

**FAZ BİLEŞENLERİ VE ÇOK-UÇLU ELEMAN
KAVRAMI YARDIMI İLE 3-FAZLI DAĞITIM
ŞEBEKELERİNİN HARMONİK ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Ömer GÜL
(504952010)

112246

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16 Mart 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 05 Ekim 2001

Tez Danışmanı :

Prof. Dr. Adnan KAYPMAN

Diğer Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ömer USTA

Doç. Dr. Canbolat UÇAK

Prof. Dr. Ergül AKÇAKAYA (IŞIK Ü.)

Prof. Dr. Nevzat ÖZAY (O.D.T.Ü.)

EKİM 2001

ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmam sırasında yakın ilgilerini gördüğüm, çalışmalarımı yönlendiren değerli hocam Sayın Prof. Dr. Adnan Kaypmaz' a, UMIST' de misafir araştırmacı olarak yapmış olduğum çalışmaya katkılarından dolayı Dr. J. Milanović' e ve 3 aylık kısmını maddi olarak destekleyen Tinçel Kültür Vakfı'na, doktora tez çalışmasını proje olarak destekleyen ve yapılan çalışmaların yurtiçi ve yurtdışı konferanslarda sunulmasında ekonomik destek sağlayan İstanbul Teknik Üniversitesi'ne, çalışmalarına her zaman sabır ve hoşgörü ile destek olan sevgili eşime ve bu çalışmaya küçük de olsa katkısı bulunan tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Mart, 2001

Y. Müh. Ömer GÜL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	xii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLER	13
2.1. Giriş	13
2.2. Fourier Serileri	14
2.3. Sinüsoidal Olmayan Durumda Elektriksel Büyüklükler	16
2.4. Harmonik İndisleri	19
2.5. Harmonik Kaynakları	20
2.6. Harmoniklerin Etkileri	22
2.7. Harmoniklerin Azaltılması	25
2.8. Harmonik Standartları	27
2.9. Harmonik Analiz Yöntemleri	28
2.9.1. Frekans tarama yöntemi	29
2.9.2. Sabit akım kaynağı yöntemi	30
2.9.3. Harmonik güç akışı yöntemi	31
3. ÜÇ FAZLI ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNİN HARMONİK BAĞIMLI MODELLENMESİ	36
3.1. Giriş	36
3.2. Çok-Uçlu Eleman Kavramı Yardımı İle Elektrik Şebekelerinin Harmonik Bağımlı Modellenmesi	39

3.3. Çok-Uçlu Eleman Kavramı ile Çok-Fazlı Elektrik Şebekelerinin Harmonik Bağımlı Modellenmesi	46
3.3.1. Üç fazlı hattın harmonik bağımlı modeli	49
3.3.2. Transformatörün harmonik bağımlı modeli	55
3.3.2.1. Bir fazlı transformatörün harmonik bağımlı modeli	59
3.3.2.2. Üç fazlı transformatörün harmonik bağımlı modeli	63
3.3.3. Senkron generatörün harmonik bağımlı modeli	74
3.3.4. Diğer elemanların modelleri	77
3.3.5. Elektrik şebekesinin harmonik bağımlı modeli	78
4. DAĞITIM ŞEBEKELERİNİN ÇOK-FAZLI HARMONİK ANALİZİ	82
4.1. Giriş	82
4.2. Dağıtım Şebekelerinin Harmonik Analizi	82
4.3. Dağıtım Şebekelerinin Harmonik Bağımlı Modeli	85
4.4. Dağıtım Şebekelerinde Yükler	88
4.4.1. Doğrusal yükler	89
4.4.2. Doğrusal olmayan yükler	92
4.4.3. Genel yükler	92
4.5. Yüklerin Genel Modelinin Gerilim Ve Akım Ölçümleri Kullanılarak Elde Edilmesi	92
4.6. Yeni Yaklaşım ile Çok-Fazlı Güç Akışı	100
4.7. Dağıtım Şebekeleri İçin Önerilen Çok-Fazlı Harmonik Güç Akışı Algoritması	107
5. SAYISAL UYGULAMALAR	115
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	131
KAYNAKLAR	136
EK A. SAYISAL UYGULAMA VERİLERİ	148
EK B. FAKTÖRLERE AYIRMA YÖNTEMİ	150
EK C. ÇOK-UÇLULARIN PARALEL BAĞLANMASI	152
ÖZGEÇMİŞ	154

KISALTMALAR

CF	: C faktörü
DF	: Bozulma Faktörü
FFT	: Hızlı Fourier Transform
DFT	: Ayırık Fourier Transform
IEE	: İngiltere Elektrik Mühendisliği Enstitüsü
IEEE	: Amerikan Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Enstitüsü
PF	: Güç Faktörü
p.u.	: Birim Değer
IMTP	: Elektromanyetik Transient Program
ATP	: Alternatif Transient Program
THD	: Toplam Harmonik Bozulması
TDD	: Toplam Talep Bozulması
PCC	: Ortak Bağlantı Barası
TIF	: Telefon Etkileşim Faktörü
KAY	: Kiriş Akımları Yöntemi
A.G	: Alçak Gerilim
O.G	: Orta Gerilim
Y.G	: Yüksek Gerilim
Im	: Kompleks sayının imajiner kısmı
Re	: Kompleks sayının reel kısmı

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Çeşitli ülkelerin harmonik standartları	27
Tablo 2.2. Gerilim bozulma sınırları	28
Tablo 2.3. Akım bozulma sınırları	28
Tablo 3.1. Transformatör kısa devre parametrelerinin frekansa göre değişimi	56
Tablo 3.2. Bir güç transformatörünün harmonik spektrumu	57
Tablo 4.1. Pasif yük modeli için direnç ve reaktans bağıntıları	91
Tablo 5.1. Test sisteminin frekans cevabı incelemesi için farklı durumlar	116
Tablo 5.2 Temel bileşen bara gerilimleri	124
Tablo 5.3 Nötr akımı	124
Tablo 5.4 Bir fazlı doğrusal yükün harmonik spektrumu ve yük modeli	125
Tablo 5.5 Bir fazlı doğrusal olmayan yükün harmonik spektrumu ve yük modeli	125
Tablo 5.6 Gerilim harmoniklerinden farklı harmonik akımları olan bir fazlı yük ve modeli	126
Tablo 5.7 3-fazlı dengeli doğrusal yükün harmonik spektrumu ve yük modeli ..	127
Tablo 5.8 3-fazlı dengeli doğrusal olmayan yükün harmonik spektrumu ve yük modeli	127
Tablo 5.9 Gerilim harmoniklerinden farklı harmonik akımları olan 3-fazlı dengeli doğrusal olmayan yükün harmonik spektrumu ve yük modeli	128
Tablo 5.10 Gerilim harmoniklerinden farklı harmonik akımları olan 3-fazlı dengesiz doğrusal olmayan yükün harmonik spektrumu ve yük modeli	128
Tablo A.1. IEEE endüstriyel test sistemi verileri	148
Tablo A.2. IEEE endüstriyel test sistemi 2 nolu yükün harmonik akım spektrumu	148
Tablo A.3 IEEE bina dağıtım harmonik test sistemi verileri	149
Tablo A.4 IEEE bina dağıtım harmonik test sistemi ofis yükünün harmonik spektrumu	149

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : a) Transformatör mıknatıslanma akımı	15
b) Mıknatıslanma akımı temel ve harmonik bileşenleri	15
Şekil 2.2 : Seri rezonans prensip şeması	24
Şekil 2.3 : Paralel rezonans prensip şeması	24
Şekil 2.4 : Alçak gerilim filtresi	26
Şekil 3.1 : 3-fazlı transformatörlerde sıfır bileşen harmoniklerinin akışı .	
a) Yıldız (topraklı)/yıldız(topraklı).....	38
b) Yıldız(topraklı)/üçgen	38
Şekil 3.2 : Doğrusal olmayan devre elemanının Norton eşdeğerinin	
a) 2-uçlu gösterimi	40
b) Matematiksel modeli	40
Şekil 3.3 : a) (n+1)-uçlu	44
b) (n+1)-uçlunu h. harmonik matematiksel modeli	44
Şekil 3.4 : a) Çok-fazlı (1+z+n+o+1)-uçlu doğrusal olamayan eleman	48
b) Çok-fazlı (1+z+n+o+1)-uçlunun matematiksel modeli	48
Şekil 3.5 : Üç fazlı hattın π eşdeğeri	49
Şekil 3.6 : a) Üç fazlı hattın çok-uçlu gösterimi.....	51
b) Üç fazlı hattın matematiksel modeli	51
Şekil 3.7 : Transformatörün manyetik karakteristiği	56
Şekil 3.8 : Transformatörün bir fazlı harmonik eşdeğer devreleri	
a) T eşdeğer devre	57
b) L eşdeğer devre (mıknatıslanma akımı solda)	57
c) L eşdeğer devre (mıknatıslanma akımı sağda)	57
d) π eşdeğer devre	57
Şekil 3.9 : Bir fazlı faz kaydırmalı transformatör	
a) Harmonik L eşdeğer devresi	59
b) Çok-uçlu gösterimi	59
Şekil 3.10 : Bir fazlı faz kaydırmalı transformatörün matematiksel modeli	59
Şekil 3.11 : Bir fazlı transformatörün h. harmonik matematiksel modeli	60
Şekil 3.12 : a) Üç adet bir fazlı transformatörün kendi aralarında	
bağlanmasından elde edilen yıldız/üçgen bağlı transformatör	61
b) Her biri 5-uçlu eleman olarak modellenen bir fazlı	
transformatörlerin oluşturduğu, üç fazlı 8-uçlu transformatör	61
Şekil 3.13 : a) Yıldız/üçgen bağlı transformatörün 8-uçlu gösterimi	62
b) Yıldız/üçgen bağlı transformatörün uç-grafi	62
Şekil 3.14 : Ortak çekirdekli yıldız/üçgen bağlı 3 fazlı bir transformatör	64
Şekil 3.15 : a) Yıldız/üçgen bağlı 3 fazlı bir transformatörün çok-uçlu gösterimi	65
b) Yıldız/üçgen bağlı 3 fazlı bir transformatörün matematiksel	
modeli	65

Şekil 3.16	: Yıldız(topraklı)/üçgen bağlı 3 fazlı transformatörün faz bileşenleri eşdeğer devresi	72
Şekil 3.17	: Üç Fazlı, Yıldız(topraklı)/Üçgen bağlı, transformatörün simetrik bileşen eşdeğer devreleri	73
	a) Sıfır bileşen eşdeğer devresi.....	73
	b) Doğru bileşen eşdeğer devresi	73
	c) Negatif bileşen eşdeğer devresi	73
Şekil 3.18	: Senkron generatörün temel bileşen eşdeğeri ve çok-uçlu gösterimi	76
Şekil 3.19	: Senkron generatörün temel bileşen matematiksel modeli	76
Şekil 3.20	: Senkron generatörün h. harmonik eşdeğeri ve çok-uçlu gösterimi	77
Şekil 3.21	: Senkron generatörün h. harmonik matematiksel modeli	77
Şekil 3.22	: a) Üç fazlı elektrik şebekelerinin çok-uçlu gösterimi	78
	b) Üç fazlı elektrik şebekelerinin matematiksel modeli	78
Şekil 4.1	: Doğrusal pasif yük modeli	90
Şekil 4.2	: Doğrusal yayılı yükün tekil yük olarak modellenmesi	91
Şekil 4.3	: Bir fazlı yükün genel eşdeğer devresi	93
Şekil 4.4	: Bir fazlı yük 2-uçlusu ve matematiksel modeli	95
Şekil 4.5	: Yük uç-denklemlerinin elde edilmiş akış diyagramı.....	96
Şekil 4.6	: Üç fazlı yük modeli akış diyagramı	97
Şekil 4.7	: Üç fazlı yükün 4-uçlu gösterimi	98
Şekil 4.8	: Üç fazlı yükü temsil eden 4-uçlunun matematiksel modeli	98
Şekil 5.1	: IEEE 3 baralı endüstriyel test sistemi	115
Şekil 5.2	: Test sisteminin 1, 2, 3 ve 4 durumları için frekans cevabı	117
Şekil 5.3	: Test sisteminin 1, 5, 6 ve 7 durumları için frekans cevabı	117
Şekil 5.4	: Test sisteminin 1, 8, 9 ve 10 durumları için frekans cevabı	118
Şekil 5.5	: Bir ve üç fazlı şebekenin frekans cevabı, transformatör yıldız (topraklı)/yıldız(topraklı) bağlı	119
Şekil 5.6	: Bir ve üç fazlı şebekenin frekans cevabı, transformatör yıldız (topraklı)/yıldız(topraklı), hatlar arasında kuplaj var.....	119
Şekil 5.7	: Bir ve üç fazlı şebekenin frekans cevabı, transformatör yıldız (topraklı)/üçgen bağlı	120
Şekil 5.8	: Asimetrik yapıdaki 3 fazlı şebekenin frekans cevabı	121
	a) a fazı frekans cevabı	121
	b) b fazı frekans cevabı	121
	c) c fazı frekans cevabı	121
Şekil 5.9	: IEEE bina dağıtım harmonik sistemi	122
Şekil 5.10	: a) Test sistemi temel bileşen bara admitans matrisi görüntüsü	123
	: b) Test sistemi harmonik bağımlı bara admitans matrisi görüntüsü ...	123
Şekil C.1	: a) $(k+m+1)$ -uçlu	152
	b) $(m+n+1)$ -uçlu.....	152
	c) Tüm düğümleri içeren uç-graf	152

SEMBOL LİSTESİ

f	: Frekans
h	: Harmonik derecesi
h_{mak}	: Maksimum harmonik derecesi
r	: Referans (toprak)
t	: Zaman
a_0, a_h, b_h	: Fourier seri katsayıları
$v(t)$	: Gerilimin ani değeri
$i(t)$	: Akımın ani değeri
$p(t)$	: Gücün ani değeri
$x(t)$	: t ye bağlı fonksiyon
$w(t)$	: Gerilimin integralinin alternatif bileşeni
V	: Gerilimin efektif değeri
I	: Akımın efektif değeri
P	: Aktif güç
Q	: Reaktif güç
D	: Bozulma gücü
S	: Görünür güç
K	: K-faktörü
T	: Peryot
F	: Fonksiyon
R	: Direnç
X	: Reaktans
Y	: Admitans genliği
Z	: Empedans genliği
PF	: Güç faktörü
THD	: Toplam harmonik bozulması
E_i^a, E_i^b, E_i^c	: Senkron generatörün e.m.k
X_C	: Kapasitif reaktans
X_L	: Endüktif reaktans
X_s	: Seri bağlı reaktans
X_p	: Paralel bağlı reaktans
P_z	: Aktif kayıplar
Q_z	: Reaktif kayıplar
$*$	: Kompleks eşlenik
ϕ	: Gerilimin faz açısı
β	: Akımın faz açısı
λ	: İterasyon sayısı
π	: Sabit
w	: Açısal frekans

V	: Gerilim fazörü
I	: Akım fazörü
S	: Görünür güç fazörü
Y	: Admitans fazörü
Z	: Empedans fazörü
α, β	: Faz kaydırıcı transformatörün kompleks dönüştürme oranı
e, i_e	: Gerilim kaynağı gerilim ve akımı
v^*, i^*	: Uyarma kaynakları gerilim ve akımı
v_d, i_d	: Dalda kalan 2-uçlu elemanların gerilim ve akımı
v_k, i_k	: Kirişde kalan 2-uçlu elemanın gerilim ve akımı
v_j, j	: Akım kaynağının gerilimi ve akımı
I_{jk}	: j barasından k barasına akan akım
$I_{m(h)}$	: Transformatör mıknatıslanma akımı h. harmoniği
Y_{jk}	: j barası ile k barası arasına bağlı admitans
Y'_m	: 3 fazlı transformatörün farklı fazlarının birincil sargıları arasındaki kuplaj admitansı
Y''_m	: 3 fazlı transformatörün farklı fazlarının birincil ve ikincil sargıları arasındaki kuplaj admitans
Y'''_m	: 3 fazlı transformatörün farklı fazlarının ikincil sargıları arasındaki kuplaj admitansı
$[]$	: Matris veya vektör
$[]^T$	: Matris veya vektörün transpozesi
$[]^*$	: Matrisi veya vektörün kompleks eşleniği
$[]^{-1}$	: Matris veya vektörün tersi
$[T_s]$	: Simetrik bileşen dönüşüm matrisi
$[B]$	: Temel çevre matrisi
$[J]$	: Jacobian Matris
$[\Delta P_{gen}]$	: Senkron generatör güçleri hata matrisi
$[\Delta V_{reg}]$	: Generatör gerilimleri hata matrisi
$[\Delta X]$	: Bara değişkenleri matrisi
$[\Delta M]$	: Bara hata matris
$[Y_{dd}]$	: Dallarda kalan 2-uçluların admitans matrisleri
$[Y_{kk}]$	: Kirişlerde kalan 2-uçluların admitans matrisleri
$[Y_{dk}], [Y_{kd}]$	: Dal ve kirişlerde kalan 2-uçluların arasındaki kuplaj matrisi

Üst indisler

a, b, c, d	: a, b, c ve d faz bileşenleri
0, 1, 2	: Sıfır, doğru ve ters bileşenler
m	: Kuplaj
f	: Faz

Alt indisler

p	: Primitif
v	: Gerilim
i	: Akım
ü	: Üçgen
y	: Yıldız



FAZ BİLEŞENLERİ VE ÇOK-UÇLU ELEMAN KAVRAMI YARDIMI İLE 3-FAZLI DAĞITIM ŞEBEKELERİNİN HARMONİK ANALİZİ

ÖZET

Doğrusal olmayan yüklerin, elektrik dağıtım sistemlerinde, gerilim ve akım dalga biçiminde bozulma meydana getirdikleri uzun yıllardır bilinmektedir. Ancak, günümüzde; eskiden beri bilinen doğrusal olmayan yüklere ilaveten, güç elektroniği elemanlarının hızla yaygınlaşmasının yanında dalga şeklindeki bozulmaya duyarlı elemanların sayısındaki artış, bu konuda yapılacak çalışmaların önemini artırmıştır.

Periyodik, fakat biçimleri bozulmuş olan gerilim ve akım dalgaları, Fourier analiz yöntemleri kullanılarak, genlik ve frekansları farklı bir çok sinüsoidal dalganın toplamı olarak ifade edilmektedir. Frekansı, temel frekansın tam katı biçiminde olan bileşenler harmonikler olarak tanımlanmaktadır. Harmoniklerin, dağıtım şebekelerine etkilerinin belirlenebilmesi için harmonik akım ve gerilimlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu hesapların doğruluğu ise dağıtım şebekeleri için uygun modellerin ve analiz yöntemlerinin kullanılmasına bağlıdır.

Üç-fazlı elektrik enerji sistemlerinin, simetrik olmadığı durumda, faz bileşenleri yöntemi ile 3-fazlı olarak modellenmesi ve analiz edilmesi gerekmektedir. Bu çalışma, simetrik yapıda olmayan dağıtım şebekelerinin, çok fazlı harmonik bağımlı modellerinin elde edilmesini ve harmonik analizini amaçlamaktadır.

Dağıtım şebekelerinde, tek fazlı, iki fazlı, 3 fazlı, 3 faz-4 iletkenli sistemler bir arada bulunabilmektedir. Ayrıca, kompanzasyon amaçlı bir ve üç fazlı kapasiteler de bulunmaktadır. Birden fazla harmonik kaynağının bulunduğu dağıtım sistemlerinde, transformatörlerin üçgen bağlı sargıları nedeniyle oluşan faz kayması, harmonik akımlar ortak bağlantı noktalarında toplandığı için, önemlidir. Uzun hatların temel bileşen devresini simetrik yapıya getirmek amacıyla çaprazlama kullanıldığında harmonik bağımlı sistemde denge bozulmaktadır. Ayrıca, dağıtım şebekesini besleyen iletim sistemi gerilimi de harmonikli olabilmektedir. Dağıtım şebekeleri, doğrusal ve doğrusal olmayan bir ve dengesiz üç fazlı yükler nedeniyle dengesiz yüklenmektedir. Dağıtım şebekelerinin harmonik bağımlı modellenmesinde, doğrusal yükler frekansa bağlı admitans veya empedans olarak temsil edilmektedirler. Dağıtım sistemlerinde bir grup yük birbirine çok yakın biçimde konumlandırılmakta ve bir ana dağıtım noktasından beslenmektedir. Bu özellikten dolayı bu tip yükler doğrusal ve doğrusal olmayan, bir ve üç fazlı birden fazla yük içermelerine rağmen tek bir yük gibi kabul edilmektedirler.

Sinüsoidal olmayan sürekli halde, üç-fazlı, simetrik olmayan dağıtım şebekelerinin, faz bileşenleri yöntemi ile 3-fazlı olarak modellenmesi ve analiz edilmesi gerekmektedir.

Transformatörlerin yıldız noktası gerilimleri ile nötr yada toprak iletkenlerindeki harmonik akımlarının da hesaplanması gerektiği durumda ise 3 fazlı analiz, yerini çok-fazlı analize bırakmaktadır. 3 fazlı harmonik analizi yapılan elektrik dağıtım sistemlerinin boyutunun, üç fazlı analiz nedeniyle, üç kat daha büyümesi ve harmonik analizinin, ilgilenilen harmonik sayısı kadar, tekrarlanıyor olması yeni yöntem arayışlarını beraberinde getirmektedir.

Bu çalışmada, dağıtım şebekelerinin harmonik analizi ele alınmıştır. Simetrik yapıda olmayan dağıtım şebekelerinin harmonik analizi için, 3-fazlı harmonik bağımlı modeller, faz bileşenleri kullanılarak, elde edilmiştir. Burada, üç fazlı bir sistemin tek bir devre olarak modellenmesi düşüncesi ile hareket edilmiştir. 3 fazlı sistemin tek bir devre olarak modellenmesinin bir fazlı sistemin modellenmesinden farkı, üç fazlı yapı nedeniyle üç kat artan bara sayısıdır. 3 fazlı sistemin, fazlara ait baraları kendi aralarında gruplanıp, faz sırasında tasnif edilerek ve bu faz grupları da çok-uçlunun uçları olacak biçimde düzenlenerek, matematiksel modelleri elde edilmiştir. Baraların gruplanmasının bir sonucu olarak, hatların matematiksel modellerinin elde edilmesinde, bellek ihtiyacı ve işlem sayısı azalmıştır.

Çok-fazlı dağıtım şebekelerinin tek bir devre gibi modellenmesinin bir getirisi olarak, bir fazlı temel güç akışı ve harmonik analiz yöntemleri, çok-fazlı sistemler için genelleştirilerek verilmektedir. Dağıtım şebekelerinin simetrik olmayan yapılarının yanında birden çok harmonik kaynağı barındırmaları nedeniyle, sabit harmonik kaynağı modeli ile harmonik analizi yapılmadan önce temel güç akışı yapılarak harmonik akım kaynaklarının genlik ve açılarının güncellenmesi gerekmektedir.

Matematiksel modelleri fazlar gruplanmış tek bir devre gibi verilen üç fazlı dağıtım şebekelerinin analizi için bir fazlı Newton-Raphson güç akış algoritması geliştirilerek, çok fazlı güç akış algoritması verilmiştir. Çok-fazlı dağıtım sistemlerinin harmonik bağımlı matematiksel modellerinin elde edilmesi için hatlar, transformatörler ve senkron generatörün matematiksel modelleri uçları gruplanmış çok-uçlu eleman kavramı yardımıyla verilmiştir.

Literatürde bir fazlı doğrusal ve doğrusal olmayan yüklerin uçlarında yapılan akım ve gerilim ölçümlerini kullanarak bu yükleri temsil eden eşdeğer devrenin elde edilmesi için verilen algoritma geliştirilmiştir. Buna ek olarak yük modellerinin eşdeğer devrelerinin verilmesi yerine yük çok-uçlusunun matematiksel modelleri verilmiştir. Doğrusal olmayan bir fazlı yüklerin modellenmesi için geliştirilen algoritmanın, simetrik bileşen devrelerine ve üç fazlı yüklere uygulanması ayrıca ele alınmıştır.

Dağıtım şebekelerinin frekans cevabının belirlenmesi, alçak gerilim sistemlerin çok-fazlı harmonik bağımlı modellerinin elde edilmesi ve harmonik analiz sonuçları ve bir ve üç fazlı yüklerin modellenmesi için sayısal uygulamalar verilmiştir.

İlk uygulamada, eleman modellerinin ve kompanzasyon kapasitesinin yer ve değer değişiminin dağıtım şebekesinin frekans cevabına etkisi IEEE nin 3 baralı test sistemi ile incelenmiştir. Bir fazlı analiz sonuçları test sistemi sonuçları ile tamamıyla uyushmaktadır. Orijinal test sisteminde yapılan bazı değişikliklerle elde edilen 3 fazlı sistemde hatların fazları arasındaki kuplajın ve transformatör bağlama grubunun şebekenin frekans cevabına etkisi incelenmiştir. Üç fazlı simetrik dağıtım

sistemlerinde tek fazlı olarak frekans cevabının belirlenmesinin transformatör bağlama grubuna bağlı olarak hatalı olabileceği gösterilmiştir. Ayrıca, simetrik yapıda olmayan şebekelerde fazlar için ayrı ayrı frekans cevabının belirlenmesi yerine bir faz için frekans cevabının belirlenmesinin de genelde hatalı olacağı gösterilmiştir.

İkinci uygulamada, IEEE nin bina elektrik dağıtım sistemleri için verdiği test sistemi üzerinde çok fazlı dağıtım sistemlerinin harmonik bağımlı modellerinin elde edilmesi ve çok-fazlı harmonik analizi için verilen yaklaşımın uygulaması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar test sistemi sonuçları ile uyushmaktadır.

Üçüncü uygulamada, bir fazlı doğrusal ve doğrusal olmayan yüklerin modellenmesi için verilen geliştirilmiş algoritmanın sayısal uygulaması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatür sonuçları ile uyushmaktadır. Ayrıca, üç fazlı doğrusal ve doğrusal olmayan yüklerin modellenmesi için verilen yöntemin dört uygulaması yapılmıştır.

Özet olarak bu çalışmada faz bileşenleri ve çok-uçlu eleman kavramı yardımıyla 3-fazlı elektrik dağıtım sistemlerinin ve yüklerin harmonik bağımlı matematiksel modellerinin çıkarılması için çeşitli algoritmalar önerilmiştir. Bu modeller elde edilirken kullanılan bir yenilik de çok fazlı sistemlerin fazları gruplanmış tek bir çok uçlu gibi ele alınmasıdır. Ayrıca dağıtım sistemlerinin çok fazlı harmonik analizi için yeni çok fazlı temel bileşen ve harmonik güç akışı algoritmaları verilmiştir. Son olarak modelleme ve harmonik analiz için önerilen algoritmaların doğruluğu sayısal uygulamalarla gösterilmiştir.

HARMONIC ANALYSIS OF 3-PHASE DISTRIBUTION NETWORKS BY UTILIZING CONCEPT OF MULTI-TERMINAL COMPONENTS AND PHASE COORDINATES

SUMMARY

It has been long known that non-linear loads introduce distortion in voltage and current waveforms in distribution networks. In addition to the long-known non-linear loads, the widespread use of power electronic devices and the increase in devices sensitive to distortions in waveforms has enhanced the importance of research on this subject.

Using Fourier analysis methods, periodic and distorted waveforms of voltage and current are stated as the sum of sinusoidal waves with different magnitudes and frequencies. Components with a multiple frequency of fundamental frequency are called harmonics. To determine the effects of harmonics to distribution networks, harmonic currents and voltages must be calculated. The accuracy of these calculations depends on the use of appropriate models and analysis methods.

3-phase power systems are required to be modelled and analysed by phase coordinates method when they are asymmetric. This study aims multi-phase modelling in harmonic domain and harmonic analysis of asymmetric distribution networks.

Single phase, two phase, three phase, three phase-four wire systems can be found together in distribution networks. In addition, there are three phase and single-phase capacitors for compensation purposes. The phase shift due to delta connected windings in distribution networks with more than one harmonic sources is important since the harmonic currents are added in common coupling points. When transposition is used to increase the balance of the fundamental frequency system on long transmission lines, the balance of the system in harmonic domain is lost. In addition, transmission system voltage supplying distribution networks can have harmonics. Linear and non-linear single-phase loads, and/or imbalanced three-phase loads introduce imbalanced loads to distribution networks. In modelling of distribution networks in harmonic domain, linear loads are presented as frequency dependent admittance or impedance. In distribution systems, a group of loads are placed close to each other and supplied from one central distribution point. Therefore, this type of loads are considered as a single load, although they consist of more than one linear and non-linear, single and/or 3-phase loads.

In non-sinusoidal steady state, 3-phase asymmetric distribution networks need to be analysed and modelled with phase coordinates method as three-phase.

When it is required to calculate the transformer wye point voltage as well as the harmonic currents on neutral and ground wires, multi-phase analysis takes place of 3

phase analysis. The fact that the dimension of analysis increases by a factor of 3 when the analysis of distribution networks is done in 3-phase and harmonic analysis is repeated for desired harmonic numbers brings a need for new methods in 3-phase harmonic analysis of distribution networks.

In this study, distribution network harmonic analysis is considered. For harmonic analysis of asymmetric distribution networks, 3-phase harmonic dependent models are obtained using phase coordinates. One of the main points of departure is the idea of modelling of three phase systems as a single circuit. The difference between modelling of three phase systems as a single circuit and modelling of a single phase system is the three times increased number of busses because of 3 phase structure. The mathematical model of the three-phase system is obtained by grouping the busses belonging to each phase together in the order of phases and arranging these phase groups as the nodes of the multi-terminal component. As a result of grouping of busses, the need for memory and the number of calculations are reduced in obtaining the mathematical models of lines.

An advantage of modelling multi-phase distribution networks as a single circuit is that single-phase fundamental power flow and harmonic analysis methods can be generalized for multi-phase systems. Since distribution systems have more than one harmonic source along with their asymmetric structures, magnitudes and angles of harmonic current sources need to be updated using fundamental load flow before doing harmonic analysis with fixed harmonic sources model.

For the analysis of three-phase distribution networks with mathematical models that are derived as a phase-grouped-single-circuit, a multi-phase power flow algorithm is given by generalizing the single-phase Newton-Raphson power flow algorithm. To obtain harmonic dependent models of multi-phase distribution networks, mathematical models of lines, transformers and synchronous generators are given utilizing multi-terminal component concept in which the terminals are grouped.

An algorithm in literature used for modelling of linear and non-linear single loads by using the voltage and current measurements at their buses has been improved. In addition to this, mathematical models of loads are given utilizing the concept of multi-terminal components. The application of the proposed method to symmetrical components circuits and three-phase loads has also been considered.

Numerical applications to determine frequency response of networks, to obtain multi-phase harmonic dependent models and the results of harmonic analysis for low voltage systems, and to model single and three phase loads are given.

In the first application, the effect of changes in component models and the place and the value of compensation capacitors to frequency response of distribution networks are investigated using IEEE's 3 bus test system. Single-phase analysis results are in a complete agreement with the results of the test system. By applying changes to the original test system, a test system in three-phase was obtained and the affect of coupling between line phases and transformer connection to network frequency response is studied. It is shown that depending on the transformer connection determining the frequency response in three-phase symmetric distribution networks by a single phase could be wrong. In addition to this, it is shown that obtaining the

frequency response for one phase instead of finding the frequency response of each phase is generally wrong in asymmetrical networks

In the second application, the application of the proposed approach to obtain harmonic dependent models of multiphase distribution systems and multiphase harmonic analysis using the IEEE's test system for building distribution systems is achieved. The results are in agreement with test system's results

In the third application, numerical application of the algorithm improved for modelling of linear and non-linear single-phase loads is done. The results are in agreement with the results in the literature. In addition to this, four applications of modelling of 3-phase linear and non-linear loads are done.

To sum up, in this thesis, a set of algorithms is proposed for deriving the mathematical models of 3-phase electrical distribution systems and loads using phase coordinate and the concept of multi-terminal component. In deriving these models the innovative idea of using a phase-grouped multi-terminal component in place of multi-phase systems is used. In addition to this, new fundamental and harmonics power flow algorithms for the harmonic analysis of multi-phase distribution systems are given. In the end, the correctness of the algorithms proposed for modeling and harmonic analysis are demonstrated on numerical applications.

1. GİRİŞ

Alternatif akım sistemine bağlanan cihazlar ve yükler belirli bir gerilim ve frekansta çalışmak üzere yapılırlar. Bu nedenle, elektrik sistemlerinde enerjinin üretimi, iletimi ve dağıtımı, belirli bir gerilim seviyesinde, sabit frekanslı ve sinüs biçimli gerilim ve akım olarak yapılmaktadır. Bununla birlikte, sayıları büyük bir hızla artan, doğrusal olmayan yükler tarafından üretilen harmonik akımları, elektrik enerji sistemlerine, özellikle de elektrik dağıtım sistemlerine akıtılmaktadır. Elektrik dağıtım sistemlerinde, manyetik ve elektrik devrelerdeki doğrusal olmayan olaylar nedeniyle gerilim ve akımın dalga biçimlerinde meydana gelen bozulmalar, şebeke elemanlarında ve tüketicilerde arıza yada hatalı çalışma, ek ısınma, yalıtım zorlanması gibi etkileri ortaya çıkarmaktadır [1-8]. Ayrıca, gerilim ve akımın dalga biçimindeki bozulma nedeniyle meydana gelen rezonans olayları bu etkileri daha da artırmaktadır [2, 9-11].

Elektrik enerji sistemlerinin analizinde, sinüs biçimleri bozulmuş, periyodik gerilim ve akım dalgalarının, Fourier analiz yöntemleri kullanılarak, genlik ve frekansları farklı bir çok sinüsoidal dalganın toplamı olarak ifade edilmesi, bir takım yararlar sağlamak ve frekansı temel frekansın tam katı biçiminde olan bu bileşenler, harmonikler olarak tanımlanmaktadır [1, 2, 11-15].

Sürekli halde, elektrik sistemlerinde dalga biçimi bozulmasının en önemli nedeni, gerilimi ve akımı arasında doğrusal olmayan ilişkileri bulunan elemanlardır. Doğrusal olmayan ilişkilere neden olan olaylar ise, manyetik devrelerdeki doyma, elektrik devrelerindeki ark ve güç elektroniği devrelerinde sinüs eğrisinin kesilmesi olarak özetlenebilmektedir [11, 16-20].

Harmonikler ve bunların meydana getirdiği problemler uzun yıllardır bilinmekle beraber, günümüzde; eskiden beri bilinen harmonik kaynaklarına ilave olarak güç elektroniği elemanlarının hızla yaygınlaşmasının ve dalga biçimindeki bozulmaya

duyarlı elemanların sayısındaki artış, bu konuda yapılacak çalışmaların önemini arttırmış ve hatta zorunluluk haline getirmiştir [1-4, 20].

Yapılan çalışmalarda, doğrusal olmayan elemanların, enerji sistemi elemanları ve tüketiciler üzerindeki etkileri, ayrıntılı olarak, ortaya konmuştur. Bu etkileri tanımlamak için bir çok büyüklük (THD, DF, CF vb.) kullanılmaktadır [1, 13, 21]. Ayrıca, akım ve gerilim dalga biçiminde meydana gelen bozulmalar, sinüsoidal sürekli hal için verilen elektriksel büyüklüklerle ilgili bağıntıların yenilenmesini de gerektirmektedir [12, 16].

Sürekli sinüsoidal olmayan halde, elektriksel büyüklüklerin, bir ve üç fazlı sistemler için, yeniden tanımlanması ve fiziksel anlamlarının ifade edilmesine yönelik çeşitli çalışmalar yapılmış olup, özellikle, 3 fazlı dengesiz ve harmonikli sistemlerde güç ile ilgili, frekans ve zaman domeninde, yapılan çalışmalar halen devam etmektedir [22-29].

Enerji sistemindeki doğrusal olmayan yüklerin istenmeyen etkileri nedeniyle oluşan dalga biçimi bozulmalarının belirli bir sınır altında tutulması gerekmektedir. Günümüzde, enerji sistemlerinde mevcut harmoniklerin kontrol altında tutulmasına yönelik ulusal ve uluslararası standartlar yayınlanmıştır [21, 30-36].

Enerji sistemine katılacak doğrusal olmayan, bir fazlı ve üç fazlı, elemanların sisteme verdikleri, harmonik akımlarının sistem üzerinde yapacağı olumsuz etkilerin önceden belirlenmesi, yeni ilave edilecek elemanın sebep olacağı gerilim bozulması ve harmonik akım genliğinin tahmini, mevcut sistemde bulunan harmoniklerin, standartlarda belirtilen seviyenin altına indirecek filtre sistemlerinin tasarımı ve harmoniklerin sebep olduğu kayıpların belirlenmesi amaçlarından, bir yada daha fazlası için harmonik analize gerek duyulmaktadır [37].

Enerji sistemlerinin harmonik analizine yönelik geliştirilen zaman ve frekans domeni benzetim metotlarının kullanımı, veri gereksinimi, kullanılan modellerin ayrıntısı ve çözüm tekniklerine göre değişmektedir [12, 13, 38]. Bu yöntemlerden, elektrik şebekesinin frekans cevabının belirlenmesinde kullanılan frekans tarama tekniği en az veri gerektiren ve en basit yöntemdir. Zaman domeni analiz yöntemleri ise sabit güç yüklerinin benzetiminde yaşanan zorluk nedeniyle araştırmacılar tarafından cazip bulunmamasına rağmen son zamanlarda kullanılmaktadır [39-42].

Bu yöntemlerden, frekans domeni analiz yöntemi daha geniş kabul görmüş olup, yapılan çalışmaların sayısı son zamanlarda oldukça artmıştır. Frekans domeni harmonik analiz yöntemlerinde, harmonik kaynaklarının sabit akım ve gerilim kaynağı olarak modellenmesine veya kaynakların bağımlı kaynak olması durumuna göre, farklı teknikler kullanılmaktadır [13, 38, 43-47].

Harmoniklerin, enerji sistemlerine etkilerinin belirlenebilmesi için sistemde harmonik akım ve gerilimlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bunun doğruluğu için ise harmonik kaynakları ve şebeke yeterli doğrulukta modellenmelidir [11-13, 38, 48-50].

Üç fazlı enerji sistemlerinin, simetrik ve asimetrik, yapısal durumu söz konusu olup, analiz yöntemleri ve modeller de bu özelliklerle ilgili olarak verilmektedir [51-58]. Sürekli sinüsoidal olmayan halde, üç fazlı dengeli bir sistemde, $3n$, ($n=1, 2, 3, \dots$) dereceli harmoniklerin sıfır bileşen devrelerinde, $3n+1$, ($n=0, 1, 2, \dots$), dereceli temel bileşen ve harmoniklerin doğru bileşen devrelerinde, $3n-1$, ($n=1, 2, 3, \dots$), dereceli harmonikler ise negatif bileşen devrelerine dağılmaktadırlar. Bu nedenle, simetrik bileşenler dönüşümüyle, sinüsoidal durumda olduğu gibi sadece doğru (pozitif) bileşen ortaya çıkmamaktadır. Bunun sonucunda, harmonikli ve dengeli bir sistemde bir fazlı analiz ancak bazı kabuller altında mümkün olmaktadır [44]. Sinüsoidal olmayan sürekli halde, üç fazlı dengeli bir sistemde, sadece $3n+1$ dereceli temel bileşen ve harmoniklerin olduğu durumda, simetrik bileşenler dönüşümüyle, üç adet dengeli doğru bileşen devresi elde edilmektedir. Bu üç adet doğru bileşen devresinden biri için çözüm yapılmasının yeterli olması nedeniyle üç-fazlı simetrik ve dengeli sistem bir fazlı olarak analiz edilmektedir [2, 44, 59-62].

Dengeli, $3n$ dereceli sıfır bileşen harmoniklerinin elektrik enerji sisteminde dağılımı, transformatörlerin bağlama gruplarından da etkilemekte olup, sargılarının yıldız noktasının topraklı olması halinde harmonikler toprağa akmaktadır. Sargıların üçgen bağlı olduğu durumda ise harmonikler sargılarda sirkülasyon akımı olarak dolaşmaktadır. Transformatör sargılarının üçgen bağlı olmasından kaynaklanan faz kayması, özellikle sistemde birden fazla harmonik kaynağının bulunduğu durumda, harmoniklerin şebekede yayılışına etki ettikleri için ihmal edilmemektedir [63,64]. Sürekli sinüsoidal olmayan halde, dengesiz bir sistemde tüm harmonikler, dengesizlik miktarına bağlı olarak, doğru, ters ve sıfır sistem devrelerinde de

bulunmaktadır [49]. Bu nedenle simetrik ve dengesiz harmonikli sistemlerin analizinde simetrik bileşenler dönüşümü kaçınılmaz olmaktadır. Simetrik bileşenler yöntemi ile elektrik enerji sistemlerinin harmonik bağımlı modellenmesi ve analizi ile ilgili çalışmalar mevcuttur [65].

Sürekli sinüsoidal halde, simetrik olmayan üç-fazlı enerji sistemlerinin faz bileşenleri yöntemi ile 3-fazlı olarak modellenmesi ve analiz edilmesi gerekmektedir [56, 66-68]. Bazı durumlarda, transformatörlerin yıldız noktası gerilimleri ile nötr yada toprak iletkenlerindeki harmonik akımlarının da hesaplanması gerekmektedir. Bu durumda 3 fazlı analiz yerini çok-fazlı analize bırakmaktadır [12].

Elektrik enerji sistemlerinin 3 fazlı olarak modellenmesinde günümüze kadar bir çok çalışma yapılmış olup, literatürde üç fazlı güç akışı analizi ilk olarak El-abiad ve Tarsi tarafından gerçekleştirilmiştir [69]. Faz bileşenleri ile ilgili çalışma yapan araştırmacılardan Laughton ve M. S. Chen tarafından yapılan çalışmalar, bugün de kabul gören ve bu konudaki çalışmaların çoğunda referans gösterilen, temel çalışmalardır [51, 70]. Laughton, çok fazlı şebekelerde arıza analizini gerçekleştirmek üzere, enerji sistemlerini faz bileşenleri ile üç fazlı olarak modellemiştir [51]. Bu çalışmada, çok fazlı şebekede arıza analizini gerçekleştirmek üzere üç fazlı transformatörlerin yaygın bağlama grupları için, faz dönüştürücü, üç fazlı transformatör modelleri önerilmiştir. M. S. Chen ise, üç fazlı elektrik enerji sisteminin senkron makina, transformatör, hat ve diğer elemanlarını üç fazlı olarak modellemiştir [71]. Bu çalışmalardan sonra elektrik enerji sistemlerini 3-fazlı olarak modellenmesi ve analiz ile ilgili çalışmalar artarak devam etmiştir [52-54, 71-74]. Literatürde asimetrik yapıdaki şebekeler için verilen üç fazlı Newton-Raphson yük akışı algoritmaları; genellikle, iletim sistemleri için verilmiş olduklarından, fazların bara sayılarının farklı, yani fazların topolojik olarak birbirinden farklı olabileceği, genellikle göz önüne alınmamıştır [53, 72-74]. Dağıtım sistemlerinin dallı yapıda olmaları nedeniyle bir fazlı güç akışında ladder yöntemi yaygın olarak kullanılmakta olup, üç fazlı kuplajlı hatların bulunması durumunda ise kuplajların etkisi nedeniyle ortaya çıkan sıkıntı, fazlarda akım kontrollü gerilim kaynağı kullanılarak aşılıma çalışılmaktadır [75]. Bu durum ise yöntemin karmaşık hale gelmesine neden olmaktadır.

Enerji sistemlerinin harmonik analizi için Xia ve Heyt tarafından geliştirilen harmonik yük akışı çözüm tekniği literatürde ana referans kabul edilmiştir [44]. Bu yöntemde, şebekenin simetrik yapıda olduğu, dengeli olarak yüklendiği ve yüklerin üçgen bağlı olduğu kabul edilmiştir. Doğrusal olmayan yük olarak kontrollü doğrultucular gerilim kontrollü akım kaynakları olarak modellenmekte ve Newton-Raphson yöntemi harmonik analize uyarlanmaktadır. Bu yaklaşıma uygun olarak geliştirilen HARMFLO programı bunu destekleyen diğer çalışmalar ile doğrultucuların yanı sıra HVDC sistemlerin ve diğer doğrusal olmayan yüklerin bulunduğu harmonik yük akışında kullanılmaktadır [44]. Bu yaklaşımdan yararlanarak senkron generatör ve statik kompanzatörün harmonik analizinin yapıldığı çok fazlı harmonik güç akışı gerçekleştirilmiştir [76]. Mayordomo tarafından üç fazlı dengesiz sistemler için bir harmonik güç akışı algoritması önerilmiştir [65]. Bu yaklaşımda şebekede yıldız noktalarının topraktan yalıtılmış olduğu kabul edilmiş böylece sıfır bileşen ihmal edilerek şebeke simetrik bileşenlerle modellenmiştir. Bu yaklaşımda yapılan kabuller gerçek durum ile çelişmektedir [65]. Arrillaga ve Callaghan bir HVDC sistemini modelleyerek üç fazlı ac-dc yük akışı analizini gerçekleştirmiştir [77]. Lineer yükler için bilinen optimal yük akış tekniğinden yararlanılarak sistemdeki güç kayıplarını ve harmonik bozulmayı minimize etmek üzere önerilen üç fazlı optimal yük akış algoritması önerilmiştir [78, 79].

Elektrik dağıtım sistemlerinin asimetrik yapılarının yanında dengesiz yüklü olmaları üç fazlı güç akışı yapılmasını gerektirmektedir. Dağıtım sistemlerinde güç akışı analizinde Newton-Raphson, Gauss-Seidel ve Ladder yöntemleri kullanılmakta olup Ladder yönteminin tek fazlı analizde üstünlüklerine rağmen, üç fazlı sistem analizine uygulanması da, fazlar arasındaki kuplajlar bakımından sıkıntı oluşturmaktadır [11, 12, 55, 80-90]. Üç fazlı analiz, simetrik olmayan şebeke yapılarında bir zorunluluk olarak ortaya çıkmaktadır. Buna karşın güç akışı algoritmaları genellikle, topolojik olarak simetrik sistemler için verilmiş olup bu algoritmaların topolojik olarak simetrik olmayan şebekelere uygulanması mümkün değildir. Bu durumda bir fazlı sistemler için verilmiş olan algoritmaların, üç fazlı sistemlerin gerçekte fazlar arasındaki kuplajlardan dolayı, çok-üçlü eleman olarak modellenmeleri gereği ile bu sistemin, esas olarak, tek bir devre olduğu gerçeği göz

önünde bulundurularak, bir, üç ve çok fazlı sistemlere uygulanabilecek biçimde genelleştirilmesi gerekmektedir.

Üç fazlı elektrik enerji sistemlerinin, yapısal olarak, simetrik ve asimetrik durumu söz konusu olup, sistemin iletim ve dağıtım olarak ayrılması, modelleme ve harmonik analiz açısından yararlı olmaktadır [12].

Elektrik dağıtım sistemlerinde, doğrusal olmayan bir fazlı ve üç fazlı elemanların neden oldukları harmoniklerin sistem üzerinde yapacağı etkilerin belirlenmesi için harmonik analize ihtiyaç duyulmaktadır. Dağıtım şebekelerinde harmoniklerle ilgili son zamanlarda birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya da devam etmektedir [11, 12, 49, 83, 91-96].

Elektrik dağıtım sistemlerinde yapılacak harmonik çalışmalarında izlenmesi gereken yol; harmonik üreten elemanların tespiti ve bunları temsil edecek modellerin çıkartılması, üzerinde çalışılan sistem elemanları ve bağlandıkları sistemlerin, yapılacak analize uygun modellerinin, elde edilmesi ve değişik senaryolar baz alınarak, sistemin analizi biçiminde özetlenebilmektedir [83].

Elektrik dağıtım sistemlerinde, bir-fazlı, 2-fazlı, 3-fazlı ve 3-faz-4-iletkenli sistemlerin bir arada bulunabilmesi ve kompanzasyon amaçlı bir ve üç fazlı kapasiteler nedeniyle dağıtım sistemleri genellikle simetrik yapıda değildir. Ayrıca, dağıtım sistemlerinde bulunan bir ve üç fazlı, çok sayıda, kompanzasyon kapasitesinin zaman zaman devreye girip çıkması dağıtım sistemlerinin analizi sırasında göz önünde bulundurulması gereken önemli bir unsurdur. Dağıtım sistemleri sahip oldukları doğrusal ve doğrusal olmayan bir fazlı ve üç fazlı dengesiz yükler nedeniyle de dengesiz yüklenmektedir [55, 81-84, 97].

Elektrik dağıtım sistemlerinin harmonik bağımlı modellerinin elde edilmesi işleminde, bir fazlı doğrusal yüklerin frekansa bağlı admitans olarak modellenmeleri ve uzun hatlarda yapılan çaprazlamanın harmonik frekanslarda hattın simetrik yapısını bozucu etkisi nedeniyle dağıtım sistemlerinin harmonik bağımlı matematiksel modelleri simetrik yapıda olmayacaktır [9, 12, 98].

Enerji dağıtım sistemlerinde bulunan yüklerin daha çok bağımsız kaynak olarak gösterildiği ancak, dağıtım şebekesini besleyen iletim sistemi harmonik

gerilimlerinin sabit gerilim kaynağı olarak modellenmeleri durumunda, Xia tarafından verilen iteratif çözüm tekniklerinin dağıtım şebekelerine uygulanması mümkün değildir. Dağıtım sistemlerinde yapılan harmonik çalışmaları, genellikle sabit akım kaynağı yaklaşımı ve bara admitans veya empedans matrisleri kullanılarak verilmekte ve bu çalışmaların bir çoğunda, genel olarak bir baskın harmonik kaynağı olması durumu ele alınmaktadır [49, 95, 96]. Birden çok harmonik kaynağının bulunduğu sistemlerde sabit akım kaynağı modeli ile harmonik analizde harmonik akımlarının faz açılarının dahil edilmemesi bir eksikliktir. Sabit akım kaynağı modelleri kullanılarak yapılan analizlerin yetersiz kalması, iteratif yöntemlerin ise fazla işlem sayısı gerektirmelerinin yanında, dağıtım sistemindeki bazı yüklerin bağımsız kaynak olarak modellenmeleri sonucu ortaya çıkan hata nedeniyle, sabit akım kaynakları ile yapılan analizin geliştirilmesini gündeme getirmiştir. Birden çok harmonik kaynağının bulunduğu sistemlerde sabit akım kaynağı modeli ile yapılan harmonik analiz geliştirmeye yönelik olarak önce temel güç akışı yapılmakta daha sonrada harmonik akım kaynaklarının genlik ve açılarının güncellenmesi yoluna gidilmektedir [11, 12].

Birden fazla harmonik kaynağı bulunan sistemin üç fazlı harmonik analizinde, Newton-Raphson harmonik güç akışı olarak da adlandırılan iteratif yöntemin kullanılması durumunda ortaya çıkan Jacobian matrisin boyutu oldukça büyük olacaktır.

Elektrik enerji sistemlerinin analiz çalışmalarının sonuçlarının doğruluğu kullanılan yük modeli ile doğrudan ilişkili olup yüklerin modellenmesi konusunda çalışmalar halen de devam etmektedir. Harmonik analiz için dağıtım sistemi yüklerinin, simetrisiz ve 3 fazlı bir bara empedans matrisi olarak modellenmesi bunlardan biridir [99]. Tecrübeler, harmonik analiz çalışmalarında sistem elemanlarının basit eşdeğerlerle temsil edilebilmelerine karşın, doğrusal yüklerin modellenmesinin daha önemli olduğunu göstermiştir [12]. Elektronik yükler, motorlar, direnç karakteristikli yükler ve güç faktörü düzeltme kapasitelerini de barındıran yüklerin modellenmesi için bir genel yük modeli verilmiştir [11]. Yüksek frekanslı yükler içinde işaret işleme tekniği kullanılarak bir model geliştirilmiştir [100]. Harmoniklerin analizinde yüklerin modellenmesi için “En Küçük Kareler Yöntemi” ni temel alan, frekans bağımlı bir analiz metodu da geliştirilmiştir [101].

Diğer bir harmonik yük modelinde, farklı frekans devreleri arasındaki ilişkiyi ihmal etmeden admitans matrisi biçiminde verilmekte olup bu model elektrik motor yüklerin dışındaki pasif yükler için uygundur [102]. Üç fazlı sistemlerin dengesiz oluşunu kabul, fakat farklı frekanslar için aralarındaki manyetik bağı ihmal eden, paralel hesaplama algoritmalarını temel alan yöntemlerde mevcuttur [103]. Literatürde, doğrusal, doğrusal olmayan yük veya genel yüklerin modellenmesi için akım ve gerilim ölçümleri kullanılarak tek fazlı bir genel model verilmekte olup, bu yük modelinin parametreleri, akım ve gerilimin zamana bağlı ifadeleri yardımı ile elde edilmektedir [104, 105]. Doğrusal olmayan yükler için kullanılan en yaygın model, genlik ve açıyla verilen akım kaynağı modelidir. Bu harmonik kaynaklarının faz açıları, temel bileşen gerilimlerinin açılara göre, genlikleri ise temel bileşen akımının belli bir yüzdesi olarak tanımlanmaktadır [11, 12]. Akım kaynağının bilgileri ideal bir eleman modelinden alınabileceği gibi, ölçüm sonuçları olarak da alınabilir. Genel olarak, ölçüm sonuçları daha doğru sonuçlar vermektedir [12]. Sistemde bir adet harmonik kaynağı bulunması durumunda harmonik akım kaynağının faz açısını göstermeye gerek kalmamaktadır. Ancak birden fazla harmonik kaynağı olması durumunda faz açılarının gösterilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Gerilimin dengesiz veya dalga biçimi bozuk olması halinde ise, daha ayrıntılı modellere ihtiyaç duyulmaktadır [11].

Dağıtım şebekelerinde, uygun sayıdaki yükler, birbirine çok yakın biçimde konumlandırılmakta ve bir ana dağıtım noktasından beslenmektedir. Bu yapı nedeniyle bu yükler tek bir yük gibi kabul edilmekte olup “Değişik yapıdaki bireysel yüklerin hep birlikte oluşturdukları toplamsal yük” genel yük olarak ifade edilmektedir. Bu genel yükler, karakteristiği farklı doğrusal ve doğrusal olmayan tekil yüklerden oluşmaktadır. Genel yükler modellenirken, modelin harmonikli besleme ve/veya dengesiz besleme gerilimine cevabı ile yükün bizzat kendisinin harmonik akımları içermesi olasılığına da cevap verebilmesine dikkat edilmelidir [11].

Boyutları her geçen gün giderek büyüyen ve karmaşık bir yapıya gelen elektrik şebekelerinde, üç fazlı analiz nedeniyle, boyutun üç kat daha büyümesi ve harmonik analizinin ilgilenilen harmonik sayısı kadar tekrarlanması, yeni yöntem arayışlarını da beraberinde getirmektedir. Yeni yöntemlerde amaç, daha basit

şebeke yapıları, daha az bellek kullanımı ve işlem sayısı ile uygun matematiksel model ve algoritmalarla, daha hızlı ve doğru çözümler elde etmektir.

Bu tezde, çok fazlı elektrik dağıtım sistemlerinin faz bileşenleri yöntemi ile harmonik bağımlı modellerinin elde edilmesi ve harmonik analizi amaçlanmıştır. Bu amacı gerçekleştirmek üzere, dağıtım sistemleri ve elemanlarının matematiksel modelleri, çok-uçlu eleman kavramı kullanılarak elde edilmiştir. Bu yöntemde, enerji sistemlerinin bir, üç veya çok fazlı olarak modellenmesinin her hangi bir zorluğu olmadığı, şebeke yapısı ne olursa olsun, bir çok-uçlu eleman olarak göz önüne alınabileceği ve modellenebileceği gösterilmiştir. Elde edilen bu model, genellikle, bir empedans veya admitans bağıntısı ile verilmektedir. Zaten, çok-uçlu eleman kavramının tanımı, aralarında kuplaj olan tüm elemanların bir arada tutulmasını ve tüm baraların da çok-uçlunun uçları olarak olmasını gerektirmektedir. Bu yaklaşımda, bir çok-uçlunun üç yada çok-fazlı bir şebekenin ayrı ayrı faz modelleri ile incelenmesi ancak belli kabullerle yapılabilmektedir. Bu nedenle üç fazlı sistemin tek bir çok-uçlu olarak göz önüne alınması, onun bir doğası olarak kabul edilerek, matematiksel model elde edilmiştir. Bu yaklaşımda bir çok-uçlunun uçlarının sıralanışının istenen modele göre yapılabileceği ve modelleme açısından bunun önemli olmaması nedeniyle, baraların sıralanışı, faz sırasında ve her faz kendi içinde gruplanarak, organize edilmiştir. Yani çok-uçlu elemanın modeli, önce a fazı, sonra b fazı daha sonrada c fazı baraları ve varsa en son diğer ilgilenilen baraların oluşturduğu gruplarını uç olarak alacak biçimde elde edilmiştir. Daha sonra, yapılmak istenen analiz bu bara sayısı artmış çok-uçlu için, bu çok-uçlunun bir fazlı şebeke modeli imiş gibi, bir fazlı ancak, bara sayısı artmış şebekenin analizine dönüştürülmüş olur. Burada, fazlar arasındaki 120° lik faz farkı bilgisi ise analizde veri olarak kullanılmıştır. Bu genel modelde, fazlar arasında kuplaj olmadığı kabul edilerek her fazın ayrı ayrı ve daha küçük modellerle analiz edilebileceği açıktır.

Çok fazlı devrelerin tek bir devre olarak ele alınması nedeniyle boyutları büyüyen modellerin, harmonik analizin gereği olarak, ilgilenilen harmonik sayısı kadar tekrarlanıyor olması, işlem sayısı ve bellek ihtiyacını azaltıcı yöntemlerin, birden fazlasının bir arada kullanılması bu çalışmanın amaçlarından olup, bu amaç doğrultusunda seyrek matris yaklaşımı bu yeni yaklaşımla birlikte kullanılmıştır.

Ayrıca matris tersi alınmasında bazı yöntemlerin çok fazlı modelleme ve analiz çalışmalarına uygulanması amacı ile çalışmalar yönlendirilmiştir [103, 106-109].

Çok fazlı elektrik dağıtım sistemlerinin tek bir devre gibi modellenmesinin bir getirisi olarak, bir fazlı temel güç akışı ve harmonik analiz yöntemlerinin genelleştirilerek, çok-fazlı sistemlere uygulanması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, dağıtım sisteminde bulunan bir, üç ve üç faz-dört iletkenli yüklerin doğrusal olup olmamasına bakılmaksızın, matematiksel modelleri çok-uçlu eleman kavramı kullanılarak, genel bir model olarak verilmiştir.

Çalışmada, dağıtım şebekesini oluşturan elemanlarının her biri çok-uçlu olarak kabul edilebilmekte ve dağıtım sisteminin kendisinin de, bu çok-uçluların kendi aralarında bağlanmasından oluşan, bir çok-uçlu olması nedeniyle, önce dağıtım sistemini oluşturan elemanların modellenmesi daha sonra da, matematiksel modelleri bilinen bu çok-uçların kendi aralarında bağlanmasından oluşan dağıtım sistemlerinin modellenmesi amaçlanmaktadır.

Literatürde, enerji sistemlerinin 3 fazlı modeli oluşturulurken, elemanların faz sırasına göre ve her faza ait elemanlar bir arada olacak biçimde toplanması, modelin ilkel bağıntılarında kullanılmış ancak bara matrisinde, her faza ait baralar bir arada düşünülmeyeceği için, bu modeller aynı faza ait elemanları bir arada verecek biçimde elde edilmemiştir [70]. Daha sonra yapılan bir çalışmada transformatör modelinin elde edilmesinde, her faza ait elemanlar bir arada olacak şekilde verilmiş, fakat, diğer elemanların ve şebekenin kendisinin modellenmesinde aynı yaklaşım devam ettirilmemiştir [110]. Çok-uçlu eleman kavramı yaklaşımı ile sinüsoidal halde elektrik enerji sistemi ve eleman modellerinin her faz bir arada olacak şekilde veren çalışmalar yapılmış olup, bu çalışma harmonikli sistemlere uygulanmamıştır [111]. Bu tezde, sözü edilen bu yaklaşım harmonik analize uygulanmıştır.

Altı bölümden oluşan bu tezin birinci bölümde, konunun genel tanıtımı, konu ile ilgili önceki çalışmalar ve problemin ortaya konulması, çalışmanın amacı ve diğer bölümler hakkında kısa bilgiler verilmektedir.

İkinci bölümde, harmoniklerle ilgili temel bilgiler olan, Fourier serileri, sinüsoidal olmayan durumda elektriksel büyüklükler, harmonik indisleri, harmonik kaynakları, harmoniklerin etkileri, harmonik standartları, elektrik enerji

sistemlerinde harmonik analiz yöntemleri, elektrik enerji sistemlerinin harmonik analizi hakkında özet bilgiler verilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde, sistem elemanları ve sistem modelleri ile ilgili çalışmalar yer almaktadır. Burada, doğrusal olmayan 2-uçlu elemanlar, akım ve gerilim kaynaklarından oluşan bir devre, çok-uçlu eleman olarak göz önüne alınarak bu devrenin uç-graf ve uç denklemlerden oluşan matematiksel modeli verilmektedir. Elektrik enerji sistemleri, devre teorisinde, genel olarak ele alınan devrelere göre, özel bir yapıda olduğundan, bu özellikleri yansıtan, kabullerle matematiksel modelleri, benzer yoldan, yeniden elde edilmektedir. Sürekli sinüsoidal halde çok-uçlunun matematiksel modellerinin elde edilişi için verilen yaklaşım, şebekenin farklı harmonik frekansları için verilmesi gereken çok-uçlu elemanların matematiksel modelleri için de benzer biçimde elde edilmektedir.

Elektrik dağıtım sistemlerinin çok-uçlu eleman kavramı ile matematiksel modellerinin elde edilmesinde, aynı faza ait elemanları gruplayan bir yaklaşım verilmiştir. Bu yaklaşım kullanılarak, herhangi bir kısıtlamaya gerek kalmadan, genel anlamda, üç-fazlı bir hattın harmonik bağımlı modeli, bir fazlı transformatörün ve bir fazlı transformatörlerin, kendi aralarında bağlama grubuna uygun, bağlanmasıyla oluşan üç fazlı transformatörlerin, ortak çekirdekli üç fazlı transformatörlerin ve senkron generatörlerin harmonik bağımlı modeli elde edilmiştir. Bu çok-uçlu eleman modelleri kullanılarak, elektrik şebekelerin, çok-fazlı harmonik bağımlı modelleri verilmiştir.

Dördüncü bölümde, elektrik dağıtım sistemlerinde harmonik analizi ele alınmış ve çok fazlı harmonik analizi için uygun yöntemler belirlenmiştir. Modellerin elde edilmesi için gerekli veriler üzerinde durulmuştur. Dağıtım sistemlerinin harmonik analizinde, doğrusal ve doğrusal olmayan yük modellerinin önemi nedeniyle, yük modelleri ayrıntılı olarak ele alınmış, bir, üç, üç faz-dört iletkenli, yüklerin doğrusal olup olmamasına bakılmaksızın, matematiksel modelleri için geçerli olan genel bir algoritma verilmiştir. Elektrik dağıtım sistemlerinin tek bir devre olarak elde edilen modelleri ve bir fazlı güç akışı algoritmalarının genelleştirilmesiyle, çok fazlı sistemlerin analizi mümkündür. Çok-fazlı sistemler için Newton-Raphson yük akışı yöntemi bu amaca uygun olarak genel hatları ile verilmiştir. Bu yöntemin, dağıtım sistemlerine uygulanması için gerekli değişiklikler yapılarak verilmiştir.

Sonuç olarak, dağıtım sistemlerinin çok-fazlı harmonik bağımlı modellerinin elde edilmesi ve analizi için bir algoritma verilmiştir.

Beşinci bölümde, rezonans olayları, çok-fazlı modelleme ve harmonik analiz ile yük modelleri konularında üç uygulama yapılmış ve sonuçları verilmiştir.

Birinci uygulamada, farklı eleman modellerinin, kompanzasyon kapasitelerinin değeri ve yerinin değiştirilmesi ile fazlar arasındaki kuplajların ve transformatörlerin bağlama gruplarının rezonans frekansına etkisi, IEEE nin 3 baralı endüstriyel şebekesi üzerinde 10 farklı durum için incelenmiştir.

İkinci uygulamada, IEEE' nin bina dağıtım sistemleri için verilen test sistemi kullanılarak, çok-fazlı harmonik bağımlı modelleme ve harmonik analizi gerçekleştirilmiştir [112]. Kullanılan bilgisayar bellek miktarını azaltmak amacıyla, bina dağıtım sistemlerini harmonik bağımlı modellerinin elde edilmesinde seyrek matris yaklaşımı kullanılmıştır.

Üçüncü uygulamada, gerilim ve akım ölçümleri ile bir fazlı ve üç fazlı yüklerin matematiksel modellerinin elde edilmesi için verilen algoritma kullanılarak üçü bir fazlı dördü üç fazlı olmak üzere yedi adet yüke ait model verilmiştir.

Altıncı bölümde, tezde yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve getirilen yenilikler özet olarak verilmiş ve bu çalışmada elde edilen sonuçlar ışığında, bazı önerilerde bulunulmuştur.

2. ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLER

2.1 Giriş

Bazı yüklerin doğrusal olmayan karakteristikleri nedeniyle sinüs biçimli gerilim ve akım dalgasının bozulmaya uğraması, elektrik enerji sistemlerinin en önemli problemlerinin başında gelmektedir.

Dalga biçimi bozulmuş gerilim ve akım; frekansları temel bileşen frekansının tam katlarına eşit olan bileşenlerin toplamı olarak ifade edilmektedir. Frekansı, temel frekansın tam katı biçiminde olan bileşenler harmonikler olarak adlandırılmaktadır [1,2,14].

Günümüzde, elektrik enerji sistemlerinde mevcut harmoniklerin kontrol altında tutulmasına yönelik olarak dikkate değer çalışmalar yürütülmektedir. Hatta harmonik kontrolü ile ilgili olarak standartlar da oluşturulmuştur [21, 30-36]. Öte yandan harmoniklerin kolayca ölçülmesine ilişkin cihazlar da bol miktarda bulunabilmektedir. Elektrik enerji sistemlerinin harmonik analizlerinin yapılması alanında da son zamanlarda önemli gelişmeler kaydedilmiş olup geniş ölçüde kabul gören analiz yöntemleri geliştirilmiştir [12, 38-44].

Bu bölümde, harmoniklerin teorik temelleri üzerinde durulacak olup, ilk olarak, dalga biçimi kavramının açıklanabilmesi amacıyla Fourier serileri gözden geçirilecektir. Daha sonra da genel harmonik teorisi, harmonik büyüklüklerinin tanımı, harmonik indisleri, harmonik kaynakları, harmoniklerin etkileri, sistemin harmoniklere cevabı, harmonik standartları, harmonik analiz yöntemleri konuları üzerinde durulacaktır.

2.2 Fourier Serileri

Fourier serilerinin teorik temelleri ilk olarak bir Fransız fizik ve matematikçisi olan J. Fourier tarafından 1882 yılında ortaya konmuştur. Söz konusu bu teori, herhangi bir periyodik fonksiyonun, belirli bir zaman aralığında, bir temel bileşen ile frekansları temel bileşenin tam katlarına eşit olan, daha yüksek dereceden bir dizi harmonik bileşenlerin toplamı olarak ifade edilebildiğini kanıtlamaktadır [14, 37].

Alternatif akım enerji sistemlerinde akım ve gerilime ilişkin dalga biçiminin ideal olarak sinüsoidal olması istenmesine karşın, doğrusal olmayan karakteristikli elemanlar nedeniyle dalga biçiminde bir takım bozulmalar olmaktadır. Periyodik, fakat biçimleri bozulmuş olan gerilim ve akım dalgaları, fourier analiz yöntemleri kullanılarak, genlik ve frekansları farklı bir çok sinüsoidal dalganın toplamı olarak ifade edilmesi, elektrik enerji sistemlerinin analizinde bir takım yararlar sağlamaktadır [1, 12, 37].

Periyodik bir fonksiyon tüm t değerleri için,

$$x(t) = x(t + T) \quad (2.1)$$

biçiminde tanımlanabilir. Bu eşitliği sağlayan en küçük T sabitine, $x(t)$ fonksiyonunun periyodu adı verilir.

Herhangi bir dalga biçimine sahip ve periyodu T olan bir $x(t)$ fonksiyonu,

$$x(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \left(a_h \cdot \cos\left(\frac{2\pi ht}{T}\right) + b_h \cdot \sin\left(\frac{2\pi ht}{T}\right) \right) \quad (2.2)$$

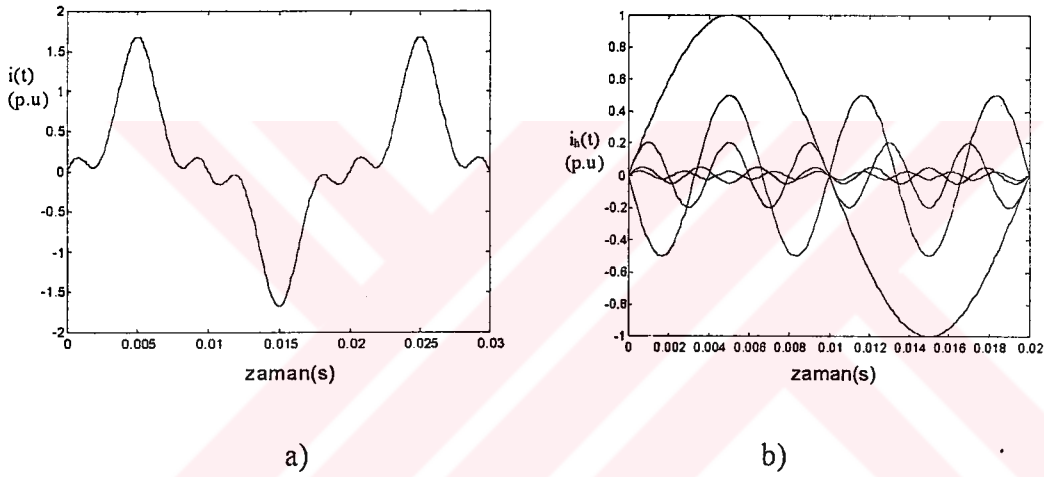
biçimde bir trigonometrik seri biçimine dönüştürülebilmektedir. Burada, a_0 sabit terim, $x(t)$ fonksiyonun ortalama değerini, a_h ve b_h , $x(t)$ fonksiyonuna ait Fourier serisinin katsayılarını, h ise harmonik mertebesini göstermektedir. Bu katsayılar,

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (2.3)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos\left(\frac{2\pi ht}{T}\right) dt \quad (2.4)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin\left(\frac{2\pi ht}{T}\right) dt \quad (2.5)$$

eşitlikleri ile hesaplanabilmektedir. Periyodik bir fonksiyonun Fourier bileşenleri, fonksiyonun dalga biçimine bağlı olup, verilen fonksiyon çift fonksiyon ise sadece kosinüslü terimler, tek ise sadece sinüslü terimler ortaya çıkmaktadır. Fonksiyon yarım dalga simetrisine sahipse çift harmonikler ortaya çıkmamaktadır. Bir $x(t)$ fonksiyonunun negatif ve pozitif dalgalarının alanları eşitse sabit terim (a_0) yani ortalama değer sıfır olur ve doğru bileşen oluşmaz [37]. Şekil 2.1 de bir transformatörün mıknatıslanma akımının dalga biçimi ve Fourier dönüşümüyle elde edilen harmonik bileşenleri verilmiştir.



Şekil 2.1 a) Transformatör mıknatıslanma akımı,
b) Mıknatıslanma akımının temel ve harmonik bileşenleri

Fourier dönüşümünde en önemli özellik, dönüşüm yapılan herhangi bir fonksiyonun, yada bu fonksiyonun dalga biçiminin gerek zaman ve gerekse frekans domeninde analiz edilmesine olanak tanımasıdır. Dolayısıyla verilen herhangi bir fonksiyon Fourier dönüşümünde zaman ve frekans domeninde temsil edilebilmektedir [37].

Frekans domeni fonksiyonunun eşit aralıklarla örneklenmiş bir fonksiyon olması halinde, elde edilen bu ayrık bileşenlerden bir Fourier dönüşüm çifti elde edilebilmekte olup buna Ayrık Fourier Dönüşüm (DFT) denmektedir. Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT), Ayrık Fourier Dönüşümün (DFT) hızlı hesaplamasını sağlamak için geliştirilmiştir[14].

2.3 Sinüsoidal Olmayan Durumda Elektriksel Büyüklükler

Eskiden beri elektrik enerji sistemleri üzerinde yapılan çalışmalarda elektriksel büyüklüklerin açıklanması için kullanılan tanımlamalar, tamamen kararlı hal durumunda çalışan sinüsoidal dalga biçimli, gerilim ve akıma sahip enerji sistemleri esas alınarak yapılmıştır. Oysa, söz konusu elektrik enerji sistemlerinde, doğrusal olmayan karakteristikli elemanların neden olduğu harmoniklerin sistem içersine akıtılması durumunda, söz konusu bu elektriksel büyüklüklerin açıklanması için kullanılan tanımlar daha farklı bir biçimde ifade edilmeleri gerekmektedir. Burada, bu anlamda, elektrik enerji sistemlerinin sinüsoidal olmayan durumlarda gerilim, akım, ani güç, ortalama güç, aktif, reaktif ve görünür güç hesaplamaları ile ilgili bir takım tarifler verilmektedir [1, 11-13, 21].

Harmonikli, bir fazlı enerji sisteminde, sürekli halde, gerilimin ve akımın zamana bağlı ifadeleri

$$v(t) = \sum_{h=1}^{h_{\max v}} \sqrt{2} \cdot V_h \cos(h\omega t + \varphi_h) \quad (2.6)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{h_{\max i}} \sqrt{2} \cdot I_h \cos(h\omega t + \beta_h) \quad (2.7)$$

biçiminde verilmektedir. Burada, $\{v(t), i(t)\}$, $\{V_h, I_h\}$, $\{\varphi_h, \beta_h\}$, h ve $\{h_{\max v}, h_{\max i}\}$ parametreleri sırasıyla, gerilim ve akımın ani değerini, h . gerilim ve akım harmoniklerinin etkin değerini, gerilim ve akım harmonik faz açılarını, harmonik derecesini, gerilim ve akımın maksimum harmoniklerini göstermektedir.

Gerilim ve akımın efektif değerleri,

$$V^2 = \sum_{h=1}^{h_{\max v}} V_h^2, \quad (2.8)$$

$$I^2 = \sum_{h=1}^{h_{\max i}} I_h^2 \quad (2.9)$$

biçimindedir.

Ani güç, iki uçlu elemanın uçlarındaki akım ve gerilimin ani değerlerinin çarpımı olup

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.10)$$

biçiminde verilmektedir.

Aktif güç, elemanın uçlarındaki akım ve gerilimin ani değerlerinin çarpımının ortalaması olup,

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (2.11)$$

biçiminde ifade edilmektedir. (2.6) ve (2.7) bağıntıları (2.11) bağıntısında yerine konularak, ortalama güç için

$$P = \sum_{h=0}^{h_{\max}} V_h \cdot I_h \cdot \cos(\varphi_h - \beta_h) \quad (2.12)$$

bağıntısı elde edilebilmektedir. Bu ifade, harmoniklerin, sistemin ortalama gücüne artı veya eksi yönde bir katkısının olduğunu göstermekte olup, harmonikler nedeniyle ortaya çıkan ortalama güç genel olarak temel güç ile mukayese edildiğinde oldukça küçük değerdedir. Farklı frekanslardaki gerilim ve akımların ortalama güce katkısı söz konusu değildir.

Görünür güç ifadesi,

$$S = V \cdot I \quad (2.13)$$

biçimindedir. Görünür güce ilişkin olarak yaygın olarak kullanılan bağıntı Denk.2.14 de verilmiştir.

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (2.14)$$

Burada Q reaktif gücü göstermekte olup değeri,

$$Q = \sum_{h=0}^{h_{\max}} V_h \cdot I_h \cdot \sin(\varphi_h - \beta_h) \quad (2.15)$$

bağıntısı ile hesaplanır. D, dalga biçiminin bozulmasıyla ortaya çıkan farklı frekanslardaki gerilim ve akım harmoniklerinin neden olduğu bozulma gücü olup değeri,

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (2.16)$$

biçiminde hesaplanır.

Güç faktörü kavramı, yükün kaynaktan çektiği enerjiyi ne kadar etkin biçimde kullandığının göstergesi olup, incelenen elektrik enerji sisteminin sinüsoidal yada sinüsoidal olmayan işletme büyüklüklerine sahip olmasına bağlı olmaksızın, genel anlamda

$$PF = \frac{P}{S} \quad (2.17)$$

ifadesi ile belirlenir. Temel bileşen için güç faktörü

$$PF_1 = \frac{P_1}{S_1} = \cos(\varphi_1 - \beta_1) = \cos \phi_1 \quad (2.18)$$

biçimindedir.

Gerilim ve akımının sinüs biçimli olmadığı durumlarda, elektrik şebekelerinde karşılaşılan problemlerin çözümünde her zaman doğru sonuç veren elektriksel güç tanımlarının olmayışı nedeniyle herkes tarafından kabul edilen ortak bir kabul bulunmamaktadır. Bozulma gücünün fiziksel anlamının tam olarak açıklanamaması sebebiyle bu gücün tanımı, fiziksel anlamı ve reaktif güçle ilişkisini açıklama amaçlı birçok çalışma yapılmıştır [22-26, 113, 114]. Elektrik şebekesinin dengesiz olması durumunda güç tanımlamaları için eşdeğer gerilim, eşdeğer akım ve eşdeğer güç tanımlamaları yapılarak, bir çözüm yolu bulununcaya kadar ortak bir tanımda anlaşmayı amaçlayan çalışmalar da yapılmıştır [28]. Ani aktif güç, ani reaktif güç ve ani bozulma gücü için sinüs biçimli olmayan durumda elektriksel büyüklüklerin tanımlanması konusunda geçmişten günümüze bir çok çalışma yapılmış ve halen de devam edilmektedir[26, 27].

2.4 Harmonik İndisleri

Harmonik analizinde, harmoniklerin elektrik enerji sistemindeki elemanlar ve iletişim sistemleri üzerindeki etkilerini tanımlamada kullanılan bir çok indis mevcuttur. Burada, pratikte kullanılan, söz konusu bu harmonik göstergelerinde söz edilecektir.

Gerilim ve akımın toplam harmonik bozulması (THD),

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{mak_v}} V_h^2}}{V_1} \quad (2.19)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{mak_i}} I_h^2}}{I_1} \quad (2.20)$$

bağıntıları ile verilmektedir.

THD, bozulmuş bir dalga şeklinin harmonik bileşenlerinin efektif değerinin bir ölçütüdür. THD, dalga şekli bozulmuş bir gerilimin bir dirence uygulandığında meydana gelen ek ısınma hakkında fikir vermesi açısından önemlidir. Ancak bir kondansatörün ne kadar zorlandığı, zorlanmanın gerilimin tepe değerine bağlı olması nedeniyle, belirtmesi açısından iyi değildir [3, 4, 28].

C faktörü (CF), en basit harmonik tahmin etme yöntemi olup, gerilim ve akımın tepe değeri ile temel bileşenlerinin efektif değeri arasındaki oranı tanımlamak için kullanılır. Dalga şeklinin saf sinüs olması durumunda bu oran $\sqrt{2}$ olur.

$$CF = \frac{V_{mak}}{V_1} \quad (2.21)$$

Toplam talep bozulması (TDD), toplam harmonik akımı bozulması olup,

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{mak}} I_h^2}}{I_L} \quad (2.22)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanır. Burada, I_L yük tarafından ortak besleme barasından (PCC) çekilen temel frekanslı maksimum akımların ortalaması olup, on iki ay öncesinden hesabın yapılacağı ana kadar olan süre içinde yük tarafından talep edilen maksimum akımların ortalaması olarak hesaplanır [21].

Telefon etkileşim faktörü (TIF), elektrik enerji sistemindeki harmonik akım ve gerilimlerinden kaynaklanan telefon gürültü değerinin tayin edilmesine yarayan bir büyüklüktür. Telefon etkileşim faktörü, boyutsuz bir büyüklük olup gerilim ve akım için dalga biçiminin göstergesidir.

$$TIF_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{h_{mak\ v}} (w_h V_h)^2}}{V_{ef}} \quad (2.23)$$

$$TIF_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{h_{mak\ i}} (w_h I_h)^2}}{I_{ef}} \quad (2.24)$$

biçiminde ifade edilir. Burada, h harmonik mertebesini, w_h ise h . mertebeden harmonik frekansın endüktif kuplaj etkisini hesaplara katan bir katsayıdır [1, 12, 21].

K-faktörü, harmoniklerden kaynaklanan transformatör kayıplarının belirlenmesinde kullanılan önemli bir katsayı olup transformatörlerin dayanabileceği akım harmonik derecesi ve oranı ile birlikte verilmektedir. K-faktörü

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{h_{mak\ i}} h^2 \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2}{\sum_{h=1}^{h_{mak\ i}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (2.25)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanmaktadır. [12].

2.5 Harmonik Kaynakları

Manyetik ve elektrik devrelerdeki, döner makineler ve transformatörlerin manyetik devrelerindeki doyma, ark fırınları ve kaynak makinaları ile deşarj lambalarında normal işletmeleri gereği, oluşan ark ve çeşitli güç elektroniği devrelerinin sinüs

biçimli dalgayı keserek, dalga biçimini bozması gibi doğrusal olmayan olaylar harmonikleri oluşturmaktadır.

Benzetim amaçları doğrultusunda harmonik kaynakları,:

- a. Şebeke içerisinde dağılmış olarak bulunan, düşük nominal değerli doğrusal olmayan karakteristikli şebeke elemanları,
- b. Büyük aralıklarda, sürekli ve rastlantısal olarak değişen doğrusal olmayan karakteristikli yükler,
- c. Büyük boyutlu statik güç dönüştürücüleri ve iletim gerilimi seviyesindeki güç elektroniği cihazları

olarak üç gruba ayrılmaktadır [12].

İlk grup, besleme kaynağı olarak tek-fazlı ve diyotlu köprü doğrultucuları kullanan düşük gerilim cihazlarından (Televizyon, Bilgisayar sistemleri vs.) oluşur. Gaz deşarjlı lambalar da bu sınıf içerisinde sayılabilir. Bu elemanların her birinin nominal değerleri küçük olmasına karşın şebeke içerisinde çok sayıda bulunması nedeniyle toplamsal olarak (yani tek tek etkileri birleşerek) şebeke üzerinde yapacakları etki önemli boyutlara ulaşmaktadır. Bununla beraber, konuya bu elemanların kontrol edilemez oluşu açısından bakıldığında, bu cihazlar herhangi bir benzetim problemi yaratmazlar, ancak bunun için bu cihazların toplam yük içerisindeki durumlarını belirleyen istatistiksel bilginin mevcut olması gerekmektedir [12].

İkinci grupta, genel olarak uygun filtre devreleri kullanılmaksızın yüksek gerilim şebekelerine doğrudan doğruya bağlanan ark ocakları bulunmaktadır. Ocağın ark empedansı rasgele bir değişim göstermekte olup, bu empedans aynı zamanda asimetriktir. Yapılan ölçümlerden elde edilen deneysel bilgiler harmonik akımlarının akıtılmasında önemli değişimler olduğunu göstermektedir. Bu durum, benzetim açısından bir sıkıntı olmayıp, asıl sıkıntı değişken harmonik akımlarının olasılık yöntemlerini kullanarak yapılacak analizlerinde karşılaşılmaktadır [19].

Konuya benzetim açısından bakıldığında önemli boyutlarda problem doğuran durum üçüncü kategori olmaktadır. Statik güç dönüştürücünün işletimi büyük ölçüde güç kaynağının kalitesine bağlı olup güç kaynağı da dönüştürücü sisteminden büyük

ölçüde etkilenmektedir. Bu nedenle, güç sistemi harmoniklerine ilişkin olarak yürütülen benzetim çalışmalarında statik güç dönüştürme işlemine çok büyük önem verilmektedir [12].

2.6 Harmoniklerin Etkileri

Harmonikler, ek ısınma, yalıtım zorlanması, hatalı çalışma ve arıza gibi etkileriyle güç sistemlerinin tüm elemanlarını etkilerler. Ayrıca, harmoniklere bağlı olarak meydana gelen dalga biçimindeki bozulmanın çok ileri boyutlarda olması durumunda sistemin kendisi de rezonansa girmek suretiyle bazı problemlere neden olmaktadır. Burada, harmoniklerin elemanlar ve sistem üzerine etkileri kısaca ele alınacaktır.

Harmonik akım ve geriliminin elektrik makinaları üzerine etkisi, harmonik frekanslardaki demir ve bakır kayıpların artması nedeniyle oluşan ısı artışıdır. Ayrıca, harmonikler, kayıp artışları nedeniyle makine veriminin düşmesine ve salınım momentlerinin oluşmasına neden olmaktadır [3,4].

Harmoniklerin transformatörler üzerindeki etkisi iki türlü olup akım harmonikleri bakır kayıplarını, gerilim harmonikleri ise demir kayıplarını arttırmaktadır [12].

Bir iletkenin harmonik akımlarının akışı, deri ve yakınlık etkisi nedeniyle direnç artışı ve akımın efektif değerinin artışı nedeniyle iletkenin ek ısınmaların oluşmasına neden olmaktadır [3, 4, 115].

Güç elektroniği elemanları, birçok durumda önemli bir harmonik kaynağı olmalarının yanında, harmonikler nedeniyle oluşan dalga biçimi bozulmasına karşı da duyarlıdır. Bu elemanların kontrol devreleri için sıfır geçiş noktaları önemli olup, harmonik bozulmanın bu noktaları kaydırması elemanın çalışmasını olumsuz yönde etkiler. Ayrıca, gerilimin tepe değerine göre cevap vererek çalışan elemanlardan kaynaklanan problemler de olmaktadır [3, 4, 116, 117].

Harmoniklerin kondansatörler üzerinde oluşturduğu en önemli problem, akımın efektif değeri ve gerilimin tepe değerindeki artışın oluşturduğu yalıtım zorlanmasıdır [3, 4].

Tepe gerilimine, akım veya gerilim sıfır geçişlerine göre çalışan röleler harmonik bozulmadan olumsuz yönde etkilenirler. Üçüncü harmonik akımı, toprak rölelerinin nötrü yüklediği için hata yapmasına neden olabilir [3, 4].

Sigortaların akım-zaman karakteristiğinde değişmelere ve dolayısıyla istenmeyen çalışma durumlarına neden olmaktadır. Harmonik akım, anahtarlama elemanlarında ısınmaya sebep olmakta, anahtarın akım kesme yeteneğini etkilemektedir [3, 4, 118].

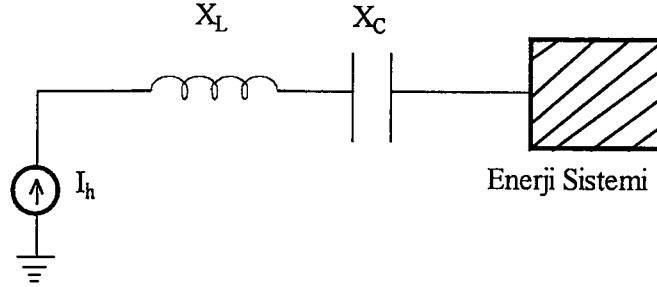
Elektrik enerji sistemleri ve iletişim devreleri arasındaki manyetik/elektrostatik bağlantı, iletişim parazitlerine neden olabilmektedir. Güç devresindeki akım/gerilim genlik ve frekansına bağlı olarak yakınındaki iletişim devresi iletkenlerinde akım/gerilim indükleyerek bir manyetik/elektrostatik alan oluşturabilmektedir [3, 4].

Akım ve gerilim ölçümlerinde tepe değer veya ortalama değer tekniklerini kullanan aletler pozitif veya negatif hatalar yapmaktadırlar. Elektrik sayaçları gibi endüksiyon prensibine göre çalışan sayaçlar, yüksek frekanslarda hatalı ölçmeler yapabilmektedir. Harmonik bozulmanın neden olduğu faz dengesizlikleri de hatalı ölçmelere neden olmaktadır. Bu nedenle bu devrelerde, dalga biçimi sinüsoidal olmayan işaretlerin ölçümüne uygun yöntemler kullanılmalıdır [3, 4].

Harmonikler, alçak gerilim enerji sistemlerinde nötr iletkeninin aşırı yüklenmesine neden olarak elemanların nötr-toprak gerilimlerinin yükselmesine neden olmaktadır. Ayrıca, harmonikli faz ve nötr iletkenlerinin toprak iletkeni üzerinde manyetik/elektrostatik etki nedeniyle parazitler oluşturmaktadır. Bu etkiler ve harmonik akımlarının neden olduğu harmonik gerilimler, hassas elektronik elemanların (robotik, otomasyon ve güvenlik sistemleri, bilgisayarlar, tıbbi cihazlar vb.) hatalı çalışmalarına veya arızalanmalarına neden olmaktadır [3, 4, 116-118].

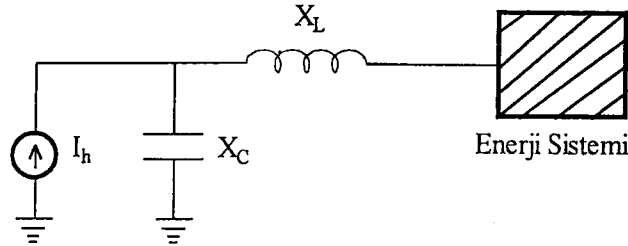
Elektrik enerji sistemlerinin harmonik empedansı, elektrik sistemlerinin harmoniklere cevabı etkilemekte olup bu etki elektrik enerji sisteminin rezonansa girmesi durumunda daha da artmaktadır. Enerji sisteminde rezonans olayları, seri rezonans ve paralel rezonans olmak üzere iki değişik biçimde meydana gelmektedir: Seri rezonans olayı harmonik akımlarının akışı için düşük değerli bir empedans meydana getirirken, paralel rezonans olayında meydana gelen empedans bunun tam tersine olarak büyük değerli olmaktadır [11, 119].

Elektrik enerji sisteminin reaktansı ile seri bağılı olan kondansatör bataryasının, harmonik akımlarının akışı için, düşük değerli bir empedans oluşturması halinde, meydana gelen seri rezonans olayı Şekil 2.2 de verilmiştir. Söz konusu bu seri rezonans da harmonik akımlarının, düşük değerli empedansa sahip, akım yolu üzerinde yığılmalarına bağlı olarak, endüktans ile kapasite arasındaki gerilimin dalga biçiminde büyük bozulmalara neden olabilir. Seri rezonans, aşırı yük durumuna bağlı olarak genelde kapasite ya da sigorta arızalarına neden olmaktadır [2, 12].



Şekil 2.2 Seri rezonans prensip şeması

Paralel rezonans oluşması muhtemel bir devre topolojisi Şekil 2.3 de görülmektedir. Paralel rezonans, sistemin paralel endüktif reaktansı ile paralel kapasitif reaktansının belirli bir frekansta birbirine eşit olması durumunda meydana gelir ve söz konusu bu paralel kombinasyon, harmonik kaynağı için, oldukça büyük değerli bir empedans oluşturmaktadır.



Şekil 2.3 Paralel rezonans prensip şeması

Rezonans durumu,

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (2.26)$$

biçiminde ifade edilmektedir. Burada h_r rezonans frekansının harmonik mertebesi göstermektedir.

Söz konusu bu büyük değerli empedansın meydana geldiği frekans ise rezonans frekansıdır. Paralel rezonansın meydana gelmesi durumunda buna bağlı olarak gerilim ve akım dalga biçimlerinde büyük bozulmalar ortaya çıkabilmektedir [12].

Paralel rezonans değişik şekillerde ortaya çıkabilmektedir. Harmonik üreten endüktif yük ile kompanzasyon devresinin kapasiteleri arasında bir paralel rezonans ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, kompanzasyon tesislerinin hepsi veya bir kısmı hem filtre hem de kompanzasyon elemanı olarak iki amaçlı olarak tesis edilirler [1, 11, 12].

Harmonik içeren bir gerilim, endüktans ve kapasitenin bulunduğu bir devreye uygulanırsa, harmonik frekanslarının birinde rezonans meydana gelebilmektedir. Elektrik enerji sistemlerinde, devredeki endüktans ve kapasite nedeniyle seri veya paralel rezonans devreleri oluşabilir. Her devrenin endüktans ve kapasite değerlerine bağlı olarak bir rezonans frekansı vardır. Bu rezonans frekansının harmonik frekanslarından biri ile çakışması istenmeyen bir durumdur.

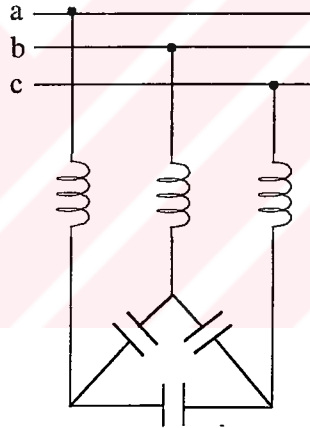
2.7 Harmoniklerin Azaltılması

Harmoniklerin, enerji sistemlerindeki elemanlar ve tüketici elemanlar üzerine etkilerini sınırlandırmak amacıyla gerilim ve akım dalga biçimi bozulmalarının azaltılmasına yönelik çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler, doğrusal karakteristikli olmayan elemanın ürettiği harmoniklerin azaltılması, üretilen harmonik akımların elektrik enerji sistemine akmasına engel olacak filtrelerin kullanılması ve çeşitli endüktans ve kapasitelerle elektrik enerjinin frekans cevabının değiştirilmesi biçimindedir [2].

Mevcut doğrusal karakteristikli olmayan elemanlarca üretilen harmoniklerin azaltılmasına yönelik yapılabilecek fazla bir şey olmayıp yeni ürünlerin tasarımında harmonik üretiminin dikkate alınması gerekmektedir. Elektrik enerji sistemlerindeki harmonik akımları, farklı şebeke kolları üzerindeki doğrusal olmayan yükler arasında faz kaydırma işlemi uygulamak yoluyla azaltılabilmektedir. Bazı durumlarda, frekansları temel bileşen frekansının üç ve üçün katı olan harmoniklerin tutulması ve söz konusu bu harmoniklerin doğrusal olmayan yükten harmonik kaynağına doğru geriye akışlarını önlemek amacıyla özel olarak tasarlanmış faz kaydırma

transformatörleri kullanılmaktadır. Zig-zag bağlantılı bu transformatörlerin sargılarının harmonik empedansı harmonik üreten kaynağın empedansına göre küçük olacak şekilde tasarlanmışlardır. Bu nedenle doğrusal olmayan yükler ile transformatör arasında sirkülasyon akımları akar [2-12].

Pasif harmonik filtreler, harmonik problemlerinin sistem için oluşturdukları tehlikelerin boyutlarının küçültülmesi ve söz konusu harmoniklerin elektrik enerji sistemi üzerindeki kötü etkilerinin azaltılması açısından oldukça etkin bir yöntemdir. Bir pasif filtre genel olarak elektrik enerji sistemindeki problem yaratan harmonik akımlarının akışı için alternatif bir yol oluşturacak biçimde tasarlanır. Uygulamada en yaygın olarak kullanılan filtre türleri seri ve paralel olmak üzere iki türdür. Seri filtre, ayar edildiği frekansta yüksek bir empedans gösteren paralel rezonans devresi olarak düşünülebilir. Paralel filtre ise seri filtrenin tersi olarak, ayar edildiği frekansta düşük değerli bir empedans gösteren seri rezonans devresi biçimindedir.



Şekil 2.4 Alçak gerilim filtresi

Aktif filtre teknikleri son yıllarda dikkat çekici gelişmeler göstermektedir. Söz konusu bu aktif filtreler doğrusal olmayan harmonikli yük gerilimlerini ya da akımlarını algılamak yoluyla, ya faz açıları yük harmonikleri ile aralarında 180^0 faz farkı olan enerji sistemine, akıtılmış harmonikleri, yada sisteme akıtılmış harmonik akımlarını kullanmak suretiyle gerilimi müsaade edilen sınırlar içersinde tutarlar [12, 115].

Sistemin frekans cevabının değiştirilmesi ile rezonans olaylarından kaynaklanan harmonikler azaltılabilmektedir. Sistemin rezonans cevabını değiştirmenin en pratik

yolu ise sisteme filtre eklemek, sistemdeki kompanzasyon kapasitelerinin değerini ve/veya yerini değiştirmek veya kaldırmak, seri veya paralel endüktans eklemektir.

2.8 Harmonik Standartları

Harmoniklerin elektrik enerji sistemi elemanları ve tüketici elemanlar üzerine etkileri nedeniyle, gerilim ve akım dalga biçimlerinin bozulmalarını sınırlandırmak, sisteme bağlı tüketiciler için uygun bir besleme gerilimi sağlamak, güç sistemlerinin diğer sistemler (iletişim sistemleri) ile etkileşimlerini engellemek amacıyla bir çok ülke harmoniklerin sınırlandırılması için çalışmalar yapmış ve bu çalışmalarını geliştirmeye de devam etmektedirler. Bazı ülkeler için harmonik standartları ile ilgili bazı değerler Tablo 2.1 de verilmiştir

Tablo 2.1 Çeşitli Ülkelerin Harmonik Standartları

Ülkeler	Gerilim	THD _v (%)	V _h /V ₁ (%) Tek	V _h /V ₁ (%) Çift	THDI(%)	I _h /I ₁ (%)
Almanya	Tüm gerilimler (h<15)	10		5		
Amerika	Tablo 2.2 ve tablo 2.3 de ayrıntılı olarak verildi					
Avustralya	Dağıtım 33kV	5	4	2		
	İletim 33-66kV	3	2	1		
	İletim 110kV<	1.5	1	0.5		
Finlandiya	1kV	5	4	4		
	3-20kV	4	3	3	10	8
	30-45kV	3	2	2	7	6
	110kV	1.5	1	1	5	4
Fransa	Tüm gerilimler	1.6	1	0.6		
İngiltere	0.415kV	5	4	2		
	6.6-11kV	4	3	1.75		
	33-66kV	3	2	1		
	132kV	1.5	1	0.5		

Elektrik enerji sistemlerinde bulunan harmoniklerin miktarını sınırlamak amacıyla iki ayrı yaklaşım vardır. Bunlardan, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından da tercih edilen birincisi herhangi bir özel doğrusal olmayan yük barasında, harmonik miktarına bir sınır getirmektedir. IEEE tarafından benimsenmiş olan ikinci yöntem ise, doğrusal olmayan yüklerin beslendiği müşterek barada harmonik miktarına sınır getirilmektedir.

IEC tarafından ön görülen sınırlamaların mantığı, her bir ekipmandan kaynaklanan harmoniklerin tek tek sınırlandırılması ile bu harmoniklerin toplamsal etkisinin de sınırlanacağına dayanır [35]. IEEE tarafından ön görülen sınırlandırma kriterleri hem akım ve hem de gerilim harmoniklerine sınırlar getirmektedir [21]. Harmoniklerin sınırlandırılmasına yönelik yapılan çalışmalarda tüketici elemanların ürettiği harmoniklere bir sınır getirilirken, aynı zamanda elektrik şebekesinde için de belirli sınırlamalar getirmek en etkili yöntem olarak görülmektedir.

Harmoniklerin sınırlandırılması ile ilgili IEEE 519-1991 Standardı yayınlanmıştır.

Tablo 2.2 Gerilimin Bozulma Sınırları

Gerilim seviyesi	Bağımsız bir sistem THD _V (%)	Genel sistem THD _V (%)
$V_n \leq 69kV$	3.0	5.0
$69kV < V_n \leq 161kV$	1.5	2.5
$V_n > 161kV$	1.0	1.5

Tablo 2.3 Akımın Bozulma Sınırları

$V_n \leq 69kV$						
I_k/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
$69kV < V_n \leq 161kV$						
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	1.25	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
$V_n > 161kV$						
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≤ 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

2.9 Harmonik Analiz Yöntemleri

Elektrik enerji sistemlerinde harmoniklerle ilgili incelemelerin amacı enerji sisteminin çeşitli noktalarındaki gerilim ve akım dalga biçimlerinde meydana gelen bozulmanın mertebesinin tespit edilebilmesidir. Bu yolla elde edilen sonuçlar, gerekli

önlemlerin alınması ve harmoniklerden doğan problemlerin giderilmesi bakımından son derece faydalı olmaktadır. Harmoniklere yönelik olarak yapılan çalışmalar aynı zamanda tehlikeli rezonans koşullarının bulunup bulunmadığının belirlenmesine ve harmonikler ile ilgili olarak mevcut limit değerlerin sağlanıp sağlanmadığının kontrolüne de yardımcı olmaktadır [12].

Harmonik üreten kaynakların temsiline ilişkin olarak farklı modeller önerilmiş olup bu modellere bağlı olarak da harmonik analiz için çok sayıda algoritma oluşturulup yayınlanmıştır [44, 59, 120-129].

Elektrik enerji sistemlerinde harmonik analiz yöntemleri, zaman ve frekans domeni yöntemler olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Harmoniklerden kaynaklanan bazı problemlerin giderilmesinde, zaman ve frekans domeni yöntemlerinin birlikte kullanılmasına da ihtiyaç duyulmaktadır.

Zaman domeni harmonik analiz yöntemi, doğrusal olmayan yükler ve elektrik enerji sisteminin zaman domeninde modellenmesi ve çözülmesinden ibarettir. Zaman domeni yöntemi özellikle dengesiz ve/veya harmonikli gerilimlerle beslenen doğrusal olmayan karakteristikli 3 fazlı yüklerin bulunduğu elektrik enerji sistemleri için en gerçekçi harmonik benzetim yöntemi olup EMTP, ATP ve EMTDC gibi programlar, zaman domeni çözümlerinin elde edilmesi amacıyla kullanılmaktadır [40-42].

Harmonik analizi için oluşturulan zaman domeni algoritmalarının beraberinde getirdikleri zorluk dağılmış ya da frekansa bağımlı parametrelili bileşenlerin modellenmesi ve sabit güç yüklerinin gösterilmesinde yaşanan sıkıntıdır.

Bu bölümde de elektrik enerji sisteminin harmonik analizine ilişkin en çok kabul gören frekans domeni yöntemlerinden kısaca bahsedilecektir.

2.9.1 Frekans tarama yöntemi

Frekans tarama yöntemi, ilgilenilen maksimum harmonik derecesine kadar, elektrik enerji sisteminin (2.27) biçiminde elde edilen uç denklemleri kullanılarak frekans cevabının belirlenmesinden ibarettir.

Harmonik çalışmalara, ilgilenilen harmonikler için elektrik enerjisi sisteminin

$$[V_h] = [Z_h] \cdot [I_h] \quad (2.27)$$

biçiminde uç-denklemlerinin elde edilmesi ile başlanmaktadır.

Elektrik enerji sisteminde, frekans taraması işlemi tüm baraları için yapılması yerine kritik görülen baralarda yapılması da yeterli olmaktadır. Bu yöntem rezonans frekansının tespiti ve filtre tasarımı için etkili bir yöntemdir. Bu yöntem uygulanırken, şebekenin topolojisinin ve eleman modellerinin frekans cevabına etkisi göz önünde bulundurulmalı ve analizin bir fazlı veya üç fazlı yapılacağına karar verilmelidir. Elektrik şebekelerinin harmonik analizinde kullanılan Frekans tarama yöntemi, basit bir yöntem olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmakta olup veri ihtiyacının az olması bakımından da diğer yöntemlerden üstündür.

2.9.2 Sabit akım kaynağı yöntemi

Sabit akım kaynağı modeline dayalı harmonik analiz yöntemi en çok kullanılan yöntem olup doğrusal olmayan elemanlar, sürekli hal durumu için faz açısı bilgisini ihtiva eden ya da etmeyen, bilinen harmonik akım kaynakları olarak ele alınmakta ve her bir harmonik için verilmiş olan frekans domen bağıntıları [(2.27), (2.28)] yardımı ile şebekedeki harmonik gerilimleri hesaplanmaktadır [11, 12].

$$[V_h] = [Y_h]^{-1} \cdot [I_h] \quad (2.28)$$

Bara harmonik gerilimlerinin belirlenmesi ile hatlardan akan harmonik akımları

$$I_{jk} = Y_{jk} \cdot (V_j - V_k) \quad (2.29)$$

biçiminde hesaplanmaktadır. Burada (I_{jk}, Y_{jk}) ve (V_j, V_k) sırasıyla j ve k barası arasındaki admitans ve akan akımı ve j, k baralarındaki gerilimleri göstermektedir.

Sabit akım kaynağı yöntemi, çözümün herhangi bir iterasyona gerek duyulmaksızın doğrudan doğruya bulunabildiği ve işlemleri basit bir yöntemdir. Ancak, bu yöntem, harmonik akım kaynaklarının sabit akım kaynağı olarak gösterilmesinin dikkate değer bir hataya neden olmadığı ve harmonik faz açısının önemli olmadığı genellikle tek harmonik kaynağı bulunduğu durum için geçerli olmaktadır.

Birden fazla harmonik kaynağı bulunduğu durumda, harmonik akım faz açısı şebeke temel bileşen gerilimi faz açısına göre, genlikleri ise temel bileşen akımının yüzdesi biçiminde temsil edilen harmonik akım kaynak modeli kullanılmaktadır. Bu harmonik akım kaynağı modelinin kurulması için gerekli olan bilgi ideal teorik model vasıtasıyla veya ölçümler yapılarak elde edilebilmektedir.

Akım kaynaklarının faz açıları besleme geriliminin faz açısının bir fonksiyonu olup söz konusu bu açılar;

$$\theta_h = h\theta_1 + \theta_{1h} \quad (2.30)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanmaktadır. Burada, θ_h , θ_1 ve θ_{1h} sırasıyla harmonik bileşen faz açısı, temel bileşen akımı faz açısı ve temel bileşen ve harmonik bileşen faz farkıdır [11, 12].

Birden fazla akım kaynağının bulunduğu durumda, harmonik akım kaynakları genlik ve faz açılarıyla temsil edilmektedir. Harmonik kaynağının temel bileşen akımı faz açısı, temel bileşen gerilim açısına göre verilmesi nedeniyle temel bileşen yük akışı sonuçlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Harmonik kaynaklarının genlikleri temel bileşen akımının yüzdesi biçiminde verilmekte olup temel bileşen yük akışı sonucunda bağlı bulundukları baranın hesaplanan gerilimleri kullanılarak temel bileşen akımı yeniden hesaplanmalı ve harmonik akımların genlikleri güncellenmektedir.

2.9.3 Harmonik güç akışı yöntemi

Doğrusal olmayan bazı elemanların ürettiği harmonik akımları, temel bileşen ve harmonik gerilimlerinin ve bazı kontrol parametrelerine bağlı olarak

$$I_h = F(V_1, V_2, \dots, V_{lmak}, \Phi) \quad (2.31)$$

biçiminde ifade edilebilmektedir.

Bu şekilde bağımlı harmonik akım kaynakları olarak modellenen elemanları barındıran elektrik enerji sistemleri çeşitli iteratif çözüm yöntemleri ile analiz edilmektedir. Bu iteratif çözüm yöntemlerinin en çok bilineni, Xia ve Heydt

tarafından dengeli sistemler için geliştirilen Newton-Raphson harmonik yük akışı çözüm tekniği olup burada doğrusal olmayan yükler gerilim kontrollü akım kaynakları olarak modellenmektedir [44]. Bu yöntem, diğer araştırmacılar tarafından dengesiz ve 3 fazlı yük akışı için geliştirilmiştir [76].

Xia ve Heyt tarafından geliştirilen harmonik yük akışı analizi için şebekenin gerilim ve akımı Fourier bileşenleri ile temsil edilir ve bara gerilim matrisi (2.32) eşitliğinde gösterildiği gibi temel bileşen ve harmonik bileşen gerilimleri alt matrisleri ile sistemdeki doğrusal olmayan yüklerin ateşleme ve komütasyon parametrelerinin oluşturduğu Φ alt matrisinden meydana gelir [44].

Bara gerilim vektörü salınım barası hariç,

$$\mathbf{U}^T = [\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_5, \dots, \mathbf{V}_{h_{mak}}, \Phi] \quad (2.32)$$

biçimindedir. Burada h_{mak} göz önüne alınan maksimum harmonik mertebesini ve Φ doğrusal olmayan elemanların değişken vektörüdür.

Harmonik güç akışı hata vektörü

$$\Delta \mathbf{M}^T = [\Delta \mathbf{W}, \Delta \mathbf{I}_1, \Delta \mathbf{I}_5, \dots, \Delta \mathbf{I}_{h_{mak}}] \quad (2.33)$$

biçiminde tanımlanabilir. Burada, $\Delta \mathbf{W}$ hata güç vektörünü, $\Delta \mathbf{I}_h$ ise h. harmonik hata akım vektörünü belirtmektedir. Harmonik güç akışı için kullanılan düzeltme vektörü aşağıda verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{W} \\ \Delta \mathbf{I}_1 \\ \Delta \mathbf{I}_5 \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{I}_{h_{mak}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_5 & \dots & \mathbf{J}_{h_{mak}} & 0 \\ \mathbf{Y}\mathbf{G}_{(1,1)} & \mathbf{Y}\mathbf{G}_{(1,5)} & \dots & \mathbf{Y}\mathbf{G}_{(1,h_{mak})} & \mathbf{H}_1 \\ \mathbf{Y}\mathbf{G}_{(5,1)} & \mathbf{Y}\mathbf{G}_{(5,5)} & \dots & \mathbf{Y}\mathbf{G}_{(5,h_{mak})} & \mathbf{H}_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Y}\mathbf{G}_{(h_{mak},1)} & \mathbf{Y}\mathbf{G}_{(h_{mak},5)} & \dots & \mathbf{Y}\mathbf{G}_{(h_{mak},h_{mak})} & \mathbf{H}_{h_{mak}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{V}_1 \\ \Delta \mathbf{V}_5 \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{V}_{h_{mak}} \\ \Delta \Phi \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Buradaki alt matrisler

$\mathbf{J}_1$: Bütün baralar için yazılan geleneksel güç akışının jacobian benzer,

$\mathbf{J}_h$: Harmonikler için jacobian matris,

$Y_{G_{hh}}$: h. harmonik gerilimlerine göre h. harmonik akımlarının kısmi türevleri,

H_h : Ateşleme açısına ve komutasyon açısına göre reel ve imajiner doğrusal olmayan yük akımlarının kısmi türev matrisi biçimindedir.

Elektrik enerji sistemlerinin Newton-Raphson harmonik yük akışı ile harmonik analizinde bütün harmoniklerin birlikte çözülmesi nedeniyle ilgilenilen maksimum harmonik derecesi ve harmonik kaynaklarının sayısına bağlı olarak matrisin boyutu artmaktadır. Elektrik enerji sistemlerinin, 3 fazlı olarak analiz edilmesi durumunda, matris boyutlarının üç kat artması nedeniyle, 3 fazlı harmonik yük akışı analizinin uygulanmasında boyutla ilgili sıkıntılar ortaya çıkmaktadır.

Ancak, sabit akım kaynağı metodu ile harmonik analizin sahip olduğu hesaplama üstünlüklerine rağmen, doğrusal olmayan karakteristikli elemanların sabit akım kaynağı olarak modelleme hatasının büyük olduğu durumlarda iteratif yöntemin kullanılması kaçınılmaz olmaktadır.

Elektrik enerji sistemlerinde yapılacak harmonik çalışmalarında uygun eleman modelleri ve harmonik analiz yönteminin belirlenmesi bakımından iletim, dağıtım, endüstriyel tesisler, konut ve ticari binalar olarak sınıflandırılmaktadır [12].

Elektrik enerji iletim sistemlerinde harmonik kaynağı olarak HVDC çeviriciler ve statik VAR generatörler olup ürettiği harmonik akımlar bağımlı akım kaynağı olarak modellenmektedir. Elektrik enerji iletim sistemlerinin genellikle simetrik olması ve sıfır bileşen harmoniklerinin olmadığı kabulüyle tek fazlı olarak analiz edilmelerinin yanında harmonik kaynak sayısının da az olmasının sonucunda Newton-Raphson harmonik güç akışı yöntemi ile harmonik analizde ortaya çıkacak matrisin boyutları ciddi sıkıntı olmayacaktır. HVDC çeviricilerin sabit akım kaynağı olarak modellenmesi durumunda ise oluşacak hata oldukça büyük olacaktır. Elektrik enerji iletim sistemlerini yapısal özellikleri ve içerdikleri bağımlı harmonik kaynakları bakımından Newton-Raphson harmonik güç akışı ile analiz edilmeleri uygundur. Dağıtım sistemlerinin, iletim sistemlerine harmonik akımları akıtabilecekleri göz önünde bulundurulması gereken diğer bir durumdur.

Elektrik dağıtım sistemlerinde, tek fazlı, iki fazlı, 3 fazlı, sistemlerin birden fazlası bir arada bulunabilmektedir. Ayrıca, genellikle kompanzasyon amaçlı tek fazlı

kapasiteler bulunmasının bir sonucu olarak, dağıtım sistemleri asimetrik yapıda olmalarının yanında doğrusal ve doğrusal olmayan karakteristikli bir fazlı ve üç fazlı dengesiz yükler nedeniyle, dengesiz yüklenmektedir [12].

Elektrik dağıtım sistemlerinde, harmonikli yüklerin tüm diğer yüklere aranı oldukça büyük değerde olup, genellikle birden fazla harmonik kaynağı vardır. Birden fazla harmonik kaynağının bulunduğu dağıtım sistemlerinde, transformatörlerin üçgen bağlı sargıları nedeniyle oluşan faz kayması harmonik akımlarının ortak baralarda fazör olarak toplanması bakımından önemlidir [12]. Ayrıca, transformatör üçgen bağlı sargıları, üç ve üçün katı harmonikler dengeli ise tamamını, dengesiz ise dengesizlik şartlarına bağlı olarak bir kısmını bloke etmektedir [130-135]. Bu nedenle, transformatör modelleri, dağıtım sistemlerinin harmonik analizi bakımından önemli olup 3 fazlı olarak modellenmeleri tek fazlı ve simetrik bileşen modellerine göre daha geçerli bir yöntemdir.

Dağıtım sistemini besleyen iletim sisteminin gerilimi de harmonikli olabilmektedir. Bu nedenle dağıtım sistemleri için yapılan analizlerde harmonik gerilim ve akım kaynaklarının her ikisinin de bulunması modelleme ve benzetim çalışmalarında dikkate alınmaktadır.

Bir elektrik dağıtım şebekesinde, makul sayıdaki yükler birbirine çok yakın biçimde konumlandırılarak ve bir ana dağıtım noktasından beslenmekte olup her birinin karakteristiği farklı doğrusal ve doğrusal olmayan tekil yüklerden oluşmaktadır. Bu tür bir yükün bağımlı bir harmonik kaynağı olarak modellenmesi hemen hemen imkansızdır. Bu nedenle bu tür yükler ölçüm sonucunda elde edilen veriler kullanılarak sabit akım kaynakları olarak modellenmesi uygun bir yöntemdir.

Dağıtım sistemlerinin çok sayıda harmonik kaynağı içermeleri ve genellikle asimetrik yapılarının nedeniyle üç fazlı olarak faz bileşenleri ile modellenmeleri, 3 fazlı modeller kullanılarak temel bileşen güç akışı sonuçlarına dayalı sabit akım kaynağı yöntemi ile harmonik analizi yapılmalıdır.

Enerji iletim sisteminin dağıtım şebekesi bakımından bir harmonik kaynağı olabileceği gerçeği göz önünde bulundurulması durumunda Newton-Raphson

harmonik güç akışı algoritmasında harmonik gerilim kaynağı olması durumu algortmada bulunmayışı nedeniyle yetersiz kalmaktadır.

Birincil dağıtım sistemlerinin (1kV-34.5kV) harmonik analizi için göz önünde bulundurulan hususların pek çoğu ikincil dağıtım sistemleri (<1kV) ve endüstriyel elektrik dağıtım sistemleri içinde geçerlidir.

Elektrik dağıtım sistemlerine bağlanan doğrusal olmayan yüklerin hızla artışı ve dağıtım sistemindeki enerjinin kalitesinin tüketicilere olan etkisi nedeniyle son zamanlarda araştırmacılar dağıtım sistemlerinin harmonik analiz konusu üzerine yoğunlaşmakta olup. bu çalışmanın amacıda da dağıtım sistemlerinin benzetimi için çok fazlı harmonik bağımlı modellerinin elde edilmesi ve harmonik analiz yönteminin verilmesidir.



3. ÇOK-FAZLI ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNİN HARMONİK BAĞIMLI MODELLENMESİ

3.1 Giriş

Doğrusal olmayan yükler nedeniyle elektrik enerji sistemlerinde önemli miktar ve mertebelerde harmonik akımları akmaktadır. Harmoniklerin, elektrik enerji sistemlerine etkilerinin belirlenebilmesi için sistemde harmonik akım ve gerilimlerin hesaplanması gerekmektedir. Bunun doğruluğu için ise harmonik kaynakları ve şebeke yeterli doğrulukta modellenmelidir.

Elektrik enerji sistemi eleman modellerinin ilgilenilen frekans aralığına göre değişmesi, harmonik analiz çalışmalarına frekans aralığının belirlenmesi ile başlanmasını gerektirmektedir. Yüksek dereceli harmoniklerin, düşük güçlü cihazları etkilemesine rağmen elektrik enerji sistemlerine etkisi genellikle ihmal edilmektedir. Bu nedenle, enerji sistemlerinin harmonik analizinde, sisteme bağlı olarak genellikle 30 dan daha yüksek dereceli harmonikler ilgilenilmemektedir [11, 12].

Üç fazlı elektrik enerji sistemlerinin, simetrik ve simetrik olmayan, yapısal durumu söz konusu olup, analiz yöntemleri ve modeller de bu özelliklerle ilgili olarak verilmektedir [51-56, 66,69, 136-141].

Simetrik yapı: Sinüsoidal sürekli halde, simetrik yapıdaki üç-fazlı elektrik enerji sistemlerinin analizinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri simetrik bileşenler yöntemidir. Bilindiği gibi; sistem yapısal olarak simetrik ise, yükün dengeli ve dengesiz oluşuna bağlı olmaksızın, simetrik bileşen dönüşümü sonucu, üç fazlı sistemin her fazı için birbirinden bağımsız olan üç adet bir fazlı eşdeğeri (doğru, ters ve sıfır bileşen devreleri) elde edilmektedir [57, 58]. Bu yöntemde, önce bir fazlı eşdeğer devrelerin çözümü yapılmakta ve bu çözümlerden ters dönüşüm yapılarak üç fazlı sistemin çözümü elde edilmektedir. Simetrik sistemde üretim ve yüklerin dengeli olması yada dengeli sayılabilmeleri durumunda; simetrik bileşenler

dönüşümü sonucunda, her faz için sadece doğru (pozitif) bileşen ortaya çıkmasının bir sonucu olarak üç fazlı ve dengeli doğru bileşen devresi elde edilmektedir. Bu üç fazlı doğru bileşen devresinin dengeli oluşu nedeniyle, biri için çözüm yapılması yeterli olup böylece, üç-fazlı simetrik ve dengeli sistemlerin bir fazlı analizi mümkün olmaktadır [52-56].

Sinüsoidal olmayan sürekli halde, üç fazlı dengeli bir sistemde, $3n$, $n=(1, 2, 3, \dots)$ dereceli harmoniklerin sıfır bileşen devrelerinde, $(3n+1)$, $(n=0, 1, 2 \dots)$, dereceli temel bileşen ve harmoniklerin doğru bileşen devrelerinde, $(3n-1)$, $(n=1, 2, 3\dots)$, dereceli harmoniklerin ise negatif bileşen devrelerine dağılmaları nedeniyle, simetrik bileşenler dönüşümüyle, sinüsoidal durumda olduğu gibi sadece doğru (pozitif) bileşen ortaya çıkmamaktadır. Bunun sonucunda, harmonikli ve dengeli bir sistemde bir fazlı analiz ancak bazı kabuller altında mümkün olmaktadır [2, 11,12, 44].

Sinüsoidal olmayan sürekli halde, üç fazlı dengeli bir sistemde, sadece $(3n+1)$ dereceli temel bileşen ve harmoniklerin olduğu durumda, simetrik bileşenler dönüşümüyle, üç adet dengeli doğru bileşen devresi elde edilmektedir. Bu üç adet doğru bileşen devresinden biri için çözüm yapılmasının yeterli olması nedeniyle üç-fazlı simetrik ve dengeli sistem bir fazlı olarak analiz edilmektedir.

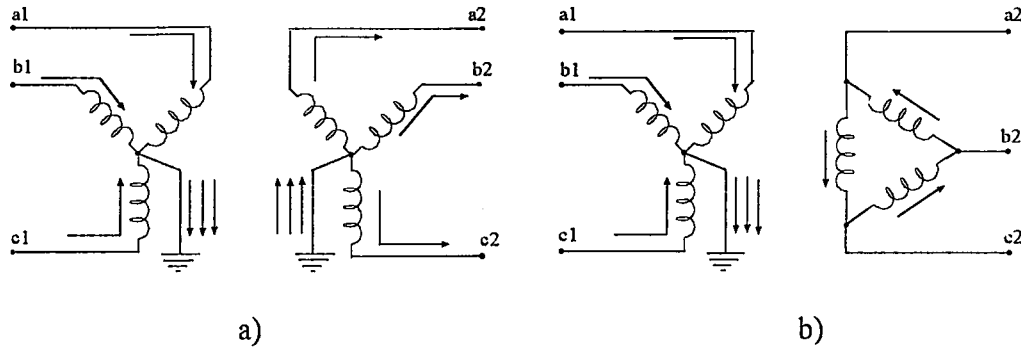
Dengeli, $3n$ dereceli sıfır bileşen harmoniklerinin elektrik enerji sisteminde dağılımı, transformatörlerin bağlama gruplarından da etkilemekte olup, sargılarının yıldız noktasının topraklı olduğu durumda bu harmonikler toprağa akmaktadır. Sargıların üçgen bağlı olduğu durumda sargılarda sirkülasyon akımı olarak dolaşmaktadır.

Transformatör sargılarının üçgen bağlı olmasından kaynaklanan faz kayması, özellikle sistemde birden fazla harmonik kaynağının bulunduğu durumda, harmoniklerin şebekede yayılım etkileri nedeniyle ihmal edilememektedir [11, 144].

Sinüsoidal olmayan sürekli halde, dengesiz bir sistemde tüm harmonikler, dengesizlik miktarına bağlı olarak, doğru, ters ve sıfır sistem devrelerinde de bulunacaktır [11, 12]. Bu nedenle simetrik ve dengesiz harmonikli sistemlerin analizinde simetrik bileşenler dönüşümü kaçınılmaz olmaktadır.

Sinüsoidal olmayan sürekli halde, dengeli ve dengesiz üç fazlı sistemde, transformatörlerin bağlama grupları harmoniklerinin şebekede yayılımına etkilemekte

olup sıfır bileşen harmoniklerinin akışı önemli iki bağlama grubu için Şekil 3.1 de verilmektedir [2].



Şekil 3.1 3-fazlı transformatörde sıfır bileşen harmoniklerinin akışı,
a) Yıldız (topraklı) / yıldız (topraklı) ,
b) Yıldız (topraklı) / üçgen ,

Asimetrik yapı: sinüsoidal sürekli halde, üç-fazlı enerji sistemlerinin simetrik olmadığı durumda, sistem dengeli veya dengesiz yüklü olsun, simetrik bileşenler yönteminin uygulanması, doğru, ters ve sıfır bileşen devreleri yanında başka devreleri de ortaya çıkarmakta, diğer bir deyişle, birbirinden bağımsız bir fazlı eşdeğer devreler elde edilememektedir. Dolayısıyla simetrik bileşenleri kullanmanın hiçbir üstünlüğünün kalmadığı bu durumda, sistemin faz bileşenleri ile modellenmesi ve analiz edilmeleri daha avantajlı olmakta ve önce simetrik bileşenler, sonrada ters dönüşüm ile faz bileşenlerinin bulunması için iki dönüşümün yapılması gibi bir anlamsızlık ortadan kalkmaktadır. Sinüsoidal olmayan sürekli halde de, asimetrik yapıdaki bir şebekenin simetrik bileşen devrelerinin elde edilişi sürekli hale benzer olarak, birbirinden bağımsız bir fazlı eşdeğer devreler biçiminde elde edilememektedir. Bu durumda faz bileşenleri yöntemi ile 3-fazlı analiz yapılması gerekmektedir. Bazı durumlarda, transformatörlerin yıldız noktası gerilimleri ile nötr yada toprak iletkenlerindeki harmonik akımlarının da hesaplanması gerekmektedir. Bu durumda 3 fazlı analiz yerini çok-fazlı analize bırakmaktadır [12].

Elektrik enerji sistemlerinin üç fazlı olarak analizinde, hem eleman sayısı hem de sistemdeki bara sayısı üç kat artmaktadır. Boyutları her geçen gün giderek büyüyen ve karmaşık bir yapıya gelen elektrik şebekelerinde, boyutun, üç fazlı analiz nedeniyle, üç kat daha büyümesi ve 3-fazlı harmonik analizinin ilgilenilen maksimum harmonik frekansı kadar tekrarlanıyor olması, yeni yöntem arayışlarını beraberinde getirmektedir. Yeni yöntemlerde amaç, daha basit şebeke yapıları, daha

az bellek kullanımı ve işlem sayısı ile uygun matematiksel model ve algoritmalarla daha hızlı ve doğru çözümler elde etmektir.

Üç fazlı sistemler için verilen bileşik (kompund) eleman kavramı ile elemanların ve şebekenin grafiksel gösterimi oldukça basitleşmektedir [53]. Ancak, şebeke elemanlarının ve şebekenin modellerinin elde edilişinde ihtiyaç duyulan bellek ve işlem sayısı bakımından belirgin bir üstünlüğe sahip değildir.

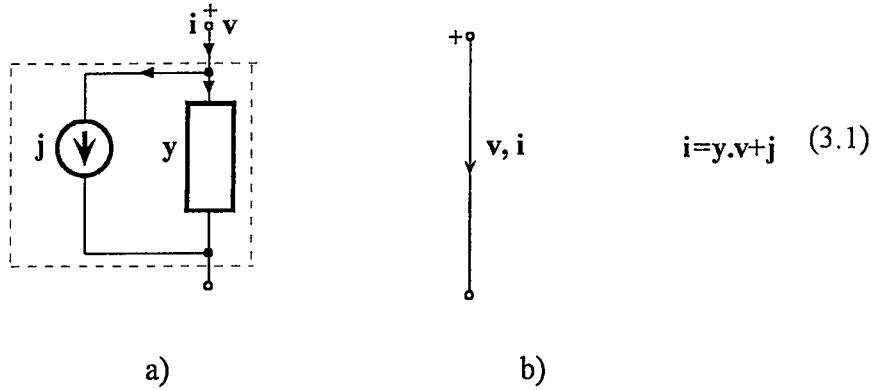
Literatürde, elektrik enerji sistemlerinin 3 fazlı modellenmesinde elemanların her faz için bir araya toplanması ilkel bağıntılarda yapılmış, fakat bara matrisinde her faza ait baralar bir arada düşünülmediği için modeller aynı faza ait elemanlar bir arada olacak şekilde elde edilmemiştir [70]. Daha sonra yapılan çalışmada transformatörlerin harmonik bağımlı modelinin elde edilişinde, her faza ait elemanlar bir arada olacak şekilde model verilmiş ancak devamında, diğer elemanların ve şebekenin kendisinin modellenmesinde aynı yaklaşım devam ettirilmemiştir [64]. Çok-uçlu eleman kavramı yaklaşımı ile sinüsoidal halde elektrik enerji sistemi ve eleman modelleri her bir faz bir arada olacak şekilde veren çalışmalar yapılmış olup harmonikli sistemlere uygulanmamıştır [111].

Burada, çok-fazlı elektrik enerji sistemlerinin sinüsoidal olmayan sürekli hal analizinde kullanılan matematiksel modellerinin elde edilmesine yönelik, fazların kendi içinde gruplaşması yaklaşımı ve modern devre teorisinde yaygın olarak kullanılan, çok-uçlu eleman kavramı birlikte kullanılarak genel bir yaklaşım verilmesi amaçlanmıştır.

3.2 Çok-uçlu Eleman Kavramı Yardımı İle Elektrik Şebeklerinin Harmonik Bağımlı Modellenmesi

Bilindiği gibi, en basit devre elemanının iki ucu olup, bunlara 2-uçlu eleman yada kısaca 2-uçlu denilmektedir. Bu 2-uçlu eleman genel anlamda doğrusal olmayıp, bu özellik ya bir z empedansı ve buna seri bağlı bir e gerilim kaynağı olarak veya Şekil 3.2 verildiği gibi bir y admitansı ile uçlarına bağlı j akım kaynağı ile ifade edilmektedir [69]. Uç sayısı ikiden fazla bir devre elemanına da çok-uçlu eleman yada, uç sayısı n , ($n > 2$) ise, n -uçlu eleman denilmektedir. Bir çok-uçlu elemene

ilişkin uç-graf ve uç-Denklem, bu çok-uçlunun matematiksel modelini oluşturmakta olup, çok-uçlunun tüm özelliklerini göstermektedir [137-139].



Şekil 3.2 Doğrusal olmayan devre elemanının Norton eşdeğerinin

a) 2-uçlu gösterimi

b) Matematiksel modeli (uç-graf, uç-Denklem)

Şekil 3.2 (a) da gösterilen ve uç bağıntıları Denk.3.1 de verilen 2-uçlu elemanlar, akım ve gerilim kaynaklarından oluşan bir devre, çok-uçlu eleman olarak göz önüne alındığında, bu devrenin matematiksel modelini elde etmek üzere, bu çok-uçlunun kapılarından gerilim kaynakları ile uyarılması gerekecektir. Bu uyarma biçimine ilişkin devre grafindan yararlanılarak yapılacak temel çevre ve temel kesitleme Denklemleri sırasıyla (3.2) ve (3.3) aşağıda verilmiştir. Burada genel çözüm olması açısından, verilen devrenin tüm baralarından değil, uç-grafla tanımlanan kapılarından uyarılması durumu ele alınmıştır.

$$\left[\begin{array}{ccc|cc} B_1 & B_3 & B_5 & U & 0 \\ B_2 & B_4 & B_6 & 0 & U \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} \underline{e} \\ \underline{v} \\ \underline{v_d} \\ \underline{v_k} \\ \underline{v_j} \end{bmatrix} = 0 \quad (3.2)$$

$$\left[\begin{array}{ccc|cc} U & 0 & 0 & -B_1^T & -B_2^T \\ 0 & U & 0 & -B_3^T & -B_4^T \\ 0 & 0 & U & -B_5^T & -B_6^T \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} \underline{i_e} \\ \underline{i} \\ \underline{i_d} \\ \underline{i_k} \\ \underline{j} \end{bmatrix} = 0 \quad (3.3)$$

Burada, $(\mathbf{e}, \mathbf{i}_e)$, $(\mathbf{v}_j, \mathbf{j})$, $(\mathbf{v}^*, \mathbf{i}^*)$, $(\mathbf{v}_d, \mathbf{i}_d)$ ve $(\mathbf{v}_k, \mathbf{i}_k)$ sırasıyla devre içinde bulunan gerilim ve akım kaynakları, uyarma kaynakları ile dal ve kirişlerde kalan 2-uçlu elemanların gerilim ve akımlarını göstermektedir.

Bu devreyi oluşturan 2-uçlu elemanların yukarıda açıklanan genel eleman tanımının da kabul edilmesinin sonunda bu 2-uçluların ilkel sistem bağıntıları da genel olarak

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_d \\ \mathbf{i}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{dd} & \mathbf{Y}_{dk} \\ \mathbf{Y}_{kd} & \mathbf{Y}_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_d \\ \mathbf{v}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{j}_d \\ \mathbf{j}_k \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

biçiminde yazılabilir. Burada, $[\mathbf{Y}_{dd}]$ ve $[\mathbf{Y}_{kk}]$ alt matrisleri sırasıyla dallarda ve kirişlerde kalan 2-uçlu elemanların admitans matrislerini, $[\mathbf{Y}_{dk}]$ ve $[\mathbf{Y}_{kd}]$ alt matrisleri ise dal ve kirişlerde kalan elemanlar arasındaki kuplajları göstermektedir. Matematiksel modelin admitans parametreleri ile bulunmak istenmesi Düğüm gerilimleri yöntemini kullanmayı gerektirmekte olup,

Denklem (3.3) den

$$\begin{bmatrix} 0 & -\mathbf{B}_3^T \\ \mathbf{U} & -\mathbf{B}_5^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_d \\ \mathbf{i}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\mathbf{B}_4^T \\ -\mathbf{B}_6^T \end{bmatrix} [\mathbf{j}] + \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ 0 \end{bmatrix} [\mathbf{i}^*] = 0 \quad (3.5)$$

biçiminde elde edilen bu bağıntı Denk.3.4 kullanılarak düzenlenmesiyle

$$\begin{bmatrix} 0 & -\mathbf{B}_3^T \\ \mathbf{U} & -\mathbf{B}_5^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{dd} & \mathbf{Y}_{dk} \\ \mathbf{Y}_{kd} & \mathbf{Y}_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_d \\ \mathbf{v}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\mathbf{B}_3^T \\ \mathbf{U} & -\mathbf{B}_5^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{j}_d \\ \mathbf{j}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\mathbf{B}_4^T \\ -\mathbf{B}_6^T \end{bmatrix} [\mathbf{j}] + \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ 0 \end{bmatrix} [\mathbf{i}^*] = 0 \quad (3.6)$$

bağıntısı elde edilir. Denk.3.2 den elde edilen,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_d \\ \mathbf{v}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{U} \\ -\mathbf{B}_3 & -\mathbf{B}_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}^* \\ \mathbf{v}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\mathbf{B}_1 \end{bmatrix} [\mathbf{e}] \quad (3.7)$$

bağıntısı Denk. 3.6 de yerine konulup, düzenlenirse

$$\begin{bmatrix} 0 & -\mathbf{B}_3^T \\ \mathbf{U} & -\mathbf{B}_5^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{dd} & \mathbf{Y}_{dk} \\ \mathbf{Y}_{kd} & \mathbf{Y}_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{U} \\ -\mathbf{B}_3 & -\mathbf{B}_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}^* \\ \mathbf{v}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\mathbf{B}_3^T \\ \mathbf{U} & -\mathbf{B}_5^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{dd} & \mathbf{Y}_{dk} \\ \mathbf{Y}_{kd} & \mathbf{Y}_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\mathbf{B}_1 \end{bmatrix} [\mathbf{e}] + \begin{bmatrix} 0 & -\mathbf{B}_3^T \\ \mathbf{U} & -\mathbf{B}_5^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{j}_d \\ \mathbf{j}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\mathbf{B}_4^T \\ -\mathbf{B}_6^T \end{bmatrix} [\mathbf{j}] = \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ 0 \end{bmatrix} [\mathbf{i}^*] \quad (3.8)$$

elde edilir. Burada, çarpma işlemleri sonucunda,

$$[Y_1] = [B_3^T][Y_{kk}][B_3] \quad (3.9)$$

$$[Y_2] = -[B_3^T][Y_{kd}] + [B_3^T][Y_{kk}][B_5] \quad (3.10)$$

$$[Y_3] = -[Y_{dk}][B_3] + [B_5^T][Y_{kk}][B_3] \quad (3.11)$$

$$[Y_4] = [Y_{dd}] - [B_5^T][Y_{kd}] - [Y_{dk}][B_5] + [B_5^T][Y_{kk}][B_5] \quad (3.12)$$

$$[Y_5] = [B_3^T][Y_{kk}][B_1] \quad (3.13)$$

$$[Y_6] = -[Y_{dk}][B_1] + [B_5^T][Y_{kk}][B_1] \quad (3.14)$$

tanımları yapılarak düzenlenirse Denk.3.8

$$\begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 \\ Y_3 & Y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^* \\ v_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_5 & -B_4^T \\ Y_6 & -B_6^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -B_3^T \\ U & -B_5^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_d \\ j_k \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} U \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i^* \\ i \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

biçiminde elde edilir. Burada, çok-uçlunun uç büyüklükleri ile modelin elde edilmesi için uçlara bağlanan uyarma kaynakları arasındaki

$$[v^*] = [v], \quad -[i^*] = [i] \quad (3.16)$$

bağıntıları kullanılarak, çok-uçlunun uç-Denklemeleri

$$[i] = [Y_1 - Y_2 \cdot Y_4^{-1} \cdot Y_3][v] + [Y_5 - Y_2 \cdot Y_4^{-1} \cdot Y_6 \quad Y_2 \cdot Y_4^{-1} \cdot B_6^T - B_4^T] \begin{bmatrix} e \\ j \end{bmatrix} + [Y_2][Y_4^{-1}] \cdot [Y_2 \cdot Y_4^{-1} \cdot B_5^T - B_3^T] \begin{bmatrix} j_d \\ j_k \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

biçiminde elde edilir.

Enerji sistemleri, özel bir devre yapısında olduğundan, enerji sistemleri analizleri için modeller bazı kabullerle benzer yoldan yeniden elde edilecektir. Elektrik enerji sistemlerinde tüm ölçümlerin toprağa göre yapılması, referans olarak toprağın seçilmesine ve uyarıcı kaynaklara ilişkin uç-grafın yıldız uç-graf biçiminde olmasına neden olmaktadır. Senkron makine gerilimi, enerji sistemi modellerinin elde

edilmesinde sağladığı kolaylık nedeniyle genellikle modelin dışında tutulmaktadır. Gerilim ve akım kaynakları ve doğrusal olmayan elemanları içeren bir çok uçlunun uç-denkleminin elde edilişi yukarıda verilmiştir. Senkron makinanın matematiksel modelinin elde edilmesinde sağlayacağı pratiklik bakımından, senkron makine gerilimi, çok-uçlunun dışında tutulmasının bir sonucu olarak matematiksel modelde görünmeyecektir. Elektrik enerji sistemlerinin tüm baralarının modelde gösterilmesi ve admitans parametreleriyle modellerinin elde edilmesi istendiğinden; uçlarından, yıldız uç-graf tarafından tanımlanan, bilinen gerilim kaynakları ile uyarılmakta ve uygun ağaç seçilerek, temel çevre ve kesitleme denklemleri, aynı notasyon kullanılarak

$$\left[\begin{array}{c|c|c} B_3 & U & 0 \\ \hline B_4 & 0 & U \end{array} \right] \begin{bmatrix} \underline{v}^* \\ \underline{v}_k \\ \underline{v}_j \end{bmatrix} = 0 \quad (3.18)$$

$$\left[U \mid -B_3^T \mid -B_4^T \right] \begin{bmatrix} \underline{i}^* \\ \underline{i}_k \\ \underline{j} \end{bmatrix} = 0 \quad (3.19)$$

biçiminde daha basit olarak elde edilmektedir. Tüm elemanlar kırışlerde kaldığı için, eleman tanım bağıntıları

$$[\underline{i}_k] = [Y][\underline{v}_k] + [\underline{j}_k] \quad (3.20)$$

biçiminde olacaktır. Denklem (3.19) dan

$$[\underline{i}^*] - [B_3^T][\underline{i}_k] - [B_4^T][\underline{j}] = 0 \quad (3.21)$$

biçiminde elde edilen Denklemden Denk. 3.20 nin yerine konmasıyla

$$[\underline{i}^*] = [B_3^T][Y][\underline{v}_k] + [B_3^T][\underline{j}_k] + [B_4^T][\underline{j}] \quad (3.22)$$

bağıntısı elde edilir. Denk. 3.18 den

$$[\underline{v}_k] = -[B_3][\underline{v}^*] \quad (3.23)$$

elde edilen bu denklemin Denk. 3.22 de yerine konmasıyla

$$[i^*] = -[B_3^T][Y][B_3][v^*] + [B_3^T][j_k] + [B_4^T][j] \quad (3.24)$$

bağıntısı elde edilir. Burada, çok-uçlunun uç büyüklükleri ile uyarma kaynakları arasındaki

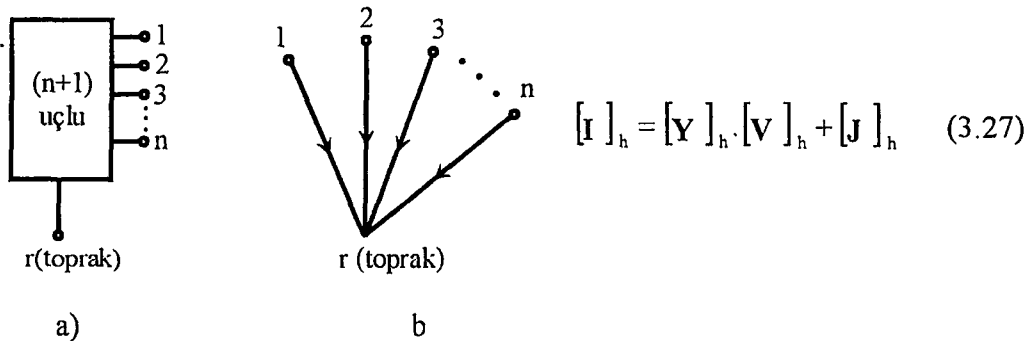
$$[v^*] = [v], \quad -[i^*] = [i] \quad (3.25)$$

bağıntıları kullanılarak, çok-uçlunun uç-Denklemeleri

$$[i] = [B_3^T Y B_3][v] - [B_3^T \quad B_4^T] \begin{bmatrix} j_k \\ j \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

biçiminde elde edilir. Bu model, elektrik enerji sistemleri için yapılan kabullerle Denk 3.17 den de elde edilebilmektedir.

Gerilim ve akımın dalga biçiminin ideal olarak sinüsoidal olması istenmesine rağmen, bazı etkenler sonucu, dalga biçiminde bozulmalar olmaktadır. Sinüsoidal olmayan periyodik dalga biçimine sahip gerilim ve akımın, genlik ve frekansları farklı bir çok sinüsoidal dalgaların toplamı şeklinde ifade edilmesiyle sinüsoidal olmayan şartlar altındaki çok uçlu da farklı harmonik frekanslar için modellenmiş aynı topolojiye sahip çok-uçlulara ayrılabilir. Bunun sonucunda, sinüsoidal sürekli halde çok-uçlunun matematiksel modellerinin elde edilişi için yukarıda verilen yaklaşım, farklı harmonik frekansları için matematiksel modellerin elde edilişi için de benzer olmaktadır.



a)
Şekil 3.3 a) (n+1)-uçlu,
b) (n+1)-uçlunun h. harmonik matematiksel modeli

n-uçlu bir enerji sistemi, referans toprağın da dahil edilmesi ile Şekil 3.3 (a) da verilen (n+1)-uçlu eleman olarak gösterilmekte olup (n+1)-uçlunun farklı frekanslar

için uç-grafi Şekil 3.3 (b) içiminde olup bu uç grafa göre h. harmonik için uç-denklemleri Denk. 3.27 biçimindedir.

Burada, $[I]_h$, $[V]_h$, $[Y]_h$ ve $[J]_h$ sırasıyla (n+1)-uçlunun h. harmonik uç akımı, uç gerilimi, uç admitans matrisi ve çok-uçlunun doğrusal olmayan davranışını temsilen uç bağıntılarında gösterilen bağımsız akım kaynağını vektörünü göstermektedir.

h. harmonik için çok-uçlunun admitans matrisi

$$[Y]_h = [B_3]^T \cdot [Y_k]_h [B_3] \quad (3.28)$$

biçiminde elde edilmekte olup, $[Y_k]_h$ admitans matrisi, 2-uçlu elemanların h. harmonik için hesaplanmış tanım bağıntılarında kuplajları da içeren ilkel admitans matrisidir.

Farklı harmonik frekansları için çok-uçluların aynı topolojisi ve uç grafa sahip olmaları nedeniyle Denk.3.28 de $[B_3]$ matrisi değişmemektedir.

Yukarıda, doğrusal olmayan 2-uçluların h. harmonik nedeniyle ortaya çıkan harmonik akımları matrisi $[J_k]_h$ biçiminde verilmiş olup çok-uçluda varlığı kabul edilen bağımsız akım kaynaklarının da dahil edilmesiyle çok-uçlunun uçlarında ortaya çıkan harmonik akımları

$$[J]_h = -[B_3^T \mid B_4^T] \begin{bmatrix} j_k \\ j \end{bmatrix}_h \quad (3.29)$$

biçiminde elde edilmektedir. Burada $[j_k]_h$ doğrusal olmayan 2-uçlu elemanların , sabit olarak kabul edilen akım kaynaklarını, $[j]_h$ ise bağımsız akım kaynaklarını göstermektedir. Ele alınan bütün harmonikler için sabit akım kaynağı veya doğrusal olmayan elemanın harmonik bileşen akımının olmaması durumunda o eleman için değeri sıfır kabul edilmektedir.

Elektrik enerji sistemlerinin matematiksel modellerinin elde edilişi için yukarıda verilen yöntemde, sistemin bir veya üç fazlı olmasının modelleme açısından herhangi

bir sıkıntı oluşturmamakta ve 3 fazlı sistem bir fazlı gibi incelenebilmektedir. Burada sistem faz sırasına göre modellenmekte, 3 fazlı oluşu sadece boyuta etki etmektedir. Üç fazlı sistemin bir fazlı gibi analizinde fazların diziliş sırasında yapılacak her hangi bir değişiklik de matematiksel modelin elde edilmesinde bir sıkıntı oluşturmamaktadır.

3.3 Çok-uçlu Eleman Kavramı Yardımı İle Çok-Fazlı Elektrik Şebekelerinin Harmonik Bağımlı Modellenmesi

Elektrik dağıtım sistemlerinde, genel anlamda tek fazlı, iki fazlı, 3 fazlı ve 3 faz 4 iletkenli sistemler bir arada bulunabilmektedir. Bu yaklaşım O.G ve A.G dağıtım şebekelerini kapsamaktadır. Ayrıca, sistemde kompanzasyon amaçlı üç fazlı ve tek fazlı kapasiteler bulunmaktadır. Dağıtım sistemlerinin harmonik bağımlı modellerinin elde edilmesinde doğrusal yükler frekansa bağımlı bir ve üç fazlı empedans veya admitans olarak alınmaktadır. Bir ve üç fazlı dengesiz yük admitansları, simetrik yapıda olan dağıtım sistemini asimetrik duruma getirmektedir. Elektrik dağıtım sistemleri genellikle asimetrik kabul edilmekte olup, bu sistemlerin çok fazlı olarak modellenmeleri ve analiz edilmeleri gerekmektedir. Fazların bara sayılarının birbirinden farklı olabileceği göz önünde bulundurulması gerekmektedir [12].

Elektrik dağıtım sistemlerinin harmonik analizinde, transformatörlerin topraklanmamış yıldız noktasının harmonik gerilimleri, toprak veya nötr iletkeninin harmonik akışının bilinmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, elektrik dağıtım sistemlerinin çok fazlı modellenmesi gerekçesini oluşturan bir nedendir. Burada, çok-uçlunun matematiksel modeli, çok fazlı ve fazların bara sayılarının birbirinden farklı olması durumlarına cevap verecek genel bir modelin verilmesi amaçlanmaktadır.

Burada verilen modelde dördüncü fazın baraları, yıldız bağlı transformatörlerin topraklanmamış yıldız noktaları veya nötr hattı baraları olabileceği gibi, herhangi bir hattın toprak iletkeni de olabilmektedir.

Üç fazlı elektrik enerji sistemi elemanlarının fazları arasında fiziksel ve/veya manyetik bir bağ olması durumunda, çok-uçlu eleman tanımı gereği, tek bir devre olarak modellenebilmektedir.

Burada, çok-fazlı elektrik enerji sistemlerinin harmonik bağımlı modelleri, farklı harmonik devreleri arasındaki kuplajlar ihmal edilerek, modern devre teorisinde çok iyi bilinen, çok-uçlu eleman kavramı kullanılarak verilmektedir. Bu amaçla, çok-uçlu eleman olarak ele alınan elektrik enerji sisteminin aynı faza ait baraları kendi aralarında gruplanıp, faz sırasında düzenlenerek matematiksel modellerinin elde edilişi için yeni bir yaklaşım verilmektedir.

Şekil 3.4 (a) da çok-uçlu olarak gösterilen elektrik enerji sistemi veya elemanının, yukarıda açıklanan fikre uygun matematiksel modelinin elde edilmesi için, çok-uçluyu oluşturan 2-uçlu elemanların, tanım bağıntılarının a, b, c ve d faz sırasında gruplanmasıyla çok-uçlunun tanım bağıntısı

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_p^a \\ \mathbf{I}_p^b \\ \mathbf{I}_p^c \\ \mathbf{I}_p^d \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_p^{aa} & \mathbf{Y}_p^{ab} & \mathbf{Y}_p^{ac} & \mathbf{Y}_p^{ad} \\ \mathbf{Y}_p^{ba} & \mathbf{Y}_p^{bb} & \mathbf{Y}_p^{bc} & \mathbf{Y}_p^{bd} \\ \mathbf{Y}_p^{ca} & \mathbf{Y}_p^{cb} & \mathbf{Y}_p^{cc} & \mathbf{Y}_p^{cd} \\ \mathbf{Y}_p^{da} & \mathbf{Y}_p^{db} & \mathbf{Y}_p^{dc} & \mathbf{Y}_p^{dd} \end{bmatrix}_h \begin{bmatrix} \mathbf{V}_p^a \\ \mathbf{V}_p^b \\ \mathbf{V}_p^c \\ \mathbf{V}_p^d \end{bmatrix}_h + \begin{bmatrix} \mathbf{J}_p^a \\ \mathbf{J}_p^b \\ \mathbf{J}_p^c \\ \mathbf{J}_p^d \end{bmatrix}_h \quad (3.30)$$

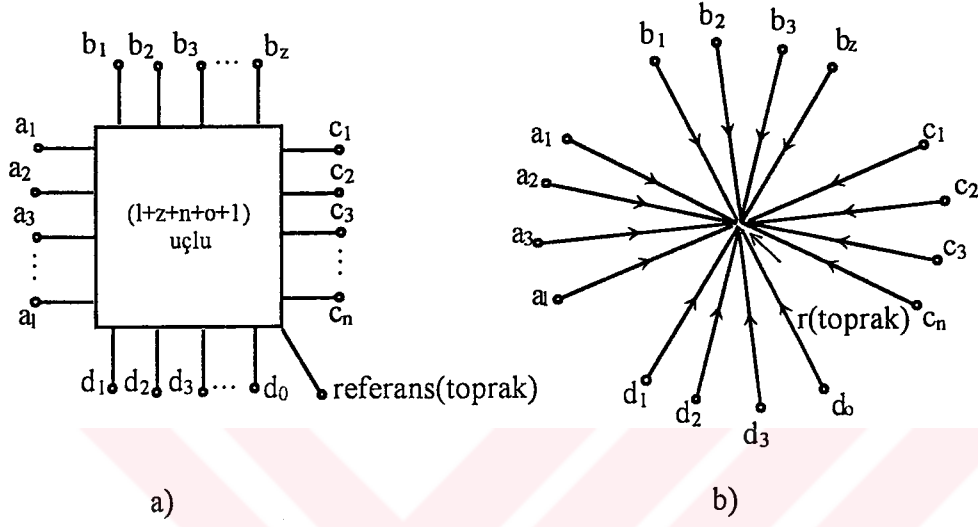
biçiminde verilmiştir. Burada, $[\mathbf{Y}_p^{aa}]_h$, $[\mathbf{Y}_p^{bb}]_h$, $[\mathbf{Y}_p^{cc}]_h$ ve $[\mathbf{Y}_p^{dd}]_h$ alt matrisleri çok-uçlunun her fazının harmonik bağımlı ilkel admitans matrislerini, $[\mathbf{Y}_p^{ab}]_h$, $[\mathbf{Y}_p^{ac}]_h$, $[\mathbf{Y}_p^{ad}]_h$, $[\mathbf{Y}_p^{ba}]_h$, $[\mathbf{Y}_p^{bc}]_h$, $[\mathbf{Y}_p^{bd}]_h$, $[\mathbf{Y}_p^{ca}]_h$, $[\mathbf{Y}_p^{cb}]_h$, $[\mathbf{Y}_p^{cd}]_h$, $[\mathbf{Y}_p^{da}]_h$, $[\mathbf{Y}_p^{db}]_h$ ve $[\mathbf{Y}_p^{dc}]_h$ alt matrisleri ise fazlar arasındaki harmonik bağımlı kuplajları (manyetik bağları) göstermektedir. $[\mathbf{J}_p^a]_h$, $[\mathbf{J}_p^b]_h$, $[\mathbf{J}_p^c]_h$ ve $[\mathbf{J}_p^d]_h$ akım vektörleri ise doğrusal olmayan 2- uçluların tanım bağıntılarındaki akım kaynağı vektörleridir.

Çok-uçlunun yeni yaklaşıma uygun olarak matematiksel modelinin elde edilmesinde, enerji sistemlerine has bir özellik olan yıldız-uç-graf yapısı nedeniyle, DGY de, çok-uçlunun tüm elemanları kırışlerde kalmakta ve temel çevre Denklemleri ve tanım bağıntıları kullanılarak h. harmonik uç Denklemleri (3.31) elde edilmektedir. Farklı harmonikler için şebeke topolojisi, değişmemekte ve çok-uçlunun her harmonik derecesine göre, uç Denklemleri sadece tanım bağıntıların harmoniğe göre değişimi ile elde edilmektedir.

Şekil 3.4 de d_1 , d_2 , ..., d_o olarak verilen uçlar, A.G şebeke hesaplarında nötr, Y.G ve O.G şebekelerinde bulunan transformatörlerin topraklanmamış yıldız noktaları veya

toprak iletkeninin indirgenmediği hat modellerinde toprak iletkenini ifade etmekte olup, bu uçların akım yada gerilimi ile ilgilenilmediği hallerde, indirgenerek bu baralar uç Denklemlerden yok edilebilmektedir.

Bu yaklaşımın sonucu, ele alınan şebeke ve matematiksel model Şekil 3.4 de verilmiştir.



$$\begin{bmatrix} I^a \\ I^b \\ I^c \\ I^d \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} Y^{aa} & Y^{ab} & Y^{ac} & Y^{ad} \\ Y^{ba} & Y^{bb} & Y^{bc} & Y^{bd} \\ Y^{ca} & Y^{cb} & Y^{cc} & Y^{cd} \\ Y^{da} & Y^{db} & Y^{dc} & Y^{dd} \end{bmatrix}_h \begin{bmatrix} V^a \\ V^b \\ V^c \\ V^d \end{bmatrix}_h + \begin{bmatrix} J^a \\ J^b \\ J^c \\ J^d \end{bmatrix}_h \quad (3.31)$$

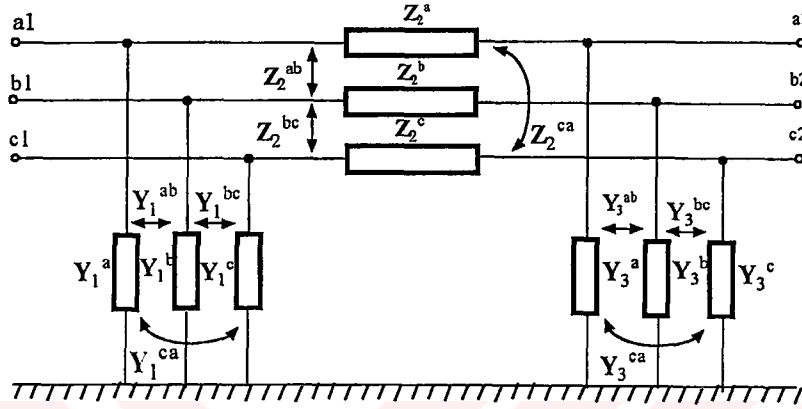
Şekil 3.4 a) Çok fazlı (l+z+n+o+1)-uçlu doğrusal olmayan eleman

b) Çok fazlı (l+z+n+o+1)-uçlunun matematiksel modeli

Bu bölümde, yeni yaklaşımla hat, transformatör ve senkron generatör modellerinin elde edilişi verilmektedir. Anlatım kolaylığı sağlaması açısından hatların toprak ve nötr iletkeni içermedikleri ve harmonik akımda üretmedikleri (hatlar genellikle doğrusal davranış gösterirler) kabul edilmiş ve sadece, hatlardan oluşan çok-uçluların matematiksel modellerinin verilmesine anlatıma temel olması açısından öncelik verilmiştir.

3.3.1 Üç-fazlı hattın harmonik bağımlı modeli

Hatlar, genellikle Π eşdeğerleri ile gösterilmekte olup üç fazlı hatlar birbiriyle kuplajlı eşdeğerleri Şekil 3.5 de verilmektedir [52]. Hatlar, geçici olay analizleri için frekans bağımlı modelleri ayrıntılı olarak verilmiş olup gerek duyulması durumunda harmonik çalışmalarda da kullanılmaktadır [40-42].



Şekil 3.5 Üç fazlı hattın Π eşdeğeri

Hattın birim uzunluk için harmonik seri empedansı ve şönt admitansı hattın geometrik karakteristiği ve deri etkisi de dikkate alınarak hesaplanmaktadır [37]. Uzun hat etkisinin ihmal edilebildiği durumda düşük dereceli harmonikler için hattın uzunluğu ile çarpılarak Π eşdeğer devresi toplu parametreleri elde edilmektedir [12]. Uzun hat etkisinin ihmal edilemediği veya yüksek dereceli harmoniklerle ilgilenildiği durumda ise hatların modellenmesi için kullanılan yöntemlerden biri olan dağılmış parametrelili hat modeli harmonik çalışmalarda da yaygın olarak kullanılmaktadır [40-42].

Hatların uzunluk etkisini gidererek temel bileşen modellerinin simetrik olması için yapılan çaprazlama işlemi, hatların harmonik bağımlı modellerinde simetrisizliğin artışına neden olmaktadır [98]. Bunun yanında yüksek frekanslarda uzun hat etkisi çok daha kısa mesafelerde ortaya çıkması nedeniyle hatların harmonik bağımlı modelleri elde edilirken faz bileşenleri yönteminin kullanılması kaçınılmaz olmaktadır.

Kabloların modellenmesi hatlar ile benzer olup dağıtım sistemlerinde, uzun olmayan kabloların kapasiteleri genellikle ihmal edilmektedir [12]. Özetle, hava hattı ve kablo

şebekelerinde harmonik bağımlı model yapısı, uzunlukları, ilgilenilen harmonik derecesi ve deri etkisinin dikkate alınıp alınmayacağına bağlı olarak verilmektedir.

Hatların çaprazlanmamış olması durumunda, temel ve harmonik bileşen toplu parametrelerinin hesaplanması için çeşitli çalışmalar yapılmakta olup, birim uzunluk başına, çok-fazlı düzenlenmiş seri empedans ve paralel kapasitelerle temsil edilirler. Deri etkisi ihmal edilmiş bir hat veya kablunun seri empedans matrisi,

$$[Z_2^{abc}]_h = [R_2^{abc}]_1 + j.h.[X_2^{abc}]_1 \quad (3.32)$$

biçiminde verilmektedir. Burada, $[R_2^{abc}]_1$ ve $[X_2^{abc}]_1$ sırasıyla hat veya kablunun temel frekanstaki çok-fazlı seri direnç ve reaktans matrisleridir. Çok-fazlı paralel admitans matrisleri ise

$$[Y_1^{abc}]_h = \text{Re}\{[Y_1^{abc}]_1\} + j.h.\text{Im}\{[Y_1^{abc}]_1\} \quad (3.33)$$

$$[Y_3^{abc}]_h = \text{Re}\{[Y_3^{abc}]_1\} + j.h.\text{Im}\{[Y_3^{abc}]_1\} \quad (3.34)$$

biçiminde olup, reel kısım hatlar ve kablolar için ihmal edilmektedir. Üç fazlı hattın seri admitans matrisi ilkel empedans matrisinin tersi alınarak

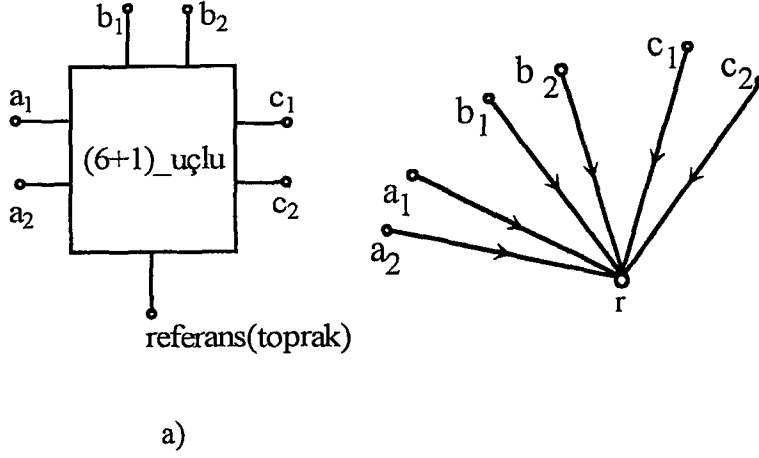
$$[Y_2^{abc}]_h = [Z_2^{abc}]_h^{-1} = \begin{bmatrix} Y_2^{aa} & Y_2^{ab} & Y_2^{ac} \\ Y_2^{ba} & Y_2^{bb} & Y_2^{bc} \\ Y_2^{ca} & Y_2^{cb} & Y_2^{cc} \end{bmatrix}_h \quad (3.35)$$

biçiminde elde edilmektedir.

$$[Y_p^{abc}]_h = \begin{bmatrix} Y_1^a & 0 & 0 & Y_1^{ab} & 0 & 0 & Y_1^{ac} & 0 & 0 \\ 0 & Y_2^a & 0 & 0 & Y_2^{ab} & 0 & 0 & Y_2^{ac} & 0 \\ 0 & 0 & Y_3^a & 0 & 0 & Y_3^{ab} & 0 & 0 & Y_3^{ac} \\ Y_1^{ba} & 0 & 0 & Y_1^b & 0 & 0 & Y_1^{bc} & 0 & 0 \\ 0 & Y_2^{ba} & 0 & 0 & Y_2^b & 0 & 0 & Y_2^{bc} & 0 \\ 0 & 0 & Y_3^{ba} & 0 & 0 & Y_3^b & 0 & 0 & Y_3^{bc} \\ Y_1^{ca} & 0 & 0 & Y_1^{cb} & 0 & 0 & Y_1^c & 0 & 0 \\ 0 & Y_2^{ca} & 0 & 0 & Y_2^{cb} & 0 & 0 & Y_2^c & 0 \\ 0 & 0 & Y_3^{ca} & 0 & 0 & Y_3^{cb} & 0 & 0 & Y_3^c \end{bmatrix}_h \quad (3.36)$$

Şekil 3.5 deki hattın yeni yaklaşıma uygun olarak düzenlenmesi ile ilkel admitans matrisinin Denk.3.36 biçiminde verilmektedir.

3 fazlı hattın çok-uçlu gösterimi ve matematiksel modeli Şekil 3.6 verilmiştir.



$$\begin{bmatrix} I^{a1} \\ I^{a2} \\ I^{b1} \\ I^{b2} \\ I^{c1} \\ I^{c2} \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} Y^{aa} & Y^{ab} & Y^{ac} \\ Y^{ba} & Y^{bb} & Y^{bc} \\ Y^{ca} & Y^{cb} & Y^{cc} \end{bmatrix}_h \cdot \begin{bmatrix} V^{a1} \\ V^{a2} \\ V^{b1} \\ V^{b2} \\ V^{c1} \\ V^{c2} \end{bmatrix}_h \quad (3.37)$$

b)

Şekil 3.6 a) Üç fazlı hattın çok-uçlu gösterimi,
b) Üç fazlı hattın matematiksel modeli.

Yeni yaklaşıma göre üç fazlı bir hattın harmonik bağımlı primitif admitans matrisi genel olarak,

$$[Y_p]_h = \begin{bmatrix} Y_p^{aa} & Y_p^{ab} & Y_p^{ac} \\ Y_p^{ba} & Y_p^{bb} & Y_p^{bc} \\ Y_p^{ca} & Y_p^{cb} & Y_p^{cc} \end{bmatrix}_h \quad (3.38)$$

biçimindedir. Üç-fazlı hattın, uç-denklemlerinin yeni yaklaşıma uygun olarak elde edilmesi amacıyla, yıldız-uçgraf biçiminde gerilim kaynakları ile uyarılmakta ve aynı faza ait uçlar bir araya getirilerek, hat çok-uçlusuna ait temel çevre denklemleri

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} B^a & 0 & 0 & U & 0 & 0 \\ 0 & B^b & 0 & 0 & U & 0 \\ 0 & 0 & B^c & 0 & 0 & U \end{array} \right] \begin{bmatrix} (V^a)^* \\ (V^b)^* \\ (V^c)^* \\ V^a \\ V^b \\ V^c \end{bmatrix} = 0 \quad (3.39)$$

biçiminde verilmektedir.

Şekil 3.6 (a) da verilen çok-uçlunun Denk.3.37 de verilen uç-denklemlerinin tüm koşulları içeren alt matrisleri genel halde

$$[Y^{aa}]_h = [B^a]^T \cdot [Y_p^{aa}]_h \cdot [B^a] \quad (3.40)$$

$$[Y^{ab}]_h = [B^a]^T \cdot [Y_p^{ab}]_h \cdot [B^b] \quad (3.41)$$

$$[Y^{ac}]_h = [B^a]^T \cdot [Y_p^{ac}]_h \cdot [B^c] \quad (3.42)$$

$$[Y^{ba}]_h = [B^b]^T \cdot [Y_p^{ba}]_h \cdot [B^a] \quad (3.43)$$

$$[Y^{bb}]_h = [B^b]^T \cdot [Y_p^{bb}]_h \cdot [B^b] \quad (3.44)$$

$$[Y^{bc}]_h = [B^b]^T \cdot [Y_p^{bc}]_h \cdot [B^c] \quad (3.45)$$

$$[Y^{ca}]_h = [B^c]^T \cdot [Y_p^{ca}]_h \cdot [B^a] \quad (3.46)$$

$$[Y^{cb}]_h = [B^c]^T \cdot [Y_p^{cb}]_h \cdot [B^b] \quad (3.47)$$

$$[Y^{cc}]_h = [B^c]^T \cdot [Y_p^{cc}]_h \cdot [B^c] \quad (3.48)$$

biçiminde hesaplanmaktadır. Burada, literatürde kullanılan ve pratik uygulamalara uygun bazı kabuller ile Denk.3.40-48 ile yapılan hesaplamalarda işlem sayısı ve bellek ihtiyacının azaltılması durumu aşağıda verilmiştir. Uzun hat etkisi ihmal edilen, uzunluk ve malzemeleri aynı, simetrik yapıdaki hatlarda

$$[Y_p^{aa}]_h = [Y_p^{bb}]_h = [Y_p^{cc}]_h = [Y_p^f]_h \quad (3.49)$$

$$[Y_p^{ab}]_h = [Y_p^{ac}]_h = [Y_p^{bc}]_h = [Y_p^{ba}]_h = [Y_p^{ca}]_h = [Y_p^{cb}]_h = [Y_p^m]_h \quad (3.50)$$

olarak kabul edilebilmektedir. Bu durumda primitif admitans matrisi

$$[Y_p]_h = \begin{bmatrix} Y_p^f & Y_p^m & Y_p^m \\ Y_p^m & Y_p^f & Y_p^m \\ Y_p^m & Y_p^m & Y_p^f \end{bmatrix}_h \quad (3.51)$$

biçimindedir.

Hatların fazlarının topolojilerinin aynı olması durumunda temel kesitleme matrisi

$$[B^a] = [B^b] = [B^c] = [B] \quad (3.52)$$

biçimindedir.

Hatların farklı fazlarının topolojilerinin aynı ve yapısal olarak simetrik olmaları durumunda uç denklemleri admitans alt matrisleri

$$[Y^{aa}]_h = [Y^{bb}]_h = [Y^{cc}]_h = [Y^f]_h \quad (3.53)$$

$$[Y^{ab}]_h = [Y^{ac}]_h = [Y^{bc}]_h = [Y^{ba}]_h = [Y^{ca}]_h = [Y^{cb}]_h = [Y^m]_h \quad (3.54)$$

biçiminde olmaktadır.

Bu durumda çok-uçlunun uç-denklemleri admitans matrisi

$$[Y]_h = \begin{bmatrix} Y^f & Y^m & Y^m \\ Y^m & Y^f & Y^m \\ Y^m & Y^m & Y^f \end{bmatrix}_h \quad (3.55)$$

biçiminde olup alt matrisleri

$$[Y^f]_h = [B]^T \cdot [Y_p]_h \cdot [B] \quad (3.56)$$

$$[Y^m]_h = [B]^T \cdot [Y_p^m]_h \cdot [B] \quad (3.57)$$

biçiminde hesaplanmaktadır.

Üç fazlı enerji sistemlerinde, genel olarak fazlara ait hatlar bir birine paralel ve çok yakın olarak tesis edildiklerinden, aralarındaki kuplaj nedeniyle bu hatlar, her biri ayrı çok-uçlular olarak değil, tek bir çok-uçlu olarak göz önüne alınmalıdır. Burada 3 fazlı bir hat için verilen algoritma birden çok hattın çok-uçlu olarak modellenmesine aynen uygulanmaktadır.

Aralarında kuplaj olsun veya olmasın birden fazla hattın oluşan bir sistemin tek bir çok uçlu olarak modellenmesinde primitif admitans matrisi denk. 3.38 biçiminde ve temel çevre matrisi denk. 3.39 biçiminde olmakta ve uç-denklemleri, denklem 3.40-48 kullanılarak elde edilmektedir. Bu algoritma farklı fazlardaki bara sayısının farklı olması durumuna da cevap vermektedir.

Hat veya kabloların kapasitelerinin ihmal edilebilmeleri veya üç faz iletkeninin dışında nötr veya koruma iletkeni gibi iletken sayısını artıran durumlarda da verilen algoritma genişletilerek uygulanmaktadır.

Sonuç olarak, harmonik analizde sadece hatlardan oluşmuş şebekeyi temsil eden, çok-uçlunun uç denklemlerinin ilgilenilen harmonik sayısı kadar tekrar elde edilmesi gerekmektedir. Büyük boyutlu çok-fazlı bir şebekenin uç denklemlerinin harmonik sayısı kadar tekrarlanacak olması işlem sayısı ve bellek ihtiyacı bakımından önemli bir sıkıntıdır. Bu durumda işlem sayısı ve bellek ihtiyacını azaltıcı çalışmalar önem kazanmaktadır.

Yeni yaklaşımın hatların modellenmesinde kullanılmasının, işlem sayısı ve bellek ihtiyacı bakımından sahip olduğu avantajlar aşağıda özetlenmiş olup aynı faza ait elemanlar ve fazlar arasındaki kuplajların kendi içinde gruplanarak bir arada verilmesi hat modelini daha anlaşılır ve anlamlı yapmaktadır.

1. Yeni yaklaşımın kullanılması ile çok-fazlı hattın uç denklemlerinin elde edilmesi 1/3 boyutunda 9 ayrı alt matrisin elde edilmesine dönüşmekte ve bu alt matrisler her harmonik için ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Bu yaklaşımın kullanılması ile 9 ayrı

matrisin birbirinden bağımsız olarak hesaplanabilmesi ve bu alt-matrislerin her bir harmonik için yapılan hesaplarının da, bir birinden bağımsız olması, harmonik bağımlı uç-denklemlerin elde edilmesinde, birden fazla bilgisayarın kullanılmasına (parallel processing)da imkan sağlamaktadır.

2. Hatlardan oluşan çok-uçlunun fazlarının topolojik olarak aynı olduğu durumda bu 9 adet matrisin, her bir harmonik için hesaplanması işleminde, sadece primitif admitans matrislerin değiştirilmesi yeterli olmaktadır. Böylece her bir faz için ortak bir B matrisi bellekte tutulmaktadır (Denk. 3.52). Ayrıca 1. durumdaki sahip olunan üstünlükler burada aynen geçerlidir.

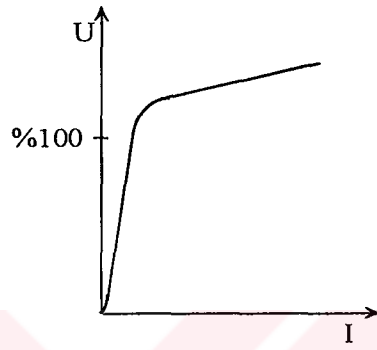
3. Hatlardan oluşan çok-uçlunun tanım bağıntılarının simetrik olduğu (Denk.3.53-54) fakat topolojilerinin farklı olduğu durumda (3.40-48) denklemleri aynı tanım bağıntısı için 9 defa tekrarlanacaktır. Her bir harmonik için tanım bağıntısı admitans matrislerini oluşturan 9 adet alt-matris yerine bir adet alt matrisin hesaplanacak ve hafızada tutulacak olması işlem sayısı ve bellekte tasarruf anlamına gelmektedir.

4. Çok-uçlusunun fazlarının aynı topolojiye ve tanım bağıntılarının simetrik olduğu durumda uç-denklemlerinin elde edilmesinde, her harmonik için 9 adet alt matris hesabı yerine 2 adet alt matrisin (Denk. 3.56-57) hesaplanması yeterli olmaktadır. Yeni yaklaşımın işlem sayısı ve bellek ihtiyacı bakımından sahip olduğu üstünlük ilgilenilen harmonik sayısının artışı ile daha da artacaktır.

3.3.2 Transformatörün harmonik bağımlı modeli

Transformatörler, sinüs biçimli gerilimle beslenmesi durumunda, mıknatıslanma karakteristiğinin doğrusal olduğu bölgede, sinüs biçimli gerilim ve akım verecek biçimde tasarlanmaktadır. Transformatörün düşük yükte çalışması durumunda, şebekede gerilim düşümü azalacağından transformatör giriş gerilimi yükselecek, şebeke geriliminin belli bir değerin üzerine çıkması halinde, doğrusal olmayan transformatör karakteristiği nedeniyle demir çekirdek doymaya girecek ve mıknatıslanma akımında harmonikler ortaya çıkacaktır [144-151]. Transformatörlerin doğrusal olmayan bu karakteristiklerini, manyetik akı devresinin malzeme ve fiziksel yapısı etkilemektedir [64, 131,132].

Elektrik enerji sistemlerini oluşturan ana elemanlardan biri olan transformatörleri harmonikler açısından modelleme çalışmaları, doyma nedeniyle ortaya çıkan harmonik akımların tespiti ve transformatörün eşdeğer devre parametrelerinin harmonik frekanslara göre değişiminin belirlenmesi konularında yoğunluk kazanmakta olup, bu harmonik akımlar; transformatörlere ait elektriksel ve manyetik bağıntıların yazılması ve elektromanyetik yasaların uygulanması ile belirlenmektedir [64, 133, 148].



Şekil 3.7 Transformatör manyetik karakteristiği

Şekil 3.7 de transformatörün akım ve gerilimi arasındaki doğrusal olmayan ilişki verilmektedir. [2].

Transformatörün temel bileşen modelleri, mıknatıslanma akımı ihmal edilerek, kısa devre empedansları ile verilmekte, daha ayrıntılı modellere ihtiyaç duyulması durumunda ise mıknatıslanma akımı bu modele ilave edilmektedir.

Tablo 3.1 Transformatör kısa devre empedansının harmonik derecesine göre değişimi

Model	R(pu)	L(pu)
EPRI	$0.9953 + 6.0013 \times 10^{-5}xf + 2.9475 \times 10^{-7}xf^2$	1.0
McGraw-Edison	$9.5370 \times 10^{-1} + 0.0167xf$	1.0
CIGRE	$1.2072 - 0.0065xf + 5.0675 \times 10^{-5}xf^2$	$1.0006 - 5.4019 \times 10^{-6}f - 7.1592 \times 10^{-8}xf^2$

Transformatörlerin kısa devre parametrelerinin frekansla değişimine ilişkin çalışmaların sonucunda elde edilen ampirik formüllerin yaygın kullanılanları Tablo 3.1 de verilmiştir. Bu parametrelerin frekansa göre değişimleri transformatör güçlerini göre de farklılıklar göstermektedir [49].

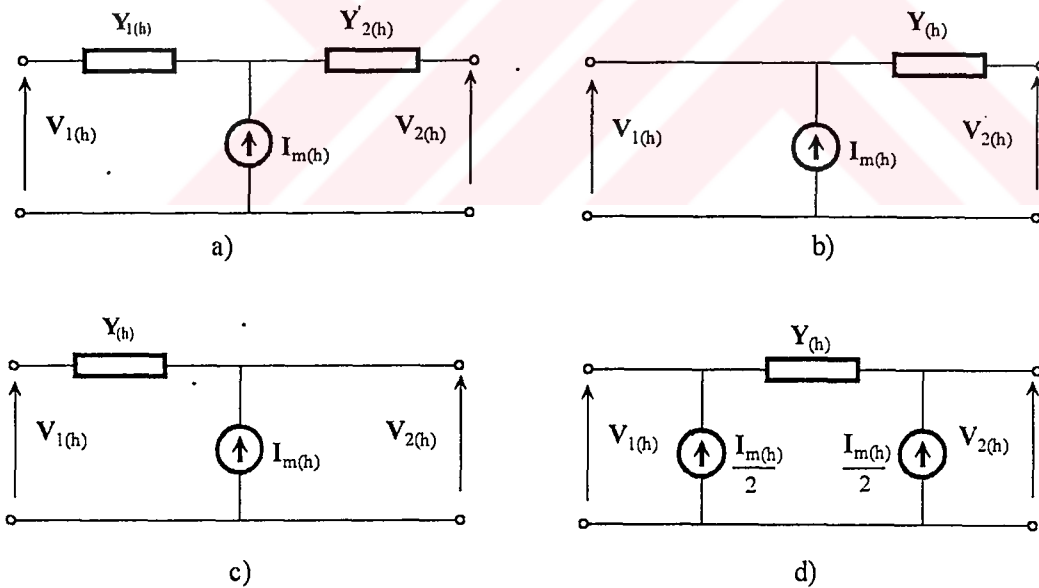
Transformatörlerin neden olduğu harmonik akımlar, mıknatıslanma akımını temsil eden bir harmonik akım kaynağı olarak kabul edilmekte ve modele eklenmektedir. Güç transformatörleri için, tipik mıknatıslanma akımı değerleri tam yük akımının yüzdesi biçiminde verilmekte ve genellikle anma akımının %1'i seviyesinde olduğu kabul edilmektedir [2].

Tablo 3.2 dağıtım transformatörlerinde mıknatıslanma akımının harmonik bileşenlerinin mıknatıslanma akımı ve anma akımına oranları verilmiştir [2].

Tablo 3.2 Bir güç transformatörünün harmonik spektrumu

Harmonik Derecesi(h)	(%) $I_{m(h)}/I_m$	(%) $I_{m(h)}/I$
3	50	0.5
5	20	0.2
7	5	0.05
9	2.6	0.026

Burada, I , I_m ve $I_{m(h)}$ sırasıyla, transformatör anma akımı, mıknatıslanma akımı ve mıknatıslanma akımının h. harmoniğidir.



Şekil 3.8 Transformatörün tek fazlı harmonik eşdeğer devreleri.

- a) T eşdeğer devre,
- b) L eşdeğer devre (mıknatıslanma akımı solda),
- c) L eşdeğer devre (mıknatıslanma akımı sağda),
- d) π eşdeğer devre.

Şekil 3.8 da bir fazlı transformatörün harmonik analiz için literatürde kullanılan farklı eşdeğer devreleri verilmiştir.

Şekil 3.8 de, 1 ve 2 indisleri transformatörün birincil ve ikincil uçlarını temsil etmekte, $Y_{1(h)}$, $Y'_{2(h)}$, $Y_{(h)}$ ve $I_{m(h)}$ ise sırasıyla h. harmonik için birincil sargı direnci ve kaçak reaktansından oluşan admitansı, ikincil sargı direnci ve kaçak reaktansından oluşan admitansın birinci tarafa indirgenmiş değerini, kısa devre admitansı ve mıknatıslanma akımlarıdır.

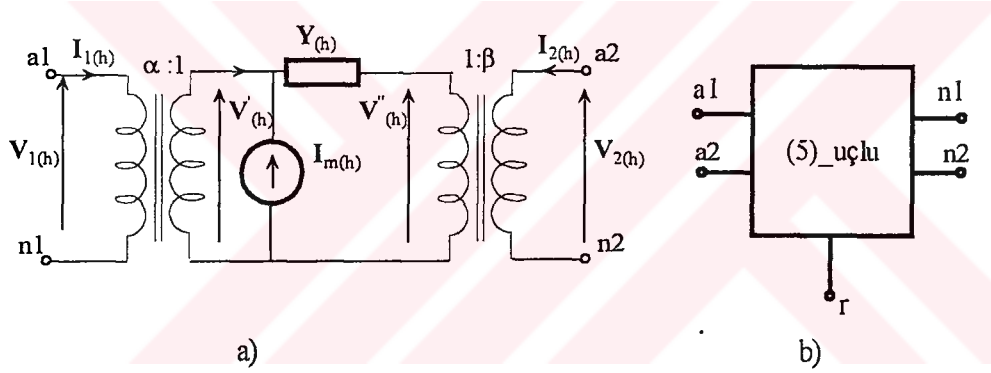
Doğrusal olmayan yükleri besleyen bir transformatörde, yükün harmonik akımlarının diğer şebeke eleman empedansları üzerinde oluşturdukları gerilim düşümleri nedeniyle transformatörün giriş geriliminin dalga biçimi bozulmaktadır. Sinüsoidal olmayan gerilimlerle beslenmiş, doğrusal olmayan yüklerle yüklenmiş transformatörlerde, parametrelerin değişimine yönelik çalışmalar devam etmektedir [149]. Bu nedenle transformatörler genellikle doğrusal elemanlar olarak modellenmekte veya nominal yüklenme şartlarında doyma nedeniyle oluşacak mıknatıslanma akımının harmonikleri sabit bir akım kaynağı olarak gösterilmektedir [18].

Şekil 3.8 (b) de verilen devrede mıknatıslanma akımını ifade eden harmonik akım kaynaklarının girişe taşınmasının, boşta çalışma akımının yük akımına göre çok küçük olması nedeniyle, gerilim düşümü açısından bir sakınca yoktur. Bu şekilde yapılan basitleştirme ile bara sayısı bir adet azalmakta (diğer deyişle artırılmamakta) ve daha sade bir eşdeğer devre elde edilmektedir. Mıknatıslanma akımlarından kaynaklanan gerilim düşümlerinin hesaba katılmasının istenmesi durumunda, (d) eşdeğer devresinin kullanılması daha uygun olacaktır. Özetle, transformatörün eşdeğer devresi seçilirken, kendisinden kaynaklanan harmonik akımlarının neden olduğu harmonik gerilimler ve benzetim açısından, bara sayısını değişmesi durumları göz önünde bulundurularak karar verilmektedir.

Harmonik çalışmaları açısından doğrusal olmayan birden fazla yükün bulunduğu elektrik şebekelerinde harmonik akımlarının faz açıları önemli olup, faz kaydırcı transformatörler veya 3 fazlı transformatörlerin üçgen bağlı sargıları nedeniyle ortaya çıkan faz kayması harmonik bağımlı modellerde verilmesi gerekmektedir. Transformatörlerin bağlama grubundan kaynaklanan faz kayması, sürekli sinüsoidal çalışmalarda, genellikle ihmal edilmektedir [52].

3.3.2.1 Bir-fazlı transformatörün harmonik bağımlı modeli

Burada, 3 fazlı transformatör modellerinin elde edilmesine temel teşkil etmek ve tek fazlı harmonik çalışmalarında kullanılmak üzere, bir fazlı, faz kaydırmalı bir transformatörün matematiksel modeli Şekil 3.8 (b) de verilen eşdeğer devre kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmada, transformatörün temel bileşen eşdeğer devreleri ayrıca verilmemiştir. Temel bileşen eşdeğeri, harmonik bağımlı modellerden kolayca elde edilebilecektir. Harmonik bağımlı eşdeğerler de mıknatıslama akımı sıfır kabul edilerek mıknatıslama akımı temel bileşen eşdeğerlerinde ihmal edilebilmektedir. Daha kapsamlı bir model için, temel bileşen mıknatıslama akımı admitans veya akım kaynağı olarak gösterilebilmektedir. Bu durum çok-uçlu eleman yaklaşımında bir sıkıntı oluşturmayacaktır. Bir fazlı transformatörün matematiksel modeline ait uç-denklemleri bölüm 3.2. de verilen yöntem kullanılarak denk. 3.51 biçiminde elde edilmektedir.



Şekil 3.9 Bir fazlı faz kaydırmalı transformatörün

a) Harmonik L eşdeğer devresi

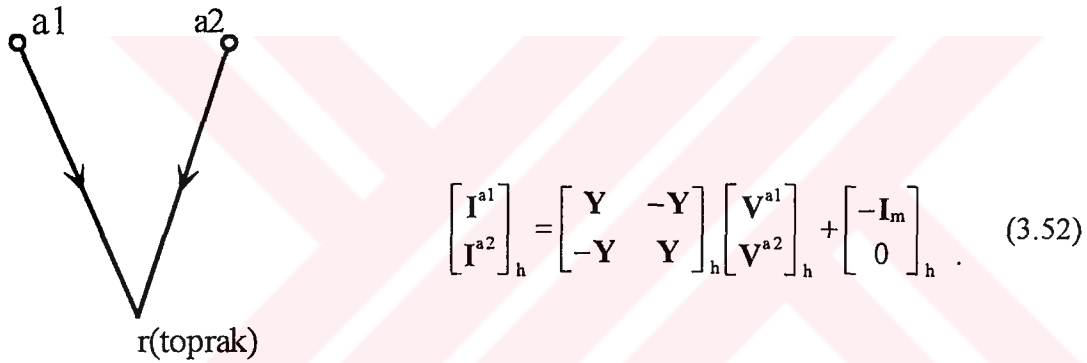
b) Çok-uçlu gösterimi

$$\begin{bmatrix} I^{a1} \\ I^{a2} \\ I^{n1} \\ I^{n2} \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} Y & -Y & -Y & Y \\ \alpha_i \cdot \alpha_v & \alpha_i \cdot \beta_v & \alpha_i \cdot \alpha_v & \alpha_i \cdot \beta_v \\ -Y & Y & Y & -Y \\ \beta_i \cdot \alpha_v & \beta_i \cdot \beta_v & \beta_i \cdot \alpha_v & \beta_i \cdot \beta_v \\ \alpha_i \cdot \alpha_v & \alpha_i \cdot \beta_v & \alpha_i \cdot \alpha_v & \alpha_i \cdot \beta_v \\ Y & -Y & -Y & Y \\ \beta_i \cdot \alpha_v & \beta_i \cdot \beta_v & \beta_i \cdot \alpha_v & \beta_i \cdot \beta_v \end{bmatrix}_h \cdot \begin{bmatrix} V^{a1} \\ V^{a2} \\ V^{n1} \\ V^{n2} \end{bmatrix}_h + \begin{bmatrix} -I_m \\ \alpha_i \\ 0 \\ \alpha_i \\ 0 \end{bmatrix}_h \quad (3.51)$$

Şekil 3.10 Bir fazlı faz kaydırmalı transformatörün matematiksel modeli

Şekil 3.9 da verilen eşdeğer devrede, α ve β ideal transformatörlerin çevirme oranları olup literatürde yaygın olarak kullanılan transformatör eşdeğer devreleri ancak $\alpha_i = \alpha_v = \alpha$ ve $\beta_i = \beta_v^* = \beta$ kabulleri altında verilebilmekte, $\alpha_i = \alpha_v^*$, $\beta_i = \beta_v^*$ ve $Y_{ij} \neq Y_{ji}$ olması durumunda bu eşdeğer devreler verilememektedir. Burada, çok-uçlu eleman yaklaşımı ile elde edilen uç-denklemleri transformatörün her türlü koşula cevap vermesi açısından en genel gösterim olarak kullanılabilmektedir. Çevirme oranlarının v ve i alt indisleri gerilim ve akıma ait olduklarını göstermektedir.

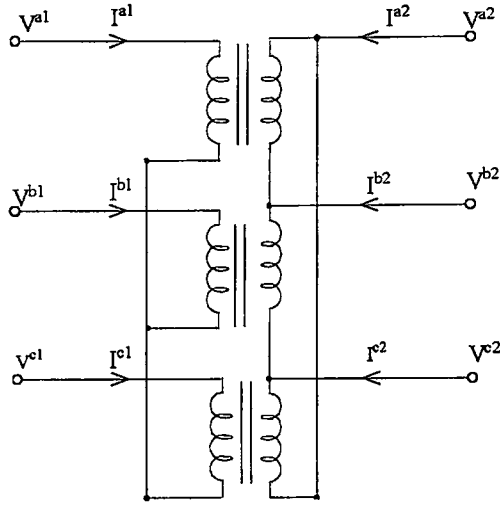
Bir fazlı transformatörün şekil 3.9 (a) da verilen eşdeğerinde admitansın birim değeri olarak (p.u.) verilmesi, faz kaydırmanın olmaması ve n1 ile n2 uçlarının topraklı olması halinde, bunun çok-uçlu eleman olarak matematiksel modeli Şekil 3.11 verilmiştir.



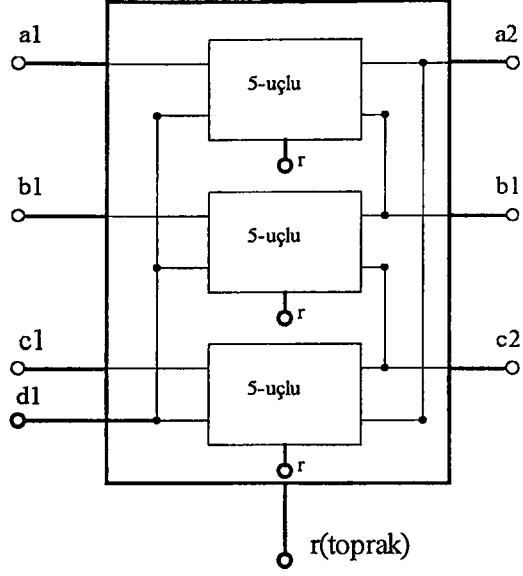
Şekil 3.11 Bir fazlı transformatörün matematiksel modeli

Pratikte, transformatör modelleri genellikle kısa devre empedansları ile verilmektedir. Bunun bir anlamı da, üç fazlı transformatörlerin, 3 adet tek fazlı transformatörün aralarında bağlama grubuna uygun bir şekilde bağlanmalarıdır. Bu, Amerika'da her faza bir fazlı trafo uygulamasına da uygun bir modelleme olarak ortaya çıkmaktadır.

3 adet, bir fazlı transformatöre ilişkin sargıların bağlama grubunu oluşturmak üzere kendi aralarında bağlanması, her biri 5-uçlu eleman olarak modellenmiş bir fazlı transformatörlerinin, 5-uçlu eleman modellerinin kendi aralarında bağlama grubu gereği bağlanmasına karşı gelmektedir. Yıldız/üçgen bağlama grubu; yapılan bağlama Şekil 3.12 (a) ve (b) de sırasıyla bir fazlı transformatörlerin bağlanması ve 5-uçlu transformatör modellerinin bağlanması olarak verilmiştir.



a)



b)

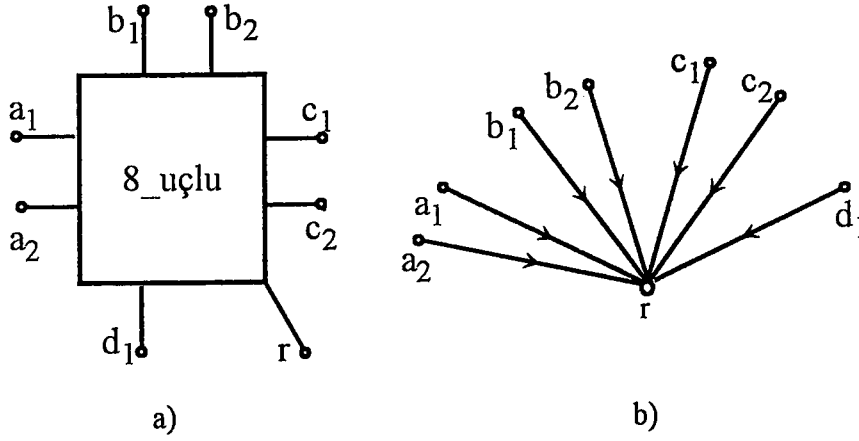
Şekil 3.12 a) Üç adet bir fazlı transformatörün kendi aralarında bağlanmasından elde edilen yıldız/üçgen bağlı transformatör,
b) Her biri 5-uçlu eleman olarak modellenen bir fazlı transformatörlerin oluşturduğu, üç fazlı 8-uçlu transformatör

Burada, bir fazlı transformatörlerin her anlamda bir birine eş oldukları ve kısa devre admitansının, sabit çevirme oranı için, pu olarak verildiği kabul edilmiştir. Sargıların üçgen bağlanması durumunda ortaya çıkan faz kayması ve genlik değişiminin modele dahil edilebilmesi için, birleştirme işleminden önce, faz kaydırma özelliği bir fazlı transformatörün uç-denklemlerine etki ettirilmektedir. Böyle bir fazlı transformatörün uç-denklemleri.

$$\begin{bmatrix} I^{a1} \\ I^{a2} \\ I^{n1} \\ I^{n2} \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} Y & -Y & -Y & Y \\ -Y & Y & Y & -Y \\ \beta_i & \beta_i \beta_v & \beta_i & \beta_i \beta_v \\ -Y & Y & Y & -Y \\ Y & -Y & -Y & Y \\ \beta_i & \beta_i \beta_v & \beta_i & \beta_i \beta_v \end{bmatrix}_h \begin{bmatrix} V^{a1} \\ V^{a2} \\ V^{n1} \\ V^{n2} \end{bmatrix}_h + \begin{bmatrix} -I_m \\ 0 \\ I_m \\ 0 \end{bmatrix}_h \quad (3.53)$$

biçiminde elde edilmektedir. Burada, β_i ve β_v sırasıyla yıldız/üçgen bağlama nedeniyle akım ve gerilimde ortaya çıkan genlik değişimi ve faz kaymasını temsil eden kompleks çevirme oranıdır.

Matematiksel modelleri bilinen tek fazlı transformatörlerin bağlama grubuna uygun olarak kendi aralarında bağlanmalarının sonucunda oluşan 8-uçlu ve uç-grafları Şekil 3.13 de verilmiştir.



Şekil 3.13 a) Yıldız/üçgen bağlı transformatörün 8-uçlu gösterimi,
b) Yıldız/üçgen bağlı transformatörün uç-grafları,

Dengesiz bir sistemde, bir fazlı transformatörler birbiriyle özdeş olsalar bile giriş gerilimlerinin farklı olduğu durumda mıknatıslanma akımının harmoniklerinde oluşacak farklılıklar göz önünde bulundurulmalıdır.

Şekil 3.13 (b) de verilen uç-grafa göre, Şekil 3.13 (a) da verilen çok-uçlunun uç-denklemleri, çok-uçluların paralel bağlanması yöntemi(Ek A) kullanılarak

$$\begin{bmatrix} \bar{I}^{a1} \\ \bar{I}^{a2} \\ \bar{I}^{b1} \\ \bar{I}^{b2} \\ \bar{I}^{c1} \\ \bar{I}^{c2} \\ \bar{I}^{d1} \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} Y & -Y & 0 & Y & 0 & 0 & -Y \\ -Y & 2Y & 0 & -Y & Y & -Y & 0 \\ \beta_i & \beta_i \cdot \beta_v & 0 & \beta_i \cdot \beta_v & \beta_i & \beta_i \cdot \beta_v & 0 \\ 0 & 0 & Y & -Y & 0 & Y & -Y \\ Y & -Y & -Y & 2Y & 0 & -Y & 0 \\ \beta_i & \beta_i \cdot \beta_v & \beta_i & \beta_i \cdot \beta_v & 0 & \beta_i \cdot \beta_v & 0 \\ 0 & Y & 0 & 0 & Y & -Y & -Y \\ 0 & \beta_v & Y & -Y & -Y & \beta_v & 0 \\ 0 & -Y & Y & -Y & -Y & 2Y & 0 \\ -Y & \beta_i \cdot \beta_v & \beta_i & \beta_i \cdot \beta_v & \beta_i & \beta_i \cdot \beta_v & 0 \\ -Y & 0 & -Y & 0 & -Y & 0 & 3Y \end{bmatrix}_h \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}^{a1} \\ \bar{V}^{a2} \\ \bar{V}^{b1} \\ \bar{V}^{b2} \\ \bar{V}^{c1} \\ \bar{V}^{c2} \\ \bar{V}^{d1} \end{bmatrix}_h + \begin{bmatrix} -\bar{I}_m^{a1} \\ 0 \\ -\bar{I}_m^{b1} \\ 0 \\ -\bar{I}_m^{c1} \\ 0 \\ \bar{I}_m^{a1} + \bar{I}_m^{b1} + \bar{I}_m^{c1} \end{bmatrix}_h$$

(3.54)

biçiminde elde edilmektedir. Bu model mıknatıslanma akımının sabit akım kaynağı olarak kabul edilmesi durumu için literatürde, J.Arrillaga tarafından verilen modelin aynısı elde edilmiştir [37]. Burada, transformatörün yıldız/üçgen bağlama grubundan dolayı oluşan gerilimin faz kayması ve genlik değişimini temsil eden kompleks dönüştürme oranı $\beta_v = \sqrt{3} \cdot e^{j30}$ ve akım dönüştürme oranının $\beta_i = \beta_v^*$ olması nedeniyle $Y_{kl} \neq Y_{lk}$ olmaktadır. Bu nedenle, uç-denklemlere ait eşdeğer devrelerin literatürde verildiği gibi çizimi mümkün değildir. Bu durum da çözüm ancak çok-uçlu eleman kavramı ve onun matematiksel modeli kullanılarak bulunabilmektedir. Bu çok-uçlu eleman kavramının bir avantajıdır.

Enerji sistemlerinde tüm ölçümlerin toprağa göre yapılmasının sonucu çok-uçlu modellerde toprağın referans alınması (yıldız uç-graf), yıldız noktası topraklı transformatörlerde, yıldız noktasının bilgileri, matematiksel modelde ifade edilememektedir. Yıldız noktası uç denklemlerinde bulunmadığı için, bu noktaya ilişkin bilgiler doğrudan hesaplanması yerine diğer fazlara ait bilgiler kullanılarak hesaplanabilmektedir.

Yıldız noktasının topraklı olmadığı hallerde, yıldız noktası bir uç olarak tutularak elde edilen çok-uçlu eleman modeli, uç-denklemlerinde yıldız noktasından toprağa akan akımın sıfır olması bilgisi kullanılarak bu noktanın gerilimi hesaplanabilmektedir. Genel durumu yansıtan bu modellerden, yıldız topraklı trafo modellerine, bu noktanın gerilimi sıfır alınarak geçilebilmekte ve yıldız noktasından toprağa akan akımlar hesaplanabilmektedir.

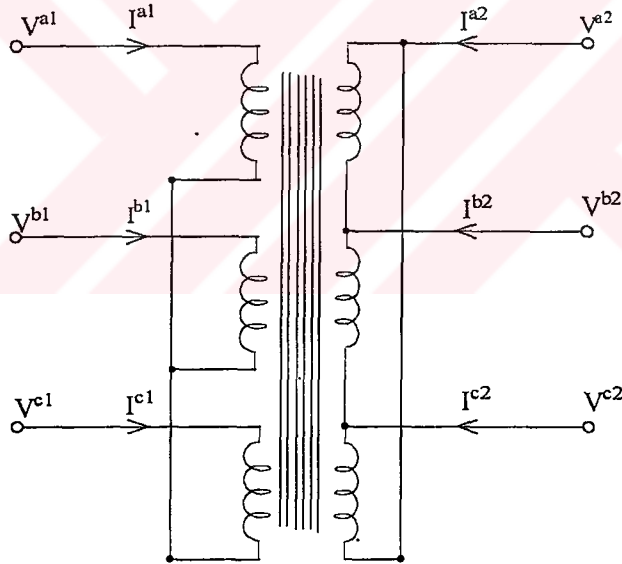
Sonuç olarak, üç fazlı transformatör modelleri aranırken başlangıçta yıldız noktası da bir uç olarak modele dahil edilip, daha sonra yıldız noktasının topraklı yada topraksız olması hallerini bu model vasıtası ile incelemek mümkün olmaktadır.

3.3.2.2. Üç-fazlı transformatörün harmonik bağımlı modeli

Üç fazlı transformatörler bağlama grupları, hem doyma nedeniyle mıknatıslanma akımında ki, hem de doğrusal olmayan elemanların ürettiği, harmonik akımların şebekeye akıtılmasına etki etmektedirler. Bu nedenle harmonik analizi çalışmalarında bu trafoların ayrıntılı modellerine kuvvetle ihtiyaç duyulmaktadır.

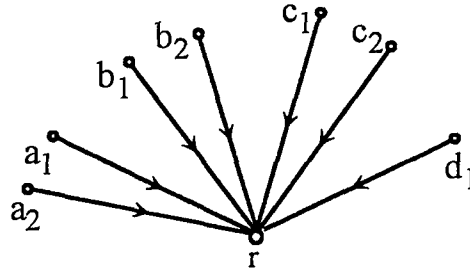
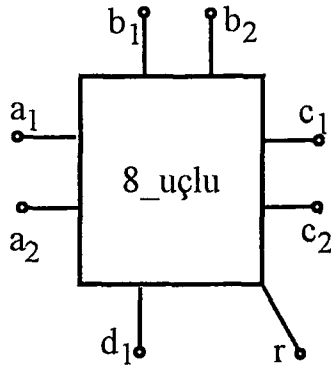
Harmonik analizleri açısından, yıldız noktası ve üçgen sargılarının önemi nedeniyle harmonik bağımlı transformatör modelleri, yıldız-üçgen bağlı üç fazlı transformatörler için verilmiştir.

Yıldız noktası yalıtılmış transformatörlerde, nötr noktası matematiksel modelde tutulmak istendiğinde, transformatörün çok-uçlu eleman gösteriminde uç sayısı bir artacak, bunun doğal bir sonucu olarak uç-graf ve uç-denklemlerinin boyutu büyüyecektir. Analiz açısından nötr noktasının matematiksel modelde tutulmasının gerekmediği hallerde ise bara indirgeme metodu ile yıldız noktasına ilişkin bu uç yok edilebilecektir. Burada, birincil ve ikincil sargılarının, farklı fazları arasındaki kuplajların da ihmal edilmediği durum için ortak manyetik devreli (tek çekirdekli) bir transformatörün harmonik bağımlı modeli, yeni yaklaşımla uygun olarak verilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca dengesiz beslenme durumunda fazlarda oluşacak harmonik akımlarının farklı olması durumu da bu çalışmaya dahil edilmiştir. Yıldız/üçgen bağlı, üç fazlı ortak çekirdekli transformatör Şekil 3.14 de verilmiştir.



Şekil 3.14 Ortak çekirdekli yıldız/üçgen bağlı 3 fazlı bir transformatör

Yıldız-üçgen bağlı ortak çekirdekli 3-fazlı bir transformatörün çok-uçlu eleman olarak gösterimi Şekil 3.15 (a) da verilmiştir.



a)

$$[I^{abcd}]_h = [Y^{abcd}]_h \cdot [V^{abcd}]_h + [J^{abcd}]_h \quad (3.55)$$

b)

Şekil 3.15 a) Yıldız-üçgen bağlı transformatör çok-uçlu gösterilimi,
b) Yıldız-üçgen bağlı transformatör matematiksel modeli

Bu yaklaşımda matematiksel modelin elde edilışinde çok-uçluyu oluşturan, 2-uçlu elemanların primitif bağıntılarının topluca ifade edildiğı tanım bağıntısı düzenlenirken, fazlara ait elemanlar, a, b ve c fazı sırasında önce a fazı, sonra b ve daha sonra c fazlı elemanları sıralanmakta olup, her harmonik derecesi için

$$\begin{bmatrix} I_p^{a1} \\ I_p^{a2} \\ I_p^{b1} \\ I_p^{b2} \\ I_p^{c1} \\ I_p^{c2} \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} Y^1 & -Y_m & Y'_m & Y''_m & Y'_m & Y''_m \\ -Y_m & Y^2 & Y''_m & Y'''_m & Y''_m & Y'''_m \\ Y'_m & Y''_m & Y^1 & -Y_m & Y'_m & Y''_m \\ Y''_m & Y'''_m & -Y_m & Y^2 & Y''_m & Y'''_m \\ Y'_m & Y''_m & Y'_m & Y''_m & Y^1 & -Y_m \\ Y''_m & Y'''_m & Y''_m & Y'''_m & -Y_m & Y^2 \end{bmatrix}_h \begin{bmatrix} V_p^{a1} \\ V_p^{a2} \\ V_p^{b1} \\ V_p^{b2} \\ V_p^{c1} \\ V_p^{c2} \end{bmatrix}_h + \begin{bmatrix} I_m^{a1} \\ I_m^{a2} \\ I_m^{b1} \\ I_m^{b2} \\ I_m^{c1} \\ I_m^{c2} \end{bmatrix}_h \quad (3.56)$$

biçiminde verilmektedir. Bu yaklaşımın bir sonucu olarak, primitif admitans matrisi,

$$[Y_p^f]_h = \begin{bmatrix} Y^1 & -Y_m \\ -Y_m & Y^2 \end{bmatrix}_h \quad (3.57)$$

$$[Y_p^M]_h = \begin{bmatrix} Y' & -Y'' \\ -Y'' & Y''' \end{bmatrix}_h \quad (3.58)$$

biçiminde tanımlanan fazların kendi admitans matrisi ve kuplaj admitans matrisi olmak üzere iki alt matris yapısının tekrarlanması ile kolayca elde edilmektedir.

Böylece literatürde modellenmesinde kargaşa yaşanan 3-fazlı harmonik model basit bir algoritma ile kolayca üretilebilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_p^{a1} \\ \mathbf{I}_p^{a2} \\ \mathbf{I}_p^{b1} \\ \mathbf{I}_p^{b2} \\ \mathbf{I}_p^{c1} \\ \mathbf{I}_p^{c2} \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_p^f & \mathbf{Y}_p^M & \mathbf{Y}_p^M \\ \mathbf{Y}_p^M & \mathbf{Y}_p^f & \mathbf{Y}_p^M \\ \mathbf{Y}_p^M & \mathbf{Y}_p^M & \mathbf{Y}_p^f \end{bmatrix}_h \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_p^{a1} \\ \mathbf{V}_p^{a2} \\ \mathbf{V}_p^{b1} \\ \mathbf{V}_p^{b2} \\ \mathbf{V}_p^{c1} \\ \mathbf{V}_p^{c2} \end{bmatrix}_h + \begin{bmatrix} \mathbf{I}_m^{a1} \\ \mathbf{I}_m^{a2} \\ \mathbf{I}_m^{b1} \\ \mathbf{I}_m^{b2} \\ \mathbf{I}_m^{c1} \\ \mathbf{I}_m^{c2} \end{bmatrix}_h \quad (3.59)$$

Bilindiği gibi bir sistemin özelliklerinin veya sistemde yapılan değişikliklerin matematiksel modele yansıtılması tanım bağıntılarında gerçekleştirilmekte ve matematiksel model modern devre teorisinden bilinen kuralları ile elde edilebilmektedir.

Faz kaydırıcı transformatörlerin birincil ve ikincil taraflarda, akım ve gerilimin hem genlik hem de faz açılarında farklılık yaratmaları nedeniyle, çevirme oranları kompleks olarak verilmektedir.

Ayrıca üç fazlı dağıtım sistemlerinde gerilim regülatörlerinin, her faz için farklı değere ayarlanabilmesi sonucu, gerilim regülatörlerinin sahip oldukları, farklı çevirme oranlarının elektrik şebekesine etkisinin, gerilim regülatörlerinin bu durumu yansıtacak biçimde modellenmesini gerekli kılmaktadır. Bu etkisi, pratikte transformatörlerin çevirme oranları içinde verilmesi yeterli görülmektedir. Burada, transformatör modellerinin en genel durumu göstermesi bakımından fazların farklı kompleks çevirme oranlarına sahip oldukları kabul edilmektedir.

Üç fazlı transformatörlerde faz kaydırılması nedeniyle ortaya çıkacak değişiklikleri tanım bağıntılarına yansıtmak amacıyla (faz kaydırma sonucu) oluşan değişiklikler primitif admitans matrisinde verilecektir.

Transformatör tanım bağıntılarının gerçek değerlerle verildiği durumda, birim değerlere geçmek için kullanılacak çevirme oranları, bağlama grubundan veya faz kaydırıcı transformatörden kaynaklanan genlik ve faz değişimleri, transformatörün tanım bağıntıların dahil edilmesi aşağıda verilmiştir.

Üç fazlı transformatör modelinin elde edilışinde de bir fazlı transformatör modelinin için Şekil 3.9 verilen devreden yararlanılarak üç fazlı transformatörün her fazı için gerilim çevirme oranları

$$[\delta_v^a] = \begin{bmatrix} 1/\alpha_v^a & 0 \\ 0 & 1/\beta_v^a \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

$$[\delta_v^b] = \begin{bmatrix} 1/\alpha_v^b & 0 \\ 0 & 1/\beta_v^b \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

$$[\delta_v^c] = \begin{bmatrix} 1/\alpha_v^c & 0 \\ 0 & 1/\beta_v^c \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

biçiminde, akım çevirme oranları da bu çevirme oranlarının kompleks eşleniği olarak,

$$[\delta_i^a] = [\delta_v^a]^* \quad (3.63)$$

$$[\delta_i^b] = [\delta_v^b]^* \quad (3.64)$$

$$[\delta_i^c] = [\delta_v^c]^* \quad (3.65)$$

biçiminde verilmektedir.

Bu kabullerle primitif admitans matrisini oluşturan alt matrisler genel halde,

$$[Y_p^{aa}]_h = [\delta_i^a] [Y^f]_h [\delta_v^a], \quad (3.66)$$

$$[Y_p^{bb}]_h = [\delta_i^b] [Y^f]_h [\delta_v^b], \quad (3.67)$$

$$[Y_p^{cc}]_h = [\delta_i^c] [Y^f]_h [\delta_v^c], \quad (3.68)$$

$$[Y_p^{ab}]_h = [\delta_i^a] [Y^M]_h [\delta_v^b], \quad (3.69)$$

$$[Y_p^{ac}]_h = [\delta_i^a] [Y^M]_h [\delta_v^c], \quad (3.70)$$

$$[Y_p^{ba}]_h = [\delta_i^b] [Y^M]_h [\delta_v^a], \quad (3.71)$$

$$[Y_p^{bc}]_h = [\delta_i^b] [Y^M]_h [\delta_v^c], \quad (3.72)$$

$$[Y_p^{ca}]_h = [\delta_i^c] [Y^M]_h [\delta_v^a], \quad (3.73)$$

$$[Y_p^{cb}]_h = [\delta_i^c] [Y^M]_h [\delta_v^b], \quad (3.74)$$

olarak verilebilmektedir. Burada elde edilen görsel ve işlemsel düzen sayesinde, bu denklemler kolayca organize edilebilmektedir. Çevirme oranlarının sabit olmadığı durumda, modellerin yenilenmesi çevirme oranların da yapılacak değişiklikler yardımı ile gerçekleştirilmektedir.

Fazlar için çevirme oranlarının

$$[\delta_v^a] = [\delta_v^b] = [\delta_v^c] = [\delta_v] \quad (3.75)$$

$$[\delta_i^a] = [\delta_i^b] = [\delta_i^c] = [\delta_v]^* \quad (3.76)$$

biçiminde eşit olduğu durum pratikte karşılaşılan (üç fazlı regülatör) en yaygın durumdur ve transformatör sargılarının üçgen bağlanmasından kaynaklanan genlik ve faz değişimleri de tüm fazlar için aynıdır. Bu durumda primitif admitans matrisleri

$$[Y_p^{aa}]_h = [Y_p^{bb}]_h = [Y_p^{cc}]_h = [\delta_v]^* [Y]_h [\delta_v] \quad (3.77)$$

$$[Y_p^{ab}]_h = [Y_p^{ac}]_h = [Y_p^{ba}]_h = [Y_p^{bc}]_h = [Y_p^{ca}]_h = [Y_p^{cb}]_h = [\delta_v]^* [Y^M]_h [\delta_v] \quad (3.78)$$

gibi basit bir yapısal özellik kazanmaktadır. Denk.3.59 un sağ tarafında toplam olarak gelen harmonik akımlara da faz kaydırma işlemi uygulanmalıdır. Ancak, Şekil 3.8 de verilen farklı modeller için bu işlem değişik sonuçlar verecektir. Bu nedenle, burada anlatım kolaylığı sağlamak üzere, denk.3.79 sağ tarafında verilen akımlar faz kaydırma işlemi sonucu elde edilmiş harmonik akımları olarak kabul edilmiştir.

Üç fazlı transformatörün, çeşitli nedenlerle ortaya çıkan kompleks çevirme oranlarını kapsayan tanım bağıntıları

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_p^a \\ \mathbf{I}_p^b \\ \mathbf{I}_p^c \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_p^{aa} & \mathbf{Y}_p^{ab} & \mathbf{Y}_p^{ac} \\ \mathbf{Y}_p^{ba} & \mathbf{Y}_p^{bb} & \mathbf{Y}_p^{bc} \\ \mathbf{Y}_p^{ca} & \mathbf{Y}_p^{cb} & \mathbf{Y}_p^{cc} \end{bmatrix}_h \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_p^a \\ \mathbf{V}_p^b \\ \mathbf{V}_p^c \end{bmatrix}_h + \begin{bmatrix} \mathbf{J}_p^a \\ \mathbf{J}_p^b \\ \mathbf{J}_p^c \end{bmatrix}_h \quad (3.79)$$

biçiminde ifade edilmektedir.

Üç fazlı transformatörün denk.3.55 verilen uç-denklemlerini elde etmek üzere, enerji sistemlerinde en çok kullanılan, altı bağlama grubu için yapılacak olan temel çevre denklemleri genel yapı olarak,

$$[\mathbf{B}^{abcd} \mid \mathbf{U}] \begin{bmatrix} \mathbf{V}^* \\ \mathbf{V}_k \end{bmatrix}_h = 0 \quad (3.80)$$

biçiminde kabul edilmektedir. Burada, fazlara ait temel çevre alt matrisi $[\mathbf{B}^{abc}]$ ve yıldız noktalarına ait temel çevre matrisi de $[\mathbf{B}^d]$ olarak gösterilir ise, Denk. 3.80 ifadesi

$$[\mathbf{B}^{abcd}] = [\mathbf{B}^{abc} \mid \mathbf{B}^d] \quad (3.81)$$

biçimine dönüşür. Burada, yıldız noktasının topraklanmış olması durumunda, bu $[\mathbf{B}^d]$ matris ortaya çıkmamakta ve (3.81) ifadesi

$$[\mathbf{B}^{abcd}] = [\mathbf{B}^{abc}] \quad (3.82)$$

biçiminde sadece fazlarla ilgili olarak verilebilmektedir. Bu temel çevre matrisi ise

$$[\mathbf{B}^{abc}] = \begin{bmatrix} \mathbf{U} & \mathbf{B}_a & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{U} & \mathbf{B}_b \\ \mathbf{B}_a & \mathbf{O} & \mathbf{U} \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

biçiminde verilebilmekte olup, burada görülen $[\mathbf{B}_a]$ alt matrisi transformatörün üçgen bağlantıları ile ilgili bir matristir ve tüm bağlama gruplarını yansıtacak biçimde genel ifade olarak,

$$[\mathbf{B}_a] = \begin{bmatrix} -(aa+1) & 0 \\ 0 & -(bb+1) \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

biçiminde verilebilmektedir. Burada, aa ve bb katsayıları bağlanma biçimine bağlı olarak -1 veya 0 değerlerini almaktadır. Eğer, transformatörün birincil sargıları yıldız bağlı ise a = -1, üçgen bağlı ise aa = 0 ve ikincil sargıları yıldız bağlı ise bb = -1, üçgen bağlı ise bb=0 değerini almaktadır.

[U] ve [O] alt matrisleri sırasıyla

$$[U] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.85)$$

ve

$$[O] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.86)$$

birim ve sıfır matristir. Transformatörün bağlama grubunda topraksız yıldız noktası olması durumunda, Denk. 3.81 de görülen temel çevre alt matrisi $[B^d]$,

$$[B^d]^T = [b_y \mid b_y \mid b_y] \quad (3.87)$$

biçiminde verilebilen bir alt matris olarak ortaya çıkmaktadır. Transformatörün birincil ve ikincil sargılarından herhangi birinin yıldız noktasının topraksız olması halinde, 3.87 de görülen $[b_y]$ matrisi

$$[b_y] = [aa \quad bb] \quad (3.88)$$

biçimindedir. Birincil ve ikincil sargılarının her ikisinin de topraksız yıldız bağlama grubundan olması durumunda, ise $[b_y]$ matrisi,

$$b_y = \begin{bmatrix} aa & 0 \\ 0 & bb \end{bmatrix} \quad (3.89)$$

olarak verilebilmektedir. Denk. 3.84 için aa ve bb verilen açıklamalar Denk.3.89'da da geçerlidir.

Enerji sistemlerinde, harmonik primitif admitans matrisi ve temel çevre denklemleri bilinen bir transformatörün bara admitans matrisi

$$[Y^{abcd}]_h = [B^{abcd}]^T \cdot [Y_p^{abc}]_h \cdot [B^{abcd}] \quad (3.90)$$

biçiminde basitçe elde edilmektedir. Daha açık olarak bu bara admitans matrisi

$$[Y^{abcd}] = \begin{bmatrix} [B^{abc}]^T \cdot [Y_p^{abc}]_h \cdot [B^{abc}] & [B^{abc}]^T \cdot [Y_p^{abc}]_h \cdot [B^d] \\ [B^d]^T \cdot [Y_p^{abc}]_h \cdot [B^{abc}] & [B^d]^T \cdot [Y_p^{abc}]_h \cdot [B^d] \end{bmatrix}_h \quad (3.91)$$

biçiminde verilebilmekte olup, benzer yapıdaki dört adet alt-matris çarpımı ile hesaplanmaktadır.

Çok-uçlunun doğrusal olmayan davranışı nedeniyle uçlarında ortaya çıkan harmonik akımları,

$$[J_p^{abc}]_h = [J_p^a \mid J_p^b \mid J_p^c]^T \quad (3.92)$$

biçiminde verilmekte olup, buradan transformatör uçlarına indirgenmiş olan harmonik akımları

$$[J^{abcd}]_h = -[B^{abcd}]^T \cdot [J_p^{abc}]_h \quad (3.93)$$

biçiminde hesaplanmaktadır.

Transformatörün topraksız yıldız noktasının analiz açısından önemsiz olduğu durumlarda, yıldız noktasının (nötr) akımının sıfır olması nedeniyle transformatörün yıldız noktasının uç-denklemlerinden yok edilmesi gerektiğinde bara admitans matrisi fazlar ve nötr olmak üzere

$$[Y^{abcd}]_h = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 \\ Y_3 & Y_4 \end{bmatrix}_h \quad (3.94)$$

biçiminde alt matrislere ayrılmaktadır. Bu alt matrisler burada kullanılan yaklaşımın bir getirisi olarak

$$[Y_1]_h = [B^{abc}]^T \cdot [Y_p^{abc}]_h \cdot [B^{abc}] \quad (3.96)$$

$$[Y_2]_h = [B^{abc}]^T \cdot [Y_p^{abc}]_h \cdot [B_d] \quad (3.97)$$

$$[Y_3]_h = [B^d]^T \cdot [Y_p^{abc}]_h \cdot [B^{abc}] \quad (3.98)$$

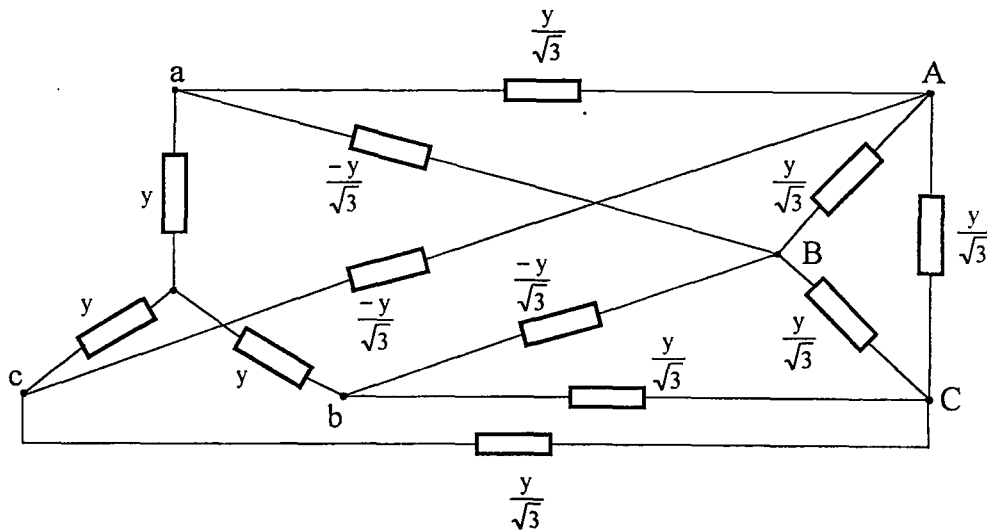
$$[Y_4]_h = [B^d]^T \cdot [Y_p^{abc}]_h \cdot [B^d] \quad (3.99)$$

biçiminde kolayca ayrı ayrı elde edilebilmektedir. Nötr noktası ile ilgilenilmiyorsa, bu duruma ilişkin bara admitans matrisi

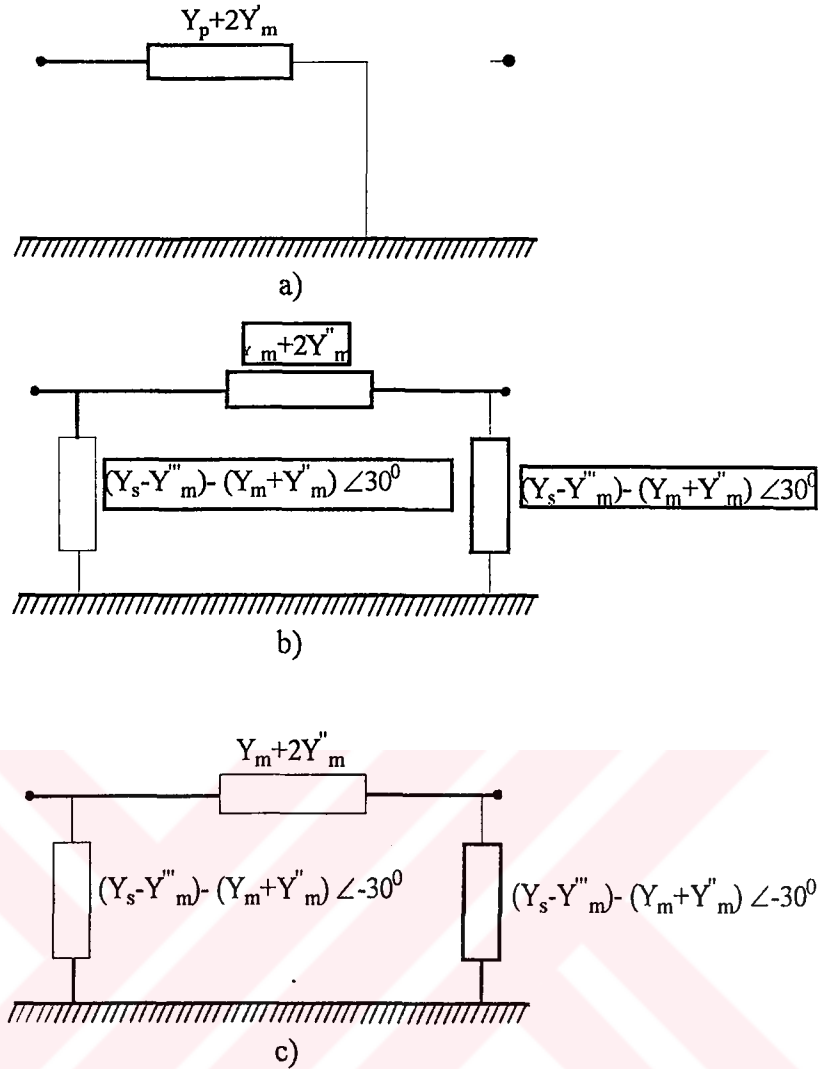
$$[Y^{abc}]_h = [Y_1]_h - [Y_2]_h \cdot [Y_4]_h^{-1} \cdot [Y_3]_h \quad (3.100)$$

biçiminde hesaplanabilmektedir.

Elektrik enerji sistemlerinin modellenmesinde oluşturan transformatör, hat, vb elemanların bilinen bazı eşdeğer devreleri yaygın olarak kullanılmaktadır [51,52,]. Elektrik enerji sistemlerinin simetrik bileşenler yöntemi ile modellerinin elde edilmesinde, transformatörlerin sıfır bileşen eşdeğer devrelerinin her bağlama grubu için farklı olması, önemli bir sıkıntı oluşturmaktadır. Bu transformatörlerin faz bileşen eşdeğer devreleri ise daha da karmaşık bir yapıdadır. Hatlar için de transformatörlerin faz bileşenleri eşdeğerlerine benzer eşdeğerler verilmektedir. Yıldız(topraklı)/üçgen bağlı 3 fazlı bir transformatörün yaygın olarak kullanılan, simetrik bileşenler eşdeğer devresi Şekil 3.17 ve faz bileşenleri eşdeğer devresi ise Şekil 3.16 de verilmiştir [52]. Transformatörlerin faz kaydırma özelliğinin olması durumunda bu eşdeğerlerin verilmesi her zamanda mümkün olmamaktadır.



Şekil 3.16 Yıldız(topraklı)/üçgen bağlı 3 fazlı transformatörün faz bileşenleri eşdeğer devresi.



Şekil 3.17 Üç Fazlı, Yıldız(topraklı)/Üçgen bağlı, transformatörün simetrik bileşen eşdeğer devreleri
a) Sıfır bileşen eşdeğer devresi
b) Doğru bileşen eşdeğer devresi
c) Negatif bileşen eşdeğer devresi

Elektrik enerji sistemlerinin faz bileşenleri ile bir fazlı, 3 fazlı ve simetrik bileşen yöntemi ile modellerinin elde edilmesi için çok-uçlu olarak ele alınan elemanların harmonik bağımlı matematiksel modelleri sözü edilen eşdeğer devrelerin verilmesine gerek kalmadan verilebilmiştir. Böylece, üç fazlı transformatörlerin bağlama grubundan kaynaklanan faz kaymasının ihmal edilmediği durumunda eşdeğer devrelerinin verilmesinde yaşanan sıkıntı çok-uçlu eleman ve matematiksel model yaklaşımı kullanılarak aşılmıştır.

3.3.3 Senkron generatörün harmonik bağımlı modeli

Senkron generatör stator sargıları simetrik üç fazlı gerilim üretecek şekilde tasarlandığı için, generatörün dengeli veya dengesiz yüklenmesinden bağımsız olarak, generatör iç gerilimleri daima dengelidir. Generatör yükü dengeli ise generatör uç gerilimleri dengeli, yük dengesiz ise generatör uç gerilimleri de dengesizdir [53].

Senkron generatörlerde, gerilim regülatörü senkron generatörün uç gerilimleri için önceden tanımlanmış bir fonksiyona uygun olarak generatör ikaz gerilimini kontrol etmekte ve her türlü yüklenme durumu için generatörün fazlardan biri (a fazı) referans alınarak uç gerilimleri sabit tutulmaktadır.

Senkron generatörün dengesiz yüklendiği durumda, dengeli gerilim üretmelerine rağmen uçlarında dengesiz gerilimler oluşmasının yanında harmonik akımlarda üretmektedir [12]. Eğer senkron generatör sargıları üçgen bağlı ise, bu sargılardan üçün katı harmonikler sirkülasyon akımı olarak geçerek sargılarda büyük kayıplara neden olmaktadır. Bu nedenle sargılarının harmonikler açısından yıldız bağlı olması tercih edilmektedir [12]. Generatörün sebep olduğu üçün katı harmonik akımlar, senkron generatöre blok bağlı transformatörde üçgen bağlantı kullanmak suretiyle şebekeye akıtılmasına engel olunabilmektedir. Genellikle, senkron generatörün harmonik gerilimleri üretmediği kabul edilmektedir.

Senkron generatörün doğrusal olmayan davranışı, manyetik ve elektriksel parçalarına ilişkin denklemler kullanılarak ortaya çıkacak harmonik akımlarının hesabı bu çalışmanın kapsamı dışında olup literatürde, çok-fazlı analizlerde kullanılmak üzere dengesiz yüklenme ve/veya doğrusal olmayan davranış modellerine ilişkin ayrıntılı çalışmalar mevcuttur [46, 76].

Temel bileşen ve harmonik bağımlı devrenin matematiksel modelinin elde edilebilmesi için ihtiyaç duyulan faz bileşenleri primitif admitans matrisi simetrik bileşen değerlerinden ters dönüşümle elde edilmekte olup generatörün simetrik bileşen empedans matrisi

$$[Z^{012}] = \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z^2 \end{bmatrix} \quad (3.101)$$

biçimindedir. Generatörün temel bileşen direnç ve endüktanlarının, harmonik bileşen direnç ve endüktansına eşit olduğu kabulüyle, generatörün harmonik empedans matrisi

$$[Z^{012}]_h = \text{Re}\{[Z^{012}]\} + j.h.\text{Im}\{[Z^{012}]\} \quad (3.102)$$

$$[Z^{abc}]_h = [T_s][Z^{012}]_h.[T_s]^{-1} \quad (3.103)$$

biçiminde elde edilebilmektedir. Bilindiği gibi, burada, $a = e^{-j2\pi/3}$ olmak üzere dönüşüm matrisi,

$$[T_s] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (3.104)$$

olarak tanımlanmaktadır. Senkron generatörün faz bileşenleri ile verilen harmonik empedans matrisi, simetrik bileşen matris yapısından farklı olarak

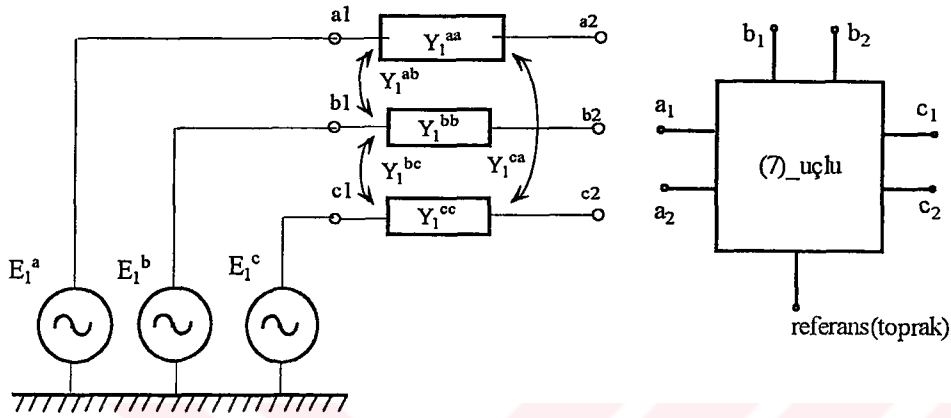
$$[Z^{abc}]_h = \begin{bmatrix} Z^{aa} & Z^{ab} & Z^{ac} \\ Z^{ba} & Z^{bb} & Z^{bc} \\ Z^{ca} & Z^{cb} & Z^{cc} \end{bmatrix}_h \quad (3.105)$$

biçiminde dolu bir matris olup, faz bileşenleri harmonik admitans matrisi, empedans matrisinin tersinden

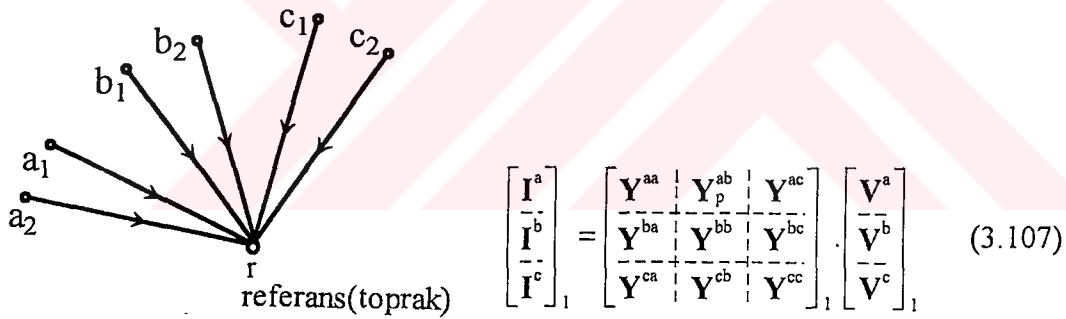
$$[Y^{abc}]_h = [Z^{abc}]_h^{-1} = \begin{bmatrix} Y^{aa} & Y^{ab} & Y^{ac} \\ Y^{ba} & Y^{bb} & Y^{bc} \\ Y^{ca} & Y^{cb} & Y^{cc} \end{bmatrix}_h \quad (3.106)$$

biçiminde elde edilmektedir.

Senkron generatörün iç uçlarında (a1, b1, c1) verdiği güçler bilinmekte olup, iç uç gerilimleri dış uç (a2, b2, c2) gerilimleri sabit kalacak şekilde yüklenme koşullarına göre, değişmektedir. Generatörün bu davranışı dengesiz yük akışında generatörler için yazılacak denklemlerle verilmektedir [53]. Şekil 3.18 da senkron generatörün eşdeğer devresi ve çok-uçlu gösterimi verilmiştir.

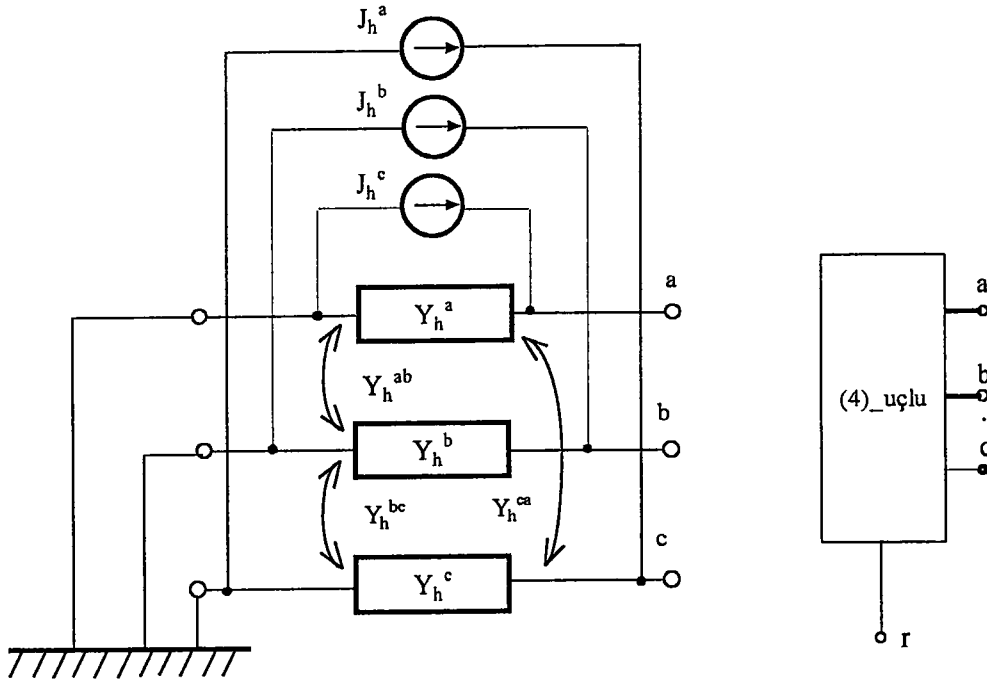


Şekil 3.18 Senkron generatörün temel bileşen eşdeğeri ve çok-uçlu gösterimi



Şekil 3.19 Senkron generatörün temel bileşen matematiksel modeli

Dengesiz harmonik analizi için h. harmonik eşdeğeri ve çok-uçlu gösterimi Şekil 3.20 de verilen senkron generatörün, bölüm 3.3 de verilen yaklaşımın uygulanması ile Şekil 3.21 de verilen uç-graf ve uç-denklemden oluşan matematiksel model elde edilmektedir. Senkron generatörün h. harmonik matematiksel modeli admitans parametreleriyle benzer biçimde, aşağıda elde edilmiştir. Senkron generatörün oluşturacağı harmonik akımların hesabı bu çalışmanın kapsamı dışındadır.



Şekil 3.20 Senkron generatörün h. harmonik eşdeğeri ve çok-uçlu gösterimi

$$\begin{bmatrix} I^a \\ I^b \\ I^c \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} Y^{aa} & Y^{ab} & Y^{ac} \\ Y^{ba} & Y^{bb} & Y^{bc} \\ Y^{ca} & Y^{cb} & Y^{cc} \end{bmatrix}_h \begin{bmatrix} V^a \\ V^b \\ V^c \end{bmatrix}_h + \begin{bmatrix} J^a \\ J^b \\ J^c \end{bmatrix}_h \quad (3.108)$$

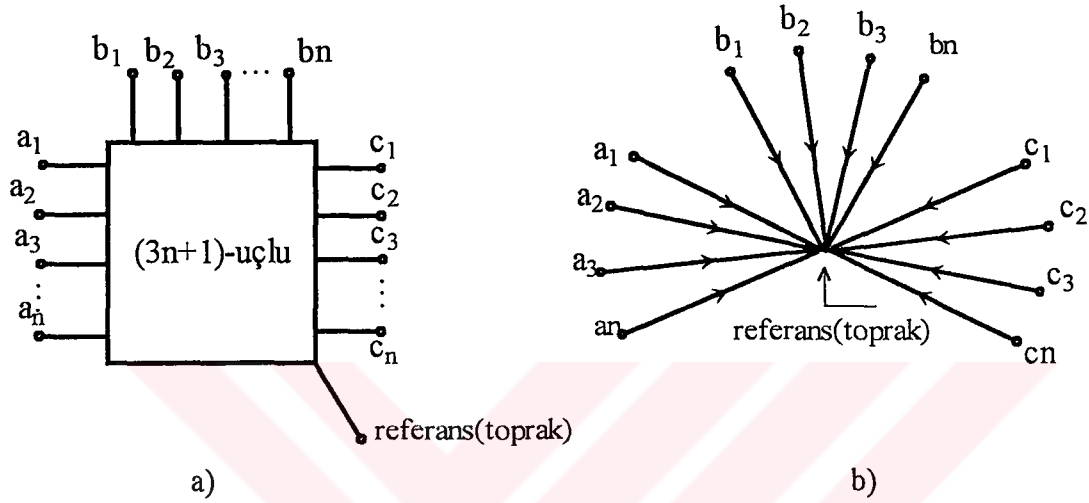
Şekil 3.21 Senkron generatörün, h. harmonik matematiksel modeli

3.3.4 Diğer elemanların modelleri

Seri ve paralel elemanlar, elektrik enerji sistemlerine çeşitli amaçlar için bağlanan endüktans ve kapasitelerden oluşmaktadır. Elektrik enerji sistemlerinde filtreler, harmoniklerin azaltılması amacıyla direnç, endüktans ve kapasitenin aralarında uygun biçimde bağlanmasında oluşmaktadır. Filtre devrelerinde, bağlantı biçimleri harmonik frekansına bağlı olarak değişen direnç, endüktans ve kapasiteler arasında kuplaj olmadığı ve değerlerinin frekansla değişmediği kabul edilebilmektedir. Endüktans ve kapasite reaktansları frekansla değişecektir. Bu elemanların matematiksel modelleri Bölüm 3.3 de verilen yaklaşımla kolayca elde edilebilecektir.

3.3.5 Elektrik şebekesinin harmonik bağımlı modeli

Transformatörler, hatlar, generatörler ve diğer elemanlardan oluşan üç fazlı elektrik enerji sistemi, daha önce matematiksel modelleri verilen çok-uçluların kendi aralarında bağlanmasından oluşmaktadır. Elektrik enerji sisteminin, çok-uçlu elemanlarının kendi aralarında bağlanması sonucunda elde edilmiş olduğu gerçeği ile, öncelikle eleman modelleri elde edilmiştir.



$$\begin{bmatrix} I_p^a \\ I_p^b \\ I_p^c \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} Y_p^{aa} & Y_p^{ab} & Y_p^{ac} \\ Y_p^{ba} & Y_p^{bb} & Y_p^{bc} \\ Y_p^{ca} & Y_p^{cb} & Y_p^{cc} \end{bmatrix}_h \cdot \begin{bmatrix} V_p^a \\ V_p^b \\ V_p^c \end{bmatrix}_h + \begin{bmatrix} J_p^a \\ J_p^b \\ J_p^c \end{bmatrix}_h \quad (3.109)$$

Şekil 3.22 a) Üç fazlı elektrik şebekesinin çok-uçlu gösterimi
b) Üç fazlı elektrik şebekesinin matematiksel modeli

Burada, enerji sisteminin çok-uçlu gösterimi ve matematiksel modeli, anlatım kolaylığı açısından, 3 fazlı şebeke için verilmiştir. Şebekeyi (sistemi) oluşturan tüm eleman yada alt sistemlerin çok-uçlu olarak modellenmesinden sonra, enerji sisteminin kendisini oluşturan bu çok-uçluların biçiminde bir araya getirilmeleri (bağlanmaları) biçiminde ortaya çıkan şebekenin matematiksel modeli için, devre teorisi kuralları uygulanarak şebekenin elde edilen model aşağıda açıklanmıştır.

Şebekeyi oluşturan ve matematiksel modelleri genel anlamda Denk. 110 da verilen uç-denklemleri biçiminde olan, çok-uçlu elemanların oluşturduğu sistem primitif admitans matrisi Denk. 111 de verilmiştir.

$$[I^{abc}]_h^k = [Y^{abc}]_h^k \cdot [V^{abc}]_h^k + [J^{abc}]_h^k \quad k=1..n \quad (3.110)$$

$$[Y_p^{abc}]_h = \begin{bmatrix} [Y^{aa}]^1 & [Y^{ab}]^1 & [Y^{ac}]^1 \\ [Y^{aa}]^2 & [Y^{ab}]^2 & [Y^{ac}]^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ [Y^{aa}]^n & [Y^{ab}]^n & [Y^{ac}]^n \\ [Y^{ba}]^1 & [Y^{bb}]^1 & [Y^{bc}]^1 \\ [Y^{ba}]^2 & [Y^{bb}]^2 & [Y^{bc}]^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ [Y^{ba}]^n & [Y^{bb}]^n & [Y^{bc}]^n \\ [Y^{ca}]^1 & [Y^{cb}]^1 & [Y^{cc}]^1 \\ [Y^{ca}]^2 & [Y^{cb}]^2 & [Y^{cc}]^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ [Y^{ca}]^n & [Y^{cb}]^n & [Y^{cc}]^n \end{bmatrix}_h \quad (3.111)$$

Denk.111 de düzenleme yapılarak

$$\begin{bmatrix} I_p^a \\ I_p^b \\ I_p^c \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} Y_p^{aa} & Y_p^{ab} & Y_p^{ac} \\ Y_p^{ba} & Y_p^{bb} & Y_p^{bc} \\ Y_p^{ca} & Y_p^{cb} & Y_p^{cc} \end{bmatrix}_h \cdot \begin{bmatrix} V_p^a \\ V_p^b \\ V_p^c \end{bmatrix}_h + \begin{bmatrix} J_p^a \\ J_p^b \\ J_p^c \end{bmatrix}_h \quad (3.112)$$

biçiminde ifade edilebilir.

Yeni yaklaşıma göre elde edilen primitif admitans matrisi göz önünde bulundurularak aynı faza ait baralar bir arada olacak biçimde Şekil 22 (b) de verilen uç-grafa göre temel çevre denklemleri

$$\begin{bmatrix} B^a & 0 & 0 & U & 0 & 0 \\ 0 & B^b & 0 & 0 & U & 0 \\ 0 & 0 & B^c & 0 & 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (V^a)^* \\ (V^b)^* \\ (V^c)^* \\ V^a \\ V^b \\ V^c \end{bmatrix} = 0 \quad (3.113)$$

elde edilmiştir.

Çok-uçluların kendi aralarında birleştirilmesinden meydana gelen sistemin kendisinde bir çok uçlu olup, çok-uçluların matematiksel modelini elde edilişi için verilen algoritma sistem çok-uçlusu için de geçerlidir. Sistemin primitif admitans matrisi ve

temel çevre matrisi Bölüm 3.3.1 de hatlar için verilen matrislere benzer olup Denk.112 ve Denk. 113 kullanılarak admitans matrisi alt-matrisleri

$$[Y^{aa}]_h = [B^a]^T \cdot [Y_p^{aa}]_h \cdot [B^a] \quad (3.114)$$

$$[Y^{ab}]_h = [B^a]^T \cdot [Y_p^{ab}]_h \cdot [B^b] \quad (3.115)$$

$$[Y^{ac}]_h = [B^a]^T \cdot [Y_p^{ac}]_h \cdot [B^c] \quad (3.116)$$

$$[Y^{ba}]_h = [B^b]^T \cdot [Y_p^{ba}]_h \cdot [B^a] \quad (3.117)$$

$$[Y^{bb}]_h = [B^b]^T \cdot [Y_p^{bb}]_h \cdot [B^b] \quad (3.118)$$

$$[Y^{bc}]_h = [B^b]^T \cdot [Y_p^{bc}]_h \cdot [B^c] \quad (3.119)$$

$$[Y^{ca}]_h = [B^c]^T \cdot [Y_p^{ca}]_h \cdot [B^a] \quad (3.120)$$

$$[Y^{cb}]_h = [B^c]^T \cdot [Y_p^{cb}]_h \cdot [B^b] \quad (3.121)$$

$$[Y^{cc}]_h = [B^c]^T \cdot [Y_p^{cc}]_h \cdot [B^c] \quad (3.122)$$

biçiminde hesaplanmaktadır.

Çok-uçlu sistemi oluşturan elemanlar olan çok-uçluların Denk.110 bağıntı ile verilen matematiksel modelleri yardımı ile sistem için tanım bağıntıları oluşturmak üzere akım kaynakları,

$$[J_p^{abc}]_h = \begin{bmatrix} [J^{aa}]^1 & [J^{aa}]^2 & \dots & [J^{aa}]^n & [J^{bb}]^1 & [J^{bb}]^2 & \dots & [J^{bb}]^n & [J^{cc}]^1 & [J^{cc}]^2 & \dots & [J^{cc}]^n \end{bmatrix}_h^T \quad (3.123)$$

olarak bir araya getirilmekte ve bu akımlar

$$[J_p^{abc}]_h = [J_p^{aa} \mid J_p^{bb} \mid J_p^{cc}]_h^T \quad (3.124)$$

biçiminde verilmektedir. Elektrik enerji sisteminin uç-denklemlerinde ortaya çıkacak akım kaynakları ise

$$[J^a]_h = -[B^a]^T [J_p^{aa}]_h \quad (3.125)$$

$$[J^b]_h = -[B^{bb}]^T [J_p^{bb}]_h \quad (3.126)$$

$$[J^c]_h = -[B^c]^T [J_p^{cc}]_h \quad (3.127)$$

biçiminde elde edilmektedir. Admitans ve akım kaynakları alt matrislerinin elde edilişi ile Denk.109 da verilen uç denklemleri elde edilmiştir.

Burada 3 fazlı sistemin matematiksel modeli için verilen yaklaşım çok fazlı sistemler için benzer biçimde genişletilebilmektedir. Çok-uçlu eleman kavramı kullanılarak, üç-fazlı sistemlerin, boyutları 3 faz boyutunda olan, bir fazlı şebeke gibi modellenmesi mümkün olmuştur.

4. DAĞITIM ŞEBEKELERİN ÇOK-FAZLI HARMONİK ANALİZİ

4.1 Giriş

Elektrik enerji sistemleri, yapılacak modelleme ve simülasyon çalışmaları bakımından üretim, iletim ve dağıtım olarak sınıflandırılmaktadır [81].

“Dağıtım şebekesi, nominal gerilim seviyesi 34.5kV ve altında olan, dallı, halka veya gözlü yapıda ve dağıtım transformatörlerini doğrudan besleyen şebekelerdir” [81]. Elektrik dağıtım sistemleri de, 1kV-34.5kV gerilim aralığı birincil, 1kV'un altı ise ikincil dağıtım sistemleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [81]. Çoğu dağıtım sistemleri halka şebeke olarak tesis edilmekte ancak işletilmesi açık halka (dallı) olarak yapılmaktadır [55].

Elektrik dağıtım şebekelerinde, sayıları her geçen gün artan, doğrusal olmayan bir ve üç fazlı yüklerin etkilerinin doğru olarak belirlenebilmesi, uygun eleman modelleri ve uygun harmonik analiz yöntemi seçilmesine bağlıdır. Bu ise analiz edilecek sistemin yeterince tanınmasıyla mümkündür.

Bu bölümde, elektrik dağıtım sistemlerinde harmonik analiz, dağıtım sistemleri ve yüklerin modellenmesi, çok fazlı temel yük akışı ve elektrik dağıtım sistemlerinin çok-fazlı harmonik analizine uygulanması ele alınmıştır.

4.2 Dağıtım Şebekelerinin Harmonik Analizi

Elektrik dağıtım sistemlerinde, bir, iki, üç fazlı, 3 faz-4 iletkenli sistemlerin birden fazlası, bir arada, bulunabilmektedir. Ayrıca, kompanzasyon amaçlı üç fazlı ve tek fazlı, çok sayıda kompanzasyon kapasiteleri bulunmakta ve bu kapasiteler zamanla devreye girip çıkmaktadır. Dağıtım sistemleri sahip oldukları asimetrik yapılarının yanında, doğrusal ve doğrusal olmayan, bir fazlı ve üç fazlı dengesiz yükler nedeniyle dengesiz yüklenmektedir [11, 12, 152, 153]. Elektrik dağıtım sistemlerinin modellenmesinde, 1-fazlı ve 3-fazlı dengesiz doğrusal yüklerin

harmonikler bakımından, uç-denklemlerinin elde edilişinde frekansa bağımlı admitans veya empedans olarak temsil edilmeleri ve uzun hatlarda yapılan çaprazlamanın, harmonik frekanslarda simetriyi bozucu etkisi nedeniyle, simetrik yapıdaki dağıtım şebekeleri harmonikler bakımından simetrik olmayan yapıya gelmektedir [98].

Dağıtım şebekeleri, simetrik yapıda, dengeli yüklü, sıfır bileşen harmoniklerinin olmadığı ve sistemde sadece bir harmonik kaynağı bulunduğu kabulleri ile bir fazlı harmonik analizi yapılmaktadır [96]. Ancak, pratikte, elektrik dağıtım şebekeleri asimetrik yapılarının yanında, birden fazla harmonik kaynağı barındırması ve harmonik akımlarının dengesizliği nedeniyle, tek fazlı olarak yapılacak analizler, yanıltıcı sonuçlar verecektir. Elektrik dağıtım sistemlerinde harmonik analizde, her fazda harmoniklerin yayılımının değerlendirilmesi ve bazı durumlarda, nötr ya da toprak iletkenlerindeki harmonik akımlarının da hesaplanması gerekmektedir [12].

Birden fazla harmonik kaynağının bulunduğu dağıtım sistemlerinde, transformatörlerin üçgen bağlı sargıları nedeniyle oluşan faz kayması, harmonik akımlarının ortak bağlantı noktalarında toplanması bakımından önemlidir [11]. Ayrıca, transformatörün üçgen bağlı sargılarında, 3'ün katı harmonikler dengeli ise bu harmoniklerin tamamı, dengesiz ise; dengesizlik şartlarına bağlı olarak bir kısmının dolaşım akımı olarak akması nedeniyle dağıtım sistemlerinde, transformatörler ayrı bir önem kazanmaktadır.

Dağıtım şebekelerinde harmonik kaynaklarının bir kısmının akım kaynağı olarak modellenmesi, yeterince doğru bir yöntem olmaması nedeniyle bazı hallerde bu kaynaklar gerilim kaynağı olarak modellenmektedir [19]. Ayrıca, dağıtım sistemini besleyen iletim sistemi gerilim dalga biçimi doğrusal olmayan yükler nedeniyle bozulmaktadır. Bu nedenle dağıtım sistemlerinin harmonik analizinde harmonik gerilim ve akım kaynaklarının her ikisinin de bulunması, modelleme ve simülasyon çalışmalarında dikkate alınmaktadır [154]. Doğrusal olmayan yüklerin, dağıtım şebekelerinin sinüs biçimli gerilim ve akımlarında bozulmalara neden olmalarının dışında, şebekenin rezonans karakteristiklerini de etkilemeleri nedeniyle, dağıtım sistemlerinde yapılan harmonik çalışmalarında doğru sonuçlar elde edilmesi, yüklerin doğru modellenmesini gerektirmektedir [11-13].

Elektrik dağıtım sistemlerinde harmonik analizleri için verilecek bir algoritmanın sahip olması gereken özellikler aşağıda özet olarak verilmiştir.

1- Modelleme ve analiz için gerekli olan veriler kolayca elde edilebilir ve pratik çalışma durumlarını yansıtır olmalıdır.

2- İşlem sayısı ve bellek gereksinimi bakımından büyük boyutlu şebekeler için uygun olmalıdır.

3- Dallı ve/veya halka dağıtım şebekeleri için uygun olmalıdır.

4- Faz bileşenleri ile modellemenin, dengesiz ve simetrisiz dağıtım sistemleri için kaçınılmaz olması nedeniyle, faz bileşenleri ile modellemeye uygun olmalıdır.

5- Dağıtım sistemi ilgilenilen frekansa bağlı olarak modellenmelidir. Çoğu dağıtım hatları için düşük frekanslarda modelleme yeterlidir.

6- Dağıtım sistemini oluşturan elemanların fiziksel davranışlarını yansıtan matematiksel modeller geliştirilmelidir.

7- Yayılı yükler de modellenmelidir

8- Doğrusal ve doğrusal olmayan, bir ve üç fazlı yükler, yeterli doğrulukta modellenmelidir.

9- Seri ve paralel rezonans durumlarının belirlenebilmesi için, dağıtım sisteminin herhangi bir barasında sistemin frekans cevabı belirlenebilmelidir.

10- Dağıtım sistemlerinde birden çok harmonik kaynağı bulunması durumunda, bu kaynakların farklı fazlarda olması durumu da göz önüne alınarak analiz edilmelidir.

11- Harmonik akım ve gerilim kaynağının her ikisinde analize dahil edilmelidir.

12- Transformatörler herhangi bir bağlama grubu için modellenmelidir.

Elektrik dağıtım sistemleri genellikle asimetrik yapıda olup, çok sayıda dengesiz ve doğrusal olmayan yük barındırmaktadır. Genel olarak, dağıtım sistemi yükleri, bağımlı akım kaynağı olarak modellenememeleri nedeniyle, sabit akım kaynağı olarak modellenmektedir.

Dağıtım sisteminde birden fazla sabit harmonik akım kaynağının bulunması, faz açılarının hesaplara dahil edilmesini gerektirmesi nedeniyle temel yük akışına ihtiyaç duyulmaktadır. Dağıtım şebekelerinde genellikle birden fazla harmonik kaynağı bulunması nedeniyle, temel bileşen yük akışı sonuçlarını kullanan sabit akım kaynağı metodu kullanılmaktadır. Bu yöntemde, dağıtım sistemlerinin asimetrik olması durumunda faz bileşenleri kullanılmaktadır.

Elektrik dağıtım şebekelerinin harmonik yayınımlı aşağıda verilen ve çok-fazlı bir sistem için verilen uç-denklemleri kullanılarak analiz edilmektedir.

$$[I^{abcd}]_h = [Y^{abcd}]_h \cdot [V^{abcd}]_h \quad (4.1)$$

Bu bağıntıda, $[Y^{abcd}]_h$ matrisinin her bir satırı sistemin bir düğümünü temsil etmektedir. Söz konusu olan düğüm üç fazlı bir baranın herhangi bir fazı yada yıldız bağlı bir transformatörün yıldız noktası olabileceği gibi herhangi bir nötr bağlantı noktası da olabilmektedir [12]. Burada a, b, c ve d indisleri sırasıyla fazları ve gerilimi bilinmek istenen yıldız veya nötr noktasını göstermektedir.

Çok fazlı harmonik analiz çalışmalarında, çok fazlı harmonik bağımlı modeller tüm fazlar için elde edilmekte ve bu modeller, ilgilenilen harmonik sayısı kadar tekrarlanmaktadır. Bu nedenle, çok-fazlı olarak yapılacak harmonik analizlerinde işlem sayısı ve bellek ihtiyacını azaltıcı yöntemlerin dağıtım şebekelerine uygulanması gerekmektedir [155, 156].

Elektrik dağıtım sistemlerinde yapılacak harmonik çalışmalarında izlenmesi gereken yol; harmonik üreten elemanların tespit edilmesi ve bunları temsil edecek modellerin hazırlanması, üzerinde çalışılan şebeke elemanları ve bağlandıkları sistemlerin yapılacak analiz bakımından, modellerinin elde edilmesi ve değişik senaryolar baz alınarak sistemin analiz edilmesi, biçiminde özetlenebilmektedir [83].

4.3 Dağıtım Şebekelerinin Harmonik Bağımlı Modeli

Dağıtım şebekesi elemanlarının her biri çok-uçlu olarak kabul edilebilmekte olup, dağıtım sisteminin kendisinde bu çok-uçluların kendi aralarında bağlanmasından oluşan bir çok-uçlu olarak ele alınmaktadır.

Bölüm 3 de, doğrusal ve doğrusal olmayan elemanların modellenmesi için verilen yaklaşımla, ilgilenilen harmonik dereceleri için enerji dağıtım sistemi elemanlarının ve kendisinin modelleri elde edilmektedir. Burada, dağıtım sistemini oluşturan elemanların bu yaklaşımla modellenmesi için ihtiyaç duyulan ve harmonik derecesi ve analizin amacına göre değişmekte olan veriler üzerinde durulmaktadır.

Elektrik dağıtım sistemlerinde, 1.5 KHZ altında, harmonik analizini etkileyen kısa devre empedansları ve kompanzasyon kapasiteleri olup, daha yüksek frekanslarda hat ve kabloların kapasiteleri de önemli olmaya başlamaktadır [11, 12]. İlgilenilen harmonik derecesi artıkça daha detaylı modellere ihtiyaç duyulmakta ve veri hazırlanması daha karmaşık hale gelmektedir. Dağıtım sistemleri için genellikle maksimum harmonik derecesi olarak 30. harmonik yeterli görülmektedir. İlgilenilen maksimum harmonik derecesine, harmonik kaynaklarının harmonik spektrumuna ve üzerinde çalışılan şebekenin özelliklerine göre karar verilmektir.

Genel olarak, elektrik dağıtım şebekelerinde, doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanan harmonik akımların yanında, şebeke elemanlarının ürettikleri harmonikler ihmal edilmektedir [49, 59, 81]. Daha detaylı analizlerde, dağıtım transformatörlerindeki doyma nedeniyle ortaya çıkan harmonik akımlar ihmal edilmeyerek, sabit akım kaynakları olarak modellenmekte ve bunun sonucu olarak, elektrik dağıtım sistemi doğrusal olarak kabul edilmektedir. Elektrik dağıtım şebekesinde farklı harmonik dereceleri arasındaki kuplajın ihmal edilebilmesinin bir sonucu olarak modelleme ve harmonik analiz; farklı harmonikler için ayrı yapılabilmektedir.

Dağıtım şebekelerini besleyen enerji iletim sistemi geriliminin sinüs biçimli olup olmaması ve harmonik akım kaynakları içermesi, dağıtım sisteminin analizi bakımından önemlidir. Elektrik dağıtım şebekesinin fazlarında harmonik yayımının değerlendirilmesi amacı ile faz bileşenleriyle harmonik analizleri yapılmaktadır. Bu durumda, iletim sistemlerinin, fazlar arası etkileşimlerinin de göz önüne alındığı, üç fazlı bir şebeke modeline gerek duyulmaktadır. Uygulamadan kazanılan tecrübeler dağıtım sistemlerinin harmonik analizi açısından, iletim sistemlerinin kısa devre empedansları ile modellenmesinin, yeterli doğrulukta sonuç verdiğini göstermektedir [11,12].

Senkron generatörlerin, çok-fazlı analizlerde kullanılmak üzere, dengesiz yüklenme ve doğrusal olmayan davranışını yansıtan modellerine ilişkin çalışmalar yapılmış olup, bu çalışmalar yeni yaklaşıma uygun olarak, harmonik benzetim çalışmaları için Bölüm 3 de senkron generatör modeli olarak düzenlenmiştir. Dağıtım şebekeleri, genellikle senkron generatör içermemektedir. Dağıtım sistemlerinde kullanılan kompanzasyon amaçlı senkron generatörlerin şebeke gerilimi ve frekansını sabit tutmak gibi bir görevleri olmaması nedeniyle, temel bileşen yük akışında, yük olarak kabul edilmiş ve sisteme güç verdikleri için negatif işaretli olarak, yük verilerinde kullanılmaktadır.

Bölüm 3 de, kısa devre reaktansı kullanılarak elde edilen transformatör modelleri, sargıların üçgen bağlanması nedeniyle oluşan faz kayması ve genlik değişimi, üçgen sargıların 3'ün katı harmonikleri bloke etmesi ve yıldız noktasının topraklı olmasının, harmoniklerin toprağa akmasına neden oluşunu kapsamakta olup, dağıtım sistemlerinin harmonik analiz için de yeterlidir.

Literatürde harmonik analiz için asenkron motorların eşdeğer devrelerini ayrıntılı olarak veren çalışmalar mevcut olup, dağıtım sistemleri için motor modeli olarak, rotoru bloke edilmiş motor empedansı yeterli olmaktadır [11, 12, 13].

Pasif filtreler, kompanzasyon kapasiteleri ve endüktansları doğrusal elemanlar olup, direnç, endüktans ve kapasite değerleri harmonik derecelerine göre değişmemektedir [2]. Bu elemanların üç fazlı bağlanmaları durumunda farklı fazlar arasında kuplaj olmadığı kabul edilmekte olup çok-uçlu eleman olarak modellenirken, uç-denklemleri harmonik bağımlı olarak verilmektedir. Pasif filtreler yapı olarak uygun değerdeki direnç, endüktans ve kapasitelerin aralarında bağlanmalarından oluşmakta olup, bir çok düğüm noktasına sahip olabilmektedir. Ancak, dağıtım sistemine bağlandıkları baralar şebekenin uç-denklemlerinde görülecek şekilde modellenmeleri yeterlidir.

Dağıtım sistemlerinde bütün baraların veya aynı baranın bütün fazlarının harmonik kaynağı içermeyeceği düşüncesi ile bara empedans matrisinin tamamı sadece yerine ilgili sütununun elde edilmesi veya kritik bazı baraların frekans cevabının belirlenmesi yeterli görüldüğü durumda empedans matrisinin tamamı veya sütunu

değil ilgili köşegen elemanı hesaplanması işlem sayısı ve bellek gereksinimi ihtiyacı bakımından yararlı olmaktadır.

Elektrik dağıtım sisteminde bulunan doğrusal olmayan yükler, uçlarına sinüs biçimli gerilim uygulanması durumunda, harmonik akımları üretmekte, bu harmonik akımlar sinüs biçimli gerilimde bozulmaya neden olmaktadır. Dağıtım sistemlerinde yüklerin genellikle dengesiz olması ve besleme gerilimlerinin dengeli ve sinüs biçimli olmaması nedeniyle bu yüklerin modellenmesi çözümlenmesi gereken bir problem olarak durmaktadır.

4.4 Dağıtım Şebekelerinde Yükler

Elektrik dağıtım şebekelerinin harmonik analizi konusunda artan ilginin sebebi doğrusal olmayan yüklerin hızlı bir biçimde artışı olarak gösterilmektedir. Bu yüklerin doğrusal olmayan karakteristikleri nedeniyle, uçlarına sinüs biçimli gerilim uygulanması durumunda bile harmonik akımları üretmektedirler. Dağıtım sistemlerindeki doğrusal olmayan yükleri besleyen sinüs biçimli gerilimlerde, harmonik akımlar nedeniyle meydana gelen bozulmalar doğrusal karakteristiğe sahip yüklerin de harmonik akımlar üretmesine sebep olmaktadır. Sinüs biçimli olmayan gerilimle beslenen ve doğrusal olmayan yüklerin davranışların modellenmesinde ise ciddi zorluklar vardır. Diğer yandan, dağıtım sistemlerindeki dengesizlikler nedeniyle, dengeli bir gerilimle beslenemeyen, doğrusal olmayan 3 fazlı yüklerin modellenmesi daha da karmaşıktır. Dengesiz ve sinüs biçimli olmayan gerilimle beslenen doğrusal ve doğrusal olmayan yüklerin modellenmesi konusunda çalışmalar halen devam etmektedir [157]. Dağıtım şebekeleri bakımından, tek bir yük olarak gösterilen ancak içinde farklı karakteristiklere sahip doğrusal ve doğrusal olmayan, birden çok yükü barındıran yüklerin modellenmesi ise başlı başına bir problemdir. Ayrıca, dağıtım sistemindeki yükler modellenirken, zamana göre değişken bir karakteristik gösterebilecekleri de unutulmamalıdır.

Doğrusal olmayan yükler, dağıtım şebekelerinin sinüs biçimli gerilim ve akımlarında bozulmalara neden olmalarının dışında, şebekenin rezonans karakteristiklerini de etkilemektedir.

Sonuç itibarıyla, dağıtım sistemlerinde yapılan harmonik çalışmalardan doğru sonuçların elde edilmesinde; yüklerin doğru biçimde modellenmesi bir zorunluluk olarak ortaya çıkmaktadır. Dalga biçimi bozulmuş dengesiz gerilimlerle beslenen, doğrusal olmayan yüklerin gerek duyulan ayrıntılı modellerinin elde edilmesi, imkansız olmasa bile, çözümü oldukça zor bir problemdir. Buna nedenle, yük karakteristiklerine ve yük hakkında mevcut olan veriler kullanılarak, harmonik analizi için çeşitli yük modellerinin geliştirilmesi yoluna gidilmektedir.

Harmonik çalışmalar için yüklerin modellenmesi konusunda önemli çalışmalar yapılmış ve yapılmaya da devam etmektedir. Harmonik analiz için dağıtım sistemi yüklerini, dengesiz 3 fazlı bara empedans matrisi olarak modellenmesi bunlardan biridir [99]. Bununla birlikte, tecrübeler göstermektedir ki, sistem elemanlarının kendileri basit eşdeğerlerle gösterilebilmektedir. Harmonik çalışmalar için doğrusal yüklerin modellenmesi de çok önemlidir. Elektronik yükler, motorlar, omik yükler ve güç faktörü düzeltme kapasitelerini barındıran yüklerin modellenmesi için genel bir yük modeli verilmiştir [11]. İşaret işleme tekniğini kullanarak, yüksek frekanslı karakteristiğe sahip yükler içinde model geliştirilmiştir [100]. Harmoniklerin analizinde yüklerin modellenmesi için “En Küçük Kareler Yöntemi”ni temel alan frekans bağımlı analiz metodu geliştirilmiştir [101]. Diğer bir alternatif harmonik yük modeli farklı frekans devreleri arasındaki ilişkiyi ihmal etmeden admitans matrisi biçiminde modeller verilmesidir. Bu alternatif model pasif ve durağan yüklerin modellenmesi için kullanılmaktadır [102]. Üç fazlı sistemlerin dengesiz oluşu kabul eden fakat farklı frekanslar için aralarındaki manyetik bağı ihmal eden ve paralel çalışma algoritmalarını temel alan yöntemler mevcuttur [103]. Literatürde güç bileşenlerin hesabı için verilen tanımları kullanan genelleştirilmiş bir yük modeli de verilmiştir [104].

Bu bölümde dağıtım şebekesi açısından, pratikte kullanılabilir ve verilerinin elde edilebilir olması da göz önünde bulundurularak bazı yük modelleri verilecektir.

4.4.1 Doğrusal yükler

Doğrusal pasif yükler çektikleri güç değerine bağlı olarak modellenmekte olup, model parametrelerinin hesabında, reaktif gücün pozitif değeri endüktif yük,

negatif değeri ise kapasitif yük için kullanılmaktadır. Endüktif ve kapasitif reaktans harmonik frekanslara bağlı olup

$$X_{L(h)} = h \cdot X_{L(1)} \quad (4.2)$$

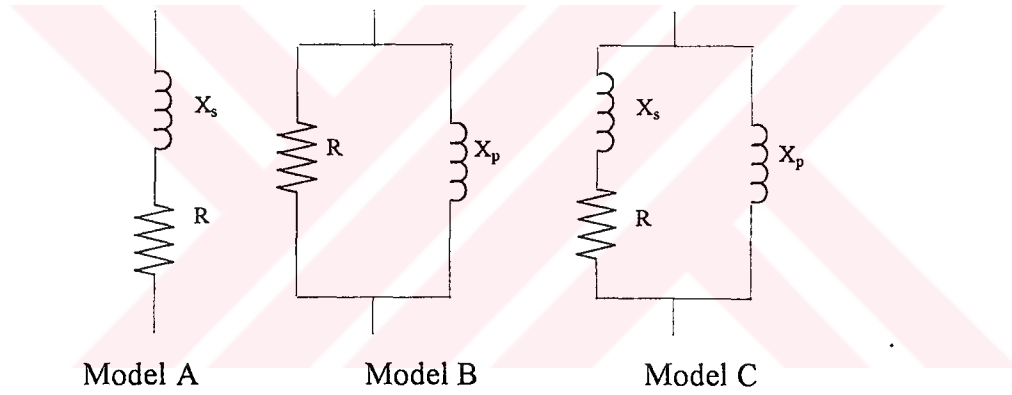
$$X_{C(h)} = (1/h) \cdot X_{C(1)} \quad (4.3)$$

biçiminde verilmektedir.

Seri bağlı bir RLC devresinin harmonik empedans ise

$$Z_{(h)} = \sqrt{R^2 + (X_{L(h)} - X_{C(h)})^2} \quad (4.4)$$

biçimindedir.



Şekil 4.1 Doğrusal pasif yük modelleri

Doğrusal yükler; sabit akım, sabit empedans ve sabit güç yükleri olmak üzere üç gruba ayrılmakta olup temel frekans yük akışı hesapları için güçleriyle, harmonik yük akışı için ise topraklanmış empedanslar olarak modellenmektedir. Sabit empedans yüklerinin gücü; uçlarındaki gerilimin karesi ile, sabit akım yüklerinin gücü ise, gerilimle doğru orantılı olarak değişmektedir [160].

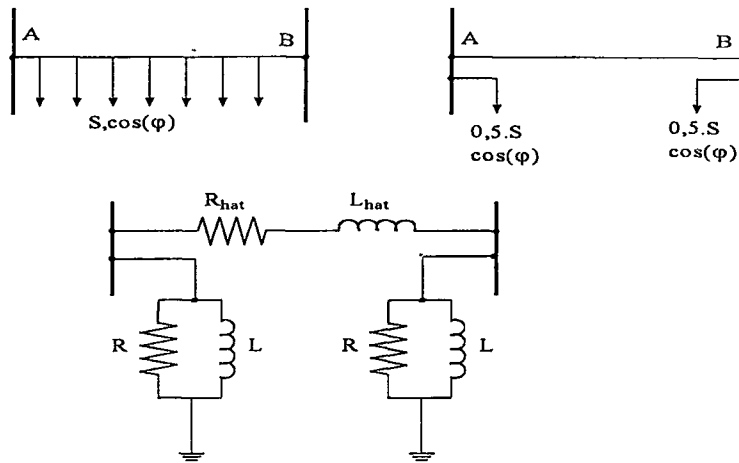
Doğrusal pasif yükler harmonik üretmeyip, rezonans frekansı yakınında, sistemin frekans cevabını önemli biçimde etkilemektedir [11, 12, 13]. Literatürde, Pasif yüklerin çeşitli modelleri verilmiş olup, en yaygın kullanılan modeller Şekil 4.1 de ve bu yük modellerini oluşturan devre elemanlarının hesabı Tablo 4.2 de verilmiştir. Burada yük modelleri bir fazlı olarak verilmiş olup diğer fazlar içinde yük modelleri benzer biçimde belirlenmektedir.

Tablo 4.1 Pasif yük modelleri için direnç ve reaktans bağıntıları

Model	Direnç(Ω)	Endüktans(Ω)
A	$R = Z \cdot \cos(\varphi)$ $Z = \frac{U^2}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$ $\tan(\varphi) = \frac{Q}{P}$	$X_s = h \cdot Z \cdot \sin(\varphi)$
B	$R = \frac{U^2}{P}$	$X_p = h \frac{U^2}{Q}$
C	$R = \frac{U^2}{P}$	$X_h^p = \frac{hR}{6.7 Q / P - 0.74}$, $X_h^s = 0.0073 \cdot h \cdot R$

Burada, U yük barasındaki bir fazlı temel gerilim, P ve Q sırasıyla yükün bir faz temel aktif ve reaktif güçlerdir.

Dağıtım sistemindeki yayılı doğrusal yükler, toplam görünür güçleri iki eşit parçaya ayrılarak hattın iki ucunda tekil yükler olarak alınmaktadır. Hattın iki ucundaki tekil yükler yukarıda verilen yük tiplerinden herhangi biri kullanılarak modellenmektedir. Şekil 4.2 de yayılı yük model A ile, yayılı yükün bulunduğu hat ise eşdeğerde devrede seri empedansı ile gösterilmektedir.



Şekil 4.2 Doğrusal yayılı yükün, tekil yük olarak modellenmesi

4.4.2 Doğrusal Olmayan Yükler

Doğrusal olmayan yükler için kullanılan en yaygın model, genlik ve açısıyla gösterilen akım kaynağı modelidir. Harmonik kaynaklarının faz açıları, referans olan temel bileşen gerilimlerinin açılara göre verilmekte, genlikleri ise temel bileşen akımının belli bir yüzdesi olarak tanımlanmaktadır. Akım kaynağının bilgileri ideal bir eleman modelinden alınabileceği gibi, bir ölçüm sonucu da olabilir. Çoğunlukla, ölçüm sonuçları daha doğru sonuç vermektedir. Sistemde baskın bir harmonik kaynağı var ise, faz açılarını göstermeye gerek kalmayabilmekte, ancak birden fazla harmonik kaynağı olması durumunda faz açılarının gösterilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Gerilimin dengesiz veya dalga şekli bozuk olması halinde daha ayrıntılı modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Dağıtım sistemleri açısından doğrusal olmayan yüklerin genellikle akım kaynağı olarak gösterilmesi yeterlidir. Dağıtım şebekelerinin frekans cevabı belirlenirken bu akım kaynakları açık devre olarak modellenmektedir. Dağıtım sisteminde bulunan kontrollü ve kontrolsüz bir ve üç fazlı bir çok güç elektroniği cihazlarının matematiksel modellerine ilişkin bir çok çalışma yapılmış olup üç fazlı yüklerin dengesiz ve sinüs biçimli olmayan gerilimle beslenmeleri durumu için ise çalışmalar halen devam etmektedir [11,12].

4.4.3 Genel yükler

Bir elektrik dağıtım şebekesinde, belli sayıdaki yükler birbirine çok yakın biçimde konumlandırılmakta ve bir ana dağıtım noktasından beslenmektedir. Bu yapıdan dolayı bu yükler tek bir yük gibi kabul edilmekte ve “Değişik yapıdaki bireysel yüklerin hep birlikte oluşturdukları bu toplamsal yük.”, genel yük olarak ifade edilmektedir [12].

4.5 Yüklerin Genel Modelinin Gerilim ve Akım Ölçümleri Kullanılarak Elde Edilmesi

Literatürde, doğrusal, doğrusal olmayan veya genel yüklerin modellenmesi için akım ve gerilim ölçümleri kullanılarak tek fazlı genel bir yük modeli verilmektedir [180].

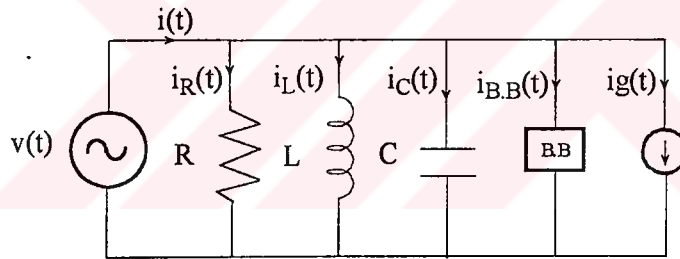
Bu modelde, akım ve gerilimin zamana bağlı ifadeleri kullanılarak yük modeli parametreleri elde edilmeye çalışılmaktadır.

Yapılan ölçüm sonucunda, bir fazlı yüke uygulanan $v(t)$ gerilimi ve yükün çektiği $i(t)$ akım harmonik spektrumu yardımıyla tespit edilebilir. Bu, gerilimin ve akımın zamana bağlı ifadeleri,

$$v(t) = \sum_{h=0}^{h_{\max v}} \sqrt{2} \cdot V_h \cos(h\omega t + \varphi_h) \quad (4.5)$$

$$i(t) = \sum_{h=0}^{h_{\max i}} \sqrt{2} \cdot I_h \cos(h\omega t + \beta_h) \quad (4.6)$$

biçiminde ifade edilmektedir. Burada, $\{v(t), i(t)\}$, $\{V_h, I_h\}$, $\{\varphi_h, \beta_h\}$ ve $\{h_{\max v}, h_{\max i}\}$ parametreleri sırasıyla, gerilim ve akımın ani değerini, h. gerilim ve akım harmoniklerinin efektif değerini, h. gerilim ve akım harmoniklerinin faz açılarını, gerilim ve akım maksimum harmonik derecelerini göstermektedir.



Şekil.4.3 Bir fazlı yükün genel eşdeğer devresi

Bir fazlı yüke ilişkin eşdeğer devre Şekil 4.3 de verilmiştir. Burada, $i(t)$, $i_R(t)$, $i_L(t)$, $i_C(t)$, $i_g(t)$, $i_{B.B}(t)$ sırasıyla, yük tarafından çekilen akımı, R direnci, L endüktansı ve C kapasitesinden geçen akımları, gerilim harmonik derecesinden farklı harmonik dereceli yük akımlarının toplamı ve yük modeli hata akımı göstermektedir.

Eşdeğer genel yük devresinde bulunan R, L, C elemanlarının değeri,

$$R = \frac{(V)^2}{P} \quad (4.7)$$

$$C = \frac{\frac{1}{T_0} \int_0^T i(t) \cdot \frac{dv(t)}{dt} dt}{\frac{1}{T_0} \int_0^T \left[\frac{dv(t)}{dt} \right]^2 dt} \quad (4.8)$$

$$L = \frac{\frac{1}{T_0} \int_0^T [w(t)]^2 dt}{\frac{1}{T_0} \int_0^T i(t) w(t) dt} \quad (4.9)$$

biçiminde hesaplanmaktadır. Burada P aktif gücü ve V yüke uygulanan gerilimin efektif değerini, C kapasiteyi, L endüktansı ve T periyodu göstermekte olup denk.4.6 da görülen $w(t)$;

$$w(t) = \int_0^t v(t) dt. \quad (4.10)$$

olarak tanımlanmış, bir fazlı yükü besleyen gerilimin alternatif bileşeninin 90° fazının kaydırılmasına karşı düşmektedir.

R, L ve C elamanlarının çekmiş oldukları akımlar, sırasıyla

$$i_R(t) = \frac{v(t)}{R} \quad (4.11)$$

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int v(t) dt \quad (4.12)$$

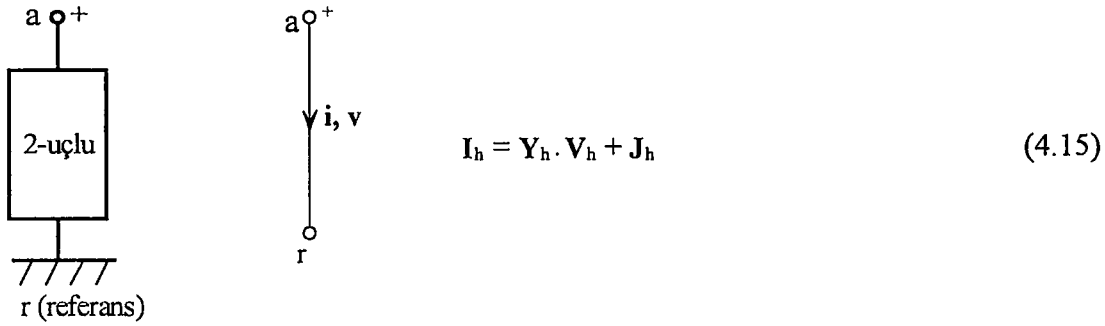
$$i_C(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \quad (4.13)$$

biçiminde hesaplanmaktadır. Burada L, C parametrelerinin negatif çıkmasının fiziksel bir anlamı olmaması nedeniyle, negatif çıktığında bu elemanların eşdeğer devrelerde olmadıkları kabul edilmekte ve akımlarının hesabı yapılmamaktadır.

$i_g(t)$ yükün, gerilim harmoniklerinin derecelerinden farklı harmonik deresine sahip akımların toplamıdır. Son olarak yük modeli hesaplamalarında ortaya çıkabilecek olan hataları modelde bir akım kaynağı olarak gösterilmekte ve bu hata akımı

$$i_{B.B}(t) = i(t) - i_R(t) - i_L(t) - i_C(t) - i_g(t) \quad (4.14)$$

biçiminde hesaplanmaktadır. Burada, doğrusal, doğrusal olmayan ve genel yükler için geçerli olan genel bir yük modeli hesabı açıklanmıştır. Bu yaklaşım ile elde edilen yük modeli parametreleri kullanılarak 2-uçlunun harmonik bağımlı matematiksel modeli (Şekil 4.4) her harmonik için ayrı ayrı elde edilebilmektedir.



Şekil 4.4 Bir fazlı yük iki-uçlusu ve matematiksel modeli

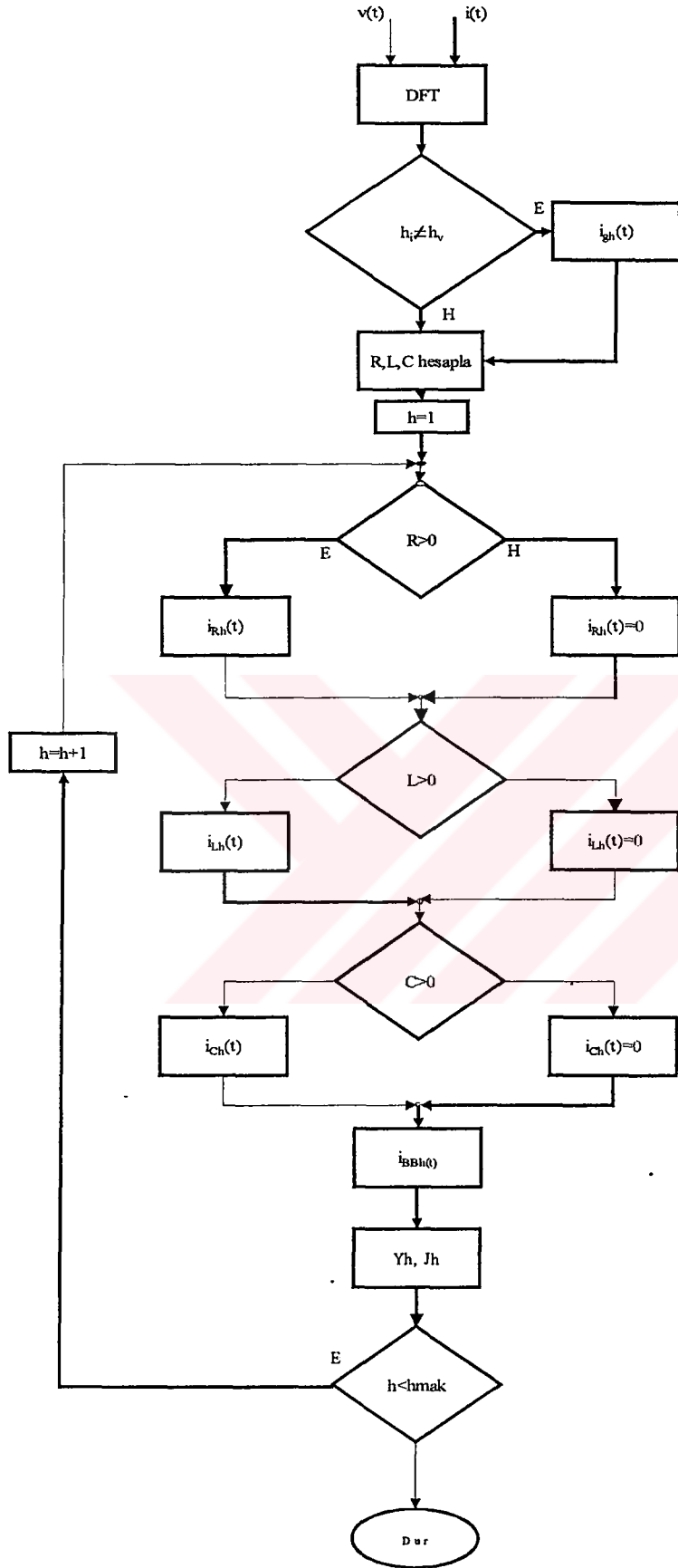
Burada,

$$Y_h = \left(\frac{1}{R} \right) + i(2\pi \cdot f_1 \cdot h \cdot C - \frac{1}{2\pi \cdot f_1 \cdot h \cdot L}) \quad (4.16)$$

$$J_h = I_{B.Bh} + I_{gh} \quad (4.17)$$

olarak verilmektedir.

Yukarıda bir fazlı yüklerin genel modellerinin elde edilmesi için verilen algoritmanın, bir fazlı simetrik bileşen devrelerinde kullanılması durumunda aktif güç negatifte olabilmektedir. Aktif gücün negatif olması nedeniyle hesaplanan direnç de negatif çıkmaktadır. Yukarıda verilen algorithmada direncin negatif çıkması hali eksiktir. Negatif direncin fiziksel bir anlamı olmadığı için bunun, L ve C nin negatif olması durumlarında olduğu gibi göz ardı edilmeli ve eşdeğer devreye konmamalıdır. Bu durumda, (-) çıkan direnç için algoritmanın geliştirilmesi gerekmektedir. Simetrik bileşen devreleri bir fazlı devreler olduğundan, bir fazlı yükler için geliştirilmiş olan algoritma kullanılmaktadır.

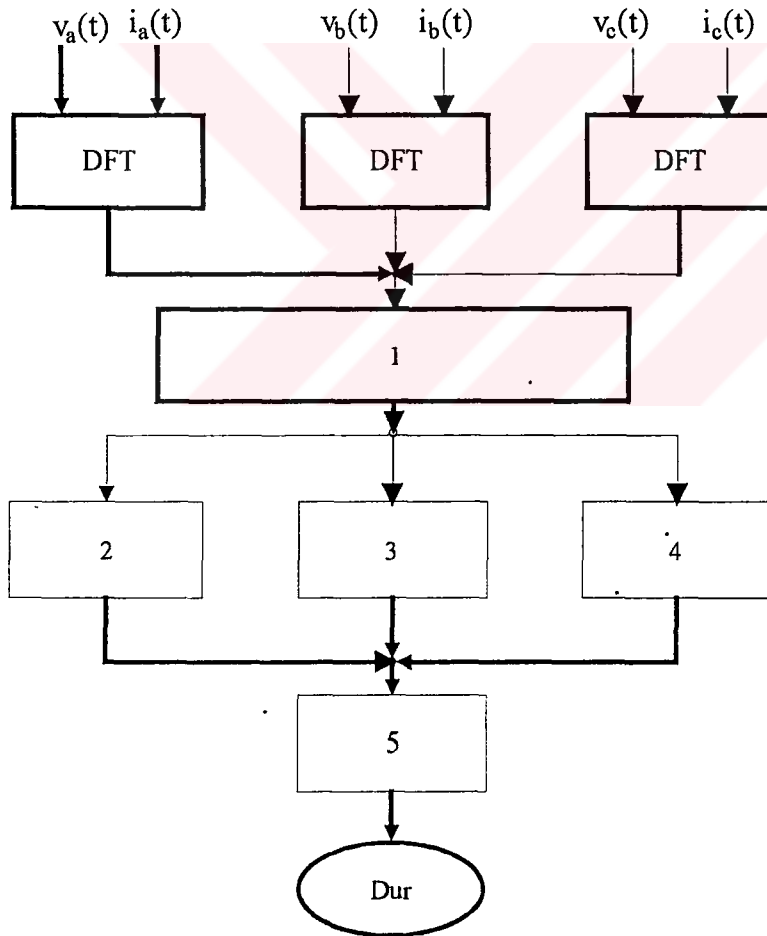


Şekil 4.5 Yük uç-denklemlerinin elde ediliş akış diyagramı

Bir fazlı ve simetrik bileşen devrelerinde yüklerin matematiksel modelleri elde edilebilecek biçimde geliştirilen algoritmanın akış diyagramı Şekil 4.5 de verilmiştir. Bir fazlı yükler için verilen bu modelin 3 fazlı, 3 fazlı 4 iletkenli yüklere uygulanması aşağıda açıklanmıştır.

3 faz-4 iletkenli beslemeye sahip yüklerin modellenmesi için, faz-nötr gerilimi ve faz akımlarının harmonik spektrumları ölçme ile elde edilmekte olup, 3 faz-4 iletkenli yük, faz-nötr arasına bağlı üç adet bir fazlı yük olarak düşünülmekte ve her bir faz'a bağlı yükler, bir fazlı yük algoritması ile elde edilebilmektedir.

3 fazlı yüklerin matematiksel modelleri, yükün simetrik bileşen matematiksel modellerinden ters dönüşümle elde edilmektedir. Şekil 4.6 da buna ilişkin bir akış diyagramı verilmiştir.



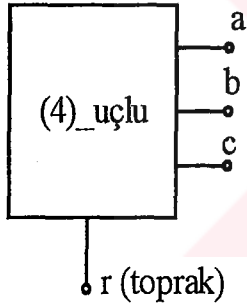
Şekil 4.6 Üç fazlı yük modeli akış diyagramı

3 fazlı yük modelinin elde edilmesine, faz-toprak gerilimleri ile faz akımlarının harmonik spektrumlarının ölçülmesiyle başlanmaktadır. Şekil 4.6 da verilen akış diyagramında 1, 2, 3, 4 ve 5 sayıları ile gösterilen işlem bloklarında yapılan işlemler aşağıda açıklanmıştır.

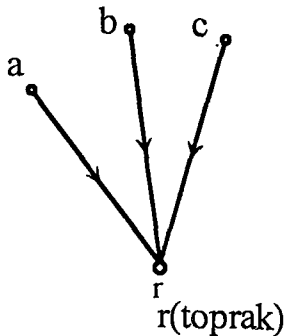
1. Faz gerilim ve akımlarının ölçümle elde edilen harmonik spektrumu kullanılarak doğru, ters ve sıfır bileşen devrelerine ilişkin akım ve gerilimin zamana bağlı ifadeleri elde edilmektedir

2, 3 ve 4 işlem bloklarında sırasıyla doğru, ters ve sıfır bileşen devrelerinin matematiksel modelleri, geliştirilen bir fazlı yük modeli algoritması ile elde edilmektedir.

5. Simetrili bileşen devrelerinin matematiksel modellerinden ters dönüşümle Şekil 4.7 de verilen 4-uçlunun harmonik bağımlı matematiksel modeli, Şekil 4.6 biçiminde elde edilmektedir.



Şekil 4.7 Üç fazlı yükün 4-uçlu gösterimi



$$\begin{bmatrix} I^a \\ I^b \\ I^c \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} Y^{aa} & Y^{ab} & Y^{ca} \\ Y^{ab} & Y^{bb} & Y^{bc} \\ Y^{ca} & Y^{bc} & Y^{cc} \end{bmatrix}_h \cdot \begin{bmatrix} V^a \\ V^b \\ V^c \end{bmatrix}_h + \begin{bmatrix} J^a \\ J^b \\ J^c \end{bmatrix}_h \quad (4.18)$$

Şekil 4.8 Üç fazlı yükü temsil eden 4-uçlunun matematiksel modeli

Sonuç olarak, doğrusal ve doğrusal olmayan yüklerin dengesiz ve/veya sinüs biçimli olmayan yüklerin modellenmesinde yaşanan sıkıntılar ölçüm sonuçlarının kullanılmasıyla aşılmakta olup, genel yüklerin matematiksel modelleri de belirlenebilmektedir

Genel yüklerin yukarıda verilen biçimde modellenmesi sonrasında şebekenin frekans cevabına etkilerinin belirlenmesi mümkün olmaktadır. Bu yüklerin temel yük akışı hesaplamaları için admitans olarak veya güçleriyle gösterilebilmesi mümkündür.

Yüklerin zamanla karakteristiklerinin değişmesi ve farklı davranması bakımından yinelenen ölçümlerle yük modelleri güncellenmelidir. Burada önemli olan, bu yük modelinin farklı uygulamalar için geçerliliğinin denenmesi ve ölçme işleminin her zaman mümkün olup olmadığının kontrolüdür. Ölçme işleminin tekrarlanma imkanı bulunamadığı durumlarda, yükün ölçülen akım ve gerilim değerlerinin bir tolerans sınırı içinde kaldığı kabulü ile, yük parametreleri için de bir sınır verilebilmesi dağıtım sistemi işleten mühendisler açısından çok önemlidir [161].

Dağıtım sistemindeki ticari ve evsel bina yükleri sahip oldukları, çok sayıda küçük güçlü, doğrusal ve doğrusal olmayan yükler itibariyle genel yük tanımına uymaktadır. Bina yüklerinin sahip olduğu yüklerin bazılarının devreye girip çıkması ile sürekli değişen bir karakteristiğe sahip olması ve genellikle de dengesiz olması, doğrusal olmayan yüklerin harmonik akımları nedeniyle, sinüs biçimli gerilimde meydana gelen bozulma, bina yüklerinin modellenmesini imkansızlaştırmaktadır. Bu yüklerin ölçüm sonuçları ile modellenmeleri ciddi bir alternatif çözüm yolu olarak görülmektedir. Bir fazlı ve 3 faz-4 iletkenli bina yüklerinin yukarıda verilen algoritma ile modellenmesi uygun olacaktır. Ancak, dağıtım sistemlerinde bina sayısının fazlalığı yüklerinin modellenmesi için her binada ölçüm yapılması imkansızdır. Bu nedenle bina yüklerinin benzer olanları gruplanarak, her grup için ölçülen değerlerin belirli sınırlar içinde değişmesi durumunda model parametreleri için bir sınır belirlenmesi bir çözüm yolu olmaktadır [161].

4.6. Yeni Yaklaşımla Çok-fazlı Güç Akışı

Normal koşullarda, elektrik enerji sistemleri, kararlı ve sürekli hal durumunda işletilirler. Bilindiği gibi, sürekli hal işletme karakteristiğinin belirlenmesi amacıyla temel güç akışı analizi yapılmaktadır. Diğer yandan, bağımsız işletilen sistemler arasındaki güç alış verişleri, generatör ve kompansatörlerin ayar karakteristiklerinin belirlenmesi, transformatörlerin gerilim kademesi ayarlarının yapılması, güvenlik sınırlarının tayin edilmesi ve optimal çalışma koşullarının tespiti için de güç akışı analizinin yapılması gerekmektedir. Sistemin optimum işletilmesinin yanında, büyümenin planlı yapılabilmesi açısından da temel güç akışı analizi gereklidir.

Geleneksel yük akışı analizinde amaç; sürekli halde, enerji sistemine ilişkin bütün bara gerilimlerinin açı ve genliklerin, hat kayıplarının ve generatör baralarına ilişkin reaktif güçlerin belirlenmesidir. Yükler, küçük gerilim değişimlerinden etkilenmedikleri varsayılan aktif ve reaktif güç talepleri biçiminde verilmektedir [44, 162, 163].

Elektrik enerji sistemlerinin faz bileşenleri ile modellenmesi ve analizi ile ilgili çalışmalar; günümüzde bilgisayar teknolojisinde işlem hızı ve bellek miktarını alanında elde edilen gelişmelerin sonucunda artarak devam etmektedir [71-75]. Yük akışı için, öncelikle, şebekenin modellenmesi gerekmektedir. Dağıtım sistemlerinin dallı yapıları nedeniyle, bu özelliklerini temel alan farklı yaklaşımlar ve yöntemler kullanılarak modellenmektedirler.

Literatürde, 3 fazlı sistemlerin, faz bileşenleri ile verilen yük akışı algoritmaları, genellikle, fazların aynı sayıda bara ve aynı topolojiye sahip olması durumu için verilmiştir. Dağıtım sistemlerinde ise fazlara ait bara sayıları, topolojiler ve kullanılan malzeme farklı olabilmektedir. Ayrıca, fazlara ait bara bilgileri yanında transformatörün nötr noktası veya toprak ve nötr iletken bilgilerinin de arandığı çözümlerde bu baraların temel yük akışına dahil edilmesinde sıkıntılar vardır.

Bu çalışmada, bilinen tek fazlı yük akışı algoritmaları, çok fazlı olarak geliştirilmiş ve, fazların kendi aralarında gruplaşması yaklaşımı kullanılarak, yeni bir algoritma verilmiştir. Önerilen yöntem ve modeller ile tüm bu sorunların kolaylıkla aşılabileceği gösterilmiştir.

Bölüm 3 de, tek bir çok-uçlu eleman olarak modellenen enerji sistemlerinde yük akışı analizi, bir fazlı yük akışı analizi olarak ele alınmış olup, a, b, c fazları ve d nötr iletkeni veya yıldız noktasını temsil eden baralar, bir çok-uçlu elemanın uçlarının faz sırasında düzenlenmesiyle elde edilen sistem modelinde, bara bilgileri açısından bara sınıflaması geleneksel güç akışına benzer olarak yapılarak yük akışı analizi yapılmıştır.

Bu çalışmada önerilen üç fazlı dengesiz yük akışında, sistemde n_y adet yük barası bulunduğu varsayılmıştır. Genel olması açısından, fazlardaki bara sayıları farklı alınacak olursa, toplam yük bara sayısı,

$$n_y = n_y^a + n_y^b + n_y^c + n_y^d \quad (4.19)$$

olacaktır. Burada, n_y^a , n_y^b , n_y^c , n_y^d ve n_y sırasıyla a, b, c, d fazı yük bara sayıları ve yüklerin toplam bara sayısını göstermektedir.

Dengeli üç-fazlı yük akışı için, senkron generatör sayısı n_g olmak üzere, sistemdeki toplam bara sayısı n_{yg}

$$n_{yg} = n_y + 3.n_g \quad (4.20)$$

biçiminde hesaplanır.

Dengesiz 3 fazlı güç akışında ise senkron generatörün iç baralarının yük akışına dahil edilmesi ile senkron generatör baraları, analiz kolaylığı bakımından, “Generatör uç baraları” ve “generatör iç baraları” olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır [52-53].

Dengesiz yük akışında senkron makinanın iç baralarının da yük akışına dahil edilmesi gerektiğinden toplama bara sayısı, $3.n_g$ kadar daha artarak

$$n = n_{yg} + 3.n_g \quad (4.21)$$

olacaktır. Bilindiği gibi, 3 fazlı güç akışında baralar, genel olarak, salınım, yük ve generatör baraları olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır.

Generatör baraları:

Generatör uç baraları; bu baralar gerilim kontrollü baralar olup, her generatör uç barasının a fazının gerilimi, bir gerilim regülatörü yardımıyla önceden belirlenen bir değerde sabit tutulmaktadır. Bu baralara bağlı yüklerin çektiği, aktif (P^a, P^b, P^c) ve reaktif (Q^a, Q^b, Q^c) güçler önceden bilinir, ancak faz gerilimleri ve açıları değişkendir. Değeri önceden bilinen generatör uç barasının a fazının gerilimi her iterasyon sonunda referans gerilimle karşılaştırılır.

Generatör iç baraları; bu baralar, dengeli üç fazlı ideal gerilim kaynaklarının bağlı oldukları baralar olup generatör uç barasına bağlı, gerilim regülatörü yardımıyla ideal gerilim kaynaklarının gerilimi, generatör uç-barasının a fazının gerilimi gerekli değere ayarlanır. Generatörü iç baralarının gerilim genlik ve açılarının simetrik olması nedeniyle a fazı için bilinmesi yeterlidir.

Generatör iç bara gerilimleri dengeli olduğu için bu gerilimlerin genlikleri eşit ve faz açıları ise aşağıda verildiği gibi 120° farklıdır. Bu gerilimler arasında

$$V_{iç} = E^a = E^b = E^c \quad (4.22)$$

$$\delta_{iç} = \delta_{iç}^a = \delta_{iç}^b + 2\pi/3 = \delta_{iç}^c - 2\pi/3 \quad (4.23)$$

ilişkileri mevcuttur. Bu baralardan sisteme verilen aktif güçler bilinen değerler olup $V_{iç}$ ve $\delta_{iç}$ her bir iterasyon sonunda elde edilen değişkenlerdir.

Salınım barası:

Yük akışı hesaplarında kesin çözüm elde edilinceye kadar şebekedeki kayıpların bilinmemesinden dolayı bu ilave kayıpları sağlayan ve gücü değişken olan bir baranın seçimi gerekli olmaktadır. Generatörlerden biri salınım generatörü olarak seçilmekte ve iç bara a fazı gerilimi referans olarak alınmaktadır. Diğer generatörlerden farklı olarak, salınım generatörlerinin sisteme verdiği aktif güç önceden bilinmemekte, buna karşılık salınım generatörünün iç bara geriliminin faz açısı ve salınım generatörünün a fazına ilişkin uç bara gerilimi bilinmektedir[.]

Yük baraları:

Bu baralar gerilim kontrollü olmayıp, baraların fazlarından çekilen aktif (P^a, P^b, P^c, P^d) ve reaktif (Q^a, Q^b, Q^c, Q^d) güçleri bilinmektedir. Baraların faz ve

yıldız noktalarının gerilimleri (V^a, V^b, V^c, V^d) ve bu gerilimlerin faz açıları ($\delta^a, \delta^b, \delta^c, \delta^d$) ise değişken olarak tutulmakta ve yük akış analizi sonunda elde edilmektedirler.

Geleneksel dengeli yük akışında olduğu gibi üç fazlı dengesiz yük akışında da yöntem; bilinmeyen sayısı kadar doğrusal olmayan denklem sisteminin önce doğrusallaştırılması ve daha sonra da çözülmesine dayanır. Doğrusal olmayan denklem sisteminin çözümü için Newton-Raphson yöntemi yaygın olarak kullanılmakta olup, bu yöntemle her iterasyon adımında, doğrusal olmayan denklem sistemi Jacobian matrisler yardımıyla doğrusal denklem sistemine dönüştürülerek çözülmektedir. İterasyona, tahmini, ilk değerlerle başlanıp her adımda bulunan çözüm değerleri bir sonraki adımda yerine konularak iterasyona devam edilmektedir.

Çok fazlı dengesiz yük akışında temel bileşen bara gerilim matrisi

$$[U] = [\delta \mid V \mid \delta_{i\varphi} \mid V_{i\varphi}]^T \quad (4.24)$$

biçiminde tanımlanmaktadır.

Generatör iç baraları hariç, diğer tüm baraların faz açıları ve gerilimleri

$$[\delta] = [\delta^a \mid \delta^b \mid \delta^c \mid \delta^d] \quad (4.25)$$

$$[V] = [V^a \mid V^b \mid V^c \mid V^d] \quad (4.26)$$

biçimindedir. Burada, fazlara ait gerilimlerin açı ve genlikleri faz sırasına göre

$$[\delta^a] = [\delta_1^a \quad \delta_2^a \quad \dots \quad \delta_{n_{yg}}^a], [V^a] = [V_1^a \quad V_2^a \quad \dots \quad V_{n_{yg}}^a] \quad (4.27)$$

$$[\delta^b] = [\delta_1^b \quad \delta_2^b \quad \dots \quad \delta_{n_{yg}}^b], [V^b] = [V_1^b \quad V_2^b \quad \dots \quad V_{n_{yg}}^b] \quad (4.28)$$

$$[\delta^c] = [\delta_1^c \quad \delta_2^c \quad \dots \quad \delta_{n_{yg}}^c], [V^c] = [V_1^c \quad V_2^c \quad \dots \quad V_{n_{yg}}^c] \quad (4.29)$$

$$[\delta^d] = [\delta_1^d \quad \delta_2^d \quad \dots \quad \delta_{n_{yg}}^d], [V^d] = [V_1^d \quad V_2^d \quad \dots \quad V_{n_{yg}}^d] \quad (4.30)$$

biçiminde verilmektedir. Burada, $n_{yg}^a, n_{yg}^b, n_{yg}^c$ ve n_{yg}^d sırasıyla a, b, c ve d fazlarının bara sayıları olup,

$$n_{yg}^a = n_y^a + n_g, \quad n_{yg}^b = n_y^b + n_g, \quad n_{yg}^c = n_y^c + n_g, \quad n_{yg}^d = n_y^d \quad (4.31)$$

biçiminde hesaplanmaktadır.

Generatör iç baralarına ait gerilimlerin genlik ve açıları ise gerektiğinde

$$[V_{i\varphi}] = \begin{bmatrix} V_{i\varphi_1} & V_{i\varphi_2} & \cdots & V_{i\varphi_{n_g}} \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

$$[\delta_{i\varphi}] = \begin{bmatrix} \delta_{i\varphi_1} & \delta_{i\varphi_2} & \cdots & \delta_{i\varphi_{(n_g-1)}} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

biçiminde verilebilmektedir.

Geleneksel yük akış analizinde, yükler, üretim ve şebeke yapısının, incelenen zaman dilimi içinde, değişmediği kabul edilmekte ve sinüsoidal sürekli durum incelenmektedir. Güç akışı algoritması, bir baraya akıtılan kompleks güçler ile baradan çekilen kompleks güçler arasındaki farktan kaynaklanan güç hatasının sıfıra yada ihmal edilebilecek kadar küçük bir tolerans değerinin altına indirilmesi esasına dayanmaktadır. Burada yöntem ana hatları ile bu uygulama için düzenlenmiştir.

Aktif ve reaktif güç hatalarının i. bara için ifadeleri,

$$\Delta P_i = (P_i)^{sp} - P_i \quad (4.34)$$

$$\Delta Q_i = (Q_i)^{sp} - Q_i \quad (4.35)$$

biçimindedir. Burada, $(P_i)^{sp}$ ve $(Q_i)^{sp}$ sırasıyla i. baranın bilinen aktif ve reaktif güç değerini, P_i ve Q_i ise hesaplanan aktif ve reaktif güç değerleri olup

$$P_i = \sum_{j=1}^{n_{yg}} V_i \cdot V_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (4.36)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^{nyg} V_i \cdot V_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (4.37)$$

biçiminde hesaplanmaktadır.

k. senkron generatörünün a fazı iç barası aktif gücü

$$P_k^a = \sum_{j=1}^{nyg} V_i \cdot V_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (4.38)$$

biçiminde hesaplanmaktadır. Burada i, k. generatörün a fazı iç barasını göstermekte olup b ve c fazı için benzer biçimde hesaplanmaktadır.

Senkron generatörün iç baraları için aktif güç hata denklemi

$$\Delta P_{gen_k} = (P_{gen_k})^{sp} - (P_k^a + P_k^b + P_k^c) \quad (4.39)$$

biçimindedir. Denk.4.39 te verilen güç hata bağıntısı, salınım generatörleri hariç diğer tüm generatörler için tanımlanmıştır. Generatör iç barasından sisteme verilen toplam aktif güç hata denklemi(4.39) eşitliği ile tanımlanmakta olup bu denklemde k. generatörün sisteme verdiği üç faz aktif gücün toplam değeri $(P_{gen_k})^{sp}$ önceden bilinmekte ve her iterasyonda sabit kalmaktadır.

Salınım barasına bağlı generatörde dahil olmak üzere tüm generatörler için gereken uç barasının geriliminin sabit tutulmasına ilişkin gerilim hatası

$$\Delta V_{reg_k} = (V_{u\varphi_k})^{sp} - V_{u\varphi_k} \quad (4.40)$$

biçiminde verilmiştir.

Bu eşitlikte $(V_{u\varphi_k})^{sp}$, k. generatöre ait, bir gerilim regülatörü yardımıyla, her türlü yükleme koşulunda, generatörün değeri sabit tutulan a fazının uç barasının geriliminin genliğidir. $V_{u\varphi_k}$ ise generatörün k. uç barasının a fazı gerilimin genliğidir.

Bara değişken matrisi $[\Delta X]$ ile bara hata matris $[\Delta M]$ arasındaki ilişki $[J]$ Jacobian matrisi yardımı ile

$$[\Delta X] = [J]^{-1} [\Delta M] \quad (4.41)$$

biçiminde ifade edilmektedir. Bara değişken ve hata matrisi

$$[\Delta M] = [\Delta P \quad \Delta Q \quad \Delta P_{\text{gen}} \quad \Delta V_{\text{reg}}]^T \quad (4.42)$$

$$[\Delta X] = [\Delta \delta; \Delta V; \Delta \delta_{i\varphi}; \Delta V_{i\varphi}]^T \quad (4.43)$$

biçiminde verilmektedir. Bara değişken matrisini oluşturan $[\Delta P]$, $[\Delta Q]$, $[\Delta P_{\text{gen}}]$ ve $[\Delta V_{\text{reg}}]$ hata alt matrisleri denklem 4.34, 4.35, 4.39 ve 4.40 da tanımlanmıştır. Denk. 4.41 daha detaylı olarak

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \\ \Delta \delta_{i\varphi} \\ \Delta V_{i\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 & J_5 & J_6 \\ J_3 & J_4 & J_7 & J_8 \\ J_9 & J_{10} & J_{13} & J_{14} \\ J_{11} & J_{12} & J_{15} & J_{16} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta P_{\text{gen}} \\ \Delta V_{\text{reg}} \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

biçiminde de ifade edilmektedir.

λ iterasyon sayısı olmak üzere, $(\lambda + 1)$. iterasyondaki $[X]^{\lambda+1}$ matrisinin elemanlarının değerleri hesaplanan $[\Delta X]$ matrisi yardımı ile

$$[X]^{\lambda+1} = [X]^\lambda + [\Delta X]^\lambda \quad (4.45)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır.

Çözüm için bir önceki iterasyonda hesaplanan $[X]$ değeri kullanılarak $[\Delta M]$ hata matrisi ve $[J]$ Jacobian matrisi tekrar hesaplanmaktadır. Denklem 4.44 ile $[\Delta X]$ matrisindeki değişken değerleri bulunmaktadır. $[\Delta M]$ hata matrisindeki tüm elemanların değeri önceden bilinen bir tolerans değerinin altına ininceye kadar iterasyona devam edilmektedir.

Dallı yapıdaki dağıtım sistemleri, bir iletim sistemi tarafından beslenmekte olup generatör barası bulunmamaktadır. Kompanzasyon amacıyla kullanılan senkron generatör bulunması durumunda, bu generatörlerin gerilim sabit tutmak amacıyla bir gerilim regülatörü ile donatılmamaları nedeniyle bağlı bulundukları baralar yük barası olarak sınıflanmakta ve sisteme verdikleri reaktif güç negatif işaretli olarak yük barası verisi olmaktadır. Dağıtım sisteminin beslendiği üç fazlı baralar sistemin kayıplarını karşılamak üzere salınım barası olarak alınmakta olup a fazı salınım barası gerilim açısı referans olarak seçilmektedir. Dağıtım sistemlerinin çok fazlı yük akışı algoritması da, her fazın ayrı ayrı gruplaşması şeklinde verilen yeni yaklaşıma göre verilmektedir. Dağıtım sistemlerinde generatör barasının bulunmamasının bir sonucu olarak denk. 4.44

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta\delta}{\Delta V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

biçimini almaktadır. Jacobian matrisi oluşturan $[J_1]$, $[J_2]$, $[J_3]$ ve $[J_4]$ alt matrislerini elde edilişi için literatürde verilen algoritma burada da uygulanabilmektedir [56].

4.7 Dağıtım Şebekeleri İçin Önerilen Çok-fazlı Harmonik Güç Akışı Algoritması

Elektrik dağıtım sistemlerinde harmoniklerin nasıl yayıldığı, harmoniklerden kaynaklanan ek kayıpların belirlenmesi, mevcut problemin giderilmesi, sisteme yeni bir ilave durumunda gerilim bozulmasının ve harmonik akım genliğinin tahmini, mevcut sistemin gerilim ve akım dalga biçiminde meydana gelen bozulmanın hesaplanması, bunların standartlarda belirtilen değerlerin altında kalıp kalmadığının belirlenmesi ve belirli sınırlarda kalması için harmonikleri giderecek tedbirlerin alınması, durumlardan biri veya daha fazlası için harmonik güç akışına ihtiyaç duyulmaktadır.

Elektrik enerji sistemlerinin modelleme ve analiz çalışmalarında kullanılan ilkel admitans matrisi, temel çevre matrisi, Jacobian matris ve bara admitans matrisi gibi matrisler, sıfırı bol (seyrek) matrislerdir. Dağıtım sistemlerinin dallı yapıları nedeniyle bu matrislerde sıfır eleman sayısı daha da artmaktadır. Ayrıca, üç fazlı olarak elde edilen bara admitans matrislerinin sıfır eleman sayısı, fazlar arasında kuplaj olup olmamasına bağlı olarak değişmektedir. Dağıtım sistemlerindeki

harmonik kaynaklarının matematiksel modelleri harmonik kaynağı olmayan baralar nedeniyle çok sayıda sıfır elamana sahip matrisler olarak ortaya çıkmaktadır.

Sıfırı bol bir matrisin tüm elemanlarının bellekte tutulması yerine, sıfırdan farklı elemanların bellekte tutulması, seyrek matris yaklaşımı olarak bilinmektedir.

Bu alt bölümde, elektrik dağıtım sistemleri için çok-fazlı harmonik güç akışı algoritması verilmesi amaçlanmakta olup bilgisayar hesaplamalarında daha az bellek ve işlem sayısı ile uygun matematiksel model ve algoritmalar ile daha hızlı ve doğru çözümler elde etmek üzere 3. bölümde verilen yaklaşım, dağıtım sistemlerinin modellenmesinde kullanılmıştır.

Dağıtım sistemlerinin çok-fazlı harmonik analizi için, yeni yaklaşım kullanılarak verilen uç-denklemleri

$$[I^{abcd}]_h = [Y^{abcd}]_h \cdot [V^{abcd}]_h \quad (4.47)$$

biçimindedir. Bu bağıntıda, $[Y^{abcd}]_h$ matrisinin her satırı sistemin bir düğümünü temsil etmektedir. Söz konusu olan düğüm üç fazlı bir baranın herhangi bir fazı yada yıldız bağlı bir transformatörün yıldız noktası olabileceği gibi herhangi bir nötr bağlantı noktası da olabilmektedir.

Elektrik dağıtım sistemlerinde genellikle birden fazla yük bulunması nedeniyle temel yük akışına ihtiyaç duyulmakta, asimetrik yapıları nedeniyle de bu temel yük akışı faz bileşenleri ile yapılması gerekmektedir.

Çok fazlı temel yük akışının yapılması sonucu harmonik analize hazırlık olmak üzere aşağıdaki çalışmalar yapılmaktadır.

1) Harmonik spektrumları ile verilen, doğrusal olmayan yüklerin, genlik ve faz açıları bağlı oldukları bara geriliminin genlik ve faz açısının belirlenmesi ile bu değerler kullanılarak harmonik akım kaynağının faz açısı ve genlikleri güncellenmektedir. Böylece daha gerçekçi bir modellemenin yanında birden fazla yükün bulunduğu elektrik dağıtım sistemlerinde faz farklarından kaynaklan sıkıntılar ortadan kalkmaktadır.

2) Transformatör uçlarındaki gerilimler belirlenerek, doymaya neden olacak bir gerilim yükselmesi olup olmadığı tespit edilip, doyma olayının olup olmadığı kontrol edilmekte, doyma varsa; transformatörün bu şartlar için ürettiği harmonik akımlar hesaplanarak, Bölüm 3 de verilen transformatör modelleri kullanılarak bu harmonik akımları transformatörün uçlarına taşınmaktadır. Bunun sonucunda sistemin bara admitans matrisinin elde edilmesinde transformatör artık doğrusal bir eleman olarak ele alınabilmektedir.

3) Sabit akım ve sabit güç olarak kabul edilebilen doğrusal yüklerin, harmonikler bakımından admitans olarak modellenmesinde, bu uç gerilimlerinin kullanılması, harmonik analizinden daha doğru sonuçlar alınmasına kaynak oluşturmaktadır.

Çok fazlı temel yük akışında, genellikle, doğrusal olmayan yükler, güçleri ile temsil edilmektedir. Dallı yapıdaki dağıtım sistemlerinin beslendiği a, b ve c fazların her birinde bir salınım barası seçilip, a fazı için seçilen salınım barasının açısı referans olarak seçilmektedir. Bu baraların, temel bileşen gerilimleri ve açıları bilinmekte, güçleri ise bilinmemektedir. Bu baralar, dağıtım sisteminin fazlara ait kayıplarını ve yüklerin güç talebini karşılamaktadırlar.

Dağıtım sistemlerinde temel yük akışında kullanılmak üzere elde edilen çok fazlı temel bileşen uç denklemlerindeki bara admitans matrisi Denk.4.48 biçiminde elde edilmektedir.

$$[Y^{abcd}]_1 = \begin{bmatrix} Y^{aa} & Y^{ab} & Y^{ac} & Y^{ad} \\ Y^{ba} & Y^{bb} & Y^{bc} & Y^{bd} \\ Y^{ca} & Y^{cb} & Y^{cc} & Y^{cd} \\ Y^{da} & Y^{db} & Y^{dc} & Y^{dd} \end{bmatrix}_1 \quad (4.48)$$

Yeni yaklaşımla temel bileşen güç akışı verilerinin bir fazlı analize uygun olarak, düzenlenmesi, salınım barası hariç diğer tüm baraların faz açıları ve gerilimleri için

$$[\delta] = [\delta^a \mid \delta^b \mid \delta^c \mid \delta^d] \quad (4.49)$$

$$[V] = [V^a \mid V^b \mid V^c \mid V^d] \quad (4.50)$$

biçimindedir.

Fazlara ait gerilimlerin açı ve genlikleri faz sırasına göre

$$[\delta^a] = [\delta_1^a \ \delta_2^a \ \dots \ \delta_{na}^a], [V^a] = [V_1^a \ V_2^a \ \dots \ V_{na}^a] \quad (4.51)$$

$$[\delta^b] = [\delta_1^b \ \delta_2^b \ \dots \ \delta_{nb}^b], [V^b] = [V_1^b \ V_2^b \ \dots \ V_{nb}^b] \quad (4.52)$$

$$[\delta^c] = [\delta_1^c \ \delta_2^c \ \dots \ \delta_{nc}^c], [V^c] = [V_1^c \ V_2^c \ \dots \ V_{nc}^c] \quad (4.53)$$

$$[\delta^d] = [\delta_1^d \ \delta_2^d \ \dots \ \delta_{nd}^d], [V^d] = [V_1^d \ V_2^d \ \dots \ V_{nd}^d] \quad (4.54)$$

Yeni yaklaşımla temel bileşen güç akışı verilerinin, bir fazlı analize uygun olarak, düzenlenmesi, salınım barası hariç diğer tüm baraların aktif ve reaktif güçleri

$$[P] = [P^a \mid P^b \mid P^c \mid P^d] \quad (4.55)$$

$$[Q] = [Q^a \mid Q^b \mid Q^c \mid Q^d] \quad (4.56)$$

biçimindedir. Burada, fazlara ait aktif ve reaktif güçlerin faz sıralanışı aşağıda verilmiştir.

$$[P^a] = [P_1^a \ P_2^a \ \dots \ P_{na-1}^a], [Q^a] = [Q_1^a \ Q_2^a \ \dots \ Q_{na-1}^a] \quad (4.57)$$

$$[P^b] = [P_1^b \ P_2^b \ \dots \ P_{nb-1}^b], [Q^b] = [Q_1^b \ Q_2^b \ \dots \ Q_{nb-1}^b] \quad (4.58)$$

$$[P^c] = [P_1^c \ P_2^c \ \dots \ P_{nc-1}^c], [Q^c] = [Q_1^c \ Q_2^c \ \dots \ Q_{nc-1}^c] \quad (4.59)$$

$$[P^d] = [P_1^d \ P_2^d \ \dots \ P_{nd}^d], [Q^d] = [Q_1^d \ Q_2^d \ \dots \ Q_{nd}^d] \quad (4.60)$$

Çok-fazlı şebekenin bir fazlı tek bir devre olarak ele alınarak güç akışı için tahmini değerleri

$$V_j^a = 1.0 \text{ p.u.}, \quad \delta_j^a = 0, \quad (j=1,\dots,na), \quad j \neq sa \quad (4.61)$$

$$V_j^b = 1.0 \text{ p.u.}, \quad \delta_j^b = -2.\pi/3, \quad (j=1,\dots,nb), \quad j \neq sb \quad (4.62)$$

$$V_j^c = 1.0 \text{ p.u.}, \quad \delta_j^c = 2.\pi/3, \quad (j=1,\dots,nc), \quad j \neq sc \quad (4.63)$$

$$V_j^d = 0.1 \text{ p.u.}, \quad \delta_j^d = 0, \quad (j=1, \dots, nd) \quad (4.64)$$

biçiminde alınmaktadır. Burada, sa, sb ve sc sırasıyla a, b ve c fazı salınım bara numaralarını göstermektedir. Çok-fazlı şebekenin tek devre olarak modellerinin elde edilmesinde, gerilimin genlik ve açısı için kabul edilen tahmini değerlerin düzenlenişinde fazların gruplanması yaklaşımı kullanılmıştır. Bundan sonra, sistemde bir fazlı Newton-Raphson veya Gauss-seidel yöntemi ile güç akışı yapılabilecektir. Dağıtım sistemlerinde R/X oranının büyük olması nedeniyle, büyük boyutlu şebekelerin analizinde boyutları azaltan, ayrık Newton-Raphson yöntemi kullanılamamaktadır. Bu durumda, üzerinde çalışılan şebeke özellikleri ile birlikte Newton-Raphson ve Gauss-seidel yöntemlerinin üstünlükleri ve sıkıntıları göz önünde bulundurularak yöntem seçimi yapılmalıdır.

Bu çalışmada ele alınan üç fazlı dağıtım sisteminin büyük boyutlu olması ve dağıtım sistemlerinin yük akışı analizinde Newton-Raphson yönteminin ıraksaması nedeniyle, temel yük akışı için Gauss Seidel (G.S) yöntemi tercih edilmiştir.

Literatürde bir fazlı sistemlerle için verilen G.S güç akışı algoritmasının, tek bir devre gibi modelleri elde edilen çok fazlı elektrik dağıtım şebekesinin güç akışında kullanılması mümkün olup çok-fazlı güç akışı için ihtiyaç duyulan düzenlenmeler Bölüm 4.6 da verilmiştir. G.S yöntemine göre Toplam bara sayısı N olan bir sistemde k. bara gerilimi

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left(\frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N Y_{kn} \cdot V_n \right) \quad (4.65)$$

biçiminde hesaplanmaktadır. Burada, P_k ve Q_k sırasıyla k barasında verilen aktif ve reaktif güçlerdir. Denklemin sağ tarafındaki gerilim değerleri iterasyon yapılmış ise, hesaplanan en son değerleri veya tahmini değerleri göstermektedir.

2. Temel yük akışı sonucunda elde edilen bara gerilimlerinin genlikleri ve açıları kullanılarak harmonik kaynaklarının açıları

$$\alpha_h = h.(\alpha_1) + \alpha_{1h} \quad (4.66)$$

biçiminde hesaplanarak güncellenmektedir. Burada, α_h , α_1 ve α_{1h} sırasıyla h. harmonik akımı, temel bileşen gerilimi ve harmonik akımı ile temel bileşen gerilimi arasındaki açıdır. Akımın temel bileşen genliği, gerilimin bu yeni değeri ve güç kullanılarak hesaplanmaktadır.

3. Dağıtım sistemlerindeki doğrusal yükler, bağlandıkları baraların hesaplanan gerilimleri kullanılarak admitans olarak modellenmektedir.

Dağıtım sistemi aşağıda verilen admitansı matrisi ilgilenilen her harmonik derecesi için tekrarlanmaktadır.

$$[Y^{abcd}]_h = \begin{bmatrix} Y^{aa} & Y^{ab} & Y^{ac} & Y^{ad} \\ Y^{ba} & Y^{bb} & Y^{bc} & Y^{bd} \\ Y^{ca} & Y^{cb} & Y^{cc} & Y^{cd} \\ Y^{da} & Y^{db} & Y^{dc} & Y^{dd} \end{bmatrix}_h \quad (4.68)$$

4.Yeni yaklaşıma göre elde edilmiş admitans matrisi ve harmonik akım kaynağı matrisi yardımı ile bara harmonik gerilimleri

$$[V^{abcd}]_h = [Y^{abcd}]_h^{-1} \cdot [I^{abcd}]_h \quad (4.69)$$

biçiminde hesaplanmıştır.

Burada, $[I^{abcd}]_h$ matrisi dağıtım sistemlerine bağlanan doğrusal olmayan yüklerin harmonik akımları ve dağıtım sistemlerinde transformatör gibi karakteristiği doğrusal olmayan elemanlar nedeniyle sistem uç denklemlerine kadar taşınmış harmonik akımlarından oluşmaktadır.

Burada, bara admitans matrisinin tersinin alınmasında işlem sayısı ve bellek ihtiyacını azaltmak amacıyla faktörlere ayırma yöntemi kullanılabilmekte olup, bu yöntemde, bara empedans matrisinin ihtiyaç duyulan sütunları, matrisin tümünün tersi alınmadan elde edilebilmektedir. Bununla ilgili bir algoritma EK B de verilmiştir.

Elektrik dağıtım sistemlerini besleyen iletim sistemlerini geriliminin harmonikli olması veya doğrusal olmayan bazı yüklerin harmonik gerilim kaynakları olarak

modellenmesi durumlarında admitans matrisi akım ve gerilim kaynaklarının bağlandığı baralar olarak gruplanarak,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_i^{abcd} \\ \mathbf{I}_v^{abcd} \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{ii}^{abcd} & \mathbf{Y}_{iv}^{abcd} \\ \mathbf{Y}_{vi}^{abcd} & \mathbf{Y}_{vv}^{abcd} \end{bmatrix}_h \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_i^{abcd} \\ \mathbf{V}_v^{abcd} \end{bmatrix}_h \quad (4.70)$$

biçiminde verilmektedir. Burada v ve i alt-indisleri gerilim ve akıma ait olduklarını göstermektedir.

Burada da akım harmonik kaynakları bakımında bir kısıtlama söz konusu değildir. Yani harmonik akım kaynaklarının tamamı a fazında harmonik gerilimlerinin tamamı b veya c fazında olabilir. Yada sadece üç fazlı bir harmonik kaynağı ve tek fazlı bir harmonik gerilim kaynağı olup diğer baralarda harmonik kaynakları olmaya bilmektedir.

Yukarıda verilen yaklaşım için harmonik kaynağı bulunmayan baraların gerilim kaynağı bulunan baralar grubuna dahil edilmesi tersi alınacak matris boyutunu küçültecektir.

Bilinmeyen bara harmonik gerilimleri ve akımları Denk. 3.70 kullanılarak,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_i^{abcd} \\ \mathbf{I}_v^{abcd} \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} [\mathbf{Y}_{ii}^{abcd}]^{-1} & -[\mathbf{Y}_{ii}^{abcd}]^{-1} \mathbf{Y}_{iv}^{abcd} \\ [\mathbf{Y}_{vi}^{abcd}] [\mathbf{Y}_{ii}^{abcd}]^{-1} & [\mathbf{Y}_{vv}^{abcd}] - [\mathbf{Y}_{vi}^{abcd}] [\mathbf{Y}_{ii}^{abcd}]^{-1} [\mathbf{Y}_{iv}^{abcd}] \end{bmatrix}_h \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_i^{abcd} \\ \mathbf{V}_v^{abcd} \end{bmatrix}_h \quad (4.71)$$

biçiminde elde edilmektedir. Çözüm, tüm harmonikler için tekrarlanmaktadır.

Burada verilen harmonik gerilim ve akımın kaynaklarının bağımlı kaynak olmaları durumunda, iteratif çözüm teknikleri kullanılmalıdır. Ancak sadece temel bileşen akım ve gerilimlerine bağımlılık olması gibi özel bir durumda temel bileşen yük akışı sonuçlarının kullanılması ile kaynaklar bağımsız kaynak olarak kullanılabilir.

5.Sistem baralarının temel bileşen ve harmonik gerilimlerinin elde edilmesi ile hatlarda harmonik akımlarının yayılımı, sistem ve hat kayıpları, akım ve gerilimlerin toplam harmonik bozulması (THD) hesap edilmektedir.

Bara harmonik gerilimlerinin belirlenmesi ile hatlardan akan harmonik akımları

$$\mathbf{I}_{jk} = \mathbf{Y}_{jk} \cdot (\mathbf{V}_j - \mathbf{V}_k) \quad (4.72)$$

biçiminde hesaplanmaktadır. Burada $(\mathbf{I}_{jk}, \mathbf{Y}_{jk})$ ve $(\mathbf{V}_j, \mathbf{V}_k)$ sırasıyla j ve k barası arasındaki admitansı ve elemandan akan akımı ve j. ve k. baralarındaki gerilimleri göstermektedir.

Çok-uçlu eleman olarak modellenmiş şebeke veya elemanlarının kayıplar

$$P_z = \sum_{h=1}^{h_{\max}} \operatorname{Re} \left\{ [\mathbf{V}^{abcd}]_h^* \cdot [\mathbf{Y}^{abcd}]_h \cdot [\mathbf{V}^{abcd}]_h^T \right\} \quad (4.73)$$

$$Q_z = - \sum_{h=1}^{h_{\max}} \operatorname{Im} \left\{ [\mathbf{V}^{abcd}]_h^* \cdot [\mathbf{Y}^{abcd}]_h \cdot [\mathbf{V}^{abcd}]_h^T \right\} \quad (4.74)$$

biçiminde hesaplanmaktadır. Burada, $[\mathbf{V}^*]_h$ çok-uçlunun h. harmonik uç gerilimlerinin kompleks eşleniklerinin oluşturduğu matristir.

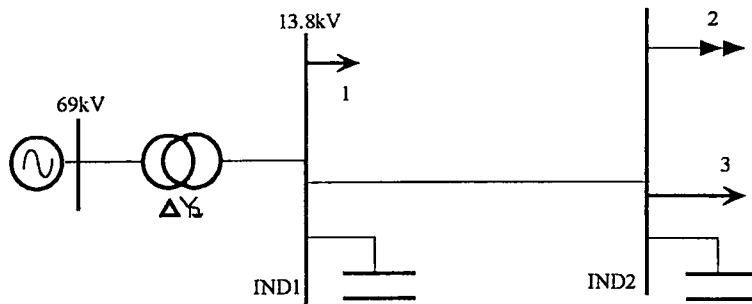
Elektrik dağıtım sistemlerinin harmonik bağımlı matematiksel modellerinin bu şekilde elde edilmesi ve analizi, paralel hesaplama algoritmalarına da çok uygun bir yaklaşımdır.

5. SAYISAL UYGULAMALAR

Bu tezde verilen yöntem ve geliştirilen algoritmaların geçerliliğinin kontrol edilmesi amacıyla, ilgili uluslararası test sistemleri kullanılarak yapılan sayısal uygulamalar aşağıda verilmiştir

Uygulama 1: İlk uygulamada dağıtım şebekelerini oluşturan elemanların modelleri, kompanzasyon için kullanılan kapasitesinin yerleri ve değerleri, transformatörlerin bağlama grupları ve hatlar arasındaki kuplajların şebekenin frekans cevabına etkisi, IEEE nin 3 baralı test sistemi kullanılarak incelenmiştir. Endüstriyel şebeke yapısındaki bu test sistemi, IND1 barasında motor ve pasif yük, IND2 barasında ise yine bir pasif yük ile birlikte harmonik akımları üreten doğrusal olmayan bir yük bulunmaktadır. Doğrusal olmayan yükün harmonik akım spektrumu Ek A da Tablo A.2 de verilmiş olup, sıfır bileşen harmonikleri olmaması ve bir harmonik kaynağı bulunması nedeniyle, sistem simetrik ve dengeli kabul edilerek tek fazlı analizleri yapılabilmektedir. IND1 ve IND2 baraları 3 fazlı 4 iletkenli kısa bir hatla bağlıdır. Sistem 69kV/13.8kV bir transformatör tarafından beslenmektedir. Tablo A.2 deki sistem verileri, baz gücü 10.000kVA, baz gerilimi 13.8kV kabul edilerek p.u. değerleri hesaplanmıştır.

Test sisteminin, <http://www.ee.ualberta.ca/pwrsys/IEEE/download.html>, adresinden veri ve çözümleri temin edilebilmektedir.



Şekil 5.1 IEEE 3 baralı endüstriyel test sistemi

Şekil 5.1 de verilen test sisteminin harmonik kaynağının bağlandığı IND2 isimli barada frekans cevabının incelenmesi için ele alınan on farklı durum Tablo 5.1 de ve bu test sisteminin verileri Tablo A.1 ve Tablo A.2 de verilmiştir.

Tablo5.1 Test sisteminin frekans cevabı incelemesi için farklı durumlar

Eleman isimleri	Eleman modelleri	Farklı durumlar									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Transformatör	A.1 *	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	A.2. *			✓							
Hat	A.3 *	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	A.4 *		✓								
Doğrusal olmayan yük	IND1 $R_p=2, X_p=3.227.h.i$				✓						
Kapasite	IND1 $C_1=0$ $XC_1=0.135i pu$ $XC_1=0.292pu$ $XC_1=0.620pu$ $XC_1=0.201pu$ $XC_1=0.481pu$ $XC_1=1.073pu$	✓	✓	✓	✓						
						✓					
							✓				
								✓			
									✓		
										✓	
											✓
	IND2 $C_2=0$ $XC_2=0.068pu$ $XC_2=0.193pu$ $XC_2=0.455pu$	✓	✓	✓	✓						
						✓					
							✓				
								✓			

* Farklı modeller EK-A da verilen eşitlik numaraları ile gösterilmiştir

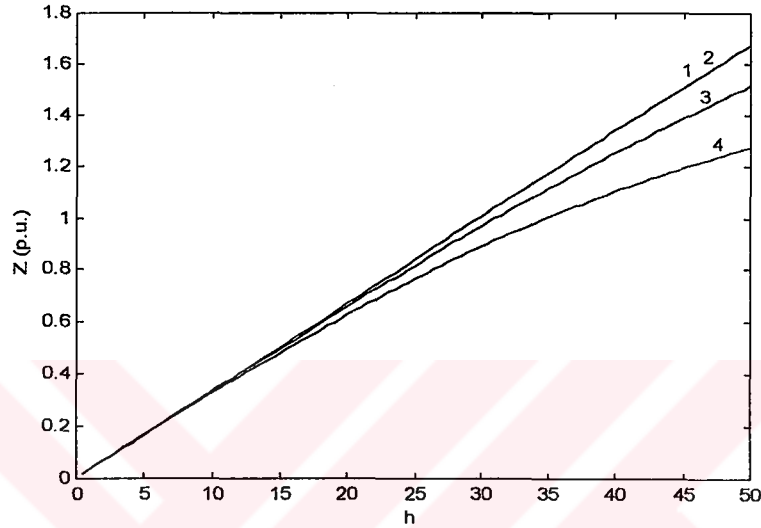
Burada, tüm durumlar için, şebekeyi besleyen kaynak sonsuz güçlü olarak kabul edilmiş, doğrusal yükler seri bağlı direnç ve reaktansları ile modellenmiştir. Motor için ise, rotoru bloke edilmiş halde ki durumda seri direnç ve reaktansları ile verilen bir motor modeli kullanılmıştır [11, 12, 13].

Kompanzasyon için kullanılan kapasitesinin yerleri ve değerleri, transformatörlerin farklı modelleri, hatlarda deri etkisi ve doğrusal olmayan yüklerin şebekenin frekans cevabına etkisini belirlemek amacıyla; doğrusal olmayan yükler ve kapasitelerin modellenmediği, transformatörün ve hattın deri etkisi ihmal edilerek seri bağlı direnç ve reaktans olarak modellendiği 1 durumu referans olarak alınmıştır. Şebekede yapılacak değişiklikleri farklı durumlar olarak verilmiş ve yapılan değişikliklerin etkisi 1 durumu ile kıyaslanarak yorumlanmıştır.

Şekil 5.2 de, 2 durumu 1 durumundan farklı olarak hattın deri etkisi göz önüne alınmış olup, inceleme sonucunda 1 ve 2 durumlarına ait grafiklerin üst üste geldiği yani, deri etkisinin şebekenin frekans cevabına ciddi bir etkisi olmamaktadır.

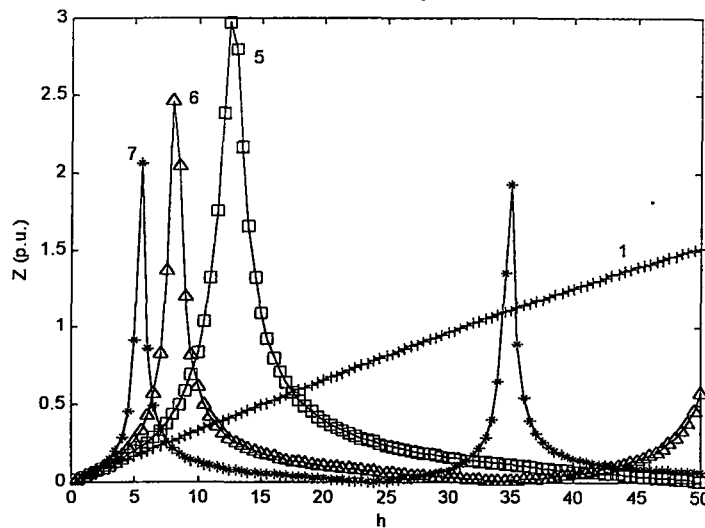
3 durumunda 1 durumundan farklı olarak transformatörün farklı bir modeli ele alınmış ve yapılan incelemede transformatör modellerinin şebekenin frekans cevabına etki ettiği görülmüştür.

4 durumunda 1 durumundan farklı olarak doğrusal olmayan yüklerin paralel direnç ve reaktans olarak elde edilen modelleri şebekeye ilave edilmiş ve yapılan incelemede doğrusal olmayan yükün şebeke frekans cevabına önemli miktarda etki ettiği, görülmüştür.



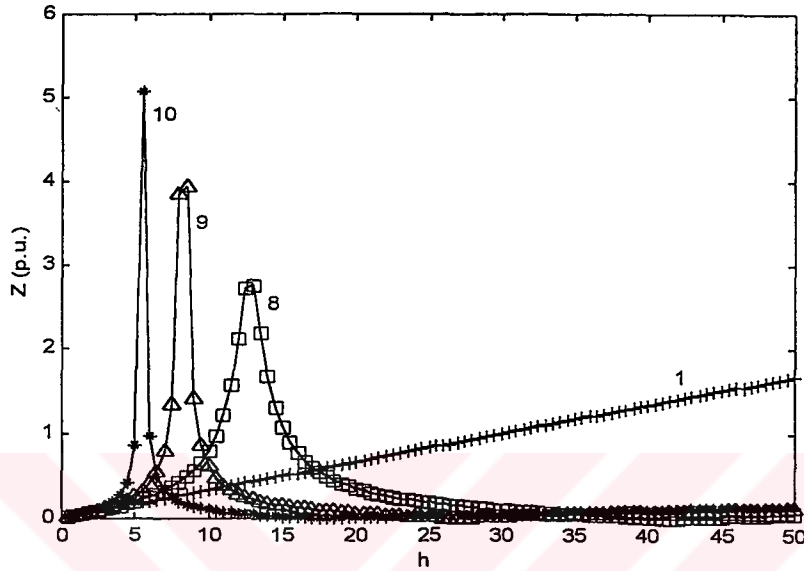
Şekil 5.2 Test sisteminin 1, 2, 3 ve 4 durumları için frekans cevabı

Şekil 5.3, IND1 ve IND2 baralarına bağlı doğrusal yüklerin $\cos \phi$ değerlerini 0.9, 0.95 ve 1.0 yapacak kapasitelerin bağlanmasının frekans cevabına etkisi sırasıyla durum 5, 6 ve 7 de inceleme sonucunu göstermektedir.



Şekil 5.3 Test sisteminin 1, 5, 6 ve 7 durumları için frekans cevabı

Şebekeye bağlanan kapasitelerin rezonans olayının ortaya çıkmasına neden oldukları ve değişen kapasite değerlerinin rezonans frekansının da değiştirdiği görülmektedir. 7. Durumda, 5. ve 35. harmonikler için rezonans durumu mevcut olup IND2 barasına bağlı doğrusal olmayan yükün 5. ve 35. harmonik akımları nedeniyle rezonans olayı gerçekleşecektir.



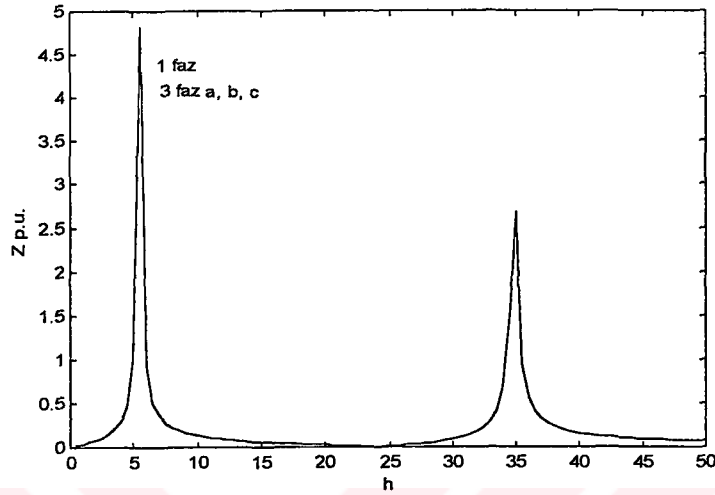
Şekil 5.4 Test sisteminin 1, 8, 9 ve 10 durumları için frekans cevabı

Şekil 5.4, IND1 ve IND2 baralarına bağlı doğrusal yüklerin $\cos \phi$ değerlerini 0.9, 0.95 ve 1.0 yapacak kapasitelerin IND1 barasına bağlanmasının frekans cevabına etkisi sırasıyla durum 8, 9 ve 10 durumlarının inceleme sonucunu göstermektedir. Burada Şekil 5.3 için yapılan değerlendirmeye ilave olarak kapasitelerin yerinin değişmesi ile şebekenin frekans cevabının da değiştiği görülmektedir.

Sonuç olarak, şebekenin bir fazlı olarak frekans cevabının belirlenmesinde eleman modellerinin etkileri, kompanzasyon kapasitelerinin yanında ihmal edilebileceği kompanzasyon kapasitelerini yerinin ve değerinin değiştirilmesi veya planlanması aşamasında doğrusal olmayan yük harmonikleri ve şebekenin frekans cevabına dikkat edilmesinin gerektiği görülmüştür.

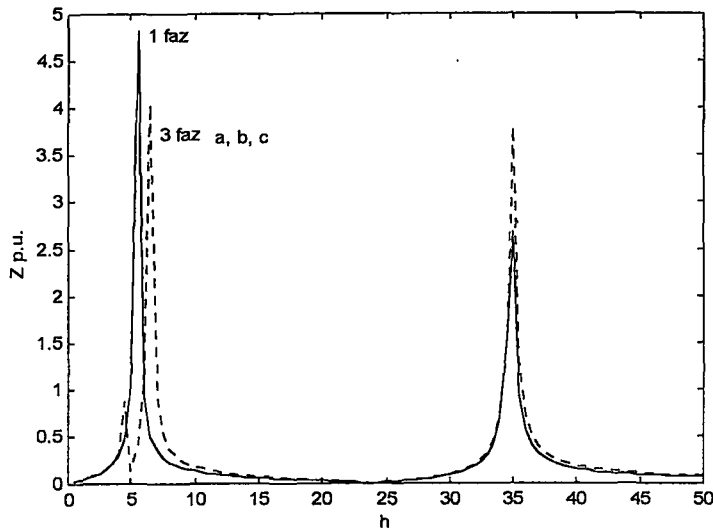
Aşağıda, üç fazlı simetrik elektrik enerji sistemlerinin, tek fazlı ve üç fazlı modellenerek frekans cevabının belirlenmesi karşılaştırmalı incelenmekte, ayrıca simetrik olmayan bir şebeke için de frekans cevabı belirlenmektedir. Transformatörlerin bağlama grupları ve hatlar arasındaki kuplajların simetrik yapıdaki şebekenin frekans cevabına etkisi üç fazlı incelemelere dahil edilmiştir.

Bir fazlı ve üç fazlı incelemeler IND1 ve IND2 baralarına bağlı yüklerin reaktif enerji ihtiyacını karşılayacak biçimde kondansatörlerin bağlandığı ve diğer tüm elemanların modellerinde bir değişiklik yapılmadığı kabulü ile bir ve üç fazlı olarak modellenmiştir.



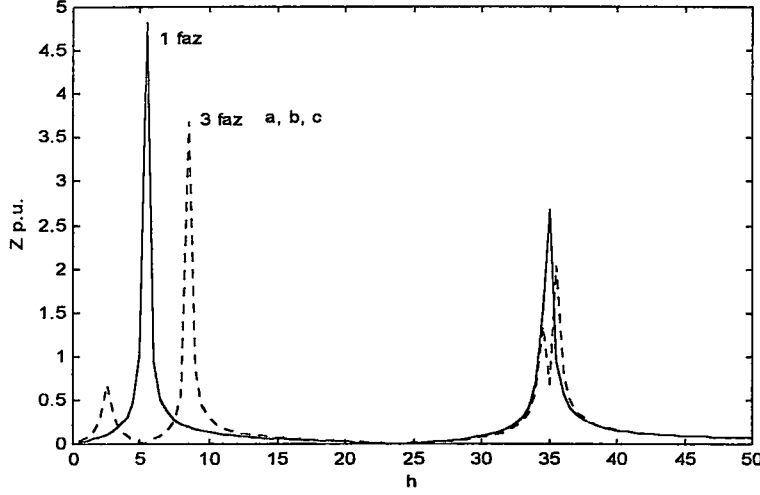
Şekil 5.5 Bir ve üç fazlı şebekenin frekans cevabı, transformatör yıldız (topraklı) / yıldız (topraklı) bağlı

Şekil 5.5 de görüldüğü gibi hatlar arasında kuplaj yoksa ve transformatör yıldız(topraklı)/yıldız(topraklı) bağlı olduğu kabulüyle, üç fazlı olarak yapılan inceleme sonucu üç fazlı sistemin her fazı için elde edilen çözüm ve bir fazlı olarak yapılan çözüm sonuçları beklendiği gibi aynı çıkmaktadır.



Şekil 5.6 Bir ve üç fazlı şebekenin frekans cevabı, transformatör yıldız (topraklı) / yıldız (topraklı) bağlı, hatları arasında kuplaj var

Hatlar arasında, faz empedanslarının (1/3) oranında kuplaj empedanslarının kullanılmasının sonucu elde edilen çözüm, Şekil 5.6 verilmiştir. Burada, hatlar arasında kuplaj olması durumunda bir fazlı çözümden farklı olduğu görülmüştür. Üç fazlı çözüm simetrik yapı nedeniyle beklendiği gibi yine aynı sonucu vermiştir.

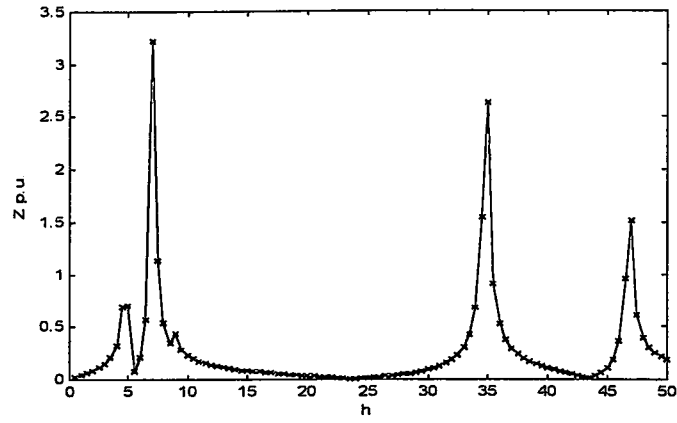


Şekil 5.7 Bir ve üç fazlı şebekenin frekans cevabı, transformatör yıldız (topraklı) / üçgen bağlı

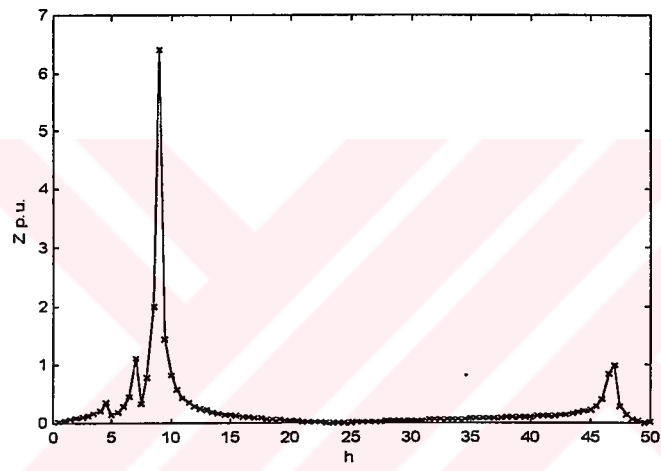
Şekil 5.7, kuplajsız hatlar ve yıldız(topraklı) / üçgen bağlı transformatör ele alınmış ve bağlama gruplarının frekans cevabına etkisini göstermektedir. Şekil 5.7 transformatörün üçgen bağlı sargılarının sistemi hatlar arasındaki kuplajların etkisine benzer biçimde etkilediği görülmüştür.

Şekil 5.7 de verilen test sisteminde, fazlar arasında (1/3) oranında kuplaj değerinin kabul edildiği durumda, IND2 barasında kompanzasyon kapasite değerleri a fazında $XC^a = 0.455i$ p.u, b fazında $XC^b = 0.068i$ ve c fazında $XC^c = 0.193i$ p.u olarak alınarak simetrik olmayan bir şebeke oluşturulmuş ve transformatör yıldız(topraklı)/yıldız(topraklı) biçiminde bağlı olması kabulü ile elde edilen fazların frekans cevabı Şekil 5.8 da verilmiştir.

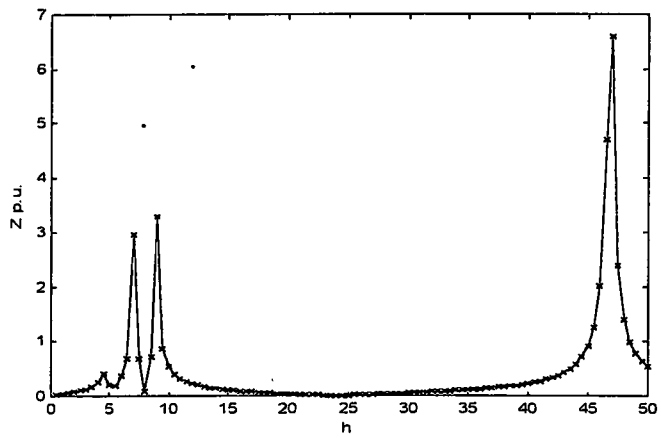
Şekil 5.8, simetrik yapıdaki şebekenin frekans cevabının fazlar için farklı olduğunu göstermesi, asimetrik şebekelerin üç fazlı olarak analiz edilmelerinin gerekli olduğunu göstermesi bakımından beklenen sonuçtur.



a)



b)



c)

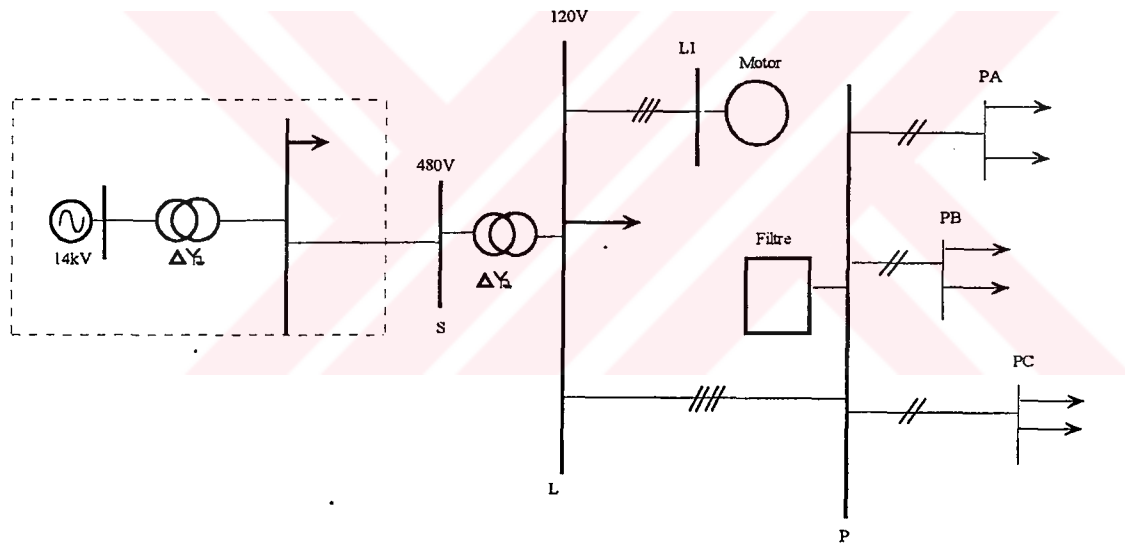
Şekil 5.8 Asimetrik yapıdaki 3 fazlı şebekenin frekans cevabı

- a) a fazı frekans cevabı
- b) b fazı frekan cevabı
- c) c fazı frekan cevabı

Barada yapılan frekans cevabı incelemelerinde fazlar arasındaki manyetik ve fiziksel bağların olması durumunda, üç fazlı olarak modellenen şebekede fazlardan biri için frekans cevabının belirlenmesi yeterlidir. Şebeke asimetrik yapıda ise üç fazlı olarak modellenmeli ve fazların her biri için ayrı ayrı frekans cevabı belirlenmelidir.

Uygulama 2: Burada, çok-fazlı dağıtım sistemlerinin modellenmesi ve analizi için, tezde verilen yaklaşım, IEEE tarafından bina dağıtım sistemleri için verilen harmonik test sistemine uygulanmıştır [112].

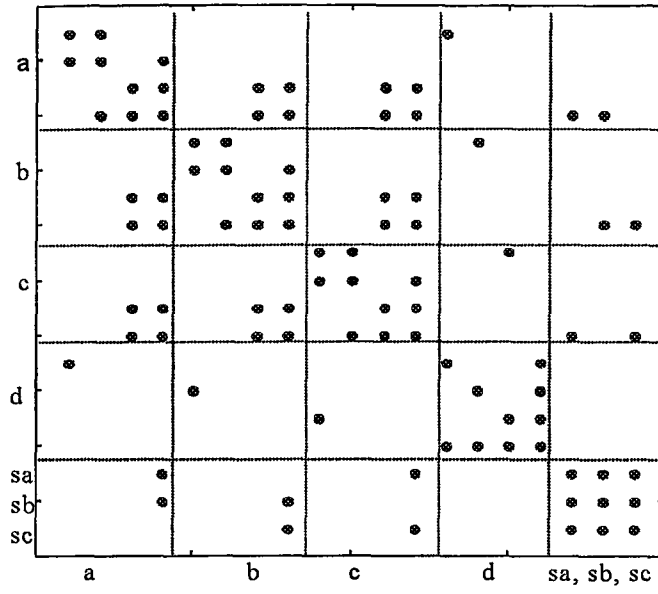
Simetrik yapıda olmayan ve dengesiz yapıda olan test sisteminde doğrusal olmayan yüklerin harmonik spektrumu sıfır, doğru ve ters sistem harmoniklerini içermektedir. Nötr iletkeni nedeniyle test sisteminin çok-fazlı olarak modellenmesi gerekmekte, ayrıca, birden fazla harmonik kaynağı bulunduğu için harmonik analizinde temel yük akışa gerek duyulmaktadır.



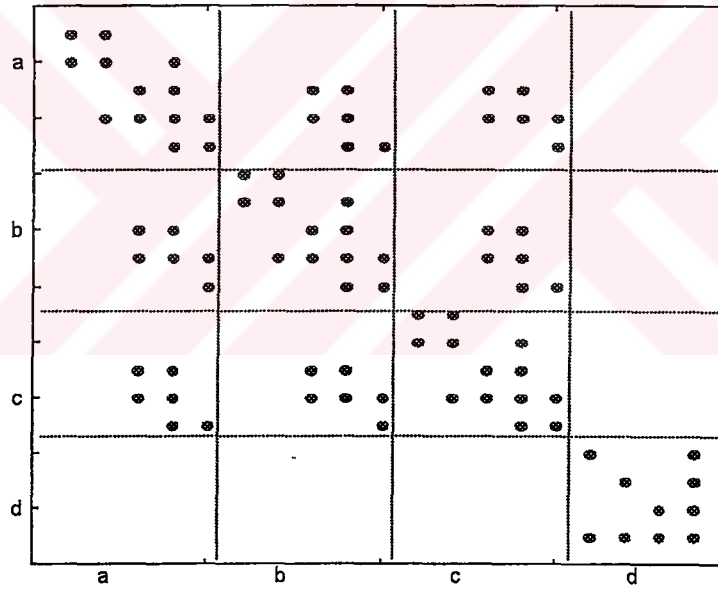
Şekil 5.9 IEEE bina dağıtım harmonik test sistemi

Test sistemi, tezde verilen yaklaşımla çok-fazlı, fazları gruplanarak sıralanmış, bir çok-uçlu eleman kavramı, faz bileşenleri ve seyrek matris yöntemleri kullanılarak elde edilen, temel bileşen admitans matrisi Şekil 5.10 (a) da ve test sistemine ait harmonik bağımlı admitans matrisi ise Şekil 5.10 (b) de verilmiştir.

Harmonik bağımlı admitans matrisinin, harmonik analizinde kullanılacak olmasından dolayı, gevşek baraları gösteren sa, sb ve sc baraları ayrıca gruplanmamıştır.



a)



b)

Şekil 5.10 Test sistemi bara admitans matrisi görüntüsü

a) Temel bileşen admitans matrisi

b) Harmonik bağımlı admitans matrisi

Şekil 5.9 da verilen test sistemine ilişkin temel bileşen admitans matrisi ve harmonik bağımlı admitans matrisinin seyrek matris yaklaşımı kullanılarak ihtiyaç duyulan bellek miktarı, seyrek matris yaklaşımı kullanmadan ihtiyaç duyulacak bellek miktarının yaklaşık $\frac{1}{4}$ mertebesinde dir.

Yeni yaklaşıma uygun olarak düzenlenmiş bir fazlı Gaus-Seidel yük akış yöntemi kullanılarak çok-fazlı şebeke için elde edilen faz ve nötr baralarının temel bileşen gerilimleri Tablo 5.2 de verilmiştir.

Tablo 5.2 Temel bileşen bara gerilimleri

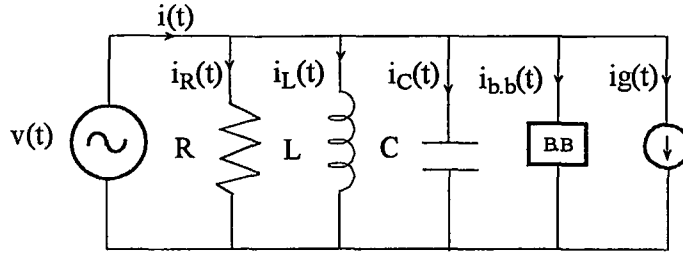
Fazlar Bara	İsmi	Gerilim (pu)
A	S	1,0000+0,0000
	L	0,9944-0,0240i
	L1	0,9939-0,0242i
	P	0,9860-0,0302i
	PA	0,9648-0,0456i
B	S	-0,5000-0,8660i
	L	-0,5168-0,8514i
	L1	-0,5166-0,8508i
	P	-0,5185-0,8416i
	PB	-0,5209-0,8270i
C	S	-0,5000+0,8660i
	L	-0,4504+0,8564i
	L1	-0,4721+0,8679i
	P	-0,4789+0,8713i
	PC	-0,4793+0,8717i
N	L	0,0000
	P	0,0170-0,0005i
	PA	0,0841+0,0336i
	PB	0,0152 -0,0437i
	PC	-0,0420+0,0357i

Tablo 5.3 Nötr akımı

Nötr akımı	
I_1	I
37,4A	173,16A

Tablo 5.3 de verilen I_1 , temel yük akışı sonucunda hesaplanan nötr akımıdır. I ise harmonik analizi sonucunda elde edilen harmonik akımları ve temel bileşen akımlarının toplam efektif değeridir. Test sisteminin çözümünden elde edilen nötr akımının temel bileşeni ile test sitemi için verilen sonuçları arasında var olan küçük fark, tek fazlı sabit güç yüklerinin admitans ile modellenmesinden kaynaklanmaktadır. Nötr iletkeninden geçen akımın efektif değerindeki fark ise sabit akım kaynağı ile yapılan harmonik güç akışının, temel güç akışı yapılarak, iyileştirilmesinden kaynaklanmaktadır. Nötr iletkeninden geçen akım dengeli bir sistemde sadece sıfır bileşen akımlarından, dengesiz bir sistemde ise dengesizlik miktarına bağlı olarak temel bileşen, sıfır, pozitif ve negatif bileşen harmonikleri akımları nötr akımını oluşturmaktadır. Nötr-toprak gerilimi nötr direnci ve akımına bağlı olup, nötr-toprak gerilimini azaltmak için her ikisi de azaltılmalıdır.

Uygulama 3. Burada bir fazlı, simetrik bileşen devreleri ve üç fazlı yüklerin modellenmesi için geliştirilen bir modelin uygulaması verilmektedir. Bir fazlı yük modeli eşdeğer devre Şekil 4.3 de verilmiştir.



Şekil.4.3 Bir fazlı yükün eşdeğer devresi

Bir fazlı yük modelleri: Bir fazlı yük uçlarında ölçme sonucunda belirlenen gerilim ve akım harmonik spektrumu ve Şekil 4.3 de verilen yük modeli eşdeğer devresinin parametreleri, ölçüm sonuçları kullanılarak geliştirilen bir fazlı yük modeli algoritmasıyla elde edilen sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.4 Bir fazlı doğrusal yükünün harmonik spektrumu ve yük modeli

Gerilim ve akımın harmonik spektrumu								
	1		3		5		7	
	Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)
V	1	0	-	-	-	-	-	-
I	1	-30	-	-	-	-	-	-
Yük modeli								
I _g	-	-	-	-	-	-	-	-
I _{b.b}	0	0	-	-	-	-	-	-
R	1,1547 p.u							
L	0,0053 p.u							
C	-							

Tablo 5.4 de verilen bir fazlı doğrusal yük modeli bu koşulda paralel bağlı direnç ve endüktanstan oluşmaktadır.

Tablo 5.5 Bir fazlı doğrusal olmayan yükünün harmonik spektrumu ve yük modeli

Gerilim ve akımın harmonik spektrumu								
	1		3		5		7	
	Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)
V	1	0	0,6	0	-	-	-	-
I	1	-30	0,25	60	-	-	-	-
Yük modeli								
I _g	-	-	-	-	-	-	-	-
I _{b.b}	0,1844	19,27	0,4205	133,63	-	-	-	-
R	1,4452 p.u							
L	0,006 p.u							
C	-							

Tablo5.5 de, bir fazlı doğrusal olmayan yükünün gerilim ve akım ölçümleri kullanılarak elde edilen modelinde, doğrusal yük modelinden farklı olarak elde edilen R ve L parametrelerinin yanında Ib.b akımı kaynağı da ortaya çıkmıştır.

Tablo 5.6 Gerilim harmoniklerinden farklı harmonik akımları olan bir fazlı yük ve modeli

	Gerilim ve akımın harmonik spektrumu							
	1		3		5		7	
	Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)
V	1	0	0,6	0	-	-	-	-
I	1	-30	0,6	30	0.05	30	-	-
Yük modeli								
Ig	-	-	-	-	0.05	30	-	-
Ib.b	0,0864	90	0.3676	90	-	-	-	-
R	1.1547 p.u							
L	0.0063 p.u							
C	$25 \cdot 10^{-6}$ p.u							

Tablo 5.6 bir fazlı doğrusal olmayan yükün gerilim akım ölçümleri ile yük modelinde reaktif enerji tüketen L ve üreten C elemanları birbirinden ayrı olarak elde edilebilmiştir. Bu yük modelinde Şekil 4.3 de gösterilen her iki harmonik akım kaynağı da ortaya çıkmıştır. Bu örnekte verilen gerilimin toplam harmonik bozulması %51.45 olarak verilmiştir. Böyle bir durum pratikte rastlanması pek mümkün olmayıp sadece durumu vurgulamak için alınmıştır.

Bir fazlı yük modelleri ile ilgili uygulamalar yukarıda verilmiştir. 3 fazlı-4 iletkenli yükler, faz akımları ve faz-nötr gerilim harmoniklerinin ölçülmesiyle belirlenebilecektir.

Simetrili bileşen yük modelleri: Üç fazlı yüklerin, bir fazlı yükler için verilen algoritma ile modellenebilmesi için faz akımları ve gerilimin simetrili bileşen ani değerlerinin elde edilmesi ile sıfır, pozitif ve negatif bileşen devreleri yük modelleri elde edilebilecektir. Bu modeller simetrili bileşen yöntemi ile yapılan analizlerde kullanılabileceği gibi dönüşümle faz bileşenleri matematiksel modelleri elde edilebilecektir.

Tablo 5.7 de üç fazlı doğrusal dengeli yük modeli simetrili bileşen devreleri için verilmiş olup dengeli olması nedeniyle beklendiği gibi sadece doğru bileşen devresinde yük modeli elde edilmiştir. Yük modeli pozitif bileşen devresinde paralel bağlı direnç ve endüktanslardan ibarettir.

Tablo 5.7 3-fazlı dengeli doğrusal yükün harmonik spektrumu ve yük modeli

		Gerilim ve akımın harmonik spektrumu							
		1		3		5		7	
		Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)
A	V	1	0			-	-	-	-
	I	1	-30			-	-	-	-
B	V	1	-120						
	I	1	-150						
C	V	1	120						
	I	1	90						
Yük modeli									
0	Ig	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ib.b	-	-	-	-	-	-	-	-
	R	-							
	L	-							
	C	-							
1	Ig	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ib.b	0	0	-	-	-	-	-	-
	R	1.1547 p.u							
	L	0.0053							
	C	-							
2	Ig	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ib.b	-	-	-	-	-	-	-	-
	R	-							
	L	-							
	C	-							

Tablo 5.8. 3 fazlı dengeli doğrusal olmayan yükünün harmonik spektrumu ve yük modeli

		Gerilim ve akımın harmonik spektrumu							
		1		3		5		7	
		Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)
A	V	1	0	0.6	0	-	-	-	-
	I	1	-30	0.25	60	-	-	-	-
B	V	1	-120	0.6	0				
	I	1	-150	0.25	60				
C	V	1	120	0.6	0				
	I	1	90	0.25	60				
Yük modeli									
0	Ig	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ib.b	0	0	0	0	-	-	-	-
	R	4.8 p.u							
	L	-							
	C	$3.1906 \cdot 10^{-4}$ p.u							
1	Ig	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ib.b	0	0	0	0	-	-	-	-
	R	1.1547 p.u							
	L	0.0053 p.u							
	C	-							
2	Ig	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ib.b	0	0	0	0	-	-	-	-
	R	-							
	L	-							
	C	-							

Tablo 5.9 Gerilim harmoniklerinden farklı akım harmonikleri olan üç fazlı dengeli doğrusal yükün harmonik spektrumu ve yük modeli

		Gerilim ve akımın harmonik spektrumu							
		1		3		5		7	
		Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)
A	V	1	0	0.6	0	-	-	-	-
	I	1	-30	0.6	30	0.05	30	-	-
B	V	1	-120	0.6	0	-	-	-	-
	I	1	-150	0.6	30	0.05	-210	-	-
C	V	1	120	0.6	0	-	-	-	-
	I	1	90	0.6	30	0.05	170	-	-
Yük modeli									
0	Ig	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ib.b	-	-	-	-	-	-	-	-
	R	1,1547 p.u							
	L	-							
	C	$4,421.10^{-4}$ p.u							
1	Ig	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ib.b	0	0	0	0	-	-	-	-
	R	1.1547 p.u							
	L	0,0053 p.u							
	C	-							
2	Ig	-	-	-	-	0.05	30	-	-
	Ib.b	0	0	0	0	-	-	-	-
	R	-							
	L	-							
	C	-							

Tablo 5.10 Gerilim harmoniklerinden farklı akım harmonikleri olan üç fazlı dengesiz doğrusal yükün harmonik spektrumu ve yük modeli

		Gerilim ve akımın harmonik spektrumu							
		1		3		5		7	
		Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)	Genlik (pu)	Açı (°)
A	V	1	0	0.1	0	0.1	0	-	-
	I	1	-30	0.5	40	0.2	-50	0.01	100
B	V	0,9	-120	0.15	0	0.10	120	-	-
	I	1,1	-155	0.35	120	0.20	-30	0.015	-50
C	V	1,1	120	0.1	0	0,16	-120	-	-
	I	0.8	75	0.45	60	0.20	180	0.10	140
Yük modeli									
0	Ig	-	-	-	-	-	-	0,031	137,64
	Ib.b	0.1364	56,3	0.0555	3.139	0,109	115,56	-	-
	R	1,1658 p.u							
	L	-							
	C	0.0023 p.u							
1	Ig	-	-	-	-	-	-	0,0378	30,84
	Ib.b	0,0017	13,72	0,20	42,69	0,082	75,90	-	-
	R	1,2888 p.u							
	L	0,0047 p.u							
	C	-							
2	Ig	-	-	-	-	-	-	0,0324	110,37
	Ib.b	0,1443	63,90	0,1428	48,61	0,143	82,59	-	-
	R	-							
	L	0,3578 p.u							
	C	-							

Tablo 5.8 de de üç fazlı doğrusal olmayan dengeli yük modeli simetrik bileşen devreleri için verilmiştir. Sıfır bileşen harmonikleri için sıfır sistem yükü, pozitif sistem harmonikleri için de pozitif bileşen yük modelleri elde edilmiştir. Sıfır bileşen devresi yük modeli paralel bağlı direnç ve kapasiteden oluşurken, pozitif bileşen yük modelleri paralel bağlı direnç ve endüktans olarak elde edilmiştir.

Tablo 5.9 de üç fazlı doğrusal olmayan dengeli yükün gerilim harmoniklerinden farklı olarak 5. Harmonik akımları da mevcut olup, bu akımlar negatif bileşen yük modellerinde akım kaynağı olarak görünmektedir. Sıfır bileşen yük modeli R ve C, pozitif bileşen yük modeli için R ve L elde edilmiştir. Sıfır bileşen devreleri kapasitif özellikte bir yük olarak modellenirken, pozitif bileşen yükü endüktif karakteristikte bir model elde edilmiştir. Simetrik bileşen modelleri kullanılarak faz bileşenleri modelleri de bölüm 4 de verilen algoritma ile kolayca elde edilebilmektedir.

Tablo 5.9 da 3 fazlı yükün simetrik bileşen modeli verilmiştir. Bu yükün referans toprak olmak üzere yıldız uç-graf için faz bileşenleri uç-denklemleri 5. harmonik için verilmiş olup istenen harmonik derecesi için uç-denklemler elde edilebilir. Yükün faz bileşenleri modeli için literatürdeki eşdeğer devre modelinin verilmesi burada mümkün değildir. Bu model ancak, matematiksel model yaklaşımı kullanılarak elde edilip harmonik analiz çalışmalarında kullanılabilecektir. Tablo 5.9 da verilen simetrik bileşen yük modeli kullanılarak 5. harmonik için üç fazlı yükün uç-denklemleri Denk.5.1 de p.u olarak elde edilmiştir. Faz bileşenleri ile yükün matematiksel modeli istenen harmonik dereci için elde edilebilecektir.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}^a \\ \mathbf{I}^b \\ \mathbf{I}^c \end{bmatrix}_5 = \begin{bmatrix} 0,6107-i0,2778 & 0,1277-i0,5567 & 0,1277+i0,001 \\ 0,1277+i0,001 & 0,6107-i0,2778 & 0,1277-i0,5567 \\ 0,1277-i0,5567 & 0,1277+i0,001 & 0,6107-i0,2778 \end{bmatrix}_5 \begin{bmatrix} \mathbf{V}^a \\ \mathbf{V}^b \\ \mathbf{V}^c \end{bmatrix}_5 + \begin{bmatrix} 0,433+i0,025 \\ 0,433+i0,025 \\ 0,433+i0,025 \end{bmatrix}_5 \quad (5.1)$$

Tablo 5.10 da verilen üç fazlı doğrusal olmayan yükün gerilim ve akımları dengesiz ve harmoniklidir. Üç fazlı doğrusal olmayan bir yükün dengesiz ve doğrusal olmayan gerilimle beslenmesi durumuna karşılık gelen bu ölçüm sonuçları kullanılarak simetrik bileşen yük modelini vermek mümkün olmuştur. Simetrik bileşen yük modelleri kullanılarak faz bileşenleri matematiksel modelleri de elde edilebilecektir.

Tablo 5.10 de verilen sıfır bileşen yük modeli R, C ve akım kaynağından, pozitif bileşen yük modeli R, L ve akım kaynağından ve negatif bileşen yük modeli sadece L ve akım kaynağı olarak elde edilmiştir.

Geliştirilen yük modeli ile yüklerin, dengesizliklerine, doğrusal, doğrusal olmayan ve genel yük oluşlarına, sinüsoidal olmayan gerilimle beslenmelerine, bir fazlı veya üç fazlı olmaları durumlarına matematiksel model yaklaşımı ile cevap verebilmektedir.



6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tezde, dağıtım şebekelerinin 3 fazlı harmonik analizi ve bu analizin gereği olan eleman ve sistem modellerinin elde edilmesi için yeni bir algoritmanın verilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, harmonik bağımlı modeller, farklı harmoniklere ait şebekeler arasındaki kuplajlar ihmal edilerek, modern devre teorisinde çok iyi bilinen çok-uçlu eleman kavramı kullanılarak verilmiştir.

Bilindiği gibi, çok-uçlu eleman tanımı gereği, alınan elektrik devreleri arasında bir bağ (kuplaj) varsa, bir bütün olarak, yani bir çok-uçlu eleman olarak modellenmesi gerekmektedir. Üç fazlı elektrik enerji sistemlerinin fazları arasında, genellikle, elektromanyetik (kuplaj) bağlar bulunması nedeniyle bu eleman ve sistemler üç fazlı olarak ele alınmış ve çok-uçlu modelleri verilmiştir. Üç fazlı elektrik enerji sistemlerinde fazlar arasında kuplaj olmaması halinde ise, her fazı ayrı bir çok-uçlu olarak modellemekte ve bir fazlı analiz mümkün olmaktadır.

Bu çalışmada, enerji sistemlerinin üç fazlı analizinde harmonik bağımlı modeller çok-uçlu eleman kavramı yardımı ile ve yeni bir yaklaşımla elde edilmiştir.

Bu yaklaşımda, her fazın kendi içinde ve diğer fazlardan yalıtılmış bir devre oluşturduğu fiziksel gerçeğinden yola çıkılmış, her türlü kuplaj ve topoloji yapılarına cevap veren genel bir şebeke modeli verilmiştir.

Bu yolla önce, 3-fazlı bir hat veya sadece hatlardan oluşan bir şebeke göz önüne alınmış ve herhangi bir kısıtlama getirmeden, fazların farklı topolojilerde olabilmesine de cevap veren, harmonik bağımlı matematiksel modeller kolayca elde edilmiştir. Burada elde edilen matematiksel model, her faz ve fazlar arasında kuplajları gösteren, $B^T \cdot Y_p \cdot B$ biçiminde bir matris işlemi sonucu elde edilen dokuz alt matristen oluşmaktadır.

Üç fazlı hat veya sadece hatlardan oluşan üç fazlı bir şebekenin primitif bağıntılarının simetrik olması ve her fazın aynı topolojide olması durumunda, $(3n \times 3n)$ boyutunda bara admitans matrisi $B^T.Y.B$ biçiminde $(n \times n)$ boyutunda iki alt matris hesabı ile elde edilebilmesi bu yeni yaklaşımın, işlem sayısının azaltılması bakımından, bir getirisiidir.

Çalışmada, bir fazlı faz dönüştürücü transformatörün, faz kaymaları, genlik değişimi ve mıknatıslanma akımının harmoniklerini de içeren harmonik bağımlı modeli 5-uçlu eleman olarak elde edilmiştir.

Matematiksel modelleri belirlenen bir fazlı transformatörlerin, kendi aralarında, bağlama grubuna uygun biçimde, bağlanması ile ortaya çıkan üç fazlı transformatörlerin matematiksel modelleri, üçgen bağlamadan kaynaklanacak faz kaymaları, bir fazlı transformatörlerin 5-uçlu matematiksel modellerine dahil edilerek verilmiştir.

Ortak demir çekirdekli (faz sargıları arasında kuplaj bulunan) üç fazlı, faz kaydırıcı transformatörlerin çok-uçlu matematiksel modeli, genel halde, fazların çevirme oranları da farklı kabul ederek, şebeke kuplajı ve yapısal bir kısıtlama olmaksızın, mıknatıslama akımı harmonikleri ihmal edilmeden, bir algoritma ile verilmiştir. Yaklaşımın bir sonucu olarak, bu modellerin elde edilişinde, yaygın bağlama grupları için, tanım bağıntıları ve temel çevre bağıntılarında fazlara ve bağlama grubuna ait bilgiler, işlemsel ve görsel bir sistematik içinde verilmiştir.

Elektrik enerji sistemlerinin bir fazlı, 3 fazlı ve simetrik bileşen yöntemi modelleri, bir takım eşdeğer devrelerin verilmesine gerek kalmadan çok-uçlu elemanların harmonik bağımlı matematiksel modelleri olarak verilmiştir. Bu yolla, üç fazlı transformatörlerde bağlama grubundan kaynaklanan faz kaymaları içeren eşdeğer devrelerinin verilmesinde yaşanan sıkıntı, çok-uçlu eleman ve matematiksel model yaklaşımı kullanılarak aşılmıştır.

Bu çalışmada, bir ve üç fazlı transformatör modelleri, genel olması bakımından faz kaydırıcı transformatörler için verilmiştir.

Senkron generatörlerin, temel bileşen ve harmonik bağımlı matematiksel modelleri harmonik gerilimleri üretmediği kabulü ve doğrusal olmayan davranışı nedeniyle

ortaya çıkan harmonik akımları, sabit akım kaynağı olarak temsil edilerek, bu yaklaşımla yeniden verilmiştir.

Elektrik enerji sistemlerini oluşturan elemanların çok-uçlu matematiksel modelleri belirlendikten sonra, çok-uçluların birbiri ile sistemi oluşturacak biçimde elemanların aralarında bağlanmaları ile oluşan enerji sistemi için de bir çok-uçlu matematiksel model verilmiştir.

Faz bileşenleri ile verilen harmonik bağımlı sistem modelleri, harmoniklerin temel frekansın tam katları olmadığı durumlarda da, harmonik analizine imkan vermektedir.

Tez de ayrıca, çok-uçlu olarak modellenen bir elektrik enerji sisteminin analizinde, mevcut bir fazlı analiz algoritmalarından faydalanarak üç fazlı analiz yapılabilmesi amacıyla gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Bu amaçla, bir fazlı güç akışı için verilen Newton-Raphson güç akışı algoritmasında gerekli düzenlemeler yapılmış ve Newton-Raphson güç akışı algoritması ile çok-fazlı yük akışı analiz algoritması açıklanmıştır. Bu algoritma, fazlara ait bara sayılarının farklı olması durumuna ve nötr iletkeninin dördüncü bir faz gibi ele alınarak yük akışı çözümüne imkan vermesi açısından daha geneldir. Yeniden düzenlenen Newton-Raphson yük akışı algoritmasının iletim sistemlerinde kullanılmasına imkan sağlamak amacıyla, generatör uç gerilimlerinin dengesiz yüklenme nedeniyle, farklı olabileceğini de kapsama alınarak, Jacobian' e generatörlerle ilgili olarak da hata denklemleri ilave edilmiştir.

Bu çalışmada, dağıtım sistemlerinin çok-fazlı harmonik analizi için, temel yük akışı sonuçlarını kullanan, sabit akım kaynağı metodu seçilmiştir. Dağıtım sistemlerinde güç akışında, Newton-Raphson temel güç akışı algoritmasının, bazı uygulamalarda, ikinci sayısal uygulamada olduğu gibi, ıraksaması nedeniyle, tezde Gaus-Seidel yöntemi tercih edilmiştir. Gaus-Seidel yöntemi ile, çok-fazlı temel yük akışından elde edilen bara gerilimlerini kullanan, çok-fazlı bir harmonik güç akışı algoritması verilmiştir.

Literatürde, yük uçlarında yapılan gerilim ve akım ölçümlerine dayalı olarak bir fazlı yüklerin modellenmesi için verilen algoritma, direncin negatif olması durumuna da cevap verebilecek biçimde geliştirilmiştir. Böylece, 3 fazlı yüklerin simetrik bileşen

yük modelleri bu yüklerin modellenmesi için verilen algoritma ile verilebilmiştir. Elde edilen simetrik bileşen yük modelleri ile, 3 fazlı, doğrusal ve doğrusal olmayan yükler ile genel yüklere ait 4-üçlünün matematiksel modeli için bir algoritma verilmiştir. Üç fazlı yükler için bağlanma grubundan bağımsız olarak, burada elde edilen matematiksel modellerin verilmesi dengesiz ve sinüsoidal olmayan gerilimlerle beslenen, 3 fazlı yük için verilmesi her zaman mümkün olmayan eşdeğer devreler yerine bir çok-üçlü ve matematiksel model verilebilmektedir.

Bir fazlı yükleri temsil eden bir eşdeğer devre elemanının parametrelerin hesaplanması yaklaşımı ile matematiksel model yaklaşımının birlikte kullanılması sonucu, modellenmesinde ciddi sıkıntı yaşanan, 3 fazlı yükler için de bir matematiksel model verilmiştir.

Genel yüklerin modellenmesi için önerilen algoritmanın bir uygulaması yapılarak elde edilen sonuçların literatür sonuçları ile uyumlu olduğu gösterilmiştir. Bir ve üç fazlı yükler için verilen modeller kullanılmasıyla kompanzasyon kapasitelerinin seçimi daha doğru olarak yapılabilmekte ve genel yüklerin şebeke frekans cevabına etkisi belirlenebilmektedir.

Sabit harmonik kaynağı metodu ile dağıtım şebekelerinin çok-fazlı harmonik analizini gerçekleştirmek için verilen çok-üçlü eleman kavramı ile harmonik bağımlı modellerin elde edilmesi ve temel yük akışı sonuçlarını kullanan algoritmanın bir uygulaması, IEEE nin bina elektrik dağıtım sistemi için verdiği çok-fazlı test sistemi üzerinde yapılmıştır.

Nötr iletkeninden geçen harmonik akımların, dengesiz yükler nedeniyle geçen akımlardan, fazla olması nedeniyle, 3 fazlı hat ve kabloların nötr iletken kesit seçiminde, harmoniklerin göz önünde bulundurulmasını kaçınılmaz yapmaktadır.

Nötr iletkeninden geçen harmonik akımlarının, alçak gerilim sistemlerinde kompanzasyon amacıyla kullanılan, üçgen bağlı, kapasitelerin gereksiz yere yüklenmesine ve bu yüklenmenin nominal değerlerin üzerinde olması durumunda sistemde ilave kayıplara ve çeşitli arızalara neden olacağı açıktır.

Tez de, eleman modelleri ve bağlantı biçimlerinin elektrik enerji sistemlerinin frekans cevabına etkisi de incelenmiştir. Eleman modellerinin, elemanların bağlantı gruplarına bağlı olarak değişmesi nedeniyle; bağlantı gruplarının rezonans frekansına etkileri incelenmiş ve üç fazlı simetrik şebekelerin frekans cevabının, tek fazlı model çözümleri ile belirlenmesinin, her zaman, doğru olmayacağı, incelemenin üç fazlı modeller kullanılarak fazlardan biri için yapılmasının yeterli olacağı, simetrik olmayan üç fazlı şebekelerin frekans cevabının ise üç fazlı olarak elde edilmiş modeller yardımı ile her faz için ayrı ayrı yapılmasının gerektiği gösterilmiştir.

Kompanzasyon kondansatörlerinin yer ve değerlerinin rezonans frekansına etkisi incelenmiş ve kompanzasyon tesislerinin tasarımında veya kompanzasyon miktarının azaltılıp/artırılmasında rezonans durumunun göz önüne alınması gerekliliği, yapılan farklı durum analizleriyle, gösterilmiştir. Kompanzasyon tesislerinin yerinin rezonans frekansına etkisi için yapılan incelemede kompanzasyon sistemlerinin yerlerinin değiştirilmesinin de rezonans için bir çözüm olabileceği gösterilmiştir.

Elektrik enerji sistemlerinde, gerçek durumu yansıtmayan ve çok sayıdaki kısıtlayıcı kabuller ile yapılan tek fazlı harmonik analizler, günümüz bilgisayar teknolojisi imkanları ile bu kabullerden uzaklaşarak, gerçek sisteme en yakın modellerle yapılma eğilimine girilmiştir. Gerçek sistem üzerinde çalışma düşüncesinin bir parçası, elektrik enerji sistemlerinin faz bileşenleri yöntemiyle ve 3 fazlı olarak modellenmesi ve analiz edilmesidir. Bu amaçla, büyük boyutlu elektrik dağıtım sistemlerinin 3 fazlı harmonik analizinde bellek ihtiyacı ve işlem sayısını azaltıcı yöntem arayışı çalışmalarına devam edilmelidir. Bunun yanında, işlem yükünü farklı bilgisayarlara dağıtarak hız kazanma yönünde paralel hesaplama yöntemlerine de ağırlık verilmelidir.

Bu çalışmada verilen matematiksel modeller ve nitelikleri, elektrik enerji sistemleri ve elemanlarının, sinüsoidal ve sinüsoidal olmayan durumlarda, bir fazlı, üç fazlı veya simetrik bileşenler yöntemi ile modellerinin elde edilmesinde çok-uçlu eleman kavramı yaklaşımından daha fazla yararlanılması gerektiği ortaya çıkmıştır.

Genel yük olarak ele alınabilen bina yüklerinin matematiksel modellerinin, gerilim ve akım ölçümleri kullanılarak verilen algoritma ile elde edilmesi yararlı, ancak, dağıtım sistemindeki bina sayısı göz önünde alındığında bunun imkansız olmasa bile,

çok zor ve maliyeti yüksek bir çalışma olacağı, bu nedenle binaların tümünde ölçme yapılmasından kaynaklanan sıkıntının giderilmesi için, ölçüm sayısını azaltıcı yaklaşımların araştırılması faydalı olacaktır.

Dağıtım sisteminde bulunan bina yüklerini belirli sınıflara ayırarak ölçüm yapılması, yük gerilim ve akımlarının zamanla değişmesinin modellerde meydana getireceği değişimler için bir sınır belirlenmesi ölçüm sayısını azaltıcı bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir.

Burada yapılan çalışmanın devamında, çok fazlı elektrik dağıtım sistemlerinin faz bileşenleri ile harmonik bağımlı modellerinin elde edilmesi ve harmonik analizi için tezde verilen algoritmaları kullanan bir bilgisayar programının hazırlanması, düşünülmektedir.



KAYNAKLAR.

- [1] **Arrillaga, J., Bradley, D.A.**, 1985. Power System Harmonics, John Wiley & Sons, London.
- [2] **Dugan, R.C., McGranaghan, M.F.**, 1996. Electrical Power System Quality, McGraw-Hill, New York.
- [3] **IEEE Task Force**, 1985. The Effects of Power System Harmonics on Power System Equipment and loads, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 104, No.9, 2555-2563.
- [4] **IEEE Task Force**, 1993. Effects of Harmonics on Equipment, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 8, No. 2, 672-680.
- [5] **Henderson, R.D., Rose, P.J.**, 1994. Harmonics: The effects on Power Quality and Transformers, *IEEE Trans. On Industry Application*, 30, No. 3, 528-532.
- [6] **Koval, D. O.**, 1997. Power Quality Characteristics of Computer Loads, *IEEE Trans. Ind. Application*, 33, No. 3, 613-620.
- [7] **Gruzs, T. M.**, 1990. A survey of Neutral Currents in Three-phase Computer Power Systems, *IEEE Trans. On Industry Application*, 26, No. 4, 719-725.
- [8] **Horton, W. F., Goldberg, S.**, 1985. The Effects of Harmonics on Electromechanical Relays, *IEEE Trans. on Power Apparatus. and Systems*, 104, No. 5, 1178-1186.
- [9] **Haskew, T.A., Ray, J., Horn, B.**, 1997. Harmonic Filter Design and Instalation: A Case Study with Resonance, *Electric Power Systems Research*, 40, 121-125.
- [10] **Makram, E.B., Subramaniam, E.V.**, 1993. Harmonic Filter Design Using Actual Recorded Data, *IEEE Trans. On Industry Application*, 29, N0.6, 1176-1183.
- [11] **Task force on Harmonics Modeling and Simulation**, 1996. The Modeling and simulation of the propagation of harmonics in Electric Power Networks Part I: Concepts, model and simulation Techniques, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 11, No.1, 452-465.
- [12] **IEEE Power Engineering Society**, 1998 Tutorial on Harmonic Modelling and Simulation, IEEE Catalog number: 98TP125-0, Piscataway.
- [13] **CIGRE Working Group 36-05**, 1981. Harmonics, Characteristics Parameter, Methods of Study, Estimates of Existing Values in the Network, *Electra*, No.77, 35-54.
- [14] **Brigham, E.O.**, 1974. The Fast Fourier Transform, Prentice-Hall, New York.

- [15] George, T.A., 1991. Harmonic Power Determination Using The Fast Fourier Transform, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 530-535.
- [16] Shepherd, W., Zond, D., 1978. Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Circuits, Cambridge University Press, Cambridge.
- [17] W. Xu, Drakos, J., Mansour, Y., Chang, A., 1994. A Three Phase Converter Model for Harmonic Anaysis of HVDC Systems, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 9, No.4, 1724-1731.
- [18] Dommel, H.W., Yan, A. and Shi, W., 1986. Harmonics from Transformer Saturation, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1, No.2, 209-215.
- [19] Dugan, R.C., 1989. Simulation of Arc Furnace Power Systems, *IEEE Trans. on Industry Application*, 16, No.6, 813-818.
- [20] Gül, Ö., Kaypmaz, A., 1998. Effect of Power Quality on Control Systems Capability" *The 2nd International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems*, Sakarya, Türkiye, Ağustos, 1045-1051.
- [21] IEEE Standard 519, 1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
- [22] Emanuel, A.E., 1990. Powers in Non-sinusoidal Situations -A Review of Definitions and Physical Meaning, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 5, No.3, 1377-1389.
- [23] Emanuel, A.E., 1993. On the Definition of Power Factor and Apparent Power in Unbalanced Polyphase Circuits, *IEEE Trans.on Power Delivery*, 8, No.3, 841-852.
- [24] Ferrero, A., Superti-Furga, G., 1991. A new Approach to the Definitions of Power Components in Three-Phase Systems," *IEEE Trans. on Inst. & Meas.*, 40, No.3, 568-577.
- [25] Czarnecki, L., 1987. What is wrong with the Budeanu Concept of Reactive and Distortion Power and why it should be Abandoned," *IEEE Trans.on Inst.&Meas.*, 36, N0.4, 834-837.
- [26] Watanabe, E.H., Stephan, M., 1993, New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 8, No.2, 697-703.
- [27] Nabae, A., Tanaka, T., 1996. A new Definition of Instantaneous Active-Reactive current and Power Based on Instantaneous Space Vectors on Polar Coordinates in Three-Phase Circuits, *IEEE Trans.on Power Delivery*, 11, No.3, 1238-1243.
- [28] IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations, 1996. Practical Definitions for Powers in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion, *IEEE Trans.on Power Delivery*, 11, No.1, 79-87
- [1] Gül, Ö., Kaypmaz, A., 1998, Power Components In Unbalanced and Distorted Polyphase Systems", *Melecon'98 conference*, 18-20 Mayıs, Tel-Aviv, 1004-1007

- [30] **Australian Standard AS 2279.1**, 1991. Disturbances in Mains Supply Network, Part 1: Limitation of Harmonics Caused by Household and similar Electrical Appliances.
- [31] **Australian Standard, AS 2279.2**, 1991, Disturbances in Mains Supply Network, Part 2: Limitation of Harmonics Caused by Industrial Equipment.
- [32] **Australian Standard, AS 2279.3**, 1991, Disturbances in Mains Supply Network, Part 3: Limitation of Voltage Fluctuations by Household and similar Electrical Appliances.
- [33] **Australian Standard, AS 2279.4**, 1991, Disturbances in Mains Supply Network, Part 4: Limitation of Voltage Fluctuations by Industrial Equipment.
- [1] **TS 9882**, 1992, Ev Tipi cihazlar ve Benzeri Elektrik Donanımının Elektrik Besleme Sistemlerinde Yol Açtığı Bozulmalar Bölüm 2:Harmonikler, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [35] **TS EN 6100-3-2+A1+A2**, 1996 , Elektromanyetik Uyumluluk Bölüm 3: Sınır Değerler Kısım 2: Harmonik Akım Yayınlarına Ait Sınır Değerler (IEC 1000-3-2:1995), *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [36] **TS EN 61642**, 1999, Harmonikleri etkileyen Endüstriyel A.A Şebekeleri Filtrelerin ve Şönt kondansatörlerin uygulanması, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [37] **Arrillaga, J., Smith, B.C., Watson. N.R.**, 1997. Power System Harmonics Analysis, John Wiley and Sons, New York.
- [38] **Task force on Harmonics Modeling and Simulation**, 1996. The Modeling and simulation of the propagation of harmonics in Electric Power Networks Part II: Sample Systems and Examples, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 11, No.1, 452-465.
- [39] **Wortman, D. L., Allen, D.L.**, 1985. Techniques for the Steady State Representation of Unbalanced Power System: Part I. A Systematic Building Block Approach to Network Modeling, *IEEE Trans. on Power Apparatus. and Systems*, 104, No.10 1604-1610.
- [40] **Dommel, H.W.**, 1986, *Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP Theory Book)*, Department of Electrical Engineering University of British Columbia, Vancouver.
- [41] **Manitoba HVDC Research Center**, 1994, PSCAD/EMTDC Power System Simulation Software User's Manual, BPA, Manitoba
- [42] **Alternatif Transient Program**, 1996, Users's Manual, Vancouver.
- [43] **Xu, W., Marti, J.R., Dommel, H.W.**, 1991. Harmonic Analysis of Systems with Static Compensators, *IEEE Trans. on Power Systems*, 6, No.1, 183-190.

- [44] Xia, D., and Heyt, G.T., 1982. Harmonic Power Flow Studies, Part I-Formulation and Solution, Part II-Implementation and Practical Application, *IEEE Trans. on Power Apparatus. and Systems*, 101, 1257-1270.
- [45] Densem, T.J., Bodger, P.S., Arrillaga, J., 1984. Three phase Transmission System Modeling for Harmonic Penetration Studies, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 103, 310-317.
- [46] Semlyen, A., Eggleston, J.F., and Arrillaga, J., 1987. Admittance Matrix Model of a Synchronous Machine for Harmonic Analysis, *IEEE Trans. on Power Systems*, 2, No.4, 833-840.
- [47] Kelly, D.O., Simmons S, 1968. Intriduction to Generalized Machine Theory, McGraw-Hill, London
- [48] Christoforidis, G.P., Meliopoulos, A. P., 1990. Effects of Modeling on the accuracy of harmonic analysis, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 5, No.3, 1598-1607.
- [49] Makram, E. B., Thomson, R. L., 1989. Effects of Transformer Models on the Voltage variation of an Unbalanced Distribution in the Presence Harmonic Distorsion, *Electric Power Sytems Research*, 17, 199-207.
- [50] Carpinelli, G., Gagliardi, F., Russu, M., Villacci, D., 1994. Generalised Converter Models for Iterative Harmonic Anaysis in Power Systems, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib*, 141, 207-214.
- [51] Laughton, M.A. 1968. Analysis of Unbalanced polyphase networks by the method of phase coordinates, *Proceeding of IEE*, 115, No.8, 1163-1172.
- [52] Arrillaga, J., Arnold C.P., Harker B.J., 1983. Computer modelling of Electrical Power Systems, John Wiley.
- [53] Arrillaga, J., Arnold C.P., 1990. Computer Analysis of Electrical Power Systems, John Wiley.
- [54] Anderson, P.M., 1973. Analysis of Faulted Power Systems, Iowa State Universty Press.
- [55] Gönen, T., 1986. Electric PowerDistribution System Engineering, McGrawill.
- [56] Stagg, G.W., and El-Abiad, A.H., 1968. *Computer Methods in Power System Analysis*, New York:McGraw-Hill Book Company.
- [57] Wagner, C.F., Evans, R.D., 1933. Symetrical Components, McGraw-Hill, New York.
- [58] Fortescue, C.L., 1918. Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks, *AIEE Trans.*, 37, 138-144.
- [59] Mahmoud, Aly A., Richard Shultz, D., 1982. A Method for Analyzing Harmonic Distribution in A.C. Power Systems, *IEEE Trans.on Power Apparatus and Systems*, 101, 1815-1824.

- [60] Semlyen, A., Acha, E., and Arrillaga, J., 1988. Newton-Type Algorithms for the Harmonic Phasor Analysis of Non-linear Power Circuits in Periodical Steady State with Special Reference to Magnetic Non-linearities, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 3, No.3, 1090-1098.
- [61] Grainger Lance, G., Roy Spencer, C., 1984. Residual Harmonics in Voltage Unbalanced Power Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 30, 1398-1405.
- [62] Watson, N.R., Arrillaga, J., 1988. Frequency-Dependent A.C. system Equivalents for Harmonic Studies and Transient Converter Simulation, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 3, No.3, 1196-1203.
- [63] Wortman, N.A., Allen, D.L. and Grigsby, L.L., 1985. Techniques for the Steady State Representation of Unbalanced Power Systems, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 104, 2805-2824.
- [64] Medina, A., Arrillaga, J., 1992. Generalized modeling Power Transformer in the Harmonic Domain, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 7, No.3, 457-462.
- [65] Valcarse, M., Mayordomo, J.G., 1993. Harmonic Power Flow for Unbalanced Systems, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 8, No.2, 2052-2059.
- [66] Saleh, A.O.M., Laughton, M.A., Stone, G.T., 1985. M- to N-Phase Transformer Models in Phase Co-ordinates, *IEE Proceedings-C*, 132, 41-48.
- [67] Youssef, R.D., 1993. Phase-Shifting transformers in load flow and short-circuit analysis: modelling and control, *IEE Proceedings-C*, 140, No.4., 334-341.
- [68] Tan, A., Liu, W.-H. E., Shirmohammadi, D., 1997. Transformer and Load Modeling in Short Circuit Analysis For Distribution Systems, *IEEE Trans. on Power Systems*, 6, 174-182.
- [69] El-Abiad, A.H., Tarsi, D.C., 1967. Load flow of Untransposed EHV Networks, *Proceedings of the 5th Power Industry Computer Applications Conference, Pittsburgh, USA*, 377-384.
- [70] Chen, M.S., Dillon, W.E., 1974. Power System modeling," *Proceeding of IEEE*, 62, No.7, 901-915.
- [71] Xiao-Ping Zhang, 1996. Fast Three Phase Load Flow Methods, *IEEE Trans. on Power Systems*, 11, 1547-1554
- [72] Kenneth, A.B., Graffy, J.J., McDonald, J.D., 1976. Three Phase Load Flow Program, *IEEE Trans. on Power Apparatus. and Systems*, 95, 59-65.
- [73] Arrillaga, J., Arnold, C.P., 1978. Fast-Decoupled Three Phase Load Flow, *IEE Proceedings*, 125, 734-740.
- [74] Chen, M.S., Shoults, R.R., Liang, C.C., 1990. Hybrid Three Phase Load Flow, *IEE Proceedings-C*, 137, 177-185

- [75] Broadwater, R.P., Chandrasekaran, A., Huddleston, C.T., Power Flow Analysis of Unbalanced Multiphase Radial Distribution Systems, *Electric Power Systems Research*, 14, 23-33.
- [76] Xu, W., Marti, J.R., Dommel, H.W., 1991. A Multiphase Load Flow Solution Technique, *IEEE Trans. on Power Systems*, 6, 174-182.
- [77] Arrillaga, J., Callaghan, C.D., 1989. Double-iterative algorithm for the analysis of power and harmonic flow at a.c.-d.c. convertor terminals. *Proc. IEE*, 136, No.6, 319-324.
- [78] Hong, Y.-Yi., 1997. Optimal Harmonic Power Flow, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 12, No.3, 1267-1273
- [79] Hong, Y.-Y., Chen, Y.-T., 1996. Three-Phase Optimal Harmonic Power Flow, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 143, No.4, 321-328
- [80] Yamayee, Z. A., Kazibwe, W. E., 1987. Probabilistic modelling of distribution harmonics: data collection and analysis, *Elektrical Power&Energy Systems*, 9, No.3, 189-192.
- [81] Willis, H.L., 1997. *Power Distribution Planning Reference Book*, Marcel Dekker Inc, New York
- [82] Burke, J.J., 1994. *Power Distribution Engineering: Fundamental and Application*, Marcel Dekker Inc, New York.
- [83] McGranaghan, M.F., Dugan, R.C., 1984 Distribution Feeder Harmonic Study Methodology, *IEEE Trans. on Power Apparatus. and Systems*, 103, No.12, 3663-3671
- [84] *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*, 1965. Westinghouse Corp,
- [85] Zimmerman, R.D., Chiang, H.D., 1995. Fast Decoupled Power Flow for Unbalanced Radial Distribution Systems, *IEEE Trans. on Power Systems*, 10, No.4, 2045-2052.
- [86] Chen, T.H., Chen, M. S., Chebli, E., 1991. Distribution System Power Flow Analysis-A Rigid Approach, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 6, No.3, 1146-1152
- [87] Luo, G.X, Semlyen, A., 1990. Efficient load flow for Large Weakly Meshed Networks, *IEEE Trans. on Power Systems*, 5, No.4, 1309-1316.
- [88] Tan, A., Edwin Liu, W.-H., Shirmohammadi, D., 1995. Transformer and Load Modeling in Short Circuit Analysis For Distribution Systems, *IEEE Trans. on Power Systems*, 12, No.3, 1315-1322.
- [89] Lin, W.-H., Teng, J.-H., 2000. Three-Phase Distribution Networks Fast-decoupled power flow solution, *Electrical Power and Energy Systems*, 22, 375-380.
- [90] Chen, T.H., Chen, M.S., Kotas, P., 1991. Three-Phase Cogenerator and Transformer Models for Distribution System Analysis, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 6, No.4, 1671-1681

- [91] Emanuel, A.E., Janczak, J., Pillegi, D.G., 1995, Distribution Feeder with Nonlinear Loads in the Northeast USA: part I-Voltage Distortion Forecast, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 10, No.1, 340-347
- [92] Chen, C.S., XU, J.S., Moo, C.S., 1989. Harmonic Analysis of Distribution Systems, *Electric Power Systems Research*, 17, 171-177
- [93] Emanuel, A.E., Yang, Minghao, Pileggi, D.J., 1991. The Engineering Economics of Power Systems Harmonics In Subdistribution Feeder. A Preliminary Study, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 6, No.3, 1092-1098
- [94] Phipps, J.K., Nelson, J.P., 1994. Power Quality and Harmonic Distorsion on Distribution Systems, *IEEE Trans. on Industry Application*, 30, No.2, 476-483.
- [95] Tang, Y., Mahmoud, A.A., 1989. Evaluation and Reduction of Harmonic Distortion in Power Systems, *Electric Power Systems Research*, 17, 41-48.
- [96] Pileggi, J., Chandra, N.H., 1981. Prediction of Harmonic Voltages in Distribution Systems, *IEEE Trans. on Power Apparatus. and Systems*, 100, 1307-1315.
- [97] Hiyama, T., Hammam, M.S.A.A., Thomas Ortmeyer, H., 1989. Distribution System Modeling with Distributed Harmonic Sources, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 4, 1297-1303.
- [98] Arrillaga, J., Acha, E., Densem, T.J., 1986. Ineffectiveness of Transmission at Harmonic Frequencies, *IEE Proceeding*, 133, PartC, No.2, 99-104.
- [99] Palmer, E.W., Ledwich, G.F., 1993. Three phase Harmonic Modeling of Power System Loads, *IEE Proc-C*, 140, NO.3, 206-212.
- [100] Morched, A.S., Kundur, P., 1987. Identification and modeling of load characteristics at high frequencies, *IEEE Transactions. on Power Systems*, 2, No.1, 153-160.
- [101] Varadan, S., Makram, E.B., 1996. Harmonic Load Identification and determination of Load Composition Using a Least Squares Method, *Electrical Power Systems Research*, 37, 203-208.
- [102] Fauri, M., 1997. Harmonic Modelling of Non-Linear Load by means of crossed Frequency Admittance Matrix, *IEEE Transactions. on Power Systems*, 12, No.4, 1632-1638.
- [103] Marinos, Z. A., Pereira, J.L.R., Carneiro, S., 1994. Fast harmonic flow calculation using parallel Procesing, *IEE Proc.Gene.Trans. Distri.*, 141, No.1, 27-32.
- [104] Makram, E. B., and S. Varadan, A Generalised Load Modelling Technique Using Actual Recorded Data and its Use in a Harmonic Load Flow Program. *Electric Power System Research*, 27, 203-208.
- [105] Soliman, S. A., Kandari, A.M., El-Hawary, M.E, 1997. Time Domain Estimation Techniques for Harmonic Load Models," *Electric Machines and Power Systems*, 25, 885-896.

- [106] **Kron G.**, 1963. Diakoptics: The Piece-wise Solution of Large-Scale Systems, McHill , London.
- [107] **Kasturi, N., and Pottle, P.**, 1976. Piece-wise Newton-Raphson Load Flow, *IEEE Trans. on PAS*, 95,183-189
- [108] **Zollenkopf, K.**, 1972. Bi-Factorisation, Basic Computational Algorithm and Programming Techniques in large Sparse Sets of linear Equations, Academic Press.
- [109] **Kaypmaz, A., Tokad, Y., Usta, Ö.**, 1994. Diakoptics A Parallel Processing Approach For The Analysis of Large-scale Power Systems, *IEEE MELECON*, Antalya, 1069-1072.
- [110] **Medina, A.**, 1992. Power Systems Modelling in the HarmonicDomain, *PhD Thesis*, Universty of Canterbury, New Zealand.
- [1] **Gül, Ö.**, 1995. Büyük Boyutlu Şebekelerin Diakoptics Yöntem ile Kısadevre Analizi, *Y.lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [112] **Task force on Harmonics Modeling and Simulation**, 1999. Test System for Harmonics Modeling and Simulation, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 14, No.2, 452-465
- [113] **Gül, Ö., Kaypmaz, A.**, 1998. Power Components In Unbalanced and Distorted Polyphase Systems", *Melecon'98 conference*, 98CH36056, Tel Aviv, 18-20 Mayıs, 1004-1011.
- [114] **Gül, Ö., Kaypmaz, A.** 1997. Dengesiz ve Sinüsoidal Olmayan Dalga Şekline Sahip Üç-fazlı Sistemlerde Güç, *Elektrik -Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 7.Ulusal Kongre*, Ankara, 8-14 Eylül, 508-511.
- [115] **Bayarak, M., Gül, Ö.**, 1997. Harmoniklerin Enerji Kalitesine Etkisi ve Harmoniklerin Azaltılması, *Elektrik -Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 7.Ulusal Kongresi*, Ankara, 8-14 Eylül , 496-499.
- [116] **Gül, Ö., Bayrak, M.**, Power quality and neutral current problems from unbalanced and non-linear loads in three-phase power systems, *15 th International Conference on Electricity Distribution, Conference 1-4 June*.
- [1] **Gürsoy, E., Gül, Ö., Kaypmaz, A.**, 1999. 3-Fazlı Alçak Gerilim Dağıtım Sistemlerinde Nötr Yüklenmesinden kaynaklanan Problemlerin İncelenmesi, *Elektrik -Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 8.Ulusal Kongresi*, G.Antep, 6-12 Eylül, 365-368.
- [118] **Gürsoy, E., Gül, Ö., Kaypmaz, A.**, 1999. Konutlar ve Ticari Binalardaki Harmonik Kaynakları ve Etkileri, *Elektrik -Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 8.Ulusal Kongresi*, G.Antep, 6-12 Eylül, 325-328.
- [119] **Makram, E.B., Subramaniam, E.V.**, 1993. Harmonic Filter Design Using Actual Recorded Data, *IEEE Trans. On Industry Application*, 29, NO.6, 1176-1183.
- [120] **Lombard, X., Mahseredjian, J., Lefebvre, S., Kieny, C.**, 1995. Implimentation of a New Harmonic Initialization Method in the EMTP, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 10, No.3, 1343-1352.

- [121] Saintz, L., Pedra, J., 1995. Infeasible Harmonic Power Flow Study Solutions, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 10, No.3, 1621-1627.
- [122] Pedra, J., Salichs, M., 1989. Harmonic Power Flow Studies. Part I Formulation and solution, *International Symposium on Electrical Energy Conversations in Power Systems*, Capri, May.
- [123] Pedra, J., Salichs, M., 1989. Harmonic Power Flow Studies. Part II Numerical Solutions and Implementation, *International Symposium on Electrical Energy Conversations in Power Systems*, Capri, May.
- [124] Caramia, P., Carpinelli, G., Rossi, F., Verde, P., 1994. Probabilistic Iterative Harmonic Analysis of Power Systems, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.-C*, 141, 329-338.
- [125] Martinis, U.De, Fantauzzi, M., Testa, A., 1993. An Improvement of the Iterative Harmonic Analysis Method, *ETEP*, 3, 134-139
- [126] Smith, B.C., Arrillaga, J., Wood, A.R., Watson, N.R., 1998. A Review of Iterative Harmonic Analysis for AC-DC Power Systems, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 13, No.1, 180-185.
- [127] Song, W., Heyt, G.T. and Grady, W.M., 1984. The Integration of HVDC Subsystems into the Harmonic Power Flow Algorithm, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 103, 1953-1961.
- [128] Grady, W.M., Heyt, G.T., 1985. Prediction of Power System Harmonics Due to Gaseous Discharge Lighting, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 104, 554-561.
- [129] Grady, W.M., Samotyj, M.J., Noyola, A.H., 1992. The Application of Network Objective Functions for Actively Minimizing the Impact of Voltage Harmonics in Power Systems, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 7, 1379-1386.
- [130] Kersting, W.H., Phillips, W.H., 1996. Modeling and Analysis of Unsymmetrical Transformer Banks Serving Unbalanced Loads, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 32, 720-725.
- [131] Acha, E., Arrillaga, A., J., and Semlyen, A., 1989. General Frame of Reference for Analysis of Harmonic Distortion in Systems with Multiple Transformer Non linearities, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 136, 271-278.
- [132] Semlyen, A., Acha, E., and Arrillaga, J., 1987. Harmonic Norton Equivalent for the Magnetizing Branch of a Transformer, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 134, 162-169.
- [133] Neves, W.L.A., Dommel, H.W., 1993. On Modeling Iron Core Nonlinearities, *IEEE Trans. on Power Systems*, 8, No.2, 417-425.
- [134] Mohseni, H., 1991. Multi-Winding Multi-Phase Transformer model with Saturable Core, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 6, No.1, 166-173.
- [135] Tiwari, S.N., Singh, L.P., 1982. Mathematical Modeling and Analysis of Multi-phase Systems, *IEEE Trans. on Power Apparatus. and Systems*, 101, 1784-1793.

- [136] **Strzoski, V.C., Trpezanovski,** 2000. Three-Phase Asymmetrical Load-flow, *Electrical Power and Energy Systems*, 22, 511-520.
- [1] **Çakır, H.,** 1986. Elektrik Güç Sistemleri Analizi, Nesil Yayıncılık.
- [138] **Stevenson, W.D.,** 1962. Elements of Power Systems Analysis, McGraw Hill
- [139] **Kaypmaz, A., Gül, Ö.,** Diakoptics: 3 Fazlı ,Simetrik ve Dengesiz Sistemlerin Analizi", *Elektrik Mühendisliği 6.Ulusal Kongresi*, Bursa, Eylül, 203-206, 1995
- [140] **Kaypmaz, A., Gül, Ö.,** 1997. Güç Transformatörlerinin Modellenmesinde Yeni Bir Bakış" , *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 7.Ulusal Kongre*, 8-14 Eylül, pp. 500-503.
- [141] **Tokat, Y.,** 1987. Devre Analizi Dersleri I-II, Çağlayan Kitapevi, İstanbul.
- [142] **Tokat, Y.,** 1972. Foundation of Passive Electrical Network Synthesis Vol.I, Ankara, M.E.T.U. Faculty of Engineering Puplication, Ankara.
- [143] **Kaypmaz, A.,** 1980. Elektrik Şebekelerin Çok-Uçlu Eleman Kavramı Yardımıyla İncelenmesi, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [144] **Baghzouz, Y., Gong, X.D.,** 1991. Analysis of Three Phase Transformer No-load Characteristics, *IEEE Trans. on Power Systems*, 6, No.1, 18-26.
- [145] **Jung-Chien Li, Yan-Pei Wu,** 1991. FFT Algorithms for the Harmonic Analysis of Three-Phase Transformer Banks with Magnetic Saturation, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 6, No.1, 158-165
- [146] **Dick, E.P., Watson, W.,** 1981. Transformer Models for Transient Studies Based on Field Measurements, *IEEE Trans.on Power Apparatus and Systems*, 100, 409-419.
- [147] **Neves, W.L.A., Dommel, H.W., Wilsun, Xu,** 1995. Saturations Curves of Delta-Connected Transformers from Measurements, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 10, No.3, 1432-1437
- [148] **Neves, W.L.A., Dommel, H.W.,** 1995. Practical Distribution Transformer Models for Harmonic Studies, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 10, No.2, 906-912
- [149] **Chowdhury, A. H., Grady, W.M.,** 1999. An Investigation of the Characteristics of Transformer Excitation Current Under Nonsinusoidal Supply Voltage, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 12, No.3, 1315-1322.
- [150] **Chen, T.H., Kuo, H.-Y.,** 1995. Network Modeling of Traction Substation Transformers for Studying Unbalance Effects, *IEE Proceedings C*, 142, 103-108.
- [151] **Fushuan, W., Wennan, S.,** 1994. A Modified Three-Phase Model of Transformers with Delta-Connected Windings, *Electric Machines and Power Systems*, 22, 53-59.
- [152] **Makram, E. B.,** 1995. A new technique for optimal size and location of capacitor banks in the presence of harmonic and distortion, *Electric Power Sytems Research*, 34, 149-156.

- [153] **Kaplan, M.**, 1984. Optimization of number, location, size, control, type, and control setting of shunt capacitors on radial distribution feeders, *IEEE Trans. on Power Apparatus. and Systems*, 103, 2659-2665.
- [154] **Medina, A., Arrillaga, J., and Acha, E.**, 1990. Sparsity-Oriented Hybrid Formulation of linear Multiports and its Application to Harmonic Analysis, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 5,
- [155] **Grainger, L.G., Roy Spencer, C.**, 1993. Residual Harmonics in Voltage Unbalanced Power Systems, *IEEE Transactions. on Industry Application*, 30, 1398-1405
- [156] **Gül, Ö., E gürsoy, Adnan Kaypmaz**, 1999. A Diakoptical Technique for 3-phase Harmonik Power Flow of Large Scale Power Systems, *IEEE Budapest Power Tech'99*, Aug 29-Sept 2, Budapest.
- [157] **Duggan, E., Morrison, R.E.**, 1996. Pradiction of Harmonic Voltage Distortion When a Nonlinear Load is Connected to an already distorted Supply, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 140, 161-166.
- [158] **Palmer, E.W., Ledwich, G.F.**, 1993. Three phase Harmonic Modeling of Power System Loads, *IEE Proc-C*, 140, 206-212
- [159] **Mombauer, W., Weck, K-H.**, 1993. Load Modelling for Harmonic Flow Calculations, *ETEP*, 3, 453-460.
- [160] **Wallach, Y.**, 1986. Calculation and Programs for Power System Networks, Printice-Hall.
- [161] **Gül, Ö., Milanovic, J.**, 2000. Sensitivity of Harmonic Load model Parameters to Voltage and Current Waveforms, *The International Conference on Harmonics and Quality of Power*, October 1-4 2000, Orlando, FL USA.
- [162] **Tinny, W.F., Hart, C.E.**, 1967. Power Flow Solution by Newton's Method, *IEEE Trans. on Power Apparatus. and Systems*, 86, 1449-1460.
- [163] **Stott, B., Alsac, O.**, 1974. Fast Decoupled Load Flow, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 93, 859-869.

EK A. SAYISAL UYGULAMA VERİLERİ

Tablo A.1 IEEE endüstriyel test sistemi verileri

Besleme	69kV, sonsuz güç barası	
Transformatör	69kV/13.8, DYg, 20MVA, R=%0.5, X=%8	
Hat	Kısa dağıtım hattı, Toplam pozitif bileşen direnci(R)=0.02ohm Toplam pozitif bileşen reaktansı(X)=0.06ohm	
Yükler	IND1 ,1	10000kW, Güç faktörü=0.85 endüktif %60 motor, %40 pasif
	IND2 3.	3000kW, Güç faktörü=0.9 endüktif, pasif
	2.	5000kW, Güç faktörü=0.85 endüktif, Doğrusal olmayan yük harmonik spektrumu tablo 7.1 verilmiştir.
Kapasite	IND1	Yüklerin kompanzasyonunu sağlıyor.
	IND2	Yüklerin kompanzasyonunu sağlıyor.

Transformatörün, birbirine seri bağlı direnç ve reaktans olarak verilen kısa devre empedansı harmonik bağımlı olarak

$$z_{tr} = 0.0025 + i.0.04 \cdot h \quad (A.1)$$

biçiminde verilebileceği gibi, birbirine seri bağlı direnç ve reaktansın her ikisine de paralel bağlı bir reaktansla gösterilen CIGRE modeli,

$$z_{tr} = (0.0025 + (h^2 \cdot 0.04^2 \cdot 3.2 + i \cdot h \cdot 0.04 \cdot 3.2^2) / (3.2^2 + (h \cdot 0.04)^2)) \quad (p.u) \quad (A.2)$$

biçiminde verilmektedir.

Hattın

$$z_h = 0.0011 + i.0.003 \cdot h \quad (p.u) \quad (A.3)$$

biçiminde verilen empedansına deri etkisi

$$z_{hat} = 0.0011 \cdot (1 + ((0.646 \cdot h^2) / (192 + 0.518 \cdot h^2))) + i.0.0032 \cdot h \quad (p.u); \quad (A.4)$$

biçiminde dahil edilebilmektedir[.]

Tablo A.2 IEEE endüstriyel test sisteminde 2 nolu yükün harmonik akım spektrumu

H	5	7	11	13	17	19	23	25
%I _{cl}	0.2	0.143	0.091	0.077	0.059	0.053	0.043	0.04
I _{ch}	0.119	0.085	0.054	0.046	0.035	0.031	0.026	0.024
θ _h	-π	0	-π	0	-π	0	-π	0

Tablo A.2 (devam)

H	29	31	35	37	41	43	47	49
%I _{cl}	0.034	0.032	0.029	0.027	0.024	0.023	0.021	0.02
I _{ch}	0.020	0.019	0.017	0.016	0.014	0.014	0.012	0.012
θ _h	-π	0	-π	0	-π	0	-π	0

Tablo A.3. IEEE bina dağıtım harmonik test sistemi verileri

Besleme eşdeğeri		Bir faz kısa devre gücü: 1MVA, $R/X=0.5$ 3 faz kısa devre gücü 5MVA, $R/X=0.3$	
Transformatör		480/120V, 100kVA, %5, DYg	
Hatlar	Ofis elemanları	Faz kablosu $Z=0.0004+j0.0005 \Omega/m$ Nötr kablosu $Z=0.0016+j0.0010 \Omega/m$ A,B ve C faz ve nötr kablo uzunlukları sırasıyla: 50m, 50m; 30, 30 ve 60, 60m dir.	
	Motor kablosu	$Z_s=0.00644+0.0036i \Omega$, $Z_m=0.00230+0.001i \Omega$,	
	Hat L-P	Faz kablosu $Z=0.0004+j0.0005 \Omega/m$ Nötr kablosu $Z=0.0025+j0.0040 \Omega/m$ A,B ve C faz ve nötr kablo uzunlukları 20m olup eşittir.	
Yükler	Ofis Elemanı harmonik spektrumları tablo A.4. de verilmiştir.	A	$S_1=10.000+500i \text{ VA}$ $S_2=5.000+1.500i \text{ VA}$
		B	$S_1=9.000+400i \text{ VA}$ $S_2=4.000+1.000i \text{ VA}$
		C	$S_1=5.000+400i \text{ VA}$ $S_2=7.000+2.000i \text{ VA}$
	Doğrusal eşdeğer yük	A	$S=3.000+0i \text{ VA}$
		B	$S=2.000+0i \text{ VA}$
		C	$S=3500+0i \text{ VA}$
	Motor	$S=5.000+1500i \text{ VA}$, $Z_s=2.88i \Omega$, $Z_s=0.72i \Omega$	

Tablo A.4. IEEE bina dağıtım harmonik test sistemi yükünün harmonik spektrumu

h	Yük 1		Yük 2	
	Genlik (p.u)	Açı (derece)	Genlik (p.u)	Açı (derece)
1	1	-37	1	-37
3	0.657	-97	0.199	-63
5	0.377	-166	0.074	137
7	0.127	113	0.032	30
9	0.044	-46	0.024	-108
11	0.053	-158	0.018	168
13	0.025	92	0.008	68
15	0.019	-51	0.004	-48
17	0.018	-151	0.001	-125
19	0.011	84	0.002	-66

EK B. FAKTÖRLERE AYIRMA YÖNTEMİ

B.1 Faktörlere Ayırma Yöntemi İle Matris Tersinin Alınması

Bir $[A]$ matrisi solundan ve sağından, çarpım sonucu birim matris elde edilecek biçimde matrisler ile çapılması (denk.B.1) düşüncesi faktörlere ayırma yönteminin esasını oluşturmaktadır.

$$[U] = [C] [A][R] \quad (B.1)$$

Burada, $[C]$, $[R]$ ve $[U]$ sırasıyla, sol çarpan, sağ çarpan ve birim matris olup, $[R]$ ve $[C]$ matrisleri

$$[R] = [R]^{(1)} [R]^{(2)} \dots [R]^{(k)} \dots [R]^{(n-1)} [R]^{(n)} \quad (B.2)$$

$$[C] = [C]^{(n)} [C]^{(n-1)} \dots [C]^{(k)} \dots [C]^{(2)} [C]^{(1)} \quad (B.3)$$

biçiminde tanımlanmıştır. Buradan $[A]$ matrisinin tersi

$$[A]^{-1} = [R] [C] \quad (B.4)$$

biçiminde hesaplanır.

B.2 Faktörlere Ayırma Yönteminin Harmonik Analize Uygulanması

Genellikle, şebekenin baralarının tamamında harmonik kaynağı olmayıp sınırlı sayıda barada harmonik kaynağı bulunmaktadır. Bu durumda, bara harmonik gerilimlerini elde edilmesi için bara empedans matrisinin tamamının hesaplanması yerine sadece harmonik kaynaklarının bulunduğu baralara ait empedans matrisi sütunların hesaplanması yeterli olmaktadır. n baralı bir şebekenin h . harmonikleri sadece J, K, L ve M baralarında mevcut ise h . harmonik gerilimleri aşağıdaki eşitlikle denk.B.5 ile hesaplanabilmektedir. J, K, L ve M baraları tamamı aynı faz barası olabileceği gibi, J, K, L üç fazlı harmonik kaynağının a, b ve c fazları ve M tek fazlı bir harmonik kaynağı da olabilir. Diğer farklı durumlar da da mümkündür.

Bara harmonik gerilimleri,

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} Z_{1J} \\ Z_{2J} \\ \vdots \\ Z_{NJ} \end{bmatrix}_h \cdot [I_J]_h + \begin{bmatrix} Z_{1K} \\ Z_{2K} \\ \vdots \\ Z_{NK} \end{bmatrix}_h \cdot [I_K]_h + \begin{bmatrix} Z_{1L} \\ Z_{2L} \\ \vdots \\ Z_{NL} \end{bmatrix}_h \cdot [I_L]_h + \begin{bmatrix} Z_{1M} \\ Z_{2M} \\ \vdots \\ Z_{NM} \end{bmatrix}_h \cdot [I_M]_h \quad (B.5)$$

biçiminde hesaplanabilir.

Yukarıda verilen yöntemler bara admitans matrisinin tersinin elde edilmesi işlemi her farklı harmonik için tekrarlanacaktır. Bazı baraların harmonik akımları bilinmesi ve sadece bu akımlara ilişkin empedans matrisi satırının elde edilmesi istenmesi durumunda ise yukarıda verilen denklem 4.54

$$[C] = [C]^{(n)} [C]^{(n-1)} \dots [C]^{(k)} \dots [C]^{(2)} [C]^{(1)} \cdot [C_{az}]_h \quad (B.6)$$

biçiminde değiştirilmesi hesaplamada kullanılan işlem sayısı ve bellek miktarını azaltacaktır. Burada, harmonik kaynağı bağlı bara sayısı n_h ve admitans matrisinin boyutu $n \times n$ olması durumunda, $[C_{az}]_h$ $n \times n_h$ boyutunda seyrek matristir. Örneğin $n \times n$ boyutlu bir şebekenin J, K, L ve M barasında harmonik kaynakları var ise $[C_{az}]_h$ matrisi $n \times 4$ boyutunda olup, $C_{az}(J,1)$, $C_{az}(K,2)$, $C_{az}(L,3)$ ve $C_{az}(M,4)$ elemanları 1 ve diğer elemanları sıfır olan seyrek matristir. Farklı harmonik dereceleri için harmonik kaynağı olan bara sayısında artma veya azalma olabilecektir. Bunun sonucunda farklı harmonik dereceleri için $[C_{az}]_h$ tanımını yenilenmelidir.

Harmonikler açısından yapılması gerekli diğer önemli çalışma baraların frekans cevabının belirlenmesidir. Ancak, şebeke baralarının tamamı için harmonik cevaplarının araştırılması yerine, önemli görülen bir veya birkaç bara için yapılması istenebilmektedir. Bu durumda empedans matrisinin sadece bazı köşegen elemanlarının hesaplanması yeterlidir. Bunun için yukarıdaki algoritmanın

$$[R] = [R_{az}]_h [R]^{(1)} [R]^{(2)} \dots [R]^{(k)} \dots [R]^{(n-1)} [R]^{(n)} \quad (B.7)$$

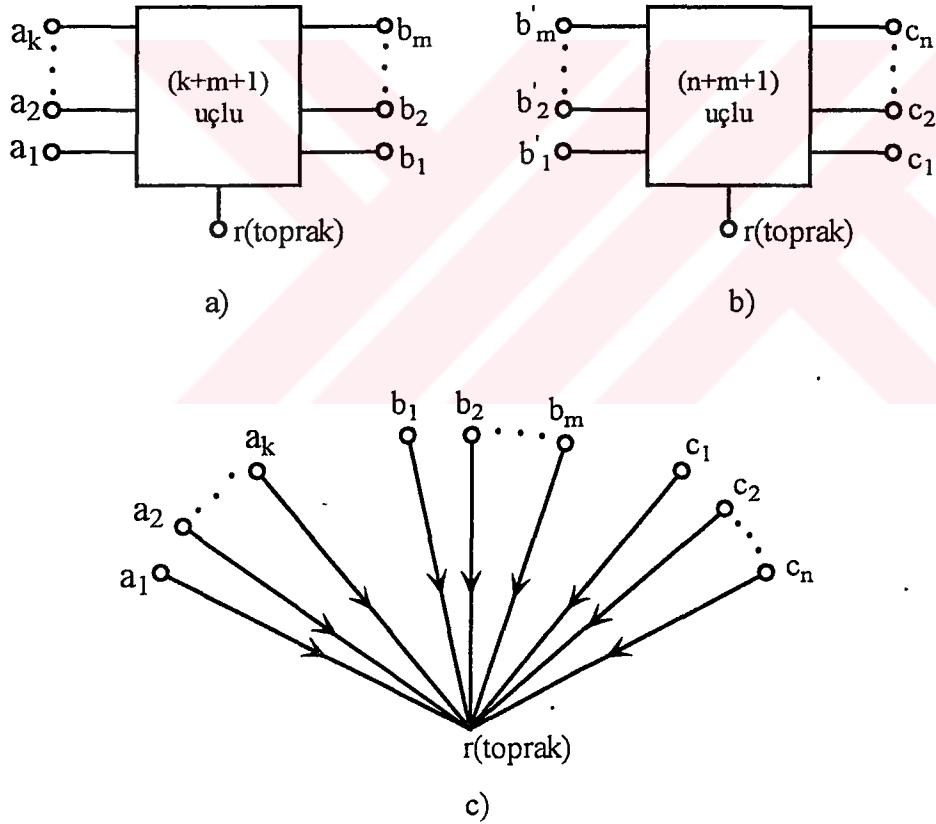
$$[C] = [C]^{(n)} [C]^{(n-1)} \dots [C]^{(k)} \dots [C]^{(2)} [C]^{(1)} \cdot [R_{az}]_h^T \quad (B.8)$$

biçiminde değiştirilmesi, hesaplarda işlem sayısı ve bellek miktarını azaltacaktır. Burada, frekans cevabı belirlenecek bara sayısı n_f ve admitans matrisinin boyutu $n \times n$ olması durumunda, $[R_{az}]_h$ $n \times n_f$ boyutunda seyrek bir matris olacaktır. $n \times n$ boyutlu bir şebekenin J, K, L ve M barasının frekans cevabının belirlenmesinde $[R_{az}]_h$ boyutu $4 \times n$, $R_{az}(1,J)$, $R_{az}(2,K)$, $R_{az}(3,L)$ ve $R_{az}(4,M)$ ise elemanları 1 ve diğer elemanları ise sıfır olan seyrek matris olacaktır.

EK C ÇOK-UÇLULARIN PARALEL BAĞLANMASI

İki veya daha fazla çok-uçlunun herhangi bir biçimde bağlanmasını, çok-uçluların paralel bağlanması olarak görmek mümkündür. Eğer bu çok-uçlu devreler farklı sayıda uçlara sahiptirler ya da bu çok-uçluların uç sayısı aynı olduğu halde, birinin ötekine bağlanmamış uçları kalıyorsa, önce her bir devre aynı sayıda ve söz konusu bütün düğümlere sahip olacak biçimde, ayrı düğümlerle genişletilebilir.

Özel bir devre olan elektrik enerji sistemlerinde bütün ölçümlerin toprağa göre yapılması ve genellikle, tüm düğümlerin modelde görülmesi arzu edilmesi nedeniyle, şebekenin çok-uçlu olarak gösterimi ve matematiksel modellerinin tüm düğümleri içeren ve toprağı referans olarak kabul eden yıldız uç graf, ağaç olarak seçilmelidir.



Şekil C.1 a) (k+m+1)-uçlu
b) (m+n+1)-uçlu
c) Tüm düğümleri içeren uç-graf

Şekil C.1 (a) verilen (k+m+1)-uçlunun, Şekil C.1 (c) de verilen uç grafa göre uç-denklemleri, 3.bölümde çok-uçluların matematiksel modelinin elde edilişi için verilen algoritmanın uygulanmasıyla,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}^a \\ \mathbf{I}^b \\ \mathbf{I}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1 & \mathbf{Y}_2 & 0 \\ \mathbf{Y}_3 & \mathbf{Y}_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}^a \\ \mathbf{V}^b \\ \mathbf{V}^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{J}^a \\ \mathbf{J}^b \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{C.1})$$

biçiminde ve Şekil C.1 (b) verilen $(k+m+1)$ -uçlunun Şekil C.1 (c) de verilen uç grafa göre uç-denklemleri

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}^a \\ \mathbf{I}^b \\ \mathbf{I}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Y}_5 & \mathbf{Y}_6 \\ 0 & \mathbf{Y}_7 & \mathbf{Y}_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}^a \\ \mathbf{V}^b \\ \mathbf{V}^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{J}^b \\ \mathbf{J}^c \end{bmatrix} \quad (\text{C.2})$$

biçiminde elde edilir.

Uç denklemleri Denk. C.1 ve Denk. C.2 biçiminde olan $(k+m+1)$ -uçlu ve $(m+n+1)$ -uçluların m tane uçlarından bağlanması ile bu iki çok-uçlu paralel bağlanmaktadır.

Çok-uçluların paralel bağlanması ile ortaya çıkan $(k+m+n+1)$ -uçlunun aynı uç-graf için uç-denklemleri

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}^a \\ \mathbf{I}^b \\ \mathbf{I}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1 & \mathbf{Y}_2 & 0 \\ \mathbf{Y}_3 & \mathbf{Y}_4 + \mathbf{Y}_5 & \mathbf{Y}_6 \\ 0 & \mathbf{Y}_7 & \mathbf{Y}_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}^a \\ \mathbf{V}^b \\ \mathbf{V}^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{J}^a \\ \mathbf{J}^b + \mathbf{J}^b \\ \mathbf{J}^c \end{bmatrix} \quad (\text{C.3})$$

biçimindedir.

Harmonik bağımlı matematiksel modelleri bilinen çok-uçluların paralel bağlanması da aynı biçimdedir.

ÖZGEÇMİŞ

Ömer Gül 1970 yılında Kozan-Adana’da doğdu. Lise öğrenimini Adana Teknik Lisesi Elektrik bölümünde tamamladıktan sonra 1987 yılında İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği bölümüne girdi. 1991 de Lisans eğitimini tamamlayarak aynı yıl İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik bölümünde Y. Lisans programına başladı. 1995 de Y. Lisans eğitimini tamamlayarak aynı yıl İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik bölümünde Doktora programına başladı. Ağustos 1999-Şubat 2000 tarihleri arasında UMIST de misafir araştırmacı olarak bulundu. İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Tesisleri Anabilim Dalında 1992 yılında araştırma görevlisi olarak başladığı görevini halen sürdürmekte olan Ömer Gül evli ve bir çocuk babasıdır.

