

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ KAMPÜSÜNÜN
ELEKTRİK ENERJİ KALİTESİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NEJDET SEZGİN

DANIŞMAN
PROF. DR. SABİR RÜSTEMLİ

EYLÜL 2024
BİTLİS

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ KAMPÜSÜNÜN
ELEKTRİK ENERJİ KALİTESİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NEJDET SEZGİN

ORCID: 0000-0002-9797-3284

DANIŞMAN
PROF. DR. SABİR RÜSTEMLİ

EYLÜL 2024

BİTLİS

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisiyim. Hazırlamış olduğum “Muş Alparslan Üniversitesi Kampüsünün Elektrik Enerji Kalitesinin İncelenmesi” başlıklı tezde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi; tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu; tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi; kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı; bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim. 02/09/2024

İmza

Nejdet SEZGİN

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
TEZ YAZIM KILAVUZU UYGUNLUK BEYANI

“Muş Alparslan Üniversitesi Kampüsünün Enerji Kalitesinin İncelenmesi” başlıklı yüksek lisans tezi Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak hazırlanmıştır. 02/09/2024

Tezi Hazırlayan

Nejdet SEZGİN

Danışman

Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ

Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Başkanı

Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY SAYFASI

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı öğrencisi Nejdet SEZGİN tarafından hazırlanan “Muş Alparslan Üniversitesi Kampüsünün Enerji Kalitesinin İncelenmesi” adlı Yüksek Lisans Tezi ile ilgili tez savunma sınavı, 02/09/2024 tarihinde yapılmış ve tezin oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmesine karar verilmiştir.

JÜRİ:

İMZA

Danışman: Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ
(Bitlis Eren Üniversitesi)

Üye: Ünvanı, Adı - Soyadı
(Üniversite Adı)

Üye: Ünvanı, Adı – Soyadı
(Üniversite Adı)

Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun tarih ve sayılı kararıyla jüri tarafından kabul edilmiş bu çalışmanın yüksek lisans tezi olarak kabulü onaylanmıştır.

.../.../2024

Doç. Dr. Mehmet Bakır ŞENGÜL
Enstitü Müdürü

T.C.
Bitlis Eren Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Muş Alparslan Üniversitesi Kampüsünün Elektrik Enerji Kalitesinin
İncelenmesi
Nejdet SEZGİN
Danışman : Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ
Eylül 2024

ÖZET

Bu tez çalışmasında Muş Alparslan Üniversitesi kampüsünde bulunan dağıtım trafoları güç kalitesi problemlerinden olan akım ve gerilim harmonikleri açısından incelenmiştir. Kampüste bulunan trafolarda enerji analizörü ile yapılan ölçümlerde akım ve gerilim harmonikleri kayıt altına alınmıştır. Ölçümler sonucunda elde edilen akım ve gerilim harmonikleri incelenmiştir.

Yapılan ölçümlerde akım harmoniklerinin standart limitlerin üzerinde olduğu gerilim harmoniklerinin ise standart limitlere uygun olduğu belirlenmiştir. Akım harmonik değerleri kullanılarak Matlab/Simulink ortamında üç fazlı nonlineer yük modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerin toplam harmonik bozulma (THD) oranları, enerji analizörü ile ölçülen değerlere oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Matlab/Simulink ortamında akım harmoniklerini elimine edecek paralel aktif güç filtresi tasarlanmış ve her bir trafo için paralel aktif güç filtresinin performansı incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Harmonik, Enerji kalitesi, Aktif paralel güç filtresi

Republic of Türkiye
Bitlis Eren University Graduate School
Department of Electrical and Electronic Engineering
Investigation Of Electrical Energy Quality Of Muş Alparslan University
Campus
Master's Thesis
Nejdet SEZGİN
Supervisor: Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ
September 2024
ABSTRACT

In this thesis, the distribution transformers on the Muş Alparslan University campus have been examined for power quality issues related to current and voltage harmonics. Measurements of current and voltage harmonics were recorded using an energy analyzer at the transformers on the campus. The obtained current and voltage harmonics were analyzed.

The measurements revealed that the current harmonics were above the standard limits, while the voltage harmonics were within the standard limits. Using the current harmonic values, three-phase nonlinear load models were created in the Matlab/Simulink environment. The total harmonic distortion (THD) ratios of these models were found to be quite close to the values measured by the energy analyzer. A parallel active power filter designed to eliminate current harmonics was developed in Matlab/Simulink, and the performance of the parallel active power filter was evaluated for each transformer.

Keywords: Harmonics, Energy quality, Active parallel power filter

ÖNSÖZ

Tez çalışması sırasında her türlü bilgi, teşvik ve deneyimleri ile yardımlarını esirgemeyen, her zaman bana yol gösteren danışmam hocam sayın Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ'ye, çalışmalarımda bana yardımcı olan Öğr. Gör. Dr. Bilal COŞKUN'a ve çalışmalarım süresince her türlü maddi ve manevi destekleri ile göstermiş oldukları sabırdan dolayı aileme teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	I
ABSTRACT.....	II
ÖNSÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VI
KISALTMALAR	VIII
SİMGELER.....	IX
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	6
2.1. Enerji Kalitesi.....	6
2.2. Harmonikler İle İlgili Tanımlar	7
2.2.1. Toplam Harmonik Bozulma (THD)	8
2.2.2. Toplam Talep Distorsiyon (TTD)	9
2.2.3. Şekil Faktörü	9
2.2.4. Tepe Faktörü	10
2.2.5. Distorsiyon Güç Faktörü	10
2.3. Harmonik Standartları	10
2.4. Harmoniklerin Filtrenmesi.....	12
2.4.1. Pasif Güç Filtreleri.....	12
2.4.2. Aktif Güç Filtreleri	14
2.5. Paralel Aktif Güç Filtresi	16
2.5.1. Anlık Güç Teorisi.....	17
3. MATERYAL VE METOT	19
3.1. Harmoniklerin Ölçülmesi.....	19
3.2. Paralel Aktif Güç Filtresi Tasarımı	23
3.2.1. Histeresiz PWM Modeli	25
3.2.2. Nonlinear Yük Modeli Tasarımı.....	26
3.2.3. Gerilim Kaynaklı Evirici Modeli	28
3.2.4. PI Kontrolör	28
3.2.5. Komple PAGF Modeli	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	30
4.1. Trafo 1 (Ana Giriş Trafosu) AGF Uygulaması.....	30
4.2. Trafo 2 PAGF Uygulaması	32
4.3. Trafo 3 PAGF Uygulaması	35
4.4. Trafo 4 PAGF Uygulaması	37
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	40
KAYNAKLAR	41
ÖZGEÇMİŞ	44

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. IEEE Gerilim harmonik sınır değerleri	11
Çizelge 2.2. IEEE Akım harmonik sınır değerleri	11
Çizelge 2.3. Pasif ve aktif filtrelerin karşılaştırılması	15
Çizelge 4.1. Trafo 1 akım değerleri	30
Çizelge 4.2. Trafo 1 akım değerleri	32
Çizelge 4.3. Trafo 3 akım değerleri	35
Çizelge 4.4. Trafo 4 akım değerleri	37



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Muş Alparslan Üniversitesi orta gerilim enerji dağıtım alt yapısı ve trafo güçleri	6
Şekil 2.2. Farklı frekans ve genlikteki harmonikler ve toplam harmonik	8
Şekil 2.3. Seri pasif güç filtresinin tek hat şeması	13
Şekil 2.4. Paralel pasif güç filtresinin tek hat şeması	14
Şekil 2.5. Seri aktif güç filtresinin tek hat şeması	15
Şekil 2.6. Paralel aktif güç filtresinin tek hat şeması	16
Şekil 3.1. Trafo modüler hücreleri AG panosu harmonik ölçümleri	20
Şekil 3.2. Chauvin Arnoux CA: 8331 enerji analizörü	21
Şekil 3.3. Trafo 1 THD grafiği	21
Şekil 3.4. Trafo 2 THD grafiği	22
Şekil 3.5. Trafo 3 THD grafiği	22
Şekil 3.6. Trafo 4 THD grafiği	23
Şekil 3.7. Üç fazlı akımların Clark dönüşümü	24
Şekil 3.8. Üç fazlı gerilimlerin Clark dönüşümü	24
Şekil 3.9. Anlık p ve q güçleri hesaplama Matlab/Simulink modeli	25
Şekil 3.10 PAGF'nin referans akım hesaplama Matlab/Simulink modeli	25
Şekil 3.11. Histeresiz akım kontrol modeli	26
Şekil 3.12. Akım kaynakları ile oluşturulan nonlinear yük modeli	27
Şekil 3.13. Üç fazlı nonlinear yük modeli	27
Şekil 3.14. IGBT tabanlı üç fazlı gerilim kaynaklı evirici modeli	28
Şekil 3.15. DA hat kondansatörü PI kontrolörü	29
Şekil 3.16. Paralel aktif güç filtresi komple modeli	29
Şekil 4.1. Trafo 1 yük akımı, filtre akımı, şebeke akımı	31
Şekil 4.2. Trafo 1 FFT oranları	31
Şekil 4.3. Trafo 1 PAGF devrede iken FFT grafiği	32
Şekil 4.4. Trafo 2 yük akımı, filtre akımı ve şebeke akımı benzetim grafiği	33
Şekil 4.5. Trafo 2 FFT oranları	34
Şekil 4.6. Trafo 2 PAGF devrede iken FFT grafiği	34
Şekil 4.7. Trafo 3 yük akımı, filtre akımı ve şebeke akımı benzetim grafiği	35
Şekil 4.8. Trafo 3 FFT grafiği	36
Şekil 4.9. Trafo 3 PAGF devrede iken FFT grafiği	37
Şekil 4.10. Trafo 4 yük akımı, filtre akımı ve şebeke akımı benzetim grafiği	38

Şekil 4.11. Trafo 4 FFT grafiği	39
Şekil 4.12. Trafo 4 PAGF devrede iken FFT grafiği.....	39



KISALTMALAR

AA	: Alternatif Akım
AG	: Alçak Gerilim
PAGF	: Paralel Aktif Güç Filtresi
AGT	: Anlık Güç Teorisi
DA	: Doğru Akım
PWM	: Dalga Genişlik modülasyonu
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
IEEE	: Institute of Electrical And Electronics Engineers
IGBT	: Isolated Gate Bipolar Transistor
PI	: Oransal+İntegral Kontrolör

SİMGELER

I_1 : Temel Harmonik Akımı

I_L : Yük Akımı

I_n : n. Harmonik Akımı

k_f : Şekil Faktörü

p : Gerçek Anlık Güç

q : Sanal Anlık Güç

R : Direnç

V_1 : Temel Harmonik Gerilimi

V_n : n. Harmonik Gerilimi

1. GİRİŞ

Günümüzde elektrik enerjine olan ihtiyaç artarak devam etmektedir. Bununla birlikte fosil yakıt kaynaklarının tükenmeye başlaması enerji üretim maliyetlerinin artması elektrik enerjisinin verimli kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda enerji kalitesi enerjinin verimli kullanımı açısından kritik öneme sahiptir. Elektrik enerjisi sanayide, kamu kurumlarında, konutlarda ve iş yerlerinde ısı, ışık ve mekanik enerjiye dönüştürülerek kullanılır. Bu dönüşümün kaliteli olarak yapılması enerjinin verimli kullanılmasına da sağlar. Enerji verimliliği üretimden tüketimine kadar bütün kademelerde dikkate alınmalı, kayıplar azaltılmalı, üretimde yeni yöntemler kullanılarak kalite ve performansın artırılması sağlanmalıdır [1]. Genel olarak ülkelerin gelişmişlik oranları sanayileşme, enerji tüketimleri ve enerjiyi verimli kullanmaları ile doğrudan orantılıdır.

Elektrik enerjisinde verimlilik, kullanılan enerjinin güç kalitesiyle doğrudan bağlantılıdır. Güç kalitesi, birçok parametreye bağlıdır ve bu parametreler genellikle gerilim ve frekans kararlılığı, kırpma (flicker) miktarı, güç faktörü ve güç sistemindeki harmoniklerle ilişkili olaylar olarak tanımlanabilir[2], [3].

Kaynak frekans ve geriliminde meydana gelen değişiklikler, gerilimin dalga şeklini bozan geçici olaylar, harmonik, zayıf bağlantı noktalarında oluşan ark hataları enerji sisteminde bozucu etkiler olarak söylenebilir. Kırpmalar (flicker) ve harmonikler bozucu etkilerin başında gelmektedir. Harmonikler gerilim ve akım dalga şekillerini bozmanın yanında transformatör, motor ve iletkenlerin aşırı ısınmasına neden olabilirler. Ayrıca kablo ve kondansatör gibi dielektrik malzemelerde bozulma, yüksek enerji kayıpları, verimliliğin azalması, malzemenin ekonomik kullanım ömrünün azalması gibi nedenlere sebep olur. İletim hatlarındaki kayıpların gereğinden fazla artması, elektronik tabanlı koruma ve kontrol sistemlerinin hatalı çalışmasına, enerji hatlarına yakın geçen zayıf akım hatlarının elektromanyetik açıdan etkilemesine, elektrikli makinaların fazla ısınmasına, yüksek ses çıkarmaları ve mekanik salınımlara neden olabilmektedir [2]. Bahsedilen nedenlerden dolayı, güç kalitesi sorunları hem elektrik güç sistemleri hem de ulusal ekonomisi için dezavantaj oluşturmaktadır [1]. Güç sistemlerindeki enerji kalitesi problemlerini belirlemek ve gerekli önlemleri almak, yoğun bir araştırma alanı haline gelmiştir.

Güç kalitesi parametreleri yönetmelik ile incelenmektedir. Özellikle elektrik dağıtım şirketlerinin özelleştirilmesi ve 2008 yılında son hali çıkarılan “Elektrik Piyasasında Dağıtım ve Perakende Satış Faaliyetlerine İlişkin Kalite Yönetmeliği” [4] Öncelikle sanayi ve ticari müşteriler olmak üzere tüm elektrik enerjisi tüketicilerinin haklarının korunmasına yönelik tedbirlerin artmasına neden olmuştur [4].

Rüstemli ve arkadaşları (2013), yaptıkları çalışmada, Van et kombinası tesisinde üç fazlı güç analizörü ile çeşitli ölçümler yaparak güç kalitesinde oluşan bozuklukları kayıt altına almışlardır. Güç kalitesindeki bozulmalara neden olan baskın harmonikleri incelemiş ve harmoniklerin tesis üzerindeki etkilerini yorumlayarak tesisdeki harmonikleri aktif filtre simülasyonu ile düzeltmeye çalışılmışlardır. Paralel aktif güç filtresi tasarımından sonra sistemdeki harmonikler standart limitlerin altındaki değerlere çekilmiş, akım ve gerilim dalga formlarının ideal sinüs formuna yaklaştığı belirlenmiştir. Ayrıca faz kaymalarının olmadığı ve genlik değerlerinin korunduğu tespit edilmiştir. Paralel aktif güç filtresi yöntemi ile güç kalitesi iyileştirmesi yönteminin pasif güç fitresi gibi yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiği vurgulanmıştır [5].

Rüstemli ve arkadaşları (2015), yaptıkları diğer bir çalışmada, Van Erciş şeker fabrikasında güç analizörü ile çeşitli ölçümler yapmış, yapılan ölçümlerde akım harmonik değerleri standart limitlerin üstünde kalırken gerilim değerleri standart limitlerin altında kaldığını ve 5. harmoniğin etkin olduğunu belirlemişlerdir. Harmoniklerin sistem üzerindeki etkilerini pasif güç filtresi yöntemlerini benzetim çalışmaları ile karşılaştırarak, Matlab programı ile tek ayarlı (bant geçiren) filtre uygulaması yaparak sistemin bu durumdaki performansı incelenmiştir. Tek ayarlı filtre uygulamasından sonra akım için Toplam harmonik bozulma (THD_I) değerleri tolerans değerlerin altına düşerken, gerilim için THD_V değerleri tolerans değerlerinin altında olmasına rağmen daha da düşürülmüştür. Akım ve gerilimdeki THD değerleri kabul edilebilir bir seviyeye düşürülmüştür [6].

Cengiz (2015), bir bölgenin elektrik dağıtım şebekesini incelemiş harmoniklerin şebeke üstündeki etkilerini analiz ederek filtreme yöntemlerinden aktif güç ve pasif güç filtresi yöntemlerini benzetim ortamında karşılaştırmıştır. Elektrik dağıtım şebekesinin aktif güç filtreme yöntemi uygulandığında harmonik sınırların altında THD oranlarına ulaşılmış. Pasif güç filtresi yöntemi ise harmonik değerleri istenilen THD oranlarına getirememiştir [7].

Tabak (2004), yaptığı çalışmada enerji kalitesi sorunları, çözüm önerileri ve uygulanan standartlar üzerine çalışmıştır. Yapılan çalışma ile ulusal ve uluslararası enerji kalitesi standartları araştırılmış ve bu standartların sistemlerin tamamına uygulanması durumunda güç sistemlerindeki enerji kalitesi sorunlarını minimum seviyeye düşürüleceğini öngörmüştür [8].

Aslan (2023), yaptığı çalışmada eğitim binasını enerji kalitesi açısından incelemiştir. Yaptığı ölçümlerde sistemdeki yük dağılımlarının dengeli yapılmadığını belirlemiştir. Bu yük dengesizliğinden kaynaklı kompanzasyon sisteminde reaktif güç oranlarında sorunların meydana geldiğini tespit etmiştir. Sistemde bulunan yükler fazlara eşit dağıtıldıktan sonra pasif güç filtresi uygulanmış ve sistem istenilen standartlara getirilmiştir [9].

Bayrak (2004), yaptığı çalışmada elektrik güç sistemlerinde oluşan kısa devre, ani yük değişimlerinin şebeke gerilimine yaptığı etki, açma-kapama olayları ve güç elektroniği devrelerinin şebeke akım ve geriliminde meydana getirdiği bozuklukları bilgisayar yardımı ile analiz etmiştir. Analizler sonucunda şebekedeki diğer tüketicilere olan etkisini incelemiştir. Bu bozucu etkilerin enerji kalitesi standartların da olup olmadığı belirlenmiş ve etkilerin azaltılması için çözüm önerileri sunmuştur [10].

Şahin ve ark (2014), enerji sistemindeki harmoniklerin enerji kalitesi üzerindeki olumsuz etkilerinin tespiti yapılmış. Harmoniklerin etkisinin sistemde yol açtığı zararları aza indirmek için harmonik üreten cihazların tasarım sürecinde harmonik üretmeyecek ve sisteme harmonik vermeyecek şekilde filtreli imal edilmesi gerekir. Sistemdeki cihazlar yenilenemiyorsa sisteme uygun filtreme yöntemi uygulanmalıdır [11].

Sarı (2017), bir üniversite yerleşkesine ait trafoların AG panolarında ölçümler yapmıştır. Elde edilen akım, gerilim ve harmonik değerlerin analizi yaparak harmonik oranları yüksek olan trafoları belirlemiştir. Harmonik oranlarının düşürülmesi için sisteme pasif harmonik filtre uygulanması öngörmüştür [12].

Rüstemli ve arkadaşları (2022), bu çalışmada güç kalitesini etkileyen parametrelerden biri olan nonlinear özellikli elemanların oluşturduğu harmonik ve ara harmoniklerin güç kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Matlab/Simulink programı yardımı ile değişik nonlinear yüklerle karşı seri aktif filtre modeli

tasarlanmıştır. Filtre kullanıldıktan sonra endüktif yüklü nonlineer sistemin gerilimdeki THD_v değerinin %91,08 oranında azaldığı tespit edilmiş. Kapasitif yüklü sisteme uygulandığında ise THD_v değerinin %91,34 oranında azaldığı tespit edilmiştir [13].

Efe ve Kocaman (2018), bu çalışmada nominal güç kapasitesi 50 kW'dan küçük olan yatay eksenli bir rüzgar türbininin çıkış gerilim dalga şekilleri incelenmiş çeşitli frekanslar için seviyeler belirlenmiştir. Elde edilen bu verilerden çeşitli frekanslar için harmonik bozulma seviyeleri tespit edilmiştir. Sonuç olarak kaliteli enerji üretimi için olası çözümler sunulmuştur [14].

Efe (2016), yaptığı çalışmada aktif güç filtesinin 6 ve 12 darbeli güç elektroniği çeviricilerinin üzerindeki etkilerini incelemiştir. Tasarlanan filtre ile gerilimdeki THD_v %38 seviyesinden %3.7'ye düşürülmüştür. Akımdaki THD_i %124 seviyesinden %3.7'ye düşürülmüştür [15].

Rüstemli ve arkadaşları (2023), Giresun Üniversitesi Güre kampüsünde doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanan harmoniklerin güç kalitesi üzerine etkileri incelenmiş ve bu harmoniklerin filtrelenmesi için seri aktif güç filtesi (SAGF) kullanmışlardır. SAGF kampüste bulunan trafolarla uygulanmıştır. SAGF uygulaması ile yüksek olan akım harmonikleri THD_i oranı IEEE standartlarına getirilmiştir [16]

Rüstemli ve Cengiz (2015), Van ilinde çeşitli tesislerde ZERA MT 310 güç analizörü ile yapılan ölçümlerde bazı güç kayıplarını tespit etmiştir. Bu güç kayıplarına sebep olan harmonikler inceleyerek benzetim ortamında paralel aktif güç filtesi kullanılarak güç kayıplarının ve voltaj düşüşlerinin engellenebileceğini göstermişlerdir [17].

Rüstemli ve Tekev (2021), güç sistemindeki harmoniklerin ve harmonik etkilerin görülebilmesi için Matlab/Simulink programını kullanarak harmonikleri simüle etmiştir. Devamında seri aktif güç filtresinin farklı nonlineer yüklere performansı değerlendirilmiştir. Performans değerlendirmesi için FFT analizi yapılmıştır [18].

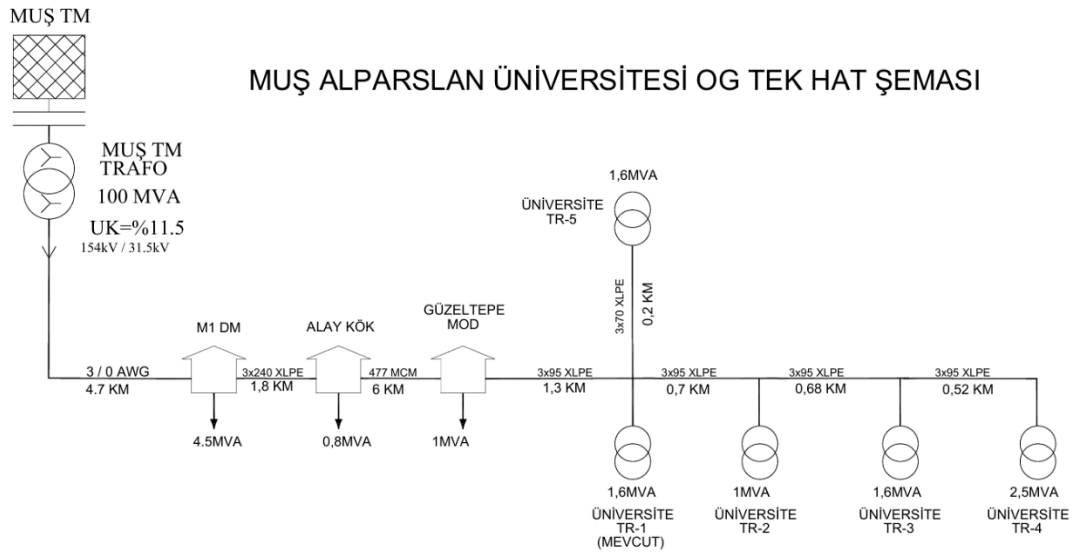
Bu çalışmada Muş Alparslan Üniversitesi Kampüsünün enerji kalitesi harmonikler açısından incelenmiştir. Kampüs alanında bulunan trafolarla ait alçak gerilim "ölçümlerden toplam harmonik bozulma, gerilim dalgalanmaları, fazlardaki akım dengesizliği gibi veriler incelenmiştir. Yapılan ölçümlerde gerilim harmoniklerinin

standartlara uygun olduğu, genel olarak akım harmoniklerinin olduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda akım harmoniklerinin bilgisayar ortamında benzetimleri yapılmış ve bu akım harmoniklerini minimize edecek paralel aktif güç filtresi (PAGF) tasarlanarak akım harmonikleri büyük oranda elimine edilmiştir.



2. GENEL BİLGİLER

Muş Alparslan Üniversitesi 2007 yılında kurulmuş ve 2024 yılı itibariyle 10 fakülte, 6 meslek yüksekokulu 2 enstitü ile faaliyetlerine devam etmektedir. Muş Alparslan Üniversitesi kampüsü Güzeltepe mahallesinde bulunup yaklaşık yüz ölçümü 130000 m² olup 193865 m² kapalı alana sahiptir. Kampüs enerjisi şehir merkezinden itibaren 477 MCM 34.5 kV enerji hattı ile sağlanmaktadır. Şehir merkezinden gelen 477 MCM hat Güzeltepe modüler hücrelerine girdikten sonra kampüste bulunan ilk trafoya 95 mm² XLPE hat ile bağlanmaktadır. Kampüs içinde toplam beş adet trafo modüler hücreleri bulunmaktadır. Trafolar arası bağlantı galeri içinde tesis edilmiş XLPE kablolarla sağlanmaktadır. Şekil 2.1’de kampüs orta gerilim enerji dağıtım alt yapısı ve trafo güçleri verilmiştir.



Şekil 2.1 Muş Alparslan Üniversitesi orta gerilim enerji dağıtım alt yapısı ve trafo güçleri

2.1. Enerji Kalitesi

Enerji (Güç) kalitesi; elektrik enerjisinin sürekli olması, frekansın belli sınırlar içinde olmasını, gerilim dalgalanmalarının belirli limitler içinde olması, kırpışma olmaması, akım ve gerilim dalga formlarının sinüs formuna olabildiğince yakın olmasını, güç katsayısının 1'e yakın olması gibi kavramları kapsamaktadır. Enerji kalitesini belirleyen önemli parametrelerden biride güç sisteminde akım ve gerilim

dalga formlarının sinüse hangi oranda benzediği yani güç sistemindeki baskın harmoniklerin miktarıdır [10], [19]–[21] .

Günümüzde güç elektroniği tabanlı cihazların kullanımının artması ile güç sistemindeki harmonikler artmış ve bu harmoniklerin tespit edilmesi ve filtrelenmesi önemli bir çalışma alanı olmuştur. Harmonikler güç sisteminde ek kayıplara neden olmaktadır. Ayrıca harmonikler koruma sistemlerinde hatalı açmalara, elektrik makinalarında ve hatlarda ısı artışı ve dielektrik malzemelerde verim kaybı ve bozulmalara sebep olabilmektedir [22], [23]. Dağıtım şebekelerinde güç kalitesi limitleri EN50160 standardı olarak bilinen ülkemizde de EN50160 standardı referans alınarak EPDK tarafından hazırlanan “Elektrik Dağıtım ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliğinde” yer almaktadır [24].

2.2. Harmonikler İle İlgili Tanımlar

Bir güç sisteminde akım ve gerilim dalga şekillerinin ideal olarak sinüs olması istenmektedir. Fakat pratik uygulamalarda güç sisteminde bulunan lineer olmayan yüklerden kaynaklı akım ve gerilimin dalga formu ideal sinüs değildir. Akım ve gerilimdeki ideal olmayan bu bileşke dalgalar harmonik olarak tanımlanmaktadır. Harmonikler matematiksel olarak fourier serisi yardımıyla ifade edilmektedir. Fourier dönüşümünde sinüzoidal olmayan sinyaller farklı genlikte ve frekansta sinyallerin toplamı olarak yazılırlar [25], [26]. Denklem 2.1 ve Denklem 2.2’de periyodik bir dalganın fourier serisi açılımı verilmiştir.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) \quad (2.1)$$

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + b_2 \sin(2\omega t) + a_3 \cos(3\omega t) + b_3 \sin(3\omega t) + \dots \quad (2.2)$$

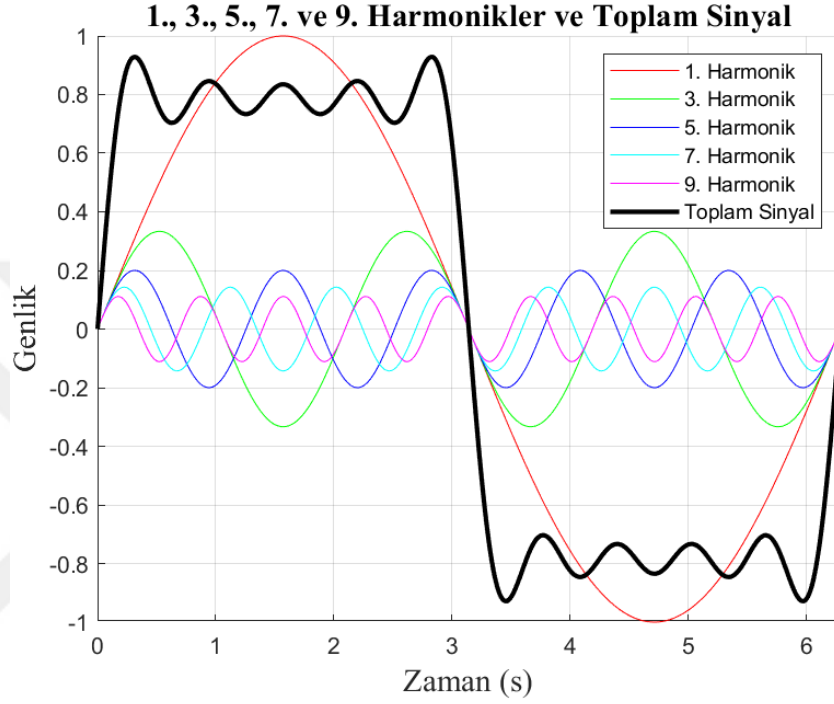
Bu denklemlerde a_0, a_n, b_n katsayılarıdır, açısal hız ω ise $2\pi/T$ ’dir. Katsayılar Denklem 2.3, Denklem 2.4 ve Denklem 2.5’teki gibi hesaplanmaktadır.

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

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt \quad (2.4)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt \quad (2.5)$$

Farklı frekans ve genlikteki harmonikler ve toplam harmonik şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Farklı frekans ve genlikteki harmonikler ve toplam harmonik

2.2.1. Toplam Harmonik Bozulma (THD)

THD, harmonikli bileşenin ideal dalga formundan ne kadar saptığının yüzdelik olarak ifade edilmesi olarak tanımlanabilir. Temel frekansta toplam harmonik distorsiyonu sıfır olmaktadır. Toplam harmonik distorsiyon bir dalga formunun harmonik bileşenlerinin karekök ortalamasının temel bileşene bölünmesi ile bulunur. Toplam harmonik distorsiyon gerilimi aşağıdaki Denklem 2.6’daki gibi hesaplanmaktadır. Denklem 2.6’da THD toplam harmonik bozulma olarak ifade edilmektedir ve Akım ve gerilimdeki toplam harmonik bozulma şeklinde ifade edilmektedir. V_n n. dereceden gerilim harmoniği V_1 temel frekanstaki gerilimdir.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (2.6)$$

Toplam harmonik distorsiyon akımı Denklem 2.7 ile hesaplanmaktadır. Burada THD_I akımdaki toplam harmonik bozulma, I_n n. dereceden akım harmoniği, I_1 temel frekanstaki akım olarak tanımlanmaktadır.

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.7)$$

2.2.2. Toplam Talep Distorsiyon (TTD)

Toplam talep distorsiyonu (TTD) yük tarafından istenilen maksimum akımların ortalamasına denilmektedir. TTD yük ile ilgili bir değişken olup Denklem 2.9'a göre hesaplanabilir.

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (2.9)$$

2.2.3. Şekil Faktörü

Şekil faktörü, bir sinyalin dalga şeklinin belirli bir özelliğini ifade eden bir parametredir. Güç sistemlerinde, şekil faktörü genellikle bir akım veya gerilim sinyalinin etkin efektif değerinin, ortalama değerine oranı olarak tanımlanmaktadır. Denklem 2.10'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$k_f = \frac{\text{Efektif Değer}}{\text{Ortalama Değer}} \quad (2.10)$$

2.2.4. Tepe Faktörü

Tepe faktörü, harmonikli sinyalinin tepe değeri ile temel bileşenin etkin değeri arasında orandır. Daha açık ifade edilirse ideal bir sinüs dalgası formunda olmayan akım ya da gerilim için Denklem 2.11'deki gibi tepe değerin temel bileşenin efektif değerine bölünerek tepe faktörü değeri hesaplanır.

$$\text{Tepe Faktörü} = \frac{\text{Tepe Değer}}{\text{Temel Bileşenin Efektif Değeri}} \quad (2.11)$$

2.2.5. Distorsiyon Güç Faktörü

Yüksek akım distorsiyonunu oluşturan bir fazlı doğrusal olmayan yükler güç faktörünün hesaplanmasına gerek duymaktadır. Bu yükler rezonans oluşumuna sebebiyet verdiği için güç faktörü hesaplaması ve güç faktörü düzeltici elemanları kullanılmalıdır [32]. Gerilim için aşağıdaki Denklem 2.12 kullanılır.

$$V = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THDV}{100}\right)^2} \quad (2.12)$$

Akım için aşağıdaki Denklem 2.13 kullanılır;

$$I = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THDI}{100}\right)^2} \quad (2.13)$$

Yukarıdaki denklemde P aktif güç değeri yerine yazılır ve böylece güç faktörü hesaplanabilir. Distorsiyon güç faktörünü en yüksek seviyelere çıkarmak için ve doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonikleri gidermek için aktif ve pasif filtrelerden yararlanılır [33].

2.3. Harmonik Standartları

EN 50006 ve IEEE-519-1992 standartları elektrik güç kalitesinin artırılması için akım ve gerilim harmonikleri ile ilgili standartları tanımlamaktadır. Toplam

harmonik bozulma (THD) gerilim ve akım dalgalarındaki bozulmayı ifade eder. THD, harmoniklerin efektif değerlerinin toplamının temel bileşenin efektif değerine oranı ile bulunur. Denklem (2.6) ve denklem (2.7) deki gibi hesaplanan akımın ve gerilimin THD standart değerleri Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 IEEE Gerilim harmonik sınır değerleri

Bara Gerilimi (V _n)	Tekil Harmonik Büyüklüğü (%)	THD V _n
V_n <69 kV	3	5
69 < V_n < 161 kV	1.5	2.5
V_n > 161 kV	1	1.5

Çizelge 2.2 IEEE Akım harmonik sınır değerleri

V _n ≤ 69 kV						
I _k /I _L	n < 1 1	11 ≤ n < 17 7	17 ≤ n < 23	23 ≤ n < 35	n ≥ 35 5	TTD (%)
<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 kV < V _n ≤ 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
V _n > 161 kV						
<50	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
≥50	3	1.5	1.15	0.5	0.22	4

2.4. Harmoniklerin Filtrelenmesi

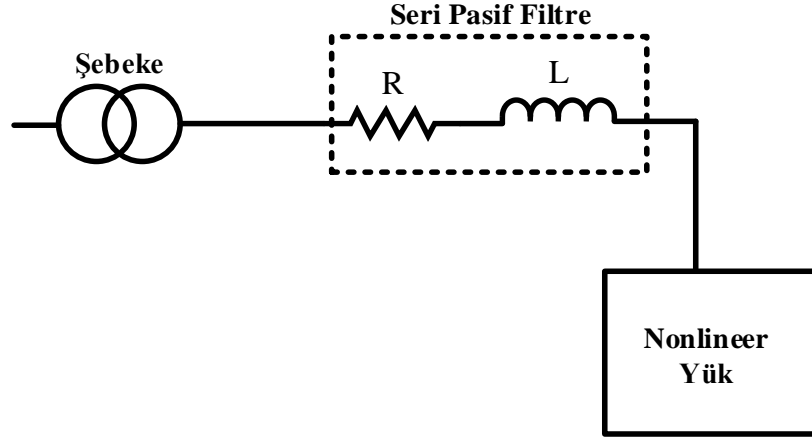
Harmonik kaynakları yani harmonik üreten cihazlar (transformatörler, doğrultucular, ark fırınları, aydınlatma elemanları vb. ürünler) imal edilirken çok az harmonik üretecek şekilde ya da hiç üretmeyecek şekilde tasarlanması gerekmektedir. Fakat bu durum pratik uygulamalarda çok mümkün olmayabilir. Akım ve gerilim harmonikleri minimize etmek ve şebekeyi harmoniklerden en az etkilenecek şekilde tasarlamak için güç sistemine eklenen ekipmanlara “harmonik filtresi” denilmektedir. Bu devreler istenen harmoniklerin süzülmesi veya bastırılması amacıyla kullanılmaktadır. Harmonik filtreler bir ya da daha fazla frekanstaki gerilim ya da akım harmoniklerinin seviyesini düşürmek veya yok etmek amacıyla kullanılmaktadır [22], [23], [27], [28]. Güç sistemlerinde harmonikleri minimize etmek için iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler harmonik ortaya çıktıktan sonra filtreleme yöntemi veya harmonikleri bastırma yöntemi olarak bilinmektedir. Harmonik filtreler direnç, endüktans ve kapasitans gibi devre elemanlarından oluşan “Pasif filtreler”; denetimli gerilim veya akım kaynağı bulunan “Aktif filtrelerdir [29].

2.4.1. Pasif Güç Filtreleri

Pasif güç filtreleri, pasif devre elemanları olarak bilinen direnç kondansatör ve bobinden oluşabilen kaynak ile alıcı arasına yerleştirilen ve istenen frekans genel olarak şebeke frekansı dışındaki daha yüksek frekanstaki akım veya gerilim bileşenlerini yok eden ekipmanlardır. İki çeşit pasif güç filtresi bulunmaktadır. Bunlar seri ve paralel pasif güç filtresi diye adlandırılmaktadır [30], [31]–[33].

Seri Pasif Güç Filtresi

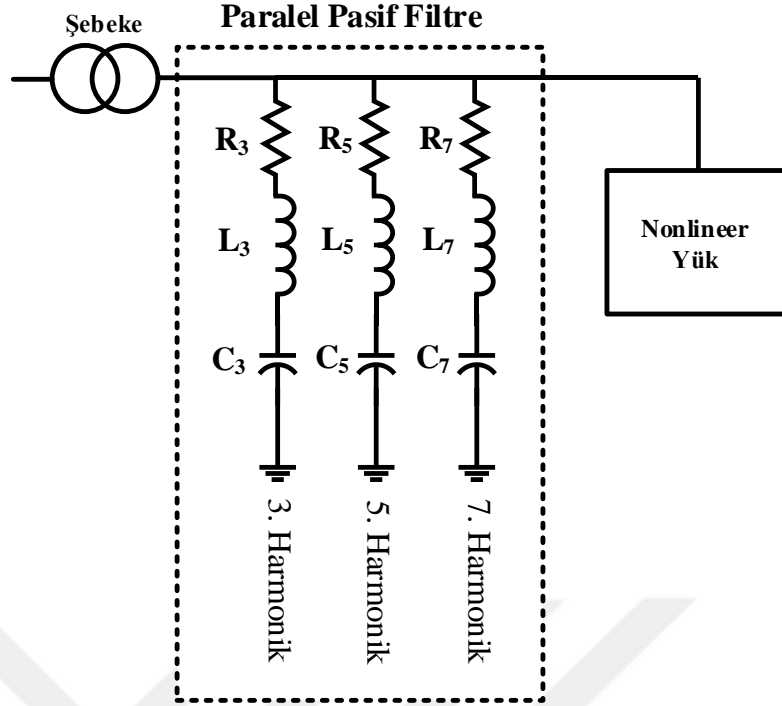
Şebeke ile harmoniğe neden olan nonlineer yük arasına seri şekilde bağlanan endüktans (L) elemanından oluşmaktadır. İstenmeyen harmonik akımlarını engellemek için yüksek bir seri empedans kullanımı ile sistemde harmonik akımların akmasını engellemek amacıyla kullanılır. Seri filtreler yük akımının tamamını taşımak zorundadırlar ve bu yüzden yüksek gerilim hatlarında gerilim bozulmaları ve harmonik gerilim düşümüne neden olurlar [30]–[32]. Şekil 2.3'te seri pasif güç filtrenin tek hat şeması verilmiştir.



Şekil 2.3. Seri pasif güç filtresinin tek hat şeması

Paralel Pasif Güç Filtresi

Paralel pasif güç filtreleri harmonik kaynağı ile şebeke arasına paralel olarak bağlanır. Paralel pasif güç filtreleri genel olarak, düşük bir paralel empedans yolu oluştururlar. Böylece filtrelenmesi istenen frekantaki harmonik akımlarını filtre üzerinden geçerek sönmülenmesi gerçekleştirilir. Bu filtreler harmonik akımlarına çok düşük empedans gösterecek şekilde tasarlanırlar. Paralel pasif güç filtreleri ana frekansta reaktif güç oluşturdukları için güç katsayısının düzeltilmesinde de kullanılırlar. Tasarımları kolay olması ve üretim maliyetinin düşük olması sebebi ile kullanımda tercih edilirler. Paralel pasif güç filtresinin olumsuz yanı ise güç sistemi ile rezonansa girmesidir. Şekil 2.4'te paralel pasif güç filtresinin tek hat şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Paralel pasif güç filtresinin tek hat şeması

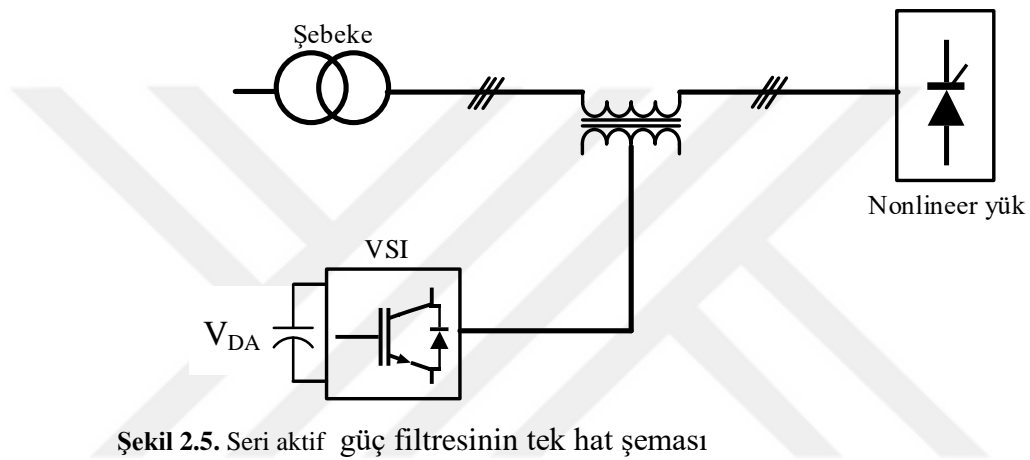
2.4.2. Aktif Güç Filtreleri

Aktif güç filtreleri, nonlinear özellikteki alıcının çektiği nonlinear akımı veya gerilim harmoniklerini elimine etmek için kullanılmaktadır. Aktif güç filtreleri güç anahtarları ve şebekeye bağlı bir endüktanstan oluşmaktadır. Genel çalışma prensibi nonlinear özellikteki akım ve gerilimlerin tam tersi yönde aynı genlikte akım ve gerilim üreterek şebekeye enjekte ederek nonlinear akım ve gerilimin şebeke üzerindeki etkisini bastırmaktır. Aktif güç filtreleri aynı zamanda reaktif güç ve nötr akımı kompanzasyonu amacıyla da kullanılmaktadır.

Aktif güç filtresi mevcut güç sisteminde değişiklik yapıldığı zaman bile geniş bir frekans aralığında filtreleme yapabildiğinden dolayı harmonik kompanzasyonuna devam edebilir. Hızlı değişen yüklerin oluşturduğu harmoniklerin süzülmesi ve sistemdeki reaktif güç ihtiyaçlarını hızlı şekilde karşılaması aktif güç filtresi kullanımını yaygınlaştırmıştır. Aktif güç filtresinin olumsuz yönleri ise sisteme entegre edilmelerinin zor, kurulum maliyetlerinin ise yüksek olmasıdır. İki çeşit aktif güç filtresi kullanılmaktadır. Bunlar Seri aktif güç filtresi ve Paralel aktif güç filtresi şeklindedir.

Seri Aktif Güç Filtresi

Seri aktif güç filtresi güç anahtarları ve bir şebeke transformatöründen meydana gelmektedir. Seri aktif güç filtresi ile gerilim harmonikleri elemine edilir ve gerilim regülasyonu yapılabilir. Seri aktif güç filtresi sistemin başlangıç noktasına kurulur. Şekil 2.5'te seri aktif güç filtresinin tek hat şeması gösterilmektedir. Paralel aktif güç filtreleri yüke paralel bağlanır ve yük akımının harmoniklerini yok etmek, reaktif güç kompanzasyonu yapmak için sisteme ters fazda ve eşit büyüklükte akımlar verir.



Pasif ve Aktif Güç Filtresinin Özellikleri

Pasif ve aktif filtresinin olumlu ve olumsuz yönleri çizelge 2.3'te karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.3 Pasif ve aktif güç filtresinin karşılaştırılması

DURUM	Pasif Güç Filtresi	Aktif Güç Filtresi
Sistemdeki yük artarsa	İlk yatırım geçersiz	İlk yatırım geçerli
İlk kurulum maliyeti	Düşük	Yüksek
Birden fazla harmonikler	Uygun değildir.	Uygun
Boyut	Büyük	Küçük
Sisteme montajları	Oldukça zor	Kolay
Empedans etkisi	Rezonans oluşabilir	Rezonans oluşmaz
Frekans değişimi	Filtrenin etkisi azalır	Etkilenmemektedir

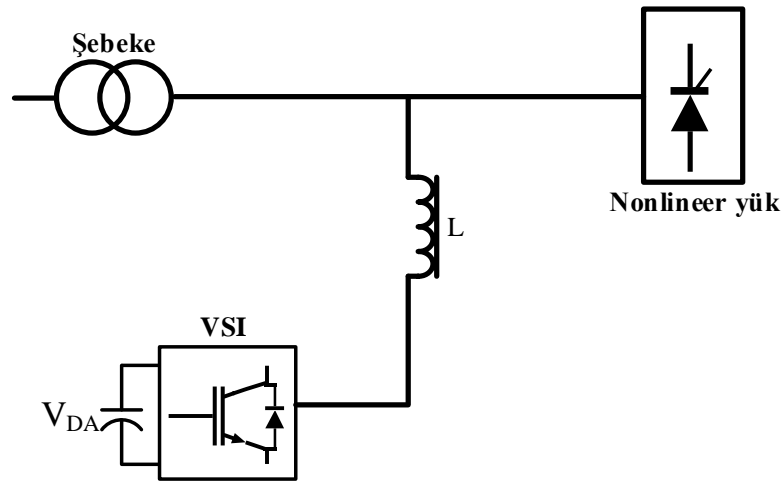
2.5. Paralel Aktif Güç Filtresi

PAGF vasıtasıyla yük akımında istenmeyen akım bileşenlerinin kompanzasyonu için akımlar üretilmektedir. Bu çalışmada PAGF'nin harmonik hesabı ve kontrolü için anlık güç teorisi kullanılmıştır [34], [35]. Genel olarak, yük doğrusal olmadığında, \bar{p} , \tilde{p} , \bar{q} , \tilde{q} gerçek ve sanal güçler, ortalama ve salınımlı bileşenlere bölünebilir. Salınımlı güçler \tilde{p} ve \tilde{q} yük akımındaki harmonik bileşenlerden kaynaklanan istenmeyen güçleri temsil eder. Reaktif güç kompanzasyonu yapılacak sistemlerde \bar{q} 'de istenmeyen bir güç olarak tanımlanabilir.

Anlık güç teorisi kullanılarak AGF hem harmonikleri elimine etmek için hem de reaktif güç kompanzasyonu yapmak için kullanılabilir. Elde edilen salınımlı güçler vasıtasıyla, $\alpha\beta$ referans çerçevesindeki dengeleme akımlarını hesaplanabilir. Daha sonra, ters Clarke dönüşümünü kullanarak, yükteki bu harmonikli bileşenleri elimine etmek için aktif filtre tarafından enjekte edilecek akımlar bulunabilir. Elde edilen üç fazlı referans akımlar bir histerisiz akım karşılaştırıcıya uygulanarak elde edilen PWM sinyalleri verim kaynaklı üç fazlı evirici güç anahtarlarına uygulanarak kompanzasyon amacıyla sisteme enjekte edilecek akımlar elde edilir.

$$\begin{aligned} \text{Gerçek güç} \quad p &= \bar{p} + \tilde{p} \\ \text{Sanal güç} \quad q &= \bar{q} + \tilde{q} \end{aligned}$$

Burada \bar{p} gerçek ortalama güç, \tilde{p} ise gerçek salınımlı güçtür. Aynı şekilde \bar{q} ortalama reaktif güç \tilde{q} ise salınımlı sanal güçtür. Paralel aktif güç filtresinin tek hat şeması Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Paralel aktif güç filtresinin tek hat şeması

Histeresiz Akım Kontrolü

Histeresiz akım kontrolü, uygulamasının basit olmasından dolayı yaygın olarak kullanılan PWM tekniklerindedir. Bu yöntemde referans olarak elde edilen akım ile gerçek akımların bir histeresiz bant içerisinde kontrolü sağlanmaktadır. Bu PWM tekniğinin diğer bir avantajı ise dinamik cevabının hızlı olmasıdır.

2.5.1. Anlık Güç Teorisi

Anlık güç teorisi aktif güç filtresi kontrolünde kullanılan yöntemlerden biridir. Bu teori 1983 yılında Akagi tarafından önerilmiştir AGT üç fazlı sistemlerde anlık değerlere sahip çıkış veren hesaplaması basit bir yöntem olarak bilinmektedir. Bu yöntemde üç fazlı sistemin anlık aktif ve reaktif güçleri sistemin harmonikli ve/veya dengesiz olmasından bağımsız olarak anlık olarak hesaplanabilmektedir. Pq teorisi olarak da bilinen bu yöntemde öncelikle üç fazlı bileşenler (abc) Clarke dönüşümü vasıtasıyla iki fazlı bileşenlere ($\alpha\beta$) dönüştürülür. Dönüşümü yapılan akım ve gerilimler kullanılarak anlık güç teorisi yardımıyla aktif ve reaktif güçlerin anlık değerleri hesaplanmaktadır. Anlık olarak hesaplanan güçler AA ve DA bileşenlerden oluşmaktadır [34], [35]. Denklem 2.13 ve 2.14'te akım ve gerilimlerin Clarke dönüşümü verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Anlık aktif ve reaktif güç matrisi Denklem 2.15'teki gibi hesaplanmaktadır. Burada p ve q sırasıyla aktif ve reaktif (sanal) güçlerdir. Normalde güç sisteminde sadece anlık gerçek gücün ortalama değeri arzu edilmektedir. Diğer güç bileşenleri aktif güç filtresi kullanılarak bertaraf edilir. Anlık güç bileşenlerine ek olarak AGF'nin DA bara tarafındaki kondansatör gerilimini dengelemek için gerekli bir güç ihtiyacı da bulunmaktadır [34], [35].

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Elde edilen güçlerden iki eksenli akımlar Denklem 2.16'daki gibi elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} & -\bar{p} \\ q \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

İki eksenle elde edilen referans akımlar ters Clarke dönüşümü vasıtasıyla üç fazlı sisteme çevrilerek, üç fazlı sistem için referans akımlar Denklem 2.17'deki gibi elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} i_{a_ref} \\ i_{b_ref} \\ i_{c_ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

3. MATERYAL VE METOT

Bu kısımda Muş Alparslan Üniversitesi Kampüsünde harmonik ölçümleri için kullanılan yöntem ve cihazlar açıklanacaktır. Öncelikle akım ve gerilim harmoniklerinin ölçülmesinde kullanılan cihazlar tanıtılarak, bu cihazlardan elde edilen veriler sunulacaktır. Devamında elde edilen verilerin benzetim ortamına nasıl aktarıldığı verilecektir. Sonrasında elde edilen harmonik verilerinin minimize edilmesi için Matlab/Simulink ortamında paralel aktif güç filtresi tasarlanacaktır.

3.1. Harmoniklerin Ölçülmesi

Elektrik güç sistemlerinde elektrik kalitesinin belirtilen standartlarda olması için düzenli olarak takip edilmeli, ölçümler alınarak analizlerin yapılması gerekmektedir. Elde edilen verilerle oluşan veya oluşabilecek aksaklıkların çözüm yöntemleri araştırılması gerekmektedir. Güç kalitesi problemleri tesise bağlanan sabit cihazlarla veya taşınabilir cihazlarla tespit edilebilirler. Özellikle sürekli çalışan ve enerji tüketimi fazla olan endüstri tesislerinde sistemi sürekli takip eden güç kalite analizörlerinin bulunması gerekmektedir. Elde edilen bilgilerin elektronik ortamda depolanabilmesi önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu tür cihazlar devamlı kayıt yaptıkları için tesisin enerji kalitesini anlık olarak görebilmeyi, analiz etmeyi ve hızlı müdahale etme olanağı sağlarlar. Trafo modüler hücreleri AG panosu harmonik ölçümleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Trafo Modüler Hücreleri AG Panosu Harmonik Ölçümleri



Şekil 3.1. Trafo modüler hücreleri AG panosu harmonik ölçümleri

Elektrik sistemlerinde ideal gerilim ve akımın 50 Hz ideal sinüs dalgası şeklinde iletilmesi, dağıtılması ve tüketime sunulması, elektrik güç sistemlerinin ve elektrikle çalışan bütün cihazların verimli çalışması açısından kritik öneme sahiptir. Sistemde bulunan ekipmalarda veya sisteme bağlı tüketicilerden kaynaklanan bozucu faktörler akı, akım ve gerilim gibi temel elektriksel büyüklüklerin ideal sinüzoidal dalga şeklinden uzaklaşmasına sebep olabilirler. Temel frekansın katları ile orantılı olan istenmeyen harmonikli akım ve gerilimler temel dalga formunu bozabilmektedirler.

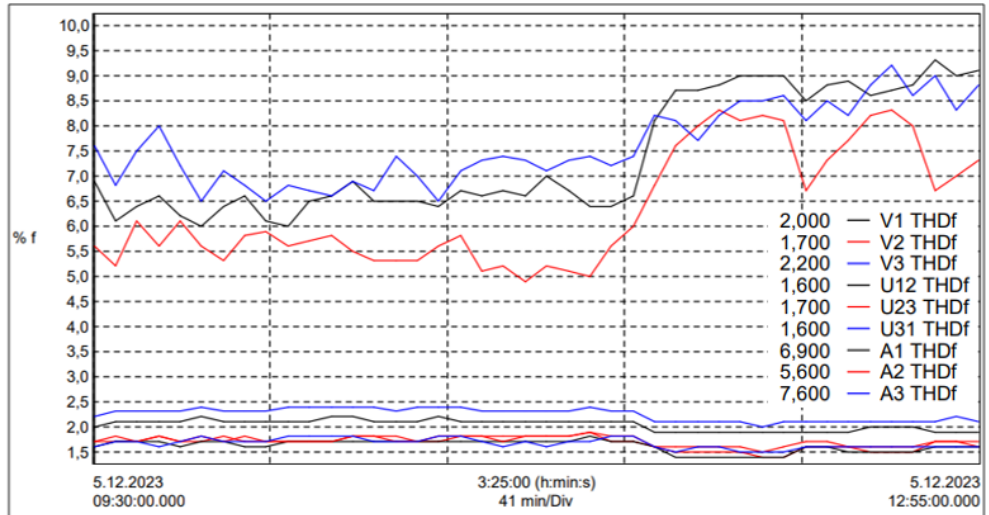
Güç kalitesi analizörleri ile ölçüm yapılarak ani gerilim değişimi, anlık kesinti, düşük ve yüksek gerilim, harmonik, akım ve gerilim dalga şekilleri, frekans değişimi gibi değişkenler incelenip çözüm yöntemleri bulunabilmektedir. Bu çalışmada transformatör AG panolarında yapılan ölçümler için Chauvin Arnoux 8331 güç analizörü kullanılmıştır. Bu cihaz EN50160 standartlarında enerji kalitesi raporlama imkanı sunmaktadır. Cihaz büyük boyutlu verilerin kolay ve hızlı analizini yapacak şekilde tasarlanmıştır. Analizör aynı zamanda renkli grafik geniş ekrana sahip olup buda kullanım kolaylığı sağlamaktadır. CA: 8331 cihazı 50. dereceye kadar akım - gerilim harmonik ölçümü, gerilim dalgalarının kaydı, aktif, reaktif ve görünür güç kayıtları, aktif ve reaktif enerji kayıtları, flicker kaydı yapabilmektedir. Bununla birlikte kaydedilen bu verileri bilgisayara aktarma olanağı sunmaktadır. Bir binanın tesisatının eksiksiz bir şekilde enerji etüdünü gerçekleştirme açısından da cihaz kullanılabilir. Muş Alparslan Üniversitesi Kampüsünde yapılacak ölçümler için

kullanılan CA: 8331 enerji analizörü Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Chauvin Arnoux CA: 8331 enerji analizörü

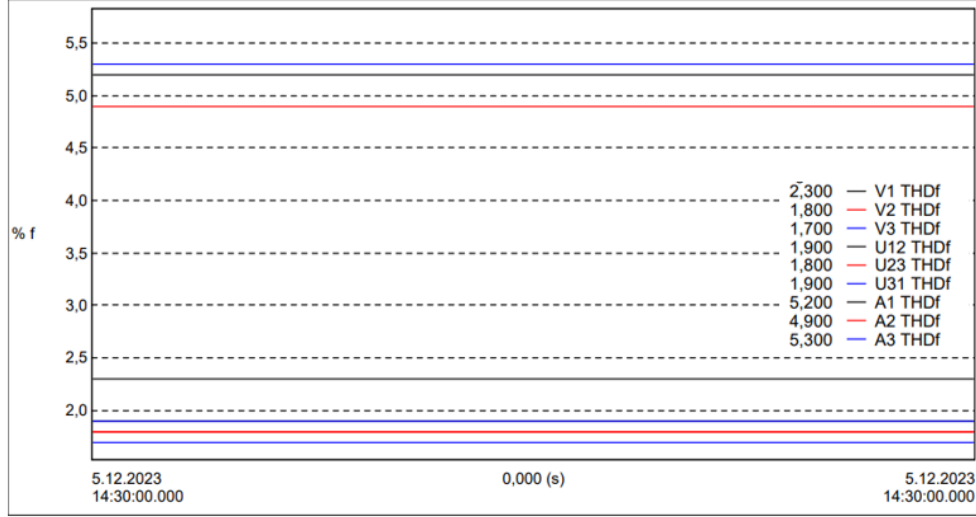
Enerji analizörü ile Trafo1 için yapılan toplam harmonik bozulma grafikleri ve THD oranları Şekil 3.3’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde gerilim harmoniklerinin düşük olduğu yani standart limitlerin altında, akım harmoniklerinin ise standart limitlerin üzerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.3. Trafo 1 THD grafiği

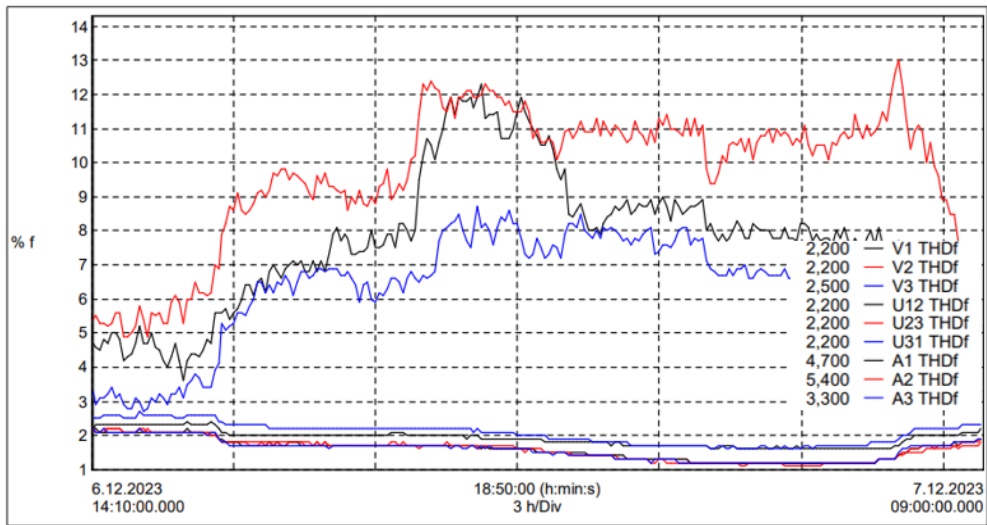
Aynı şekilde Trafo 2’de yapılan ölçümlerde gerilimlerdeki toplam

harmonik bozulmaların limitler içinde olduğu akım harmoniklerinin ise Trafo 1'e göre daha düşük olduğu ve iki fazdaki toplam harmonik bozulmaların standart limitlerin üzerinde olduğu belirlenebilir. Trafo 2'ye ait THD grafiği Şekil 3.4'te verilmiştir.



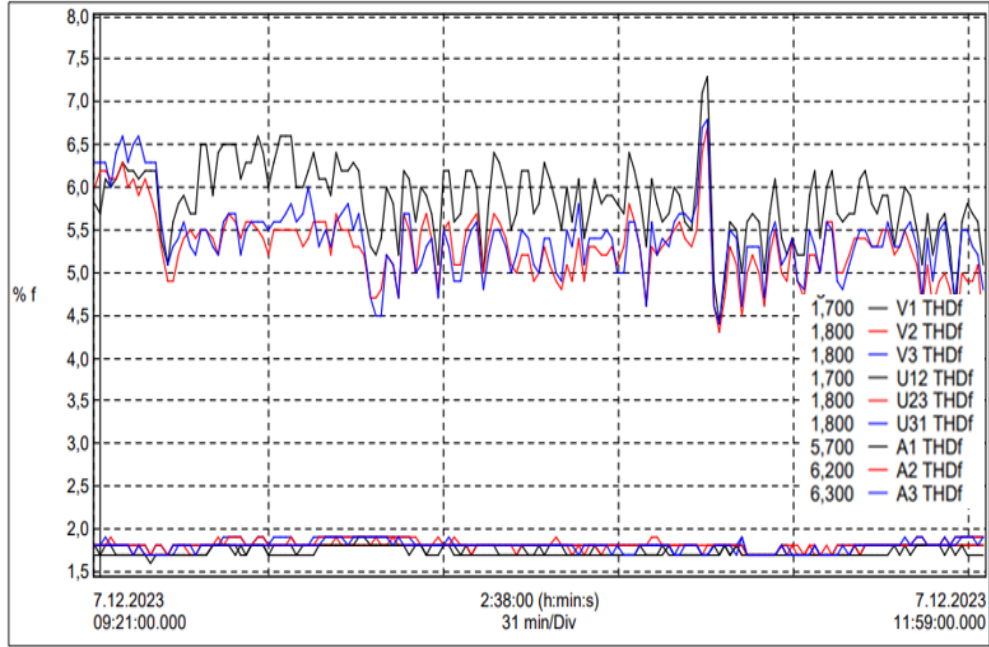
Şekil 3.4. Trafo 2 THD grafiği

Trafo 3 için toplam harmonik grafiği incelendiğinde akımlardaki toplam harmonik bozulmaların gerilimlere göre daha yüksek olduğu ayrıca 1 fazdaki akım harmoniğinin standart limitlerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Şekil 3.5'te Trafo 3 THD grafiği verilmiştir.



Şekil 3.5. Trafo 3 THD grafiği

Trafo 4 için THD grafiği incelendiğinde diğer trafolarda olduğu gibi gerilim harmoniklerinin standart limitlerde akım harmoniklerinin ise limitlerin dışında olduğu belirlenmiştir. Şekil 3.6'da Trafo 4 THD grafiği verilmiştir.

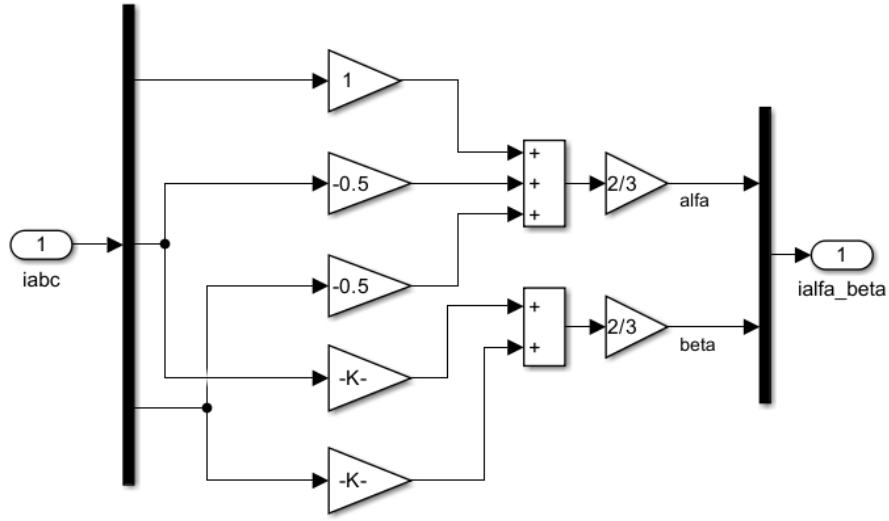


Şekil 3.6. Trafo 4 THD grafiği

Grafikler incelendiğinde akım harmonikleri standart limitlerin üzerinde olduğundan nonlinear ylık modeli farklı genlik ve frekanstaki akım kaynakları toplanarak elde edilmiştir.

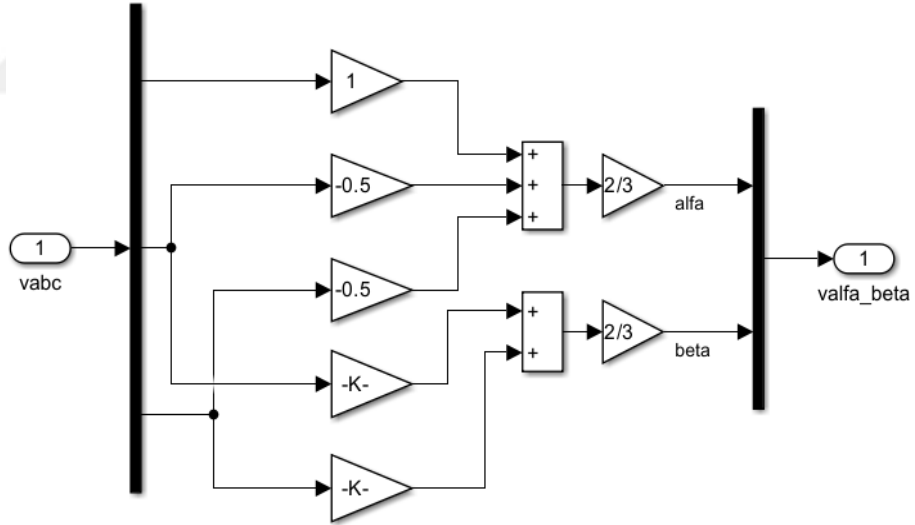
3.2. Paralel Aktif Gúc Filtresi Tasarımı

Bu çalışmada, anlık gúc (p ve q) teorisi kullanılarak harmoniklerin elimine edilmesi üzerine bir Matlab/ Simulink modeli oluşturulmuştur. Üç faz akımlar ve gerilimler kullanılarak anlık gúc (p ve q) hesaplanmıştır. Anlık aktif gúc oluşturan ve tüm harmonikleri içeren p , alçak geçiren bir filtreye uygulanarak temel frekanstaki (50 Hz) gúc elde edilmiştir. Bu temel frekanstaki gúc, tüm harmonikleri içeren gúcten çıkarılarak filtrelenecek harmonikli gúc ayrıştırılmıştır. Son olarak, bu gúc ve üç fazlı gerilimler kullanılarak PAGF çıkışında şebeke harmoniklerini elimine edecek referans akımlar elde edilmiştir. Bu çalışmada reaktif gúc kompanzasyonu yapılmadığından anlık reaktif gúc q hesaplamaya dahil edilmemiştir. Şekil 3.7'de üç fazlı akımların Clark dönüşümü ile iki eksenli akımlara dönüşümü verilmiştir.



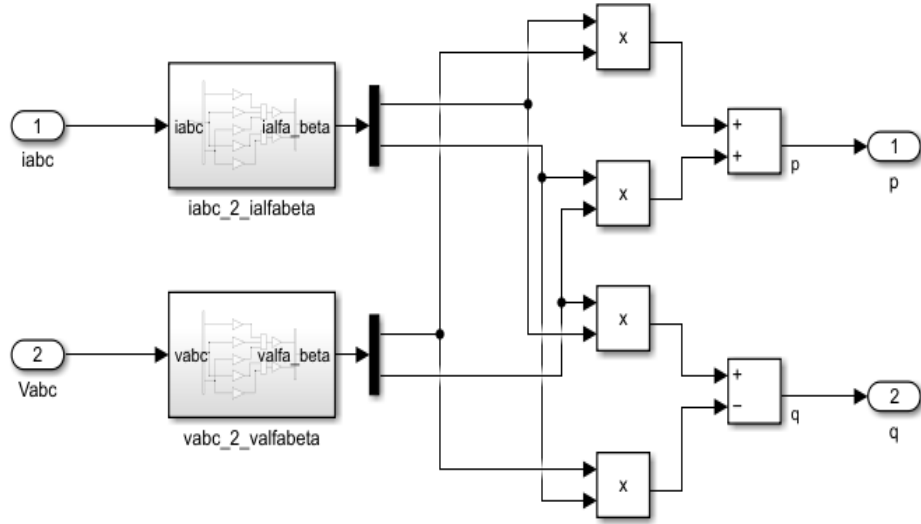
Şekil 3.7. Üç fazlı akımların eClark dönüşümü

Şekil 3.8’de üç fazlı gerilimlerin Clark dönüşümü vasıtasıyla iki eksenli gerimlere dönüşümü verilmiştir.



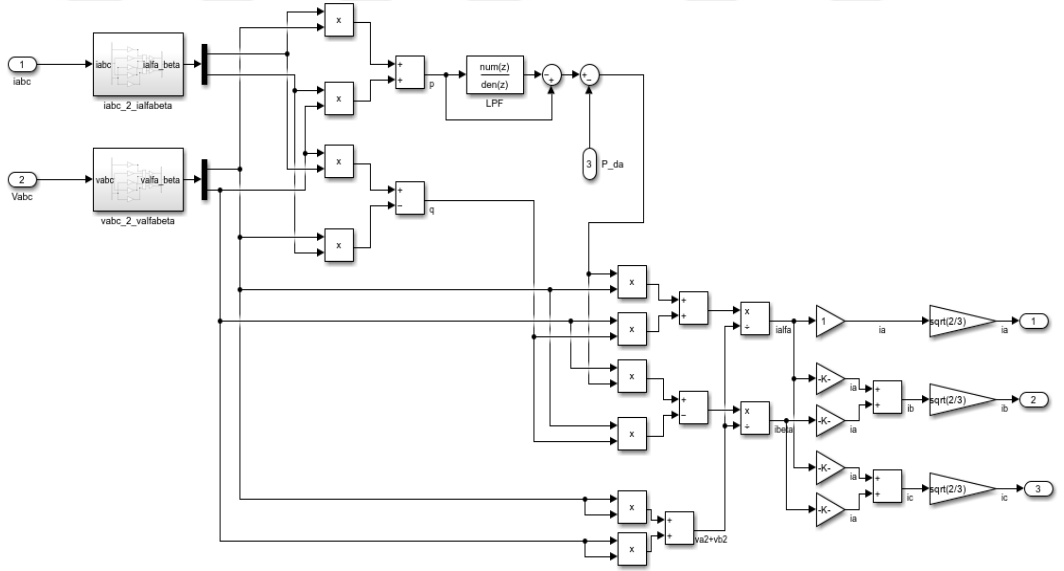
Şekil 3.8. Üç fazlı gerilimlerin Clark dönüşümü

Üç fazlı akım ve gerilimlerin Clark dönüşümleri yapıldıktan sonra elde edilen iki eksenli akım ve gerilimler kullanılarak anlık güç teorisi ile p ve q güçleri Şekil 3.9’daki gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.9. Anlık p ve q güçleri hesaplama Matlab/Simulink modeli

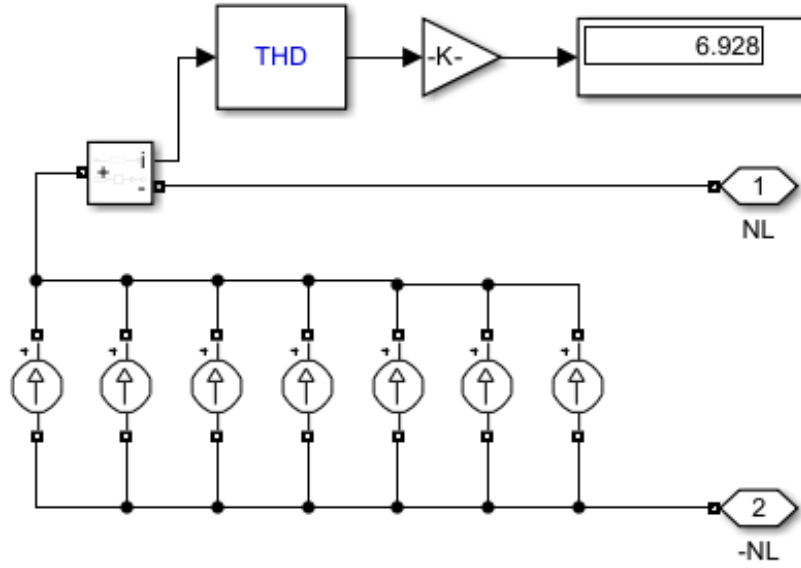
P ve q güçleri hesaplandıktan sonra elde edilen bu güçler kullanılarak üç fazlı referans akımlar elde edilmiştir. Şekil 3.10. PAGF'nin referans akım hesaplama modeli verilmiştir.



Şekil 3.10 PAGF'nin referans akım hesaplama Matlab/Simulink modeli

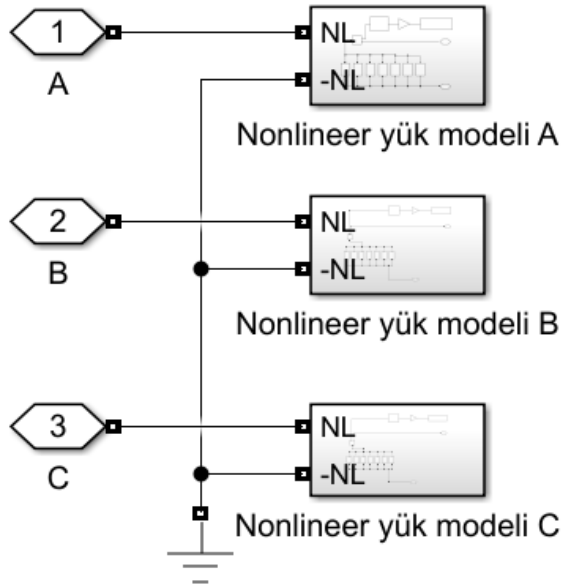
3.2.1. Histeresiz PWM Modeli

Histeresiz bant kontrol tekniğinde kontrol edilmek istenen akım için bir histeresiz bant belirlenmekte ve akımın bu bant içerisinde kalması sağlanmaktadır. Bu teknik hızlı tepki vermesi basitçe uygulanabilmesi gibi avantajlara sahiptir. Önceki



Şekil 3.12. Akım kaynakları ile oluşturulan nonlinear yük modeli

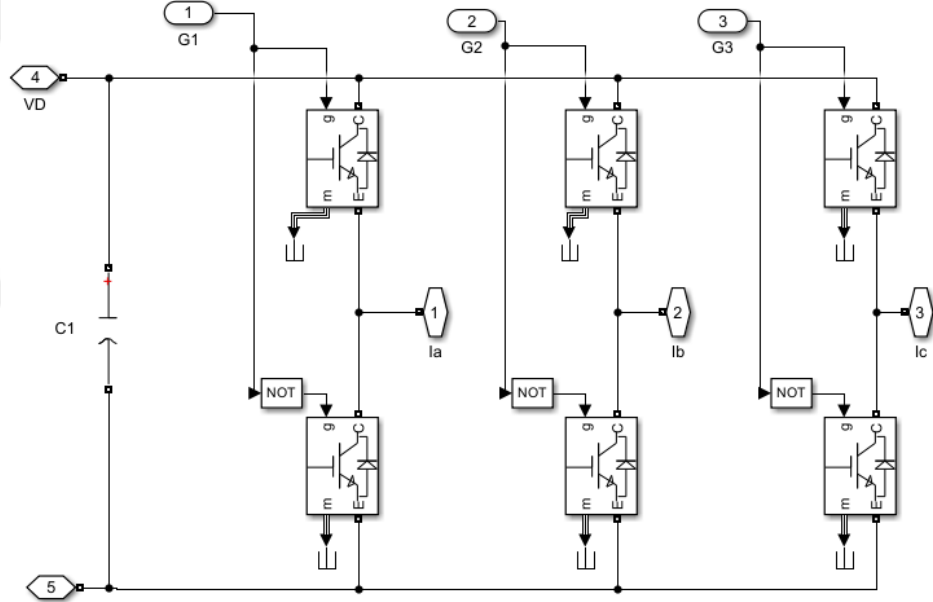
Şekil 3.12’da akım harmoniği elde etmek için uygulanan bu yöntem her trafo için tekrarlanmıştır. Ölçülen faz akımları arasındaki genlik farkları ihmal edilerek en yüksek faz akım değerine göre faz akımları belirlenerek sistem dengeli kabul edilmiştir. Her faz için oluşturulan nonlinear yük modeli birleştirilerek üç fazlı nonlinear yük modeli Şekil 3.13’deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.13. Üç fazlı nonlinear yük modeli

3.2.3. Gerilim Kaynaklı Evirici Modeli

Paralel bağı AGF için gerilim kaynaklı üç fazlı bir evirici tasarımı yapılmıştır. Gerilim kaynaklı evirici anahtarlama elemanı olarak IGBT'ler tercih edilmiştir. Evirici uygulama devrelerinde güç anahtarlama elemanları ideal olmadığından PWM sinyali ile eşzamanlı olarak açma kapama yapılamamaktadır. Açma kapama esnasında bir gecikme zamanı oluşmaktadır. Bu yüzden aynı faz bacağına bağlı anahtarlama elemanlarının açma kapama esnasında faz bacağının kısa devre olmasını engellemek için güç anahtarlarına bir gecikme zamanı eklenir. Benzetim ortamında anahtarlar ideal olarak kabul edildiğinden bu gecikme zamanı eklenmemiştir. Şekil 3.14'te Matlab/Simulink'te oluşturulmuş üç fazlı gerilim kaynaklı evirici modeli verilmiştir.



Şekil 3.14. IGBT tabanlı üç fazlı gerilim kaynaklı evirici modeli

3.2.4. PI Kontrolör

Aktif güç filtresi şebeke harmoniklerini bastırmak için ürettiği zıt yöndeki harmonik akımları üç fazlı evirici girişindeki DA hat kondansatöründen sağlamaktadır. Bu yüzden bu kapasitörün geriliminin sabit tutulması AGF'nin işlevini yerine getirmesi için kritik öneme sahiptir. DA hat kondansatörünün gerilim kontrolü amacıyla PI kontrolör kullanılmıştır. K_p ve K_i katsayıları deneme yanılma yöntemiyle $K_p = 20$, $K_i = 15$ olarak ayarlanmıştır. Şekil 3.15'te DA hat kondansatörü PI kontrolörü verilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Benzetim çalışmaları sırasıyla Trafo1, trafo2, trafo3 ve trofa4 için yapılmıştır. Trafolardan çekilen akımlar incelendiğinde faz akımlarının dengesiz olduğu belirlenmiştir. Bu yüzden en yüksek akımlı faz referans alınarak üç fazlı sistemin dengeli yüklendiği kabul edilerek benzetimler yapılmıştır.

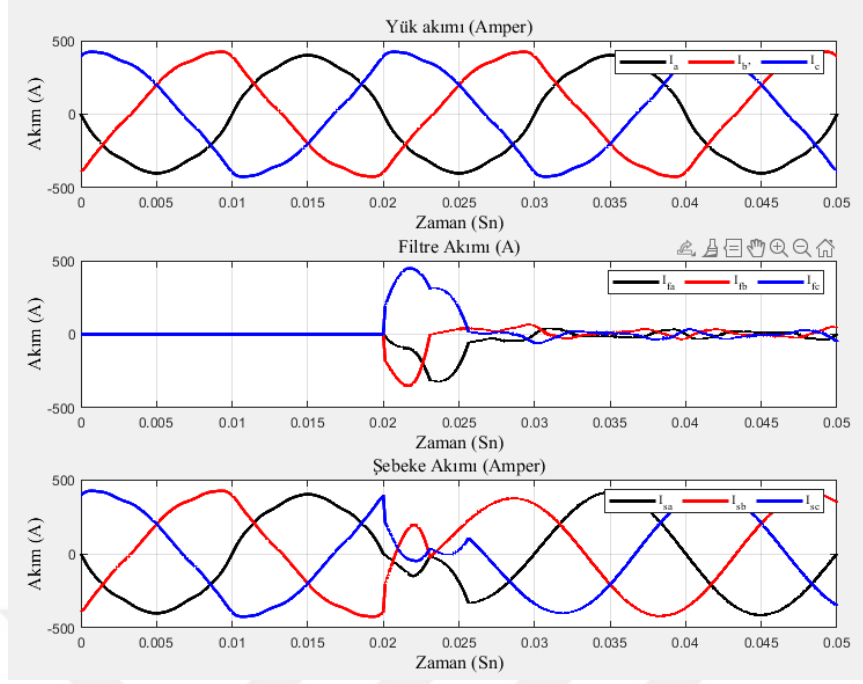
4.1. Trafo 1 (Ana Giriş Trafosu) AGF Uygulaması

Trafo1'den çekilen akımlar Çizelge 4.1'de verilmiştir. Bu çizelgedeki değerlere göre akım harmonikleri birleştirilerek Şekil 3.12'deki gibi nonlineer yük modeli elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. Trafo akım değerleri

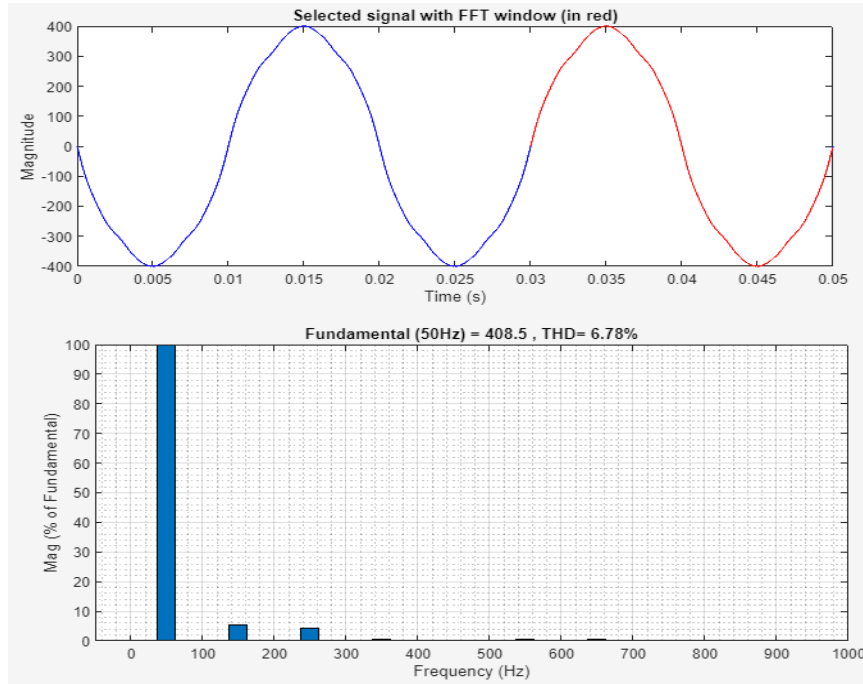
TR 1	1.H	3.H	5.H	7.H	9.H	11.H	13.H
A ₁	408,5	21,65	16,75	2,860	0,817	2,451	2,043
A ₂	385,6	17,74	8,483	2,699	4,242	3,856	1,928
A ₃	380,8	27,04	7,616	3,046	0,762	3,808	1,904

Benzetim süresi boyunca Şekil 4.1'deki gibi sırasıyla yük akımı, filtre akımı ve şebeke akımı çizdirilmiştir. Başlangıçta PAGF devrede değildir. 0.02. sn sonra PAGF devreye alınmıştır. Grafikler incelendiğinde PAGF devrede değilken şebekeden çekilen akım dalga şeklindeki bozulma belirgin bir şekilde görülmektedir. PAGF devreye alındıktan sonra şebekeden çekilen akım formları ideal sinüse yaklaşmış ve PAGF akım harmoniklerini büyük oranda filtrelemiştir.



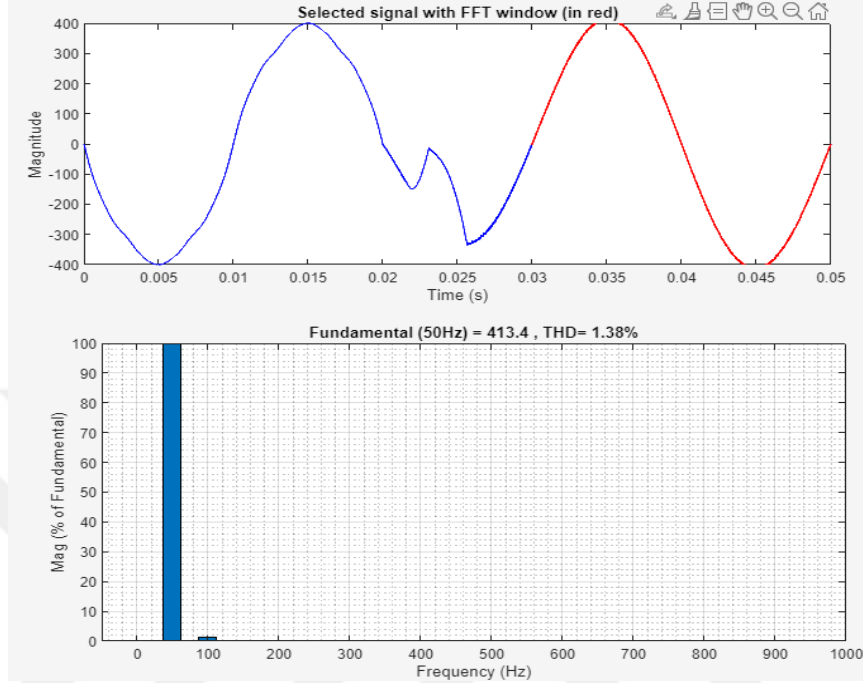
Şekil 4.1. Trafo 1 yük akımı, filtre akımı, şebeke akımı

Şekil 4.2’de FFT (Fast Fouruer Transform) analizi grafiği verilmiştir. Bu grafik PAGF devrede değilken akım THD’sini göstermektedir. PAGF deverde değilken THD₁ değeri %6.78 olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde temel frekansın yanında 3. (150 Hz) ve 5. (250 Hz) harmoniğin diğer harmoniklere göre baskın olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.2. Trafo 1 FFT oranları

PAGF devreye alındıktan sonra yapılan FFT analizi Şekil 4.3'te verilmiştir. PAGF devrede değilken yapılan FFT analizinde THD₁ oranı %6.78 iken PAGF devreye alındıktan sonra bu oran %1.38 değerine kadar gerilemiştir.



Şekil 4.3. Trafo 1 PAGF devrede iken FFT grafiği

4.2. Trafo 2 PAGF Uygulaması

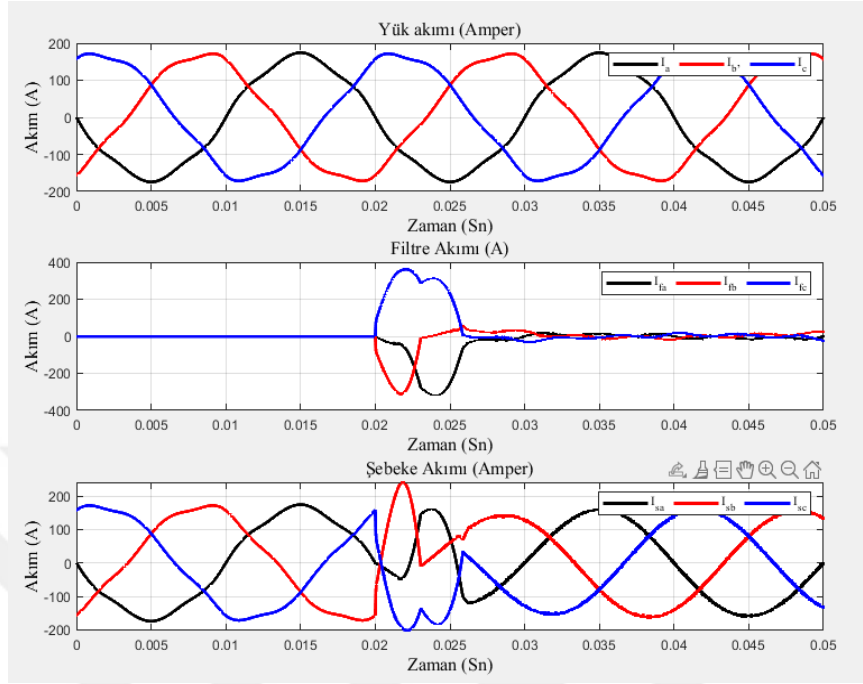
Trafo 2 akım değerleri Çizelge 4.2.'de verilmiştir. Çizelgedeki akım değerlerine göre harmonikli yük modeli oluşturulmuş ve benzetimlerde faz akımlarının dengeli olduğu varsayılmıştır.

Çizelge 4.2 Trafo 2 akım değerleri

TR 2	1.H	3.H	5.H	7.H	9.H	11.H	13.H
A ₁	169,2	2,030	8,460	1,354	0,000	0,000	0,169
A ₂	162,1	1,783	7,457	1,135	0,486	0,162	0,162
A ₃	174,7	3,319	8,386	1,398	0,349	0,175	0,175

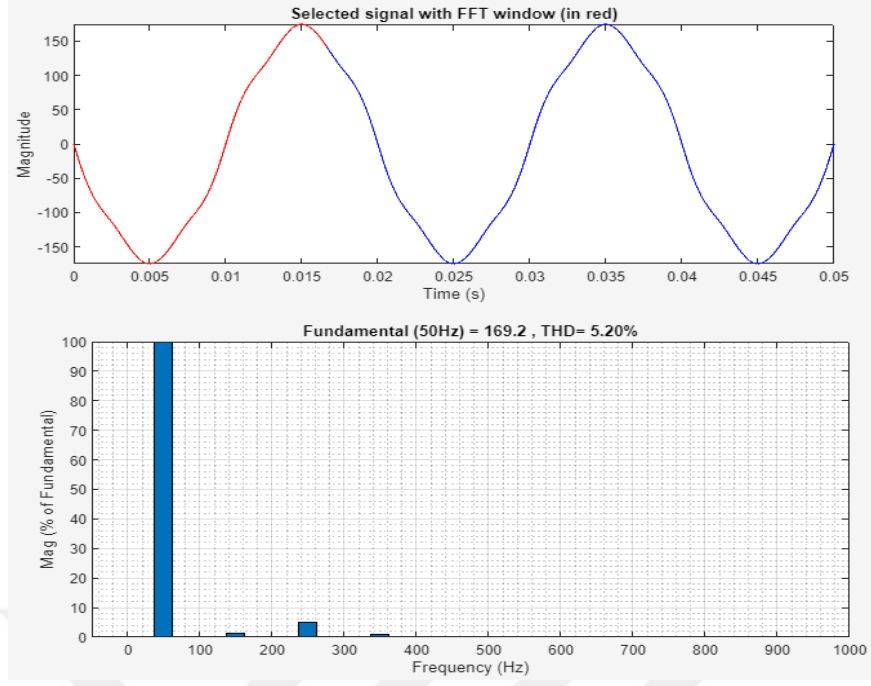
Şekil 4.4.'teki grafikte trafo 2 için PAGF devrede değilken ve devreye alındıktan sonraki yük, filtre ve şebeke akım değerleri verilmiştir. PAGF 0.02. sn'den sonra

devreye alınmış ve hızlı bir şekilde şebekede harmonik değerleri bastırılmış ve akım dalga formu ideal sinüse yaklaşmıştır.



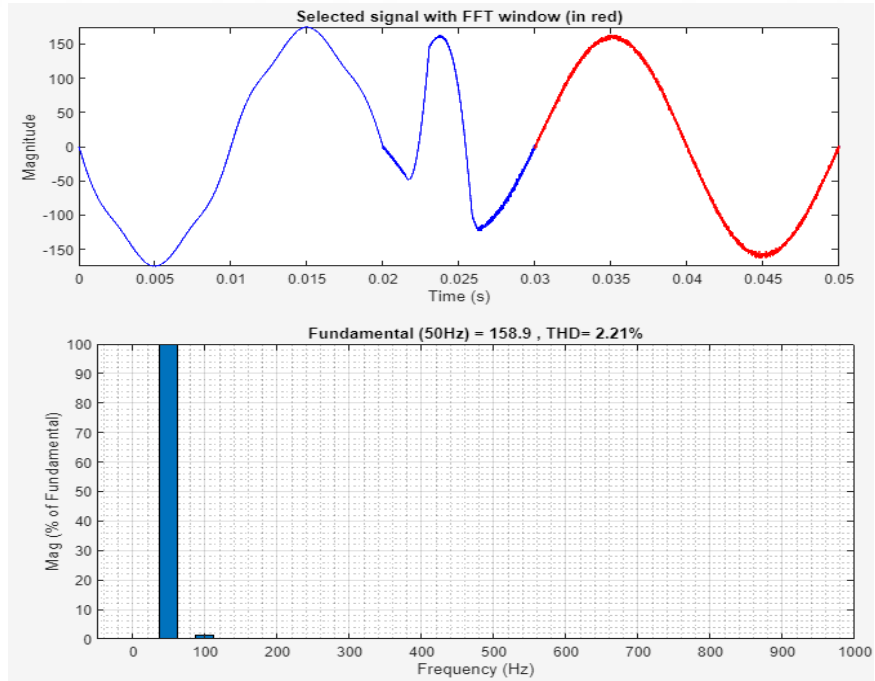
Şekil 4.4. Trafo 2 yük akımı, filtre akımı ve şebeke akımı benzetim grafiği

Şekil 4.5'te verilen FFT grafiği incelendiğinde PAGF devrede değilken Trafo 2'de 5. Harmoniğin diğer harmoniklere göre baskın olduğu ve THD_I oranlarının %5.2 olduğu görülmektedir.



Şekil 4.5. Trafo 2 FFT oranları

Şekil 4.6'da PAGF devreye alındıktan sonra FFT grafiği verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde akım için THD₁ oranları %2.21' ye gerilemiştir.



Şekil 4.6. Trafo 2 PAGF devrede iken FFT grafiği

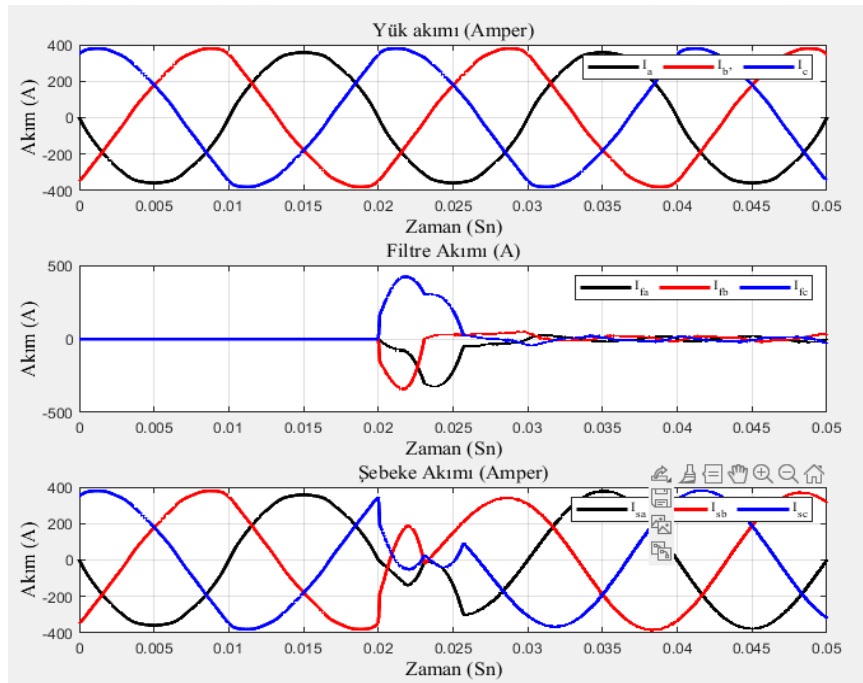
4.3. Trafo 3 PAGF Uygulaması

Trafo 3'e ait akım değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir. Çizelge 4.3'deki değerler incelendiğinde fazlar arası akımların dengesiz yüklendiği diğer trafolar ile karşılaştırıldığında en yüksek yük dengesizliğinin trafo 3'te olduğu belirlenebilir. Diğer trafolarla uygulandığı gibi trafo 3'ten enerji analizörü ile ölçülen akım değerlerinden nonlineer yük modeli oluşturulmuştur.

Çizelge 4.3 Trafo 3 akım değerleri

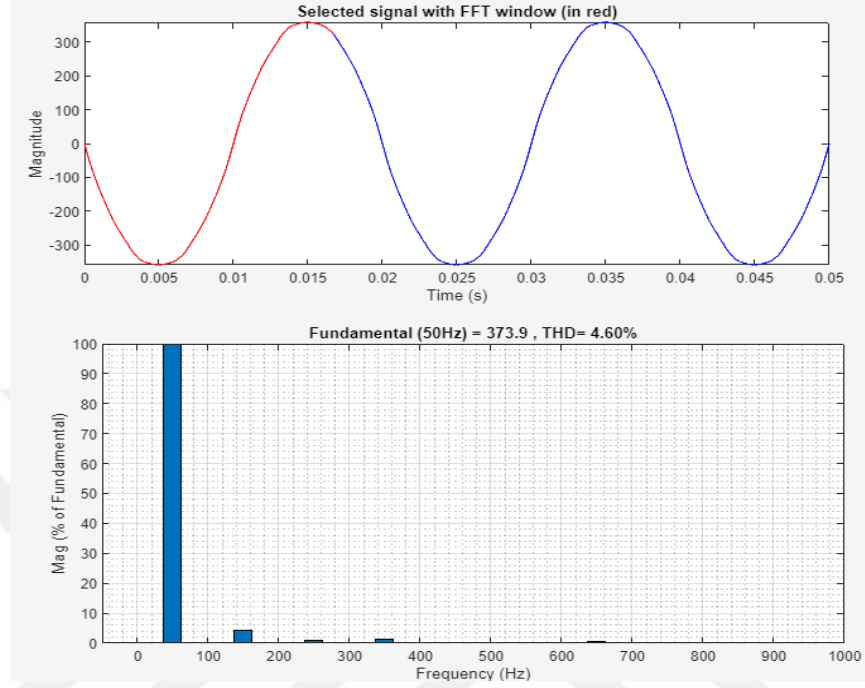
TR 3	1.H	3.H	5.H	7.H	9.H	11.H	13.H
A ₁	373,9	16,08	3,739	4,487	0,374	0,748	1,496
A ₂	307,8	12,93	6,772	6,772	1,231	0,616	1,539
A ₃	273,0	7,371	1,638	1,911	0,546	0,819	0,819

Trafo 3 akım grafikleri incelendiğinde PAGF devrede değilken akım dalga şeklindeki bozulma açıkça görülmektedir. 0.02.sn'den sonra PAGF devreye alındıktan sonra şebekeden çekilen akım formu büyük oranda düzelmiştir. Trafo 3 için yük akımı, filtre akımı ve şebeke akımı benzetim grafiği şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Trafo 3 yük akımı, filtre akımı ve şebeke akımı benzetim grafiği

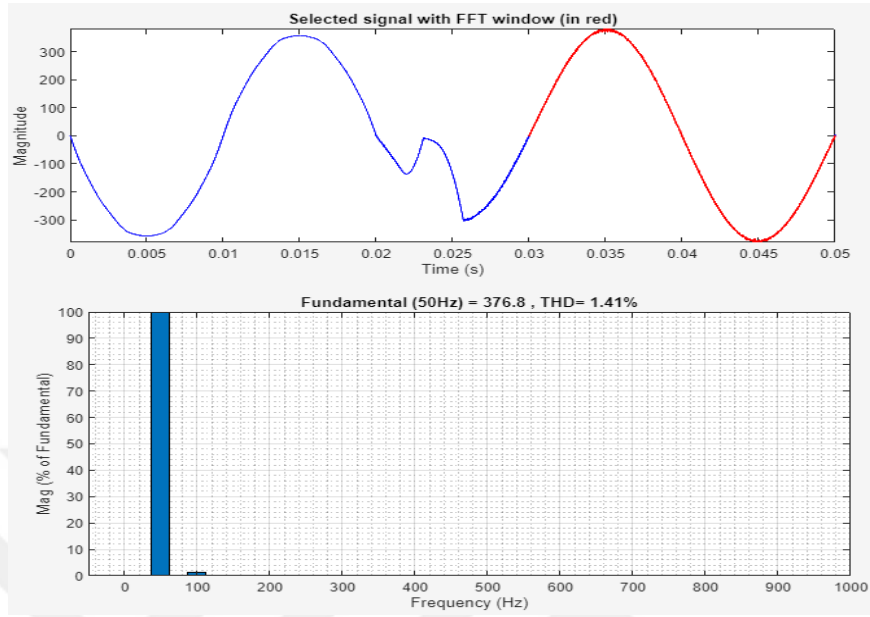
Trafo 3 FFT grafiği incelendiğinde PAGF devrede değilken hesaplatılan THD₁ oranı % 4.60 olarak geręekleřtir. Frekans spektrumundan 3. harmoniğin diğer harmoniklere göre baskın olduğu Şekil 4.8’de görülmektedir.



Şekil 4.8. Trafo 3 FFT grafiği

PAGF devreye alındıktan sonra FFT grafiği incelendiğinde akım için THD₁ %4.60 değerinden % 1.41 değerine düşmüştür. PAGF devrede değilken baskın olan 3.

Harmonik PAGF devreye alındıktan sonra tamamen bastırılmıştır. Şekil 4.9’da Trafo 3 için PAGF devreye alındıktan sonra hesaplatılan FFT ve THD değerleri verilmiştir.



Şekil 4.9. Trafo 3 PAGF devrede iken FFT grafiği

4.4. Trafo 4 PAGF Uygulaması

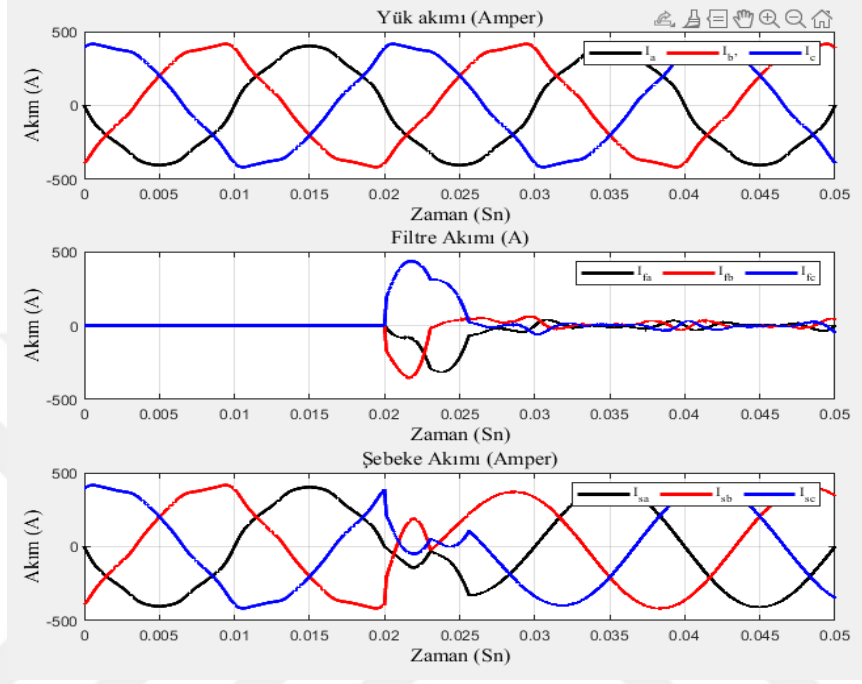
Trafo 4’ün ölçülen akım değerleri Çizelge 4.4’te verilmiştir. Ölçülen bu değerlere göre akım kaynakları paralel bağlanarak nonlineer yük modeli elde edilmiştir. Akım değerleri incelendiğinde fazlar arası akımların dengesiz olduğu ve trafo 4’te fazlar arası yük dağılımlarının yeniden düzenlenmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Üç fazlı sistemlerde dengesiz yük dağılımları trafoların aşırı ısınmasına, verimlerinin düşmesine, aşırı nötr akımlarının çekilmesine sebep olabilmektedir.

Çizelge 4.4. Trafo 4 akım değerleri

TR 4	1.H	3.H	5.H	7.H	9.H	11.H	13.H
A ₁	405,6	9,734	17,04	11,36	1,217	1,622	2,028
A ₂	393,3	8,259	19,67	10,62	2,360	2,753	1,967
A ₃	338,9	11,86	14,91	8,473	2,033	2,372	2,033

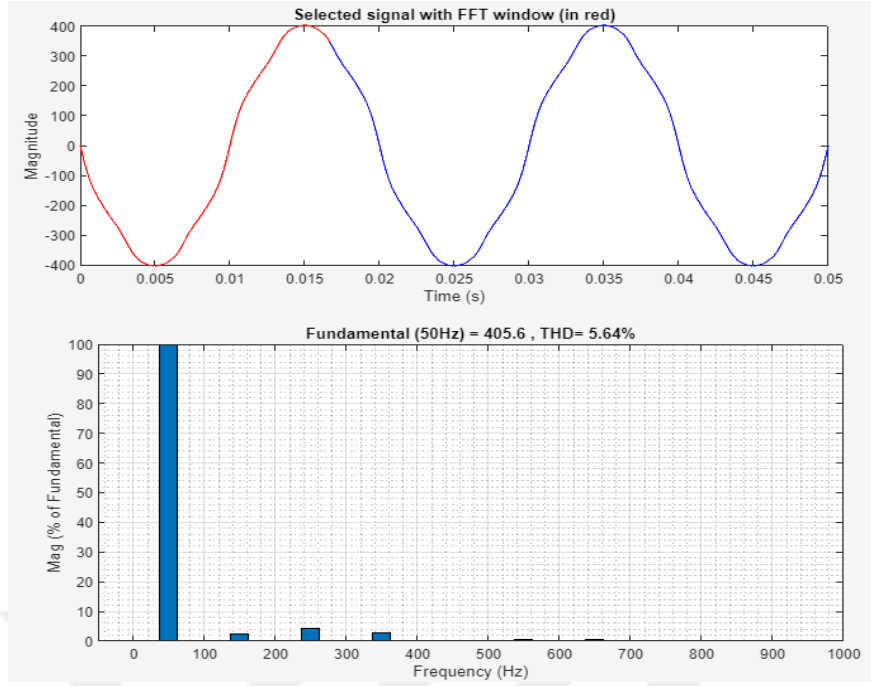
Diğer trafolarla yapılan benzetimin aynısı Trafo 4 içinde yapılmıştır. Başlangıçta PAGF devrede değildir. PAGF devrede değilken şebekeden çekilen akımların dalga

formu akım harmoniklerinden dolayı ideal sinüs değildir. 0.02. sn'de PAGF devreye alındıktan sonra akım dalga şekli ideal sinüse yaklaşmıştır. Şekil 4.10'da Trafo 4 akım değerleri verilmiştir.

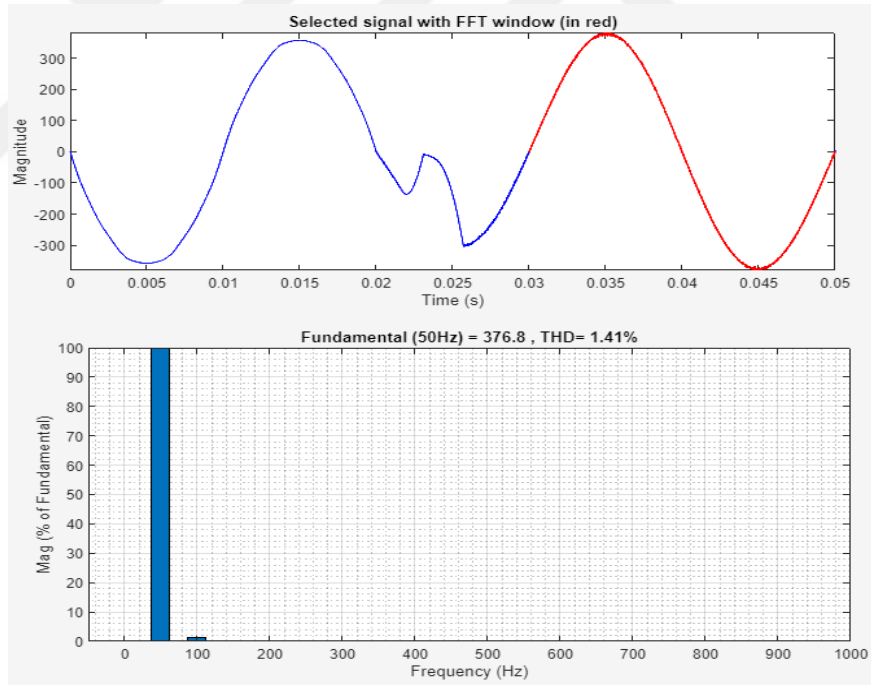


Şekil 4.10. Trafo 4 yük akımı, filtre akımı ve şebeke akımı benzetim grafiği

Şekil 4.11'deki FFT grafiği incelendiğinde 3. 5. ve 7. Harmoniğin baskın olduğu belirlenmiştir. THD_I oranı ise PAGF devrede değilken yapılan ölçümlerde %5.64 olarak hesaplatılmıştır. Trafo 4 PAGF devrede iken FFT grafiği şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Trafo 4 FFT grafiği



Şekil 4.12. Trafo 4 PAGF devrede iken FFT grafiği

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Muş Alparslan Üniversitesi kampüsünde bulunan trafolar akım ve gerilim harmonikleri açısından incelenmiş ve ölçülen harmonikleri bastırarak şekilde paralel aktif güç filtresi tasarlanmıştır. Yapılan ölçümlerde gerilim harmoniklerinin standart limitlerde olduğu akım harmoniklerinin ise limitlerden yüksek olduğu belirlenmiştir. Referans akım üretmek için anlık güç teorisinden faydalanılmıştır. Anlık güç teorisi vasıtasıyla anlık aktif ve reaktif güçler hesaplanmıştır. Hesaplanan aktif anlık güçten 50 Hz'lik temel dalgadaki güç çıkarılarak anlık aktif gücün harmonikli bileşeni hesaplanmıştır. Devamında iki eksenli akımlardan üç fazlı referans akımlar elde edilmiştir. Elde edilen bu üç faz referans akımlar histeresiz bant denetleyiciye uygulanarak PAGF'nin kontrolü gerçekleştirilmiştir. Gerilim kaynaklı eviricinin DA hat gerilimi kontrolü PI kontrolör kullanılmıştır. Nonlinear yük modeli için enerji analizörü ile ölçülen akım değerlerine göre akım kaynakları paralel bağlanarak oluşturulmuştur. Her trafo için ayrı ayrı yük modelleri oluşturularak Matlab/Simulink'te PAGF benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan benzetimler trafo 1, trafo 2, trafo 3, trafo 4 için tekrarlanmıştır. Yapılan benzetimlerde başlangıçta PGAF devrede olmayıp 0.02. sn'de devreye alınmıştır. Birinci trafoda PAGF devreye alındıktan sonra yapılan FFT analizlerinde THD_1 oranı %6.78'den % 1,38'e gerilemiştir. Aynı şekilde ikinci trafoda THD_1 oranı, % 5,2'den % 2,21'e, üçüncü trafoda THD_1 oranı % 4,6'dan 1,41'e dördüncü trafoda ise THD_1 oranı % 5,64'ten % 1,37'ye gerilemiştir. Nonlinear yükün şebekeden çektiği harmonikli akımlar büyük oranda bastırılmış ve şebekeden çekilen akımların dalga formu düzelerek ideal sinüse oldukça yaklaşmıştır. Harmonik ölçümlerle beraber yapılan ölçümlerde fazlardaki yüklenmenin dengesiz olduğu ve bunun nötr akımlarının çekilmesine ve gerilimlerde dengesizliğe neden olabileceği belirlenebilir.

Sonuç olarak tasarımı yapılan PAGF başarılı bir şekilde akım harmoniklerini filtrelemiştir. Bununla birlikte uzun süreli ve çeşitli yük koşulları için harmonik ölçümleri yapılarak baskın olan harmoniklere göre pasif güç filtresi tasarımı da yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] M. Özkaya and T. Tüfekçi, “Aydınlatma Tekniği, Birsen Yayınevi,” *İstanbul Tek. Üniversitesi, Elektr. Fakültesi, İstanbul*, 2004.
- [2] B. T. Erginöz and H. Pehlivan, “Enerji Kalitesi Problemleri, Çözüm Önerileri Ve Uygulanan Standartlar,” *Ejovoc (Electronic J. Vocat. Coll.*, vol. 5, no. 4, pp. 42–47.
- [3] S. B. Efe, “Güç sistemlerinde harmonikler ve harmoniklerin analizi.” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnönü Üniversitesi, Malatya, 2006.
- [4] R. Gazete, “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik.” 2006.
- [5] S. Rüstemli, M. S. Cengiz, and F. Dinçer, “Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Aktif Filtre Kullanılarak Yok Edilmesi ve Simülasyonu,” *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilim. Derg.*, vol. 2, no. 1, pp. 30–38, 2013.
- [6] S. Rüstemli, E. Okuducu, and S. B. Efe, “Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Pasif Filtre Kullanılarak Azaltılması Ve Simülasyonu.” Accessed: Aug. 15, 2024. [Online]. Available: https://www.emo.org.tr/ekler/044fbf5ab1d9724_ek.pdf
- [7] M. S. Cengiz, “Enerji sistemlerinde harmoniklerin azaltılması ve simülasyonu.” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, 2011.
- [8] B. Tabak and M. Yalçın, “Elektrik güç sistemlerinde enerji kalitesi,” *Sak. Univ. J. Sci.*, vol. 8, no. 1, pp. 52–54, 2004.
- [9] İ. Aslan and S. Türkdoğan, “Bir Kamu Eğitim Binasının Enerji Kalitesinin ve Verimliliğinin Analizi ile Geliştirilmesine Yönelik Öneriler,” *Int. Conf. Eng. Nat. Soc. Sci.*, vol. 1, pp. 643–651, Apr. 2023, Accessed: Jul. 27, 2024. [Online]. Available: <https://as-proceeding.com/index.php/icensos/article/view/519>
- [10] M. Bayrak, E. M. Yeğin, and M. Z. Bilgin, “Elektrik Güç Sistemlerinde Enerji Kalitesi,” *Türkiye*, vol. 7, pp. 3–8.
- [11] M. Şahin, “Güç sistemlerinde enerji kalitesini etkileyen harmoniklerin incelenmesi,” *Erzincan Univ. J. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 199–218, 2014.
- [12] M. Sarı, “Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Avşar Kampüsünün enerji kalitesinin incelenmesi.” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, 2017.
- [13] S. Rustemli, B. Kocaman, and S. Tekev, “Güç Sisteminde Oluşan Harmonik ile Ara Harmoniklerin Modellenmesi ve Simülasyonu,” *EMO Bilim. Dergi*, vol. 12, no. 1, pp. 67–79, 2022.
- [14] S. B. Efe and B. Kocaman, “Harmonic analysis of a wind energy conversion system with small-scale wind turbine,” *Int. J. Energy Appl. Technol.*, vol. 5, no. 4, pp. 168–

- 173, 2018, doi: 10.31593/ijeat.441563.
- [15] S. B. Efe, “Endüstriyel Tesisler için Aktif ve Pasif Harmonik Filtre Uygulaması,” *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilim. Derg.*, vol. 5, no. 1, p. 0, Jun. 2016, doi: 10.17798/beufen.16476.
- [16] S. Rustemli, M. A. Satıcı, G. Şahin, and W. van Sark, “Investigation of harmonics analysis power system due to non-linear loads on the electrical energy quality results,” *Energy Reports*, vol. 10, pp. 4704–4732, 2023.
- [17] S. Rüstemli and M. S. Cengiz, “Active filter solutions in energy systems,” *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 23, no. 6, pp. 1587–1607, 2015.
- [18] S. Rüstemli and S. Tekev, “Güç Sistemindeki Harmoniklerin Bilgisayar Destekli Modellenmesi,” *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Derg.*, vol. 12, no. 5, pp. 711–718, 2021.
- [19] A. Dolara and S. Leva, “Power quality and harmonic analysis of end user devices,” *Energies*, vol. 5, no. 12, pp. 5453–5466, 2012.
- [20] H. Shah, “Harmonics-A power quality problem,” *Electr. Electron.*, 2005.
- [21] M. J. Ghorbani and H. Mokhtari, “Impact of Harmonics on Power Quality and Losses in Power Distribution Systems.,” *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 5, no. 1, 2015.
- [22] G. J. Wakileh, *Power systems harmonics: fundamentals, analysis and filter design*. Springer Nature, 2019.
- [23] P. S. Harmonics, “Power system harmonics: an overview,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, no. 8, pp. 2455–2460, 1983.
- [24] EPDK (T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu), “EPDK | Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu,” Doğal Gaz Piyasası Yıllık Sektör Raporu Listesi. Accessed: Jul. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-6740/elektrik-dagitimi-ve-perakende-satisina-iliskin-hizmet-kalitesi-yonetmeligi>
- [25] V. Serov, *Fourier series, Fourier transform and their applications to mathematical physics*, vol. 197. Springer, 2017.
- [26] H. P. Hsu, “Schaum’s outlines signals and systems,” 2014.
- [27] W. M. Grady and S. Santoso, “Understanding power system harmonics,” *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 21, no. 11, pp. 8–11, 2001.
- [28] J. Arrillaga and N. R. Watson, *Power system harmonics*. John Wiley & Sons, 2004.
- [29] M. Bozabalı, “Üç fazlı sistemlerde paralel aktif güç filtre tasarımı ve simülasyonu.” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2009.
- [30] S. Rüstemli, E. Okuducu, and S. B. Efe, “Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Pasif Filtre Kullanılarak Azaltılması Ve Simülasyonu”., www.emo.org.tr, 22.07.2024.
- [31] L. Motta and N. Faundes, “Active/passive harmonic filters: Applications, challenges & trends,” in *2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power*

- (*ICHQP*), IEEE, 2016, pp. 657–662.
- [32] B. Badrzadeh, K. S. Smith, and R. C. Wilson, “Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 2, pp. 973–983, 2011.
- [33] N. M. Rustami, “Alçak gerilim şebekeleri için üç fazlı aktif filtre tasarım ve benzetimi.” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2022.
- [34] H. Akagi and A. Nabae, “The p-q theory in three-phase systems under non-sinusoidal conditions,” *Eur. Trans. Electr. Power*, vol. 3, no. 1, pp. 27–31, 1993.
- [35] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. John Wiley & Sons, 2017.



ÖZGEÇMİŞ

doğdum. Orta öğrenimimi Muş Lisesinde tamamladım yılında kazandığım Pamukkale Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde. yılında mezun oldum. yılında Muş Alparslan Üniversitesi'nde çalışmaya başladım ve öğretim görevlisi olarak bu görevime devam etmekteyim. Aynı zamanda Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitimimi sürdürmekteyim.

