

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÜÇ FAZLI SİSTEMLERDE PARALEL AKTİF
FİLTRE**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elk. Müh. Murat SEZER**

Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : KONTROL ve OTOMASYON MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2006

**ÜÇ FAZLI SİSTEMLERDE PARALEL AKTİF
FİLTRE**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elk. Müh. Murat SEZER
504021115**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Aralık 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 5 Ocak 2006**

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Seta BOĞOSYAN

Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Okyay KAYNAK (B.Ü.)

Yar. Doç. Dr. Deniz YILDIRIM (İ.T.Ü)

OCAK 2006

ÖNSÖZ

Lisans öğrenimimde ilgilenmeye başladığım Güç Elektroniği Devrelerinin kontrolü ve bu devrelerin en büyük sorunu olan harmonikler, tezimin konusunu belirlemiştir.

Tez çalışmamda öncelikle bana yol gösteren ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen sayın danışmanım Doç. Dr. Seta BOĞOSYAN' a teşekkürü bir borç bilirim. Tezimin konusunun fikrini veren ve bana her sorunumda yardımcı olan sayın hocam Doç. Dr. Metin GÖKAŞAN' a ve simülasyon çalışmamda, karamsarlığa düştüğümde telkinleriyle bana güç veren ve çözemediğim problemlerde yardımlarını esirgemeyen Dr. Vehbi BÖLAT' a da saygılarımı sunarım. Uzun zaman süren tez çalışmamda, beni her zaman destekleyen sevgili eşim Binnur YILDIRIM-SEZER' e de teşekkür etmek isterim.

Murat SEZER

Ocak, 2006

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	iii
TABLO LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı	1
2. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDEKİ TANIMLAR	6
2.1. Lineer Olmayan Yük için Akım, Gerilim ve Güç Tanımı	6
2.2. Etkin Akım ve Etkin Gerilim Değerinin Hesaplanması	9
2.3. Enerji Kalitesi ile İlgili Kavramlar	10
2.3.1. Güç Faktörü	10
2.3.2. Toplam Harmonik Bozulum	11
3. ELEKTRİK SİSTEMLERİNDEKİ HARMONİKLER ve HARMONİKLERİN FİLTRELENMESİ	12
3.1. Harmoniklerin Şebeke Üzerindeki Etkileri	12
3.2. Harmoniklerin Rezonans Etkisi	13
3.2.1. Seri Rezonans	14
3.2.2. Paralel Rezonans	15
3.3. Harmonik Standartları	16
3.4. Harmoniklerin Filtrelenmesi	17
3.4.1. Pasif Filtreler	18
3.4.1.1 Seri Pasif Filtre	18
3.4.1.2 Paralel Pasif Filtre	18
3.4.2. Aktif Filtreler	19
4. PARALEL AKTİF FİLTRE	21
4.1 PAF Matematiksel Modeli	22
4.2. PAF Devre Dizaynı	24

4.2.1. PAF DA Kondansatörü	25
4.2.2. PAF AA Endüktansı	26
4.2.3. PAF Eviricisi	27
4.3 Anahtarlama Filtresi	28
4.4. PAF Kontrolü	31
4.4.1. DA Kondansatörü Lineer PI Kontrolüyle PAF Kontrolü	32
4.4.1.1. Referans Dalga Seklinin Üretilmesi	32
4.4.1.1.1. DA Kondansatörüne PI Kontrol Uygulanması	32
4.4.1.1.2. Birim Sinüs Dalga İşaretlerinin Üretilmesi	34
4.4.1.2 IGBT Tetikleme İşaretlerinin Oluşturulması	37
4.4.2. Yük Akimi Bant Geçiren Filtre Kontrollü PAF Kontrolü	39
4.4.2.1 Referans Dalga Seklinin Üretilmesi	39
4.4.2.1.1. Bant geçiren Filtre	40
4.4.2.1.2. Birim Sinüs Dalga İşaretlerinin Üretilmesi	44
4.4.2.2 IGBT Tetikleme İşaretlerinin Oluşturulması	46
5. SİMÜLASYON SONUÇLARININ ANALİZİ	48
5.1. Yük İçin Simülasyon Sonuçları	48
5.2. DA Kondansatörü Lineer PI Kontrollü, PAF Devresi Simülasyon Sonuçları	55
5.3. Yük Akimi Bant Geçiren Filtre Kontrollü, PAF Devresi Simülasyon Sonuçları	69
5.4. Simülasyon Sonuçları	81
6. SONUÇLAR	83
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	88

KISALTMALAR

AA	: Alternatif Akım
AC	: Alternative Current
DA	: Doğru Akım
DC	: Direct Current
GED	: Güç Elektroniği Devresi
PEC	: Power Electronic Circuits
AF	: Aktif Filtre
PF	: Pasif Filtre
PAF	: Paralel Aktif Filtre
GKAF	: Gerilim Kaynaklı Aktif Filtre
AKAF	: Akım Kaynaklı Aktif Filtre
SAF	: Seri Aktif Filtre
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
PWM	: Pulse Width Modulation
OKN	: Ortak Kuplaj Noktası
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC	: International Electrical Commission
THB	: Toplam Harmonik Bozulumu
THD	: Total Harmonic Distortion
FFT	: Fast Fourier Transform
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor
FKD	: Faz Kilitleme Devresi
PLL	: Phase Locked Loop
PI	: Proportional Integrant
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor
GF	: Güç Faktörü
BGF	: Bant Geçiren Filtre

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1. IEEE Gerilim İçin Harmonik Distorsyon Sınırları	16
Tablo 3.2. IEEE 519 Tek Harmonik Akım Sınırları I_n/I_1 (%)	17
Tablo 5.1. Değişik Tetikleme Açılarında Şebeke Gerilimi THB' si ve Şebekeden Çekilen Akımın THB' si	82
Tablo 5.2. Değişik Tetikleme Açılarında Şebekeden Çekilen Akımın Etkin Değeri ve Şebekeden Çekilen Aktif Güç	82

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Lineer Olmayan Yükü Besleyen Devre.....	6
Şekil 2.2 : Yük Akım Fazörleri.....	7
Şekil 2.3 : Ortalama Aktif ve Reaktif Gücün Hesaplanması.....	9
Şekil 2.4 : Akım ve Gerilim Etkin Değerinin Hesaplanması.....	10
Şekil 2.5 : Toplam Harmonik Bozulma Değerinin Hesaplanması.....	11
Şekil 3.1 : Seri RLC Devresi.....	14
Şekil 3.2 : Paralel RLC Devresi.....	15
Şekil 3.3 : Seri Pasif Filtre.....	18
Şekil 3.4 : Paralel Pasif Filtre	19
Şekil 3.5 : Aktif Filtre ile Harmonik Akım Kompanzasyonu.....	20
Şekil 4.1 : PAF Tek Hat Şeması.....	21
Şekil 4.2 : İdeal Akım Kompanzasyonu Durumunda Tek Faz Akım Değerleri a)Yük Akımı b)Şebeke Akımı c)PAF Akımı.....	22
Şekil 4.3 : PAF Akım Kompanzasyonu Sistem Diyagramı.....	24
Şekil 4.4 : Tristör $\alpha=45^\circ$ ile tetiklenirken I_{dc} akımı	27
Şekil 4.5 : Anahtarlama Filtresi Devresinin PAF' ye Bağlanması.....	28
Şekil 4.6 : Anahtarlama Filtresi Bode Diyagramı.....	29
Şekil 4.7 : Anahtarlama Filtresi Kullanılmayan Durumda, Şebeke Gerilimi ve FFT Analizi.....	30
Şekil 4.8 : Anahtarlama Filtresi Kullanılan Durumda, Şebeke Gerilimi ve FFT Analizi.....	31
Şekil 4.9 : DA Kondansatörü PI Kontrollü PAF İç Akım Kontrol Çevrimi Şeması.....	32
Şekil 4.10 : PI Kontrolör Şeması	33
Şekil 4.11 : Sürekli Zamanda Kapasite Gerilimi.....	34
Şekil 4.12 : Faz Kilitleme Devresi Blok Diyagramı.....	35
Şekil 4.13 : Faz Kilitleme Devresi Çıkışı.....	35
Şekil 4.14 : Akım Referans Değeri.....	36
Şekil 4.15 : Akım Referans Değerinin FFT Analizi.....	37
Şekil 4.16 : Histerezis Akım Yöntemi.....	37
Şekil 4.17 : Referans Dalga ve Üçgen Dalganın Toplamının, Şebekeden Çekilen Akım ile Karşılaştırılması.....	38
Şekil 4.18 : Şebeke Akımı BGF Kontrollü PAF İç Akım Kontrol Çevrimi Şeması.....	39
Şekil 4.19 : Analog Bant Geçiren Filtre Blok Diyagramı.....	39
Şekil 4.20 : Analog Bant Geçiren Giriş ve Çıkış FFT Analizi.....	40
Şekil 4.21 : Bant Geçiren Filtre, Kazanç Frekans Grafiği.....	41
Şekil 4.22 : Şebeke Gerilimi ve Şebekeden Çekilen Yük Akımı.....	42
Şekil 4.23 : Bant Geçiren Filtre Çıkışı.....	43

Şekil 4.24	: Analog Filtre Dizayn Seçenekleri.....	43
Şekil 4.25	: FGD Kullanılmadan Önce, OKN Şebeke Gerilimi ve Şebekeden Çekilen Akım.....	44
Şekil 4.26	: Referans Akım İşaretinin Elde Edilmesi.....	45
Şekil 4.27	: Referans Akım Maksimum Değerinin Elde Edilmesi.....	45
Şekil 4.28	: BGF Çıkışındaki Dalga'nın RMS değeri.....	46
Şekil 4.29	: Sabit Frekans Akım Yöntemi.....	47
Şekil 5.1	: Simülasyonda İncelenen Yükün Sistem Diyagramı.....	48
Şekil 5.2	: PAF' sız durumda, Şebeke Gerilimi ve Yükün Çektiği Akım.....	49
Şekil 5.3	: A Fazı Yük Akımı.....	50
Şekil 5.4	: Şebekeden Çekilen Akımın Etkin (rms) Değeri.....	51
Şekil 5.5	: Şebekeden Çekilen Aktif ve Reaktif Güç.....	52
Şekil 5.6	: $\alpha=0^\circ$ de Şebekeden Çekilen Akımın FFT' si.....	53
Şekil 5.7	: $\alpha=45^\circ$ de Şebekeden Çekilen Akımın FFT' si.....	53
Şekil 5.8	: $\alpha=0^\circ$ de OKN Şebeke Gerilimi FFT' si.....	54
Şekil 5.9	: $\alpha=45^\circ$ de OKN Şebeke Gerilimi FFT' si.....	54
Şekil 5.10	: Kapasite Gerilimi.....	55
Şekil 5.11	: Sürekli Zamanda Kapasite Gerilimi.....	56
Şekil 5.12	: PI Kontrol Çıkışı.....	57
Şekil 5.13	: Şebeke Gerilimi ile Aynı Fazda Birim Dalgalar.....	58
Şekil 5.14	: Şebekeden Çekilmesi İstenen Referans Akım.....	58
Şekil 5.15	: OKN Şebeke Gerilimi ve Şebekeden Çekilen Akım ($\alpha=0^\circ$).....	59
Şekil 5.16	: OKN Şebeke Gerilimi ve Şebekeden Çekilen Akım ($\alpha=45^\circ$).....	60
Şekil 5.17	: $\alpha=0^\circ$ de Referans Akım ve Şebekeden Çekilen Akım.....	60
Şekil 5.18	: $\alpha=45^\circ$ de Referans Akım ve Şebekeden Çekilen Akım.....	61
Şekil 5.19	: Şebekeden Çekilen Aktif ve Reaktif Güç.....	62
Şekil 5.20	: Yükün Uçlarında Harcanan Aktif ve Reaktif Güç.....	62
Şekil 5.21	: Yükün Gereksinimi Olan Harmonikli Akımın, PAF' den Sağlanması.....	63
Şekil 5.22	: Yükün Gereksinimi Olan Harmonikli Akımın FFT Analizi.....	63
Şekil 5.23	: Kompanzasyon Akımı ve İdeal Kompanzasyon Akımı ($\alpha=0^\circ$).....	64
Şekil 5.24	: Kompanzasyon Akımı ve İdeal Kompanzasyon Akımı ($\alpha=45^\circ$).....	65
Şekil 5.25	: a) Referans+Üçgen ve Gerçek Akımın Karşılaştırılması b) Karşılaştırma Sonucu Oluşturulan IGBT Tetikleme İşaretleri.....	66
Şekil 5.26	: $\alpha=0^\circ$ de Şebekeden Çekilen Akımın FFT' si.....	67
Şekil 5.27	: $\alpha=45^\circ$ de Şebekeden Çekilen Akımın FFT' si.....	67
Şekil 5.28	: $\alpha=0^\circ$ de OKN Şebeke Geriliminin FFT' si.....	68
Şekil 5.29	: $\alpha=45^\circ$ de OKN Şebeke Geriliminin FFT' si.....	68
Şekil 5.30	: Şebeke Akımı Bant Geçiren Filtre Çıkışı.....	69
Şekil 5.31	: Bant Geçiren Filtre Çıkışının FFT' si.....	70
Şekil 5.32	: Bant Geçiren Filtre Çıkışının Etkin(rms) Değeri.....	70
Şekil 5.33	: Şebeke Geriliminin FGD' ye Uygulanması Sonucu Elde Edilen Birim Dalgalar.....	71
Şekil 5.34	: $\alpha=0^\circ$ de Şebekeden Çekilmesi Gereken Akım ve Şebekeden Çekilen Akım.....	72
Şekil 5.35	: $\alpha=45^\circ$ de Şebekeden Çekilmesi Gereken Akım ve Şebekeden Çekilen Akım.....	72
Şekil 5.36	: OKN Şebeke Gerilimi ve Şebekeden Çekilen Akım ($\alpha=0^\circ$).....	73
Şekil 5.37	: OKN Şebeke Gerilimi ve Şebekeden Çekilen Akım ($\alpha=45^\circ$).....	74
Şekil 5.38	: DA Kondansatörü Gerilimi.....	74

Şekil 5.39 : Şebekeden Çekilen Aktif ve Reaktif Güç.....	75
Şekil 5.40 : Yükte Harcanan Aktif ve Reaktif Güç.....	76
Şekil 5.41 : Yünün Gereksinimi Olan Harmonikli Akımın PAF' den Sağlanması ($\alpha=45^\circ$).....	76
Şekil 5.42 : PAF' den Çekilmesi Gereken Akım (i_{ac}^*) ve PAF' den Çekilen Akım (i_{ac}), ($\alpha=0^\circ$).....	77
Şekil 5.43 : PAF' den Çekilmesi Gereken Akım (i_{ac}^*) ve PAF' den Çekilen Akım (i_{ac}), ($\alpha=0^\circ$).....	78
Şekil 5.44 : $\alpha=0^\circ$ de Şebekeden Çekilen Akımın FFT' si.....	79
Şekil 5.45 : $\alpha=45^\circ$ de Şebekeden Çekilen Akımın FFT' si.....	79
Şekil 5.46 : $\alpha=0^\circ$ de OKN Şebeke Geriliminin FFT' si.....	80
Şekil 5.47 : $\alpha=45^\circ$ de OKN Şebeke Geriliminin FFT' si.....	80

SEMBOL LİSTESİ

$v(t), i(t)$	: Periyodik değişen gerilim ve akım fonksiyonunun ani değerleri
V_n, I_n	: Periyodik değişen gerilim ve akım fonksiyonunun n. harmoniğine ilişkin etkin değerler
Φ_n	: Gerilim ve Akıma ilişkin n. harmonikteki faz farkı
ω	: AA kaynak gerilim/akım değişiminin açısal hızı
$v_{as}(t), v_{bs}(t), v_{cs}(t)$	: OKN a, b, c faz-nötr gerilimi ani değerleri
$i_{as}(t), i_{bs}(t), i_{cs}(t)$	: AA kaynak a,b, c faz akımı ani değerleri
I_{as}, I_{bs}, I_{cs}	: AA kaynak a,b, c faz akımı etkin değerleri
$i_{as}^*(t), i_{bs}^*(t), i_{cs}^*(t)$	: İdeal AA kaynak a, b, c referans faz akımı ani değerleri
$I_{as}^*, I_{bs}^*, I_{cs}^*$	: İdeal AA kaynak a, b, c referans faz akımı etkin değerleri
$i_{af}(t), i_{bf}(t), i_{cf}(t)$	: PAF a, b, c çıkış faz akımı ani değerleri
I_{af}, I_{bf}, I_{cf}	: PAF a, b, c çıkış faz akımı etkin değerleri
$i_{af}^*(t), i_{bf}^*, i_{cf}^*$	: İdeal PAF a, b, c çıkış faz akımı ani değerleri
$I_{af}^*, I_{bf}^*, I_{cf}^*$	: İdeal PAF a, b, c çıkış faz akımı etkin değerleri
$i_a(t), i_b(t), i_c(t)$	: Yük a, b, c faz akımı ani değerleri
I_a, I_b, I_c	: Yük a, b, c faz akımı etkin değerleri
I_{md}^*	: Referans akım maksimum genliği
$v_{dc}(t)$	: PAF DA Kondansatörü DA gerilimi ani değeri
V_{dc}^*	: PAF DA Kondansatörü DA gerilimi referans değeri
C_{dc}	: PAF DA Kondansatörü
L_c, R_c	: PAF çıkış endüktansı ve endüktans iç direnci
L_s, R_s	: AA Gerilim kaynağı çıkış endüktansı ve endüktans iç direnci
L_{dc}, R_{dc}	: Kompanze edilen yük devresinin, DA kısmında yer alan endüktans, kondansatör ve direnç
L_{af}, R_{af}	: Kompanze edilen yük devresinin AA kısmında yer alan endüktans, kondansatör ve direnç
S	: Yükün tükettiği toplam görünür güç
P	: Yükün tükettiği toplam aktif güç
Q	: Yükün tükettiği toplam reaktif güç
α	: Tristör elemanının yer aldığı güç dönüştürücülerinde kullanılan tetikleme açısı
I_q	: Akımın reel fazörü
I_p	: Akımın imajinel fazörü

ÜÇ FAZLI SİSTEMLERDE PARALEL AKTİF FİLTRE

ÖZET

Günümüzde yaygın kullanım alanı bulan Güç Elektroniği Devreleri (GED), elektrik şebekesinde, gerilim ve akım harmoniklerinin oluşmasına yol açar. Bu harmonikler, şebekede ve şebekeden beslenen cihazlarda birçok probleme neden olurlar. Enerji kalitesindeki düşüşün birçok dezavantajı bulunmaktadır.

GED' lerin sistemde meydana getirdiği harmonikler, uzun zamandır bilinmekte ve bu sorun için sürekli kısıtlamalar getirilmektedir. Uluslararası standartlardan, en çok rağbet gören standart, IEEE 519 standardıdır.

Güç sistemlerinin kompanzasyonu için uygulanan yöntemlerden en çok kullanılanı, Pasif Filtrelerle (PF) yapılan kompanzasyondur. Sanayide bolca kullanılan PF' ler, GED sektörünün büyümesiyle, popülerliğini kaybetmiştir. PF' ler sistemde, birçok soruna neden olabilirler.

Enerji kalitesinin iyileştirilmesine olan talep sonucu, son yıllarda aktif çalışma sekli gösteren, Aktif Filtreler (AF) üzerinde yapılan çalışmalar artmıştır. Ek olarak, son yıllarda, AF' lerle yapılan çalışmalar, pratikte de başarılı sonuçlar vermektedir. Yapılan çalışmaların ekseriyetle Paralel Aktif Filtre (PAF) üzerinde yoğunlaşmasının nedeni, bu filtrelerin akım harmoniklerini kompanze etmeleridir. Alçak gerilimli şebekelerde, akım harmoniklerinin, gerilim harmoniklerinden daha tehlikeli olmasından dolayı, kompanzasyonu daha büyük önem arz etmektedir.

Yapı olarak PAF, bir GE eviricisidir. Yapısında, Alternatif Akım (AA) endüktansı, Doğru Akım (DA) kondansatörü ve üç fazlı sistemler için 6 adet ters paralel bağlı yarıiletken-diyot çifti bulunur.

PAF' in çalışma prensibi, yükün şebekeden çektiği harmonikli akım bileşenlerini uygun kontrol yöntemleri ile üreterek, şebekeden harmoniksiz, ideal sinüs akımın çekilmesini sağlamaktır. PAF, belirlenen bir yük için değil, farklı yapıdaki her yük için kompanzasyon yapabilmektedir.

Tez çalışmasında, simülasyon devresi gerçekleştirilerek, sanayide kompanze edilmesi güç olarak tanımlanan, üç fazlı tam dalga doğrultucu ve buna seri bağlı R-L yükünün, çeşitli tetikleme açılarında, harmonik akım kompanzasyonu yapılmış ve ortaya çıkan sonuçlar irdelenmiştir.

Şebekeden çekilen akımın Toplam Harmonik Bozulumu (THB), PAF kullanılarak, IEEE 519 standardının akım için getirdiği sınır değerlerin altına indirilmiştir. Bunun yanında kontrol devresi, şebekeden çekilen reaktif güç değerini de sıfırlama başarısı göstermiştir.

Simülasyon devresinde, iki adet farklı kontrol yöntemi uygulanmıştır. Buna göre, ilk devrede, şebeke akımının, DA kondansatörünün lineer π kontrolle üretilen referans akım işaretini izlemesi sağlanmıştır. İkinci yöntemde ise, yük akımından bant geçiren filtre yardımıyla referans işaret üretilmiş ve şebeke akımı referans akımı izlemeye zorlanmıştır. Gayet basit yapıda ve uygulanması kolay olan bu yöntemlerle, şebekeden çekilen akımların, referans akımları mükemmel biçimde ve çok hızlı olarak izlemesi sağlanmıştır.

Tez çalışmasının simülasyon bölümü, Matlab 6.5/Simulink 5 programı yardımıyla uygulanmıştır. Devre elemanları Simpower modülünden yararlanarak oluşturulmuştur.

PARALLEL ACTIVE FILTER IN THREE PHASE SYSTEMS

SUMMARY

Power Electronics Circuits (PEC), which are commonly used in many areas of recent Electronics Engineering, causes voltage and current harmonics in electrical networks. These harmonics are extremely detrimental for either the instrumental parts of the network or devices connected to the network. In essence, the decrease in energy quality has numerous disadvantages.

The harmonics arising from the PECs in the system are known for a long time since many limitations are designated in order to overcome this problem. Of all the international standards, IEEE 519 is probably the most respected.

The most applied method for the compensation of power networks is the use of Passive Filters (PF). Although the use of PFs has found a wide application area in industrial areas, these types of filters have lost their popularity with the development of PEC sector. Besides, recent experiences reveal that PFs may cause many problems in the power network.

Because of the demand for the desire in energy quality, research currently is focused on the Active Filters (AC), which are simply referred as active-working filters. In addition, recent advances on the AFs led to prosperous experiences in practice. The reason why the majority of the studies concentrate on the Parallel Active Filters (PAFs) is that these filters can successfully compensate current harmonics. Because current harmonics are more dangerous than voltage harmonics in low voltage systems, compensation of this type of harmonics necessitates more importance.

Structurally speaking, PAF is a PE inverter. Its structure consists of an AC Inductance, DC Capacitor and 6 inverse-paralleled connected semiconductor-diode pairs for three phase systems.

Simply, PAF ensures the network to pull ideal sinusoidal waves by producing harmonic current components which the load pulls from the network via appropriate control methodologies. PAF does not only operate for analyzed load: it can compensate different structured loads.

In this study, harmonic current compensation of a three phase complete wave rectifier and serially connected R-L load, which can difficultly be compensated in industry, is carried out in various triggering angles utilizing a simulation circuit. Eventually, the outcomes are scrutinized.

Total Harmonic Distortion (THD) is reduced below IEEE 519 network current limit values utilizing PAF. Moreover, control circuit simulation succeeded to reset reactive power consumption from network to zero.

In the simulation circuit, two different control methodologies have been applied. In the first circuit, it is ensured that the network current follows the reference current signal produced by linear pi control of DA capacitor voltage. In the second method, reference signal is produced by applying appropriate bandpass filter to load current and network current is forced to follow the reference current. Using these methodologies which are rather simple and easy to apply, it is ensured that the currents pulled from the network perfectly and swiftly track the reference currents.

Simulation part of this thesis is employed using the Simulink toolbox in Matlab 6.5 software. Circuit components are formed using Simpower module.

1. GİRİŞ

1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

Son yarım asırda, sanayinin hızla gelişmesi sonucu, elektrik enerjisine olan talep sürekli artmıştır. Teknolojinin gelişmesine paralel olarak ise, enerjinin kalitesine olan talep artmıştır. Enerjinin kalitesine olan bu talep sonucu, güç kalitesi, elektrik mühendisliğinde yeni bir araştırma konusu olmuştur[3]. Üretim sistemlerinde otomasyona geçilmesiyle, enerji ile birlikte kontrol edilebilir enerji kavramı tartışılmıştır. Elektrik enerjisinin kontrolü Güç Elektroniği Devreleri (GED) ile gerçekleştirilmektedir. GED' ler nonlinear karakteristik gösteren devrelerdir.

Bir güç sisteminin güvenli ve sorunsuz çalışabilmesi için, sistem tasarım ve işletim aşamalarında bazı etkenlerin göz önüne alınması gerekir. Nonlinear karakteristikli yüklerin, şebekede meydana getirdiği harmonikler, iletim ve dağıtım sistemlerinde enerji kirliliğine neden olmakta ve tüketiciye verilen enerji kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır.

Güç sisteminde, akım, gerilim gibi büyüklüklerin dalga şekli, temel frekanslı sinüzoidal bir değişime sahip olmalıdır. Bu koşulun yerine getirilebilmesi için, sistemin sinüzoidal bir kaynaktan beslenmesi ve lineer yüklerle yüklenmesi gerekmektedir. Ancak sanayide sıklıkla karşılaşılan güç elektroniği elemanları olan, konverterler, kesintisiz güç kaynakları, AA/DA motor sürücüler ve anahtarlama modlu güç kaynakları gibi nonlinear yükler, elektrik şebekesinin kalitesini azaltmaktadırlar.

Nonlinear yüklerin güçleri düşük olsa bile, gerilim dalga şeklinde bozulmalara neden olurlar. Enerji sisteminde nonlinear karakteristikli birçok yükün var olduğu düşünülürse, harmonik gerilim kayıplarının ve toplam bozulma değerlerinin yüksek değerlere ulaşması kaçınılmaz olur.

Günümüzde nonlinear karakteristikli cihazların kullanımının hızlı artışı, harmonik bileşenlerinin sayısının artmasına ve var olan harmoniklerin genliklerinin artmasına neden olur.

Harmoniklerin şebeke ve şebekeye bağlı diğer elemanlar üzerinde yaptığı zararlı etkiler bilinmektedir. Enerji kalitesinin artırılması ve işletmenin sürekliliği için harmonik analizinin geniş boyutta yapılması ve bu harmoniklerin önlenmesi gerekmektedir. Harmonikler, sistemde ilave güç kayıplarına neden olurlar. Bazı durumlarda harmonikler, güç elemanlarının zarar görmesine veya yanlış çalışmasına neden olurlar. Bunun yanında harmonikler nedeniyle sistemde bulunan çeşitli frekanstaki akım ve gerilim harmonikleri, rezonans olaylarının oluşmasına neden olabilir. Rezonans durumunda oluşacak yüksek akım ve gerilimler, işletmeye büyük zarar verebilirler[3].

Elektrik şebekesinin kalitesini attırmak için uygulanan genel yöntem Pasif Filtrelerdir (PF). PF' lerle gerçekleştirilen uygulamalar, sadece belirlenen harmonikleri yok etmek amacıyla tasarlandığından dolayı, gelişen sanayinin ihtiyacını karşılamaktan uzaklaşmıştır. PF' lerin tasarımı yapılırken, var olan yüklerin geniş bir teknik analizi yapılması gerekmektedir. Sisteme eklenecek her cihaz, şebekenin karakteristiğini değiştirmektedir. Kompanzasyon verileri tekrar incelenmezse, şebekede rezonans durumları yaşanabilir. Pasif filtrelerin en büyük dezavantajı rezonans durumlarıyla karşılaşma olasılığıdır. Rezonans durumda şebeke çok büyük zarar görebilir.

Bu durum, gelişen elektronik sektörünün yardımıyla, aktif bir çalışma sergileyen Aktif Filtrelerin (AF) geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Aktif çalışmanın amacı, yükün değişken durumlarında dahi, sürekli filtrasyon yapmak ve harmonikleri kompanze etmektir. AF' lerin kullanıldığı sistemlerde belirlenen değil, var olan tüm harmonikler kompanze edilir. Bu nedenle, sistemde yapılan değişimler veya ek yükler AF' lerin çalışmasını etkilemez. Teknolojinin gelişmesine paralel olarak, hızlı bir gelişim gösteren AF' ler, son 25 yıldır, pratik olarak uygulanmaktadır [23]. Gelecekte, bu konunun daha da yaygın kullanım alanı bulacağı ve gelişen teknoloji ile daha da hızlı ve verimli kullanılacağı düşüncesindeyim.

AF' ler Paralel Aktif Filtre (PAF) ve Seri Aktif Filtre (SAF) olarak iki gruba ayrılır. PAF, akım harmoniklerinin kompanzasyonu, SAF ise gerilim harmoniklerinin kompanzasyonu için kullanılırlar. Yapılan çalışmada PAF' nin seçilme nedeni, özellikle orta ve alçak gerilim sistemlerinde akım harmoniklerinin gerilim harmoniklerine nazaran daha zararlı olmalarıdır. PAF ve SAF' nin beraber kullanıldığı kontrol ise, ekonomik ölçütler ve diğer kompanzasyon yöntemlerine nazaran, belirli yüklerde daha kötü kompanzasyon yeteneği göstermesinden dolayı, fazla tercih edilmezler [5,6]. Pratikte, PAF ve belirli harmonikler için tasarlanmış PF' ler, en çok uygulanan yöntem biçimidir[5].

AF, beslendiği kaynak açısından da ikiye ayrılır. DA tarafında kondansatör olan AF, Gerilim Kaynaklı Aktif Filtre (GKAF), endüktans olan AF ise Akım Kaynaklı Aktif Filtre (AKAF) olarak adlandırılır. Yapılan çalışmada, GKAF seçilmesinin birkaç nedeni vardır. Pratiğe uygunluk açısından, GKAF hem devrede ekonomi sağlar hem de, daha az yer kaplar [7]. Simülasyon devresinde ise kolay kontrol yeteneği açısından tercih edilmiştir [4].

PAF, sistemdeki harmonik akımları yok ederken, ayrıca sistemden reaktif güç çekilmesini de önler [8,9,10,11]. Uygun kontrol yönteminin seçilmesiyle, PAF bir reaktif güç ayarlayıcısı olarak ta çalıştırılabilir [17]. PAF prensip olarak, şebekeden çekilen harmonik akım bileşenlerini kendi üreterek, şebekeden harmoniksiz akımların çekilmesini sağlar. PAF' nin tükettiği güç, şebekeden aktif güç olarak çekilir. Böylece şebekeden reaktif güç çekilmez.

Simülasyon devresinde, iki adet kontrol yöntemi simüle edilmiştir. İlk devrede, PAF DA kaynağı kapasitesi, PI kontrolle kontrol edilmiş ve gerilimle aynı fazdaki birim sinüs işaretlerle çarpımı sonucu referans işarete ulaşılmıştır [13,14]. Şebeke akımı, referans akımı izlemeye zorlanmıştır. Bu işlem, Histerezis Akım yöntemi ile gerçekleştirilmiştir[19, 20, 2].

İkinci çalışmada ise, referans akım, şebeke akımından harmonik bileşenler süzülerek elde edilir. Burada elde edilen akım, harmoniklerden tamamen yalıtılsa da, şebeke gerilimi ile faz farkı bulunduğundan, kontrol yapımıza tez düşmektedir. Bunun için, şebeke geriliminden elde edilen birim dalgalar, filtre çıkısındaki maksimum değer ile

çarpılarak, referans akım işareti elde edilir. Şebeke akımının bu referans işarete zorlanması sonucu, şebekeden çekilen akımın harmonik ve reaktif bileşenleri kompanze edilmiş olur. Bu çalışmada ise, akım kontrol yöntemi olarak, sabit genlikli frekans yöntemi kullanılmıştır[13,2].

Şebekeden çekilen harmonikli akımlar tüketicinin sorumluluğundadır. Şebekedeki harmonikler sadece düzeltilmesi gereken bir sorun değil, ayrıca şebekeden beslenen diğer yükleri ve tüketicileri de ilgilendiren bir konudur. Bu konuda bazı uluslararası kurumlar gerilim ve akım harmoniklerine belli sınırlamalar getirmektedir. IEEE ve IEC gibi standartlar, dünyada harmonik standartlar arasında en fazla kullanılan standartlardır[3].

Tezin İkinci Bölüm' ü elektrik güç kalitesi ile ilgili temel tanım, kavram ve standartlara ayrılmıştır. Akım ve gerilim büyüklükleri fourier serilerine açılarak analiz edilmiştir. Ayrıca bu bölümde Matlab/Simulink yazılım programında ölçümler için kullanılan devre ve tanımlar ayrıntılarıyla gösterilecektir.

GED' lerin en büyük dezavantajı olan harmonikler ve harmoniklerin zararları, üçüncü bölümde ayrıntılarıyla incelenmiştir. Kompanzasyon çeşitlerinden AF ve PF karşılaştırılmıştır. PF' lerin en büyük sorunu olan rezonans olayı açıklanmıştır. Uluslararası kurumların, şebeke gerilimi ve şebekeden çekilen akımın THB değerlerine ilişkin kısıtlamaları tablolar halinde sunulmuştur.

Dördüncü bölümde, gelişen teknolojinin ihtiyacını karşılamakta zorlanan, PF ler yerine önerilen PAF anlatılmıştır. PAF' nin matematiksel modeli gösterilmiş ve PAF güç devre kriterlerinin seçiminin önemi vurgulanmıştır. PAF' nin simülasyon çalışmasında uygulanan, iki ayrı kontrol yöntemi ayrıntılarıyla incelenmiştir.

Beşinci bölümde ise, tez çalışmasında oluşturulan devre ile ilgili grafikler, konunun daha iyi anlaşılabilmesi açısından tek tek vurgulanmıştır. Oluşturulan her iki kontrol sisteminin, çıkardığı sonuçlar ayrıntılarıyla gösterilmiştir. Ayrıca bu bölümde, kullanılan iki yönteminde, avantaj ve dezavantajları sıralanmıştır.

Altıncı ve son bölümde ise, yapılan çalışma sonrasında ortaya çıkan sonuçlar irdelenmiştir.

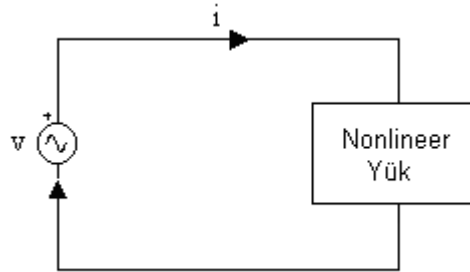
2. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDEKİ TANIMLAR

Güç elektroniği sistemleri, sanayi ve günlük hayatta, hayatımızı kolaylaştırmalarına rağmen, harmonik üreten üreteçler olduğu için şebekeye zararları çok büyüktür. Bu sistemlerinin, harmonik analizinin kusursuz yapılarak, harmoniklerin elemine edilmesi gerekir.

Bu bölümde, harmoniklerin analizleri yapılacak ve elektrik şebekesi ile ilgili temel matematiksel kavramlar ele alınacaktır. Toplam Harmonik Bozulum (THB), Güç Faktörü (GF), aktif-reaktif güç ve etkin değer gibi elektrik şebekesi yönetiminde sıklıkla karşılaştığımız kavramlar, tanımlanacaktır.

2.1. Lineer Olmayan Yük için Akım, Gerilim ve Güç Tanımı

İdeal bir kaynaktan lineer olmayan bir yükü beslediğimizi düşünelim.



Şekil 2.1 Lineer Olmayan Yükü Besleyen Devre

Burada gerilim harmoniksiz ideal bir yapıdadır. Gerilimin ani değeri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir[2,11,10].

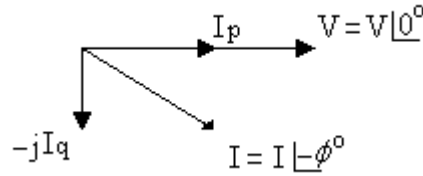
$$v = V_m \cdot \cos wt \quad (2.1)$$

Akım ise sonsuz sayıda harmonikten oluşmaktadır. Yükü endüktif kabul edersek, şebeke gerilimi ve şebekeden çekilen akım arasında faz farkı bulunmaktadır. Akım

gerilimi geriden takip eder. Akımın ani değeri Fourier serileri ile aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$i = \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \cos(n\omega t - \phi_n) \quad (2.2)$$

Akımdaki faz farkı nedeniyle akımı fazörlerle ifade etmek, faz farkı bulunan bir sistemi ifade etmemizi kolaylaştıracaktır.



Şekil 2.2 Yük Akım Fazörleri

Şekil 2.2' den görüleceği gibi akımın iki adet fazörü bulunmaktadır. Fazörlerin bir tanesi reel bileşen, diğeri ise imajinel bileşendir. Akım fazörlerinin etkin değerleri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir. I_p ve I_q birbirlerine fazör olarak diktirler ve aralarında 90° faz farkı bulunmaktadır[2].

$$i_p = \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \cos n\omega t \cdot \cos \phi_n \quad (2.3)$$

$$i_q = \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \sin n\omega t \cdot \sin \phi_n \quad (2.4)$$

Reel ortalama güç P, aktif güç olarak isimlendirilir ve akım ile gerilimin reel bileşenlerinin çarpımına eşittir. Reel bileşenler birbirleriyle aynı fazdadırlar.

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_m I_{mn} \cdot \cos \phi_n \quad (2.5)$$

Fakat akımın, I_p ve I_q gibi iki bileşenden oluştuğunu unutmamak gerekir. Burada iki ayrı gücün var olduğunu göstermek gerekir. Diğer akım fazörü olan I_q ' nun aktif

güce hiçbir etkisi yoktur. I_q tarafından oluşturulan güç, reaktif güç olarak tanımlanır. Aşağıda reaktif güç Q gösterilmiştir.

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_m I_{mn} \cdot \sin \phi_n \quad (2.6)$$

Kompleks güç S ise, aktif ve reaktif gücün fazörel olarak toplamından oluşur.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.7)$$

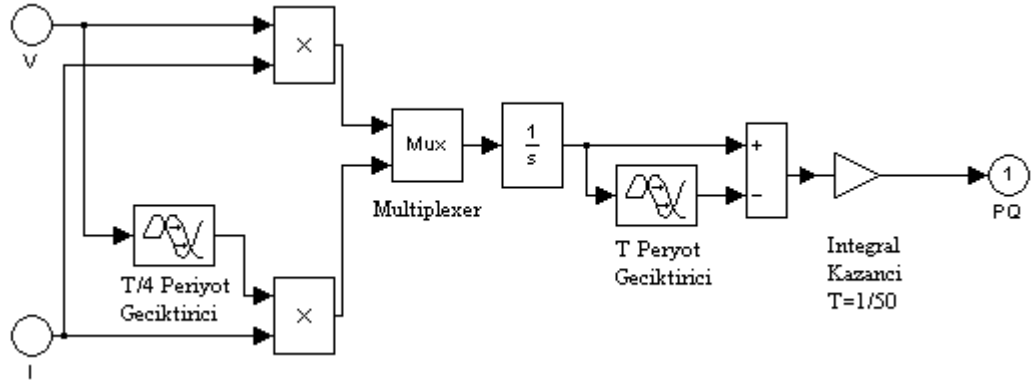
Aktif gücün fiziksel olarak bir anlamı vardır. Burada aktif güç yararlı güç olarak tanımlanır ve içinde çok az kayıp güç barındırır. Reaktif güç ise elektromanyetik cihazlarda elektromanyetik alan oluşturur ve yararlı bir iş için kullanılamaz. Reaktif güç sistemdeki cihazların yüklenmesine neden olur. Bu nedenle ideal olarak, reaktif gücün sıfır olması istenir.

Matlab/Power System Blockset' de yer alan Active/Reactive Power ölçüm bloğu her bir faz için ölçme işlevini aşağıda verilen bağıntıları gerçekleştirecek şekilde kurulmuş blok diyagramla sağlar. Matlab, harmonik içeren ve periyodik değişen ani akım ve gerilim değerlerinden, P ve Q ortalama güçlerini, $v(t).i(t)$ çarpımının bir periyot boyunca ortalamasını alarak hesaplar. Bu şekilde güç değerleri temel frekans için hesaplanmış olur. Üç faz için yapılan benzer ölçüm sonuçlarının toplamı kaynaktan çekilen toplam P_s ve Q_s güçlerini oluşturur.

$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v(\omega t).i(\omega t).dt \quad (2.8)$$

$$Q = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v(\omega t).i(\omega t - \frac{\pi}{2}).dt \quad (2.9)$$

Güç ölçümü, sistemin elektriksel analizinin çıkarılması sebebiyle çok önemlidir. Devre elemanlarının tespitinde, yükün güç bileşenlerinin bilinmesi gerekmektedir. Aşağıda Matlab/Power System Blockset' de yer alan Active/Reactive Power devresi gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Ortalama Aktif ve Reaktif Gücün Hesaplanması

2.2. Etkin Akım ve Etkin Gerilim Değerinin Hesaplanması

Güç elektroniği devrelerinde bulunan, anahtarlama yapan cihazlar, belli bir periyotta kendilerini tekrarlarlar. Bu yüzden burada sürekli hal tanımı yapılabilir[2].

Herhangidir yüke akan ani güç aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$p = v.i \quad (2.10)$$

Sürekli halde ise, bir zaman süresi içerisinde akan gücün ortalama değeri aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$P_{et} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t).dt = \frac{1}{T} \int_0^T v.i.dt \quad (2.11)$$

Devrenin tamamen lineer olduğu varsayılırsa, gerilim ifadesi $v = R.i$ olarak yazılabilir. Bu durumda etkin güç ifadesi aşağıdaki şekilde düzenlenir.

$$P_{et} = R. \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t).dt \quad (2.12)$$

Ortalama güç akısı $P=R.I^2$ olduğu göz önüne alınarak, etkin akım değeri şu şekilde ifade edilebilir.

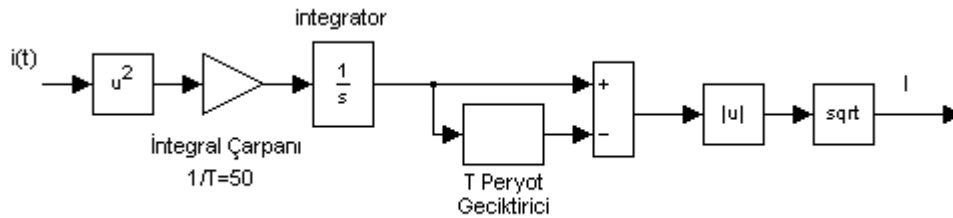
$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t).dt} \quad (2.13)$$

Bu tanım gerilim içinde kolaylıkla yapılabilir.

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t).dt} \quad (2.14)$$

Etkin akımın tanımı, devre dizaynında birçok üstünlük sağlamaktadır.

Matlab/Simulink ortamında yukarıda verilen bağıntıyı gerçekleştirecek şekilde oluşturulmuş model devresi aşağıda gösterilmektedir. Burada her dalga için anlık ölçüm yapılmaktadır. Ölçüm, belirlenen frekans için her periyotta tekrarlanmaktadır.



Şekil 2.4 Akım ve Gerilim Etkin Değerinin Hesaplanması

2.3. Enerji Kalitesi ile İlgili Kavramlar

2.3.1. Güç Faktörü

Güç Faktörü (GF) kavramı, AA güç sisteminden çekilen akımın bir yük tarafından ne kadar verimlilikle kullanıldığını ölçmek için gereklidir. S, sistemin kompleks gücü, P de verimli kullanılan güç olan aktif güç olduğu için toplam güç faktörü bunların oranıdır.

$$\text{Güç_Faktörü} = \frac{P}{S} = \frac{V_s \cdot I_{s1} \cdot \cos \phi}{V_s \cdot I_s} = \frac{I_{s1}}{I_s} \cdot \cos \phi \quad (2.15)$$

Sinüzoidal olmayan akım şeklinde, harmonikler ne kadar artarsa, güç faktörü de o kadar azalır.

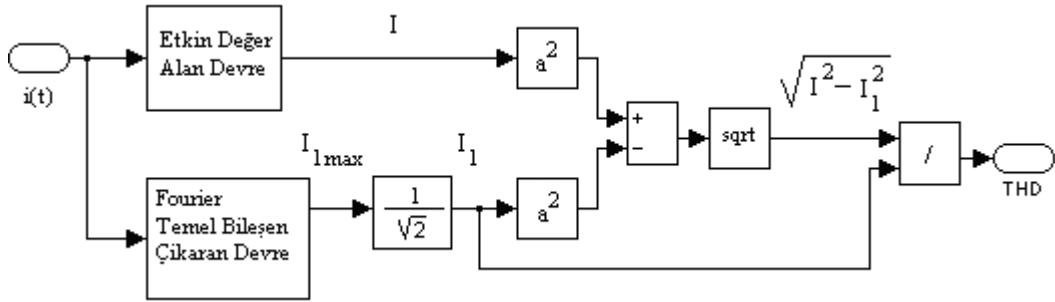
Güç faktörü düzeltilmesinde amaç, devreden çekilen aktif gücün, devre elemanlarının yüklenmesine esas olan görünür güç değerine yaklaştırmaktır. Değeri ‘0’ ve ‘1’ arasında değişir ve ideal durumda ‘1’ olmalıdır. Güç faktörünün tam 1 olması reaktif gücün hiç çekilmediğini gösterir.

2.3.2. Toplam Harmonik Bozulum (THB)

Gerilim ve akım dalga şeklinde, ideal durumdan sapma miktarının tespitinde, THB değeri kullanılır. Sadece temel frekanstan oluşan tam bir sinüs dalga şekli için THB değeri sıfırdır. Akımdaki toplam harmonik bozulum değeri, temel harmonik dışındaki harmoniklerin toplamının, temel bileşene oranı ile hesaplanır.

$$THD_i = \frac{I_{dist}}{I_1} = \frac{(I^2 - I_1^2)^{1/2}}{I_1} \quad (2.16)$$

Burada, ideal durumda sadece 1. harmoniğin (temel dalga) olduğu varsayılmıştır. Aşağıda Matlab/Simulink’ te THB değerinin hesaplanması için verilen devre gösterilmektedir.



Şekil 2.5 Toplam Harmonik Bozulum Değerinin Hesaplanması

3. ELEKTRİK SİSTEMLERİNDEKİ HARMONİKLER ve HARMONİKLERİN FİLTRELENMESİ

Sinüzoidal akım ve gerilimlerin bulunduğu bir elektrik şebekesi, sabit genlik ve frekansa sahip gerilim kaynakları tarafından beslenen ve pasif elemanlardan oluşan bir sistemdir. Günümüzde güç elektroniği elemanlarının artmasıyla, sisteme enjekte edilen harmonik akımları artmaktadır. Harmonik akımlar, güç sistemdeki elemanlara zararlı etkilerde bulunmaktadır. Bu yüzden harmonik akımların önlenmesi gerekmektedir. Harmonik akımların önlenmesi içinde, teknik analizlerinin yapılması ve filtre yönteminin belirlenmesi gerekmektedir.

Gerilim ve akım dalga şeklinin sinüs biçiminden sapmasına neden olan harmonik bileşenleri, harmonik kaynağı olarak nitelendirilen ve akım-gerilim karakteristiği lineer olmayan elemanlar tarafından üretilmektedir. Şebekede bulunan motorlar, generatörler, kesintisiz güç kaynakları ve konverterler sanayide sıklıkla karşılaşılan yüksek güçlü harmonik üreten cihazlardır. Bunun yanında bilgisayarlar ve televizyonlar gibi küçük güçlü lineer olmayan elemanlar da sayılarının çok olması nedeniyle şebekede harmoniklere yol açan diğer etkenlerdir[23].

3.1 Harmoniklerin Şebeke Üzerindeki Etkileri

Aşağıda, harmoniklerin sistemde sebep olduğu zararlar irdelenecektir[3].

- Harmonik akımlar, iletkenlerde kayıpların artmasına neden olurlar. Harmonik akımların artmasıyla, akım iletkenin dış yüzeyine doğru yoğunlaşır. Bunun sonucunda, etkin direncin artmasıyla akımda artış gözlenir. Bu olay literatürde skin effect (deri etkisi) olarak tanımlanır.
- Lineer bir sistemde 3 ve 3' ün katı harmonikler nötr hattında birbirini sönmülerler. Fakat lineer olmayan bir sistemde, 3 ve 3' ün katı harmonikler, nötr hattında birbirini zayıflatmaz, aksine güçlendirir.

- Akım harmonikleri motor ve generatörlerde bakır kayıplarını arttırır. Bakır kayıpları sonucu dönen cihazların ısısı artar. Bunun sonucunda verim, makine momenti azalır ve harmoniksiz duruma kıyasla daha gürültülü bir çalışma durumu ortaya çıkar. Transformatörlerde aynı durum sonucu oluşan, bakır ve kaçak akı kayıpları, transformatörün verimini olumsuz etkiler.
- Sesli ve görüntülü elemanlarda parazitli ve anormal çalışma, mikroşlemcilerin hatalı çalışması harmoniklerin yüksek frekansta çalışan elektronik elemanlara verdiği zararı gösterir.
- Temel frekansta rezonans olayı olmadığı halde, harmonik frekanslarında, şebekedeki pasif elemanlarda rezonans olaylarının meydana gelmesi ve bu elemanlarda aşırı akım veya gerilimlerin oluşması, harmoniklerin işletmelere gösterebileceği büyük zararın göstergesidir.
- Harmoniklerden kaynaklanan gürültü nedeniyle, kontrol sistemlerinin hatalı çalışması ve sistemdeki koruma sistemlerinin yanlış çalışması, harmoniklerin işletmelerdeki sürekliliğe zararının göstergesidir.

Harmonik bozulumu olarak anılan ve enerji sistemindeki harmonik bileşenler sonucu meydana gelen harmonik kirliliği, özellikle GED' lerin yaygın kullanımıyla giderek artış göstermektedir. Bu bozulunun sonucu oluşan olumsuzlukların giderilmesi için harmonik sınırlamalarının yapılması zorunlu olmuştur. Bu nedenle elektrik enerjisindeki harmonik kirliliği bazı ülkelere sınırlandırılmıştır.

3.2 Harmoniklerin Rezonans Etkisi

Bir elektrik devresinde, endüktif reaktans ile kapasitif reaktans değerlerinin eşit olması durumunda, rezonans durumu meydana gelir. Güç sistemlerinde, rezonans durumu, devreden aşırı akım veya aşırı gerilim değerlerinin oluşmasına neden olur. Rezonans problemi, sistemin sürekliliği bakımından sakınca oluşturur ve kesinlikle önlem alınması gereken bir problemdir.

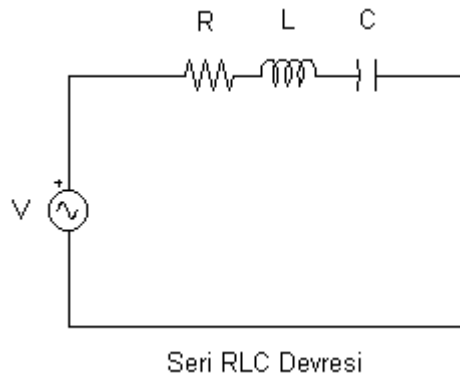
Elektrik devrelerinde iki tür rezonans durumuyla karşılaşılır.

1. Seri Rezonans
2. Paralel Rezonans

Aşağıdaki açıklamalarda, devrenin ideal bir şebeke kaynağından beslendiği öngörülmüştür.

3.2.1 Seri Rezonans

Seri rezonans durumunda, devre empedansı düşüktür ve devreye düşük genlikli bir gerilim uygulansa bile devreden yüksek genlikli rezonans akımları akacaktır.



Şekil 3.1 Seri RLC Devresi

Yukarıdaki verilen devrede empedans aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j(X_L + X_C) \quad (3.1)$$

Kaynak gerilimine ait açısal frekans ω olmak üzere, devrede rezonans durumu meydana geldiğinde,

$$X_L = X_C \Rightarrow \frac{1}{\omega C} = \omega L \quad (3.2)$$

olur ve bu durumda rezonans frekansı aşağıdaki şekilde ifade edilir.

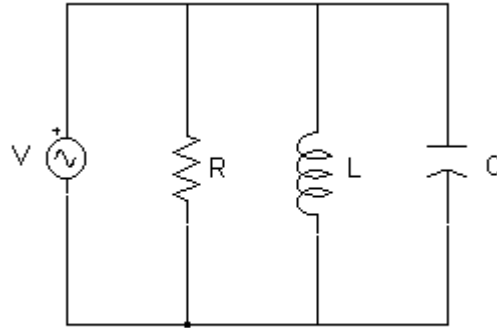
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{f}{\omega\sqrt{LC}} = f \cdot \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (3.3)$$

Rezonans durumunda $X_L = X_C$ olduğu için devre empedansı $Z = R$ olur. Rezonans durumunda, empedans minimum iken akım maksimum değer alır.

Seri rezonansda büyük değerler alan kondansatör ve endüktans gerilimi birbirine eşit ve zıt yönlü olduklarından toplamaları sıfır olur. Bu nedenle, seri rezonansa gerilim rezonansı denir.

3.2.2 Paralel Rezonans

Paralel rezonans durumunda, empedans maksimum değerini alır ve bu nedenle özellikle harmoniklerin mevcut olması durumunda devreden düşük genlikli bir akım geçse bile devre elemanları uçlarında yüksek genlikli rezonans gerilimleri meydana gelir.



Paralel RLC Devresi

Şekil 3.2 Paralel RLC Devresi

Şekil 3.3' de verilen devre için devre empedansı şu şekilde ifade edilir.

$$Z = \frac{-j.R.X_L.X_C}{R.(X_L - X_C) - j.X_L.X_C} \quad (3.4)$$

Rezonans durumunda $X_L = X_C$ olacağından rezonans frekansı şöyle ifade edilir.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.5)$$

Rezonans durumunda, akım değeri büyük değerler alır. Empedans ve kondansatör üzerinden geçen akım değeri birbirine eşit olup, toplamaları sıfırdır. Bu nedenle paralel rezonansa akım rezonansı denir.

3.3 Harmonik Standartları

IEEE (International Electrical Electronics Engineers) tarafından getirilen sınırlamalar hem akım hem de gerilim harmoniklerini kapsamaları nedeniyle daha etkin ve sınırlayıcı olmaktadır. Ayrıca IEEE sınırlamasında yüklere tek tek değil, toplu olarak sınırlama getirilmektedir. IEEE-519 standardında, elektrik şirketleri için şebeke bara gerilim bozulumu, müşteriler içinse lineer olmayan yükler tarafından üretilen harmonik akımları ile ilgili sınırlamalar getirilmiştir[3].

Üretici firmanın sorumluluğunda olan gerilim harmonik bozulum değeri, IEEE tarafından aşağıdaki şekilde sınırlandırılmıştır. Burada her bir harmonik için ve toplamda harmonik bozulumu için ayrı ayrı iki sınırlama verilmiştir[12].

Tablo 3.1 IEEE Gerilim İçin Harmonik Distorsyon Sınırları

Bara Gerilimi (Vn)	Tekil Harmonik Büyüklüğü (%)	THB Vn (%)
Vn<69 kV	3	5
69<Vn<161 kV	1.5	2.5
Vn>161kV	1	1.5

Akım harmoniklerinin kompanzasyonu kullanıcının sorumluluğundadır. Aşağıda uluslararası IEEE kuruluşunun, izin verdiği maksimum THB değerleri verilmiştir. Tabloda I_{sc} sistemin kısa devre akımını, I_1 temel bileşeni ve n harmonik mertebesini göstermektedir.

Tablo 3.2 IEEE 519 Tek Harmonik Akım Sınırları I_n/I_1 (%)

Vn < 69 kV						
I_{sc}/I_1	n<11	11≤n<17	17≤n<23	23≤n<35	n≤35	THB
<20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50-100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100-1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1,4	20
69 < Vn < 161 Kv						
<20	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4
50-100	5	2.25	2	0.75	0.35	6
100-1000	6	2.75	2.5	1	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3	1.25	0.7	10
Vn > 161 Kv						
<50	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
>50	3	1.5	1.15	0.5	0.22	4

3.4 Harmoniklerin Filtrenmesi

Harmoniklerin elektrik sistemine zararlı etkileri ilk bölümde belirtilmişti. Bu harmoniklerin zararlı etkilerini engellemek için tasarımda yapılacak değişiklikler yeterli olmayacaktır. Harmonik akımların kompanzasyonu için, şebekeden çekilmesini engelleyecek düzeneklerin kurulması zorunluluğu vardır.

Harmonik filtrelerin amacı, bir ya da daha fazla frekanstaki akım ve gerilim harmoniklerinin etkisini azaltmak veya sıfıra indirmek olarak açıklanabilir. Genelde sanayide karşılaşılan kompanzasyon yöntemi, etkin harmoniklerin yok edilmesi ve diğer küçük değerli harmoniklerin azaltılmasıdır. Filtre dizaynı aşamasında, işletmenin teknik olarak geniş bir biçimde analiz edilmesi gerekmektedir.

Filtreler işlevleri bakımından ikiye ayrılır:

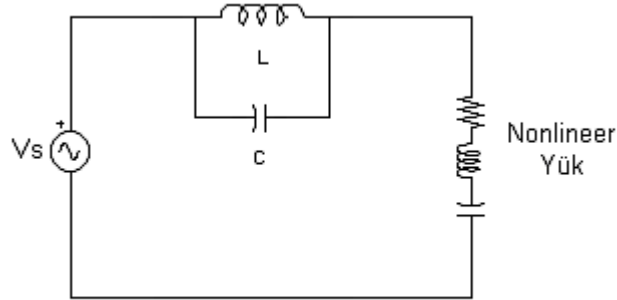
1. Pasif Filtreler
2. Aktif Filtreler

3.4.1 Pasif Filtreler

Pasif filtreler, kaynak ile alıcı arasına yerleştirilen ve temel frekans dışındaki harmonikleri yok eden direnç, endüktans ve kapasite gibi pasif elemanlardan oluşmuş filtrelerdir. Pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik bileşen frekansında rezonansa gelecek L ve C değerlerini belirlemektir. Her bir harmonik için onu rezonansa getirecek ayrı bir filtre uygulanması gerekmektedir.

3.4.1.1 Seri Pasif Filtre

İstenmeyen harmonik bileşen akımlarını bloke etmek için yüksek bir seri empedansın kullanımı ile sistemde harmonik akımların akması engellenebilir. Sadece belli frekanstaki bileşenin kompanze edilmesi için bu yöntem kullanılır. Seri filtreler ayarlandıkları frekansa yüksek empedans, temel harmoniğe ise düşük empedans gösterir. Seri pasif filtrelerde rezonans durumu gözlemlenmemesine rağmen, tam yük akımını taşıma ve hat gerilimine göre yalıtılma zorunlulukları vardır.

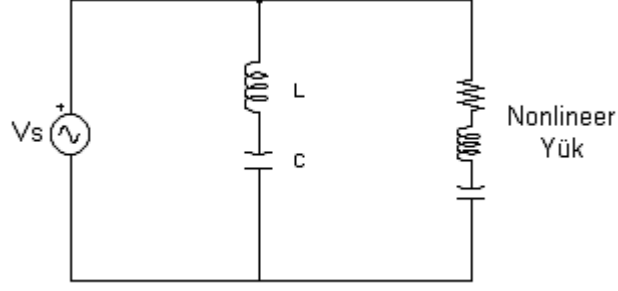


Şekil 3.3 Seri Pasif Filtre

3.4.1.2 Paralel Pasif Filtreler

İstenmeyen harmonik bileşen akımları, düşük empedanslı bir paralel devre üzerinden toprağa aktarılarak, sistem içinde dolaşımı paralel pasif filtrelerle önlenir.

Maliyet olarak bakıldığında, paralel filtreler seri filtreler nazaran daha ucuzdur. Paralel filtreler harmonik akımlarına düşük empedans gösterirler. Temel frekansta ise reaktif güç üretebildiklerinden yaygın kullanım alanı bulmuşlardır.



Şekil 3.4 Paralel Pasif Filtre

Fakat bunun yanında paralel filtreler güç sistemiyle rezonansa geçebilirler. Filtre bileşenleri, şebeke empedansı ile etkileşime girerek, işletme için çok zararlı olan seri-paralel rezonans durumunun ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu nedenle paralel pasif filtrenin dizaynından önce ayrıntılı bir teknik analiz yapma zorunluluğu vardır. Ayrıca işletmede yapılacak her değişim çok iyi kontrol edilmelidir. Her yeni eklemede rezonans frekansı tekrar hesaplanmalı ve filtre elemanı değerleri güncellenmelidir.

3.4.2 Aktif Filtreler

Aktif filtreler harmoniklerin tümünden kaldırılması için gerçekleştirilen devrelerdir. 1980 yılından beri, pratik olarak uygulanan aktif filtreler, ileri güç elektroniği temellerine dayalıdır. Pasif filtrelerle nazaran daha pahalı olan aktif filtreler, geniş düşünüldüğünde tüketiciye birçok yarar sağlar. Filtre kullanımına karar verirken, geniş bir istatistik hesap yapılarak, ona göre filtre yöntemi belirlenmelidir.

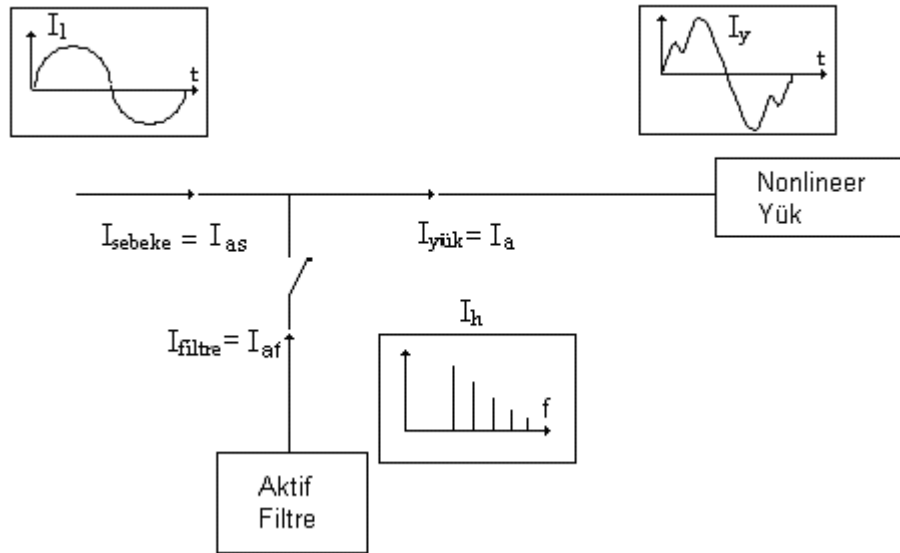
PF' lerle yapılan harmonik kompanzasyonu için filtre tasarımı, işletmenin konfigürasyonu değiştiğinde geçersiz olur ve yeni tasarım gerektirir. Aktif filtrede ise bu durum yoktur ve oluşan her harmonik için filtreleme işlemi yapılır. Ayrıca PF' lerin şebekeye entegre edilmesi gayet zordur. Aktif filtreler ise sisteme kolayca entegre edilebilirler.

Aktif filtreler PAF ve SAF olarak iki gruba ayrılır. PAF şebekeden çekilen akım harmoniklerinin kompanzasyonu için sisteme paralel bağlanır. SAF ise şebeke geriliminin kompanzasyonu için sisteme faz trafolarıyla seri bağlanır. Alçak ve orta

gerilim sistemlerinde, akım harmoniklerinin etkileri, gerilim harmoniklerine nazaran daha tehlikeli olduğu için yapılan araştırmalar PAF üzerinde yoğunlaşmıştır. PAF ve SAF' lerin beraber kullanıldığı uygulamalar ise, maliyet ve karmaşık kontrol sistemleri nedeniyle tercih edilmezler.

Yükün ihtiyacı olan harmonikli akım bileşenlerini oluşturan PAF' ler, yükün ihtiyacı olan temel harmonik bileşen dışındaki harmonik akım bileşenlerini karşılayarak, şebekeden harmoniksiz akımların çekilmesini sağlar.

Aşağıda PAF' nin işlevini gösteren diyagram bulunmaktadır.



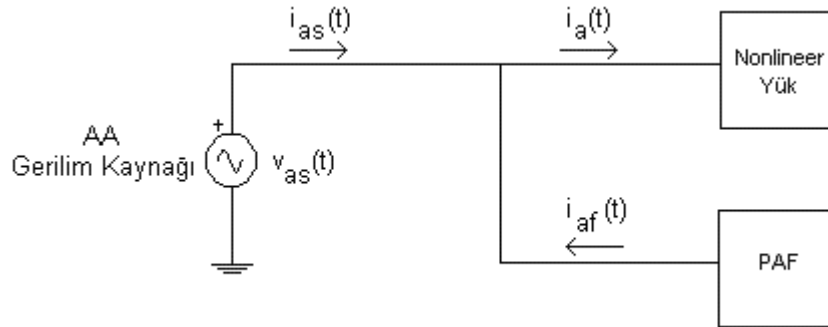
Şekil 3.5 Aktif Filtre ile Harmonik Akım Kompanzasyonu

4. PARALEL AKTİF FİLTRE

Yük akım harmoniklerinin kompanzasyonu için geliştirilen PAF, orta veya alçak gerilimlerde, akım harmoniklerinin kompanzasyonunun gerilim harmoniklerine kıyasla daha önemli olduğu için, sanayide sıklıkla tercih edilir.

PAF, şebeke ile yük arasına doğrudan bağlanır. PAF' nin şebekeye bağlanması sırasında herhangi bir devre veya elemana ihtiyacı olmaması, PAF' nin diğer bir özelliğidir.

Aşağıda PAF tek hat şeması gösterilmektedir.

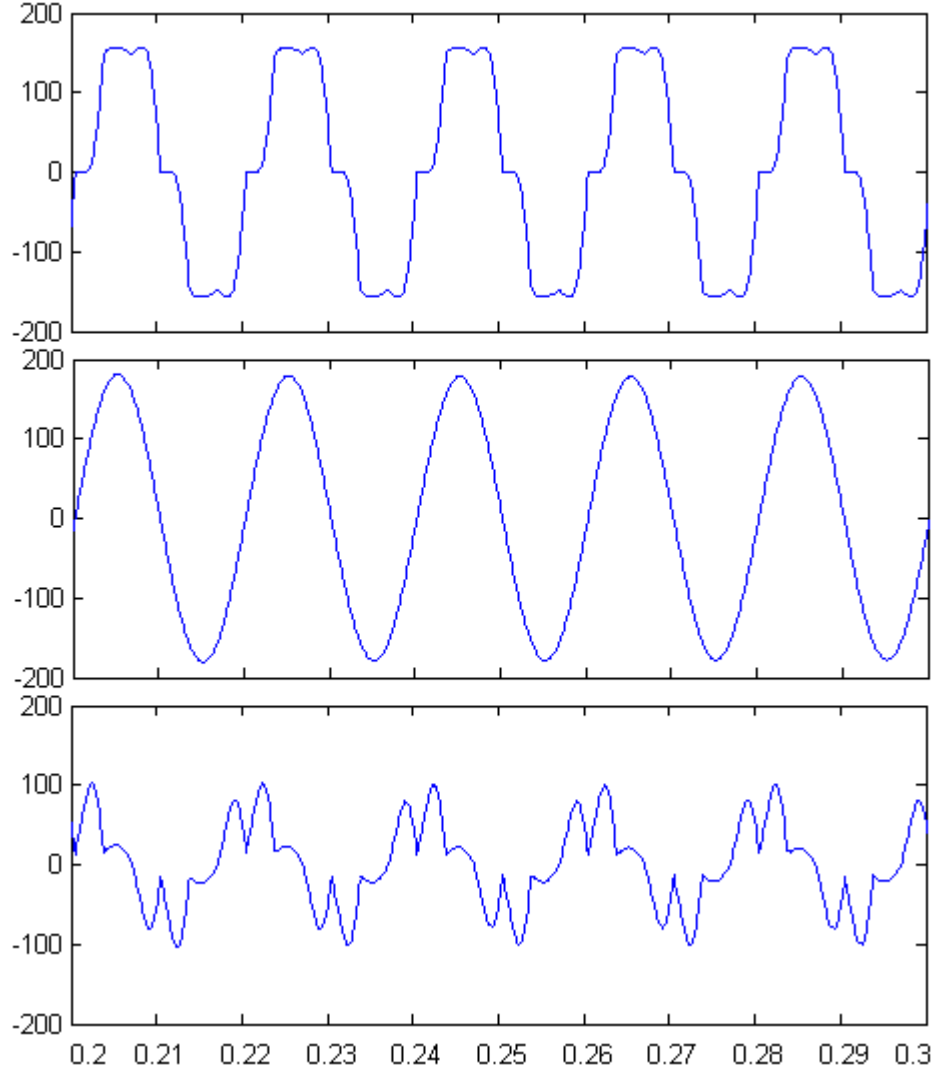


Şekil 4.1 PAF Tek Hat Şeması

Burada, i_{as} şebekeden çekilen harmoniksiz akım, i_a yük akımı, i_{af} PAF' nin sisteme enjekte ettiği akım ve v_{as} şebeke gerilimidir.

PAF prensip olarak, yükün ihtiyacı olan harmonik akımları üreterek, şebekeden harmoniksiz akımların çekilmesini sağlar. PAF yükteki değişimlere karşı duyarlıdır. Sistemdeki yükün değişimi, kontrol devresi tarafından algılanarak, farklı durumlarda da PAF' nin harmonik kompanzasyonu yapmasını sağlar. Yarıiletken teknolojisindeki gelişmeler sonucu, PAF, sanayide çok verimli olarak kullanılmaktadır.

Şekil 4.2 de yük akımı i_a , şebekeden çekilen akım i_{as} ve PAF in sisteme enjekte ettiği akım i_{af} gösterilmektedir. İdeal durumda, şebekeden çekilen akım ideal sinüs dalgasıdır ve harmonik ihtiva etmez.



Şekil 4.2 İdeal Akım Kompanzasyonu Durumunda Tek Faz Akım Değerleri a)Yük akımı b)Şebeke akımı c)PAF akımı

4.1 PAF Matematiksel Modeli

Şebekenin harmoniksiz yapıda olduğunu düşünelim. Bu durumda şebeke gerilimi ideal formdadır.

$$v_s(t) = V_m \cos \omega t \quad (4.1)$$

Şebekenin lineer olmayan bir yükü beslediğini düşünelim. Bu durumda, yükün endüktif olduğu varsayılırsa, şebekeden çekilen akım, gerilimi geriden takip eder ve sonsuz sayıda harmonik içerir.

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{nm} \cos(n\omega t - \phi_n) = I_{1m} \cos(\omega t - \phi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_{nm} \cos(n\omega t - \phi_n) \quad (4.2)$$

Şebekeden çekilen ani güç aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$p(t) = v_s(t).i(t) \quad (4.3)$$

Şebekenin ideal gerilimi ile şebekeden çekilen harmonik akım bileşeni içeren akım çarpıldığında, 3 farklı güç bileşeni elde edilir.

$$p(t) = V_m . I_{1m} \cos^2 \omega t . \cos \phi_1 + V_m . I_{1m} . \cos \omega t . \sin \omega t . \sin \phi_1 \quad (4.4)$$

$$+ V_m . \cos \omega t . \sum_{n=2}^{\infty} I_n \cos(n\omega t - \phi_n) \quad (4.5)$$

Bileşenlerden görüleceği üzere, şebekeden aktif güç, bu güce fazörel olarak dik reaktif güç ve sonsuz sayıda harmonik güç bileşeni çekilir. Aktif güç değeri, şebeke gerilimine bölünürse, şebekeden çekilen reel akım hesaplanabilir. Böylece, toplam akım değerinden, reel akım değeri çıkarılarak, harmonik ve reaktif akım değerleri görülür. Bu harmonik ve reaktif akımlar, PAF tarafından karşılanmak suretiyle, şebekeden ideal sinüs akımın çekilmesi mümkün olur.

Şebekeden çekilen aktif güç aşağıda gösterilmiştir.

$$p_{ak}(t) = V_m . I_{1m} \cos^2 \omega t . \cos \phi_1 \quad (4.6)$$

Aktif güç için şebekeden çekilmesi gereken akım, şebekeden çekilen akımın reel bileşenidir ve aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$i_s(t) = \frac{p_{ak}(t)}{v_s(t)} = I_{1m} \cos \omega t . \cos \phi_1 \quad (4.7)$$

Yük akımından, akımın reel bileşeni çıkarıldığında, reaktif akım ve akım harmoniklerinden oluşan, bozulmuş akım görülmektedir.

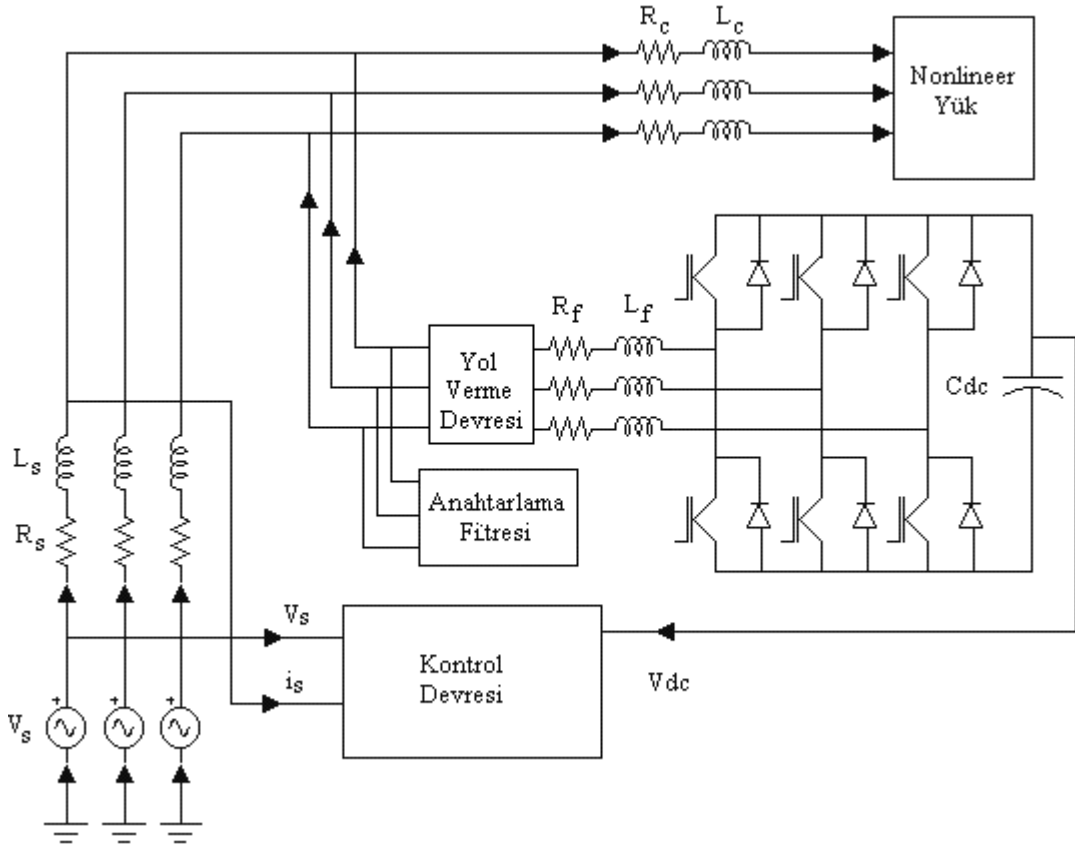
$$i_{boz}(t) = i(t) - i_s(t) \quad (4.8)$$

$$i_{boz}(t) = I_{1m} \sin \omega t \cdot \sin \phi_1 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{nm} \cos(n\omega t - \phi_n) \quad (4.9)$$

Bu akım bileşenlerinin aktif güce katkısı yoktur ve sistemde birçok dezavantaja neden olurlar.

4.2 PAF Devre Dizaynı

Tezde ele alınan PAF güç devresi, enerji depolama elemanı olarak doğru akım kondansatörü C_{dc} , AA empedansı L_f ve DGM eviricisinden oluşur. Aşağıda lineer olmayan yükün, PAF ile kompanzasyonunu gösteren şekil görülmektedir.



Şekil 4.3 PAF Akım Kompanzasyonu Sistem Diyagramı

Oluşturulan devrede, pratik çalışma düşünülerek, şebeke empedansı tanımlanmıştır. Burada $R=1\text{m}\Omega$ ve $L=0.02\text{mH}$ gibi çok düşük değerler seçilmiştir.

Ayrıca, PAF empedansından önce, Yol Verme Devresi tasarlanmıştır. PAF $t=0$ anında devreye girdiğinde, kapasitenin boş olduğu düşünülürse, kapasitenin şarj edilmesi için ilk anda büyük akımlar çekilecektir. Bunu önlemek amacıyla, ilk 0.05 için $R=1\Omega$ değeri aktif olmakta, daha sonra ise kısa devre edilmektedir. R_f değeri, direnç üzerindeki kayıpların minimum olması için 0.01Ω seçilmiştir.

Simülasyonda, hızlı akım değişimlerinin de sistem tarafından kompanze edilmesi amaçlanmıştır. Yük değişimlerin hızlı algılanabilmesi için, tristörün girişine, seri bağlı L_{ac} - R_{ac} reaktansı bağlanmıştır. Simülasyon devresinde, doğrultucudan önce kullanılan direncin değeri 0.01Ω , endüktansın değeri 1 mH ’ dir.

4.2.1 PAF DA Kondansatörü

PAF devre tasarımında, eviricinin DA tarafında, ek bir üretece gerek görülmemiş ve pasif bir eleman olan DA kondansatörü kullanılarak, devrede ekonomi sağlanmıştır. Enerji depolama elemanı olarak DA kondansatörü veya endüktansı kullanılabilir. Sistemde kapasite kullanımının nedeni, kapasite kontrolünün kolayca yapılması ve devre maliyetinde ekonomi sağlamaktır[4].

C_{dc} doğru akım kondansatörü, PAF devredeyken, harmonik akımların üretilmesi için gerekli olan enerjiyi depolar. Şekil 4.3’ teki devrede görüleceği üzere, C_{dc} doğru akım kondansatörü, yol verme direnciyle şebekeye bağlanmıştır. Sistem devreye alındığında, belli bir müddet, yol verme direncinin üstünden şarj işlemi yapılmakta, daha sonra devre dışı bırakılarak, C_{dc} doğru akım kondansatörünün aktif çalışması sağlanmaktadır. C_{dc} değeri şarj edilmeden, PAF aktif hale geçemez[17].

Yapılan simülasyon çalışmasında, yaklaşık 100 kW ’ lık bir yük incelenmiştir. Yükün reaktif gücü yaklaşık 80 kVA civarındadır. DA tarafında uygulanması gereken kapasite değerini Mohan aşağıdaki formülle hesaplamıştır[2].

$$Q_C = C.\omega.V_{LL}^2 \quad (4.10)$$

PAF, şebekenin reaktif güç ihtiyacını karşılamaktadır. Sistemdeki kayıplar ve yük değişimleri söz konusu olunca, 50 Hz frekansında, fazlar arası gerilimi 380 V olan bir sistemde, formül 4.10'a göre, 3000 µF değerinde bir kapasite kullanımı fazlasıyla yeterli olacaktır. PAF' nin enerji depolama elemanı olarak kullandığı C_{dc} DA kondansatörünün seçimi, PAF açısından çok önemlidir. Seçilecek C_{dc} değerinin, faz gerilimi tepe değerinden en az iki kat fazla seçilmesiyle sağlanır [17]. Bu koşullar ele alındığında V_{dc} gerilimi, kaynak gerilimi tepe değerinin yaklaşık 2.5 katı (800 V) seçilmiştir[4].

Sürekli çalışma durumunda DGM eviricisi, sadece yükün ihtiyacı olan reaktif gücü üretmektedir. Reaktif güç üretirken kullandığı enerji, şebekeden aktif güç çekilmesi suretiyle sağlanmaktadır. Sistemin kontrolü bu şekilde sağlanmaktadır. Enerji alışverişi sırasındaki, kapasite gerilim değerindeki dalgalanma, lineer PI kontrol tarafından kontrol edilir. PAF devredeyken, şebekeden reaktif güç çekilmez.

4.2.2 PAF Endüktansı

L_f filtre endüktansı, DGM ile şebeke arasına bağlanır. L_f elemanı, DGM çıkışında oluşturulan gerilim dalga şeklini, akım işaretlerine çevirir. Eviriciyi akım kaynağına dönüştürür. L_f filtre endüktansının seçimi çok önemlidir zira DGM çıkışındaki yüksek mertebedeki harmonikleri, yapısı gereği süzer.

L_f elemanının büyük seçimi, PAF' nin filtre kabiliyetini arttırır. Fakat L_f elemanının gereğinden büyük seçilmesi, PAF' nin referans akımları izleme kabiliyetini azaltır[16]. Büyük değerli L_f elemanı, sistemde gecikmeye neden olur.

L_f secimi aşağıdaki formülle yapılır[24].

$$L_f = \frac{V_{dc}}{6 \cdot f_s \cdot I_{pp\max}} \quad (4.11)$$

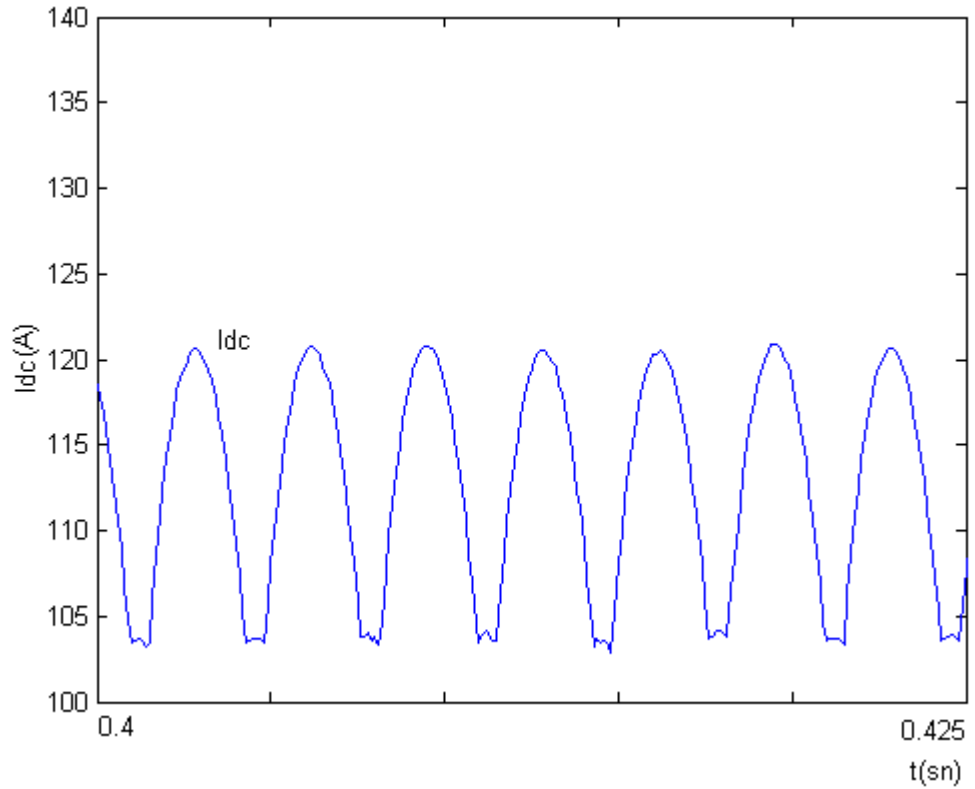
Yukarıdaki formülde, V_{dc} değeri bilinmektedir. f_s değeri de sistemimizde 8 kHz olarak seçilmiştir. Konverter verimi %90 olarak değerlendirilir. Buna göre, DA tarafındaki maksimum akım işareti I_{dc} değeri %10' luk değişimler içermektedir.

Simülasyon devresinde I_{ppmax} değeri, akımın %10' u seçilecek biçimde 15.1 A seçilmiştir[24].

$$I_{ppmax} = 0.1 * I_{dc} \quad (4.12)$$

Bu kurallar ele alındığında, tez çalışmasında 1.2 mH değerine sahip bir Lc filtre endüktansı kullanılmıştır.

Şekil 4.4' te, tristör $\alpha=45^\circ$ ile tetiklenirken, I_{dc} akımı görülmektedir. Pikten pike akım, sistemimizde 15.5 A seçilmiştir.



Şekil 4.4 Tristör $\alpha=45^\circ$ ile tetiklenirken I_{dc} akımı

4.2.3 PAF Eviricisi

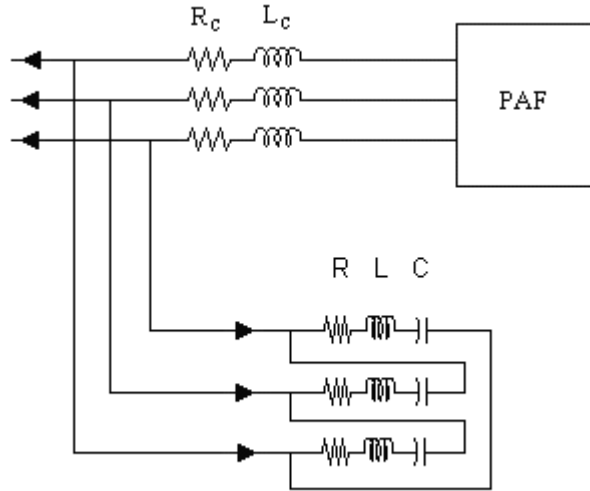
DGM devresinde yarı iletken olarak IGBT/Diyot çifti kullanılmıştır. IGBT elemanı yüksek güçlerde hızlı anahtarlama yapabilme özelliğine sahiptir. Ters akım diyotları da, PAF devreye girdiğinde C_{dc} DA kondansatörünün şarj olmasını, sürekli zamanda ise, sistemin güç dengeleyicisi olarak çalışmasını sağlar.

IGBT elemanın anahtarlama frekansının seçimi de, devrenin düzgün çalışması için çok önemlidir. Ele alınan tezde, 80-100 kVA görünür gücündeki yüklerin kompanzasyonu için yeterli olacak şekilde, anahtarlama frekansı olarak 8 kHz seçilmiştir.

4.3 Anahtarlama Filtresi

PAF eviricisinin anahtarlama anlarında, şebekeden çekilen akım dalga şeklinde yüksek mertebede harmonikler oluşur. Bu yüksek mertebeli harmonikler, akım THB değerinde artışa neden olurlar. Öte yandan yüksek dereceli harmonikler, şebekeden beslenen diğer tüketicileri de etkiler. Bu etkinin engellenmesi amacıyla, şebekeye uygun seçilmiş bir anahtarlama filtresi (Switching Ripple Filter) uygulanır[4].

Anahtarlama filtresinin bir özelliği de, IGBT OKN' de oluşabilecek yüksek frekanslı gerilim harmoniklerini önlemesidir. Gerilim harmonikleri şebekeye OKN' den beslenen diğer üreticileri olumsuz etkiler.



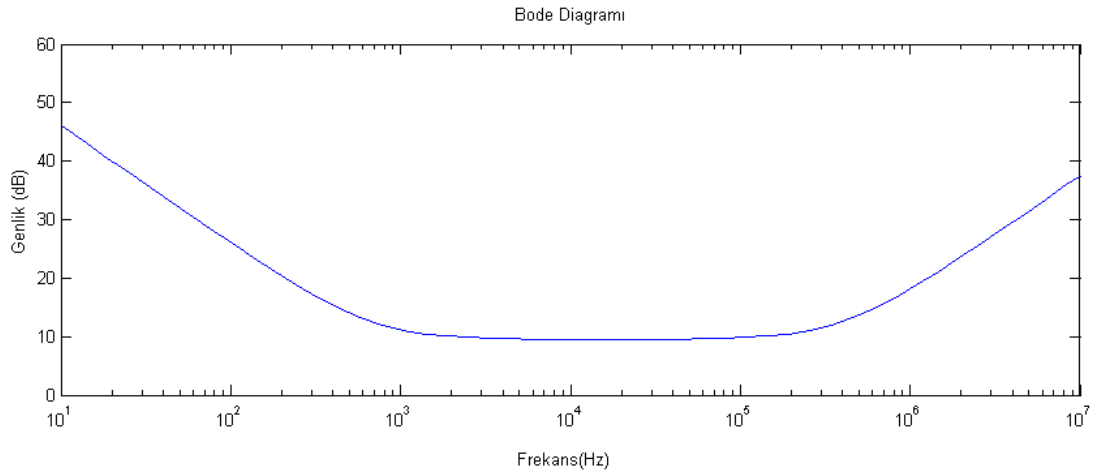
Şekil 4.5 Anahtarlama Filtresi Devresinin PAF' ye Bağlanması

Anahtarlama devresi, pasif elemanlardan oluşmaktadır. Seçilen uygun kapasite değeri, yüksek gerilimli harmonikleri süzerek, alçak geçiren pasif bir filtre görevi üstlenmektedir. Şekil 4.5' te, PAF çıkışına paralel bağlanan, üçgen bağlı anahtarlama filtresi görülmektedir.

Anahtarlama filtresi devre elemanları, rezonans frekansına uygun seçilmelidir.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.13)$$

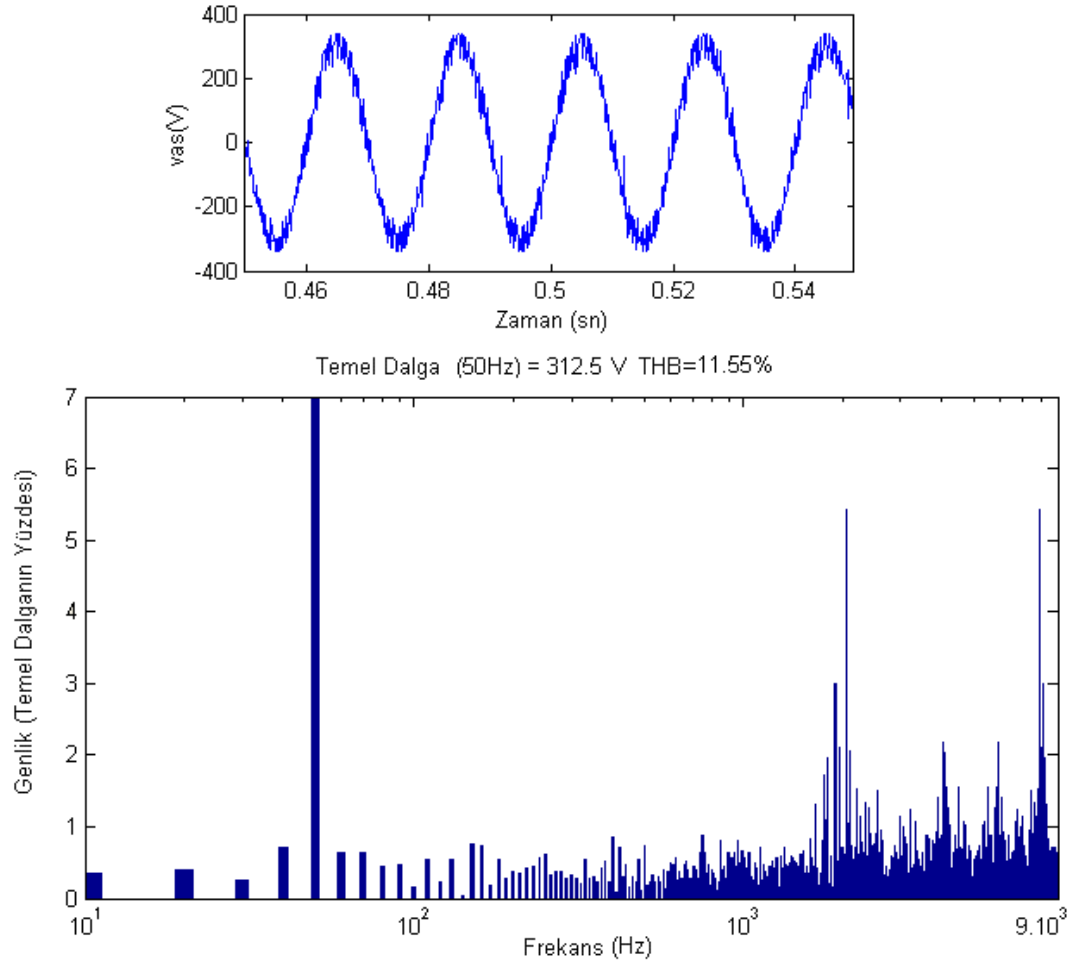
DA Kondansatörü lineer PI kontrol uygulamasında, L değeri 75 μ H ve C değeri de 500 μ F seçilmiştir. Devre elemanları belirtilenden küçük seçildiğinde kompanzasyon özellikleri azalır. C değeri gereğinden büyük seçilirse, PAF' nin reaktif güç kompanzasyon yeteneği azalır. L değeri gereğinden büyük seçilirse, gerilimdeki bozulum miktarı artmaktadır. R değeri ise söndürme direncidir. Söndürme direnci, gerilim harmoniklerini sınırlayacak kadar küçük, akım dalga şeklindeki harmonikleri önleyecek kadar da büyük seçilmelidir. R değeri, 3 Ω seçilmiştir.



Şekil 4.6 Anahtarlama Filtresi Bode Diyagramı

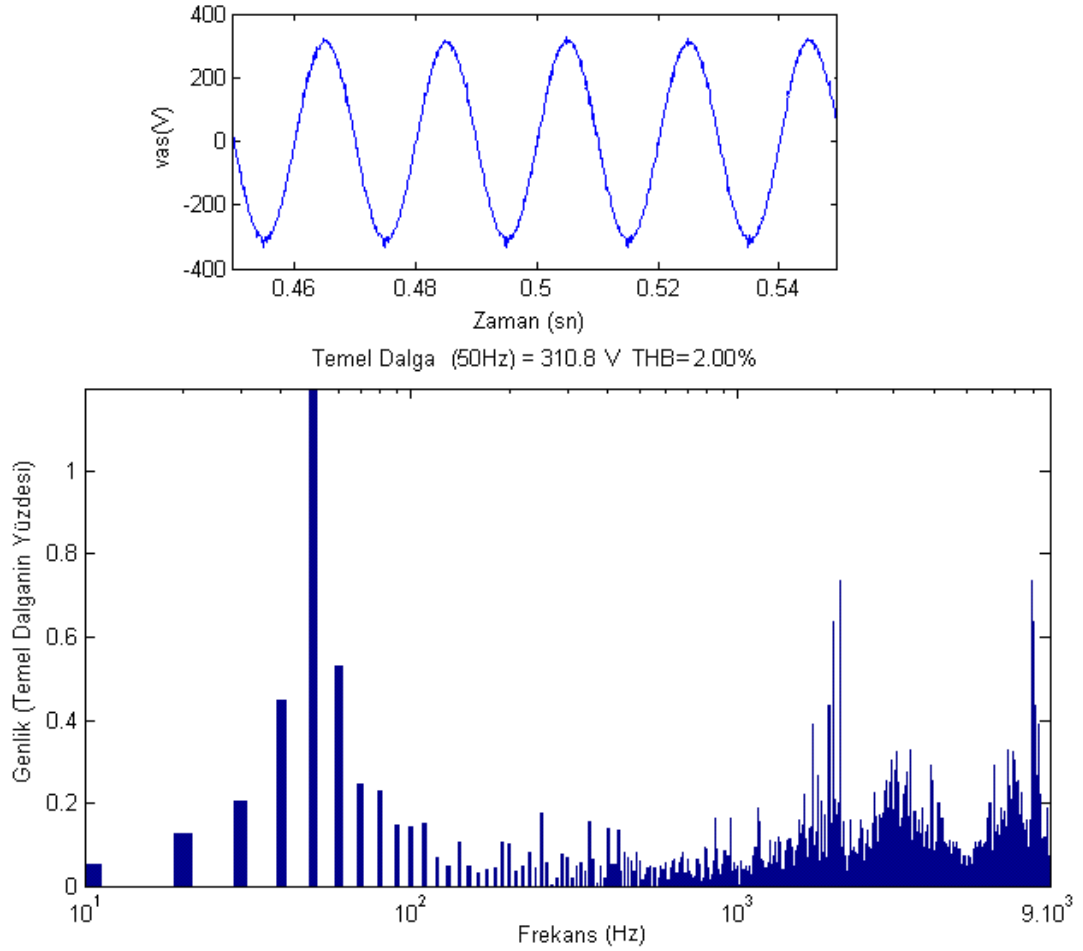
Simülasyon sonuçlarının anlatıldığı son bölümde gösterileceği üzere, anahtarlama filtresinin üç fazlı sistemlerde özellikle lineer olmayan sistemlerde kullanılması kaçınılmazdır. Simülasyonda akım THB değerinin %5' in altına indirilmesi ancak ve ancak anahtarlama filtresi yardımıyla olmaktadır.

DA Kondansatörü lineer PI kontrol ile kontrol edilen PAF' nin simülasyon çalışmasında, tristörün $\alpha=0$ ile tetiklendiği durumda, anahtarlama filtresi kullanılmadığında, şebeke gerilimi ve bu gerilimin FFT analizi aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.7 Anahtarlama Filtresi Kullanılmayan Durumda, Şebeke Gerilimi ve FFT Analizi

DA Kondansatörü lineer PI kontrollü PAF devresine, Anahtarlama Filtresi uygulandığı zaman, gerilim değerindeki THB değeri %5 in altına inmektedir. Akım harmonik kompanzasyonu yapılırken, gerilimde ortaya çıkabilecek harmonik bozukluk, anahtarlama filtresi yardımıyla engellenmiştir. Şekil 4.8’ da, anahtarlama filtresi kullanıldığında, şebeke geriliminin FFT analizi gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Anahtarlama Filtresi Kullanılan Durumda, Şebeke Gerilimi ve FFT Analizi

4.4 PAF Kontrolü

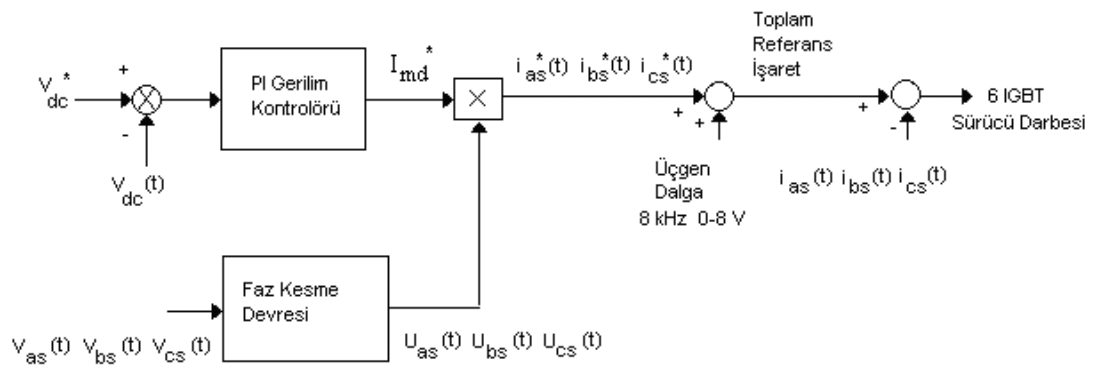
Simülasyon çalışmasında, iki tip kontrol yöntemi kullanılmıştır. İlk kontrol yönteminde, PAF' nin enerji elemanı olan DA kondansatörü gerilim değeri, lineer PI kontrolle kontrol edilerek, referans işaret oluşturulmuştur. Şebekeden çekilen akımın, referans akımı izlemesi sağlanmıştır.

İkinci yöntemde ise, şebeke akımından, bant geçiren filtre yardımıyla referans akım elde edilmiştir. Şebekeden çekilen akımın, referans akımı izlemesi sağlanarak, kontrol başarıyla tatbik edilmiştir. Şimdi bu kontrol yöntemleri ayrıntılarıyla anlatılacaktır.

4.4.1 DA Kondansatörü Lineer PI Kontrollü PAF Kontrolü

Lineer PI kontrol devresi yapı olarak, şebekeden çekilen akımı, PI kontrol ile elde edilen referans akım şekline zorlamak olarak açıklanabilir. Bu işlem, referans akım ile şebekeden çekilen akım farkı, yani harmoniklerin, PAF tarafından sağlanması ile mümkün olmaktadır.

Şekil 4.9' de kontrol yapısının iç akım çevrim şeması görülmektedir.



Şekil 4.9 DA Kondansatörü PI Kontrollü PAF İç Akım Kontrol Çevrimi Şeması

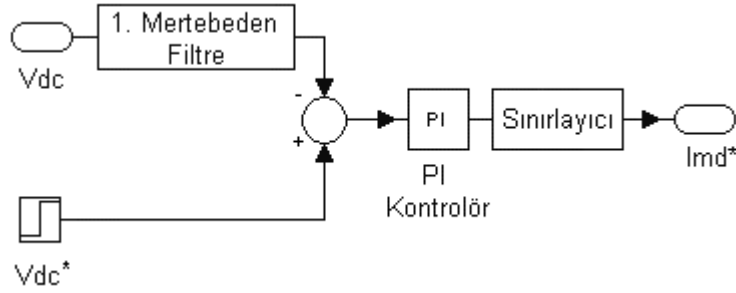
PI kontrol üzerinde deneyim kazanılmış bir yöntem olmakla beraber, cevap verme süresinin hızı nedeniyle sıkça rağbet edilen bir yöntemdir. Simülasyonda incelenen PAF kontrol devresi 2 ana başlıktan oluşmaktadır. Referans dalga şeklinin üretilmesi ve IGBT tetikleme işaretlerinin oluşturulması.

4.4.1.1 Referans Dalga Şeklinin Üretilmesi

4.4.1.1.1 DA Kondansatörüne PI Kontrol Uygulanması

Tez çalışmasında DGM enerji depolama elemanı olarak C_{dc} DA kondansatörünün kullanıldığı belirtilmişti. C_{dc} DA kondansatörü, DGM' nin enerji ihtiyacını karşılamakla beraber, sistem enerji dengesinin sağlanması bakımından da büyük önem teşkil eder.

C_{dc} DA kondansatörünün uçlarındaki gerilim, tez çalışmasında uygulanan PI kontrolör tarafından sürekli kontrol edilir. Simülasyonda, PI kontrol için kullanılan, seçilmiş K_p ve K_i değerleri, kondansatörün uçlarındaki gerilimdeki değişimlere anında cevap vermekte ve referans akımı anında düzenlemektedir. Simülasyon çalışmasında $K_p=0.77$ ve $K_i=28$ katsayıları kullanılmıştır. Matematiksel modelden bağımsız seçilen K_p ve K_i katsayıları, referans akımlarını üretmek için uygun olarak seçilmiştir[11].

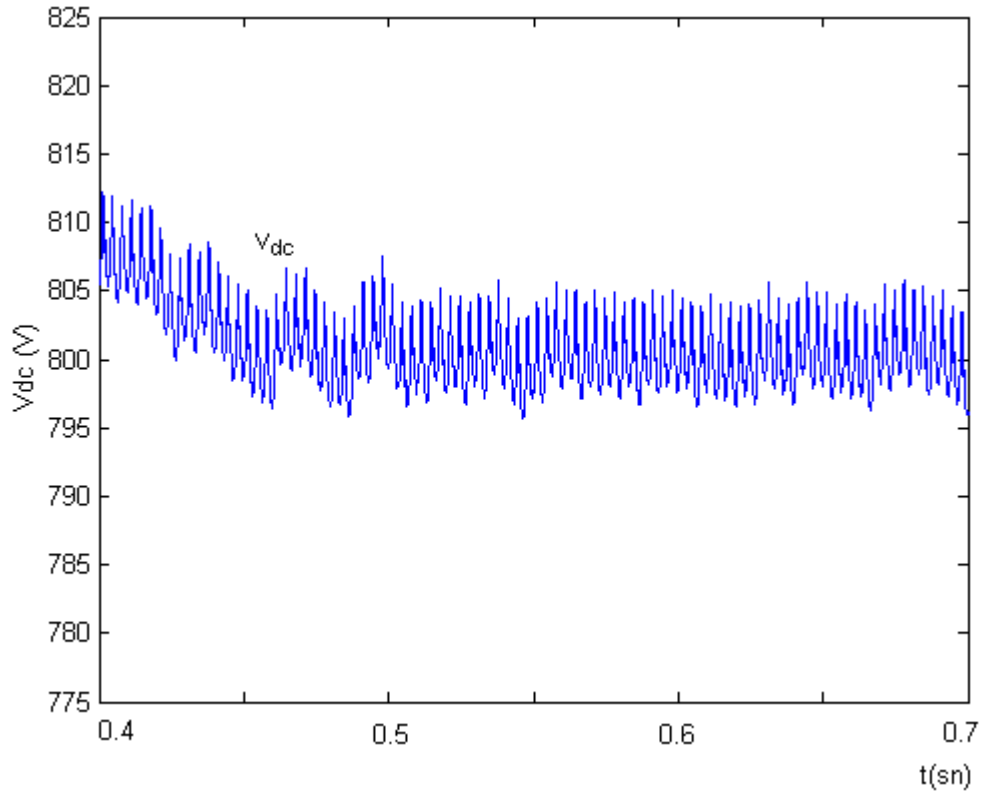


Şekil 4.10 PI Kontrolör Şeması

PAF DA kondansatörü uçlarında ölçülen DA gerilimi dalgalıdır. Bu yüzden kontrol elemanı olarak kullanılırken hata oranı aratacaktır. Bunun önüne geçmek için ölçülen şebeke gerilimi değerinin önüne 1. mertebeden, alçak geçiren bir filtre konulmuştur. Referans değerle karşılaştırılan dalga daha düzgün bir biçime geçmiştir[18].

PI çıkısındaki sınırlayıcı ise, geçici rejimde, referans akımın, yüksek genliklerde üretilmesini engeller.

C_{dc} DA kondansatörünün gerilimindeki değişimler, anında algılanarak, şebeke akımı uygun forma getirilmek suretiyle, sistem güç dengesi sağlanmaktadır. Buna göre, yük akımındaki artış sonucu, yükün ihtiyacı olan ek aktif güç ihtiyacı DA kondansatörü tarafından sağlanır. Bu sebeple, DA kondansatörü uçlarındaki gerilim azalır ve gerilim kontrol çevrimi, bu değeri, bir süre sonra tekrar referans değere getirir. Benzer şekilde, yük akımındaki azalma sonucu, şebekeden çekilen fazla akım, DA kondansatörü doldurulmak suretiyle kullanılır. Gerilim kontrol çevrimi, bu değeri bir süre sonra tekrar referans değere düşürür. Gerilim değerindeki bu salınım, PI kontrol tasarımında önemli rol oynar.

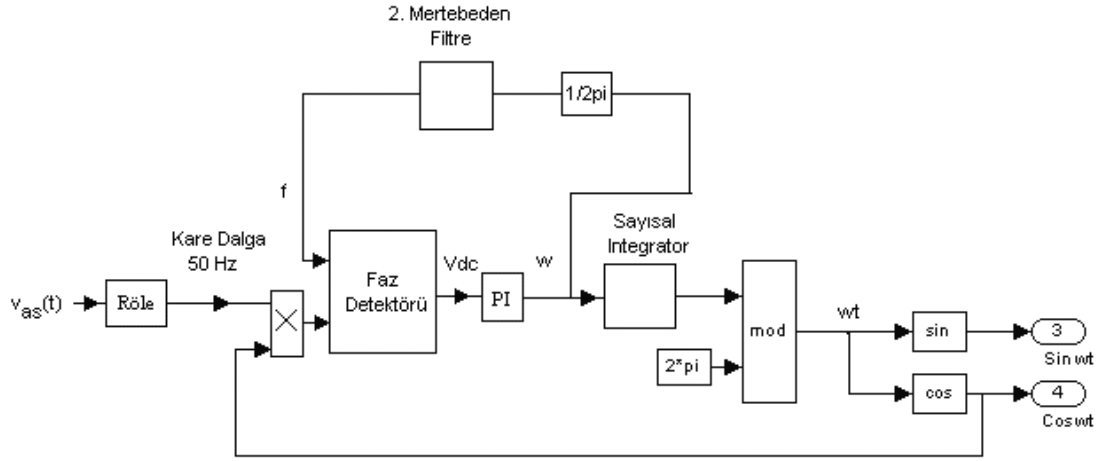


Şekil 4.11 Sürekli Zamanda Kapasite Gerilimi

Bu salınım değerinin, referans akım değeri olan 800 V' dan farkı, PI kontrol ile kontrol edildiğinde, çıkışta bir değişken elde edilmiş olur.

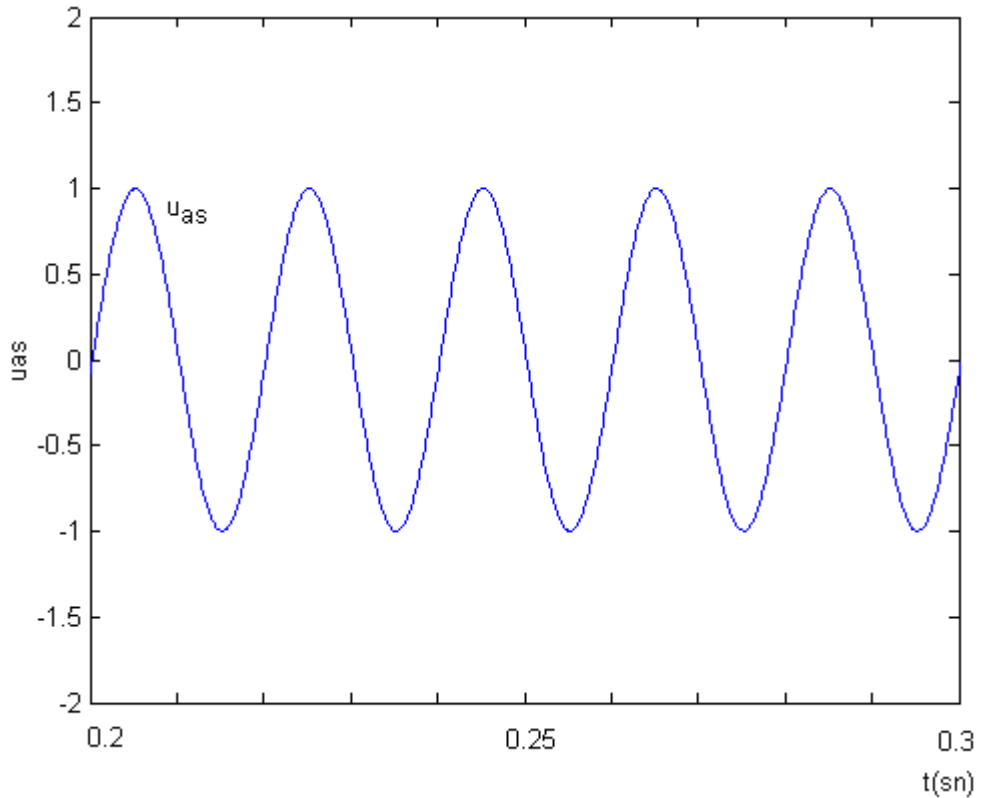
4.4.1.1.2 Birim Sinüs Dalga İşaretlerinin Üretilmesi

PAF kullanılarak şebekeden harmoniksiz akımların çekilmesi amaçlanmaktadır. Bunun yanında, gerilim ile akım arasındaki faz farkının kaldırılması da uygun görülmüştür. Bu amaçla tez çalışmasında ayırık Faz Kilitleme Devreleri (FKD, Phase Locked Loop, PLL) kullanılmıştır. Faz kilitleme devreleri, şebeke gerilimini analiz etmekte ve çıkışta şebeke ile aynı fazda, birim sinüs dalga işaretleri oluşturmaktadır. Oluşturulan işaretler -1, 1 V genliğinde ve tam 50 Hz frekansındadır. Her bir faz için 0° , -120° ve 120° derecelik faz farkı bulunmaktadır. Böylece, ideal formda birim sinüs darbe işaretleri üretilmiş olur[13,14]. Aşağıda, Matlab/Simulink' te gerçekleştirilen FKD devresi gösterilmektedir.



Şekil 4.12 Faz Kilitleme Devresi Blok Diyagramı

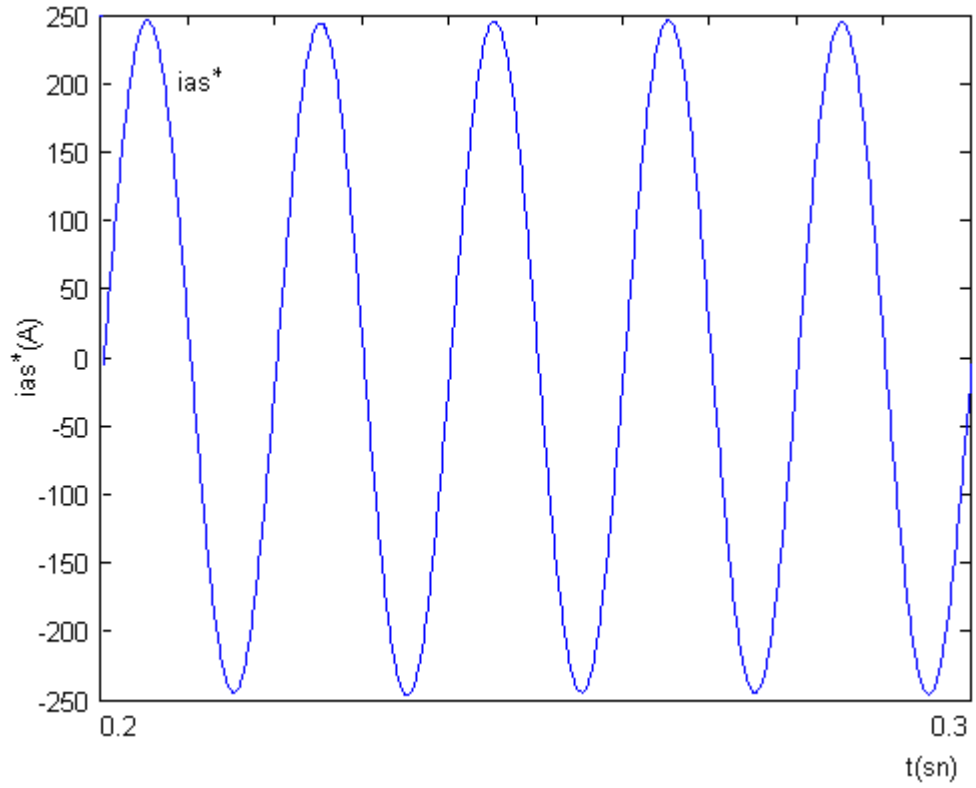
Faz detektörü, girişindeki kare dalga'nın frekansını ve 2. mertebeden yüksek frekanslı harmonikleri süzen filtrenin çıkışını karşılaştırır. Kontrol amacı, bu iki dalga arasındaki faz farkını sıfıra indirmektir. Faz farkı sıfır olduğunda, faz detektörü çıkışındaki gerilimin, ortalama değeri sıfır olur. Bu değer PI kontrolöre uygulandıktan sonra, PI çıkışındaki değerin integrali alınarak ω açısal frekans ile modüle edilir ve birim sinüs işaretleri elde edilir. Şebeke gerilimindeki bozulmalar, FKD çıkışında görülmez.



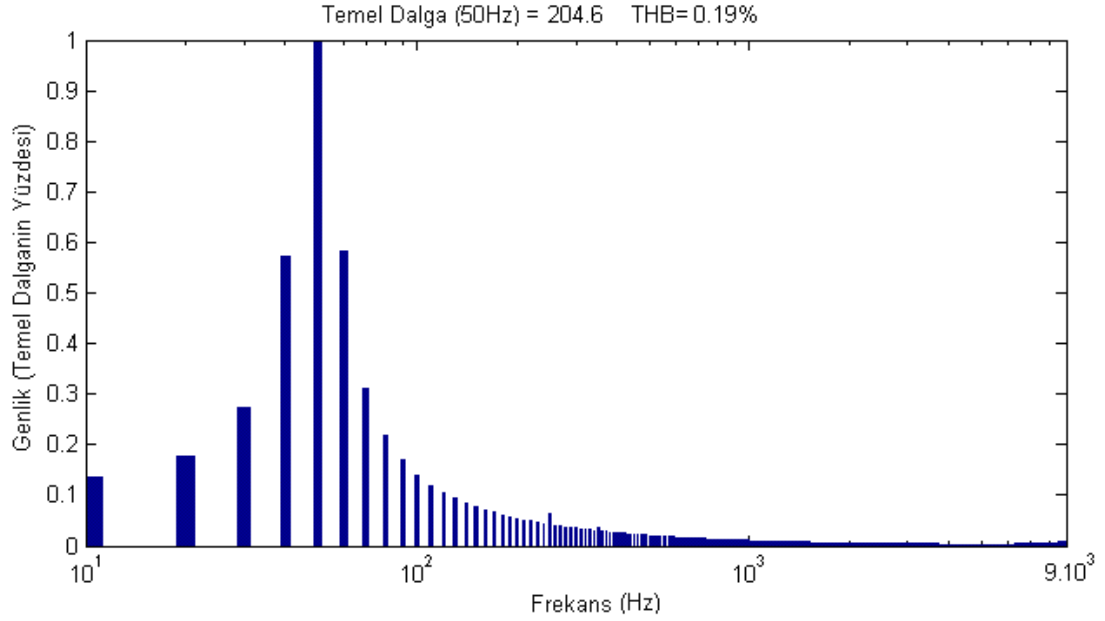
Şekil 4.13 Faz Kilitleme Devresi Çıkışı

Devrede, birim dalgaının gerilim işaretine bakılarak üretilmesinin tek bir nedeni vardır. Geliştirilen PAF, akımdaki harmonikleri kompanze etmekle kalmamakta aynı anda, akım ve gerilim arasındaki faz farkını kaldırarak, şebekeden reaktif güç çekilmesini engellemektedir. Bu nedenden dolayı, devre 2 ayrı kompanzasyon sorununu, tek bir devre ile çözümlemektedir.

Elde edilen birim sinüs dalgaların PI katsayılarıyla çarpılması sonucu, referans akım işaretleri elde edilmiş olur. Referans akım işaretinde harmonik bulunmaz. Sadece akım temel bileşeni bulunur.



Şekil 4.14 Akım Referans Değeri

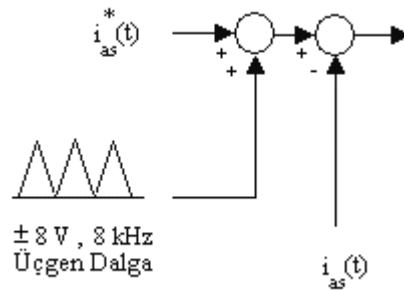


Şekil 4.15 Akım Referans Değerinin FFT Analizi

4.4.1.2 IGBT Tetikleme İşaretlerinin Oluşturulması

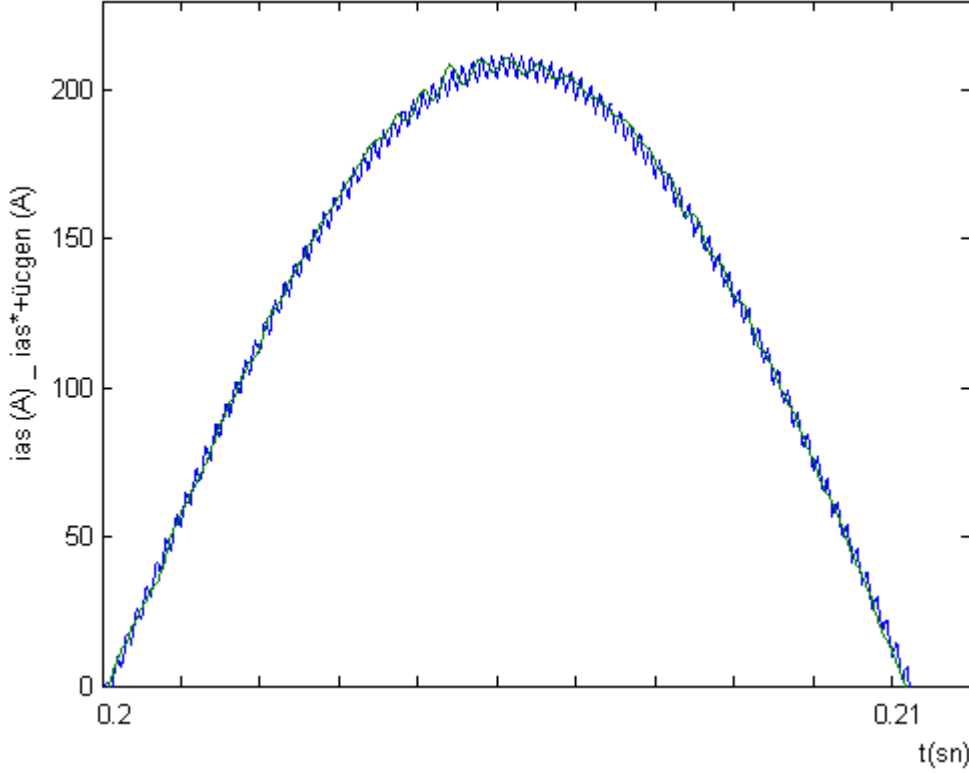
Tezde oluşturulan devrede, PI kontrolörün çıkışındaki değer, birim dalga ile çarpılarak, referans akım işaretleri oluşturulur. Bu işaretler, üçgen dalga ile modüle edilerek, gerçek akım işaretleriyle karşılaştırılır. Bu yöntem literatürde, histerezis kontrol yöntemi olarak adlandırılır[19,20].

Bu tip akım kontrolünde, gerçek faz akımı i_a , o faz ile ilişkili referans akımın çevresindeki tolerans bandı ile karşılaştırılır. Referans akım, gerçek akımdan büyük olduğunda, evirici tetikleme işareti üretmez ve gerçek akım referans bandına oturur. Ters durumda da, evirici tetikleme işaretlerini üreterek, gerçek akımın referans akım bandına oturmasını sağlar.



Şekil 4.16 Histerezis Akım Yöntemi

Tez çalışmasında, 8 kHz frekansında, 0-8 V genliğinde üçgen dalga kullanılmıştır[4]. Yapılan karşılaştırmada, referans akım, gerçek akımdan büyük olduğunda DGM tetikleme darbesi üretmezken, gerçek akımın referans akımdan küçük olduğu durumlarda tetikleme darbesi üretilerek, şebekeden çekilen akımın, referans akımı izlemesi sağlanır.



Şekil 4.17 Referans Dalga ve Üçgen Dalganın Toplamının, Şebekeden Çekilen Akım ile Karşılaştırılması

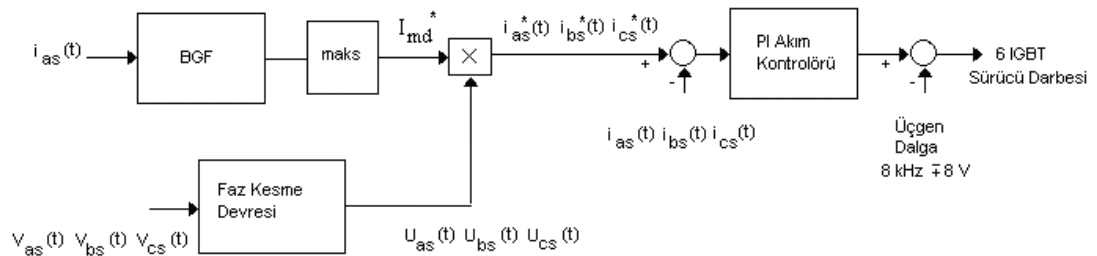
Şekil 4.17' den görüleceği üzere, şebekeden çekilen akım, referans akım tolerans bandına alınmıştır. Referans akım, şebekeden çekilen akımdan büyük olduğunda, tetikleme işareti üretilmekte, küçük olduğunda ise üretilmemektedir.

Yukarıdaki, IGBT sürücü işaretleri elde edildikten sonra, bu darbelerin eviriciye direk verilmesi, eviriciyi sürmek için yeterli değildir. Eviriciyi sürmek için bu darbelerin önüne, ölü zamanı gerçekleyen bir geciktirici konulmalıdır. Geciktiricinin örnekleme zamanı $5 \cdot 10^{-6}$ sn' dir.

4.4.2 Şebeke Akımı Bant Geçiren Filtre Kontrollü PAF Kontrolü

Lineer PI kontrollü PAF, şebekeye enjekte ettiği akımları matematiksel yöntemden bağımsız olarak üretmekteydi. Bu yüzden, yapılan çalışma, yaklaşık sonuca dayalı olmuştur. Lineer PI kontrolün çok kısa cevap verme süresi çok büyük bir avantajdır. Fakat bunun yanında, matematiksel modelden bağımsız çalışması en büyük dezavantajdır.

Bu yüzden farklı tarzda bir kontrol yöntemi üretmek, devrenin verimini arttıracaktır. Bu amaçla, şebeke akımındaki tüm harmonikler çıkarılıp, şebeke akımının kalan ideal dalga şekline zorlanması amaçlanmaktadır. Bu amaçla düzenlenen devrenin iç akım kontrol çevrimi şeması aşağıda gösterilmiştir.

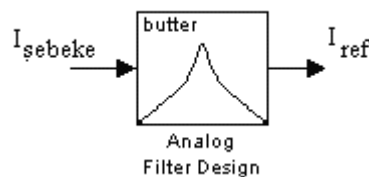


Şekil 4.18 Şebeke Akımı BGF Kontrollü PAF İç Akım Kontrol Çevrimi Şeması

Bu tip aktif filtre kontrolü 2 ana başlıktan oluşur. Referans akım işaretlerinin elde edilmesi ve sürücü işaretlerinin oluşturulması.

4.4.2.1 Referans Akım İşaretinin Üretilmesi

Oluşturulan devrede, yük akımı, birçok mertebeden yüksek genlikli harmonik akımları ihtiva etmektedir. Yük akımından tüm harmoniklerin süzülmesi, bant geçiren yapıdaki, filtre ile sağlanmıştır[20,21].



Şekil 4.19 Analog Bant Geçiren Filtre Blok Diyagramı

BGF, şebeke akımında bulunan tüm harmonikleri, ideale yakın düzeyde süzer.

Fundamental = 168.1 peak (118.9 rms)		Fundamental = 167.9 peak (118.8 rms)	
Total Harmonic Distortion (THD) = 17.02%		Total Harmonic Distortion (THD) = 0.20%	
50 Hz Fund	100.00 %	50 Hz Fund	100.00 %
250 Hz (h5)	16.07 %	250 Hz (h5)	0.06 %
350 Hz (h7)	7.70 %	350 Hz (h7)	0.04 %
550 Hz (h11)	2.31 %	550 Hz (h11)	0.02 %
650 Hz (h13)	1.52 %	650 Hz (h13)	0.02 %

Şekil 4.20 Analog Bant Geçiren Giriş ve Çıkış FFT Analizi

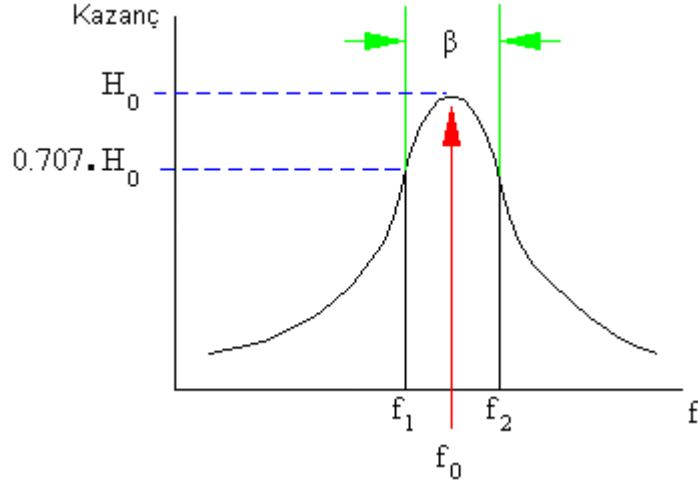
Bant geçiren filtre çıkışındaki akım, şebeke gerilimi ile aynı fazdaki birim dalgalar ile çarpılınca, referans akım işareti elde edilir. Simülasyon devresinde amaç, şebekeden çekilen akımı, referans olarak üretilen dalga şekline benzetmek olarak açıklanabilir.

4.4.2.1.1 Bant Geçiren Filtre

Bant geçiren filtre, alçak geçiren ve yüksek geçiren filtrelerden oluşan bir filtre olarak tanımlanabilir. Bant geçiren filtre belli frekans değerleri arasında çıkış vermektedir. 2. dereceden bir bant geçiren filtrenin s domeninde, frekans cevabi şu şekilde verilebilir.

$$H(s) = \frac{H_0 \cdot \beta \cdot s}{s^2 + \beta s + \omega_0^2} \quad (4.14)$$

Burada, H_0 filtrenin maksimum genliği, β bant geçiren filtrenin bant genişliği, ω_0 bant geçiren filtrenin radyan cinsinden rezonans frekansıdır. Aşağıda bant geçiren filtrenin çıkışı verilmektedir.



Şekil 4.21 Bant Geçiren Filtre, Kazanç Frekans Grafiği

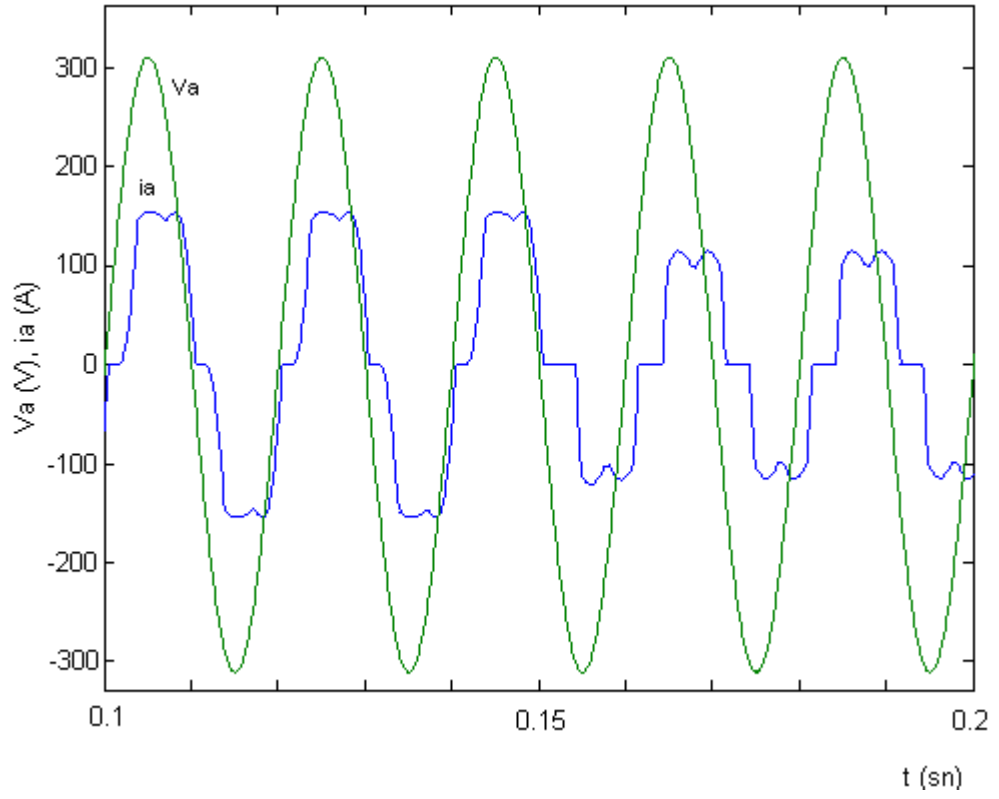
f_1 ve f_2 kesme frekanslarında, iletim yapan, bant geçiren filtrenin sistem cevabı aşağıda görülmektedir.

Bir bant geçiren filtrenin rezonans frekansı, kesme frekanslarının (f_1, f_2) geometrik ortalamalarıdır. Yalnız devremizde kesme frekansları birbirine çok yakın seçildiğinden, aritmetik ortalama da kullanılabilir.

$$f_0 = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \quad (4.15)$$

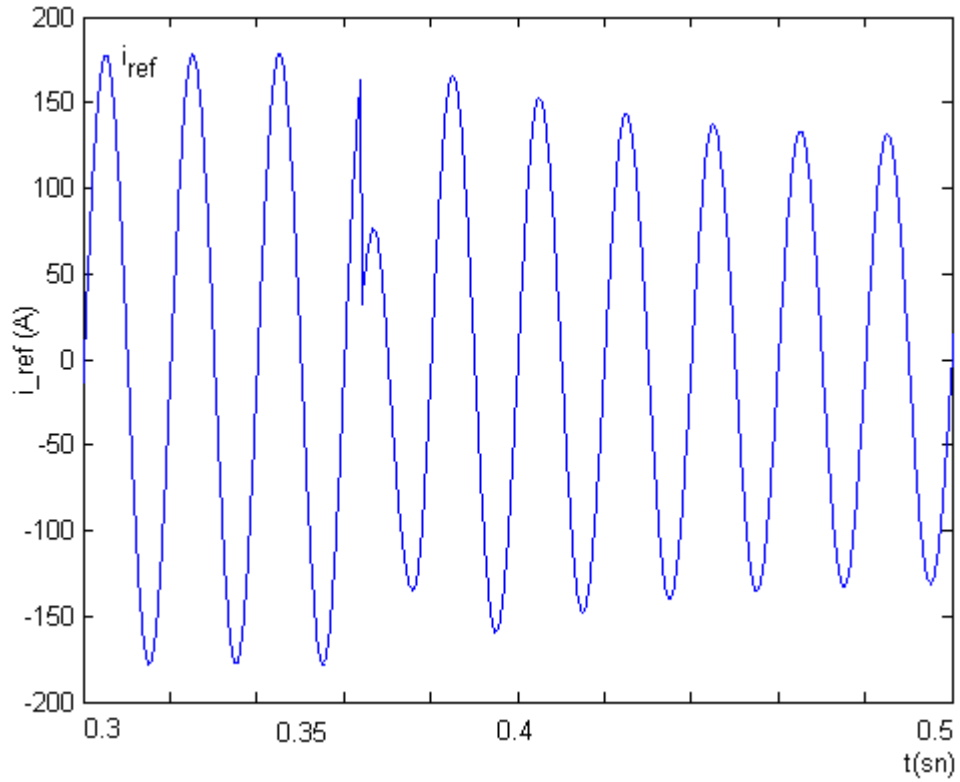
Buna göre, filtrenin girişindeki harmonik yapıdaki işaret, çıkışta sadece 50 Hz yani ideal şebeke frekansında olan işarete dönüşmüştür. Bant geçiren filtrenin alt ve üst sınırları, sistem cevabının hızlı olması amacıyla, 45-55 Hz olarak seçilmiştir.

Yapılan simülasyon çalışmasında, tristörün $\alpha=0^\circ$ ve $\alpha=45^\circ$ ile tetiklendiği durumda, şebekeden çekilen akım, yüksek miktarda harmonik ihtiva etmektedir. Şekil 4.20' de şebekeden çekilen akımın dalga şekilleri görülmektedir.



Şekil 4.22 Şebeke Gerilimi ve Şebekeden Çekilen Yük Akımı

Yük akımının, bant geçiren bir filtreye uygulandığını düşünelim. Bu durumda, yük akımındaki tüm harmonikler, filtre edilmiş olur. Şekil 4.21’de bant geçiren filtrenin çıkışı görülmektedir.



Şekil 4.23 Bant Geçiren Filtre Çıkışı

Elde edilen dalga şekli, ideale yakın olmakla beraber, tristörün $\alpha=0^\circ$ ile tetiklenmesi durumunda %0.18, tristörün $\alpha=45^\circ$ ile tetiklenmesi durumunda %0.20 THB değeri içermektedir. Çok az harmonik bileşen barındıran bu işaret, ideal kabul edilebilir.

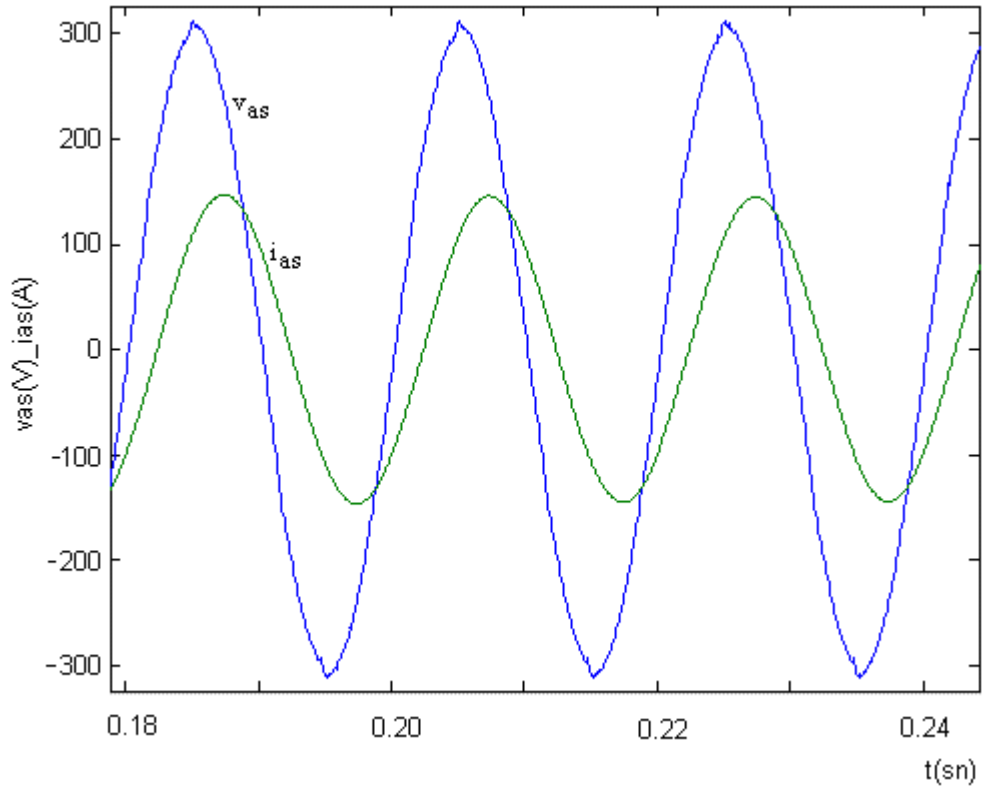
Matlab Analog Filter Design devresi hazır olarak gelmekte ve bize çok geniş bir alanda, filtre tasarımı şansı tanımaktadır. Simülasyon çalışmasında, Butterworth türü, 2. dereceden bant geçiren analog filtre kullanılmıştır. Bu yazılımda, filtre mertebesi ve türü rahatlıkla değiştirilebilir. Bu özellik bize, filtre konusunda geniş bir çalışma alanı yaratmaktadır.

Design method:	Butterworth
Filter type:	Bandpass
Filter order:	2
Lower passband edge frequency (rads/sec):	$2\pi \cdot 45$
Upper passband edge frequency (rads/sec):	$2\pi \cdot 55$

Şekil 4.24 Analog Filtre Dizayn Seçenekleri

4.4.2.1.2 Birim Sinüs Dalga İşaretlerinin Üretilmesi

Yük akımı, bant geçiren filtreden geçirilip, tüm harmonik bileşenlerden ayrılmasına rağmen, yük endüktif olduğu için, gerilimle arasında faz farkı bulunur. Bu şekildeki bir çalışma, harmonik eliminasyonunu mükemmel şekilde yapmasına rağmen, faz farkı sebebiyle oluşacak reaktif gücü önleyemez. Reaktif güç kompanzasyonu içinde, bir çalışma yapılması, maliyeti arttırır. Aşağıda, faz farkı önlemeyen bir PAF kontrol tasarımında, harmonik değerlerden arındırılmış işaret ve gerilim görülmektedir.

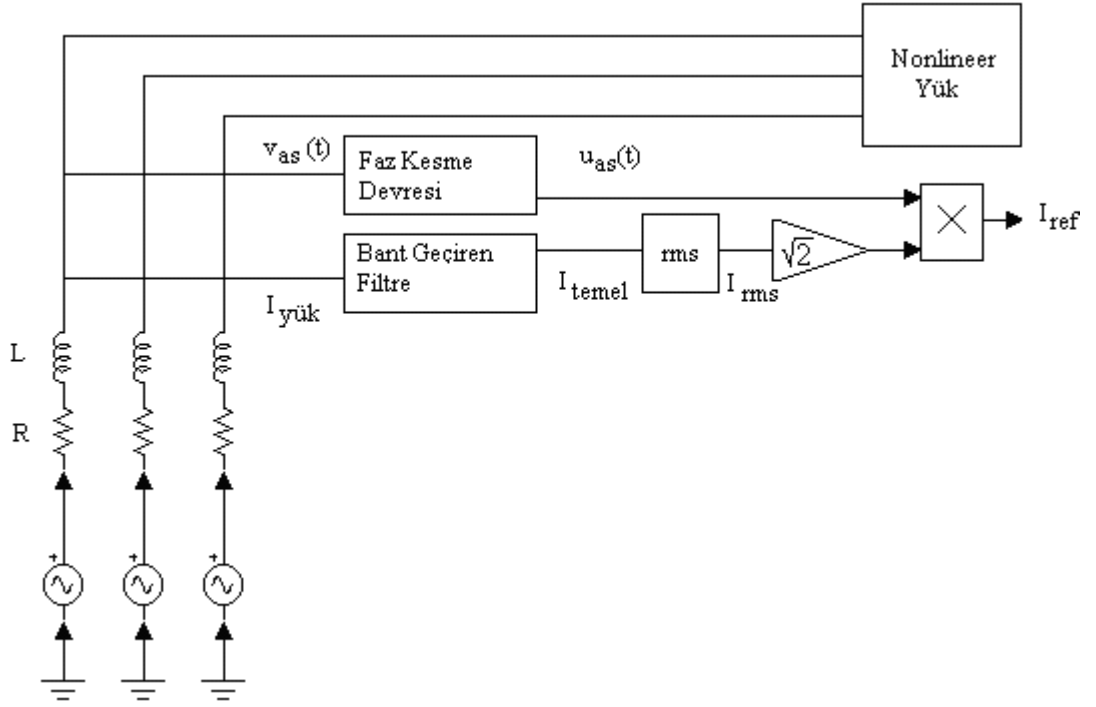


Şekil 4.25 FKD Kullanılmadan Önce, OKN Şebeke Gerilimi ve Şebekeden Çekilen Akım

Tez çalışmasında, akım ve gerilim değeri arasında faz farkı bulunmaması için, birim dalga işaretleri, şebeke geriliminden elde edilir. Simülasyon çalışmasında, akım ile gerilim arasındaki faz farkını kaldırmak için, ayrık Faz Kilitleme Devreleri (FKD, Phase Locked Loop, PLL) kullanılmıştır. Faz kilitleme devreleri, şebeke gerilimini analiz etmekte ve çıkışta şebeke gerilimi ile aynı fazda, birim sinüs dalga işaretleri oluşturmaktadır. Oluşturulan işaretler $\pm 1V$ genliğinde ve tam 50 Hz frekansındadır. Her bir faz için 0° , -120° ve 120° derecelik faz farkı bulunmaktadır. Böylece, ideal

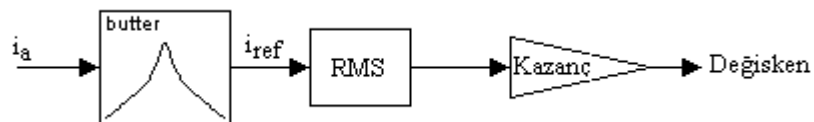
formda birim sinüs darbe işaretleri üretilmiş olur. FKD' nin yapısı, lineer PI kontrollü PAF yapısında, açıklanmıştır.

Elde edilen birim dalga işareti ile şebeke akımının, bant geçiren filtreden geçirilerek elde edilmiş işaretin tepe değeri çarpılarak, şebekeden çekilmesi gereken ideal akım işareti elde edilir.



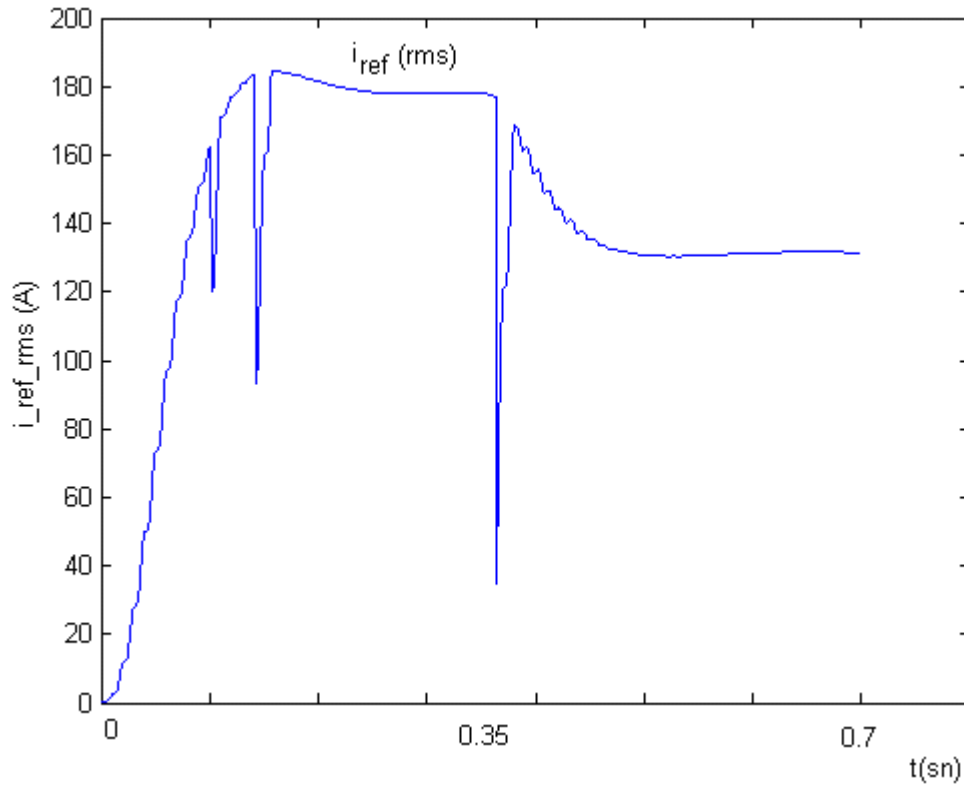
Şekil 4.26 Referans Akım İşaretinin Elde Edilmesi

Simülasyon devresinde filtreden geçirilmiş yük akımının tepe değeri, dalganın efektif değerinin yaklaşık $\sqrt{2}$ ile çarpımı sonucu gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.27 Referans Akım Maksimum Değerinin Elde Edilmesi

Filtreden geçirilen yük akımı efektif değeri, yaklaşık 0.15 sn sonra sabit bir değere ulaşmaktadır. Bu sonuç, devrenin 0.15 sn sonra sürekli zamana ulaştığını göstermektedir.



Şekil 4.28 BGF Çıkışındaki Dalganın RMS değeri

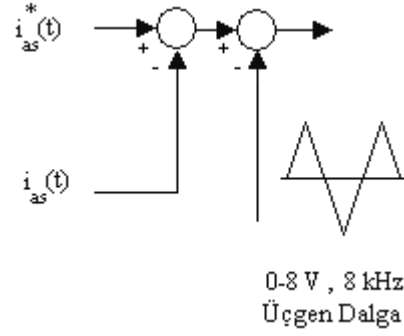
BGF çıkışındaki dalga'nın maksimum değerinin, gerilimden oluşturulan birim dalga ile çarpımı, referans akım işaretini oluşturur. Elde edilen referans akımın sürekli zamanda etkin değeri, 134 A ve 95 A dir. Bu sonucu PI kontrol çıkışındaki değişken ile karşılaştırınca, bant filtre ile kontrolde, lineer PI kontrole kıyasla, şebekeden, etken değer olarak daha az akım çekildiği görülmektedir. Bu sonuç simülasyon sonuçlarında irdelenecektir.

4.4.2.2 IGBT Tetikleme İşaretlerinin Oluşturulması

Birim dalga'nın gerilimden elde edildiği bu yöntemde, referans akım hem harmoniksiz, hem de faz farksız yapıda üretilmiş olur. Bu işaret şebekeden çekilmesini istediğimiz işarettir. Bu yüzden şebeke akımı, ürettiğimiz referans akımı izlemeye zorlanır.

PAF eviricisini sürmek için sabit frekans kontrolü kullanılmıştır[13,2]. Buna göre, referans dalga ile şebekeden çekilen akım arasındaki fark lineer PI kontrolöre uygulanır. Kullanılan katsayılar $K_p=0.5$, $K_i=15$ tir. Elde edilen işarete, $\pm 7.5V$

genliğinde, 10 kHz frekansında üçgen dalga ile karşılaştırılarak, evirici sürücü işaretleri elde edilir.



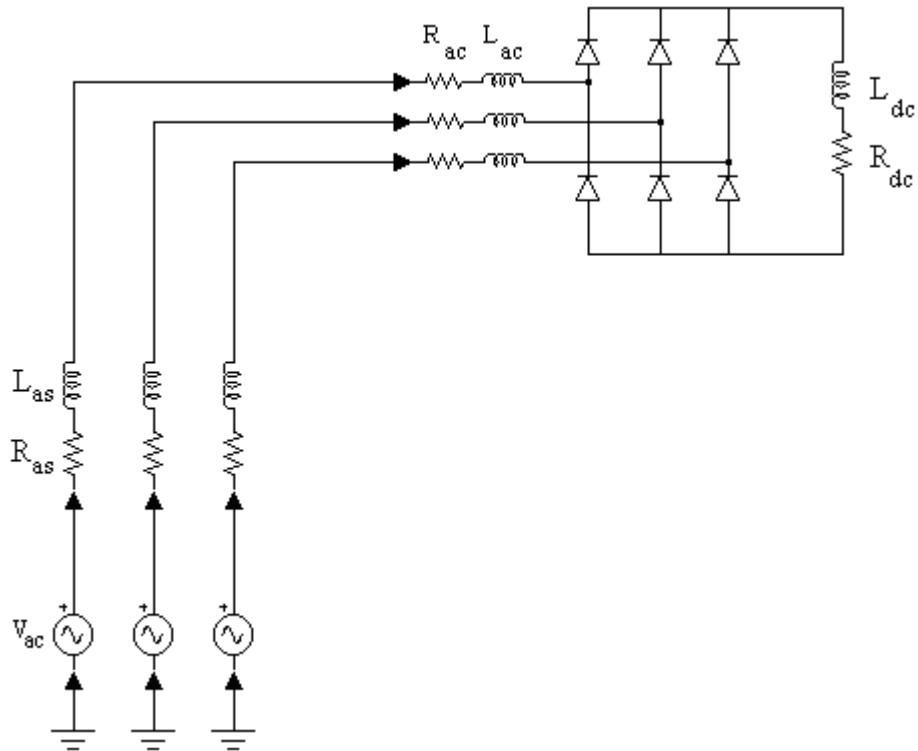
Şekil 4.29 Sabit Frekans Akım Yöntemi

PAF eviricisi devreye geçtikten sonra, gerilim ve akım arasında faz farkı bulunmaz. Burada yükün tükettiği reaktif güç sıfırlanmış, şebekeden çekilen akımın harmonik bozulumu sınırların altına çekilmiştir.

5. SİMÜLASYON SONUÇLARININ ANALİZİ

5.1 Yük İçin Simülasyon Sonuçları

Simülasyon çalışmasında, endüstride akım harmonik kompanzasyonu zor bir yük çeşidi olan, 3 fazlı konverter ve buna seri bağlı R-L yükünün akım harmonikleri kompanze edilmiştir. Sanayide tristör elemanı ile sürülen L_{dc} - R_{dc} yükleri, sıklıkla karşılaşılan yük türüdür. Bu tür yüklerde, tetikleme açısı arttıkça, şebekeden çekilen akımın harmonik miktarı ve şebekeden çekilen reaktif güç miktarı artmaktadır. Aşağıda incelenen yükün sistem diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 5.1 Simülasyonda İncelenen Yükün Sistem Diyagramı

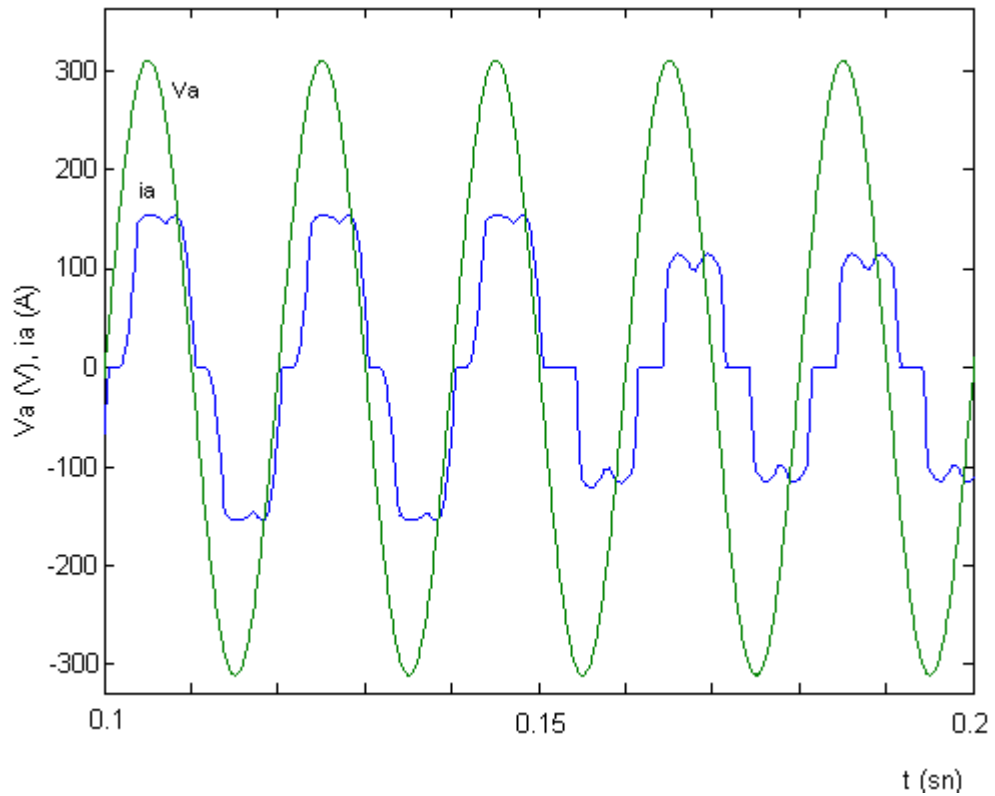
Simülasyonda, hızlı akım değişimlerinin de sistem tarafından kompanze edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 5.1 de diyagramı verilen yük için, α açısındaki değişimlerin hızlı algılanabilmesi için, tristörün girişine, seri bağlı L_{ac} - R_{ac} reaktansı bağlanmıştır.

Simülasyon devresinde, doğrultucudan önce kullanılan direncin değeri 0.01Ω , endüktansın değeri 1 mH ’ dir[4]. AA tarafında bulunan R-L elemanı, akım THB değerinde iyileştirme sağlasa da, devrenin maliyeti düşünüldüğünde, küçük bir değerde kullanımı uygun bulunmuştur.

Yük ara devresinde kullanılan L_{dc} endüktansı, doğrultucu çıkış akımındaki dalgalılığı, giriş akım THB_i değerini ve AA kaynak gerilim dengesizliklerini azaltır, kaynaktan çekilen akımların tepe faktörü değerini düşürür. İncelemede doğrultucu yükü olarak kullanılan direncin değeri 3Ω , endüktansın değeri 5mH ’ dir[4].

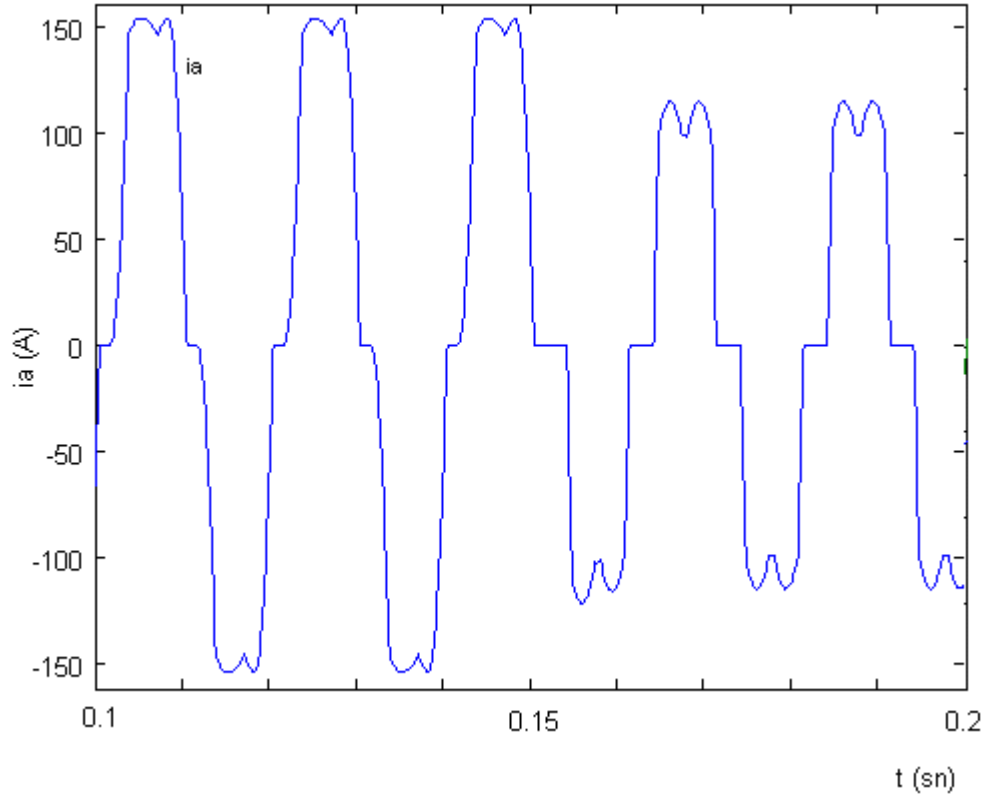
Simülasyon, yük konverterinin 0.15 sn $\alpha=0^\circ$ ile tetiklenirken, 0.15 sn sonunda, bu değerin $\alpha=45^\circ$ ’ ye çıkarılması ile gerçekleşir.

İlk olarak a fazı için şebeke gerilimi ve yükün şebekeden çektiği akım incelenecektir. Aşağıdaki grafikten görüleceği üzere, gerilim ve akım arasında faz farkı bulunmaktadır. Bu fark, akım harmoniklerinden kaynaklanmaktadır ve α açısı arttıkça, faz farkı da artmaktadır. Şebekeden çekilen harmoniklerin filtre edilmesi gerekir, zira harmoniklerin şebeke için birçok zararlı etkileri bulunmaktadır.



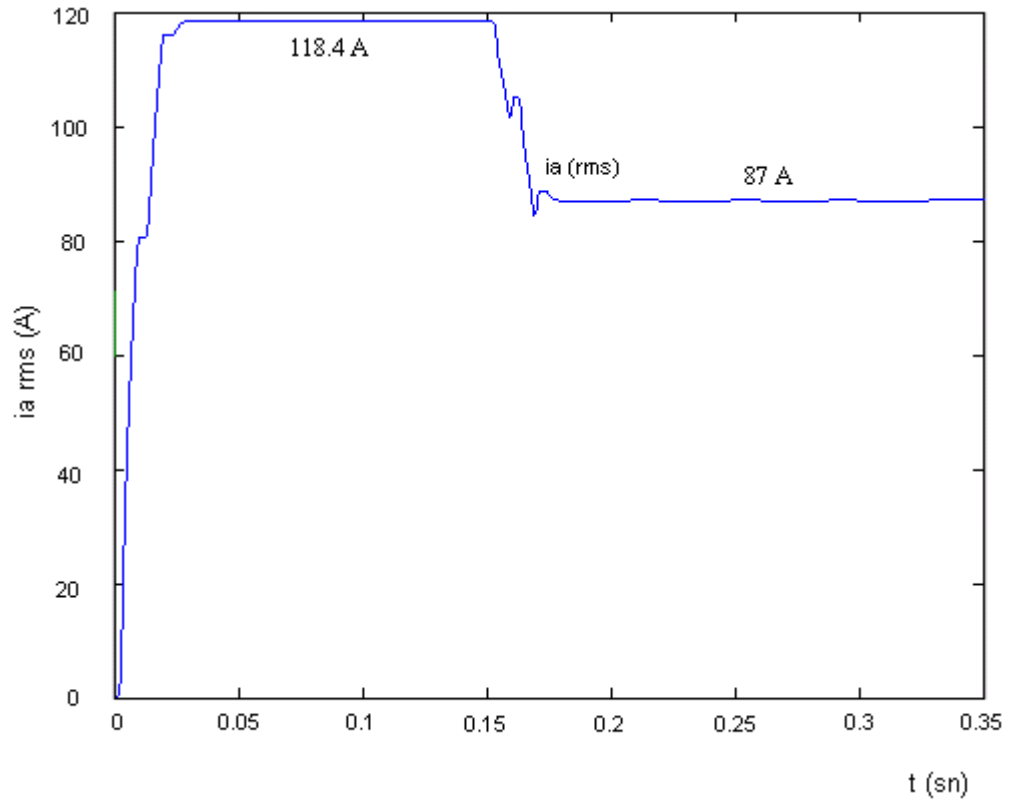
Şekil 5.2 PAF’ siz durumda, Şebeke Gerilimi ve Yükün Çektiği Akım

Şekil 5.3' te a fazı yük akımının grafiği gösterilmiştir.



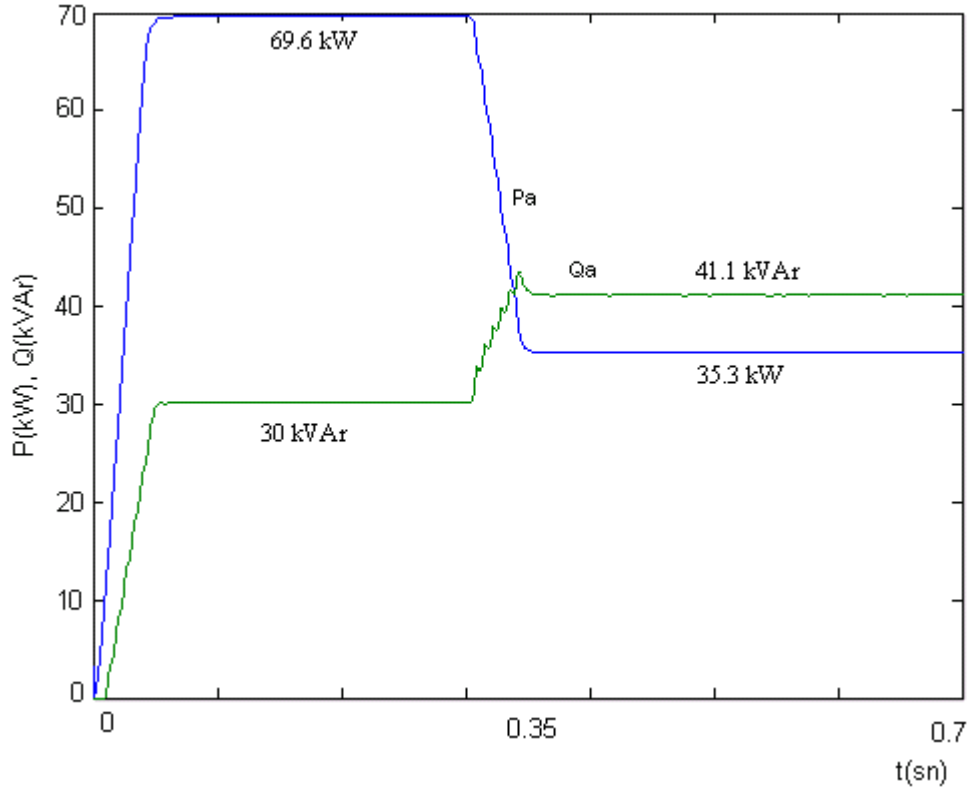
Şekil 5.3 A Fazı Yük Akımı

α açısı arttıkça şebekeden çekilen akımın etkin değeri azalmaktadır. α açısı 0° den 45° ye çıkarıldığında şebekeden çekilen etkin akım, 118.4 A' den, 87 A' e düşmektedir. Şekil 5.4' te, a fazı yük akımının etkin değerini gösteren grafik görülmektedir.



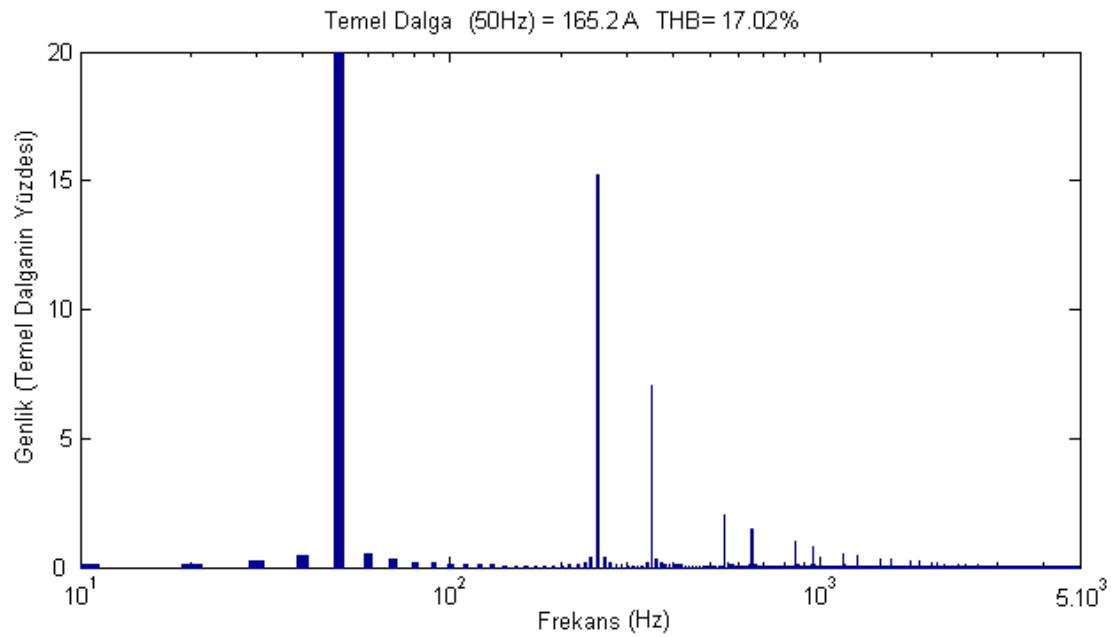
Şekil 5.4 Şebekeden Çekilen Akımın Etkin (rms) Değeri

Şebekeden çekilen aktif ve reaktif gücün grafiği şekil 5.5’ de gösterilmektedir. Şebekenin gerilimi ile şebekeden çekilen akım arasında faz farkı olduğu belirtilmişti. Bu faz farkından dolayı, şebekeden reaktif güç çekilmektedir. (İlk 0.15 sn için alttaki eğri reaktif gücü belirtmektedir.) Tristörün tetikleme açısı, α açısı arttıkça, şebekeden çekilen akımın etkin değeri azalsa da, gerilim ile akım arasındaki faz farkı artmaktadır. Bu yüzden 0.15 sn’ den sonra şebekeden çekilen reaktif güç miktarı, aktif gücü geçmektedir. Şekil 5.5’ de şebekeden çekilen aktif ve reaktif gücün grafiği gösterilmiştir.

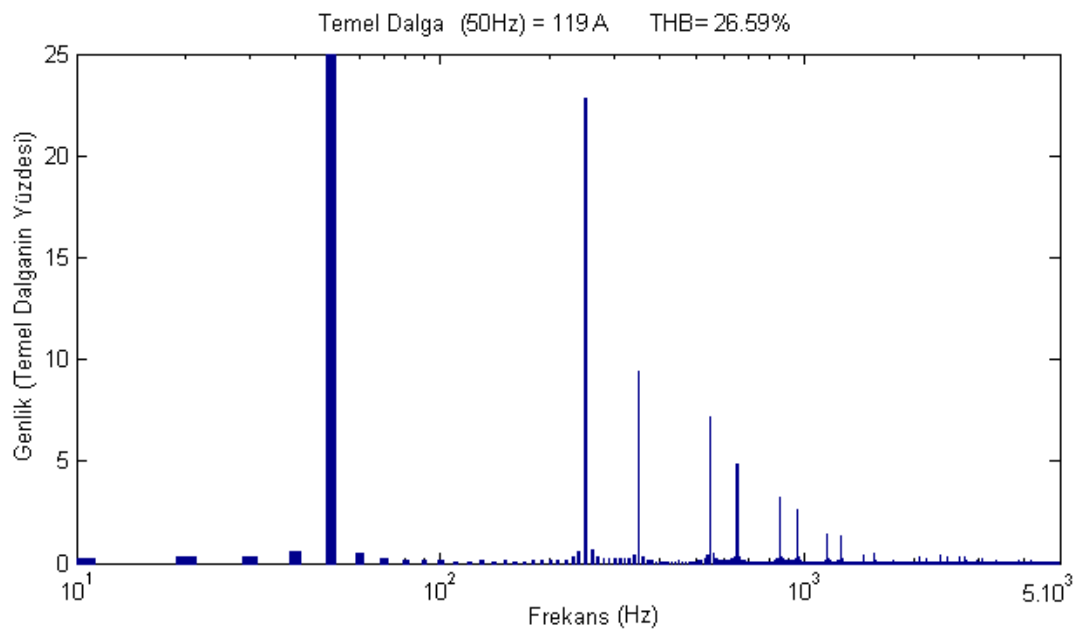


Şekil 5.5 Şebekeden Çekilen Aktif ve Reaktif Güç

PAF' nin kullanılmasındaki amaç, akımdaki toplam harmonik bozulum değerinin standartlar altına indirilmesidir. Yükün iki durumunda da, şebekeden yüksek harmonikli akımlar çekilmektedir. Tetikleme açısı $\alpha=0^\circ$ iken şebekeden çekilen akımın THB' si %17.01' dir. Tetikleme açısı $\alpha=45^\circ$ e çıkarıldığında ise, THB %26 düzeylerine çıkmaktadır. Akım harmoniği kullanıcının sorumluluğunda olup, %5 değerinin altında tutulması gerekmektedir. Şekil 5.6 ve 5.7 de, şebekeden çekilen akımın FFT analizi gösterilmiştir.

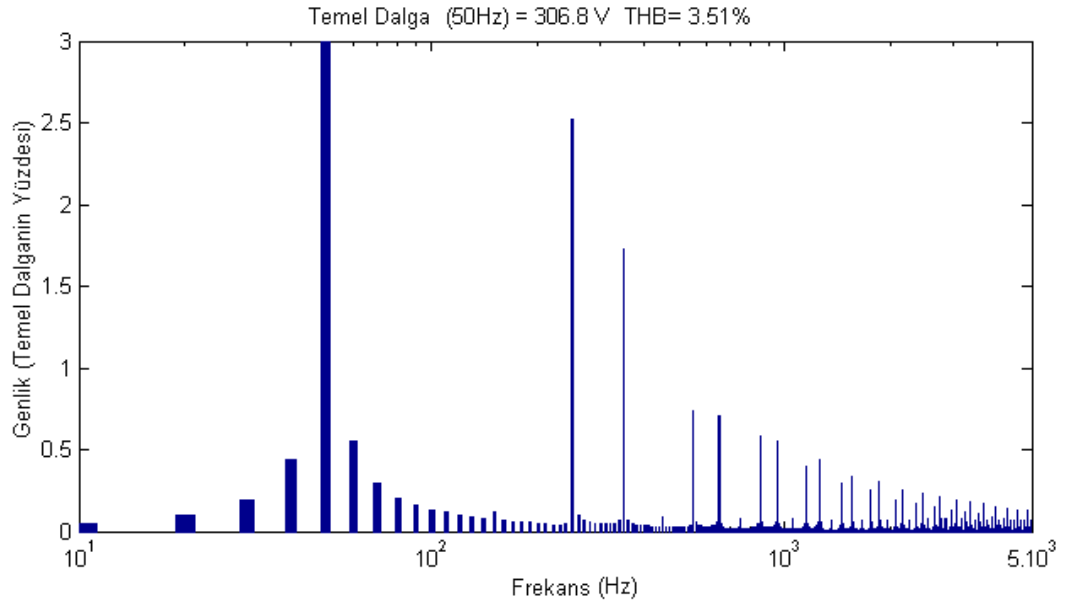


Şekil 5.6 $\alpha=0^\circ$ de Şebekeden Çekilen Akımın FFT' si

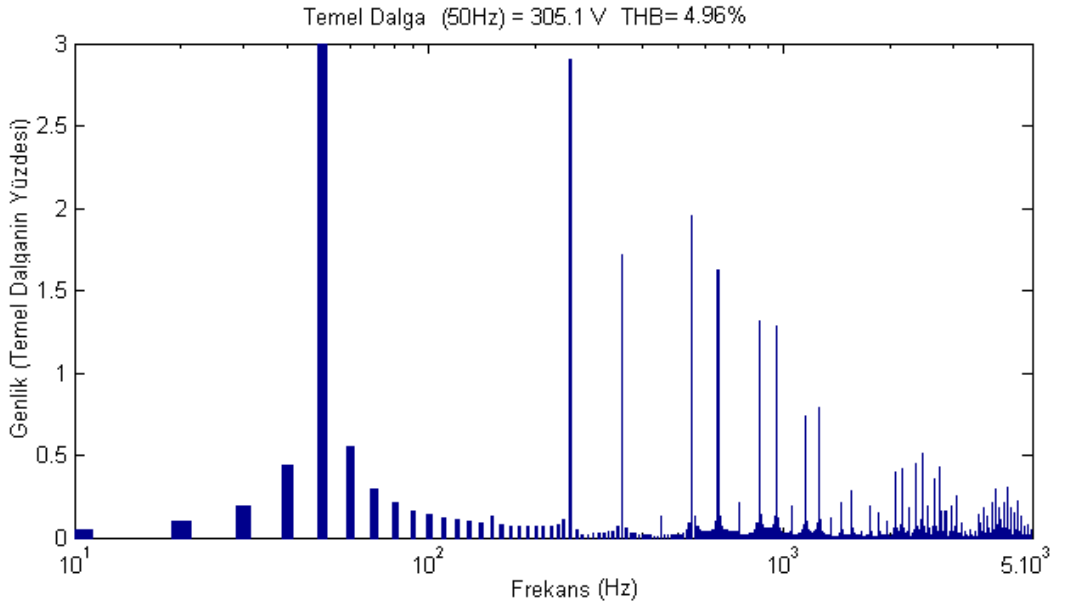


Şekil 5.7 $\alpha=45^\circ$ de Şebekeden Çekilen Akımın FFT' si

Gerilim değeri frekans domeninde incelendiğinde, IGBT elemanının yüksek frekanslardaki çalışması sebebiyle, şebekenin OKN geriliminde farklı frekanslarda harmonik gerilimler meydana edilmektedir. Şekil 5.8 ve 5.9’ da, OKN şebeke geriliminin FFT analizi gösterilmiştir.



Şekil 5.8 $\alpha=0^\circ$ de OKN Şebeke Gerilimi FFT' si



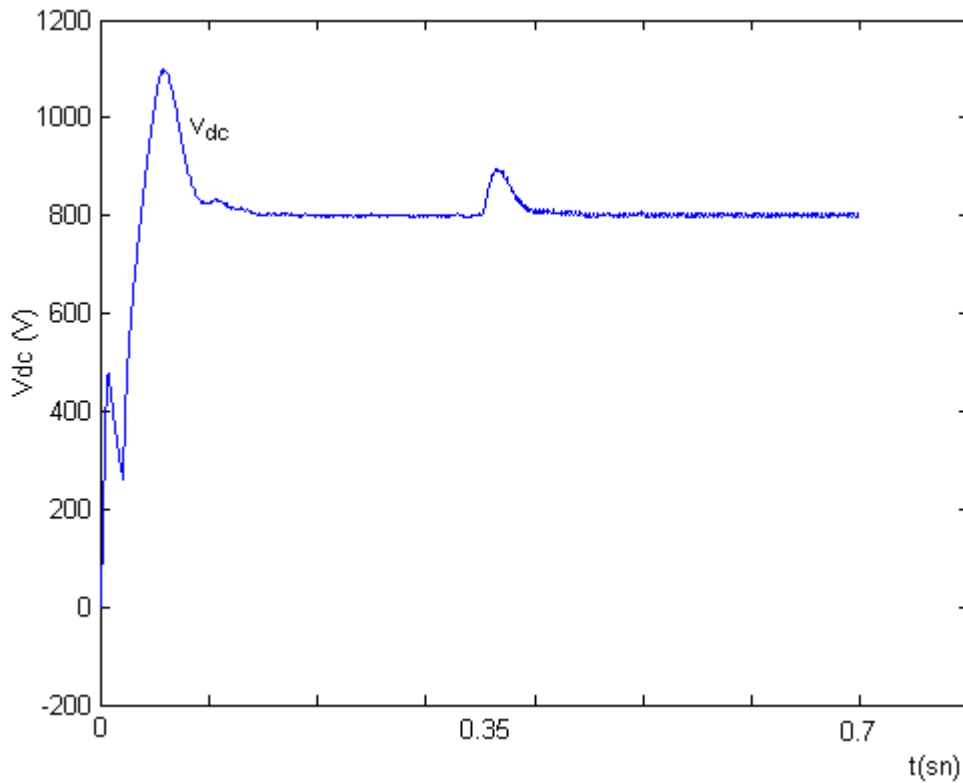
Şekil 5.9 $\alpha=45^\circ$ de OKN Şebeke Gerilimi FFT' si

Yukarıda gösterilen grafikler Matlab 6.5 sürümünde, Power Electronic Library altında bulunan Powergui aracıyla çizdirilmiştir. Grafikte temel bileşenin değeri ve diğer harmoniklerin temel bileşenine olan yüzdeleri görülebilmektedir. Bu araçla, harmonik akımların genlikleri de görülebilmektedir.

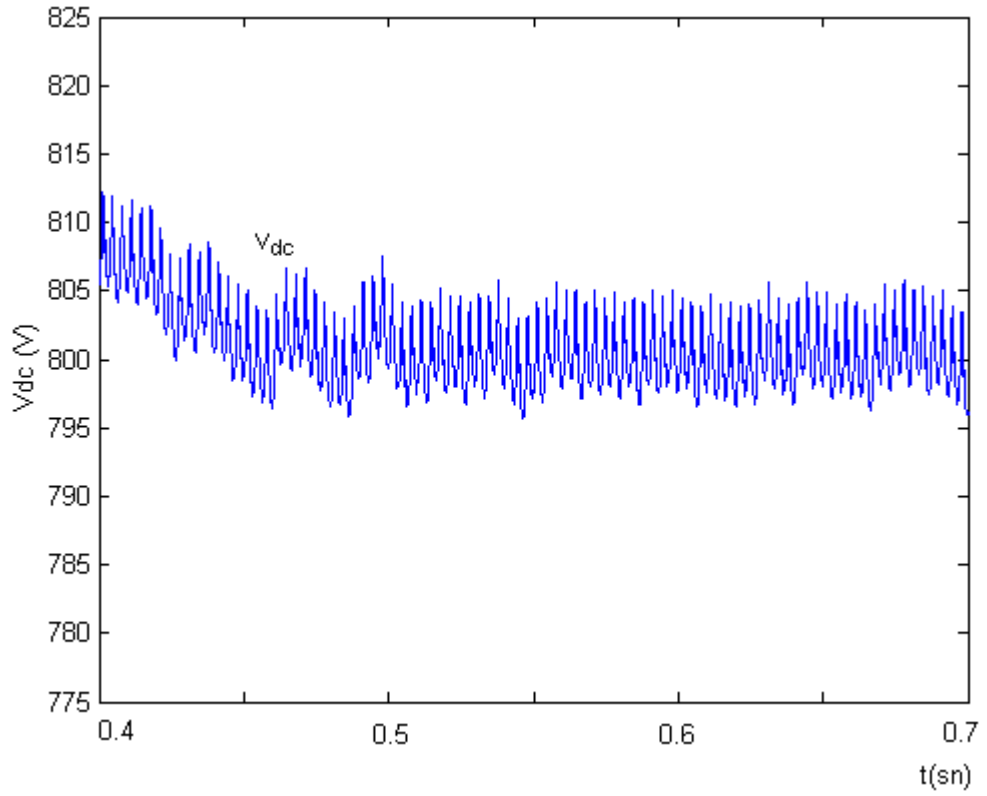
5.2 DA Kondansatörü Lineer PI Kontrollü, PAF Devresi Simülasyon Sonuçları

DA Kondansatörü lineer PI kontrollü PAF devresinde, farklı yük durumları için harmonik analizi yapılmıştır. PAF kullanılmayan durumda, tristör $\alpha=0^\circ$ ile tetiklenirken, şebekeden çekilen akımın THB' si %17, tristör $\alpha=45^\circ$ ile tetiklenirken %26 civarındadır. IEEE 519 standardına göre şebekeden çekilen akımın THB' si maksimum %5 seviyesinde olmalıdır.

PAF, daha önce belirtildiği üzere, kaynak olarak pasif bir eleman olan DA kondansatörü kullanmaktadır. Aktif filtre ön şarj işleminden sonra 0.05 sn' de çalışır duruma geçmektedir. Aktif filtre, yol verme dirençleri kısa devre edilerek, aktif hale getirilmektedir. Aşağıda, kapasite gerilimin grafiği görülmektedir. İkinci grafikte ise, sürekli zamanda, kapasitenin $\pm 4V$ salınımı görülmektedir.

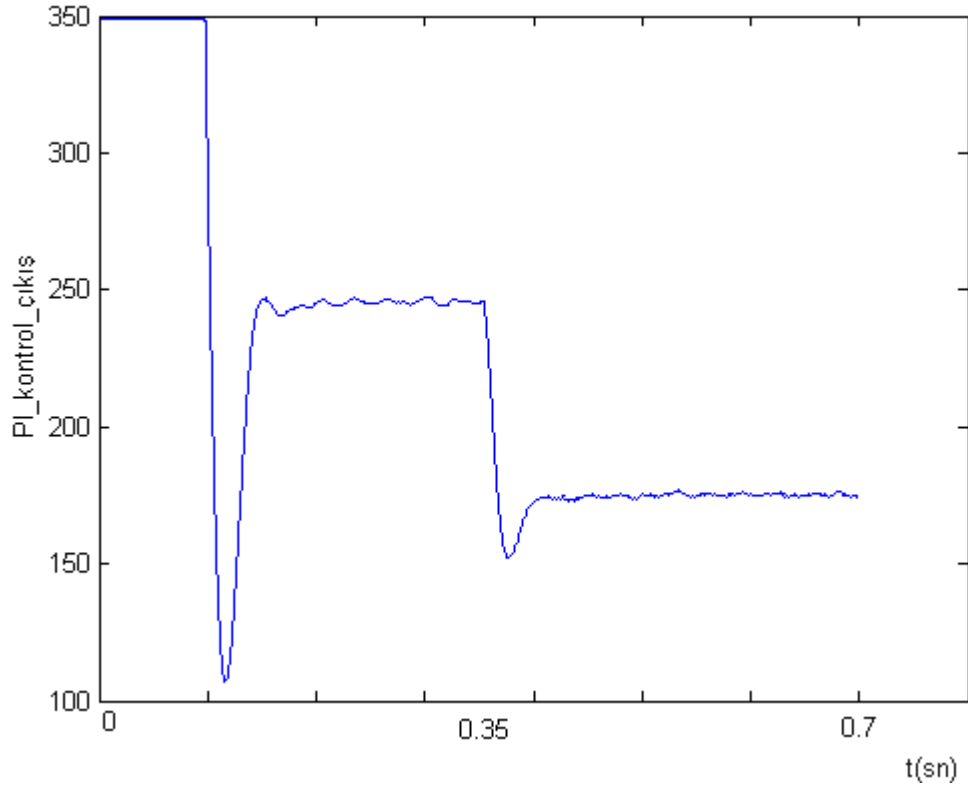


Şekil 5.10 Kapasite Gerilimi



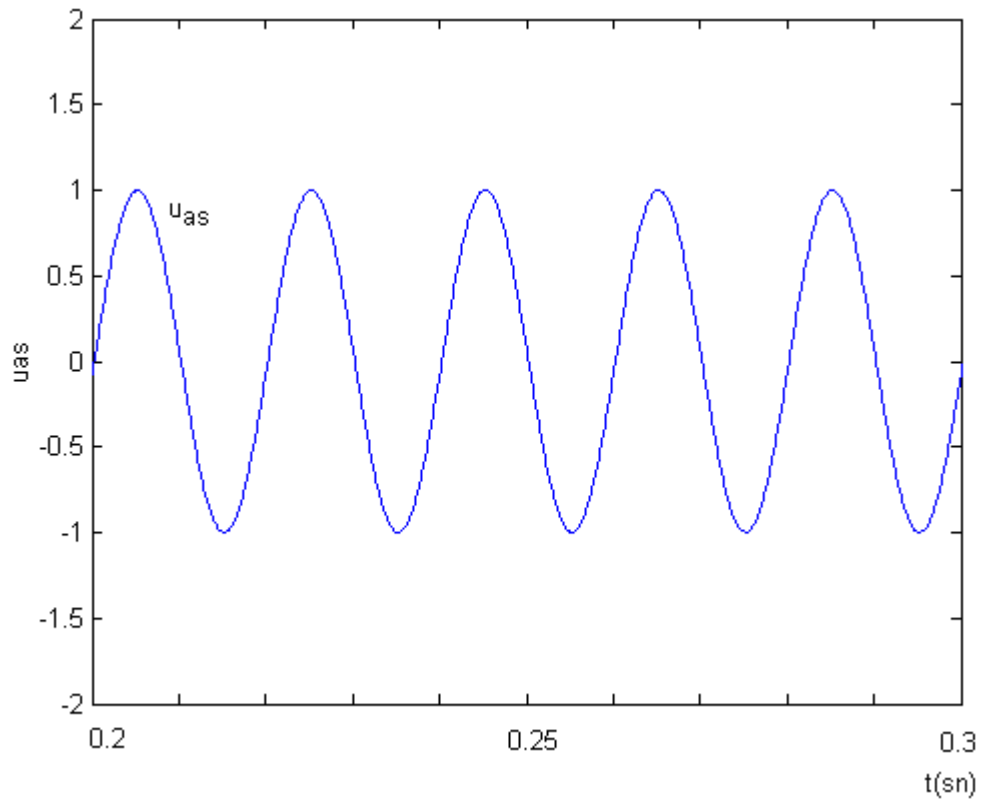
Şekil 5.11 Sürekli Zamanda Kapasite Gerilimi

Kontrol devresinde DA kapasite gerilimi, PI kontrolle kontrol edilmiştir. Kapasite gerilimi, şebeke ile PAF arasındaki akım alışverişi yüzünden, sürekli zamanda salınımlar yapmaktadır. Bu küçük değişime uygulanan PI kontrol sonucu, bir değişken elde edilir. Devrenin ilk anda, çok büyük salınımlar yapması, PI çıkış değerini, dolayısıyla, akım referans değerini arttırır. Bu yüzden, PI kontrol çıkışı 350 birim, yani 350 A ile sınırlanmıştır. Aşağıda PI kontrol çıkışı görülmektedir.



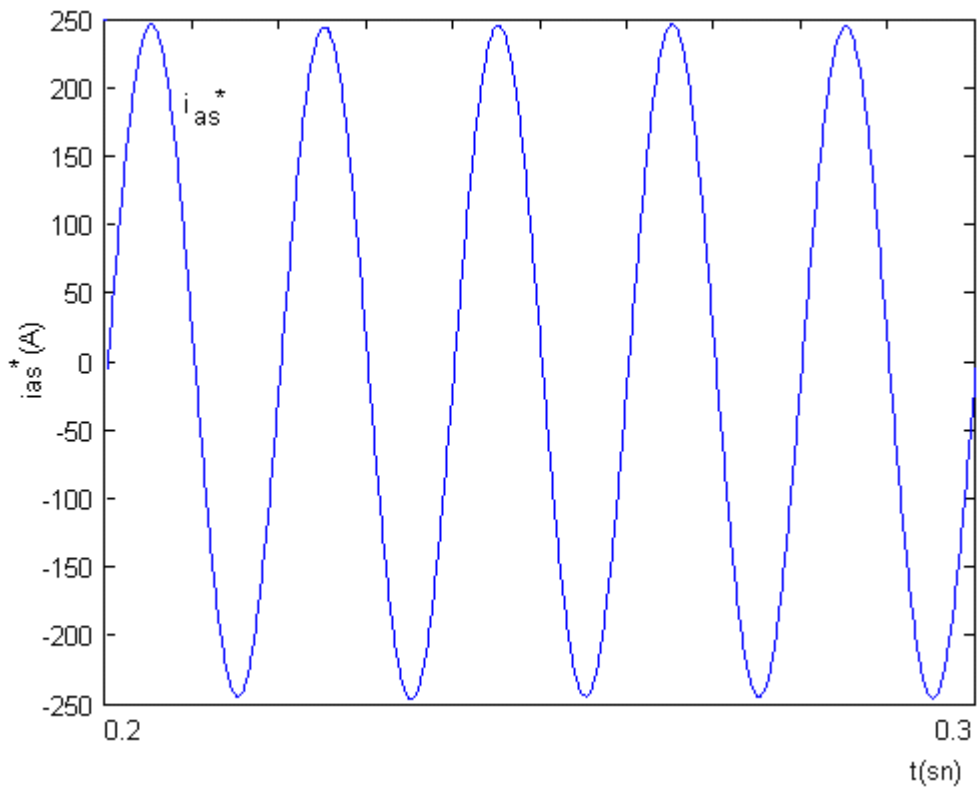
Şekil 5.12 PI Kontrol Çıkışı

Tez çalışmasındaki amaç, şebeke gerilimi ile aynı fazda, yani faz farksız ve harmoniksiz akım işaretleri elde etmektir. Şebeke gerilimi FKD devresinden geçirilerek, şebeke gerilimi ile aynı fazda, birim dalgalar elde edilmiş olur.



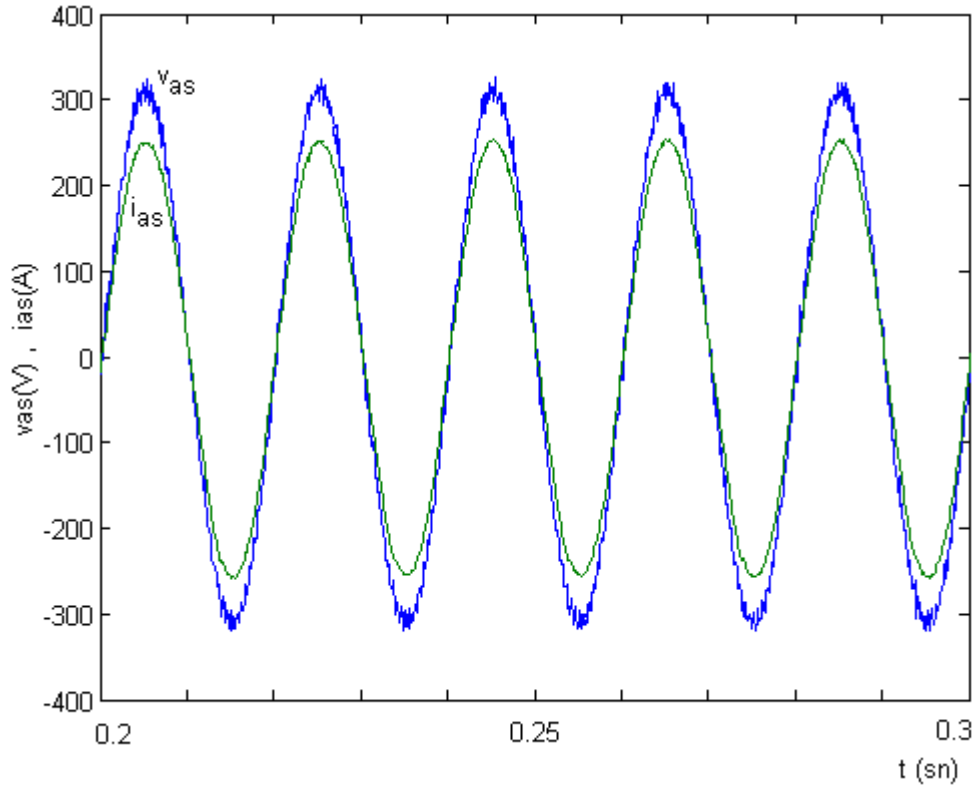
Şekil 5.13 Şebeke Gerilimi ile Aynı Fazda Birim Dalgalar

Birim dalgalar ile PI çıkısındaki değışken çarpımı, referans akımı vermektedir.

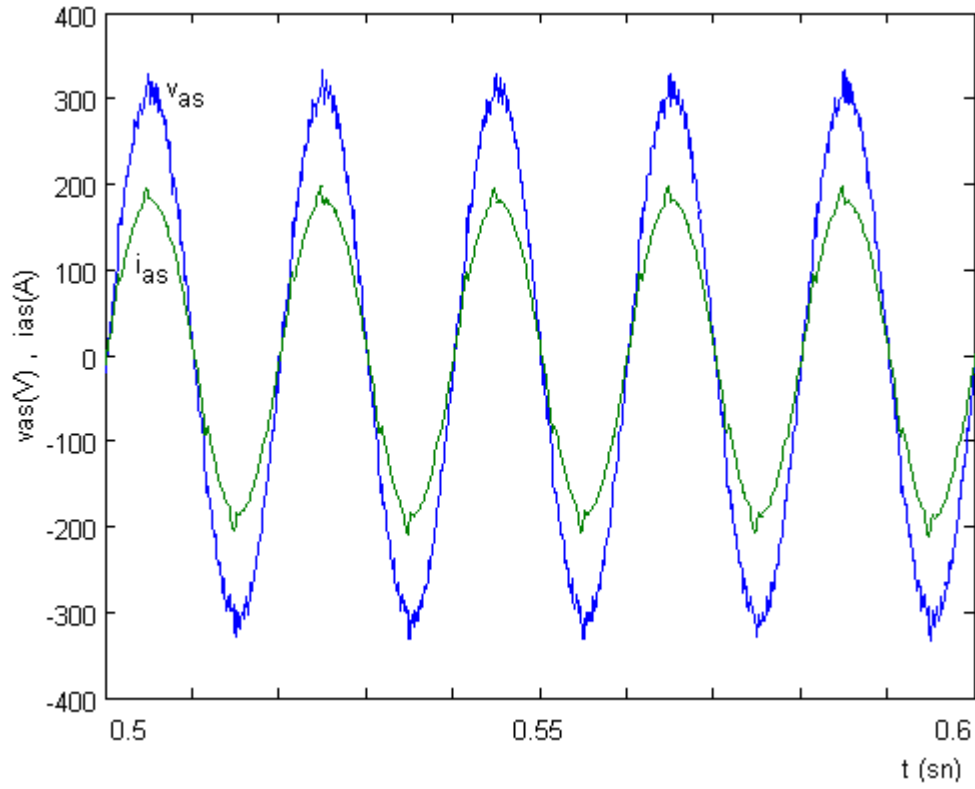


Şekil 5.14 Şebekeden Çekilmesi İstenen Referans Akım

PAF kontrol devresi, ilk 0.35 sn için, tristörün 0° ile tetiklenmesi sırasında, akım THB' sini %2 mertebelerine indirmektedir. Daha sonraki 0.35 sn içinse, tristörün 45° ile tetiklenmesi sırasında, THB değeri %4.5 mertebelerine düşmektedir. Sanayide bolca görülen, zor kompanze edilebilecek bir yük tipi için, simülasyon başarıyla uygulanmıştır. Aşağıda belli zaman aralıklarında, şebekeden çekilen akım ve şebeke gerilimi gösterilmektedir. Grafiklerden görüleceği gibi, şebekeden çekilen akım çok düzgündür ve gerilimle arasında faz farkı bulunmamaktadır.

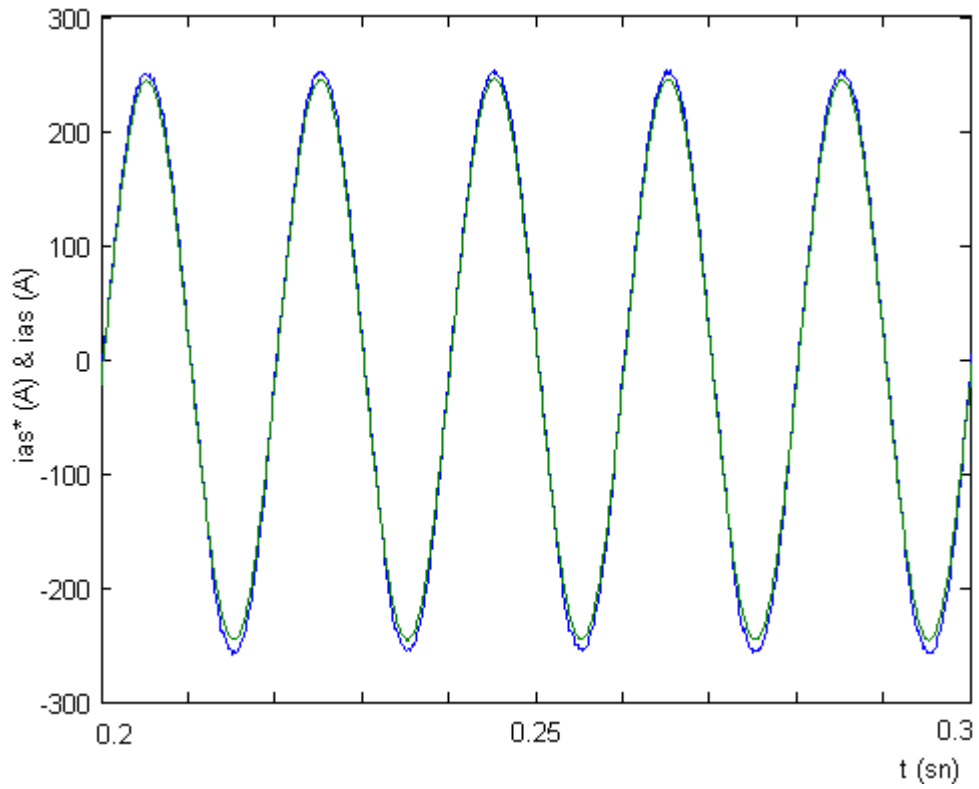


Şekil 5.15 OKN Şebeke Gerilimi ve Şebekeden Çekilen Akım ($\alpha=0^\circ$)

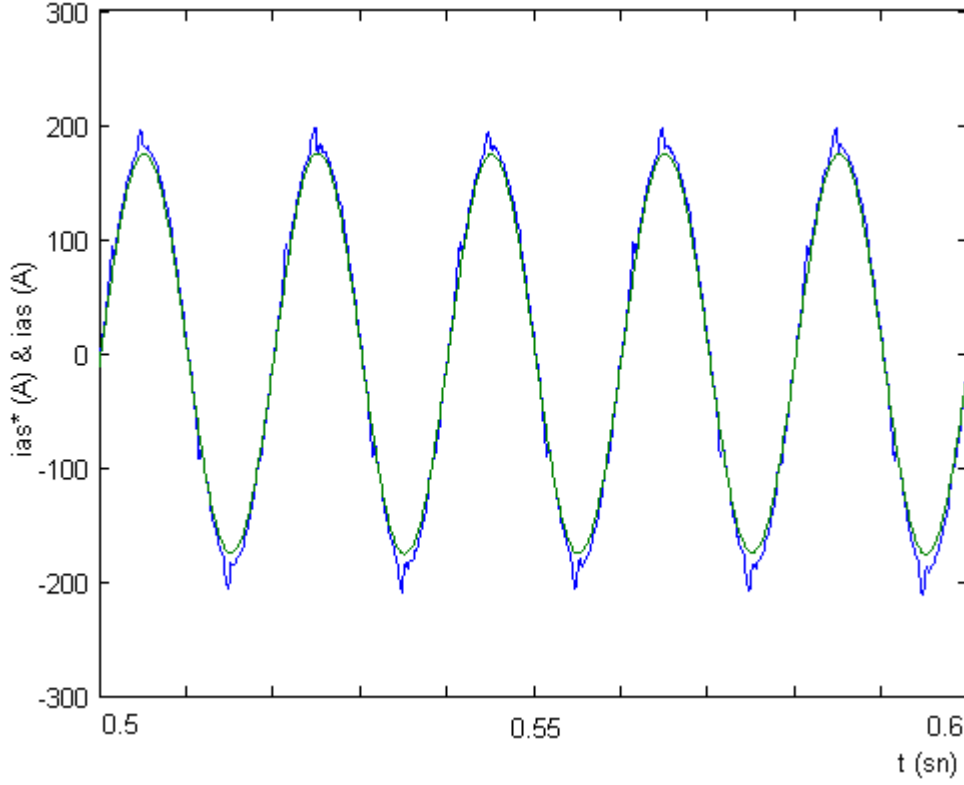


Şekil 5.16 OKN Şebeke Gerilimi ve Şebekeden Çekilen Akım ($\alpha=45^\circ$)

Şebekeden çekilen akım, şebekeden çekilmesi istenen referans akımı çok düzgün biçimde takip etmektedir.



Şekil 5.17 $\alpha=0^\circ$ de Referans Akım ve Şebekeden Çekilen Akım

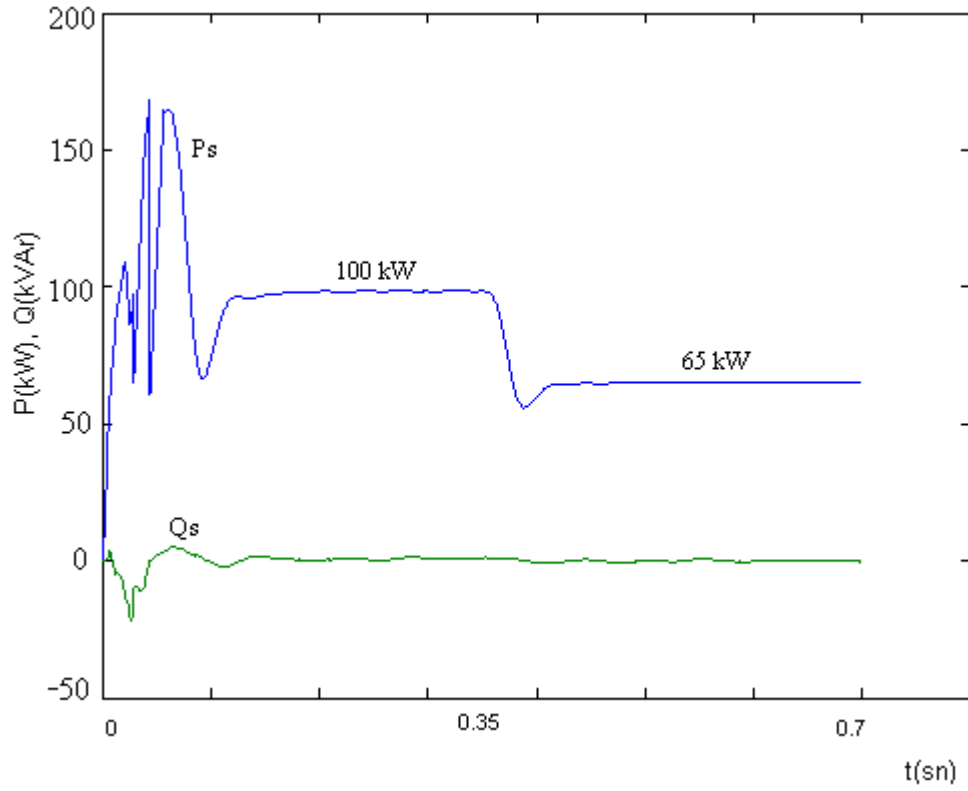


Şekil 5.18 $\alpha=45^\circ$ de Referans Akım ve Şebekeden Çekilen Akım

Yukarıdaki grafiklerde, belli zaman aralıklarında, referans akım ve şebekeden çekilen akım görülmektedir. Şebekeden çekilen akım, şebekeden çekilmesi gereken akımı mükemmel şekilde takip etmektedir. Grafiklerde görülen pikler, tristörün anahtarlama anlarında akım üzerinde oluşturduğu piklerdir. Bu pikler anahtarlama filtresi ile yüksek miktarda azaltılmasına rağmen, yinede tam olarak kompanse edilememiştir. Son grafiklerde gösterilecek olan, şebekeden çekilen akım THB değerinin büyük kısmı, bu anlardaki yüksek harmoniklerden meydana gelmektedir.

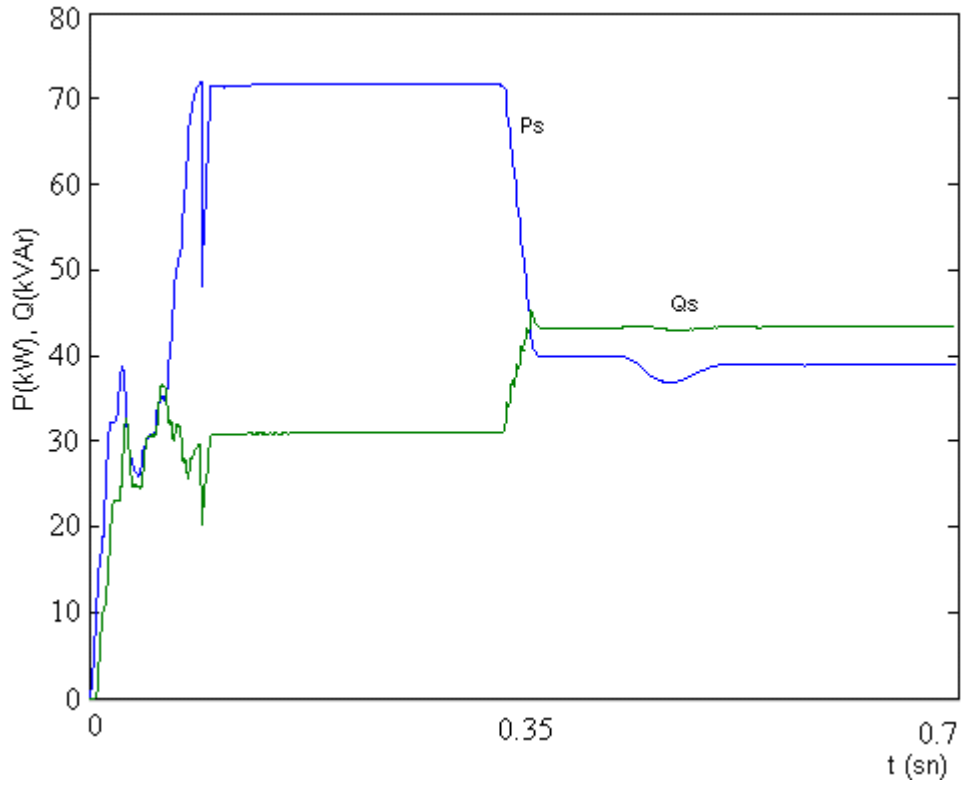
PAF kullanıldıktan sonra şebekeden çekilen aktif ve reaktif güç, şekil 5.19' da görülmektedir. PAF' nin kullanılmadığı duruma kıyasla, şebekeden çekilen reaktif güç sıfıra inmiştir.

PAF kullanılmayan duruma kıyasla, aktif gücün artma sebebi ise, PAF tarafından üretilen reaktif gücün, şebekeden aktif güç çekilerek sağlanmasıdır.



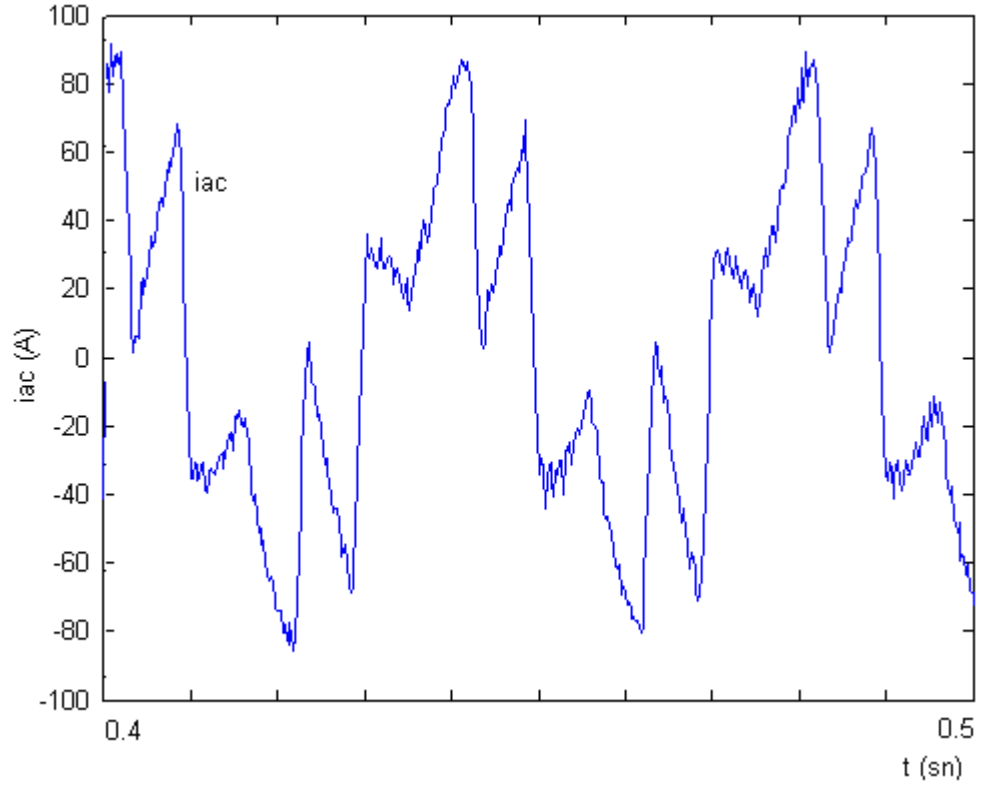
Şekil 5.19 Şebekeden Çekilen Aktif ve Reaktif Güç

Devrenin çalışma prensibi gereği, yükün uçlarında gerilim, akım ve güç olarak bir değişim yoktur. Yükün çektiği aktif ve reaktif güç, aşağıdaki grafikten görüleceği üzere, PAF kullanılmayan duruma göre değişmemiştir.

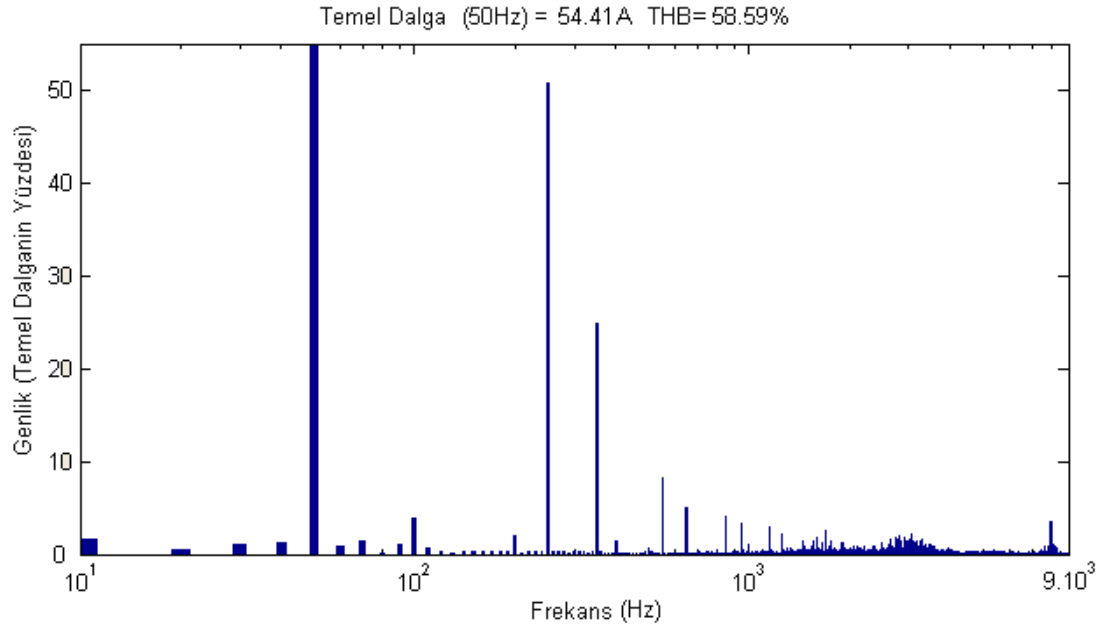


Şekil 5.20 Yükün Uçlarında Harcanan Aktif ve Reaktif Güç

Sürekli zamanda, PAF' nin şebekeye enjekte ettiği akım aşağıda görülmektedir. Bu akım, şebekeden harmonik ve reaktif akımların çekilmesini engeller.



Şekil 5.21 Yükün Gereksinimi Olan Harmonikli Akımın, PAF' den Sağlanması

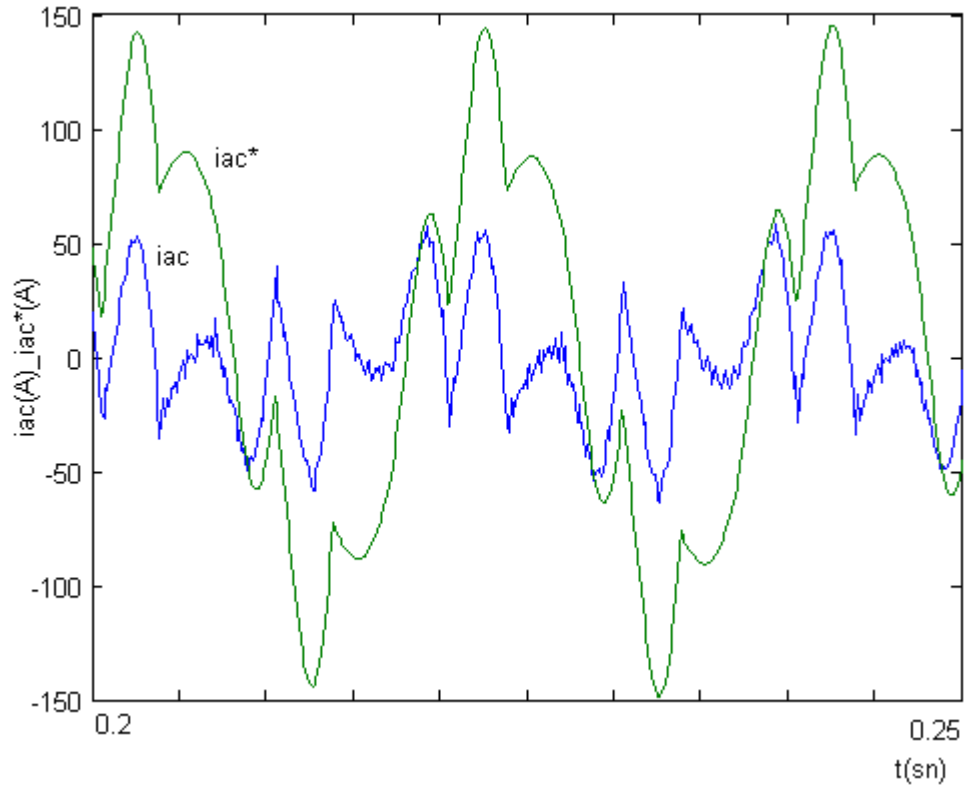


Şekil 5.22 Yükün Gereksinimi Olan Harmonikli Akımın FFT Analizi

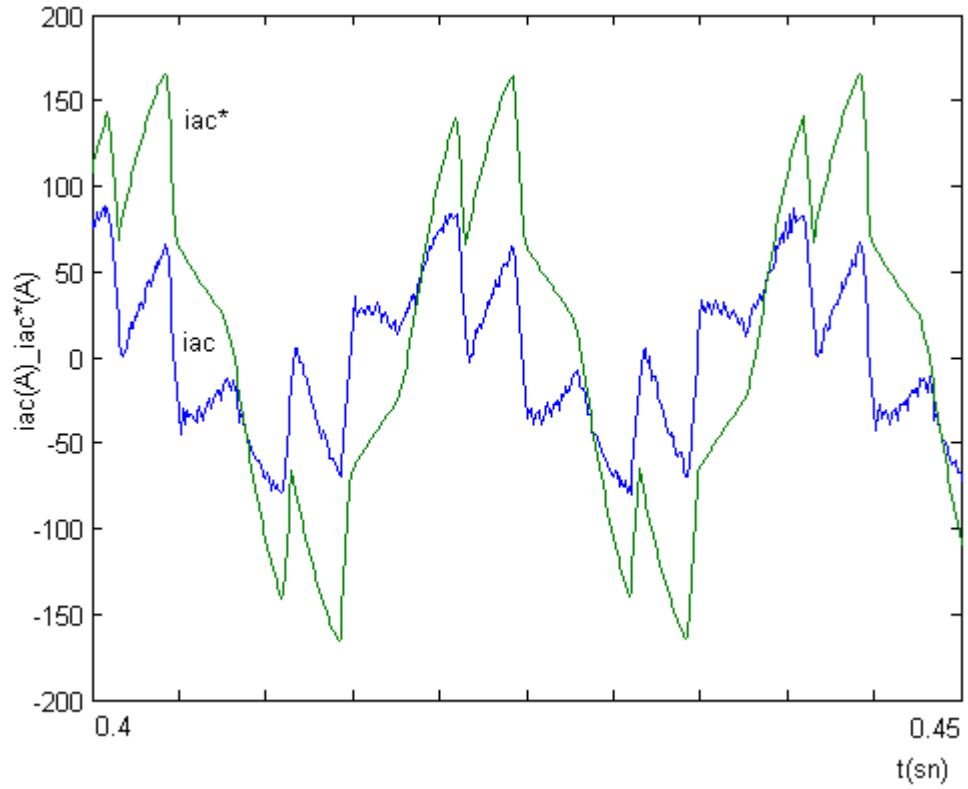
Şebekeye verilen akımın, FFT analizi yapıldığında, anahtarlama frekansı olan 8 kHz frekansındaki bileşenler görülmektedir. PAF devresindeki L_f endüktansı, alçak geçiren bir filtre görevi görerek bu bileşeni süzse de, tam olarak kompanse edememiştir.

Elde edilen referans akımdan (i_{as}^*), yük akımı (i_a) çıkarılırsa, tam kompanzasyon için PAF tarafından üretilmesi gereken (i_{ac}^*) akım bulunur.

Şekil 5.22 ve 5.23 te kompanzasyon akımı i_{ac} ve ideal kompanzasyon akımı i_{ac}^* görülmektedir.

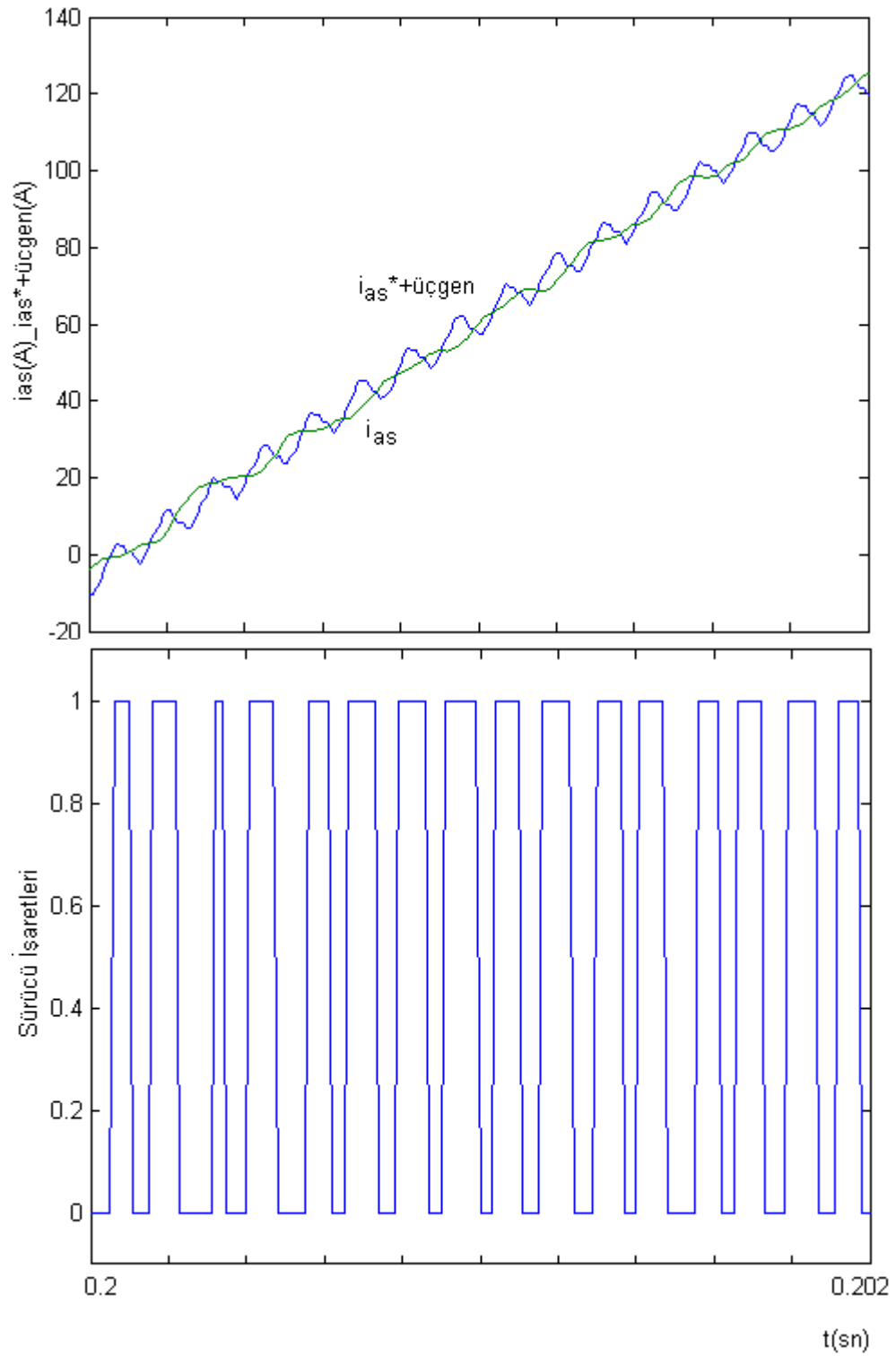


Şekil 5.23 Kompanzasyon Akımı (i_{ac}) ve İdeal Kompanzasyon Akımı (i_{ac}^*) ($\alpha=0$)



Şekil 5.24 Kompanzasyon Akımı (i_{ac}) ve İdeal Kompanzasyon Akımı (i_{ac}^*) ($\alpha=45$)

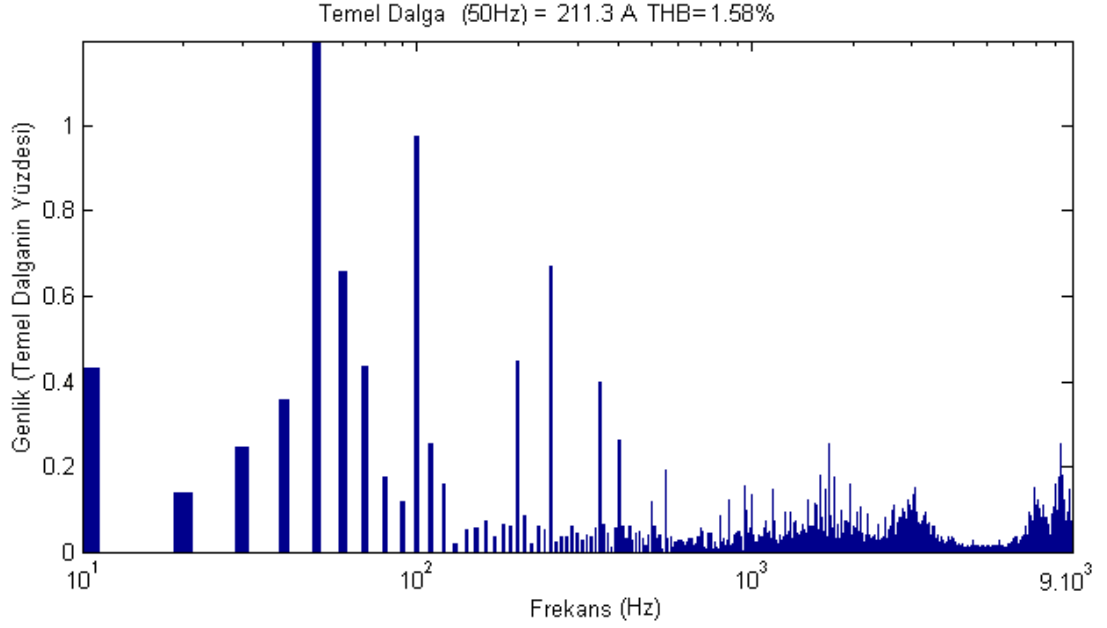
Akım kontrol devresi, referans akım ve şebekeden çekilen akımı sürekli izler. Referans akım, şebekeden çekilen akımdan büyük olduğunda, DGM çıkışı, kontrol yapısı dolayısıyla 0 olur, küçük olduğunda ise DGM çıkışı, 1 olur.



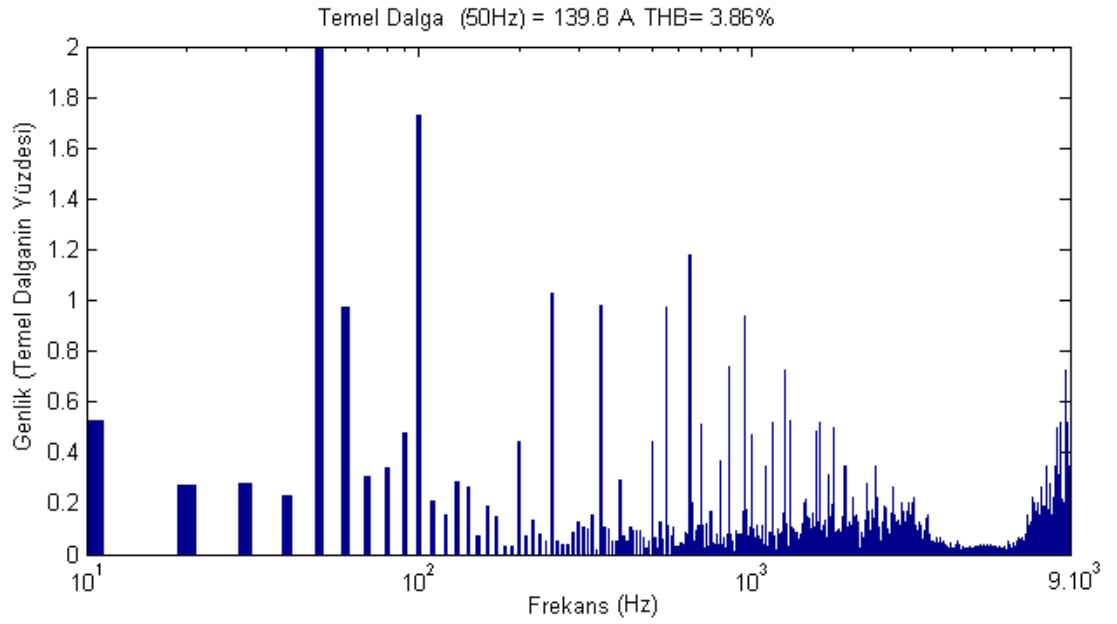
Şekil 5.25 a) Referans+Üçgen ve Gerçek Akımın Karşılaştırılması b) Karşılaştırma Sonucu Oluşturulan IGBT Tetikleme İşaretleri

Simülasyon çalışmasının asıl amacı, yükün ihtiyacı olan harmonik akımı, PAF' den sağlayarak, şebekeden harmonik akımların çekilmesini önlemek yani THB_{ias} değerini sıfıra indirmektir. Aşağıda iki durumda, şebekeden çekilen akımın THB' si görülmektedir. Tetikleme açısının 0° olduğu durumda, THB değeri %17 den %1.6

mertebeesine, tetikleme açısının 45° olduğu durumda ise % 26 dan %4 mertebesine düşürülmüştür.



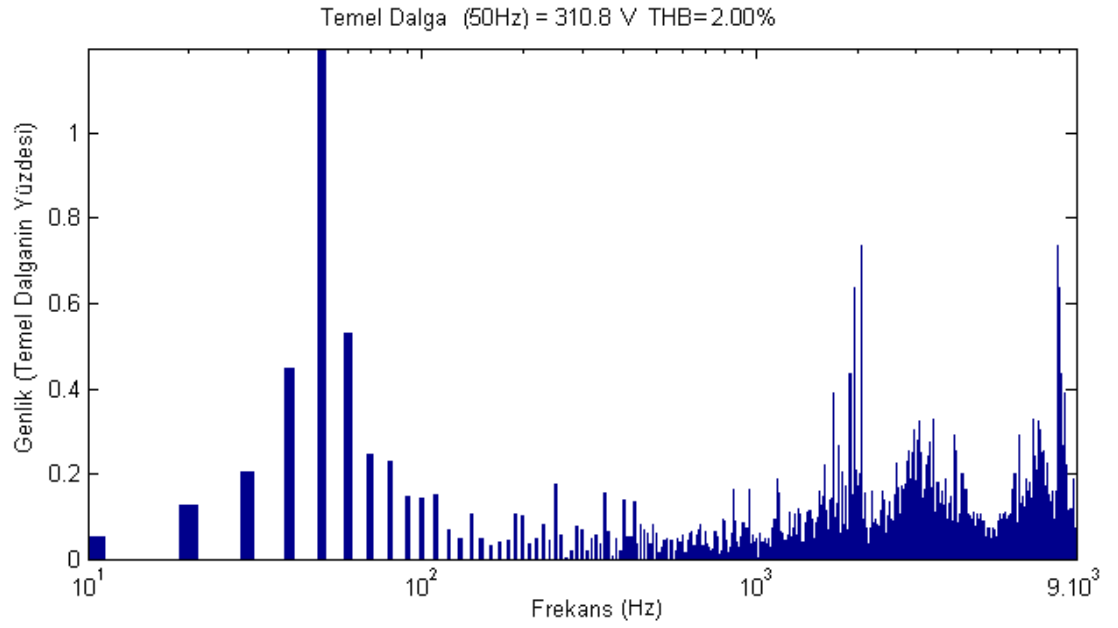
Şekil 5.26 $\alpha=0^\circ$ da Şebekeden Çekilen Akımın FFT' si



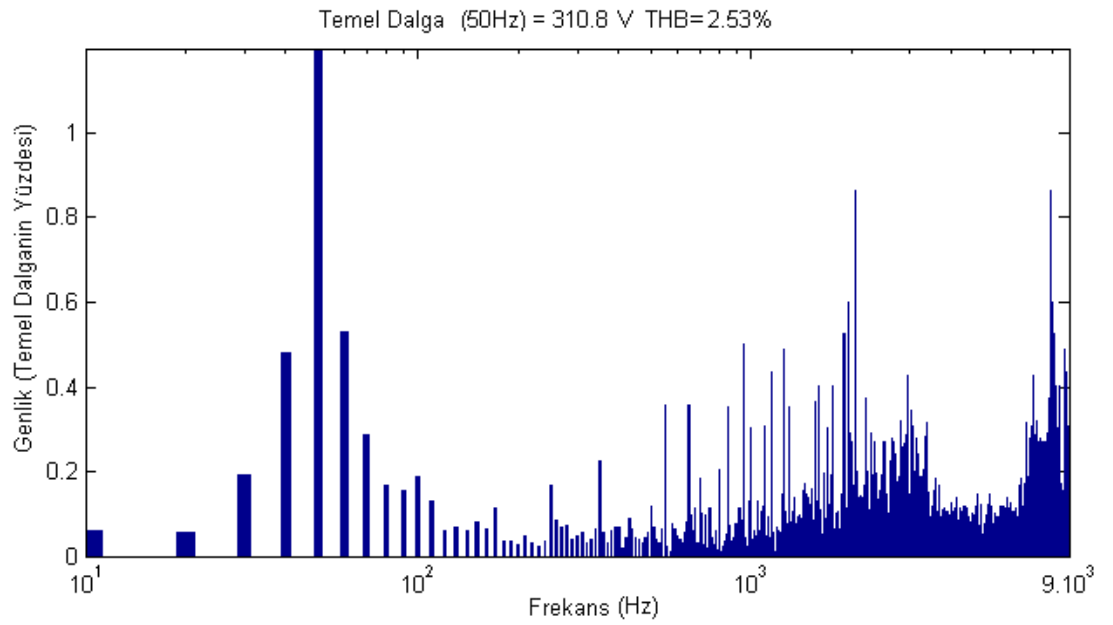
Şekil 5.27 $\alpha=45^\circ$ de Şebekeden Çekilen Akımın FFT' si

Gerilim değeri frekans domeninde incelendiğinde, IGBT elemanın yüksek frekanslardaki çalışması sebebiyle, şebekeye farklı frekanslarda harmonik gerilimler enjekte edilir. Yapılan simülasyon çalışmasında, kullanılan anahtarlama filtresi gerilim THB değerin %5 in çok altında tutulmasını sağlamıştır. Aşağıda gerilim değerin FFT analizi grafikte gösterilmiştir. Anahtarlama filtresi kullanılmadığında,

şebeke gerilimi THB değeri %5 ten yüksek bir rakam çıkmaktadır ki, akım harmonik düzeltimi planlanırken, gerilim bozulumuna sebep vermek simülasyon çalışmasının amacını saptırmaktadır.



Şekil 5.28 $\alpha=0^\circ$ de OKN Şebeke Geriliminin FFT' si



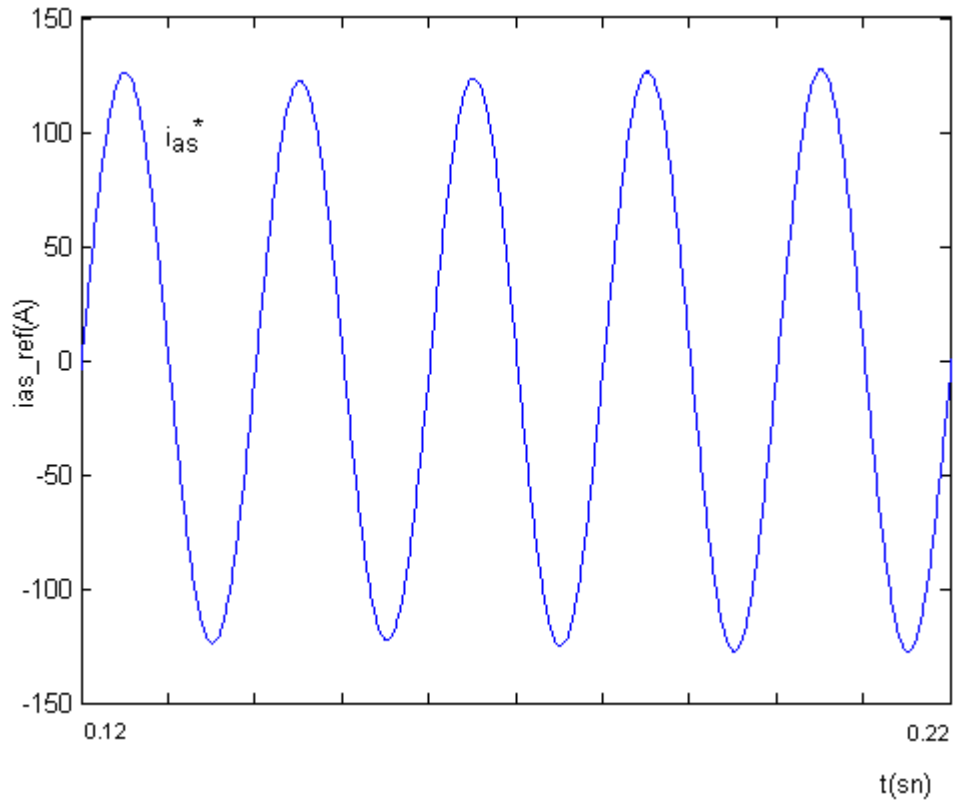
Şekil 5.29 $\alpha=45^\circ$ de OKN Şebeke Geriliminin FFT' si

5.3 Şebeke Akımı Bant Geçiren Filtre Kontrollü, PAF Devresi Simülasyon Sonuçları

Simülasyon devresinde kullanılan, ikinci kontrol yapısı, açık çevrim kontrol olarak nitelendirilir. Burada şebeke akımından çekilen tüm harmonikler tespit edilerek, PAF' nin bu harmonik akımları üretmesi sağlanır. Böylece şebekeden ideale yakın bir akım çekilmiş olur.

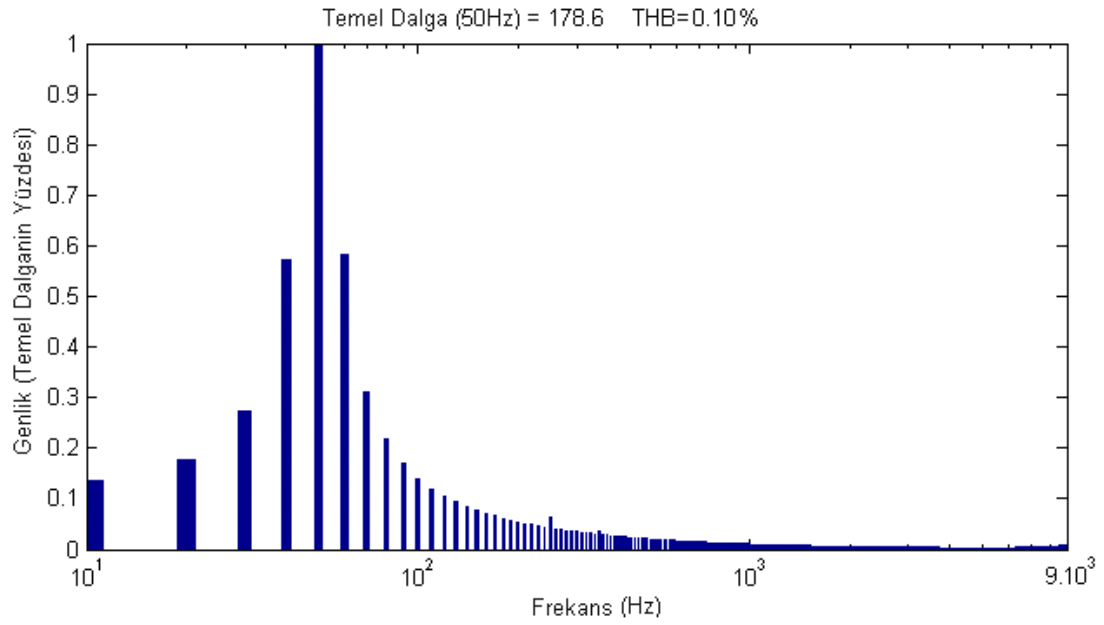
Yük için öngörülen şartlar, lineer PI kontrollü PAF devresiyle birebirdir.

İlk olarak, şebeke akımına bant geçiren (45–55 Hz) bir filtre uygulanarak, şebeke akımı harmoniklerden arındırılmıştır. Aşağıda bant geçiren filtrenin çıkışı gösterilmektedir.



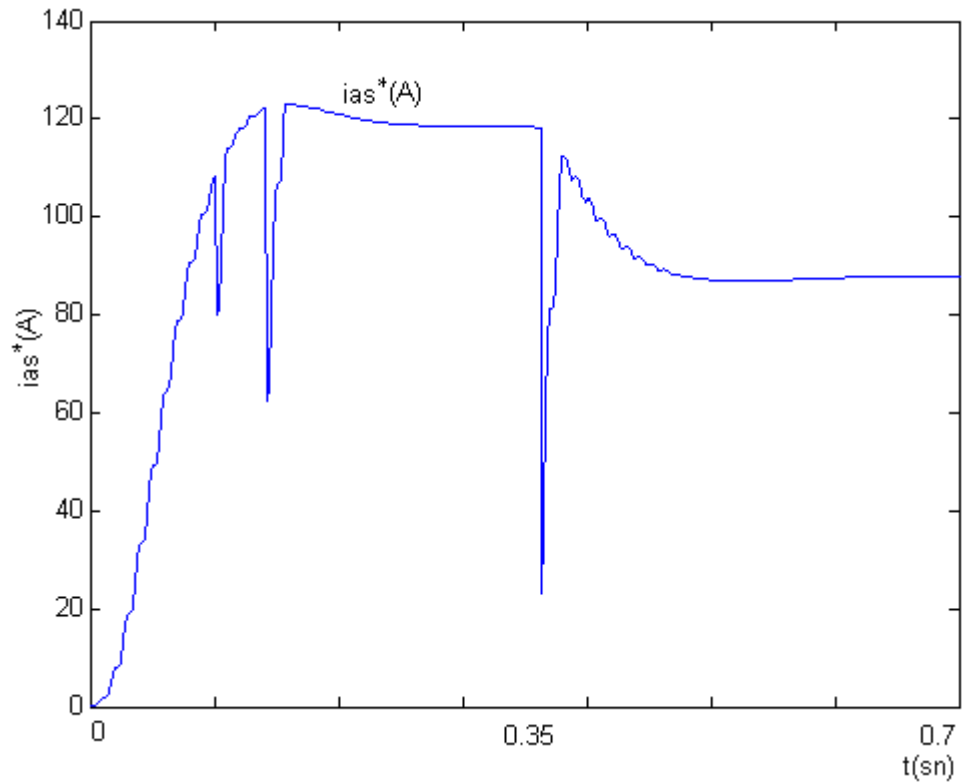
Şekil 5.30 Şebeke Akımı Bant Geçiren Filtre Çıkışı

Elde edilen referans dalga %0.1' lik bir THB değeri içermektedir. Bu dalga şekli, ideal sinüs formuna çok yakındır. Şekil 5.30' da, bant geçiren filtre çıkışındaki dalganın FFT analizi görülmektedir.



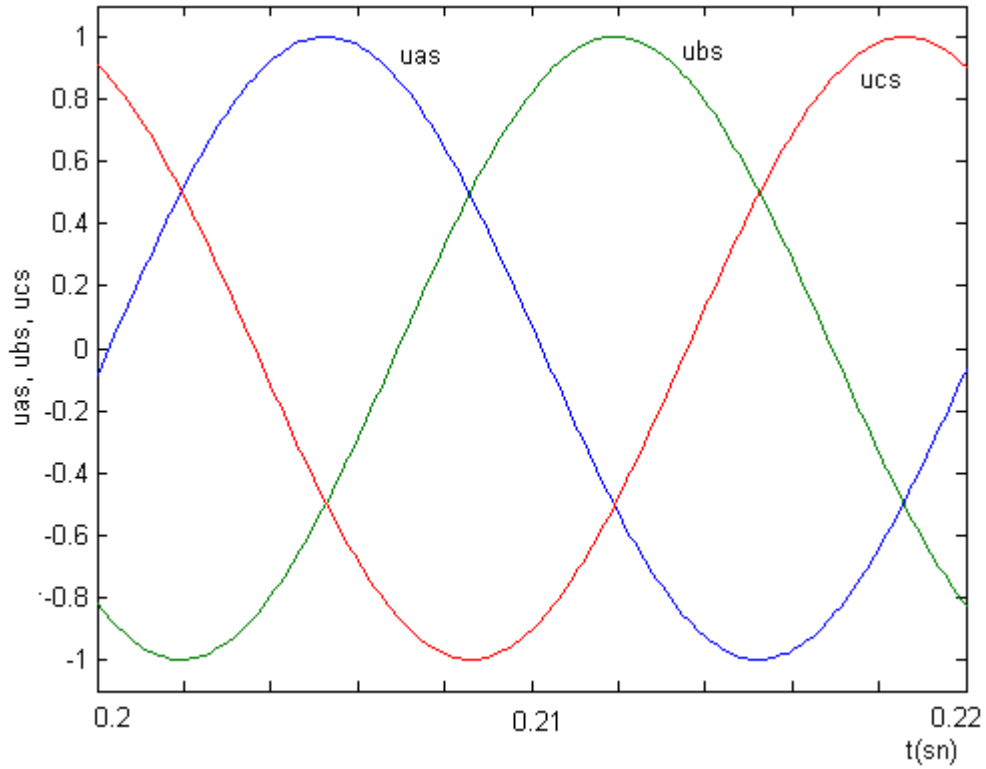
Şekil 5.31 Bant Geçiren Filtre Çıkışının FFT' si

Çıkış, ideale çok yakın olmakla beraber, filtrenin yapısı gereği, sistem 0.15 sn sonra sürekli hale ulaşmaktadır. Aşağıda filtre çıkışının etkin değeri, bu gecikme görülmektedir.



Şekil 5.32 Bant Geçiren Filtre Çıkışının Etkin(rms) Değeri

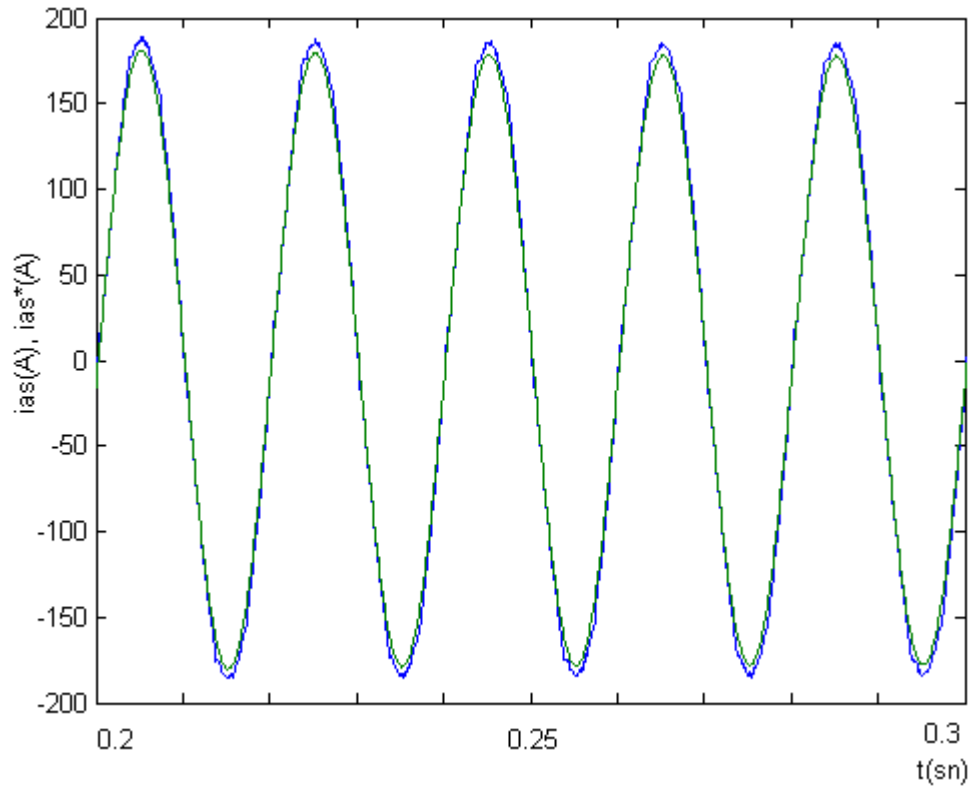
Elde edilen akım şekli, referans akım olarak kullanıldığında, PAF sadece akım harmonik kompanzasyonu yapmış olur. GED' lerin diğer büyük sorunu olan, şebekeden reaktif güç çekilmesine ise devam edilecektir. Bu amaçla, referans işaretin şebeke gerilimi ile aynı frekansta olması gerekmektedir. Bu yüzden FKD devreleri ile gerilime paralel birim sinüs dalgalar üretilir.



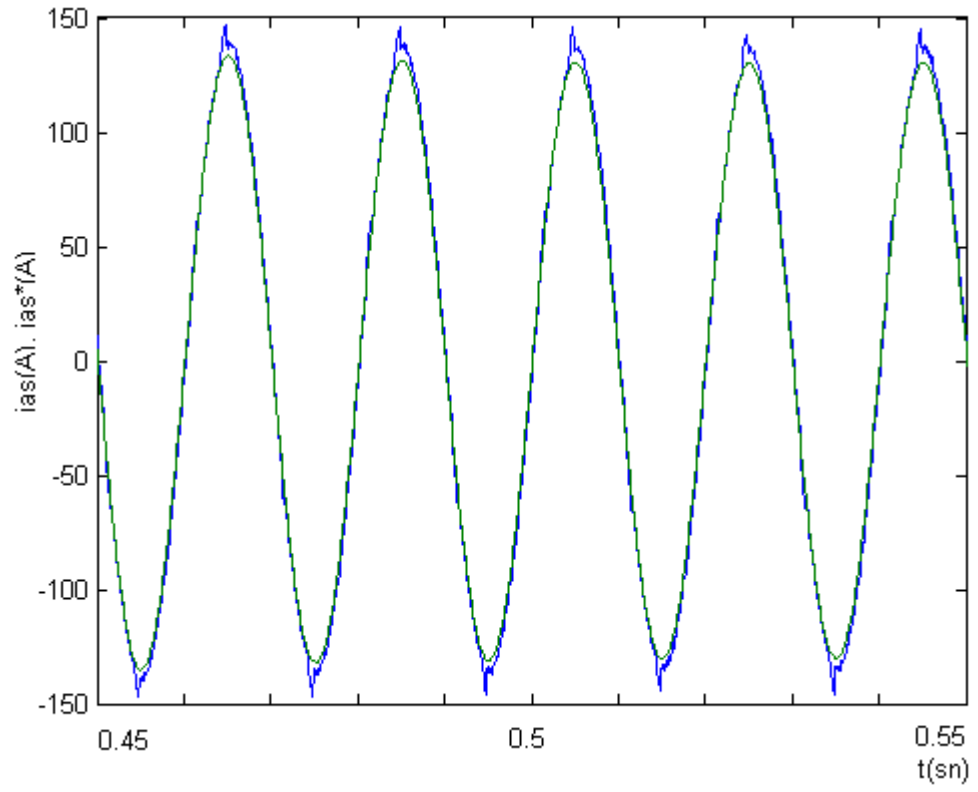
Şekil 5.33 Şebeke Geriliminin FKD' ye Uygulanması Sonucu Elde Edilen Birim Dalgalar

Bu dalgalar, filtre çıkısındaki akımın maksimum değeri ile çarpılarak, referans akım üretilmiş olur. DA Kondansatörü lineer PI kontrol devresi ile karşılaştırılınca, şebekeden çekilen akımın etkin değeri ve THB bozulum değeri düşmüştür. Simülasyon çalışması, lineer PI kontrolden daha başarılı bir sonuç vermektedir.

Şekil 5.34' de, referans akım ve şebekeden çekilen akım, karşılaştırılmak için gösterilmiştir.



Şekil 5.34 $\alpha=0^\circ$ de Şebekeden Çekilmesi Gereken Akım ve Şebekeden Çekilen Akım

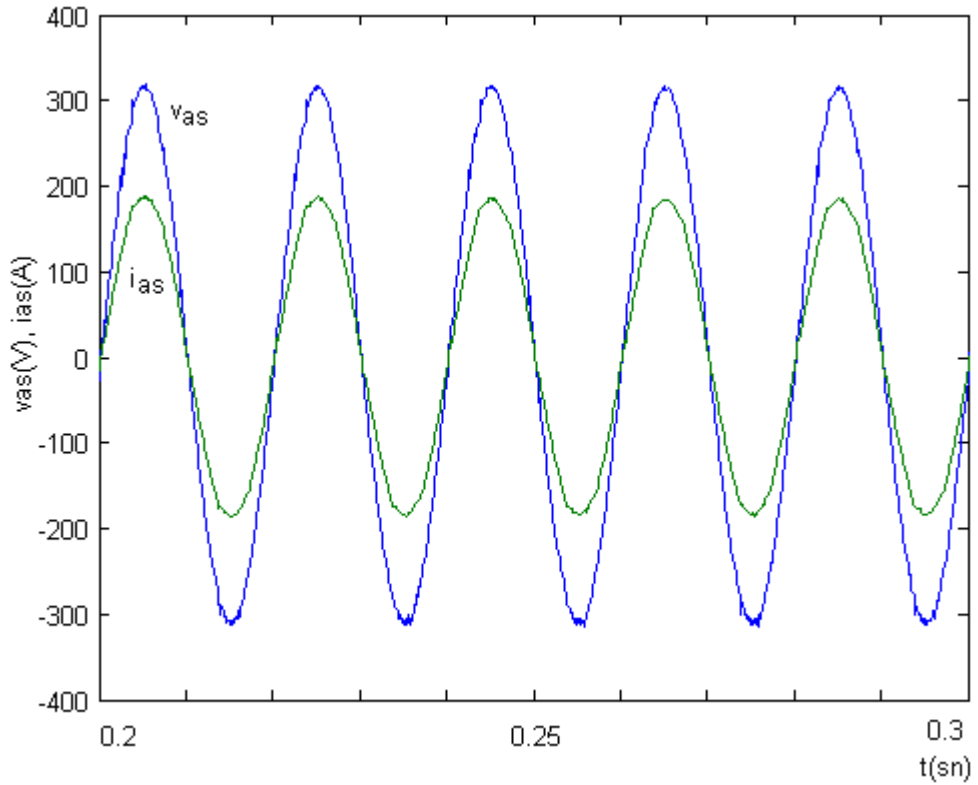


Şekil 5.35 $\alpha=45^\circ$ de Şebekeden Çekilmesi Gereken Akım ve Şebekeden Çekilen Akım

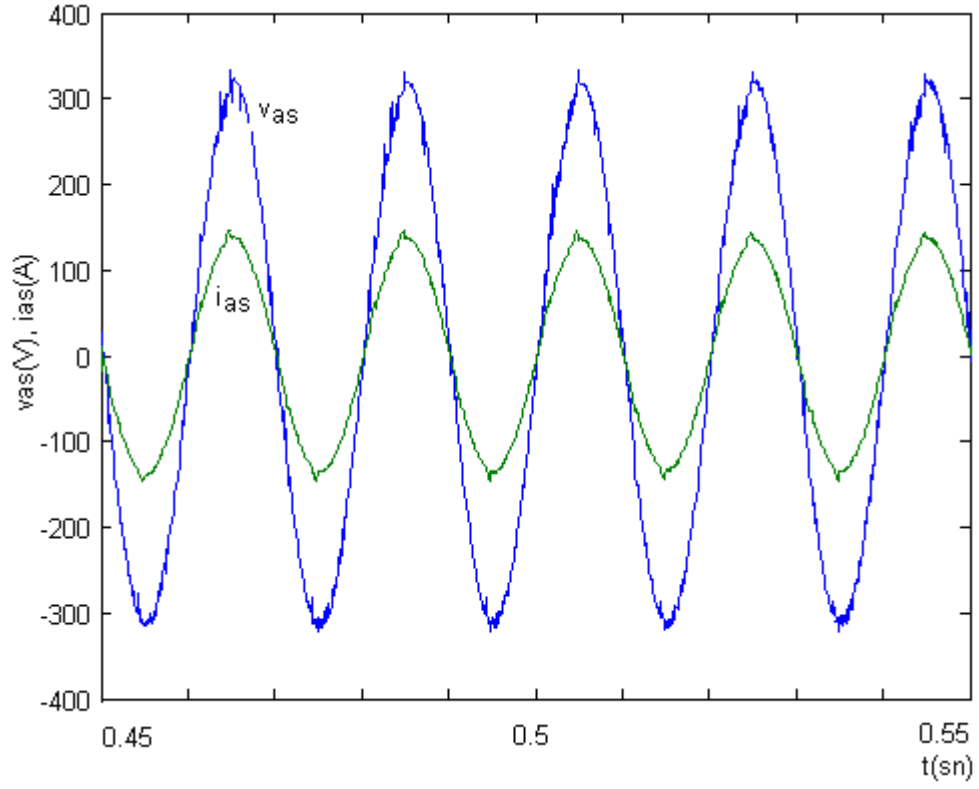
Şekil 5.34 ve 5.35’ deki grafiklerde, belli zaman aralıklarında, referans akım ve şebekeden çekilen akım görülmektedir. Şebekeden çekilen akım, şebekeden çekilmesi gereken akımı mükemmel şekilde takip etmektedir. Grafiklerde görülen pikler, tristörün anahtarlama anlarında akım üzerinde oluşturduğu piklerdir. Bu pikler anahtarlama filtresi ile yüksek miktarda azaltılmasına rağmen, yinede tam olarak kompanze edilememiştir. Son grafiklerde gösterilecek, şebekeden çekilen akım THB değerinin büyük kısmı bu anlardaki yüksek harmoniklerden meydana gelmektedir.

Şebekeden çekilen akım, ilk durumda, etkin değer olarak 135 A civarındadır. İkinci durumda akım 95 A mertebelerine düşse de, akımın reaktif bileşeni arttığı için, şebekeden çekilen reaktif güç artmaktadır.

Tristörün 0° ile tetiklenmesi sırasında şebekeden çekilen akım THB’ si %1.6 mertebelerindedir. Tristörün 45° ile tetiklenmesi sırasında ise, THB %2.3 gibi bir değer göstermektedir. Bu değer, DA Kondansatörü lineer PI kontrolle elde edilen akım değerinden, daha düşük bir değerdir. Şekil 5.35 ve 5.36’ da, belirli zaman aralıklarında, şebeke gerilimi ve şebekeden çekilen akımın grafikleri görülmektedir.

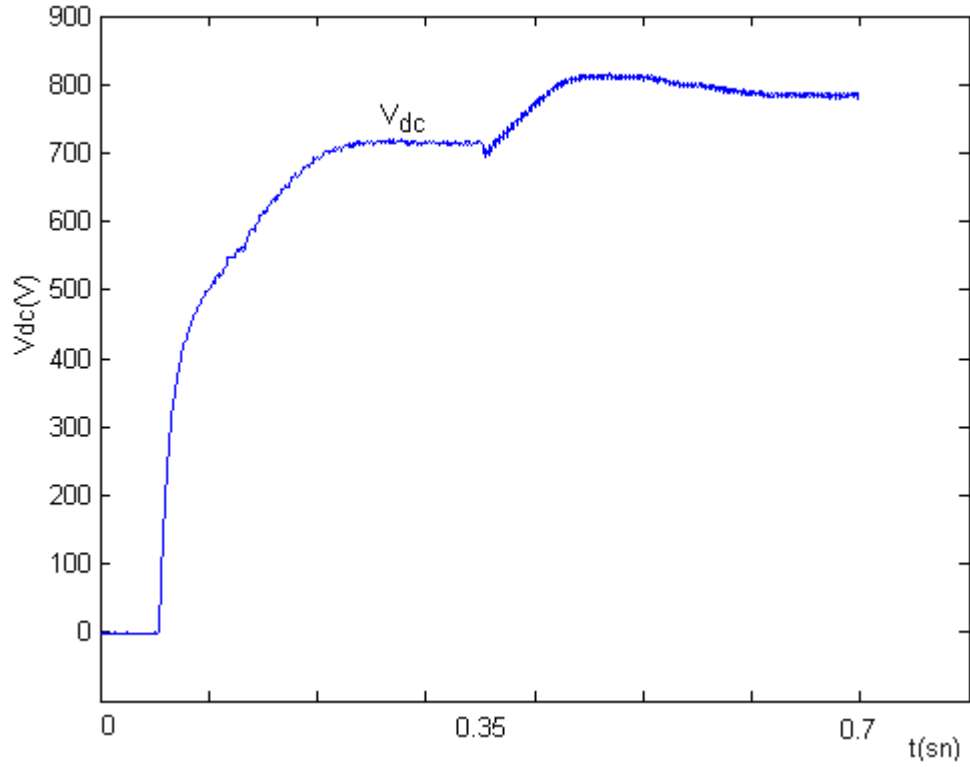


Şekil 5.36 OKN Şebeke Gerilimi ve Şebekeden Çekilen Akım ($\alpha=0^\circ$)



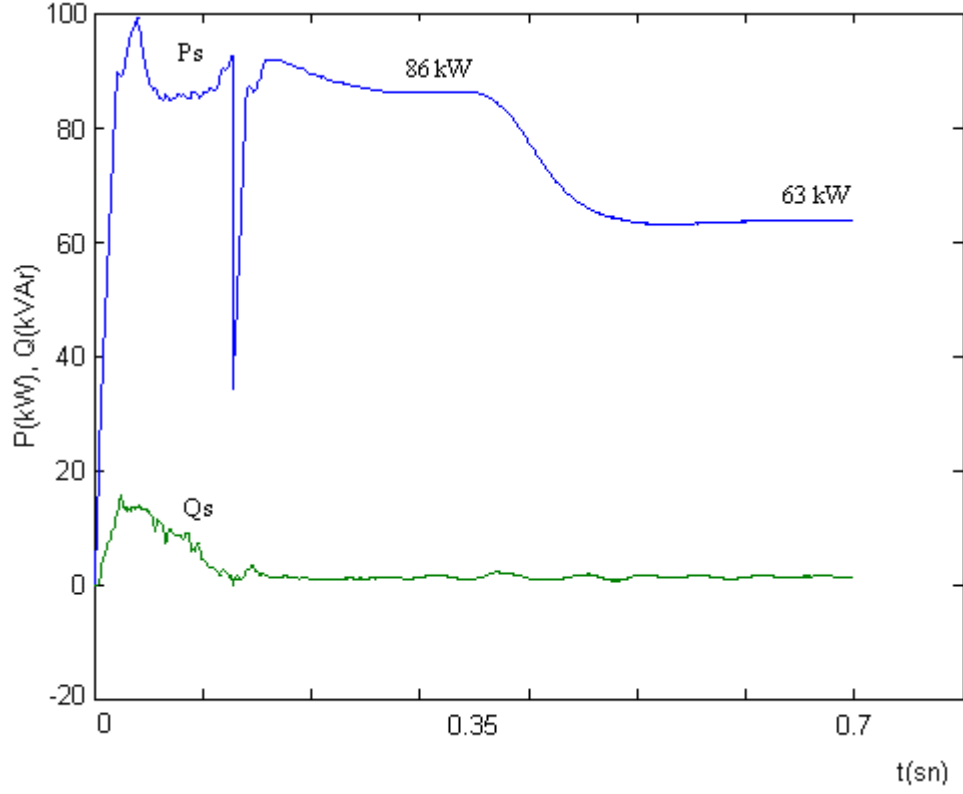
Şekil 5.37 OKN Şebeke Gerilimi ve Şebekeden Çekilen Akım ($\alpha=45^\circ$)

Seçilen uygun R_f değeri, kapasite değerini kısa bir zaman içinde doyuma ulaştırmaktadır.



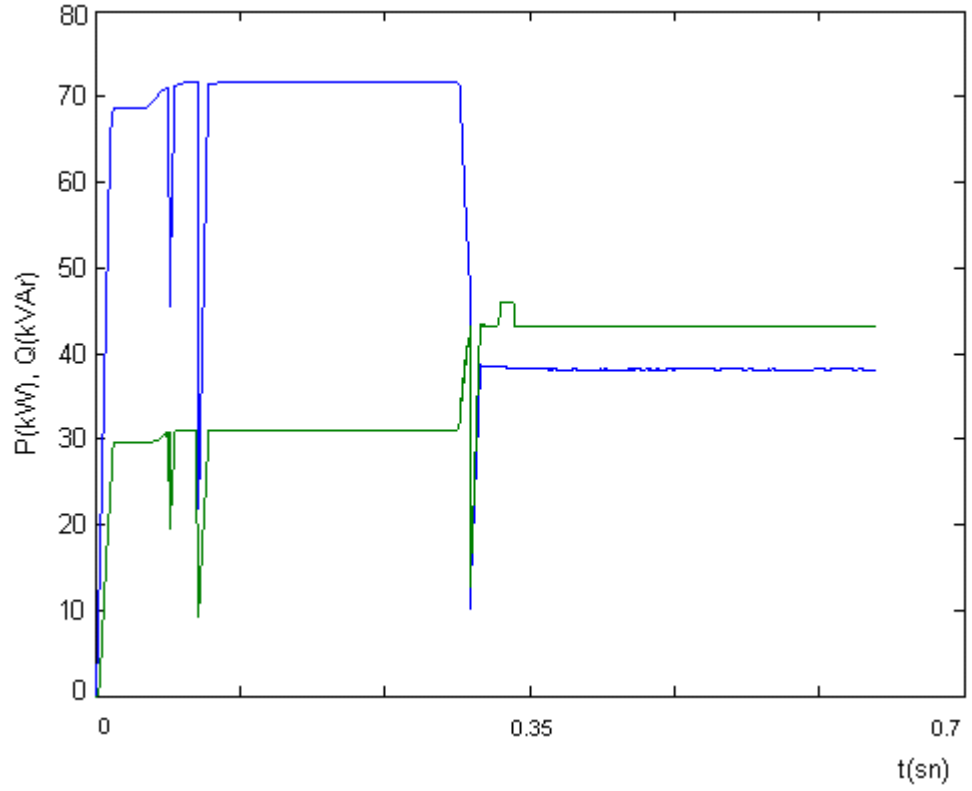
Şekil 5.38 DA Kondansatörü Gerilimi

AF kullanıldıktan sonra şebekeden çekilen aktif ve reaktif güç, şekil 5.39’ de görülmektedir. PAF kullanılmayan duruma kıyasla, şebekeden çekilen reaktif güç sıfıra inmiştir. Aktif gücün artma sebebi ise, PAF tarafından üretilen reaktif gücün, şebekeden aktif güç çekerek sağlanmasıdır.



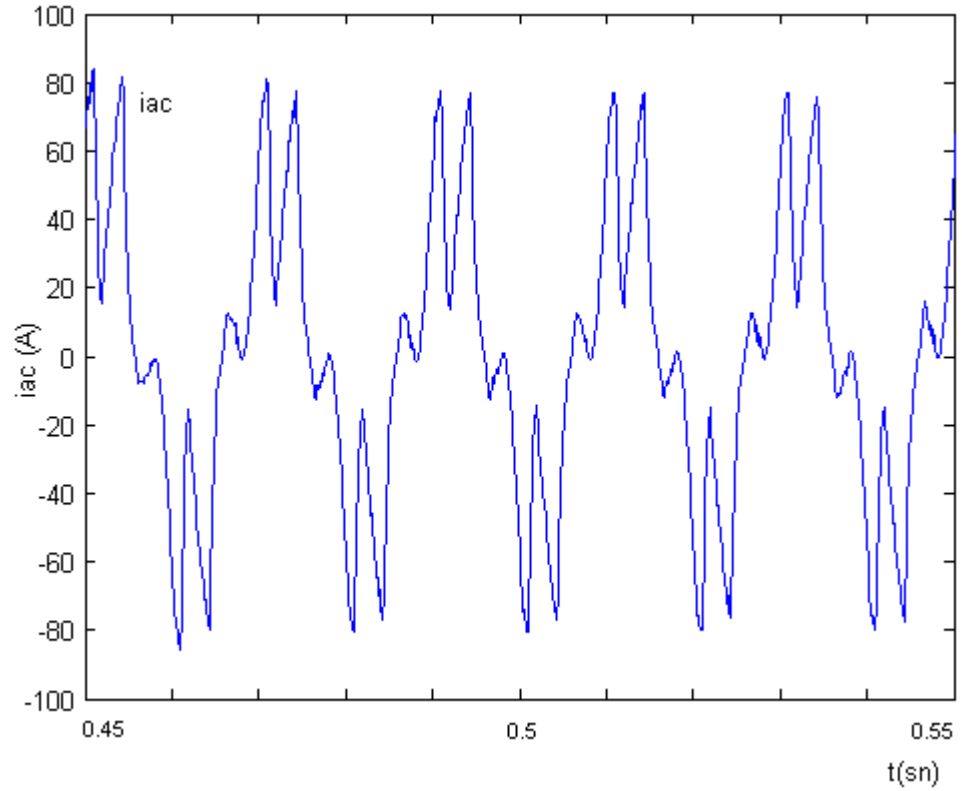
Şekil 5.39 Şebekeden Çekilen Aktif ve Reaktif Güç

Devrenin çalışma prensibi gereği, yükün uçlarında gerilim, akım ve güç olarak bir değişim yoktur. Yükün çektiği aktif ve reaktif güç, aşağıdaki grafikten görüleceği üzere, PAF kullanılmayan duruma göre değişmemiştir.



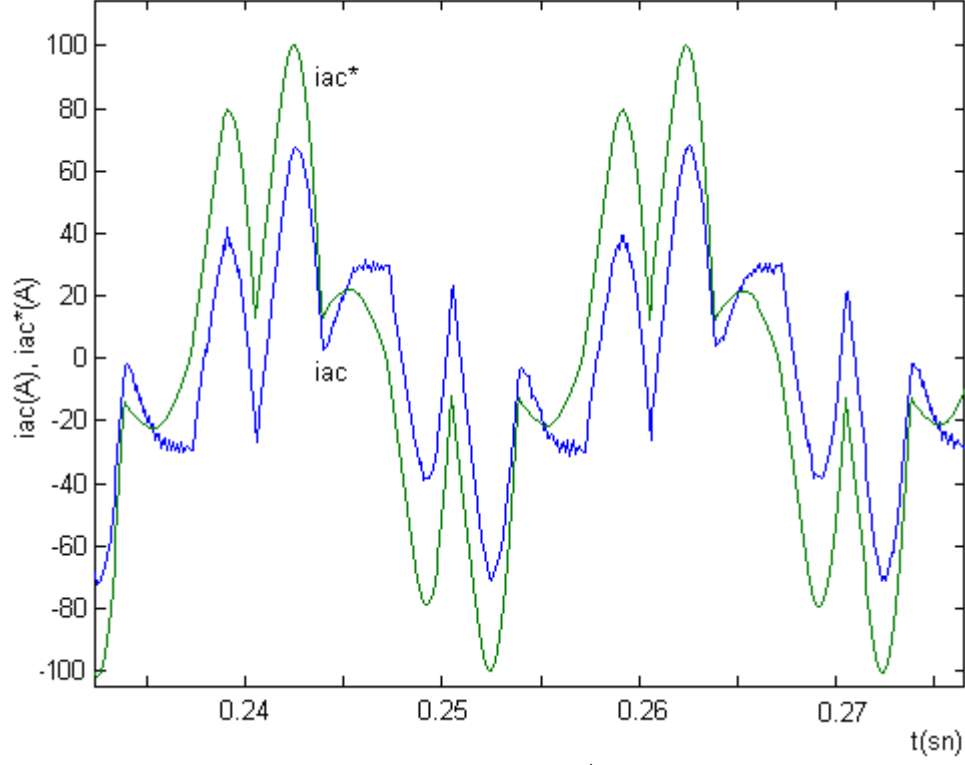
Şekil 5.40 Yükte Harcanan Aktif ve Reaktif Güç

Sürekli zamanda, AF' nin şebekeye enjekte ettiği akım aşağıda görülmektedir. Bu akım şebekeden harmonik ve reaktif akımların çekilmesini engeller.

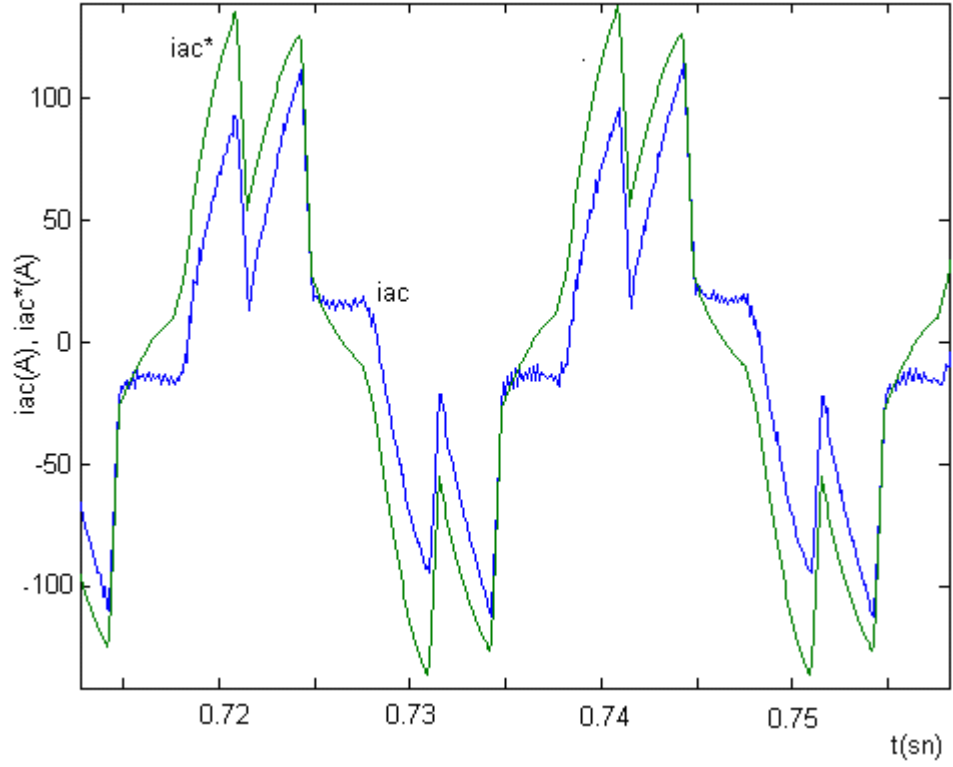


Şekil 5.41 Yükün Gereksinimi Olan Harmonikli Akımın PAF' den Sağlanması ($\alpha=45^\circ$)

Simülasyon çalışmasında, referans akımdan (i_{as}^*), yük akımını (i_a) çıkardığımızda, eviricinin şebekeye vermesi gereken ideal akım (i_{ac}^*) yi bulmuş oluruz. Eviricinin şebekeye vermesi gereken akım ve simülasyonda sisteme verilen akım şekil 5.42 ve 5.43' de karşılaştırma amacıyla gösterilmektedir.

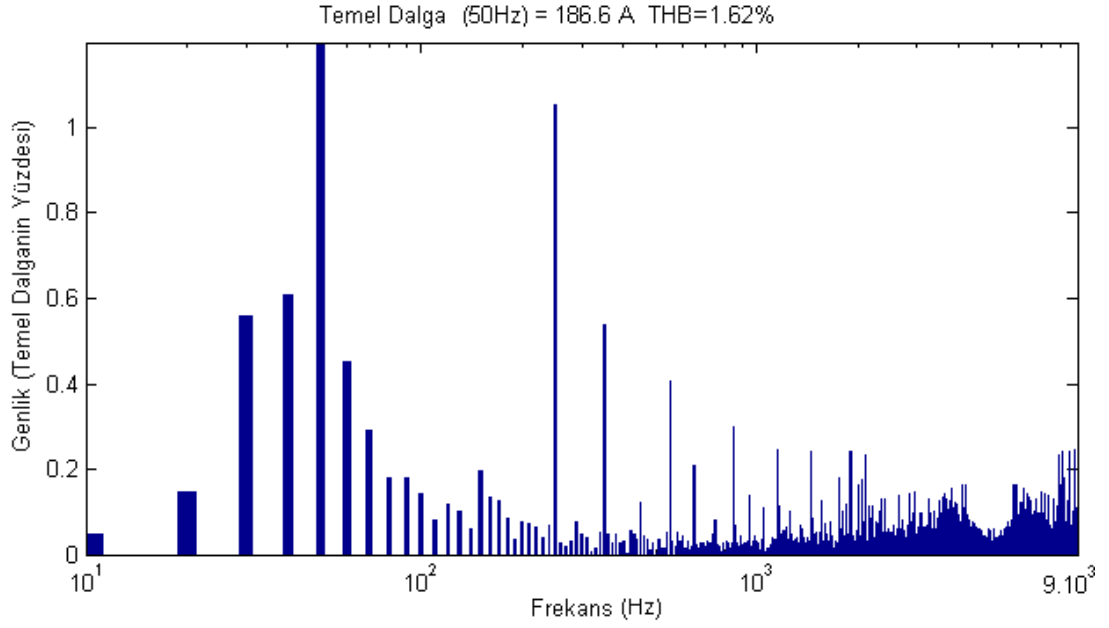


Şekil 5.42 PAF' den Çekilmesi Gereken Akım (i_{ac}^*) ve PAF' den Çekilen Akım (i_{ac}), ($\alpha=0^\circ$)

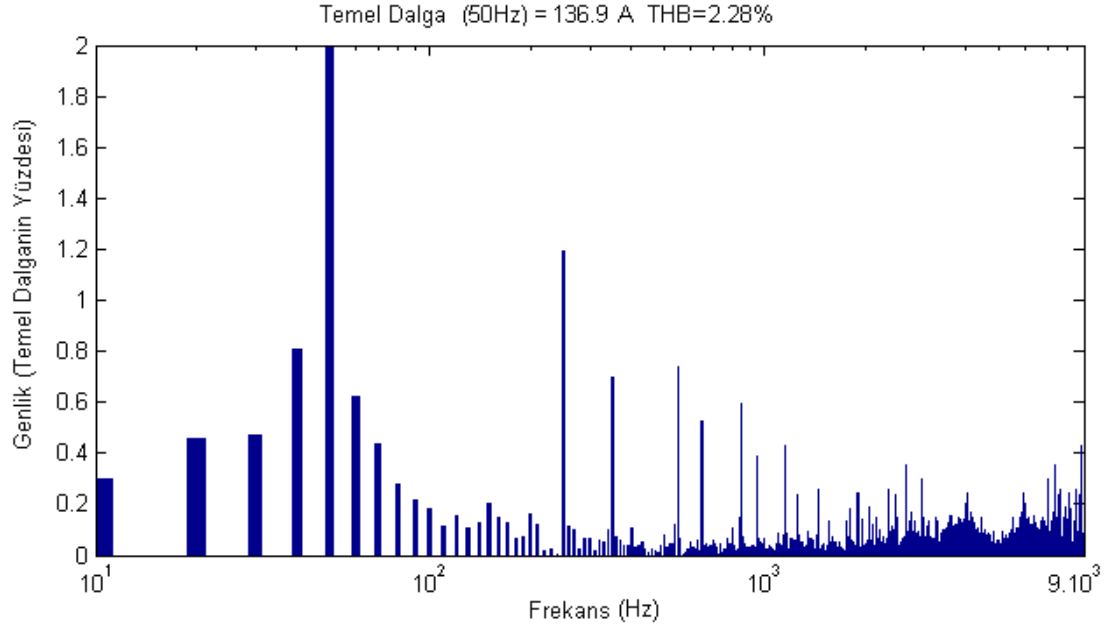


Şekil 5.43 PAF' den Çekilmesi Gereken Akım (i_{ac}^*) ve PAF' den Çekilen Akım (i_{ac}), ($\alpha=45^\circ$)

Simülasyon çalışmasının asıl amacı, yükün ihtiyacı olan harmonik akımı başka bir düzendenekten sağlayarak, şebekeden harmonik akımların çekilmesini önlemek yani THB_{ias} değerini sıfıra indirmektir. Aşağıda iki durumda, şebekeden çekilen akımın THB' si görülmektedir. Tetikleme açısının 0° olduğu durumda, THB değeri %18 den %1.6' ya, tetikleme açısının 45° olduğu durumda ise % 26 dan %2.28 mertebesine düşürülmüştür.

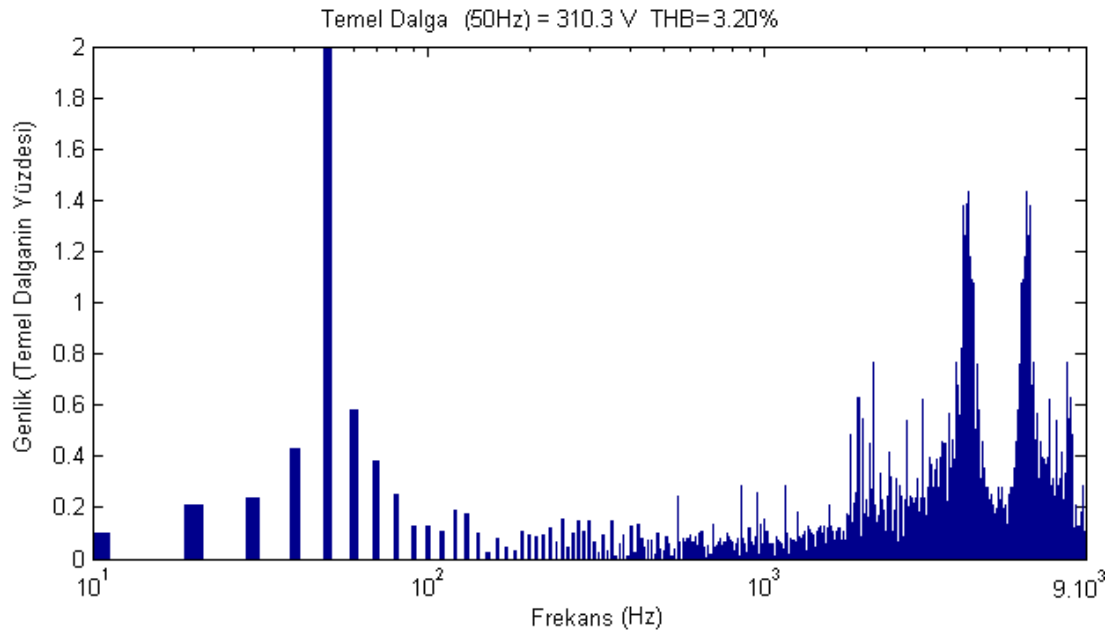


Şekil 5.44 $\alpha=0^\circ$ de Şebekeden Çekilen Akımın FFT' si

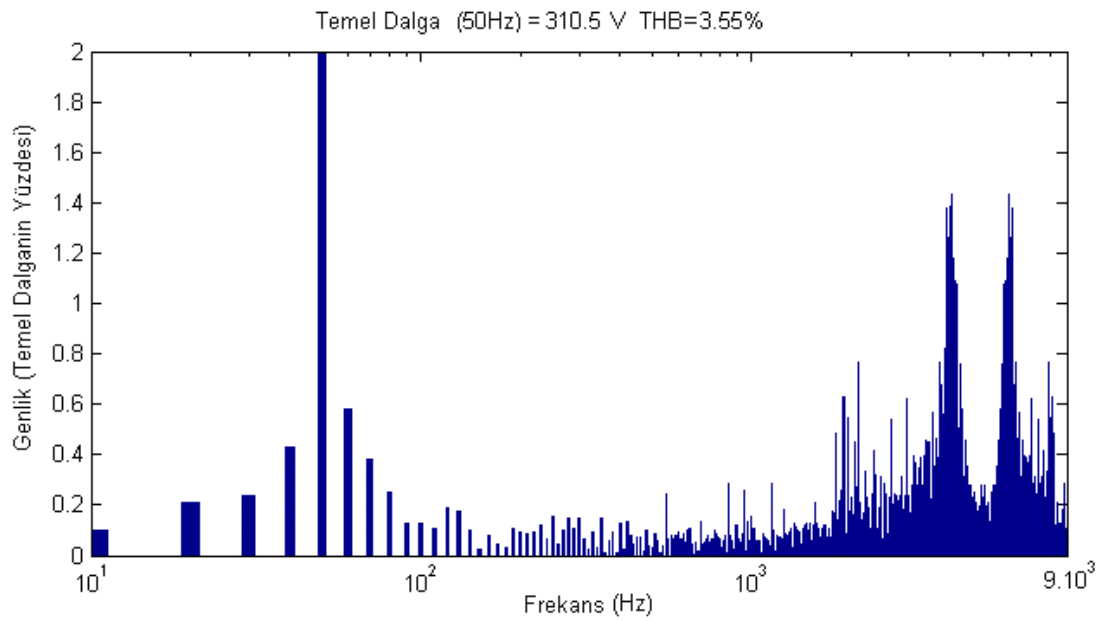


Şekil 5.45 $\alpha=45^\circ$ de Şebekeden Çekilen Akımın FFT' si

PAF kompanzasyon akımları üretilirken, şebekede genelde görülen sorun, IGBT elemanın, gerilimde yüksek frekanslı harmonikler oluşturmastır. Bunu önlemek için, anahtarlama filtresi kullanılır ve şebeke THB değeri %5 in altına çekilir.



Şekil 5.46 $\alpha=0^\circ$ de OKN Şebeke Geriliminin FFT' si



Şekil 5.47 $\alpha=45^\circ$ de OKN Şebeke Geriliminin FFT' si

5.4 Simülasyon Sonuçları

- Her iki simülasyon sonucunda da, IEEE' nin, şebekeden çekilen akımın harmonik bozuluma getirdiği sınır karşılanmıştır. Şebeke akımının, bant geçiren filtre ile kontrol edildiği durumda, şebekeden çekilen akımdaki THB değeri, DA Kondansatörünün lineer pi kontrolle kontrol edildiği yöntemden, daha düşük çıkarmıştır. Tablo 5.1' de bu durum gözlemlenmektedir.
- DA kondansatörünün lineer PI kontrolle kontrol edildiği yöntem, referans akım işaretlerini varsayımla üretmektedir. Bant geçiren filtre kontrollü PAF ise, referans akımı, yük akımından ürettiği için, daha doğru değer vermektedir. Şebeke akımın BGF kontrol devresi simülasyon çalışmasında, şebekeden çekilen akımın değeri ve şebekeden çekilen aktif güç, da kondansatörü lineer PI kontrollü yöneme göre düşmektedir. Şebekeden çekilen aktif gücün nedeni, anahtarlama filtresinde kaybedilen güçtür. DA Kondansatörü lineer pi kontrollü devrede, $\alpha=0^\circ$ ile tetiklenirken, anahtarlama filtresinde 30 kW aktif güç harcanırken, bu rakam şebeke akımı BGF kontrollü devrede 9 kW' a düşmektedir. Tablo 5.2' de, her iki durumda da şebekeden çekilen aktif güçler gözlemlenmektedir.
- Her iki yöntemde de, PAF' nin yüksek frekanslı darbeleri neticesinde, ortaya çıkan, şebeke gerilimi harmonikleri, pasif filtre yapısındaki anahtarlama filtresi ile önlenmiştir. Tablo 5.1' de bu durum gözlemlenmektedir.
- PI kontrol referans işaretindeki salınımlar THB değerini arttırmaktadır. Şebekeden çekilen akımın kompanzasyonu için Anahtarlama Filtresi kullanma zorunluluğu vardır. BGF kontrol yapısında, böyle bir durumla rastlanılmaz.

Tablo 5.1 Değişik Tetikleme Açılarında Şebeke Gerilimi THB' si ve Şebekeden Çekilen Akımın THB' si

	$\alpha=0^\circ$ THB _i	$\alpha=45^\circ$ THB _i	$\alpha=0^\circ$ THB _v	$\alpha=45^\circ$ THB _v
Lineer PI Kontrol	1.58	3.86	2.00	2.53
Bant Geciren Filtre ile Kontrol	1.62	2.28	3.20	3.55

Tablo 5.2 Değişik Tetikleme Açılarında Şebekeden Çekilen Akımın Etkin Değeri ve Şebekeden Çekilen Aktif Güç

	$\alpha=0^\circ$ I _{rms}	$\alpha=45^\circ$ I _{rms}	$\alpha=0^\circ$ P _s	$\alpha=45^\circ$ P _s
Lineer PI Kontrol	150 A	100 A	100 kw	65 kw
Bant Geciren Filtre ile Kontrol	134 A	95 A	86 kw	63 kw

6. SONUÇLAR

- Tez çalışmasında, elektrik güç sistemi kompanzasyon yöntemleri olan pasif ve aktif filtre yapıları ayrıntılarıyla incelenmiştir. Sanayide sıklıkla karşılaşılan kompanzasyon yöntemi olan pasif filtre kullanımının dezavantajları ve sistemde neden oldukları seri ve paralel rezonans problemleri açıklanmıştır. Aktif filtrelerin pasif filtrelere göre avantajları irdelenmiştir. Aktif filtrelerin, pasif filtreler gibi belirlenen değil var olan tüm harmonikleri yok ettiği gösterilerek, üstünlüğü vurgulanmıştır.
- Şebekeden çekilen akımın toplam harmonik bozulumunun, uluslararası standartlarca sınırlandırıldığı tablolar halinde gösterilmiştir. Tez çalışmasının simülasyon bölümünde, şebekeden çekilen akımın harmonik bozulumunun uluslararası standartların altına indirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla geliştirilen PAF, simülasyonlarda gerçekleştiği üzere, bu işlemi başarıyla yapmıştır. Tristöre seri bağlı R-L yükü, $\alpha=0^\circ$ ile tetiklenirken %17 olan THB değeri, tristör $\alpha=45^\circ$ ile tetiklenirken, %28 değerine çıkmıştır. Her iki PAF kontrol devresinde de, şebekeden çekilen akımın THB değeri %5 in altında elde edilmiştir.
- Geliştirilen PAF devresi, şebekeden reaktif güç çekilmesini engeller. Üretilen referans işaretleri, şebeke gerilimi ile aynı fazdadır. Bunu gerçeklemek amacıyla, FKD devreleri kullanılmıştır. Bu devreler girişindeki dalgaının fazıyla aynı fazda, ideal birim dalga şekilleri üretmektedirler. Dolayısıyla, referans akım işareti ve şebeke gerilimi arasında faz farkı bulunmaz. Bu özellik bize, harmonik kompanzasyonu yapılırken, reaktif güç kompanzasyonu yapılmasını da sağlar.

- PAF kullanımında, tristörün yüksek frekanslı anahtarlama yapmasından dolayı, gerilimde harmonikler meydana gelmektedir. DA kondansatörünün lineer pi kontrolle kontrol edildiği devre için, bu değer %8' in üzerine çıkmaktadır. Bunu önleyen Anahtarlama Filtresi devresi, şebeke geriliminin THB değerini de %5 in altına indirmiştir. Anahtarlama Filtresi burada, alçak geçiren bir filtre görevi görerek, yüksek frekanslı harmonikleri süzmüştür.
- Simülasyonda kullanılan PAF, GKAF' dir. Enerji depolama elemanı olarak kullanılan DA kondansatörü, simülasyon devresinde, kontrol devresinin yapısını oluşturmuştur. Pratik olarak düşünüldüğünde ise, DA kondansatörü, hem devrede ek güç kaynağı gereksinimini engelleyerek ekonomi sağlar hem de endüktansa kıyasla hacim olarak kapladığı alan azalır.
- Simülasyon devresinde, yüke, farklı tetikleme açıları uygulanmıştır. Yükün giderek zorlaştırıldığı bu durumda, PAF' nin yumuşak geçiş yapabilmesi için AA tarafında R-L devresi ilave edilmiştir. Bu devre sönümleme yaparak, yükün farklı durumlarına cevabını hızlandırmaktadır. Bu devredeki L_{ac} değerinin artması, THB değerinde düşüşe yardımcı olsa da, devre ekonomisi düşünüldüğünde, küçük bir değer kullanılması uygun bulunmuştur.
- Devre kontrol yapısında, çok az miktarda algılayıcıya yer verilmiştir. Bu, devrenin ekonomik yönden uygulanabilirliğini arttırmaktadır. Basit yapıdaki devre, ucuz bir maliyetle, verimli ve hızlı bir biçimde pratik olarak kullanılabilir. Lineer PI ile PAF kontrolü bu açıdan daha ucuz bir tasarım olanağı sağlamaktadır.
- Söz konusu kontrol devresi, hızlı cevap süresi ve basit kontrol yapısı düşünüldüğünde, MATLAB programının zengin özellikleri sayesinde, DSP kontrol kartlarına kolayca aktarılarak, pratik tasarımda kullanılabilir. Real-Time-Workshop ara yüzü, bu işlemi gerçeklemektedir. Söz konusu çalışma için literatürde birçok örnek bulunmaktadır [10,21].

KAYNAKLAR

A) Kitaplar

- [1] **Erickson, R.W.**, 2000. Fundamentals of Power Electronics, Kluwer Academic Publishers, Massachusetts.
- [2] **Mohan, N., Undeland, T.M. and Robbins, W.P.**, 1995 Power Electronics Converters, Applications and Design Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [3] **Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R.**, 2003. Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.

B) Tezler

- [4] **Bölat, V.**, 2003. Üç Fazlı AA Güç Dağıtım Sistemlerinin Enerji Kalite Problemlerinin Çözümünde Paralel Aktif Filtre Temelli Uygulamalar, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

C) Süreli Dergilerdeki Makaleler

- [5] **Akagi, H.**, 1996. New Trends in Active Filters for Improving Power Quality, *IEEE-PEDES Conf. Record*, p. 417-425.
- [6] **Bhattacharya, S., Divan, D.M. and Banerjee, B.**, 1995. Active Filter Solutions for Utility Interface, *IEEE International Symposium on Ind. Elec. ISIE '95. July 10-14*, pp. 53-63.
- [7] **Benchaita, L., Saadate, S. and Salem Nia, A.**, 1999. A comparison of voltage source and current source shunt active filter by simulation and experimentation, *IEEE Transactions on Power Systems, Volume: 14, Issue: 2*, p. 642-647.
- [8] **Smedley, K.M., Zhou, L. and Qiao, C.**, 2001. Unified Constant-Frequency Integration Control of Active Power Filters - Steady-State and Dynamics, *IEEE Transactions on Power Electronics, Volume: 16, No: 3*, p. 428-436.

- [9] **Morán, L., Godoy, P., Wallace, R. and Dixon, J.**, 1993. A New Current Control Strategy for Active Power Filters Using Three PWM Voltage Source Inverters, *IEEE PESC'93*, pp. 3-9.
- [10] **Rukonuzzaman, M., Uematsu, T., Nishida, K. and Nakaoka, M.**, 2003. Harmonic and Reactive Currents Estimation with Adaptive Neural Network and Their Compensation with DSP Control in Single-Phase Shunt Active Power Filter, *IEICE/IEEE INTELEC'03*, pp. 358-365.
- [11] **Bölat, V., Boğosyan, S. and Gökasan, M.**, 2003. Self-tuning Fuzzy Control of Parallel Active Filters, *INT ACEMP'04*.
- [12] **IEEE** Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, *ANSI/IEEE Std. 519-1992*.
- [13] **Akagi, H., Fujita, H. and Wada, K.**, 1999. A Shunt Active Filter Based on Voltage Detection for Harmonic Termination of a Radial Power Distribution Line, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Volume: 35, No: 3, pp. 638-645.
- [14] **Jacobs, J., Detjen, D. Karipidis, C.D. and De Doncker, R.W.**, 2004. Rapid Prototyping Tools for Power Electronic Systems: Demonstration with Shunt Active Power Filters, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Volume: 19, No: 2, pp. 500-507.
- [15] **Sato, Y., Kawase, T., Akiyama, M. and Kataoka, T.**, 2000. A Control Strategy for General-Purpose Active Filters Based on Voltage Detection, *IEEE Transaction on Industry Applications*, Volume: 36, No: 5, pp. 1405-1412.
- [16] **Singh, B., Al-Haddad, K. and Chandra, A.**, 1999. A Review of Active Filters for Power Quality Improvement, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume: 46, No: 5, pp. 960-971.
- [17] **Nastran, J., Cajhen, R., Seliger, M. and Jereb, P.**, 1994. Active Power Filter for Nonlinear AC Loads, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Volume: 9, No: 1, pp. 92-96.
- [18] **Kuo, H.H, Yeh, S.N. and Hwang, J.C.**, 2001. Novel Analytical Model for Design and Implementation of Three-Phase Active Power Filter Controller, *IEE Proc.-Electr. Power Appl.* Volume: 148, No: 4, pp. 369-383.
- [19] **Buso, S., Malesani, L. and Mattavelli, P.**, 1998. Comparison of Current Control Techniques for Active Filter Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume: 45, No: 5, pp. 722-729.

- [20] **Özdemir, E. And Kale, M.**, 2004. A Novel Adaptive Hysteresis Band Current Controller for Shunt Active Power Filter, *IEEE CCA 2003 Conf. On Control Application*, pp. 118-1123.
- [21] **Mariethoz, S. and Rufer, A.C.**, 2002. Open Loop and Closed Loop Spectral Frequency Active Filtering, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Volume: 17, No: 4, pp. 564-573.
- [22] **Tey, L.H. and So, P.L.**, 2002. DSP-Controlled Active Filters for System Harmonics Compensation, *PowerCon*, Volume: 1, pp. 453-458.
- [23] **Akagi, H.**, 1994. Trends in Active Power Line Conditioners, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Volume: 9, No: 3.
- [24] **Laskai, L., Enjeti, P. and Pitel, J.**, 1994. A Unity Power Factor Electronic Ballast for Metal Halide Lamps, *IEEE APEC'94*, pp. 31-37.
- [25] **Mathworks**, 1994-2005. Documentation for MathWorks Products, www.mathworks.com.

ÖZGEÇMİŞ

Murat SEZER, 29 Temmuz 1980 yılında Söke’ de doğdu. İlköğrenimini 1991’ de Söke Felekşan Fırat İlkokulu’ nda, ortaöğrenimini 1998’ de Söke Hilmi Fırat Anadolu Lisesi’ nde, yükseköğrenimini 2002’ de Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği’ nde tamamladı. 2002 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği anabilim dalı, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği programında yüksek lisans eğitimine başladı.