan halatlara su seviyesi civarında şamandıralar asılmak suretiyle dalga tepe çukuruna göre şamandıralar aşağıya ve yukarıya doğru hareket ederler. Böylece hareket eden halatlar, hareketi sistemin en üst noktasındaki generatöre iletirler. Bu sistemlerin en büyük dezavantajı uzun süre dayanım için tercih edilen halatların sürtünme dirençleri nedeniyle kayıplar oluşturmalarıdır. Halatlar çelikten yapıldığında ise deniz suyuna maruz kalarak korozyona uğrayıp kısa sürede deforme olmaktadır [34].



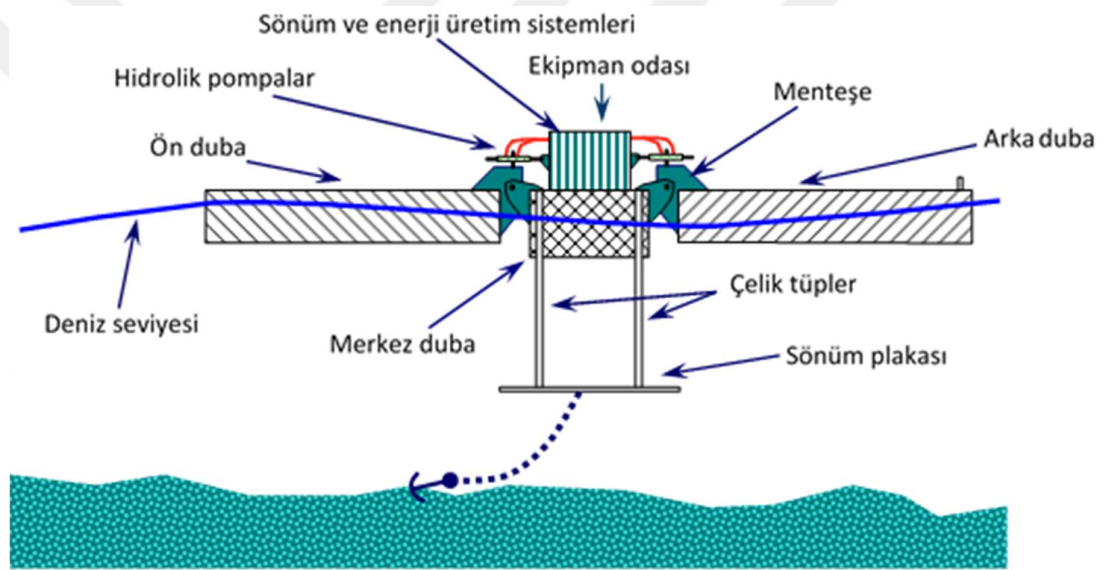
Şekil 2.27 : Dalga motoru enerji dönüşüm sistemi [38].

2.1.4.3 Kıyıda uzak (off-shore) uygulamalar

40m’den daha derin sularda yüksek dalga rejimlerinden faydalanabilmek için kıyıda uzak dönüşüm sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemlerde enerjinin iletimi için uzun elektrik kablolarına ihtiyaç duyulur. Kurulumları ve bakımları kıyıda kullanılan uygulamalara göre daha zordur, bu da maliyetlerin diğer sistemlere göre daha yüksek olmasına neden olmaktadır [39].

McCabe dalga pompası

Bu sistem 1980’de teorik çalışmalar ve deneyimler sonucu Peter McCabe tarafından oluşturulmuştur. Sistem birbirine menteşe ile bağlanmış, düzenli bir şekilde sıralanmış ve birbirine bağlı olarak hareket eden dubalardan oluşmuştur. Bu sayede sistem kendini denize göre ayarlayabilir. Ekstra bir kütle eklenmesiyle merkez dubanın ataletinin artması sağlanır. Enerji ise, Şekil 2.28’de gösterildiği üzere, merkez duba ile diğer dubalar arasına monte edilen hidrolik tulumba aracılığıyla menteşe noktalarındaki hareketten sağlanır. 40m uzunluğundaki bir prototip 1996 yılında İrlanda’da Country Clare’de kurulmuştur [36], [40].

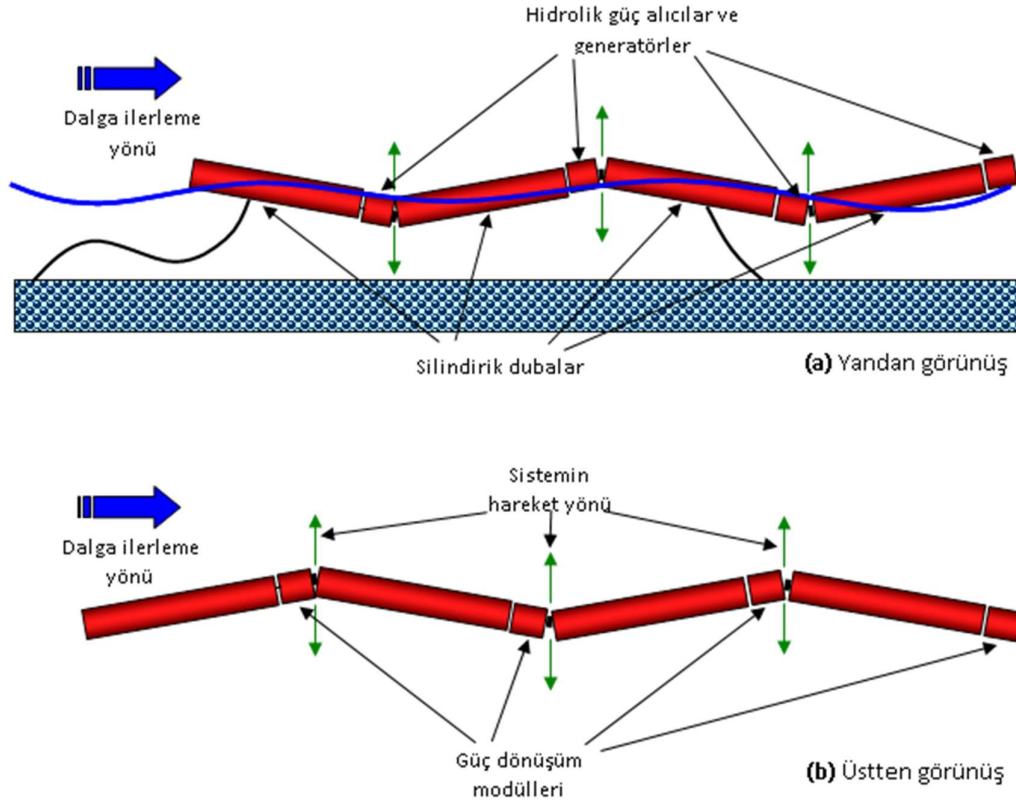


Şekil 2.28 : McCabe dalga pompası yöntemi.

Pelamis enerji dönüşüm sistemi

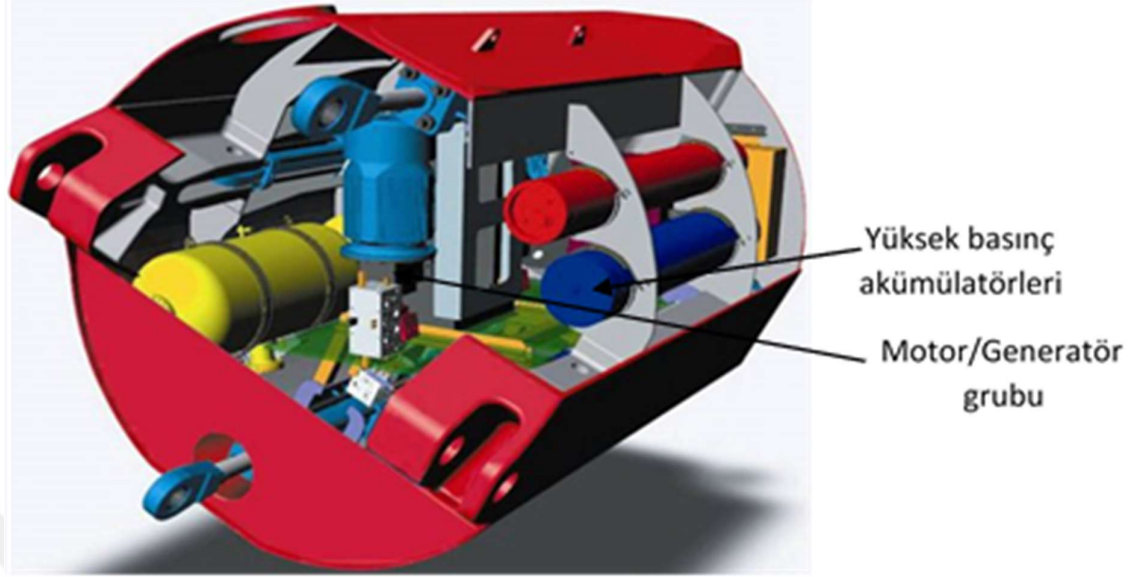
Şeklinden dolayı sisteme bir deniz yılanı cinsi olan “pelamis” ismi verilmiştir. Şekil 2.29’da gösterildiği gibi yapı kısmi olarak su içinde yer alan ve menteşelerle birbirine bağlantılı silindirik şamandıralardan oluşur. Sistem deniz yüzeyine yerleştirilirken yer değiştirmesini önlemek için bazı noktalarından deniz dibine sabitlenir.

Pelamis gelen bir dalga karşısında su yüzeyinde kalacak şekilde hem yatay hem de düşey düzlemde hareket eder. Bu şekilde düzenlenmiş olan sistemin dalga yönüne olan bağımlılığı azaldığından ve kontrol sistemleri çok daha basit hale gelir. Her iki harekette de hidrolik silindirler içinde yer alan hidrolik yağ, hidrolik sıvının hareketiyle tahrik edilen bir pompayı harekete geçirir. Jeneratöre bağlı bu pompa jeneratörün çalışmasıyla elektrik üretimini sağlar. Üretilen elektrik deniz dibinden götürülen iletim hattı vasıtasıyla karaya iletilir [34].



Şekil 2.29 : Pelamis sisteminin hareket yönü (yandan görünüş).

“Ocean Power Delivery Ltd.” şirketinin patenti ile üretilen bu sistem açık deniz yapılarında kullanım için ideal olarak düşünülebilir. 150m uzunluğunda, 3,5m genişliğinde, 375kW gücündeki silindirler bir arada kullanılarak, uygun şartlarda sistemden 2,5MW güç elde edilmesi planlanmıştır. Her ünite toplam 4 adet silindir bulunmaktadır. Portekiz’deki ilk ticari elektrik santrali olan ve 2008’de faaliyete geçen Aguçadoura Wave Park Şimdilik 3 adet üniteden oluşmakta ancak yakın zamanda ünite sayısı artırılarak toplam gücün 21MW’a çıkarılması planlanmaktadır [41].



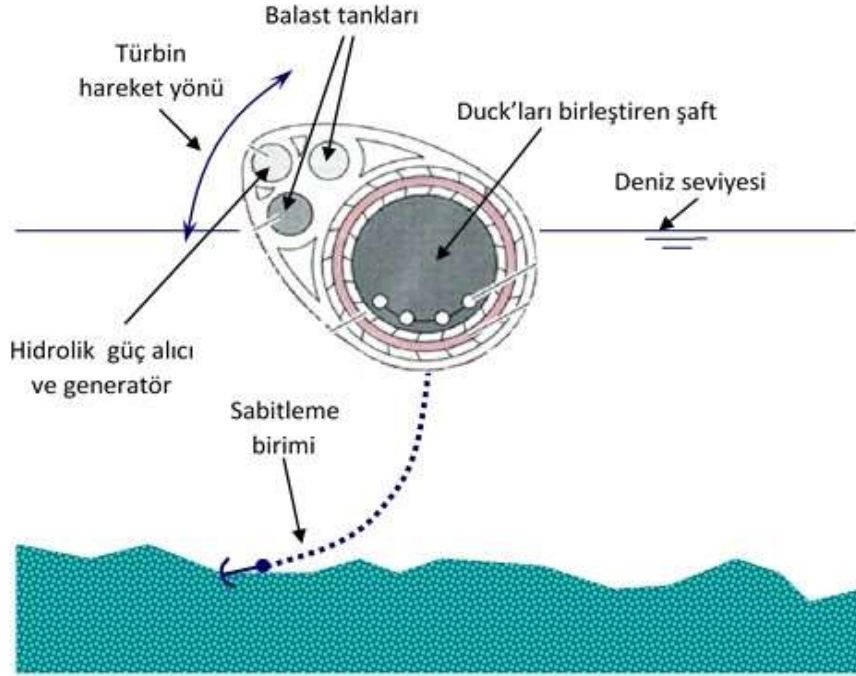
Şekil 2.30 : Pelamis sisteminin iç yapısı [34].

Pelamis enerji dönüşüm sistemi diğer dönüşüm sistemlerine göre çok daha avantajlı gözükmeye karşın bir takım dezavantajlar da içermektedir. En önemli dezavantajı deniz dibinden geçirilecek enerji nakil hatlarının kurulum ve bakım masraflarının çok yüksek olmasıdır. Öte yandan sistemdeki hidrolik yağların denize sızarak çevre kirliliğine neden olma riski de bulunmaktadır [34].

Sistemin 150m uzunluğa sahip olması nedeni ile aynı anda çok farklı dalga yüklerinin farklı yönlerde ve şiddetlerde etkimesi uzun vadede silindirler arasındaki esnek bağların deforme olması ve sistemin dibe sabitlemede kullanılan halatlarının ani yüklerle gerilmelerine ve yıpranmalarına neden olması da söz konusudur.

Salter's duck enerji dönüşüm sistemi

Stephen Salter 1973 yılında üniversite kapsamında (İskoçya'daki Edinburgh Üniversitesinde) dalga enerjisi üzerine araştırma çalışmalarını başlatan ilk kişidir. 1974 yılında "dalga gücü" adlı makalenin ardından adı dalga enerjisi camiasında en çok anılan isim olmuş ve makalede tanımladığı dönüştürücü tipi Salter's Duck olarak literatüre geçmiştir [34].

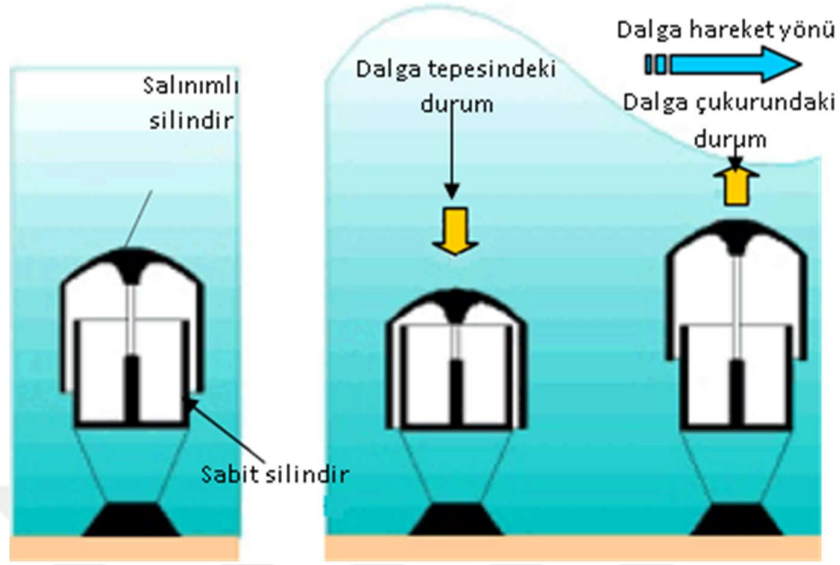


Şekil 2.31 : Salter's Duck sisteminin genel yapısı.

Bu sistemde dalga enerjisi suyun içerisinde yer alan yumurta şeklindeki bir forma (duck) çarparak onu kendi eksenini etrafında döndürmeye çalışır. Aynı ekseninde bulunan sarkaç bir generatöre bağlanmıştır. Dalga nedeniyle Salter ördeği yukarı aşağı salınım yaptıkça sarkaç da aynı şekilde hareket ederek şaftına bağlı bir türbini harekete geçirir ve türbin ucundaki generatör ile elektrik enerjisi üretilir. İstenirse aynı şaftta birden fazla Salter ördeği bağlanarak elde edilen enerji miktarı arttırılabilmektedir. Sistemin en önemli özelliği dalganın kinetik ve potansiyel enerjilerini mekanik enerjiye %90 verimle çevirebilmesidir. Öte yandan dalga, enerjisinin bir kısmını duck'a aktardığı ve yoluna zayıflamış olarak devam ettiği için "Salter's Duck"ın aynı zamanda dalgakıran olarak kullanıldığı da bilinmektedir [42].

Archimedes dalga salınımı sistemi (AWS)

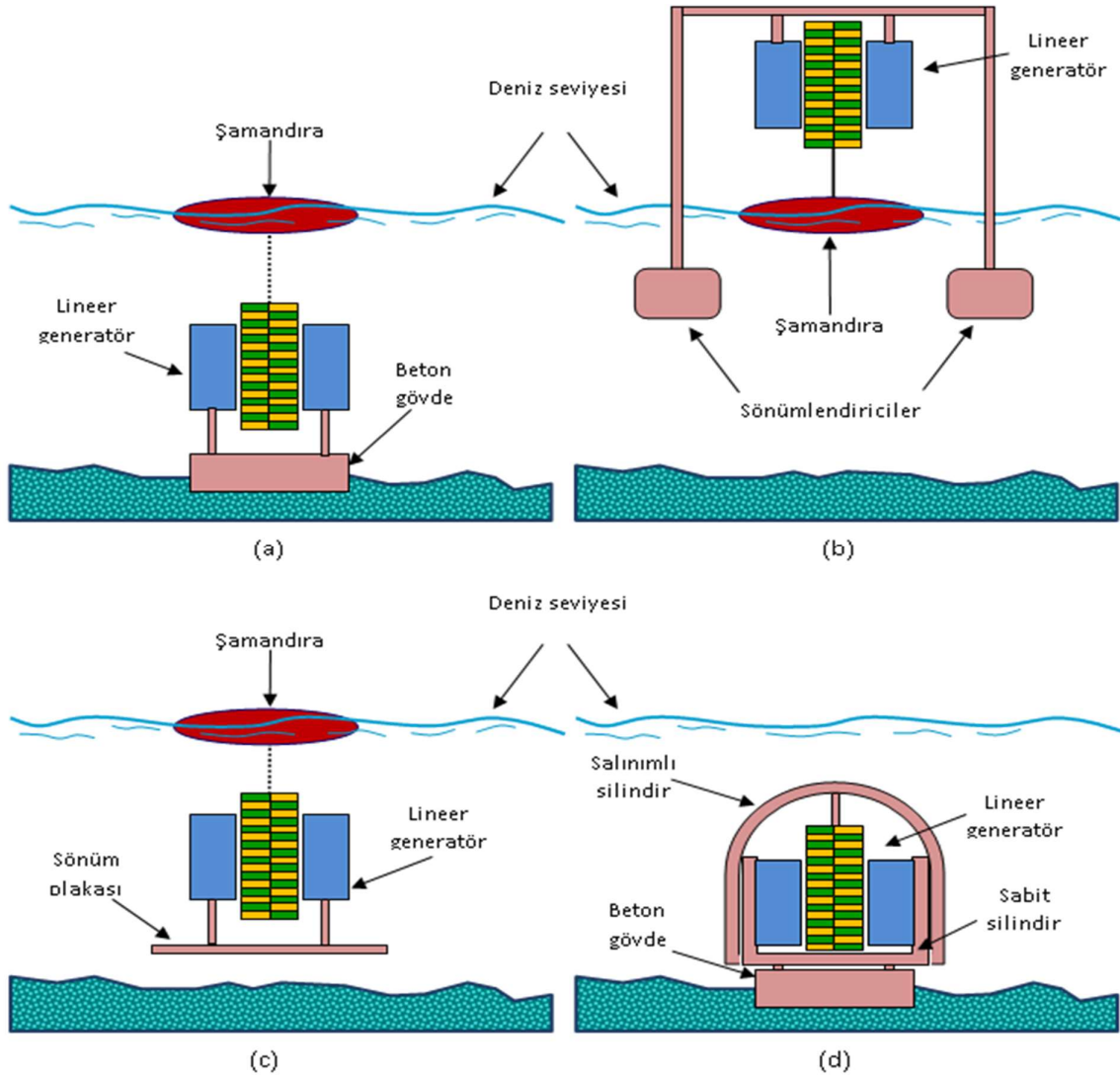
Bu sistem 10 – 20m çapında silindirik, içi hava ile dolu bir yapıdan oluşur. Çalışma prensibi; sistemin üzerinden geçen dalganın, dalga tepesi ve çukuruna göre yüzen kısım içindeki havanın basıncını arttırması veya düşürmesi sonucunda yüzücü kısmın zemine göre aşağı yukarı hareket ederek enerji üretmesine dayanır [43].



Şekil 2.32 : AWS çalışma prensibi [34].

Kapalı olarak çalışan sistemin doğal frekansının gelen dalganın frekansına eşit olduğu ve sistemin yay katsayısı ile dalganın sönüm katsayısının eşit olduğu anlar, Archimedes dalga dönüşüm sisteminin en verimli çalıştığı anlardır. Bu sistemler gerektiğinde batırılabilen dubalar üzerine inşa edilebileceğinden bir yerden başka bir yere taşınmaları da mümkün olmaktadır.

1995 yılından 2003 yılına kadar pek çok üretim ve test aşamalarından geçtikten sonra 2MW'lık AWS prototip türbini Portekiz açıklarına kurulmuştur (Bakınız Şekil 2.34). 7 ay süreyle teste tabi tutulan sistem, bu süre zarfında şehir şebeke hattına 15kV'luk gerilim sağlamıştır. Test sonuçları doğrudan tahrikli sürekli mıknatıslı lineer generatörün bu uygulama için en uygun generatör tipi olduğunu göstermiştir. Lineer generatör kullanılarak gelen dalga enerjisi arada mekanik ekipmanlara gerek duyulmadan direk elektrik enerjisine dönüştürülerek sistemin verimi arttırılabilmektedir. AWS dönüşüm sisteminin linner generatörle çalıştırılması Şekil 2.33'te gösterilmiştir [44], [45].



Şekil 2.33 : AWS sisteminin lineer generatörle çalıştırılmasına dair örnekler.

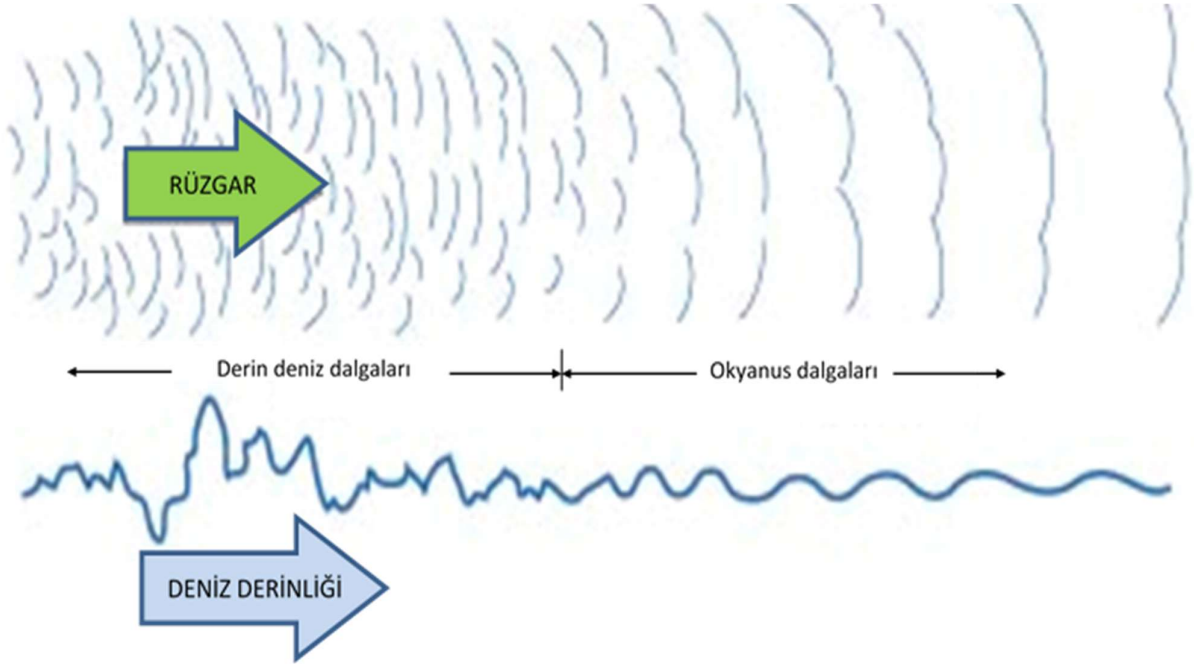


Şekil 2.34 : Leixoes limanındaki AWS türbini [45].

2.2 Dalga Enerjisinin Matematiksel Modellemesi

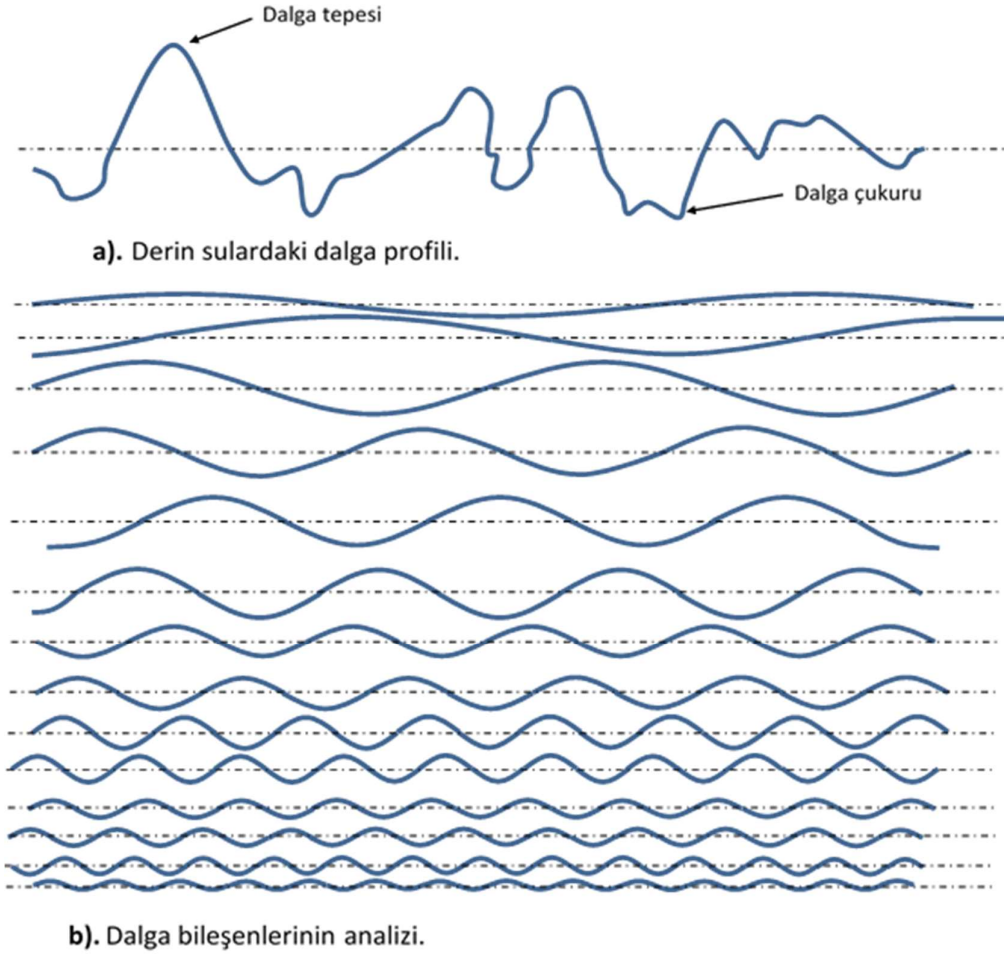
2.2.1 Dalgaların oluşumu ve dalga karakteristikleri

Okyanus üzerinde esen rüzgarlar okyanus dalgalarını meydana getirirler. Rüzgar enerjisi bir kez dalgaya dönüşünce de dalgalar çok az bir enerji kaybıyla kilometreler boyunca hareket edebilirler. Dalgaların şiddeti, dalga gelmeden birkaç gün önceden tahmin edilebilmektedir. Şekil 2.35’te rüzgara bağlı olarak dalgaların derin sulardaki ve sığ sulardaki profilleri gösterilmiştir [46].



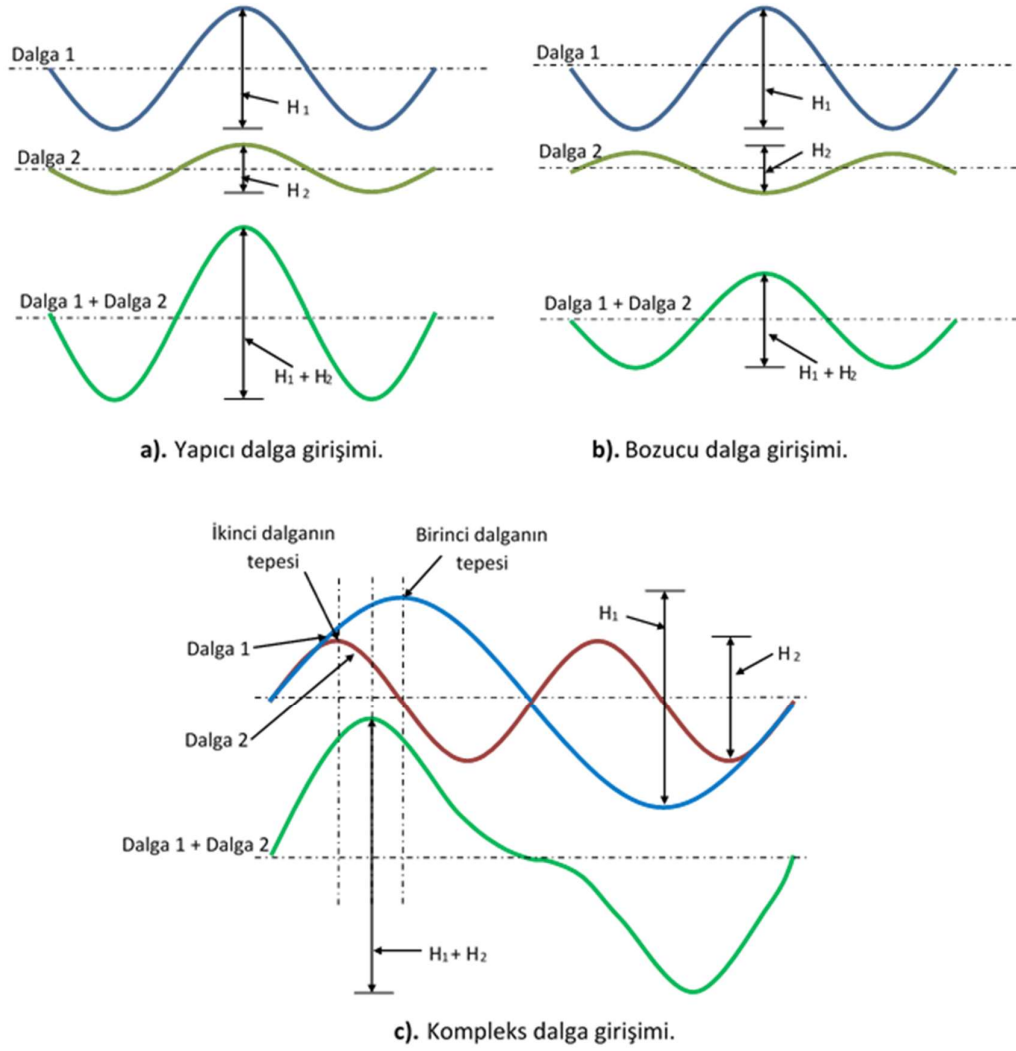
Şekil 2.35 : Rüzgara bağlı olarak farklı su derinliklerindeki dalga profili [46].

Okyanus dalgaları her ne kadar zamandan bağımsız olarak hareket ediyor gibi gözükseler de temel frekans bileşenleri dikkate alındığında dalga şekilleri sinüs biçimindedir. Şekil 2.36’da gösterildiği üzere bir okyanus dalga şekli birden fazla farklı genlik ve farklı frekanstaki sinüzoidal dalga şeklinin biraraya gelmesinden oluşmaktadır [46].



Şekil 2.36 : Derin (kaotik) sulardaki dalga profili [46].

Eğer dalgalar aynı fazda ve aynı frekansta ise birbirleri üzerinde destekleyici etkileri vardır, eğer aynı frekansta ancak farklı fazlarda hareket ediyorsa bu sefer de birbirleri üzerinde zayıflatıcı etkiye neden olurlar. Eğer dalgaların hem frekansları hem de fazları farklı ise bu durumda da kompleks dalga yapıları oluşur. Şekil 2.37’de destekleyici, zayıflatıcı ve kompleks dalgalara birer örnek verilmiştir [46].



Şekil 2.37 : Yapıcı, bozucu ve kompleks dalga girişimleri.

Bir dalga karakteristiğini belirleyen dalga yüksekliği, dalga periyodu ve su derinliği olmak üzere üç parametre vardır. Dalga periyodu, T , bir dalga tepesi ve dalga çukuru arasında geçen süreyi, dalga yüksekliği (ya da dalga genliği), H , bir dalga tepesi ve dalga çukuru arasındaki mesafeyi, su derinliği, h , durgun su ile su yatağı arasındaki mesafeyi, dalga boyu da, λ , ileri yönde hareket eden dalganın iki tepesi veya iki çukuru arasındaki mesafeyi göstermektedir.

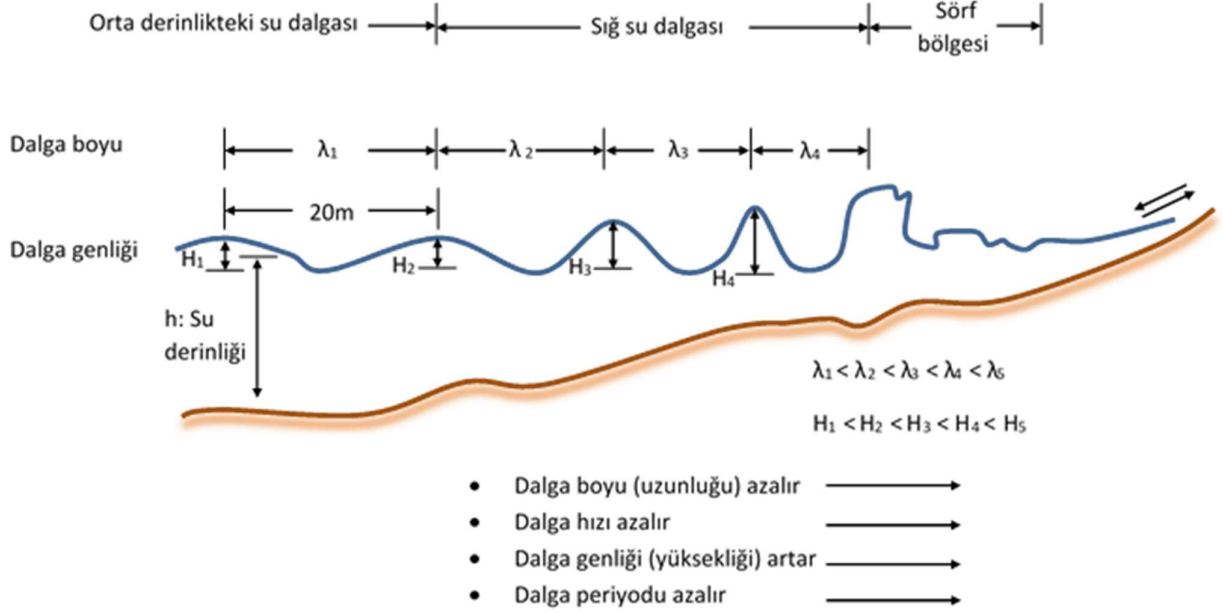
Şekil 2.38’de gösterildiği üzere su derinliği azaldıkça dalgaların sıklığı artar, diğer bir deyişle periyotları azalır; öte yandan hareket eden su dalgalarının genliği (yüksekliği) enerji korunumu yasasına dayanarak kıyıya yaklaştıkça artmaya başlar. Belirli bir derinlikteki deniz seviyesinde ortalama dalga derinliği ve dalga periyodu sırasıyla eşitlik 2.1 ve eşitlik 2.2’deki gibi verilir.

Ortalama dalga genliği:

$$H_{ort} = \frac{H_{j,1} + H_{j,2} + \dots + H_{j,N}}{N} \quad [\text{m}] \quad (2.1)$$

Ortalama dalga periyodu:

$$T_{ort} = \frac{T_1 + T_2 + \dots + T_N}{N} \quad [\text{s}] \quad (2.2)$$



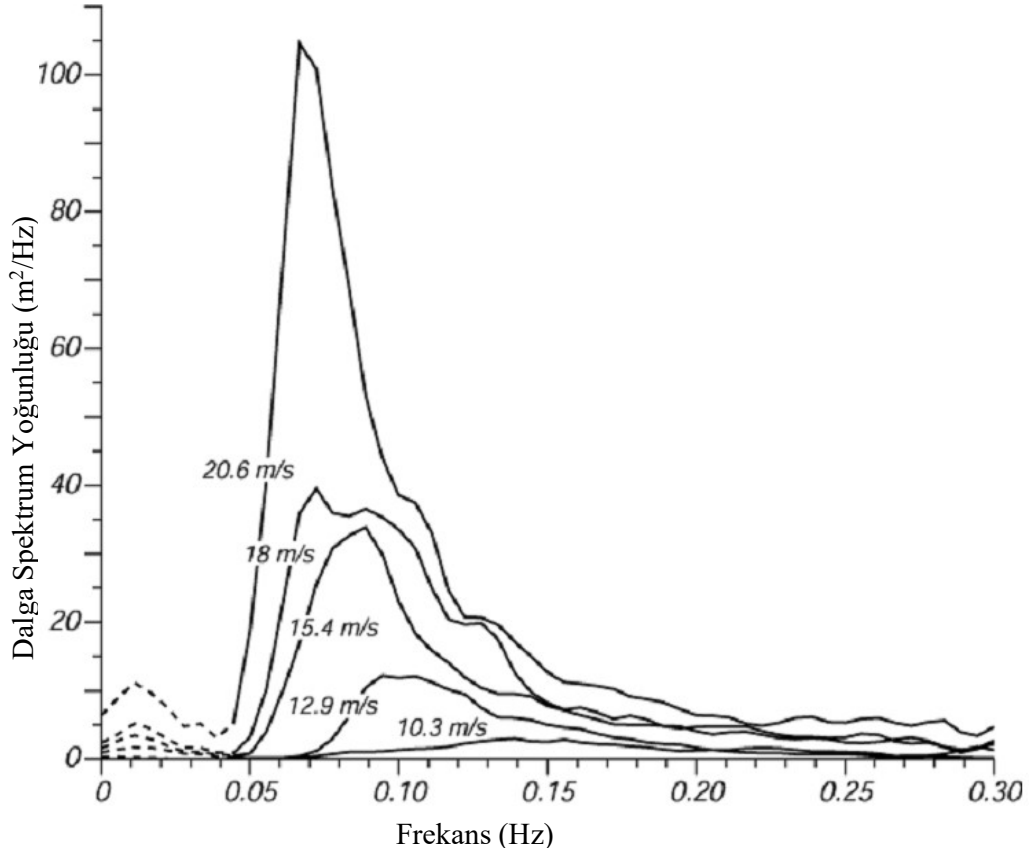
Şekil 2.38 : Derin ve sığ sularda dalga oluşumu [46].

Not: Sığ suların dalga genliği ve yüksekliği derin sulara göre abartılarak çizilmiştir.

2.2.2 Dalgaların spektrumu

Dalgaların hızı, yüksekliği, periyodu ve yönü gelişigüzel olarak gözükmeyle birlikte yapılan çalışmalar dalgaların bir spektrumu olduğunu göstermektedir. Herhangi bir kontrol modelinin efektif olarak çalışabilmesi için okyanus dalgalarının gerçekçi bir profillerinin oluşturulması gerekir. Bunun için de dalga spektral yoğunluk verilerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bazı araştırma merkezlerinin uzun süre yaptıkları veri kayıtları sonucunda çeşitli bölgelere ait dalga spektrumları günümüzde mevcuttur.

Çok uzun süreli bir çalışma gerektiren bu yöntem yerine dalgaların spektrum modelini tahmin edebilmek için çeşitli istatistiksel metotlar ileri sürülmüştür. Bunlar arasında en yaygın olarak bilineni, Pierson ve Maskowitz'in 1964'te hazırladıkları dalga spektrumu modelidir. Şekil 2.39'da Pierson ve Maskowitz'in farklı rüzgar hızlarına göre hazırlamış oldukları bir dalga spektrumu örnek olarak verilmiştir [47], [48].



Şekil 2.39 : Pierson ve Maskowitz modeline göre dalga spektrumu [47].

Pierson ve Maskowitz modellerini hazırlarken deniz üzerinde rüzgarın uzun süre sabit bir hızda estiği ve dalgadaki hızın da bir süre sonra rüzgar hızı ile aynı hızda hareket edeceğini kabul etmişlerdir. Şekil 2.39'daki Pierson ve Maskowitz'in teorik çalışmalarının sonucunda ortaya çıkan dalga spektrumunda farklı rüzgar hızlarına göre hazırlanmıştır.

Dalga spektrumları dalga periyotlarına göre farklı kategorilere ayrılırlar. Dalga periyodu 2sn'nin altında olan dalgalar kıyıya yakın olan dalgalardır ve bu dalgalar yüksek frekanslı dalgalar olarak adlandırılırlar. Frekanslarının yüksek olması nedeniyle bu dalgalardan elde edilecek olan enerji de çok düşük olur. Bu nedenle dalga enerjisi dönüşüm sistemleri genelde bu tür “yüksek frekanslı” dalgalara cevap vermeyecek şekilde tasarlanırlar (türbinlerin çalışma aralıklarını daha dar tutarak verimlerini arttırmak için) [47], [48].

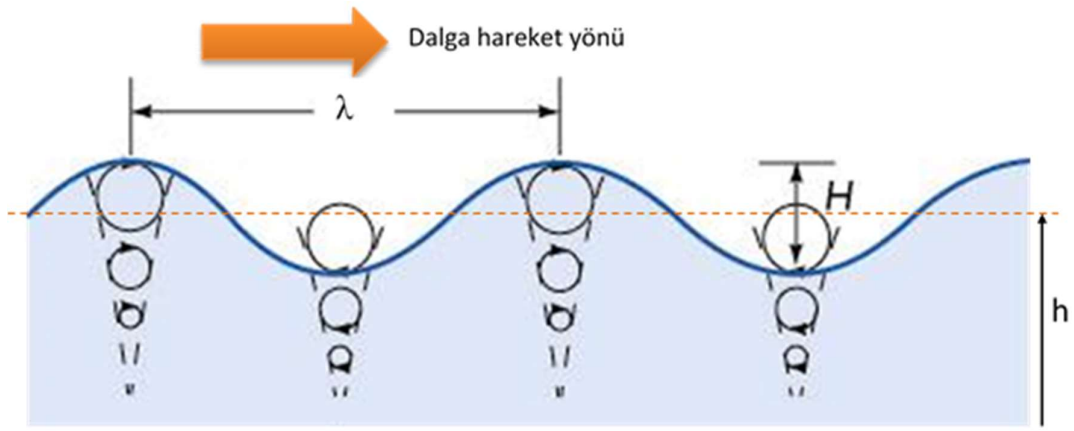
Genellikle dalga enerjisi dönüşüm sistemleri, dalga periyodu 2 ile 10sn arasında olan dalgalar için tasarlanırlar. Şekil 2.38'de λ_3 ve λ_4 dalga boyları ile verilen dalgalar yüksek frekanslı, sığ su dalgalarıdır ve bu dalgalardan elde edilecek olan enerji çok düşük olur. Ancak aynı şekildeki λ_1 ve λ_2 ile gösterilen ve daha uzun boylu dalgalar enerji yoğunluklarının çok yüksek olması nedeniyle dalga enerjisi dönüşüm sistemi tasarımında çok daha etkindirler.

10 ile 25sn arasındaki dalga periyotlu dalgalar genelde uzun dalgalar olarak adlandırılırlar ve bu dalgaların güçleri oldukça yüksektir. Bu dalgalar genelde derin deniz sularında meydana gelirler.

25sn'nin üzerinde periyoda sahip dalgalar ise çoğunlukla lineer olmayan ve düzensiz dalgalardır. Bu dalgalar çoğunlukla okyanuslarda meydana gelirler ve yıkıcı dalgalar olarak adlandırılırlar. Dalga enerjisi dönüşüm sistemleri günümüzde bu dalgalara yönelik olarak tasarlanmamaktadır.

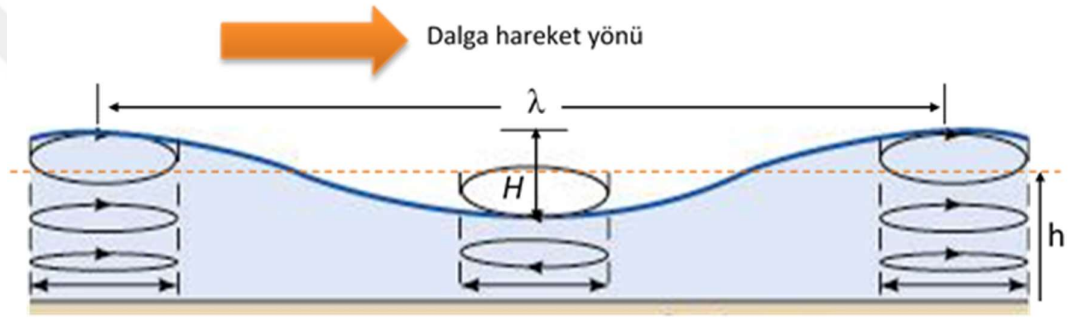
Dalga enerjisinden elde edilen enerjinin sığ, derin ve orta derinlikteki deniz seviyelerine göre değişimi bir sonraki bölümde anlatılmaktadır.

Suyun derinliği olan h yüksekliğine göre dalgalar farklı şekilde davranmaktadırlar ve buna bağlı olarak dalgadan elde edilebilecek gücün değeri de farklı olmaktadır. Şekil 2.40'da derinliklerine göre dalgaların sınıflandırılması gösterilmiştir [46].



Su derinliği (h) $\geq \frac{1}{2}$ Dalga boyu (λ)

a). Derin su dalgaları.



Su derinliği (h) $\leq \frac{1}{20}$ Dalga boyu (λ)

b). Sığ su dalgaları.

Şekil 2.40 : Sığ ve derin sularda dalgaların hareketi [46].

Şekil 2.40'ta da görüldüğü üzere derin sularda su moleküllerinin orbiti dairesel şekildedir ve dairenin çapı suyun derinine indikçe küçülür. Bu da derine indikçe meydana gelen enerjinin giderek azaldığını gösterir. Derin sularda su yüksekliği dalga boyunun iki katı veya üzerinde bir değerdedir.

Sığ sularda su moleküllerinin orbiti şekilde de görüldüğü üzere elips şeklini alır. Su derinine indikçe elips şeklindeki orbitin dikey çapı giderek küçülür. Bu da su parçacıklarının hareketinin dikine hareketten çok (yukarı-aşağı), enine (ileri-geri) hareket ettikleri anlamına gelir. Su moleküllerinin bu şekildeki hareketi su derinliğinin dalga boyunun yarı değerinden sığ olduğu yerlerde meydana gelir.

Aşağıdaki eşitliklerde farklı su derinliklerine göre dalgaların hızları ve boyları verilmektedir. Eşitliklerden de anlaşılacağı üzere su derinliği azaldıkça dalga boyu kısalmakta, dalga hızı ise artmaktadır. Eşitliklerdeki g yer çekimi kuvvetini vermektedir.

Derin sular:

Şekil 2.41’de dalgaların derinliklerine göre sınıflandırılmaları verilmiştir. Deniz sularının derin sular olarak sınıflandırılabilmesi için eşitlik 2.3’ün sağlanması gerekir. Buna göre dalga boyu ve dalga hızı sırasıyla eşitlik 2.4 ve eşitlik 2.5’teki gibi yazılır.

$$h \geq \frac{1}{2}\lambda \quad (2.3)$$

Dalga boyu:

$$\lambda = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \quad (2.4)$$

Dalga hızı:

$$C = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2 \cdot \pi}} \quad (2.5)$$

Dalga grup hızı:

$$C_g = \frac{C}{2} \quad (2.6)$$

Orta derinlikteki sular:

Şekil 2.41’de görüldüğü gibi orta derinlikteki deniz sularında su derinliği dalga boyunun yarısından küçük ancak 20’de birinden büyüktür.

$$\frac{1}{20}\lambda < h < \frac{1}{2}\lambda \quad (2.7)$$

Dalga boyu:

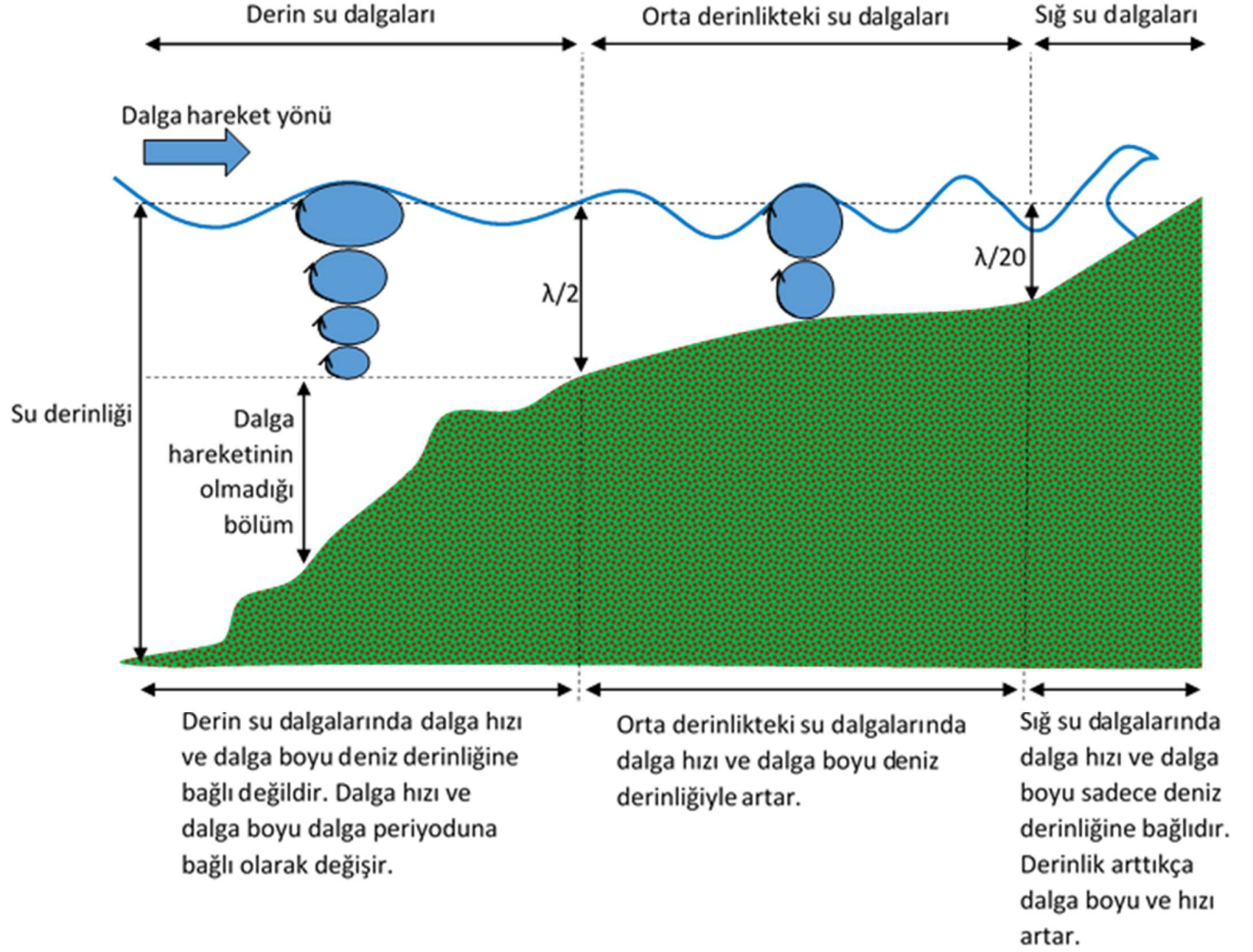
$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot g}{\lambda} \cdot \tanh\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{h}{\lambda}\right) \quad (2.8)$$

Dalga hızı:

$$C = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(2 \pi \cdot \frac{h}{\lambda}\right)} \quad (2.9)$$

Dalga grup hızı:

$$C_g = \frac{C}{2} \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot \pi}{\sinh(4 \cdot \pi \cdot \frac{h}{\lambda})} \cdot \frac{h}{\lambda} \right) \quad (2.10)$$



Şekil 2.41 : Derinliklerine göre dalgaların sınıflandırılması.

Sığ sular:

Sığ sular için dalga boyu ve dalga hızı sırasıyla eşitlik 2.11 ve eşitlik 2.12'deki gibi yazılır. Sığ sulardaki enerji üretimi verimi yüksek olmadığı için bu çalışmada sığ deniz suları dikkate alınmayacaktır.

$$h \leq \frac{1}{20} \lambda \quad (2.11)$$

Dalga boyu:

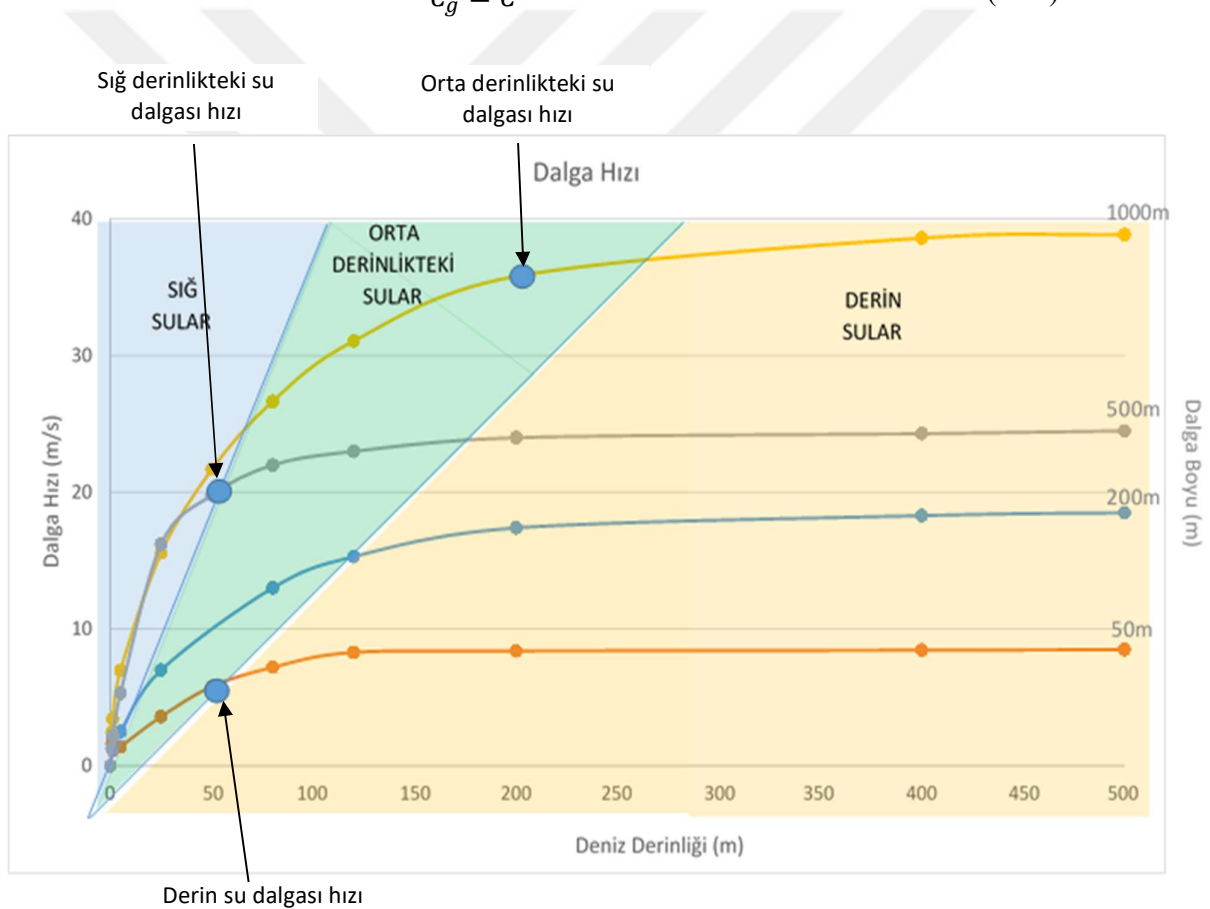
$$\lambda = T \cdot \sqrt{g \cdot h} \quad (2.12)$$

Dalga hızı:

$$C = \sqrt{g \cdot h} \quad (2.13)$$

Dalga grup hızı:

$$C_g = C \quad (2.14)$$



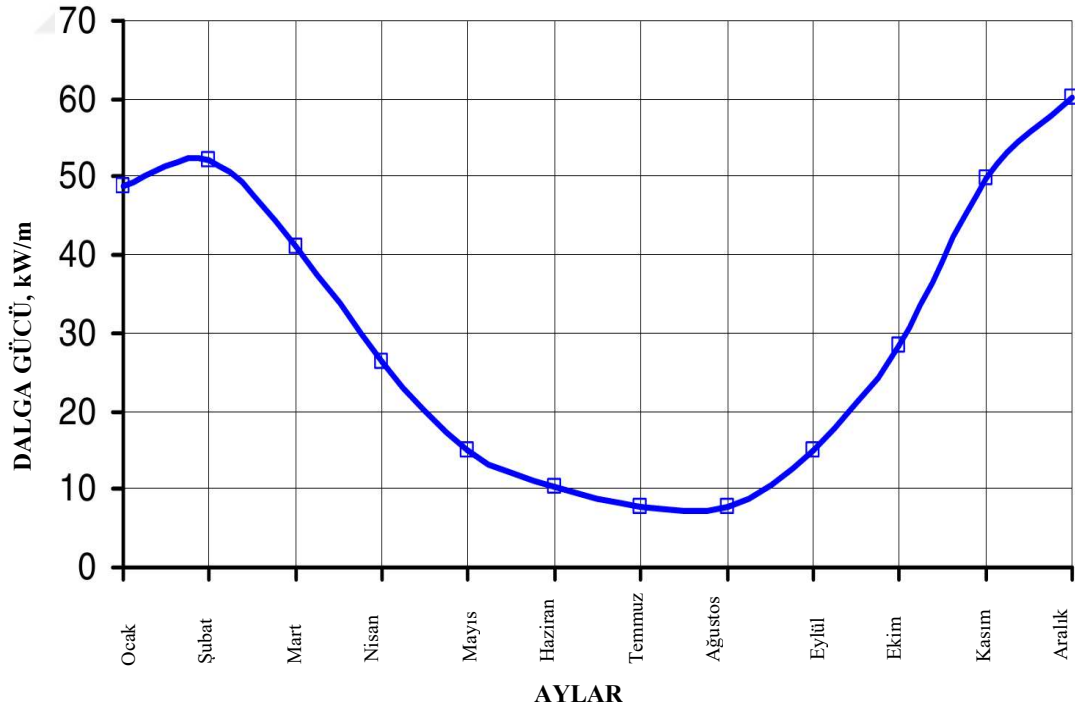
Şekil 2.42 : Dalga hızının dalga boyuna ve deniz derinliğine bağlı olarak değişmesi (derin sular, orta derinlikteki sular ve siğ sular).

Su derinliğinin dalga karakteristikleri üzerindeki etkisini daha iyi anlamak için farklı derinlikteki dalgalar simüle edilerek dalga hızının dalga boyuna ve deniz derinliğine bağlı olarak değişmesi Şekil 2.42'deki gibi bulunmuştur.

Eşitlik 2.4 ve eşitlik 2.5'teki dalga boyu ve dalga hızı denklemleri kullanıldığında, Şekil 2.42'nin turuncu ile taranı alanında görüldüğü gibi, derin denizliklerdeki dalga hızının derinlikten bağımsız olarak değiştiği görülür. Ancak yine Şekil 2.42'de görüldüğü üzere dalga hızı ve dalga boyu, dalga periyoduna bağlı olarak değişir.

Şekil 2.42'nin yeşil ile taralı alanında gösterilen orta derinlikteki deniz sularında dalga hızı ve dalga boyu deniz derinliğiyle artar. Aynı şekilde mavi ile gösterilen sığ deniz sularında dalga hızı ve dalga boyu deniz derinliğine bağlıdır. Derinlik arttıkça dalga boyu ve dalga hızı da artmaktadır.

Dalgaların yükseklikleri sadece derinliklerine göre değil aynı zamanda mevsimsel olarak da değişmektedir. Dolayısıyla dalgalardan elde edilebilecek birim güç de değişen dalga yüksekliği ile birlikte değişmektedir. Örnek olarak, Oregon'da yapılan 10 yıllık bir veri toplama çalışması yaz aylarında 10kW/m'lik güce sahip olan deniz dalgalarının aynı bölgede kış aylarında 50kW/m'ye çıktığını göstermiştir. Şekil 2.43'te Oregon'daki bir bölgede yapılan ölçümler sonucunda elde edilen aylara göre metre başına düşen birim güç değerleri verilmiştir [50].



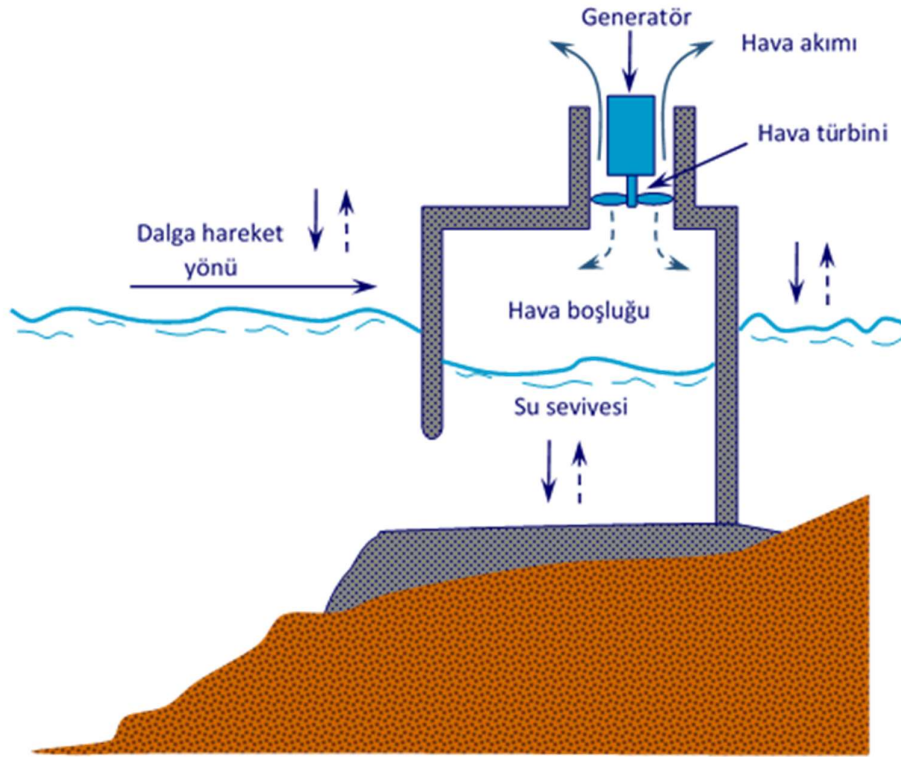
Şekil 2.43 : Oregon'da yapılan bir ölçüme göre dalga gücünün aylara bağlı olarak değişimi [50].

A world map illustrating the percentage of the population with access to electricity by country in 2008. The map uses a color scale where darker shades of blue represent lower percentages and red represents higher percentages. Numerical values are provided for many countries, indicating the specific percentage of the population with access to electricity.

Country	Percentage (%)
Algeria	49
Algeria	89
Algeria	92
Algeria	70
Algeria	60
Algeria	40
Algeria	26
Algeria	19
Algeria	12
Algeria	21
Algeria	34
Algeria	40
Algeria	66
Algeria	50
Algeria	40
Algeria	23
Algeria	50
Algeria	40
Algeria	74
Algeria	29
Algeria	97
Algeria	42
Algeria	33
Algeria	40
Algeria	24
Algeria	17
Algeria	25
Algeria	72
Algeria	42
Algeria	33
Algeria	40
Algeria	24
Algeria	17
Algeria	15
Algeria	20
Algeria	43
Algeria	41
Algeria	33
Algeria	40
Algeria	22
Algeria	102
Algeria	53
Algeria	8
Algeria	43
Algeria	15
Algeria	12
Algeria	13
Algeria	11
Algeria	16
Algeria	20
Algeria	40
Algeria	50
Algeria	74
Algeria	29
Algeria	97
Algeria	42
Algeria	33
Algeria	40
Algeria	24
Algeria	17
Algeria	25
Algeria	72
Algeria	42
Algeria	33
Algeria	40
Algeria	24
Algeria	17
Algeria	15
Algeria	20
Algeria	43
Algeria	41
Algeria	33
Algeria	40
Algeria	22
Algeria	102
Algeria	53
Algeria	8
Algeria	43
Algeria	15
Algeria	12
Algeria	13
Algeria	11
Algeria	16
Algeria	20
Algeria	40
Algeria	50
Algeria	74
Algeria	29
Algeria	97
Algeria	42
Algeria	33
Algeria	40
Algeria	24
Algeria	17
Algeria	25
Algeria	72
Algeria	42
Algeria	33
Algeria	40
Algeria	24
Algeria	17
Algeria	15
Algeria	20
Algeria	43
Algeria	41
Algeria	33
Algeria	40
Algeria	22
Algeria	102
Algeria	53
Algeria	8
Algeria	43
Algeria	15
Algeria	12
Algeria	13
Algeria	11
Algeria	16
Algeria	20
Algeria	40
Algeria	50
Algeria	74
Algeria	29
Algeria	97
Algeria	42
Algeria	33
Algeria	40
Algeria	24
Algeria	17
Algeria	25
Algeria	72
Algeria	42
Algeria	33
Algeria	40
Algeria	24
Algeria	17
Algeria	15
Algeria	20
Algeria	43
Algeria	41
Algeria	33
Algeria	40
Algeria	22
Algeria	102
Algeria	53
Algeria	8
Algeria	43
Algeria	15
Algeria	12
Algeria	13
Algeria	11
Algeria	16
Algeria	20
Algeria	40
Algeria	50
Algeria	74
Algeria	29
Algeria	97
Algeria	42
Algeria	33
Algeria	40
Algeria	24
Algeria	17
Algeria	25
Algeria	72
Algeria	42
Algeria	33
Algeria	40
Algeria	24
Algeria	17
Algeria	15
Algeria	20
Algeria	43
Algeria	41
Algeria	33
Algeria	40
Algeria	22
Algeria	102
Algeria	53
Algeria	8
Algeria	43
Algeria	15
Algeria	12
Algeria	13
Algeria	11
Algeria	16
Algeria	20
Algeria	40
Algeria	50
Algeria	74
Algeria	29
Algeria	97
Algeria	42
Algeria	33
Algeria	40
Algeria	24
Algeria	17
Algeria	25
Alger	

2.3 Salınlımlı Su Kolonunun (OWC) Matematiksel Modellemesi

Son yıllarda salınlımlı su kolonu dalga dönüşüm sistemleri üzerine yapılan çalışmalar bu sistemin kullanımını giderek popüler hale getirmektedir. Çalışmaların temeli hidrolik enerjinin en efektif şekilde mekanik enerjiye dönüşümünü sağlamak ve bu amaçla kullanılacak olan en elverişli kendinden doğrultmalı türbin tipinin belirlenmesine dayanmaktadır. Hava türbini ve generatör grubu ile kullanılan bir salınlımlı su kolonu modeli Şekil 2.45'te görülmektedir.



Şekil 2.45 : Salınlımlı su kolonu (OWC) dalga enerjisi dönüşüm sistemi.

2.3.1 Salınlımlı su kolonunun (OWC) çalışma şekli

Dalga enerjisinin temel dönüşümüne, ya yüzen bir cisim (şamandıra) ya da dalga hareketiyle salınım yapan katı bir öge ya da bir yapı içerisinde titreşen bir sistem tarafından ulaşılmaktadır. Potansiyel olarak, dalga enerjisi donanımında kullanılan en başarılı cihaz salınlımlı su kolonu (OWC) dalga enerjisi dönüştürücüdür. Yüzen veya Şekil 2.45'te gösterildiği gibi deniz seviyesinin altında yer alan salınlımlı su kolonu odasının suya daldırılmış olan bölümündeki bir açıklıktan gelen dalga hareketiyle birlikte su girişine izin verilir. Gelen dalga hareketinin tepesi ve çukuru belirli bir frekansta salınım yaparak dalgada enerji oluşturur. Salınlımlı su kolonu içerisinde kinetik enerji pnömatik enerjiye dönüştürülür.

Bu prensipte gelen dalga hareketi değişken basınç odası içerisindeki dikine osilasyon hareketini tahrik ederek mekanik enerjiye dönüştürülmesini sağlar. Osilasyon yapan hava sütununundaki enerjinin mekanik enerjiye dönüşümü, doğrultulmuş hava akımını tek yönlü valf sistemleri ve konvansiyonel türbinlerin birlikte kullanımı ile elde edilebilir.

Konvansiyonel türbinlerin kullanılması durumunda giren ve çıkan havanın valfler yardımı ile farklı kanallara yönlendirilerek türbin kanatlarına aktarılması gerekir. Bu yöntem hem karmaşık bir yapı gerektirir, hem de sistemde valflerin kullanılması verimi ciddi ölçüde düşürürken sistem maliyetini de arttırmaktadır.

Konvansiyonel türbinler yerine kendinden doğrultmalı hava türbinleri kullanıldığı takdirde doğrultucu valflere gerek duymaksızın bir sistem tasarlanabilmektedir. Bu türbinler kanatlarına gelen basınçlı hava hangi yönden olursa olsun sürekli aynı yönde dönme özellikleri nedeniyle salınlımlı su kolonu sistemlerinde kullanılabilecek en elverişli sistemlerdir.

Diğer yandan kendinden doğrultmalı hava türbinleri su içerisinde hareketli parçalarının olmaması, basit yapıda olmaları, fazla arayüz içermemeleri, mekanik parçalarının az olması, dişli kutusu gerektirmemeleri, hidrolik parçalara ihtiyaçlarının olmaması ve değişken hızlı hava akışında çalışabilmeleri nedeniyle diğer sistemlere göre daha az karmaşık, daha sağlam ve daha güvenilir yapıdadırlar.

2.3.2 Salınlımlı su kolonunda kullanılan kendinden doğrultmalı hava türbinleri

Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinde kullanmak için geliştirilmiş çok sayıda farklı yapıda kendinden doğrultmalı hava türbini yapısı mevcuttur.

Bu topolojileri birbirinden ayıran çok sayıda belirleyici özellik olmasına karşın kullanılacak olan türbinin çok iyi analiz edilmesi ve kullanılacağı yerdeki dalga karakteristiğinin çok iyi tanınması gerekir. Günümüzde kendinden doğrultmalı hava türbinleri hazır satın alınıp sisteme direk entegre edilecek kadar yaygın olarak üretilmedikleri için türbinin kullanılacağı dalga enerjisi dönüşüm sisteminin karakteristiklerine uygun olacak biçimde özel olarak tasarlanması gerekir. Bu da ne yazık ki hava türbinlerinin üretimini pahalı bir hale getirmektedir.

Türbin seçiminde en önemli kriterlerinden biri, dalga dönüşüm sisteminin düşük hızlardaki çalışması esnasında meydana gelecek olan tutma mukavemetinin değeri ve makinanın fiziksel büyüklüğüdür.

Türbinin karşılayacağı gücün miktarı türbinin fiziksel büyüklüğü ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla türbin seçiminde amaç küçük ebatlı makina ile büyük güçlü dalgalarda çalışabilmektir. Türbin tipinin seçiminde önemli belirleyici rol oynayan diğer unsurlar ise maliyet, verim ve dayanıklılık olarak sıralanabilir.

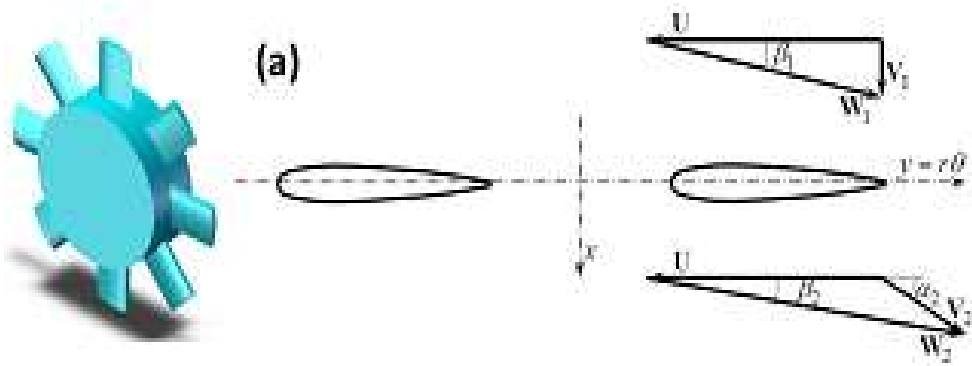
Hava türbinleri kalkış karakteristiklerinin çok zayıf olması, çalışma verimlerinin düşük olması, diğer konvansiyonel türbinlere göre daha yüksek gürültüde çalışmaları, çalışma aralıklarının küçük olması gibi bir takım dezavantajlar içermektedirler. Kendinden doğrultmalı hava türbinlerinin bu özelliklerini iyileştirmek için özellikle 1980 - 1990 yılları arasında Akabane, Katsuhara, Richard, Inoue, Kim, Weiskopf, Setoguchi, Takao ve McCormick tarafından pek çok farklı hava türbini çalışması yapılmıştır. Kendinden doğrultmalı hava türbinleri genel olarak aşağıdaki gibi gruplandırılabilir [51 - 66].

- Wells türbinleri
- Impulse türbinleri
- Radyal tip türbinler

2.3.2.1 Wells türbinleri

Şekil 2.46’da kendinden doğrultmalı bir hava türbini olarak çalışan Wells türbini yer almaktadır. Bu türbin osilasyonlu hava akımında sadece tek yönde hareket eder, bu yüzden dönmeyen (non return) valf sistemine ihtiyaç duymazlar. Ayrıca bu türbin dalga enerjisi dönüşümü için en basit ve muhtemelen en ekonomik türbindir.

Buna rağmen daha önce yapılan çalışmalara göre wells türbini yüksek akış sabitinde düşük verimle çalışmak ve konvansiyonel türbinlere göre zayıf başlama karakteristiği gibi bir takım dezavantajlar içermektedirler. Bu nedenle Wells türbini ile çalışan salınlımlı su kolonu dalga dönüşüm sistemlerinde dönüşüm sistemlerinin bütün olarak verimi en iyi durumda %60 civarındadır. Bununla birlikte Wells türbinleri yüksek rotasyonel hıza sahip olmaları nedeniyle gürültü seviyeleri yüksektir ve sıkça bakıma ihtiyaç duyarlar [55].

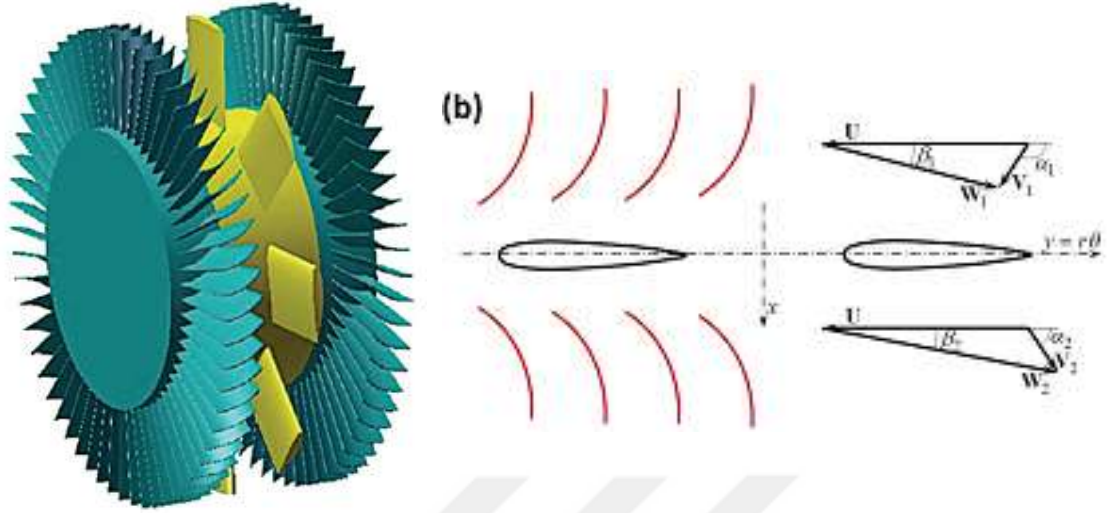


Şekil 2.46 : Kılavuz kanatları olmayan Wells türbini [55].

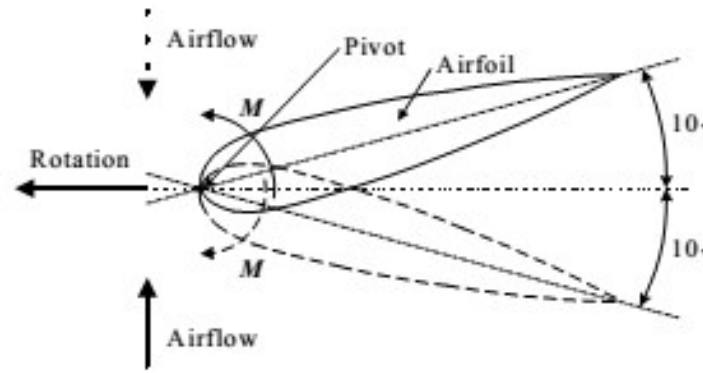
İdeal bir dalga şeklinde dalga tepesinin yüksekliği ve dalga çukurunun derinliği birbirine eşittir. Ancak gerçek deniz dalgalarında dalga tepeleri dalga çukurlarına göre daha yüksektir. Bu durum salınımlı su kolonu içerisindeki hava akışını da etkiler, buna göre hava haznesinden çıkan havanın anlık hızı hava haznesine giren havanın anlık hızından daha yüksektir.

Hava haznesine giren ve çıkan hava basıncının kanatlar üzerinde meydana getirdiği basınç farkını dengelemek için, kanatları karşı karşıya gelmeyecek şekilde düzenlenmesini sağlayan Şekil 2.47’de görüldüğü gibi bir kanat yapısı önerilmiştir.

Şekilde görüldüğü gibi birbirine ters yönde konumlandırılmış kılavuz kanatlar havanın hem hazneden çıkışında hem de hazneye girişinde havayı kanatlar üzerine yönlendirerek türbinin dönüşünü daha verimli hale getirmektedirler.



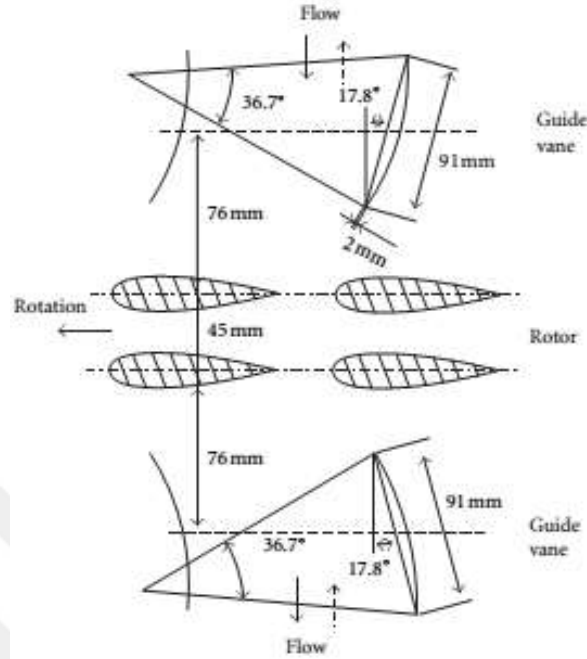
Şekil 2.47 : Kılavuz kanatlarına sahip Wells türbini [55].



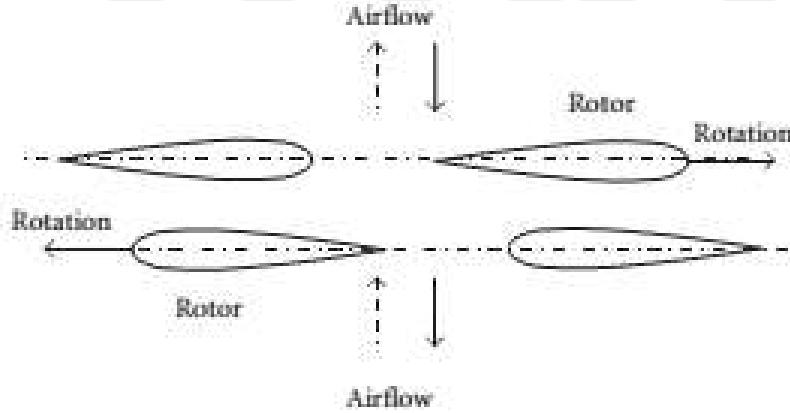
Şekil 2.48 : Kendinden açı kontrollü Wells türbini [55].

Şekil 2.47’de görüldüğü gibi kılavuz kanatlar yerine kendinden açı kontrollü Wells türbinleri de kullanılabilir. Ancak bu türbinler hareketli parçaların olmasından ötürü daha çok servis gerektirirler ve daha az güvenilirlerdir.

Wells türbinleri için önerilen diğer yöntemler de Şekil 2.49 ve Şekil 2.50’de görüldüğü üzere sırasıyla çift kanatlı Wells türbinleri ve ters dönüş yönlü Wells türbinleridir. Burada amaç hava kanatlarının ve dolayısıyla da türbin üzerindeki itme kuvvetinin artırılmasıdır.



Şekil 2.49 : Çift kanatlı ve kılavuz kanatlı Wells türbini [55].

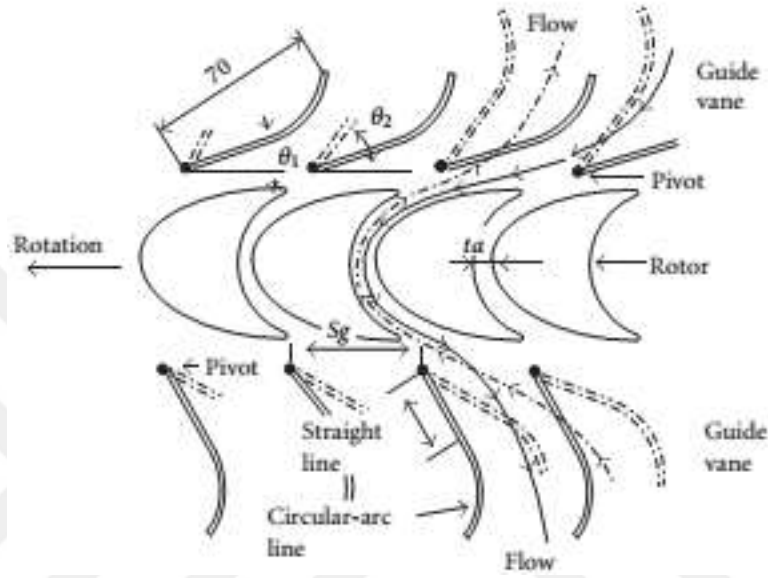


Şekil 2.50 : Ters dönüş yönlü kanatlara sahip Wells türbini [55].

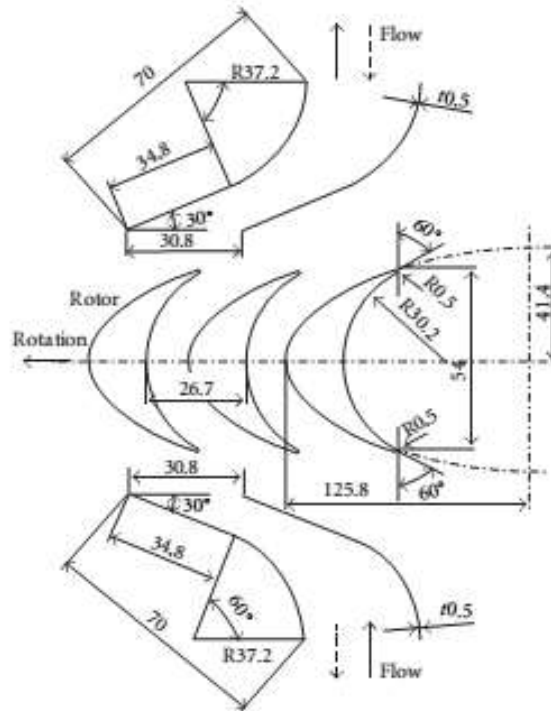
2.3.2.2 Impulse türbinleri

Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinde kullanmak için yüksek performanslı, kendinden doğrultmalı hava türbini geliştirmek amacıyla yapılan çalışmalar arasında Wells türbinine kıyasla en çok önerilen türbin tipi Impulse türbinidir. Türbinin verimli çalışmasını sağlamak için Impulse türbininde türbin pervanesinin her iki tarafında kılavuz kanatları bulunmaktadır. Bu iki komşu kılavuz kanat, hava kanalı oluşturacak ve pervanenin merkez çizgisine simetrik olacak şekilde konumlandırılırlar. Impulse türbinlerinin rotor kanat yapıları klasik buhar türbinlerinin modifiye edilmiş şeklidir [53].

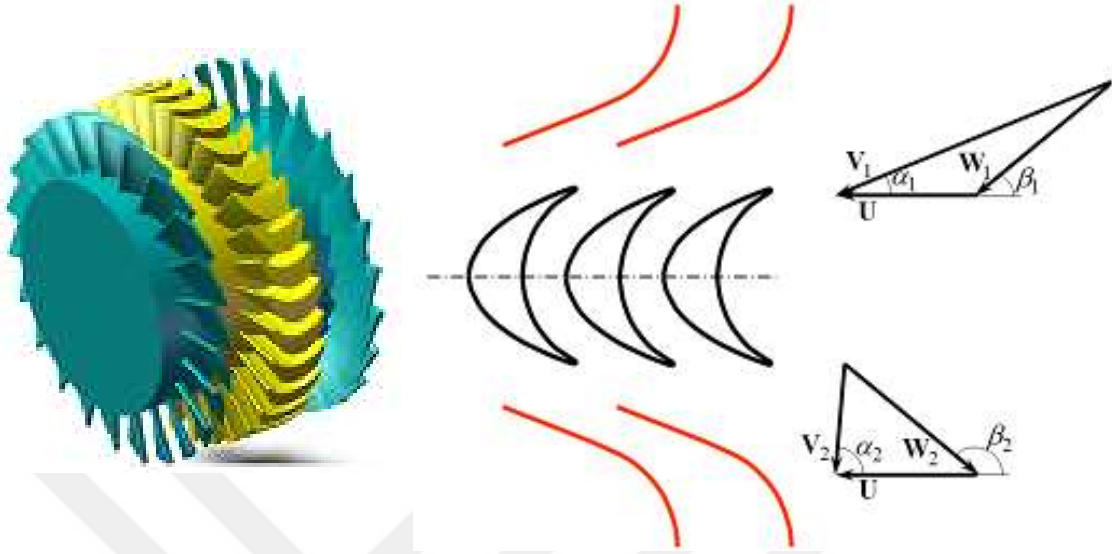
Impuls türbininin Wells türbinine kıyasla en belirgin özelliği kanat yapısının konkav-konveks şeklinde olmasıdır. Bununla birlikte, Wells türbinlerinde yer alan iki katlı kanat yapısı yerine Impulse türbinlerinde üç katlı kanat yapısı yer alır. Bu kanat yapısına sahip Impulse türbini Şekil 2.51’de yer almaktadır.



Şekil 2.51 : Kendinden açı kontrollü kılavuz kanatlarına sahip Impulse türbini yapısı [59].

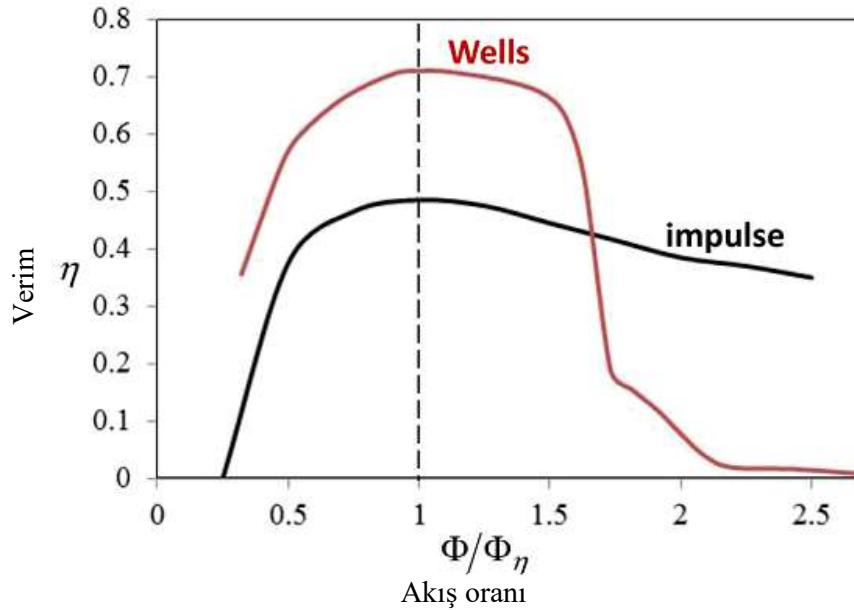


Şekil 2.52 : Sabit kılavuz kanatlı Impulse türbini [59].



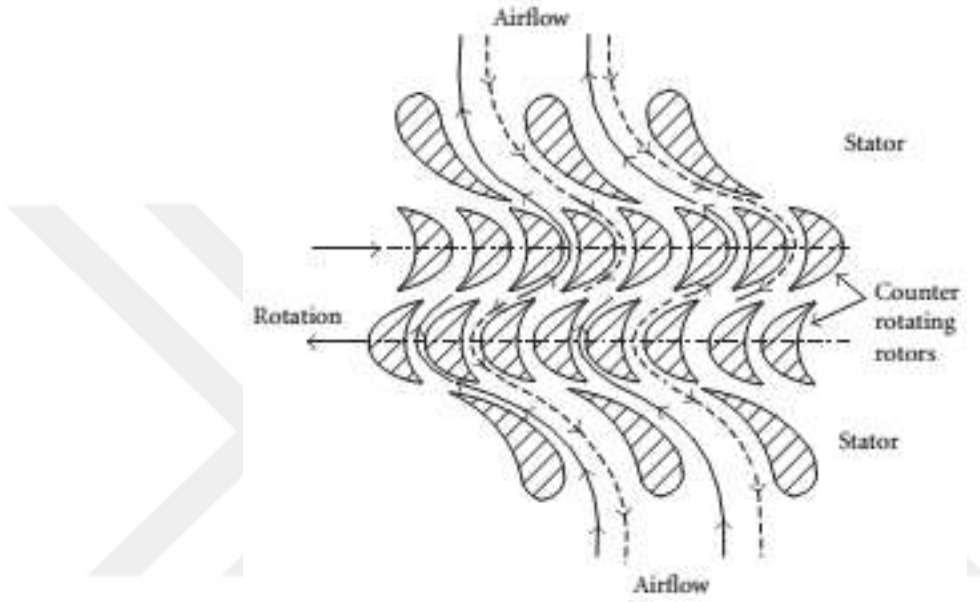
Şekil 2.53 : Impulse türbininin kılavuz kanatları ve pervanesiyle üç boyutlu gösterilimi [55].

Literatürde Impulse türbinleri ile Wells türbinlerinin verimlerini karşılaştırmak için çok detaylı çalışmalar yapılmamıştır. Ancak Impulse türbininin Wells türbinine göre daha geniş çalışma aralığının olduğu bilinmektedir. Literatürde uygulamaya dayalı çok fazla karşılaştırma çalışması yer almamasına karşın Falcao'nun 2012 yılında yaptığı bir çalışmada Impulse ve Wells türbinlerinin performans karşılaştırması Şekil 2.54'teki gibi verilmiştir [62]. Bu çalışmada Wells türbini için Şekil 2.55'te verilen verim/akış oranı eğrisi dikkate alınacaktır.



Şekil 2.54 : Impulse türbini ve Wells türbininin verim/akış oranı eğrilerinin karşılaştırılması [62].

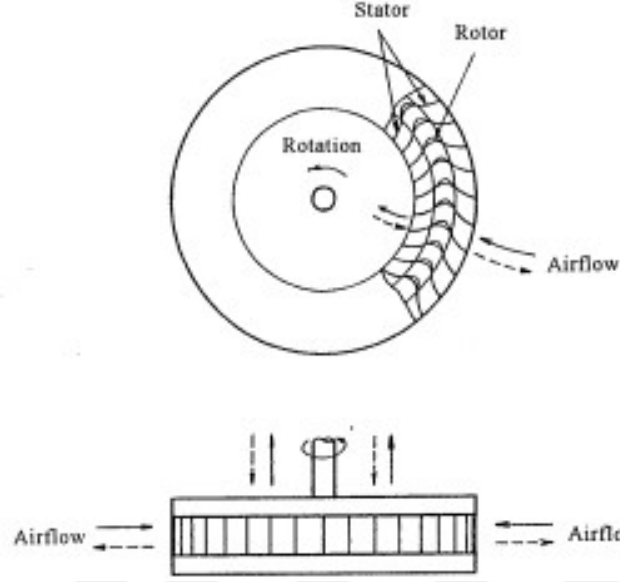
Şekil 2.55’te yer alan McCormick tipi impulse türbini ters yönlü konveks kanatlarının yerleştirilmesi sayesinde arttırılan hava kanalları nedeniyle diğer türbinlere kıyasla daha küçük çapta daha yüksek güç üretebilme kapasitesine sahiptir. Ancak bu türbinlerin en büyük dezavantajları yüksek gürültüyle çalışmaları ve üretimlerinin pahalı olmasıdır. Bu nedenle uygulamada daha nadiren kullanılmaktadırlar [62], [63].



Şekil 2.55 : McCormick türbini [62].

2.3.2.3 Radyal tip türbinler

Radyal tip türbinin özellikleri literatürde bulunmasa da, türbin verimliliği daha önceki çalışmalara göre daha düşük olduğu bilinmektedir. Bu dezavantajın üstesinden gelmek için, yazarlar tarafından dalga enerjisi dönüşümü için Şekil 2.56’da gösterilen aktif kontrollü klavuz kanatlı radyal türbin kullanımı önerilmiştir [59].



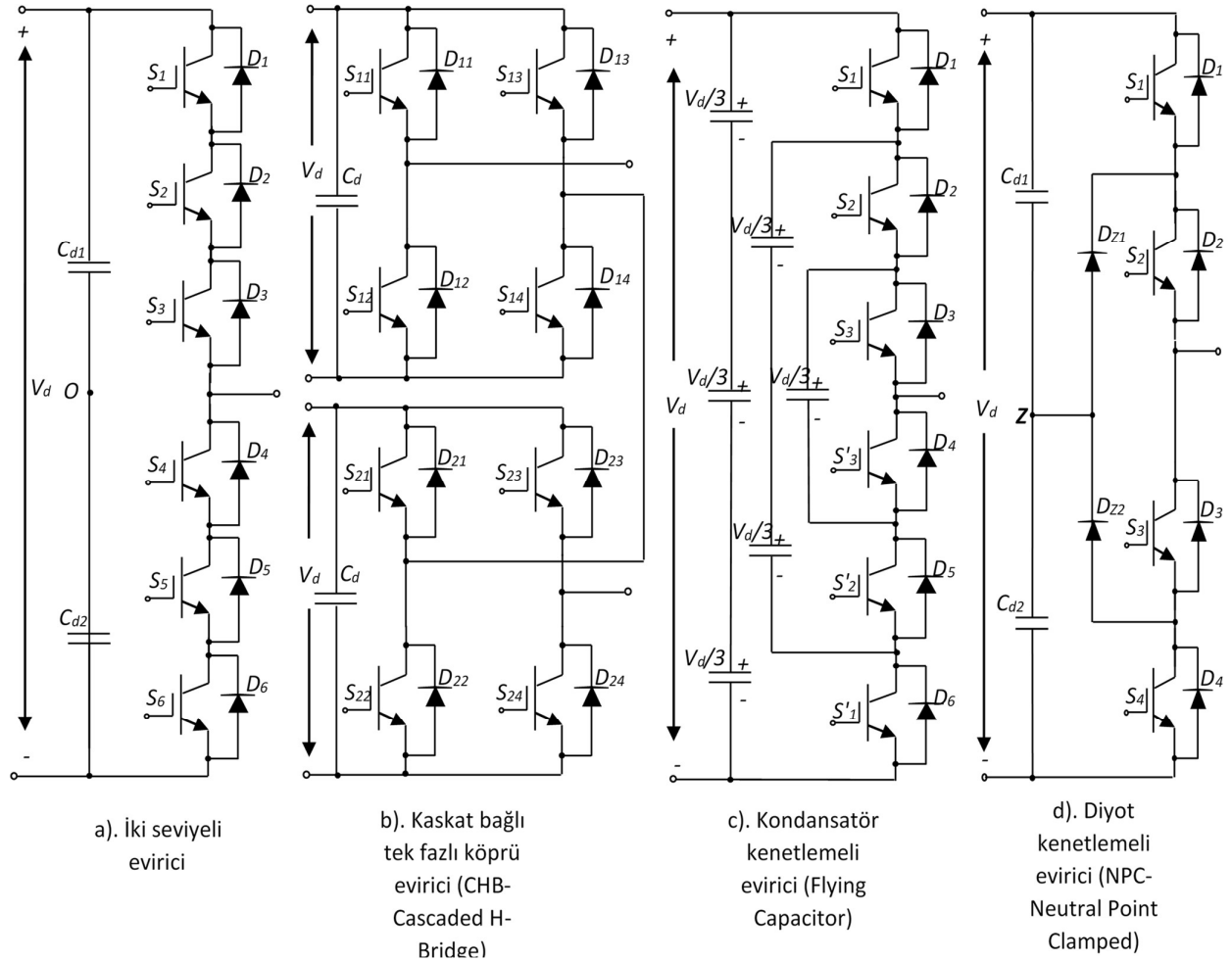
Şekil 2.56 : Radyal hava türbini [59].

2.4 Çok seviyeli çevirici güç elektroniği devreleri

Güç elektroniği uygulamalarında yüksek gerilim ve yüksek akımlarda çalışma 1980'lerde GTO (Gate Turn Off) tristörlerin marketlerde yerini almasıyla başlamıştır. GTO'lar 90'ların sonuna kadar yüksek güçlü IGBT ve GCT (Gate Commutated Thyristor) yarı iletken anahtarlama elemanlarının yaygın hale gelmesine kadar güç elektroniğindeki yerini korumuştur. Günümüzde IGBT ve IGCT'lerdeki büyük gelişmeler sayesinde artık MW seviyesindeki uygulamalarda da yüksek frekanslı anahtarlama yapmak mümkündür. IGBT kullanılarak gerçekleştirilen mevcut uygulamaların güç aralığı 100MW'a kadar uzanmaktadır.

Bu çeviriciler kullanılma amaçlarına bağlı olarak gerilim kaynaklı çevirici veya akım kaynaklı çevirici olmak üzere ikiye ayrılırlar. Gerilim kontrollü eviriciler doğru gerilimi sabit genlik ve frekanstaki alternatif gerilime çevirirken, akım kontrollü eviriciler doğru akımı sabit genlik ve frekanstaki alternatif akıma çevirirler. Dalga enerjisi uygulamalarında evirici çıkışındaki gerilimin şebeke gerilimi ile senkronize edilmesi gerektiği için gerilim kaynaklı evirici yapısı kullanılması gerekmektedir.

Yüksek güçlü uygulamalarda giriş ve çıkış güç kalitesi değeri çok daha önemli hale gelmektedir. Giriş güç kalitesinin değeri büyük ölçüde sistem topolojisi ve sistemde kullanılan anahtarlama elemanının nasıl kontrol edildiğine bağlı olarak değişir. Sistemin ihtiyacına ve mevcut anahtarlama elemanlarının gücüne bağlı olarak kullanılan çeviricinin topolojisi farklılık göstermektedir. Şekil 2.57’de yüksek güç ve yüksek gerilim gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılan çeviricilerin tek fazlı gösterimleri yer almaktadır [64].



Şekil 2.57 : Gerilim ara devreli topolojilerin tek fazlı olarak gösterimi.

Anahtarlama kayıpları yüksek güçlü uygulamalarda düşük güçlü uygulamalardan daha önemlidir. Bu tip uygulamalarda anahtarlama kayıplarının düşürülmesi ve buna bağlı olarak soğutma ünitelerinin küçültülmesi için anahtarlama frekansı belirli değerin altında tutulmaya çalışılır. Anahtarlama frekansını çok arttıramamanın diğer bir nedeni ise kullanılan malzemenin ısıl direncine bağlı olarak ısı transferini optimum bir seviyede tutmaya çalışmaktır.

Yüksek güçlü uygulamalarda GTO'lar için anahtarlama frekansı genelde 100 - 200Hz, IGBT ve GCT'ler için ise 50 -1000Hz civarında tutulur. Ancak giriş ve çıkıştaki dalga şeklinde meydana gelen harmonik distorsiyonunun belirli değerin üzerine çıkmaması ve anahtarlama elemanı üzerindeki dV/dt oranının çok yüksek olmaması için anahtarlama frekansının uygulamaya göre optimize edilmesi gerekir, bu nedenle anahtarlama frekansı bu belirtilen değerlerden farklı da seçilebilir.

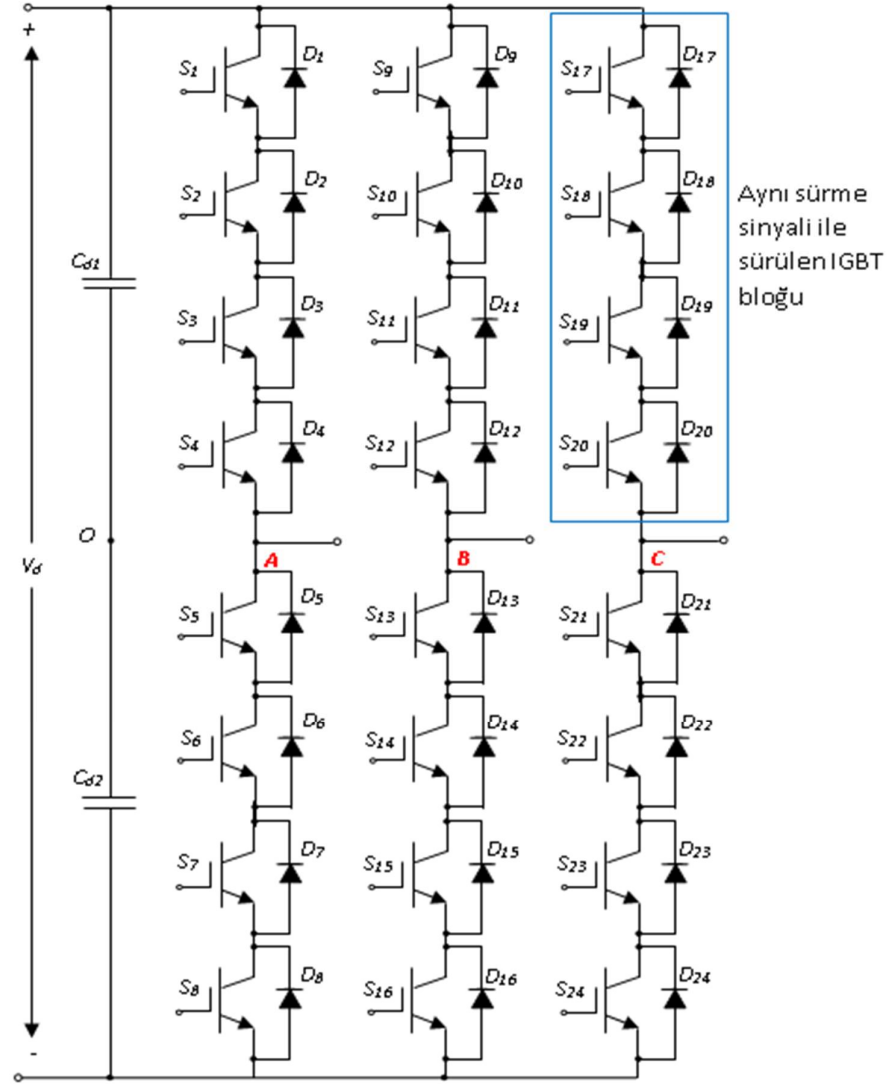
Şekil 2.57'de yer alan yüksek gerilim ve yüksek güçlü uygulamalarda kullanılan topolojilere ilişkin detaylı bilgi aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

2.4.1 İki seviyeli gerilim kaynaklı çevirici

İki seviyeli yüksek güçlü çeviriciler klasik iki veya üç fazlı tam köprü çeviricilerde bir yarı iletken yerine Şekil 2.58'de görüldüğü gibi istenen gerilim seviyesine göre birden fazla yarı iletken anahtar kullanılmasıyla elde edilen topolojilerdir. Bu yapıda yarı iletken anahtarlar birbirlerine senkron olarak çalıştırılırlar, dolayısıyla bir anahtar yerine kullanılan birden fazla yarı iletken anahtar aynı anda iletme veya kesime sokulur. Böylece seri bağlanmış anahtarlar anahtarlama gerilimini bir koldaki anahtar sayısıyla orantılı olarak paylaşmış olurlar [64].

İki seviyeli çevirici topolojisi çok uzun yıllardır çeşitli uygulamalarda kullanılması nedeniyle diğer çok seviyeli çeviricilere göre daha iyi bilinen ve daha basit yapıya sahip bir topolojidir. Uzun yıllardır kullanılmasından ötürü bu topolojinin kontrol yöntemleri çok iyi analiz edilmiş ve bu konuda pek çok anahtarlama yöntemi (standart dalga genlik modülasyonu, sinüsoidal dalga genlik modülasyonu, vs.) geliştirilmiştir.

İki seviyeli çeviricilerin en önemli avantajlarından bir tanesi, sistemin standart bir yapıya sahip olmasından ötürü, kullanılan IGBT anahtarı, sürücü devresi ve snubber devresinin bütün bir modül halinde temin edilmesinin mümkün olmasıdır. Modüler yapı sayesinde bakım esnasında kolay değişim imkanı ve üretimde düşük fiyat avantajı sağladığı için iki seviyeli çevirici uygulamada daha çok tercih edilen bir yapı haline gelmiştir.



Şekil 2.58 : Üç fazlı iki seviyeli çevirici bloğu.

İki seviyeli çeviricilerde tasarlanan sistemin çalışma gerilimi değiştiğinde birbirine seri bağlı anahtarların sayısının gerilime bağlı olarak artırılması veya azaltılması yeterli olmaktadır. Bir kolun alt veya üst bölgesindeki anahtarların tümünün sürme sinyali birbiriyle aynı olduğundan aynı kol üzerindeki anahtar sayısı değişse dahi sürme sinyali ve sistemin kontrol yapısı değişmemektedir. Bu nedenle kontrol yapısı diğer çok seviyeli çevirici tiplerine göre daha kolay ve daha ucuzdur.

Diğer çok katlı çevirici topolojileri ile kıyaslandığında standart iki katlı çeviricide kullanılan yarı iletken anahtar sayısı çok daha azdır. Ancak anahtarların güvenilir çalışma bölgelerinde (SOA) çalışabilmeleri için kullanılması gereken anahtar sayısından bir veya iki adet daha fazla anahtar kullanılması gerekmektedir. Bu durumda bir anahtar çalışma esnasında zarar gördüğünde (IGCT ve benzeri tür bir yarı iletken anahtar kullanıldığında anahtar zarar gördüğünde kısa devre olur) diğer anahtarlar sorunsuz olarak çalışmaya devam edebilmektedirler.

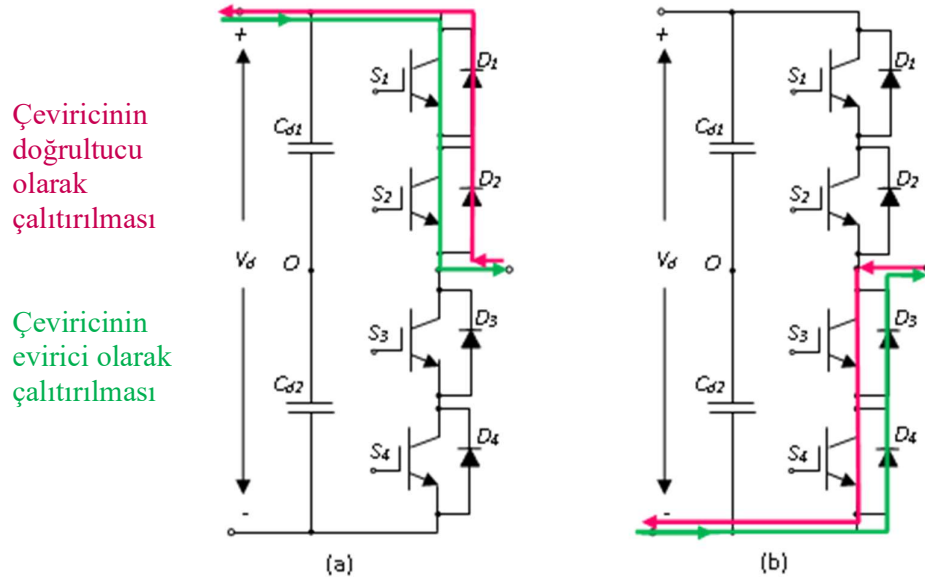
İki seviyeli yüksek güçlü çeviriciler bütün bu avantajlarının yanında bazı çok önemli dezavantajlar da içermektedir. Bu da tasarımcıları yük ihtiyacına göre başka topolojilerin arayışına itmiştir. Bu dezavantajlardan en önemlisi iki seviyeli çeviricilerin harmonik seviyelerinin diğer çok seviyeli-yüksek güçlü çeviricilere göre çok daha yüksek harmonik bileşenleri içermeleridir. Bundan dolayı iki seviyeli çeviricilerin çıkışlarındaki harmonik bileşenlerini bastırmak için büyük ebatlardaki filtreler ihtiyacı duyulmaktadır.

Diğer bir önemli sorun ise anahtarlar üzerinde çok yüksek dV/dt meydana gelmesidir. Ayrıca anahtarların kapanması esnasında bir anahtar doğru gerilim barasının gerilim değerine eşit değerdeki bir gerilime maruz kalabilir, bu da seri bağlı anahtarların normal çalışma geriliminden daha yüksek bir gerilim stresi altında kalacağından daha yüksek gerilim değerinde seçilmesi gerektiği anlamına gelir.

Seri bağlı anahtarlar kesim konumundayken anahtarların statik gerilim paylaşımları birbirlerinden farklı olabilir. Eşit gerilim paylaşımını sağlayabilmek için her bir anahtara paralel büyük değerli bir direnç kullanılması gerekir. Benzer şekilde, her bir anahtarın anahtarlama hızının birbirinden farklı olabilmesi nedeniyle, anahtarların iletme veya kesime sokulması sırasındaki gerilim paylaşımları da birbirlerinden farklı olabilmektedir. Biraz daha karmaşık olan bu dinamik gerilim paylaşımı özel bazı anahtarlama teknikleri veya özel snubber devreleri yardımıyla çözülebilmektedir. İki seviyeli çeviricilerin çıkışındaki gerilimin büyük gerilim kademelerine sahip olması motor gibi yüklerde zamanla izolasyon problemlerine de neden olabilmektedir.

İki seviyeli çeviricinin anahtarlama durumlarına meydana gelen pozitif ve negatif faz akımlarının yolu Şekil 2.59'da verildiği gibidir. Burada anahtarlama elemanları devredeyken akım yönü şebekeden yüke doğru, diyotlar devredeyken de akımın yönü yükten şebekeye doğru olur. Çeviricinin her fazı anahtarların konumuna göre doğru

gerilim barasının pozitif ucuna veya negatif ucuna bağlanmış olur. Dolayısıyla çıkış geriliminin pozitif ve negatif doğru gerilim değeri olmak üzere iki farklı kademesi olabilmektedir. Bu da gerilim kademeleri ve faz sayısı dikkate alındığında sekiz farklı anahtarlama durumu anlamına gelmektedir. Çizelge 2.1’de anahtarların konumlarına göre bir fazın çıkışında meydana gelebilecek gerilim değeri verilmiştir.

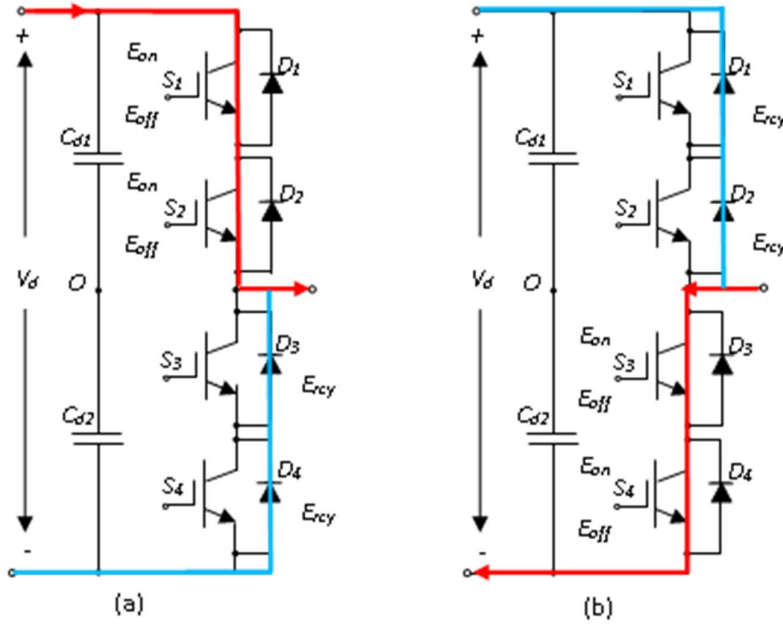


Şekil 2.59 : İki seviyeli çeviricinin anahtarlama durumlarına göre akım yolları. (a) Pozitif yarı dalga. (b) Negatif yarı dalga.

Çizelge 2.1 : Anahtarların iletim durumlarına göre iki seviyeli bir çeviricinin çıkışında meydana gelen gerilim değerleri.

Anahtarlama Durumu	A fazı için anahtarlama elemanlarının konumu		Çıkış Gerilimi
	S_1-S_2	S_3-S_4	V_{AZ}
Pozitif	1	1	$V_d/2$
Negatif	0	0	$-V_d/2$

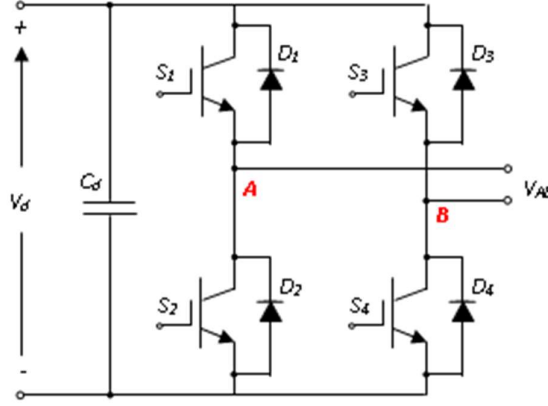
Şekil 2.60’ta yarı iletkenlerin iletim veya kesim durumlarına göre meydana gelen kayıpları gösterilmiştir. Burada anahtarlama elemanlarının iletime geçme ve kesime geçme kayıpları ile diyotlar üzerinde ters toparlanma süresince (reverse recovery time) meydana gelen kayıplar dikkate alınmıştır.



Şekil 2.60 : Yarı iletken anahtarların kayıpları. (a) Pozitif yarım dalga. (b) Negatif yarım dalga.

2.4.2 Kaskat bağlı çok seviyeli köprü çevirici

Kaskat bağlı çok seviyeli köprü çeviriciler günümüzde orta gerilimde çalışan yüksek güçlü çeviriciler arasında oldukça popüler hale gelmeye başlamıştır. Kaskat çeviriciler, genellikle Şekil 2.61’de yer alan tek fazlı köprü çeviricilerin alternatif akım bağlantı noktalarının birbirine kaskat olarak bağlanmasıyla elde edilmektedirler. Bu tip topolojilerde amaç meydana gelen kaskat yapının daha yüksek gerilimlerde ve düşük harmonik değeri ile çalışabilmesine imkan yaratmaktır. Bir faz üzerinde kaç adet tek fazlı köprü çevirici bloğunun kullanılacağı ise çalışılan gerilim seviyesine, ulaşılmak istenen harmonik seviyesine, sistemde meydana gelebilecek toplam kayıplara ve sistemin toplam maliyetine bağlı olarak belirlenir [65].



Şekil 2.61 : Tek fazlı tam köprü çevirici bloğu.

Kullanılan tek fazlı köprü çevirici blokları birbirleriyle eş değerde oldukları için gerektiği durumda herhangi bir modül başka bir modülle kolayca değiştirilebilmektedir. Bu da sistemin bakım maliyetlerini ve tasarımın karmaşıklığını önemli ölçüde aşağıya çekmektedir.

Kaskat yapı aynı zamanda pahalı yüksek güçlü anahtarlama elemanlarının kullanılması yerine daha küçük güçlerdeki anahtarlama elemanlarının kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Öte yandan kullanılan modül sayısına veya modüllerin doğru gerilim değerlerine bağlı olarak çıkışta elde edilen çoklu gerilim seviyesi sayesinde diğer topolojilerle kıyaslandığında çok düşük toplam harmonik ve dV/dt değerlerine ulaşmak mümkün olmaktadır.

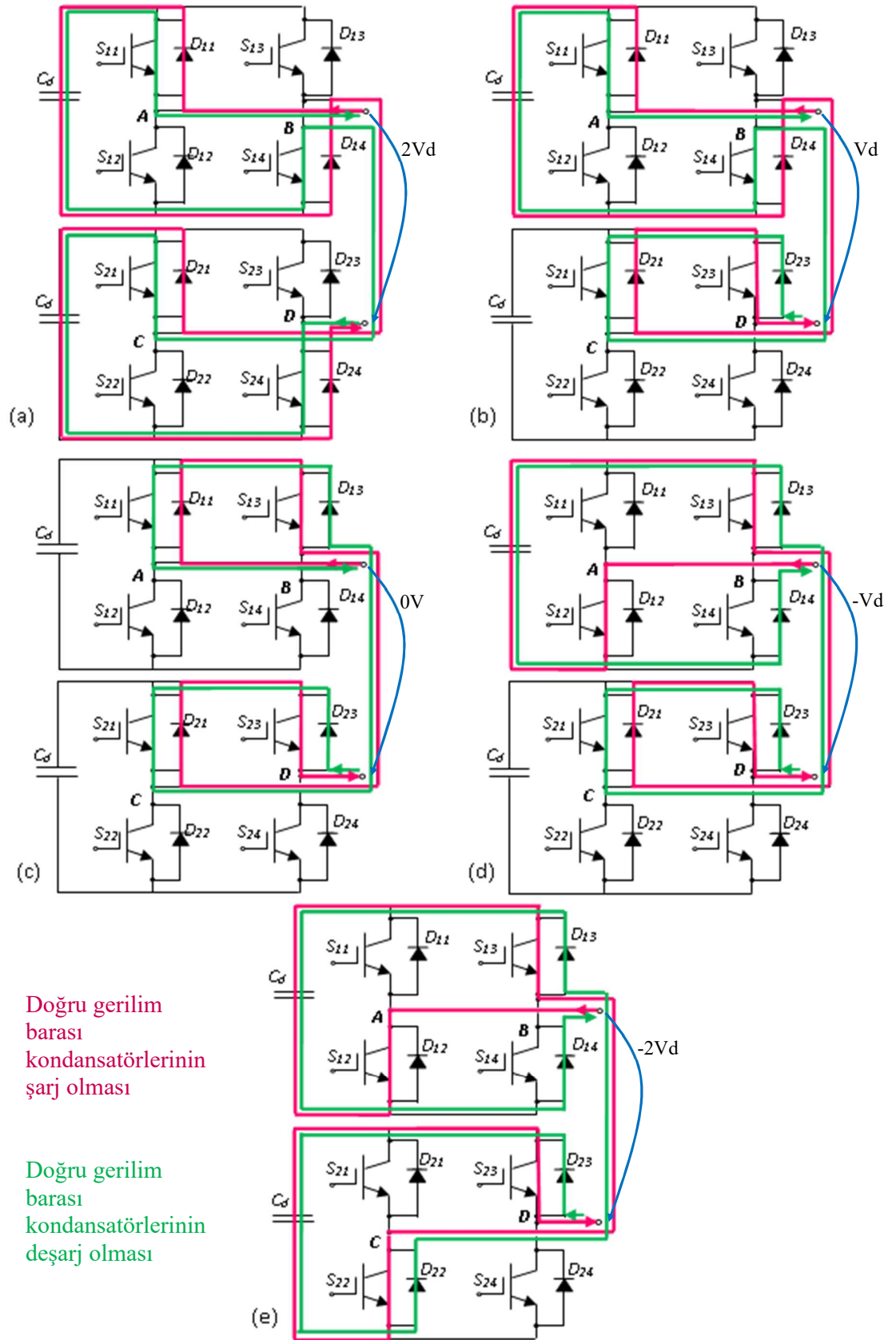
Ancak çok sayıda anahtarlama elemanının ve buna bağlı olarak çok sayıda sürücü devrenin kullanılması kaskat yapıdaki çeviricilerin maliyetini arttırmaktadır. Diğer bir önemli unsur ise her bir tek fazlı köprü çevirici doğru gerilim baralarının ayrı ayrı kontrol edilmesi ve birbirlerine eşit tutulmaları gerekir. Bu da sistemin karmaşıklığını arttırır.

Sistemin çalışma modlarını incelemek için bir faz üzerindeki iki kaskat bağlı modül örneği Şekil 2.62’de verilmiştir. Seri modül sayısı arttıkça alternatif gerilim terminalleri arasında elde edilen toplam gerilim değeri modül sayısı kadar artar. Şekil 2.62’nin a şıkında akım yolları gösterilen devrede S_{11} , S_{14} , S_{21} , ve S_{24} , anahtarları ilettime geçtiğinde A ve D uçları arasındaki toplam gerilimin $2.V_d$ gerilimine eşit olduğu görülür. Benzer şekilde, b şıkında görüldüğü gibi S_{11} , S_{14} , S_{21} , ve S_{23} anahtarları ilettime sokulduğunda ise ikinci köprü çeviricinin C ve D uçları arasındaki gerilim değeri sıfır olacağı için A ve D noktaları arasındaki gerilim değeri sadece üstteki doğru gerilim barasının gerilim değerine eşit olur. e şıkında ise S_{13} , S_{12} , S_{23} , ve S_{22} , anahtarları ilettime sokularak A ve D uçları arasındaki gerilim $-2.V_d$ gerilimine eşitlenmiş olur.

Anahtarların konumuna göre A ve D uçlarında meydana gelebilecek gerilim değerleri Çizelge 2.2’de yer almaktadır. Çizelgeden de anlaşılacağı üzere Şekil 2.62’de verilen örnekteki devrede anahtarların konumuna göre çıkış faz gerilimi beş farklı kademede gerilim değerine sahip olabilir. Çeviricinin çıkış geriliminin kaç seviyeli olacağı H bir fazın üst veya alt kolu üzerinde kullanılan modül sayısı olmak üzere $m = (2H + 1)$ denkleminde bulunur.

Çizelge 2.2 : Anahtarın iletim durumlarına göre beş seviyeli kaskat çeviricinin çıkışında meydana gelen gerilim değerleri.

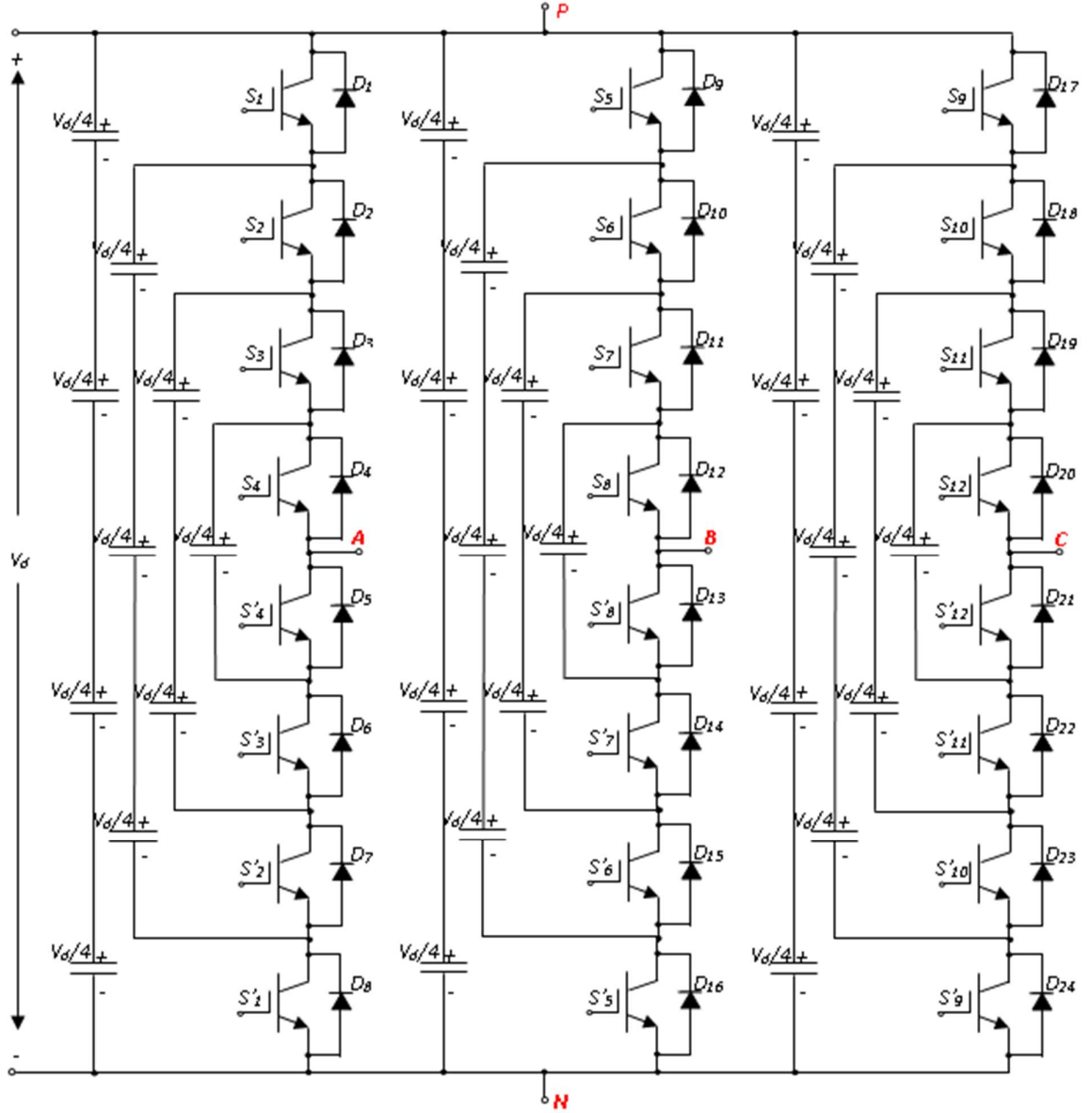
Çıkış Gerilimi	Anahtarların Konumu				Köprü Eviricilerin Çıkış Gerilimleri	
V_{AD}	S_{11}	S_{13}	S_{21}	S_{23}	V_{AB}	V_{CD}
$2V_d$	1	0	1	0	V_d	V_d
V_d	1	0	1	1	V_d	0
V_d	1	0	0	0	V_d	0
V_d	1	1	1	0	0	V_d
V_d	0	0	1	0	0	V_d
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0
0	1	1	0	0	0	0
0	1	1	1	1	0	0
0	1	0	0	1	V_d	$-V_d$
0	0	1	1	0	$-V_d$	V_d
$-V_d$	0	1	1	1	$-V_d$	0
$-V_d$	0	1	0	0	$-V_d$	0
$-V_d$	1	1	0	1	0	$-V_d$
$-V_d$	0	0	0	1	0	$-V_d$
$-2V_d$	0	1	0	1	$-V_d$	$-V_d$



Şekil 2.62 : Kaskat bağlı çeviricinin çalışma modları.

2.4.3 Kondansatör kenetlemeli çevirici

Şekil 2.63'te beş seviyeli kondansatör kenetlemeli evirici yapısı görülmektedir. Tipik olarak kondansatör kenetlemeli bir evirici topolojisi doğru gerilim konsandasörlerinin iki seviyeli bir eviricinin anahtarlarına paralel olarak eklenmesiyle elde edilir. Bir fazın alt üst kolunda yer alan (S_1, S'_1) , (S_2, S'_2) , (S_3, S'_3) ve (S_4, S'_4) anahtarlarının sürme sinyalleri birbirlerinin evriği olarak çalışırlar. Bu nedenle Şekil 2.62'teki gibi beş seviyeli bir kondansatör kenetlemeli evirici topolojisinde dört adet birbirinden bağımsız sürme sinyaline ihtiyaç vardır [66], [67].



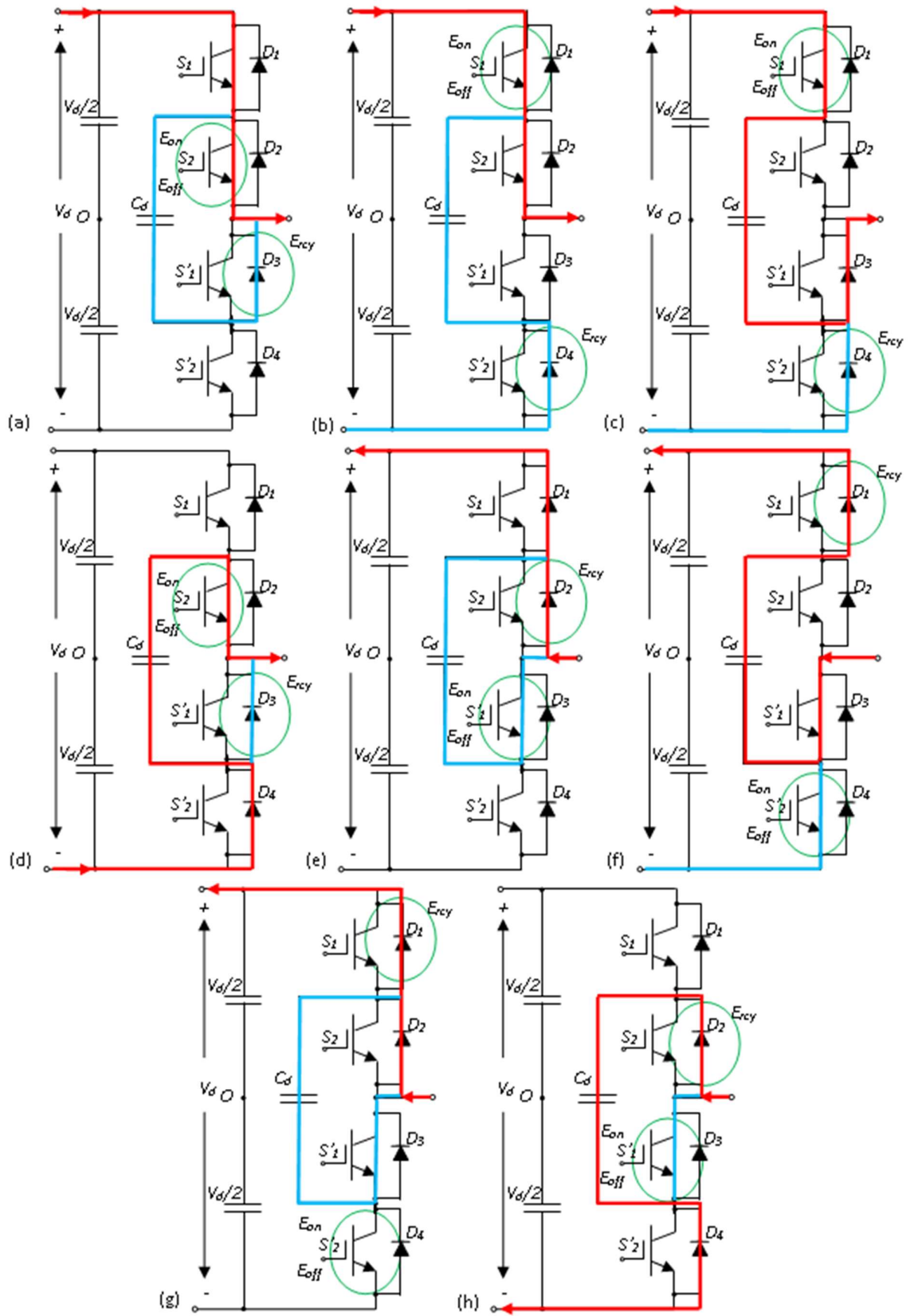
Şekil 2.63 : Beş seviyeli kondansatör kenetlemeli çevirici.

Şekil 2.63'teki kullanımda anahtarların iletme veya kesime geçme durumlarına göre çıkışta beş kademeli alternatif gerilim değeri oluşur. S_1 , S_2 , S_3 , ve S_4 anahtarları iletme geçtiğinde eviricinin A fazı ve nötr noktası (N) arasında meydana gelen gerilim değeri V_d (toplam doğru gerilim değeri) gerilimine eşit olur. Anahtarlama elemanlarından sadece S_1 , S_2 , ve S_3 iletme girerse bu durumda aynı noktalar arasındaki gerilim değeri $3.V_d/4$ 'e eşit olur. Ancak farklı anahtarların iletim-kesim durumlarına göre de aynı gerilim değeri elde edilebilmektedir. Anahtarların iletme geçme durumlarına göre A ve N noktaları arasında meydana gelen gerilim değeri Çizelge 2.3'te yer aldığı gibidir.

Çizelge 2.3 : Anahtarın iletim durumlarına göre beş seviyeli kondansatör kenetlemeli eviricinin A fazında meydana gelen gerilim değerleri.

Çıkış Faz Gerilimi	Anahtarların Konumu			
V_{AN}	S_1	S_2	S_3	S_4
V_d	1	1	1	1
$3V_d/4$	1	1	1	0
$3V_d/4$	0	1	1	1
$3V_d/4$	1	0	1	1
$3V_d/4$	1	1	0	1
$V_d/2$	1	1	0	0
$V_d/2$	0	0	1	1
$V_d/2$	1	0	0	1
$V_d/2$	0	1	1	0
$V_d/2$	1	0	1	0
$V_d/2$	0	1	0	1
$V_d/4$	1	0	0	0
$V_d/4$	0	1	0	0
$V_d/4$	0	0	1	0
$V_d/4$	0	0	0	1
0	0	0	0	0

Şekil 2.64'te pozitif veya negatif gerilim durumuna göre yarı iletken anahtarlar üzerindeki iletim kayıpları ve kenetleme kondansatörünün şarj ve deşarj durumları gösterilmiştir. İletimde olan anahtarlar doğru gerilim değerinin yarısına eşit bir gerilim değeri altında çalışırlar.



Şekil 2.64 : Anahtarlama durumlarına göre yarı iletken anahtarların kayıpları.

Kondansatör kenetlemeli evirici topolojisi iki kademeli çevirici ile benzer özellikleri taşımaktadır. Ancak çok seviyeli bir evirici olmasından ötürü bu topolojinin iki kademeli çeviriciye göre bazı avantajları vardır. Bunlar arasında en önemli olanı toplam harmonik distorsiyonunun ve dV/dt değerinin çok düşük olmasıdır. Bu nedenle bu topolojide kullanılan yarı iletken anahtarların (diyot kenetlemeli eviricilerin nötr noktalarında kullanılan diyotların aksine) çok yüksek gerilim değerine sahip olmaları gerekmez.

Kondansatör kenetlemeli çevirici devreleri bazı kaskat bağlı köprü çeviricilerde olduğu gibi birden fazla izole gerilim kaynaklarına ihtiyaç duymazlar. Eşit anma gerilimi değerine sahip aynı sayıdaki yarı iletken anahtarlar kullanılarak yapılan kaskat bağlı tam köprülü topoloji, diyot kenetlemeli topoloji veya kondansatör kenetlemeli topolojinin her üçünün çıkışında da elde edilen gerilim değerleri birbirine eşit olur.

Kondansatör kenetlemeli evirici topolojisinin, yukarıda bahsedilen avantajlarının yanında uygulamada çok fazla tercih edilmemesine neden olan bir takım dezavantajları da vardır. Bunlardan en önemlisi her fazda kullanılan çok sayıdaki kondansatörün sistemi ciddi şekilde hantallaştırması ve yapının boyutlarını büyütmesidir. Ayrıca gerilim değeri ve ona bağlı olarak eviricinin anahtarlama seviyesi arttıkça seri bağlı kondansatör (buradaki şekilde bir adet olarak gösterilen her bir kondansatör gerilim değerine bağlı olarak birden fazla seri bağlı kondansatör bloğundan meydana gelmektedir) ve anahtarların da sayısının arttırılması gerekir.

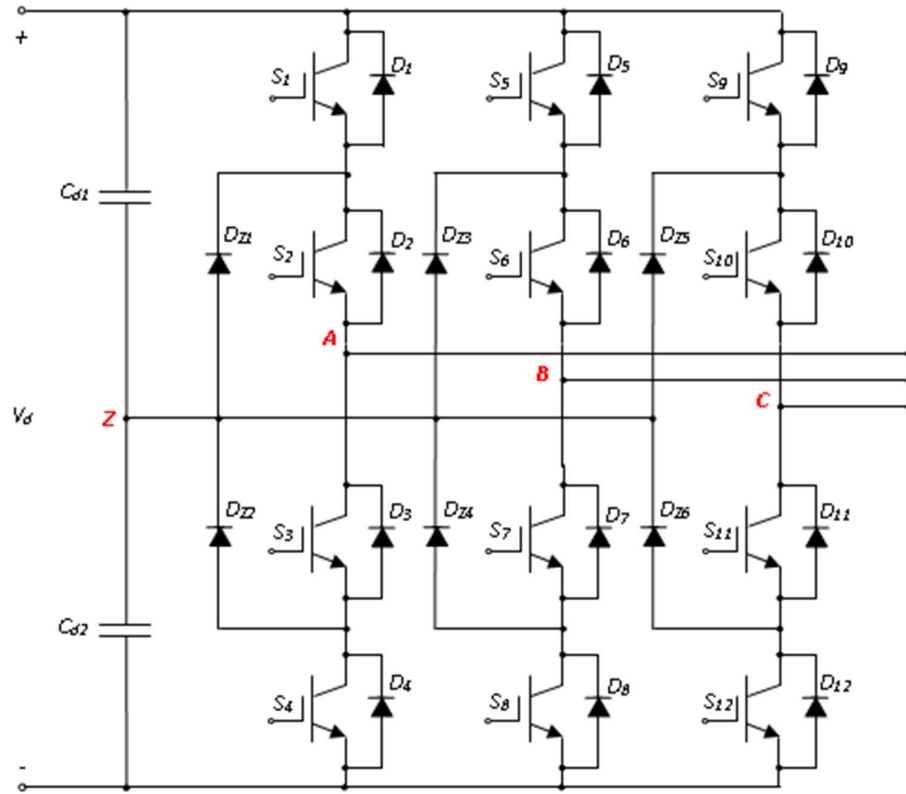
Kondansatörler ve yarı iletken anahtarlar üzerindeki gerilim değerinin eşit dağılımından emin olmak için tüm kondansatörlerin eşit gerilimde ön şarja tabi tutulmaları gerekir. Bu da sistemin maliyetini arttıran unsurlardan biridir.

Çalışma esnasında kondansatörlerin gerilimleri eviricideki yarı iletken anahtarların anahtarlama durumuna göre sürekli değişiklik gösterir. Kondansatörlerin eşit şekilde şarj edilmemeleri ya da zamanla kapasitif özelliklerinde farklılık meydana gelmesi nedeniyle üzerlerindeki gerilimin eşit olmaması, sistemin tamamen zarar görüp devre dışı kalması gibi çok ciddi sonuçlara neden olabilir.

Bunun için anahtarlama esnasında her bir kondansatör geriliminin ayrı ayrı ölçülüp eşit değerde olduğunun kontrol edilmesi gerekir. Bu da her bir kondansatörden alınacak geri besleme devresi ile sistemin kontrol yapısının çok karmaşık bir hal almasına neden olur. Bu nedenlerden ötürü kondansatör kenetlemeli evirici topolojisi çok geniş bir kullanım alanına sahip değildir.

2.4.4 Diyot kenetlemeli evirici (NPC-neutral point clamped inverter)

İki seviyeli gerilim kaynaklı eviricilerin yüksek güçlü uygulamalarda ihtiyaçlara yeterince cevap verememesi üzerine 1981 yılında üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici topolojisi üzerinde çalışılmaya başlanmıştır. Diyot kenetlemeli eviriciler bir kol üzerindeki dört adet anahtarlama elemanı, bunlara bağlı dört adet anti paralel diyot ve Şekil 2.65’de görüldüğü gibi kondansatörlerle oluşturulmuş nötr noktasına bağlı iki adet diyottan oluşur. Kondansatörlerin orta noktalarına bağlı olan bu diyotlara kenetleme (clamping) diyotları denir. Bu topolojide doğru gerilim barasının gerilim değeri iki adet kondansatör bloğu (alt kol ve üst kol kondansatörleri) ile iki kademeye ayrılır. Gerilim değerini her iki kondansatör bloğu üzerinde de sabit tutmak gerekir [68].



Şekil 2.65 : Üç fazlı üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici.

Kenetleme diyotları sayesinde her bir anahtarlama elemanı üzerinde meydana gelen maksimum gerilim değeri toplam doğru gerilim barasının gerilim değerinin yarısına eşit olur ($V_d/2$). Bu durum diyot kenetlemeli eviricilerin iki seviyeli eviricilere göre çok önemli bir avantaj elde etmesini sağlar. Bu sayede hangi tip anahtarlama elemanı kullanılırsa kullanılsın anahtarın anma gerilimi doğru gerilim barasının gerilim değerinin yarı değerine göre belirlenmiş olur.

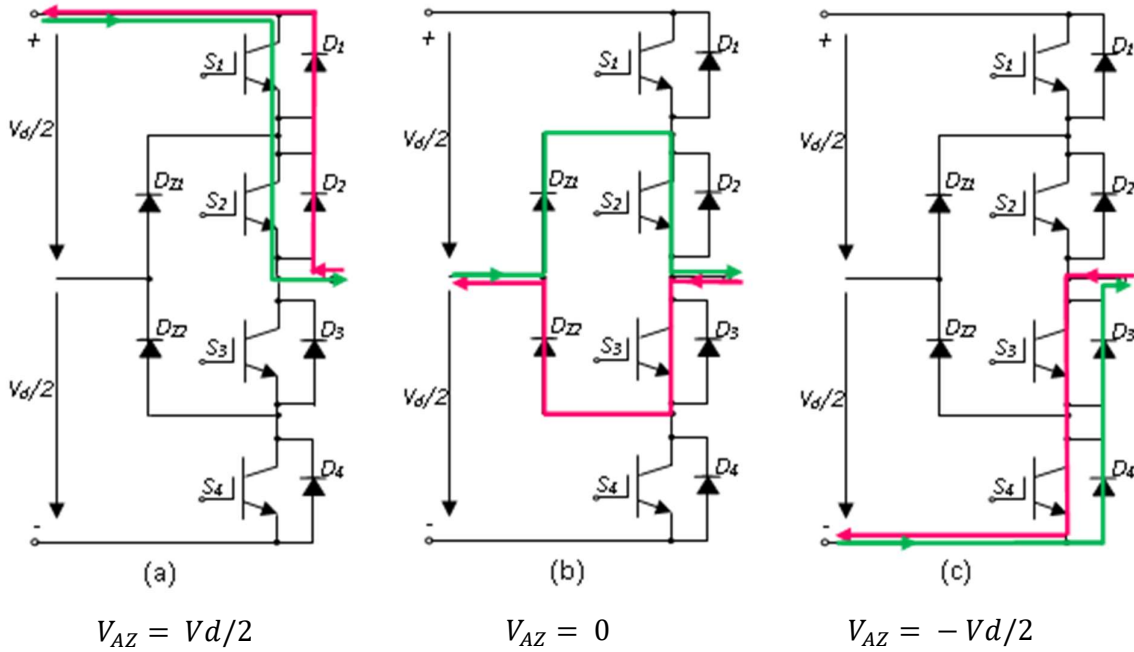
Bazı gerilim değerlerinde iki seviyeli uygulamada yüksek anma gerilimine sahip yarı iletken anahtar kullanılırken, diyot kenetlemeli yapıda gerilim değeri yarı değerine düştüğü için daha ticari olan düşük anma gerilimine sahip yarı iletkenler kullanılabilir. Bu durum daha hızlı yarı iletken anahtarlar kullanılabilmesi ve sistemin daha yüksek frekanslarda çalışabileceği anlamına gelmektedir. Bununla birlikte iletim kayıpları ve dV/dt değerleri düşürülebilmektedir.

Üç seviyeli diyot kenetlemeli çeviricilerin diğer önemli avantajlarından biri ise giriş ve çıkış dalga şekillerindeki harmonik değerlerinin çok düşük olmasıdır. İki seviyeli çeviriciler çıkışlarında özel tasarlanmış filtre gerektirirken, üç seviyeli çeviricilerin pek çoğunda filtre ihtiyacı ortadan kalkmaktadır. Öte yandan kaskat bağlı bazı topolojilerde doğru gerilim bara sayısı kadar birbirinden izole kaynak gerekirken diyot kenetlemeli topolojide izole kaynağa ihtiyaç yoktur. Alt ve üst koldaki her iki kondansatör de aynı doğru gerilim barası üzerinden şarj ve deşarj olmaktadır.

Ancak devreye eklenen kenetleme diyotları ve doğru gerilim barası kondansatörlerinden alınan geri besleme sinyalleri sistemi iki seviyeli çevirici tiplerine göre daha kompleks hale getirmekte ve maliyetini arttırmaktadır. Diğer yandan sistemin daha güvenilir çalışması için diğer topolojilerin bazılarında olduğu gibi yarı iletken anahtarların yedeklenmesi de gerekebilmektedir.

Gerilim ihtiyacına göre diyot kenetlemeli çevirici yapısı üç seviyeden dört veya beş seviyeye çıkarılabilir. Eviricinin seviyesi artırıldığında topolojide kullanılan diyot sayısı da artar. Örneğin üç seviyeli çeviricide altı adet kenetleme diyotu kullanılırken, dört seviyeli çeviricide 18 adet, beş seviyeli de ise 36 adet kenetleme diyotu kullanılır. Topolojide kullanılan komponent sayısının artması ile sistemin kontrolü de daha karmaşık hale gelir. Güç seviyesi ve malzeme adedi kıyaslandığında ortaya çıkan sayı çok efektif olmadığından üç veya beş seviyenin üzerindeki yüksek seviyeli diyot kenetlemeli çeviriciler uygulamada çok fazla tercih edilmemektedir.

Üç seviyeli diyot kenetlemeli çeviricinin birinci kolundaki S_1 ve S_3 anahtarları veya S_2 ve S_4 anahtarları aynı anda ilettime sokulduklarında A noktası kenetleme diyotları aracılığıyla Şekil 2.66'da görüldüğü gibi nötr noktasına bağlanır (sıfır vektörü). Çıkış alternatif gerilimindeki gerilim kademeleri nötr noktasına bağlı bu diyotlar ve anahtarlama elemanları yardımıyla elde edilir. Çıkışta pozitif veya negatif gerilim bileşeninin elde edilebilmesi için S_1 ve S_2 veya S_3 ve S_4 anahtarlarının ilettime sokulması gerekir. Sistemin doğru gerilim barasına bağlı C_{d1} ve C_{d2} kondansatörlerinin her birinin gerilimi toplam gerilim değerinin yarısına ($V_d/2$) eşittir. Bu kondansatörler Z nötr noktasından akan akımla şarj veya deşarj olurlar.

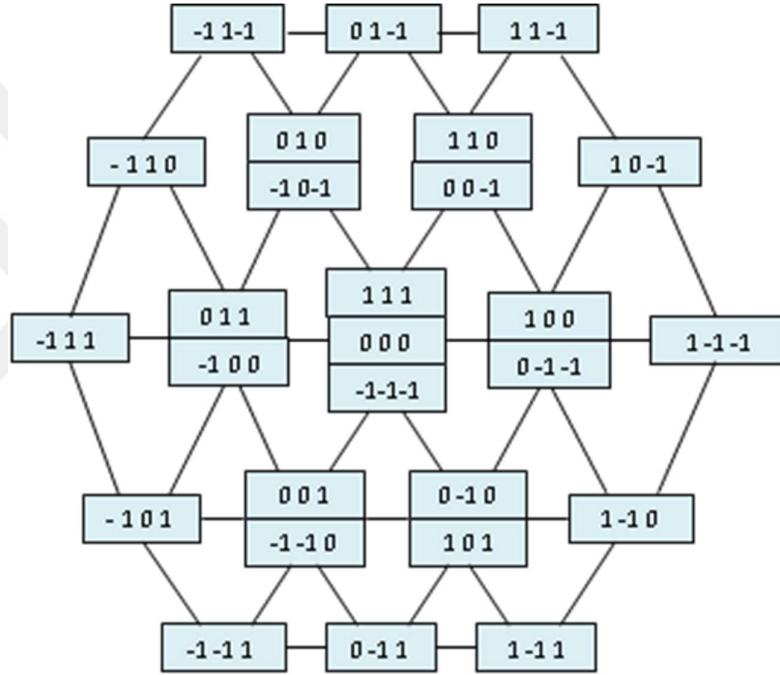


Şekil 2.66 : Diyot kenetlemeli üç seviyeli eviricinin anahtarlama durumlarına göre akım yolları.

Şekil 2.66'da anahtarların iletimde veya kesimde olma durumlarına göre meydana gelen akım yolları gösterilmektedir. Bir fazın anahtarlarının konumuna göre çıkış alternatif gerilim noktasında meydana gelebilecek gerilim potansiyelleri Çizelge 2.4'te verilmiştir. Buradan da anlaşılabileceği üzere her bir faz üzerinde meydana gelebilecek gerilim değerleri $V_d/2$, 0 ve $-V_d/2$ olmak üzere üç farklı değere sahip olabilir. Bu değerler dikkate alındığında üç fazlı ve üç seviyeli bir çevirici için Şekil 2.67'de görüldüğü üzere 27 farklı anahtarlama durumu meydana gelir.

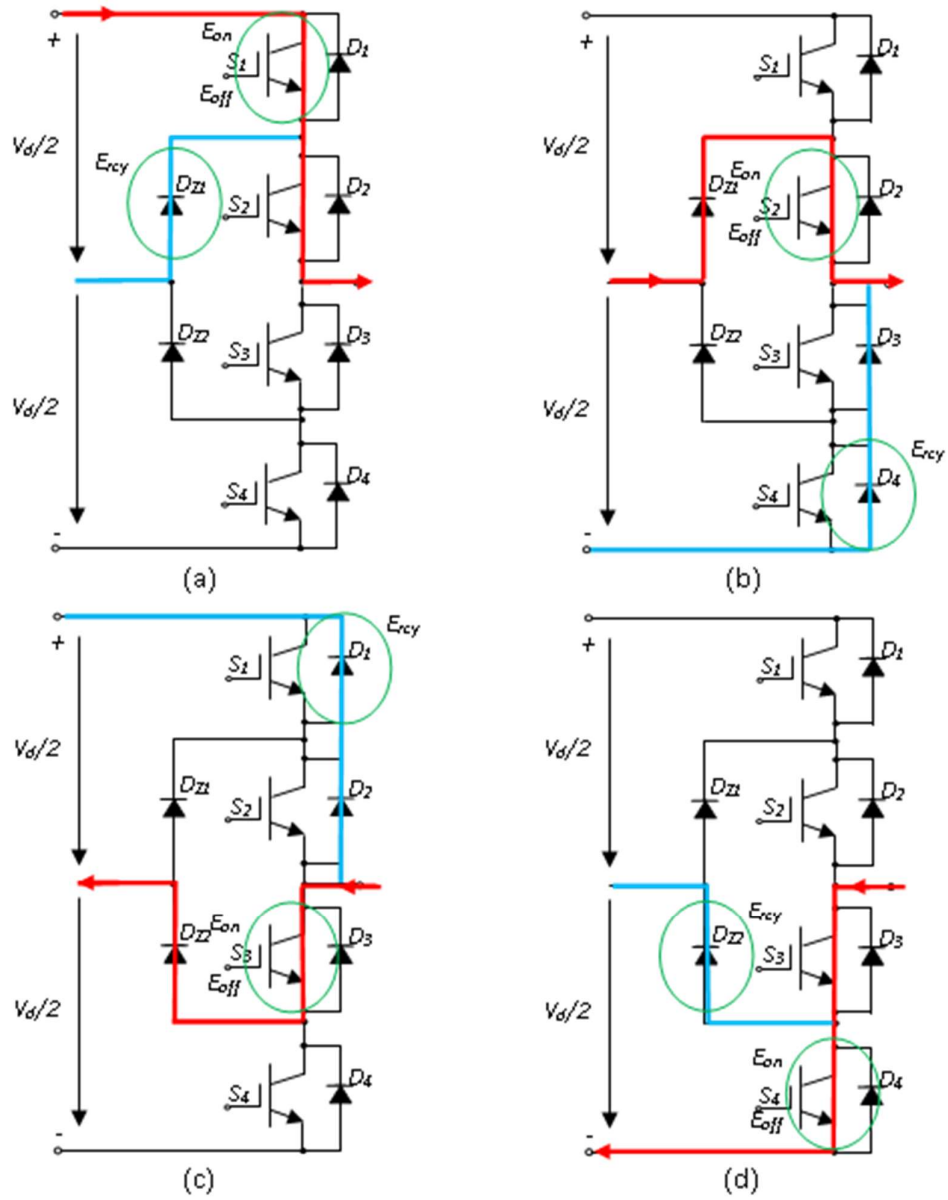
Çizelge 2.4 : Anahtarın iletim durumlarına göre diyot kenetlemeli üç eviricinin çıkışında meydana gelen gerilim değerleri.

Anahtarlama Durumu	A fazı için anahtarlama elemanlarının konumu				Evirici Çıkış Gerilimi
	S_1	S_2	S_3	S_4	
<i>Pozitif</i>	1	1	1	0	$V_d/2$
<i>0</i>	0	1	0	0	0
<i>Negatif</i>	0	0	0	1	$-V_d/2$



Şekil 2.67 : Diyot kenetlemeli üç seviyeli eviricinin anahtarlama durumları.

Bu anahtarlama durumlarından birinde nötr noktadan dışarıya doğru akan akım alt konumdaki kondansatörü şarj ederken aynı koldaki üst konumdaki kondansatörün de deşarj olmasına neden olur. Nötr akımı nötr noktadan içeriye doğru aktığında ise üst koldaki kondansatör şarj olurken alt koldaki kondansatör deşarj olur. Örneğin “110” konumunda akım nötr noktaya doğru akar ve doğru gerilim barasının üst tarafındaki kondansatör şarj olur. Anahtarlama konumu “001” olduğunda ise akım nötr noktadan dışarıya doğru akarak alt koldaki kondansatörü şarj eder.



Şekil 2.68 : Anahtarlama durumlarına göre yarı iletken anahtarların kayıplarının gösterilimi.

Eğer nötr noktasının gerilimi doğru gerilim barasının gerilim değerinin yarısına eşitse her iki anahtarlama konumunda da yüke uygulanan gerilim değeri birbirine eşit olur. Üç seviyeli çeviricinin anahtarlama durumlarına ve akım yönüne göre yarı iletken anahtarlarda meydana kayıplar Şekil 2.68’de gösterildiği gibidir.

Diğer çok seviyeli yüksek güçlü çeviricilere (kaskat bağlı çok katlı çeviriciler, kondansatör kenetlemeli çeviriciler, ortadan diyot kenetlemeli beş veya daha yüksek katlı çeviriciler) göre üç seviyeli ortadan diyot kenetlemeli çeviriciler yarı iletken anahtarlama elemanlarının az olması, maliyetinin düşük olması, diğer çok seviyeli çeviricilerde olduğu gibi çıkış ripple ve harmonik değerlerinin düşük olması gibi avantajlarından ötürü sonraki bölümlerde anlatılacak olan doğrultucu ve evirici bloklarında kullanılmıştır. Sonraki bölümlerde bu topolojinin çalışma şekline daha detaylı olarak yer verilecektir.

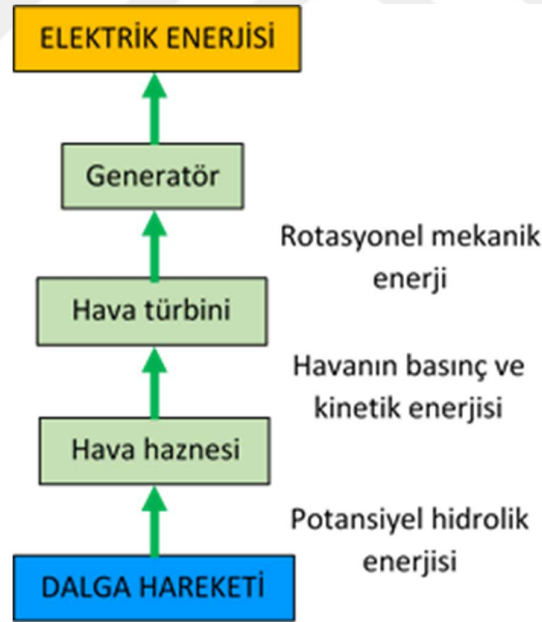




3. DALGA ENERJİSİNİN MODELLENMESİ

Bu bölümün amacı dalga hareketinden enerji üretilmesinin ve bu enerjinin hidrolik, pnömatik, mekanik ve elektriksel enerji dönüşüm aşamalarının tek tek irdelenmesi ve dalga enerjisi ile elektrik enerjisi arasındaki salınlı su kolonu, Wells türbini ve elektrik generatörünün sayısal ve dinamik sistem modellemesinin oluturulmasıdır. Bölüm sonunda oluşturulan matematiksel modelin Matlab-Simulink ortamında gerçekleşmesi daha sonraki bölümde verilecektir.

Şekil 3.1’de gösterildiği üzere, su kolonuna gelen dalga enerjisinden elektrik enerjisi üretiminde dikkate alınması gereken dört temel aşama mevcuttur. Bunlar;



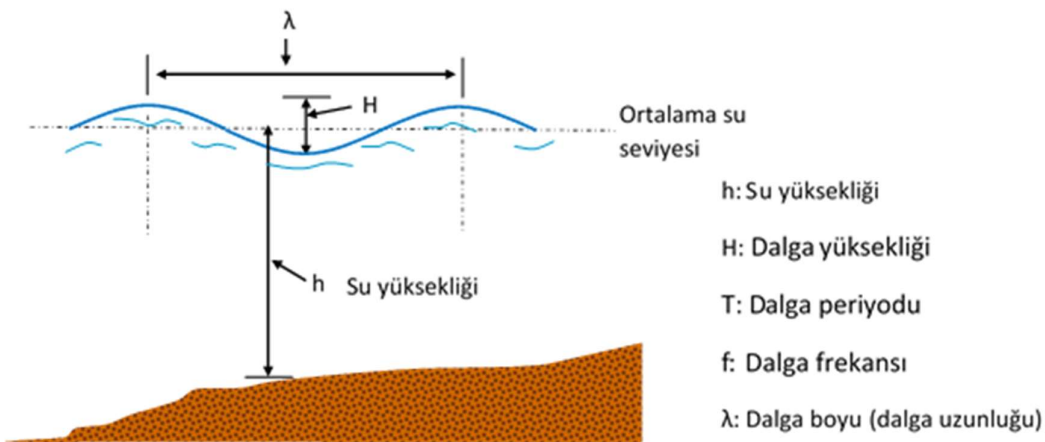
Şekil 3.1 : Salınlı su kolonu dönüşüm sistemlerinde enerji zinciri.

1. Hidrodinamik tasarım: Dalga hareketinden elde edilen enerjinin suya aktarılması, (su, potansiyel enerji → su, kinetik enerji)
2. Aerodinamik tasarım: Hava haznesine gelen dalga enerjisinden pnömatik enerjiye dönüşüm, (su, dalga enerjisi → hava, basınç ve kinetik enerji)

3. Hava haznesinden çıkan hava akımının aerodinamik tasarımı ve pnömatik enerjiden mekanik enerjiye dönüşüm (hava, basınç ve kinetik enerji → türbin, mekanik enerji)
4. Mekanik enerjiden elektrik enerjisine dönüşüm (türbin, mekanik enerji → generatör, elektrik enerjisi)

Dalga enerjisi dönüşüm sistemleri, enerji zincirindeki elektrik enerjisinin üretildiği aşamada eğer enerji depolama durumu söz konusu değilse, enerji akısının sürekli osilasyon yaptığı düzensiz ve tamamen gelişigüzel meydana gelen enerji şeklidir. Enerji dönüşümü hangi tip dalga dönüşüm sistemi ile yapılırsa yapılsın dalga enerjisi dönüşüm sistemini tasarlamadan önce sistemin uygulanacağı bölgedeki dalgaların bu üç karakteristiği (h , H , λ) çok iyi incelenmelidir. Bununla birlikte dalga karakteristiği yaz ve kış aylarına göre de değişiklik göstermektedir. Dolayısıyla yaz ve kış ayları arasındaki değişiklik de sistem tasarımında göz önünde bulundurulmalıdır. Yapılan araştırmalar kış aylarında meydana gelen dalgalardan elde edilen gücün yaz aylarında elde edilen dalga gücüne göre ortalama altı kat daha fazla olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla türbin gücü bu güç değişiminde çalışabilecek şekilde seçilmelidir.

Dalga enerjisi dönüşüm sistemini tasarlarken dalgaya ait en önemli iki bileşen dalganın yüksekliği (H) ve periyodudur (T) (ya da dalga boyudur (λ)). Dalganın yüksekliği (H) dalga enerjisi dönüşüm sisteminden elde edilebilecek gücün belirlenmesi açısından önemlidir. Ortalama dalga periyodu (T) ise sistemin uyartımıyla rezonansta çalışması gereken şamandıra sisteminin tasarımı için önemlidir.



Şekil 3.2 : Dalga karakteristikleri.

Dalga hareketi salınımı bir parçacıktaki hareketin sürekli olarak bir sonraki parçacığa aktarılması ve sonraki parçacığın yer değiştirmesiyle meydana gelir. k dalga sayısı, ω de açısal hız olmak üzere dalga hareketinin dikine yer değiştirmesi aşağıdaki gibi verilir:

$$y(t) = \frac{H}{2} \cdot \cos(\theta) \quad (3.1)$$

Burada θ gelen dalganın faz açısını vermektedir ve x y referans noktasına göre yatay düzlemdeki pozisyon olmak üzere aşağıdaki gibi gösterilir:

$$\theta = k.x - \omega.t + Y \quad (3.2)$$

$$X = \begin{cases} 1, \text{sağa doğru yayılımda} \\ 1, \text{sola doğru yayılımda} \end{cases} \quad Y = -\frac{\pi}{2} \quad (3.3)$$

Buradan eşitlik 3.1'deki dalganın yer değiştirme denklemi aşağıdaki gibi yeniden yazılır:

$$y(t) = \frac{H}{2} \cdot \cos(k.x \pm \omega.t - \frac{\pi}{2}) \quad (3.4)$$

k dalga sayısı, h deniz suyunun derinliği olmak üzere gelen dalganın boyu:

$$\lambda = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \cdot \tanh(k.h) \quad (3.5)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.6)$$

$$\omega^2 = g \cdot k \cdot \tanh(k.h) \quad (3.7)$$

Buradan dalganın yatay ve dikey yöndeki hız bileşenleri şu şekilde yazılır:

$$V_y = \frac{\pi}{T} \cdot H \cdot \frac{\cosh(k \cdot (z + h))}{\sinh(k \cdot h)} \cdot \cos(k.x \pm \omega.t - \frac{\pi}{2}) \quad (3.8)$$

$$V_x = \frac{\pi}{T} \cdot H \cdot \frac{\sinh(k \cdot (z + h))}{\sinh(k \cdot h)} \cdot \sin(k.x \pm \omega.t - \frac{\pi}{2}) \quad (3.9)$$

Buradan z su parçacığının referans noktasına göre dikey yöndeki pozisyonunu verir.

Dalga grup hızı:

$$C_g = \frac{\omega}{2k} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot k \cdot h}{\sinh(2 \cdot k \cdot h)}\right) \quad (3.10)$$

$$C_g = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot k \cdot h}{\sinh(2 \cdot k \cdot h)}\right) \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \tanh(k \cdot h)}{k}} \quad (3.10)$$

$$C_g = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot h}{\lambda \cdot \sinh\left(\frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot h\right)}\right) \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \tanh\left(\frac{2 \pi}{\lambda} h\right)}{\frac{2 \pi}{\lambda}}} \quad (3.12)$$

$$C_g = \frac{\lambda}{2 \cdot T} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \pi}{\sinh\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{h}{\lambda}\right)} \cdot \frac{h}{\lambda}\right) \quad (3.13)$$

Burada verilen dalga grup hız değeri orta derinlikteki dalgalar için belirlenen dalga hızıdır.

Türbin çıkışından elde edilecek olan enerjinin tespit edilmesi için ilk olarak hava haznesi girişine gelen dalga enerjisi değerinin analiz edilmesi gerekir. Dalga enerjisi hesaplanırken ilk olarak birim alanda meydana gelebilecek enerji yoğunluğu hesaplanır. Bu enerji de potansiyel ve kinetik enerji olarak ikiye ayrılır. Dalganın potansiyel, kinetik ve toplam enerjileri aşağıdaki gibi yazılır.

Potansiyel dalga enerjisi:

$$E_p = m \cdot g \cdot h \text{ [J]} \quad (3.14)$$

Birim yüzey alanında meydana gelen potansiyel dalga enerjisi:

$$\overline{E_p} = \frac{1}{16} \cdot \rho_w \cdot g \cdot H^2 \left[\frac{J}{m^2} \right] \quad (3.15)$$

Burada ρ_w , dalga yoğunluğu, g , yer çekimi ivmesi ve H , dalganın dikine yer değiştirmesi aşağıdaki gibi verilir.

Dalga yoğunluğu:

$$\rho_w = 1025 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (3.16)$$

Yer çekimi ivmesi:

$$g = 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad (3.17)$$

Dalganın dikine yer değıştirmesi:

$$H(t) = \frac{H}{2} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) \quad (3.18)$$

Dalga kinetik dalga enerjisi:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \left[\frac{J}{m^2} \right] \quad (3.19)$$

Kinetik enerji eşitlik 3.8 ve eşitlik 3.9'daki dalganın yatay ve dikey yöndeki hız bileşenleri cinsinden aşağıdaki gibi yazılır:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot dx \cdot dy \cdot \sum_{x,y} v_{x,y}^2 \left[\frac{J}{m^2} \right] \quad (3.20)$$

Birim yüzey alanında meydana gelen kinetik enerji:

$$\overline{E_k} = \frac{1}{16} \cdot \rho_w \cdot g \cdot H^2 \left[\frac{J}{m^2} \right] \quad (3.21)$$

Toplam dalga enerjisi:

$$\overline{E_T} = \overline{E_p} + \overline{E_k} \quad (3.22)$$

$$\overline{E_T} = \frac{1}{8} \cdot \rho_w \cdot g \cdot H^2 \left[\frac{J}{m^2} \right] \quad (3.23)$$

Bu değeri dalga boyu λ ile çarpıldığında, bir dalga boyu süresince meydana gelen toplam enerji eşitlik 3.24'teki gibi bulunmuş olur.

$$\bar{E} = \frac{1}{8} \cdot \rho_w \cdot g \cdot H^2 \cdot \lambda \quad [\text{J/m}] \quad (3.24)$$

Dalgadaki potansiyel ve kinetik enerjinin birbirine eşit olduğu kabul edilirse enerji üretiminde kullanılacak olan bir dalga boyunca meydana gelen toplam enerji aşağıdaki şekilde yeniden yazılmış olur.

$$\bar{E}_p = \bar{E}_k = \frac{E_T}{2} = \frac{1}{16} \cdot \rho_w \cdot g \cdot H^2 \cdot \lambda \quad [\text{J/m}] \quad (3.25)$$

Enerji değeri T periyoduna bölünürse dalga tepesi ve çukuru arasındaki süre boyunca meydana gelen gücün metre başına düşen birim değeri eşitlik 3.26'daki şekilde elde edilmiş olur.

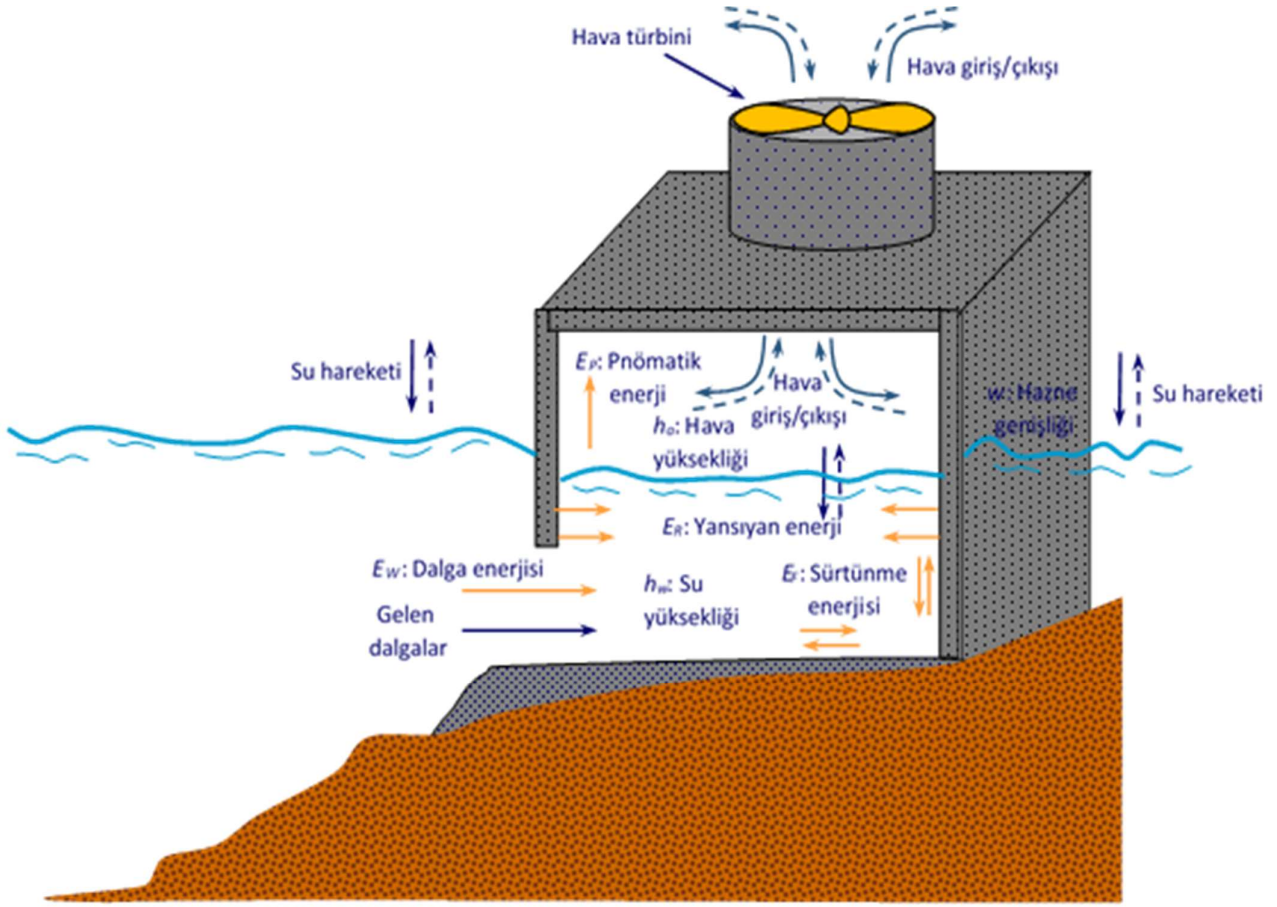
$$\bar{P}_w = \frac{1}{8} \cdot \frac{\rho_w \cdot g \cdot H^2 \cdot \lambda}{T} \quad [\text{W/m}] \quad (3.26)$$

Sığ su dalgaları için grup hız değeri derin sulardaki hızın yarı değerine düştüğü için sığ sulardaki metre başına düşen güç miktarı şu şekilde yazılır.

$$\bar{P}_w = \frac{1}{16} \cdot \frac{\rho_w \cdot g \cdot H^2 \cdot \lambda}{T} \quad [\text{W/m}] \quad (3.27)$$

Eşitlik 3.27'deki dalga güç formülündeki dalga boyunun zamana bağlı değişimi (λ/T) yerine grup hız değeri (C_g) konursa dalga gücünün metre başına düşen birim değeri aşağıdaki gibi yeniden yazılır. Burada verilen değer salınlımlı su kolonunun girişindeki dalgada meydana gelen güç değeridir.

$$\bar{P}_w = \frac{1}{8} \cdot \rho_w \cdot g \cdot H^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot k \cdot h}{\sinh(2 \cdot k \cdot h)} \right) \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \tanh(k \cdot h)}{k}} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}} \right] \quad (3.28)$$



Şekil 3.3 : Salınlı su kolonunda enerji dönüşümü.

Salınlı su kolonu dalga dönüşüm sistemi diğer dönüşüm sistemlerine göre en gelişmiş olan ve en verimli çalışan dönüşüm sistemi olduğu için bu çalışmada dalga enerjisini hidrolik enerjiye dönüştürmek için su kolonu dönüşüm sistemi kullanılmıştır. Şekil 3.3'te gösterilen salınlı su kolonu en az iki açıklığı olan bir dönüşüm sistemidir. Bu açıklıklardan birinden su giriş/çıkışı sağlanırken diğer açıklıktan dalga tepesi ve dalga çukuruna bağlı olarak hava girişi veya çıkışı sağlanır. Dalga hareketine bağlı olarak hava haznesinde bulunan hava hacmi zamana bağlı olarak sürekli osilasyon yapar.

Şekil 3.3'te gösterildiği üzere salınlı su kolonu içerisinde hareket eden dalganın genliği ve hızı, su kolonu içerisindeki suyun yüksekliği, duvarlardan yansıyan suyun etkisi, su kolonu içerisindeki hava basıncının sürekli salınım yapması, duvarlarda ve su yatağındaki sürtünmelerin etkisi nedeniyle dışarıdaki dalga şekline göre farklılık gösterir. Bocotti'ye göre salınlı su kolonu içerisinde meydana gelen yeni dalganın boyu yaklaşık olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır [70]:

$$\lambda_o \cong \left(1 - \frac{\pi \cdot h_o}{3 \cdot \lambda}\right) \cdot T \cdot \sqrt{g \cdot h_o} \quad (3.29)$$

λ_o salınlımlı su kolonu içerisindeki dalğanın uzunluğu, λ gelen dalğanın uzunluğu, h_o da salınlımlı su kolonu içerisindeki suyun yüksekliğidir. Gelen dalga ile su kolonu içerisindeki dalga arasındaki farklılık Şekil 3.4’te gösterilmiştir.

Salınlımlı su kolonunun taban genişliği L olarak belirlenirse dalğanın zamana bağlı dikine hareketi, salınlımlı su kolonu içerisindeki su seviyesi yüksekliği ve su kolonunun taban genişliğine göre yeniden düzenlenerek aşığıdaki şekli almış olur [71].

$$H_o(t) \cong \frac{H}{2} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) \cdot \frac{1}{\theta} \cdot \int_{-\frac{\theta}{2}}^{\frac{\theta}{2}} \cos(\varphi) \cdot d\varphi \quad (3.30)$$

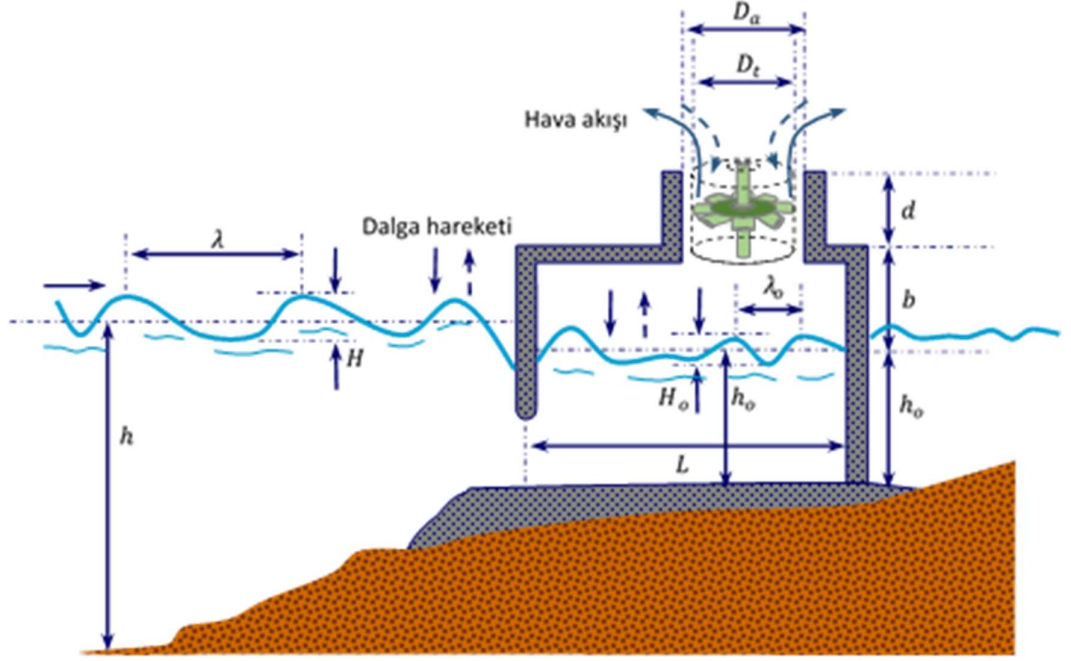
$$H_o(t) \cong \frac{H}{2} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) \cdot \frac{1}{\theta} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3.31)$$

$$\theta = 2\pi \cdot \frac{\lambda_o}{L} \quad (3.32)$$

Bu değerkler eşitlik 3.23’teki yerlerine konursa salınlımlı su kolonu içerisinde suyun hareketiyle meydana gelen hidrolik güç değeri aşığıdaki şekilde yeniden düzenlenmiş olur:

$$\overline{P_{w_owc}} = \frac{1}{16} \cdot \frac{\rho_w \cdot g \cdot H_o^2 \cdot \lambda_o}{T} \quad [W/m] \quad (3.33)$$

$$\overline{P_{w_owc}} = \frac{1}{16} \cdot \frac{\rho_w \cdot g \cdot H_o^2 \cdot \sqrt{g \cdot h_o}}{\theta^2} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot h_o}{3 \cdot \lambda}\right) \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad [W/m] \quad (3.34)$$



Şekil 3.4 : Salınlı su kolonu boyutları.

Salınlı su kolonunun hava haznesine gelen enerji ile hazneden çıkan enerji arasındaki bağıntı şu şekildedir:

$$E_w = E_p + E_R + E_F + E_S \quad (3.34)$$

E_w : Salınlı su kolonuna gelen dalga enerjisi

E_p : Hava haznesine (türbine) iletilen pnömatik enerji

E_R : Gelen dalganın salınlı su kolonunun duvarlarında yansımından dolayı meydana gelen yansıma enerjisi

E_F : Dalganın türbülans hareketi ve vizkositesinden dolayı OWC duvarlarında ve su yatağında meydana gelen sürtünme enerjisi

E_S : Salınlı su kolonu içerisinde depolanan enerji

Bu eşitlikteki enerji dönüşümleri tek tek incelenecek olursa, gelen dalgadan elde edilen güç değeri eşitlik 3.28’de verildiği gibidir. Salınlı su kolonu içerisinde depolanan güç değeri ise su kolonunun belirli bir genişlikteki açıklığından giren su hareketine bağlı olarak eşitlik 3.35’teki şekilde ifade edilir.

$$P_s = \frac{E_s(t)}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot g \cdot (H_o(t))^2 \cdot w \cdot dt \quad (3.35)$$

w : Salınlımlı su kolonunun su giriş açıklığı

Hava haznesine gelen dalgaanın hareketi ile salınlımlı su kolonu içerisinde bir hacim akış oranı meydana gelir. Bu akış oranı salınlımlı su kolonu içerisindeki hava hacmine ve hareket eden havanın hızına bağılı olarak salınlımlı su kolonu içerisinde zamana bağılı olarak değışen bir basınç değıeri meydana getirir. Salınlımlı su kolonunun hava haznesinden türbine iletilen ve salınlımlı hava akışına bağılı olarak değışen enerjinin (E_p) teorik olarak modellenmesi için akışkanlar mekaniğindeki pnömatik teoremden faydalanılacaktır. Bu sayede salınlımlı su kolonunun hava haznesine gelen hava kütlesi ile hava haznesinden çıkan hava akışı arasındaki enerji değıişimi bağılantısı sağılanmış olacaktır. Hava haznesinde meydana gelen ve türbine iletilen pnömatik güç değıeri aşığıdaki şekilde yazılır.

$$P_p(t) = \frac{E_p(t)}{T} = \Delta p \cdot q(t) = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta p \cdot q(t) \cdot dt \quad (3.36)$$

$$\Delta p = p_{owc}(t) - p_o \quad (3.37)$$

Burada:

$P_p(t)$: Türbine iletilen anlık hava akımı gücü

$p_{owc}(t)$: Hava haznesinde su yüzeyinde meydana gelen bağılı hava basıncı (atmosferik basınca oranla)

$q(t)$: Hacimsel akış oranı

Δp : Türbin içerisindeki basınç değıeri

p_o : Atmosferik hava basıncı

Evans'ın teoreminden yola çıkarak hacim akış oranı aşığıdaki şekilde yazılır [72].

$$q(t) = q_r(t) + q_d(t) \quad (3.38)$$

$q_r(t)$: Türbinden ve salınlımlı su kolonu duvarlarından yansıyan hacimsel akış oranı

$q_d(t)$: Kırılma hacimsel akış oranı

Hacimsel akış oranı alan ve hız cinsinden aşağıdaki şekilde yazılır:

$$q(t) = \frac{d}{dt} V(t) \quad (3.39)$$

$$q(t) = \frac{d}{dt} \vartheta_{owc}(t) \cdot A_{owc} \quad (3.40)$$

$V(t)$: Hava haznesindeki havanın zamana bağlı değeri

$\vartheta_{owc}(t)$: Hava haznesindeki havanın akış hızı

A_{owc} : Salınlımlı su kolonu içerisindeki yüzey alanı

Hareket eden havanın hacmi hareket eden su miktarının hacmi ile eşdeğer olduğu bilindiğine göre havanın hız değeri şu şekilde yazılır:

$$H_o(t) = \frac{H_o}{2} \cdot \sin(\omega_o \cdot t) \quad (3.41)$$

Buradan hacim akış oranı aşağıdaki şekilde bulunmuş olur:

$$q(t) = \frac{H_o}{2} \cdot \omega_o \cdot A_{owc} \cdot \cos(\omega_o \cdot t) \quad (3.42)$$

Süreklilik kuramı ya da hacmin korunumu yasasından faydalanılarak $q(t)$ hacimsel akış oranı türbin kesit alanı cinsinden aşağıdaki şekilde yazılabilir [73]:

$$Q(t) = \frac{V_1}{t_1} = \frac{V_2}{t_2} \quad (3.43)$$

$$q(t) = \frac{H_o}{2} \cdot \omega_o \cdot A_{owc} \cdot \cos(\omega_o \cdot t) = (A_a - A_t) \cdot \vartheta_a \quad (3.44)$$

ϑ_a : Salınlımlı su kolonu çıkışındaki havanın hızı

ω_o : Salınlımlı su kolonunun doğal salınım frekansı

$$\omega_o = \sqrt{\frac{g}{H_o + x}} \quad (3.45)$$

Hava haznesinden çıkan havanın kütle akış oranı ise hacimsel akış oranı cinsinden şu şekilde yazılır:

$$\dot{m} = \rho_a \cdot q(t) \quad (3.46)$$

$$\dot{m} = -\frac{d(\rho_a \cdot V_{owc})}{dt} \quad (3.47)$$

$\dot{m}$: Kütle akış oranı

V_{owc} : Salınlı su kolonu içerisindeki havanın durağan haldeki hacmi

ρ_a : Havanın yoğunluğu

$$\dot{m} = \rho_a \cdot q(t) - (V_{owc} + (y_2 - y_1) \cdot A_{owc}) \cdot \frac{1}{c_a^2} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (3.48)$$

c_a : Havadaki ses hızı

A_{owc} : Salınlı su kolonu içerisindeki yüzey alanı

$y_2 - y_1$: Havanın salınım yaptığı aralık

Burada hava yoğunluğu ve hacimdeki bağıl değişimlerin çok küçük olduğu ve hava yoğunluğu ile basınç arasında lineer bir ilişki olduğu kabul edilmiştir. Dolayısıyla eşitlik 3.48'deki kütle akış oranı yeniden düzenlenerek aşağıdaki gibi yazılır:

$$\dot{m} = \rho_a \cdot q(t) - V_{owc} \cdot \frac{1}{c_a^2} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (3.49)$$

Daha önceki bölümde de belirtildiği üzere bu çalışmada dalga tepesi ve çukurundan bağımsız olmak üzere tek yönde dönü sağlayan, düşük rotasyonel hızda çalışan ve esnek bir yapıya sahip Wells türbini kullanılmıştır. Bu çalışmada dikkate alınan Wells türbininin kılavuz kanat içermeyen, tek kanat tipli ve kanat genişliği sabit olan bir Wells türbini olduğu kabul edilmiştir. Wells türbininin modellenmesinde aşağıda belirtilen boyutsuz türbin denklemleri dikkate alınacaktır (buradaki türbin eşitliklerinde bağlantı kanalları da dikkate alınmıştır) [74].

Boyutsuz basınç oranı:

$$\Psi = \frac{p}{\rho_a \cdot N_t^2 \cdot D_t^2} \quad (3.50)$$

Boyutsuz basınç sabiti:

$$\Delta_p^* = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot N_t^2} \quad (3.51)$$

Boyutsuz hava akışı oranı:

$$\phi = \frac{Q}{A_a \cdot N_t} \quad (3.52)$$

$$\phi = \frac{A_a}{A_t \cdot N_t} \cdot \frac{dy}{dt} = \frac{V}{N_t} \quad (3.53)$$

$$\phi = \frac{\dot{m}}{\rho_a \cdot N_t \cdot D_t^3} \quad (3.54)$$

$$\phi = f_w (\Psi) \quad (3.55)$$

Boyutsuz tork sabiti:

$$\Pi = \frac{P_t}{\rho_a \cdot N_t^3 \cdot D_t^5} \quad (3.56)$$

$$\Pi = \frac{T}{\rho_a \cdot N_t^2 \cdot D_t^5} \quad (3.57)$$

$$\Pi = f_p (\Psi) \quad (3.58)$$

Verim:

$$\eta_t = \frac{P_t}{\Delta p \cdot Q} = \frac{T \cdot N_t}{\Delta p \cdot Q} \quad (3.59)$$

p : Hava haznesindeki hava basıncı

ρ_a : Hava yoğunluğu

N_t : Well türbini kanat uçlarındaki rotasyonel hız

D_t : Wells türbinin çapı

Q : Eksenel hava akış hızı

A_a : Silindirik bölgenin kesit alanı

A_t : Türbin çıkışındaki bölgenin kesit alanı

P_t : Türbin gücü

Ψ : Basınç

ϕ : Hava akış oranı

Π: Tork sabiti

T: Tork

Eşitlik 3.54'teki boyutsuz hava akış oranı yeniden düzenlenerek eşitlik 3.60'daki gibi yazılır.

$$\dot{m} = \phi \cdot \rho_a \cdot N_t \cdot D_t^3 \quad (3.60)$$

Burada boyutsuz hacimsel akış oranı ile boyutsuz basınç oranı arasında eşitlik 3.55'te gösterildiği gibi neredeyse lineer bir bağıntı olduğu kabul edilirse eşitlik 3.60'daki kütle akış oranı aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\phi = K \cdot \Psi \quad (3.61)$$

$$\dot{m} = K \cdot \Psi \cdot \rho_a \cdot N_t \cdot D_t^3 \quad (3.62)$$

$$\dot{m} = K \cdot p \cdot \frac{D_t}{N_t} \quad (3.63)$$

Eşitlik 3.63'ten anlaşılacağı üzere kütle akış oranı türbin çapına, türbin dönüş hızına ve basınca bağlı olarak değişmektedir. Sabit bir rotasyonel türbin dönüş hızı için kütle akış oranı ile basınç salınımı arasında lineer bir ilişki olduğu söylenebilir.

Kütle akış oranı değeri eşitlik 3.49'daki yerine konursa hacimsel akış oranı şu şekilde yazılmış olur.

$$\dot{m} = K \cdot p \cdot \frac{D_t}{N_t} = \rho_a \cdot q(t) - V_{owc} \cdot \frac{1}{c_a^2} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (3.64)$$

$$q(t) = K \cdot p \cdot \frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{D_t}{N_t} + \frac{V_{owc}}{c_a^2} \cdot \frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (3.65)$$

Türbine aktarılan gücün hesaplanması için bir sonraki aşama salınımlı su kolonu içerisinde meydana gelen ve türbine iletilen basınç değerinin hesaplanmasıdır. Basıncın genel tanımının bir akışkan tarafından birim alana uygulanan kuvvet olduğu bilinmektedir ve Newton, m² cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$P[Pa] = \frac{F}{A} \left[\frac{Newton}{m^2} \right] \quad (3.66)$$

Buna göre salınlımlı su kolonu içerisinde durağan haldeki suyun tabana uyguladığı statik kuvvet şu şekilde yazılır:

$$F_w = \rho_w \cdot g \cdot V_w$$

$$F_w = \rho_w \cdot g \cdot h_o \cdot L \cdot w \left[\frac{kg \cdot m}{s^2} \right] \quad (3.67)$$

Yukarıdaki kuvvet denkleminde suyun tabana uyguladığı statik basınç değeri aşağıdaki şekilde yazılır:

$$p = \frac{F_w}{A_w} = \frac{\rho_w \cdot g \cdot h_o \cdot L \cdot w}{w \cdot L}$$

$$p = \rho_w \cdot g \cdot h_o \quad (3.68)$$

Eşitlikten de görüldüğü üzere bu basınç değeri salınlımlı su kolonunun alanından bağımsızdır ve suyun yoğunluğuna, yüksekliğine ve yer çekimi ivmesine bağlı olarak değişir.

Hesaplamaların oldukça karmaşık hale gelmesi nedeniyle bu çalışmada enerji dönüşümünde havanın sıkışması ya da enerjinin bir kısmının su yatağında veya su haznesi duvarlarında meydana gelen sürtünmelerden ötürü ısı enerjisi olarak kaybolması gibi etkenler ihmal edilecektir.

Türbine iletilen gücün hacim akış oranı ve basınca bağlı olarak bulunabileceği eşitlik 3.36'da verilmişti. Eşitlik 3.37'deki türbin çıkışından elde edilen hava basıncı değerini elde etmek için Bernoulli denklemlerinden faydalanılacaktır.

Bernoulli'ye göre bir akışkanın toplam enerjisi aşağıdaki şekilde bulunur [74].

Akışkanın birim hacimdeki enerjisi [75]:

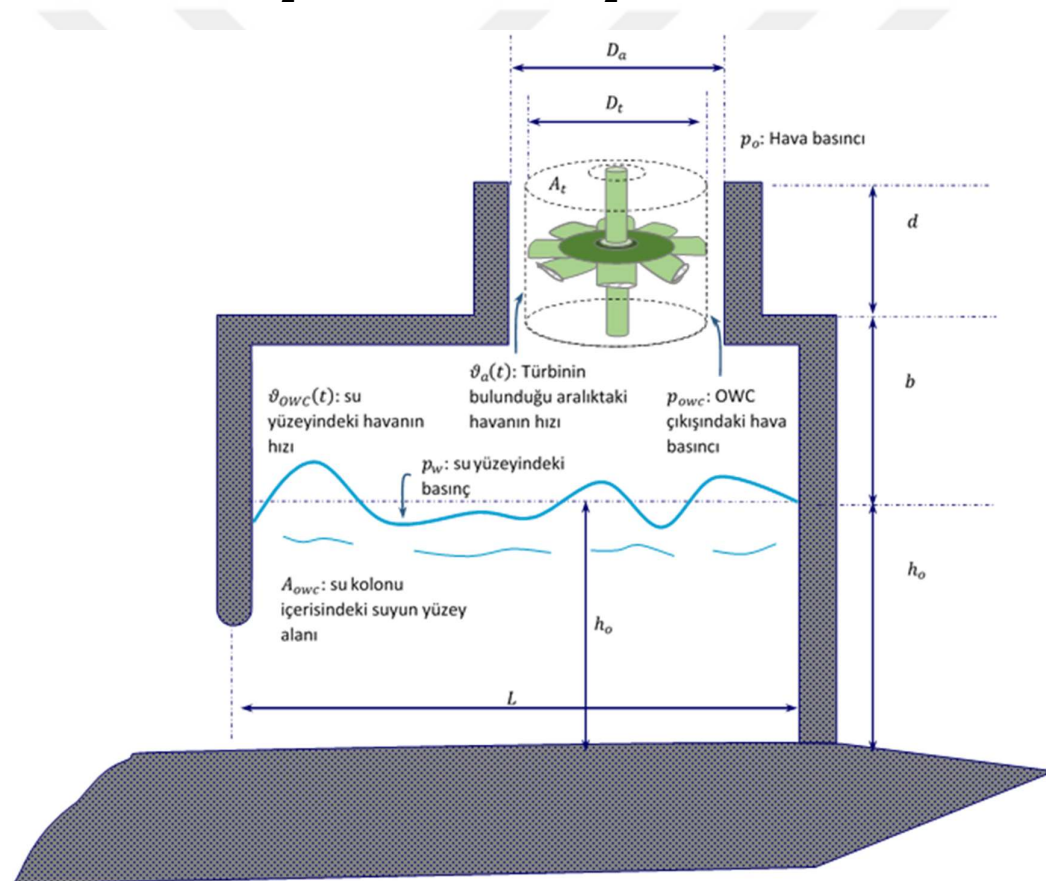
$$e_p = \frac{m \cdot g \cdot h}{V} = \rho \cdot g \cdot h \quad (3.69)$$

Akışkanın birim hacimdeki kinetik enerjisi [75]:

$$e_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (3.70)$$

Akışkanın birim hacimdeki basınç tarafından verilen enerjisi:

$$e = \frac{p \cdot A \cdot d}{V} = p \quad (3.71)$$

$$e_t = \rho . g . h + \frac{1}{2} . \rho . v^2 + p = sabit \quad (3.72)$$
$$p_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \vartheta_1^2 = p_2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \vartheta_2^2 = \text{sabit} \quad (3.73)$$


98

Bernoulli denklemi salınlı su kolonu içerisinde meydana gelen basınç için kullanılırsa ve p_1 yerine su yüzeyinde meydana gelen basınç değeri p_w ve p_2 yerine de türbinin bulunduğu açıklıkta meydana gelen basınç değeri p_{owc} yazılırsa eşitlik aşağıdaki şekilde düzenleniş olur [74]:

$$\begin{aligned} p_w + \rho \cdot g \cdot h_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \vartheta_{owc}^2 &= p_{owc} + \rho \cdot g \cdot h_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \vartheta_a^2 \\ p_{owc} &= p_w + \rho \cdot g \cdot h_1 - \rho \cdot g \cdot h_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \vartheta_{owc}^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \vartheta_a^2 \\ p_{owc} &= p_w + \rho \cdot \frac{d}{dt}(h_1 - h_2) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \vartheta_{owc}^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \vartheta_a^2 \end{aligned} \quad (3.74)$$

Su yüzeyindeki (h_1) ve türbinin bulunduğu hava aralığındaki (h_2) hava yüksekliğinin zamana bağlı değişimi gelen dalganın hareketi ve türbinin bulunduğu alan cinsinden aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$h_1 = \frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o \cdot \sin(\omega_o \cdot t) \cdot \cos(\omega_o \cdot t) \quad (3.75)$$

$$h_2 = \frac{A_{owc}}{(A_a - A_t)} \cdot \frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o \cdot \sin(\omega_o \cdot t) \cdot \cos(\omega_o \cdot t) \quad (3.76)$$

Hava haznesindeki havanın akış hızı:

$$\vartheta_{owc}(t) = \frac{H_o}{2} \cdot \omega_o \cdot \cos(\omega_o \cdot t) \quad (3.77)$$

Hacim akış sürekliliği denkleminde faydalanılarak salınlı su kolonu çıkışındaki havanın hızı şu şekilde yazılır:

$$\vartheta_a = \frac{A_{owc} \cdot \vartheta_{owc}}{(A_a - A_t)} \quad (3.78)$$

$$\vartheta_a(t) = \frac{H_o}{2} \cdot \omega_o \cdot \cos(\omega_o \cdot t) \cdot \frac{A_{owc}}{(A_a - A_t)} \quad (3.79)$$

Su kolonu çıkışındaki havanın hızı türbin boyutları cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\vartheta_a(t) = \frac{H_o}{2} \cdot \omega_o \cdot \cos(\omega_o \cdot t) \cdot \frac{L \cdot w}{\frac{\pi}{4} \cdot (D_a^2 - D_t^2)} \quad (3.80)$$

Yukarıdaki denklemler eşitlik 3.74'te yerine konulduğunda salınlımlı su kolonu çıkışındaki hava basıncı yeniden aşağıdaki şekilde düzenlenir:

$$p_{owc} = p_w + \rho \cdot \frac{d}{dt} \left(\left[\frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o \cdot \sin(\omega_o \cdot t) \cdot \cos(\omega_o \cdot t) \right] \cdot \left(1 - \frac{A_{owc}}{(A_a - A_t)} \right) \right) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \vartheta_{owc}^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \vartheta_a^2 \quad (3.81)$$

$$p_{owc} - p_w = \rho \cdot \frac{d}{dt} \left(\left[\frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o \cdot \sin(\omega_o \cdot t) \cdot \cos(\omega_o \cdot t) \right] \cdot \left(1 - \frac{A_{owc}}{(A_a - A_t)} \right) \right) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o^2 \cdot \cos^2(\omega_o \cdot t) \cdot \left(1 - \left(\frac{A_{owc}}{(A_a - A_t)} \right)^2 \right) \right) \quad (3.82)$$

Su yüzeyinde meydana gelen basınçla türbin dışındaki havanın basıncı arasındaki bağıntı ise Bernoulli denklemine bağlı olarak aşağıdaki şekilde yazılır [74].

$$p_w - p_o = \rho \cdot \frac{d}{dt} (h_o - h_1) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \vartheta_o^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \vartheta_{owc}^2 \quad (3.83)$$

Salınlımlı su kolonu içerisindeki hava basıncı türbinin yer aldığı bölümdeki hava basıncına göre çok düşüktür bu nedenle su kolonu içerisindeki suyun üzerinde meydana gelen basınçla dış ortamdaki hava basıncı arasındaki fark yaklaşık olarak sıfır kabul edilebilir. Ayrıca dışarıdaki havanın zamana bağlı yer değişimi de (hız değeri) ϑ_o , sıfır olarak kabul edildiği için eşitlik aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenir.

$$p_w - p_o \approx 0 \quad (3.84)$$

$$p_w - p_o = \rho \cdot \frac{d}{dt} (-h_1) - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \vartheta_{owc}^2 \quad (3.85)$$

Hız değerleri eşitlikte yerlerine konursa su yüzeyi üzerinde meydana gelen basınçla hava basıncı arasındaki oran aşağıdaki şekli alır:

$$p_w - p_o = \rho \cdot \frac{d}{dt} \left(-\frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o \cdot \sin(\omega_o \cdot t) \cdot \cos(\omega_o \cdot t) \right) - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o^2 \cdot \cos^2(\omega_o \cdot t) \quad (3.86)$$

Eşitlik 3.37’de gösterildiği üzere türbinden elde edilen güç türbin üzerine uygulanan hava basıncına bağlıdır. Bu basınç değerini bulmak için eşitlik eşitlik’deki yerine konursa türbin üzerinde meydana gelen bağıl basınç değeri aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$p_{owc} - p_o = -\rho \cdot \frac{d}{dt} \left(\left[\frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o \cdot \sin(\omega_o \cdot t) \cdot \cos(\omega_o \cdot t) \right] \cdot \frac{A_{owc}}{(A_a - A_t)} \right) - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o^2 \cdot \cos^2(\omega_o \cdot t) \cdot \left(\frac{A_{owc}}{(A_a - A_t)} \right)^2 \right) \quad (3.87)$$

Denklemlerin düzenlenmesi için aşağıdaki trigonometrik ifadelerden faydalanılır.

$$\frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o \cdot \sin(\omega_o \cdot t) \cdot \cos(\omega_o \cdot t) = \frac{H_o^2}{8} \cdot \omega_o \cdot \sin(2 \cdot \omega_o \cdot t) \quad (3.88)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{H_o^2}{8} \cdot \omega_o \cdot \sin(2 \cdot \omega_o \cdot t) \right) = \frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o^2 \cdot \cos(2 \cdot \omega_o \cdot t) \quad (3.89)$$

$$\frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o^2 \cdot \cos(2 \cdot \omega_o \cdot t) = \frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o^2 \cdot (2 \cdot \cos^2(\omega_o \cdot t) - 1) \quad (3.90)$$

Türbin üzerinde meydana gelen basınç değeri:

$$\Delta p = p_{owc} - p_o$$

$$\Delta p = -\rho \cdot \frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o^2 \cdot (2 \cdot \cos^2(\omega_o \cdot t) - 1) \cdot \frac{A_{owc}}{(A_a - A_t)} - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o^2 \cdot \cos^2(\omega_o \cdot t) \cdot \left(\frac{A_{owc}}{(A_a - A_t)} \right)^2 \right) \quad (3.91)$$

Türbine aktarılan basınç değeri hız cinsinden şu şekilde ifade edilir:

$$\Delta p = -\rho \cdot \frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o^2 \cdot (2 \cdot \cos^2(\omega_o \cdot t) - 1) \cdot \frac{A_{owc}}{(A_a - A_t)} - \rho \cdot \frac{Q}{A_a - A_t} \cdot (\vartheta_a - \vartheta_{owc}) \quad (3.92)$$

Basınç ve hacim akış oranları eşitlik 3.37’deki yerlerine konursa türbine aktarılan güç değeri aşağıdaki şekilde bulunmuş olur.

$$P_p(t) = \frac{E_p(t)}{T} = \Delta p \cdot q(t) = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta p \cdot q(t) \cdot dt \quad (3.93)$$

$$P_p(t) = \left\{ -\rho \cdot \frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o^2 \cdot (2 \cdot \cos^2(\omega_o \cdot t) - 1) \cdot \frac{A_{owc}}{(A_a - A_t)} - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o^2 \cdot \cos^2(\omega_o \cdot t) \cdot \left(\frac{A_{owc}}{(A_a - A_t)} \right)^2 \right) \right\} \cdot \left\{ \frac{H_o}{2} \cdot \omega_o \cdot A_{owc} \cdot \cos(\omega_o \cdot t) \right\} \quad (3.94)$$

Buradan eşitlik 3.28'den faydalanılarak salınlı su kolonunun verimi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\eta_{owc} = \frac{P_p}{P_w} = \frac{\left\{ -\rho \cdot \frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o^2 \cdot (2 \cdot \cos^2(\omega_o \cdot t) - 1) \cdot \frac{A_{owc}}{(A_a - A_t)} - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o^2 \cdot \cos^2(\omega_o \cdot t) \cdot \left(\frac{A_{owc}}{(A_a - A_t)} \right)^2 \right) \right\} \cdot \left\{ \frac{H_o}{2} \cdot \omega_o \cdot A_{owc} \cdot \cos(\omega_o \cdot t) \right\}}{\frac{1}{8} \cdot \rho_w \cdot g \cdot H^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot k \cdot h}{\sinh(2 \cdot k \cdot h)} \right) \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \tanh(k \cdot h)}{k}}} \quad (3.95)$$

Türbinden elde edilen mekanik şaft torku aşağıdaki şekilde yazılır.

$$T_{mech}(t) = T_{em}(t) + T_f(t) + T_j(t) \quad (3.96)$$

$$T_{em}(t) = \frac{P_{elek}(t) + P_{class}(t)}{N(t)} \quad (3.97)$$

$$T_f(t) = B_m N(t) \quad (3.98)$$

$$T_j(t) = J \cdot \frac{dN(t)}{dt} \quad (3.99)$$

T_{em} : Elektromagnetik tork

T_f : Sürtünme torku

T_j : Atalet torku

B_m : Türbin sürtünme faktörü

ρ_o : Hava yoğunluğu

J : Türbin ataleti

Türbin ataleti:

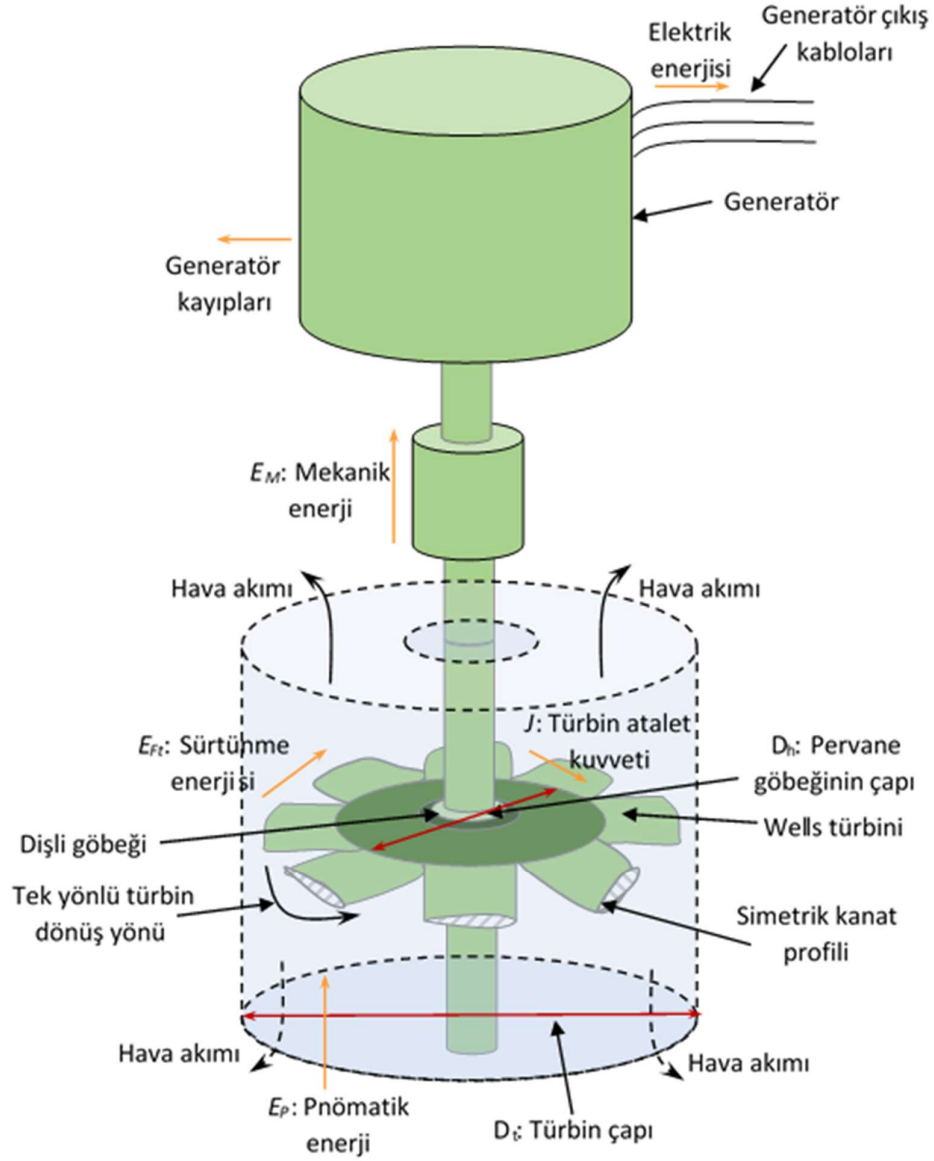
$$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \quad (3.99)$$

Mekanik enerji:

$$E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (3.100)$$

Türbin gücü:

$$P_t = \frac{dE}{dt} = \frac{d(\frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \cdot \omega^2)}{dt} = \frac{d}{dt} \cdot \frac{1}{4} \cdot (m \cdot (r \cdot \omega)^2) \quad (3.101)$$



Şekil 3.6 : Wells türbini üzerinde meydana gelen güç dağılımı.

Eşitlikteki, r , yarıçap değeri yerine Şekil 3.6’da yer alan türbin çapı (D_t) ve pervane çapı (D_h) arasındaki farkın yarı değeri konarak hesaplama yapılır. Böylece kullanılan Wells türbininin ebatlarına göre türbin çıkışında elde edilen mekanik güç değeri aşağıdaki şekilde yeniden yazılmış olur.

$$P_t = \frac{d}{dt} \cdot \frac{1}{16} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot (D_t - D_h)^2 \quad (3.102)$$

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot N_t^3 \cdot A_t \cdot B_t + \int_0^{+\infty} \eta_t(\varphi) \cdot \varphi^2 \cdot P_G(\varphi) \cdot d\varphi \quad (3.103)$$

Türbin verimi:

$$\eta_t = \frac{P_t}{P_p} = \frac{\int_0^{+\infty} \eta_t(\varphi) \cdot \varphi^2 \cdot P_G(\varphi) \cdot d\varphi}{N_\varphi^2} \quad (3.104)$$

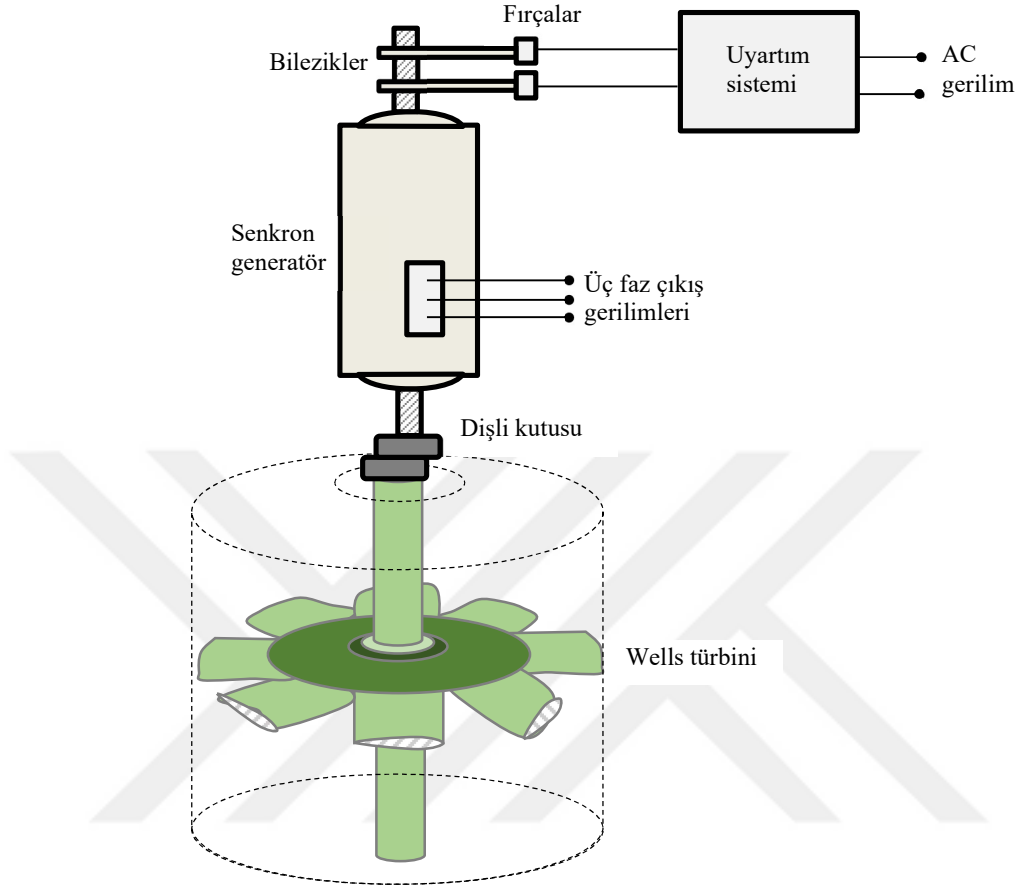
$$\eta_t = \frac{P_t}{P_p} = \frac{T_t \cdot N_t}{\Delta p \cdot Q} \quad (3.105)$$

$$\eta_t = \frac{P_t}{P_p} = \frac{T_t \cdot N_t}{\left\{ -\rho \cdot \frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o^2 \cdot (2 \cdot \cos^2(\omega_o \cdot t) - 1) \cdot \frac{A_{owc}}{(A_a - A_t)} - \right. \\ \left. \left\{ \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{H_o^2}{4} \cdot \omega_o^2 \cdot \cos^2(\omega_o \cdot t) \cdot \left(\frac{A_{owc}}{(A_a - A_t)} \right)^2 \right) \right\} \right\} \cdot \left\{ \frac{H_o}{2} \cdot \omega_o \cdot A_{owc} \cdot \cos(\omega_o \cdot t) \right\}} \quad (3.105)$$

3.1 Generatör eşdeğer devresi

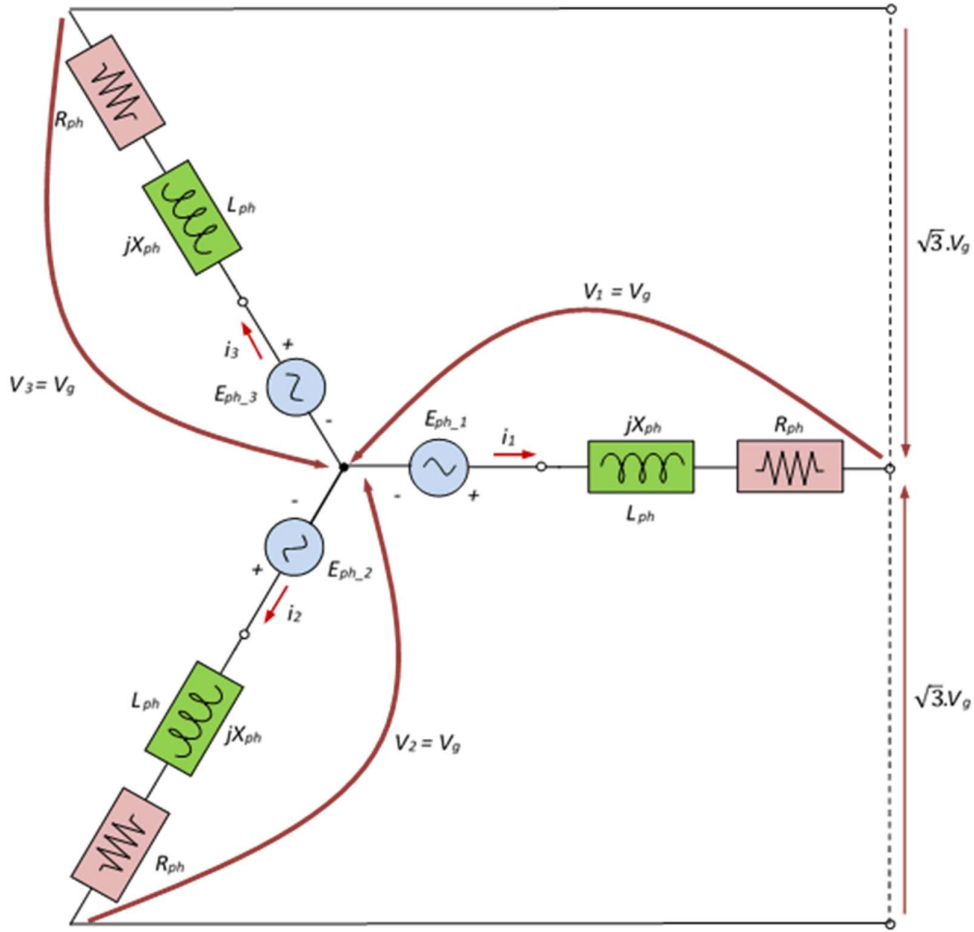
Yuvarlak rotorlu senkron generatörler yüksek devirli türbinlerde kullanmak için uygun generatör tipi oldukları için bu çalışmada yuvarlak rotorlu senkron generatör seçilmiştir. Boyları uzun, çapları küçük olan ve genelde doğru akım ile uyarılan senkron generatörler çoğunlukla iki veya dört kutuplu olarak üretilirler. Bu çalışmada senkron generatörün dört kutuplu olduğu kabul edilecektir. Senkron generatörde açısız hız, şebeke frekansının ve makine kutup sayısının bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\omega_g = \frac{120 \cdot f_g}{p} \quad (3.106)$$



Şekil 3.7 : Senkron generatörün Wells türbini ile birlikte çalıştırılması.

Şekil 3.8’de generatörün elektriksel eşdeğer devresi yer almaktadır. Şekilde de görüldüğü üzere generatörün bir fazı elektromotor kuvveti, generatörün iç direnci, reaktansı ve çıkış gerilimi ile modellenmektedir. E_{ph} ile gösterilen elektromotor kuvveti generatörde endüklenen gerilim değerini göstermektedir. Bu gerilim aynı zamanda generatör uçları boştayken ölçülen gerilim değerine de eşit olduğu için yüksüz (boşta) gerilim değeri olarak da adlandırılır.



Şekil 3.8 : Silindirik rotorlu senkron generatörün üç fazlı eşdeğer devresi.

Sargı dirençlerinden dolayı generatör içerisinde rezistif ve endüktif gerilim düşümleri meydana gelir. Bu gerilim düşümlerini sembolize etmek için sırasıyla R_{ph} ve X_{ph} değerleri kullanılarak generatör eşitlikleri eşitlik 3.107'deki gibi yazılır.

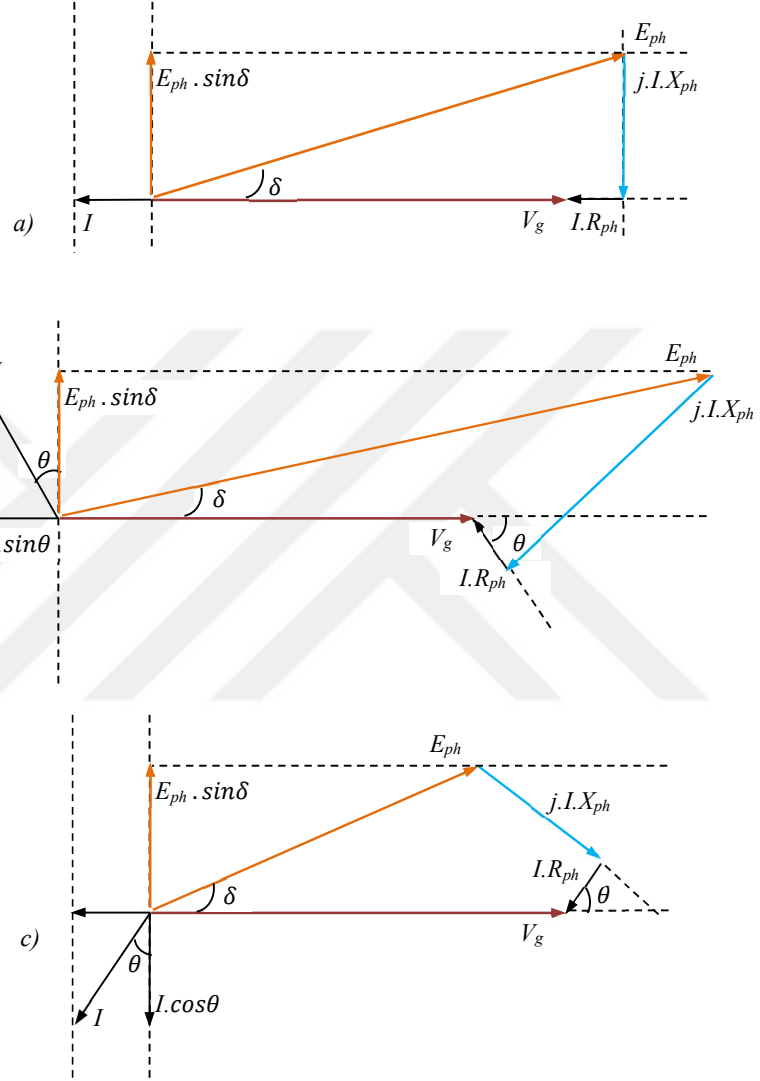
Generatör gerilim eşitlikleri:

$$\begin{aligned} E_{ph_1} &= R_{ph} \cdot i_1 + L_{ph} \frac{di_1}{dt} + V_1 \\ E_{ph_2} &= R_{ph} \cdot i_2 + L_{ph} \frac{di_2}{dt} + V_2 \\ E_{ph_3} &= R_{ph} \cdot i_3 + L_{ph} \frac{di_3}{dt} + V_3 \end{aligned} \quad (3.107)$$

Generatör akım eşitlikleri:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_1 &= \frac{E_{ph_1} - V_1 - i_1 \cdot R_{ph}}{L_{ph}} \\ \frac{d}{dt} i_2 &= \frac{E_{ph_2} - V_2 - i_2 \cdot R_{ph}}{L_{ph}} \end{aligned} \quad (3.108)$$

$$\frac{d}{dt} i_3 = \frac{E_{ph3} - V_3 - i_3 \cdot R_{ph}}{L_{ph}}$$



Şekil 3.9 : Generatör fazör diyagramı. a). Omik yükleme durumu. b). Endüktif yükleme durumu. c). Kapasitif yükleme durumu.

Şekil 3.9’da generatörün farklı yük durumlarındaki göre fazör diyagramları verilmiştir. Generatörün endüktif çalışması durumunda stator akımları rotor akımlarını zayıflatır, generatörün kapasitif çalışması durumunda ise stator akımları rotor akımlarını destekler. Bu da kapasitif çalışmada belli bir uç gerilimi için daha küçük bir uyarma akımına ihtiyaç duyulacağı anlamına gelir.

Şekil 3.9 (b)'de gösterilen fazör diyagrama göre generatör iç gerilimi ile generatör çıkış gerilimi arasındaki bağıntı endüktif yükleme durumunda göre aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\begin{aligned} E_{ph} \cdot \sin \delta &= I \cdot X_{ph} \cdot \cos \theta - I \cdot R_{ph} \cdot \sin \theta \\ E_{ph} \cdot \cos \delta &= I \cdot X_{ph} \cdot \sin \theta + I \cdot R_{ph} \cdot \cos \theta + V_g \end{aligned} \quad (3.109)$$

Burada faz başına düşen endüvi akımının kompleks düzlemdeki eşleniği şu şekilde ifade edilir:

$$I^* = \frac{1}{Z} \cdot (E_{ph} \cdot e^{j(\frac{\pi}{2}-\delta)} - V \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}) \quad (3.110)$$

Senkron generatörün üç faz görünür gücü aşağıdaki ekilde yazılır.

$$\begin{aligned} S &= P + j \cdot Q \\ S &= 3 \cdot V \cdot I^* \end{aligned} \quad (3.111)$$

Generatör iç direnci, R_{ph} , ihmal edilirse eşitlik 3.110'daki Z empedans değeri yerine X_{ph} endüktans empedans değeri konarak güç değeri aşağıdaki şekilde yazılır:

$$S = 3 \cdot V \cdot \frac{1}{X} \cdot (E_{ph} \cdot e^{j(\frac{\pi}{2}-\delta)} - V \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}) \quad (3.112)$$

$$\begin{aligned} S &= 3 \cdot V \cdot \frac{1}{X} \cdot (E_{ph} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} - \delta) + j \cdot E_{ph} \cdot \sin(\frac{\pi}{2} - \delta) - j \cdot V) \\ S &= 3 \cdot V \cdot \frac{1}{X} \cdot (E_{ph} \cdot \sin(\delta) + j \cdot (E_{ph} \cdot \cos(\delta) - V)) \end{aligned} \quad (3.113)$$

Buradan aktif güç ve reaktif güç değerleri eşitlik 3.114 ve eşitlik 3.115'teki şekilde elde edilir.

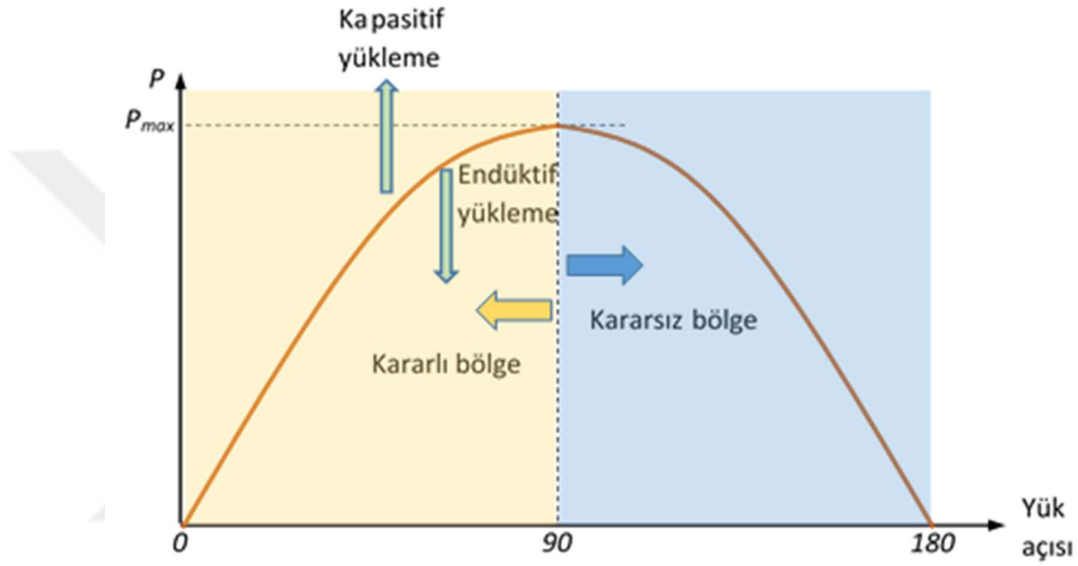
Aktif güç:

$$P = 3 \cdot V \cdot \frac{1}{X} \cdot E_{ph} \cdot \sin(\delta) \quad (3.114)$$

Reaktif güç:

$$Q = 3 \cdot V \cdot \frac{1}{X} \cdot (E_{ph} \cdot \cos(\delta) - V) \quad (3.115)$$

Aktif ve reaktif güç denklemlerinden anlaşılağı üzere senkron genaratör tarafından üretilen güç değeri genaratör iç gerilimi ile genaratör terminallerinden elde edilen gerilim arasındaki δ açısına bağı olduğı görölür. Buradan genaratör maksimum gücünün δ açısının 90 derece olduğı durumda elde edileceğı bilinmektedir. Ancak aşğıdaki şekilden de anlaşılağı üzere açının 90 dereceye ulaşması durumunda genaratör kararlılık sınırı zorlanacağı için yük açısı çok daha küçük bir değerde tutulur.



Şekil 3.10 : Senkron genaratörün güç/yük açısı karakteristiğı.

Genaratörün rotor milinde oluşın maksimum moment değeri ise aşğıdaki eşitlikten bulunur:

$$T_{max} = \frac{P_{max}}{\omega_g} \quad (3.116)$$

$$T_{max} = \frac{P_{max} \cdot p}{120 \cdot f_g} \quad (3.117)$$

Ortalama momentin yük açısı cinsinden değeri ise şu şekilde ifade edilir:

$$T_{max} = 3 \cdot V \cdot \frac{1}{X} \cdot E_{ph} \cdot \frac{p}{120 \cdot f_g} \cdot \sin(\delta) \quad (3.118)$$

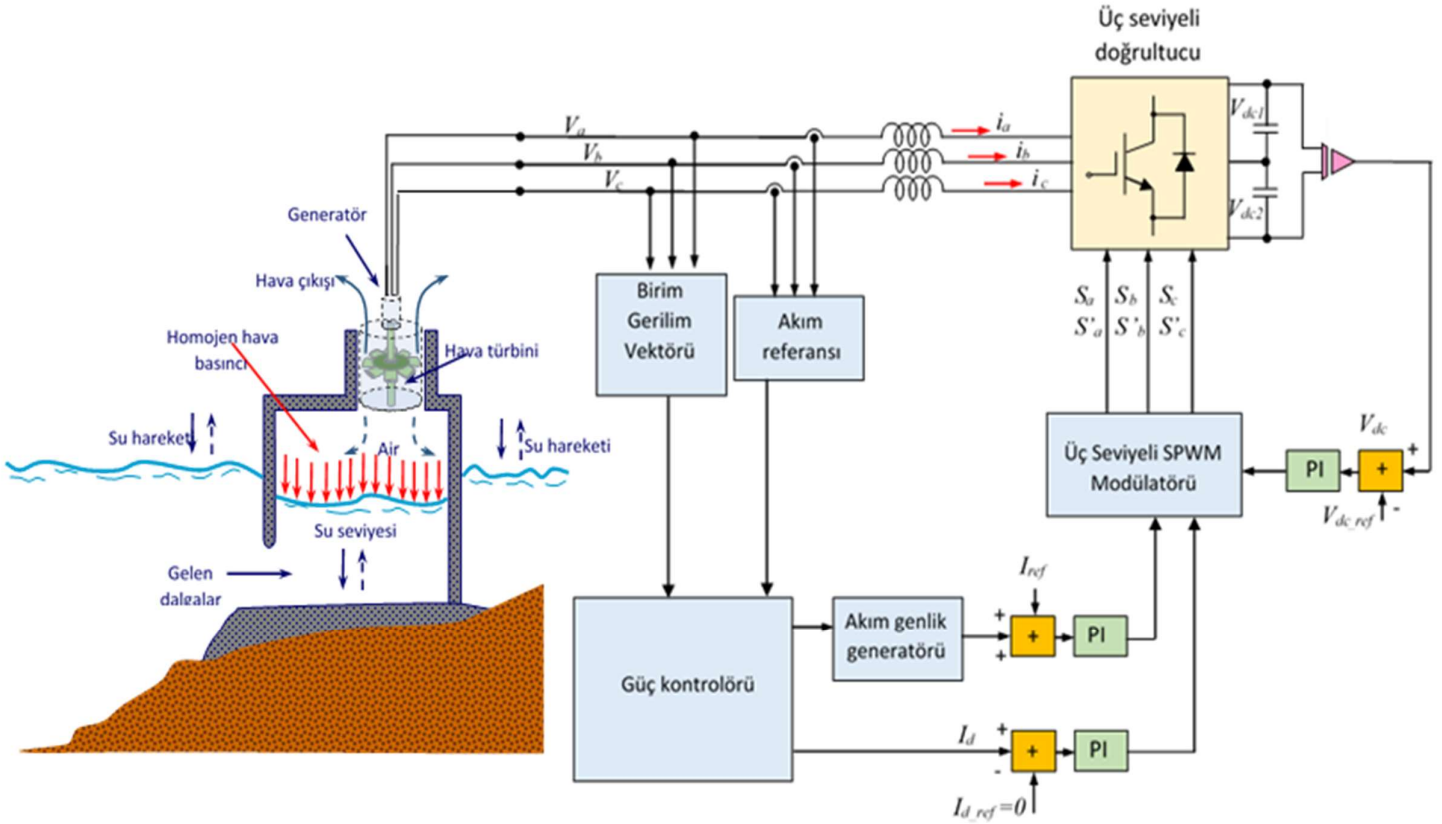


4. ÜÇ SEVİYELİ AKTİF DOĞRULTUCUNUN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ

Bu çalışmada elektrik enerjisini üretecek olan dalga generatörünün kıyı şeridi boyunca orta derinlikteki dalga sularında çalıştırılacağı düşünülmektedir. Generatörün çıkışındaki gerilimin değişken frekans ve değişken genlikte olduğu düşünülecek olursa, enerjinin şebekeye aktarılmadan önce uygun genlik ve frekanstaki gerilime dönüştürülmesi gerekir. Bunun için de doğrultucu ve evirici ünitelerinden oluşan iki aşamalı güç koşullandırma sisteminin tasarlanması gereklidir. Üretilen enerjinin en verimli şekilde kullanılması açısından enerjinin üretildiği yerde doğrultulması ve minimum uzunluktaki iletim hatlarıyla şebekeye aktarılacağı yere taşınması ve orada alternatif gerilime dönüştürülerek şebekeye entegre edilmesi gerekir. Bu bölümde generatör çıkışındaki düzensiz genlik ve frekanstaki alternatif gerilimi doğru gerilime çevirecek olan üç seviyeli doğrultucu ünitesinin tasarımı anlatılmıştır.

Elektrik enerjisi üreticinin çıkışındaki güç koşullandırma birimi aşağıdaki Şekil 4.1’de görülen kontrollü doğrultucu ile başlayacaktır. Burada değişken genlik ve frekanslı gerilim daha sonra istenen değere işlenmek için ilk olarak doğrultulmuş sabit gerilime dönüştürülür. Harmonik bileşeninin çok düşük seviyeye indirilmesi dolayısıyla üç seviyeli aktif doğrultucunun kontrolünde sinüzoidal darbe genlik modülasyonu kullanılmıştır.

Şekil 4.1’de gösterilen diyot kenetlemeli üç seviyeli doğrultucunun anahtarlanması, referans sinüs sinyali doğru gerilim seviyesinde kazanca sahip iki farklı yüksek frekanslı üçgen sinyalin karşılaştırılması yöntemine dayanır. Bu yöntemde, her bir yarı iletken anahtarın darbe genlik oranı referans sinüs sinyali ile taşıyıcı üçgen dalga sinyali arasındaki genli oranına bağlı olarak değişir. Bu nedenle bir sinüs dalga süresi boyunca bir anahtarın anahtarlama süresi sürekli olarak değişir.



Şekil 4.1 : Üç fazlı üç seviyeli çeviricinin kontrol blok diyagramı.

Doğrultucu çıkışındaki elektrik enerjisi ara devre kondansatörlerinde depolanır. Dalga enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesinde enerjinin kısa süreli depolanması çok önemlidir. Denizdeki dalgaların dalga boylarının sürekli değişiklik göstermesi, generatör çıkışındaki elektriksel gücün de zamanla değişken nitelikte olmasına yol açmaktadır. Dağıtım şebekesine aktarılan gücün kalitesini ve kullanılabilirliğini belirleyecek ilk etken şebekeye aktarılan güçte (aktif ve/veya reaktif güç) dalgalanmanın olmaması veya meydana gelen dalgalanmanın ihmal edilebilir sınırlar içerisinde kalmasıdır. Bunu sağlamak için de, üretilen enerjinin belirli bir süre boyunca depolanması kaçınılmaz bir durumdur. Depolama sistemi dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinin maliyetinde belirleyici bir rol oynamaktadır.

Bu uygulamanın gerçek hayata uyarlanması durumunda doğru gerilim barasında enerji depolama sistemi olarak kondansatör ve batarya ünitelerinin bir arada kullanılması çok daha güvenilir bir çözüm sunacaktır. Aynı zamanda dalgalardaki süreksizliklerin kompanze edilmesi ve şebekeye aktarılan enerjinin kalitesinin artırılması açısından batarya kullanımı çok daha verimli bir çözüm sunacaktır. Ancak akü kontrolü ya da evicirinin UPS (kesintisiz güç kaynağı) olarak kullanılması bu tez çalışmasının kapsamında yer almadığı için bu çalışmada doğru gerilim barasında depolama ünitesi olarak sadece kondansatör ünitesi kullanılmıştır.

4.1 Üç Seviyeli Aktif Doğrultucunun Çalışma Şekli

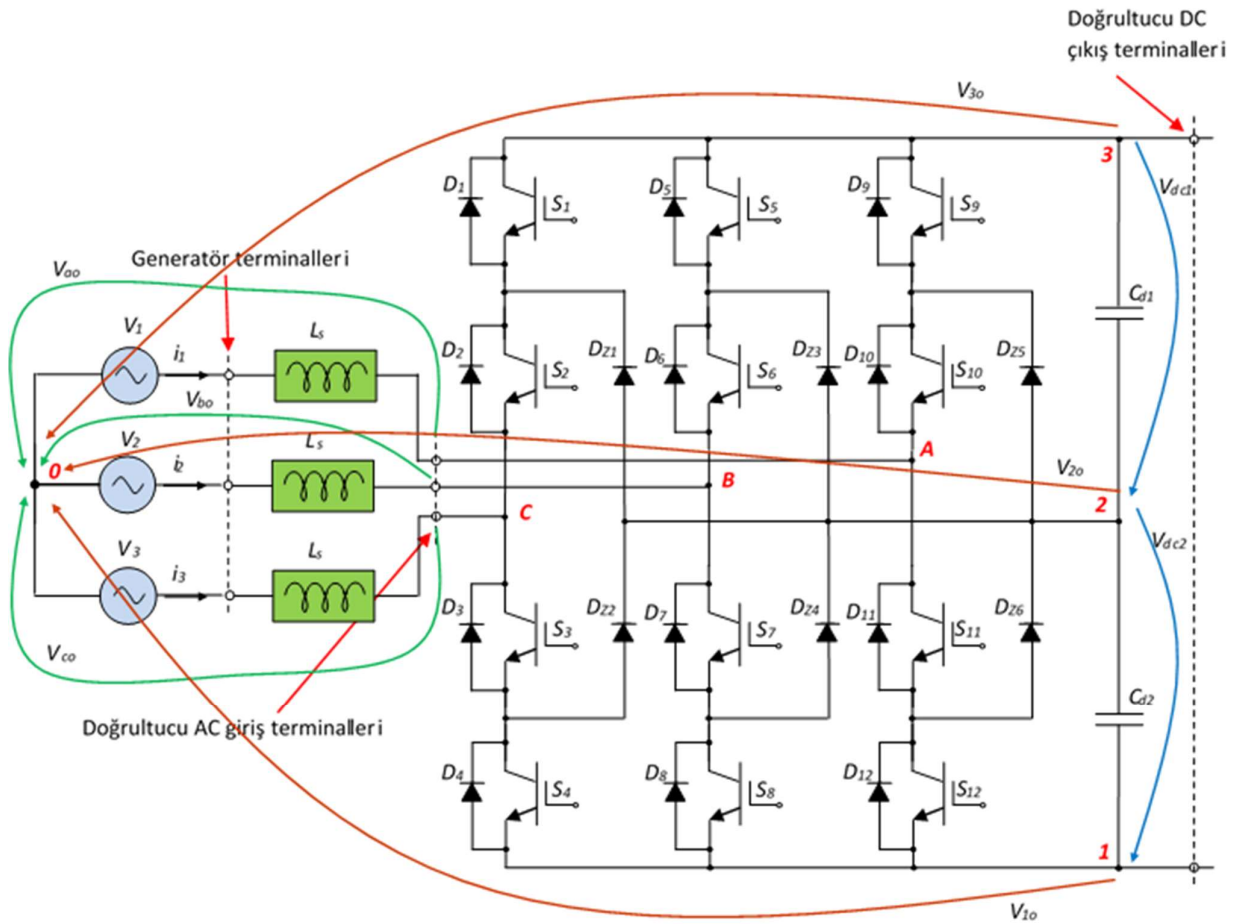
Aktif doğrultucu uygulamalarında anahtarlama elemanları üzerindeki gerilim stresinin azaltılması, anahtarlama kayıplarının ve harmoniklerin düşürülmesi ve çıkış gücünün artırılması için son yıllarda çok seviyeli çeviricilere olan ilgi giderek artmaktadır. Bunlar arasında en yaygın olarak uygulanan kaskad bağlı çeviriciler ve nötr noktası diyot kenetlemeli çeviricilerdir. Prensipde sistemde iki seviyeli çevirici yerine üç seviyeli çevirici kullanılmasının nedeni, anahtarlama üzerindeki gerilim stresinin azalması nedeniyle düşük gerilim seviyesine sahip anahtarlama elemanları kullanarak daha yüksek gerilim seviyesinde çalışılmasına olanak sağlanması, daha düşük anahtarlama frekansına gereksinim duyulması ve dolayısıyla anahtarlama kayıplarının da daha düşük olmasıdır. Aynı zamanda üç seviyeli doğrultucunun faz-nötr geriliminin üç seviyeli olması, doğrultucu girişindeki akım harmonik bileşenlerinin IEEE 519 ve IEC 61000-3-2 standartlarınca belirlenen harmonik sınırlarına uygun olacak şekilde düşük olmasını sağlamaktadır. Bu da doğrultucu girişindeki harmonik filtresinin ebatlarını düşürmektedir.

Üç seviyeli diyot kenetlemeli aktif doğrultucuların kontrolü için çeşitli kontrol yöntemleri ileri sürülmüştür, bunlar arasında histerezis kontrolü, sıfır geçişlerini takip eden sinüzoidal PWM tekniği gibi yöntemler yer almaktadır. Hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın enerjinin efektif olarak kullanılmasının sağlanması ve yüke sabit güç akışının gerçekleşmesi için bu uygulamada kontrolörünün aşağıdaki özellikleri sağlaması gerekir [53], [69].

- Doğru gerilim barasının gerilim değerinin sabit tutulması
- Çift yönlü akım geçişinin sağlanması

- Akım harmoniğinin düşürülmesi
- Doğru gerilim barası orta nokta geriliminin sabit tutulması
- Doğrultucunun alternatif akım uçlarında üç seviyeli faz arası gerilimlerinin oluşturulması
- Alternatif akım girişinden sinüzoidal akım çekerek güç faktörünün bire yakın tutulması

Bu uygulamada doğru gerilim barası orta noktası, aynı bara gerilimine bağlı üç fazlı evirici kontrolörü tarafından kontrol edildiği için doğrultucu kontrolöründe doğru gerilim barasındaki alt ve üst koldaki kondansatör gerilimlerinin eşit olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 4.2 : Üç fazlı üç seviyeli aktif doğrultucu yapısı.

Şekil 4.2’de gösterilen üç seviyeli aktif doğrultucu yapısı topolojik olarak üç seviyeli evirici ile aynı yapıda olmasına rağmen burada anahtarlama elemanları filtreleri şarj ederek pasif rol oynarken, diyotlar doğru gerilim barasına akım taşımak için aktif rol

oyunlar. Şekilde de görüldüğü üzere üç fazlı doğrultucunun alternatif akım giriş uçları üç fazlı sabit mıknatıslı generatörün çıkış terminallerine endüktans üzerinden bağlanırlar. Şekil üzerinde gösterilen gerilim sembolleri aşağıda belirtilen gerilim değerleri için verilmiştir.

V_{ao} : A alternatif gerilim terminali ile generatörün 0 noktası arasındaki gerilim değeri

V_{bo} : B alternatif gerilim terminali ile generatörün 0 noktası arasındaki gerilim değeri

V_{co} : C alternatif gerilim terminali ile generatörün 0 noktası arasındaki gerilim değeri

V_{3o} : Doğru gerilim barasının pozitif noktası ile generatörün 0 noktası arasındaki gerilim değeri

V_{2o} : Doğru gerilim barasının orta noktası ile generatörün 0 noktası arasındaki gerilim değeri

V_{1o} : Doğru gerilim barasının negatif noktası ile generatörün 0 noktası arasındaki gerilim değeri

Çizelge 4.1: Anahtarlama durumlarına göre gerilim değerleri

Anahtarlama durumu	İletimdeki anahtarlar	Gerilim değeri
$H_{a3} = S_{1ap} \cdot S_{2ap}$	$S_1 \ S_2$	$\frac{V_{dc}}{2}$
$H_{a2} = S_{1ap} \cdot \overline{S_{2ap}}$	$S_2 \ S_3$	0
$H_{a1} = \overline{S_{1ap}} \cdot S_{2ap}$	$S_3 \ S_4$	$-\frac{V_{dc}}{2}$

$$\begin{aligned} \overline{S_{1ap}} &= 1 - S_{1ap} \\ \overline{S_{2ap}} &= 1 - S_{2ap} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Çizelge 4.1’de anahtarlama durumlarına göre faz nötr geriliminin nasıl değiştiği gösterilmektedir. Üç seviyeli çeviricide doğru gerilim barasına bağlı kondansatörün kısa devre olmaması için bu anahtarlama kombinasyonlarından sadece birinin aynı anda aktif olması gerekir. Doğrultucu girişindeki gerilimler Kirchhoff yasasına göre aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned}
V_a &= L_s \frac{di_a}{dt} + v_{ao} \\
V_b &= L_s \frac{di_b}{dt} + v_{bo} \\
V_c &= L_s \frac{di_c}{dt} + v_{co}
\end{aligned} \tag{4.2}$$

A alternatif gerilim terminalindeki efektif gerilimin $H_{a3} V_{3o}$ anahtarlama kombinasyonu ile oluştuğu kabul edilirse V_{ao}, V_{bo}, V_{co} noktasındaki gerilim değerleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned}
V_{ao} &= H_{a3} V_{3o} + H_{a2} V_{2o} + H_{a1} V_{1o} \\
V_{bo} &= H_{b3} V_{3o} + H_{b2} V_{2o} + H_{b1} V_{1o} \\
V_{co} &= H_{c3} V_{3o} + H_{c2} V_{2o} + H_{c1} V_{1o}
\end{aligned} \tag{4.3}$$

$$\begin{aligned}
H_{a3} + H_{a2} + H_{a1} &= 1 \\
H_{b3} + H_{b2} + H_{b1} &= 1 \\
H_{c3} + H_{c2} + H_{c1} &= 1
\end{aligned} \tag{4.4}$$

Yukarıdaki eşitlik, gerilim eşitliklerinde yerine konuğunda gerilim değerleri anahtarlama durumlarına göre aşağıdaki gibi yeniden yazılır:

$$\begin{aligned}
V_a &= L_s \frac{di_a}{dt} + H_{a3} V_{c1} - H_{a1} V_{c2} + V_{2o} \\
V_b &= L_s \frac{di_b}{dt} + H_{b3} V_{c1} - H_{b1} V_{c2} + V_{2o} \\
V_c &= L_s \frac{di_c}{dt} + H_{c3} V_{c1} - H_{c1} V_{c2} + V_{2o}
\end{aligned} \tag{4.5}$$

Kondansatör gerilim değerlerinin eşit olduğu durum için doğru gerilim barası orta noktası ile generatör nötr noktası arasındaki gerilim değeri şu şekilde yazılır:

$$V_{2o} = -\frac{1}{3} [V_{c1}(H_{a3} + H_{b3} + H_{c3}) + V_{c2}(H_{a1} + H_{b1} + H_{c1})] \tag{4.6}$$

Anahtarlama sinyallerinin modülasyon indeksleri aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned}
H_{a3} &= \left(\frac{2V_{ao}}{V_d} + 1 \right) \frac{1}{3} = (m_{a3} + 1) \frac{1}{3} \\
H_{a2} &= \frac{1}{3} = (m_{a2} + 1) \frac{1}{3} \\
H_{a1} &= \left(-\frac{2V_{ao}}{V_d} + 1 \right) \frac{1}{3} = (m_{a1} + 1) \frac{1}{3}
\end{aligned} \tag{4.7}$$

$$\begin{aligned}
m_{a3} &= \frac{2V_{ao}}{V_d} \\
m_{a2} &= 0 \\
m_{a1} &= -\frac{2V_{ao}}{V_d} \\
m_{a3} &= -m_{a1} = -H_a
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Modülasyon indeksleri eşitlik 4.5'te yerine konduğunda gerilim değerleri aşağıdaki şekli alır.

$$\begin{aligned}
v_a &= L_s \frac{di_a}{dt} + H_a (V_{c1} + V_{c2}) + V_{2o} \\
v_b &= L_s \frac{di_b}{dt} + H_b (V_{c1} + V_{c2}) + V_{2o} \\
v_c &= L_s \frac{di_c}{dt} + H_c (V_{c1} + V_{c2}) + V_{2o}
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Doğru gerilim barasının pozitif, nötr ve negatif noktasındaki akım değerleri, sırasıyla I_3, I_2, I_1 , anahtarlama konumları cinsinden aşağıdaki şekilde yazılırlar.

$$\begin{aligned}
I_3 &= H_{a3}i_a + H_{b3}i_b + H_{c3}i_c \\
I_2 &= H_{a2}i_a + H_{b2}i_b + H_{c2}i_c \\
I_1 &= H_{a1}i_a + H_{b1}i_b + H_{c1}i_c
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Buradan kondansatör akımları şu şekilde yazılır:

$$\begin{aligned}
C_1 \cdot \frac{dV_{c1}}{dt} &= -I_{dc} + H_{a3}i_a + H_{b3}i_b + H_{c3}i_c \\
C_2 \cdot \frac{dV_{c2}}{dt} &= -(I_{dc} + H_{a1}i_a + H_{b1}i_b + H_{c1}i_c)
\end{aligned} \tag{4.11}$$

Çevirici eşitlikleri:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{a3} \\ H_{b3} \\ H_{c3} \end{bmatrix} V_{c1} - \begin{bmatrix} H_{a1} \\ H_{b1} \\ H_{c1} \end{bmatrix} V_{c2} + V_{2o} \tag{4.12}$$

Burada üç fazlı doğrultucunun akım ve gerilim değerleri dq dönüşümü kullanılarak aktif ve reaktif doğrultucu girişindeki aktif ve reaktif gücün kontrolü sağlanmıştır. Üç fazlı sistemin iki fazlı dq bileşenlerine dönüştürülmesi sistemin kararlı hal hatalarının da ortadan kaldırılmasını sağlamaktadır. Aşağıdaki eşitliklerde gerilim ve akım değerlerinin d ve q bileşenlerinin elde edilmesi gösterilmektedir.

$$\begin{aligned}
V_q^* &= L_s \frac{dI_q^*}{dt} + \omega_e L_s I_d^* + V_{c1} H_{q3} - V_{c2} H_{q1} \\
V_d^* &= L_s \frac{dI_d^*}{dt} - \omega_e L_s I_q^* + V_{c1} H_{d3} - V_{c2} H_{d1} \\
V_0^* &= L_s \frac{dI_0^*}{dt} + V_{c1} H_{03} - V_{c2} H_{01}
\end{aligned} \tag{4.13}$$

$$\begin{aligned} C_1 \cdot \frac{dV_{c1}}{dt} &= -I_{dc} + \frac{3}{2} [H_{q3} I_q^* + H_{d3} I_d^* + H_{03} I_0^*] \\ C_2 \cdot \frac{dV_{c2}}{dt} &= - \left[I_{dc} + \frac{3}{2} [H_{q1} I_q^* + H_{d1} I_d^* + H_{01} I_0^*] \right] \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} H_{q3} &= \frac{2}{3} [H_{a3} \cos(\theta) + H_{b3} \cos(\theta - \beta) + H_{c3} \cos(\theta + \beta)] \\ H_{d3} &= \frac{2}{3} [H_{a3} \sin(\theta) + H_{b3} \sin(\theta - \beta) + H_{c3} \sin(\theta + \beta)] \\ H_{03} &= \frac{1}{3} [H_{a3} + H_{b3} + H_{c3}] \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} H_{q1} &= \frac{2}{3} [H_{a1} \cos(\theta) + H_{b1} \cos(\theta - \beta) + H_{c1} \cos(\theta + \beta)] \\ H_{d1} &= \frac{2}{3} [H_{a1} \sin(\theta) + H_{b1} \sin(\theta - \beta) + H_{c1} \sin(\theta + \beta)] \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$H_{01} = \frac{1}{3} [H_{a1} + H_{b1} + H_{c1}] \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} H_{q3} &= \alpha H_q ; H_{d3} = \alpha H_d \\ H_{q1} &= -\beta H_q ; H_{d1} = -\beta H_d \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} V_q^* &= L_s \frac{dI_q^*}{dt} + \omega_e L_s I_d^* + (\alpha V_{c1} + \beta V_{c2}) H_q \\ V_d^* &= L_s \frac{dI_d^*}{dt} - \omega_e L_s I_q^* + (\alpha V_{c1} + \beta V_{c2}) H_d \end{aligned} \quad (4.19)$$

Kondansatör akımlarının d ve q bileşenleri cinsinden yeniden yazılması.

$$\begin{aligned} C_1 \cdot \frac{dV_{c1}}{dt} &= -I_{dc} + \frac{3}{2} [\alpha (H_q I_q^* + H_d I_d^*)] \\ C_2 \cdot \frac{dV_{c2}}{dt} &= - \left[I_{dc} - \frac{3}{2} [\beta (H_q I_q^* + H_d I_d^*)] \right] \end{aligned} \quad (4.20)$$

Kararlı hal durumunda $\alpha = \beta$ olacağı için eşitlikler aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenir:

$$\begin{aligned} V_q^* &= L_s \frac{dI_q^*}{dt} + \omega_e L_s I_d^* + (V_{dc}) H_q \\ V_d^* &= L_s \frac{dI_d^*}{dt} - \omega_e L_s I_q^* + (V_{dc}) H_d \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} C_1 \cdot \frac{dV_{c1}}{dt} &= -I_{dc} + \frac{3}{2} [(H_q I_q^* + H_d I_d^*)] \\ C_2 \cdot \frac{dV_{c2}}{dt} &= - \left[I_{dc} - \frac{3}{2} [(H_q I_q^* + H_d I_d^*)] \right] \end{aligned} \quad (4.22)$$

Aktif ve reaktif güç eşitlikleri:

$$P = \frac{3}{2}(V_q I_q + V_d I_d) \quad (4.23)$$

$$Q = \frac{3}{2}(V_d I_q - V_q I_d) \quad (4.24)$$

Burada reaktif güç değeri sıfırlanarak güç faktörünün “1”e eşit olması sağlanmaya çalışıldığı için d ve q gerilim değerleri aşağıdaki şekilde alınır:

$$V_q = V, V_d = 0, V_q \cdot I_d = 0, I_d = 0 \quad (4.25)$$

$$Q = \frac{3}{2}(V_d I_q - V_q I_d) = 0 \quad (4.26)$$

$$\begin{aligned} V_q &= R_s I_q + H_q V_{dc} \\ V_d &= -\omega_e L_s I_q + H_d V_{dc} \\ 0 &= -I_{dc} + \frac{3}{2} \alpha H_q I_q \end{aligned} \quad (4.27)$$

Buradan anahtarlama durumlarının d ve q bileşenleri eşitlik 4.28 ve eşitlik 4.29'daki gibi yazılır.

$$= \frac{3R_L V_q - \sqrt{3}[-R_L(-3R_L V_q^2)]^{1/2}}{6R_L V_{dc}} \cdot \frac{H_q}{6R_L V_{dc}} \cdot \frac{3R_L V_q + \sqrt{3}[-R_L(-3R_L V_q^2)]^{1/2}}{6R_L V_{dc}} \quad (4.28)$$

$$\begin{aligned} H_d &= \frac{6V_{dc} R_L R_s + \omega_e L_s \sqrt{3}[-R_L(-3R_L V_q^2)]^{1/2}}{6R_L V_{dc}} \\ &\quad \frac{3\omega_e L_s R_L V_q - \omega_e L_s \sqrt{3}[-R_L(-3R_L V_q^2)]^{1/2}}{6R_L V_{dc}} \end{aligned} \quad (4.29)$$

$$I_d = \frac{3R_L V_q + \sqrt{3}[-R_L(-3R_L V_q^2)]^{1/2}}{6R_L} \cdot \frac{3R_L V_q - \sqrt{3}[3R_L^2 V_q^2]^{1/2}}{6R_L} \quad (4.30)$$



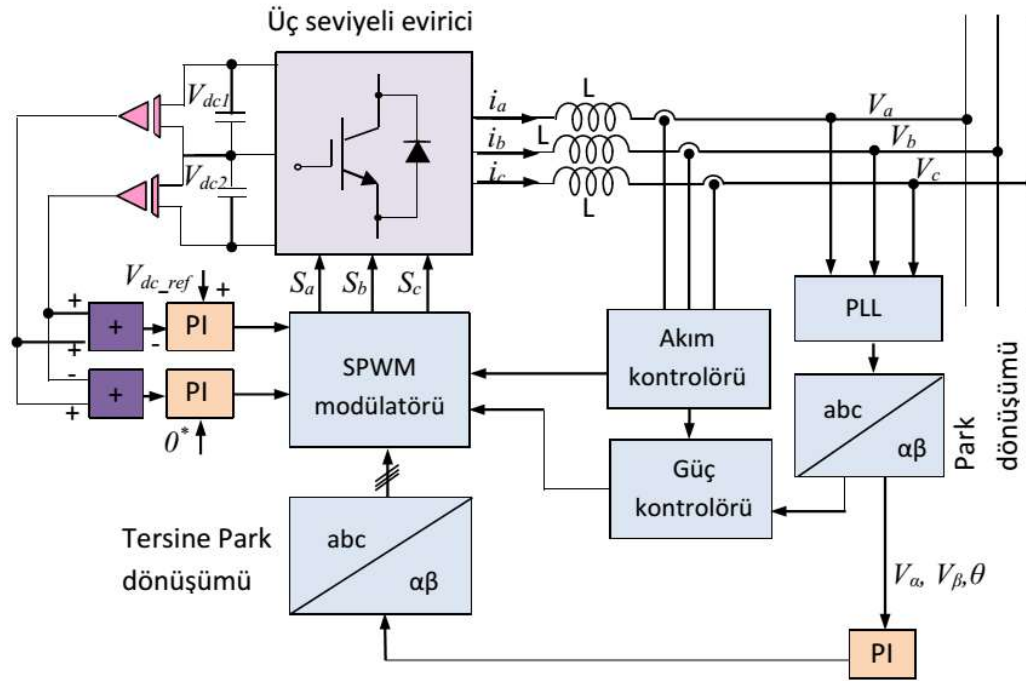
5. ÜÇ SEVİYELİ EVİRİCİNİN NTV-SV-PWM METODU İLE KONTROLÜ VE DC BARA ORTA NOKTASININ DENGELENMESİ

5.1 Üç Seviyeli Eviricinin NTV-SV-PWM Metodu ile Kontrol Edilmesi

Şebeke hattından çekilen veya şebeke hattına gönderilen akım ve gerilimlerin toplam harmonik distorsiyonlarının ve harmonik bileşenlerinin güç kalitesi standartları gereği belirli değerin altında tutulması gerekir. Ancak konvansiyonel eviriciler ve konvansiyonel kontrol yöntemleriyle bu standartları yakalamak oldukça zordur. Dalga enerjisi gibi elektrik enerjisi üretilen kaynağın düzensiz alternatif gerilim ürettiği bir uygulamada bu durum daha da önemlidir. Bu nedenle bu çalışmada üç seviyeli, diyot kenetlemeli evirici topolojisi kullanılmış ve gerilim kademeleri artırılarak toplam harmonik seviyeleri düşürülmüştür. Bu topoloji sayesinde kullanılan yarı iletken anahtarlar üzerindeki dv/dt oranı düşürüldüğü için daha yüksek gerilimde düşük anahtarlama gerilimindeki yarı iletken anahtarların da kullanılması mümkün olmaktadır.

Bu çalışmada üç seviyeli eviricinin kontrolünde en yakın üç vektör - uzay vektör modülasyon kontrol (NTV-SV-PWM, Nearest Three Vector – Space Vector – Pulse Width Modulation) yöntemi uygulanmıştır. Üç fazlı eviriciye ait kontrol bloğu aşağıdaki Şekil 5.1’de gösterildiği gibidir. Şekilden de anlaşılabacağı üzere gerilim kaynaklı eviricinin akım regülasyonuna gereksinim duyması nedeniyle şebekeden akım geri beslemesi alınmıştır. Evirici çıkışının şebekeye senkron çalıştırılması ve referans vektörün elde edilmesi de gerilim geri beslemesi ve PLL (Phase Locked Loop – Faz Kenetleme Devresi) devresi ile yapılmıştır.

Çok seviyeli çeviricileri kontrol etmek için kullanılan en yaygın yöntem sinüs biçimli darbe genlik modülasyonudur (SPWM). Bunun yanında yine çok seviyeli uygulamalarda sıklıkla kullanılan uzay vektör modülasyonu (SVPWM) çok daha karmaşık bir kontrol yöntemi olmasına karşın, harmonikleri bastırmak ve anahtarlama kayıplarını düşürerek güç kayıplarını azaltmak açısından sinüzoidal darbe genlik modülasyonuna göre çok daha efektif bir yöntemdir. Bu bölümde uzay vektör modülasyonunun çalışma şekli irdelenecek ve uzay vektör modülasyonunun üç seviyeli ortadan diyot kenetlemeli eviriciye nasıl uygulanacağı açıklanacaktır.

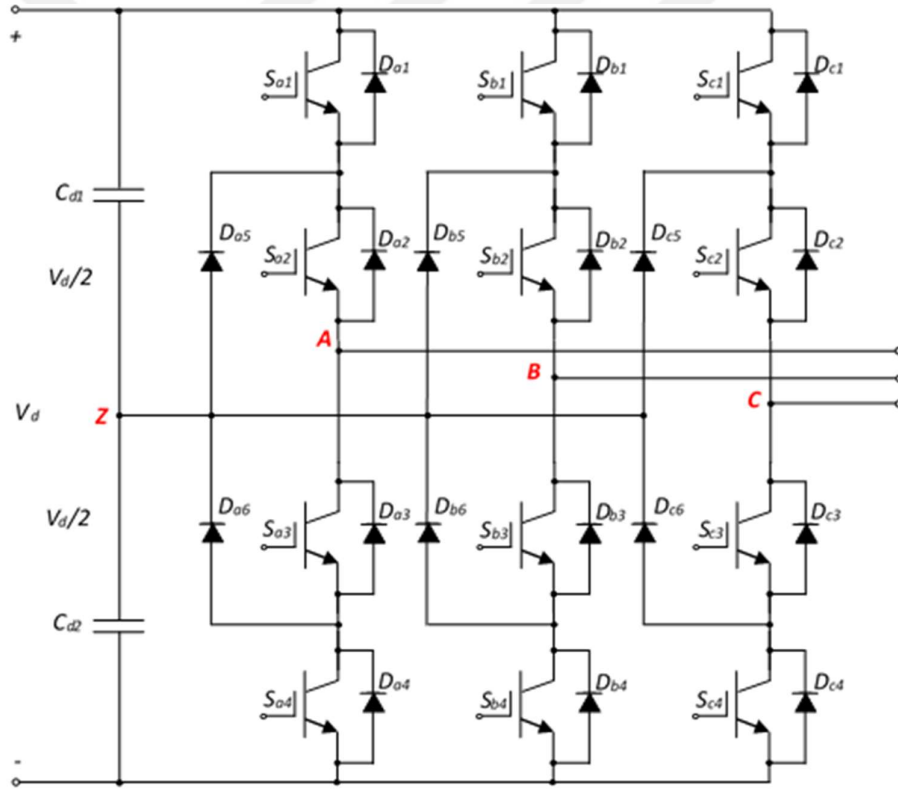


Şekil 5.1 : Üç fazlı eviriciye ait kontrol blok diyagramı.

5.1.1 Üç seviyeli çeviricinin anahtarlama kombinasyonlarına göre vektör tipleri

Uzay vektörü modülasyonu tekniği, referans olarak girilen gerilim değerini çeviricinin çıkışında elde etmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. Bu yöntemde her örnekleme periyodunda hangi anahtarlama yapılabileceği ve anahtarlama süreleri hesaplanır. Bu bölümde anahtarlama süresi boyunca anahtarlama durumlarının nasıl seçildiği ve anahtarlama sürelerinin nasıl hesaplandığı açıklanacaktır.

Üç seviyeli eviricinin uzay vektör modülasyonu ile kontrolü incelemek için ilk olarak üç seviyeli çeviricinin farklı anahtarlama durumlarına göre meydana gelen uç gerilimlerini incelemek gerekir. Çizelge 5.1’de gösterilen anahtarlama durumları Şekil 5.2’de gösterilen üç seviyeli NPC çeviricisi anahtarların operasyonel durumunu sembolize etmektedir. Anahtarlama durumu “p” olduğunda bir kolun üst iki anahtarı aynı anda doğru gerilim barasının pozitif noktasına bağlanmaktadır. Benzer durumda anahtarlama durumunun “n” olması o faza ait alt iki anahtarın aynı anda iletimde olması ve doğru gerilim barasının negatif noktasına bağlanması anlamına gelir. Anahtarlama durumu “o” olduğunda ise bir koldaki orta iki anahtar aynı anda iletimde olarak nötr noktasına bağlanmaktadır.



Şekil 5.2 : Üç fazlı ortadan diyot kenetlemeli eviriciye ait topoloji.

Çizelge 5.1 : Üç seviyeli çeviricinin anahtarlama durumlarının ve uç gerilimlerinin tanımı.

Anahtarlama Durumu	Faz A				Uç Gerilimi
	S _{a1}	S _{a2}	S _{a3}	S _{a4}	V _{AO}
<i>p</i>	on	on	off	off	V _d /2
<i>o</i>	off	on	on	off	0
<i>n</i>	off	off	on	on	-V _d /2
Anahtarlama Durumu	Faz B				Uç Gerilimi
	S _{b1}	S _{b2}	S _{b3}	S _{b4}	V _{BO}
<i>p</i>	on	on	off	off	V _d /2
<i>o</i>	off	on	on	off	0
<i>n</i>	off	off	on	On	-V _d /2
Anahtarlama Durumu	Faz B				Uç Gerilimi
	S _{c1}	S _{c2}	S _{c3}	S _{c4}	V _{CO}
<i>p</i>	on	on	off	off	V _d /2
<i>o</i>	off	on	on	off	0
<i>n</i>	off	off	on	on	-V _d /2

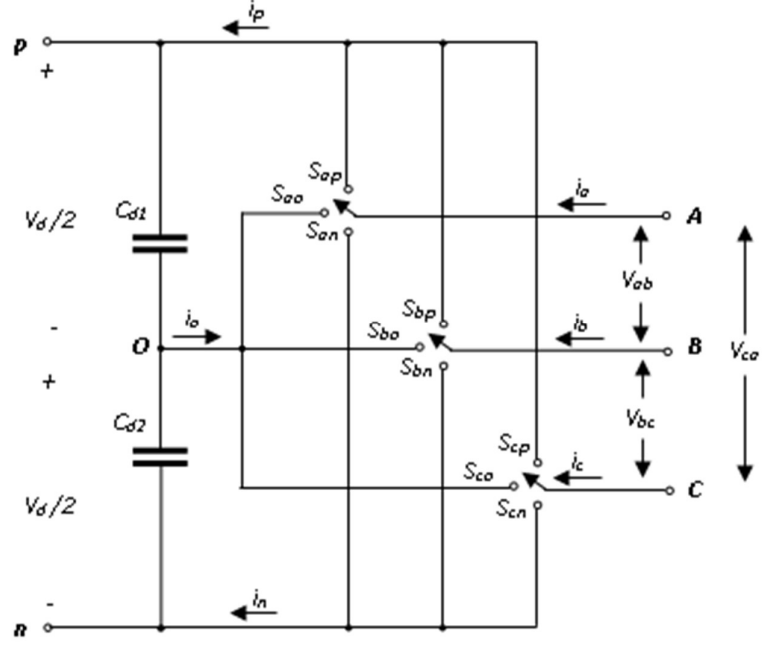
n çevirici seviyesi olmak üzere çok seviyeli bir çeviricinin anahtarlama durumu

$$N = n^3 \quad (5.1)$$

olarak bulunur. Bu da;

$$N_{\text{vektör}} = 1 + 6 \sum_{i=1}^n i \quad (5.2)$$

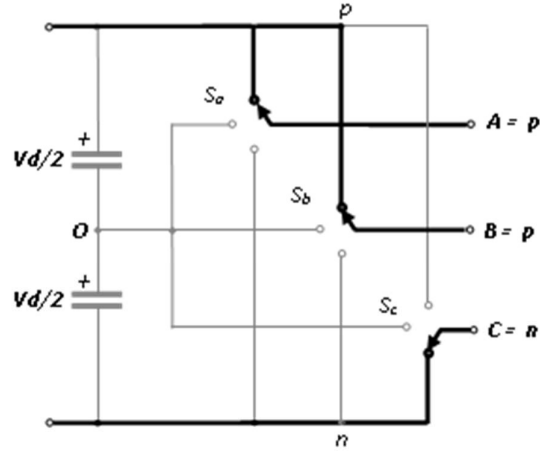
sayısında vektör meydana gelmesini sağlar. Eşitlikten de anlaşılacağı üzere çeviricinin seviyesi arttıkça anahtarlama sayısı da artmaktadır. Çok sayıda anahtarlama durumunun olması doğrultulmuş gerilimin dengelenmesi ve anahtarlama düzeninin optimize edilmesi açısından büyük esneklik sağlar. Şekil 5.3'te her fazda yer alan dört anahtarın anahtarlama kombinasyonları ile meydana gelen anahtarlama durumları gösterilmektedir. Buna göre bir fazın orta noktası pozitif gerilim noktasına, negatif gerilim noktasına veya sıfır gerilim noktasına bağlanabilmektedir.



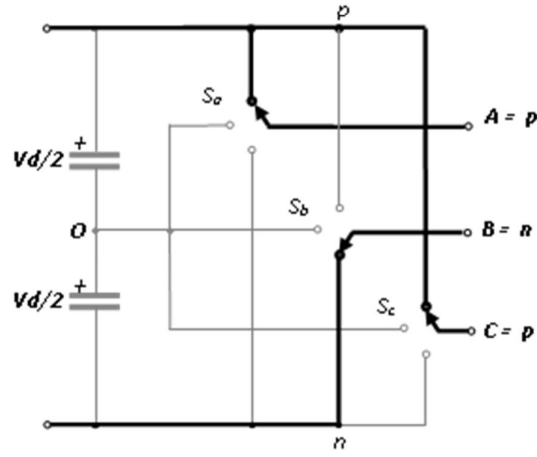
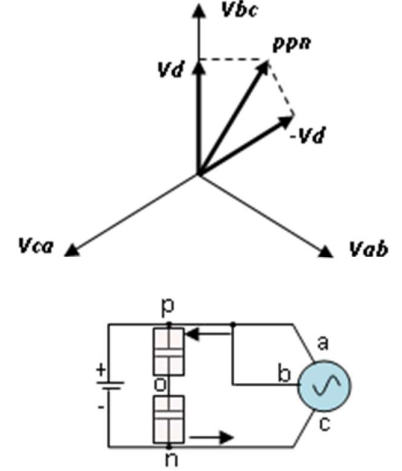
Şekil 5.3 : NPC topolojisinin üç kutuplu anahtarları.

Üç fazlı NPC topolojisinde 27 farklı anahtarlama durumu 27 farklı çıkış vektör değeri verir. Bu gerilim değerleri uzay vektör dönüşümü ile vektörel koordinatlara dönüştürülerek üç seviyeli NPC topolojisinin uzay vektör gösterilimi elde edilmiş olur. Şekil 5.4'te görüldüğü üzere birden fazla vektör aynı nokta üzerinde olabilmektedir. Bu da uygun gerilim durumunun oluşturulmasının iki veya üç farklı anahtarlama durumunun kullanılması ile oluşturulabileceği anlamına gelmektedir. Anahtarların iletim/kesim durumlarına göre meydana gelebilecek vektörler sınıflandırıldığında boyutlarına göre vektörler “büyük”, “orta”, “küçük” ve “sıfır” vektörler olarak adlandırılırlar.

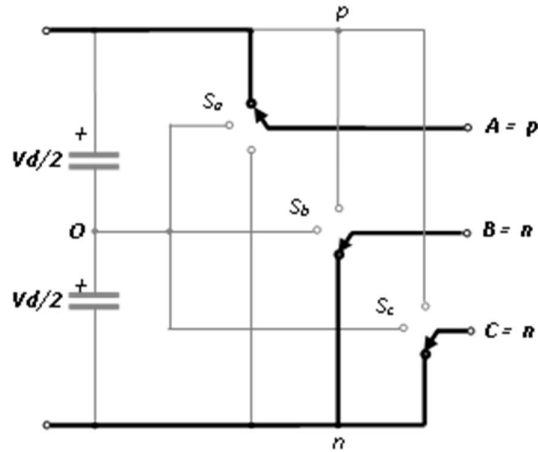
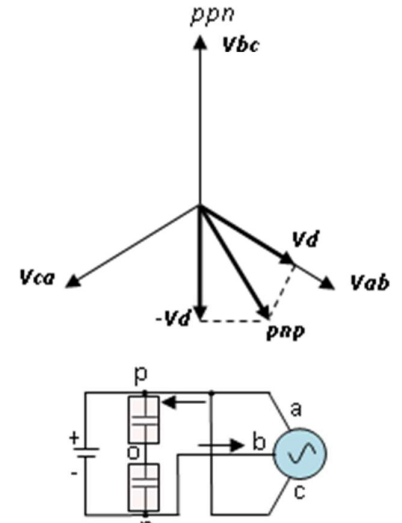
Küçük gerilim vektörleri nötr noktasını yükleyerek nötr noktasının potansiyelini şarj veya deşarj ederler. Orta gerilim vektörleri ise nötr noktasına üçüncü harmoniği enjekte ederler ve bu sayede nötr noktasının potansiyeli çıkış akımlarının üçüncü harmonik frekansında dalgalanır. Uzay vektör darbe genlik modülasyonu kullanılarak nötr noktasının potansiyeli efektif olarak dengelenebilir. Büyük,orta, küçük ve sıfır vektörlerinin çalışma şekilde açıklanabilir.



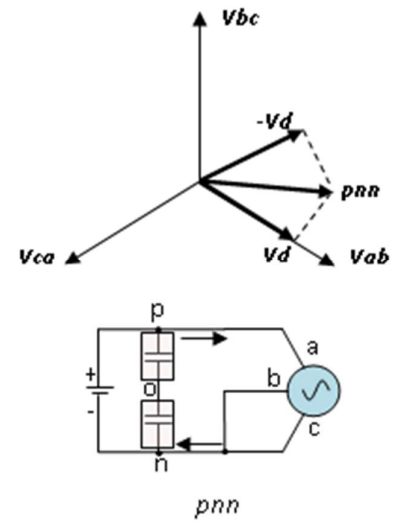
(a)



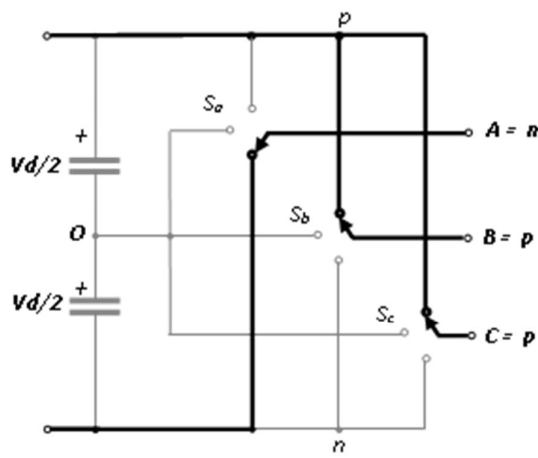
(b)



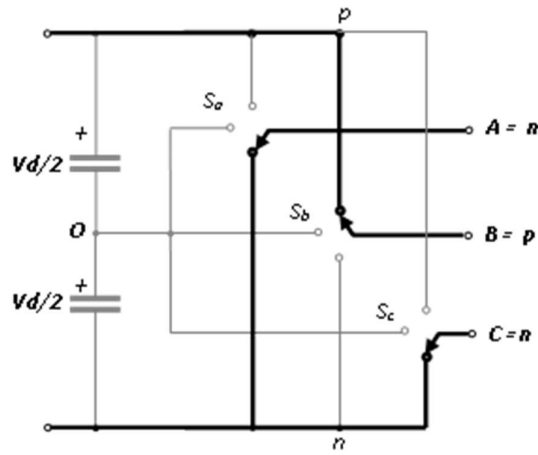
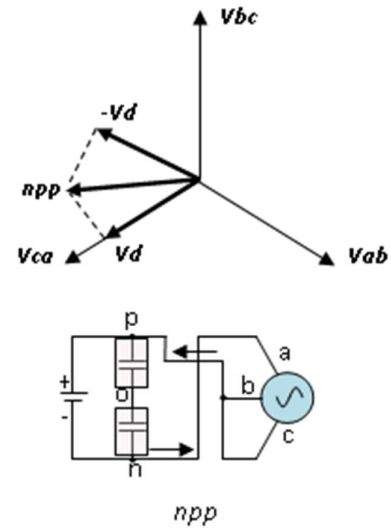
(c)



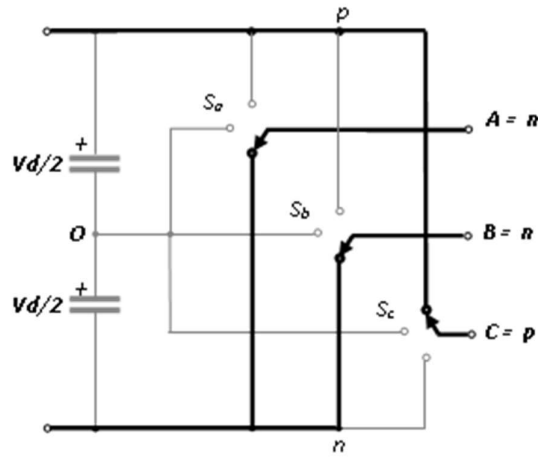
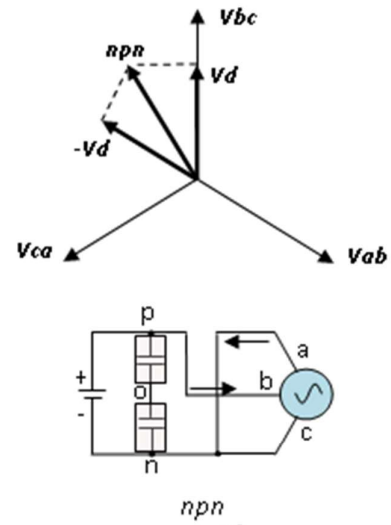
Şekil 5.5 : Büyük vektörleri oluşturan anahtarlama konumları, büyük vektörlerin gösterilimi ve anahtarlama durumuna göre akım yönleri. (a) pnp vektörü. (b) npn vektörü. (c) pnp vektörü. (d) npn vektörü. (e) npn vektörü. (f) npn vektörü.



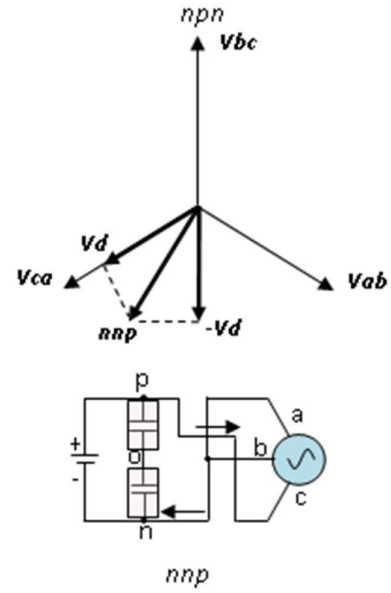
(d)



(e)



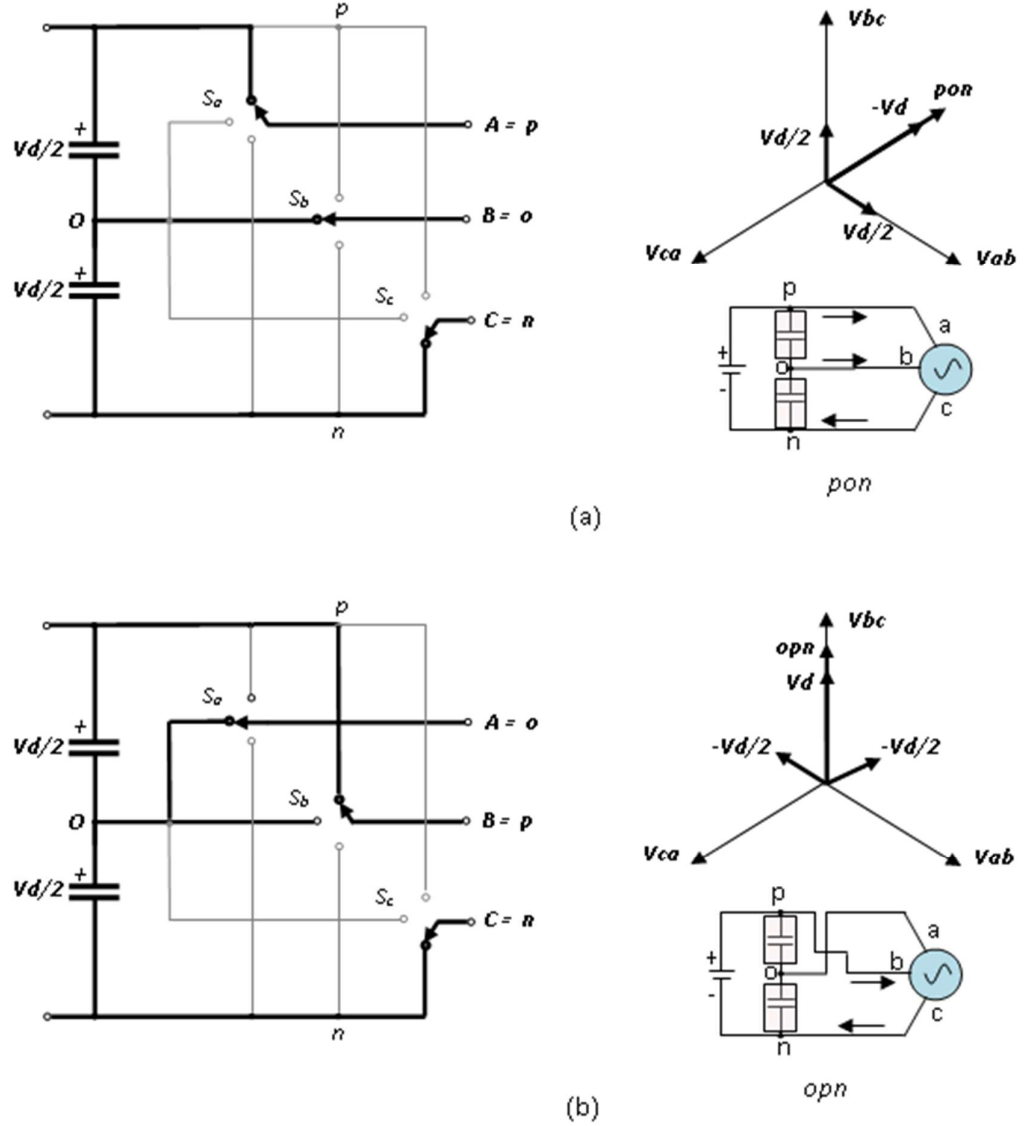
(f)



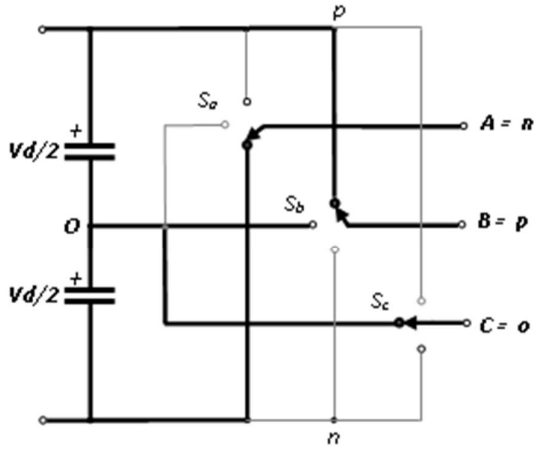
Şekil 5.5 (devam): Büyük vektörleri oluşturan anahtarlama konumları, büyük vektörlerin gösterilimi ve anahtarlama durumuna göre akım yönleri. (a) ppp vektörü. (b) npn vektörü. (c) pnn vektörü. (d) npp vektörü. (e) npn vektörü. (f) nnp vektörü.

5.1.1.2 Orta vektörler

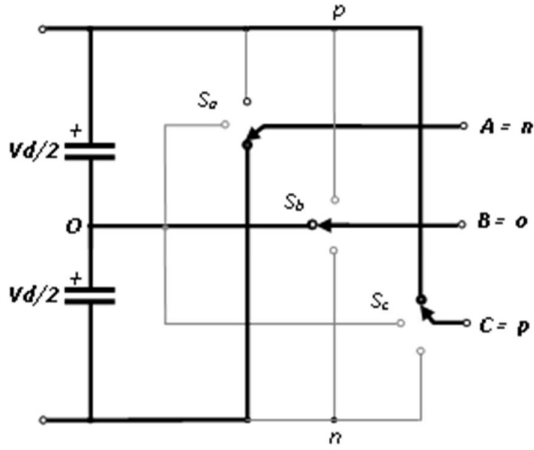
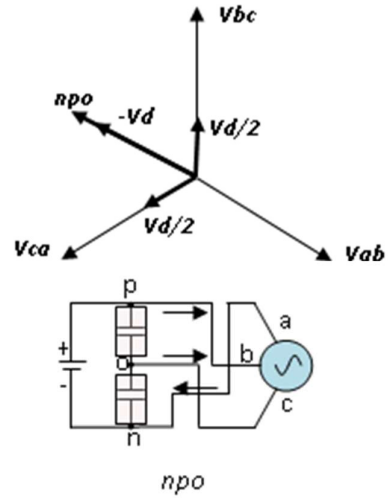
Orta vektörler sadece bir fazın V_o orta nokta gerilimine bağlanması ile elde edilirler. Ancak diğer iki fazın V_p veya V_n noktalarına aynı anda bağlanmaması gerekir. Orta vektörler de pon, opn, npo, nop, onp ve pno olmak üzere altı adettir. Şekil 5.6'dan da anlaşılacağı üzere orta vektörler iki küçük, bir adet de büyük vektörün birleşmesi ile elde edilirler.



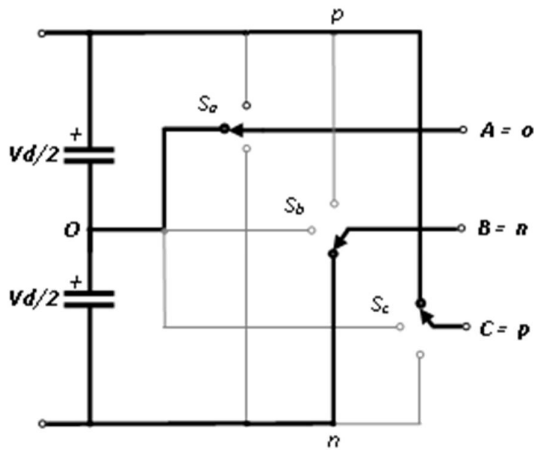
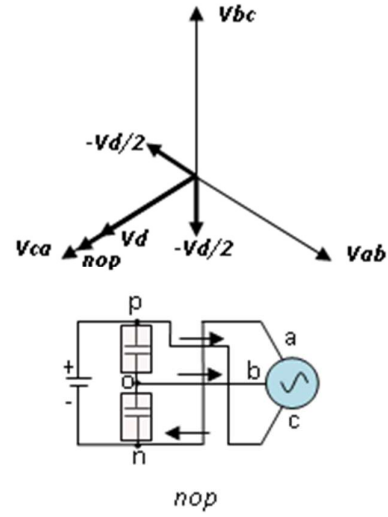
Şekil 5.6 : Orta vektörleri oluşturan anahtarlama konumları, orta vektörlerin gösterilimi ve anahtarlama durumuna göre akım yönleri. (a) pon vektörü. (b) opn vektörü. (c) npo vektörü. (d) nop vektörü. (e) onp vektörü. (f) pno vektörü.



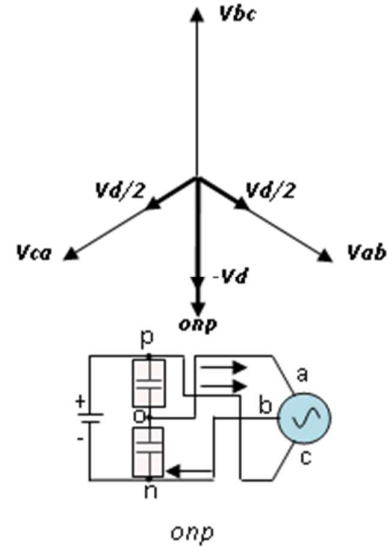
(c)



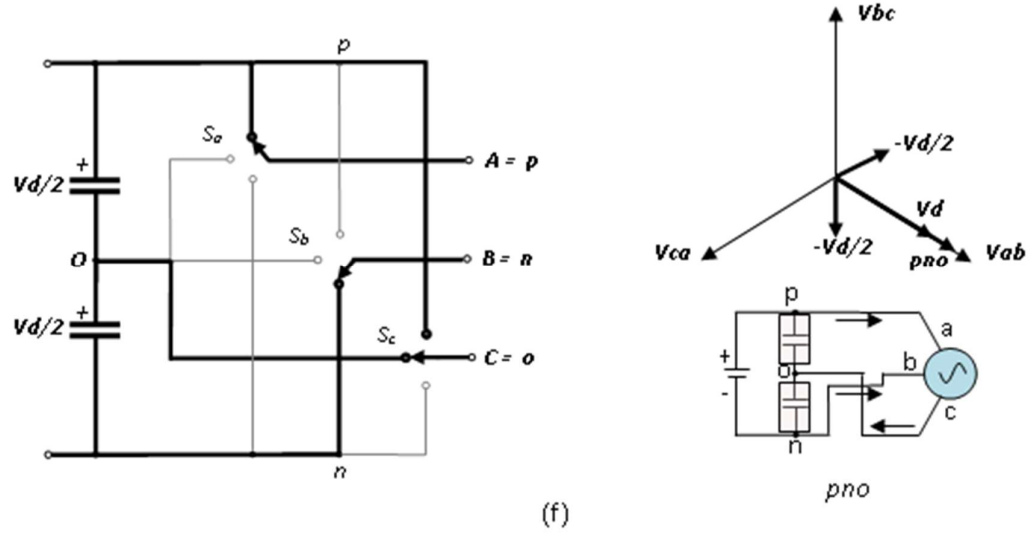
(d)



(e)



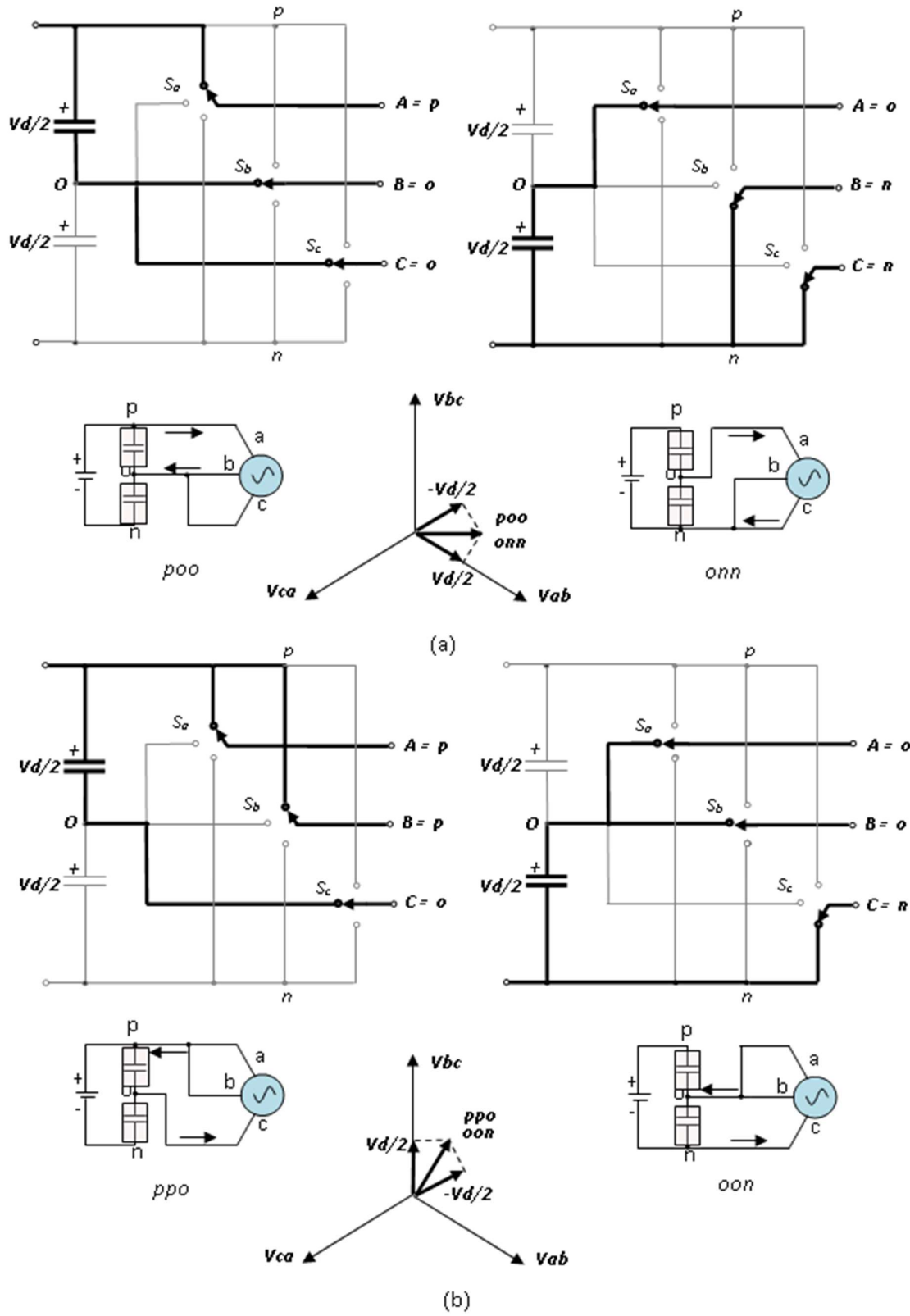
Şekil 5.6 (devam): Orta vektörleri oluşturan anahtarlama konumları, orta vektörlerin gösterilimi ve anahtarlama durumuna göre akım yönleri. (a) pon vektörü. (b) opn vektörü. (c) npo vektörü. (d) nop vektörü. (e) onp vektörü. (f) pno vektörü.



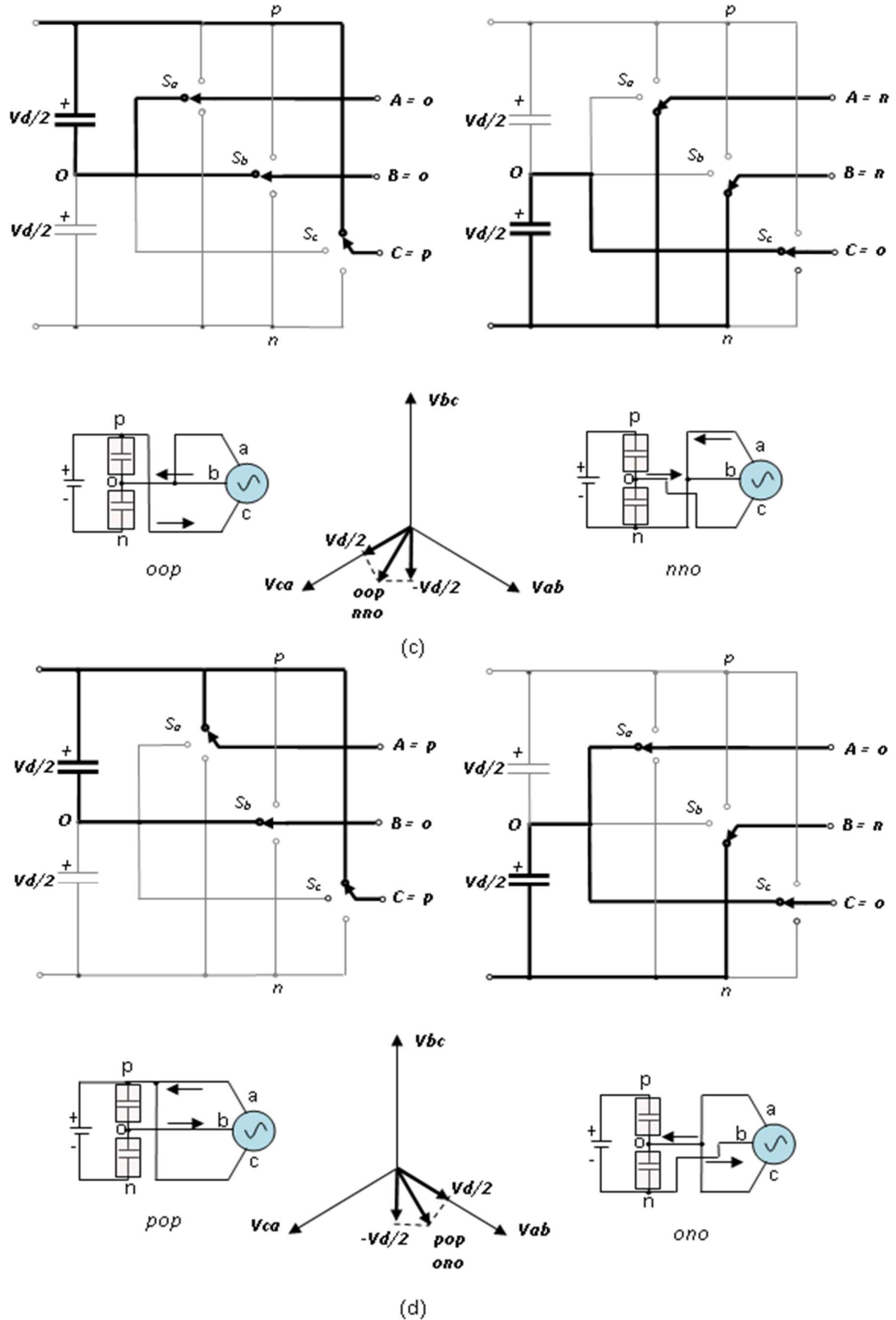
Şekil 5.6 (devam): Orta vektörleri oluşturan anahtarlama konumları, orta vektörlerin gösterilimi ve anahtarlama durumuna göre akım yönleri. (a) pon vektörü. (b) opn vektörü. (c) npo vektörü. (d) nop vektörü. (e) onp vektörü. (f) pno vektörü.

5.1.1.3 Küçük vektörler

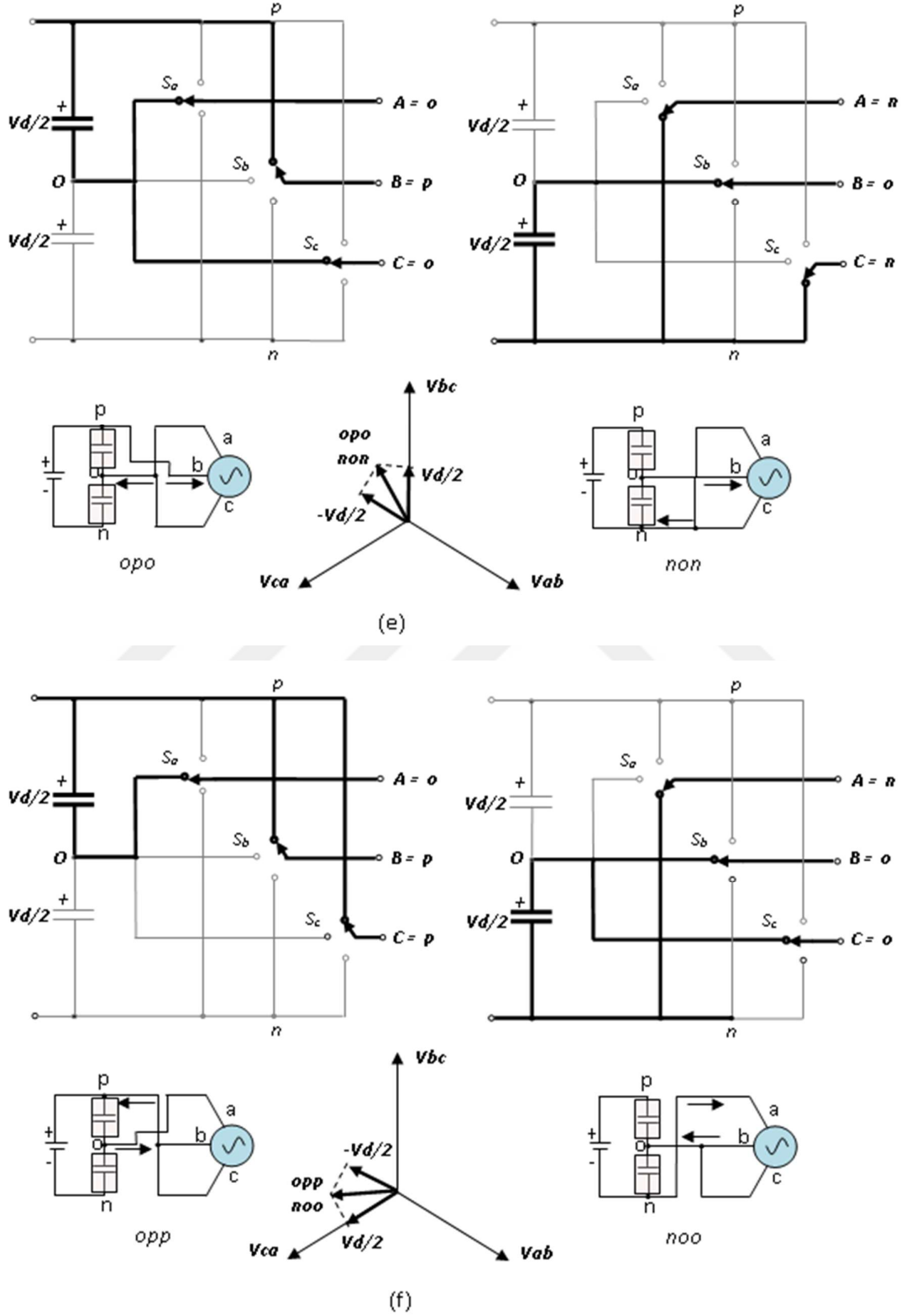
Küçük vektörler iki fazın aynı anda aynı noktaya bağlanması ve üçüncü fazında aynı anda farklı bir noktaya bağlanması ile elde edilir. Küçük vektörler toplamda 12 adettir ve ppo, oon, opo, non, opp, noo, oop, nno, pop, ono, poo ve onn olarak sıralanırlar. Şekil 5.7’de küçük vektörleri oluturan anahtarlama konumları ve bu anahtarlama konumlarına göre meydana gelen akım yönleri gösterilmiştir.



Şekil 5.7 : Küçük vektörleri oluşturan anahtarlama konumları, küçük vektörlerin gösterilimi ve anahtarlama durumuna göre akım yönleri. (a) p00 ve onn vektörleri. (b) ppo ve oon vektörleri. (c) oop ve nno vektörleri. (d) pop ve ono vektörleri. (e) opo ve non vektörleri. (f) opp ve noo vektörleri.



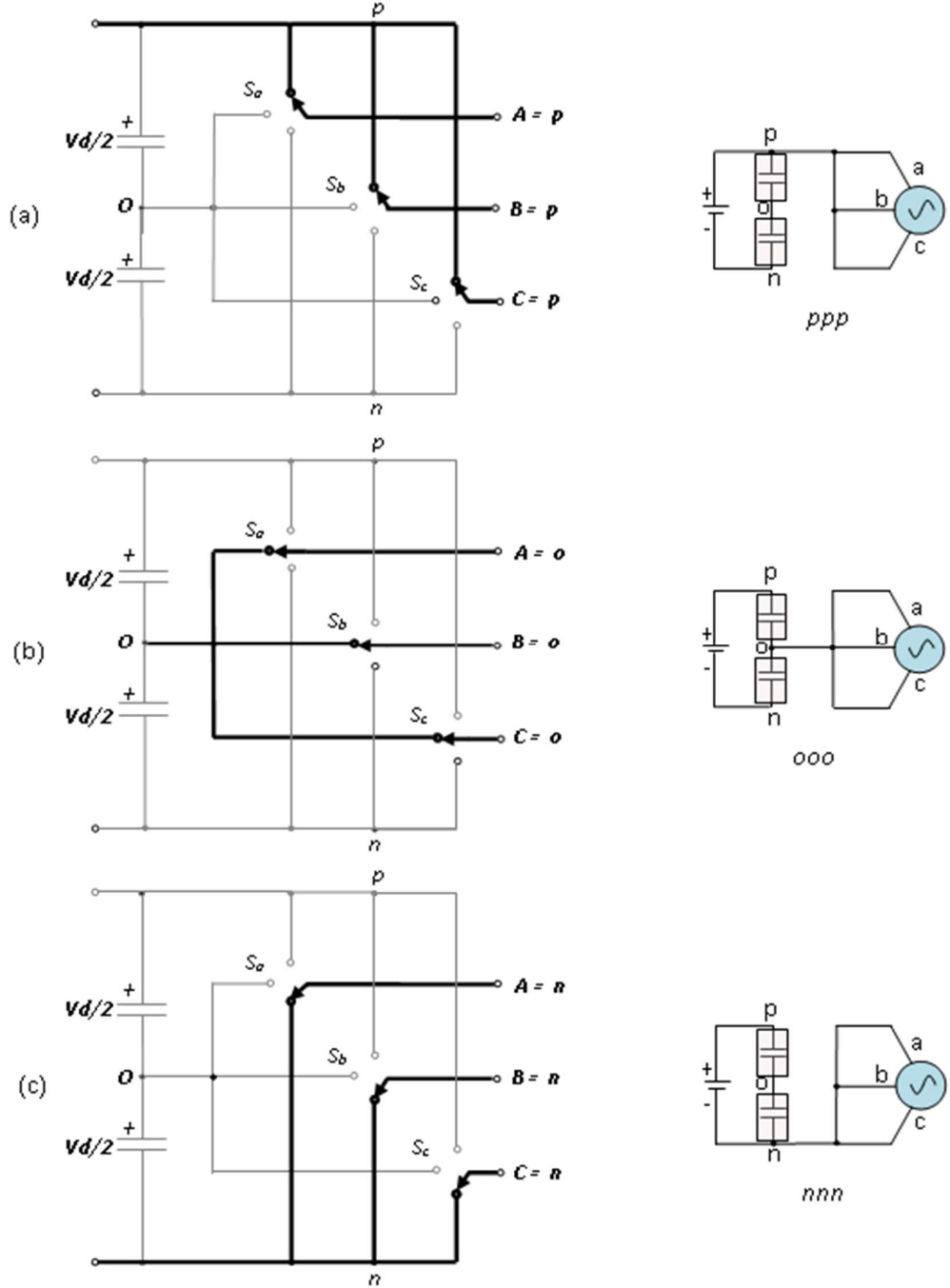
Şekil 5.7 (devam): Küçük vektörleri oluşturan anahtarlama konumları, küçük vektörlerin gösterilimi ve anahtarlama durumuna göre akım yönleri. (a) poo ve onn vektörleri. (b) ppo ve onn vektörleri. (c) oop ve nno vektörleri. (d) pop ve ono vektörleri. (e) oop ve non vektörleri. (f) opp ve noo vektörleri.



Şekil 5.7 (devam): Küçük vektörleri oluşturan anahtarlama konumları, küçük vektörlerin gösterilmesi ve anahtarlama durumuna göre akım yönleri. (a) poo ve onn vektörleri. (b) ppo ve oon vektörleri. (c) oop ve nno vektörleri. (d) pop ve ono vektörleri. (e) opo ve non vektörleri. (f) opp ve noo vektörleri.

5.1.1.4 Sıfır vektörler

“Sıfır vektörleri ise üç anahtarın da ppp, nnn ve ooo gibi aynı noktaya bağlanması ile elde edilirler. Sıfır vektörleri herhangi bir çıkış gerilimi üretmezler. Şekil 5.8’de sıfır vektörlerini oluşturan anahtarlama konumları yer almaktadır. Şekil 5.9’da ise 27 anahtarlama kombinasyonu ile meydana gelen 19 adet vektörün uzay vektöründeki yerleşimleri görülmektedir.



Şekil 5.8 : Sıfır vektörlerinin anahtarlama konumları ve akım yönleri. (a) ppp vektörü. (b) ooo vektörü. (c) nnn vektörü.

5.1.2 Vektör büyüklüklerinin bulunması

Vektörlerin uzay düzlemindeki büyüklüklerinin bulunması için α - β dönüşümü kullanılır. Üç fazlı sistemde gerilim değişkenleri Eşitlik 5.3'teki gibi alınırsa, eşitlik 5.5'teki vektör transformasyonu ile sinüsoidal gerilim referansları eşitlik 5.6 ve eşitlik 5.7'deki α ve β bileşenlerine dönüştürülür.

$$\begin{aligned} V_a &= V_m \cdot \cos(\omega t) \\ V_b &= V_m \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c &= V_m \cdot \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$V_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{ao} - \sqrt{\frac{1}{6}} \cdot V_{bo} - \sqrt{\frac{1}{6}} \cdot V_{co} \quad (5.6)$$

$$V_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot V_{bo} - \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot V_{co} \quad (5.7)$$

Bu eşitliklerin ve anahtarlama konumlarının oluşturduğu vektör büyüklüklerinden faydalananarak, büyük, orta, küçük ve sıfır vektörlerin değerleri aşağıdaki şekilde bulunur.

5.1.2.1 Büyük vektörlerin büyüklüklerinin bulunması

Büyük vektörlerin hesaplanması için örnek olarak ppn anahtarlama durumu dikkate alındığında gerilimin α ve β düzlemindeki değeri eşitlik 5.11'deki gibi bulunur.

$$\begin{aligned}V_{ao} &= \frac{V_d}{2} \cdot \sqrt{2} \\V_{bo} &= \frac{V_d}{2} \cdot \sqrt{2} \\V_{co} &= -\frac{V_d}{2} \cdot \sqrt{2}\end{aligned}\tag{5.8}$$

Büyük vektörlerin α bileşeni:

$$V_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{V_d}{2} \cdot \sqrt{2} - \sqrt{\frac{1}{6}} \cdot \frac{V_d}{2} \cdot \sqrt{2} + \sqrt{\frac{1}{6}} \cdot \frac{V_d}{2} \cdot \sqrt{2} = \frac{V_d}{\sqrt{3}}\tag{5.9}$$

Büyük vektörlerin β bileşeni:

$$V_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_d}{2} \cdot \sqrt{2} + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_d}{2} \cdot \sqrt{2} = V_d\tag{5.10}$$

Buradan büyük vektörlerin büyüklüğü aşağıdaki gibi yazılır:

$$\sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} = \sqrt{\left(\frac{V_d}{\sqrt{3}}\right)^2 + (V_d)^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot V_d\tag{5.11}$$

5.1.2.2 Orta vektörlerin büyüklüklerinin bulunması

Orta vektörlerin α ve β düzlemindeki genlik değerlerinin hesaplanması için örnek olarak ppn anahtarlama durumunu dikkate aldığımızda gerilim genlik değeri 5.13'teki gibi bulunur.

$$\begin{aligned}V_{ao} &= \frac{V_d}{2} \cdot \sqrt{2} \\V_{bo} &= 0 \\V_{co} &= -\frac{V_d}{2} \cdot \sqrt{2}\end{aligned}\tag{5.12}$$

$$V_{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{V_d}{2} \cdot \sqrt{2} + \sqrt{\frac{1}{6}} \cdot \frac{V_d}{2} \cdot \sqrt{2} = \sqrt{3} \cdot \frac{V_d}{2} \quad (5.13)$$

$$V_{\beta} = \frac{V_d}{2} \quad (5.14)$$

Orta vektörlerin büyüklüğü:

$$\sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} = \sqrt{\left(\sqrt{3} \cdot \frac{V_d}{2}\right)^2 + \left(\frac{V_d}{2}\right)^2} = V_d \quad (5.15)$$

5.1.2.3 Küçük vektörlerin büyüklüklerinin bulunması

Vektör genliklerini hesaplamak için örnek olarak, A ve B fazlarının pozitif noktasına, C fazının da orta noktaya bağlandığı ppo küçük vektörü alındığında faz nötr gerilimleri eşitlik 5.16'daki gibi olur. α ve β gerilim değerleri hesaplandığında küçük vektörün değeri eşiklik 5.19'daki gibi bulunur.

$$\begin{aligned} V_{ao} &= \frac{V_d}{2} \cdot \sqrt{2} \\ V_{bo} &= \frac{V_d}{2} \cdot \sqrt{2} \\ V_{co} &= 0 \end{aligned} \quad (5.16)$$

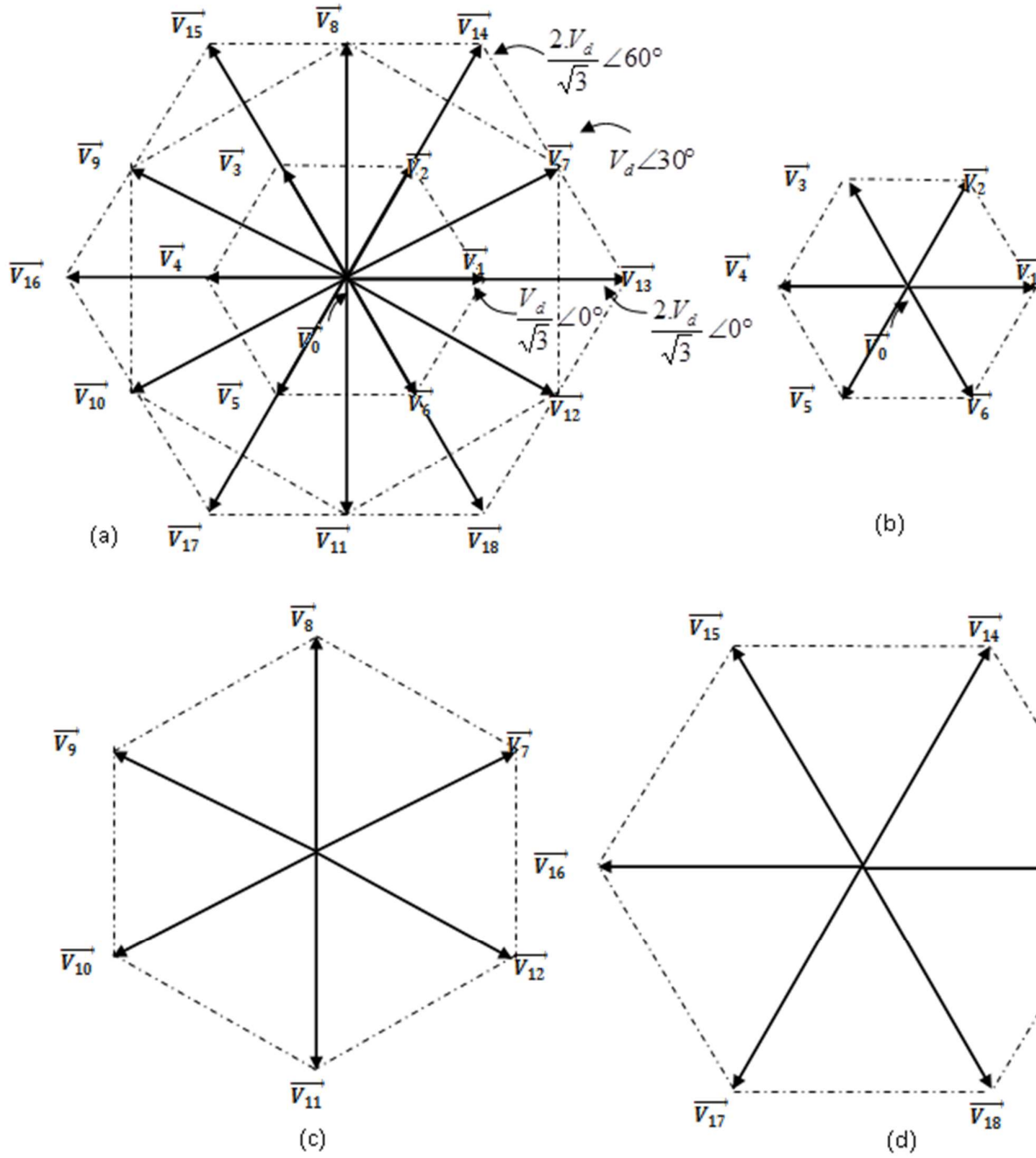
$$V_{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{V_d}{2} \cdot \sqrt{2} - \sqrt{\frac{1}{6}} \cdot \frac{V_d}{2} \cdot \sqrt{2} = \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot \frac{V_d}{2} \quad (5.17)$$

$$V_{\beta} = \frac{V_d}{2} \quad (5.18)$$

Küçük vektörlerin büyüklüğü:

$$\sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{V_d}{2}\right)^2 + \left(\frac{V_d}{2}\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot V_d \quad (5.19)$$

Buradan 19 vektöre ait vektör büyüklükleri Çizelge 5.2'deki gibi bulunmuş olur.



Şekil 5.9 : (a) Üç seviyeli NPC çeviricisinin vektörlerinin ve vektör genliklerinin gösterilmesi. (b) Küçük vektörler. (c) Orta vektörler. (d) Büyük vektörler.

Çizelge 5.2 : Vektör büyüklükleri.

Vektör		Anahtarlama Durumu		Vektör Sınıfı	Vektör Genliği				
$\overrightarrow{V_0}$		$ppp / ooo / nnn$		Sıfır vektörler	0				
$\overrightarrow{V_1}$	$\overrightarrow{V_{1P}}$	P-tipi	N-tipi	- Küçük vektörler - P-tipi küçük vektörler - N-tipi küçük vektörler	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$				
	$\overrightarrow{V_{1N}}$	poo	onn						
$\overrightarrow{V_2}$	$\overrightarrow{V_{2P}}$	ppo	oon						
	$\overrightarrow{V_{2N}}$	opo	non						
$\overrightarrow{V_3}$	$\overrightarrow{V_{3P}}$	opp	noo						
	$\overrightarrow{V_{3N}}$	oop	nno						
$\overrightarrow{V_4}$	$\overrightarrow{V_{4P}}$	pop	ono						
	$\overrightarrow{V_{4N}}$	pon	opn						
$\overrightarrow{V_5}$	$\overrightarrow{V_{5P}}$	npo	nop			Orta vektörler	V_d		
	$\overrightarrow{V_{5N}}$	onp	pno						
$\overrightarrow{V_6}$	$\overrightarrow{V_{6P}}$	pnn	ppn					Büyük vektörler	$\frac{2.V_d}{\sqrt{3}}$
	$\overrightarrow{V_{6N}}$	npn	npp						
$\overrightarrow{V_7}$	$\overrightarrow{V_{7P}}$	nnp	pnp						
$\overrightarrow{V_8}$	$\overrightarrow{V_{8P}}$	ppp	ooo						
$\overrightarrow{V_9}$	$\overrightarrow{V_{9P}}$	ppn	pon						
$\overrightarrow{V_{10}}$	$\overrightarrow{V_{10P}}$	pnp	pno						

5.1.3 En yakın üç vektör - uzay vektör modülasyonu (NTV-SV-PWM)

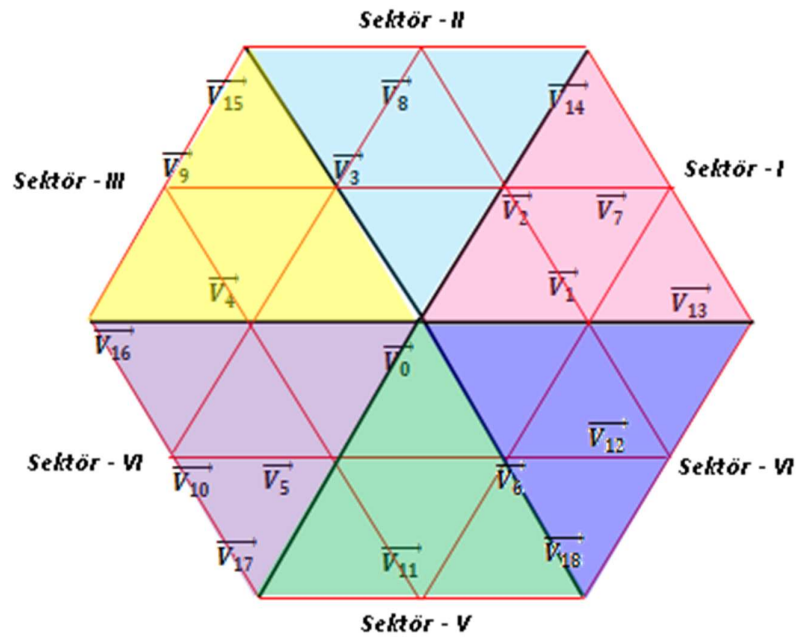
Uzay vektör modülasyonu bir anahtarlama çevirimi içerisinde vektörlerin kombinasyonu olarak incelenebilir. Ancak bütün vektör kombinasyonları aynı sonucu vermez. Çıkış gerilimlerinin harmonik distorsiyonu, gerilim dalgalanmalarının değeri ve anahtarlama sayısı önemli oranda modülasyon metoduna dayanır. Aynı üç fazlı gerilim çıkışını sağlayan bütün vektör modülasyon teknikleri arasında düşük akım dalgalılığına sahip ve düşük harmonikli gerilim üretebilen en etkili ve basit yöntem en yakın üç vektör kombinasyonunu seçme metodudur (NTV - Nearest Three Vector). En

yakın üç vektör modülasyonunda, bir PWM periyodu boyunca üç adet gerilim vektörü seçilir ve bu vektörler belirli sırada ve sürede çıkışa uygulanır [82].

Şekil 5.10'da gösterilen vektör diyagramı altı eşit üçgen bölgeye ayrılır. Sektör olarak adlandırılan bu üçgen bölgelerin her birinde iki adet büyük, iki adet küçük ve ortada da bir adet orta vektör yer alır. NTV metodunda ilk adım V_{ref} referans geriliminin hangi vektör alanına girdiğini bulmaktır.

Uzay vektör modülasyonunun üç seviyeli çeviricide doğru ekilde uygulanabilmesi için aşağıdaki aşamaların sırasıyla uygulanması gerekir:

1. Referans vektörün yer aldığı sektörün belirlenmesi.
2. Referans vektörün yer aldığı bölümün (bölgenin) belirlenmesi ve ardından referans vektöre en yakın üç vektörün tespit edilmesi.
3. En yakın üç vektörün anahtarlanaacağı sürelerin (dwell time) belirlenmesi.
4. Anahtarlama kayıplarının minimuma indirgenmesi için anahtarlama yönünün belirlenmesi.



Şekil 5.10 : Üç seviyeli çeviricinin altı eşgen sektör bölgesi.

5.1.3.1 Sektörlerin belirlenmesi

Anahtarlamamanın hangi sektörde olacağını bulması için Eşitlik 5.21’de yer alan referans vektörüne ait θ açısının bilinmesi gerekir. Vektör diyagramında altı adet sektör yer aldığından her sektörün iç açısı 60 derecedir. Eğer referans vektörün faz açısı 0° ile 60° arasında ise referans gerilimi birinci sektörde yer alır. Eğer θ faz açısı 60° ile 120° arasında ise vektör ikinci sektörde yer alır. Buna göre çalışma bölgesinin tespit edilmesi için vektör açısının Çizelge 5.3’te hangi koşulu sağladığına bakılmalıdır.

$$\vec{V}_{ref} = \vec{V}_{ref\alpha} + \vec{V}_{ref\beta} \quad (5.20)$$

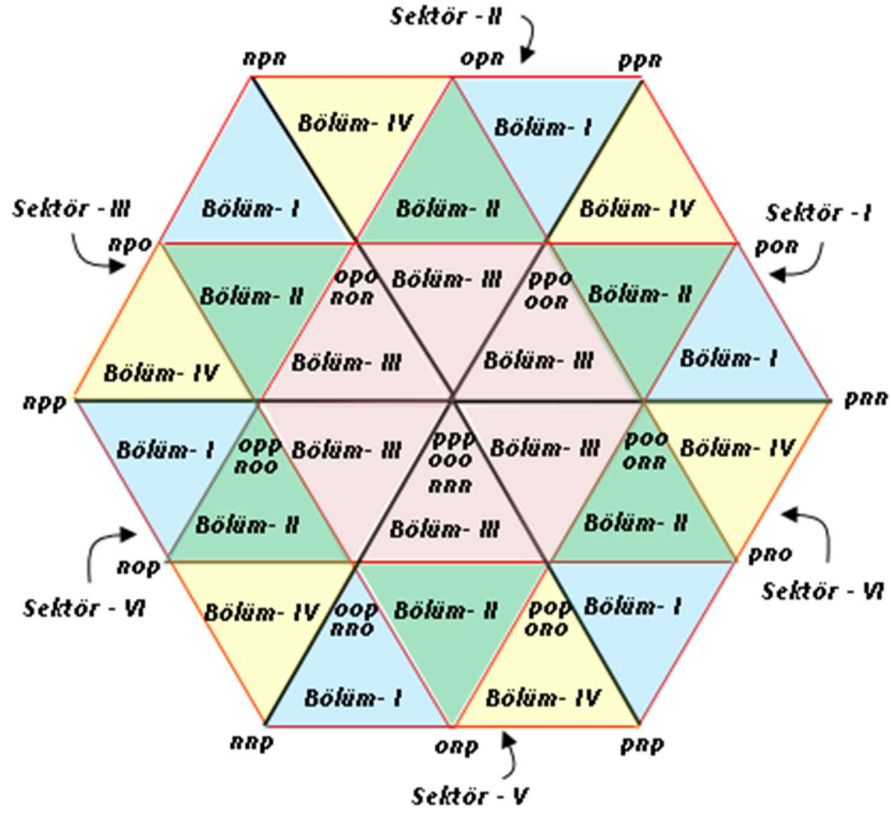
$$\vec{V}_{ref} = \sqrt{V_{ref\alpha}^2 + V_{ref\beta}^2} \cdot e^{j(\theta - \frac{\pi}{2})} \quad (5.21)$$

Çizelge 5.3 : Sektör bölgeleri.

Koşul	Sektör
$0^\circ < \theta \leq 60^\circ$	Sektör I
$60^\circ < \theta \leq 120^\circ$	Sektör II
$120^\circ < \theta \leq 180^\circ$	Sektör III
$180^\circ < \theta \leq 240^\circ$	Sektör IV
$240^\circ < \theta \leq 300^\circ$	Sektör V
$300^\circ < \theta \leq 360^\circ$	Sektör VI

5.1.3.2 En yakın üç vektörün tespiti

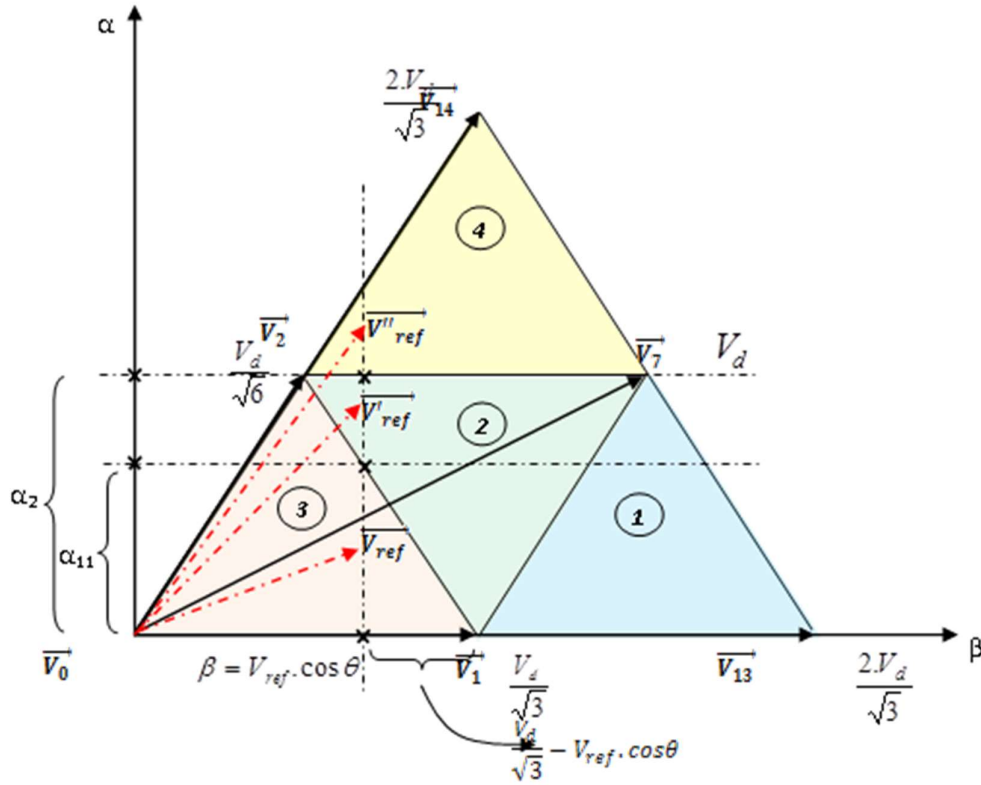
Şekil 5.11’de görüldüğü gibi her sektör dörder adet bölüm veya bölge olarak adlandırılan üçgenden oluşur. Küçük üçgenler daima 60° ’lik eşkenar üçgenlerden oluşur ve gerilim vektörleri bu üçgenlerin köşelerinde yer alır. V_{ref} referans gerilimine en yakın üç gerilim vektörünün belirlenebilmesi için ilk olarak referans geriliminin yer aldığı küçük üçgen bölgesinin tespit edilmesi gerekir.



Şekil 5.11 : Vektör diyagramında anahtarlama bölümlerinin gösterilimi.

Hesaplamalarda geometriden faydalanılır. Referans geriliminin hangi üçgen bölgede yer aldığına bulunabilmesi için gerilimin eşkenar küçük üçgenin kenarlarından biri olan küçük vektörden küçük olup olmadığına bakılır. Şekil 5.12’de gösterildiği üzere referans gerilimin reel bileşeni küçük vektörden daha küçükse bu durumda vektörün imajiner bileşeninin hangi limit değerleri arasında kaldığı hesaplanır.

Eğer reel bileşen $\frac{V_d}{\sqrt{3}}$ değerinden küçükse referans vektör bölüm 2, bölüm 3 veya bölüm 4 bölgelerinden herhangi birinde yer alabilir. Bu durumda referans vektörün imajiner kısmının eşitlik 5.27 ve eşitlik 5.30 ile verilen sırasıyla α_{11} ve α_2 değerlerinden büyük veya küçük olup olmadığına bakılır. Eğer vektörün imajiner bileşeni α_{11} ’den küçükse vektör bölüm 3’te yer alıyor demektir, eğer imajiner bileşen α_{11} ve α_2 değerleri arasında ise vektör bölüm 2’de yer alıyordur, eğer imajiner bileşen α_2 ’den değerinden büyükse vektör bölüm 4’te yer alıyordur.



Şekil 5.12 : Referans geriliminin reel kısmının $\frac{V_d}{\sqrt{3}}$ geriliminden küçük olduğu durum.

α_{11} , α_{12} ve α_2 ışıık değerlerinin α eksenindeki değerlerinin belirlenmesi için ilk olarak referans geriliminin α ve β eksenindeki bileşenlerinin bulunması gerekir. Eşitlik 5.22’de gösterilen referans geriliminin reel ve imajiner bileşenleri eşitlik 5.24 ve 5.25’teki gibi yazılır.

$$V_{ref} = V_m \cdot e^{-j\omega t} = d_m \cdot V \cdot e^{j\omega t} \quad (5.22)$$

Referans gerilimi reel bileşeni:

$$V_{ref\beta} = V_{ref} \cdot \cos(\theta) \quad (5.23)$$

Referans gerilimi imajiner bileşeni:

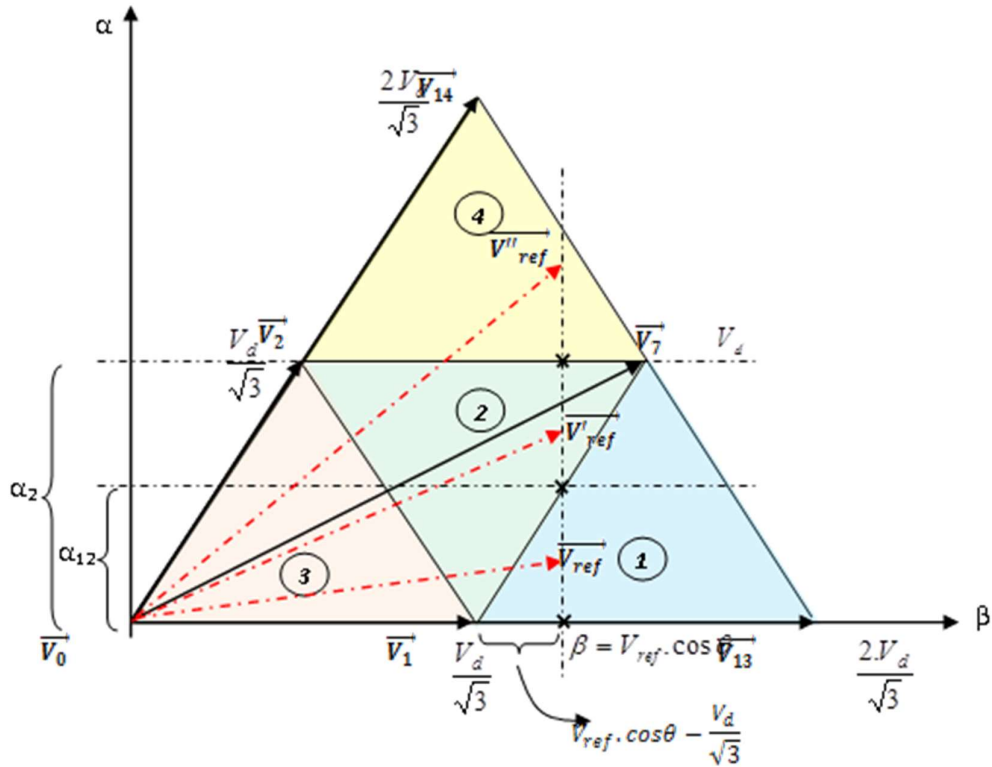
$$V_{ref\alpha} = V_{ref} \cdot \sin(\theta) \quad (5.24)$$

Buradan α_{11} , α_{12} ve α_2 imajiner eşik değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır. Eğer referans gerilimi reel bileşeni küçük vektörün büyüklüğünden küçük ise,

$$V_{ref\beta} < \frac{V_d}{\sqrt{3}} \quad (5.25)$$

$$\tan 60^\circ = \frac{\alpha_{11}}{V_d / \sqrt{3} - V_{ref} \cdot \cos \theta} \quad (5.26)$$

$$\alpha_{11} = V_d - \sqrt{3} \cdot V_{ref} \cdot \cos \theta \quad (5.27)$$



Şekil 5.13 : Referans geriliminin reel kısmının $\frac{V_d}{\sqrt{3}}$ geriliminden büyük olduğu durum.

Eğer referans gerilimi reel bileşeni Şekil 5.13'te gösterildiği gibi küçük vektörün büyüklüğünden büyük ise,

$$V_{ref\beta} > \frac{V_d}{\sqrt{3}} \quad (5.28)$$

$$\tan 60^\circ = \frac{\alpha_{12}}{V_{ref} \cdot \cos \theta - V_d / \sqrt{3}} \quad (5.29)$$

$$\alpha_{12} = \sqrt{3} \cdot V_{ref} \cdot \cos \theta - V_d \quad (5.30)$$

α_2 eşik değerlerinin belirlenmesi,

$$\alpha_2 = \frac{V_d}{\sqrt{3}} \cdot \sin 60^\circ = \frac{V_d}{2} \quad (5.31)$$

Bu durumda;

- eğer referans gerilimi imajiner bileşeni α_{12} ve α_2 eşik değerlerinden küçükse referans vektörü birinci bölgede yer alır,
- eğer referans gerilimi imajiner değeri α_{11} ve α_{12} eşik değerlerinden büyük ve α_2 eşik değerinden küçükse referans vektörü ikinci bölgede yer alır,
- eğer imajiner bileşen α_{11} ve α_2 eşik değerlerinden küçükse referans vektörü üçüncü bölgede yer alır,
- ve son olarak referans gerilimi imajiner değeri α_2 eşik değerlerinden büyükse bu durumda vektör dördüncü bölgede yer alır.

Eşitlikleri basitleştirmek için m_1 , m_2 ve $m_1 + m_2$ değişkenleri kullanılır ve bu değişkenler aşağıdaki gibi belirlenir.

$$m_1 = 2 \cdot \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot \sin \theta \quad (5.32)$$

$$m_2 = \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos \theta - \sin \theta) \quad (5.33)$$

$$m_1 + m_2 = \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos \theta + \sin \theta) \quad (5.34)$$

Birinci bölgenin eşitlikleri aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenir;

Eğer $\alpha_{12} > V_{ref\alpha}$ ise,

$$\begin{aligned}\sqrt{3} \cdot V_{ref} \cdot \cos\theta - V_d &> V_{ref} \cdot \sin\theta \\ \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos\theta - \sin\theta) &> 1 \\ m_2 &> 1\end{aligned}\tag{5.35}$$

Eğer $\alpha_2 \geq V_{ref\alpha}$ ise,

$$\begin{aligned}\frac{V_d}{2} &\geq V_{ref} \cdot \sin\theta \\ 1 &\geq 2 \cdot \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot \sin\theta \\ 1 &\geq m_1\end{aligned}\tag{5.36}$$

İkinci bölgenin eşitlikleri;

Eğer $\alpha_2 \geq V_{ref\alpha}$ ise,

$$1 \geq m_1\tag{5.37}$$

Eğer $\alpha_{11} \leq V_{ref\alpha}$ ise,

$$\begin{aligned}V_d - \sqrt{3} \cdot V_{ref} \cdot \cos\theta &\leq V_{ref} \cdot \sin\theta \\ 1 &\leq \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos\theta + \sin\theta) \\ 1 &\leq m_1 + m_2\end{aligned}\tag{5.38}$$

Eğer $\alpha_{12} \leq V_{ref\alpha}$ ise,

$$\begin{aligned} \sqrt{3} \cdot V_{ref} \cdot \cos\theta - V_d &\leq V_{ref} \cdot \sin\theta \\ \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos\theta - \sin\theta) &\leq 1 \\ m_2 &\leq 1 \end{aligned} \quad (5.39)$$

Üçüncü bölgenin eşitlikleri;

$$\begin{aligned} \text{Eğer } \alpha_2 &\geq V_{ref\alpha} \text{ ise,} \\ m_1 &\leq 1 \end{aligned} \quad (5.40)$$

$$\begin{aligned} \text{Eğer } \alpha_{11} &> V_{ref\alpha} \text{ ise,} \\ m_1 + m_2 &< 1 \end{aligned} \quad (5.41)$$

$$\begin{aligned} \text{Eğer } \alpha_{12} &< V_{ref\alpha} \text{ ise,} \\ m_2 &> 1 \end{aligned} \quad (5.42)$$

Dördüncü bölgenin eşitlikleri;

$$\begin{aligned} \text{Eğer } \alpha_2 &< V_{ref\alpha} \text{ ise,} \\ m_1 &> 1 \end{aligned} \quad (5.43)$$

Benzer şekilde ikinci sektöre ait eşitlikler koşul değerlerini 60° derece öteleyerek aşağıdaki şekilde hesaplanır.

Birinci bölgenin eşitlikleri:

$$\frac{V_{ref}}{V_d} \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos(\theta + 60^\circ) - \sin(\theta + 60^\circ)) > 1 \quad (5.44)$$

Eşitlikleri düzenlemede aşağıdaki trigonometrik hesaplamalardan faydalanılır.

$$\begin{aligned} \cos(\alpha + \beta) &= \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) - \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) \\ \sin(\alpha + \beta) &= \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) + \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) \end{aligned} \quad (5.45)$$

Trigonometrik eşitlikler kullanılarak eşitlik 5.44 eşitlik 5.46'daki gibi yeniden yazılır.

$$\begin{aligned} \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot [\sqrt{3} \cdot (\cos\theta \cdot \cos 60^\circ - \sin\theta \cdot \sin 60^\circ) \\ - (\sin\theta \cdot \cos 60^\circ + \cos\theta \cdot \sin 60^\circ)] > 1 \\ \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot \left[\left(\cos\theta \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} - \sin\theta \cdot \frac{3}{2} \right) - \left(\sin\theta \cdot \frac{1}{2} + \cos\theta \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right] > 1 \\ m_1 > -1 \end{aligned} \quad (5.46)$$

$$\begin{aligned} 2 \cdot \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot \sin(\theta + 60^\circ) < 1 \\ 2 \cdot \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot \left(\sin\theta \cdot \frac{1}{2} + \cos\theta \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) < 1 \\ m_1 + m_2 < 1 \end{aligned} \quad (5.47)$$

İkinci bölgenin eşitlikleri:

$$\begin{aligned} \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot (\sin\theta + \sqrt{3} \cdot \cos\theta) < 1 \\ m_1 + m_2 < 1 \end{aligned} \quad (5.48)$$

$$\begin{aligned} \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos\theta - \sin\theta) < 1 \\ m_1 < -1 \end{aligned} \quad (5.49)$$

$$\frac{V_{ref}}{V_d} \cdot (\sin\theta + \sqrt{3} \cdot \cos\theta) > 1$$

$$\frac{V_{ref}}{V_d} \cdot [\sqrt{3} \cdot (\cos\theta \cdot \cos 60^\circ - \sin\theta \cdot \sin 60^\circ) + \sin\theta \cdot \cos 60^\circ + \cos\theta \cdot \sin 60^\circ] > 1$$

$$\frac{V_{ref}}{V_d} \cdot \left[\cos\theta \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} - \sin\theta \cdot \frac{3}{2} + \sin\theta \cdot \frac{1}{2} + \cos\theta \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right] > 1 \quad (5.50)$$

$$\frac{V_{ref}}{V_d} \cdot [\sqrt{3} \cdot \cos\theta - \sin\theta] > 1$$

$$m_2 > 1$$

Üçüncü bölgenin eşitlikleri:

$$m_1 + m_2 < 1 \quad (5.51)$$

$$m_1 < -1 \quad (5.52)$$

$$m_2 > 1 \quad (5.53)$$

Dördüncü bölgenin eşitlikleri:

$$m_1 + m_2 > 1 \quad (5.54)$$

Tüm bölgeler için α_{11} , α_{12} , ve α_2 eşik değerleri hesaplandığında referans vektörünün hangi bölgede olduğunun belirlenmesi için kullanılması gereken eşitlikler farklı sektörler ve farklı bölgeler için Çizelge 5.4'teki eşitliklerin kullanılması gerekir.

Çizelge 5.4 : Vektör konumunun belirlenmesi.

	I. Bölge	II. Bölge	III. Bölge	IV. Bölge
<i>Sektör I</i>	$m_1 \leq 1$ $m_2 > 1$	$m_1 \leq 1$ $m_1 + m_2 \geq 1$ $m_2 \leq 1$	$m_1 \leq 1$ $m_1 + m_2 < 1$ $m_2 > 1$	$m_1 > 1$
<i>Sektör II</i>	$m_1 \geq -1$ $m_1 + m_2 < 1$	$m_1 < -1$ $m_1 + m_2 < 1$ $m_2 \geq 1$	$m_1 < -1$ $m_1 + m_2 < 1$ $m_2 \geq 1$	$m_1 + m_2 > 1$
<i>Sektör III</i>	$m_1 > 1$	$m_1 \leq 1$ $m_1 + m_2 \geq 1$ $m_2 \leq 1$	$m_1 \leq 1$ $m_1 + m_2 < 1$ $m_2 < 1$	$m_1 \leq 1$ $m_2 > 1$
<i>Sektör IV</i>	$m_1 \leq 1$ $m_2 > 1$	$m_1 \leq 1$ $m_1 + m_2 \geq 1$ $m_2 \leq 1$	$m_1 \leq 1$ $m_1 + m_2 < 1$ $m_2 < 1$	$m_1 > 1$
<i>Sektör V</i>	$m_1 \leq -1$ $m_1 + m_2 \leq -1$	$m_1 \leq -1$ $m_1 + m_2 < -1$ $m_2 \leq 1$	$m_1 > -1$	$m_1 \leq -1$ $m_2 > 1$
<i>Sektör VI</i>	$m_1 > 1$	$m_1 \leq 1$ $m_1 + m_2 \geq 1$ $m_2 \leq 1$	$m_1 \leq 1$ $m_1 + m_2 < 1$ $m_2 < 1$	$m_1 \leq 1$ $m_2 > 1$

5.1.3.3 Anahtarlama sürelerinin hesaplanması

Uzay vektör modülasyonunda bir anahtarlama periyodu boyunca V_k , V_{k+1} , ve V_{k+2} olmak üzere üç adet vektör kullanılır. Ve bu üç vektör için sırasıyla T_k , T_{k+1} , ve T_{k+2} anahtarlama süreleri dikkate alınır. Herhangi bir referans gerilimine ulaşmak

hesaplamak için, referans geriliminin yer aldığı üçgenin köşegenlerine denk gelen üç vektör kullanılır. Bu vektörlerin uygulanma süreleri ya da çevrim oranları (dwell time) PWM ortalama yaklaşımı metodu kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\frac{1}{T} \int_0^T V_{ref} \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^{T_k} V_k \cdot dt + \frac{1}{T} \int_{T_k}^{T_k+T_{k+1}} V_{k+1} \cdot dt + \frac{1}{T} \int_{T_k+T_{k+1}}^T V_{k+2} \cdot dt$$

$$V_{ref} \cdot T = V_k \cdot T_k + V_{k+1} \cdot T_{k+1} + V_{k+2} \cdot T_{k+2} \quad (5.55)$$

Bu eşitlik α - β koordinatlarına açıldığında eşitliğin reel ve imajiner kısımları aşağıdaki şekli alır.

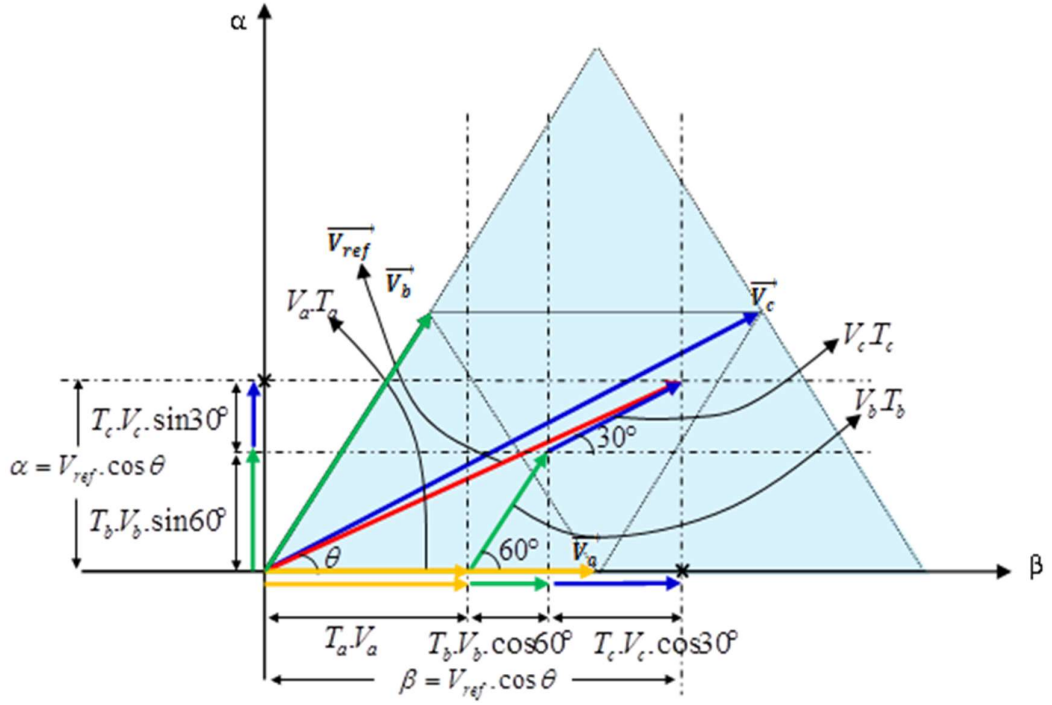
$$V_{ref\alpha} \cdot T = V_{k\alpha} \cdot T_k + V_{(k+1)\alpha} \cdot T_{k+1} + V_{(k+2)\alpha} \cdot T_{k+2} \quad (5.56)$$

$$V_{ref\beta} \cdot T = V_{k\beta} \cdot T_k + V_{(k+1)\beta} \cdot T_{k+1} + V_{(k+2)\beta} \cdot T_{k+2} \quad (5.57)$$

Bir PWM periyodunda gerilim vektörlerinin uygulanma sürelerinin toplamı PWM periyoduna (carrier signal period) eşit olmalıdır.

$$T = T_k + T_{k+1} + T_{k+2} \quad (5.58)$$

Şekil 5.14'te bir referans vektörün üç ayrı gerilim vektörü kullanılarak nasıl oluşturulduğu görülmektedir. Bir önceki bölümde vektörün hangi sektörde ve hangi bölgede olduğu belirlendikten sonra, eşkenar üçgenlerdeki daha önce tespit edilmiş olan vektörler ve eşitlik 5.56, eşitlik 5.57 ve eşitlik 5.58 kullanılarak vektör uygulama süreleri bulundukları bölüme göre aşağıdaki gibi hesaplanırlar.



Şekil 5.14 : Anahtarlama sürelerinin α - β düzleminde hesaplanması.

Sektör I – Bölüm I

Eğer referans vektörü birinci bölümde yer alıyorsa eşkenar üçgenin köşegenlerine gelen vektörler Çizelge 5.5'teki gibi olur. Bu vektörler eşitlik 5.56 ve eşitlik 5.57'de yerlerine konursa eşitlikler 5.59 ve eşitlik 5.60'daki hali alır. Eşitlik 5.58 kullanılarak birinci bölgeye ait T_a , T_b ve T_c zaman sabitleri aşağıdaki gibi bulunur (eşitliklerin kolay yazılabilmesi için k , $k+1$, $k+2$ yerine a , b , c karakterleri kullanılmıştır).

Çizelge 5.5 : Birinci bölgede uygulanan vektörler.

Vektörler	Vektör Büyüklüğü	Açısı
$\vec{V}_1$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	0°
$\vec{V}_7$	V_d	30°
$\vec{V}_{13}$	$\frac{2V_d}{\sqrt{3}}$	0°

$$\begin{aligned}
 \vec{V}_{ref\beta} &= V_{ref} \cdot \cos \theta \\
 T \cdot V_{ref} \cdot \cos \theta &= T_a \cdot V_d \cdot \cos 30^\circ + T_b \cdot V_1 + T_c \cdot V_{13} \\
 T \cdot V_{ref} \cdot \cos \theta &= T_a \cdot V_d \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} + T_b \cdot \frac{V_d}{\sqrt{3}} + T_c \cdot \frac{2V_d}{\sqrt{3}}
 \end{aligned} \tag{5.59}$$

$$\begin{aligned}
\overrightarrow{V_{ref\alpha}} &= V_{ref} \cdot \sin \theta \\
T.V_{ref} \cdot \sin \theta &= T_a.V_7 \cdot \sin 30^\circ \\
T.V_{ref} \cdot \sin \theta &= T_a.V_d \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}
\end{aligned} \tag{5.60}$$

$$T_a = 2.T \cdot \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot \sin \theta \tag{5.61}$$

$$T_b = T - T_c - 2.T \cdot \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot \sin \theta \tag{5.62}$$

$$T.V_{ref} \cdot \cos \theta = \left(T - T_c - 2.T \cdot \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot \sin \theta \right) \cdot \frac{V_d}{\sqrt{3}} + 2.T \cdot \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot \sin \theta \cdot V_d \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} + T_c \cdot \frac{2V_d}{\sqrt{3}} \tag{5.63}$$

$$T_c = T \cdot \left\{ \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos \theta - \sin \theta) - 1 \right\} \tag{5.64}$$

Sektör I – Bölüm II

Çizelge 5.6'daki vektörler eşitlik 5.65 ve eşitlik 5.66'da yerlerine konarak T_a , T_b ve T_c zaman sabitleri eşitlik 5.69, eşitlik 5.70 ve eşitlik 5.71'deki gibi bulunur.

Çizelge 5.6 : İkinci bölgede uygulanan vektörler.

Vektörler	Vektör Büyüklüğü	Açısı
$\vec{V}_1$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	0°
$\vec{V}_2$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	60°
$\vec{V}_7$	V_d	30°

$$\begin{aligned}
T.V_{ref} \cdot \cos \theta &= T_a.V_1 + T_b.V_2 \cdot \cos 60^\circ + T_c.V_7 \cdot \cos 30^\circ \\
T.V_{ref} \cdot \cos \theta &= T_a \cdot \frac{V_d}{\sqrt{3}} + T_b \cdot \frac{V_d}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{2} + T_c.V_d \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}
\end{aligned} \tag{5.65}$$

$$\begin{aligned}
T.V_{ref} \cdot \sin \theta &= T_b.V_2 \cdot \sin 60^\circ + T_c.V_7 \cdot \sin 30^\circ \\
T.V_{ref} \cdot \sin \theta &= T_b.V_d \cdot \frac{1}{2} + T_c.V_d \cdot \frac{1}{2}
\end{aligned} \tag{5.66}$$

$$T_a = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\cos \theta}{\sin \theta} (T_b + T_c) - \frac{T_b + 3T_c}{2} \quad (5.67)$$

$$T_c = T \cdot \frac{V_{ref} \cdot 2 \cdot \sin \theta}{V_d} - T_b \quad (5.68)$$

$$T_b = T \cdot \left\{ 1 - \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos \theta - \sin \theta) - 1 \right\} \quad (5.69)$$

$$T_c = T \cdot \left\{ \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos \theta + \sin \theta) - 1 \right\} \quad (5.70)$$

$$T_a = T \cdot \left\{ 1 - \frac{2 \cdot V_{ref} \cdot \sin \theta}{V_d} \right\} \quad (5.71)$$

Sektör I – Bölüm III

Çizelge 5.7 : Üçüncü bölgede uygulanan vektörler.

Vektörler	Vektör Büyüklüğü	Açısı
$\vec{V}_0$	0	0°
$\vec{V}_1$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	0°
$\vec{V}_2$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	60°

$$T \cdot V_{ref} \cdot \cos \theta = T_a \cdot V_1 + T_b \cdot V_2 \cdot \cos 60^\circ$$

$$T \cdot V_{ref} \cdot \cos \theta = T_a \cdot \frac{V_d}{\sqrt{3}} + T_b \cdot \frac{V_d}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{2} \quad (5.72)$$

$$T \cdot V_{ref} \cdot \sin \theta = T_b \cdot V_2 \cdot \sin 60^\circ$$

$$T \cdot V_{ref} \cdot \sin \theta = T_b \cdot V_d \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (5.73)$$

$$T_b = 2 \cdot T \cdot \frac{V_{ref} \cdot \sin \theta}{V_d} \quad (5.74)$$

$$T_a = T \cdot \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos \theta - \sin \theta) \quad (5.75)$$

$$T_c = T \cdot \left\{ 1 - \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos \theta + \sin \theta) \right\} \quad (5.76)$$

Sektör I – Bölüm IV

Çizelge 5.8 : Dördüncü bölgede uygulanan vektörler.

Vektörler	Vektör Büyüklüğü	Açısı
$\vec{V}_2$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	60°
$\vec{V}_7$	V_d	30°
$\vec{V}_{14}$	$\frac{2 \cdot V_d}{\sqrt{3}}$	60°

$$T \cdot V_{ref} \cdot \cos \theta = T_a \cdot V_2 \cdot \cos 60^\circ + T_b \cdot V_7 \cdot \cos 30^\circ + T_c \cdot V_{14} \cdot \cos 60^\circ$$

$$T \cdot V_{ref} \cdot \cos \theta = T_a \cdot \frac{V_d}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{2} + T_b \cdot V_d \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} + T_c \cdot \frac{2 \cdot V_d}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{2} \quad (5.77)$$

$$T \cdot V_{ref} \cdot \sin \theta = T_a \cdot V_2 \cdot \sin 60^\circ + T_b \cdot V_7 \cdot \sin 30^\circ + T_c \cdot V_{14} \cdot \sin 60^\circ$$

$$T \cdot V_{ref} \cdot \sin \theta = T_a \cdot \frac{V_d}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} + T_b \cdot V_d \cdot \frac{1}{2} + T_c \cdot \frac{2 \cdot V_d}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (5.78)$$

$$T_b = T \cdot \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos \theta - \sin \theta) \quad (5.79)$$

$$T_a = T \cdot \left\{ 2 - \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos \theta + \sin \theta) \right\} \quad (5.80)$$

$$T_c = T \cdot \left\{ 2 \cdot \frac{V_{ref}}{V_d} \cdot \sin \theta - 1 \right\} \quad (5.81)$$

Çizelge 5.9’da birinci sektörün tüm bölgelerine ait vektörler, vektör büyüklükleri, anahtarlama durumu ve anahtarlama süreleri yer almaktadır. Diğer sektörlerin anahtarlama sürelerinin hesaplanmasında sektör I’deki bölgelerin hesaplamasında kullanılan eşitliklerdeki θ açısından $\frac{\pi}{3}$ ’ün sektör sayısı kadar katları çıkarılarak eşitlikler yeniden düzenlenir. Diğer sektörlerle ait vektörler ve anahtarlama süreleri Ek A’da yer almaktadır.

Çizelge 5.9 : Referans geriliminin bulunduğu eşkenar bölgelere göre iletim sürelerinin hesaplanması.

		T _a	T _b	T _c		
SEKTÖR I	I. Bölge	Anahtarlama Süresi	$2T \frac{V_{ref}}{V_d} \sin(\theta)$	$T \left\{ 2 - \frac{V_{ref}}{V_d} \left(\sqrt{3} \cos(\theta) + \sin(\theta) \right) \right\}$	$T \left\{ \frac{V_{ref}}{V_d} \left(\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta) \right) - 1 \right\}$	
		Vektör	$\vec{V}_7$	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_{13}$	
		Büyüklik	V_d	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{2V_d}{\sqrt{3}}$	
		Anahtarlama durumu	pon	poo veya onn	pnn	
		İletimdeki anahtarlar	S _{a1} , S _{a2} → ON S _{b2} , S _{b3} → ON S _{c3} , S _{c4} → ON	S _{a1} , S _{a2} → ON S _{b2} , S _{b3} → ON S _{c2} , S _{c3} → ON	S _{a1} , S _{a2} → ON S _{b3} , S _{b4} → ON S _{c3} , S _{c4} → ON	
		Kesimdeki anahtarlar	S _{a3} , S _{a4} → OFF S _{b1} , S _{b4} → OFF S _{c1} , S _{c2} → OFF	S _{a3} , S _{a4} → OFF S _{b1} , S _{b4} → OFF S _{c1} , S _{c4} → OFF	S _{a3} , S _{a4} → OFF S _{b1} , S _{b2} → OFF S _{c1} , S _{c2} → OFF	
		Anahtarlama Süresi	$T \left\{ 1 - \frac{2V_{ref} \sin(\theta)}{V_d} \right\}$	$T \left\{ 1 - \frac{V_{ref}}{V_d} \left(\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta) \right) \right\}$	$T \left\{ \frac{V_{ref}}{V_d} \left(\sqrt{3} \cos(\theta) + \sin(\theta) \right) - 1 \right\}$	
	II. Bölge	Vektör	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_2$	$\vec{V}_7$	
		Büyüklik	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	V_d	
		Anahtarlama durumu	poo veya onn	ppo veya oon	pon	
		İletimdeki anahtarlar	S _{a1} , S _{a2} → ON S _{b2} , S _{b3} → ON S _{c2} , S _{c3} → ON	S _{a1} , S _{a2} → ON S _{b2} , S _{b3} → ON S _{c3} , S _{c4} → ON	S _{a1} , S _{a2} → ON S _{b3} , S _{b4} → ON S _{c3} , S _{c4} → ON	
		Kesimdeki anahtarlar	S _{a3} , S _{a4} → OFF S _{b1} , S _{b4} → OFF S _{c1} , S _{c4} → OFF	S _{a3} , S _{a4} → OFF S _{b1} , S _{b4} → OFF S _{c1} , S _{c2} → OFF	S _{a3} , S _{a4} → OFF S _{b1} , S _{b2} → OFF S _{c1} , S _{c2} → OFF	
		III. Bölge	Anahtarlama Süresi	$T \left\{ 1 - \frac{V_{ref}}{V_d} \left(\sqrt{3} \cos(\theta) + \sin(\theta) \right) \right\}$	$T \frac{V_{ref}}{V_d} \left(\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta) \right)$	$2.T \frac{V_{ref} . \sin(\theta)}{V_d}$
			Vektör	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_2$
	Büyüklik		0	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	
	Anahtarlama durumu		ooo, nnn veya ppp	poo veya onn	ppo veya oon	
	İletimdeki anahtarlar		S _{a1} , S _{a2} → ON S _{b1} , S _{b2} → ON S _{c1} , S _{c2} → ON	S _{a1} , S _{a2} → ON S _{b2} , S _{b3} → ON S _{c2} , S _{c3} → ON	S _{a1} , S _{a2} → ON S _{b2} , S _{b3} → ON S _{c3} , S _{c4} → ON	
	Kesimdeki anahtarlar		S _{a3} , S _{a4} → OFF S _{b3} , S _{b4} → OFF S _{c3} , S _{c4} → OFF	S _{a3} , S _{a4} → OFF S _{b1} , S _{b4} → OFF S _{c1} , S _{c4} → OFF	S _{a3} , S _{a4} → OFF S _{b1} , S _{b4} → OFF S _{c1} , S _{c2} → OFF	
	IV. Bölge	Anahtarlama Süresi	$T \left\{ 2 - \frac{V_{ref}}{V_d} \left(\sqrt{3} \cos(\theta) + \sin(\theta) \right) \right\}$	$T \frac{V_{ref}}{V_d} \left(\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta) \right)$	$T \left\{ 2 \frac{V_{ref}}{V_d} \sin(\theta) - 1 \right\}$	
		Vektör	$\vec{V}_2$	$\vec{V}_7$	$\vec{V}_{14}$	
		Büyüklik	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	V_d	$\frac{2V_d}{\sqrt{3}}$	
		Anahtarlama durumu	ppo veya oon	pon	ppn	
		İletimdeki anahtarlar	S _{a1} , S _{a2} → ON S _{b2} , S _{b3} → ON S _{c3} , S _{c4} → ON	S _{a1} , S _{a2} → ON S _{b2} , S _{b3} → ON S _{c3} , S _{c4} → ON	S _{a1} , S _{a2} → ON S _{b1} , S _{b2} → ON S _{c3} , S _{c4} → ON	
		Kesimdeki anahtarlar	S _{a3} , S _{a4} → OFF S _{b1} , S _{b4} → OFF S _{c1} , S _{c2} → OFF	S _{a3} , S _{a4} → OFF S _{b1} , S _{b4} → OFF S _{c1} , S _{c2} → OFF	S _{a3} , S _{a4} → OFF S _{b3} , S _{b4} → OFF S _{c1} , S _{c2} → OFF	

5.1.3.4 Vektörlerin anahtarlama sıralamasının belirlenmesi

Referans gerilimini üretmek için her modülasyon çevrimi için uzay vektör diyagramından uygun vektörler seçilmelidir. Uygun vektörler seçilirken küçük vektör çiftlerinden herhangi biri seçilebilir. Referans gerilimine yakın olan uygun vektörler seçilirken anahtarlama elemanının frekansının minimuma düşürülmesi, çıkış gerilim kalitesinin yükseltilmesi ve elektromanyetik girişime dikkat edilmelidir. Bu nedenle anahtarlama durumları sıralanırken ya da küçük vektör çiftlerinden biri seçilirken en önemli nokta; bir durumdan diğer duruma geçerken yalnızca bir anahtarın konum değiştirmesinin sağlanmasıdır.

Her geçişte sadece bir anahtarlama yapılmalıdır. Dolayısıyla T anahtarlama periyodu süresi boyunca üç anahtarlama fazlası yapılmamalıdır. Bu kurallar anahtarlama sayısının sınırlandırılmasını ve anahtarlama kayıplarının azalmasını sağlayacaktır.

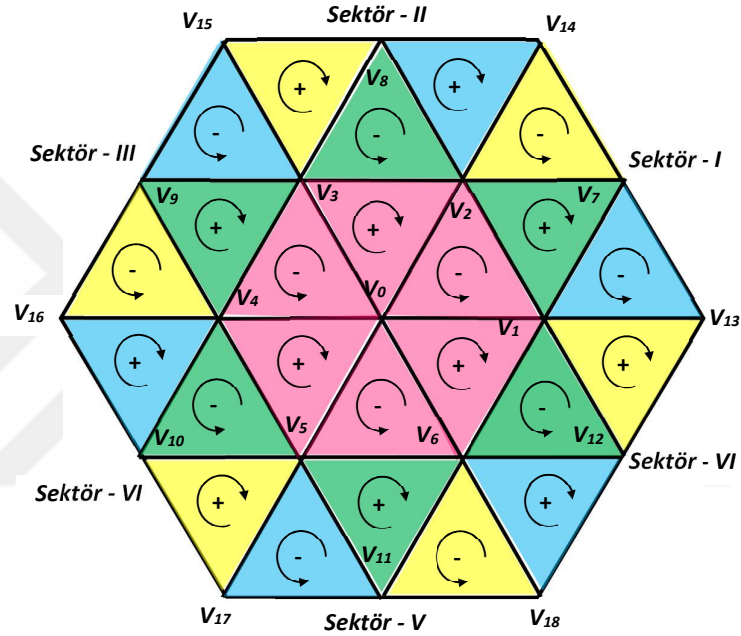
Çizelge 5.10 : Birinci bölümün bütün sektörler için onüç kademeli anahtarlama durumu.

Sektör	Anahtarlama Kademeleri												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
I	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{1N}$	$\vec{V}_{2N}$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{1P}$	$\vec{V}_{2P}$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{2P}$	$\vec{V}_{1P}$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{2N}$	$\vec{V}_{1N}$	$\vec{V}_0$
	Nnn	onn	oon	ooo	poo	ppo	ppp	ppo	poo	ooo	oon	onn	nnn
II	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{2N}$	$\vec{V}_{3N}$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{2P}$	$\vec{V}_{3P}$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{3P}$	$\vec{V}_{2P}$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{3N}$	$\vec{V}_{2N}$	$\vec{V}_0$
	Nnn	oon	non	ooo	ppo	opo	ppp	opo	ppo	ooo	non	oon	nnn
III	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{3N}$	$\vec{V}_{4N}$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{3P}$	$\vec{V}_{4P}$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{4P}$	$\vec{V}_{3P}$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{4N}$	$\vec{V}_{3N}$	$\vec{V}_0$
	Nnn	non	noo	ooo	opo	opp	ppp	opp	opo	ooo	noo	non	nnn
IV	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{4N}$	$\vec{V}_{5N}$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{4P}$	$\vec{V}_{5P}$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{5P}$	$\vec{V}_{4P}$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{5N}$	$\vec{V}_{4N}$	$\vec{V}_0$
	Nnn	noo	nno	ooo	opp	oop	ppp	oop	opp	ooo	nno	noo	nnn
V	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{5N}$	$\vec{V}_{6N}$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{5P}$	$\vec{V}_{6P}$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{6P}$	$\vec{V}_{5P}$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{6N}$	$\vec{V}_{5N}$	$\vec{V}_0$
	Nnn	nno	ono	ooo	oop	pop	ppp	pop	oop	ooo	ono	nno	nnn
VI	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{6N}$	$\vec{V}_{1N}$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{6P}$	$\vec{V}_{1P}$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{1P}$	$\vec{V}_{6P}$	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_{1N}$	$\vec{V}_{6N}$	$\vec{V}_0$
	Nnn	ono	onn	ooo	pop	poo	ppp	poo	pop	ooo	onn	ono	nnn

Diğer yandan anahtarlama sırasında simetrinin sağlanması ve çıkış geriliminde daha düşük toplam harmonik distorsiyonu oluşması da mümkün olmaktadır.

Çizelge 5.10’da örnek olarak verilen anahtarlama dizini kullanıldığında her bir anahtarlama elemanının periyod içinde sadece bir kere konum değiştirdiği görülür.

Anahtarlama sayısının minimuma indirilebilmesi için her bir sektör ve bölgedeki anahtarlama sıralamasının Şekil 5.15’te gösterildiği döngüde yapılması gerekir.



Şekil 5.15: Üç seviyeli çeviricinin uzay vektör modülasyonunda anahtarlama sırası.

İlk dört aşamanın uygulanmasıyla elde edilen anahtarlama durumları örnek olarak Ek B’de verilmiştir. Örneklerde birinci bölgede yer alan bir referans vektörünün farklı faz açısı ve farklı modülasyon indeksi değerlerine göre uygulanacak vektör tipinin ve anahtarlama sürelerinin belirlenmesi yer almaktadır. Anahtarlamalarda bir vektörden diğer vektöre geçerken sadece tek anahtarın konum değiştirmesine dikkat edilmiştir.

5.2 Doğru Gerilim Barası Orta Noktasının NTV-SV-PWM Metodu ve Veri Arama Tablosu Yardımı ile Dengelenmesi

Bir önceki bölümde üç seviyeli ortadan diyot kenetlemeli çeviricide, referans vektörünün bulunduğu bölgeye ait en yakın üç vektörün belirlenmesiyle uygulanan, uzay vektör modülasyonunun nasıl uygulanacağı anlatıldı. Ancak bu modülasyon

yönteminde alt ve üst koldaki kondansatör gerilim değerlerinin birbirlerine eşit oldukları kabul edilmiştir.

Fakat alt ve üst koldaki kondansatörlerin gerilim değerleri doğru gerilim barası üzerinde meydana gelen gerilim dalgalılığı (anahtarlama frekansındaki dalgalılık) ve sistemin doğru gerilim barasının orta noktasındaki akım anahtarlama değerini bir modülasyon periyodu boyunca sıfıra eşitleyememesi nedeniyle birbirlerine eşit olamamaktadır.

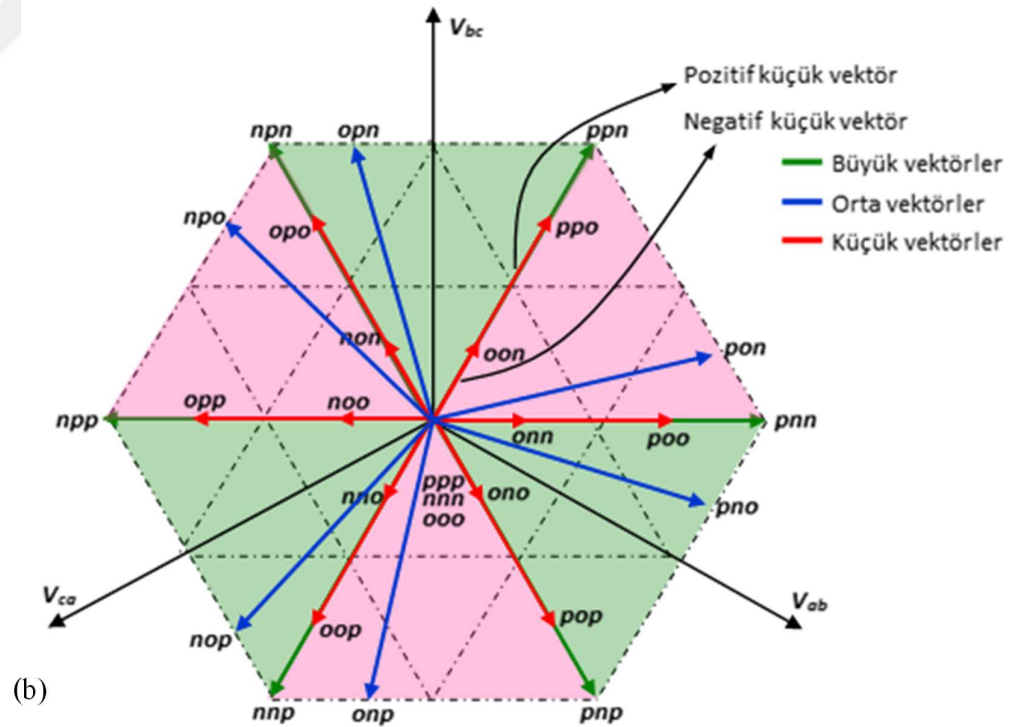
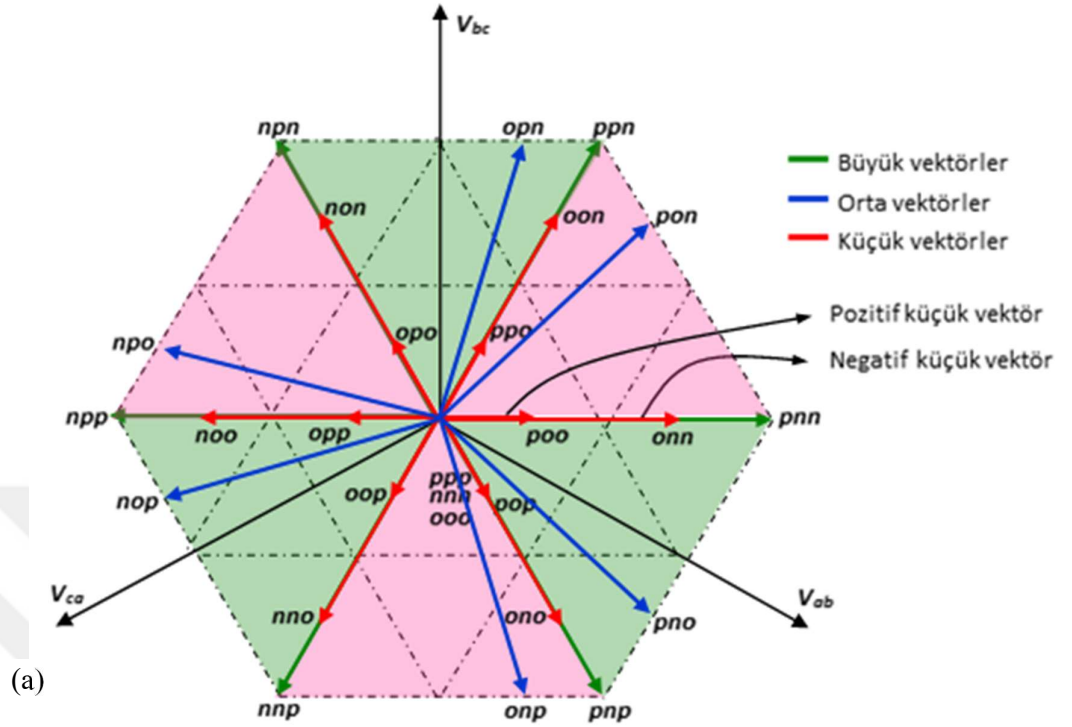
Doğru gerilim barası kondansatörlerinin gerilim değerleri eşit olmadığından uzay vektör diyagramındaki pek çok vektör doğru gerilim barasının orta noktasındaki gerilim dengesizliğinden etkilenir. Küçük vektör çiftlerinden biri bu gerilim dengesizliğine göre bağlı olarak büyürken, diğeri küçülür, ancak doğru gerilim barasının toplam gerilim değeri sabit tutulduğundan küçük vektör gerilim çiftlerinin toplam değeri daima aynı kalır.

Diğ er yandan orta vektörlerin hem genlikleri hem de faz açıları değ işir. Ancak orta vektörün genliği uzay vektör diyagramının altıgen sınır çizgisini takip eder. Şekil 5.16'da doğru gerilim barası orta noktasının dengede olmaması durumunda orta ve küçük vektörlerin alabileceğ i muhtemel genlik değ erleri ve faz açıları yer almaktadır.

Şekil 5.16 (a)'da üstteki kondansatör geriliminin alttaki kondansatör geriliminden daha büyük olduğ u durum ele alınmıştır. Burada küçük vektör çiftlerinden negatif küçük vektörün genliğinin büyüdüğ ü, pozitif küçük vektörün genliğinin ise küçüldüğ ü görölmektedir. Ancak küçük vektör çiftlerinden her ikisinin de açıları aynı kalmaktadır.

Şekil 5.16 (b)'de ise alttaki kondansatör geriliminin üstteki kondansatör geriliminden daha büyük olduğ u durum gösterilmiştir. Burada küçük vektör çiftlerinden negatif küçük vektörün küçüldüğ ü, pozitif küçük vektörün ise büyüdüğ ü görölmektedir. Her iki şekilde de orta vektörlerin hem açılarının hem de genliklerinin değ iştiğ ine dikkat edilmelidir.

Doğru gerilim barası orta nokta kontrolü için hassas bir gerilim referansı gerektiğ inden bütün bu değ işimler dikkate alınmalıdır. Diğ er bir deyiş le modülasyon devresi her iki kondansatör gerilimini de ölçmeli ve uygun bir geri besleme kontrol yöntemi uygulanmalıdır.



Şekil 5.16 : Doğru gerilim barası orta nokta geriliminin dengede olmaması durumunda vektör genliklerinde ve açılarında meydana gelen değişim. (a) $V_{C1} > V_{C2}$.
(b) $V_{C1} < V_{C2}$.

Diyot kenetlemeli çeviriciler ilk kullanılmaya başladıklarından bu yana bu çeviricilerin doğru gerilim barası orta noktalarının kontrolü üzerine çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Bütün bu kontrol yöntemlerinin neredeyse tamamı doğru gerilim barasının alt ve üst kolundaki kondansatör gerilimlerinden alınan geri besleme sinyali ile gerçekleştirilir. Sistem evirici veya doğrultucu modunda da çalışsa aradaki tek fark nötr noktasından akan akımın yönü olur. Ancak her iki durumda da sistemin nötr noktasından akan akımın kontrol edilmesi gerekir.

Gerilimler arasındaki sapma çeviriciye özellikle düşük güç faktörlü yükler bağlandığında veya çeviricinin yüksek modülasyon indekslerinde çalıştırılması durumunda daha belirgin olarak ortaya çıkar. Bununla birlikte doğru gerilim barası orta noktasında çıkış geriliminin üç katı frekansındaki düşük frekans dalgalılığı meydana gelir. Eğer bu gerilim dengesizliğini düzeltmek için uygun bir kontrol yöntemi uygulanmazsa elde edilen çıkış faz arası gerilimleri düşük frekans harmonikleri içerir. Bu harmonikler yük performansında önemli düşüşe neden olurlar. Özellikle de şebekeye bağlı çeviricilerde veya alternatif akım motor sürücülerinde bu problem daha bir önemli hale gelmektedir.

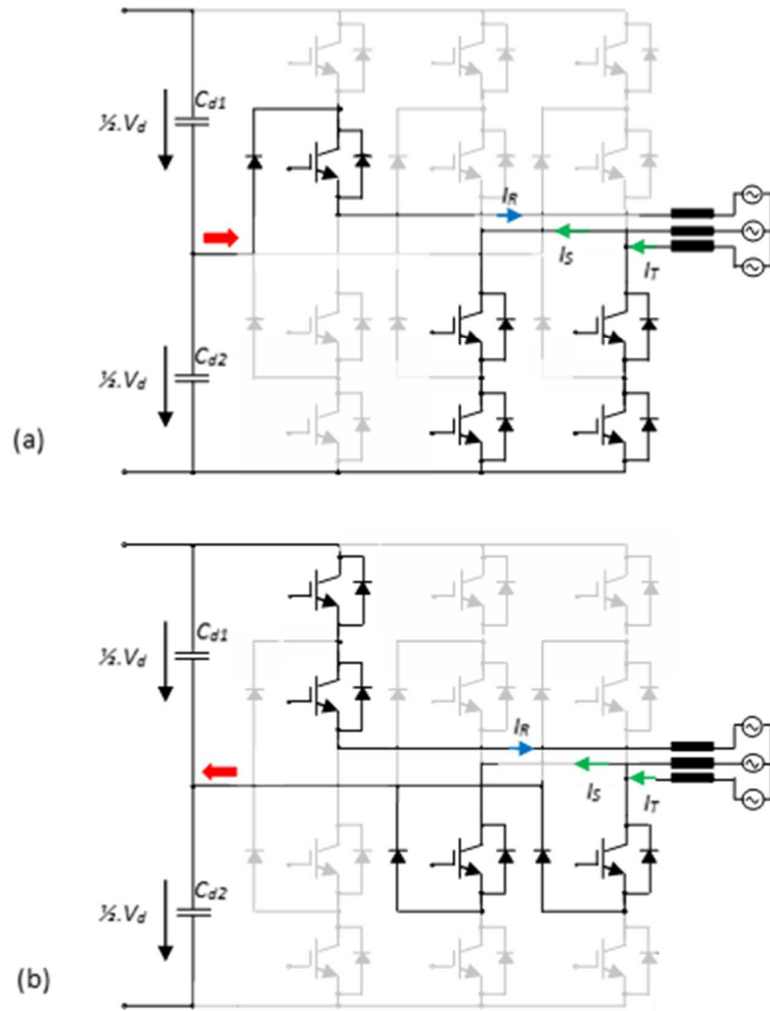
Daha önceki bölümde de anlatıldığı üzere NPC topolojisinde 19 adet farklı vektör durumu veren toplam 27 adet vektör vardır. Gerilim vektörlerinin tümü doğru gerilim barası orta noktasının dengelenmesinde etkili değildir.

- *Büyük vektörler* faz akımlarını pozitif veya negatif gerilim noktasına bağladıkları için orta noktanın dengelenmesine katkıda bulunmazlar.
- *Orta vektörler* bir fazı orta noktaya bağlayarak, orta noktanın potansiyelinin yüke bağlı olarak değişmesini sağlarlar. Bu nedenle orta noktanın dengesizliğinde orta vektörlerin çok büyük katkısı bulunmaz.
- *Küçük vektörler* faz arası eşdeğer geriliminin çıkışa uygulanmasına neden olurlar, ancak vektörün “pozitif” veya “negatif” olmasına göre orta nokta akımının yönü değişir. Aşağıdaki şekilde bu durumu örnekleyen bir anahtarlama durumu yer almaktadır.

Şekil 5.17 (a)’dan anlaşılacağı üzere, anahtarlama durumu *onn* olduğunda, R faz akımı pozitif, S ve T faz akımları negatif olmak üzere orta nokta akımı dışarıya doğru akmaktadır. Anahtarlama durumu *poo* olduğunda ise faz akımlarının yönü aynı kalır ancak doğru gerilim barası

orta noktasının akımı yön değiştirerek içeriye doğru akmakya başlar. Bu da üst koldaki kondansatörün deşarj olmasına, alt koldaki kondansatörün de şarj olmasına neden olur.

Nötr noktasından hangi faz akımının geçeceği bu küçük vektör çiftlerinden hangisinin uygulanacağına bağlıdır. Çizelge 5.11’de nötr noktası akımının farklı vektörlere göre nasıl değiştiği gösterilmektedir.



Şekil 5.17 : Pozitif ve negatif küçük vektörlerin orta nokta akımına etkisi (a) Pozitif küçük vektör (onn). (b) Negatif küçük vektör (poo).

Çizelge 5.11 : Nötr akımının uzay vektörlerine bağlı olarak değişimi.

Orta Vektörler	i_{NP}	Pozitif Küçük Vektörler	i_{NP}	Negatif Küçük Vektörler	i_{NP}
pon	i_b	poo	i_a	onn	$-i_a$
opn	i_a	oon	i_c	ppn	$-i_c$
npo	i_c	opo	i_b	non	$-i_b$
nop	i_b	noo	i_a	opp	$-i_a$
onp	i_a	oop	i_c	nno	$-i_c$
pno	i_c	ono	i_b	pop	$-i_b$

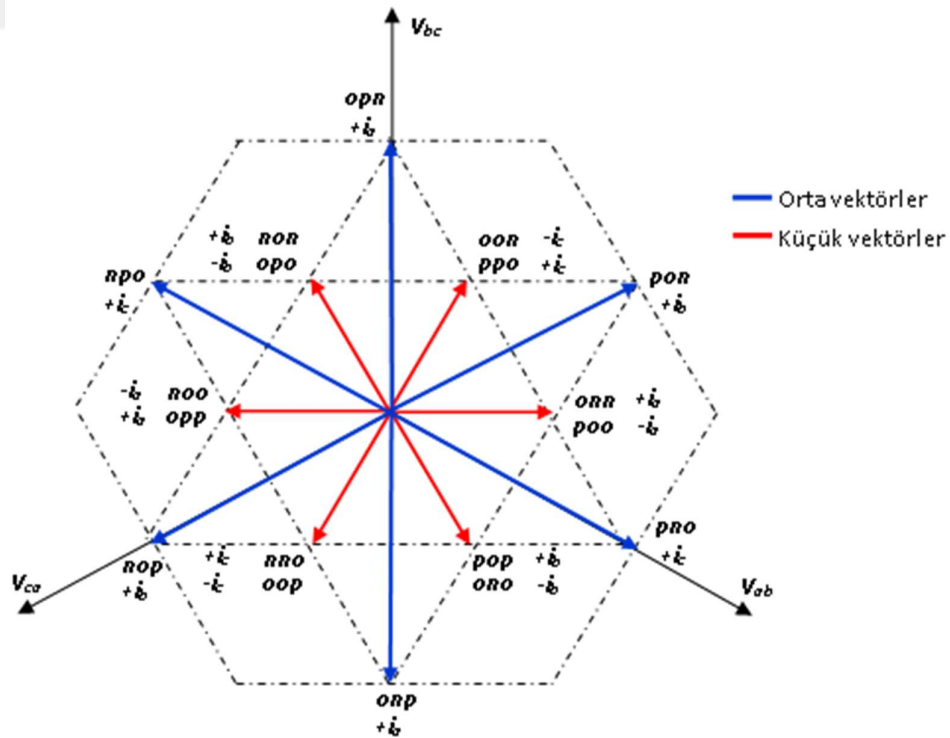
Tablodan da anlaşılacağı üzere bütün pozitif küçük vektörler ve orta vektörler doğru gerilim barasının alt kısmında kalan kondansatörü bağlı bulundukları faz akımı pozitif oluncaya dek deşarj ederler (V_{C1} üst kondansatör gerilimi artıp V_{C2} alt kondansatör gerilimi azalincaya kadar). Eğer faz akımı negatifse, bu durum üstteki kondansatörün deşarj, alttaki kondansatörün ise şarj olduğu anlamına gelir.

Negatif küçük vektörler ise pozitif küçük vektörlerin ve orta vektörlerin aksine üstteki kondansatörü deşarj ederler. Çizelge 5.12’de vektör tiplerinin akım yönüne göre doğru gerilim barası kondansatörlerinin şarj/deşarj durumunu nasıl değiştirdikleri görülmektedir.

Şekil 5.18’de doğru gerilim barasının orta nokta gerilimini etkileyen vektörlere ilişkin diyagram yer almaktadır. Şekilde pozitif ve negatif vektörlere ilişkin faz akımları gösterilmektedir. Eğer vektör pozitif yöndeysse akım pozitif yönde, eğer vektör negatif yöndeysse akım da negatif yöndedir.

Çizelge 5.12 : Vektör tipi ve akım yönüne göre kondansatör şarj/deşarj durumları.

Vektör Türü	Faz Akımı Yönü $i > 0$	Faz Akımı Yönü $i < 0$
Büyük vektörler	Akım durumunda değişiklik olmaz	Akım durumunda değişiklik olmaz
Orta vektörler	Üst kol kondansatörünü şarj eder Alt kol kondansatörünüdeşarj eder	Üst kol kondansatörünüdeşarj eder Alt kol kondansatörünü şarj eder
Pozitif küçük vektörler	Üst kol kondansatörünü şarj eder Alt kol kondansatörünüdeşarj eder	Üst kol kondansatörünüdeşarj eder Alt kol kondansatörünü şarj eder
Negatif küçük vektörler	Üst kol kondansatörünüdeşarj eder Alt kol kondansatörünü şarj eder	Üst kol kondansatörünü şarj eder Alt kol kondansatörünüdeşarj eder
Sıfır vektörleri	Akım durumunda değişiklik olmaz	Akım durumunda değişiklik olmaz



Şekil 5.18 : Doğru gerilim barası orta nokta gerilimini belirleyen vektörler ve bunlara ilişkin akım yönleri.

NPC topolojisinde uzay vektör modülasyonu uygulandığında orta vektörlerin kullanımına bağlı olarak ortamda üçüncü harmonik osilasyonu meydana gelir. Bu durum doğal bir osilasyon sonucunda meydana gelir. İdeal durumda küçük vektörlerin her bir anahtarlama periyodunda birbirlerini bastırmaları gerekir. Ancak doğru gerilim barası gerilim dengelemesindeki en önemli nokta çeviricinin hiçbir durumda ideal koşulda çalışmamasıdır. Doğru gerilim barasında dengesizlik durumu yaratan çeşitli faktörler vardır, bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

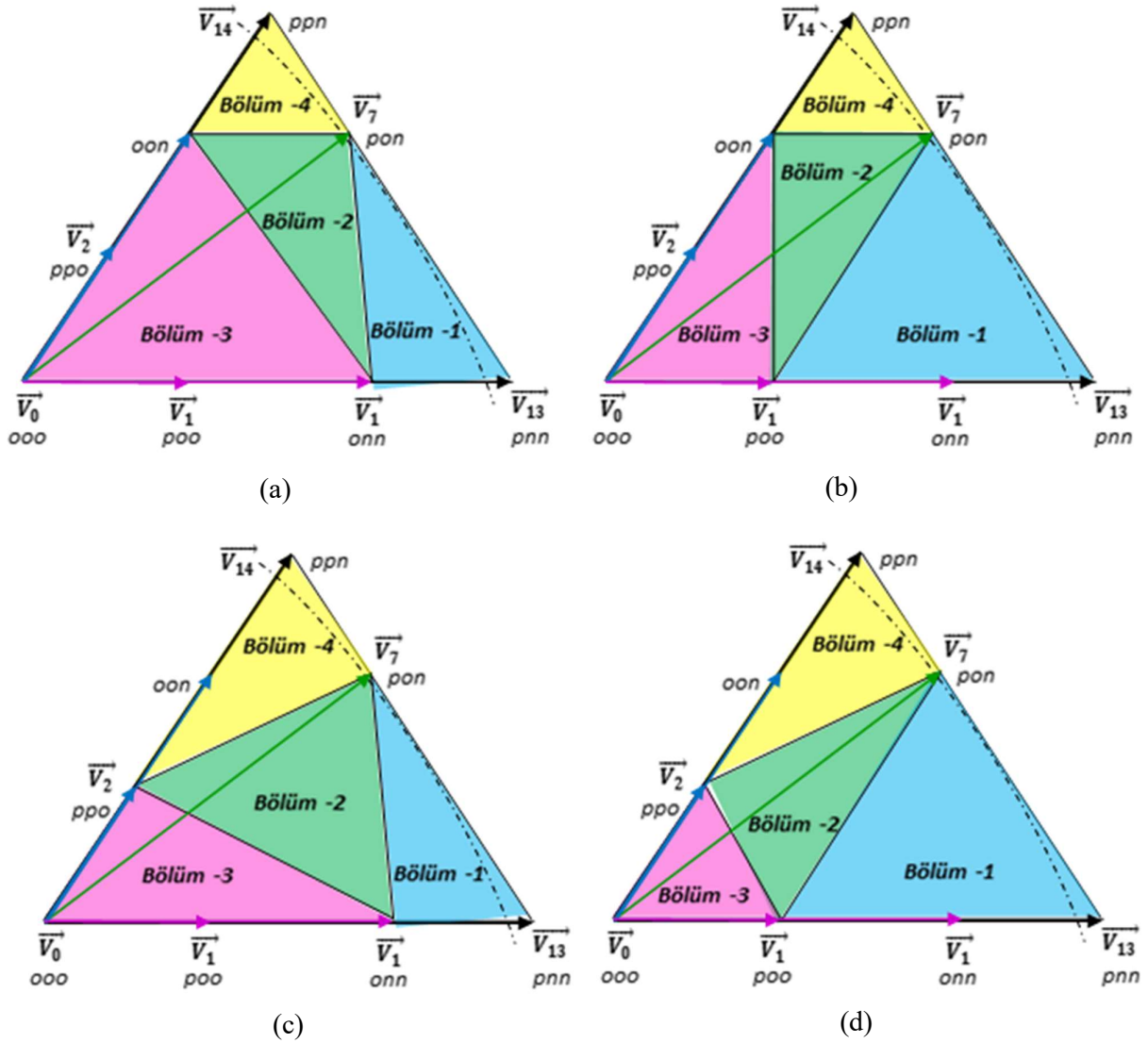
- Temel periyod boyunca faz akımlarının değişiyor olması (fazlardan çekilen akımların anlık değerlerinin birbirine eşit olmaması aynı koldaki kondansatörler arasında şarj veya deşarj yaşanmasına neden olur).
- Referans geriliminin temel periyod boyunca değişiyor olması.
- Anahtarlama elemanlarının ideal olmaması (yarı iletken anahtarlama elemanları ve paralel diyotlar üzerinde meydana gelen gerilim düşümleri pozitif ve negatif gerilim gerilim değerlerinin birbirine eşit olmamasına neden olur, diğer yandan alt ve üst kol anahtarları arasındaki ölü zaman süresi ve anahtarların turn-on ve turn-off gecikme süreleri de vektörler arasında yüke bağlı olarak değişen eşitsizliğe neden olur).
- Yükteki üç faz parametrelerinin ideal olarak eşdeğer olmaması
- Sınırlı anahtarlama frekansı.

Bu bölümde önerilen gerilim dengeleme yöntemi, küçük vektör çiftlerinden her birinin ne kadar sürelerle iletimde kalacaklarını belirlemeye yöneliktir. Bu yöntem ilgili vektörlere uygulanan iletimde kalma sürelerinin direk dengesiz uzay vektör diyagramından elde edilmesine dayanan ileri beslemeli gerilim dengeleme yöntemidir. Bu yöntem sayesinde daha sonra doğru gerilim barası orta noktasındaki gerilim sapmasına göre çevrim oranlarının düzeltilmesi gerekmez. Bu method sayesinde sistemin çalışması sırasında işlemcide sürekli tekrarlanan uzun karmaşık işlemler basite indirgenir ve işlemcinin tepki süresi artar.

Bu yöntemin gerçek zamanlı işlemcide kullanılabilirliğini sağlamak için dengesiz diyagramdaki üçgenler arasındaki simetri kullanır. Bu metotta her bir modülasyon periyodu boyunca sadece üç vektör dikkate alır, bu nedenle küçük vektör çiftlerinden

sadece bir tanesi kullanılır. Küçük vektörün seçimi kondansatör gerilimine ve doğru gerilim barası orta nokta akımına bağlı olarak değişir.

Burada kontrol yöntemini karmaşık ve zor hale getiren durum bölgelerin doğru gerilim barasının orta noktasındaki gerilim değişiminden dolayı bir önceki vektör seçimi konusunda belirtildiği gibi artık eşkenar üçgen olmaması ve üçgen şeklinin seçilen küçük vektöre ve orta vektörün açısına göre farklılık göstermesidir.

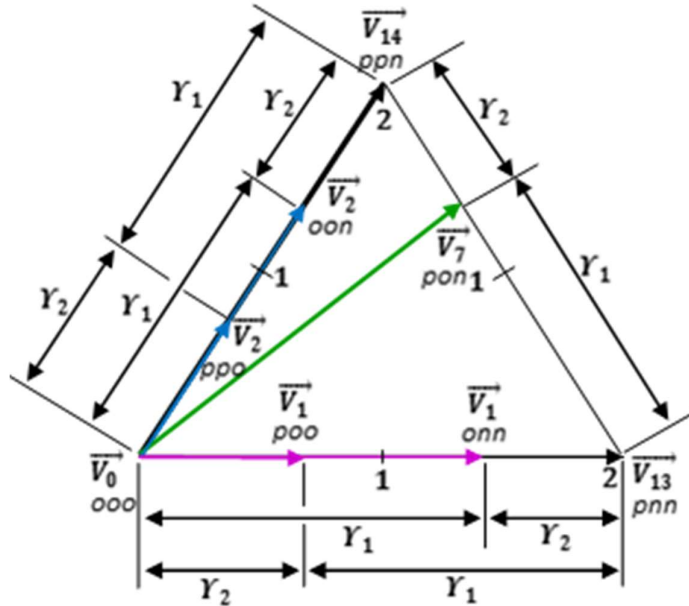


Şekil 5.19 : Doğru gerilim barasının orta nokta gerilim dengesizliği durumunda seçilen küçük vektöre göre bölgeleri belirleyen üçgenlerin değişimi. (a) Durum 1. (b) Durum 2. (c) Durum 3. (d) Durum 4.

Şekil 5.19’da seçilen küçük vektör tipine göre meydana gelebilecek üçgen bölgeler için bir örnek verilmektedir. Örneklerde orta vektörün genliği ve açısı sabit tutulmuştur. Şekil 5.19 (a)’da küçük vektör çiftlerinden her ikisi de genliği büyüyen vektörlerden seçilmiştir. Şekil 5.19 (b) ve Şekil 5.19 (c)’de küçük vektör çiftlerinden biri genliği büyüyen vektörlerden diğeri genliği küçülen vektörlerden seçilmiştir. Son örnekte de vektör küçük vektör çiftlerinden her ikisinin de genliği küçülen vektörlerden seçildiği durum gösterilmiştir.

Şekilden de anlaşılacağı üzere bu yeni durum yeni üçgen bölgelerinin oluşmasına neden olmuştur. Yeni durumda Bölüm 1 ve Bölüm 4 iki farklı üçgen alanına sahip olabilecekken, Bölüm 2 ve Bölüm 3 için bu sayı dördüttür. Böylece daha önceki bölümde dört eşkenar üçgen için hesaplanmış olan anahtarlama sürelerinin bu yeni durumda toplam 12 farklı üçgen için yeniden hesaplanması gerekir.

Şekil 5.20’de birinci sektörde yer alan alttaki kondansatör geriliminin üstteki kondansatör geriliminden daha büyük olduğu durum gösterilmektedir. Gerilimdeki dengesizliğe rağmen üçgen bölgelerin değişimi gelişigüzel değildir ve belirli bir simetriyi takip eder.



Şekil 5.20: Doğru gerilim barasının orta noktasındaki sapmaya göre birinci sektördeki gerilimlerin genliklerinin sapması ($V_{C1} > V_{C2}$).

Önceki bölümde anlatılanlar dikkate alındığında burada sadece referans vektörün hangi bölgede olduğunun belirlenmesi değil, aynı zamanda kullanılacak olan gerilim vektörünün belirlenmesi de oldukça karmaşık hale gelmektedir. Ancak diğer yandan

bütün bölgeler en azından bir adet 60'lık açı içermektedir. Bu da matematiksel hesaplamaları biraz da olsa kolaylaştırmaktadır.

γ_1 ve γ_2 doğru gerilim barası orta noktasındaki dengesizlik durumunda modülasyon işlemini belirlemek üzere tanımlanan parametrelerdir. Alt ve üst kondansatör gerilimlerinin birbirine eşit olması durumunda her bir parametre doğru gerilimin yarısının $1/\sqrt{3}$ değerine eşittir.

$$\gamma_1 = \frac{V_{c1}}{\sqrt{3}} \quad (5.82)$$

$$\gamma_2 = \frac{V_{c2}}{\sqrt{3}} \quad (5.83)$$

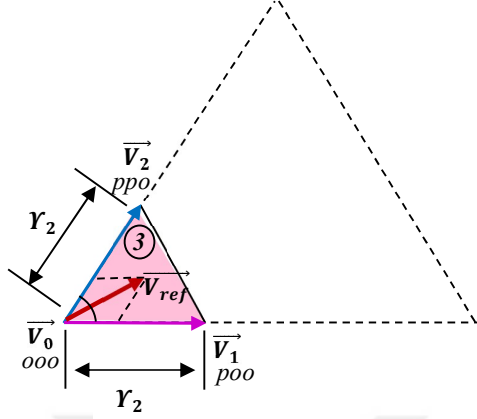
Aşağıdaki eşitlikte de görüldüğü üzere parametrelerin toplamı daima büyük vektörün genliğine eşittir.

$$\gamma_1 + \gamma_2 = \frac{V_{c1} + V_{c2}}{\sqrt{3}} = \frac{V_d + V_d}{\sqrt{3}} = 2 \cdot \frac{V_d}{\sqrt{3}} \quad (5.84)$$

Değişen vektör boyutları ve açılarından dolayı meydana gelen yeni bölgeler için anahtarlama sürelerinin yeniden hesaplanması gerekir. Daha önceki bölümde kullanılan T_a , T_b ve T_c değişkenleri yeni bölgelerin hesaplanmasında büyük kolaylık sağlayacaktır. Burada daha önceki zaman sabitleri yerine $\hat{T}_a$, $\hat{T}_b$ ve $\hat{T}_c$ değişkenleri kullanılacaktır.

Eğer referans vektörü aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi yeniden boyutlandırılmış üçüncü bölgede yer alıyorsa anahtarlama süreleri şu şekilde hesaplanır.

Sektör I - Bölüm III (küçük vektörlerin poo-ppo olduğu durum):



Şekil 5.21: Referans vektörünün üçüncü bölgede yer aldığı durum.

Anahtarlama sürelerinin hesaplanması daha önce Bölüm 5.1.3 'te anlatıldığı gibi yapılır. Vektörlerin yeni büyüklüklerinin γ_2 olduğu bilindiği için bu bölgedeki işlemler oldukça kolaydır.

$$\begin{aligned} T \cdot V_{ref} \cdot \cos \theta &= T'_a \cdot V_{1_poo} + T'_b \cdot V_{2_ppo} \cdot \cos 60^\circ + T'_c \cdot V_{0_ooo} \\ T \cdot V_{ref} \cdot \cos \theta &= T'_a \cdot \gamma_2 + T'_b \cdot \gamma_2 \cdot \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (5.85)$$

$$\begin{aligned} T \cdot V_{ref} \cdot \sin \theta &= T'_b \cdot V_{2_ppo} \cdot \sin 60^\circ + T'_c \cdot V_{0_ooo} \\ T \cdot V_{ref} \cdot \sin \theta &= T'_b \cdot \gamma_2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \end{aligned} \quad (5.86)$$

Yeni hesaplanan anahtarlama süresi ve çevrim oranı önceki anahtarlama süresine göre şu şekilde gösterilir:

$$\begin{aligned} T'_b &= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot T \cdot \frac{V_{ref} \cdot \sin \theta}{\gamma_2} \\ T'_b &= T_b \cdot \frac{V_d}{\gamma_2} \end{aligned} \quad (5.87)$$

$$\begin{aligned} d'_{ppo} &= \frac{T'_b}{T} = \frac{T_b}{T} \cdot \frac{V_d}{\gamma_2} \\ d'_{ppo} &= d_{ppo} \cdot \frac{V_d}{\gamma_2} \end{aligned} \quad (5.88)$$

$$\begin{aligned}
T'_a \cdot \gamma_2 &= T \cdot V_{ref} \cdot \cos \theta - T'_b \cdot \gamma_2 \cdot \frac{1}{2} \\
T'_a &= T \cdot \frac{V_{ref}}{\gamma_2} \cdot \cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot T \cdot \frac{V_{ref}}{\gamma_2} \cdot \sin \theta \\
T'_a &= T_a \cdot \frac{V_d}{\gamma_2}
\end{aligned} \tag{5.89}$$

$$d'_{poo} = d_{poo} \cdot \frac{V_d}{\gamma_2} \tag{5.90}$$

$$\begin{aligned}
T'_c &= T - T'_a - T'_b \\
T'_c &= T - T_a \cdot \frac{V_d}{\gamma_2} - T_b \cdot \frac{V_d}{\gamma_2}
\end{aligned} \tag{5.91}$$

$$d'_{ooo} = 1 - d_{ppo} \cdot \frac{V_d}{\gamma_2} - d_{poo} \cdot \frac{V_d}{\gamma_2} \tag{5.92}$$

Eğer referans vektörü yeniden boyutlandırılmış bölge dörtte yer alıyorsa anahtarlama süreleri ve çevrim oranları şu şekilde hesaplanır.

Sektör I - Bölüm IV (küçük vektörün oon olduğu durum):

Vektörlerin α ve β bileşenleri Şekil 5.22’de gösterildiği gibi matematiksel olarak hesaplanmış ve eşitlik 5.93 ve eşitlik 5.94’teki yerlerine konmuştur.

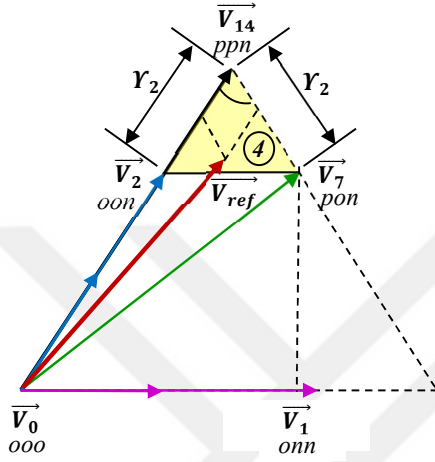
$$\begin{aligned}
T \cdot V_{ref} \cdot \cos \theta &= T'_a \cdot V_{2_oon} \cdot \cos 60^\circ + T'_b \cdot V_{7_pon} \cdot \cos \phi + T'_c \cdot V_{14_ppn} \cdot \cos 60^\circ \\
T \cdot V_{ref} \cdot \cos \theta &= T'_a \cdot \gamma_1 \cdot \frac{1}{2} + T'_b \cdot \left(\frac{\gamma_1}{2} + \gamma_2 \right) + (T - T'_a - T'_b) \cdot \frac{1}{2} \cdot (\gamma_1 + \gamma_2)
\end{aligned} \tag{5.93}$$

$$\begin{aligned}
T \cdot V_{ref} \cdot \sin \theta &= T'_a \cdot V_{2_oon} \cdot \sin 60^\circ + T'_b \cdot V_{7_pon} \cdot \sin \phi + T'_c \cdot V_{14_ppn} \cdot \sin 60^\circ \\
T \cdot V_{ref} \cdot \sin \theta &= T'_a \cdot \gamma_1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} + T'_b \cdot \gamma_2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} + (T - T'_a - T'_b) \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (\gamma_1 + \gamma_2)
\end{aligned} \tag{5.94}$$

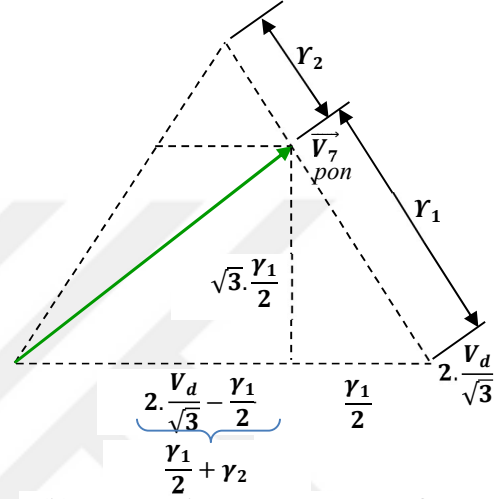
$$\begin{aligned}
T'_b &= \frac{V_{ref} \cdot T}{\sqrt{3}} \cdot \frac{(\sqrt{3} \cdot \cos \theta - \sin \theta)}{\gamma_2} \\
T'_b &= T_b \cdot \frac{V_d}{\gamma_2}
\end{aligned} \tag{5.95}$$

$$d'_{pon} = \frac{T'_b}{T} = \frac{T_b}{T} \cdot \frac{V_d}{\gamma_2}$$

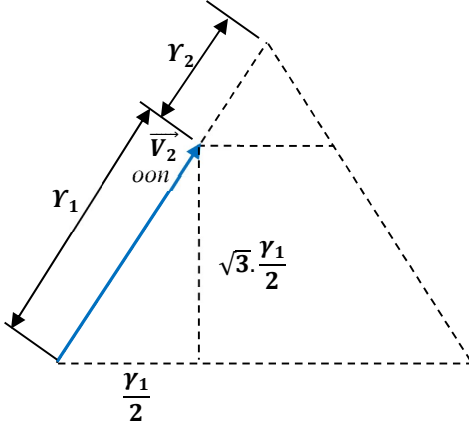
$$d'_{pon} = d_{pon} \cdot \frac{V_d}{\gamma_2} \quad (5.96)$$



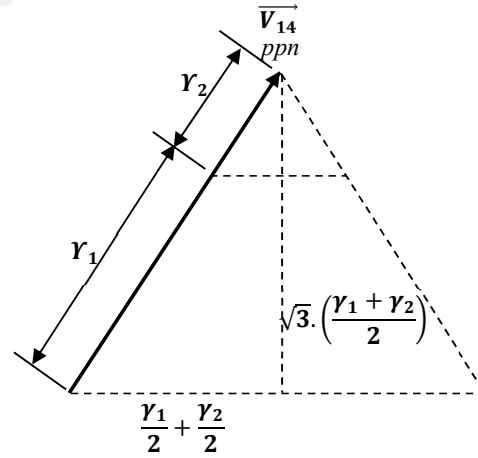
(a) Dördüncü bölgede yer alan referans vektörü.



(b) V_7 vektörünün α ve β bileşenlerinin bulunması.



(c) V_2 vektörünün α ve β bileşenlerinin bulunması.



(d) V_{14} vektörünün α ve β bileşenlerinin bulunması.

Şekil 5.22: Referans vektörünün dördüncü bölgede yer aldığı durum için vektörlerin α ve β bileşenlerinin bulunması.

Eşitlik 5.95'teki $\hat{T}_b$ değeri eşitlik 5.93'teki yerine konursa $\hat{T}_a$ anahtarlama süresi aşağıdaki gibi bulunur.

$$\begin{aligned}
T \cdot V_{ref} \cdot \cos \theta &= T'_a \cdot \gamma_1 \cdot \frac{1}{2} + \frac{V_{ref} \cdot T}{\sqrt{3}} \cdot \frac{(\sqrt{3} \cdot \cos \theta - \sin \theta)}{\gamma_2} \cdot \left(\frac{\gamma_1}{2} + \gamma_2 \right) \\
&+ \left(T - T'_a - \frac{V_{ref} \cdot T}{\sqrt{3}} \cdot \frac{(\sqrt{3} \cdot \cos \theta - \sin \theta)}{\gamma_2} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot (\gamma_1 + \gamma_2) \\
T'_a &= T - T \cdot \frac{V_{ref}}{\gamma_2 \cdot \sqrt{3}} \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos \theta + \sin \theta) \\
T'_a &= T_a \cdot \frac{V_d}{\gamma_2}
\end{aligned} \tag{5.97}$$

$$d'_{oon} = d_{oon} \cdot \frac{V_d}{\gamma_2} \tag{5.98}$$

$$\begin{aligned}
T'_c &= T - T'_a - T'_b \\
T'_c &= T - T_a \cdot \frac{V_d}{\gamma_2} - T_b \cdot \frac{V_d}{\gamma_2} \\
T'_c &= 2 \cdot \frac{V_{ref} \cdot T \cdot \sin \theta}{\sqrt{3} \cdot \gamma_2}
\end{aligned} \tag{5.99}$$

$$d'_{ppn} = 1 - d_{oon} \cdot \frac{V_d}{\gamma_2} - d_{pon} \cdot \frac{V_d}{\gamma_2} \tag{5.100}$$

Çizelge 5.13'te bütün olası durumlar için anahtarlama sürelerinin hesaplanması gösterilmektedir. Burada birinci sektör için hesaplanmış ve dört grup altında toplanabilen toplam 12 adet durum söz konusudur. Örneğin birinci bölgede veya dördüncü bölgede daima bir adet küçük vektör olabileceği için durum sayısı pozitif veya negatif vektör (oon ve poo vektörleri) durumuna göre iki adettir. Ancak ikinci ve üçüncü bölgelerde ikişer adet küçük vektörün pozitif ve negatif vektör çiftleri söz konusu olduğundan bu bölgelerde durum sayısı dörde çıkmaktadır.

Çizelge 5.13 : Dengesizlik durumuna göre yeniden düzenlenen anahtarlama süreleri.

	T_a	T_b	T_c
Anahtarlama Süresi	$T\left\{2 \cdot \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_1} \sin(\theta)\right\}$	$T\left\{1 - \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_2} (\sqrt{3} \cos(\theta) + \sin(\theta))\right\}$	$T\left\{\frac{V_{ref}}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sqrt{3} \cos(\theta) + \sin(\theta)}{\gamma_2} - 2 \cdot \frac{\sin(\theta)}{\gamma_1}\right)\right\}$
Vektör	$\vec{V}_7$	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_{13}$
Vektör büyüklüğü	V_d	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{2V_d}{\sqrt{3}}$
Anahtarlama durumu	pon	onn	pnn
Anahtarlama Süresi	$T\left\{2 \cdot \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_1} \sin(\theta)\right\}$	$T\left\{1 - \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_1} (\sqrt{3} \cos(\theta) + \sin(\theta))\right\}$	$T\left\{\frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_1} (\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta))\right\}$
Vektör	$\vec{V}_7$	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_{13}$
Vektör büyüklüğü	V_d	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{2V_d}{\sqrt{3}}$
Anahtarlama durumu	pon	poo	pnn
Anahtarlama Süresi	$T\left\{1 - 2 \cdot \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_1} \sin(\theta)\right\}$	$T\left\{\begin{array}{l} 2 \cdot \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_1} \sin(\theta) \\ - \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_2} (\sqrt{3} \cos(\theta) + \sin(\theta)) \end{array}\right\}$	$T\left\{\frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_2} (\sqrt{3} \cos(\theta) + \sin(\theta))\right\}$
Vektör	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_2$	$\vec{V}_7$
Vektör büyüklüğü	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	V_d
Anahtarlama durumu	onn	oon	pon
Anahtarlama Süresi	$T\left\{1 - 2 \cdot \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_1} \sin(\theta)\right\}$	$T\left\{1 - \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_2} (\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta))\right\}$	$T\left\{\begin{array}{l} 2 \cdot \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_1} \sin(\theta) + \\ \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_2} (\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta)) - 1 \end{array}\right\}$
Vektör	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_2$	$\vec{V}_7$
Vektör büyüklüğü	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	V_d
Anahtarlama durumu	poo	oon	pon
Anahtarlama Süresi	$T\left\{\begin{array}{l} \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_2} (\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta)) \\ - \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_1} (\sqrt{3} \cos(\theta) + \sin(\theta)) \end{array}\right\}$	$T\left\{1 - \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_2} (\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta))\right\}$	$T\left\{\frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_1} (\sqrt{3} \cos(\theta) + \sin(\theta))\right\}$
Vektör	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_2$	$\vec{V}_7$
Vektör büyüklüğü	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	V_d
Anahtarlama durumu	poo	ppo	pon

Çizelge 5.13 (devam) : Dengesizlik durumuna göre yeniden düzenlenen anahtarlama süreleri.

	T_a	T_b	T_c
Anahtarlama Süresi	$T \cdot \left(\frac{\gamma_1 \cdot \gamma_2}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 - \gamma_1 \cdot \gamma_2} \right) \cdot \left\{ \frac{\frac{V_{ref}}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta)}{\gamma_2} + \frac{\sqrt{3} \cos(\theta) + \sin(\theta)}{\gamma_1} \right) - 1}{\gamma_1} \right\}$	$T \cdot \left(\frac{\gamma_1 \cdot \gamma_2}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 - \gamma_1 \cdot \gamma_2} \right) \cdot \frac{V_{ref}}{\sqrt{3}} \cdot \left\{ \frac{\frac{\sin(\theta)}{\gamma_1} + \frac{\sqrt{3} \cos(\theta) + \sin(\theta)}{\gamma_2}}{\gamma_2} \right\}$	$T \cdot \left(\frac{\gamma_1 \cdot \gamma_2}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 - \gamma_1 \cdot \gamma_2} \right) \cdot \left\{ \frac{\frac{V_{ref}}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta)}{\gamma_1} + \frac{2 \cdot \sin(\theta)}{\gamma_2} \right) - 1}{\gamma_2} \right\}$
Vektör	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_2$	$\vec{V}_7$
Vektör büyüklüğü	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	V_d
Anahtarlama durumu	onn	ppo	pon
Anahtarlama Süresi	$T \left\{ 1 - \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_2} (\sqrt{3} \cos(\theta) + \sin(\theta)) \right\}$	$T \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_2} (\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta))$	$T \left\{ 2 \cdot \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_2} \sin(\theta) \right\}$
Vektör	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_2$
Vektör büyüklüğü	0	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$
Anahtarlama durumu	ooo, nnn veya ppp	poo	ppo
Anahtarlama Süresi	$T \left\{ 1 - \frac{V_{ref}}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta)}{\gamma_2} + \frac{\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta)}{\gamma_1} \right) \right\}$	$T \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_2} (\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta))$	$T \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_1} (\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta))$
Vektör	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_2$
Vektör büyüklüğü	0	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$
Anahtarlama durumu	ooo, nnn veya ppp	poo	oon
Anahtarlama Süresi	$T \left\{ 1 - \frac{V_{ref}}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta)}{\gamma_1} + \frac{2 \cdot \sin(\theta)}{\gamma_2} \right) \right\}$	$T \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_1} (\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta))$	$T \left\{ 2 \cdot \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_2} \sin(\theta) \right\}$
Vektör	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_2$
Vektör büyüklüğü	0	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$
Anahtarlama durumu	ooo, nnn veya ppp	onn	ppo

Çizelge 5.13 (devam) : Dengesizlik durumuna göre yeniden düzenlenen anahtarlama süreleri.

	T _a	T _b	T _c
Anahtarlama Süresi	$T \left\{ 1 - \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_1} (\sqrt{3} \cos(\theta) + \sin(\theta)) \right\}$	$T \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_1} (\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta))$	$T \left\{ 2 \cdot \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_1} \sin(\theta) \right\}$
Vektör	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_2$
Vektör büyüklüğü	0	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$
Anahtarlama durumu	ooo, nnn veya ppp	onn	oon
Anahtarlama Süresi	$T \left\{ 1 - \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_2} (\sqrt{3} \cos(\theta) + \sin(\theta)) \right\}$	$T \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_2} (\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta))$	$T \left\{ 2 \cdot \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_2} \sin(\theta) \right\}$
Vektör	$\vec{V}_2$	$\vec{V}_7$	$\vec{V}_{14}$
Vektör büyüklüğü	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	V_d	$\frac{2V_d}{\sqrt{3}}$
Anahtarlama durumu	oon	pon	ppn
Anahtarlama Süresi	$T \left\{ 1 - \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_1} (\sqrt{3} \cos(\theta) + \sin(\theta)) \right\}$	$T \frac{V_{ref}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_2} (\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta))$	$T \left\{ \frac{V_{ref}}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sqrt{3} \cos(\theta) + \sin(\theta)}{\gamma_1} - \frac{\sqrt{3} \cos(\theta) - \sin(\theta)}{\gamma_2} \right) \right\}$
Vektör	$\vec{V}_2$	$\vec{V}_7$	$\vec{V}_{14}$
Vektör büyüklüğü	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	V_d	$\frac{2V_d}{\sqrt{3}}$
Anahtarlama durumu	ppo	pon	ppn

Çevrim oranlarının hesaplamasının basitleştirilmesi için eşitlik 5.101, eşitlik 5.102 ve eşitlik 5.103'te δ_1 , δ_2 ve δ_3 ile verilen üç değişken tanımlanmıştır. Bu değişkenler Çizelge 5.13'teki anahtarlama sürelerinin hesaplamasında kullanıldığında her bir bölge için çevrim oranları Çizelge C.1'deki gibi bulunmuş olur.

$$\delta_1 = \frac{V_{ref}}{\sqrt{3}} \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos\theta - \sin\theta) \quad (5.101)$$

$$\delta_2 = 2 \cdot \frac{V_{ref}}{\sqrt{3}} \cdot \sin\theta \quad (5.102)$$

$$\delta_3 = 1 - \frac{V_{ref}}{\sqrt{3}} \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos\theta + \sin\theta) \quad (5.103)$$

Gerilimleri pozitif veya negatif yönde meydana gelen sapmaya göre uygulanacak olan küçük vektör tipi seçildikten sonra dengeleme durumuna göre modülasyon işlemi yukarıdaki tabloda gösterilen çevrim oranları dikkate alınarak uygulanır. Her modülasyon süresi boyunca dört koşul dikkate alınır.

Birinci, üçüncü ve dördüncü bölgeler sadece çevrim oranı potansiyel olarak negatif olduğunda aktive edilir. İkinci bölge diğer üç bölgenin aktif olmaması durumunda aktif edilir.

Doğru gerilim barası orta noktasındaki gerilim sapmasına göre güncellenen anahtarlama süreleri tablolarda verilen eşitliklere dayanarak sistem modellemesindeki yerlerine konur.

Anahtarlama sıralaması doğru gerilim barası orta noktasından akan akımın yönüne ve doğru gerilim barasının orta noktasındaki gerilim sapmasının pozitif veya negatif olma durumuna bağlı olarak Ek D'deki Çizelge D.1'deki gibi belirlenmiştir.



6. MODEL KURULUMU VE BENZETİM ÇALIŞMALARI

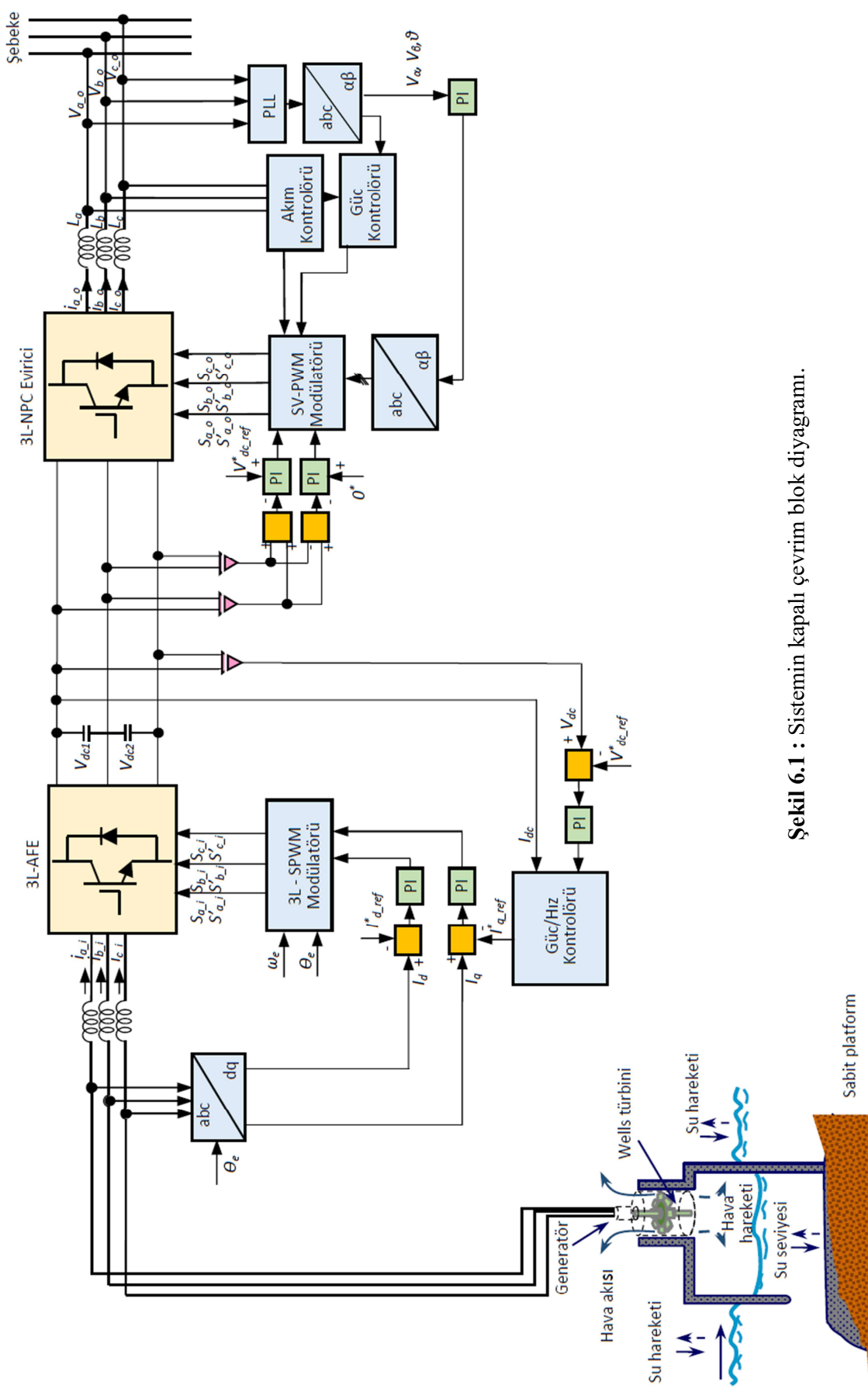
6.1 Model Kurulumu

Sistem modellemesi yapılırken ilk olarak analizi yapılan okyanus dalgasının MATLAB’de modellenmesi gerekir. Dalgadan elde edilecek güç ve gerilim değerlerine göre de doğrultucu ve evirici bloklarının modellenmesi gerekir. Aşağıdaki şekilde sistemin detaylandırılmadan gösterilmiş kapalı çevrim blok diyagramı verilmiştir.

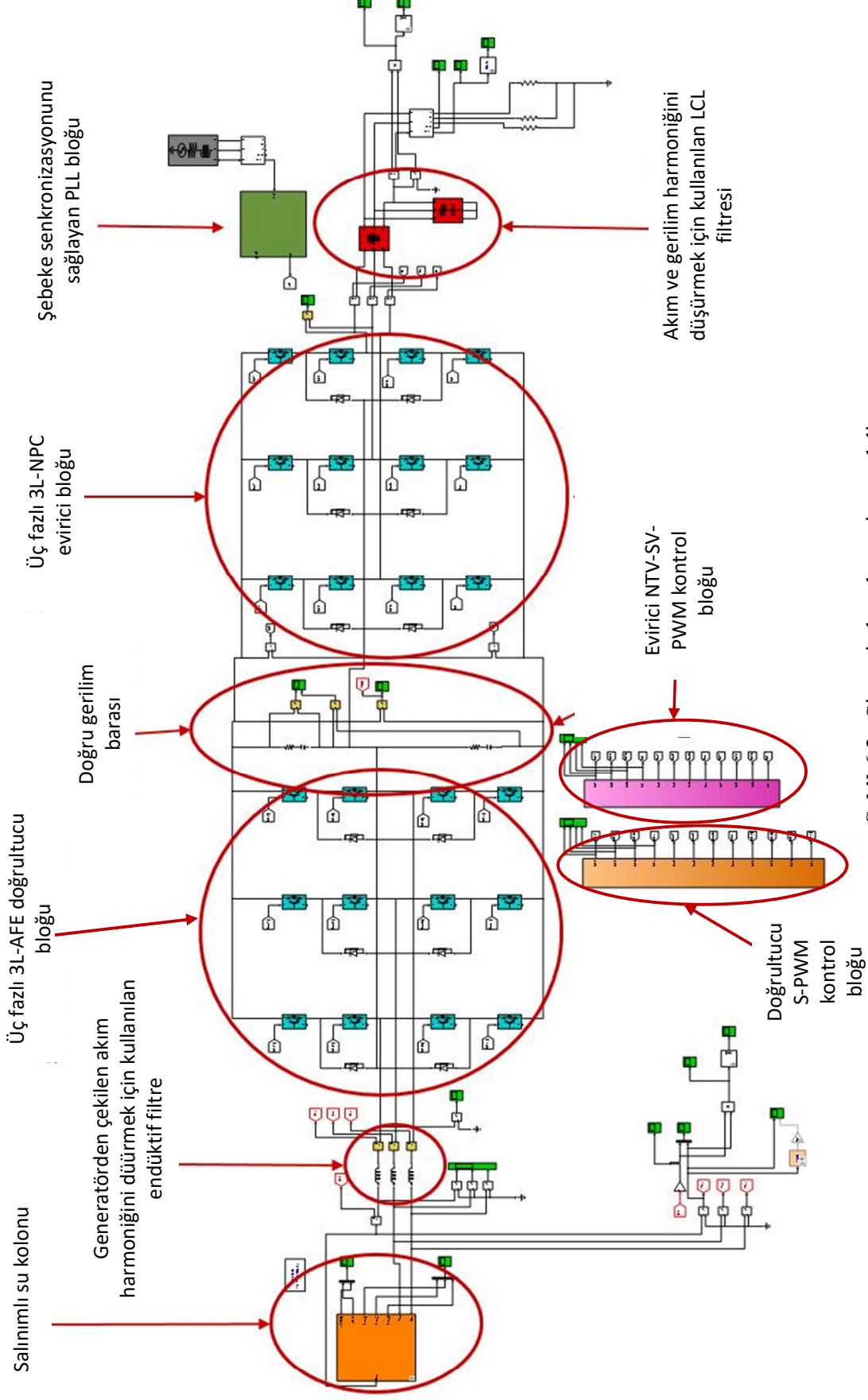
Sistemin MATLAB’deki benzetiminin genel olarak gösterilimi Şekil 6.2’de verilmiştir. Şekilde gösterildiği üzere sistemde üç ana temel kontrol bloğu yer almaktadır. Bunlardan ilki salınımlı su kolonu, Wells türbini ve senkron generatörün modellendiği ve kontrol edildiği salınımlı su kolonu modelidir. İkinci kontrol bloğunda ise üç seviyeli aktif doğrultucunun sinüsoidal darbe genlik modülasyonu ile kontrol edilmesi ve doğru gerilim barası orta noktasının kontrolü yer almaktadır. Son kontrol bloğunda ise üç fazlı üç seviyeli eviricinin en yakın üç vektör, uzay vektör modülasyonu ile kontrol edilmesi yer almaktadır.

Bu çalışmada sistem gerilim kaynağı olarak çalıştırıldığı için amaç giriş dalga genliği ve frekansı ne olursa olsun (belirlenen sistem çalışma aralığı içerisinde kalmak koşuluyla) yüke aktarılan çıkış geriliminin sürekli sabit tutulmasıdır.

Bu bölümde salınımlı su kolonu, üç seviyeli aktif doğrultucu ve üç seviyeli eviricinin ve kontrol bloklarının MATLAB’de nasıl oluşturulduğu verilecektir.



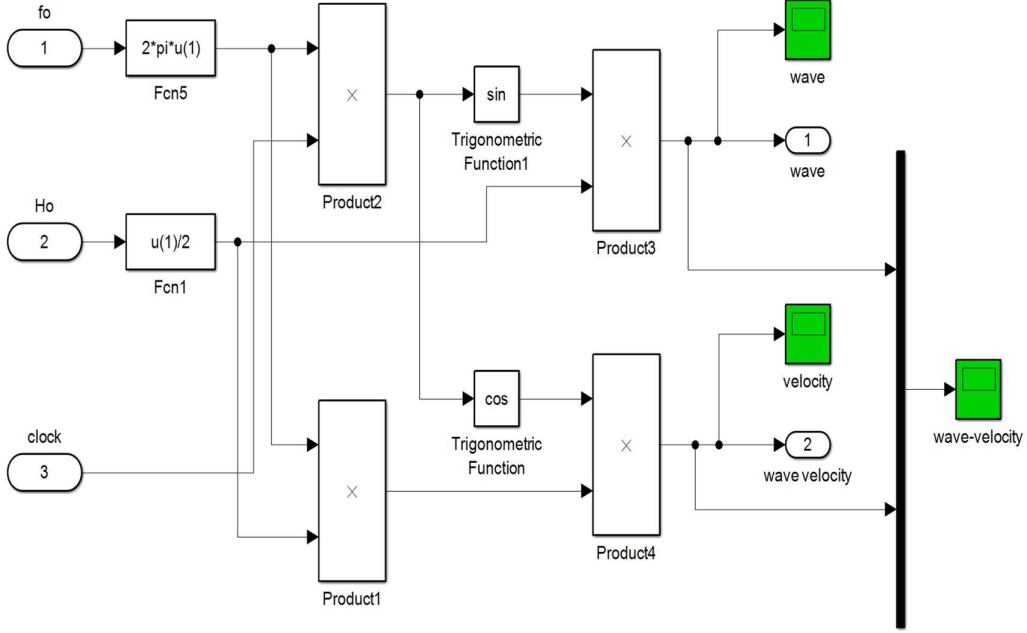
Şekil 6.1 : Sistemin kapalı çevrim blok diyagramı.



Şekil 6.2 : Sistemin kapalı çevrim modeli.

6.1.1 Düzenli dalgaların MATLAB’de modellenmesi

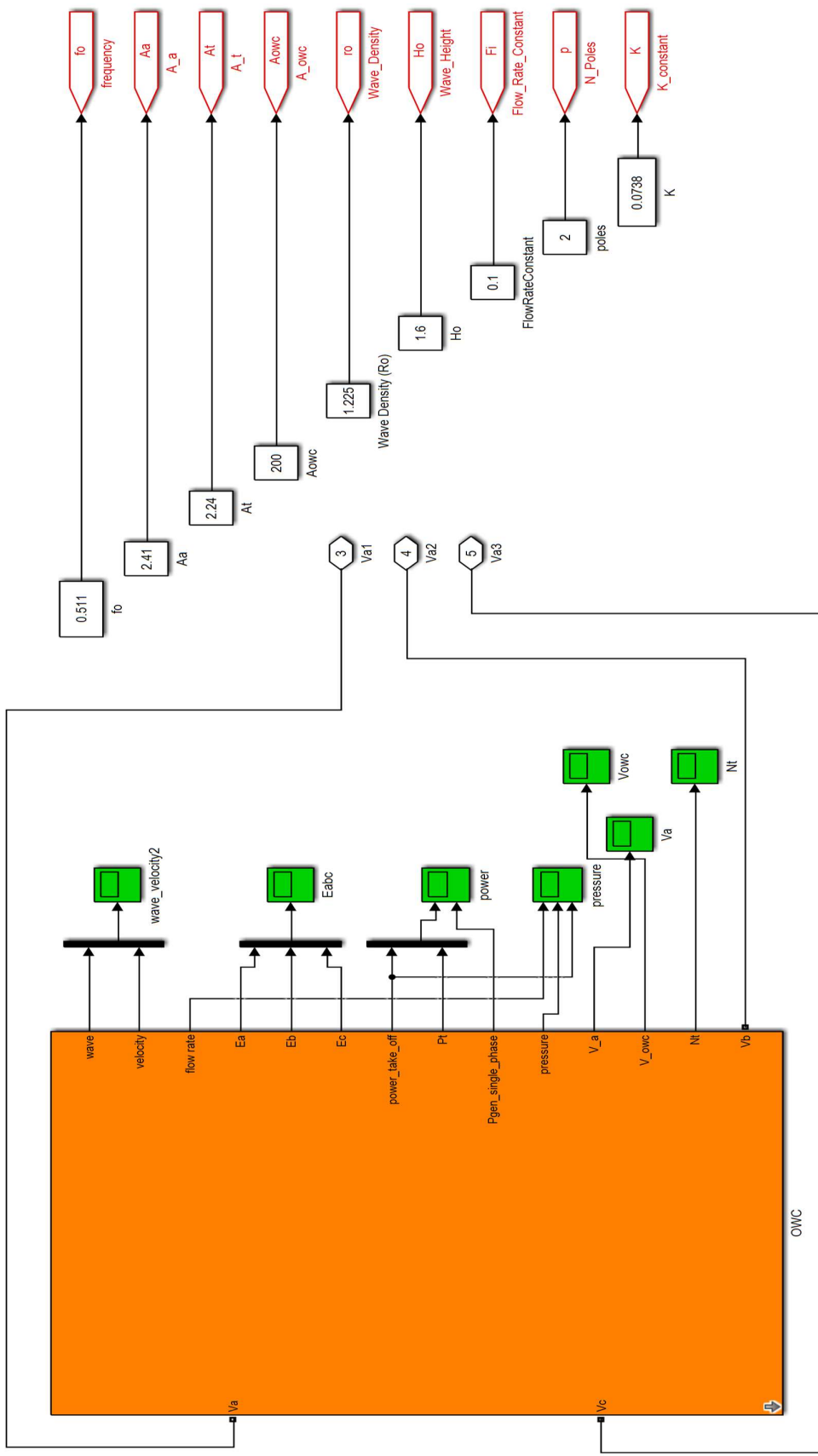
Bölüm 3.2 ve Bölüm 3.3’de yer alan orta dalgalar için verilen dalga karakteristikleri MATLAB programına aşağıdaki blok diyagram kullanarak uygulanmıştır. Şekilde salınlı su kolonu içerisinde hareket eden dalganın dikine hareketi ve hızı simüle edilmiştir.



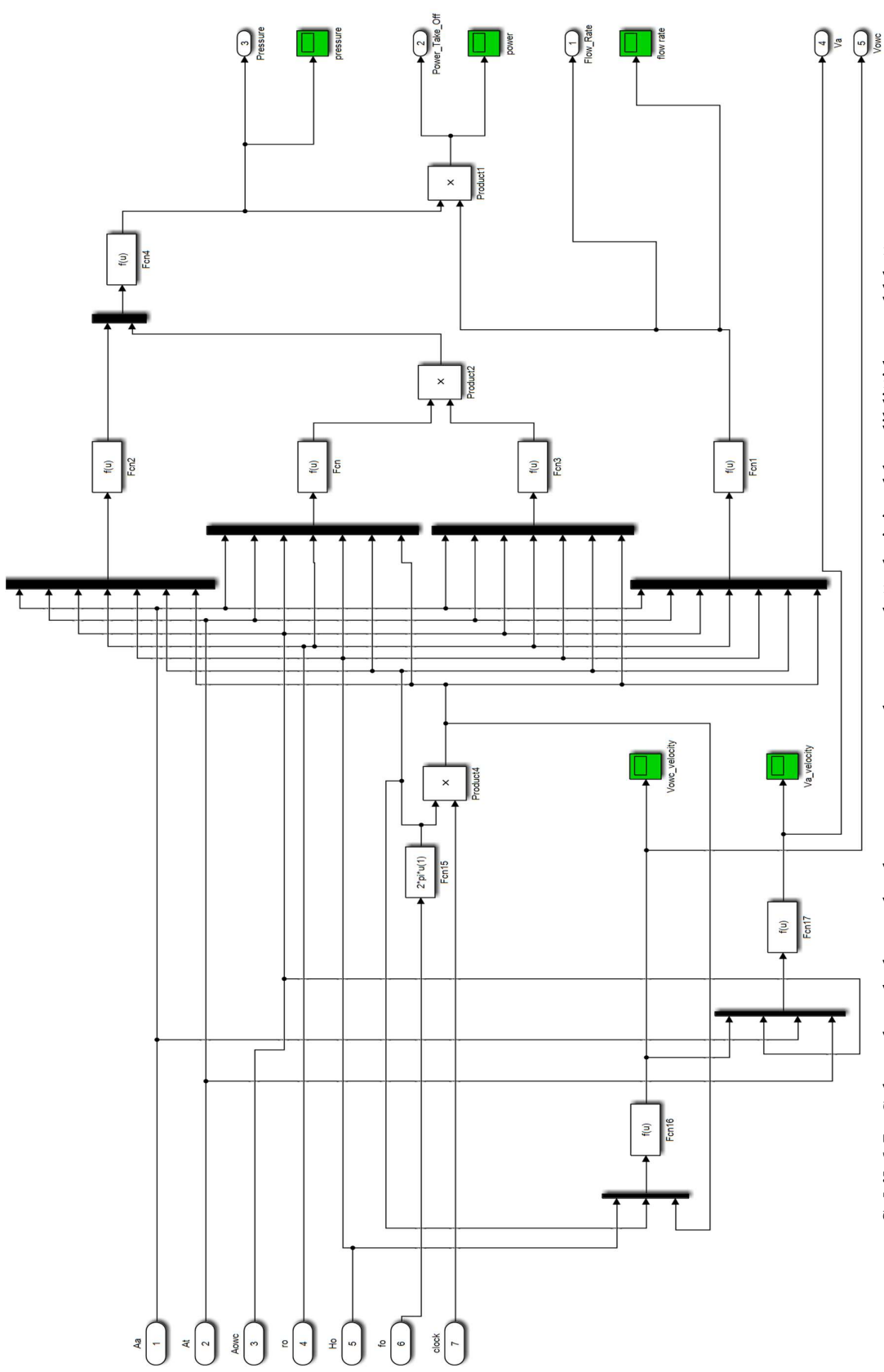
Şekil 6.3 : Dalga karakteristiğinin MATLAB’de oluşturulması.

6.1.2 Salınlı su kolonunun MATLAB’de modellenmesi

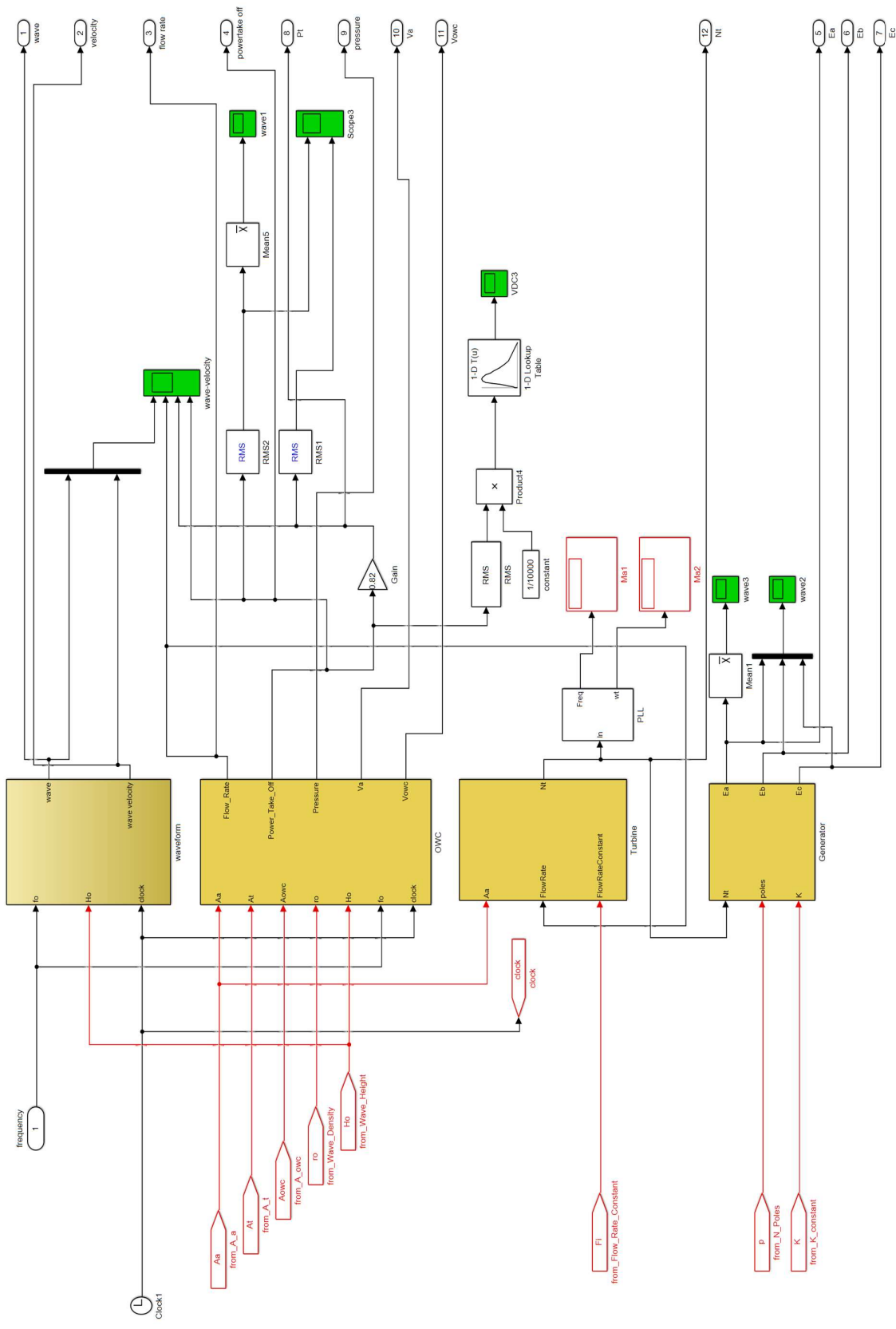
Şekil 6.4’te salınlı su kolonu ve salınlı su kolonunun çalıştırılmasında kullanılan kontrol ve büyüklük değerleri yer almaktadır. Bu büyüklükler salınlı su kolonunun çalıştırılması istenen nokta için optimize edilmiştir.



Şekil 6.4 : Salınlımlı su kolonu kontrol bloğu.



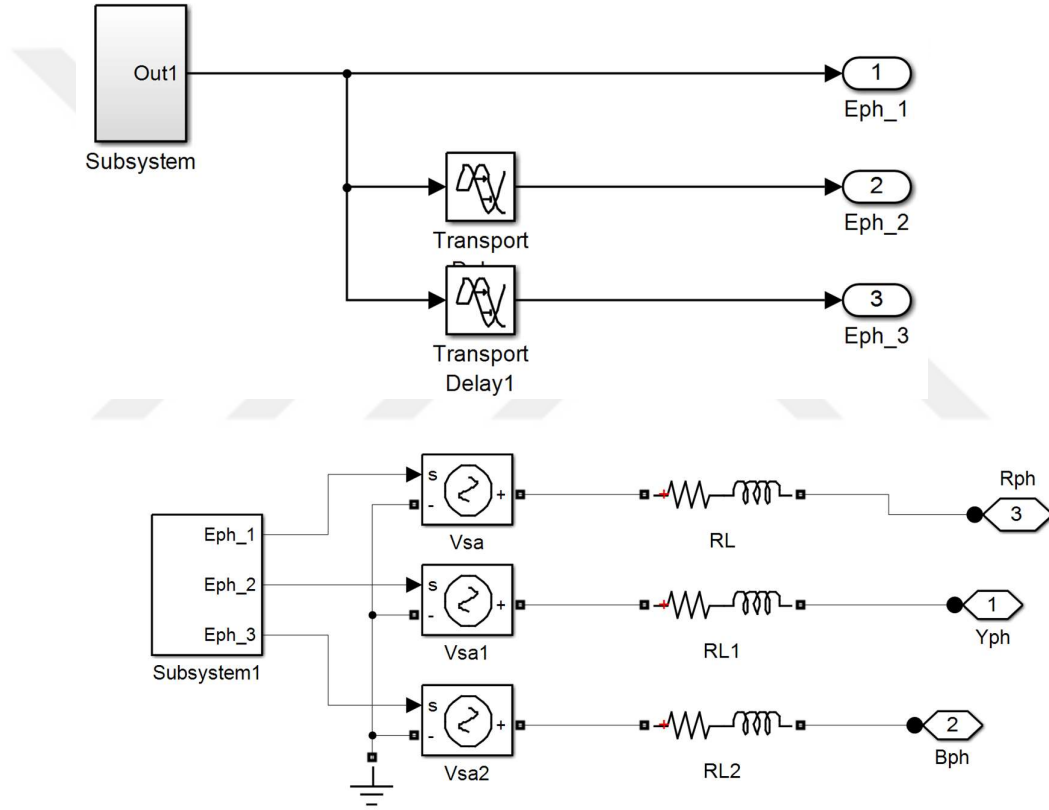
Şekil 6.5 : Salınlımlı su kolonundan basınç, güç ve akış oranı değerlerinin elde edildiği kontrol bloğu.



Şekil 6.6 : Wells türbini ve generatör bloklarının salımlı su kolonu çıkışına adapte edildikleri kontrol bloğu.

Şekil 6.5'te Bölüm 3'teki basınç, akış oranı ve güç eşitliklerinden faydalanılarak salınlımlı su kolonu çıkışından gelen dalga hareketine göre basınç, akış oranı ve güç değerlerinin nasıl elde edildiği gösterilmiştir.

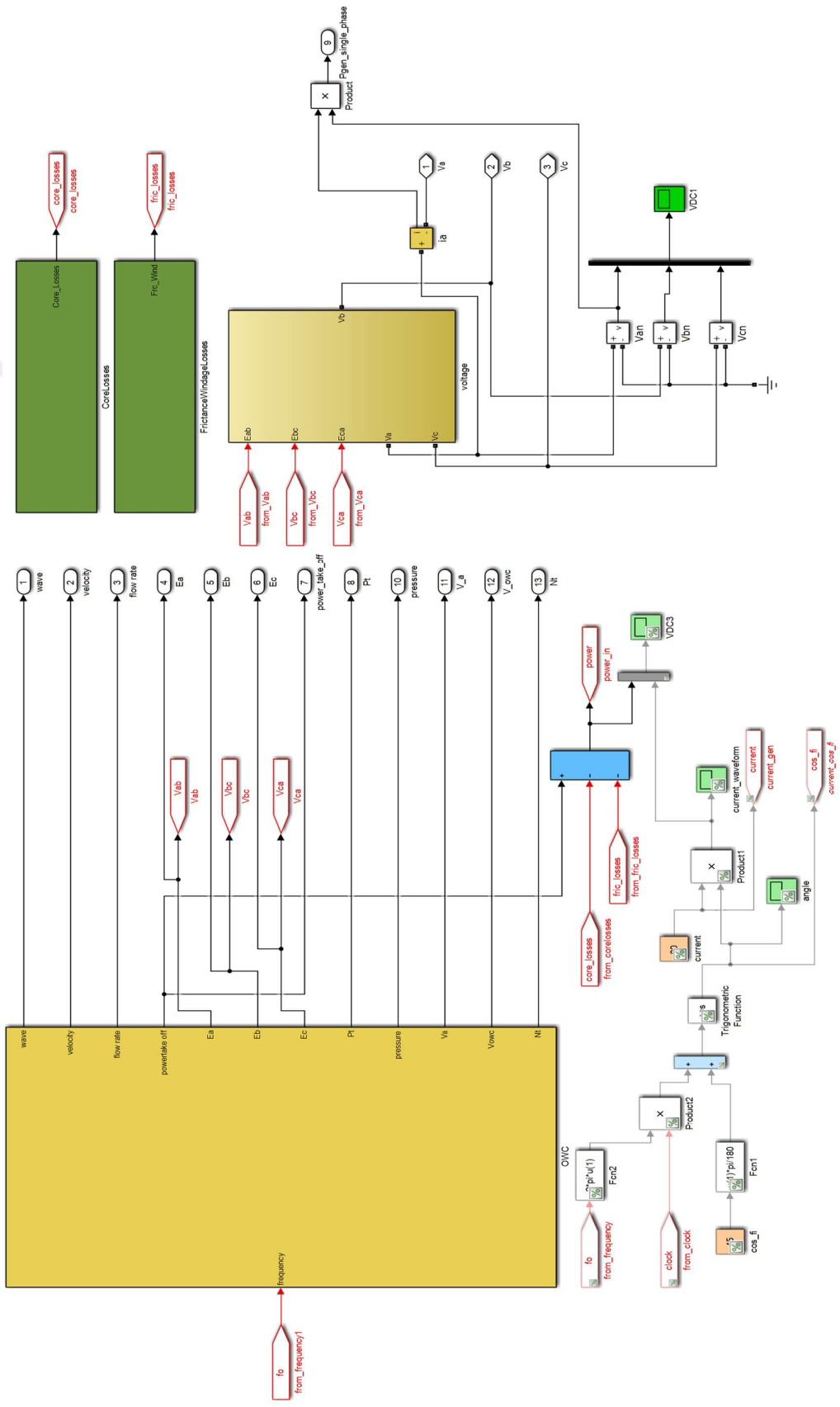
Şekil 6.6'da ise Wells türbini çıkışından elde edilen rotasyonel hız bilgisine göre generatöre endüklenen gerilim değerinin nasıl bulunduğu gösterilmiştir.



Şekil 6.7 : Generatör eşdeğer devresinin modellenmesi.

Generatöre ait üç faz gerilim bilgisinin elde edilmesi ve generatör eşdeğer devre modeli Şekil 6.7'de verilmiştir.

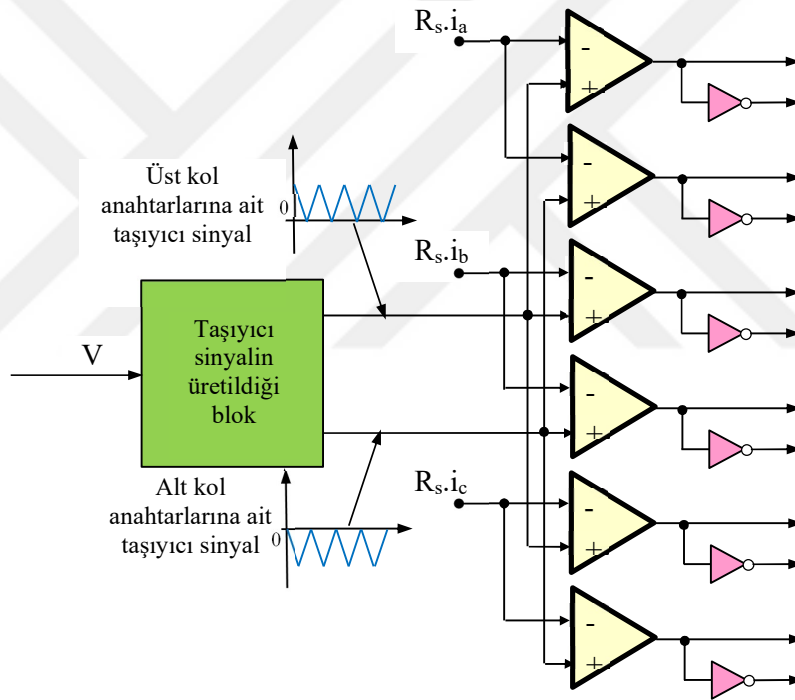
Şekil 6.8'de generatör rüzgar, sürtünme, nüve ve sargı kayıp değerlerinin simülasyon bloğuna eklenerek generatör çıkış uç gerilim bilgisi elde edilmektedir. Buradan elde edilen gerilim dalga şekli Şekil 6.10'daki doğrultucu alternatif akım giriş terminallerine iletilmektedir.



Şekil 6.8 : Generator kayıplarının ilave edildiği ve generatör uç gerilimlerinin elde edildiği kontrol bloğu.

6.1.3 Üç seviyeli aktif doğrultucu (3L-AFE) ve S-PWM kontrol metodunun MATLAB’de modellenmesi

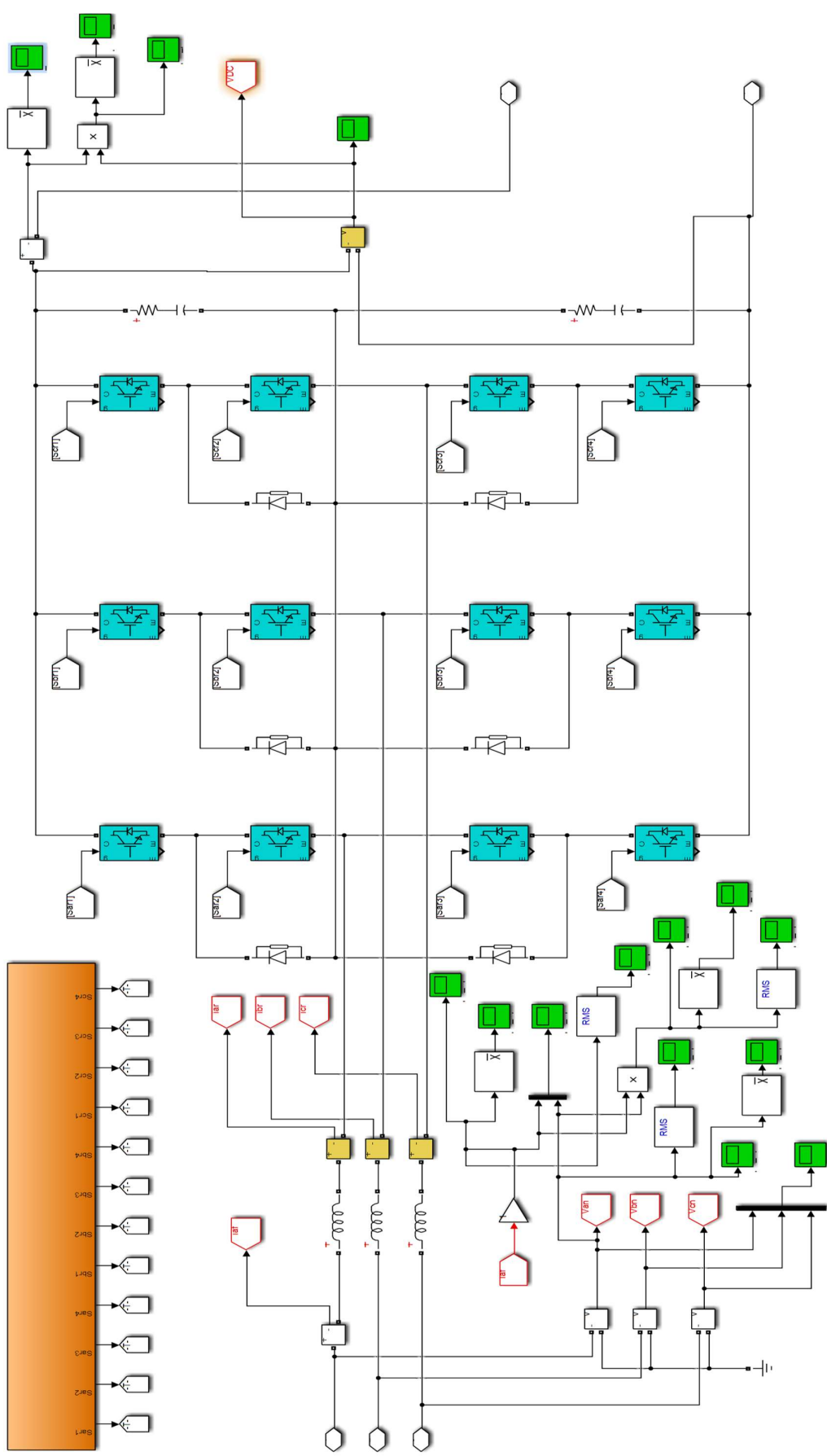
Bölüm 4’te anlatıldığı üzere bu çalışmada üç seviyeli aktif doğrultucunun kontrolünde sinüsoidal darbe genlik modülasyonu kontrol metodu kullanılmıştır. Sinüsoidal PWM tekniğinde; ilk taşıyıcı sinyalin komşu taşıyıcı sinyale göre 180° kaydırılması veya alt ve üst taşıyıcı sinyallerin birbirlerine göre 180° kaydırılması ya da bütün taşıyıcı sinyallerin aynı fazda olması gibi modülasyon teknikleri mevcuttur. Bu çalışmada taşıyıcı sinyaller birbirleriyle aynı fazdadır. Yarı iletken anahtarların kapı sürme sinyalleri Şekil 6.9’da görüldüğü şekilde ayarlanmıştır.



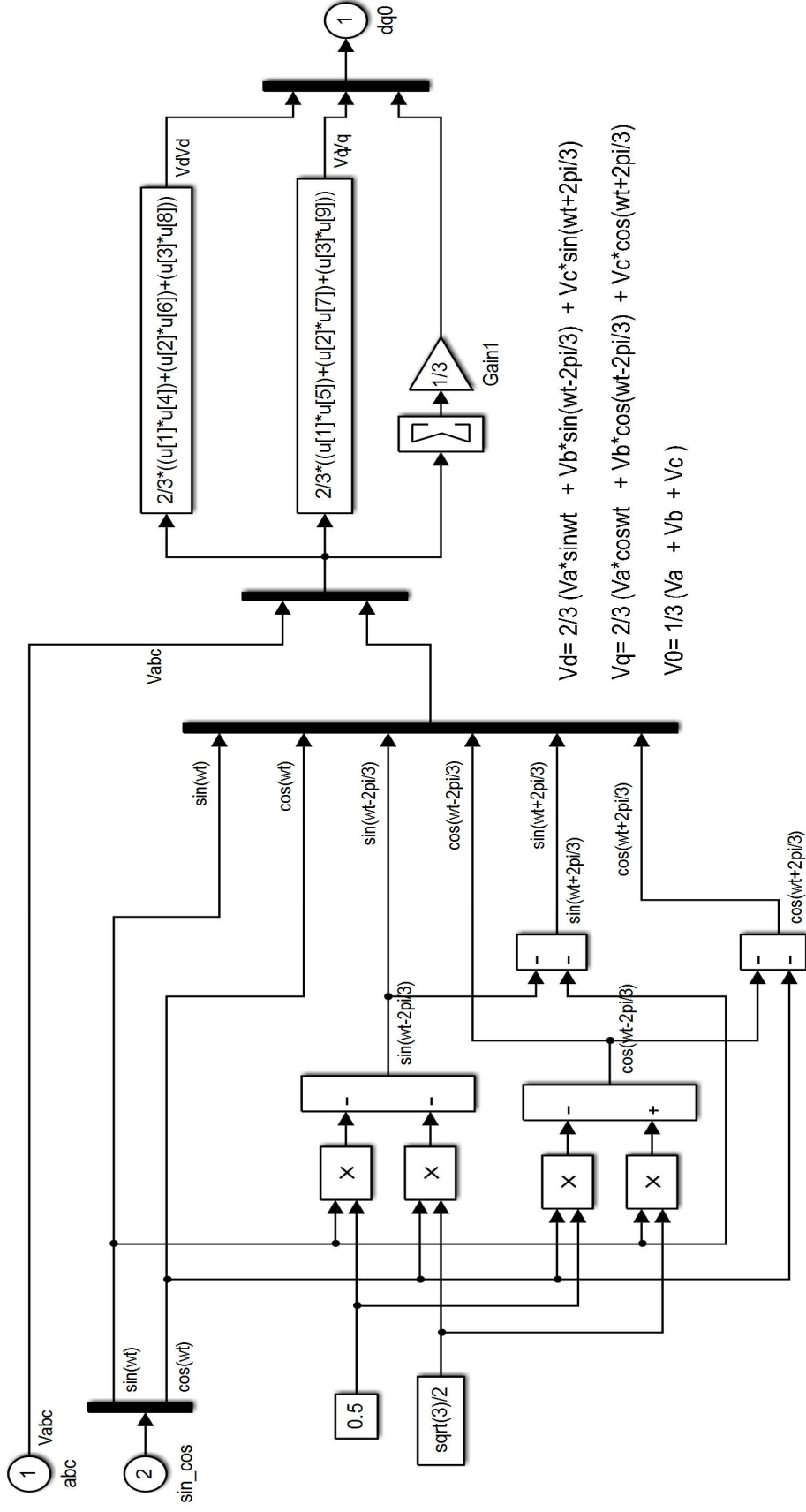
Şekil 6.9 : SPWM modülatörü.

Şekil 6.10’da üç seviyeli aktif doğrultucu ve Şekil 6.11’de de doğrultucuya ait ana kontrol bloğu görülmektedir. Doğrultucu orta noktasının dengede tutulması bu blokta gerçekleştirilmiştir.

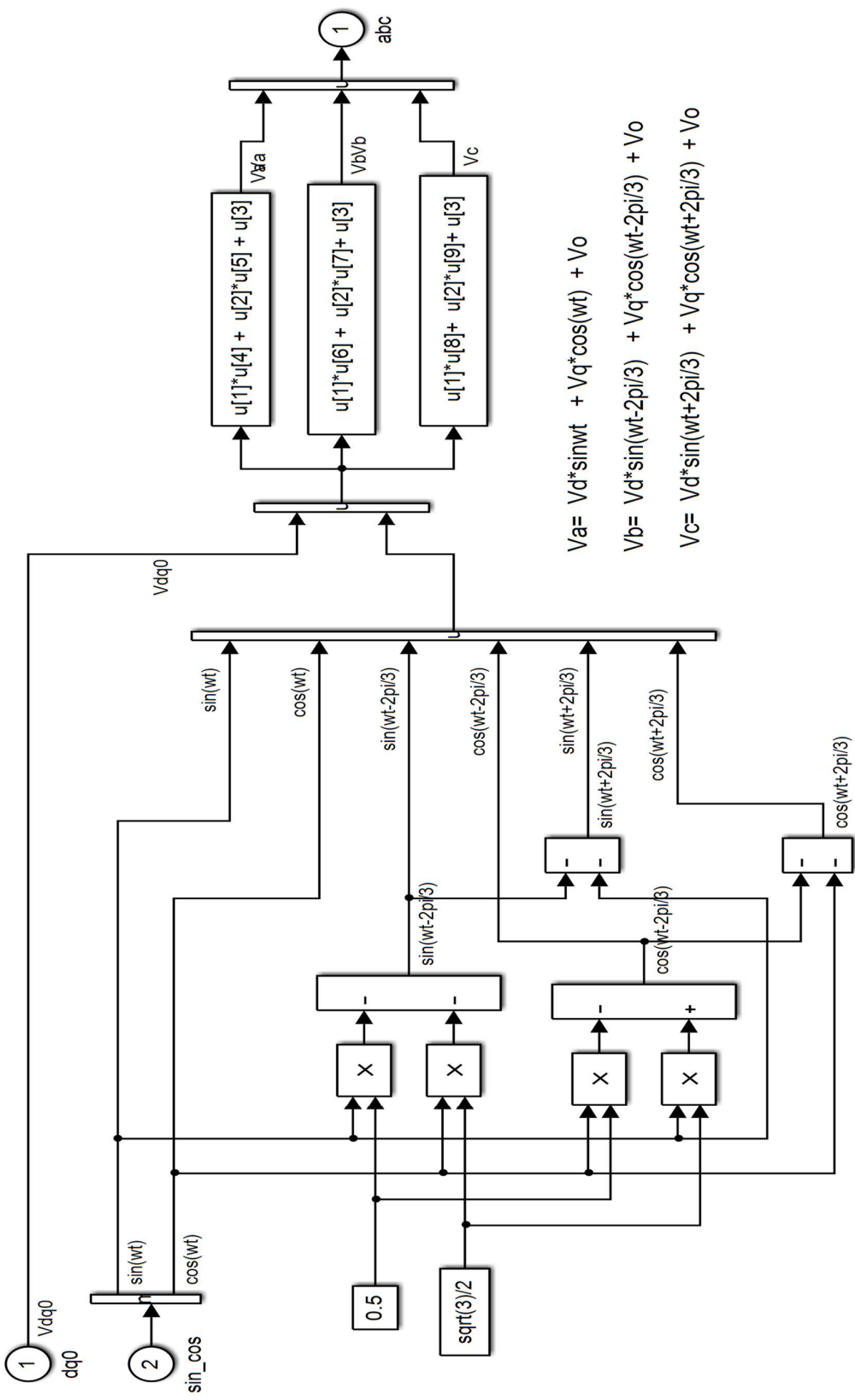
Generatör çıkışından alınan akım ve gerilim bilgilerine ait $abc \rightarrow dq$ ve $dq \rightarrow abc$ dönüşüm blokları sırasıyla Şekil 6.12 ve Şekil 6.13’te verilmiştir.



Şekil 6.10 : S-PWM metodu ile kontrol edilen 3L-AFE'nin MATLAB kontrol bloğu.

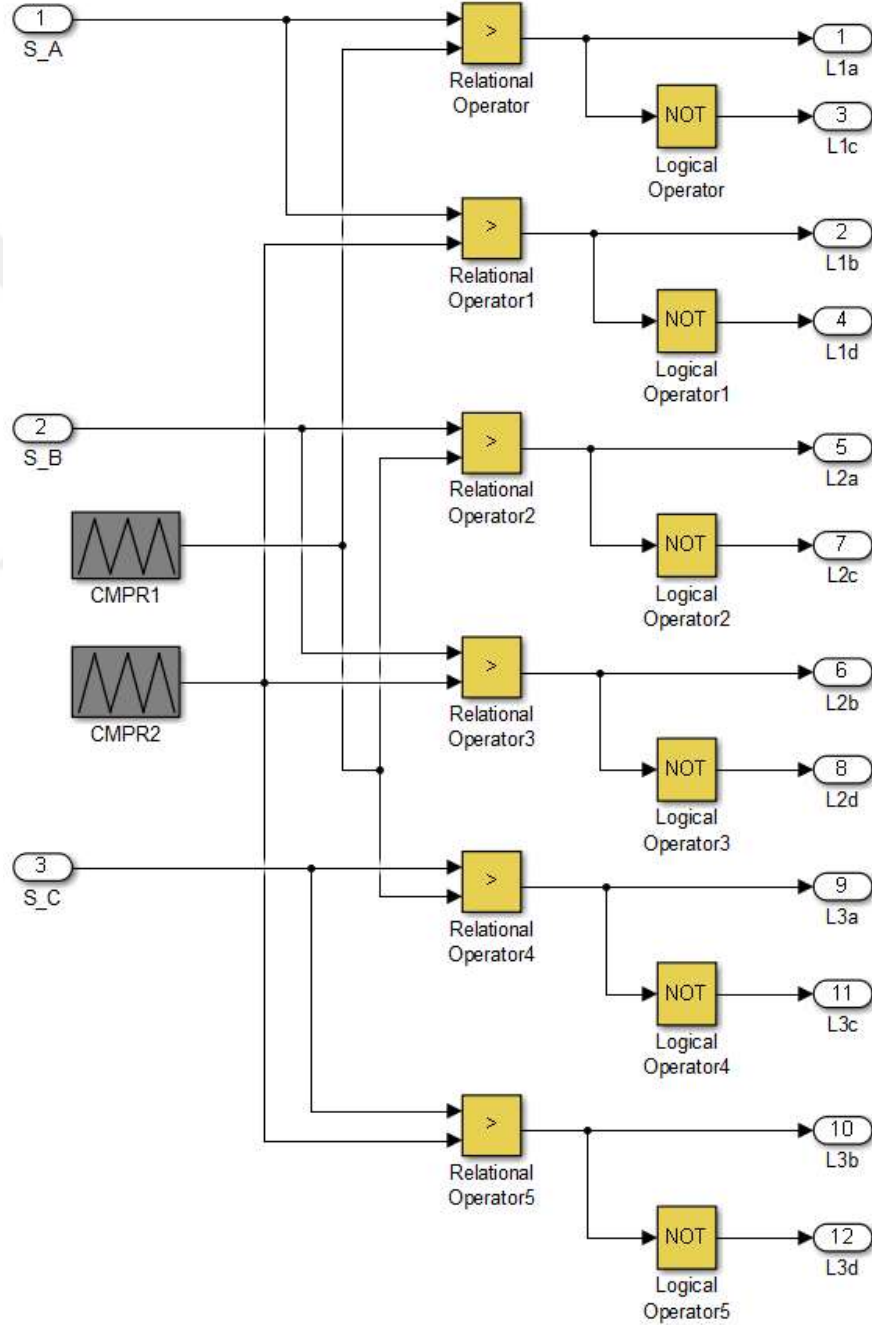


Şekil 6.12 : abc $\rightarrow$ dq dönüşümü



Şekil 6.13 : dq → abc dönüşümü.

Şekil 6.14'te sinüzoidal gerilim referans sinyalinin taşıyıcı sinyallerle karşılaştırılmasıyla oluşturulan sürme sinyallerine ait kontrol bloğu verilmiştir. Burada $L1_{a,b,c,d}$ a fazına ait sürme sinyallerini, $L2_{a,b,c,d}$ ve $L3_{a,b,c,d}$ de sırasıyla b ve c fazlarına ait sürme sinyallerini göstermektedir.

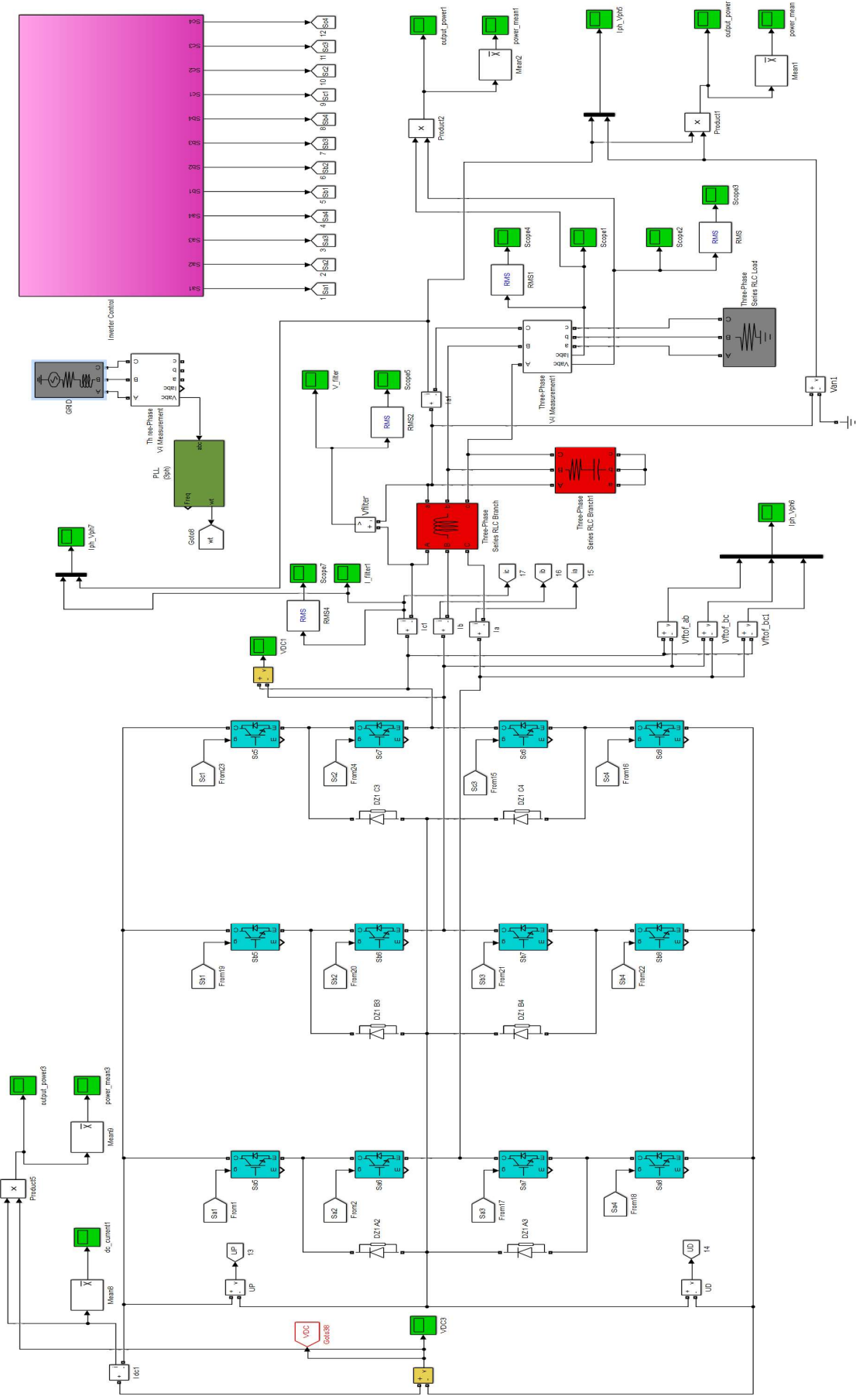


Şekil 6.14 : Doğrultucu anahtarlama sinyallerinin oluşturulması.

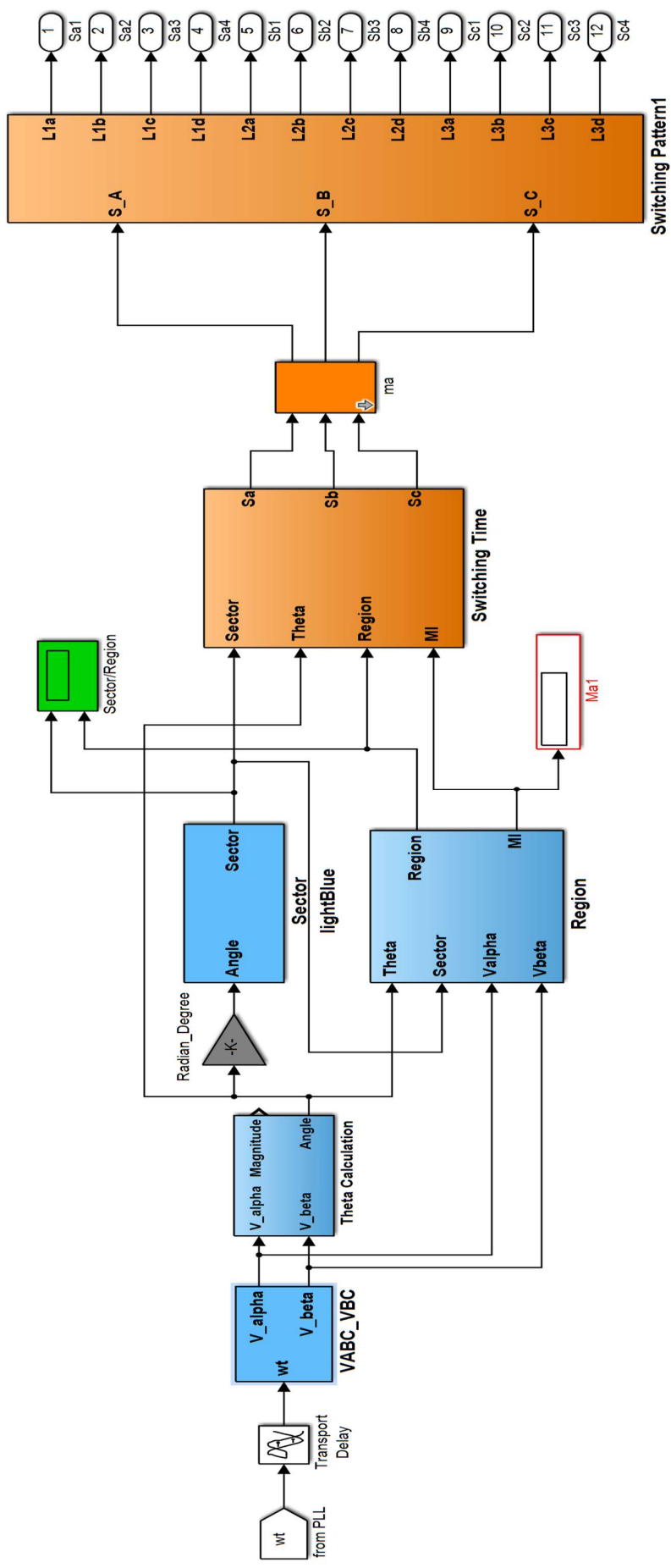
6.1.4 Üç seviyeli evirici (3L-NPC) ve NTV-SV-PWM kontrol metodunun MATLAB’de modellenmesi

Şekil 6.15’te üç seviyeli eviriciye ait ana kontrol bloğu ve Şekil 6.16’da ise eviricinin en yakın üç vektör, uzay vektör modülasyonu yöntemi ile kontrolünün uygulanmasında kullanılan evirici kontrol bloğu yer almaktadır.

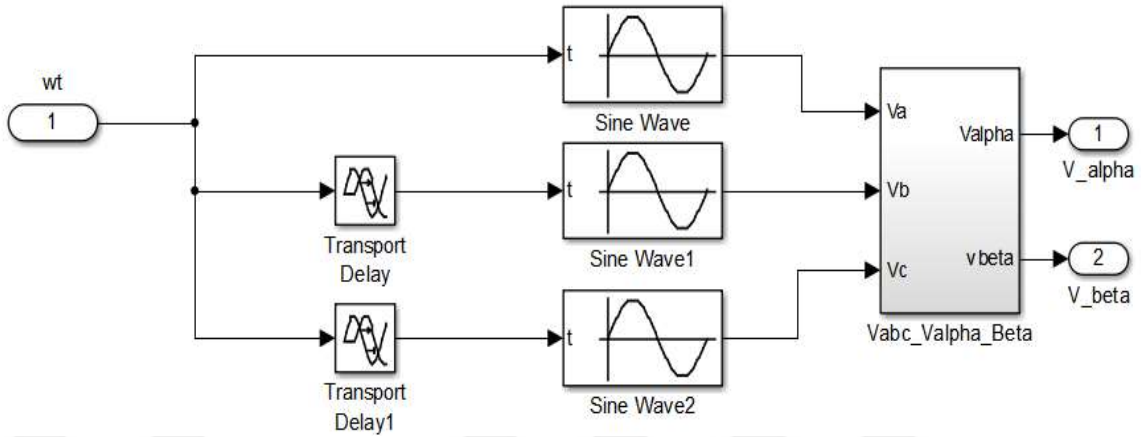
Referans vektörün genlik ve açı değerlerinin elde edilebilmesi için şebekeden geri besleme sinyalinin alınması gerekir. Şekil 6.17’de şebeke geriliminden alınan geri besleme sinyali gösterilmiştir. Referans sinyaline ait α ve β açılarının elde edildiği kontrol bloğu ise Şekil 6.18’de verilmiştir.



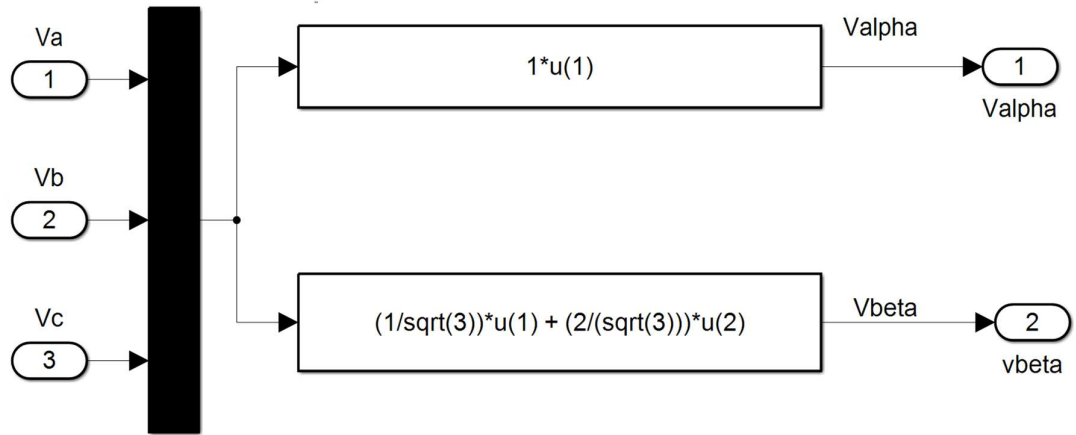
Şekil 6.15 : NTV-SV-PWM metodu ile kontrol edilen 3L-NPC'nin MATLAB kontrol bloğu.



Şekil 6.16 : Üç seviyeli evirici kontrol bloğu.

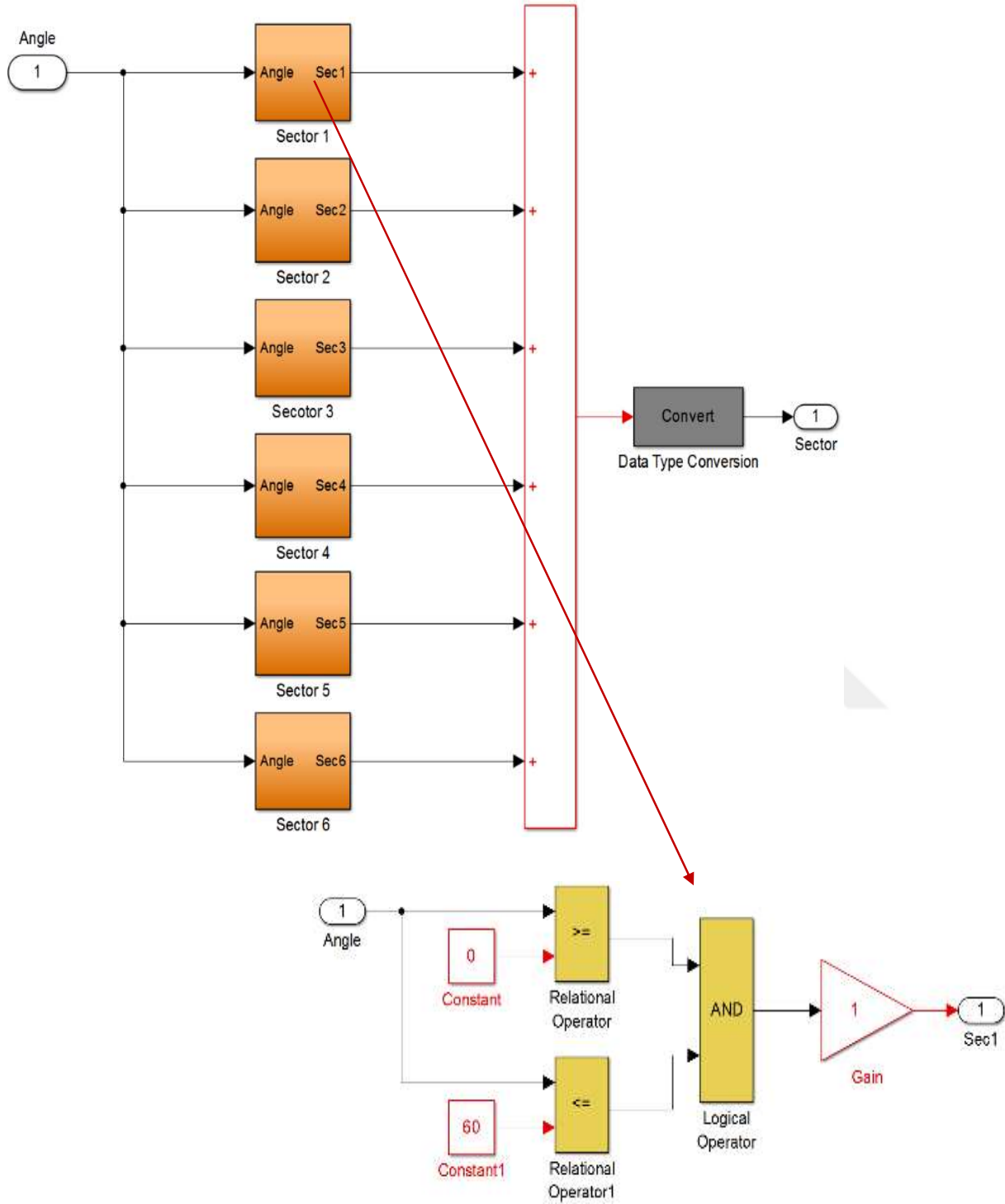


Şekil 6.17 : Şebeke geriliminin PLL bloğu ile ölçülmesi.



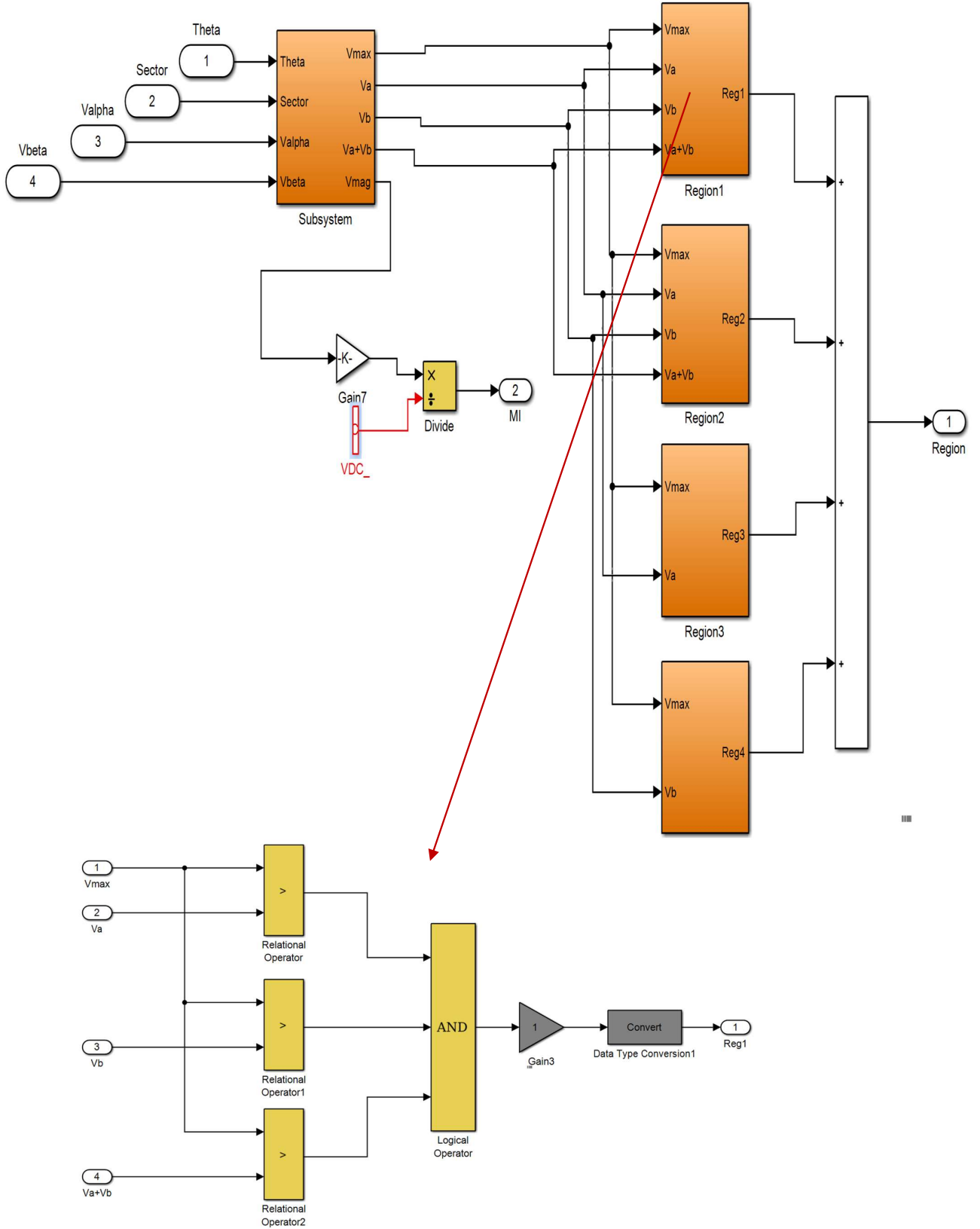
Şekil 6.18 : α ve β açılarının bulunması.

Şekil 6.19'daki kontrol bloğu şebeke sinyalinin geri besleme sinyalinin elde edilen açı bilgisine göre referans geriliminin hangi sektörde olduğunu belirlemektedir. Şekil 6.20'deki kontrol bloğu ile oluşturulan koşul bilgisine göre referans vektörün hangi bölgede olduğu bulunur.

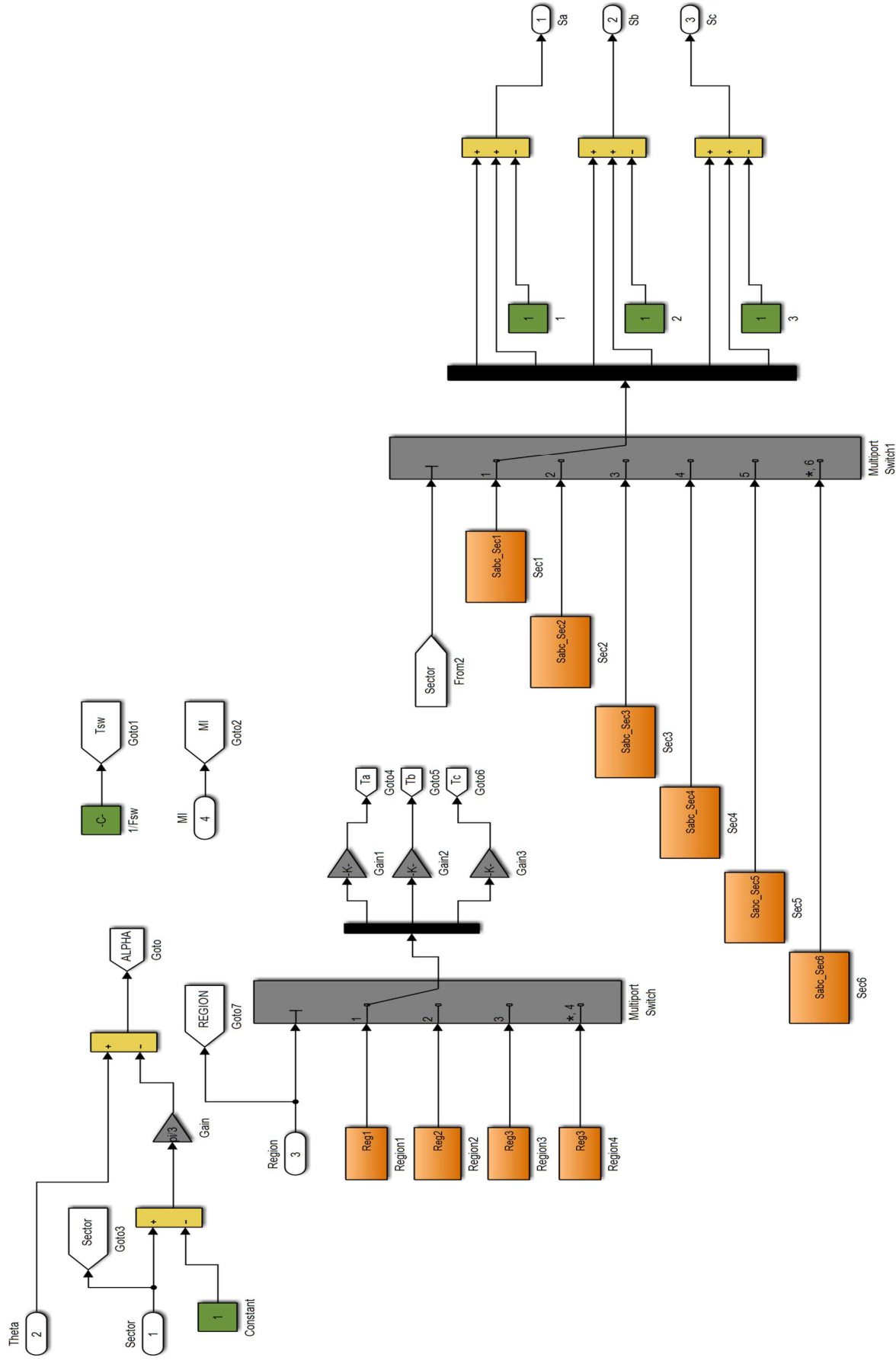


Şekil 6.19 : Referans vektörün bulunduğu sektör bilgisinin elde edilmesi.

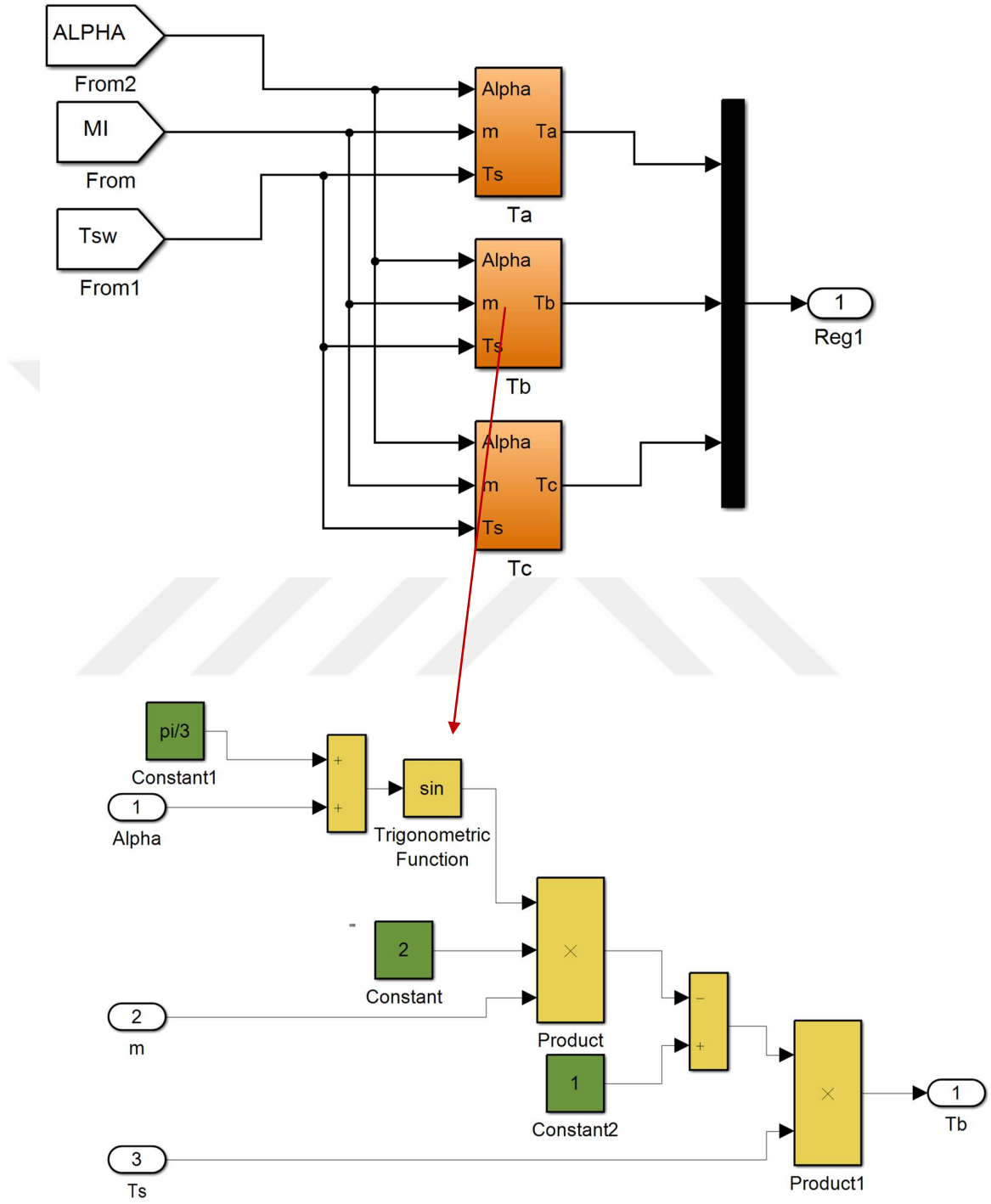
Şekil 6.21 ve Şekil 6.22’de her üç vektöre ait anahtarlama sürelerinin MATLAB’de nasıl bulunduğu gösterilmiştir. Anahtarlama süreleri belirlendikten sonra, Şekil 6.23’te gösterildiği üzere anahtarlama kayıplarını minimumda tutacak şekilde vektörlerin anahtarlama sıralaması belirlenmiştir.



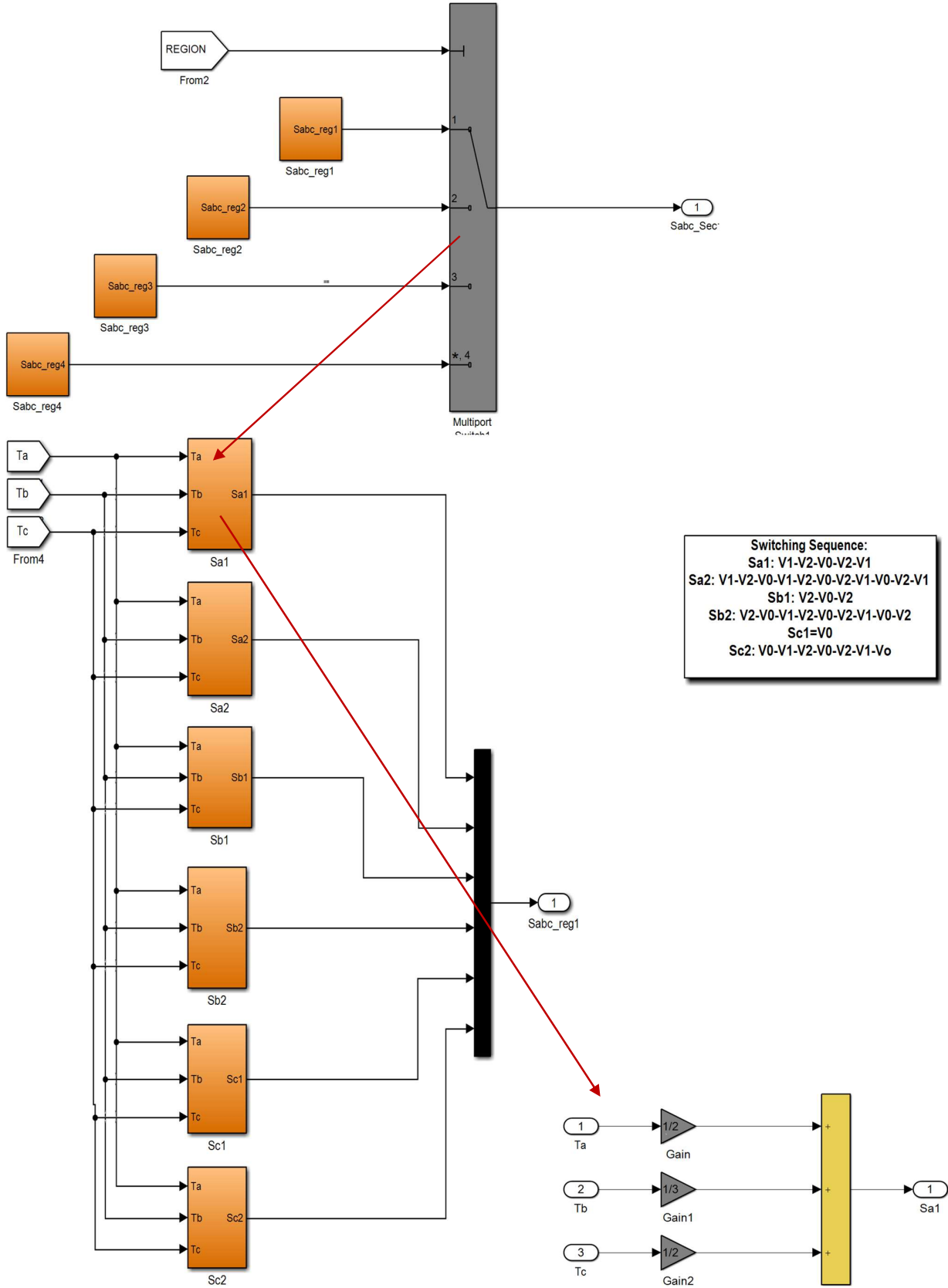
Şekil 6.20 : Referans vektörün bulunduğu bölge bilgisinin elde edilmesi.



Şekil 6.21 : Vektörlerin anahtarlama sürelerinin hesaplanması - 1.



Şekil 6.22 : Vektörlerin anahtarlama sürelerinin hesaplanması - 2.

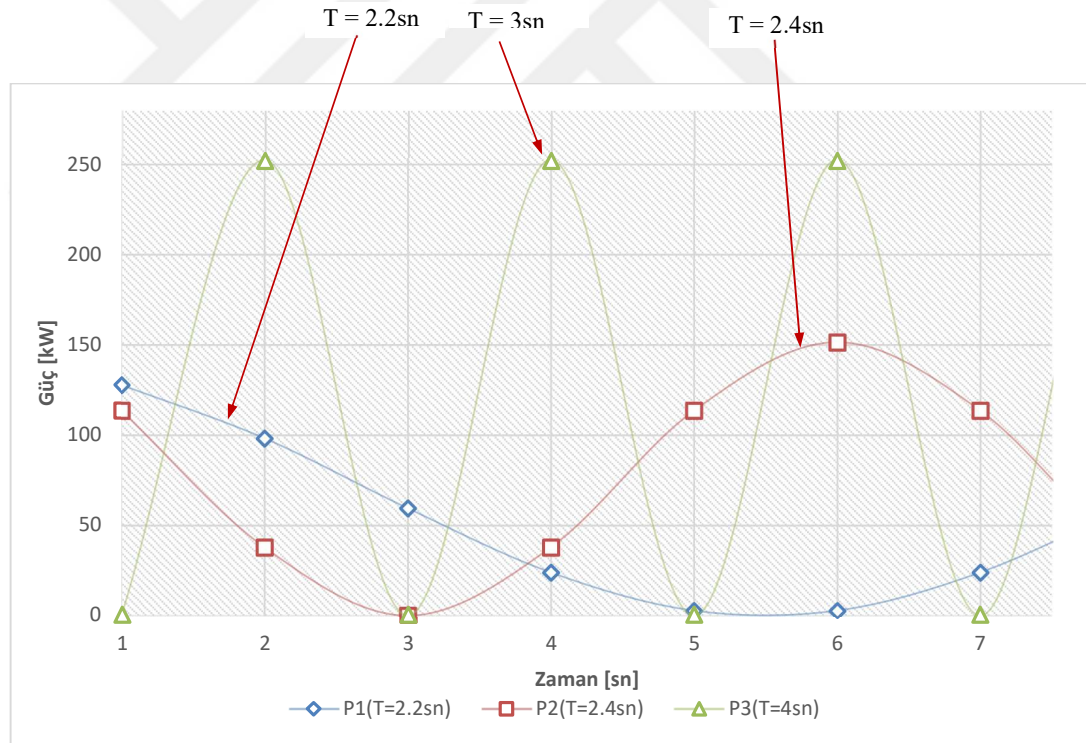


Şekil 6.23 : Vektörlerin anahtarlama sıralamasının belirlenmesi.

6.2 Benzetim Sonuçları

6.2.1 Dalga karakteristiklerinin ve wells türbinine aktarılan gücün farklı parametrelere göre değişiminin analiz edilmesi

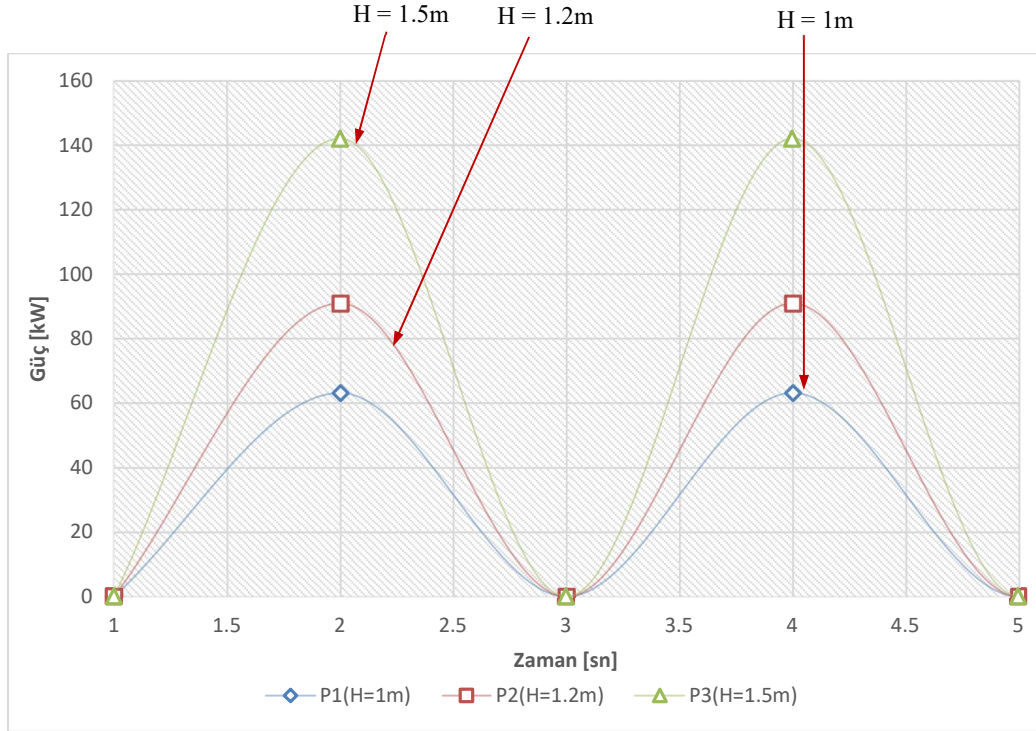
Dalga hareketinin analiz edilebilmesi için farklı dalga periyodu ve farklı dalga genliklerindeki dalgalarda meydana gelen anlık güç değişimleri incelenmiştir. Şekil 6.24'teki sonuçlarda aynı dalga genliğine ancak farklı dalga periyotlarına sahip dalgaların meydana getirdiği güç değerleri gösterilmiştir. Şekilde P1, P2 ve P3 ile gösterilen güç değerleri sırasıyla dalga periyotlarının 2.2sn, 2.4sn ve 8sn olan dalgalar için verilmiştir. Güç değerlerinin tamamı dalga yüksekliğinin 2m olduğu durum için hesaplanmıştır. Hesaplamalarda dalga genliği sabit tutulmuştur. Burada verilen değerler salınlımlı su kolonunun girişindeki dalgada meydana gelen anlık güç değişimlerini göstermektedir.



Şekil 6.24 : Farklı dalga periyotlarına bağlı gelen dalgada meydana gelen anlık güç değişimi.

Şekilde görüldüğü üzere dalga periyodunun azalmasıyla dalgada meydana gelen anlık güç değerinin genliği de azalmaktadır.

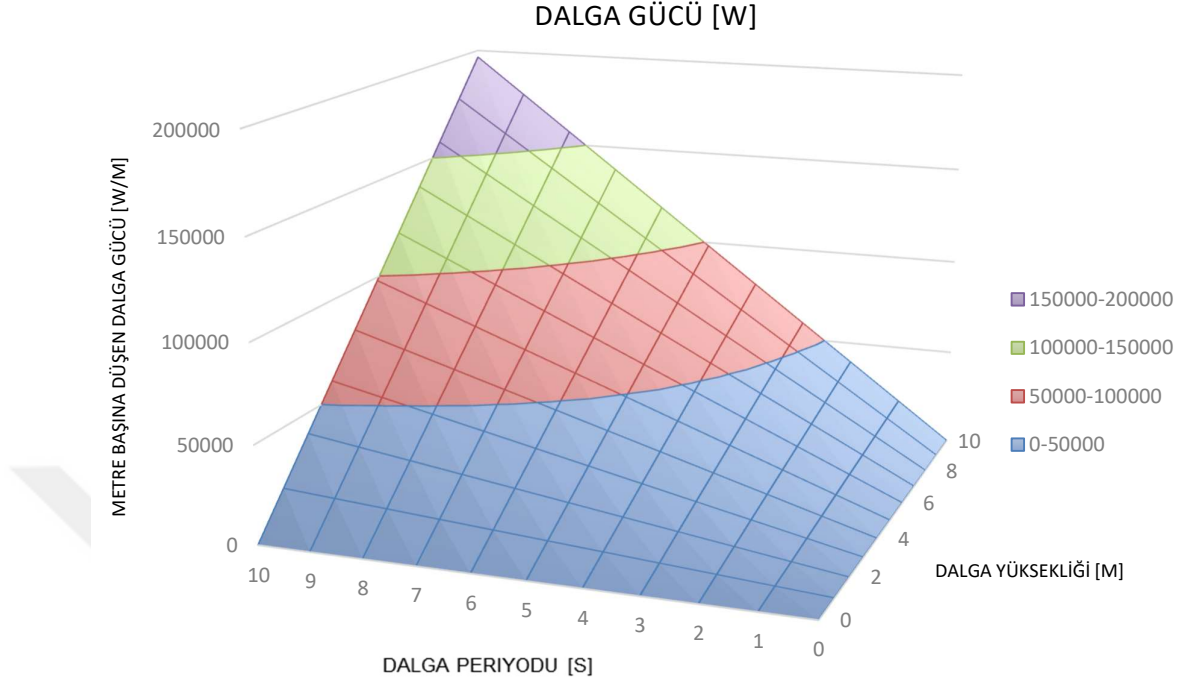
Bir sonraki hesaplamada güç değerinin dalga yüksekliğine bağlı olarak değişimini incelemek için dalga periyodu sabit tutulup dalga yüksekliği değiştirilmiştir. Şekil 6.25'te dalga yükseklikleri sırasıyla 1m, 1.2m ve 1.5m olarak alınmıştır. Şekilde görüldüğü üzere dalga yüksekliğinin artmasıyla dalgada meydana gelen gücün genliği de artmaktadır.



Şekil 6.25: Farklı dalga genliklerine bağlı olarak gelen dalgada meydana gelen anlık güç değişimi.

Şekil 6.26'da ise metre başına düşen dalga gücünün dalga periyoduna ve dalga yüksekliğine bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.

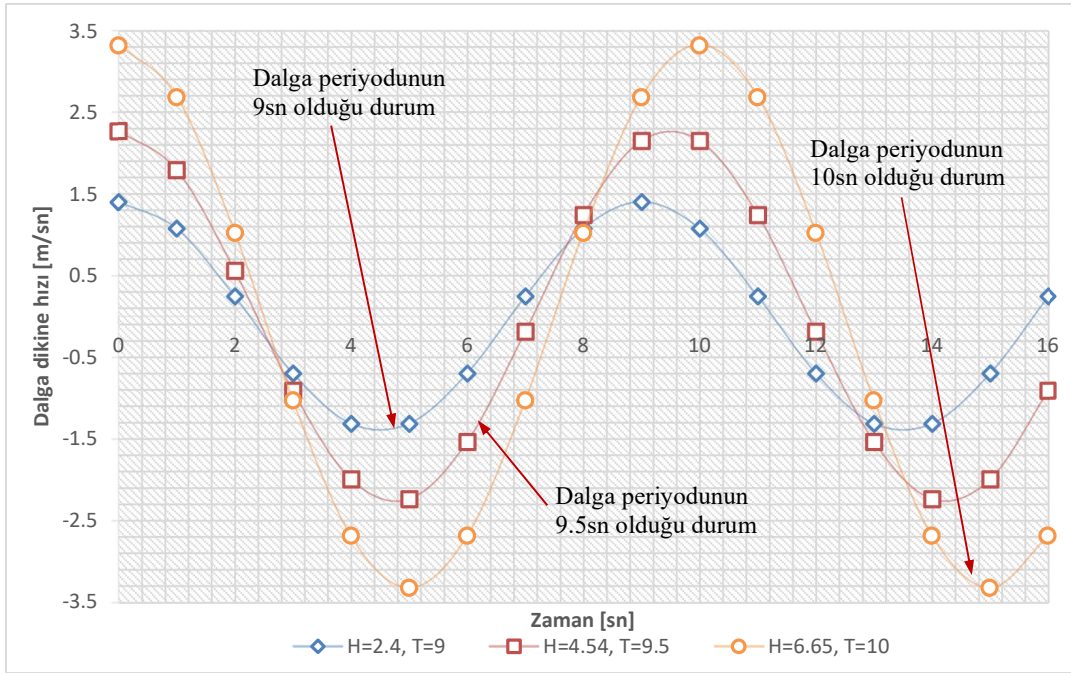
Bölüm 3'te anlatıldığı üzere salınlımlı su kolonu içerisinde hareket eden dalga su kolonu dışında hareket eden dalgaya göre farklı frekans ve dalga genliğinde hareket eder. Bunun nedeni su kolonu içerisindeki suyun zeminden yüksekliğinin dışarıdaki su seviyesine göre düşük olması ve su kolonu içerisindeki duvarlarda ve su yatağında sürtünme ve yansılardan dolayı kayıpların meydana gelmesidir.



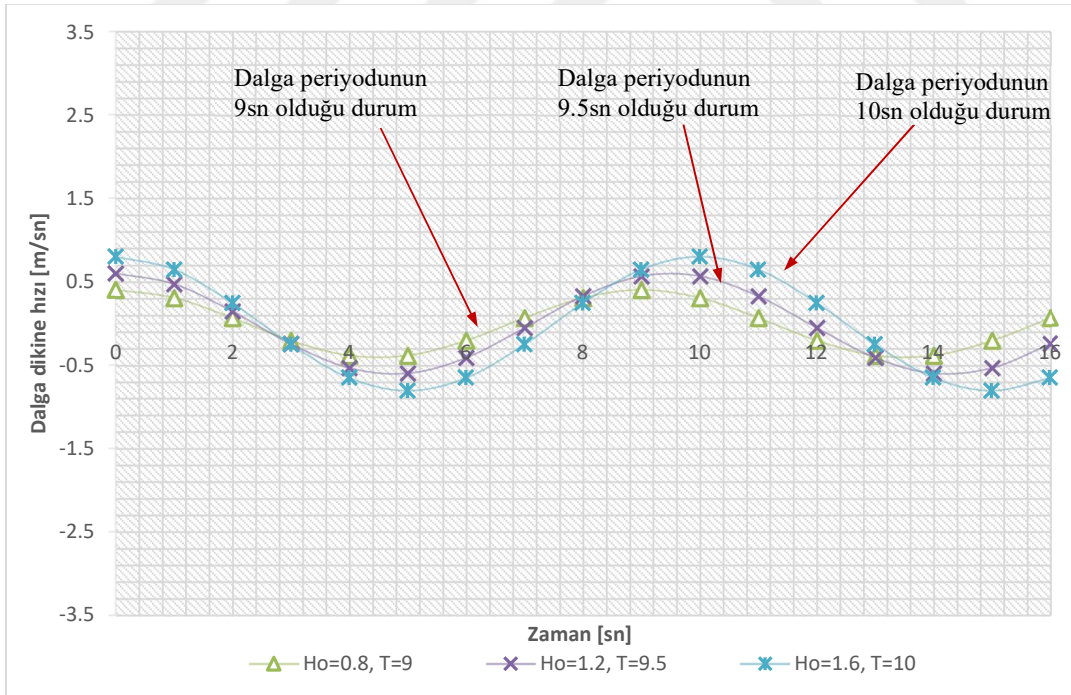
Şekil 6.26 : Ortalama dalga gücünün dalga periyodu ve dalga yüksekliğine bağlı olarak değişimi.

Aşağıdaki şekilde, Şekil 6.27, salınlımlı su kolonuna gelen dalga ile su kolonu içerisinde hareket eden dalganın zamana bağlı değişimleri verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere su kolonu içerisinde hareket eden dalganın yüksekliği gelen dalgaya göre zayıflamaktadır. Gelen dalganın yüksekliği ve süresi ne kadar büyükse su kolonu içerisinde hareket eden dalganın zayıflaması da o derece kuvvetli olmaktadır. Ancak gelen dalga ile su kolonu içerisinde hareket eden dalga arasındaki faz farkı aynı kalmaktadır.

Şekil 6.27'deki su kolonuna gelen (Şekil 6.27 (a)) ve su kolonu içerisinde hareket eden (Şekil 6.27 (b)) dalgalardan elde edilen anlık güç değişimleri Şekil 6.28'de gösterilmektedir. Şekil 6.28 (a)'da su kolonuna gelen dalgalarda meydana gelen güç değerleri, Şekil 6.28 (b)'de su kolonu içerisindeki dalgalarda meydana gelen güç değerleri verilmektedir.

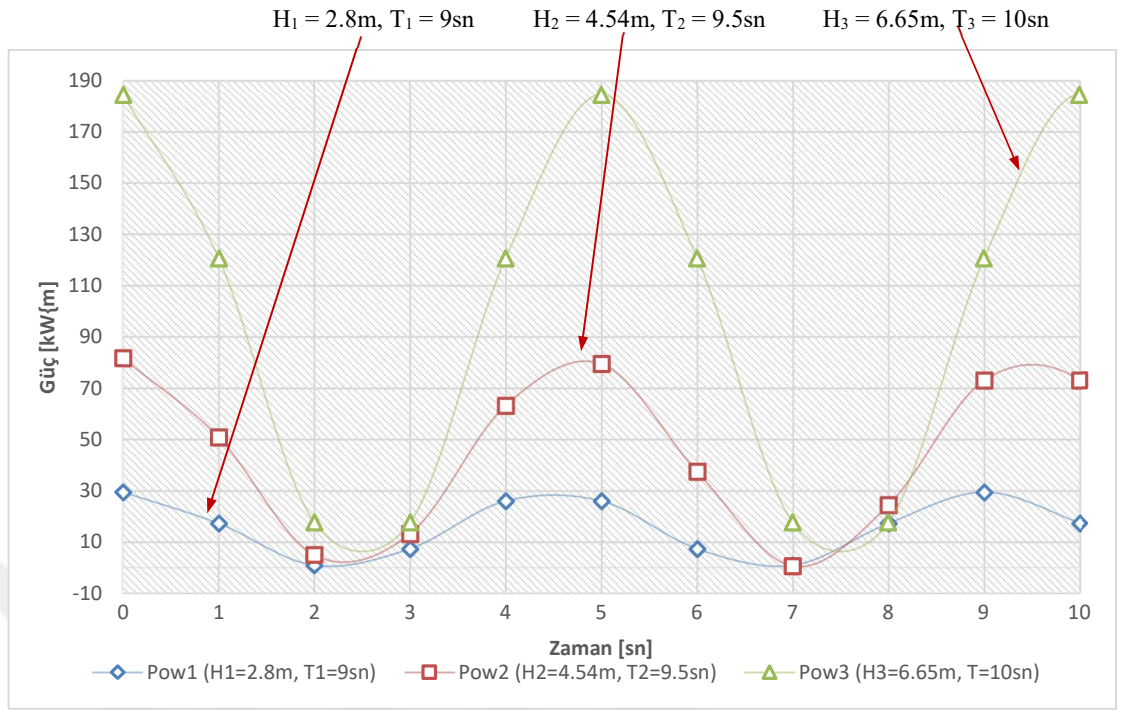


(a). Su kolonuna gelen dalganın hızı.

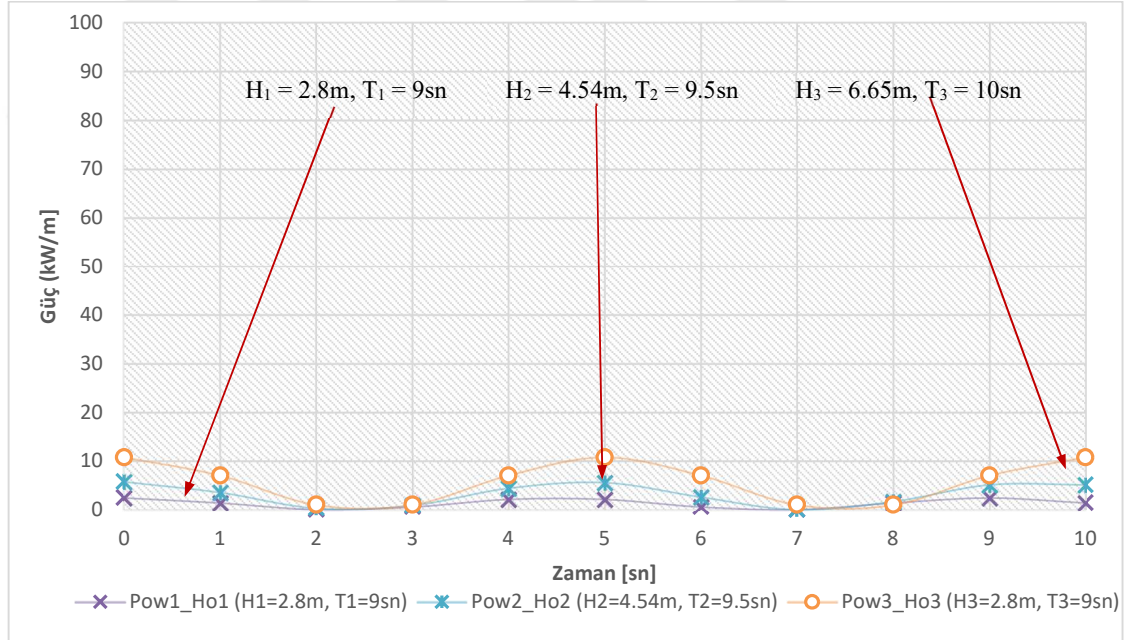


(b). Su kolonu içerisindeki dalganın hızı.

Şekil 6.27 : Gelen dalgla ile su kolonu içerisindeki dalgla hızının gösterilimi. (a). Su kolonuna gelen dalganın hızı. (b). Su kolonu içerisindeki dalganın hızı.



(a). Su kolonuna gelen dalganın anlık güç değişimi.



(b). Su kolonu içerisindeki dalganın anlık güç değişimi.

Şekil 6.28 : Su kolonuna gelen dalga ile su kolonu içerisindeki dalga gücünün anlık değişimi. (a). Su kolonuna gelen dalganın anlık güç değişimi. (b). Su kolonu içerisindeki dalganın anlık güç değişimi.

Salınımlı su kolonu tasarım bölümünde anlatıldığı üzere bu çalışmada belirli bir hava haznesi geometrisi ve türbin/generatör grubu için sayısal değerler belirlenmiş ve bu sayısal değerler kullanılarak salınımlı su kolonunun modellenmesi yapılmıştır. Belirlenen değerlerin çıkışta elde edilmek istenen güç değerine göre optimize edilmesi gerekir. Aynı zamanda doğrultucu ve eviricide kullanılacak olan aktif ve pasif elemanların büyüklükleri ve kontrol bloklarında kullanılacak olan referans ve kazanç değerlerinin de bu büyüklüklere göre seçilmesi gerekir. Tasarımın belirli bir çalışma aralığı için optimize edilebilmesi için aşağıdaki bölümde verildiği üzere çeşitli karşılaştırmaların yapılması gerekmiştir.

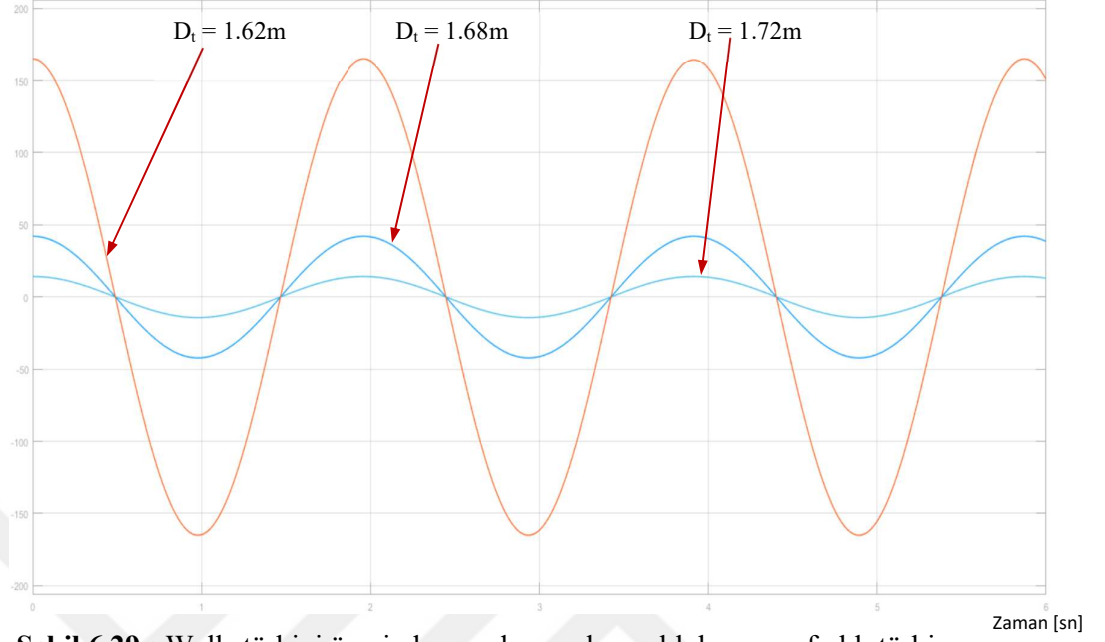
6.2.1.1 Türbin çapının etkisi

Türbin çapının sistem davranışındaki etkisinin anlaşılması için diğer tüm değerler sabit tutularak türbin çapının büyüklüğü değiştirilmiştir. Şekil 6.29, Şekil 6.30 ve Şekil 6.31'deki simülasyon sonuçlarında hava aralığı genişliği 1.76m iken, türbin çapları sırasıyla 1.62m, 1.68m ve 1.72m olarak değiştirilmiştir.

Şekil 6.29'da Wells türbini üzerinde meydana gelen anlık basıncın farklı türbin çaplarına göre değişimi gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere aynı salınımlı su kolonu boyutları, aynı hava aralığı ve aynı gelen dalga değerleri için, Wells türbinin çapı 1.62m'den 1.68m'ye arttırıldığında türbin üzerinde meydana gelen basınç düşümünde yaklaşık %200, türbin çapı 1.68m'den 1.72m'ye arttırıldığında ise basınç düşümünde yaklaşık %300 civarında bir artış olduğu görülmektedir. Bu da türbinden elde edilen güçte önemli bir artış olacağı anlamına gelmektedir. Ancak bu elbette farklı boyutta bir türbin kullanılması anlamına gelir, dolayısıyla türbin çapı tasarımın ilk aşamasında bu farklılık göz önünde bulundurularak seçilmelidir.

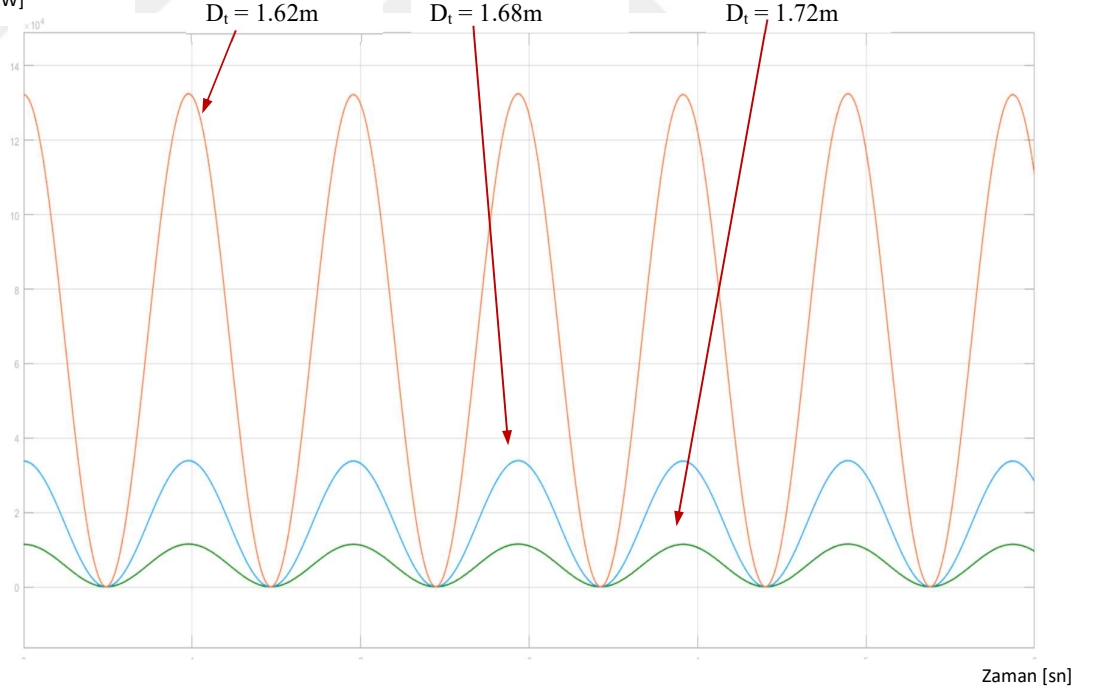
Şekil 6.30'daki anlık güç değerleri incelendiğinde türbin çapının büyümesiyle türbin çıkışından elde edilen anlık gücün tepe değeri de basınç değişimi ile aynı oranda değiştiği görülmektedir. Diğer bir deyişle türbin çapı 1.62m'den 1.68m'ye yükseltildiğinde güç değeri %200, 1.68m'den 1.72m'ye yükseltildiğinde %300 değerinde artmaktadır. Ancak bu durum belirli bir noktadan sonra hava akısında sönüme neden olacağı için fiziksel bir takım kısıtlamalar söz konusudur. Bu nedenle türbin boyutları seçilirken bu kısıtlamalar göz önünde bulundurulmalıdır. Ancak bu konu bu tez çalışmasının kapsamında olmadığı için burada detaylı bir araştırmaya yer verilmemiştir.

Güç [W]



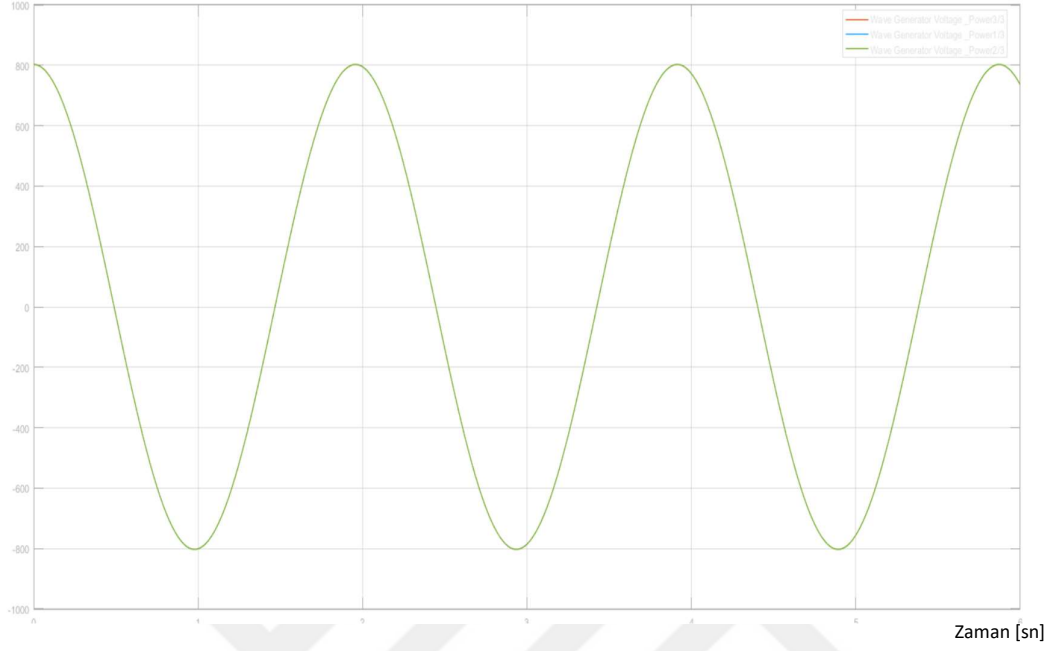
Şekil 6.29 : Wells türbini üzerinde meydana gelen anlık basıncın farklı türbin çaplarına göre zamana bağlı değişimi.

Güç [W]

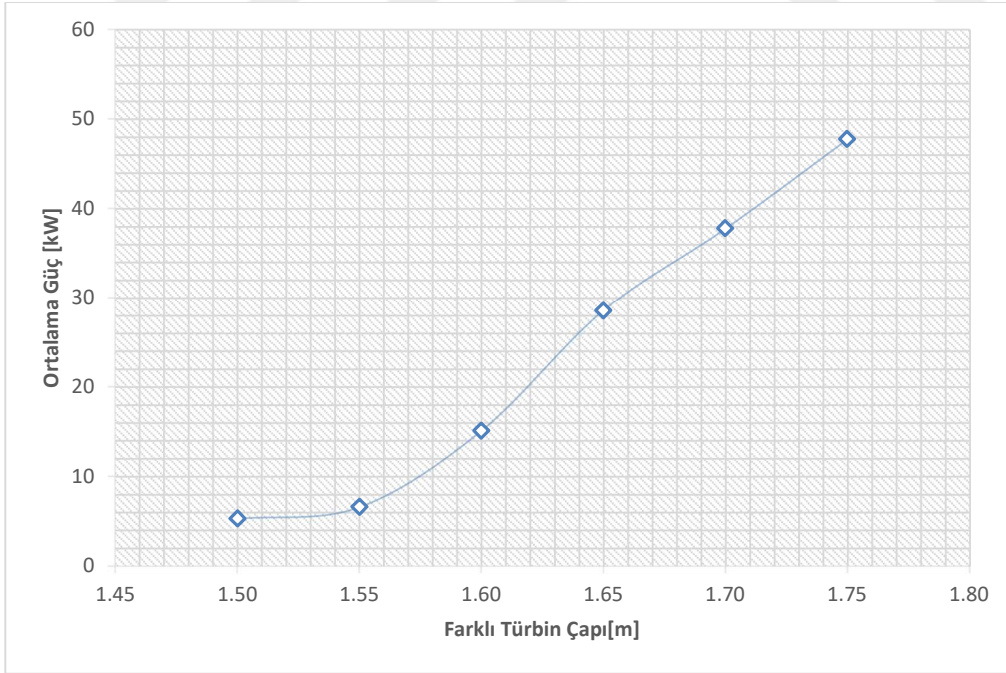


Şekil 6.30 : Wells türbinine aktarılan anlık gücün farklı türbin çaplarına göre zamana bağlı değişimi.

Akış Oranı [m³/sn]



Şekil 6.31 : Anlık hava akış oranının farklı türbin çaplarına bağlı olarak değişimi.



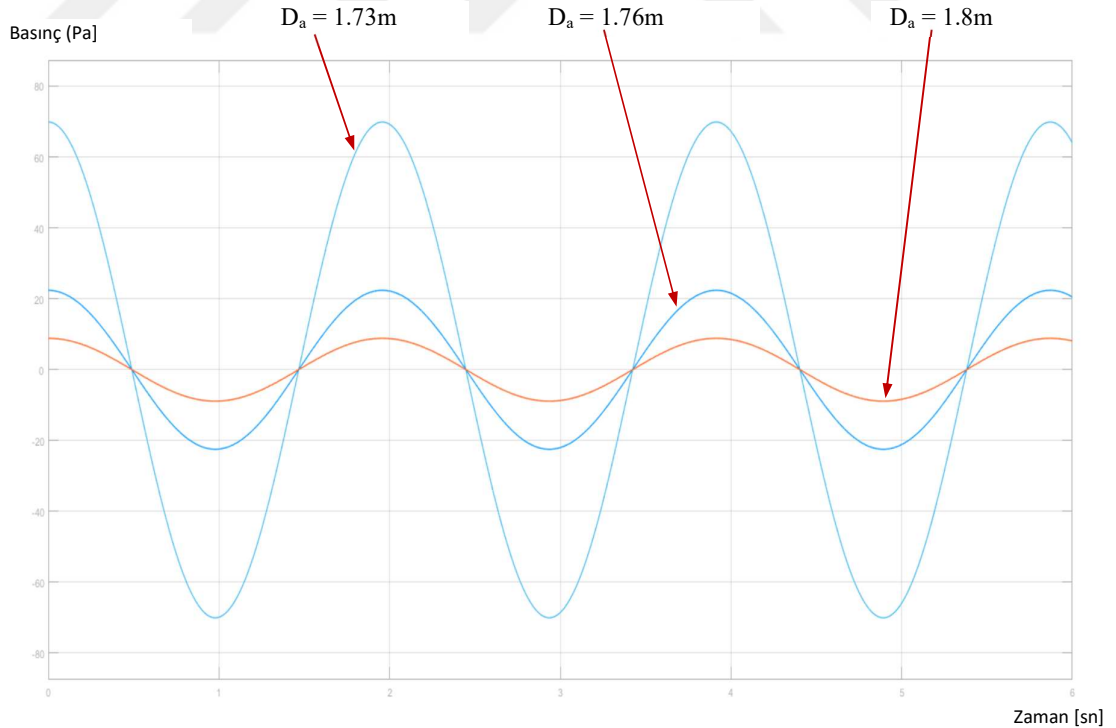
Şekil 6.32 : Wells türbinine aktarılan ortalama gücün farklı türbin çaplarına bağlı olarak değişimi.

Şekil 6.31’de hava akış oranının anlık değişimi gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere türbin çapı değişse dahi meydana gelen anlık hava akışı oranında bir değişiklik olmamaktadır. Daha önce Bölüm 3’te de anlatıldığı üzere hava akış oranı türbin çapından bağımsızdır, şekilde de bunun doğrulaması verilmektedir.

Şekil 6.32’de türbin çapının 1.5m ile 1.75m arasında değiştiği durum için türbine aktarılan ortalama güç değerinde meydana gelen değişiklik gösterilmektedir. Daha önce belirtildiği üzere türbin çapı arttıkça türbin çıkışında meydana gelen güç değeri de artmaktadır.

6.2.1.2 Salımlı su kolonu hava çıkış haznesi genişliğinin etkisi

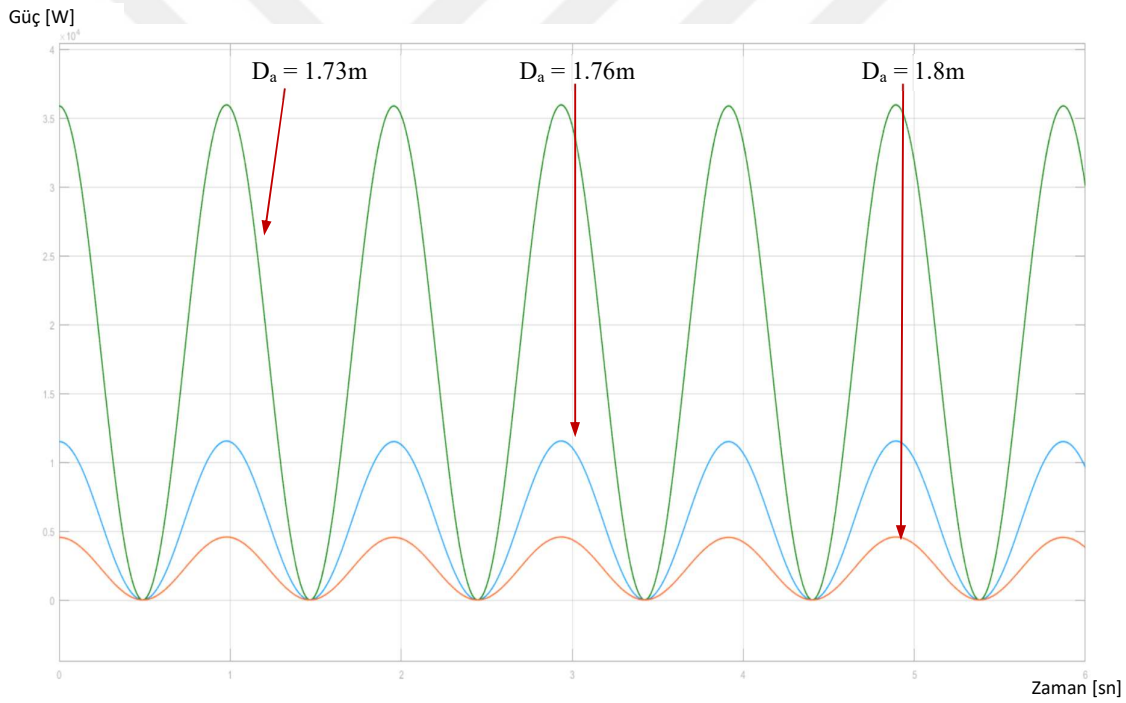
Yapılan incelemelerde aynı boyuttaki hava haznesi hacmi için, türbin çapı aynı kalmak üzere, türbinin yer aldığı bölümün çapı düşürülürse türbinin dönüş hızının da arttırılabileceği görülmüştür. Şekil 6.33’te Wells türbini çapının 1.69m olduğu durum için sırasıyla hava haznesi çıkış çapının sırasıyla 1.73m, 1.76m ve 1.8m olması durumunda Wells türbini üzerinde meydana gelen basınçtaki değişim gösterilmiştir.



Şekil 6.33 : Wells türbini üzerinde meydana gelen anlık basıncın farklı hava çıkış haznesi genişliğine göre zamana bağlı değişimi.

Hava haznesi genişliği 1.73m'den 1.76m'ye çıkarıldığında (türbin çapı aynı kalmak üzere) türbin üzerinde meydana gelen basınç değeri %68 oranında azalmaktadır. Benzer şekilde hava aralığı çapı 1.76m'den 1.8m'ye arttırıldığında türbin üzerine aktarılan güç değerinin %60 oranında azaldığı görülmüştür.

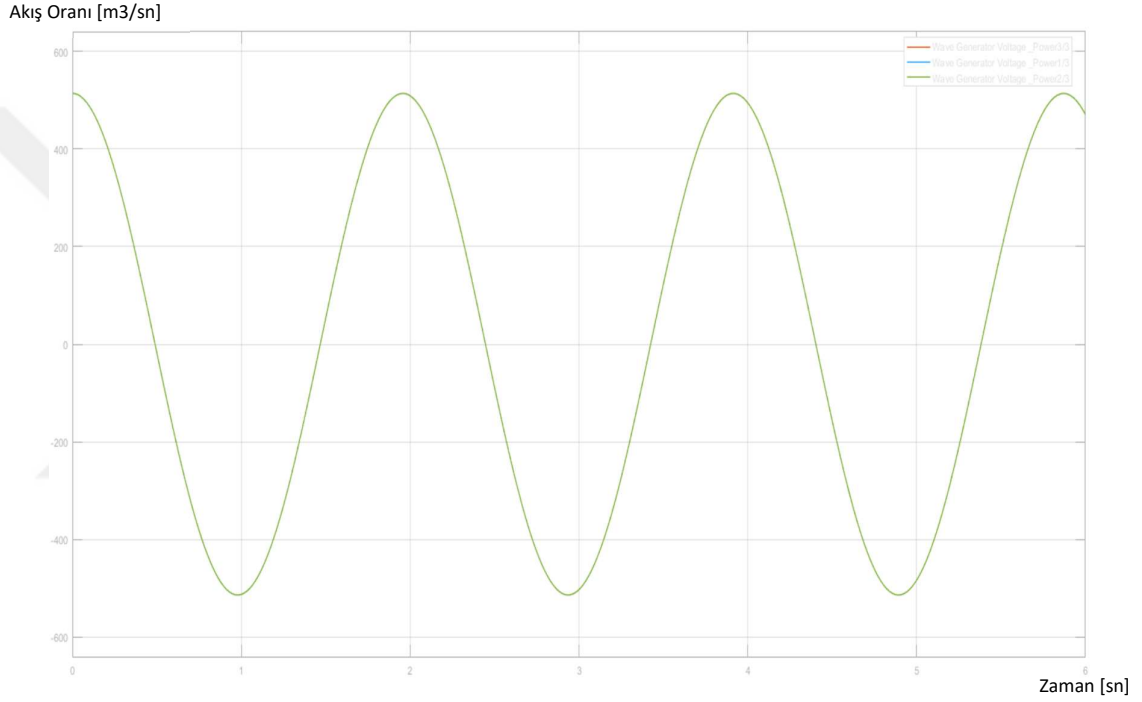
Dalga frekansının veya dalga genliğinin çok düşük olduğu yerlerde hava aralığı haznesi çıkış çapının düşürülmesiyle türbin dönüş hızının arttırılabileceği, dolayısıyla türbinden elde edilen gücün de Şekil 6.34'te gösterildiği gibi arttırılabileceği görülmektedir. Buradan yola çıkarak salınımlı su kolonundan maksimum verim elde edilebilmesi için türbin çapı ve hava aralığı çapı arasındaki oranın iyi belirlenmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır.



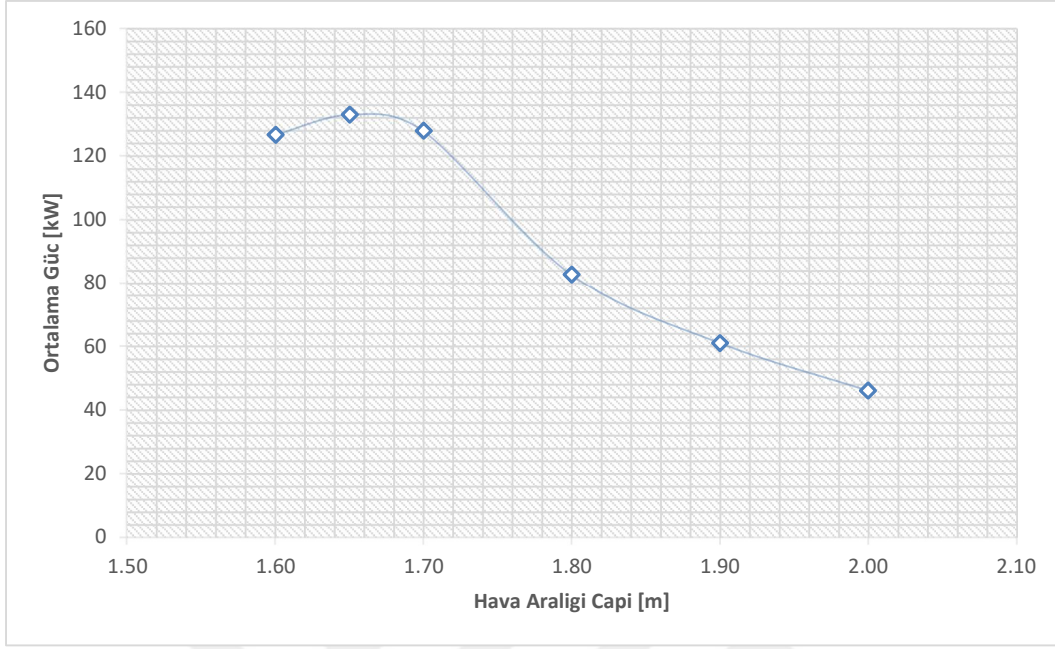
Şekil 6.34 : Wells türbinine aktarılan anlık gücün farklı hava çıkış haznesi genişliğine göre zamana bağlı değişimi.

Şekil 6.35'te anlık hava akış oranının farklı hava çıkış haznesi genişliğine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Daha önceki bölümde de belirtildiği üzere türbin çapının veya hava haznesi hava çıkış aralığı çapının değişmesiyle türbin üzerinde meydana gelen basınçta ve elde edilen güçte değişiklik olmaktadır ancak anlık hava akış oranı her iki değişimde de sabit kalmaktadır.

Şekil 6.36'da hava haznesi hava çıkış aralığı çapının 1.6m ile 2.0m arasında değiştiği durum için türbine aktarılan ortalama güç değerinde meydana gelen değişiklik gösterilmektedir. Şekilden anlaşılabacağı üzere hava aralığı haznesi çapının artması ile belirlenen türbinin optimum çalışma aralığı civarında türbin çıkışında meydana gelen güçte bir artış olduğu görülmektedir. Ancak optimum çalışma noktasından sonra hava haznesi çapının artmasıyla türbin çıkışından elde edilen güç değerinde önemli oranda bir azalma olduğu görülmektedir.

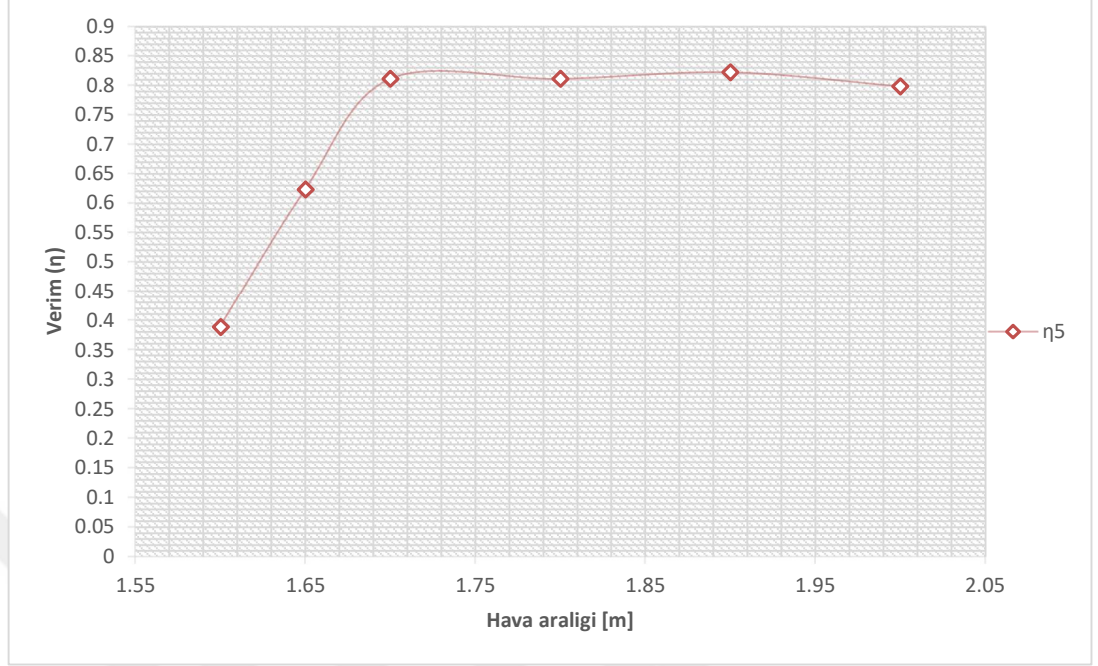


Şekil 6.35 : Anlık hava akış oranının farklı hava çıkış haznesi genişliğine bağlı olarak değişimi.



Şekil 6.36 : Wells türbinine aktarılan ortalama gücün farklı hava çıkış haznesi genişliğine bağlı olarak değişimi.

Şekil 6.37’de Wells türbini veriminin salınlı su kolonu hava çıkış haznesinin boyutlarına bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. Burada türbinin optimum çalışma noktasına kadar hava aralığı çapının artmasıyla türbin veriminin de arttığı görülmektedir ancak bu noktadan sonra hava aralığı artarken türbine aktarılan güç değerinde azalma olsa dahi türbin veriminin neredeyse aynı kaldığı görülmektedir.

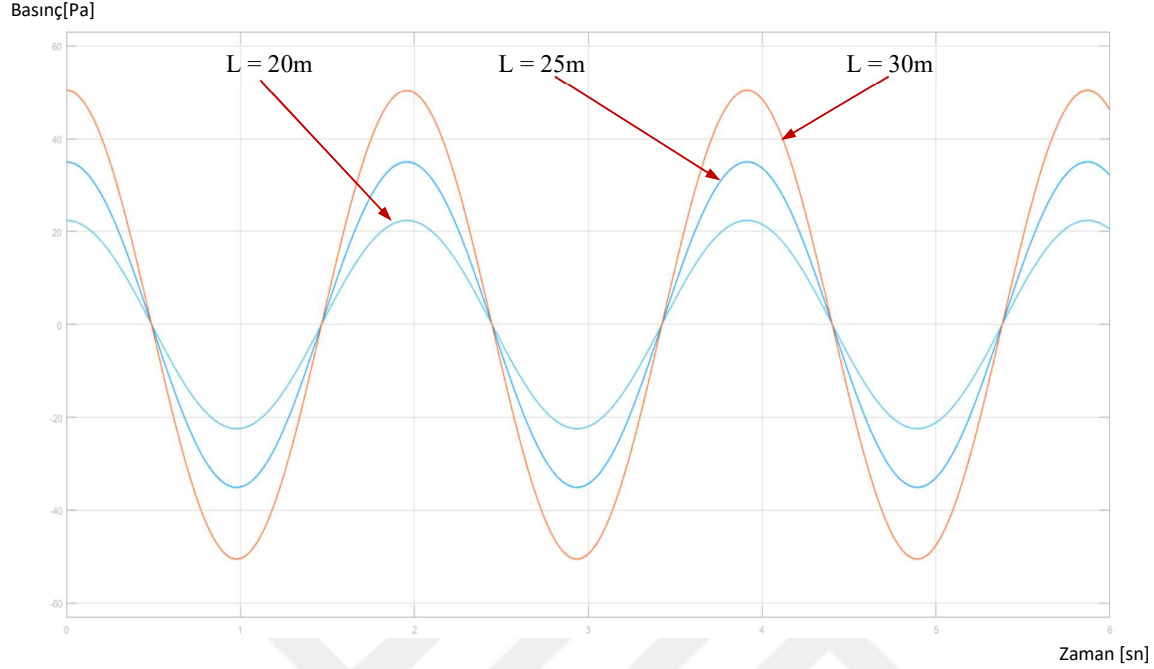


Şekil 6.37 : Wells türbini veriminin salınlı su kolonu hava aralığı genişliğine bağlı olarak değişimi.

6.2.1.3 Salınlı su kolonu uzunluğunun etkisi

Bölüm 3'teki eşitlik 3.92'de verildiği üzere Wells türbini üzerinde meydana gelen basınç değeri salınlı su kolonu hava haznesinin hacmiyle doğrusal olarak değişmektedir. Dolayısıyla salınlı su kolonu uzunluğunun artmasıyla da Wells türbini üzerindeki basınç değerinin doğrusal olarak artacağı beklenmektedir. Şekil 6.38'de bu basınç değişimi sırasıyla salınlı su kolonu uzunluklarının 20m, 25m ve 30m olduğu durumlar için verilmiştir. Salınlı su kolonu uzunluğu arttırılırken genişliği 10m olarak sabit tutulmuştur.

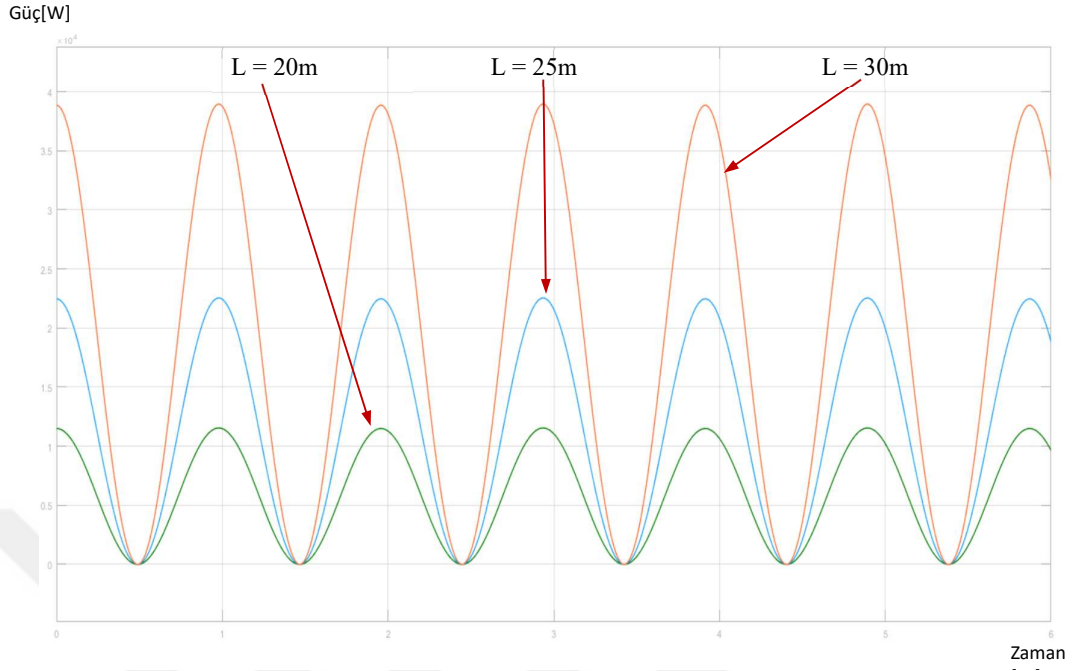
Şekil 6.38'deki basınç dalga şekli incelendiğinde salınlı su kolonu uzunluğunun 20m'den 25m'ye çıkarılmasıyla basınç değerinde %56'lık bir artış olduğu, uzunluk 25m'den 30m'ye çıkarıldığında ise bu değerin %44 oranında arttığı gözlenmiştir.



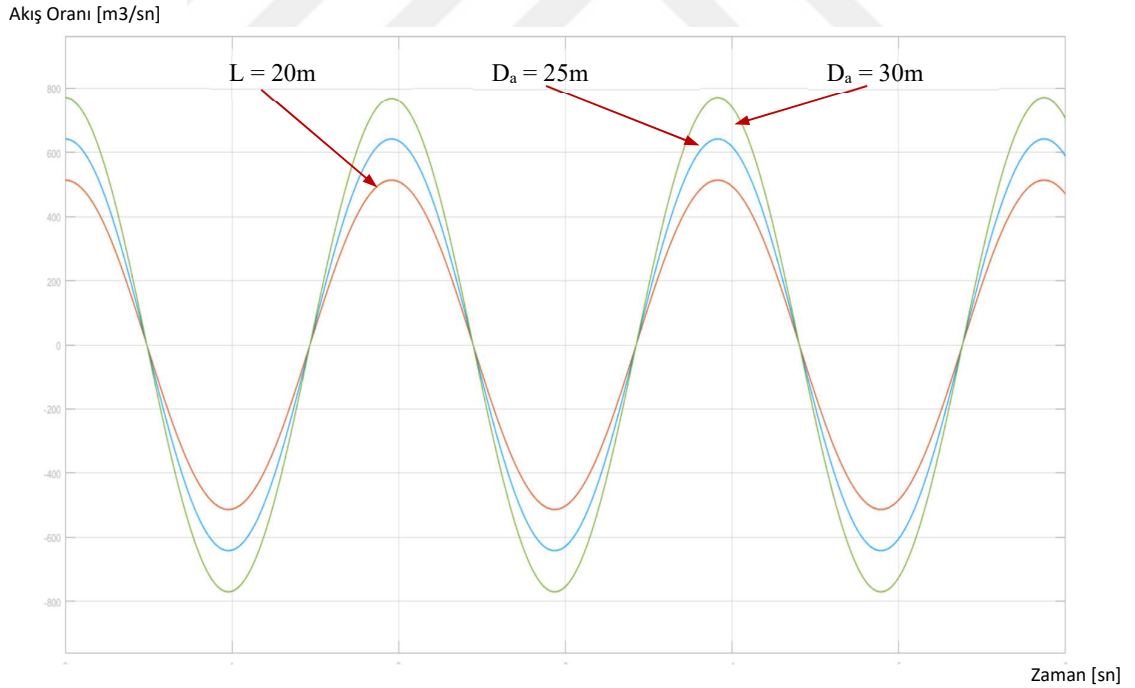
Şekil 6.38 : Wells türbini üzerinde meydana gelen anlık basıncın farklı su kolonu uzunluğuna göre zamana bağlı değişimi.

Şekil 6.39’da Wells türbinine aktarılan anlık gücün farklı su kolonu uzunluklarına göre zamana bağlı değişimi verilmiştir. Burada görüldüğü üzere salınlı su kolonu uzunluğunun 20m’den 25’ye veya 30m’ye yükseltilmesiyle türbine aktarılan güçteki artışın sırasıyla %95 ve %72 olduğu belirlenmiştir.

Önceki iki değişkenin aksine (türbin çapı ve hava aralığı çapı) hava akış oranı salınlı su kolonu boyutlarına göre değişiklik göstermektedir. Şekil 6.40’da gösterildiği gibi salınlı su kolonu boyutlarındaki %20’lik veya %25’lik bir artış hava akış oranında da %20’lik veya %25’lik bir artışa neden olmaktadır. Buradan hava akış oranının salınlı su kolonu boyutları ile doğrusal olarak değiştiği görülmektedir.

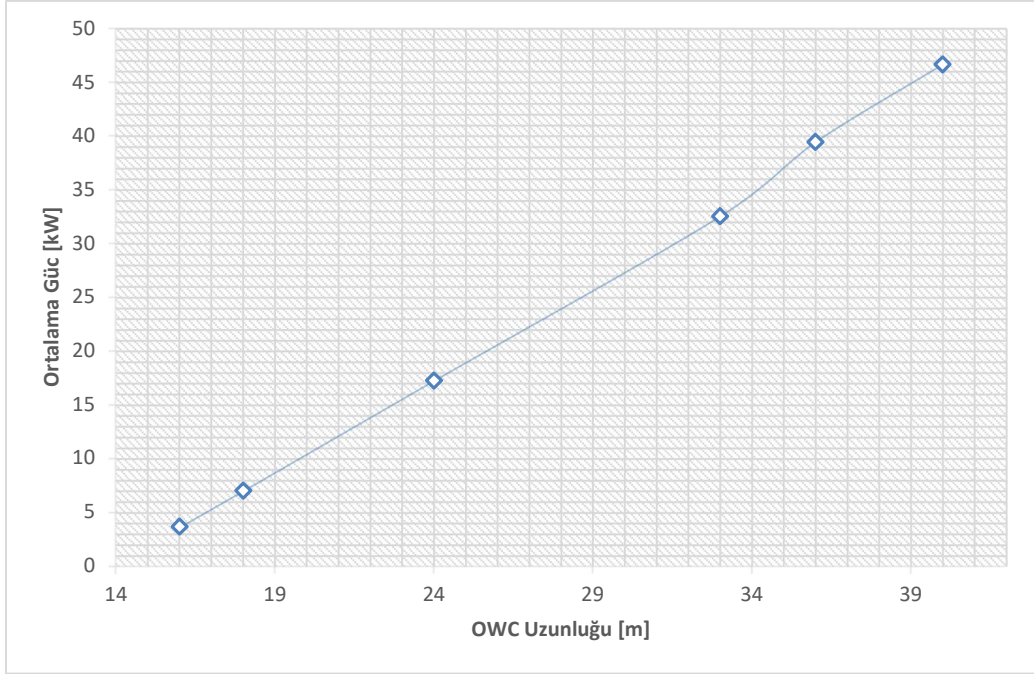


Şekil 6.39 : Wells türbinine aktarılan anlık gücün farklı su kolonu uzunluğuna göre zamana bağlı değişimi.



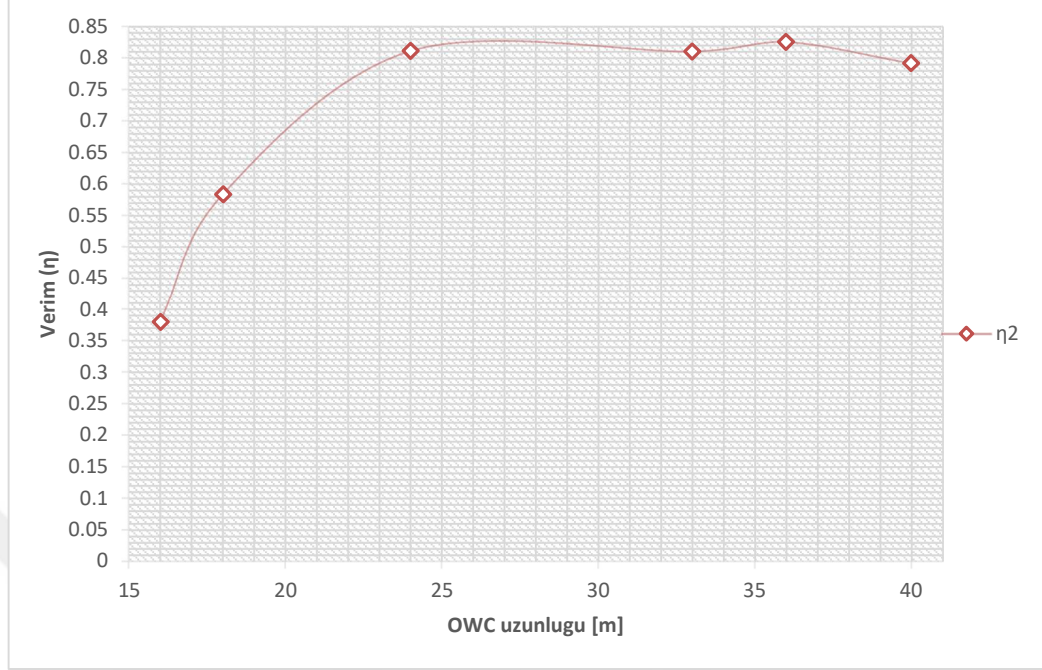
Şekil 6.40 : Anlık hava akış oranının farklı su kolonu uzunluğuna bağlı olarak değişimi.

Şekil 6.41’de türbine aktarılan gücün ortalama değeri farklı su kolonu uzunlukları için verilmiştir. Beklendiği üzere su kolonu boyutları ile türbine aktarılan ortalama gücün değeri doğrusal olarak değişmektedir.



Şekil 6.41 : Wells türbinine aktarılan ortalama gücün farklı su kolonu uzunluğuna bağlı olarak değişimi.

Şekil 6.42’de Wells türbininden elde edilen verimin salınlı su kolonu uzunluğuna bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Türbin verimi belirli bir noktaya kadar (türbinin optimum çalışma noktasına kadar) artarken bu noktadan sonra salınlı su kolonunun boyutları değişse dahi çok fazla farklılık göstermediği görülmüştür.

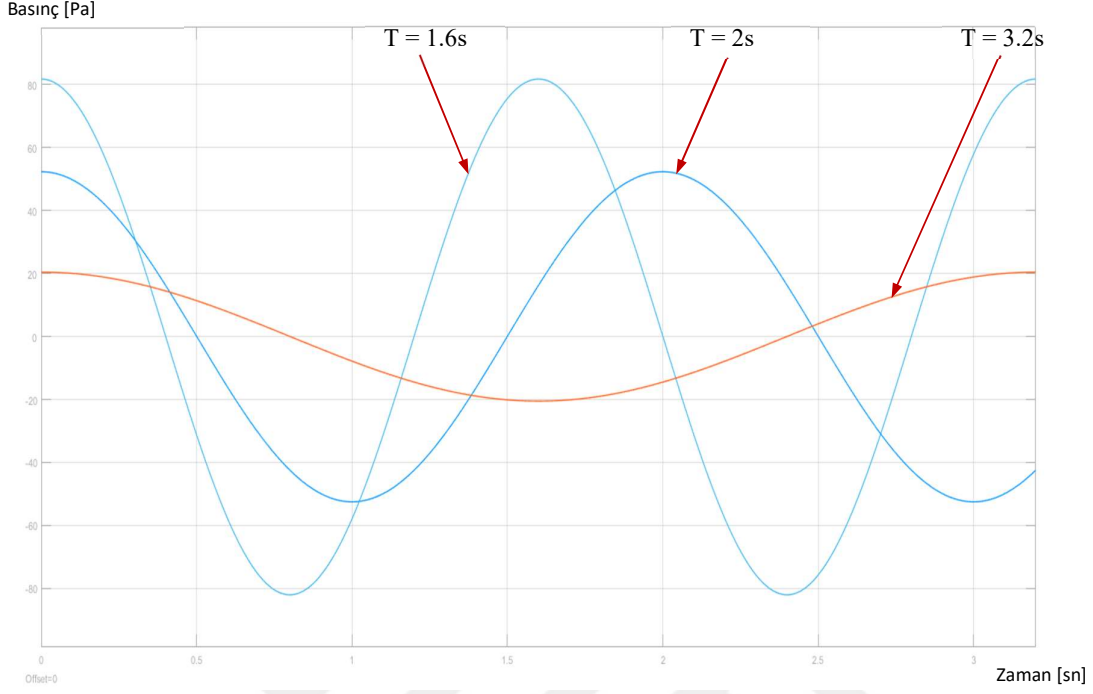


Şekil 6.42 : Wells türbini veriminin salınlı su kolonu uzunluğuna bağlı olarak değişimi.

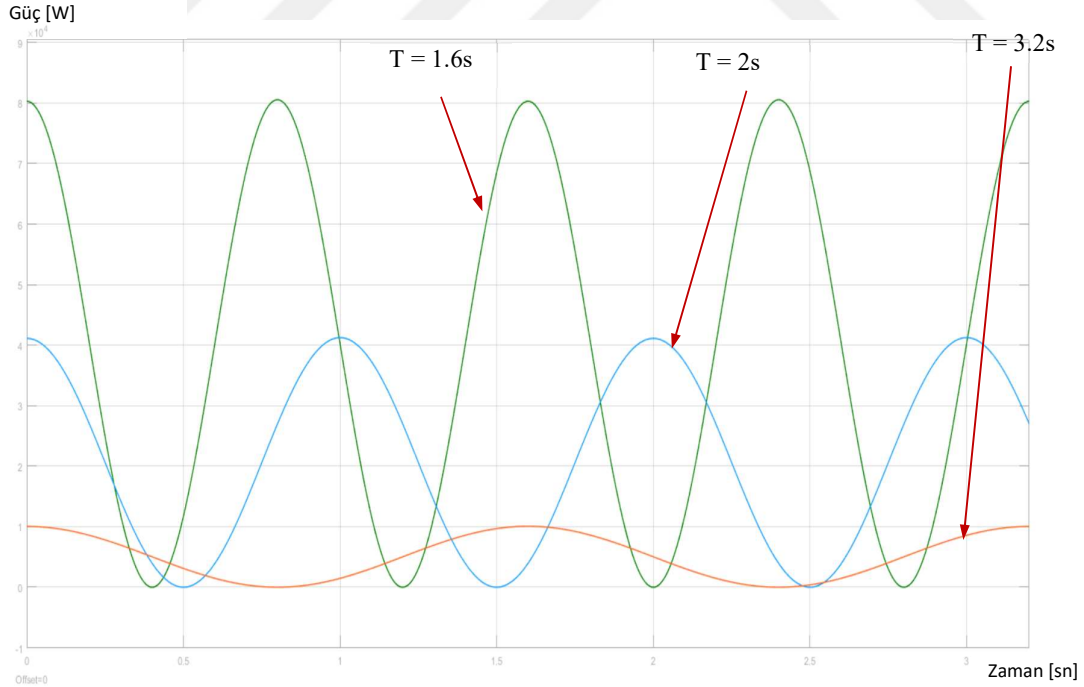
6.2.1.4 Dalga frekansının etkisi

Aşağıdaki Şekil 6.43'te farklı frekanstaki dalgalar için türbine aktarılan anlık basınç değerindeki değişim verilmektedir. Simülasyonlar salınlı su kolonu içerisinde hareket eden dalga frekansının sırasıyla 1.6sn, 2sn ve 3.2sn olduğu durum için verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere aynı dalga yüksekliğine sahip dalgalar için ve aynı değerdeki salınlı su kolonu boyutları için dalga frekansının artmasıyla Wells türbini üzerinde meydana gelen anlık basınç değeri de artmaktadır. Frekansın iki katına çıkmasıyla basınç değerinde %300'lük bir artış olduğu hesaplanmıştır.

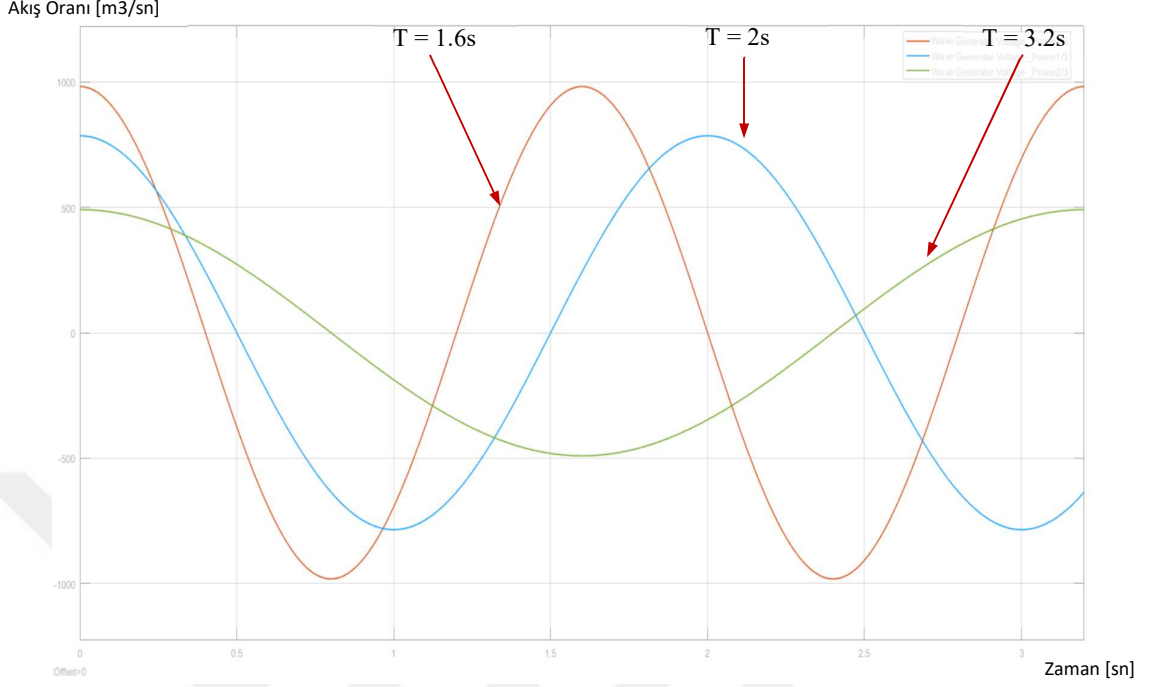
Şekil 6.44 ve Şekil 6.45'te sırasıyla Wells türbinine aktarılan anlık gücün ve anlık hava akış oranının farklı dalga frekanslarına bağlı değişimleri gösterilmektedir. Dalga frekansının artmasıyla türbine aktarılan gücün değeri de anlık hava akış oranının değeri de artmaktadır. Frekansın iki katına çıkmasıyla türbine aktarılan güç miktarındaki artışın %700 değerinde olduğu belirlenmiştir. Ancak hava akış oranının frekansla doğru orantılı olarak değiştiği gözlenmiştir. Frekansın iki katına çıkmasıyla akış oranı da iki katına çıkmaktadır.



Şekil 6.43 : Wells türbini üzerinde meydana gelen anlık basıncın farklı dalga frekanslarına bağlı olarak değişimi.



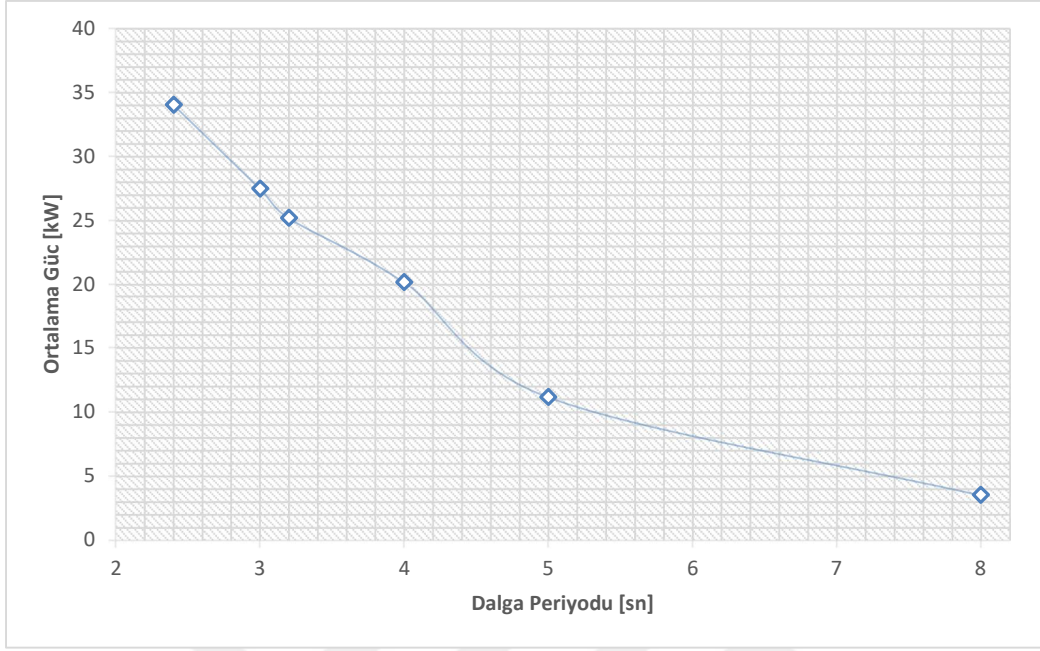
Şekil 6.44 : Wells türbinine aktarılan anlık gücün farklı dalga frekanslarına bağlı olarak değişimi.



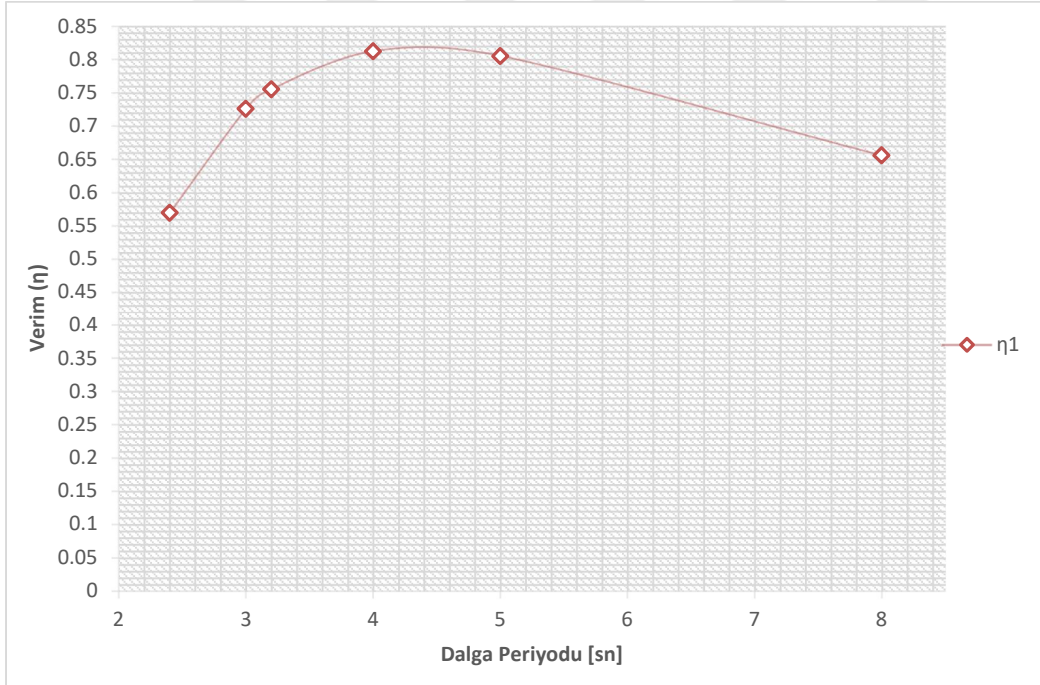
Şekil 6.45 : Anlık hava akış oranının farklı dalga frekanslarına bağlı olarak değişimi.

Şekil 6.46'da Wells türbinine aktarılan ortalama gücün dalga periyoduna bağlı değişimi gösterilmektedir. Dalganın periyodu arttıkça dalgada meydana gelen gücün değeri azaldığı için türbine aktarılan ortalama gücün değeri de düşmektedir.

Şekil 6.47'de ise dalga frekansının değişimine bağlı olarak Wells türbini veriminin nasıl değiştiği verilmiştir. Şekilde belirli bir dalga periyodu aralığında Wells türbinin yüksek verimde çalıştığı gözlenirken, bu aralık dışında türbin veriminde düşüş olduğu gözlenmektedir. Bu da türbin tipi boyutları belirlenirken salınlı su kolonu uygulamasının kurulacağı yerdeki dalga karakteristiklerinin (gün, ay ve mevsimlere göre dalga boyu ve dalga frekansındaki değişimler açısından) iyi analiz edilmesi anlamına gelmektedir.



Şekil 6.46 : Wells türbinine aktarılan ortalama gücün farklı dalga frekanslarına bağlı olarak değişimi.

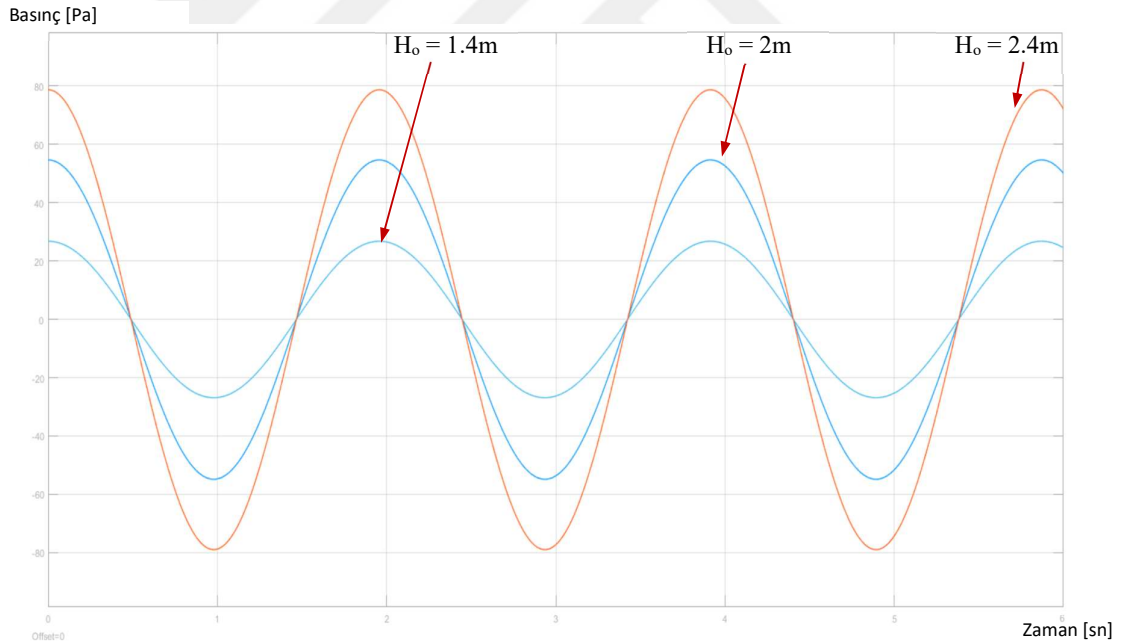


Şekil 6.47 : Wells türbini veriminin salınlımlı su kolonu uzunluğuna bağlı olarak değişimi.

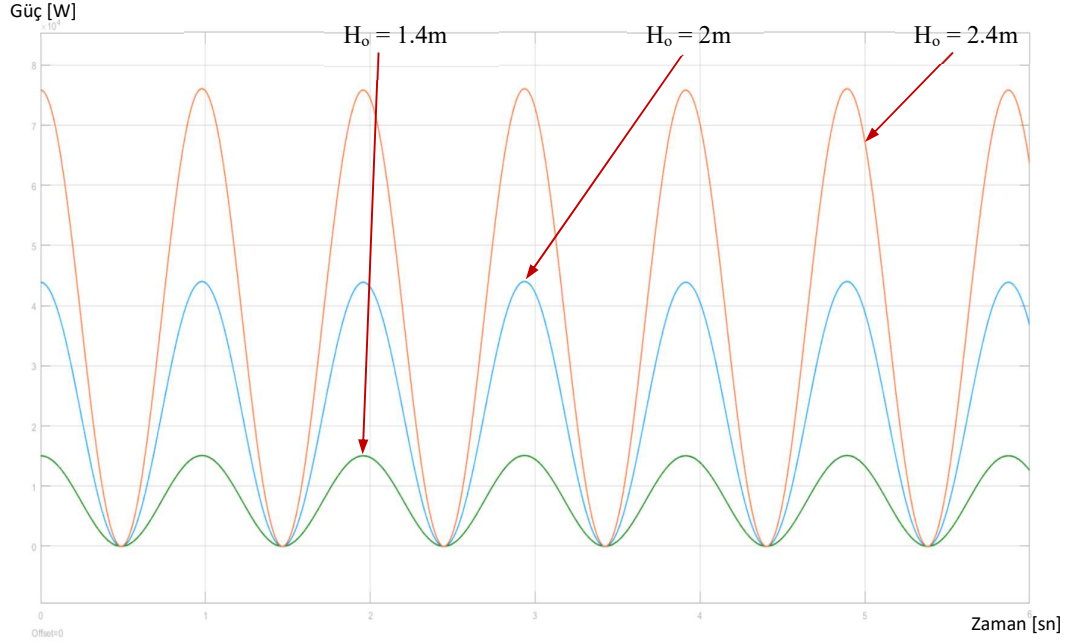
6.2.1.5 Dalga yüksekliğinin etkisi

Daha önce Şekil 6.25'te dalgaların yüksekliklerinin değişmesiyle ürettikleri güçlerde meydana gelen değişim değeri gösterilmişti. Aağıdaki şekillerde ise salınlımlı su kolonu içerisinde hareket eden dalganın genliğinin (yüksekliğinin) değişmesiyle Wells türbinine aktarılan basınç ve güç değerlerindeki anlık değişimler gösterilmektedir. Simülasyonlarda dalga yükseklikleri sırasıyla 1.4m, 2m ve 2.4m olarak alınmıştır.

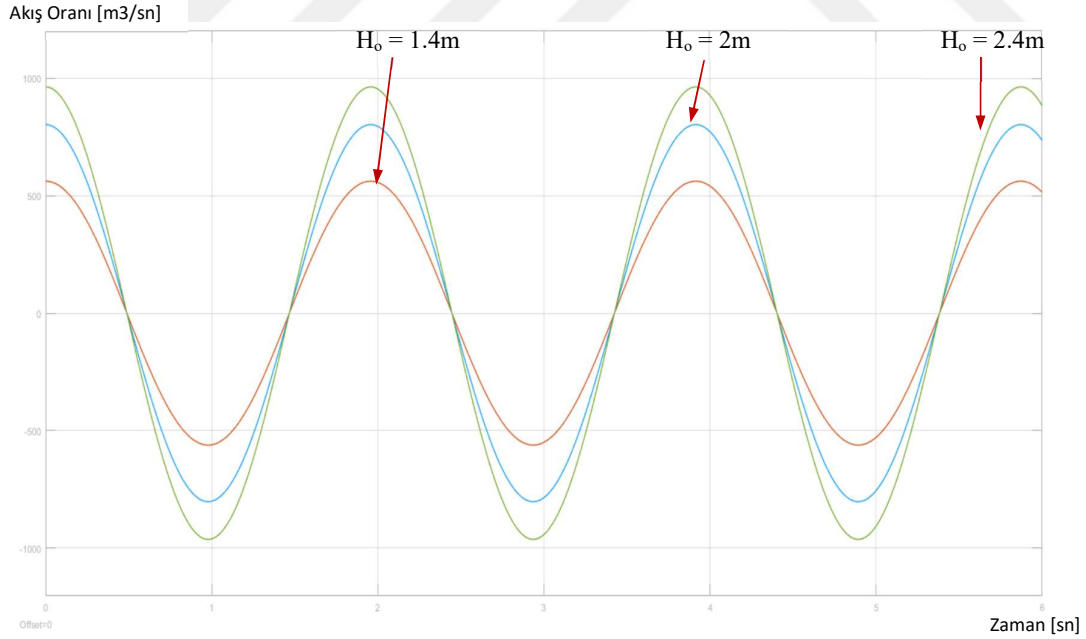
Şekil 6.48 ve Şekil 6.49'da gösterildiği üzere dalganın genliği arttıkça türbine aktarılan güç değeri ile türbin üzerinde meydana gelen anlık basınç değerinde artış olduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçları incelendiğinde dalga yüksekliğindeki %42'lik bir artışın basınç değerinde %104'lük, güç değerinde ise %191'lik bir artışa neden olduğu belirlenmiştir. Dalga yüksekliğindeki %20'lik bir artış basınçta %44'lük güçte ise %72'lik bir artışa neden olmaktadır.



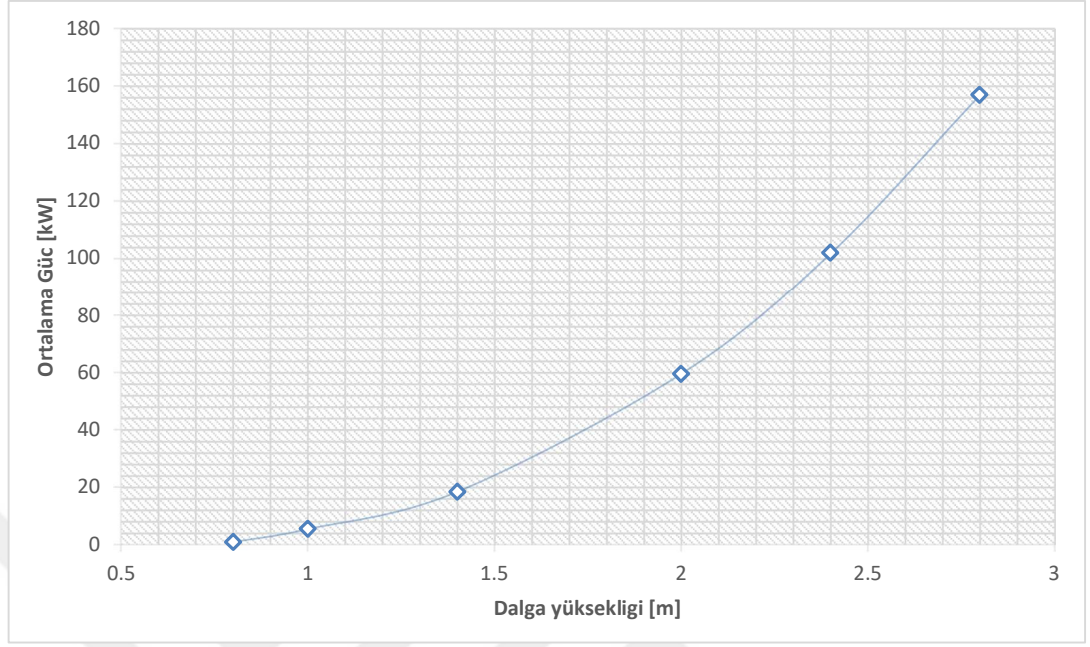
Şekil 6.48 : Wells türbini üzerinde meydana gelen anlık basıncın farklı dalga yüksekliklerine bağlı olarak değişimi.



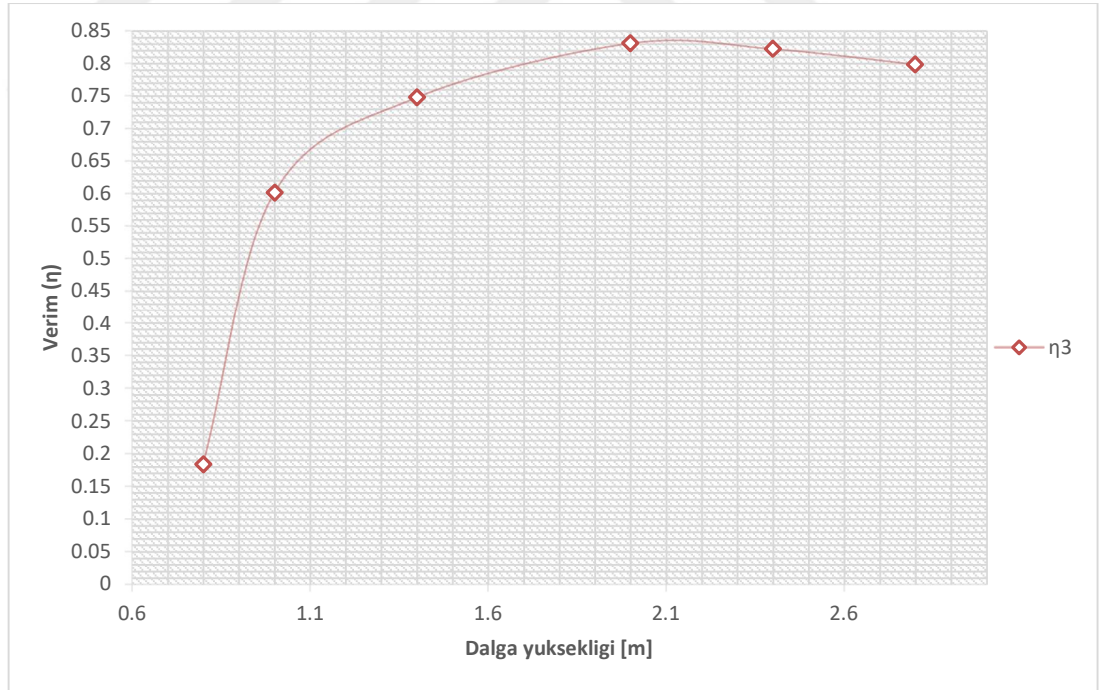
Şekil 6.49 : Wells türbinine aktarılan anlık gücün farklı dalga yüksekliklerine bağlı olarak değişimi.



Şekil 6.50 : Anlık hava akış oranının farklı dalga yüksekliklerine bağlı olarak değişimi.



Şekil 6.51 : Wells türbinine aktarılan ortalama gücün farklı dalga yüksekliklerine bağlı olarak değişimi.



Şekil 6.52 : Wells türbini veriminin salınlı su kolonu içerisindeki dalganın genliğine bağlı olarak değişimi.

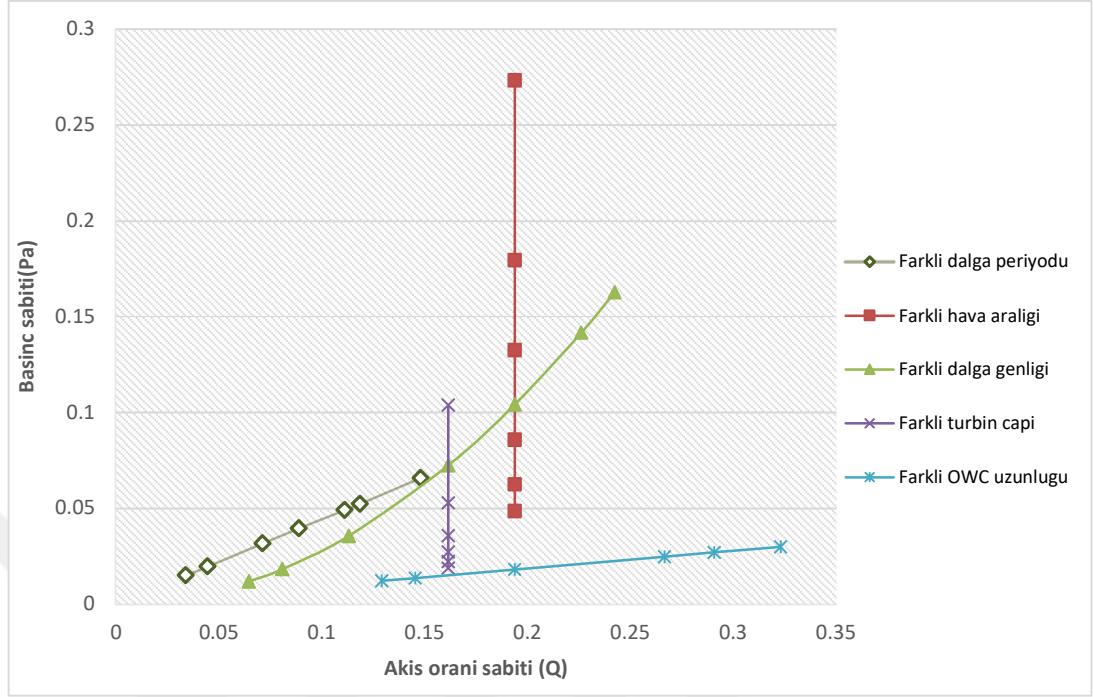
Şekil 6.50 ve Şekil 6.51’de ise sırasıyla artan dalganın genliği ile değişen anlık akış oranı değerleri ve türbine aktarılan ortalama güç değeri verilmiştir. Her iki şekilde salınlı su kolonu içerisinde hareket eden dalga yüksekliğinin artmasıyla akış oranının ve ortalama gücün arttığı görülmektedir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken nokta dalga yüksekliği akış oranında doğrusal bir artışa neden olurken, türbine aktarılan ortalama güçte parabolik bir artış söz konusudur.

Şekil 6.52’de Wells türbini veriminin salınlı su kolonu içerisinde hareket eden dalganın genliğine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Dalga frekansının değişimindeki etkiye benzer şekilde belirli bir dalga genliği aralığında Wells türbini veriminin yüksek olduğu, bu aralık dışında da türbin veriminde düşüş olduğu gözlenmektedir. Bu nedenle Wells türbini boyutları seçilirken salınlı su kolonu uygulamasının gerçekleştirileceği yerdeki dalga genliğinin gün, ay ve mevsimlere göre değişiminin iyi analiz edilmesi gerekmektedir.

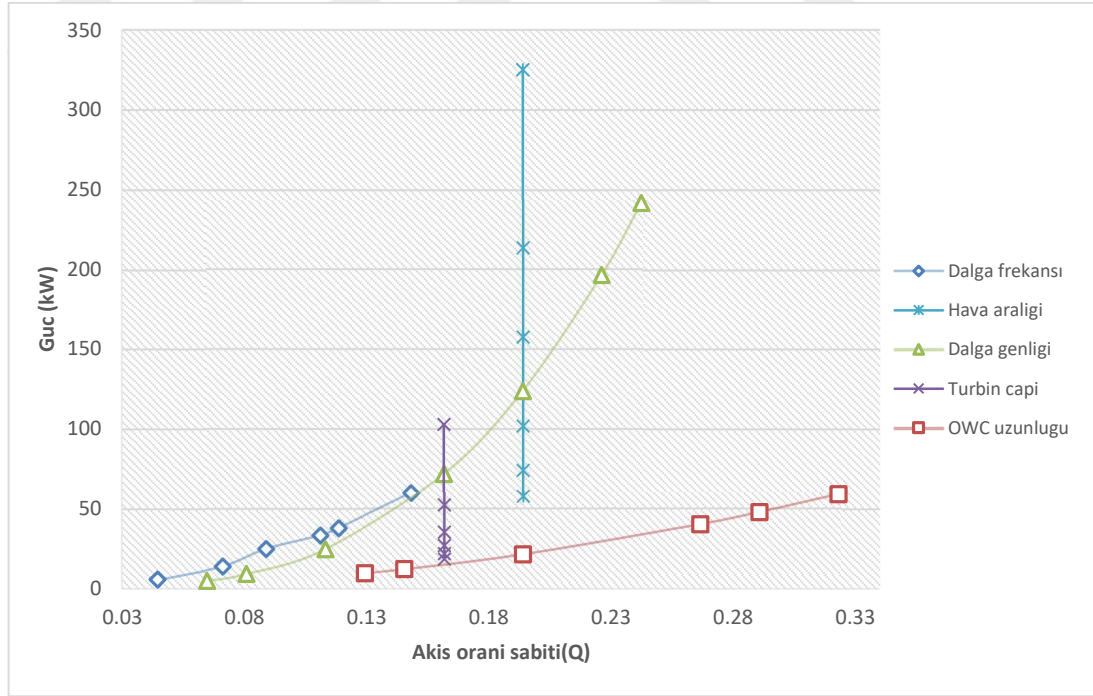
6.2.1.6 Salınlı su kolonunun farklı akış oranlarındaki davranışı

Önceki bölümlerden yola çıkarak salınlı su kolonu boyutları, türbin boyutları ve dalga karakteristiklerine bağlı olarak değişen akış oranına göre basınç ve güç değerlerindeki değişim incelenmiştir. Şekil 6.53’te dalga frekansının, dalga genliğinin ve salınlı su kolonu boyutlarının artmasıyla akış oranında ve basınç değerinde artış olduğu gözlenmiştir. Ancak türbin ve hava aralığı çapları değiştirildiğinde akış oranı sabit kalırken elde edilen güç miktarının arttığı gözlenmiştir.

Salınlı su kolonundan türbine aktarılan güç değerinin hava haznesi içerisinde meydana gelen basınç değerine bağlı olması nedeniyle Şekil 6.53’te olduğu gibi burada da güç değerinde artan dalga frekansı, dalga genliği ve salınlı su kolonu uzunluğuna bağlı olarak artış olduğu gözlenmiştir. Dalga frekansının ve salınlı su kolonu uzunluğunun etkisi doğrusal olarak, dalga genliğine bağlı değişimin parabolik olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.53 : Salınlı su kolonu çıkışında meydana gelen basıncın farklı akış oranlarındaki davranışı.



Şekil 6.54 : Salınlı su kolonu çıkışında meydana gelen gücün farklı akış oranlarındaki davranışı.

6.2.2 Salınlımlı su kolonu, doğrultucu ve eviricinin bir arada çalıştırılmasının analiz edilmesi

Bu çalışmada oluşturulan simülasyon modeli üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak üç seviyeli evirici modeli oluşturulmuş ve en yakın uzay vektör kontrol modülasyonu yöntemi ile çalıştırılması incelenmiştir. Ardından üç seviyeli doğrultucu modeli kurulmuş ve değişken frekanslı gerilim kaynağına bağlı iken doğrultucunun kararlı halde çalışması sağlanmıştır. En son olarak da modele salınlımlı su kolonu modeli eklenerek sistemin bütün olarak çalıştırılması sağlanmıştır. Aşağıdaki bölümde bu üç durumdaki dalga şekilleri verilecektir.

Salınlımlı su kolonunun modellenmesindeki matematiksel analizde hava türbini karakteristiklerinin neredeyse lineer olduğu kabul edilmiştir. Gelen dalganın frekans domeninde incelenebilmesi için anlık dalga hareketinin monokromatik ya da diğer deyişle düzenli dalgalar oldukları kabul edilmiş ve lineer modelleme kullanılmıştır. Ayrıca hava haznesindeki yansıma ve kırınım kayıpları da ihmal edilmiştir.

Salınlımlı su kolonu modeli Bölüm 3'te verilen teorik çalışmalara ve bir önceki bölümde yapılan simülasyon sonuçlarına bağlı olarak MATLAB-Simulink ortamında kurulmuştur. Evirici çıkışındaki filtre üzerindeki kayıplar, senkron generatör kayıpları ve Wells türbini üzerinde meydana gelen kayıplar dikkate alınarak salınlımlı su kolonu çıkışındaki ortalama güç değeri 55kW olacak şekilde ayarlanmıştır. Salınlımlı su kolonu, Wells türbini, senkron generatör ve salınlımlı su kolonu içerisinde hareket eden dalgaya ait diğer büyüklükler aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

Sistemin çalışma parametreleri:

Wells türbini çapı:	$D_t = 1.69m$
Hava çıkış aralığı çapı:	$D_a = 1.75m$
Salınlımlı su kolonu uzunluğu:	$L = 10m$
Salınlımlı su kolonu genişliği:	$w = 20m$
Dalga periyodu:	$T = 1.956s$
Dalga yüksekliği:	$H_o = 1.6m$
Dalga frekansı:	$\omega_o = 3.21rad/s$
Dalga yoğunluğu:	$\rho_w = 1.025kg/L$
Senkron generatör kutup sayısı:	$p = 2$
Senkron generatör endüvi direnci:	$R_a = 0.1\Omega$

Senkron generatör reaktansı:	$L_s = 5.34mH$
Wells türbini maksimum verimi:	$\eta_t = 0.82$
Wells türbini boyutsuz akış sabiti:	$\phi_t = 0.1$
Evirici anahtarlama frekansı:	$f_i = 20kHz$
Doğrultucu anahtarlama frekansı:	$f_r = 20kHz$
Çıkış yük değeri:	$P_o = 30kW$

6.2.2.1 Eviricinin test edilmesi

Simülasyonda üç seviyeli evirici çıkışının en yakın üç vektör – uzay vektör modülasyonu ile üç fazlı dengeli gerilim çıkışı ürettiğini görebilmek için ilk olarak evirici bloğu tek başına çalıştırılmıştır. Eviricinin doğru gerilim barasına sabit gerilim kaynağı bağlanarak evirici çıkışı nominal yükte yüklenmiştir.

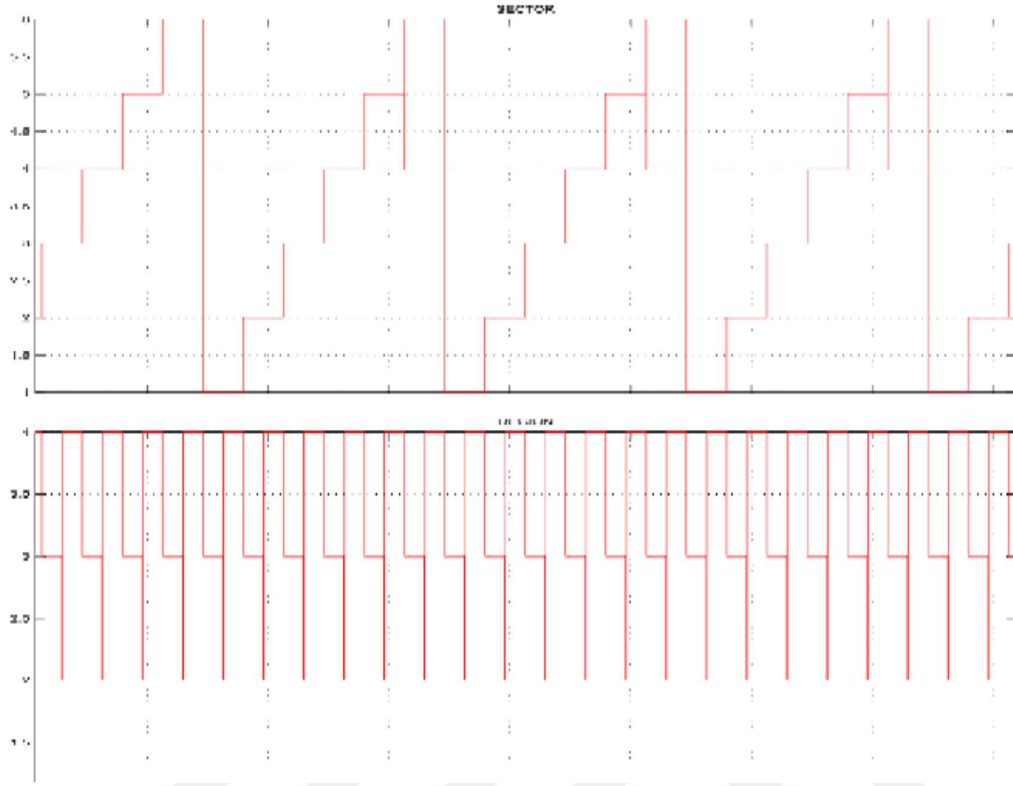
Şekil 6.55'te referans vektörün yer aldığı sektör bilgisi ve referans vektörün yer aldığı bölgeye ait bilgi verilmiştir. Referans vektörün konumu ve açısı zamana bağlı olarak sürekli değiştiği için şekildeki durum bilgileri de sürekli olarak değişmektedir. Eviricinin bir kolu üstündeki dört anahtara ait kapı sürme sinyalleri Şekil 6.56'da görüldüğü gibidir.

Şekil 6.57'de evirici çıkış çıkış terminallerinde meydana gelen üç seviyeli gerilim dalga şekilleri yer almaktadır. Burada her bir gerilim kademesi doğru gerilim barasının yarı değerindedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere üç kademeli gerilim dalga şekillerinde yüksek anahtarlama frekansları mevcuttur.

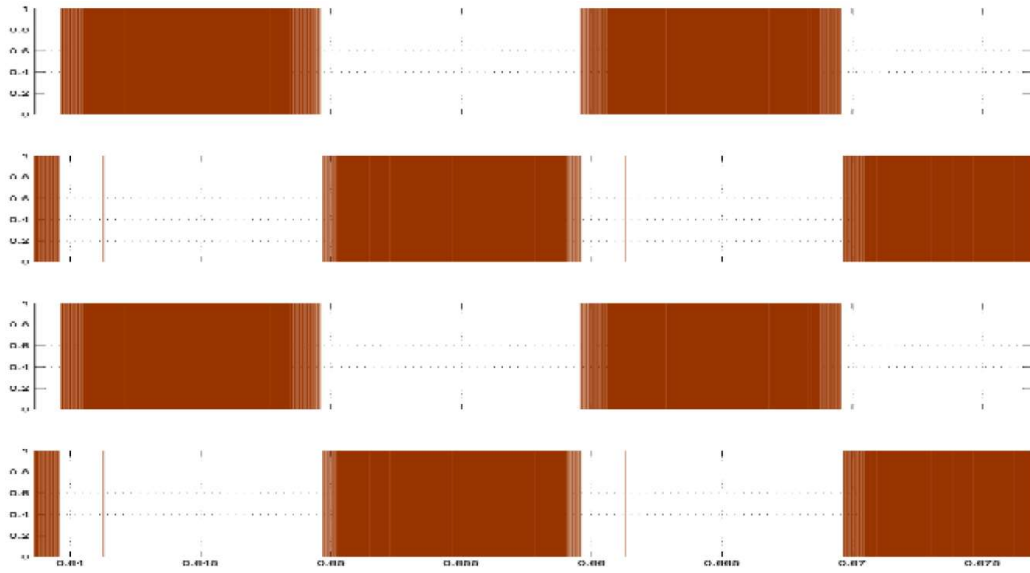
Evirici terminallerinde elde edilen gerilim dalga şeklini sinüs formuna sokmak için evirici çıkışında filtre kullanılmıştır. Filtre çıkışında elde edilen ve yüke aktarılan akım ve gerilim dalga şekilleri ise sırasıyla Şekil 6.58 ve Şekil 6.59'da yer almaktadır.

Evirici çıkışındaki filtreye ait akım ve gerilim değerleri sırasıyla Şekil 6.60 ve Şekil 6.61'de verilmiştir.

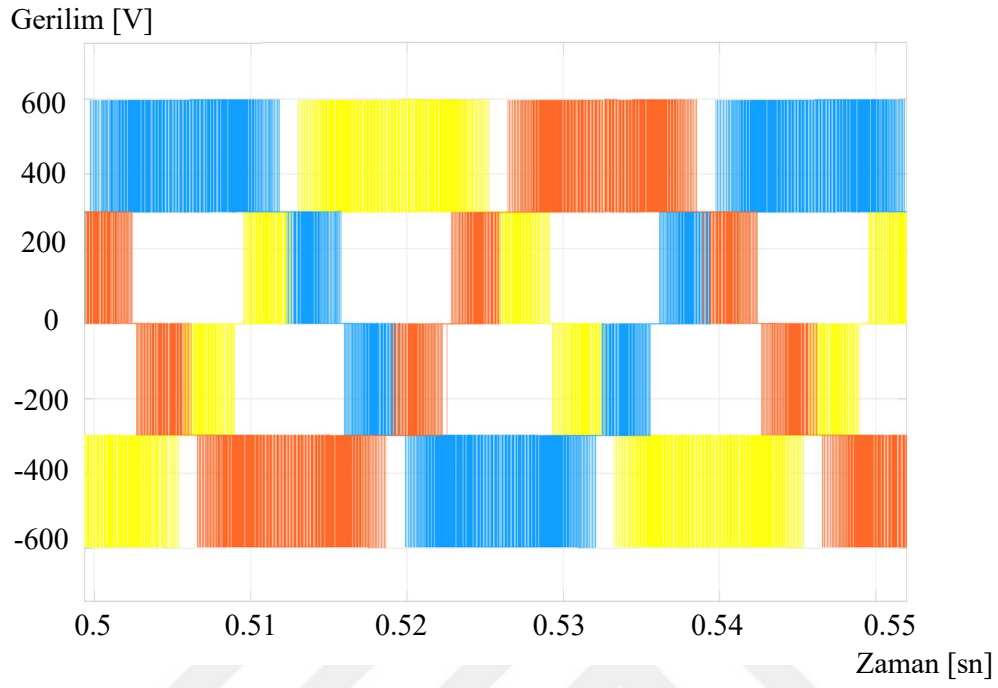
Doğru gerilim barasından çekilen akım ve yüke aktarılan anlık güç değeri Şekil 6.62 ve Şekil 6.63'te gösterilmektedir.



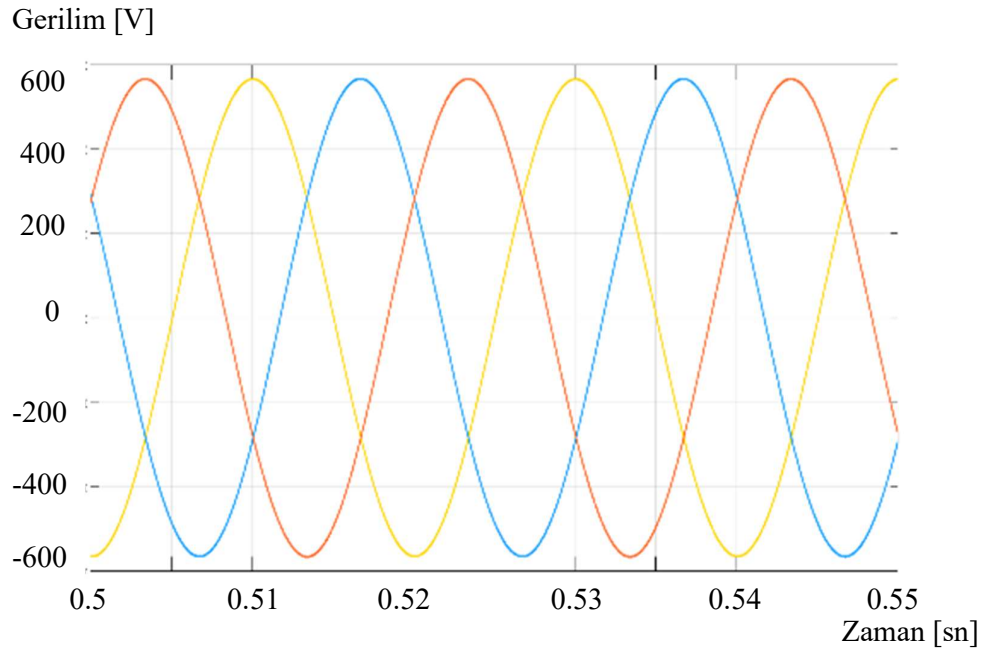
Şekil 6.55 : Referans gerilime ait sektör ve bölge durum bilgisi.



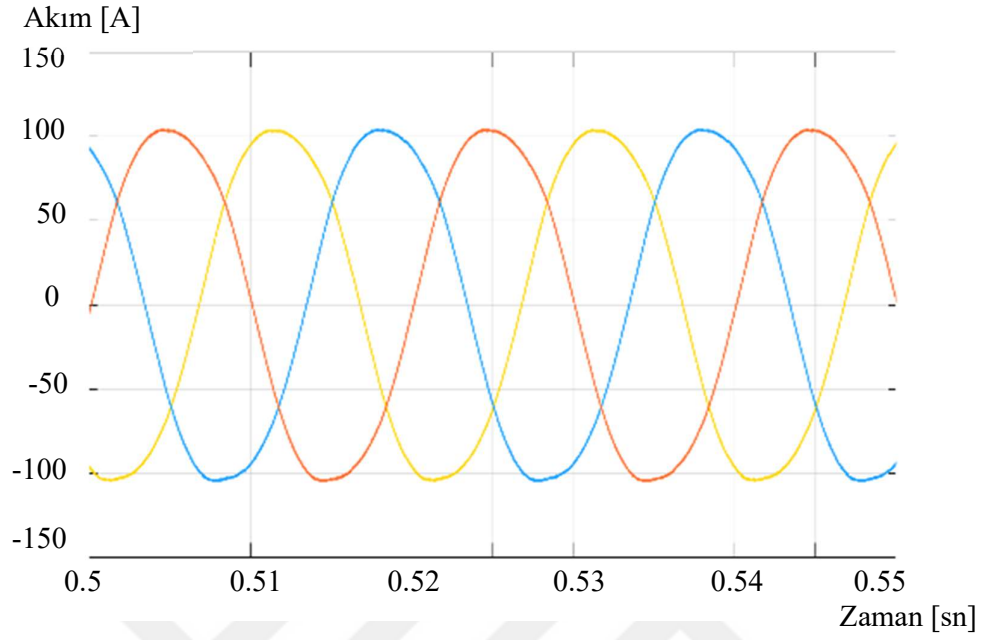
Şekil 6.56 : Evirici kapı sürme sinyalleri.



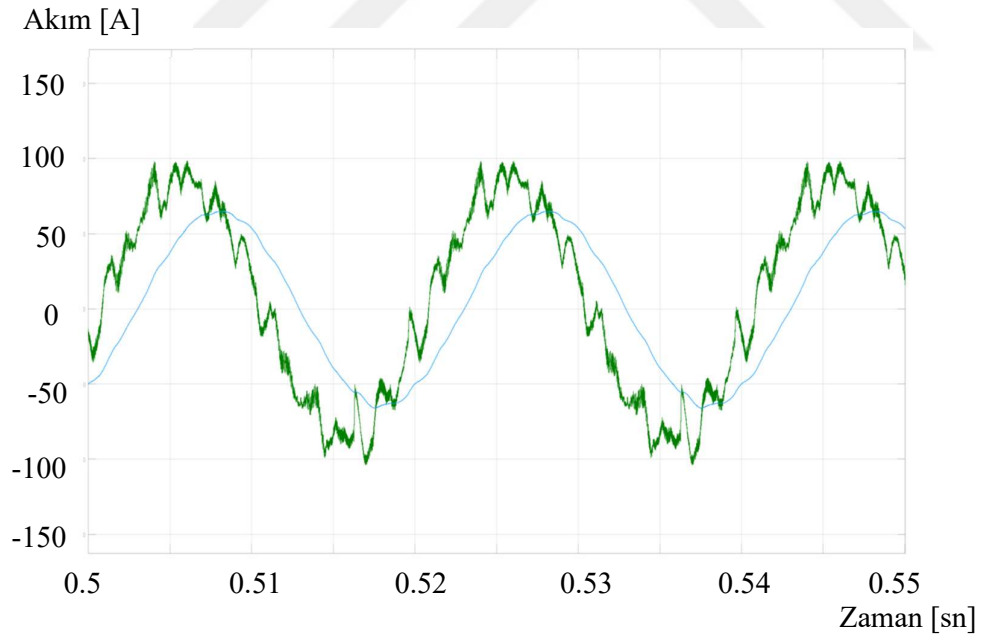
Şekil 6.57 : Evirici terminallerinden elde edilen üç faz gerilimleri.



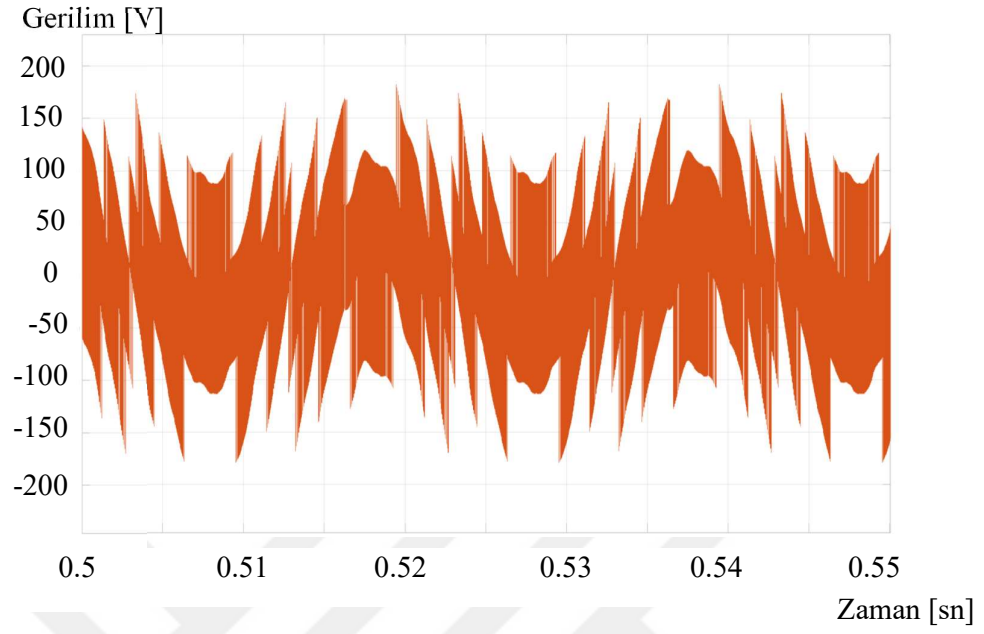
Şekil 6.58 : Yüke aktarılan faz arası gerilim dalga şekilleri.



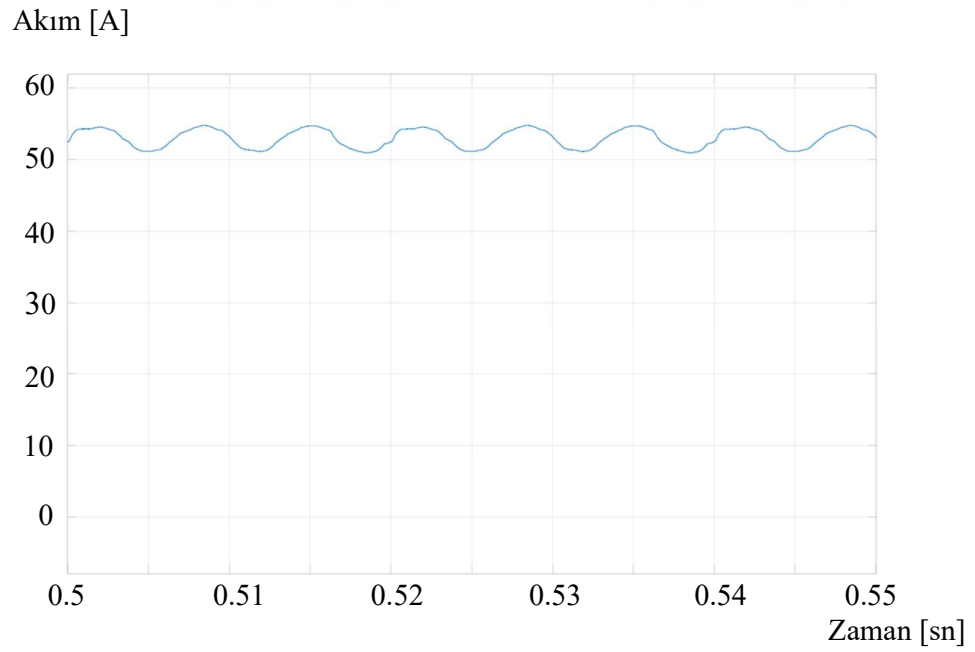
Şekil 6.59 : Yüke aktarılan faz akımı dalga şekilleri.



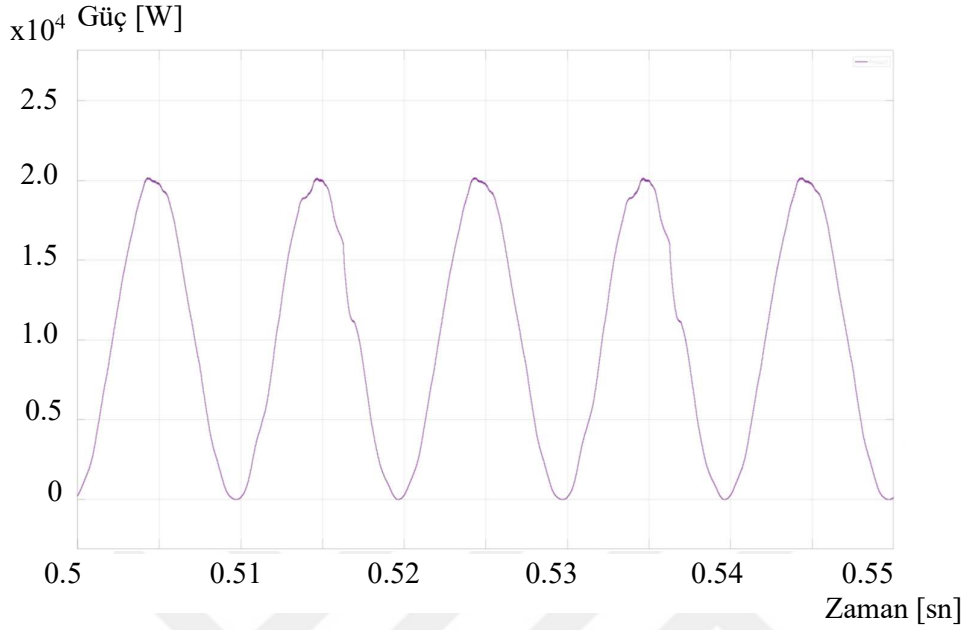
Şekil 6.60 : Evirici çıkışı filtre öncesi ve sonrası tek faz akımı.



Şekil 6.61 : Evirici çıkışındaki filtre üzerindeki gerilim.



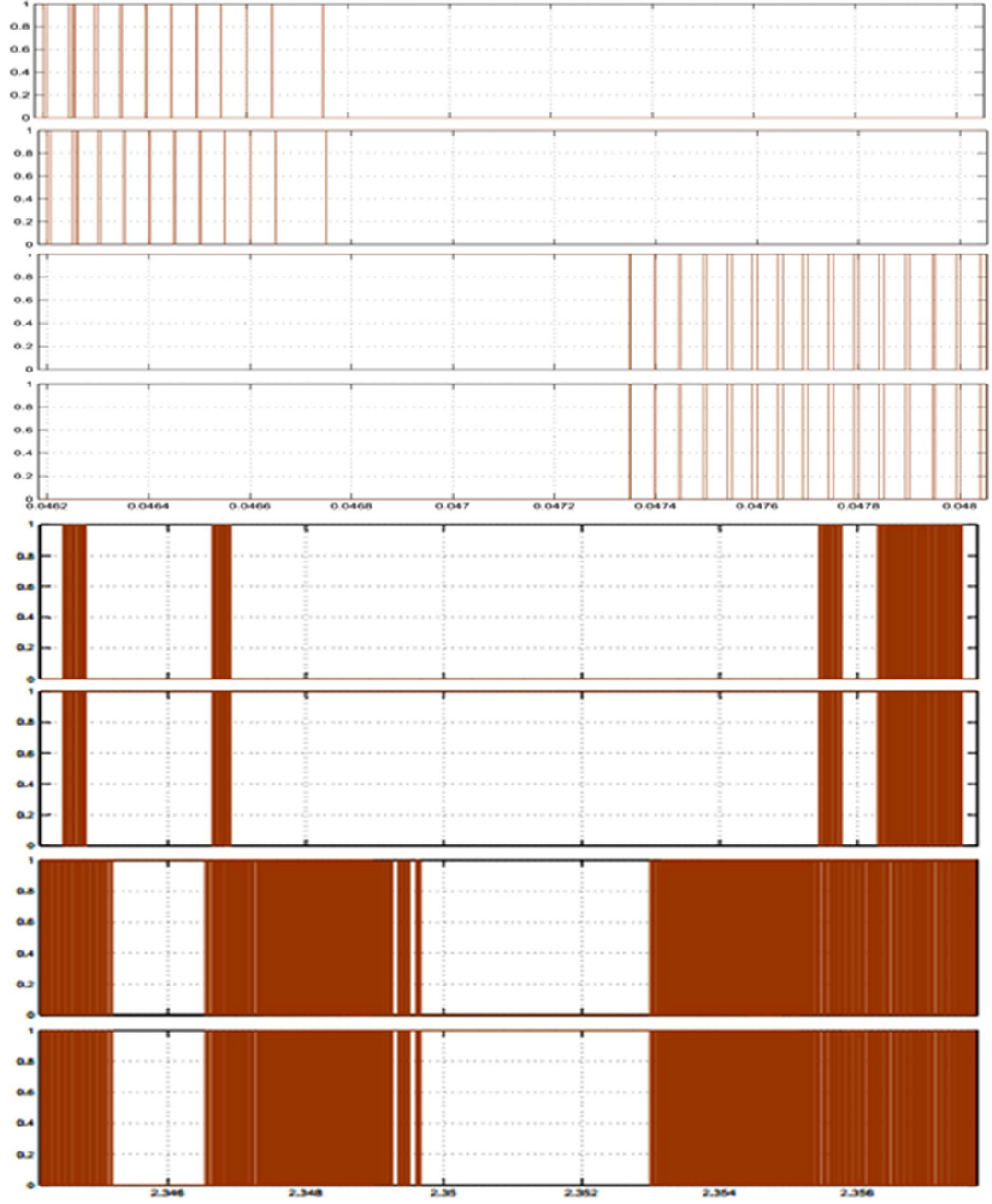
Şekil 6.62 : Doğru gerilim barasından çekilen akım dalga şekli.



Şekil 6.63 : Yüke aktarılan tek faz anlık çıkış gücü.

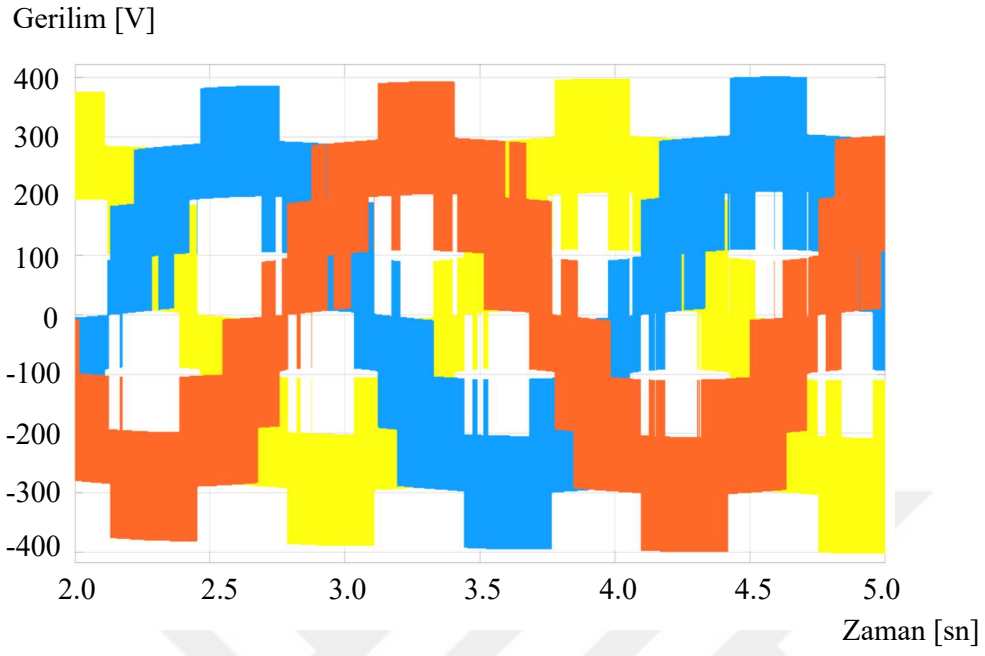
6.2.2.2 Doğrultucunun test edilmesi

Bir sonraki aşamada ise üç fazlı ve üç seviyeli aktif doğrultucu bloğu salınlımlı su kolonu çıkışındaki senkron generatöre entegre edilerek çalıştırılmıştır. Bölüm 5’de anlatıldığı üzere bu çalışmada üç seviyeli aktif doğrultucunun kontrolünde sinüzoidal darbe genlik modülasyonu kullanılmıştır. Aynı kol üzerindeki yarı iletken anahtarlara ait kapı sürme sinyallerine ilişkin dalga şekilleri farklı zaman aralıkları için Şekil 6.64’te verilmiştir.

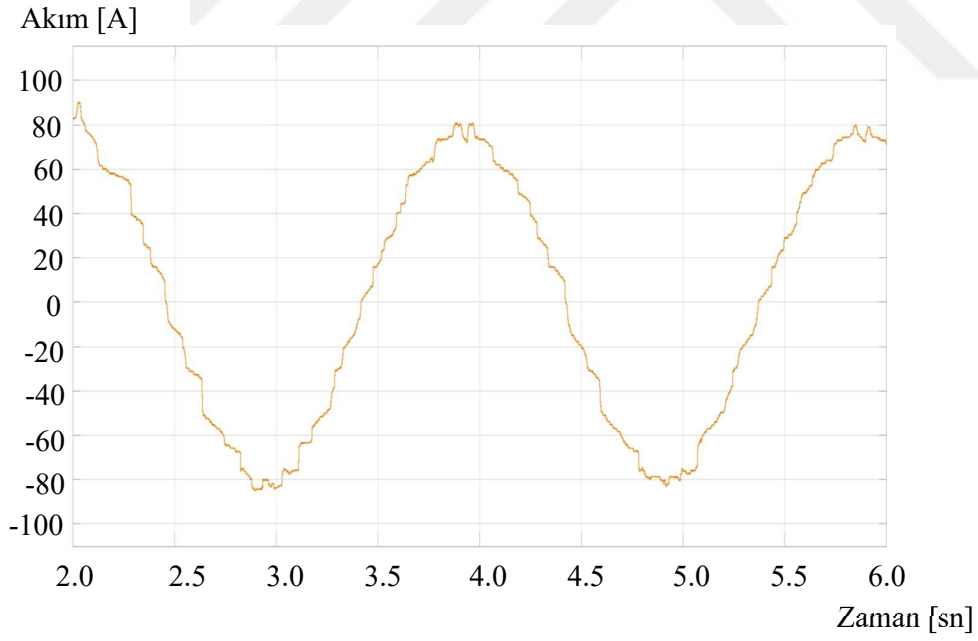


Şekil 6.64 : Doğrultucu kapı sürme sinyalleri.

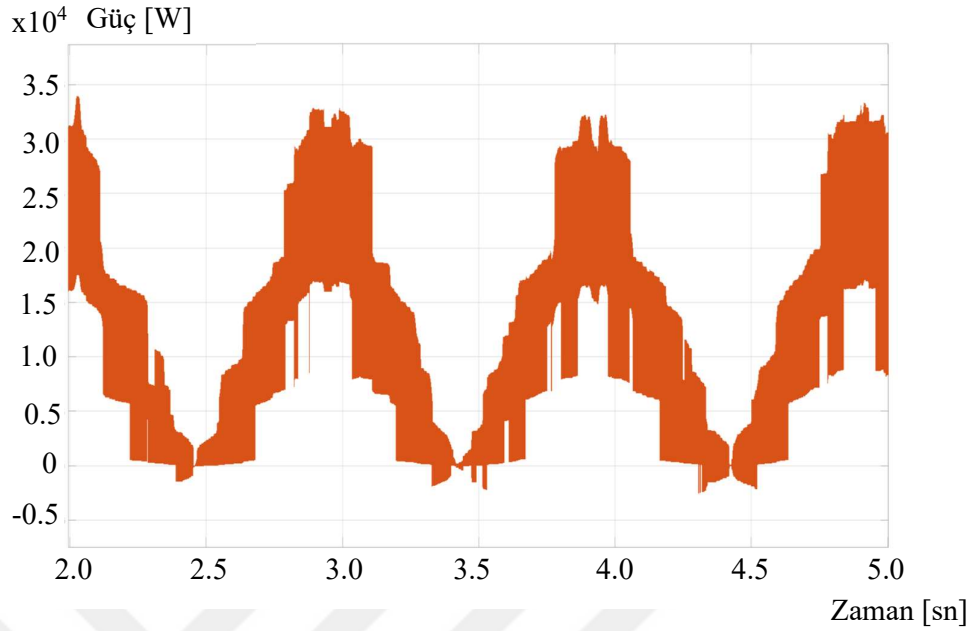
Salımlı su kolonu, Wells türbini, senkron generatör ve üç fazlı aktif doğrultucunun senkron şekilde çalışmasının incelenebilmesi için doğrultucu çıkışına (doğru akım terminallerine) 30kW'lık sabit direnç yükü uygulanmış ve benzetim modeli bu şekilde çalıştırılmıştır. Şekil 6.65'da doğrultucu girişinden çekilen faz-nötr gerilim dalga şekilleri görülmektedir. Doğrultucu girişinden çekilen tek faz akımı ve gücü sırasıyla Şekil 6.66 ve Şekil 6.67'de verilmektedir.



Şekil 6.65 : Doğrultucu üç faz giriş gerilim dalga şekilleri.



Şekil 6.66 : Doğrultucu giriş tek faz akımı.

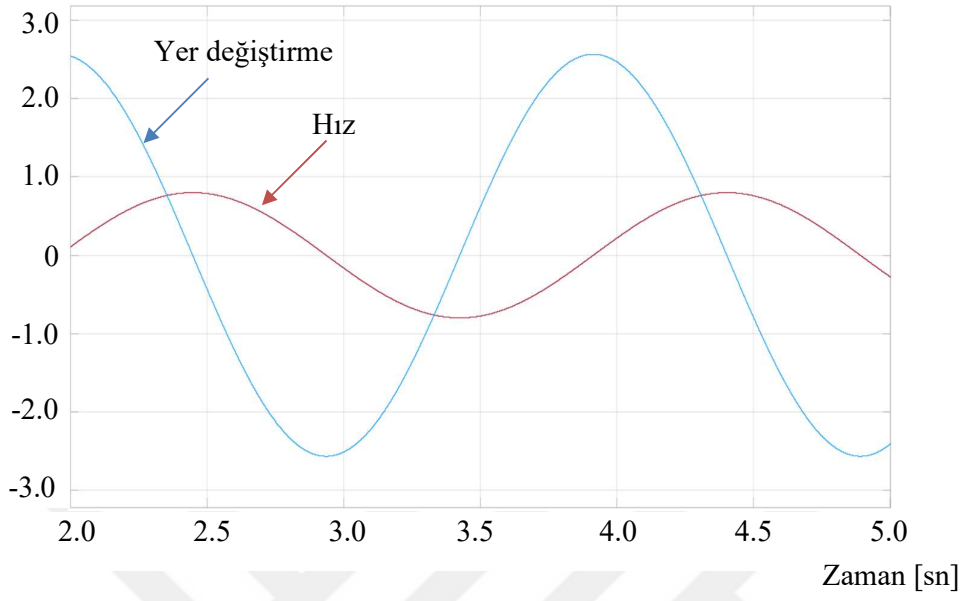


Şekil 6.67 : Doğrultucu girişinden çekilen anlık güç.

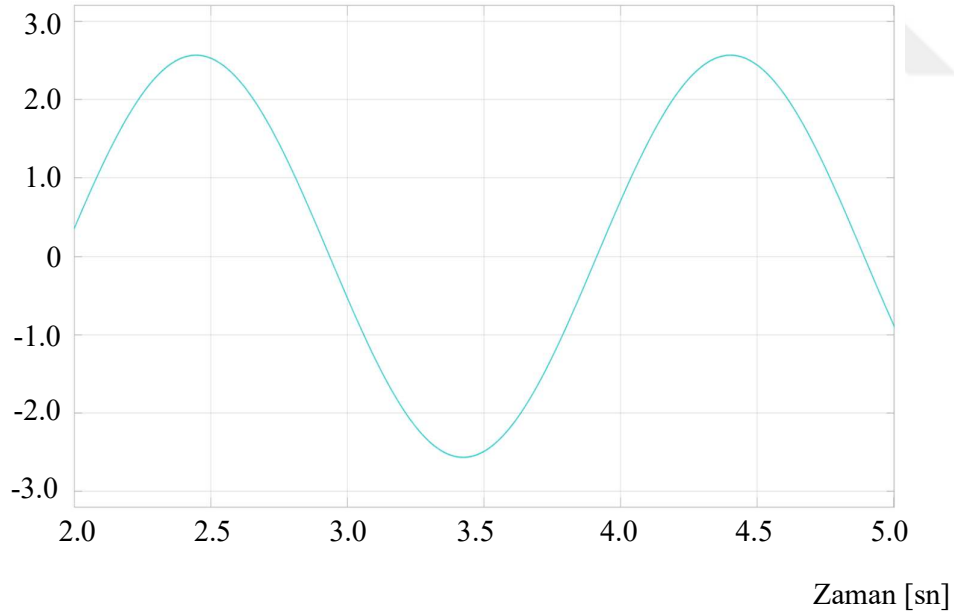
6.2.2.3 Salınlımlı su kolonu, wells türbini, senkron generatör, evirici ve doğrultucunun birarada test edilmesi

Son aşamada giriş parametreleri aynı kalmak üzere, salınlımlı su kolonu, Wells türbini, doğrultucu ve evirici blokları birbirine entegre edilerek sistem yeniden çalıştırılmış ve aşağıdaki dalga şekilleri elde edilmiştir. Şekil 6.68’de salınlımlı su kolonu içerisinde hareket eden su dalgasının yer değiştirmesi ve hız eğrileri gösterilmiştir.

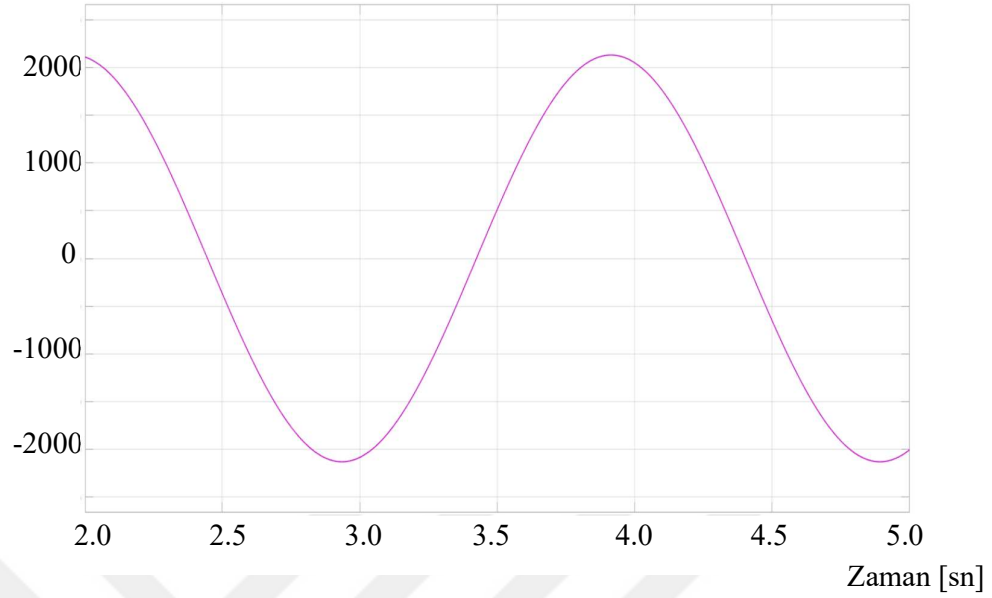
Şekil 6.69’da salınlımlı su kolonu içerisinde hareket eden havanın hız dalga şekli verilmiştir. Burada görüldüğü üzere dalga hızı ile su kolonu içerisindeki hava hızı birbirleriyle aynı fazda hareket ederler. Şekil 6.70’de ise Wells türbini kanat uç hızının zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. Burada Wells türbini ile senkron generatör arasındaki kuplaj 1:1 olarak kabul edildiği için senkron generatör Wells türbini ile aynı hızda dönmektedir.



şekil 6.68 : Salınımlı su kolonu içerisinde hareket eden dalgaya ait hız ve yer değiştirme dalga şekilleri.

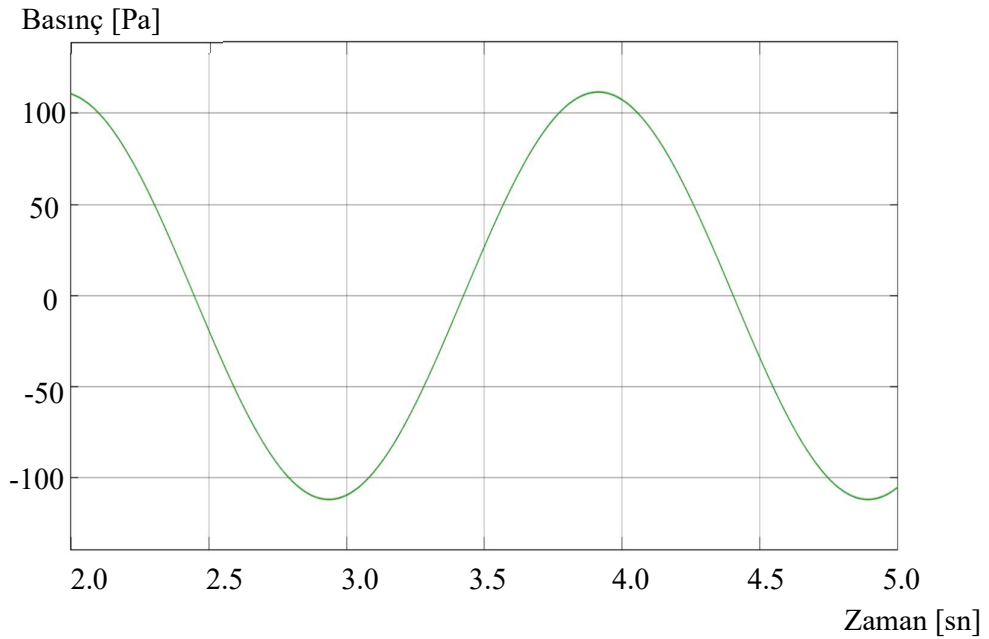


şekil 6.69 : Salınımlı su kolonu içerisinde hava hızının zamana bağlı değişimi.



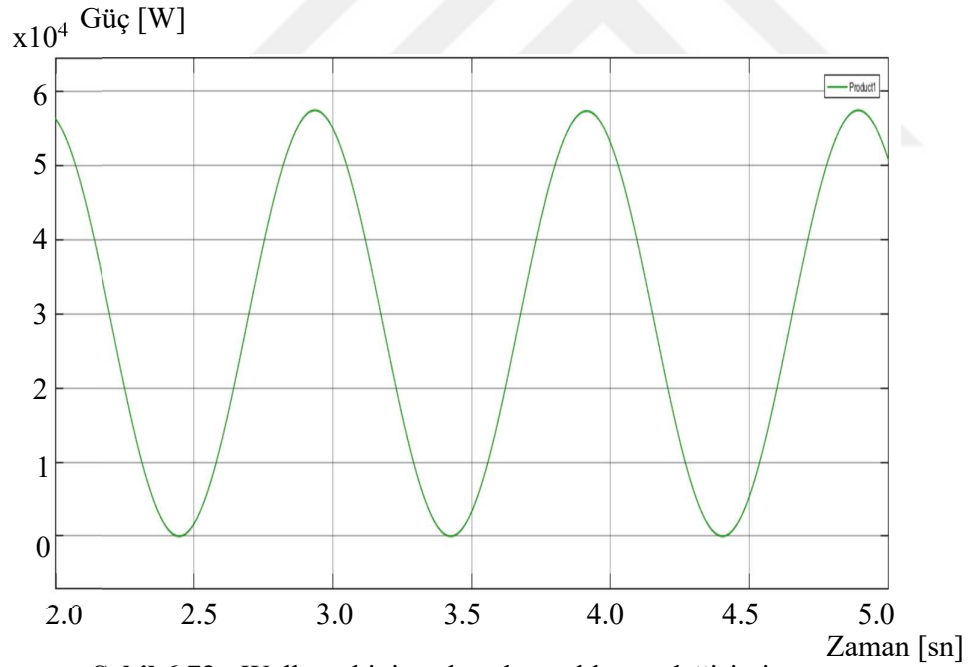
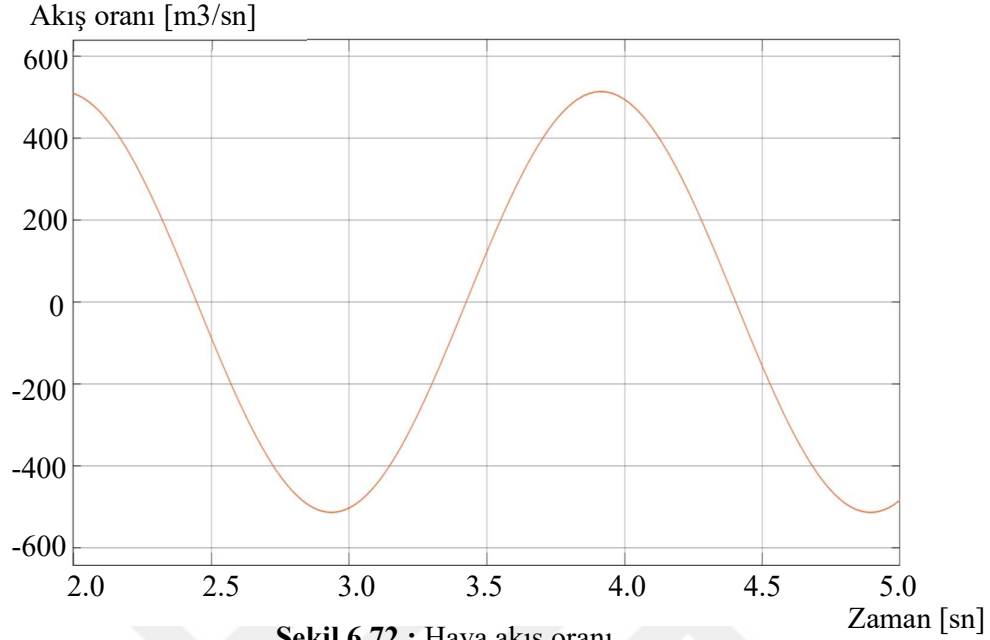
Şekil 6.70 : Wells türbini hızının zamana bağlı değişimi.

Şekil 6.71 ve Şekil 6.72’de sırasıyla salınlı su kolonu hava haznesinden Wells türbinine aktarılan basıncın zamana bağlı değişimi ve Wells türbininin bulunduğu hava aralığında meydana gelen hava akış oranı gösterilmektedir.

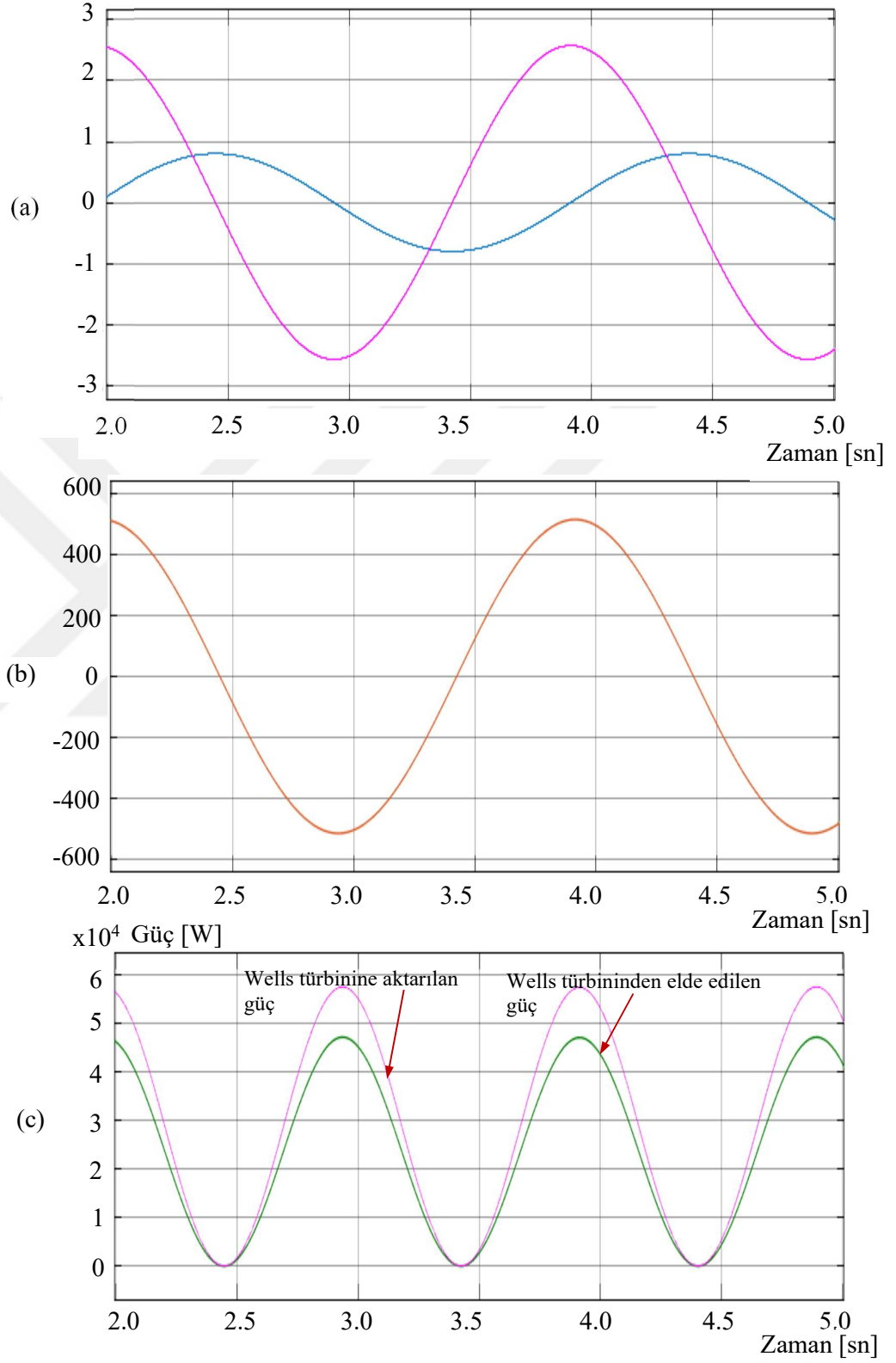


Şekil 6.71 : Wells türbinine aktarılan basınç dalgası.

Şekil 6.73’te Wells türbinine aktarılan gücün zamana bağlı anlık Simülasyonda anlık güç değerinin elde edilmesinde salınlı su kolonu içerisinde meydana gelen ısı kayıpları ve su yatağında meydana gelen sürtünme kayıpları ihmal edilmiştir.

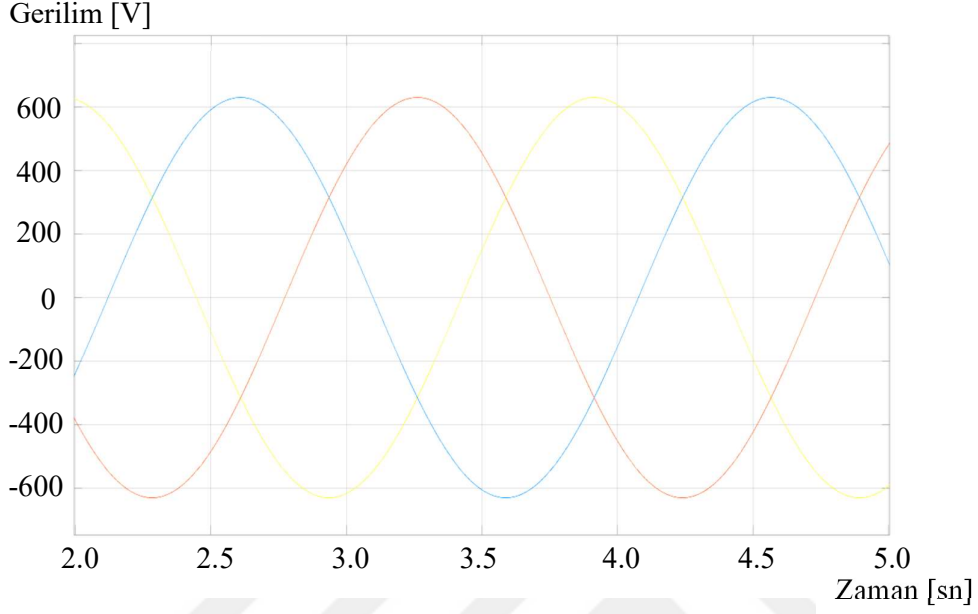


Şekil 6.74’te salınlımlı su kolonu içerisinde hareket eden dalganın yer değiştirmesi, dalganın hızı, hava akış oranı ve Wells türbinine aktarılan güç dalga şekilleri tekrar bir arada verilmiştir. Şekilde aynı zamanda Wells türbini çıkışından elde edilen güç değeri de görülmektedir.

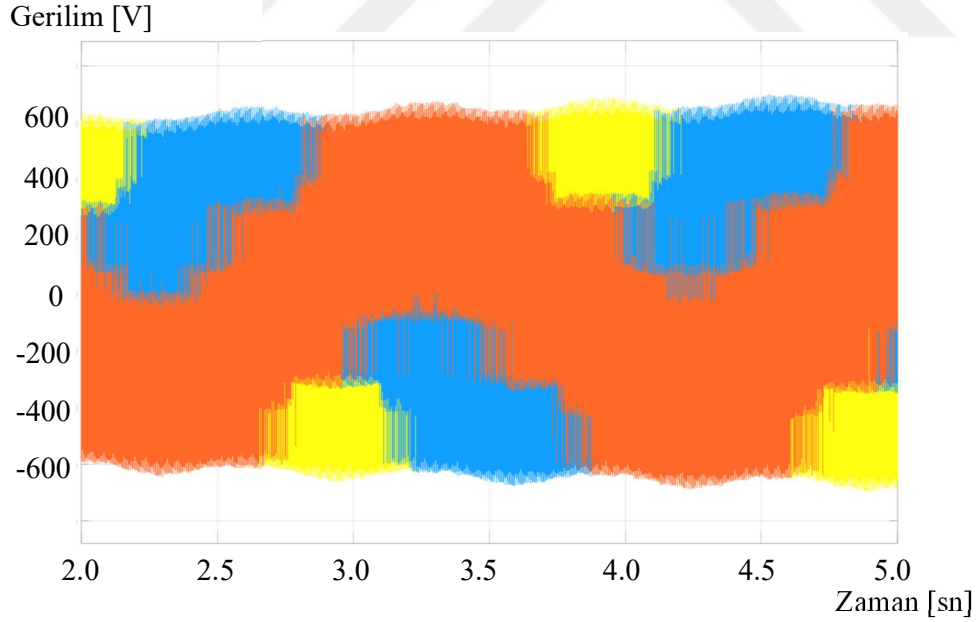


Şekil 6.74 : (a) Dalganın hızı ve dalganın yer değişimi. (b) Akış oranı. (c) Türbine aktarılan güç ve türbin çıkışından elde edilen güç dalgaları.

Senkron generatöre endüklenen faz-nötr gerilim dalga şekilleri ve doğrultucu giriş faz-nötr gerilim dalga şekilleri sırasıyla Şekil 6.75 ve Şekil 6.76’da verildiği gibidir.



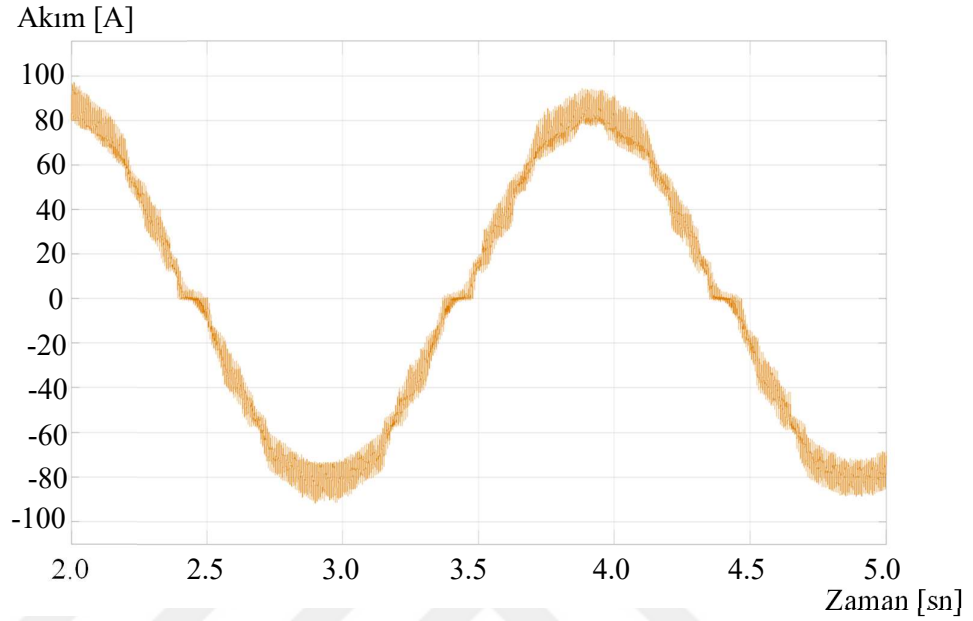
Şekil 6.75 : Generatöre endüklenen üç faz gerilim dalga şekli.



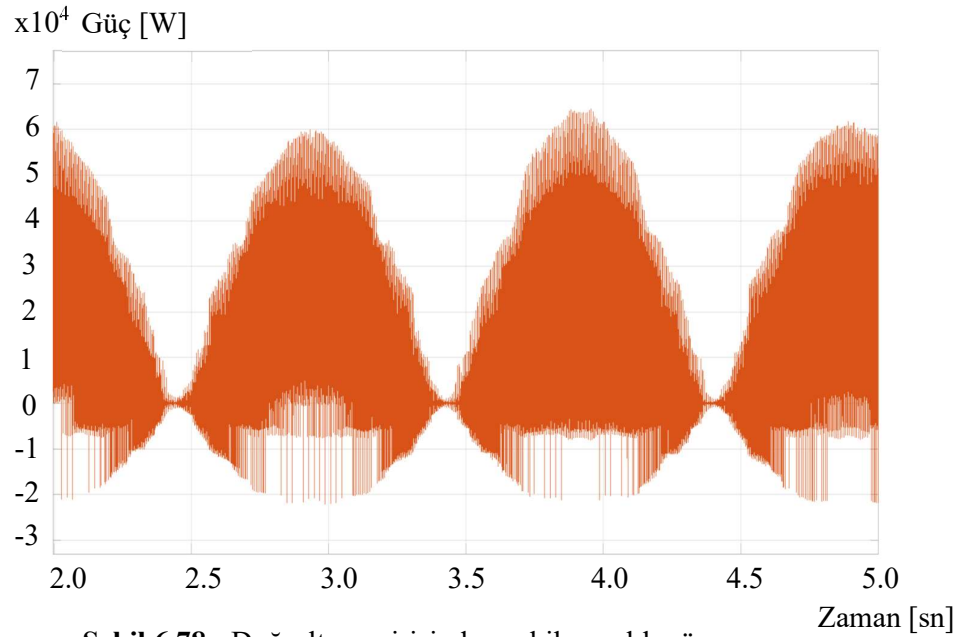
Şekil 6.76 : Doğrultucu üç faz giriş gerilim dalga şekilleri.

Üç seviyeli doğrultucu girişindeki faz-nötr gerilim dalga şekilleri Şekil 6.76’da görülmektedir. Şekil 6.65 ile kıyaslandığında gerilim dalga şekli üzerinde sistemde çıkış eviricisindeki yüksek anahtarlardan kaynaklanan yüksek frekans bileşenleri olduğu görülmektedir. Benzer şekilde doğrultucu girişinden çekilen tek faz akımında

da, Şekil 6.66 ile kıyaslandığında, yüksek frekans bileşenleri olduğu görülmektedir. Doğrultucu tek faz girişi akımı Şekil 6.77’de verilmiştir.

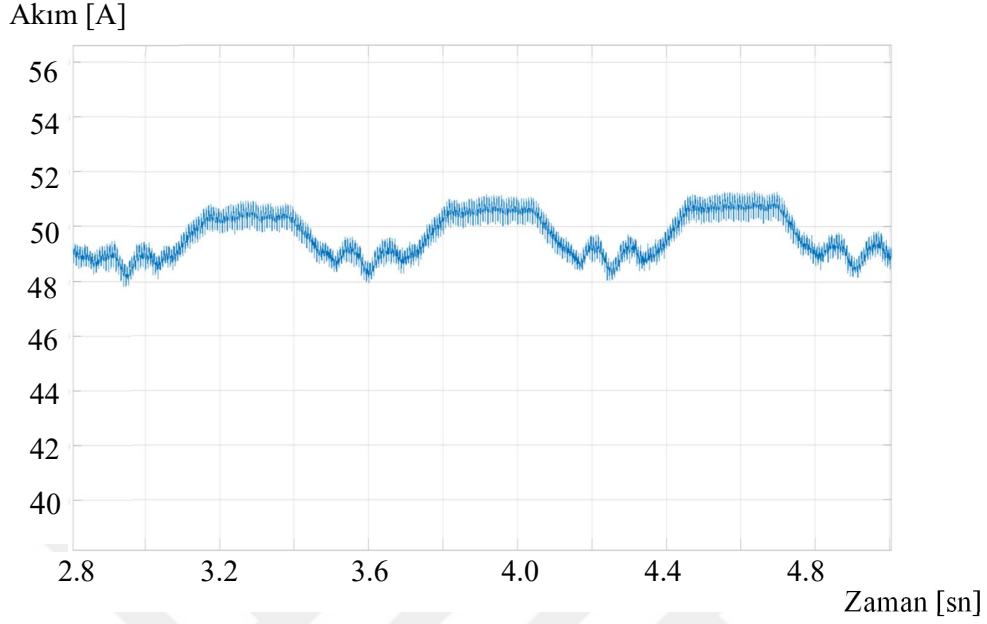


Şekil 6.77 : Doğrultucu giriş tek faz akımı.

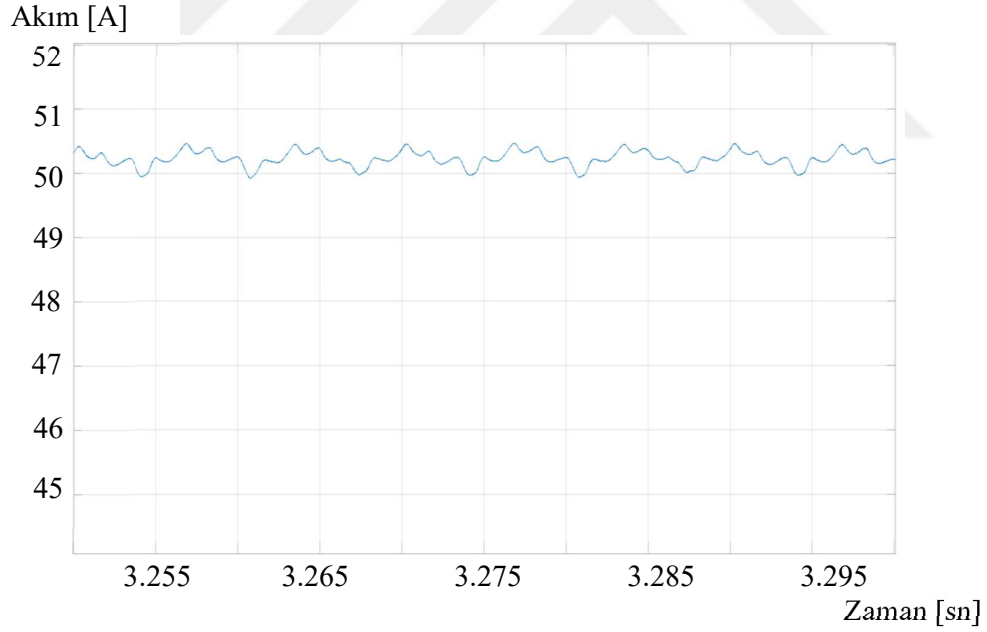


Şekil 6.78 : Doğrultucu girişinden çekilen anlık güç.

Şekil 6.78’de ise doğrultucu girişinden çekilen tek faz anlık güç dalga şekli görülmektedir. Beklendiği üzere güç ortalama ve maksimum değerleri aynı kalırken güç dalga şekli üzerindeki yüksek frekans bileşenleri akım ve gerilim dalga şekillerinde meydana gelen harmoniklerden ötürü artmaktadır.

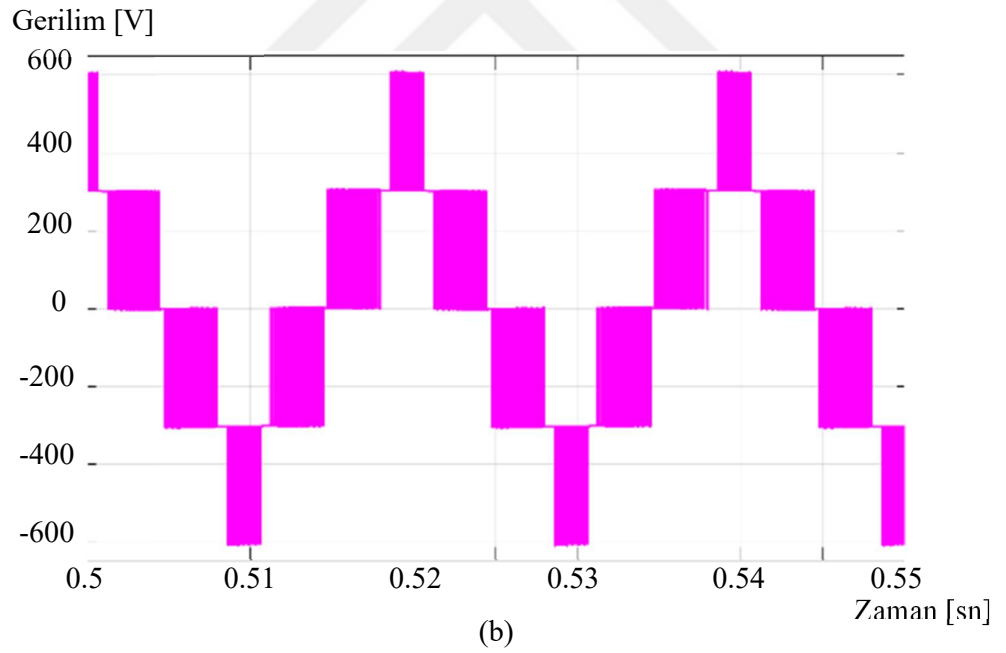
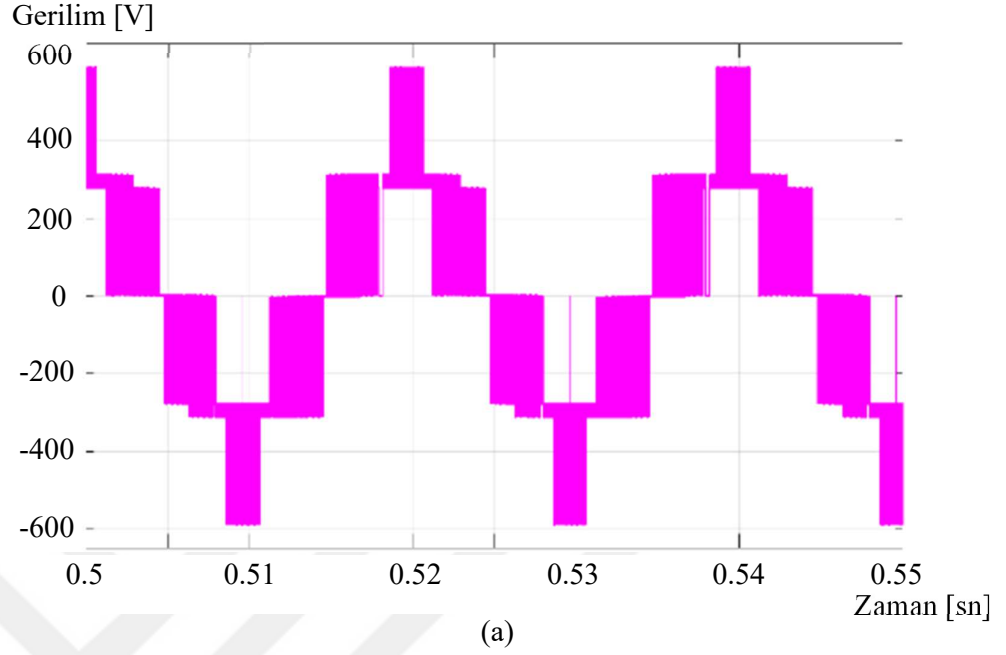


Şekil 6.79 : Doğru gerilim barasından çekilen akım dalga şekli.



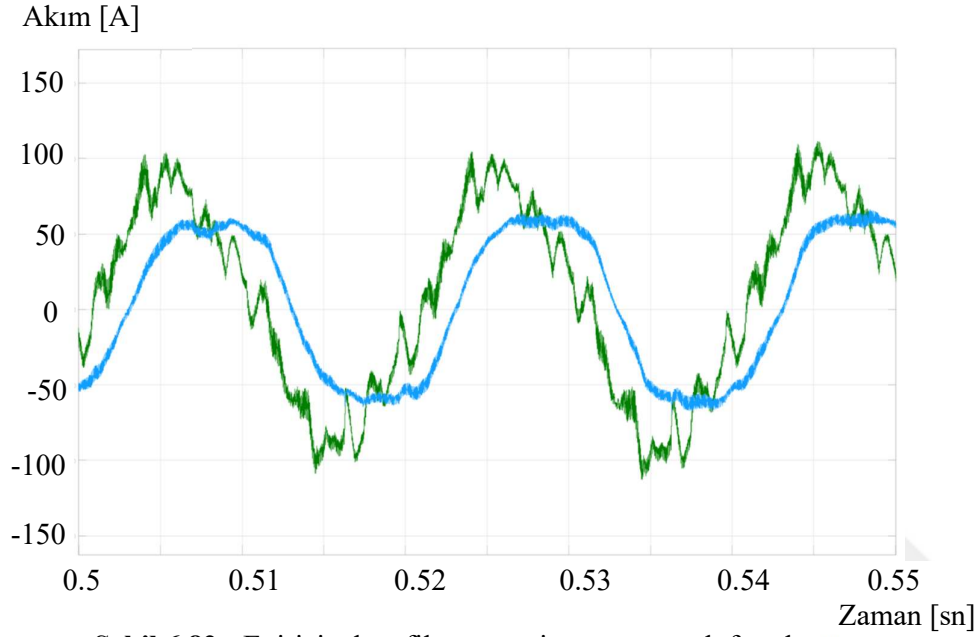
Şekil 6.80 : Doğru gerilim barasından çekilen akım dalga şekli.

Şekil 6.79 ve Şekil 6.80’de doğru gerilim barasından çekilen doğru akımın farklı zaman aralıklarındaki dalga şekli görülmektedir. Şekil 6.62 ile kıyaslandığında akım dalgalılık oranının yaklaşık %7 oranında azaldığı görülmüştür.

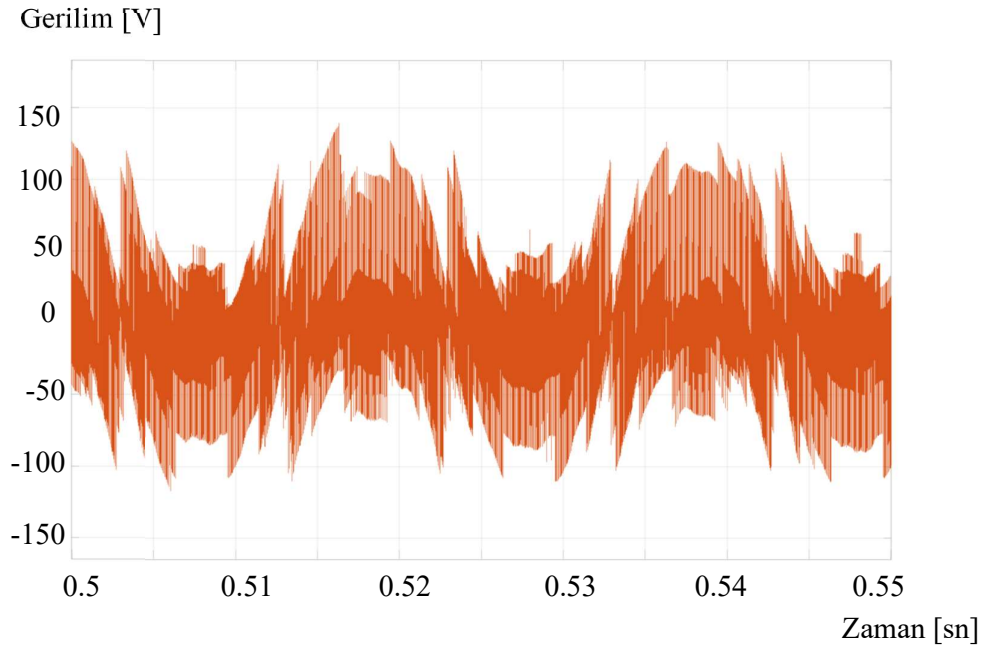


Şekil 6.81 : Evirici terminallerinden elde edilen faz gerilimleri (filtresiz). (a) Doğru bara dengeleme yöntemi aktif duruma getirilmeden önce. (b) Doğru bara dengeleme yöntemi aktif duruma getirildikten sonra.

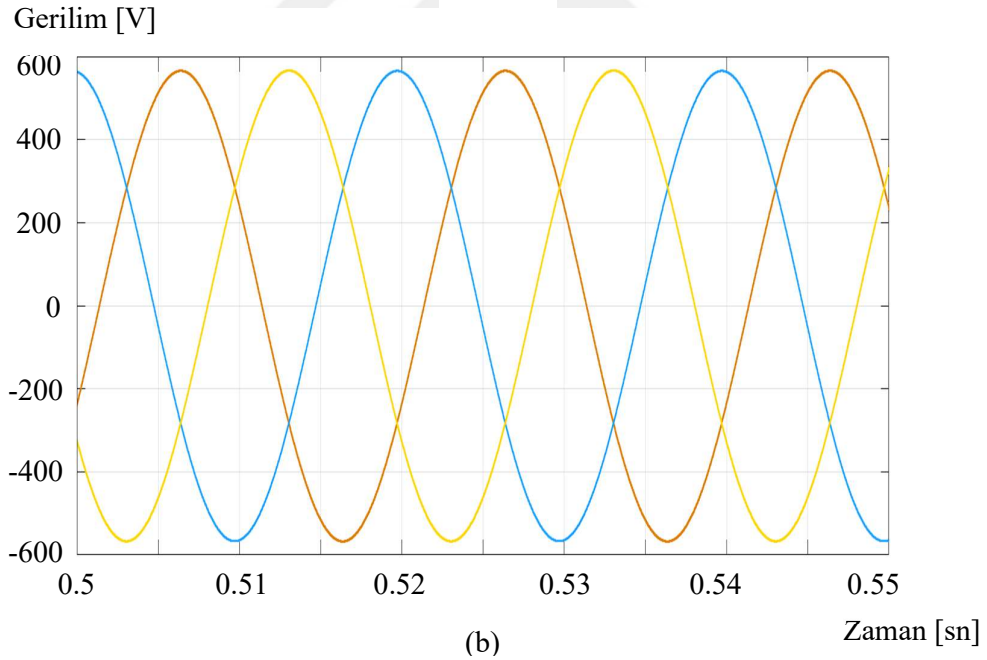
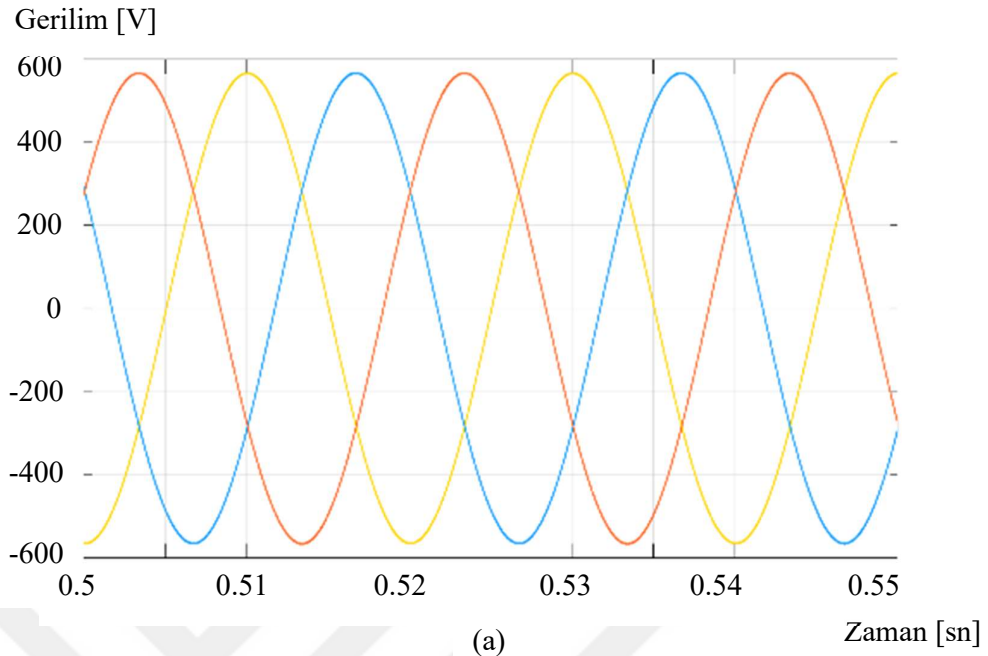
Şekil 6.81’de görüldüğü üzere doğru bara gerilim dengeleme yöntemi aktif hale getirildikten sonra evirici çıkış terminaline endüklenen gerilim dalga şeklindeki bozulmalar düzeltilmektedir. Evirici çıkış terminallerine bağlı filtreden çekilen akım ve filtre üzerinde meydana gelen gerilim düşümü ise sırasıyla Şekil 6.82 ve Şekil 6.83’te yer almaktadır.



Şekil 6.82 : Evirici çıkışı filtre öncesi ve sonrası tek faz akımı.

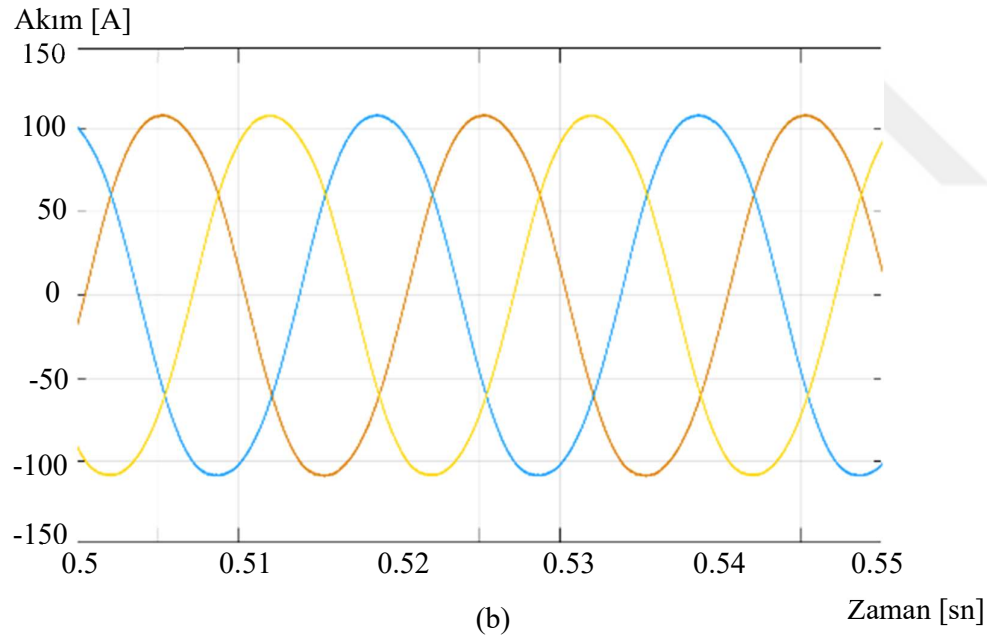
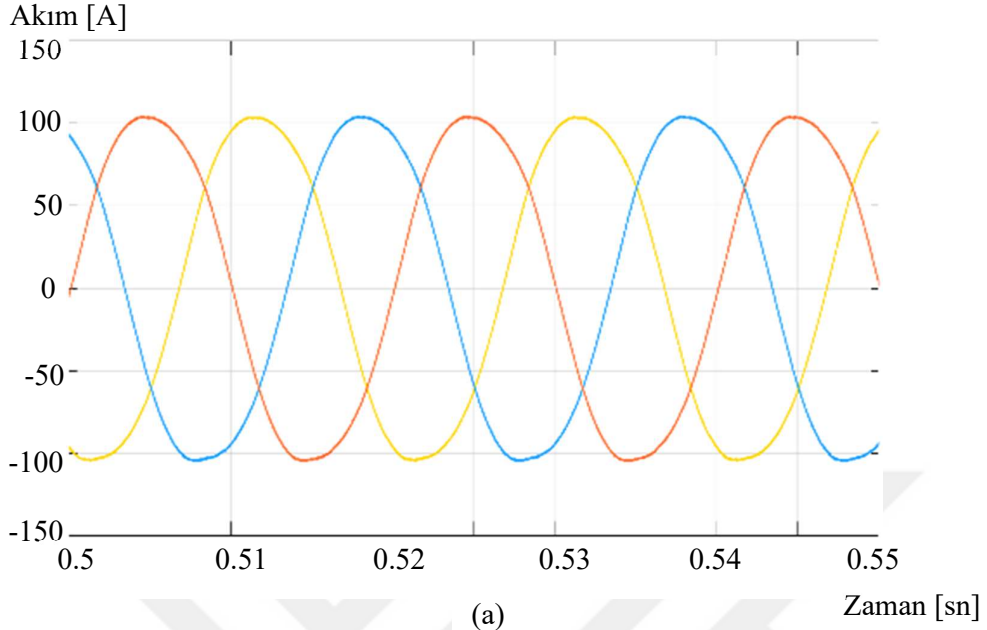


Şekil 6.83 : Evirici çıkışındaki filtre üzerindeki gerilim.



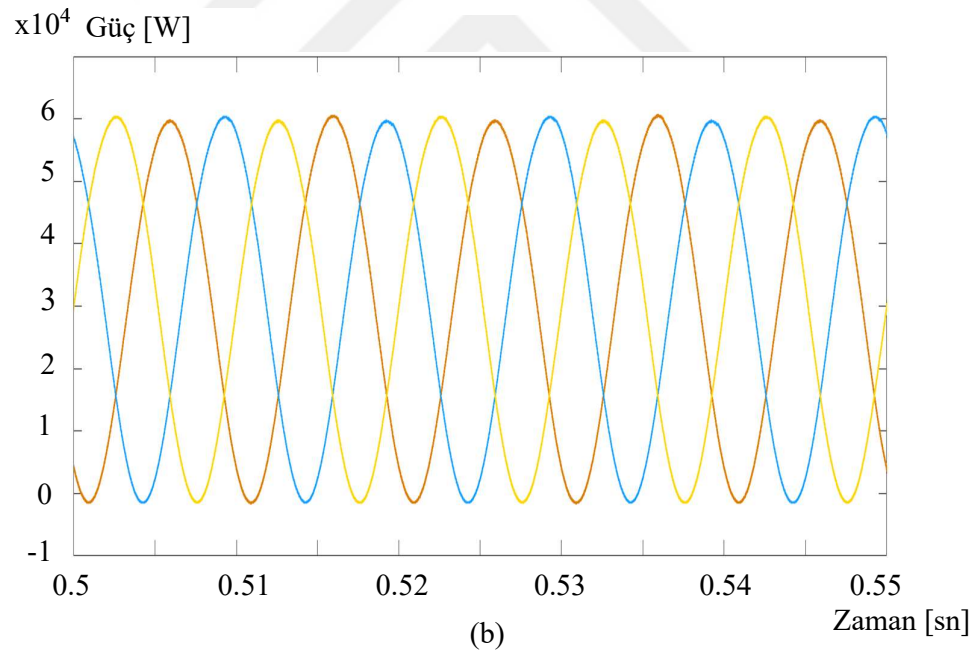
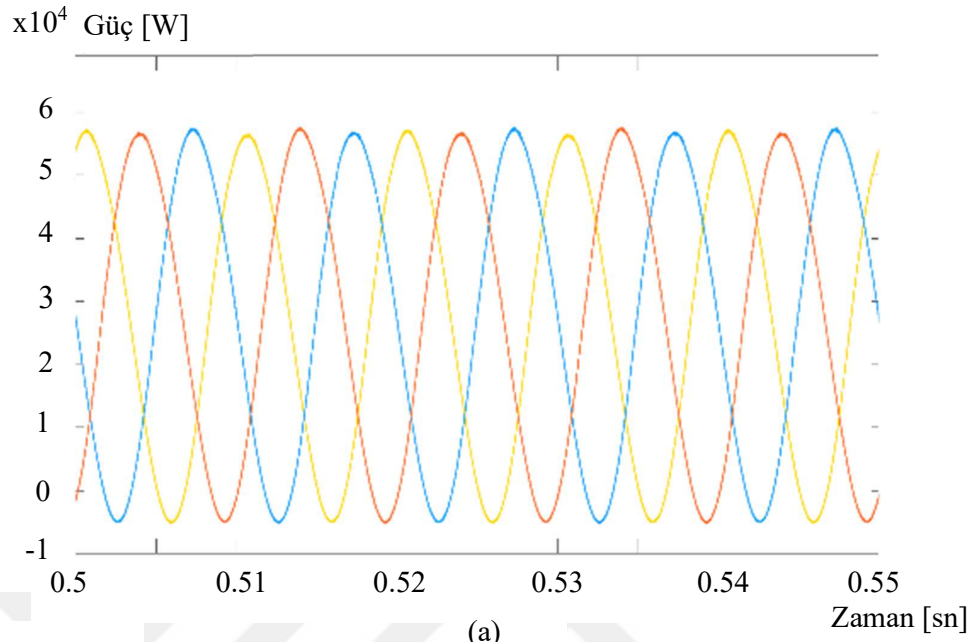
Şekil 6.84 : Yüke aktarılan faz arası gerilim dalga şekilleri. (a) Rezistif yük durumunda. (b) Endüktif yük durumunda.

Şekil 6.84 ve Şekil 6.85’te aktif ve reaktif yük durumlarında çıkıştaki yüke (şebekeye) aktarılan gerilim dalga şekilleri ve yük tarafından çekilen akım dalga şekilleri verilmektedir. Şekil 6.58 ile kıyaslandığında, sistemin gerilim kaynağı olarak çalışması nedeniyle, çıkış gerilim dalga şeklinin sinüs formunu koruduğu görülmektedir. Ancak çıkışta çekilen akımda özellikle aktif yük durumunda harmonikler meydana geldiği görülmektedir.



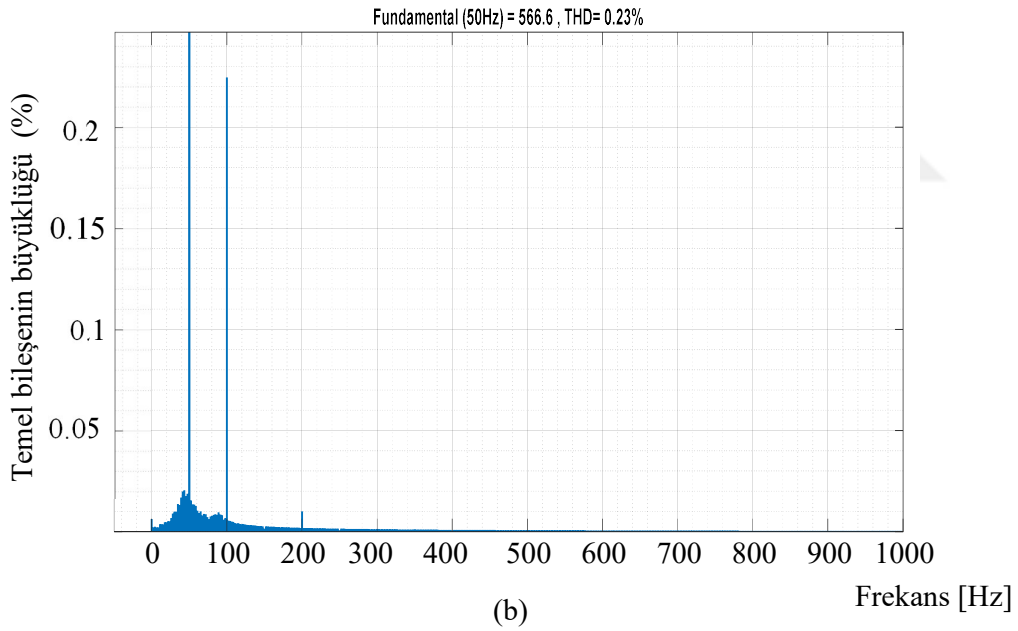
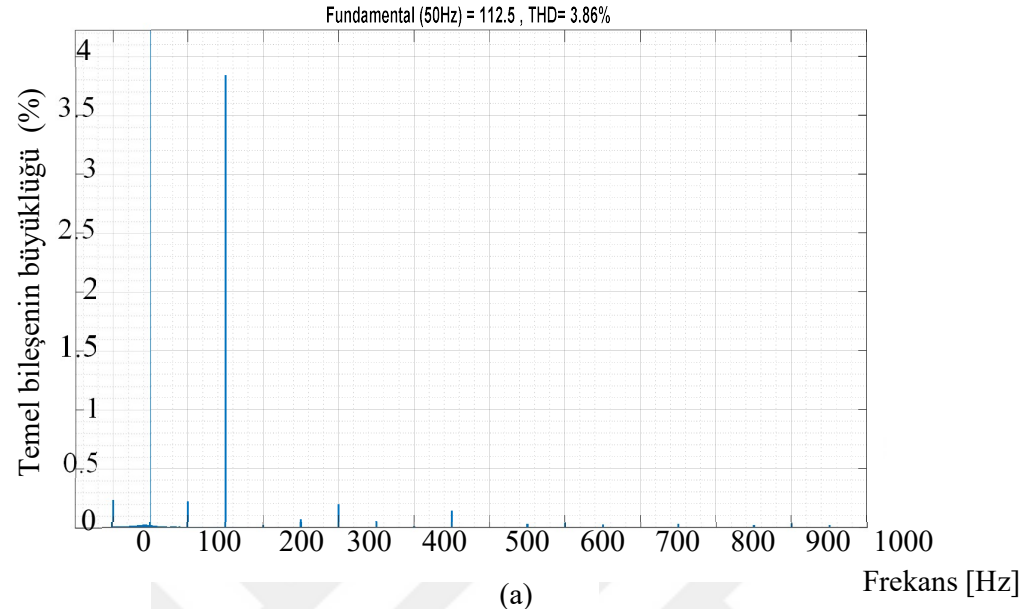
Şekil 6.85 : Yüke aktarılan faz akımı dalga şekilleri. (a) Rezistif yük durumunda. (b) Endüktif yük durumunda.

Şekil 6.86’da çıkış anlık gücü rezistif ve endüktif yük durumları için verilmiştir. Şekil 6.63 ile kıyaslandığında güç ortalama ve tepe değerlerinin aynı kaldığı görülmektedir. Senkron generatör terminallerinde üretilen gerilimin genliğinin ve frekansının değişken olmasına ve akımın süresiz olmasına rağmen, çıkış sürekli güç elde edildiği görülmektedir.



Şekil 6.86 : Yüke aktarılan anlık çıkış gücü. (a) Rezistif yük durumunda. (b) Endüktif yük durumunda.

Reaktif yük için çıkış akım ve gerilim harmonik spektrumları sırasıyla Şekil 6.87 (a) ve Şekil 6.87 (b)'de sunulmuştur. Şekil 6.87 (a)'da görüldüğü gibi, akım dalga formu üçüncü harmonik bileşeni içerir. Ancak tüm tekil akım harmonik bileşenleri ve akım ve gerilim toplam THD değerleri (akım THD: %3,86, gerilim THD: %0,23) IEEE 519 standardında açıklanan sınırların altındadır [86].



Şekil 6.87 : (a) Evirici çıkış akımı, (b) Evirici çıkış gerilimi harmonik spektrumları.

7. SONUÇLAR

Okyanus dalgalarının yüksek enerji potansiyeline sahip oldukları bilinen bir konudur. Son yıllarda, dünyadaki enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla yapılan çeşitli araştırmalar içinde yer alan deniz enerjisinden yararlanma fikri pek çok bilim insanının ilgisini çeken bir konu olmakla birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimi doğrultusunda da çok büyük bir önem taşımaktadır.

Bu tez çalışmasında ilk olarak okyanus sularından enerji elde etmek üzere kullanılan ya da önerilen yöntemler incelenmiş ve günümüze kadar gelen farklı enerji üretim sistemleri tanıtılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda çalışma konusunun, okyanus enerjisinden elektrik enerjisi üretiminde en verimli yöntemlerinden biri olan, dalga enerjisinden elektrik enerjisi üretimi yöntemine dayandırılmasına karar verilmiştir.

Araştırmalar dalga enerjisinden elektrik enerjisi üretmek için Bölüm 2’de anlatıldığı üzere çeşitli yöntemler olduğunu ve bu yöntemlerin pek çoğunda tasarlanması nisbeten daha kolay, ancak sürekli bakım gerektiren ve güç üretimi kapasitesi ve güvenilirliği düşük olan şamandıra sisteminin kullanıldığını göstermiştir. Bu tez çalışmasında ise tasarımı diğer yöntemlere göre karmaşık olan ancak güç üretim kapasitesi daha yüksek, daha az bakım gerektiren ve gerektiğinde bakımının kolay yapılabilirdiği salınlımlı su kolonu (OWC) yöntemi kullanılmıştır. Kıyı şeridinde çalıştığı kabul edilen ve yere sabit olarak tasarlanan salınlımlı su kolonunun daha az bakım gerektirmesi önemli bir avantajdır. Aynı zamanda kıyı şeridinde olması nedeniyle bakımı kolay yapılabilmekte ve şebeke hattına enerji taşıma kayıpları düşük olmaktadır.

Dalga enerjisinden elektrik enerjisi üretimi yöntemi belirlendikten sonra, dalga enerjisi dönüşüm sistemi ile şebeke arasında kullanılabilecek iki kademeden oluşan elektriksel enerji dönüşüm sistemleri araştırılmış literatürdeki çok seviyeli çeviriciler arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, türbin/generatör grubunun çıkışında diğer çok seviyeli çevirici topolojilerine oranla daha az sayıda yarı iletken anahtar içermesi ve sistem maliyetinin daha düşük olması nedeniyle üç seviyeli,

ortadan diyot kenetlemeli aktif doğrultucu (3L-AFE) ve üç seviyeli, ortadan diyot kenetlemeli evirici (3L-NPC) kullanılması uygun görölmüştür.

Bölüm 1.1’de sunulan amaçlar ve hedefler doğrultusunda bu çalışma aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır.

Dalga hareketi:

İlk olarak dalga hareketinin matematiksel analizi yapılmış ve deniz derinliğine (derin sular, orta derinlikteki sular, sığ sular), mevsimlere ve bölgelere bağılı olarak dalga karakteristiklerinin nasıl değıştiğı incelenmiştir. İncelemeler sonucunda orta derinlikteki su karakteristiklerinin kullanılmasına karar verilmiştir.

Salınımlı su kolonu:

Dalga hareketini mekanik enerjiye dönüştürebilmek için çok sayıda yöntem incelendikten sonra en uygun dönüşüm yöntemi olarak salınımlı su kolonu metodu (OWC) belirlenmiştir. Sistem çalışma şekli detaylı olarak incelendikten sonra, oldukça karmaşık olan sistem modellemesi karşılaşılan zorluklara rağmen pnömatik ve hidrolik dönüşümler yardımıyla MATLAB’de modellenmiştir.

Literatürde salınımlı su kolonu tasarımına dair örnekler bulunmaması ve salınımlı su kolonu boyutlarının ve dalga karakteristiklerinin çıkışta elde edilen gücü nasıl etkilediğine dair detaylı bilgi verilmemesi nedeniyle simülasyon çalışmalarında bu konu derinlemesine incelenmiş ve hangi parametrenin türbine aktarılan güçte ne kadar etkisinin olduğu irdelenmiştir. Genel olarak aşağıdaki değışkenlerin Wells türbinine aktarılan güç ve basınçtaki etkilerine bakılmış ve sistem tasarımındaki boyutlar bu simülasyon çalışmalarının sonucu olarak belirlenmiştir.

- Frekans
- Dalga yüksekliğı
- Salınımlı su kolonu boyutları
- Hava aralığı boyutları

Wells türbini:

Salınlımlı su kolonundan mekanik enerji elde etmek için, konvansiyonel hava türbinlerinin doğrultucu valflerle kullanılması bilinen bir çözümken, dönüşüm sisteminin çıkışında kendinden doğrultmalı hava türbini kullanılmasının daha efektif ve daha ucuz olması nedeniyle Wells türbini kullanılmasına karar verilmiştir. Sistemin modellemesi en zor bölümlerinden biri olan salınlımlı su kolonu ve Wells türbin bileşenlerinin analizi yapılmış ve dönüşüm sisteminin matematiksel modeli akışkanlar mekaniği kullanılarak MATLAB-Simulink'te oluşturulmuştur.

Senkron generatör:

Wells türbini çıkışında mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde yuvarlak kutuplu senkron generatör kullanılmıştır. Dalga hareketi frekansının ve genliğinin sürekli değişkenlik göstermesi nedeni ile senkron generatör çıkışındaki gerilimin değişken genlik ve değişken frekansta ve sürekli olmayan bir alternatif gerilim şeklinde olabileceği görülmüştür. Bu da uygun tasarım ve kontrol yöntemleri uygulanmadığı takdirde şebekeye aktarılan gücün kesintili olacağı anlamına gelmektedir. Ayrıca şebekeye aktarılan gücün maksimumda tutulması için generatöre hız kontrolü uygulanması gerekmektedir.

Üç seviyeli aktif doğrultucu:

Dalga enerjisi dönüşüm sistemleri için önerilen çalışmalarda genelde generatör çıkışında konvansiyonel doğrultucularla birlikte kullanılan depolama ünitelerinin kullanılması ya da konvansiyonel eviricilerle enerjinin şebekeye aktarılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Ancak bu çalışmaların tamamı teknolojik olarak yeterince olgunlaşmamış ve verim ve enerji kalitesi açısından yeterli özellikleri sağlayamamaktadır. Bu çalışmada ise doğru gerilim barasındaki gerilim sürekliliğinin sağlanması ve çift yönlü akım geçişine olanak sağlamak için üç seviyeli ortadan diyot kenetlemeli doğrultucu kullanılmıştır. Kullanılan aktif doğrultucu reaktif gücü kompanze ederken, aynı zamanda doğru gerilim barası toplam değerini de sabit tutmaktadır.

Genelde motor ve benzeri uygulamalarda kullanılan iki veya üç seviyeli çevirici topolojilerinin kontrolünde akımın dengeli olması, gerilim ve frekansın

sabit tutulması için çoğunlukla dq dönüşümü uygulanmasıyla modülasyon indeksinin ve faz açısının hesaplanması mümkün olmaktadır. Ancak bu çalışmada gerilimin hem genliği hem de frekansı değişebildiği için sistem kontrolü oldukça karmaşık hale gelmektedir. Frekansı ve genliği değişen bir referans vektöründe modülasyon indeksinin doğru şekilde üretilmesi için senkron generatör veya Wells türbini çıkışından geri besleme sinyalinin alınması gerekmektedir.

Tasarımın ilk aşamasında eviricide uygulanan NTV-SV-PWM kontrol yönteminin üç seviyeli aktif doğrultucuda da uygulanması düşünülmüş ancak giriş gerilim frekansının ve genliğinin sürekli değiştiği bir kaynaktan referans vektörün oluşturulması için gereken vektör büyüklüklerin sürekli değişiklik göstereceği için aktif doğrultucunun kontrolünde üç seviyeli S-PWM metodunun uygulanmasına karar verilmiştir. Üç seviyeli aktif doğrultucunun kullanılması sayesinde genel olarak aşağıdaki kazanımlar sağlanmıştır.

- Güç faktörünün birde tutulması ve reaktif kayıpların azaltılması.
- Anahtarlama esnasında yarı iletken anahtarlar üzerinde meydana gelen dv/dt oranlarının düşürülmesi ve bu sayede yüksek gerilim değerlerinde çalışan anahtarlar yerine düşük gerilimde çalışan yarı iletken anahtarların kullanılabilmesi.
- Çift yönlü akım akışına olanak sağlayan aktif doğrultucu yardımıyla gerektiğinde generatörün ilk kalkış anındaki tahrik geriliminin sağlanabilmesi.
- Generatörden düşük akım harmoniği ve düşük crest faktörüne sahip akım çekilmesi ve bu sayede generatör sargı kayıplarının düşürülmesi ve kullanılan yarı iletken akım tepe değerinin rms değerinin çok yüksek olmaması.
- Gerilim harmoniklerinin düşürülmesi sayesinde generatör izolasyon direncinin çok fazla zorlanmaması ve generatör ömrünün uzaması.
- Ve en önemlisi doğru gerilim barasından sürekli enerji akışının sağlanabilmesi.

Doğru gerilim barası:

Çalışmalar özellikle dalga frekansının ve genliğinin sürekli değişiklik gösterdiği yerlerdeki salınımlı su kolonu uygulamalarında doğru gerilim barasında bir enerji depolama sisteminin gerekli olduğunu göstermektedir. Bu çalışmanın kapsamında enerji depolama sistemleri tasarımı ve dalga dönüşüm sistemleriyle birlikte kullanımının yer almaması ve depolama sisteminin bu tez çalışması için yeterince komplike olan kontrol sistemini daha da karmaşık hale getireceği için bu konuya detaylı olarak yer verilmemiştir. Doğru gerilim barasında depolama ünitesi olarak kısa süreli enerji depolama özellikleri olduğu bilinen büyük kondansatörler kullanılmıştır. Ancak ileriki dönemlerdeki çalışmalarda enerji kesintilerinin kompanze edilebilmesi için uygun bir enerji depolama ve kontrol yönteminin belirlenmesi gerekmektedir.

Üç seviyeli doğrultucu veya eviriciler için her zaman bir kontrol zorluğu yaratan doğru gerilim barası orta nokta kontrolü için literatürde çeşitli araştırmalar ve çözüm önerileri yer almaktadır. Bu çalışmalarda genel olarak, alt ve üst koldaki kondansatör gerilim değerleri ve doğru gerilim barası orta nokta akımının yönü ölçülür ve akım yönüne ve gerilimler arasındaki farkın değerine göre bir PI kontrolörü ile iterasyon yaparak aradaki gerilim farkı sıfırlanmaya çalışılır. Ancak bu tez çalışmasında uzay vektörlerinin sapmaya uğrayan büyüklükleri ve açılarının değerleri önceden tahmin edilerek bir anahtarlama tablosu hazırlanmıştır. Bu anahtarlama tablosuna göre, seçilecek olan en yakın üç vektörün (NTV) büyüklükleri ve vektörlerin uygulama süreleri (duty cycle) sapmaya göre güncellenerek tabloya eklenmiştir. Eviricinin doğru gerilim barası orta nokta gerilimi kontrol edilirken, uzay vektörlerin güncellenmiş olan bu yeni vektör ve çevrim oranı tablosundan seçilmesi durumunda PI kontrolöründe defalarca iterasyon yapılmasına gerek kalmamaktadır. Bu da işlemci yükünü azaltırken, sistem dinamik cevabını hızlandırmaktadır.

Üç seviyeli evirici:

Doğru gerilim barası geriliminin üç fazlı sabit genlik ve sabit frekanslı alternatif gerilime dönüştürülmesinde üç seviyeli ortadan diyot kenetlemeli evirici (3L-NPC) kullanılmıştır. Gerilim kaynağı olarak kullanılan evirici, güç

elektronik uygulamalarında çok yeni bir kontrol yöntemi olan ve zorluğu nedeniyle uygulamada kendine çok fazla yer edinememiş üç seviyeli en yakın üç vektör, uzay vektör modülasyonu kontrol (NTV-SV-PWM, Nearest Three Vector-Space Vector-Pulse Width Modulation) metodu ile kontrol edilmiştir. NTV-SV-PWM kontrol yöntemi temel olarak aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır:

- Referans vektörün büyüklüğünün ve açısının ölçülmesi.
- Referans vektörün yer aldığı sektörün bulunması.
- Referans vektörün yer aldığı bölgenin bulunması.
- Referans vektörü oluşturmak için kullanılacak olan üç vektörün belirlenmesi.
- En yakın üç vektörün anahtarlama sürelerinin tespiti.
- En yakın üç vektörün anahtarlama sıralamasının belirlenmesi.

Sistem çıkışında üç seviyeli eviricinin kullanılması ile aşağıdaki kazanımlar elde edilmiştir:

- Gerekğinde çift yönlü enerji akışı sağlanabilmektedir.
- Güç faktörü birde tutulmaktadır.
- Şebeke gerilim harmonik kriterleri sağlanabilmektedir.
- Anahtarlama elemanları düşük dv/dt altında çalıştırılmaktadır.
- Çıkış akım ve gerilimleri sinüzoidaldir.
- Sistemin dinamik cevabı arttırılmıştır.

Sonuç olarak, içerisinde detaylı mekanik, kontrol ve güç elektroniki bilgisi gerektiren bu tasarım literatürde ilk kez dalga enerjisinden elektrik enerjisi üretimini güç elektronikiindeki en güncel yöntemlerden biri olan çok seviyeli aktif doğrultucu ve çok seviyeli evirici dönüşüm sistemleri ile birlikte çalıştırılmasının analizi yapılmıştır. Bu çalışmada oldukça karmaşık bir enerji üretimi yöntemi olan okyanus dalgasından elektrik enerjisi üretiminin kontrolü, güç elektroniki uygulamalarında çok yeni ve aynı zamanda karmaşık bir yöntem olarak bilinen NTV-SV-PWM kontrol yöntemi ile birleştirilmiştir. Bununla birlikte bu tez

çalışmasında dalga enerjisi dönüşüm sisteminin şebekeye senkronize olarak çalıştırılmasında kullanılan üç seviyeli aktif doğrultucu ve üç seviyeli evirici sistemlerinin tasarımları konusunda çok detaylı bilgiler verilmiş ve ayrıca bu sistemlerin önerilen kontrol metodlarıyla nasıl kontrol edilebileceği detaylı olarak aktarılmıştır. Bu bilgiler ışığında bu sistemlerin güç elektroniğindeki herhangi bir sistemde en verimli şekilde kullanılması mümkün olmaktadır. Ayrıca literatürde ilk kez okyanus dalgasından başlayarak, şebekeye gerilim aktarımına kadarki sistem tasarlanmasındaki tüm aşamaların tek tek gösterildiği ve karşılaşılabilecek temel zorlukların aktarıldığı bu tez çalışması gelecek dönemlerde okyanus enerjisinden elektrik enerjisi üretiminde bir kılavuz niteliği taşımaktadır.

Bu çalışma salınlı su kolonu dalga dönüşüm sistemi ile çalışan bütünleşik bir enerji dönüşüm sistemini verse de ileriki dönemlerde iyileştirilmesi ya da daha detaylı olarak irdelenmesi gereken pek çok konu mevcuttur. Başlıca araştırılması gereken konular aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Bu çalışma lineer dalgalardan elde edilen elektrik enerjisinin modern bir güç elektroniği topolojisi ve sofistike bir kontrol yöntemi ile şebekeye aktarılmasını konu almıştır. Çalışmalarda irregüler dalgalar dikkate alınmamıştır. İleriki dönemde sistemin gerçek bir uygulamada kullanılması durumunda, kullanılacağı bölgenin dalga karakteristiği önceden analiz edilerek, irregüler dalgalar dikkate alınarak tasarlanması önerilir.
- Öte yandan bir bölgenin enerji ihtiyacının dalga enerjisinden karşılanması öngörülürse, birden fazla dalga dönüşüm sisteminin birarada kullanılarak yüksek güçlere çıkılması gerekir. Bu durumda dönüşüm sistemlerinin ortak bir ana kontrol ünitesi tarafından kontrol edilerek akım paylaşımlarının doğru yapılması, yani microgrid uygulamasına gerek vardır.
- Bu çalışmada türbinin matematiksel modellemesinde salınlı su kolonu içerisindeki su ve havanın sıkıştırılmaz olduğu, su kolonu duvarlarında, su yatağında, türbin kanatlarında ve türbinin yer aldığı silindirik bölgenin duvarlarındaki sürtünme kayıpları ihmal edilmiştir. Aynı şekilde salınlı su kolonunun duvarlarından yansıyan dalgaların meydana getirdiği kayıpların da çok iyi analiz edilmesi ve salınlı su kolonu sistemi modellemesine bu kayıpların eklenmesi gerekmektedir.

- Güç elektroniği sistemlerinin girişinde kullanılan salınımlı su kolonu dönüşüm sistemi yerine dişli takımı içeren ve yüzeyde salınım yapan bir şamandıraya bağlı olarak çalışan başka bir dönüşüm sistemi veyahutta şamandıraya direk bağlı bir lineer generatörle çalışan sistem kullanılabileceği bilinmektedir. İleriki çalışmalarda salınımlı su kolonu yerine diğer sistemler kullanılarak, sistemler arasında verim karşılaştırması yapılarak en yüksek verimli sistem kullanımına gidilebilir.
- Yapılan çalışmalar sonucunda sistem rezonansa girmediği durumda, sistemden elde edilen enerjide kesinti olduğu görülmüştür. Bu da doğru gerilim barasındaki kondansatör ihtiyacını bir hayli arttırmaktadır. Diğer yandan literatürde şu ana kadar dalga enerjisinin kesintisiz güç kaynağı (UPS) uygulamaları ile birlikte çalıştırılma örneklerine rastlanmamıştır. İleriki dönemde yapılacak olan çalışmalarda, doğru gerilim barasındaki kondansatörler aküler ile desteklenip güç koşullandırma sistemine kesintisiz güç kaynağı özelliği eklenirse sistemin sürekli ve güvenilir çalışması sağlanabilir.
- Literatürde güneş ve rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretiminde maksimum güç noktasını takip eden (MPPT) kontrol yönteminin kullanımı konusunda çok sayıda çalışma yer almasına karşın, dalga enerjisinde bu yöntemin uygulama örneği henüz yer almamaktadır. Bunun için türbin hızının veriminin en yüksek olduğu akış hızı noktasında, diğer bir deyişle türbinin gelen dalga ile rezonansa girdiği noktada sabit tutulması gerekmektedir. İleriki dönemlerde türbin çalışmasını bu noktada tutacak kontrol yöntemine yönelik bir çalışma yapılabilir.
- Farklı uygulamalarda sinüzoidal dalga genlik modülasyonu (S-PWM) ve uzay vektör dalga genlik modülasyonu (SV-PWM) kontrol yöntemlerinin performans ve verim (anahtarlama ve iletim kayıplarına dayalı olarak) karşılaştırmaları yapılmıştır. Ancak bu çalışmada bu karşılaştırmaya yer verilmemiştir. Bir sonraki çalışmada dalga uygulaması için de bu karşılaştırmaya yer verilebilir.
- Bu çalışmada kullanılan uzay vektör modülasyonu yöntemi ile toplam harmonik distorsiyonunun düşürüleceği öngörülmüştür. Ancak çalışma

kapsamında frekans domeninde tekil harmonik bileşenlerinin analizine yer verilmemiştir. İleri dönemki çalışmalarda tekil harmonik bileşenleri incelenip uzay vektör modülasyonu ile tekil harmoniklerin bastırılması veya daha yüksek frekanslara ötelenmesi gibi çözümler üretilebilir.

- Bölüm 3’te de anlatıldığı üzere dalga enerjisinin üretilmesinde gece ve gündüz veya yaz ve kış ayları arasında büyük farklılıklar olacağı bilinmektedir. Örneğin sistem performansı bu gibi enerji ya da gerilim değişimlerinin beklendiği zamanlarda kademeli transformatör (tap-changer) ile birlikte kullanılabilir.
- Sistemin farklı yük durumlarına bağlı olarak verim, maliyet, kayıp ve risk analizleri yapılabilir. Ayrıca farklı güç faktöründeki yükler için sistemin PQ diyagramının çıkarılması önerilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Ran, L., Tavner, P. J., Mueller, M. A., Bakert, N. J., McDonaldtt, S.,** (2006). Power Conversion and Control for a Low Speed, Permanent Magnet, Direct-Drive, Wave Energy Converter, *3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, pp. 17-21, March.
- [2] **Breeze, P.,** (2014). *Power Generation Technologies*, Elsevier B.V., UK, June.
- [3] **URL-1** <http://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed/data/ms2/photo/alternative-energy/otec/OTEC-ResourceMap2009-1290x860.jpg>, alındığı tarih: 06.12.2015.
- [4] **URL-2** <http://energy.gov/eere/energybasics/articles/ocean-thermal-energy-conversion-basics>, alındığı tarih: 06.12.2015.
- [5] **Charlier, R.H., Justus, J.R.,** (1993). *Ocean Energies: Environmental, Economic and Technological Aspects of Alternative Power Sources*, Elsevier Oceanography Series, September.
- [6] **Finney, K. A.,** (2008). Ocean Thermal Energy Conversion, *Guelph Engineering Journal*, pp. 17-23, from http://www.soe.uoguelph.ca/webfiles/gej/articles/GEJ_001-017-023_Finney_Ocean_Thermal_Energy.pdf.
- [7] **Aswathanarayana,U., Harikrishnan T. and Thayyib Sahini, K.M.,** (2010). Green Energy: Technology, Economics and Policy, *CRC Press*, August.
- [8] **URL-3** https://en.wikipedia.org/wiki/Ocean_thermal_energy_conversion, alındığı tarih: 06.12.2015.
- [9] **Kobayashi, H., Jitsuhara, S., Uehara, H.,** (2004). The Present Status and Features of OTEC and Recent Aspects of Thermal Energy Conversion Technologies, *Proceedings of the 24th Meeting of the UJNR Marine Facilities Panel*, Honolulu, USA, p. 4-12.
- [10] **URL-4** http://www.wave-energy.net/index_files/documents/CA-OEBROCHURE.pdf, alındığı tarih: 10.01.2010.
- [11] **URL-5** https://en.wikipedia.org/wiki/Rance_Tidal_Power_Station, alındığı tarih: 06.12.2015.
- [12] **URL-6** <http://businesses.edf.com/generation/hydropower-and-renewable-energy/marineenergies/how-it-works-43777.html>, alındığı tarih: 06.12.2015.
- [13] **URL-7** <http://www.verdantpower.com>, alındığı tarih: 06.12.2015.

- [14] **Sidney, L.**, (1976). Production of energy from concentrated brines by pressure-retarded osmosis: I. Preliminary technical and economic correlations, *J. Membr. Sci.*, 1, 49–63.
- [15] **Loeb, S., Van Hessen, F., Shahaf, D.**, (1976). Production of energy from concentrated brines by pressure-retarded osmosis: II. Experimental results and projected energy costs, *J. Membr. Sci.*, 1, 249–269.
- [16] **URL-8**<<http://www.statkraft.no/jobb-og-karriere>>, alındığı tarih: 11.03.2013.
- [17] **Skilhagen, S. E., Dugstad, J.E., Aaberg, R.J.**, (2008). Osmotic power—Power production based on the osmotic pressure difference between waters with varying salt gradients, *Desalination*, 220, 476–482.
- [18] **Skilhagen, S. E.**, (2008). *Osmotic Power “A New Renewable Source”*, <<http://www.hydro.org/events/HydroTechnology%20Skillhagen%20Statkraft.pdf>>, alındığı tarih: 06.12.2015.
- [19] **Stover, R. L., Pique, G.G.**, (2006). *Energy Recovery Inc.*, <<http://www.powermag.com/osmotic-power-from-the-ocean/?pagenum=1>>, alındığı tarih: 06.12.2015.
- [20] **URL-9**<<http://www.jamstec.go.jp/e/>>, alındığı tarih: 06.12.2015.
- [21] **Farley, F. J. M. and Rainey, R. C. T.**, (2006). Radical design options for wave-profiling wave energy converters, *International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, Loughborough, alındığı tarih: 06.12.2015.
- [22] **Wengenmayr, R.**, (2012). *Renewable Energy: Sustainable Energy Concepts for the Energy Change*, Germany, Wiley-Vch Pub, pp. 101–104.
- [23] **Mc Cormick, M. E.**, (1973). *Ocean Engineerings Wave Mechanics*, Wiley-Interscience Publication, NewYork.
- [24] **Thorpe, T. W., Picken, M. J.**, (1993). Wave Energy Devices and the Marine Environment, *Science, Measurement and Technology*, IEE, pp. 63-70 Vol. 140, January.
- [25] **White, P.**, (1989). Developments in Norwegian Wave Energy, *Proceedings of a Conference on Wave Energy Devices*, Coventry, UK.
- [26] **URL-10**
<[http://www.kanenergi.no/oslo/kanenergi.nsf/2773B351C76FC86CC12570B5002CCFE1/\\$FILE/New+Renewable+Energy.pdf](http://www.kanenergi.no/oslo/kanenergi.nsf/2773B351C76FC86CC12570B5002CCFE1/$FILE/New+Renewable+Energy.pdf)>, alındığı tarih: 06.12.2015.
- [27] **Vining, J. G.**, (2007). *Ocean Wave Energy Converters: Overview, Legal and Economic Aspects, and Direct-Drive Power Take-Off* (MSc Thesis) alındığı yer: University of Wisconsin-Madison, January.
- [28] **Clément, A., McCullen, P., Falcão, A., Fiorentino, A., Gardner, F., ... Thorpe, T.**, (2002). Wave energy in Europe: current status and perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6, 405-431.
- [29] **Wells, AA.**, (1976). Fluid driven rotary transducer. *British Patent Spec No. 1595700*.
- [30] **URL-11**<<http://wavepowerlab.weebly.com/what-is-that-wec/kvaerner-brugs-owc-device>>, alındığı tarih: 06.12.2015.
- [31] **Falcão, AF de O.**, (2000). The shoreline OWC wave power plant at the Azores. *In Proceedings of 4th European Wave Energy Conference*, Aalborg, Denmark, p. 42-7.

- [32] **Whittaker, T.J.T., McIlwaine, S.J., Raghunathan, S.,** (1993). A review of the Islay shoreline wave power station. *In Proc First European Wave Energy Symp*, Edinburgh, p. 283-6.
- [33] **Heath, T., Whittaker T.J.T., Boake, C.B.,** (2000). The design, construction and operation of the LIMPET wave energy converter (Islay, Scotland). *In Proc 4th European Wave Energy Conf*, Aalborg, Denmark, p. 49-55.
- [34] **Rodrigues, A. L.,** (2008). Wave power conversion systems for electrical energy production, *ICREPQ'08*, April, from <<http://www.icrepq.com/icrepq-08/380-leao.pdf>>.
- [35] **Mc Cormick, M. E.,** (1981). Ocean Wave Energy Conversion, *Wiley-Interscience Publication*, Maryland, 233p.
- [36] **Falcão, A. F. O.,** (2014). *Modelling of Wave Energy Conversion*, from <[https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779580606646/Chapter%201\(2014\).pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779580606646/Chapter%201(2014).pdf)>.
- [37] **URL-12**<http://lamtengchoy.com/main/uploads/others/1298524568_8914.pdf>, alındığı tarih: 07.12.2015.
- [38] **URL-13**<<file:///C:/Users/Il/Downloads/US599756.pdf>>, alındığı tarih: 06.12.2015.
- [39] **Wan Nik, W. B., Sulaiman, O. O., Rosliza, R., Prawoto, Y., Muzathik, A. M.,** (2011). Wave energy resource assessment and review of the technologies, *FTP: IJEE.IEEFoundation.org*, Directory: <vol2/issue6 File: IJEE_11_v2n6.pdf>.
- [40] **McCormick, M. E., Murthagh, J., McCab, P.,** (1998). Large-scale experimental study of a hinged-barge wave energy conversion system, *3rd European Wave Energy Conference Patras*, Greece, 215-222.
- [41] **URL-14** <<http://www.c2es.org/technology/factsheet/Hydrokinetic>>, Center for Climate and energy Solution, (2011). *Hydrokinetic Electric Power Generation*, alındığı tarih: 07.11.2015.
- [42] **Weedy, B., Cory, B.,** (1998). Electric Power Systems, *Wiley, Fourth Edition*, London.
- [43] **Prado, M.,** (2008). Archimedes wave swing (AWS). *In: Ocean wave energy (Ed. Cruz J)*, pp. 297-304, Springer, Berlin.
- [44] **URL-15** Offshore Renewable Energy Current Status-Future perspectives for Portugal: <http://oteo.inegi.up.pt/resources/363_1_livro.pdf>, alındığı tarih: 08.12.2015.
- [45] **URL-16** <<http://awsocean.com/technology/archimedes-waveswing-submerged-wave-power-buoy/>>, alındığı tarih: 07.12.2015.
- [46] **URL-17** Waves, <<file:///C:/Users/Il/Downloads/3-150304182934-conversion-gate01.pdf>>, alındığı tarih: 07.12.2015.
- [47] **Pierson, W. J., Moskowitz, L.,** (1964). Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S. A. Kitaigorodskii, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 69, p.5181-5190.

- [48] **URL-18** <http://www.wikiwaves.org/Ocean-Wave_Spectra>, alındığı tarih: 08.12.2015.
- [49] **URL-19** <<http://www.ecowavepower.com/why-wave-energy/global-resources/>>, alındığı tarih: 08.12.2015.
- [50] **URL-20** <https://www.google.ch/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi1srfDv_JAhWp_XIKHX9NBKIOFggcMAA&url=http%3A%2F%2Fees.oregonstate.edu%2Fwesrf%2Fprojects%2Fimages%2FWave%2520Energy_Final.ppt&usg=AFQjCNELE_fZxkFtqHxrvQXRcx-YoUuHTg&sig2=3NNxOVkQ1rcDz3zi67DwLA&bvm=bv.110151844,d.bGQ>, alındığı tarih: 08.12.2015.
- [51] **Akabane, M., Suzuki, H. and Yamauchi, K.**, (1984), On the Cross Flow Turbine for Wave Power Plant, *Proc. 1st Symp. on Wave Energy Utilization in Japan*.
- [52] **Inoue, M., Kaneko, K., Setoguchi, T. and Hamakawa H.**, (1989), Air Turbine with Self-Pitch-Controlled Blades for Wave Power Generator (Estimation of Performances by Model Testing), *JSME Int. J.*, 32, 1, pp. 19-24.
- [53] **Richard, D., Weiskopf, Jr.F.B.**, (1986), Studies with, and Testing of the McCormick Pneumatic Wave Energy Turbine with Some Comments on PWECS Systems, *Proc. Int. Symp. on Utilization of Ocean Waves-Wave to Energy Conversion*, ASCE, pp.80-102.
- [54] **Dixon, S. L., Hall, C. A.** (2014), Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, 7th Ed., Elsevier, Amsterdam.
- [55] **Falcao, A.F.O., Henriques, J.C.C.**, (2015), Oscillating Water Column Wave Energy Converters and Air Turbines: A Review IDMEC, LAETA, Instituto Superior Tecnico, Universidade de Lisboa, pp. 1049-001, Lisbon, Portugal.
- [56] **Setoguchi, T., Kaneko, K., Maeda, H., Kim, T.W., Inoue, M.**, (1993), Impulse Turbine with Self-Pitch-Controlled Guide Vanes for Power Conversion: Performance of Mono-Vane Type, *Int. J. Offshore and Polar Eng.*, Vol. 3, 1, pp. 73-78.
- [57] **Setoguchi, T., Kaneko, K., Taniyama, H., Maeda, H., Inoue, M.**, (1996), Impulse Turbine with Self-Pitch-Controlled Guide Vanes Connected by Links, *Int. J. Offshore and Polar Eng.*, Vol. 6, 1, pp. 76-80.
- [58] **Setoguchi, T., Takao, Kinoue, Y., Kaneko, K., Santhakumar, S., Inoue, M.**, (2000), Study on an Impulse Turbine for Wave Energy Conversion, *Int. J. Offshore and Polar Eng.*, Vol. 10, 2, pp. 145-152.
- [59] **Setoguchi, T., Takao, M.**, (2001), State Of Art On Self-Rectifying Air Turbines For Wave Energy Conversion, 4th International Conference on Mechanical Engineering, pp.117-126, 26-28 December, Dhaka, Bangladesh.
- [60] **Setoguchi, T., Kim, T.H., Kaneko, K., Takao, M., Lee, Y.W., Inoue, M.**, (2002), Air turbine with staggered blades for wave power conversion, in: *Proc 12th International Offshore Polar Engineering Conference*, pp. 662-667.

- [61] Setoguchi, T., Santhakumar, S., Takao, M., Kim, T.H., Kaneko, K., (2003), A modified Wells turbine for wave energy conversion, *Renew. Energy* 28 pp. 79-91.
- [62] Setoguchi, T., Takao, M., Kaneko, K., Inoue, M., (1998), Effect of Guide Vanes on the Performance of a Wells Turbine for Wave Eenergy Conversion”, *Int. J. Offshore and Polar Eng.*, Vol. 8, 2, pp. 155-160.
- [63] Falcao, A.F.O., Gato, L.M.C., (2012), Air Turbines, in: *A.A. Sayigh (Ed.), Comprehensive Renewable Energy*, Vol. 8, Ocean Energy, Elsevier, Oxford, pp. 111-149.
- [64] Khomfoi, S., Tolbert, L. M., Chapter 31. Multilevel Power Converters, < http://web.eecs.utk.edu/~tolbert/publications/multilevel_book_chapter.pdf>, alındığı tarih: 08.12.2015.
- [65] URL-21<<http://s-engineering.com.ua/eng/images/stories/1/2/ws-perfect-harmony-e.pdf>>, alındığı tarih: 08.12.2015.
- [66] URL-22<http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/Flying_Capacitor_Multilevel_Inverters.pdf>, alındığı tarih: 06.12.2015.
- [67] Rodriguez, J., Lai, J. S. and Peng, F. Z. (2002), Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49 (4), pp.724-738, August.
- [68] Nabae, A., Takahashi, I., Agaki, H., (1981). A New Neutral Point Clamped PWM Inverter, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, 17, pp. 518-523, Sept./Oct.
- [69] Lin, B.-R., Lee, F. C. Y. and Yang, T.-Y. (2004), Implementation of a three-phase high-power-factor rectifier with NPC topology, *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, 4 (1), pp.180-189, January.
- [70] Bocotti, P. (2000), Wave Mechanics for Ocean Engineering, *Elsevier Oceanography Series No.64*.
- [71] Dorrell, D. G., Hsieh, M.F (2008), Performance of Wells Turbines for Use in Small-Scale Oscillating Water Columns, *Proceedings ISOPE, Vancouver*, BC, Canada, pp. 393–400 6–11 July.
- [72] Evans, D.V. (1982), Wave Power Absorption by Systems of Oscillating Surface Pressure Distributions, *J Fluid Mech.*, 1982; 114:481-99.
- [73] URL-23<https://en.wikipedia.org/wiki/Volumetric_flow_rate>, alındığı tarih: 08.12.2015.
- [74] URL-24<https://tr.wikipedia.org/wiki/Bernoulli_ilkesi>, alındığı tarih: 08.12.2015.
- [75] URL-25<https://en.wikipedia.org/wiki/Conservation_of_energy>, alındığı tarih: 30.12.2016.
- [76] Carija, Z., Kranjcevic, L., Banic, V. Cavrak, M. (2012), Numerical Analyses of Wells Turbine for Wave Power Conversion, *Engineering Review*, 32 (3), 141-146, 2012.
- [77] Lim, S. K., Kim, J. H. and Nam, K. (1999), A DC-Link voltage balancing algorithm for three-level converter using the zero sequence current, *Power electronics specialists conference*, pp.1083-1088.
- [78] Colak, I., Kocabas, D.A. (2016), Space Vector Modulation Controlled 3L-Converter for Ocean Wave Energy Conversion, *MELECON'16*, CY, April.

- [79] **Cosan, M., Mao, H., Borojevic, D., Lee, F.C.,** (1996), Space Vector Modulation of Three Level Voltage Source Inverter, *VPEC Seminar Proceedings*, pp. 123-128.
- [80] **Klabunde, M.C., Zhao, Y., Lipo, T.A.,** (1996), Current Control of A 3-Level Rectifier/Inverter Drive System, *IEEE Transactions on Power Electronics, IECON 2006 – 32nd Annual Conference*, pp. 57-65, Vol. 11, No. 1, January.
- [81] **Kocalmis, A., Sunter, S.,** (2006), Simulation of a Space Vector PWM Controller For a Three-Level Voltage-Fed Inverter Motor Drive, *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 – 32nd Annual Conference*, pp. 1915-1920, 06-10 November.
- [82] **Colak, I., Kocabas, D.A.** (2015), NTV-SV-PWM Controlled Three-Level Converter for Ocean Wave Energy Conversion, *RTUCON'15*, Latvia, October.
- [83] **Lewicki, A., Krzeminski, Z., Abu-Rub, H.,** (2011), Simulation of a Space Vector PWM Controller For a Three-Level Voltage-Fed Inverter Motor Drive, *IEEE Transactions on Industrial Electronics, IECON 2006 – 32nd Annual Conference*, pp. 5076-5086, Vol. 58, November.
- [84] **Colak, I., Kocabas, D.A.** (2016), DC Link Balancing of Space Vector Modulation Controlled Three-Level Converter for Ocean Wave Energy Conversion, *RTUCON'16*, Latvia, October.
- [85] **Ogasawara, S., Akagi, H.,** (1991). A Vector Control System Using a Neutral-Point-Clamped Voltage Source PWM Inverter, *IEEE-IAS Conference Record*, pp. 422-427.
- [86] **URL-26**<<https://standards.ieee.org/standard/519-2014.html>>, 519-2014 – IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, alındığı tarih: 08.12.2015.

EKLER

EK A: Farklı sektörlerin anahtarlama süreleri

EK B: Dört bölge anahtarlama sürelerinin hesaplanması

EK C: Yeniden düzenlenmiş çevrim oranları

EK D: Orta nokta gerilim değişimine ve faz akımları arasındaki bağıntıya bağlı olarak anahtarlama sıralamasının belirlenmesi



EK A: Farklı sektörlerin anahtarlama süreleri

Çizelge A.1: Sektör II'ye ait anahtarlama süreleri.

SEKTÖR II	I. Bölge		T_a	T_b	T_c
		Anahtarlama Süresi	$2T\left\{1-\frac{V_{ref}}{V_d}\cdot\sin(\theta)\right\}$	$T\frac{V_{ref}}{V_d}\left(\sin(\theta)-\sqrt{3}\cos(\theta)\right)$	$T\left\{\frac{V_{ref}}{V_d}\left(\sin(\theta)+\sqrt{3}\cos(\theta)\right)-1\right\}$
		Vektör	$\vec{V}_2$	$\vec{V}_8$	$\vec{V}_{14}$
		Büyüklik	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	V_d	$\frac{2V_d}{\sqrt{3}}$
		Anahtarlama durumu	ppo veya oon	opn	ppn
		İletimdeki anahtarlar	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b2}, S_{b3} \rightarrow ON$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow ON$	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow ON$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow ON$
		Kesimdeki anahtarlar	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow OFF$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow OFF$
	II. Bölge	Anahtarlama Süresi	$T\left\{1-\frac{V_{ref}}{V_d}\left(\sqrt{3}\cos(\theta)+\sin(\theta)\right)\right\}$	$T\left\{1+\frac{V_{ref}}{V_d}\left(\sqrt{3}\cos(\theta)-\sin(\theta)\right)\right\}$	$T\left\{2\frac{V_{ref}}{V_d}\sin(\theta)-1\right\}$
		Vektör	$\vec{V}_3$	$\vec{V}_2$	$\vec{V}_8$
		Büyüklik	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	V_d
		Anahtarlama durumu	opo veya non	ppo veya oon	opn
		İletimdeki anahtarlar	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c2}, S_{c3} \rightarrow ON$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c2}, S_{c3} \rightarrow ON$	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow ON$
		Kesimdeki anahtarlar	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow OFF$
	III. Bölge	Anahtarlama Süresi	$T\left\{1-2\frac{V_{ref}}{V_d}\sin(\theta)\right\}$	$T\frac{V_{ref}}{V_d}\left(\sin(\theta)-\sqrt{3}\cos(\theta)\right)$	$T\frac{V_{ref}}{V_d}\left(\sin(\theta)+\sqrt{3}\cos(\theta)\right)$
		Vektör	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_3$	$\vec{V}_2$
		Büyüklik	0	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$
		Anahtarlama durumu	ooo, nnn veya ppp	opo veya non	ppo veya oon
		İletimdeki anahtarlar	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c2}, S_{c3} \rightarrow ON$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c2}, S_{c3} \rightarrow ON$
		Kesimdeki anahtarlar	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c4} \rightarrow OFF$
	IV. Bölge	Anahtarlama Süresi	$2T\left\{1-\frac{V_{ref}}{V_d}\sin(\theta)\right\}$	$T\left\{\frac{V_{ref}}{V_d}\left(\sin(\theta)-\sqrt{3}\cos(\theta)\right)-1\right\}$	$T\frac{V_{ref}}{V_d}\left(\sin(\theta)+\sqrt{3}\cos(\theta)\right)$
		Vektör	$\vec{V}_3$	$\vec{V}_{15}$	$\vec{V}_8$
		Büyüklik	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{2V_d}{\sqrt{3}}$	V_d
		Anahtarlama durumu	opo veya non	npn	opn
		İletimdeki anahtarlar	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c2}, S_{c3} \rightarrow ON$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow ON$	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow ON$
		Kesimdeki anahtarlar	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow OFF$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow OFF$

Çizelge A.2: Sektör III'e ait anahtarlama süreleri.

SEKTÖR III	I. Bölge		T_a	T_b	T_c
		Anahtarlama Süresi	$T\left\{2 - \frac{V_{ref}}{V_d}(\sin(\theta) - \sqrt{3}\cos(\theta))\right\}$	$T\left\{2 \frac{V_{ref}}{V_d} \sin(\theta) - 1\right\}$	$-T \frac{V_{ref}}{V_d}(\sin(\theta) + \sqrt{3}\cos(\theta))$
		Vektör	$\vec{V}_3$	$\vec{V}_{15}$	$\vec{V}_9$
		Büyüklik	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{2V_d}{\sqrt{3}}$	V_d
		Anahtarlama durumu	opo veya non	npn	npo
	II. Bölge	İletimdeki anahtarlar	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c2}, S_{c3} \rightarrow ON$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow ON$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c2}, S_{c3} \rightarrow ON$
		Kesimdeki anahtarlar	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow OFF$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow OFF$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c4} \rightarrow OFF$
		Anahtarlama Süresi	$T\left\{1 + \frac{V_{ref}}{V_d}(\sin(\theta) + \sqrt{3}\cos(\theta))\right\}$	$T\left\{1 - 2 \frac{V_{ref}}{V_d} \sin(\theta)\right\}$	$T\left\{\frac{V_{ref}}{V_d}(\sin(\theta) - \sqrt{3}\cos(\theta)) - 1\right\}$
		Vektör	$\vec{V}_3$	$\vec{V}_4$	$\vec{V}_9$
		Büyüklik	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	V_d
	III. Bölge	Anahtarlama durumu	opo veya non	opp veya noo	npo
		İletimdeki anahtarlar	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow ON$ $S_{b2}, S_{b3} \rightarrow ON$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow ON$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow ON$ $S_{b2}, S_{b3} \rightarrow ON$ $S_{c2}, S_{c3} \rightarrow ON$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c2}, S_{c3} \rightarrow ON$
		Kesimdeki anahtarlar	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow OFF$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c4} \rightarrow OFF$
		Anahtarlama Süresi	$T\left\{2 - \frac{V_{ref}}{V_d}(\sin(\theta) - \sqrt{3}\cos(\theta))\right\}$	$2T \frac{V_{ref}}{V_d} \sin(\theta)$	$T\left\{-1 - \frac{V_{ref}}{V_d}(\sin(\theta) + \sqrt{3}\cos(\theta))\right\}$
		Vektör	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_3$	$\vec{V}_4$
	IV. Bölge	Büyüklik	0	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$
		Anahtarlama durumu	ooo, nnn veya ppp	opo veya non	opp veya noo
		İletimdeki anahtarlar	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow ON$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow ON$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow ON$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow ON$ $S_{b2}, S_{b3} \rightarrow ON$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow ON$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow ON$ $S_{b2}, S_{b3} \rightarrow ON$ $S_{c2}, S_{c3} \rightarrow ON$
		Kesimdeki anahtarlar	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c4} \rightarrow OFF$
		Anahtarlama Süresi	$T\left\{1 - \frac{V_{ref}}{V_d}(\sin(\theta) - \sqrt{3}\cos(\theta))\right\}$	$2T \frac{V_{ref}}{V_d} \sin(\theta)$	$-T \frac{V_{ref}}{V_d}(\sin(\theta) + \sqrt{3}\cos(\theta))$
		Vektör	$\vec{V}_4$	$\vec{V}_9$	$\vec{V}_{16}$
		Büyüklik	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	V_d	$\frac{2V_d}{\sqrt{3}}$
		Anahtarlama durumu	opp veya noo	npo	npp
		İletimdeki anahtarlar	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow ON$ $S_{b2}, S_{b3} \rightarrow ON$ $S_{c2}, S_{c3} \rightarrow ON$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c2}, S_{c3} \rightarrow ON$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$
		Kesimdeki anahtarlar	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow OFF$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow OFF$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow OFF$

Çizelge A.3: Sektör IV'e ait anahtarlama süreleri.

SEKTÖR IV	I. Bölge		T_a	T_b	T_c
		Anahtarlama Süresi	$2T\left\{1-\frac{V_{ref}}{V_d}.\sin(\theta-120^\circ)\right\}$	$2T\frac{V_{ref}}{V_d}\sin(\theta)$	$T\left\{2\frac{V_{ref}}{V_d}.\sin(-120^\circ-\theta)-1\right\}$
		Vektör	$\vec{V}_4$	$\vec{V}_{10}$	$\vec{V}_{16}$
		Büyüklik	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{2V_d}{\sqrt{3}}$
		Anahtarlama durumu	opp veya noo	nop	npp
		İletimdeki anahtarlar	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow ON$ $S_{b2}, S_{b3} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$
		Vektör	$\vec{V}_5$	$\vec{V}_4$	$\vec{V}_{10}$
		Büyüklik	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$
		Anahtarlama durumu	oop veya nno	opp veya noo	nop
		İletimdeki anahtarlar	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b2}, S_{b3} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow ON$ $S_{b2}, S_{b3} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$
		Kesimdeki anahtarlar	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow OFF$
		Vektör	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_5$	$\vec{V}_4$
		Büyüklik	0	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$
		Anahtarlama durumu	ooo, nnn veya ppp	oop veya nno	opp veya noo
		İletimdeki anahtarlar	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b2}, S_{b3} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$
		Kesimdeki anahtarlar	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow OFF$
		Vektör	$\vec{V}_5$	$\vec{V}_{17}$	$\vec{V}_{10}$
		Büyüklik	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{2V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$
		Anahtarlama durumu	oop veya nno	nnp	nop
		İletimdeki anahtarlar	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b2}, S_{b3} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow ON$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow ON$ $S_{b2}, S_{b3} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$
		Kesimdeki anahtarlar	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow OFF$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow OFF$

Çizelge A.4: Sektör V'e ait anahtarlama süreleri.

SEKTÖR V	I. Bölge		T_a	T_b	T_c
		Anahtarlama Süresi	$T\left\{2 - \frac{V_{ref}}{V_d}(\sqrt{3}\cos\theta + \sin\theta)\right\}$	$T\left\{\frac{V_{ref}}{V_d}(\sqrt{3}\cos\theta - \sin\theta) - 1\right\}$	$2T\frac{V_{ref}}{V_d}\sin\theta$
		Vektör	$\vec{V}_5$	$\vec{V}_{17}$	$\vec{V}_{11}$
		Büyüklik	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{2V_d}{\sqrt{3}}$	V_d
		Anahtarlama durumu	oop veya nno	nnp	onp
		İletimdeki anahtarlar	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b2}, S_{b3} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow ON$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$
		Vektör	$\vec{V}_5$	$\vec{V}_6$	$\vec{V}_{11}$
		Büyüklik	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	V_d
		Anahtarlama durumu	oop veya nno	pop veya ono	onp
		İletimdeki anahtarlar	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b2}, S_{b3} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow ON$ $S_{b2}, S_{b3} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$
		Kesimdeki anahtarlar	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow OFF$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow OFF$
		Vektör	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_5$	$\vec{V}_6$
		Büyüklik	0	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$
		Anahtarlama durumu	ooo, nnn veya ppp	oop veya nno	pop veya ono
		İletimdeki anahtarlar	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b2}, S_{b3} \rightarrow ON$ $S_{c2}, S_{c3} \rightarrow ON$	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b2}, S_{b3} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow ON$ $S_{b2}, S_{b3} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$
		Kesimdeki anahtarlar	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow OFF$
		Vektör	$\vec{V}_6$	$\vec{V}_{11}$	$\vec{V}_{18}$
		Büyüklik	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	V_d	$\frac{2V_d}{\sqrt{3}}$
		Anahtarlama durumu	pop veya ono	onp	pnnp
		İletimdeki anahtarlar	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow ON$ $S_{b2}, S_{b3} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow ON$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$
		Kesimdeki anahtarlar	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow OFF$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow OFF$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow OFF$

Çizelge A.5: Sektör VI'ya ait anahtarlama süreleri.

SEKTÖR VI	I. Bölge		T_a	T_b	T_c
		Anahtarlama Süresi	$T \left\{ 2 - \frac{V_{ref}}{V_d} (\sqrt{3} \cos \theta + \sin \theta) \right\}$	$2T \frac{V_{ref}}{V_d} \sin \theta$	$T \left\{ \frac{V_{ref}}{V_d} (\sqrt{3} \cos \theta - \sin \theta) - 1 \right\}$
		Vektör	$\vec{V}_6$	$\vec{V}_{12}$	$\vec{V}_{18}$
		Büyüklik	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{2V_d}{\sqrt{3}}$
		Anahtarlama durumu	pop veya ono	pno	pnnp
		İletimdeki anahtarlar	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow ON$ $S_{c2}, S_{c3} \rightarrow ON$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow ON$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow ON$ $S_{c2}, S_{c3} \rightarrow ON$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow ON$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$
	II. Bölge	Anahtarlama Süresi	$T \left\{ 1 - \frac{V_{ref}}{V_d} (\sqrt{3} \cos \theta - \sin \theta) - 1 \right\}$	$T \left\{ 1 - \frac{2V_{ref} \sin \theta}{V_d} \right\}$	$T \left\{ \frac{V_{ref}}{V_d} (\sqrt{3} \cos \theta + \sin \theta) - 1 \right\}$
		Vektör	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_6$	$\vec{V}_{12}$
		Büyüklik	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$
		Anahtarlama durumu	poo veya onn	pop veya ono	pno
		İletimdeki anahtarlar	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow ON$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow ON$	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow ON$ $S_{c2}, S_{c3} \rightarrow ON$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow ON$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow ON$ $S_{c2}, S_{c3} \rightarrow ON$
		Kesimdeki anahtarlar	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c4} \rightarrow OFF$
	III. Bölge	Anahtarlama Süresi	$T \left\{ 1 - \frac{V_{ref}}{V_d} (\sqrt{3} \cos \theta + \sin \theta) \right\}$	$2T \frac{V_{ref} \cdot \sin \theta}{V_d}$	$T \frac{V_{ref}}{V_d} (\sqrt{3} \cos \theta - \sin \theta)$
		Vektör	$\vec{V}_0$	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_6$
		Büyüklik	0	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$
		Anahtarlama durumu	ooo, nnn veya ppp	poo veya onn	pop veya ono
		İletimdeki anahtarlar	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b2}, S_{b3} \rightarrow ON$ $S_{c2}, S_{c3} \rightarrow ON$	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow ON$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow ON$	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow ON$ $S_{c2}, S_{c3} \rightarrow ON$
		Kesimdeki anahtarlar	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b4} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c4} \rightarrow OFF$
	IV. Bölge	Anahtarlama Süresi	$T \left\{ 2 - \frac{V_{ref}}{V_d} (\sqrt{3} \cos \theta + \sin \theta) \right\}$	$T \left\{ 2 \frac{V_{ref}}{V_d} \sin \theta - 1 \right\}$	$T \frac{V_{ref}}{V_d} (\sqrt{3} \cos \theta - \sin \theta)$
		Vektör	$\vec{V}_1$	$\vec{V}_{13}$	$\vec{V}_{12}$
		Büyüklik	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{2V_d}{\sqrt{3}}$	$\frac{V_d}{\sqrt{3}}$
		Anahtarlama durumu	poo veya onn	pnn	pno
		İletimdeki anahtarlar	$S_{a2}, S_{a3} \rightarrow ON$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow ON$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow ON$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow ON$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow ON$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow ON$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow ON$ $S_{b3}, S_{b4} \rightarrow ON$ $S_{c2}, S_{c3} \rightarrow ON$
		Kesimdeki anahtarlar	$S_{a1}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c2} \rightarrow OFF$	$S_{a1}, S_{a2} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow OFF$ $S_{c3}, S_{c4} \rightarrow OFF$	$S_{a3}, S_{a4} \rightarrow OFF$ $S_{b1}, S_{b2} \rightarrow OFF$ $S_{c1}, S_{c4} \rightarrow OFF$

EK B: Dört bölge anahtarlama sürelerinin hesaplanması

Sektör I – Bölüm I

m modülasyon indeksi olmak üzere aşağıdaki değerler Bölüm 5.1.3'te verilen eşitlik 5.35 ve 5.36'daki yerlerine konduğunda referans vektörünün birinci bölgede olduğu tespit edilir. Bu örnekte modülasyon indeksi 0.8, θ açısı da 15° olarak alınmıştır.

$$m = \frac{V_{ref}}{V_d} = 0.8 \quad (B.1)$$

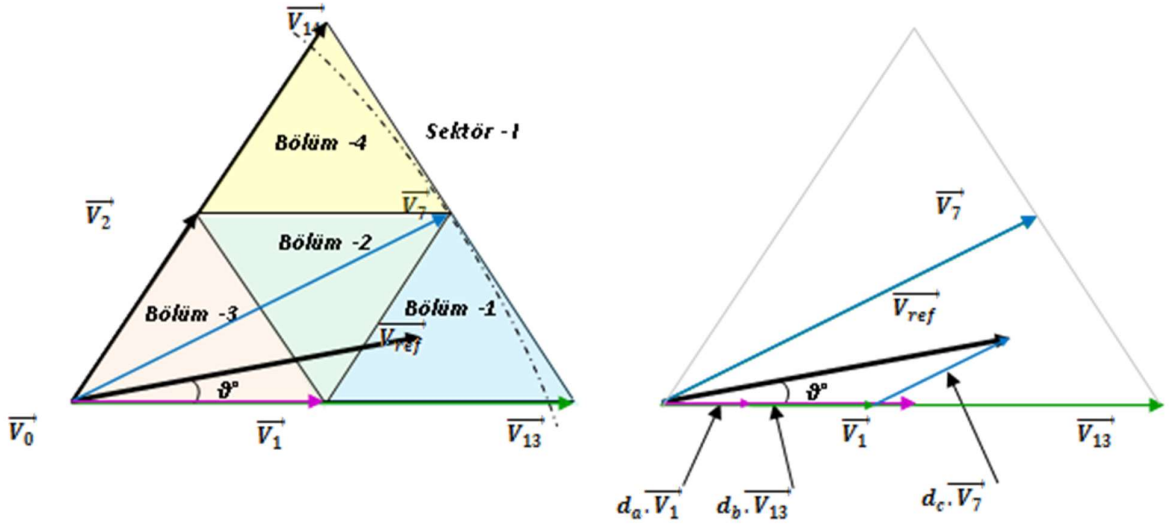
$$\theta = 15^\circ$$

$$m \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos\theta - \sin\theta) > 1 \quad (B.2)$$

$$1.131 > 1$$

$$2 \cdot m \cdot \sin\theta \leq 1 \quad (B.3)$$

$$0.414 \leq 1$$



Şekil B.1 : $m = 0.8$ ve $\theta = 15^\circ$ olması durumunda vektörlerin konumları.

Uygulanacak vektörler $\rightarrow \vec{V}_7, \vec{V}_1, \vec{V}_{13}$

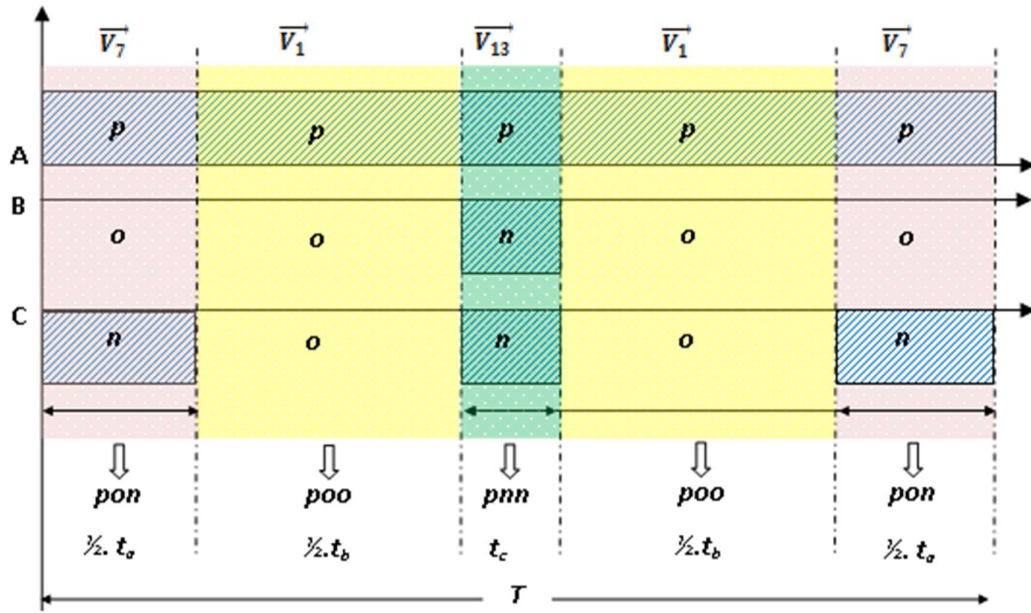
Anahtarlama süreleri:

$$T_a = 2 \cdot m \cdot T \cdot \sin(15^\circ) = 0.414 \cdot T \quad (B.4)$$

$$T_b = 2 \cdot T \cdot \left\{ 1 - m \cdot \sin\left(15^\circ + \frac{\pi}{3}\right) \right\} = 0.4545 \cdot T \quad (\text{B.5})$$

$$T_c = T \cdot \left\{ 2 \cdot m \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - 15^\circ\right) \right\} = 0.1313 \cdot T \quad (\text{B.6})$$

$$V_{ref} \cdot T = \vec{V}_7 \cdot 0.4141 \cdot T + \vec{V}_1 \cdot 0.4545 \cdot T + \vec{V}_{13} \cdot 0.1313 \cdot T \quad (\text{B.7})$$



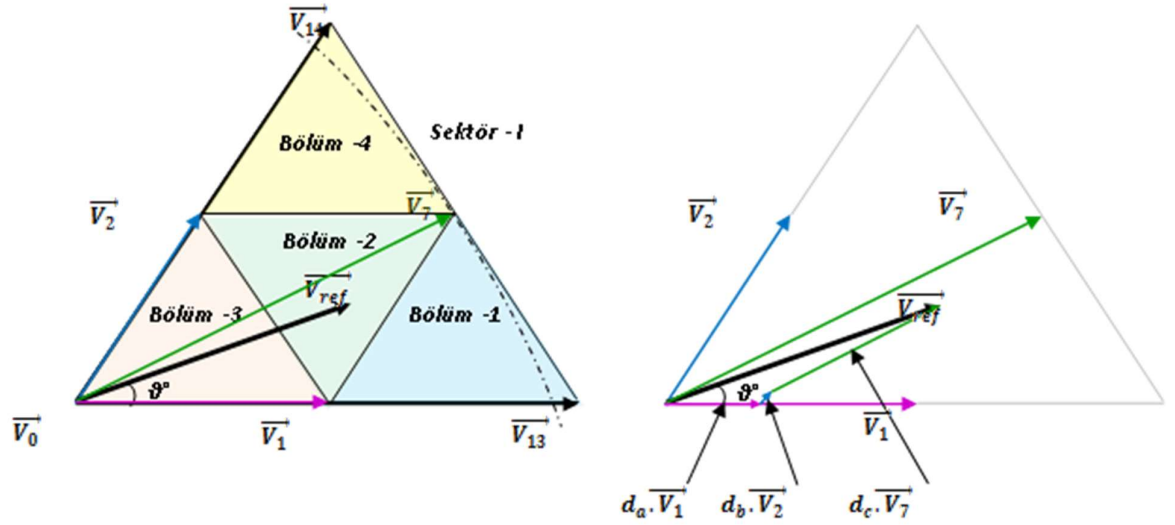
Şekil B.2 : $m = 0.8$ ve $\theta = 15^\circ$ için anahtarlama süreleri ve anahtarlama durumlarının gösterilimi.

Sektör I – Bölüm II

Modülasyon indeksinin 0.8, θ açısının 25° olduğu durum.

$$m = \frac{V_{ref}}{V_d} = 0.8 \quad (B.8)$$

$$\theta = 25^\circ$$



Şekil B.3 : $m = 0.8$ ve $\theta = 25^\circ$ olması durumunda vektörlerin konumları.

$$m \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos\theta + \sin\theta) \geq 1$$

$$1.678 \geq 1 \quad (B.9)$$

$$m \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos\theta - \sin\theta) \leq 1$$

$$0.917 \leq 1 \quad (B.10)$$

Uygulanacak vektörler $\rightarrow \vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_7$

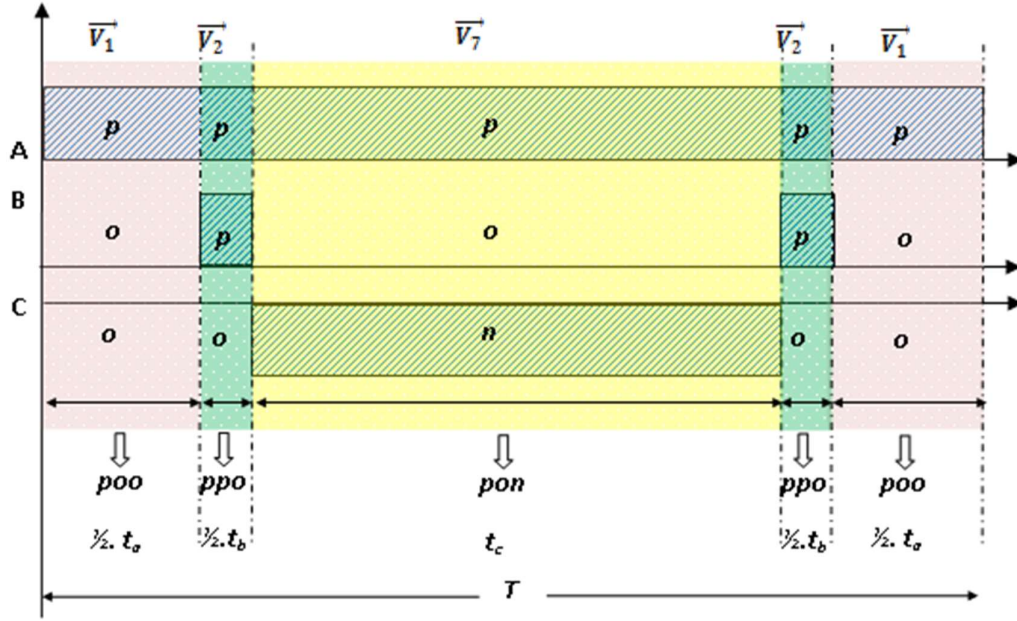
Anahtarlama süreleri:

$$T_a = T \cdot \{ 1 - 2 \cdot m \cdot \sin(25^\circ) \} = 0.3238 \cdot T \quad (B.11)$$

$$T_b = T \cdot \left\{ 1 - 2 \cdot m \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - 25^\circ\right) \right\} = 0.08227 \cdot T \quad (B.12)$$

$$T_c = T \cdot \left\{ 2 \cdot m \cdot \sin\left(25^\circ + \frac{\pi}{3}\right) - 1 \right\} = 0.5939 \cdot T \quad (\text{B.13})$$

$$V_{ref} \cdot T = \vec{V}_1 \cdot 0.3238 \cdot T + \vec{V}_2 \cdot 0.08227 \cdot T + \vec{V}_7 \cdot 0.5939 \cdot T \quad (\text{B.14})$$



Şekil B.4 : $m = 0.8$ ve $\theta = 25^\circ$ için anahtarlama süreleri ve anahtarlama durumlarının gösterilimi.

Sektör I – Bölüm III

Modülasyon indeksinin 0.4, θ açısının 45° olduğu durum.

$$m = \sqrt{3} \cdot \frac{V_{ref}}{V_d} = 0.4$$

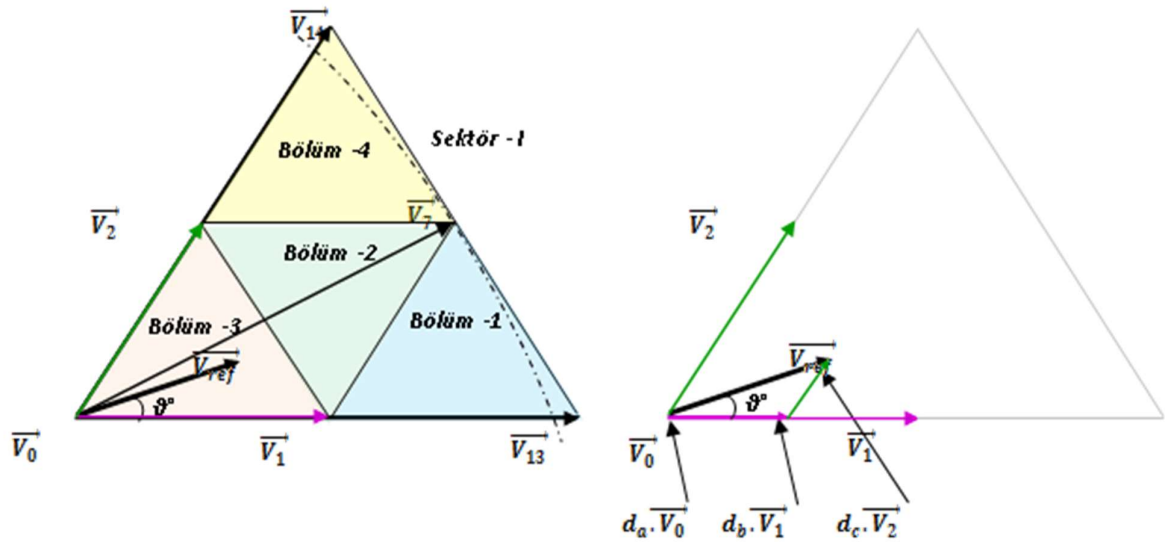
$$\theta = 45^\circ$$

$$2 \cdot m \cdot \sin\theta \leq 1$$

$$0.565 \leq 1 \quad (B.15)$$

$$\begin{aligned} m \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos\theta + \sin\theta) &< 1 \\ 0.772 &< 1 \end{aligned} \quad (B.16)$$

$$\begin{aligned} m \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos\theta - \sin\theta) &< 1 \\ 0.207 &< 1 \end{aligned} \quad (B.17)$$



Şekil B.5 : $m = 0.4$ ve $\theta = 45^\circ$ olması durumunda vektörlerin konumları.

Uygulanacak vektörler $\rightarrow \vec{V}_0, \vec{V}_1, \vec{V}_2$

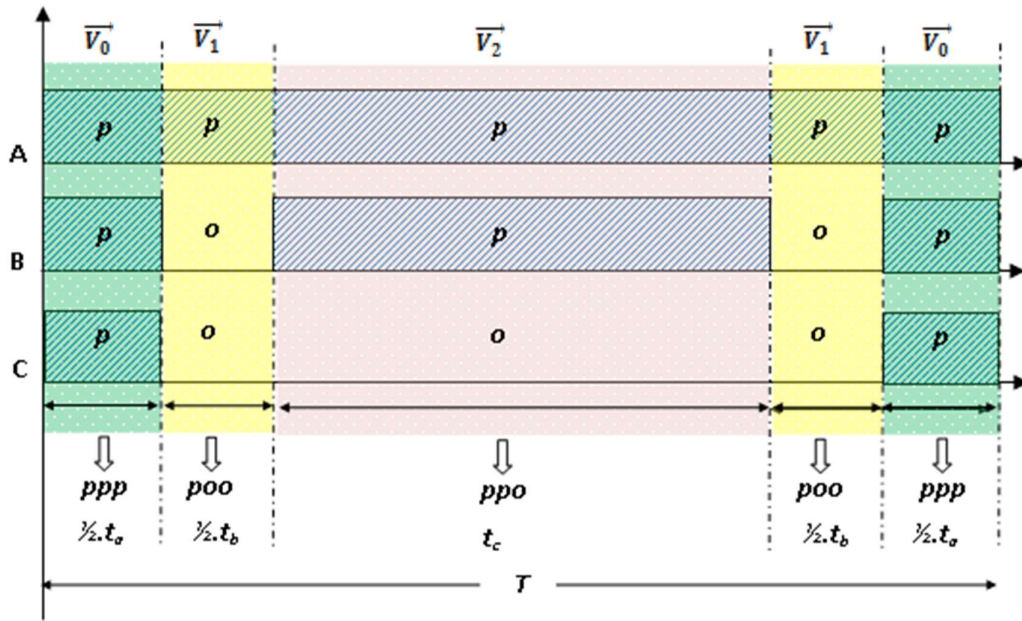
Anahtarlama süreleri:

$$T_a = T \cdot \left\{ 1 - 2 \cdot m \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} + 45^\circ\right) \right\} = 0.2272 \cdot T \quad (B.18)$$

$$T_b = T \cdot 2 \cdot m \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - 45^\circ\right) = 0.207 \cdot T \quad (\text{B.19})$$

$$T_c = 2 \cdot m \cdot T \cdot \sin(45^\circ) = 0.5656 \cdot T \quad (\text{B.20})$$

$$V_{ref} \cdot T = \vec{V}_0 \cdot 0.2272 \cdot T + \vec{V}_1 \cdot 0.207 \cdot T + \vec{V}_2 \cdot 0.5656 \cdot T \quad (\text{B.21})$$



Şekil B.6 : $m = 0.4$ ve $\theta = 45^\circ$ için anahtarlama süreleri ve anahtarlama durumlarının gösterilimi.

Sektör I – Bölüm IV

Modülasyon indeksinin 0.9, θ açısının 45° olduğu durum.

$$m = \sqrt{3} \cdot \frac{V_{ref}}{V_d} = 0.9$$

$$\theta = 45^\circ$$

$$\begin{aligned} 2 \cdot m \cdot \sin \theta &> 1 \\ 1.272 &> 1 \end{aligned}$$

(B.22)

Uygulanacak vektörler $\rightarrow \vec{V}_2, \vec{V}_7, \vec{V}_{14}$

Anahtarlama süreleri:

$$t_a = 2.T \cdot \left\{ 1 - 2.m_a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} + 45^\circ\right) \right\} = 0.261.T$$

(B.23)

$$t_b = 2.T.m_a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - 45^\circ\right) = 0.465.T$$

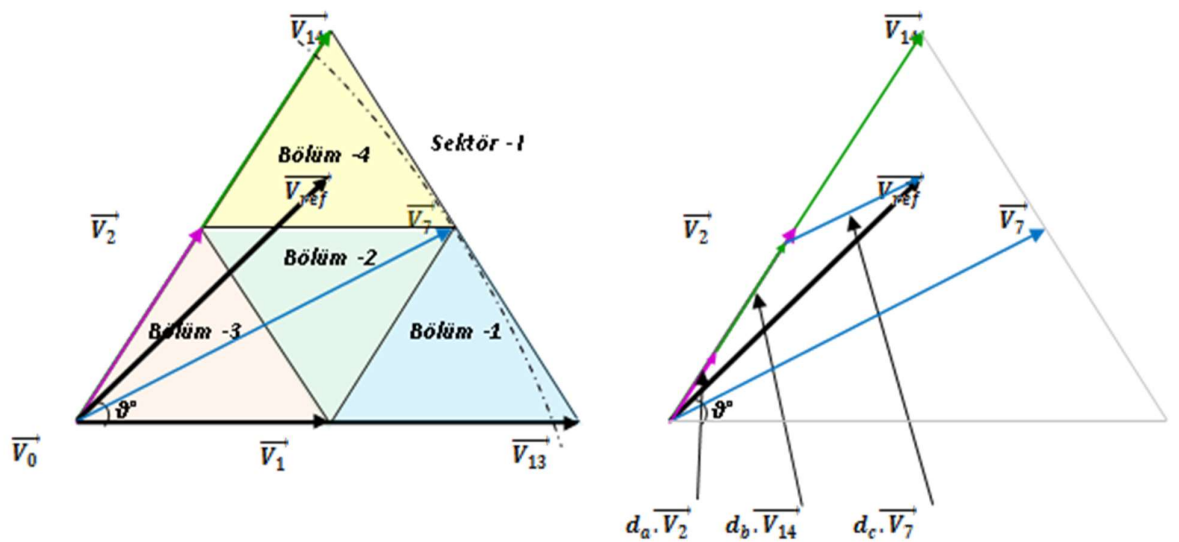
(B.24)

$$t_c = T \cdot \{ 2.m_a \cdot \sin(45^\circ) - 1 \} = 0.272.T$$

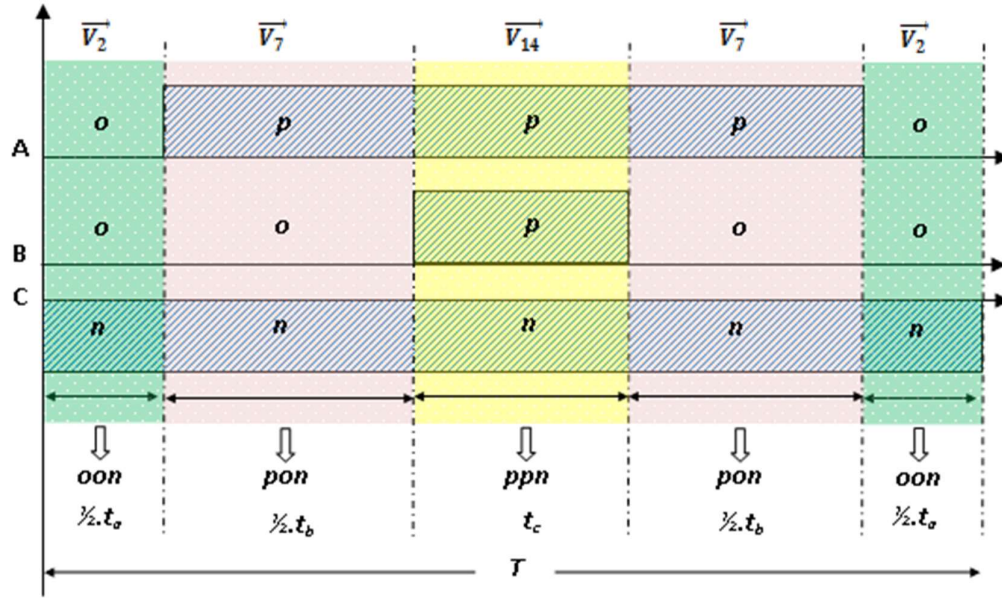
(B.25)

$$V_{ref}.T = \vec{V}_2 \cdot 0.261.T + \vec{V}_7 \cdot 0.465.T + \vec{V}_{14} \cdot 0.272.T$$

(B.26)



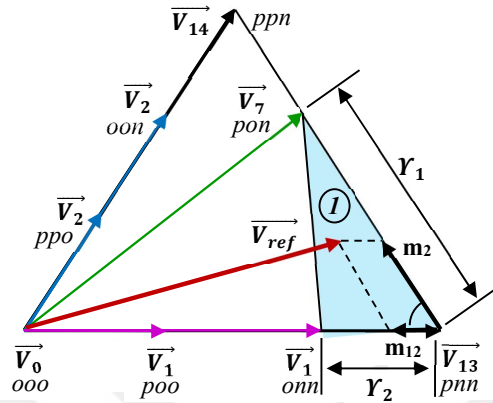
Şekil B.7 : $m = 0.9$ ve $\theta = 45^\circ$ olması durumunda vektörlerin konumları.



Şekil B.8 : $m = 0.9$ ve $\theta = 45^\circ$ için anahtarlama süreleri ve anahtarlama durumlarının gösterilimi.

EK C: Yeniden düzenlenmiş çevrim oranları

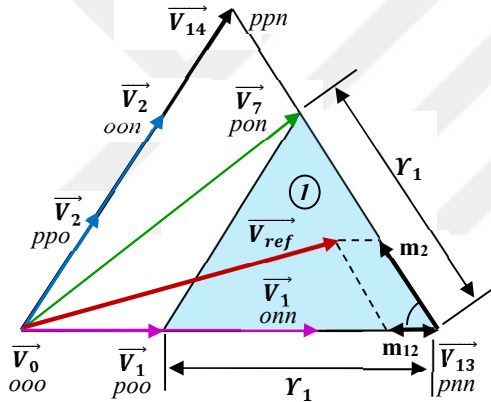
Çizelge C.1 : Dengesizlik durumuna göre yeniden düzenlenen çevrim oranları.



Bölüm – I (onn)

$$\begin{aligned}\hat{d}_{onn} &= \frac{\delta_3}{\gamma_2} \\ \hat{d}_{pon} &= \frac{\delta_2}{\gamma_1} \\ \hat{d}_{pnn} &= 1 - \frac{\delta_3}{\gamma_2} - \frac{\delta_2}{\gamma_1}\end{aligned}$$

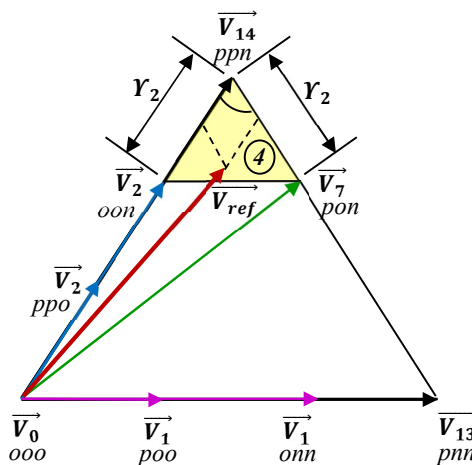
Kural: $\hat{d}_{pnn} = 1 - \frac{\delta_3}{\gamma_2} - \frac{\delta_2}{\gamma_1} \geq 0$



Bölüm – I (poo)

$$\begin{aligned}\hat{d}_{poo} &= \frac{\delta_3}{\gamma_1} \\ \hat{d}_{pon} &= \frac{\delta_2}{\gamma_1} \\ \hat{d}_{pnn} &= \frac{\delta_1}{\gamma_1}\end{aligned}$$

Kural: $\dot{d}_{pnn} = 1 - \frac{\delta_3}{\gamma_1} - \frac{\delta_2}{\gamma_1} \geq 0$



Bölüm – IV (oon)

$$\begin{aligned} \dot{d}_{oon} &= \frac{\delta_3}{\gamma_2} \\ \dot{d}_{pon} &= \frac{\delta_1}{\gamma_2} \\ \dot{d}_{ppn} &= \frac{\delta_2}{\gamma_2} \end{aligned}$$

Kural: $\acute{d}_{ppn} = 1 - \frac{\delta_3}{\gamma_2} - \frac{\delta_1}{\gamma_2} \geq 0$

Çizelge C.1 (devam): Dengesizlik durumuna göre yeniden düzenlenen çevrim oranları.

	Bölüm – IV (ppo) $\dot{d}_{ppo} = \frac{\delta_3}{\gamma_1}$ $\dot{d}_{pon} = \frac{\delta_1}{\gamma_2}$ $\dot{d}_{ppn} = 1 - \frac{\delta_3}{\gamma_1} - \frac{\delta_1}{\gamma_2}$ Kural: $\dot{d}_{ppn} = 1 - \frac{\delta_3}{\gamma_1} - \frac{\delta_1}{\gamma_2} \geq 0$
	Bölüm – III (poo-ppo) $\dot{d}_{poo} = \frac{\delta_1}{\gamma_2}$ $\dot{d}_{ppo} = \frac{\delta_2}{\gamma_2}$ $\dot{d}_{ooo} = \frac{\delta_3}{\gamma_2}$ Kural: $\dot{d}_{ooo} = 1 - \frac{\delta_1}{\gamma_2} - \frac{\delta_2}{\gamma_2} \geq 0$
	Bölüm – III (oon-ppo) $\dot{d}_{poo} = \frac{\delta_1}{\gamma_2}$ $\dot{d}_{oon} = \frac{\delta_1}{\gamma_1}$ $\dot{d}_{ooo} = 1 - \frac{\delta_1}{\gamma_2} - \frac{\delta_1}{\gamma_1}$ Kural: $\dot{d}_{ooo} = 1 - \frac{\delta_1}{\gamma_2} - \frac{\delta_1}{\gamma_1} \geq 0$

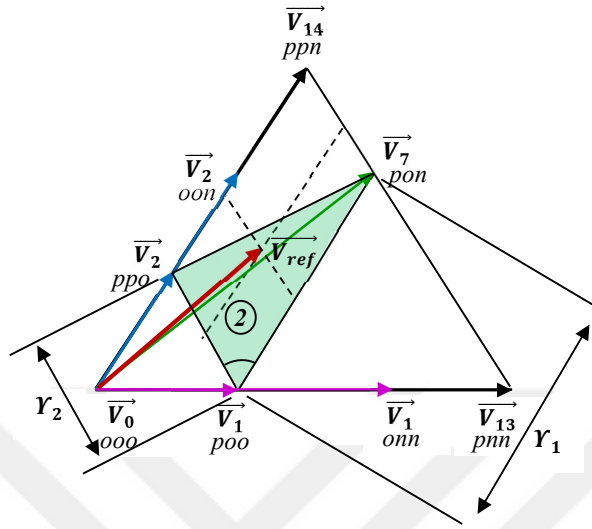
Çizelge C.1 (devam) : Dengesizlik durumuna göre yeniden düzenlenen çevrim oranları.

	Bölüm – III (onn-ppo) $\dot{d}_{onn} = \frac{\delta_1}{\gamma_1}$ $\dot{d}_{ppo} = \frac{\delta_2}{\gamma_2}$ $\dot{d}_{ooo} = 1 - \frac{\delta_1}{\gamma_1} - \frac{\delta_2}{\gamma_2}$ Kural: $\dot{d}_{111} = 1 - \frac{\delta_1}{\gamma_1} - \frac{\delta_2}{\gamma_2} \geq 0$
	Bölüm – IV (onn-onn) $\dot{d}_{onn} = \frac{\delta_1}{\gamma_1}$ $\dot{d}_{oon} = \frac{\delta_2}{\gamma_1}$ $\dot{d}_{nnn} = \frac{\delta_3}{\gamma_1}$ Kural: $\dot{d}_{nnn} = 1 - \frac{\delta_1}{\gamma_1} - \frac{\delta_2}{\gamma_1} \geq 0$

Çizelge C.1 (devam) : Dengesizlik durumuna göre yeniden düzenlenen çevrim oranları.

	Bölüm – II (onn-onn) $\dot{d}_{onn} = 1 - \frac{\delta_2}{\gamma_1}$ $\dot{d}_{pon} = \frac{\delta_3}{\gamma_2}$ $\dot{d}_{oon} = \frac{\delta_2}{\gamma_1} - \frac{\delta_3}{\gamma_2}$ Kural: $\dot{d}_{oon} = \frac{\delta_2}{\gamma_1} + \frac{\delta_3}{\gamma_2} - 1$
	Bölüm – II (oon-poo) $\dot{d}_{oon} = 1 - \frac{\delta_1}{\gamma_2}$ $\dot{d}_{poo} = 1 - \frac{\delta_2}{\gamma_1}$ $\dot{d}_{pon} = \frac{\delta_2}{\gamma_1} + \frac{\delta_1}{\gamma_2} - 1$ Kural: $\dot{d}_{pon} = \frac{\delta_2}{\gamma_1} + \frac{\delta_1}{\gamma_2} - 1$

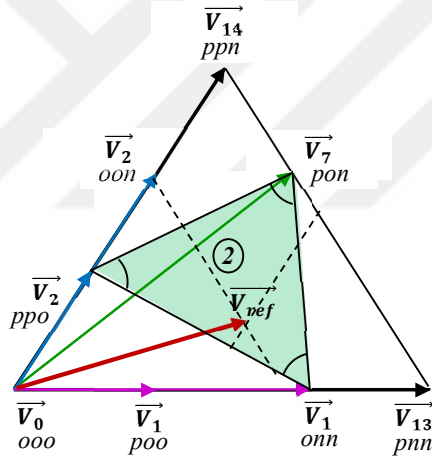
Çizelge C.1 (devam) : Dengesizlik durumuna göre yeniden düzenlenen çevrim oranları.



Bölüm – II (poo-ppo)

$$\begin{aligned} \dot{d}_{pon} &= \frac{\delta_3}{\gamma_1} \\ \dot{d}_{ppo} &= 1 - \frac{\delta_1}{\gamma_2} \\ \dot{d}_{poo} &= \frac{\delta_1}{\gamma_2} - \frac{\delta_3}{\gamma_1} \end{aligned}$$

Kural: $\dot{d}_{poo} = \frac{\delta_1}{\gamma_2} - \frac{\delta_3}{\gamma_1} > 0$



Bölüm – II (onn-ppo)

$$\dot{d}_{onn} = \left(\frac{1}{\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{\gamma_2 + \gamma_1} - 1} \right) \cdot \left(\frac{\delta_1}{\gamma_2} + \frac{\delta_3}{\gamma_1} - 1 \right)$$

$$\hat{d}_{pon} = \left(\frac{1}{\frac{\gamma_1}{\gamma_2} + \frac{\gamma_2}{\gamma_1} - 1} \right) \cdot \left(\frac{\delta_1}{\gamma_1} + \frac{\delta_2}{\gamma_2} - 1 \right)$$

$$\dot{d}_{ppo} = \left(\frac{1}{\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{\gamma_2} - 1} \right) \cdot \left(\frac{\delta_2}{\gamma_1} + \frac{\delta_3}{\gamma_2} - 1 \right)$$

EK D: Orta nokta gerilim değişimine ve faz akımları arasındaki bağıntıya bağlı olarak anahtarlama sıralamasının belirlenmesi

Çizelge D.1 : Orta nokta gerilim değişimine ve faz akımları arasındaki bağıntıya bağlı olarak anahtarlama sıralamasının belirlenmesi.

I. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sa} - I_{sc} \geq 0$	ooo $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ onn $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ onn $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ ooo
		$I_{sa} - I_{sc} < 0$	ooo $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ ppo $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ ppo $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ ooo
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sa} - I_{sc} \geq 0$	ooo $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ ppo $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ ppo $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ ooo
		$I_{sa} - I_{sc} < 0$	ooo $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ onn $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ onn $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ ooo
II. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sb} - I_{sc} \geq 0$	ooo $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ non $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ non $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ ooo
		$I_{sb} - I_{sc} < 0$	ooo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ ppo $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ ppo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ ooo
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sb} - I_{sc} \geq 0$	ooo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ ppo $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ ppo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ ooo
		$I_{sb} - I_{sc} < 0$	ooo $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ non $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ non $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ ooo
III. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sb} - I_{sa} \geq 0$	ooo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ non $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ non $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ ooo
		$I_{sb} - I_{sa} < 0$	ooo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opp $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ opp $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ ooo
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sb} - I_{sa} \geq 0$	ooo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opp $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ opp $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ ooo
		$I_{sb} - I_{sa} < 0$	ooo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ non $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ non $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ ooo
IV. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sc} - I_{sa} \geq 0$	ooo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ nno $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ nno $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ ooo
		$I_{sc} - I_{sa} < 0$	ooo $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ opp $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ opp $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ ooo
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sc} - I_{sa} \geq 0$	ooo $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ opp $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ opp $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ ooo
		$I_{sc} - I_{sa} < 0$	ooo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ nno $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ nno $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ ooo
V. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sc} - I_{sb} \geq 0$	ooo $\rightarrow$ ono $\rightarrow$ nno $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ nno $\rightarrow$ ono $\rightarrow$ ooo
		$I_{sc} - I_{sb} < 0$	ooo $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ pop $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ pop $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ ooo
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sc} - I_{sb} \geq 0$	ooo $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ pop $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ pop $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ ooo
		$I_{sc} - I_{sb} < 0$	ooo $\rightarrow$ ono $\rightarrow$ nno $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ nno $\rightarrow$ ono $\rightarrow$ ooo
VI. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sa} - I_{sb} \geq 0$	ooo $\rightarrow$ ono $\rightarrow$ onn $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ onn $\rightarrow$ ono $\rightarrow$ ooo
		$I_{sa} - I_{sb} < 0$	ooo $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ pop $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ pop $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ ooo
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sa} - I_{sb} \geq 0$	ooo $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ pop $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ ppp $\rightarrow$ pop $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ ooo
		$I_{sa} - I_{sb} < 0$	ooo $\rightarrow$ ono $\rightarrow$ onn $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ nnn $\rightarrow$ onn $\rightarrow$ ono $\rightarrow$ ooo
VII. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sc} \geq 0$ $I_{sa} \geq 0$	ppo $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ onn $\rightarrow$ onn $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ ppo
		$I_{sc} \geq 0$ $I_{sa} < 0$	ppo $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ ppo
		$I_{sc} < 0$ $I_{sa} \geq 0$	poo $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ onn $\rightarrow$ onn $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ poo
		$I_{sc} < 0$ $I_{sa} < 0$	poo $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ poo
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sc} \geq 0$ $I_{sa} \geq 0$	poo $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ poo
		$I_{sc} \geq 0$ $I_{sa} < 0$	poo $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ onn $\rightarrow$ onn $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ poo
		$I_{sc} < 0$ $I_{sa} \geq 0$	ppo $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ ppo

Çizelge D.1 (devam) : Orta nokta gerilim değişimine ve faz akımları arasındaki bağıntıya bağlı olarak anahtarlama sıralamasının belirlenmesi.

VIII. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sc} < 0$ $I_{sa} < 0$	ppo $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ onn $\rightarrow$ onn $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ ppo
		$I_{sb} \geq 0$ $I_{sc} \geq 0$	non $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ ppo $\rightarrow$ ppo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ non
		$I_{sb} \geq 0$ $I_{sc} < 0$	non $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ non
		$I_{sb} < 0$ $I_{sc} \geq 0$	oon $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ ppo $\rightarrow$ ppo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ oon
		$I_{sb} < 0$ $I_{sc} < 0$	oon $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ oon
		$I_{sb} \geq 0$ $I_{sc} \geq 0$	oon $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ oon
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sb} \geq 0$ $I_{sc} < 0$	oon $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ ppo $\rightarrow$ ppo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ oon
		$I_{sb} < 0$ $I_{sc} \geq 0$	non $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ non
		$I_{sb} < 0$ $I_{sc} < 0$	non $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ ppo $\rightarrow$ ppo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ non
		$I_{sa} \geq 0$ $I_{sb} \geq 0$	opp $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ non $\rightarrow$ non $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opp
		$I_{sa} \geq 0$ $I_{sb} < 0$	opp $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opp
		$I_{sa} < 0$ $I_{sb} \geq 0$	opo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ non $\rightarrow$ non $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ opo
IX. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sa} < 0$ $I_{sb} < 0$	opo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ opo
		$I_{sa} \geq 0$ $I_{sb} \geq 0$	opo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ opo
		$I_{sa} \geq 0$ $I_{sb} < 0$	opo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ non $\rightarrow$ non $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ opo
		$I_{sa} < 0$ $I_{sb} \geq 0$	opp $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opp
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sa} < 0$ $I_{sb} < 0$	opp $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ non $\rightarrow$ non $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opp
		$I_{sa} \geq 0$ $I_{sb} \geq 0$	nno $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ opp $\rightarrow$ opp $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ nno
		$I_{sc} \geq 0$ $I_{sa} \geq 0$	nno $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ nno
		$I_{sc} < 0$ $I_{sa} \geq 0$	noo $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ opp $\rightarrow$ opp $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ noo
X. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sc} < 0$ $I_{sa} < 0$	noo $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ noo
		$I_{sc} \geq 0$ $I_{sa} < 0$	noo $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ opp $\rightarrow$ opp $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ noo

Çizelge D.1 (devam) : Orta nokta gerilim değişimine ve faz akımları arasındaki bağıntıya bağlı olarak anahtarlama sıralamasının belirlenmesi.

XI. Bölge	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sc} < 0$ $I_{sa} < 0$	$noo \rightarrow nop \rightarrow oop \rightarrow oop \rightarrow nop \rightarrow noo$
		$I_{sc} \geq 0$ $I_{sa} \geq 0$	$noo \rightarrow nop \rightarrow oop \rightarrow oop \rightarrow nop \rightarrow noo$
		$I_{sc} \geq 0$ $I_{sa} < 0$	$noo \rightarrow nop \rightarrow oop \rightarrow opp \rightarrow opp \rightarrow oop \rightarrow noo$
		$I_{sc} < 0$ $I_{sa} \geq 0$	$nno \rightarrow noo \rightarrow nop \rightarrow oop \rightarrow oop \rightarrow noo \rightarrow nno$
		$I_{sc} < 0$ $I_{sa} < 0$	$nno \rightarrow noo \rightarrow nop \rightarrow oop \rightarrow opp \rightarrow opp \rightarrow oop \rightarrow noo \rightarrow nno$
	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sb} \geq 0$ $I_{sc} \geq 0$	$pop \rightarrow oop \rightarrow onp \rightarrow ono \rightarrow nno \rightarrow nno \rightarrow ono \rightarrow onp \rightarrow oop \rightarrow pop$
		$I_{sb} \geq 0$ $I_{sc} < 0$	$pop \rightarrow oop \rightarrow onp \rightarrow ono \rightarrow ono \rightarrow onp \rightarrow oop \rightarrow pop$
		$I_{sb} < 0$ $I_{sc} \geq 0$	$oop \rightarrow onp \rightarrow ono \rightarrow nno \rightarrow nno \rightarrow ono \rightarrow onp \rightarrow oop$
		$I_{sb} < 0$ $I_{sc} < 0$	$oop \rightarrow onp \rightarrow ono \rightarrow ono \rightarrow onp \rightarrow oop$
XII. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sb} \geq 0$ $I_{sc} \geq 0$	$oop \rightarrow onp \rightarrow ono \rightarrow ono \rightarrow onp \rightarrow oop$
		$I_{sb} \geq 0$ $I_{sc} < 0$	$oop \rightarrow onp \rightarrow ono \rightarrow nno \rightarrow nno \rightarrow ono \rightarrow onp \rightarrow oop$
		$I_{sb} < 0$ $I_{sc} \geq 0$	$pop \rightarrow oop \rightarrow onp \rightarrow ono \rightarrow ono \rightarrow onp \rightarrow oop \rightarrow pop$
		$I_{sb} < 0$ $I_{sc} < 0$	$pop \rightarrow oop \rightarrow onp \rightarrow ono \rightarrow nno \rightarrow nno \rightarrow ono \rightarrow onp \rightarrow oop \rightarrow pop$
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sa} \geq 0$ $I_{sb} \geq 0$	$onn \rightarrow ono \rightarrow pno \rightarrow poo \rightarrow pop \rightarrow pop \rightarrow poo \rightarrow pno \rightarrow ono \rightarrow onn$
		$I_{sa} \geq 0$ $I_{sb} < 0$	$onn \rightarrow ono \rightarrow pno \rightarrow poo \rightarrow poo \rightarrow pno \rightarrow ono \rightarrow onn$
		$I_{sa} < 0$ $I_{sb} \geq 0$	$ono \rightarrow pno \rightarrow poo \rightarrow pop \rightarrow pop \rightarrow poo \rightarrow pno \rightarrow ono$
		$I_{sa} < 0$ $I_{sb} < 0$	$ono \rightarrow pno \rightarrow poo \rightarrow poo \rightarrow pno \rightarrow ono$
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sa} \geq 0$ $I_{sb} \geq 0$	$ono \rightarrow pno \rightarrow poo \rightarrow poo \rightarrow pno \rightarrow ono$
		$I_{sa} \geq 0$ $I_{sb} < 0$	$ono \rightarrow pno \rightarrow poo \rightarrow pop \rightarrow pop \rightarrow poo \rightarrow pno \rightarrow ono$
		$I_{sa} < 0$ $I_{sb} \geq 0$	$onn \rightarrow ono \rightarrow pno \rightarrow poo \rightarrow poo \rightarrow pno \rightarrow ono \rightarrow onn$
		$I_{sa} < 0$ $I_{sb} < 0$	$onn \rightarrow ono \rightarrow pno \rightarrow poo \rightarrow pop \rightarrow pop \rightarrow poo \rightarrow pno \rightarrow ono \rightarrow onn$

Çizelge D.1 (devam) : Orta nokta gerilim değişimine ve faz akımları arasındaki bağıntıya bağlı olarak anahtarlama sıralamasının belirlenmesi.

XIII. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sa} \geq 0$	onn $\rightarrow$ pnn $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ pnn $\rightarrow$ onn
		$I_{sa} < 0$	pnn $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ pnn
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sa} \geq 0$	pnn $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ pnn
		$I_{sa} < 0$	onn $\rightarrow$ pnn $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ pnn $\rightarrow$ onn
XIV. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sc} \geq 0$	ppo $\rightarrow$ ppn $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ ppn $\rightarrow$ ppo
		$I_{sc} < 0$	ppn $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ ppn
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sc} \geq 0$	ppn $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ ppn
		$I_{sc} < 0$	ppo $\rightarrow$ ppn $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ pon $\rightarrow$ ppn $\rightarrow$ ppo
XV. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sc} \geq 0$	ppo $\rightarrow$ ppn $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ ppn $\rightarrow$ ppo
		$I_{sc} < 0$	ppn $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ ppn
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sc} \geq 0$	ppn $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ oon $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ ppn
		$I_{sc} < 0$	ppo $\rightarrow$ ppn $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ ppn $\rightarrow$ ppo
XVI. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sb} \geq 0$	non $\rightarrow$ npn $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ npn $\rightarrow$ non
		$I_{sb} < 0$	npn $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ npn
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sb} \geq 0$	npn $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ npn
		$I_{sb} < 0$	non $\rightarrow$ npn $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ opn $\rightarrow$ npn $\rightarrow$ non
XVII. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sb} \geq 0$	non $\rightarrow$ npn $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ npn $\rightarrow$ non
		$I_{sb} < 0$	npn $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ npn
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sb} \geq 0$	npn $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ opo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ npn
		$I_{sb} < 0$	non $\rightarrow$ npn $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ npn $\rightarrow$ non
XVIII. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sa} \geq 0$	opp $\rightarrow$ npp $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ npp $\rightarrow$ opp
		$I_{sa} < 0$	npp $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ npp
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sa} \geq 0$	npp $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ npp
		$I_{sa} < 0$	opp $\rightarrow$ npp $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ npo $\rightarrow$ npp $\rightarrow$ opp
XIX. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sa} \geq 0$	opp $\rightarrow$ npp $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ npp $\rightarrow$ opp
		$I_{sa} < 0$	npp $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ npp
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sa} \geq 0$	npp $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ noo $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ npp
		$I_{sa} < 0$	opp $\rightarrow$ npp $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ npp $\rightarrow$ opp
XX. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sc} \geq 0$	nno $\rightarrow$ nnp $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ nnp $\rightarrow$ nno
		$I_{sc} < 0$	nnp $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ nnp
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sc} \geq 0$	nnp $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ nnp
		$I_{sc} < 0$	nno $\rightarrow$ nnp $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ nop $\rightarrow$ nnp $\rightarrow$ nno
XXI. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sc} \geq 0$	nno $\rightarrow$ nnp $\rightarrow$ onp $\rightarrow$ onp $\rightarrow$ nnp $\rightarrow$ nno
		$I_{sc} < 0$	nnp $\rightarrow$ onp $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ onp $\rightarrow$ nnp
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sc} \geq 0$	nnp $\rightarrow$ onp $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ oop $\rightarrow$ onp $\rightarrow$ nnp
		$I_{sc} < 0$	nno $\rightarrow$ nnp $\rightarrow$ onp $\rightarrow$ onp $\rightarrow$ nnp $\rightarrow$ nno
XXII. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sb} \geq 0$	pop $\rightarrow$ pnp $\rightarrow$ onp $\rightarrow$ onp $\rightarrow$ pnp $\rightarrow$ pop
		$I_{sb} < 0$	pnp $\rightarrow$ onp $\rightarrow$ ono $\rightarrow$ ono $\rightarrow$ onp $\rightarrow$ pnp
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sb} \geq 0$	pnp $\rightarrow$ onp $\rightarrow$ ono $\rightarrow$ ono $\rightarrow$ onp $\rightarrow$ pnp
		$I_{sb} < 0$	pop $\rightarrow$ pnp $\rightarrow$ onp $\rightarrow$ onp $\rightarrow$ pnp $\rightarrow$ pop

Çizelge D.1 (devam) : Orta nokta gerilim değişimine ve faz akımları arasındaki bağıntıya bağlı olarak anahtarlama sıralamasının belirlenmesi.

XXIII. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sb} \geq 0$	pop $\rightarrow$ pnp $\rightarrow$ pno $\rightarrow$ pno $\rightarrow$ pnp $\rightarrow$ pop
		$I_{sb} < 0$	pnp $\rightarrow$ pno $\rightarrow$ ono $\rightarrow$ ono $\rightarrow$ pno $\rightarrow$ pnp
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sb} \geq 0$	pnp $\rightarrow$ pno $\rightarrow$ ono $\rightarrow$ ono $\rightarrow$ pno $\rightarrow$ pnp
		$I_{sb} < 0$	pop $\rightarrow$ pnp $\rightarrow$ pno $\rightarrow$ pno $\rightarrow$ pnp $\rightarrow$ pop
XXIV. Bölge	$\Delta V_{NP} \geq 0$	$I_{sa} \geq 0$	onn $\rightarrow$ pnn $\rightarrow$ pno $\rightarrow$ pno $\rightarrow$ pnn $\rightarrow$ onn
		$I_{sa} < 0$	pnn $\rightarrow$ pno $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ pno $\rightarrow$ pnn
	$\Delta V_{NP} < 0$	$I_{sa} \geq 0$	pnn $\rightarrow$ pno $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ poo $\rightarrow$ pno $\rightarrow$ pnn
		$I_{sa} < 0$	onn $\rightarrow$ pnn $\rightarrow$ pno $\rightarrow$ pno $\rightarrow$ pnn $\rightarrow$ onn

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : İlknur ÇOLAK

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2002, İstanbul Teknik Üniversitesi,
Elektrik–Elektronik Fakültesi,
Elektrik Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2006, İstanbul Teknik Üniversitesi,
Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı,
Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı
- **Doktora** : 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi,
Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı,
Elektrik Mühendisliği Doktora Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

01/2022- Present: **Schneider Electric-Secure Power Division, Grenoble, France**
Technical Director

Responsibilities: ♦ Leading multi-site R&D team and multi-disciplinary R&D activities.

11/2016- 12/2021: **Maschinenfabrik Reinhausen (MR)-Power Electronics Research and Development Department, Regensburg, Germany**

Head of Power Electronics R&D

Projects and responsibilities: ♦ Leading multinational R&D teams distributed in three locations (Regensburg, Cambridge, Dresden)
♦ Initiating, planning and leading multi-million euro government funded projects
♦ Initiating, planning and leading multi-million euro (tens of MW and tens of kV range) internal research and development projects
♦ Building up medium voltage laboratory within the company
♦ Developing medium voltage power electronics talent and know-how within the organization
♦ Technical consultancy within the company for other power electronics projects
♦ Supporting the ramp-up of power electronics capacity and competence at MR, e.g. via intensive recruiting activities

- ♦ Working together with suppliers and other third parties to find best solutions for technical problems
- ♦ Defining processes and tools best suited to each project, creating detailed project road maps, plans, schedules and work breakdown structures and make timeline adjustments as needed
- ♦ Technical design work in power electronics hardware, mechanical design and software engineering
- ♦ Generating intellectual property and reviewing other competitors' intellectual properties
- ♦ Organizing internal and external technical and soft skill tutorials and seminars
- ♦ Supervising more than 34 master students within last 5 years

**03/2012-
10/2016:**

**ABB-Power Electronics Research and Development Department,
Aargau, Switzerland**

Senior Power Electronics R&D Lead Engineer

Projects and
responsibilities:

- ♦ Lead engineer of MMC project (from 15kV to 200kV) for Rail applications
- ♦ Design of FMECA and protection concept for multilevel converters
- ♦ EMC and grounding design (based on IEC standards) for MMC based converters
- ♦ System design for NPC topology based STATCOM applications
- ♦ System loss and cost evaluation and design optimization for IGCT based converters
- ♦ Reliability and availability analysis for high power converters
- ♦ Insulation and coordination design (based on IEC standards) for MMC based STATCOM and Rail applications
- ♦ Maximum current rating analysis of medium voltage (3kV to 9kV) NPC and ANPC converters
- ♦ Performing IGCT based converter tests
- ♦ Preparing STATCOM converters' (up to 36kV) pre-charging concepts
- ♦ Optimized busbar design for a multi-parallel (24 high power thyristor) thyristor based rectifier

**03/2012-
10/2016:**

CERN-European Nuclear Research Center, Geneva, Switzerland
Research and Development Scientist (Fellow)

Projects and
responsibilities:

- ♦ Design and construction of a prototype 3-Level H-Bridge Bidirectional Converter for LHC Ring
- ♦ Design and construction of a 3-Level NPC Converter using Space Vector PWM
- ♦ Updating and re-integration of LINAC-2 (Linear Accelerator) Power Converters

- 06/2007-01/2010:** **OZDISAN ELK. PAZ. SAN. & TIC. A.S., Istanbul, Turkey**
Research & Development and Technical Support Manager
Projects and Responsibilities:
 - ♦ Preparing military and industrial project proposals
 - ♦ Technical consulting for customers
 - ♦ Build up and spread know-how in the department
 - ♦ Construct prototypes for special project requirements
 - ♦ Design and development of ASELSAN AC/DC, DC/DC and DC/AC Converters
 - ♦ Design and production of 3 phase 30kVA Capacitive Electronic Load for UPS manufacturers
 - ♦ Design of Line Follower Train (for entertainment applications)
 - ♦ Design and standardization of High Power IGBT Driver circuits
 - ♦ Design and development of SMD based hall effect sensor circuits
- 11/2003-06/2007:** **TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) - Marmara Research Center - Energy Institute, Kocaeli, Turkey**
Research Scientist
Projects and Responsibilities:
 - ♦ Design, development and commissioning of 8000A-10V Submarine Modular Quasi-Resonant Battery Charging converter
 - ♦ Design of Hybrid Electric Vehicle's Battery Management System
 - ♦ Design concept of Ship Degaussing and Deperming Systems' Power Converters
 - ♦ Participation in the "Improvement of Energy Efficiency in Turkey" project to set the rules about energy efficiency in collaboration with SENTERNOVEM-Netherlands and ADEME-France
 - ♦ Preparing the design concept of Permanent Magnet Wind Turbine and its power electronic control system
 - ♦ Preparing the design concept of Electric Train Power Converter system
- 02/2004-06/2005:** **Ansaldo Energia, Genoa, Italy**
Research Scientist
Projects and Responsibilities:
 - ♦ Design and production of 1MW, 3kV/750V DC/DC Series Resonant Converter for electrical distribution of the ships (NATO Project)
- 08/2002-11/2003:** **EKA A.S., Istanbul, Turkey**
Research & Development Engineer
Projects and Responsibilities:
 - ♦ Design and construction of 5kVA, 15kVA, 90kVA Static Voltage Regulators
 - ♦ Design of 3 phase Thyristor Controlled Rectifiers from 2kVA to 50kVA
 - ♦ Design and production of 3kVA, 5kVA series and parallel type Resonant Converters
 - ♦ Design of online/offline UPSs from 1kVA to 100kVA
 - ♦ Design and implementation of stepped output filter of 15kVA 1500Hz Frequency Converter.
- 02/1999-10/2000:** **Istanbul Technical University (ITU), Informatics Institute, Istanbul, Turkey**
Teaching Assistant
Projects:
 - ♦ Lecturing on Mathematica, C, Tex, Java, Unix and Linux
 - ♦ Preparing Turkey's first on-line learning lectures on mathematics and physics using Linux based software
 - ♦ Writing computer programs in Tex, C, Java, Mathematica, and Perl

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Colak, I.**, Kocabas, D.A., “*The NTV-SV-PWM Method Using an Improved Look-up Table for DC-Link Mid-Point Balancing Applied for Ocean Wave Energy Conversion System*“, International Journal of Power and Energy Systems, 2021.
- **Colak, I.**, Kocabas, D.A., “*DC Link Balancing of Space Vector Modulation Controlled Three-Level Converter for Ocean Wave Energy Conversion*“, RTUCON’16, October 2016, Latvia, Riga.
- **Colak, I.**, Kocabas, D.A., “*Space Vector Modulation Controlled 3L-Converter for Ocean Wave Energy Conversion*“, MELECON’16, CY, April 2016.
- **Colak, I.**, Kocabas, D.A., “*NTV-SV-PWM Controlled Three-Level Converter for Ocean Wave Energy Conversion*“, RTUCON’15, October 2015, Latvia, Riga.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Patent applications:

- MIR-20-000512: “*Cell by Cell Pre-charging for MMC*”
- MIR-20-000606: “*MMC Cells Tap Coordination*”
- EP22157273.8: “*Converter and Method for Discharging a Converter*”
- MIR-19-000158: “*Island Operation of Microgrids with PV Feed by Ront Control*”
- WO2018006970A1: “*Semiconductor Power Stack of a Modular Multilevel Converter*”
- EP3607645A1: “*Implementation of a DC Offset Suppressing Device and Method in High Voltage Modular Multilevel Converters*”

Tutorials:

- “*Insulation Coordination Design Steps for Power Converters*”, APEC’22, Houston, USA, March 2022.
- “*Solid State Transformers*”, PCIM’22, Nuremberg, Germany, May 2022.
- “*EMC Design Fundamentals for Power Electronics Converters*”, APEC’21, Phoenix, USA, June 2021.
- “*Insulation Coordination Design Steps for Medium Voltage Power Electronics Applications*”, PCIM’21, Nuremberg, Germany, May 2021.
- “*Solid State Transformers: Challenges and Applications*”, Darmstadt University, April 2021.
- “*Current Trends in Power Electronics*”, SMART Grid Conference, Rome, Italy, October 2020 (postponed).
- “*EMC Design Fundamentals and EMI Mitigation Techniques in High Power Converters*”, IECON’20, Singapore, October 2020.
- “*Insulation Coordination Design Steps for Medium Voltage Power Electronics Applications*”, HighVolt Academy, Dresden, Germany, October 2019.
- “*Insulation Coordination Design Steps for Medium Voltage Power Electronics Applications*”, EPE’19, Genova, Italy, September 2019.
- “*Insulation Coordination Design in Power Electronics*”, Gaeta PhD School’19, Gaeta, Italy, May 2019.
- “*EMC Design Fundamentals and EMI Mitigation Techniques in High Power Converters*”, Gaeta PhD School’18, Gaeta, Italy, May 2018.

- “*EMC Design Fundamentals and EMI Mitigation Techniques in High Power Converters*”, EPFL Power Electronics Laboratory, Lausanne, Switzerland, April 2018.
- “*EMC Design Fundamentals and EMI Mitigation Techniques in High Power Converters*”, EPE’17, Warsaw, Poland, September 2017.
- “*EMC Design Steps for Medium Voltage Power Electronics Systems*”, ECPE Workshop: EMC in Power Electronics: From Harmonics to MHz – Design for EMC and Fast Switching, Berlin, Germany, May 2017.
- “*EMC Design Aspects for High Power Medium Voltage Converters*”, IECON’16, Florence, Italy, October 2016.
- “*EMC Design Fundamentals and EMI Mitigation Techniques in High Power Converters*”, ABB, December 2015.
- “*High Precision Performance of Power Converters*”, CERN, Switzerland, July 2010.
- “*Photovoltaic Systems and Their System Configuration Analysis Conference*”, WIN’08, Turkey, February 2008.
- “*Harmonic and EMI Problems and Their Solutions Conference*”, WIN’08, Turkey, February 2008.

Papers:

- Meligy, A., Qoria, T., **Colak, I.**, “*Comparative Study on DC Voltage Control and Active Power Injection for an SDBC MMC E-STATCOM*”, EPE’22, September 2022.
- Abu-Ali, M., **Colak, I.**, “*A Fast and Safe Discharging Method for MMC Submodule Capacitors*”, PCIM’22, Nuremberg, May 2022.
- Bach, A., Aguilar, R., **Colak, I.**, “*Application of Resonant Controllers for Current Harmonic Suppression and Rejection in Grid-Tied Modular Multilevel Converters*”, IECON’21, October 2021.
- Kushalappa, V., Elsabrouty, I., Ali, W., **Colak, I.**, “*Modeling and Testing of Single Delta Bridge Cell Modular Multilevel Converter STATCOM in FPGA Based Real-Time Simulator*”, IECON’21, October 2021.
- Meligy, A., Qoria, T., **Colak, I.**, “*SDBC-MMC STATCOM Control Under Unbalanced Grid Conditions Based on Different Sequence Extraction Methods*”, IECON’21, October 2021.
- Abu-Ali, M., **Colak, I.**, “*A Novel Cell-by-Cell Pre-charging Scheme of Modular Multilevel Converters*”, PCIM’21, Nuremberg, May 2021.
- Kapale, P., **Colak, I.**, “*Reliability and Cost Figures Comparison of Modular Multilevel Converter*”, PEMD’20, UK, December 2020.
- Kapale, P., **Colak, I.**, “*Influence of Submodule Capacitance on MMC Performance and Its Optimum Sizing*”, IECON’20, Singapore, October 2020.
- **Colak, I.**, Yang, Y., “*Performance Comparison of Si and SiC IGBT Based Modular Multilevel Converters for Medium Voltage STATCOM Application*”, RTUCON’20, Latvia, November 2020.
- Bissal, A., Ali, W., Leedham, R., Snook, M., Elsabrouty, I., **Colak, I.**, “*A Hybrid Pulse Width Modulation Technique with Temperature Control for Modular Multilevel Converters*”, EPE’20, FR, September 2020.

- Kannan, S., Poongothai, C., **Colak, I.**, Ali, W., “*Selective Harmonic Elimination for Modular Multilevel Converter with Averaging and Circulating Current Control*”, ICRERA’18, FR, October 2018.
- Dudin, A., Bissal, A., **Colak, I.**, Ali, W., “*Comparison of Phase Shift and Cell Tolerance Band Nearest Level Modulation for Two Medium Voltage Modular Multilevel Converter Designs*”, ECCE’18, USA, September 2018.
- Bissal, A., **Colak, I.**, Ali, W., “*The Effects of Phase Leg Reactor, Submodule Capacitor, Number of Submodules and Switching Frequency on Harmonics in Modular Multilevel Converter*”, PEMD’18, IET Journal, 2018.
- **Colak, I.**, “*Thermal Analysis of an Optimized Switching Modulation Technique for ANPC Topology*”, MELECON’16, CY, April 2016.
- **Colak, I.**, “*Optimized Switching Modulation Technique for ANPC Converter*”, EPE’15, September 2015 Switzerland.
- **Colak, I.**, “*Buck Type (8kA, 10V) High Frequency Quasi-Resonant Converter*”, EPE’11, August 2011, UK.
- **Colak, I.**, Yildirim, D., “*The Control Unit of a Single Phase Voltage Regulator*”, IECON’10, USA, November 2010.
- **Colak, I.**, Ertike, S., “*A New Type Single Phase Switching Voltage Regulator*”, ECCE’10, USA, September 2010.
- **Colak, I.**, Yildirim, D., “*Evolving a Line Following Robot to Use in Shopping Centers for Entertainment*”, IECON’09, Portugal, November 2009.
- **Colak, I.**, Kadirgan, F., Yildirim, D., “*The Feasibility Report about Economic Aspects of Greenhouse Gas Emissions Reduction by Utilization of Solar Energy to Produce Electricity*”, CIEM’09, Romania, November 2009.
- **Colak, I.**, Tuncay, N., “*High Current, Low Voltage Modular Power Converter For Lead Acid Battery Charging*”, ICSET’08, Singapore, November 2008.
- **Colak, I.**, “*Surface Mount Current Transducer Applications*”, Kaynak Elektrik, No: 230, pp. 132-135, Turkey, July 2008.
- **Colak, I.**, “*Surface Mount Current Transducer in High Power Applications*”, Journal of Automation, No: 136, pp. 100-101, Turkey, July 2008.
- **Colak, I.**, “*More Efficient Motor Drive Applications with New Type IGBTs*”, Journal of Industry & Automation, No: 136, pp. 96-98, Turkey, July 2008.

Seminars:

- **Colak, I.**, “*Trends in Power Electronics*”, RT21 Conference, Germany, September 2021.
- **Colak, I.**, “*Solid State Transformer: Challenges and Applications*”, EPE Conference, online, September 2021.
- **Colak, I.**, “*A Generic Cell Design for Modular Multilevel Converters*”, eGrid Conference, Germany, November 2020.
- **Colak, I.**, “*Programming Yourself for Success*”, IEEE EMC + SIPI Conference, USA, August 2020.
- **Colak, I.**, “*Insights into Successful Career Path*”, GeMiC Conference, Germany, March 2020.
- **Colak, I.**, “*High Precision Performance of Power Converters*”, CERN, Switzerland, July 2010.
- **Colak, I.**, “*High Power Converters*”, CERN, Switzerland, August 2009.

- **Colak, I.**, “*The Methods of Research and Development of Usability*”, Yeditepe University Research and Development Symposium Days’09, Turkey, February 2009.
- **Colak, I.**, “*Induction Machine Vector Control Methods*”, Istanbul Technical University, Turkey, January, 2008.
- **Colak, I.**, “*ESD Precautions and Electrical Hazard Protections*”, TUBITAK, Turkey, May 2007.



