

**T.C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTME YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ
VE BİR AKTİF GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTME DEVRESİNİN
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

YEŞİM ŞENOL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. BAKİ KOYUNCU**

İSTANBUL, 2019

Yeşim ŞENOL tarafından hazırlanan "GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTME YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ VE BİR AKTİF GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTME DEVRESİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İstanbul Gelişim Üniversitesi Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Baki KOYUNCU

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Gelişim Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum



Başkan : Prof. Dr. Baki KOYUNCU

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Gelişim Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum



Üye : Prof. Dr. Faruk BAKAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yıldız Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum



Üye : Dr. Öğr. Üys. Hakan AKÇA

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Gelişim Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum



Tez Teslim Tarihi:

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Dr. Öğr. Üys. Ümit ALKAN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

ETİK BEYAN

İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde 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 çalışmada 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.



Yeşim ŞENOL

(2308/2019)

GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTME YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ VE
BİR AKTİF GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTME DEVRESİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Yeşim ŞENOL

İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2019

ÖZET

Gelişmekte olan ülkelerde enerji ihtiyacı her yıl artmaktadır. Güç sistemlerinde enerjinin verimli kullanılması ve sistem kapasitesinden maksimum fayda sağlanması için gerilim ve akım arasındaki faz açısının mümkün olduğunca küçük olması, başka bir deyimle bu açının kosinüsü olan güç faktörünün 0,95 ilâ 1,00 arasında bir değerde tutulması istenir. Ancak günümüzde çoğu tüketici cihaz, manyetik enerji gereksiniminden vb. sebeplerden dolayı endüktif enerjiye de ihtiyaç duymakta, güç faktörü (GF) değerleri 0.6 ilâ 0.8 arasında değişmektedir. Bu nedenle de dağıtım şebekesinden başlayarak iletim sistemi ve üretim santrallerine kadar tüm elektrik sistem bileşenlerinin kapasitesinden yeterince yararlanılamamaktadır. Çünkü üretilen görünür gücün önemli bir kısmı reaktif güç olarak harcanmaktadır. Ayrıca gerilim düşümlerine, enerji kayıplarına da neden olmaktadır. Öte yandan günümüzde elektronik devreler içeren cihazların daha çok kullanılması ve bu tür yüklerin hem güç faktörlerinin düşük ve hem de harmonik akım içermesi nedeniyle sorun karmaşık hale gelmiştir. Bu çalışmada öncelikle güç faktörünün önemi, teknik özellikleri, makro ve mikro ekonomik ülke kalkınmasına faydaları, analiz yapılarak araştırılmıştır. Çalışmada ayrıca güç faktörü düzeltme yöntemleri pasif ve aktif yöntemler olmak üzere ayrı ayrı incelenerek birbirlerine göre üstünlükleri araştırılmıştır. Çalışmada ayrıca 150 W gücünde anahtarlama modlu bir güç kaynağı için sürekli iletim modunda çalışan boost tipi güç faktörü düzeltme (GFD) devresi tasarlanarak MATLAB/Simulink Toolbox'da simüle edilmiş ve GF'nin 0,99 olduğu görülmüştür. Çalışmanın son bölümünde söz konusu GFD devresi gerçekleştirilmiş ve test edilerek simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve giriş gerilimine bağlı olarak GF'nin %97 ilâ %99 arasında olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca gerçekleştirilen GFD devresinin THD analizi yapılmış ve IEC 61000-3-2'ye uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Güç faktörü, GF düzeltme yöntemleri, sürekli iletim modu, boost tipi, aktif GFD devresi

Sayfa adedi : 78

Danışman : Prof. Dr. Baki KOYUNCU

ANALYZING OF POWER FACTOR CORRECTION METHODS AND
REALIZING OF A ACTIVE POWER FACTOR CORRECTION CIRCUIT

(M.Sc. Thesis)

Yeşim ŞENOL

ISTANBUL GELİŞİM UNIVERSITY

THE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2019

ABSTRACT

Energy needs in developing countries are increasing every year. For efficient use of energy in power systems and maximum benefit from system capacity, it is desired that the phase angle between the voltage and current is as small as possible, in other words keeping the power factor (PF) between 0.95 and 1.00. But nowadays, most devices need inductive reactive energy and PF values vary between 0.6 and 0.8. For this reason, the capacity of all electrical system components, from distribution network to transmission system and power plants, cannot be utilized sufficiently. Because a significant part of the apparent power produced is spent as reactive power. It also causes voltage drops and energy losses. On the other hand, nowadays the problem is complicated by the use of devices containing electronic circuits and the fact that such nonlinear loads have both low PF's and harmonic currents. In this study, first of all, the importance of power factor, technical features, benefits of macro and microeconomic are investigated. In addition, power factor correction (PFC) methods were examined separately and passive and active methods were investigated. In addition, in the study, the boost type PFC circuit, which is running in continuous conduction mode for a 150 W switching mode power supply, is designed and simulated in MATLAB/Simulink Toolbox and calculated PF value is 0.99. In the last part of the study, this PFC circuit was performed and tested and compared with the simulation results and it was found that the PF is between 97% and 99% depending on the input voltage. In addition, the THD analysis of the PFC circuit was performed and it was concluded that it was compliant with IEC 61000-3-2.

Key words : Power factor, PF correction methods, continuous conduction mode, boost type, active PFC circuit

Page number : 78

Supervisor : Prof. Baki KOYUNCU, PhD.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde katkılarından dolayı, tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Baki KOYUNCU hocama teşekkürü borç bilirim. Deneylerin yapılmasında laboratuvarlarındaki cihaz, donanım ve ölçü aletlerini kullanmama izin veren ve aynı zamanda Üniversitemiz Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü'nün dış paydaşı olan NETES Mühendislik ve Dış Ticaret A.Ş. yetkililerine ne kadar teşekkür etsem azdır.

Çalışmalarında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme de çok teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. GÜÇ FAKTÖRÜNÜ DÜZELTMENİN TEKNİK VE EKONOMİK FAYDALARI	8
2.1. Güç Faktörünün Tanımı Ve Özellikleri	9
2.2. Güç Faktörünün Düzeltilmesinin Teknik ve Ekonomik Faydaları	13
2.2.1. Devlete olan faydaları	16
2.2.2. Üretim, iletim ve dağıtım sistemine olan faydaları	19
2.2.3. Tüketicilere olan faydaları.....	20
2.3. Güç Faktörünün Düzeltilmesi İle İlgili Yasal Düzenlemeler.....	21
3. GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTME (GFD) YÖNTEMLERİ	25
3.1. Pasif GFD Yöntemleri	25
3.1.1. Generatörlerle GFD yöntemi.....	25
3.1.2. Senkron kompensatörlerle GFD yöntemi.....	26
3.1.3. Sabit ve değişken kondansatörlerle GFD yöntemi.....	26
3.1.4. Seri kapasitörlerle GFD yöntemi	29
3.1.5. Şönt reaktörlerle GFD yöntemi	30
3.2. Harmoniklerin GFD Yöntemleri Üzerine Etkileri.....	31
3.3. Filtreler Kullanan GFD Yöntemleri	35
3.3.1. Pasif filtreler kullanan GFD yöntemi.....	35

3.3.2. Aktif GFD Yöntemleri.....	36
3.3.2.1. Kritik iletim modlu (KİM) GFD yöntemi	38
3.3.2.2. Frekans kenetlemeli kritik iletim modlu (FKKİM) GFD yöntemi.....	39
3.3.2.3. Sürekli iletim modlu (SİM) GFD	40
4. SÜREKLİ İLETİM MODLU BİR AKTİF GFD DEVRESİNİN TASARLANMASI	43
4.1. Genel Açıklama	43
4.2. Devre Topolojisinin Açıklanması.....	45
4.3. Hesaplamalar ve Simülasyon Sonuçlarının Analizi	46
5. SÜREKLİ İLETİM MODLU BİR AKTİF GFD DEVRESİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	60
5.1. Devre Elemanlarının Seçilmesi	60
5.2. Devre Montajı.....	61
5.3. Testler, Performans Analizi ve Simülasyon Sonuçlarıyla Karşılaştırma.....	61
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	68
KAYNAKLAR	71
EKLER.....	74
EK-1: GFD UYGULAMA DEVRESİNE İLİŞKİN AYRINTILAR	75
ÖZGEÇMİŞ	79

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Santral ilk yatırım birim maliyetleri.....	17
Çizelge 2.2. Ülkemizde kurulu güçlerin yıllara göre değişimi	17
Çizelge 2.3. Gücü 75 W ilâ 600 W arasında olan D sınıfı donanım izin verilen en büyük harmonik değerler	23
Çizelge 2.4. AG ve OG şebekeleri için izin verilen en büyük harmonik % değerleri	23
Çizelge 2.5. Şebekeler için izin verilen en büyük harmonik % değerleri.....	24
Çizelge 4.1. Hesaplanan akım, gerilim, güç, PF ve THD değerleri.....	49
Çizelge 5.1. Ölçülen akım, gerilim, güç, PF ve THD değerleri	63
Çizelge 5.2. Ölçülen ve hesaplanan PF değerlerine ilişkin mutlak ve bağıl hatalar.....	64
Çizelge 5.3. Tasarlanan GFD için W başına izin verilen en büyük harmonik değerleri	66
Çizelge 5.4. Tasarlanan GFD için izin verilen en büyük harmonik akım değerleri.....	

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kompleks düzlemde empedans diyagramı	10
Şekil 2.2. a) Kapasitif akım vektörü b) Endüktif akım vektörü.....	11
Şekil 2.3. Akımın aktif ve reaktif bileşenleri	11
Şekil 2.4. Kompleks düzlemde güçler	12
Şekil 2.5. Ülkemizde kurulu gücün kamu ve özel sektör dağılımı	19
Şekil 3.1. a)Yıldız bağlı kondansatörler b) Üçgen bağlı kondansatörler.....	28
Şekil 3.2. Yıldız bağlı şönt reaktör	30
Şekil 3.3. Anahtarlama modlu GFD çip ile denetlenen bir dönüştürücü.....	37
Şekil 3.4. KİM GFD yönteminde hat endüktans akımı	38
Şekil 3.5. Kesintili iletim modlu GFD durumunda hat endüktans akımı.....	39
Şekil 3.6. Sürekli iletim modlu GFD durumunda hat endüktans akımı.....	40
Şekil 4.1. Tasarlanacak olan devrenin genel bağlantı şeması ve NCP1654 iç yapısı.....	45
Şekil 4.2. Endüktans akımı, referans gerilim ve sinyaller	46
Şekil 4.3. Simülasyon devresi.....	48
Şekil 4.4. Çıkış gerilimi ve çıkış akımının zamana göre değişimi.....	50
Şekil 4.5. 85 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri	50
Şekil 4.6. 100 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri	51
Şekil 4.7. 115 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri	51
Şekil 4.8. 130 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri	52
Şekil 4.9. 145 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri	52
Şekil 4.10. 160 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri	53
Şekil 4.11. 175 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri	53

Şekil 4.12. 190 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri	54
Şekil 4.13. 205 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri	54
Şekil 4.14. 220 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri	55
Şekil 4.15. 230 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri	55
Şekil 4.16. $I_{in} = f(V_{in})$ eğrisi.....	57
Şekil 4.17. $P_{in} = f(V_{in})$ eğrisi	58
Şekil 4.18. Güç faktörünün giriş gerilimine bağımlılık eğrisi	58
Şekil 4.19. THD'nin giriş gerilimine bağımlılık eğrisi.....	59
Şekil 5.1 GFD devresinin deney prensip şeması.....	62

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Bir dizüstü bilgisayarın çektiği akımın harmonik analizi	32
Resim 3.2. Bir dizüstü bilgisayarın çektiği akımın dalga şekli	32
Resim 5.1. En büyük THD değerleri	62
Resim E.1. GFD devre elemanları	75
Resim E.2. a) NCP 1654 (Yedekleri ile birlikte), b) Yük direnci	75
Resim E.3. Montaj sonrası GFD devresi ön ve arka görünüş	76
Resim E.4. Deneyde kullanılan AA güç kaynağı, yardımcı DA kaynağı ve osiloskop...	77
Resim E.5 Deneyde kullanılan ölçü aletleri a) Fluke 435 b) Fluke 87 V c) Fluke 28 II.	77
Resim E.6 Deney devresi genel görünümü	78

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
DC (DA)	Doğru akım
AC (AA)	Alternatif akım
V	Volt
A	Amper
S	Kompleks güç
S (S)	Görünen (görünür) güç (Kompleks gücün genliği)
P	Aktif güç
Q	Reaktif güç
VA	Volt Amper (Kompleks güç ve görünen güç birimi)
W	Watt
VA_r	Volt Amper reaktif (endüktif durum için)
VAR	Volt Amper reaktif (kapasitif durum için)
φ	Faz açısı
cos φ	Güç Faktörü
PF	Güç faktörü
U	Gerilim, gerilim fazörü
U_a	Gerilimin aktif bileşeni
U_r	Gerilimin reaktif bileşeni
I	Akım, akım fazörü
U_a	Akımın aktif bileşeni
U_r	Akımın reaktif bileşeni
Z	Empedans [Ω]
X_L	Endüktif reaktans [Ω]
X_C	Kapasitif reaktans [Ω]
*	Fazör eşlenik işareti
R	Direnç [Ω]
L	Endüktans [L]

C	Kapasitans [F]
w	Açısal frekans
f	Frekans [Hz]
ΔU	Mutlak gerilim düşümü
%e	Bağıl gerilim düşümü
D	Doluluk oranı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AA (AC)	Alternatif akım
DA (DC)	Doğru akım
GF	Güç faktörü
GFD (PFC)	Güç faktörü düzeltme, güç faktörü düzeltici devre
THB (THD)	Toplam harmonik bozulma (distorsiyon)
AG	Alçak gerilim
YG	Yüksek gerilim
OG/AG	Orta gerilim/Alçak gerilim
IC	Entegre devre
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
PWM	Darbe genişlik modülatörü

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi; sonsuz küçük parçalara bölünebilmesi, temiz, sürdürülebilir ve uzak mesafelere ışık hızı ile iletilebilir olması özelliklerinden dolayı diğer enerji türlerine nazaran daha üstündür. Günlük hayatımızda ve endüstrilerde vazgeçemediğimiz bir enerji türüdür ve enerjiye olan talep her yıl artmaktadır. Elektrik enerjisine olan talep artışı büyümekte ve gelişmekte olan ülkelerde daha hızlı artmakta ve bu da elektrik üretim, iletim ve dağıtım sektörlerinde büyük yatırımlara gereksinim duyulmasına neden olmaktadır. Ülkemizde de enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Öte yandan güç sistemlerinde yeni enerji gereksinimlerinin düşük maliyetle karşılanması sağlanırken mevcut kapasiteyi de en verimli şekilde kullanmak gerekir.

Elektrik sistemlerinin kalite parametreleri arasında enerjinin sürekli, sürdürülebilir ve temiz enerji olması, gerilim, frekans ve harmoniklerin kendi toleransları dahilinde sabit tutulması, güç faktörünün olabildiğince 1'e yaklaştırılması, trifaze şebekelerde dengeli yük şartlarının sağlanması gerekmektedir. Güç faktörünün düzeltilmesi ise elektrik enerjisinin verimli kullanılması için en önemli yollardan birisidir. Güç sistemlerinde enerjinin verimli kullanılması ve sistem kapasitesinden maksimum fayda sağlanması için gerilim ve akım arasındaki faz açısının mümkün olduğunca küçük olması, başka bir deyimle bu açının kosinüsü olan güç faktörünün 0,95 ilâ 1,00 arasında bir değerde tutulması istenir. Ancak günümüzde çoğu tüketici manyetik enerji gereksiniminden veya sinüsoidal olmayan akım çekilmesi vb. sebeplerden dolayı güç faktörü değerleri bu tür cihazlarda 0.6 ilâ 0.8 arasında değişmektedir. Bu nedenle de dağıtım şebekesinden başlayarak iletim sistemi ve üretim santrallerine kadar tüm elektrik sistem bileşenlerinin kapasitesinden yeterince yararlanılamamaktadır. Çünkü üretilen görünür gücün önemli bir kısmı reaktif güç olarak harcanmaktadır.

Bu çalışmada öncelikle güç faktörünün önemi, teknik özellikleri, güç faktörünü düzeltmenin elektrik üretim, iletim ve dağıtım sistemine olan teknik katkıları, makro ve mikro ekonomik faydaları, tüketiciler açısından önemi, tarife yapıları bakımından analiz yapılarak araştırılmıştır. Çalışmada ayrıca güç faktörü düzeltme yöntemleri incelenerek birbirlerine göre üstünlükleri araştırılmış ve anahtarlamalı bir güç kaynağı için sürekli

iletim modlu boost tipi güç faktörü düzeltme (GFD) yöntemi incelenmiştir. MATLAB/SIMULINK Toolbox'da simüle edilerek sonuçlar analiz edilmiş ve son bölümde 150 W gücünde bir GFD tasarlanarak gerçekleştirilmiş ve test edilerek gerekli doğrulamalar deneylerle yapılmıştır.

Reaktif güç kompanzasyonu ile ilgili çalışmalar 1900'lü yılların ilk çeyreğinde sabit kondansatörlerle başlamış, ikinci çeyreğinde reaktif güç rölelerinin geliştirilmesi ile reaktif güç kontrol edilmeye başlanmış olup aynı yüzyılın son çeyreğinde güç elektroniği devre elemanlarının ve yarı iletken anahtarlama işlemlerinin endüstriye girmesiyle birlikte statik kompanzatorler kullanılmaya başlamıştır. Bu konuda halen çalışmalar devam etmektedir. Güç faktörünün kontrolü ve düzeltilmesi konularında yapılan önceki çalışmalar aşağıda özet olarak verilmiştir.

Otlunun (1998) çalışması, güç faktörünün 0,95 değerine çıkartılması halinde Ulusal Elektrik Şebekesinde hat kayıplarının azaltılması, kompanzasyon panolarının hesaplanması, aboneye sağlayacağı ekonomik faydalar, bakım, montaj ve işletmeciliği konularını içermektedir. Söz konusu çalışmada şehir şebekesi güç faktörü $\cos \phi$ 'nin 0,60'ın altında olduğunu gösterdiği, güç faktörünün düşük olmasının alıcıdaki verimi düşürdüğü gibi reaktif tüketimin artmasına neden olduğu vurgulanmaktadır. Bu durumun ulusal elektrik şebekesindeki aktif enerji kayıplarının artmasına sebep olduğu ve enerji kayıplarının minimuma indirilmesi ve alıcıların verimli çalışmalarının sağlanması için elektrik abonelerine kompanzasyon yaparak güç faktörünün 0,60'lardan 0,95'lere çıkartılmasının sağlanması gerektiği incelenmektedir [1].

Çakırın (2000) çalışmasında, sürekli bağlı kondansatörü bulunan endüksiyon motorunda oluşan anormal durum ve güç faktörü işlenmiştir. Yük motoru sürdüğünde, yüksek ataletli yüklerin bağlı bulunduğu motorlarda kendinden uyarım durumu oluşturulmuştur. Çekvalflerin çalışmadığı durumda, su pompası istasyonlarında akan suyun, motoru ters yönde çevirmeye başladığını ve kondansatörlerin büyüklüğüne göre de kendinden uyarım durumunu oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu uyarım seviyesi motorun dayanabileceği sargı geriliminin üzerine çıkabildiğinden dolayı yüksek gerilimleri önlemek amacıyla, basit bir statik koruma devresinin fazlardan birine veya ikisine takılması önerilmiştir. Söz konusu devre fazların birine veya ikisine statik bir anahtarla direnç bağlanması şeklinde çalışmaktadır. Uyarımın kaybolmasını ve kalıcı mıknatıslanmanın yok edilmesini

sağlayacak sınırlar direnç değerleri için belirlenmiştir. Bu sınırlar içinde seçilen uygun bir direnç değeri, hem uyarılma kaybına neden olarak hem de artık manyetizmayı tamamen yok ederek, kendini uyarıma karşı güvenli bir koruma mekanizması oluşturmaktadır [2].

İşen (2005) çalışmasında; şebekeden çekilen akımın aktif olarak şekillendirilmesi için kullanılan üç fazlı çeşitli doğrultucu devrelerini çıkış gerilimi ve çıkış gücü gereksinimlerine göre sınıflandırılarak incelemektedir. Yapılan incelemelerde devrelerin topolojileri, çalışma prensipleri, klasik yöntemlere göre farklılıkları ile simülasyon ve deneysel sonuçlar belirtilmektedir. Çalışmada yüksek güç faktörü özelliği olan üç fazlı AC-DC dönüştürücülerin sınıflandırılması yapılmaktadır. Dönüştürücüler tek yönlü ve iki yönlü güç akışı olarak iki ayrı başlıkta toplanmaktadır. Kendi içlerinde ise yükseltici (boost), düşürücü (buck), yükseltici-düşürücü (boost-buck), çok seviyeli (multilevel) ve çok darbeli (multipulse) dönüştürücüler olarak beş kısma ayrıldığı belirtilmektedir. Tek yönlü yüksek güç faktörü özelliği olan AC-DC dönüştürücülerde güç akışının sadece şebekeden yüke doğru olduğu ve bu nedenle tek yönlü dönüştürücü adını aldığı belirtilmektedir. İki yönlü yüksek güç faktörü özelliği olan AC-DC dönüştürücülerde güç akışı iki yönlü olduğu, başka bir deyişle gücün şebekeden yüke doğru akabildiği gibi aynı zamanda da özellikle motor uygulamalarında olduğu gibi yük tarafından şebekeye doğru gerektiğinde ters yönde de akabildiği belirtilmiştir. Yani hem şebekeden yüke hem de yükten şebekeye doğru enerji akışı gerçekleşebilmekte olduğuna vurgu yapılarak; üç fazlı AC-DC dönüştürücülerin temel özellikleri, aynı kategoride yer alan diğer topolojilere göre farklılıkları, avantajları ve dezavantajları da işlenmiştir [3].

Akın (2008) çalışmasında, son yıllarda daha da sık kullanılan güç elektroniği sistem ve cihazlarının şebekeden çektiği harmonikli akımların şebekeyi bozmakta ve güç faktörü değerini düşürerek şebekeyi gereksiz yere yüklemekte olduğunu araştırmıştır. Harmonikler, aynı şebekeden beslenen diğer alıcıların çalışmasını da olumsuz olarak etkilemekte olduğundan dolayı harmonik standartlarıyla ilgili yönetmelikler her geçen gün gelişmektedir. Güç faktörünün değerini kayma faktörü ile şebekeden çekilen akımdaki harmonik bozulmanın çarpımına bağlı olduğu araştırılmıştır. Kayma faktörü, akım ile gerilim arasındaki faz farkından ortaya çıkarmaktadır. Bu sebepten güç faktörünü iyileştirmek için yapılması gereken, şebekeden çekilen akımdaki harmonik içeriği azaltmaktır. Geliştirilen yumuşak anahtarlamalı tek fazlı güç faktörü düzeltme devresinde, diyot köprüsünden sonra yumuşak anahtarlamalı yüksek çıkışlı ZVT-ZCT PWM

dönüştürücü kullanılmıştır. Algoritmalar ile kontrol edilen dönüştürücünün, şebekeden düşük harmonikli sinüzoidal akımın çekmesi sağlanmıştır. Geliştirilen dönüştürücü devresi ile, ana anahtar ZVT ile iletme ZCT ile kesime girmektedir. Üzerinde hiçbir ilave akım veya gerilim de oluşmamaktadır. Yardımcı anahtar ZCS ile iletme ve ZCS ile kesime girdiğinde anahtarın üzerinde hiçbir gerilim stresi oluşmaz. Yardımcı anahtarın üzerinden akacak olan rezonans akımının bir kısmı kuplajlı endüktans ile çıkışa yönlendirilmektedir. Yardımcı koldaki akım stresi azaltılmıştır. Bu topoloji kullanılarak yapılan devrede sistemdeki toplam verim %98 değerini almaktadır ve güç faktörü de 0.99 değerinde olmaktadır. Şebekeden ise sinüzoidal bir akım çekilmektedir [4].

Gürbüz (2012) çalışmasında; güç LED'lerinin geleneksel aydınlatma kaynaklarına göre uzun ömür, dayanıklılık ve yüksek verimleri nedeni ile aydınlatma sektöründe yaygın olarak kullanıldığını belirtmiştir. Ancak güç LED'lerinin özel sürücü devrelerine ihtiyaç duyduklarından dolayı girişlerinde şebekeden harmonikli akımlar çeken ve güç faktörünü düşüren AC-DC dönüştürücülere sahip olduğuna işaret etmiştir. AC-DC dönüştürücüler yerine aktif PFC'li AC-DC dönüştürücüler kullanılarak şebekenin güç faktörünün 1'e yaklaştırılacağı; böylelikle şebekeden harmonik içeriği azaltılmış, sinüs'e yakın akımlar çekilerek güç kalitesi düzeltilebileceğini ifade etmiştir. Güç faktörü düzeltmeli doğrultucu ile şebekeden çekilen harmonikli akımların harmonik içeriğini azaltan ve giriş güç faktörünü düzelterek güç LED'lerini süren PFC'li iki farklı devre; boost dönüştürücülü harici ve flyback dönüştürücülü dahili tasarlanmış ve pratik olarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan ve gerçekleştirilen her iki devrenin de PSpice ortamında simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon ve deneysel sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışılan güç seviyesi için dahili PFC'li güç LED sürme devresinin harici PFC'li devreye göre daha düşük harmonik ve daha yüksek güç faktörü sağladığı gösterilmiştir [5].

Erdem (2013) yılındaki çalışmasını, alternatif güç sistemlerinde iletilebilir gücü artırmak ve kayıpları azaltmak adına optimal güç kompanzasyonu uygulaması üzerine yapmıştır. Tasarım olarak güç katsayısını yükseltmek amacıyla aktif filtreleme göre daha ekonomik özelliğe sahip olan pasif filtreleme güç kompanzasyonu sistemi kullanılmış ve bir endüstriyel tesiste bulunan büyük güçlü motorlar üzerinde uygulanmıştır. Üç farklı uygulama işlemi ile; kompanzasyonsuz, kompanzasyonlu ve harmonik filtrelili kompanzasyonlu olmak üzere sisteme ait optimal kompanzasyon tasarım işlemi yapılmıştır. Gerçekleştirilen tasarımlar içerisinde en uygun olan kompanzasyon işlemlerine

göre elde edilen sonuçlarda harmonik filtreli güç kompanzasyonunun hem tüketici hem de dağıtım şirketleri açısından önemli üstünlüklere sahip olduğu sunulmuştur [6].

Büyükkatırcı (2017) yılında çalışmasında, günümüzde yaygın kullanılan yarı iletken elemanların ve bunun paralelinde güç elektroniği cihazlarının kullanımının artmasıyla birlikte harmonik akımların şebekeye etkileri göz ardı edilemeyecek seviyeye geldiğini ifade etmektedir. Yapısında AC-DC dönüştürücü bulunan kesintisiz ve anahtarlama güç kaynakları, şarj ve depolama sistemleri, motor sürücüleri, endüksiyonla ısıtma ve elektronik balast gibi birçok uygulamanın yaygın olması çeşitli güç faktörü düzeltme yöntemi uygulanmasına rağmen güç faktörü düzeltmeli AC-DC dönüştürücüleri daha önemli kılmıştır. Çalışmada güç faktörü kavramı ve bazı güç faktörü düzeltme yöntemleri açıklanmış, güç faktörünün bozulmasına sebep olan harmonikler ve bu harmonikleri sınırlayan uluslararası standartlar incelenmiştir. Tek fazlı yüksek frekanslı AC-DC dönüştürücü tabanlı güç faktörü düzeltme devresinin tasarımı, simülasyonu ve uygulaması anlatılmış olup tasarlanan devrenin simülasyon ve deney çalışmaları yardımıyla güç faktörü, harmonik ve verim konularının analizi yapılmıştır [7].

Çavdar (2017) yılında çalışmasında, günlük hayatta en çok kullanılan alternatif akım ve gerilimin doğru akım ve gerilime dönüştürüldüğü, AC-DC güç dönüştürücü devrelerin şebekeye olan bağlantıları, tam köprü diyot doğrultucuları üzerinden yapılmakta olduğu ifade edilmiştir. Tek fazlı AC-DC güç dönüştürücülerinde tam köprü yapı bulunduğundan dolayı, sadece diyotlardan oluştuğu için doğrultma işlemi esnasında dışarıdan herhangi bir kontrol ve müdahale durumu söz konusu olmadığı sunulmuştur. Tek fazlı tam köprülü AC-DC dönüştürücü devreleri, uygulamalarda genellikle düşük güç kalitesine sahip olmaları sebebiyle tam köprü yapının kendi başına lineer olmayan bir yük grubu gibi davranması ve dönüştürücünün giriş kısmında büyük miktarlarda harmonikler üretilmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Yüksek güç gerektiren uygulamalarda, tam köprü yapı üzerinde ısınma problemleri de baş göstermektedir. Tam-köprü yapıdan kaynaklanan bu sorunları gidermek ve daha verimli bir güç dönüşümü işlemi yapabilmek adına aktif güç faktörü düzeltme devreleri kullanılmaktadır. Söz konusu devrelerin esas amacı, dönüşüm işlemi esnasında şebeke tarafındaki güç faktörü değerini bire yaklaştırmaktır. Aktif güç faktörü düzeltme devrelerinde ise bu işlemin yapılabilmesi için tam köprü yapıdan sonra DC-DC dönüştürücü devresine ihtiyaç olmaktadır. Genellikle DC-DC dönüştürücü devreleri, gerilim yükseltme özelliğine sahiptirler. Tek fazlı aktif güç faktörü düzeltmeli

yükselten AC-DC dönüştürücü devrelerinde güç faktörü düzeltme işlemi, DC-DC dönüştürücüde bulunan yarı iletken anahtarın yüksek frekanslarda anahtarlanması ile yapılabilmektedir. İşlem yapılırken giriş akımı, en az üç tane yarı iletken eleman üzerinden geçerek çıkışa erişebilmektedir. Bu sebeple de iletim kayıpları artmakta, verimlilik düşmektedir. Yüksek güç uygulamalarında devrelerin girişinde tam köprü yapı bulunduğundan dolayı ısınma problemleri de ortaya çıkmaktadır. Yapılan çalışmada, AC-DC dönüştürücülerde tam köprü yapıdan kaynaklanan problemleri gidermek için köprüsüz topoloji kavramı ele alınmaktadır. İlaveten, köprüsüz yapıların AC-DC dönüştürücüler içerisinde nasıl kullanıldığı incelenmiş ve iletim kayıplarına olan etkisi değerlendirilmektedir. Literatürdeki köprüsüz tabanlı yükselten tür AC-DC dönüştürücü devreleri belirlenen parametreler doğrultusunda karşılaştırılarak performans ve kullanılabilirlik durumları incelenmektedir [8].

Çınar (2017) yılında yaptığı çalışmada, TV uygulamaları için üretilen ve aynı zamanda da güç kaynağı devrelerinde ihtiyaç duyulan PFC devre topolojisi araştırılmıştır. Kontrol yöntemleri çeşitli yönlerden araştırılmış ve ihtiyaç duyulan güç seviyesine göre hangi PFC topoloji ve kontrol yöntemlerinin uygun olacağı araştırılarak sunulmuştur. TV uygulamalarında en sık kullanılan PFC devreleri incelenmiş olup güç faktörü performansları ve verimleri bakımından karşılaştırılmıştır. sınır akım modlu (SIM, BCM) yükseltici dönüştürücü PFC, faz farklı çalışan paralel BCM yükseltici dönüştürücü PFC ve yarım köprü ortalama akım modlu (ACM) yükseltici dönüştürücü PFC devreleri olmak üzere üç farklı tür PFC devresi tasarlanıp detaylı simülasyonları yapılarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Söz konusu üç devrenin prototipleri üretilerek deneysel sonuçları da karşılaştırmalı olarak verilmiştir [9].

Şehirli (2017) yılında çalışmasında, enerji verimliliğinin sağlanması amacıyla yapılan son yıllardaki çalışmalar, GFD tip AA-DA dönüştürücüler üzerinde yapılan çalışmaların önemini artırdığı işlenmiştir. Tek fazlı GFD dönüştürücüler yarı iletken anahtar içerdikleri için doğrusal olmayan yapıda olmalarından kaynaklı olarak genellikle bir DA-DA dönüştürücü yapısı kullanılmaktadırlar. Bu sebeple, öncelikle temel DA-DA dönüştürücüler olan düşürücü, yükseltici, düşürücü-yükseltici dönüştürücülerin denge noktaları bulunmuştur. Tasarımları, matematiksel modellemeleri, açık döngülü uygulamaları, çıkış değişkeni olarak hem bobin akım hem de çıkış gerilimi alınarak giriş-çıkış doğrusallaştırılmalı doğrusal olmayan denetimlerinin benzetimleri gerçekleştirilmiştir.

Düşürücü, yükseltici, düşürücü-yükseltici DA-DA dönüştürücülerin küçük işaret modeli çıkarılarak transfer fonksiyonları bulunmuştur. Ayrıca tasarlanan PI denetleyicilerinin benzetimleri de yapılmıştır. Yapılan bu tasarımlar ile daha sonra GFD düşürücü, yükseltici, düşürücü-yükseltici AA-DA dönüştürücülerin PI denetimlerinin, akım ve gerilim tabanlı giriş-çıkış doğrusallaştırılmalı doğrusal olmayan denetimlerinin benzetimleri de yapılmıştır. Düşürücü-yükseltici DA-DA ve GFD AA-DA dönüştürücülerin giriş-çıkış doğrusallaştırılmalı doğrusal olmayan denetimleri de deneysel olarak uygulanmıştır. Bununla birlikte, yapılan uygulamaların ve benzetimlerin, şebeke akımı ve şebeke gerilimi dalga şekilleri, şebeke akımı, toplam harmonik bozulma (THB), güç faktörü ve yük üzerindeki gerilimleri verilmiştir [10].



2. GÜÇ FAKTÖRÜNÜ DÜZELTMENİN TEKNİK VE EKONOMİK ANALİZİ

Gerek elektrik sisteminin üretim, iletim ve dağıtım zincirinde yer alan elektrik işletme elemanlarının kendileri; gerekse de tüketim tarafında kullanılan pek çok tüketici cihaz rezistif özelliğinin yanı sıra endüktif ve/veya kapasitif reaktans özelliği de gösterirler. Buna örnek olarak elektrik üretim sisteminde yer alan generatörleri, elektrik iletim sistemindeki transformatörler, enerji iletim hatları ve yüksek gerilim kabloları vb. ile elektrik dağıtım sistemlerindeki yeraltı kabloları, enerji dağıtım hatları ve dağıtım transformatörleri gösterilebilir. Daha önemlisi ise elektrik şebekesinin sağladığı gerilime bağlanan bir tüketici cihaz şebekeden aktif gücün yanı sıra bir miktar da reaktif güç çekebilir. Bu cihazlara içinde transformatörü ve/veya asenkron motoru bulunan tüm tüketici cihazlar, akkor flâmanlı lambalar hariç flüoresan, sodyum buharlı, cıva buharlı lamba balastları, bobinler, ve bobini olan tüketiciler, ark fırınları, indüksiyon ocakları, doğrultucular, dönüştürücüler, kesintisiz güç kaynakları, elektronik anahtarlamalı diğer elektronik cihazlar, sinüsoidal olmayan akım çeken cihazlar, endüktanslı olan diğer tüm cihaz vb. örnek olarak verilebilir. Günlük hayatta karşılaştığımız cihazlardan somut örnekler vermek gerekirse; TV'ler, bilgisayarlar, müzik setleri ve benzeri elektronik donanımlar, fotokopi makinaları, çamaşır, bulaşık ve saç kurutma makinaları, kompakt flüoresan lambalar da dahil olmak üzere pek çok örnek sayılabilir. Görüldüğü üzere konut aboneleri da dahil ticari, sınai, tarımsal sulama, belediyeler gibi farklı abone grupları şebekeden reaktif enerji ve dolayısıyla reaktif akım çekmektedirler. Bu tür tüketici cihazların şebekeden çektiği akıma ilişkin akım fazörünün şebeke gerilimine ilişkin gerilim fazörü ile arasında faz açısının oluşması da cihazın yük empedansının endüktans özelliği de göstermesindedir. Gerilim ve akım fazörleri arasındaki bu açının kosinüsü (güç faktörü) güç sistemlerinde enerjinin verimli kullanılması ve güç sistem kapasitesinden daha iyi yararlanma olanağı nedeniyle büyük bir öneme sahiptir. Bu bölümde bu açının ve güç faktörünün önemi, özellikleri, bu açığı küçültmenin, başka bir deyişle güç faktörünü düzeltmenin, elektrik üretim, iletim ve dağıtım sistemine ve devlete olan faydaları ve tüketicilere olan teknik ve ekonomik faydaları incelenerek analiz edilecektir.

2.1. Güç Faktörünün Tanımı Ve Özellikleri

Herhangi bir kaynağın veya tüketicinin gerilimi ile akımı arasında kalan açıya faz açısı denir ve ϕ ile gösterilir. Bu açının 0° olması haline rezistif veya ohmik durum adı verilir. Direnç (R) elemanının akım-gerilim uç bağıntısı ohmiktir. Akım fazörünün gerilim fazöründen 90° geri fazda olması durumuna saf endüktif (lagging) durum adı verilir. Bu durum saf endüktans (L) devre elemanı uç bağıntılarında böyle bir durum arz eder. Hem direnç hem de endüktans elemanı içermesi halinde elektriksel olarak (R-L) karakterli olup faz açısı 0° ilâ 90° arasındadır ve endüktif karakterli olarak tanımlanır. Akım fazörünün gerilim fazöründen 90° ileri fazda olması durumuna saf kapasitif (leading) durum adı verilir. Bu durum saf kapasitans (C) devre elemanı uç bağıntılarında böyle bir durum arz eder. Hem direnç hem de kapasitans elemanı içermesi halinde elektriksel olarak (R-C) karakterli olup faz açısı 0° ilâ 90° arasındadır ve kapasitif karakterli olarak tanımlanır. Gerilimle akım arasında kalan açının (zaman açısı) kosinüsü ($\cos \phi$) güç faktörü (PF) (power factor) olarak tanımlanır.

Her tüketici cihaz veya abone bir **Z** empedansına sahiptir. Bu empedans fazörel bir büyüklük olup :

$$\mathbf{Z} = R + j\omega L = R + jX_L \quad (2.1)$$

Burada:

R: direnci (Ω),

L: endüktansı (Henry),

ω : $2\pi.f$ açısal frekansı,

X_L : endüktif reaktansı (Ω),

j: 90 derecelik pozitif açıyı tanımlamaktadır. ($1/j = -j$)

Empedansa, bir gerilim uygulandığında akım:

$$\mathbf{I} = \mathbf{U}/\mathbf{Z} = \mathbf{U} / (R + jX) = [(U.R) - j(U.X)] / (R^2 + X^2) \quad (2.2)$$

Empedans fazörünün genliği $|Z|$ olup, değeri $(R^2 + X^2)^{1/2}$ değerine eşittir. Akımın gerilimle aynı fazda olan bileşenine aktif bileşen (I_a) denir ve $(U.R) / |Z|^2$ değerine eşittir. Akımın

gerilimden 90 derece geri fazda olan dik bileşenine reaktif bileşen (I_r) denir ve $(U.X) / |Z|^2$ değerine eşittir.

Bazı elektrik tüketen aygıtlar ise aktif güç çekerken reaktif güç verirler. Bu tip elektrik aygıtlarına örnek ise kondansatörlerdir. Bu durumda empedans:

$$Z = R + (1/j\omega C) = R - (j/\omega C) = R - jX_c \quad (2.3)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada

C: kapasitansı (Farad),

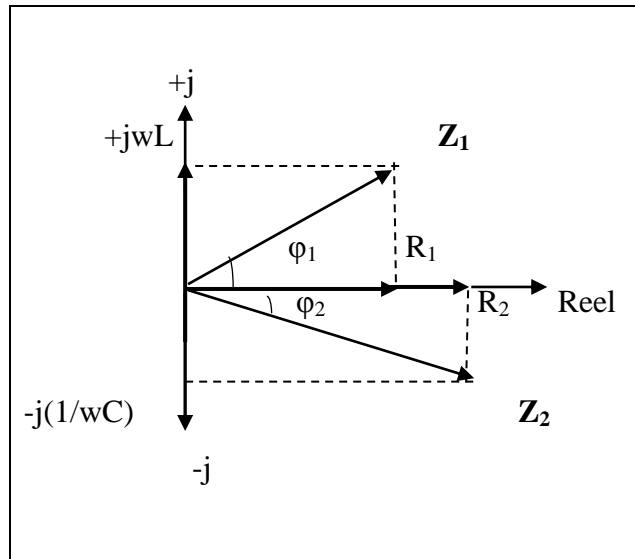
X_c : kapasitif reaktansı (Ω) tanımlamaktadır.

Reaktif güç üreten elektrik tüketim aygıtları, ϕ : 0 ilâ 90 derece arasında negatif açığa sahip olan bir vektör olarak tanımlanmaktadır.

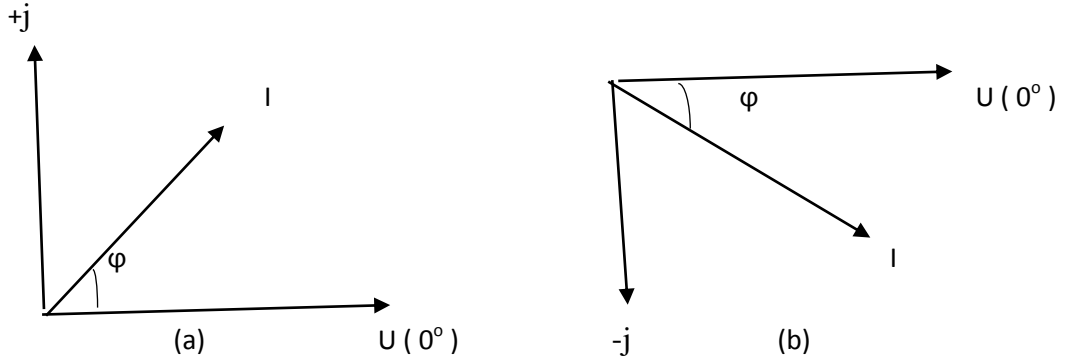
Akımın reaktif bileşeni aktif bileşenine diktir. Akım fazörü ise her iki bileşenin vektörel toplamıdır. Akımın genliği ise I_a : aktif bileşen, I_r : reaktif bileşen olmak üzere

$$I = (I_a^2 + I_r^2)^{1/2} \quad (2.4)$$

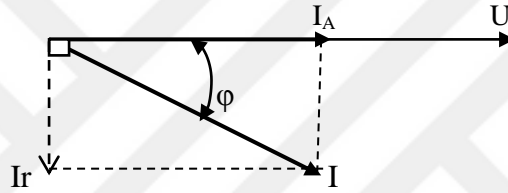
ile verilir. Şekil 2.1 de Z_1 endüktif ve Z_2 kapasitif empedans fazörleri, Şekil 2.2de ise akım vektörleri ve Şekil 2.3de ise akımın aktif ve reaktif bileşenleri görülmektedir.



Şekil 2.1. Kompleks düzlemde empedans diyagramı



Şekil 2.2 a) Kapasitif akım vektörü b) Endüktif akım vektörü



Şekil 2.3. Akımın aktif ve reaktif bileşenleri

Bir U gerilimi altında I akımı çeken bir fazlı bir cihaz için kompleks güç S , görünen güç S veya $|S|$, aktif güç P , endüktif reaktif güç (Q) ve kapasitif reaktif güç ($-Q$) aşağıdaki gibi verilir.

$$\text{Kompleks güç:} \quad \mathbf{S} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{I}^* = P \pm jQ \quad (2.5)$$

$$\text{Görünen güç} \quad |S| = S = U \cdot I = (P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (2.6)$$

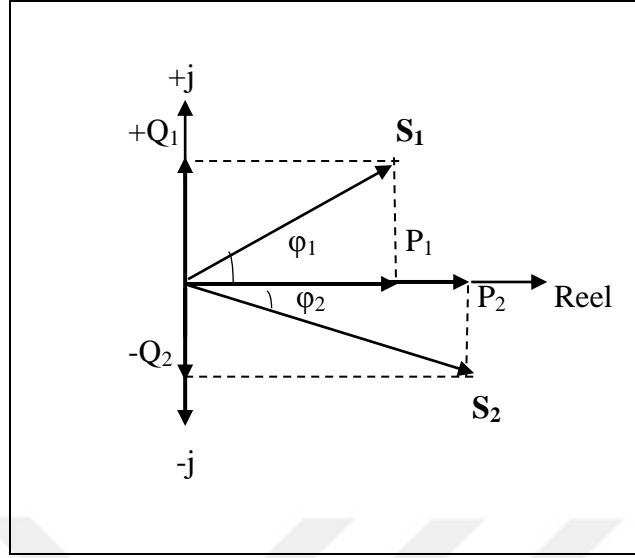
$$\text{Aktif güç:} \quad P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot I_a \quad (2.7)$$

$$\text{Endüktif reaktif güç} \quad Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = U \cdot I_r \quad (2.8)$$

$$\text{Kapasitif reaktif güç} \quad -Q = -U \cdot I \cdot \sin \varphi = -U \cdot I_r \quad (2.9)$$

Kompleks güç ifadesinde yer alan $*$ işareti eşlenik olarak kullanılmıştır. Kompleks ve görünen güç birimi [VA], aktif güç birimi [W], endüktif reaktif güç birimi [VAR] ve kapasitif reaktif güç birimi [VAR] veya [var] olarak ifade edilir.

Şekil 2.4'de güç diyagramı verilmiş olup, burada endüktif karakterli bir $S_1 = P_1 + jQ_1$ kompleks gücü ve kapasitif karakterli bir $S_2 = P_2 - jQ_2$ kompleks gücü görülmektedir.



Şekil 2.4. Kompleks düzlemde güçler

Görünen güç değişmeden ϕ açısının büyümesi ($\cos \phi$ 'nin küçülmesi) halinde sistemden çekilebilecek aktif güç ($\cos \phi$) çarpanı kadar küçülür.

Bir şebeke fazla miktarda reaktif güç taşıyorsa güç faktörü düşüktür. Bu şebekeyi en iyi koşullarda kullanabilmek için yani hemen hemen yalnız aktif güç taşımalarını sağlamak için şebekenin güç faktörünün $\cos \phi$ değerinden yaklaşık olarak 1 civarında $\cos \phi$ değerini değiştirmek demektir.

Aktif güç sabit kalmak koşulu ile güç faktörünün küçülmesi görünen gücün büyümesine neden olur. Görünen güçteki büyüme $1/\cos \phi$ veya kVA/kW çarpanı kadardır.

“Eş. 2.2”deki I akım fazörünün eşleneği “Eş. 2.5”de yerine koyulursa güç empedans cinsinden de ifade edilebilir. Örneğin endüktif karakterli bir akım halinde

$$\mathbf{S} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{I}^* = \mathbf{U} \cdot [(U \cdot \mathbf{R}) + j(U \cdot \mathbf{X})] / (\mathbf{R}^2 + \mathbf{X}^2) = [(U^2 \cdot \mathbf{R}) + j(U^2 \cdot \mathbf{X})] / (\mathbf{R}^2 + \mathbf{X}^2) \quad (2.10)$$

denklemini elde edilir. Bu kompleks sayının reel kısmı aktif güce, sanal kısmı da reaktif güce eşittir. Buna göre

$$P = (U^2 \cdot \mathbf{R}) / (\mathbf{R}^2 + \mathbf{X}^2) \quad (2.11)$$

$$Q = (U^2 \cdot \mathbf{X}) / (\mathbf{R}^2 + \mathbf{X}^2) \quad (2.12)$$

Reaktif güç; endüktif tüketicilerde, pozitif işaretli ve aktif güçten 0 ilâ 90^0 ileri fazda; kapasitif tüketicilerde, negatif işaretli ve aktif güçten 0 ilâ 90^0 geri fazdadır. Reaktif gücün pozitif olması; kaynaktan tüketiciye doğru reaktif akım aktığını göstermektedir. Reaktif gücün negatif olması; tüketiciden kaynağa doğru reaktif akımın aktığını göstermektedir.

Reaktif güçler; santral ünitelerinden, senkron kapasitörlerden, enerji nakil hatlarından ve statik kondansatörlerden üretilmektedir. Reaktif güç kaynakları; generatörler, transformatörler, senkron kompanseörler, statik kondansatörler, şönt reaktörler, enerji nakil hatları ve motorları ihtiva eden bir sistemde, her bir ünite ya reaktif güç üretecek, ya da reaktif güç çekecektir. İşletme ayarlamalarına tabi olarak bazı teçhizatların reaktif yük çekmesine ya da üretebilmesine mukabil bir kısım teçhizat daima reaktif güç çeker. Örneğin bir endüksiyon motoru kendi manyetik alanını (mıknatıslanmayı) meydana getirmek için daima reaktif güç çekecektir. Transformatörler ve reaktörler de daima reaktif güç çekerler. Aşırı ikazlı generatörler ve senkron kondansatörler reaktif güç üretirler. Aşırı ikazlı senkron kompanseör olarak çalıştırılan generatörler, aşırı ikazlı senkron generatörler, aşırı ikazlı senkron kondansatörler, aşırı ikazlı senkron motorlar, statik kondansatörler ve enerji nakil hatları reaktif güç üreten kaynaklardandır. Düşük ikazlı senkron kompanseör olarak çalıştırılan generatörler, düşük ikazlı senkron generatörler, düşük ikazlı senkron motorlar, endüksiyon motorları, transformatörler ve şönt reaktörler reaktif güç tüketen kaynaklardandır.

2.2. Güç Faktörünün Düzeltilmesinin Teknik ve Ekonomik Faydaları

Elektrik tüketiminin büyük çoğunluğu oluşturan ve önemli ölçüde reaktif enerji tüketen endüksiyon motorlarında aktif akım, motor milinden alınan aktif gücü verir. Ancak bunun için motor manyetik devresinin mıknatıslama akımına ihtiyaç vardır. Fakat bu reaktif akımın verdiği şebekeden çekilen akımı gerilime göre geri faza kaydırarak faydalı bir iş yapmamasına rağmen şebekeden daha büyük olmasına neden olur. I akımının Denklem 2.4 uyarınca genliğinin büyümesi, motorun bağlı olduğu transformatörlerden, yeraltı besleme kablolarından, hava hatlarından ve generatörlerden daha büyük akım çekilmesine neden olduğu için kapasitelerini küçültme etkisi veya kapasitelerinden başka güçler için yararlanılamaması sonucunu gösterir.

Özellikle yüksek gerilim (YG) şebekelerinde iletken kesitleri enerji kaybına göre tasarlanırlar. Reaktif akım nedeniyle genliği büyüyen akım hatlardaki enerji kayıplarını da arttırır. Ülkemizde halen 2017 resmi verilerine göre enerji iletim ve dağıtım sisteminde kayıpların 34.659.500.000 kWh değeri ile % 12,1 oranında olması; enerji kayıplarının minimize edilmesini zorunlu kılmaktadır. [11]. Bu da reaktif enerjinin kontrolünü önemli hale getirmektedir.

Reaktif gücün sebep olduğu diğer bir önemli etki ise gerilim düşümü üzerindedir. Alternatif akım (AA) devrelerinde 1 fazlı hatta mutlak gerilim düşümü ΔU aşağıdaki gibi bulunur [12]:

$$\Delta U = 2.(R. I_a + X. I_r) \quad (2.13)$$

Reaktif akım nedeniyle mutlak gerilim düşümünün büyümesi nedeniyle % e ile ifade edilen

Bağıl gerilim düşümleri de büyümektedir.

$$\% e = \frac{\Delta U}{U} \quad (2.14)$$

Bağıl gerilim düşümünün izin verilen değeri yönetmeliklerle sınırlandırılmıştır. Örneğin elektrik iç tesislerinde ışık linyelerinde % e değeri %1,5 değerini, priz ve motorların bulunduğu linyelerde %3 değerini geçemez [13]. Alçak gerilim dağıtım şebekelerinde bu değer maksimum %5 olarak yer alır [14]. Bu değeri sağlayacak şekilde linyedeki veya dağıtım şebekesindeki iletken kesitleri hesaplanmaktadır. Gerilimde daha büyük düşme olursa ışık kaynakları bundan olumsuz etkilenmektedir. Çünkü ışık kaynaklarının verdiği ışık akısı şebeke gerilimiyle üstel olarak bağımlıdır [15]. Reaktif akımın büyümesi nedeniyle gerilim düşümünün artması görsel konforu etkilediği gibi işyerlerinde görme eksikliğinin neden olduğu iş kazalarına da sebebiyet verebilir. Öte yandan elektrik motorlarının milindeki döndürme momenti (M) şebeke geriliminin karesi ile $M = f (V^2)$ şeklinde bağıntılı olduğundan şebeke gerilimi örneğin %10 düşerse; döndürme momenti nominal değerinin $(\%90)^2 = \%81$ değerine düşmektedir. Bu da motor verimini olumsuz etkileyerek iş kayıpları, ürün bozukluklarına neden olabilmektedir [16].

Öte yandan gerilim düşümünün özellikle yüksek gerilim şebekesinden çekilen büyük reaktif güçler, boyuna gerilim düşümleri oluşturarak gerilimin genliğini azaltmaktadırlar.

Bu durumun tam tersi durumu da olabilmektedir. Reaktif gücün yükten şebekeye doğru akması (kapasitif yükler) şebekenin yüksek gerilim bölümü üzerinde, doğrudan genliği arttırarak istenmeyen gerilim yükselmesine sebep olmaktadırlar. Aşırı kapasitif ve aşırı endüktif yüklü şebekelerde istenmeyen geçici akım ve gerilim darbeleri yaşanma riski de yüksektir. Bu durumların arasında en tehlikeli olan durum ise kapasitif yüklerin yol açtığı harmoniklerin rezonanslarıdır.

Konut aboneleri ve gücü 9 kW'a kadar olan küçük aboneler hariç olmak üzere diğer abonelerde ve özellikle enerji tüketiminin büyük çoğunluğunu tüketen sanayi abonelerinde aktif enerji ve reaktif enerji ayrı ayrı ölçülürler [17]. Bu tür aboneler R-L karakterli olduğundan endüktif reaktif enerji tüketirler. Aslında bir sanayi tesisinde iş yapan güç aktif güç olduğundan çekilen aktif enerji her faturalama döneminde faturalandırılır. Herhangi bir iş yapmamasına rağmen şebekeden aşırı reaktif enerji çeken aboneler o faturalama döneminde ayrıca cezalandırılarak endüktif reaktif enerji bedeli ödemek zorunda kalırlar. Abonelerin P.F. değerlerini ülkemizde 0,95 in üstünde tutma mecburiyeti getirilmiştir. Aboneler reaktif güç kompanzasyon tesisi kurarak reaktif enerji bedeli ödememe yoluna gitmektedirler. Öte yandan şebekeden çekilen reaktif gücün aktif güce oranı $\tan \phi$ değerini verir.

$$\tan \phi = \frac{Q}{P} \quad (2.15)$$

Bir fatura döneminde ise reaktif enerjinin aktif enerjiye oranı hesaplanarak $\tan \phi$ değeri bulunarak $\cos \phi$ değerinin 0,95in altına düşüp düşülmediği anlaşılmaktadır. $\cos \phi = 0,95$ 'e eşit olan $\tan \phi = 0,3285$ olup bu değer bir abonenin veya bir tüketici cihazın 1 kWh başına çekmesine izin verilen reaktif enerjinin $0,3285 \approx 0,33$ kVArh olması anlamına gelmektedir. Birim aktif enerji başına reaktif enerjinin az olması için ve dolayısıyla kayıpların az olması için güç faktörleri yüksek olan cihazlar alınmalı veya P.F. yükseltilmelidir. Cihazlar ve özellikle elektrik motorları gereğinden büyük güçte seçilmemelidir Çünkü elektrik motorunun gücü iş makinasının gücünden büyük seçilmesi halinde elektrik motoru tam yükün altında yükleneceğinden P.F. küçük olacak ve birim aktif enerji başına reaktif enerji yüksek olacaktır. Diğer bir husus ise elektrik motorları mümkünse tam yükte çalıştırılmalıdır. Çünkü Aydınlatma lambalarında ışık verimi yüksek olanlar seçilmeli ve reaktif enerji tüketen örneğin balast gibi devre elemanları olanlarda kompanzasyon yapılmalıdır. Örneğin balastlardaki joule kayıpları (I^2R) kayıplarının

kompanzasyon yapılması halinde kazanımı hesaplamak istersek; Balast gücü 10 W ve flüoresan lamba gücü 40 W olan bir ışık kaynağının kompanzasyon yapılmadan önce P.F. = 0,55 ve kompanzasyon sonrası P.F. değerinin 0,95'e yükseltildiği, ışık sortilerinin faz ve nötr iletken kesiti minimum 1,5 mm² bakır iletkenli olduğu ve linyeden faz ve nötr toplam iletken uzunluğu 10 m ve şebeke geriliminin 220 V olduğu kabulü ile:

$$P_{j1} = R \cdot I_1^2 = R \cdot [P_1 / (U \cdot \cos \varphi_1)]^2 ; P_{j2} = R \cdot I_2^2 = R \cdot [P_1 / (U \cdot \cos \varphi_2)]^2 \quad (2.16)$$

$$\text{Sağlanan ısı kaybındaki kazanç ise } k = (P_{j2} - P_{j1}) / P_{j1} = 1 - (\cos \varphi_1^2 / \cos \varphi_2^2) \quad (2.17)$$

eşitlikleri yardımı ile $k = 1 - 0,552/0,952 = 0,66$ olacaktır. Öte yandan sortinin direnç değeri $R = 10 / (56 \cdot 1,5) = 0,119 \Omega$ ve Kompanzasyon öncesi çekilen akım $I_1 = P_1 / (U \cdot \cos \varphi_1) = 50 / (220 \cdot 0,55) = 0,413$ A akım çekildiği varsayımı ile güç kazancı $0,119 \cdot 0,413^2 \cdot 0,66 = 0,0134$ W'tır. Bu flüoresan lambanın her gün 8 saat çalıştığı dikkate alındığında yılda 39 Wh lik enerji kaybı olduğu ortaya çıkar. Halen ülkemizde 24.000.000 civarında konut aboneleri olup bu abonelerin yarısının bu ışık kaynağını kullandığı varsayımı ile tek bir lambanın kompanzasyonu ile bile 469.412 kWh lik enerji tasarrufu söz konusu olacaktır.

2.2.1. Devlete olan faydaları

Çağımızda elektrik temel ihtiyaçlar arasına girdiğinden devletlerin vatandaşlarına sürekli, ucuz, kaliteli, sürdürülebilir ve temiz enerjiyi sağlamak gibi bir görevi vardır. Ülkemizde üretim, iletim ve dağıtımdan oluşan elektrik sektörü 1980'li yıllara kadar tekel konumunda olan Türkiye Elektrik Kurumu tarafından yönetilmiş, 1980 sonrası liberalleşme ile birlikte elektrik üretim şirketlerinin kurulmasına izin verilmiş olup dağıtım sektörü de halen 21 dağıtım bölgesine ayrılarak özel sektör marifetiyle işletilmektedir. İletim sektörü ise "Milli şebeke" (National Grid) olarak devlet tekelinde yürütülmektedir. Güç faktörünün iyileştirilmesi sayesinde üretim santrallerinin kapasitesinden daha iyi yararlanılacağı için devlet açısından da ekonomi sağlanacaktır. Aktif ve görünen güç arasında $P = S \cdot \cos \varphi$ bağıntısı olduğundan P.F değeri φ_1 değerinden φ_2 değerine yükseltilmesiyle herhangi bir santral yatırımı yapmadan $S (\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1)$ kadar aktif santral gücünün ülke ekonomisine kazandırılması demektir. Örnek vermek gerekirse $\cos \varphi_2 = 0,95$ ve $\cos \varphi_1 = 0,80$ alındığında

$0,95 - 0,80 = 0,13 = \%13$ kadar ülkeye katkı anlamına gelir. Tablo 1 de 1 kW'lık santral

gücünün maliyeti santral tipine bağlı olarak verilmiştir [18].

Çizelge 2.1. Santral ilk yatırım birim maliyetleri

Santral Tipi	İlk Yatırım Maliyeti (\$/kW)
Rüzgar Santrali (Deniz Üstü)	6230
Nükleer Santral	5530
Jeotermal Enerji Santrali	4362
Biyokütle Enerji Santrali	4114
Güneş Enerji Santrali	3873
Kömür Yakıtlı Linyit Santral	3246
Hidroelektrik Santral	2936
Rüzgar Santrali (Kara)	2213
Doğalgaz Yakıtlı Gaz Santrali	917

Ülkemiz kurulu gücünün son 10 yıllık değişimi ise Çizelge 2.2.'de verilmiştir [11].

Çizelge 2.2. Ülkemizde kurulu güçlerin yıllara göre değişimi

Yıl	Termik Santral	Hidrolik Santral	Jeoter.+Rüz.+Güneş Santral	Toplam
2008	27595,0	13828,7	393,5	41817,2
2009	29339,1	14553,3	868,8	44761,2
2010	32278,5	15831,2	1414,4	49524,1
2011	33931,1	17137,1	1842,9	52911,1
2012	35027,2	19609,4	2422,8	57059,4
2013	38648,0	22289,0	3070,5	64007,5
2014	41801,8	23643,2	4074,8	69519,8
2015	41903,0	25867,8	5375,9	73146,7
2016	44411,6	26681,1	7404,7	78497,4
2017	46926,3*	27273,1	11000,6**	85200,0

* : Bu gücün 22022,2 MW'ı doğal gaz santralleridir.

** : Bu gücün 1.036,7 MW'ı jeotermal, 6516,2 MW'ı rüzgar ve 3420,7 güneş santralidir.

Bu veriler ışığında P güç, f santral birim kuruluş maliyeti ve tasarruf miktarı %13 olmak üzere santrallerden yapılacak tasarruf:

$$M = P.f. \%13 \quad (2.18)$$

ile verilir. Buna göre:

Doğal gaz santrallerinden yapılacak tasarruf: $M = 22022,2 \cdot 917k \cdot 0,13 = 2.625.266 \text{ k\$}$

Termik santrallerden yapılacak tasarruf: $M = 24.904,1 \cdot 3246k \cdot 0,13 = 10.509.032 \text{ k\$}$

Hidroelektrik santrallerden yapılacak tasarruf: $M = 27.273,1 \cdot 2936k \cdot 0,13 = 10.409.596 \text{ k\$}$

Jeotermal santrallerden yapılacak tasarruf: $M = 1.036,7 \cdot 4362k \cdot 0,13 = 587.871 \text{ k\$}$

Rüzgar santrallerden yapılacak tasarruf: $M = 6516,2 \cdot 2213k \cdot 0,13 = 1.874.645 \text{ k\$}$

Güneş santrallerinden yapılacak tasarruf: $M = 3420,7 \cdot 3873k \cdot 0,13 = 1.722.288 \text{ k\$}$

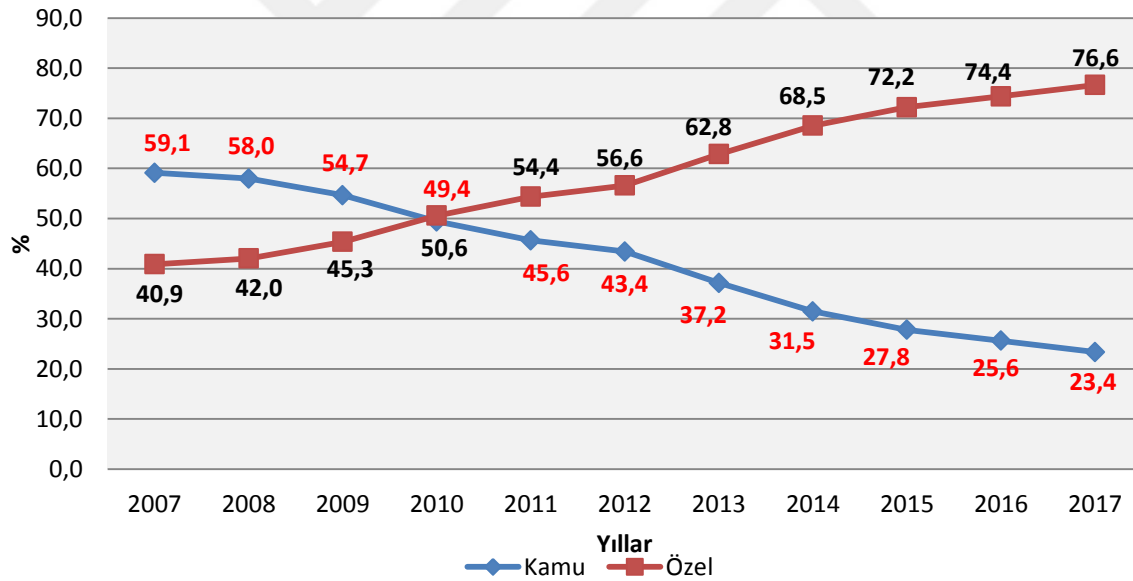
Toplam tasarruf miktarı: 27.728.518 k\$

olmaktadır. Güç faktörünün düzeltilmesiyle ister kamu marifetiyle, isterse özel sektör tarafından yapılsın yalnızca üretim tarafında 1 kW'ı ortalama 2.000 \$ alınarak 13.000 MW'ın üzerinde bir santral gücü ekonomiye kazandırılmış olacaktır. Devlet tekelinde bulunan iletim sisteminde bulunan hava hatları kapasitesinde de benzer hesaplamalar yapılabilir. Halen 2018 yılı elektrik tüketimimiz 303,3 Milyar kWh ve üretimimiz ise 303,3 Milyar kWh olup devlet resmî verilerine göre elektrik tüketiminin 2023 yılında baz senaryoya göre yıllık ortalama % 4,8 artışla 385 Milyar kWh'e ulaşması beklenmektedir. [19]. Elektrik gücünde de paralel bir artış varsayımı altında her yıl yalnızca elektrik üretim yatırımı olarak 85.200 MW. $2000.000 \cdot \%4,8 = 8.18$ Milyar \$'ın yapılması zorunludur. Ülkedeki puant güç ile sıcak yedek olarak bekleyen emre amade santral güçlerinin halihazırda bu gücün ancak yarısını karşılayabilmesi kabul edilse bile her yıl devlet veya özel sektör eliyle yıllık 4 Milyar \$'ın üzerinde bir üretim yatırımı ve yaklaşık bu bedelin 2 katı kadar da iletim ve dağıtım yatırımı yapılması kaçınılmaz olacaktır. Tüm dünyada

ekonomik durgunluğun bulunduğu son yıllarda eldeki mevcut imkanların kullanılması ve güç faktörünü düzeltmenin devlete olan faydaları daha iyi anlaşılacaktır.

2.2.2. Üretim, iletim ve dağıtım sistemine olan faydaları

Pek çok ülkede elektrik üretimi hem kamu eliyle hem de özel sektör tarafından yapılmaktadır. Ülkemizde de benzer bir durum mevcut olup elektrik üretimimizin %76,6 sı kamu tarafından, %23,4'ü özel sektör tarafından kurulup işletilmektedir. Şekil 2.5 de ülkemizde son yıllardaki elektrik üretiminin kamu ve özel sektör dağılım grafiği görülmektedir [11].



Şekil 2.5. Ülkemizde kurulu gücün kamu ve özel sektör dağılımı

Santral tiplerine göre kamu ve özel sektör elektrik üreticilerinin milli şebekeye verdikleri elektrik gücüne ait gerilim bileşeni kendileri tarafından sunulurken; gücün diğer bileşeni olan akımın aktif ve reaktif kısımları tüketiciler tarafından belirlendiğinden; üreticiler düşük güç faktörlü akım çekilmesi durumunda şebekeye daha az aktif güç ve dolayısıyla daha az aktif enerji vermek zorunda kalacaklardır. Bu da üreticilerin kapasitelerinden yeterince yararlanamama ve sonuç olarak aktif enerji azalma ve dolayısıyla kârlarında

azalma etkisi yaratacaktır.

İletim sisteminde ise gerek santral çıkışlarındaki ünite transformatörleri, gerekse ana indirici trafo merkezleri, iletim sisteminde bulunan tüm hava hatları ve yeraltı kablolarının kapasitelerinden yeterince yararlanılamayacağı için kapasite daralması oluşacak ve yeni yatırımlar yapılmak zorunda kalınacaktır. Bu da ülkemiz gibi elektrik enerji ihtiyacı yılda ortalama %7,5 civarında artan bir ülkede kıt olan yatırım kaynaklarının iyi kullanılamaması demektir. Kapasite daralması yukarıda belirtilenlerle sınırlı olmayıp kumanda, kontrol, koruma cihazlarında da benzer durum olduğu gibi daha büyük akımlar nedeniyle daha büyük tasarım değerlerine sahip olmaları zorunlu olmaktadır. İletim hatlarındaki gerilim düşümleri, gerilim regülasyonunda zorluk ve joule kayıplarının getirdiği maddi kayıplar iletim sistemini ciddi şekilde etkilemektedir. Bu da sistem işletme maliyetlerine olumsuz etki ederek tüketiciye kadar olan zincirde enerji birim fiyatlarının artmasına neden olmaktadır.

Dağıtım sisteminde ise sırasıyla tüm orta gerilim dağıtım sistemi, alçak gerilim dağıtım sistemi dikkate alındığında reaktif gücün kompanse edilmesi kaçınılmaz olmaktadır. Çünkü gerilim seviyesi düştükçe akım büyümekte bu da kapasiteden daha çok yararlanılamama anlamına gelmektedir. Bu nedenle tüm orta gerilim seviyelerindeki trafo ve dağıtım merkezleri, hava hattı ve yeraltı kablo şebekeleri, OG/AG trafo merkezleri ve AG hava hattı ve yeraltı kablo şebekeleri, tüm primer ve sekonder elektrik işletme araçları sigortalardan saha dağıtım panolarına kadar doğrudan kapasite eksikliği olarak karşımıza çıkmaktadır. Üstelik yeraltı kablo şebekelerinin hava hattı şebekelerine göre 3 ilâ 8 kat daha pahalı olmaları yeni kapasite yatırımlarına harcanacak bütçeyi de bu oranda olumsuz etkileyecektir.

Aynı güç için gerilim düştükçe akım arttığından daha büyük joule kayıpları oluşacağından bu durum elektrik dağıtım şirketlerinin kayıpla mücadele konusunu da gündeme getirecektir. Öte yandan daha önce belirtildiği gibi elektriği kaliteli olarak aboneye sunma mükellefiyeti olan elektrik dağıtım şirketleri kompanzasyon yapılmazsa gerilim düşümü problemleri ile karşı karşıya kalacakları gibi gerilim düşümü şikâyet ve tazminatları ile de uğraşmak zorunda kalacaklardır. Bunun yanı sıra hatlar ve trafolar kompanzasyon yapılmışsa rahatlayacağından enerji arıza ve inkıta riski de azalacağından dağıtım şirketlerinin maliyetleri bu bakımdan da azalacak ve daha çok enerji satabileceklerdir.

2.2.3. Tüketicilere olan faydaları

Aboneler reaktif güç kompanzasyonu yapmazlarsa reaktif enerji bedeli ödemek zorunda kalacaklardır. Öte yandan 1kVAR'lık kondansatör gücünün maliyeti 20 USD civarında olduğu dikkate alındığında, abonelerin yapacağı kompanzasyon tesisinin birkaç ay içinde kendisini amorti edeceği unutulmamalıdır. Başabaş noktasından sonra bir daha reaktif enerji bedeli ödemeyeceği için elektrik girdi maliyetleri azalacağından; özellikle yoğun elektrik kullanan ve elektrik girdi maliyeti yüksek olan sektörlerde bu durum ürün maliyetine pozitif olarak yansımaktadır. Sanayi aboneleri, oteller, alışveriş merkezleri gibi kendi trafo merkezini kurmak zorunda olan abonelerin de kompanzasyon yapmaları halinde trafolarında ve besleme kablolarında ve elektrik kuvvetli akım ve iç tesisat sisteminde kapasite genişlemesi olacağından yaptığı yatırımdan daha iyi verim alacaktır. Enerji kayıpları ve gerilim düşümleri de azalacaktır.

2.3. Güç Faktörünün Düzeltilmesi İle İlgili Yasal Düzenlemeler

Elektrik projelerinin hazırlanması ve elektrik tesislerinin gerçekleştirilmesi sürecinde güç faktörünün iyileştirilmesi ile ilgili ilk dikkate değer çalışma 16.02.1983 tarih ve 17961 sayılı resmi gazetede yayımlanan Tebliğ olup bu tebliğde 250 kVA (dahil) ve daha büyük transformatör gücünü haiz elektrik enerjisi temin projeleri 0,4 kV barada “Otomatik Reaktif Güç Kompanzasyonu” hesaplarını ihtiva edecek şekilde hazırlanacağı öngörülmüştür. Tesis edilecek kondansatör gücü hesabında; tesisin kurulu gücünün, “eş zamanlık faktörü” ile çarpılarak elde edilen aktif güç değerinin esas alınması, kondansatör gücü hesaplarında; bütün tesisler için mevcut güç faktörünün 0,7 kabul edilerek, kompanzasyon sonrası düzeltilmiş güç faktörünün 0,9 olması ve sabit kondansatör grubunun %5 ilâ %10 arasında olması esası getirilmiştir [20].

01.12.1988 tarih 20006 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan Tebliğde ise OG'den beslenen aboneler için de aynı esasa dahilinde kompanzasyon yapılması zorunluluğu getirilmiştir. Anacak yapılan bu Tebliğde yapılan değişiklik ile aşırı kompanzasyon riskine karşı sabit kondansatör grubunun hem AG'de hem de OG'de %3 ilâ %5 arasında seçilmesi hükme bağlanmıştır [20].

Ülkemizde bu konuda en köklü değişiklik 09.03.2000 tarih ve 23988 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanarak yürürlüğe giren kompanzasyon tebliği ile geçerli olan Elektrik

Tarifeleri Yönetmeliğinde yapılan değişikliklere göre güç faktörünün 0,95 (dahil) ile 1,00 arasında bir değerde tutulacağı, tesisin çektiği aktif enerjinin 0,33 (yüzde otuzüç) (dahil) katına kadar reaktif enerji (endüktif) çekilmesi halinde reaktif enerji bedeli alınmayacağı, tesisin çektiği aktif enerjinin 0,20 (yüzde yirmi) (dahil) katına kadar reaktif enerji (kapasitif) verilmesi halinde reaktif enerji bedeli alınmayacağı, aşması halinde, faturalara reaktif enerji bedelinin ilave edilerek tahsil edileceği ve kurulu gücü 50 kVA (dahil) üstünde olan tüm abonelere kompanzasyon tesisi kurma zorunluluğu hüküm altına alınmıştır [20].

Ülkemizde 2001 yılında Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu kurulmuş olup elektrik piyasa faaliyetlerinin düzenleme sorumluluğu bu kuruma verilmiş ve bu kurumun hazırladığı 31.12.2015 tarihli ve 29579 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan “Dağıtım Lisansı Sahibi Tüzel Kişiler Ve Görevli Tedarik Şirketlerinin Tarife Uygulamalarına İlişkin Usul ve Esaslar” dokümanında yukarıdaki hükümler aynen geçerliliğini korumuştur [17].

Halen ülkemizde mesken aboneleri, aydınlatma aboneleri, tek fazla beslenen aboneler, bağlantı gücü 9 (dokuz) kW'a (dahil) kadar olan aboneler reaktif enerji bedelinden muaf olup bu tür abonelerin endüktif ve kapasitif enerji sayaç kurma mükellefiyeti olmayıp; diğer tüm aboneler endüktif ve kapasitif enerji sayaç kurma mükellefiyetine haizdir ve bu abonelerde bir fatura döneminde endüktif $\tan \phi$ değeri 0,33'ü geçtiği takdirde çekilen reaktif enerjinin tamamına reaktif enerji bedeli uygulanmaktadır. Bu değer aşılmaz ise reaktif enerji bedeli alınmamaktadır. Aşırı kompanzasyon halinde ise kapasitif $\tan \phi$ 'nin sınır değeri kurulu gücün 50 kVA altında ve üstünde olmasına göre sırasıyla 0,20 ve 0,15 olarak belirlenmiştir. Bu sınır aşılmadığı takdirde kapasitif reaktif enerji bedeli uygulanmamaktadır. Sınır değer aşılmışsa reaktif enerji ceza bedeli alınmaktadır. Bir abonenin bir fatura döneminde hem endüktif hem de kapasitif reaktif enerji çekmesi durumunda, endüktif veya kapasitif enerji sayacının en yüksek değer kaydedeni dikkate alınarak bu değerlerin tamamına reaktif enerji cezası uygulanmaktadır [17].

Öte yandan elektrik yükünün non sinüsoidal olması nonlinear yüklerin güç ihtiyacının karşılanmasında ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA)'nın “Energy Star” programı ve Çin Ulusal Standardlar Enstitüsü (CNIS)'in yönlendirmeleriyle aktif moda çalışan cihazlarda yeni PF ve harmonik kuralları gündeme gelmiştir. Ayrıca Uluslararası Elektroteknik

Komisyonu (IEC) tarafından çıkarılan IEC 61000–3–2: “*Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current $\leq 16 A$ per phase)*” (Elektromanyetik Uyumluluk (EMU)- Bölüm 3-2: Sınır Değerler- “Harmonik Akım Sınırları (Giriş akımı faz başına $\leq 16 A$ Olan donanımlar)” standardının zorunlu tuttuğu güç faktörünün düzeltilmesi (GFD) veya harmonik azaltma gereklilikleri gündeme gelmiştir. Bu standarda göre, 75 W ilâ 600 W arasında gücü olan 16 A’e kadar faz başına akım çeken (D sınıfı) elektronik donanıma sahip AG şebekesine bağlı cihazlar için 39. harmoniğe kadar olan izin verilen maksimum akım harmonik genliğine [mA], birim güç [W] başına sınırlamalar getirilmiştir. Bu sınırlama [mA/W] olarak Çizelge 2.3’de verilmiştir [21].

Çizelge 2.3. Gücü 75 W ilâ 600 W arasında olan D sınıfı donanım için izin verilen en büyük harmonik değerleri

Harmonik sayısı (n)	İzin verilen en büyük harmonik değerleri (max I_n) [mA/W]
3	3,4
5	1,9
7	1
9	0,5
11	0,35
13	0,269
15 39	3,85/n

Avrupa Birliği Standartlar teşkilatı (CEN) bünyesinde bulunan ve ve ülkemizin de üyesi olduğu elektrik elektronik konulu EN standardlarını hazırlayan CENELEC teşkilatınca yayımlanan EN 50160 nolu standardda ise AG ve OG şebekelerinde harmonik % değerleri Çizelge 2.4’de verilmiştir [22].

Çizelge 2.4. AG ve OG şebekeleri için izin verilen en büyük harmonik % değerleri

Harmonik sayısı (n)		İzin verilen en büyük % V_n harmonik değerleri
Çift harmonikler	2	2
	4	1

	6,8,10,12,14,16,18,20,22,24	0,5
3'ün katı tek harmonikler	3	5
	9	1,5
	15, 21	0,5
Diğer tek harmonikler	5	6
	7	5
	11	3,5
	13	3
	17	2
	19,23,25	1,5

Öte yandan IEEE teşkilatının IEEE Standard 519 (1992) harmonik standardında ise şebekelerdeki harmonik sınırlar gerilim seviyelerine göre üç ayrı kategoriye ayrılmış olup tekil harmonik büyüklüğü ve toplam harmonik bozulma (THD) değerleri Çizelge 2.5'de verilmiştir [23].

Çizelge 2.5. Şebekeler için izin verilen en büyük harmonik % değerleri

Gerilim [kV]	Tekil harmonik büyüklüğü [%]	THD [%]
69 dan küçük	3,0	5,0
69 ilâ 161 (dahil)	1,5	2,5
161 den büyük	1	1,5

3. GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTME (GFD) YÖNTEMLERİ

Güç faktörünün düzeltilmesi elektrik sisteminde bulunan generatör, transformatör ve hat gibi işletme araçlarının çalıştırılma şekilleri ve ayarları değiştirilerek yapılabilir. Veya sistemin ihtiyacı olan L ve/veya C elemanı içeren cihaz ve elemanlar kullanılarak ya da mikro kontrolör tabanlı kapasitör bankları ile otomatik olarak devreye girip çıkan reaktif güç kompanzasyon tesisleri ile $\cos \phi$ değerinin denetlenerek kontrol edilmesi ile yapılabilir. Pasif filtre devreleri ile de PF düzeltildiği gibi harmonik bozulmalar da iyileştirilirler. Ya da aktif GFD'li AC-DC dönüştürücüler kullanılarak şebekenin güç faktörünün 1'e yaklaştırılması, böylelikle şebekeden harmonik içeriği azaltılarak olabildiğince sinüs fonksiyonuna yakın akımlar çekilerek güç kalitesi düzeltilebilmektedir. Bu nedenle GFD yöntemleri pasif ve aktif GFD yöntemleri olmak üzere iki başlık altında incelenebilir.

GFD çözümleri için seçim yaparken güç seviyesine ve uygulamanın diğer özelliklerine bağlı olarak, uygun çözüm pasif veya aktif GFD yöntemlerinden birisi olabilir. Son yıllarda ayrık zamanlı yarı iletkenlerdeki gelişmeler, kontrollü entegre devre (IC) elemanlarının düşük fiyatlı oluşu nedeniyle, aktif GFD çözümleri daha geniş bir uygulama aralığı bulmuş ve daha uygun hale getirmiştir. GFD çözümlerini değerlendirirken, sistemin toplam uygulama maliyeti ve performansını birlikte değerlendirerek optimizasyon yapmak gerekir.

3.1. Pasif GFD Yöntemleri

3.1.1. Generatörlerle GFD yöntemi

Generatörlerde uyarma akımı değiştirilerek bir santral ünitesi şebekeye ve endüktif enerji talep eden devreye kapasitif reaktif enerji vererek güç faktörünün düzeltilmesi sağlanabilir. Aslında generatörlerin dış devreye verdikleri reaktif devrenin ihtiyacı dikkate alınarak endüktif veya kapasitif olabilir. Pekçok tüketicide karşılaşılan durum, tüketici empedansının R-L karakterinde olmasıdır ki eğer generatör bir R-L devresini besliyorsa bu devrenin ihtiyacı olan reaktif enerji, generatör uyarma akımının artırılması suretiyle temin edilebilir. Eğer dış devrenin empedans karakteri R-C ise, devredeki kapasitif reaktif enerji, generatör tarafından uyarma akımı düşürülerek emilir ve devreden reaktif güç çekilir. Bu durum tüketici empedansının aşırı kompanzasyon haline karşılık gelir.

Bu yöntemin 2 önemli dezavantajı vardır. Birincisi pahalı bir yöntemdir. Çünkü reaktif enerji bir santral ünitesi tarafından üretilmektedir. Önceki bölümde incelendiği üzere santral 1 ünitelerin ilk kuruluş maliyetleri çok yüksektir. İkincisi bu generatörün verebileceği reaktif güç, görünen güç tarafından sınırlandırılmış olmasıdır. “Eş.2.6” yardımıyla generatörün verebileceği Q reaktif gücü:

$$Q = (S^2 - P^2)^{1/2} \quad (3.1)$$

ile sınırlıdır. Generatörün verdiği aktif gücü azaltılarak Q artırılabilir Ancak aktif gücü üretmemenin alternatif maliyetini göz ardı etmemek gerekir.

3.1.2. Senkron kompansatörlerle GFD yöntemi

Senkron motorların boşa çalıştırılması halinde uyarma akımının değiştirilmesi ile senkron kompansatör olarak görev yapabilir. Eğer düşük uyarma akımı ile çalıştırılırsa bir R-L karakteri gibi davranarak dış devre veya şebekeden reaktif enerji çeker. Buna karşın yüksek uyarma akımı ile çalıştırılırsa bu durumda R-C karakterine sahip olur ve bir kondansatör gibi davranarak şebekeye kapasitif reaktif enerji verir.

Santral ünitelerindeki generatörler çıkık kutuplu düşük senkron hıza sahip generatörlerdir. Özellikle hidroelektrik santrallerde bulunan generatörleri senkron kompansatör olarak çalıştırmak mümkündür. Ancak dikkatli bir işletmecilik gerektirir. Bunun için senkron hıza ulaşan generatör senkronizasyon şartları sağlanarak şebekeye paralel bağlanır. Daha sonra

üzerindeki aktif ve reaktif güç kaldırılarak türbin ayar kanatları kapatılarak çalıştırılır. Bu çalışma şekline daha çok aktif enerji üretilmesine çeşitli sebeplerle izin verilmeyen (çevre vb. etkiler, hukuki durumlar vb.) durumlarda rastlanır. Ekonomik bir GFD yöntemi değildir.

3.1.3. Sabit ve değişken kondansatörlerle GFD yöntemi

Bu yöntemde iyileştirme kondansatörlerle yapılır. Yük tek fazlı ise yükün uçlarına paralel olarak kondansatör bağlanır. Yükün 3 fazlı olması durumunda yine paralel olarak üçgen veya yıldız bağlı kondansatörler bağlanır. Bu duruma tekil kompanzasyon adı verilir. Yük birden fazla olup bir grup yükü ise bu durumda bu yük grubuna yine uygun kondansatörler bağlanarak grup kompanzasyonu yapılır. Bu yöntemde ayrıca dağıtım şebekelerinde de rastlanır. Örneğin YG/OG ana indirici transformatör merkezlerinin OG baralarında yapılan OG kondansatör bataryaları veya OG/AG transformatör köşk/binalarında AG tarafında yapılan AG kondansatör bataryaları kademelere ayrılarak gerektiği kadar yıldız veya üçgen bağlı olarak yerleştirilir. Bunun yanı sıra OG hatlarına kabin tipi OG kondansatör bataryaları da konulur.

Bu yöntemde gerekli kondansatör gücü hesaplanırken mevcut endüktif gücün güç üçgeninde aktif güçle yaptığı φ_1 açısı düzeltilmesi istenen φ_2 değerine örneğin $\cos \varphi_2 = 0,95 - 0,97$ olacak şekilde 18^0 nin altına düşürülür. O halde gerekli kondansatör gücü:

$$Q_C = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (3.2)$$

Kondansatör akımı I_C ve uçlarındaki gerilim U_C olmak üzere C sığası arasındaki ilişki:

$$I_C = U_C \cdot 2\pi \cdot f \cdot C \quad (3.3)$$

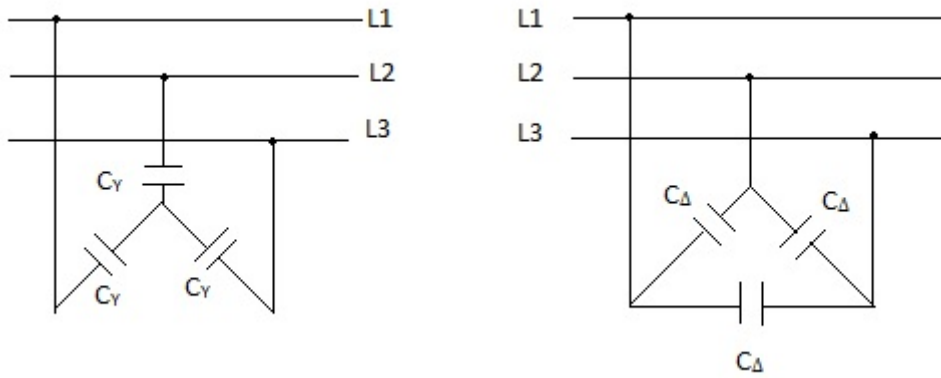
Kondansatör akımı I_C ve uçlarındaki gerilim U_C olmak üzere Q_C ile C sığası arasındaki ilişki:

$$Q_C = U_C \cdot I_C = U_C^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C = I_C^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C \quad (3.4)$$

ile hesaplanır. Kompanzasyon amaçlı kullanılan AG veya OG kondansatörlerinin Q_C güç değerleri standardize edilmiş olup bu değerler kVAR olarak : 0,25 – 0,5 – 1 – 1,5 - 2 – 2,5 – 5 – 7,5 - 10 – 12,5 -15 – 20 – 25 – 30 – ... olarak büyümektedir [24]. Bilindiği üzere

kondansatörler seri veya paralele bağlanarak istenen ara değerlere de ulaşılabilir.

Yükün 3 fazlı olması durumunda, üç fazlı yükün uçlarına paralel olarak ya yıldız bağlı veya üçgen bağlı kondansatörler bağlanabilir. Şekil 3.1 de yıldız bağlı kondansatör grubu, Şekil 3.2’de de üçgen bağlı kondansatör grubu görülmektedir. Kondansatörlerin yıldız bağlı olması durumunda her bir kondansatör faz nötr gerilimine maruz kalırken, üçgen bağlı olması durumunda her bir kondansatör faz arası gerilimine maruz kalır.



Şekil 3.1 a) Yıldız bağlı kondansatörler

b) Üçgen bağlı kondansatörler

Yıldız bağlı durumda her bir kondansatörün C_Y sığası:

$$C_Y = (Q_C / 3) / (U_{LN}^2 \cdot 2\pi \cdot f) = Q_C / (U_{LL}^2 \cdot 2\pi \cdot f) \quad (3.5)$$

Üçgen bağlı durumda her bir kondansatörün C_Δ sığası:

$$C_\Delta = (Q_C / 3) / (U_{LL}^2 \cdot 2\pi \cdot f) = (Q_C / (3 \cdot U_{LL}^2 \cdot 2\pi \cdot f)) \quad (3.6)$$

Burada:

U_{LN} : Faz nötr gerilimi

U_{LL} : Faz arası gerilim ($U_{LL} = \sqrt{3} \cdot U_{LN}$)

“Eş.3.5” ve “Eş. 3.6”nın oranlanması sonucunda:

$$C_Y = 3.C_{\Delta} \quad (3.7)$$

bulunur. Kondansatörler üçgen bağlandıkları zaman sığaları yıldız bağlı olanlara göre 3 kat küçülmekte, fakat uçlarındaki gerilim $\sqrt{3}$ kat büyümektedir. Başka bir deyişle kondansatörler yıldız bağlandıkları zaman sığaları üçgen bağlı olanlara göre 3 kat büyümekte, fakat uçlarındaki gerilim $\sqrt{3}$ kat küçülmektedir.

Sabit(statik) kondansatörler ile yapılan GFD yöntemi en ekonomik çözüm olmakla birlikte dezavantaja da sahiptir. Çünkü Yükteki endüktif reaktif güç değişimleri olması durumunda aşırı kompanzasyon riski mevcuttur. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için kondansatörler ilgili tebliğ ve yönetmelikte belirtilen kurallara uygun olarak gruplara ayrılır. Merkezi kompanzasyon olarak da adlandırılan bu yöntemde; devredeki $\cos \phi$ değerini gözleyen ve bu değeri 0,95 ilâ 1,0 arasında tutmak üzere gruplara ayrılarak kademeli olarak bu röle marifetiyle devreye girip çıkan kondansatörler söz konusudur. Bu yöntemle endüktif yük değiştikçe kondansatör güçleri de değiştiğinden değişken kondansatörle yapılan bir GFD yöntemi olarak da adlandırılabilir. Yeni nesil reaktif güç röleleri veya diğer adıyla $\cos \phi$ röleleri günümüzde mikro kontrolör tabanlı bir çalışma şekline sahip dijital rölelerdir. Tüm dünyada endüstriyel ve ticari tesislerde, büyük veya küçük güçlü abonelerde kompanzasyon bu yöntemle yapıldığından yaygın bir kullanım alanı mevcuttur. En önemli avantajı ekonomik ve yapısının basit olmasıdır. Buna rağmen dezavantajları da mevcuttur. Bu yöntemle aşırı kompanzasyon hali söz konusu bir abonede, başka bir deyişle ters (negatif) güç açılı bir abonede GF düzeltilemez. Ayrıca kondansatör grupları o abonedeki tüketici cihazların çalışma rejimleri, devreye girip çıkma sıklıkları, veya kondansatör gruplandırılmasının (kademelendirme) uygun yapılmaması halinde istenilen GF düzeltilme işlemi yapılamayabilir.

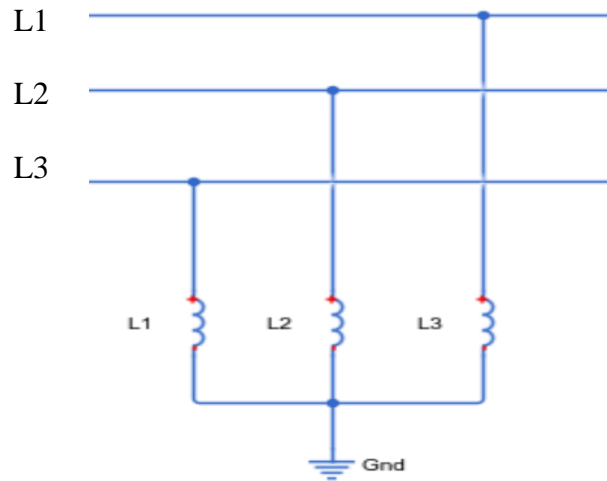
3.1.4. Seri kapasitörlerle GFD yöntemi

Enerji iletim sistemlerinde hattın seri empedansı $Z = R + j 2.\pi.f.L$ dir. Bir iletim sisteminde iletilen güç hat geriliminin karesi ile doğru orantılı iken hat empedansı ile ters orantılıdır. Hattın empedansı düşürülebilirse hem iletilen güç artacak hem de sistem kararlılığına olumlu etkileyecektir. Empedansı düşürmenin yolu ya R direncini veya X_L endüktif reaktansını düşürmektir. R direncini küçültmek için; hat uzunluğu sabit olduğuna göre ve

hafifliği nedeniyle alüminyum iletken kullanmak zorunda olunduğu dikkate alınarak ancak kesit büyütülebilir. Bu da artan iletken ağırlığı nedeniyle direk tasarımında büyüme ve maliyet artışı ve iletken maliyetlerinde artış anlamına gelir ki ekonomik bir çözüm değildir. Hattın endüktansı da iletkenler arasındaki mesafe ve iletkenin yapısına bağlı olduğu için değiştirilemeyeceğine göre yapılacak tek şey hatta seri kapasitör bağlamaktır. Böylece hattın seri empedansı $Z = R + j [2.\pi.f.L - 1 / (2.\pi.f.C)]$ olur ve küçülür. Seri kapasitörler hattın orta noktasına koyulurlar. Örneğin ülkemizde Keban HES – Ankara (Gölbaşı) hattının orta noktası olan Kayseri’de seri kapasitörler mevcuttur [11]. Seri kapasitörler iletilen akım genliğindeki endüktif bileşeni de azalttıklarından hat kayıplarının da azaltılmasına yardımcı olurlar. Seri kapasitörler her faza ayrı ayrı seri olarak bağlanırlar. Bu yöntem de ekonomik bir yöntem olmakla birlikte dezavantajı da vardır. Hattaki kısa devre anında büyük arıza akımları da kapasitör üzerinden geçerse büyük gerilimler oluşur ki buna izin verilmez. Bu amaçla seri kapasitörlerin kontrol devresi ile sistemden ayrılması ve arıza sonrası tekrar devreye alınması sağlanır.

3.1.5. Şönt reaktörlerle GFD yöntemi

Şönt reaktörler esas itibariyle self bobin olup elektriksel eşdeğeri $X_L = j 2.\pi.f.L$ dir. Uzun OG ve YG hatlarında hattın az enerjili ve yüksüz olması durumunda hattın toprağa karşı kapasitesinden dolayı hatta meydana gelen kapasitif reaktif enerji hat sonu geriliminin hat başı geriliminden daha yüksek olmasına neden olur. Bu yükseklik özellikle tehlikeli manevra aşırı gerilimlerine yol açabilir. Bunu gidermek amacıyla hatların uçlarına hatta paralel self endüktans elemanları bağlanır. Şekil 3.2’de 3 fazlı bir hatta paralel olarak bağlanan bir şönt reaktör görülmektedir. L_1 , L_2 ve L_3 faz iletkenlerini göstermektedir. Bu reaktörler hattaki kapasitif reaktif enerjiyi daha fazla kompanze edebilmek için manyetik nüvesi olmayan kuru tip yapırlar, YG’de görev yapan şönt reaktörler de aynı olur, ancak soğutma kolaylığı bakımından kuru tip (hava soğutmalı) değil yağlı tip (yağ soğutmalı) yapırlar.



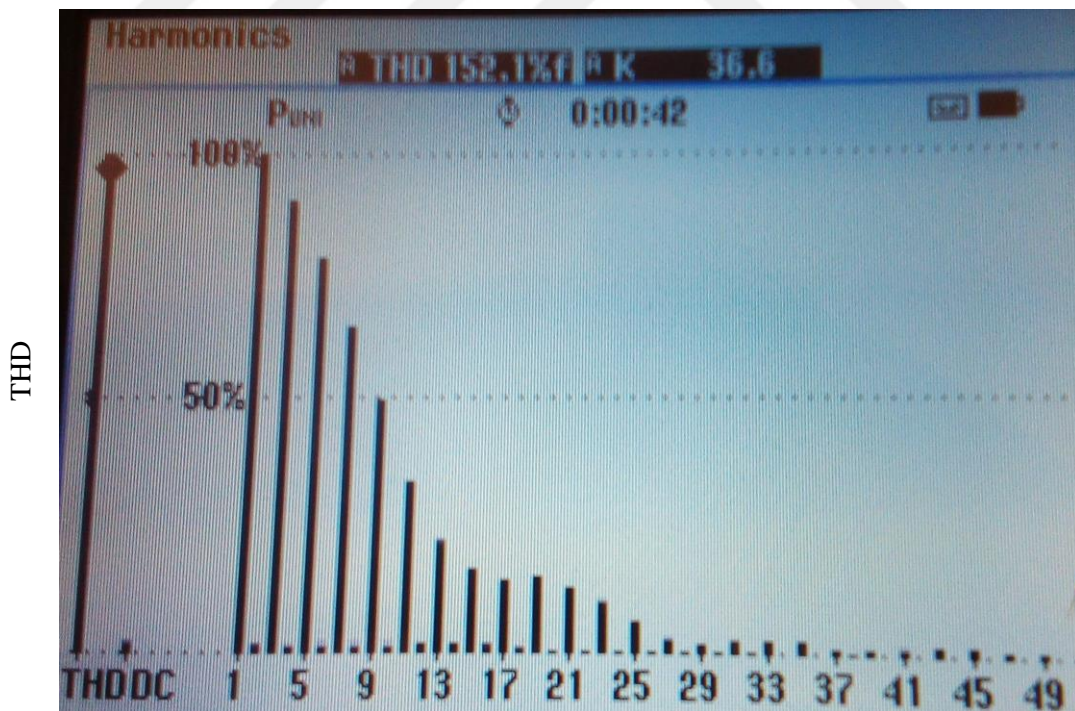
Şekil 3.2 Yıldız bağlı şönt reaktör

Yeni nesil şönt reaktörler kapasitif akımı gözlemleyerek kontrol eder ve şönt reaktörün gücünü ayarlayarak sisteme verirler. Böylece daha iyi işletme şartları sağlanmış olur. Şönt reaktörler ekonomik bir çözüm üreten bir GFD yöntemi olarak bilinir. Ancak dezavantajı da vardır. Bunlar senkron kompanseörlerden farklı olarak yalnızca kapasitif reaktif enerjiyi üstüne alabilir. Başka bir deyişle yalnızca ters (negatif) faz açısını düzeltirler.

3.2. Harmoniklerin GFD Yöntemleri Üzerine etkileri

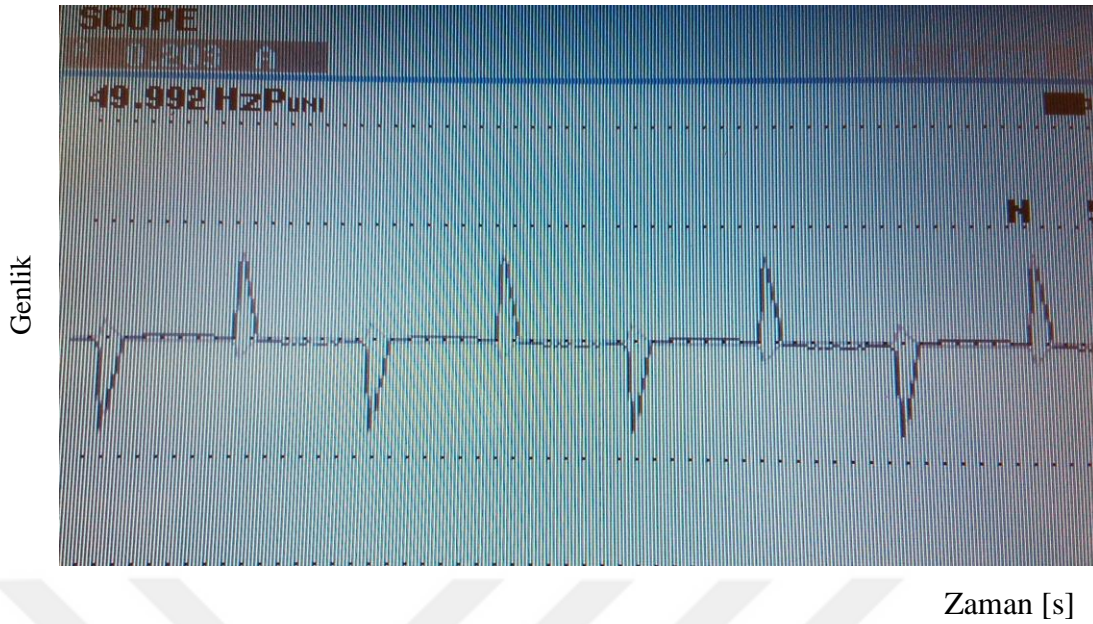
Şebekenin yani kaynak tarafının sinüsoidal olması, yük ve devre elemanlarının R, L ve C karakterli olmaları yani lineer olmaları durumunda yukarıda belirtilen yöntemler ekonomik ve uygulanabilir çözümler olarak karşımıza çıkar. Bu durumda harmonikler söz konusu olmaz. Oysa kesintisiz güç kaynaklarında olduğu gibi sinüsoidal gerilimlerden elektronik yolla elde edilen DA kaynaklarında kaynağın kendisi şebekeden saf sinüsoidal akım çekmediği için güç faktörünün düzeltilmesi gerekir. Bu düzeltme ile birlikte harmonikler de düzeltilir. Bunun yanı sıra devre elemanlarının uçlarındaki gerilimin dalga şekli ile akımın dalga şekli aynı değilse (farklıysa); başka bir deyişle devre elemanı lineer değilse (nonlinear); bu durumda akım ve gerilim biçimleri farklı olduğundan hem güç faktörünün ve hem de harmonik distorsiyonların düzeltilmesi gerekecektir. Günlük hayatta kullanılan ve içinde diyot, transistor, tristör vb. yarı iletken içeren bilgisayar, TV, radyo, fotokopi makinası gibi pek çok elektronik donanımın yanı sıra dönüştürücüler, anahtarlamalı güç kaynakları, kesintisiz güç kaynakları, motorlar, transformatörler, kontrol devreleri, frekans dönüştürücüler, kaynak makinaları, elektrikli ulaşım sistemleri, YG DA iletim sistemleri,

fotovoltaik sistemler, lamba balastları, sodyum ve cıva buharlı deşarj lambaları, flüoresan lambalar, gerilimle veya sıcaklıkla direnci değişen dirençler vb. lineer olmayan elemanlara örnek olarak verilebilir. Bu gibi durumlarda kaynak gerilimi sinüzoidal olmasına rağmen, bu devre elemanları harmonikli akım çekerler. Örnek olmak üzere bir dizüstü bilgisayarın bataryası sökülerek çektiği akım deneysel olarak tespit edilmiştir. Dizüstü bilgisayarın çektiği akımın harmonik analizi Resim 3.1’de ve harmonik akım dalga şekli Resim 3.2’de görülmektedir. Görüleceği üzere THD = % 152,1 olup 3. harmonikten başlayarak 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19,.....35. harmoniğe kadar bileşen içermektedir. Resim 3.1den görüleceği üzere 3., 5., 7., 9., 11., 13., 15., 17., 19., 21., 23., ve 25. Harmonikler sırasıyla %90, %79, %65, %50, %34, %22, %17, %14, %14, %12, %9, %6 olup 25. Harmonikten büyük olan harmonikler ise %5’den küçüktür.



Harmonik sayısı

Resim 3.1 Bir dizüstü bilgisayarın çektiği akımın harmonik analizi



Resim 3.2 Bir dizüstü bilgisayarın çektiği akımın dalga şekli

Dağıtım sistemlerinde harmonikli akım çekilmesi halinde endüktif reaktansın harmonikli ifadesi:

$$X_{L(n)} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot f \cdot L = n \cdot X_L \quad (3.8)$$

Burada:

n: n. harmonik sayısı

X_L : Temel frekanstaki endüktif reaktans

$X_{L(n)}$: n. harmonik endüktif reaktansı

olmaktadır. Görüldüğü üzere hattın endüktif reaktansı harmonikli akımda n kat büyür. Bu da “Eş.2.13” gereğince gerilim düşümlerinin artmasına ve enerji kalitesinin düşmesine neden olmaktadır. Kapasitif reaktans ise $1/(2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)$ olduğundan n kat düşer. Başka bir deyişle:

$$X_{C(n)} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot f \cdot C} = \frac{X_C}{n} \quad (3.9)$$

Burada:

X_C : Temel frekanstaki kapasitif reaktans

$X_{C(n)}$: n. harmonik kapasitif reaktansı.

Harmonik frekansta X_C n kat küçüldüğü için n. harmonik akım;

$$I_{C(n)} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot f \cdot C \cdot U_C \quad (3.10)$$

Olur ve akım değeri büyür, sonuç olarak aşırı akımın ısı etkisi nedeniyle kondansatörler zorlanırlar.

Harmonik akım taşıyan iletkenlerde AA'da görülen "deri etkisi" (skin effect) frekans n katına çıktıkça daha da büyür ve bilindiği üzere akımın yalnızca yüzeye yakın yerden akması nedeniyle sanki kesit küçülüyormuş gibi etki yaptığından iletkenlerde ve kablolarda ısı etkisi yapar ve iletkendeki ısınma yalıtkanın ömrünün azalmasına neden olur. Harmonikli akımlar I^2R (joule) kayıplarının da artmasına neden olurlar. Çünkü hem R hem de akımın temel frekansı dışındaki bileşenlerinin yeni bir joule kayıp bileşeni oluşturarak mevcut kayıplara ekleneceği açıkça görülmektedir. Ayrıca üç fazlı bir sistemde tek fazlı asimetrik non lineer tüketiciler nedeniyle nötr teli akımı sıfır olmaz, üstelik her faz akımın 3. harmonik bileşenleri arasındaki faz farkı $n=3$ olduğundan $3 \cdot 120^\circ = 360^\circ$ olur ki tüm 3. harmonik bileşenler üst üste binerek büyük akım değerleri oluştururlar. Böylece nötr telinden geçen akım fazlardan geçen akımdan bile daha büyük değerlere ulaşabilir ki bu da nötr telinde ısınmalara ve arızalara neden olur. Oysa dengeli lineer yük halinde nötr telinden akım geçmeyecektir. Dağıtım şebekelerinde nötr teli kesiti faz teli kesitinin yarısına en yakın bir üst norm değer olarak belirlenir. Bu durum dikkate alındığında büyük yalıtım tehlikeleri oluşturabilir. Isınma etkisi generatör, transformatör ve motorlarda da ısınmalara ve gürültüye neden olarak verimin düşmesine neden olurlar. Bunun yanı sıra akımın ısı etkisi ile çalışan röleler, sigortalar gibi devre elemanları da ısınmadan dolayı yanlış açmalara neden olabilirler.

Sinüzoidal bir şebekeye bağlı bir yük, örneğin bir fabrika kondansatörlerle kompanse edilen bir reaktif güç kompanzasyonu tesisine sahipse, aynı baraya bağlı harmonikli akım çeken nonlineer yük nedeni ile nonsinüzoidal gerilimle beslenirler ve kondansatörlerde gerilim yükselmesi olur. Eğer gerilimin n. harmonik bileşeni $V_{(n)}$ ise Güç sistemlerinde simetri nedeniyle $n = 1, 3, 5, 7, \dots$ harmonikleri söz konusu olur. O halde V gerilimi tüm gerilim bileşenlerinin kareleri toplamının kareköküne olacaktır. Başka bir deyişle gerilim

büyüyecektir. Öte yandan kondansatör yalıtkanındaki dielektrik kayıplar gerilimin karesi ile değişirler [25]. Bunun sonucu olarak:

$$P_{\text{dielk}} = U_C^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C \cdot \tan\delta \quad (3.11)$$

Burada:

δ : Kayıp açısı ($90^\circ - \varphi$)

olup; kondansatörde dielektrik kayıpları artacağı için yalıtkan aşırı ısınarak zorlanacaktır.

Bir kondansatörün reaktif gücü:

$$Q_C = U_C \cdot I_C = U_C^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C \quad (3.11)$$

olduğundan, herhangi n. harmonik bileşeninden ileri gelen güç $Q_{C(n)}$

$$Q_{C(n)} = n \cdot U_{C(n)}^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C \quad (3.12)$$

olur. Görüleceği üzere kondansatör harmonik bileşen reaktif güçleri nedeniyle aşırı reaktif güç üreterek de zorlanmaktadır. Sonuç olarak harmoniklerin bulunduğu yerlerdeki kompanzasyon tesislerinde harmoniklerden arındırma işlemi de kaçınılmaz olmaktadır. Harmoniklerden süzme işlemi filtreler ile yapılır.

3.3. Filtreler Kullanan GFD Yöntemleri

Harmoniklerin kompanzasyon sistemi üzerine olan olumsuz etkileri nedeniyle pasif veya aktif filtreler kullanılır. Filtreler pasif devre elemanları olan lineer karakteristiğe sahip direnç (R), endüktans (L) ve kapasitans (C) elemanlarının kombinasyonları kullanılarak yapılırsa “pasif filtre” olarak adlandırılır. Eğer filtre, kontrollü bir kaynağa sahipse “aktif filtre” olarak adlandırılır. Aşağıda pasif ve aktif filtreler ile yapılan GFD yöntemleri ele alınacaktır.

3.3.1. Pasif filtreler kullanan GFD yöntemi

Pasif filtreler kaynak ve yük arasına seri veya paralel bağlanırlar ve esas itibariyle giderilmesi istenen harmonik frekansı sayısı kadar paralel koldan oluşan ve her kolda

birbirine seri veya paralel bağı L ve C elemanları bulunan bir devredir. Her bir koldaki L ve C elemanları, o kola ait harmonik frekansı değerinde rezonans oluşacak şekilde belirlenir. Başka bir deyişle endüktansın ve kapasitansın reaktansları birbirine eşit olacak şekilde belirlenir. Bu durumda:

$$(3.13) \quad 2.\pi.f_r.L = 1/ (2.\pi.f_r.C)$$

Burada:

f_r : olup o kola ait harmonik frekansına eşit olan rezonans frekansı

Kaynak ile yük arasına seri bağlanan pasif filtreler harmonik akışına izin vermezler. Bunu sağlamak için izin verilmeyen harmonik frekansında büyük empedans gösterecek şekilde boyutlandırılırlar. Örneğin nonlinear 1 fazlı harmonik akım çeken bir yük için genlik bakımından büyük tehlike arz eden 3. harmonik bastırılmak istense $3.2.\pi.f$ frekansında büyük empedans gösterirken temel frekansa (örneğin 50 Hz) düşük empedans gösteren bir filtre tasarımı yapılır. Bu filtre “seri filtre” adını alır ve kaynakla yük arasına seri olarak bağlanan birbirine paralel L ve C elemanlarından oluşur. Etkili bir yöntem olmasına karşın seri bağlandığı için yük akımına ve kaynak geriliminin yalıtım seviyesine dayanacak şekilde tasarımı yapılmalıdır. Bu da filtre maliyetlerini akım ve gerilimin büyüklüğüne ve yalıtım seviyesinin büyüklüğüne bağlı olarak ekonomiklikten uzaklaştırır. İkinci bir dezavantajı da filtre aynı zamanda GFD yapmaz. GFD nin ayrıca yukarıda açıklanan yöntemlerden uygun olana göre tasarımı yapılması gerekir. Üçüncü dezavantajı frekansta ayarlama yapılmadığı için yalnızca tasarımı yapıldığı ayar frekansında çalışır.

Kaynak ve nonlinear yük arasına paralel olarak bağlanan filtreler de mevcuttur. Bunlara “şönt filtreler” denir ve şönt filtreler bastırılmak istenen harmonik frekansında küçük empedans gösterirler ve bu harmoniği toprağa akıtırlar. Bu filtreler seri bağı R, L ve C elemanlarından oluşurlar. Eğer devrede bastırılmak istenen birden fazla harmonik varsa her bir harmonik için bir paralel kol koyulur. Ayrıca bir paralel C elemanı da koyularak GFD de yapılmış olur. Ekonomik ve tasarımı kolay olmasına karşın şebeke empedansı ile rezonans oluşturulmamasına dikkat etmek gerekir.

Belli bir frekansın üstündeki frekanslara düşük empedans gösteren “sönümlü pasif filtre”

olarak adlandırılan filtreler de mevcut olup, bunlar da hem harmonik arındırma ve hem de GFD işlemi yapabilirler [26].

3.3.2. Aktif GFD Yöntemleri

Aktif filtreler, özellikle güç elektroniği devrelerinin 1970'li yıllarda kullanılmasının yaygınlaşması neticesinde gündeme gelmiştir. Aktif filtreler nonlineer yük tarafından talep edilen temel frekans dışındaki tüm harmonik akımları kendileri karşılayarak nonlineer yükün şebekeden harmonikli akım çekmesini ve şebekeye zarar vermesini önlerler. Bunu bir örnekle açıklamak gerekirse; örneğin pek çok uygulamada karşılaşıldığı üzere dönüştürücü içeren non lineer bir yükün çektiği non lineer akım

$$(3.14) \quad i_{\text{yük}} = i_1 + i_H$$

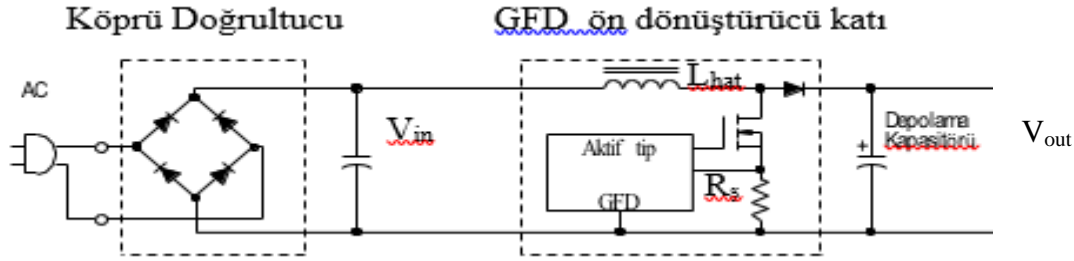
olsun. Burada i_H yükün non lineer olmasına sebep olan temel bileşen dışındaki tüm harmonik bileşen akımlarının (örneğin 5., 7., 11., 13. harmonik gibi) toplamını temsil etmektedir. O halde dönüştürücü akımının harmonik bileşenini yok etmek için aktif filtre akımı:

$$(3.15) \quad i_F = -i_H$$

olacak şekilde tasarımlanır. Bu durumda aktif filtre akımı ve yük akımının toplamı i_1 temel frekans akımına yani şebekeden çekilen akıma eşit olur. Bunu yapabilmek için nonlineer yükün çektiği akımın harmonik analizinin yapılması ve talep edilen harmonik akım genlik ve frekansının belirlenmesi gerekir. Bu genlik ve birden fazla frekanslardaki değişime aktif filtrenin adapte olabilmesi onun en büyük üstünlüğüdür. Bunlar kontrollü güç elektroniği devreleri içermesi nedeniyle pasif filtrelere göre nispeten pahalı olmakla birlikte son yıllarda ayrı zamanlı yarı iletken malzemelerdeki gelişmeler, denetleyici entegre devre (IC) elemanlarının düşük fiyatlı hale gelişi nedeniyle, aktif GFD çözümleri daha geniş bir uygulama aralığı bulmaya başlamış ve uygun hale gelmiştir. Bu uygunluk modern anahtarlamalı güç kaynakları için GFD tasarımında gerekli birçok yeni denetleyici IC'nin son birkaç yılda teknolojik olarak gelişmesiyle olmuştur. Ancak yine de GFD çözümlerini

değerlendirirken, en önemli parametre ihtiyaç duyulan gücü, GFD sisteminin toplam maliyetini ve performansını birlikte dikkate almak gerekir.

Anahtarlama modlu bir yükseltici (boost) tip dönüştürücü Şekil 3.3.'te görüldüğü gibi giriş köprü doğrultucusu ile depolama kondansatörü arasında yerleştirilip ve dönüştürücü bir GFD IC (Entegre Devre) ile kontrol edilmek suretiyle güç-güç faktörü düzeltilebilir.



Şekil 3.3. Anahtarlama modlu GFD çip ile denetlenen bir dönüştürücü

Şekil 3.3. ile ilgili açıklamalar:

L_{hat} : Hat endüktansı

$R_{ş}$: şönt direnci

V_{in} : Köprü çıkış gerilimi

V_{out} : GFD çıkış gerilimi

Anahtarlama modlu GFD yöntemleri, esas itibarıyla:

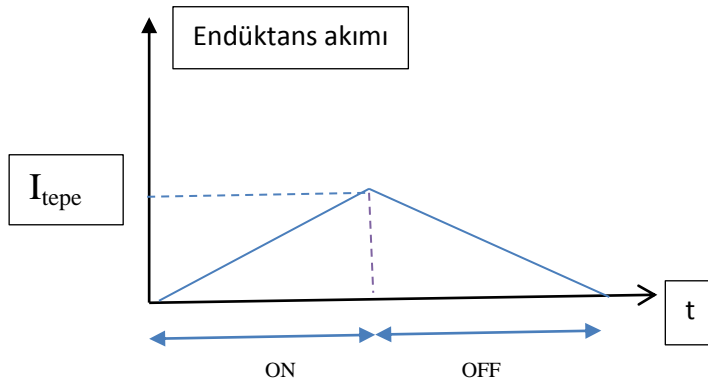
- Kritik iletim modlu (KİM);
- Kesintili (Frekans kenetlemeli kritik) iletim modlu (FKKİM);
- Sürekli iletim modlu (SİM);

GFD yöntemleri olmak üzere sınıflandırılır. Ancak özel uygulamalar için “Ara kademeli” GFD, “Köprüsüz” GFD ve “Tek kademeli ayırık” GFD yöntemi gibi diğer GFD yöntemleri de kullanılmaktadır.

3.3.2.1. Kritik iletim modlu GFD yöntemi

Bu moda “Geçiş Modu” veya “Sınır İletim modu” da denir. Bu modda köprü diyotların çıkışında bulunan hat endüktansının (L_{hat}) bir MOSFET yardımıyla anahtarlama sağlanır. Anahtarın ON durumu ve OFF durumu, bir Kritik iletim modlu dönüştürücü için iki temel

işlem durumudur. MOSFET, GFD'den aldığı bir referans gerilim (V_{ref}) değerinin hat endüktansına ON komutunu göndererek hat endüktansından rampa şeklinde yükselen bir akım akarak şönt direncin (R_s) uçlarının V_{ref} değerine ulaşmasını sağlar. Fakat V_{ref} değerine ulaştıktan sonra da durum değişir ve anahtar OFF konuma geçerek hat endüktans akımının tekrar sıfıra düşmesini sağlar. Tam sıfır noktasına gelince tekrar MOSFET'ten ON komutu gelince endüktans akımı tekrar rampa şeklinde V_{ref} değerine kadar yükselir. Şekil 3.4'de anahtarlama durumu görülmektedir. Bu işlemler böylece devam eder. İşlem sıfır geçişlerinde yapıldığı için "Kritik İletim Modu" adını alır. Böylece GFD'nin belirlediği V_{ref} değerinin akım tarafından takip edilmesi sağlanmış olur.



Şekil 3.4. KİM GFD yönteminde hat endüktans akımı

Endüktans elemanı için $V=Ldi/dt$ olup $di/dt =V/L$ dir ve di/dt aynı zamanda rampa doğrusunun eğimi olup öte yandan üçgenin özelliğinden hat frekanslı giriş akımının ani değeri I_{in} ise anahtarlama zamanı, giriş akımı, giriş gücü ve gerilimi arasındaki ilişkiler:

$$(3.15) \quad I_{in} = I_{Ltepe} / 2$$

$$(3.16) \quad I_{in} = (V_{in}/2L) \cdot t_{ON}$$

ve

$$(3.17) \quad t_{ON} = 2 \cdot L \cdot I_{in} / V_{AA}$$

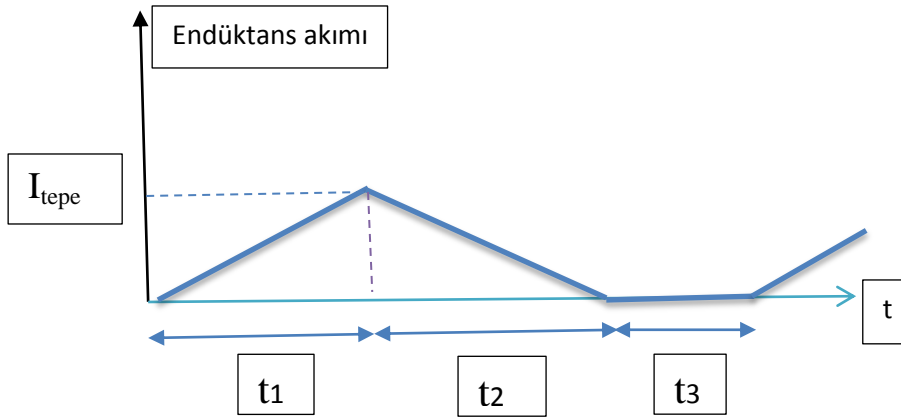
$$(3.18) \quad t_{ON} = 2 \cdot L \cdot P_{in} / V_{AA}^2$$

ile verilir.

Kritik İletim Modu, özellikle düşük güç uygulamaları için basitliği ve ucuzluğu bakımından avantajlıdır. Bununla birlikte, sinüsoidal sinyalin sıfır geçişlerinde, değişken anahtarlama frekanslarında ve çok küçük yüklerde kritik iletim modu bazı sınırlamalar göstermektedir. En belirgin sınırlama, dönüştürücünün frekans aralığının, hat ve yük koşullarına göre önemli ölçüde değişmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu da; güç faktöründe, özellikle de frekansın en yüksek seviyeye ulaştığı sıfır geçiş noktalarının yakınında bir bozulma meydana gelmesine sebep olmaktadır.

3.3.2.2. Kesintili iletim modlu (KeİM) GFD yöntemi

Kesintili İletim Modlu yöntemine “Frekans kenetlemeli kritik iletim modu” (FKKİM) da denilir. Kritik İletim Modlu yöntemden farklı olarak bu modda 3 temel durum vardır. Bunlar: Anahtar ON durumu (t_1), akım iletimi olan OFF durumu (t_2) ve endüktanstan hiç akım akmayan (akım iletimi olmayan) OFF durumu (t_3). Şekil 3.5’de 3 farklı durum görülmektedir.



Şekil 3.5. Kesintili iletim modlu GFD durumunda hat endüktans akımı

KeİM (FKKİM) yönteminde ise KİM yönteminde açıklanan “Eş.3.16” yeni duruma göre adapte edilirse giriş ve akımı ve giriş gerilimi arasındaki ilişki:

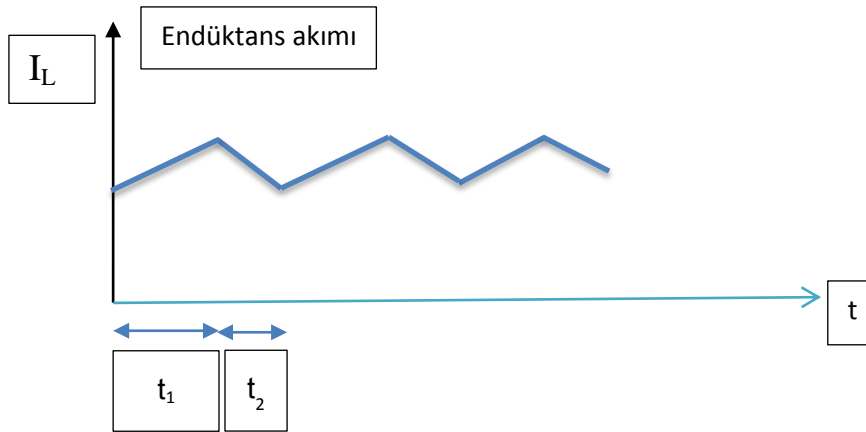
$$I_{in} = (V_{in}/2L) \cdot t_1 \cdot [(t_{1+} - t_2) / (t_{1+} - t_{1+} - t_3)] \quad (3.19)$$

Giriş ve akımı ve giriş gerilimi arasındaki ilişki GFD kontrol algoritmasının temelini açıklar.

Kesintili iletim modu yüksek tepe akım seviyelerine neden olduğu için tüm durumlarda ideal bir bir mod değildir.

3.3.2.3. Sürekli iletim modlu (SİM) GFD yöntemi

Sürekli iletim modu (SİM) ile güç faktörünün düzeltilmesi en çok kullanılan GFD yöntemidir. Bu yöntem ortalama akım modunun kontrolü esasına dayanır.



Şekil 3.6. Sürekli iletim modlu GFD durumunda hat endüktans akımı

SİM yöntemi tepe ve etkin değeri küçük akımlarına sahip olduğundan daha yüksek güç seviyelerinde daha çok kullanılır. KİM yöntemi ile karşılaştırıldığında, tepe akımlarının % 50 daha düşük ve etkin değer akımlarının % 25 daha düşük değerleri söz konusu olabilmektedir. Bu da diyot, endüktans ve MOSFET'lerin daha az zorlanma ve yıpranmaları anlamına gelmektedir. Boost (yükseltici) endüktansından geçen akım daha sürekli olduğu için filtreleme daha kolaydır. SİM çalışması için anahtarlama frekansı sabit kalır, böylece boost endüktans tasarımı ve harmonik filtre tasarımı daha kolay hale gelmektedir. Ancak diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında devre yapısı hepsinden daha karmaşık olup GFD çipi dışında daha çok sayıda devre elemanı içerirler.

Bu çalışmada boost tipi sürekli iletim moduna (SİM) sahip bir güç faktörü düzeltici (GFD) devre tasarlanacaktır.

Boost tipi dönüştürücüler girişlerindeki DA gerilimini yükselterek daha büyük DA gerilimi elde edilmesini sağlayan devrelerdir. Boost tipi bir devrede birer adet endüktans, diyot, kapasitör ile bir adet anahtarlama özelliği olan eleman bulunur. Uygulamada ise anahtarlama işlemi MOSFET tarafından yapılır. Bu devre elemanlarının bağlantı şekli Şekil 3.3’de görüldüğü üzere; endüktans elemanı L_{hat} olarak, kondansatör devre çıkışındaki depolama kondansatörü olarak yer almakta olup ayrıca MOSFET ve diyot elemanı da bulunmaktadır. Devrenin çalışması ve devre girişindeki V_{in} geriliminden daha büyük bir DA V_{out} gerilimi elde etmesi şu şekildedir:

MOSFET tarafından anahtarlama yapıldığında yani “on” konumunda ise endüktans elemanı V_{in} giriş gerilimi ile beslenir. Endüktans üzerinden akan akımın artmasıyla birlikte endüktanstaki akım değişimine bağlı olarak endüktans üzerinde enerji depolanacaktır. Bu durumda diyot anot ucu negatif potansiyelde olacağından diyot tıkama konumunda yani açık devre olacaktır. MOSFET’in “on” konumunda olduğu süreye “doluluk oranı” denir ve D ile gösterilir. MOSFET’in anahtarlama frekansı f ise T periyodu $T=1/f$ olacaktır. Bu durumda MOSFET’in iletimde kaldığı süre ($D.T$) kadar olacaktır. L_{hat} endüktansının uçlarındaki gerilim

$$V_L = L \cdot (di/dt) \quad (3.20)$$

$$di = (1/L) \cdot V_L \cdot dt \quad (3.21)$$

ve akımdaki toplam değişim miktarı

$$\Delta i_i = \int_0^{D.T} \left(\frac{1}{L}\right) V_{\text{in}} \cdot dt = [(D.T) \cdot V_{\text{in}}] / L \quad (3.22)$$

olur.

MOSFET anahtarlama elemanı olarak “kesim” konumunda ise endüktans üzerinde biriken enerji, V_{in} köprü çıkış gerilimi ile birlikte diyot elemanının iletime geçmesiyle birlikte bu enerji Şekil 3.3’de görülen depolama kondansatörünü doldurmaya başlayacaktır.

MOSFET'in kesim durumunda geçen süre $(1-D).T$ kadar olacaktır. Bu durumda endüktans gerilimi giriş ve çıkış gerilimi arasındaki farka eşit olur.

Kesim durumunda akımdaki toplam değişim miktarı

$$\Delta i_k = \int_{D.T}^T \left(\frac{1}{L}\right) (V_{in} - V_{out}).dt = [(V_{in} - V_{out})/L] \cdot (1-D).T \quad (3.23)$$

Bir T periyodu boyunca akımdaki iletim ve kesim durumlarındaki toplam değişim miktarı sıfır olacağından

$$\Delta i_i + \Delta i_k = [(D.T).V_{in}]/L + [(V_{in} - V_{out})/L] \cdot (1-D).T \quad (3.24)$$

$$V_{out} = V_{in} / (1-D) \quad (3.25)$$

elde edilir. Doluluk oranı 1'den küçük bir sayı olduğundan depolama kondansatör uçlarından V_{in} 'den daha büyük bir V_{out} çıkış gerilimini elde edilir. Sonuç olarak anahtarlama elemanı olarak MOSFET'in sabit bir frekansta iletim ve kesim durumlarında benzer işlemler tekrarlanır. Şekil 3.6'da hat endüktans akımının dalga şekli görülmektedir. Şekil 3.6'daki t_1 süresi iletim süresi olup DT 'ye eşittir. Kesim süresi olan t_2 ise $(1-D).T$ süresine eşittir. MOSFET'in anahtarlama periyodu $T = t_1 + t_2$ değerine eşittir. Buna yukarıda verilen eşitlikler aşağıdaki gibi de verilebilir:

$$V_{out}/V_{in} = (t_1 + t_2) / t_2 = T / (T - t_1) \quad (3.26)$$

MOSFET'in t_1 zamanı GFD içindeki rampa gerilimi V_{ramp} 'in referans olarak belirlenen V_{ref} referans gerilimine eşit oluncaya kadar devam eder. Eşitlik GFD içindeki karşılaştırma devresi ile sağlanır. Eşitlik sağlandığı anda MOSFET t_2 moduna yani "off" konumuna geçer.

4. SÜREKLİ İLETİM MODLU BİR AKTİF GFD DEVRESİNİN TASARLANMASI

4.1. Genel Açıklama

Son yıllarda anahtarlama güç kaynakları içeren cihazlardaki güç gereksinimlerindeki artış ve ülkemizin de üyesi olduğu Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından çıkarılan IEC 61000-3-2 standardının zorunlu tuttuğu güç faktörünün düzeltilmesi (GFD) veya harmonik azaltma gereklilikleri konuya olan ilgiyi artırmıştır.

Modern anahtarlama modlu güç kaynaklarının (SMPS) içine güç faktörü düzeltme özelliğinin eklenmesi için, pek çok yeni denetleyici entegre devrenin (IC) son birkaç yılda geliştirilmesiyle birlikte farklı çalışma modlarına sahip çeşitli GFD devreleri tasarlamak mümkün hale gelmiştir. Seçim alternatifi arttıkça, tasarımı uygulama karmaşıklığı da artmaktadır. Bu bölümde, “Sürekli İletim Modlu “ boost tipi GFD tasarlaması yapılacak, daha sonra MATLAB/SIMULINK Toolbox ile simülasyonu gerçekleştirilerek simülasyon değerleri ve grafikleri alınarak elde edilen sonuçlar analiz edilecektir. Ancak daha önce harmoniklerle ilgili temel tanımlar ve harmoniklerle PF arasındaki ilişkiyi belirlemek gerekir.

“Herhangi bir n. harmonik bileşenin harmonik distorsiyonu” (HD_n); n. harmonik bileşenin (V_n) ana bileşen (V_1) in etkin değerine oranıdır ve :

$$HD_n = V_n / V_1 \quad (n > 1) \quad (4.1)$$

“Toplam harmonik bozunum” (distorsiyon) (THB) (THD) ise 2. bileşenden başlayarak tüm harmonik bileşenlerin etkin değerlerinin kareleri toplamının karekökünün ana bileşene oranıdır ve:

$$THD = \left(V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2 \right)^{1/2} / V_1 = \left(V^2 - V_1^2 \right)^{1/2} / V_1 = \left[\left(V/V_1 \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \quad (4.2)$$

“Bozunum (distorsiyon) faktörü” (DF); 2. bileşenden başlayarak tüm harmonik bileşenlerin etkin değerlerinin n^2 ye bölüldükten sonra kareleri toplamının karekökünün

ana bileşene oranıdır ve:

$$DF = [(V_2/2)^2 + (V_3/3)^2 + \dots + (V_n/n)^2]^{1/2} / V_1 \quad (4.3)$$

“Herhangi bir harmoniğin bozunum (distorsiyon) katsayısı” (DF_n); sözkonusu harmoniğin etkin değerinin n^2 ye bölündükten sonra ana bileşene oranıdır ve:

$$DF_n = (V_n/n^2) / V_1 = V_n / (V_1 \cdot n^2) \quad (4.4)$$

En düşük dereceli harmonik (LOH) ise; frekansı ana bileşene en yakın ve genliği %3 veya daha büyük olan bileşendir [27]. Unutulmamalıdır ki yukarıda gerilim için yazılan bu eşitlikler akımlar için de yazılabilir. Bu durumda örneğin “Eş. 4.2”nin akım THD değeri için:

$$THD = [(I/I_1)^2 - 1]^{1/2} \quad (4.5)$$

Buna göre PF ve THD arasında aşağıdaki ilişkiler mevcuttur.

$$PF = P/S = P / (V \cdot I) \quad (4.6)$$

$$V = V_1 \cdot [1 + (THD_V/100)^2]^{1/2} \quad (4.7)$$

$$I = I_1 \cdot [1 + (THD_I/100)^2]^{1/2} \quad (4.8)$$

$$PF = P / \{V_1 \cdot I_1 \cdot [1 + (THD_V/100)^2]^{1/2} \cdot [1 + (THD_I/100)^2]^{1/2}\} \quad (4.9)$$

Burada:

P: Toplam aktif güç ($P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$)

S: Toplam görünen güç

THD_V : Gerilim için THD

THD_I : Akım için THD

“Eş. 4.6” ilâ “Eş. 4.9”den görüldüğü üzere yüksek PF elde edilebilmesi için THD nin çok düşük olması gerekir. Bu da harmoniklerin bastırılması ile söz konusu olacaktır. Öte yandan şebekeye bağlı sinüsoidal bir gerilimden beslenen harmonikli bir devrede PF temel bileşen akımının toplam akıma oranı cinsinden de ifade edilebilir [26].

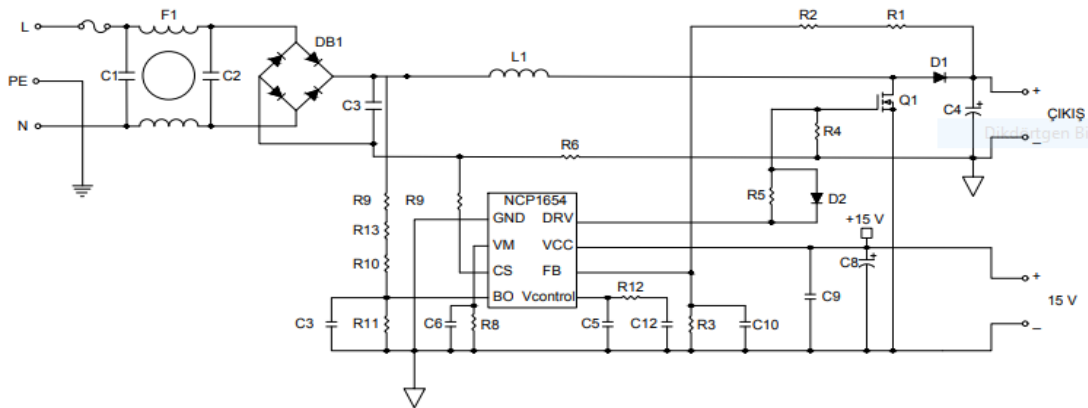
$$PF = P/S = (I_1/I) \cos\phi_1$$

(4.10)

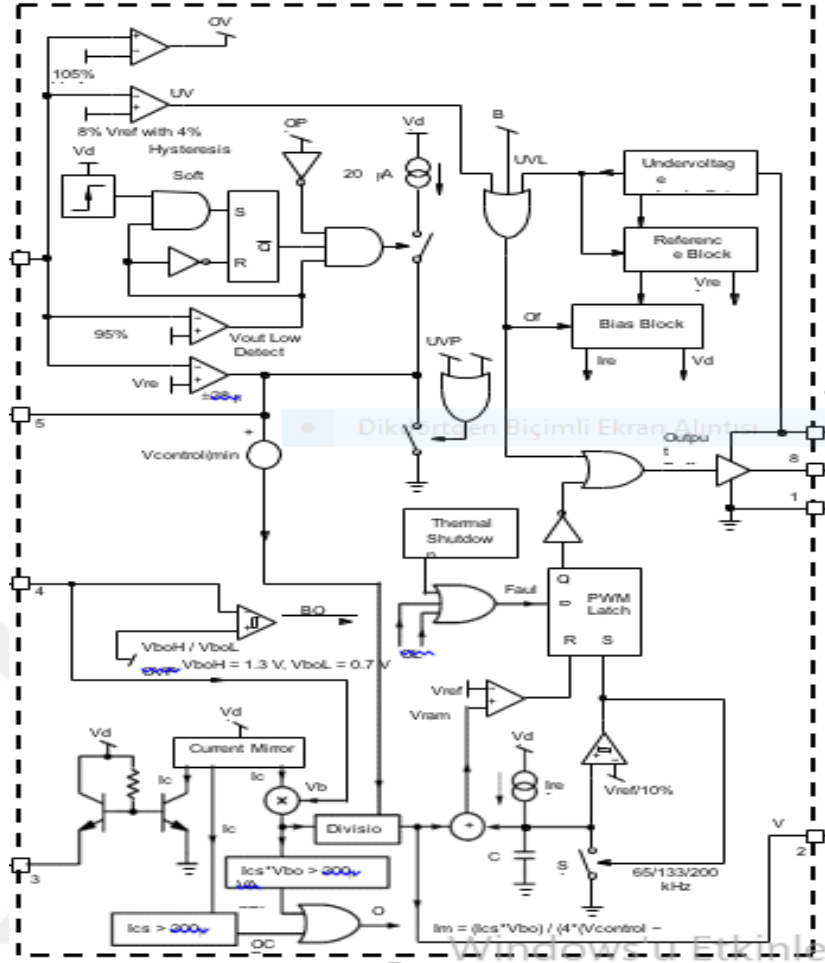
Bu eşitlikler daha sonra devrenin gerçekleştirilerek deney sonuçlarının harmonikler bakımından incelenmesi sırasında kullanılacaktır.

4.2. Devre Topolojisinin Açıklanması

Sürekli iletim modlu güç faktörü düzeltici devre anahtarlama modlu bir güç kaynağı için tasarlanacak olup AA girişinden itibaren köprü doğrultucu katı ve GFD ön dönüştürücü katından oluşacak ve DA çıkış elde edilecektir. Devrenin genel prensip blok diyagramı Şekil 3.3'de; devre genel şeması Şekil 4.1-a ve NCP 1654 içyapısı Şekil 4.1-b'de verilmiştir [28].



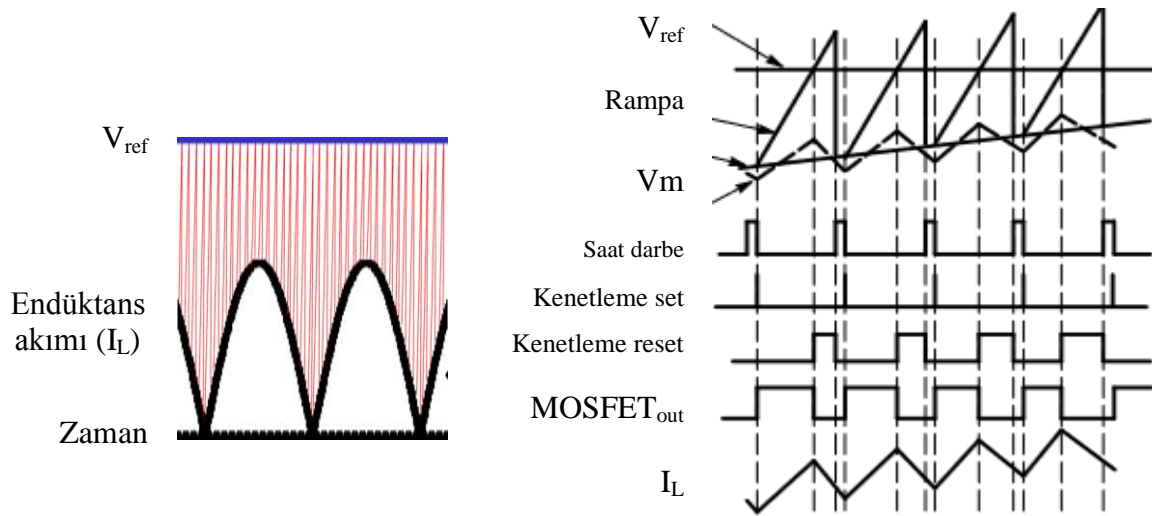
Şekil 4.1-a Tasarlanacak olan devrenin genel bağlantı şeması



Şekil 4.1-b NCP 1654 iç yapısı

Tasarlanacak söz konusu GFD devresinin entegresi olarak ON semiconductor şirketinin boost tipi sürekli iletim modu için ürettiği NCP 1654 kullanılacaktır. Tasarlanacak devrede kaynak olarak değeri 0 ilâ 380V arasında ayarlanabilir bir varyak (regülâtör) ile NCP 1654’ün çalışması için gerekli olan 15 V_{DA} yardımcı kaynak kullanılır. Devredeki başlıca devre elemanları ise GFD entegre devresi, MOSFET, Köprü diyotlar Boost diyot (D₁), Hat endüktansı (L₁), Depolama (çıkış) kondansatörü (C₄) ve diğer devre elemanlarıdır.

NCP 1654’ün iç yapısında esas itibariyle bir “darbe genişlik modülâtörü” (PWM) ile gerilimin izlenmesi suretiyle endüktans akımı biçimlendirilir. GFD iç yapısında bulunan hata amplifikatörü ise çıkıştan aldığı sinyal bilgisinin hatasına göre bir hata sinyali üretir. Çoklayıcı ise giriş gerilimi ile hata sinyalini çarpar (V_m gerilimi) . Böylece endüktans akımının bu çoklayıcı dalga biçimini izlemesi sağlanmış olur. Şekil 4.2’de endüktans akımı ve referans gerilim değerleri ve sinyaller görülmektedir.



Şekil 4.2 Endüktans akımı, referans gerilim ve sinyaller

4.3. Hesaplamalar ve Simülasyon Sonuçlarının Analizi

Ülkemizdeki nominal AG şebeke gerilim değeri 220 V ve frekansı 50 Hz değeri kullanılacaktır. Tasarlanacak olan GFD bu nominal değerlere göre test edilecektir. Ancak ülkelere göre AG nominal değerleri incelendiğinde 100 V kullanan ülkeler de mevcut olduğundan minimum giriş gerilimi olarak 100 V_{AA} değerinin %10-12 altında V_{AAmin}= 88 V olarak belirlenir. Maksimum AA gerilimi ülkemizde OG/AG transformatörlerde faz nötr arası 231 V olup bu değer test esnasında 230 V olarak yapılacaktır. Ancak tasarlama aşamasında diğer ülkelerde 230 V ve bazı diğer ülkelerde 240 V kullanıldığı için %10 fazla değer olarak 265 V_{AA} değerini belirlemek isabetli olacaktır.

Çıkış gerilimi (V_{out}) maksimum giriş geriliminin $\sqrt{2}$ katından büyük olmalıdır. Bu değer genel kabul olarak 385V ilâ 400 V arasındadır. Burada 385 V olarak alınacaktır. Maksimum çıkış gerilimi ise V_{out} değerinden %7-%10 daha fazla olup 415 V olarak öngörülmüştür. Çıkış gücü en az 100 W olarak tasarlanacaktır. Ancak dönüştürücülerin geniş bir çalışma aralığı nedeniyle bir rezerv katsayısı %50 alınarak 150 W a kadar sorunsuzca çalışabilmesi öngörülmüştür. NCP1654 için anahtarlama frekansı üreticisi tarafından yaygın kullanım olarak f_a= 65kHz olarak öngörüde bulunmuştur [28]. Çıkış gerilim dalgalılık değeri %5.V_{out}, GFD devre verimi (η) %90-93 arasında öngörülmüştür.

Hat endüktansı (L₁) iden geçecek olan etkin akım $I_{L1} = P/(\eta \cdot V_{AAmin}) = 150/0,9 \cdot 88 = 1,9$ A ve tepe akımı $\sqrt{2} \cdot 1,89 = 2,68$ A dir. Hat endüktansı:

$$L = \left[\frac{V_{AA\ min}^2}{2 \cdot \%I_f \cdot P_{out} \cdot \eta} \right] \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{\sqrt{2} \cdot V_{AA\ min}}{V_{out}} \right] \right\} \quad (4.11)$$

ile verilir. Burada:

%I: giriş akımı dalgalılık oranının %25-45 değeri olup değerler yerine koyulursa:

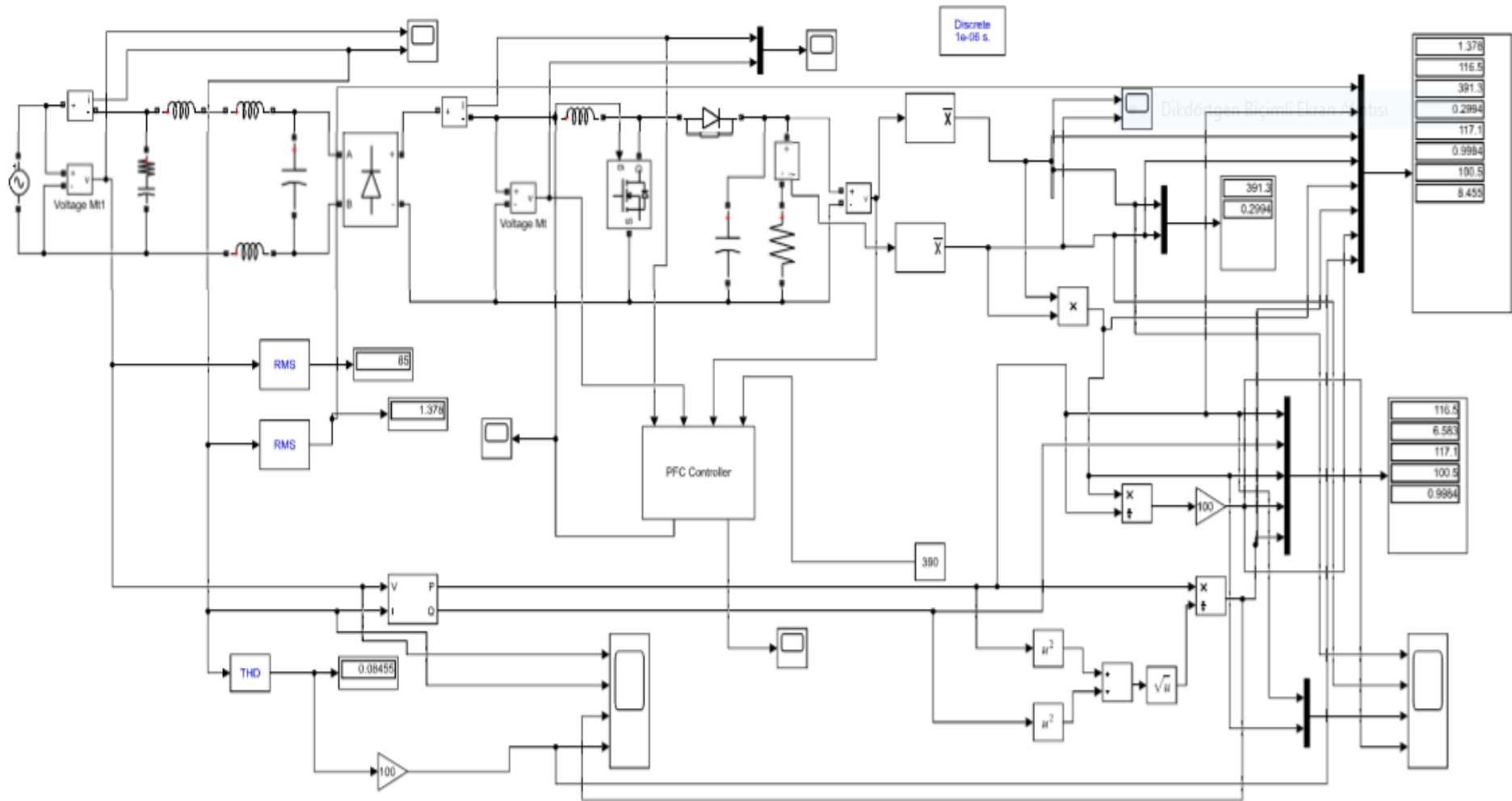
$$L = \left[\frac{88^2}{2 \cdot \%45 \cdot 65000 \cdot 150 \cdot 0,93} \right] \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{\sqrt{2} \cdot 88}{385} \right] \right\} = 642 \mu H \approx 650 \mu H \text{ alınacaktır.}$$

Köprü diyotlar hat endüktans akımının tepe değerini sorunsuzca verebilecek değerde olmalıdır. Gerilim seviyesi olarak %50 marj değeri de dikkate alınarak 600 V olarak alınacaktır. MOSFET'in de benzer şekilde 600V zorlanmaya dayanıklı olması gerekecektir.

Çıkış depolama kondansatörü boşa çalışma gerilimi 400 V'a kadar çıkabildiğinden 450 V olarak seçilecektir. Kondansatör gücü elektrik alanında biriken enerji $W = (1/2)CV^2$ formülünden hesaplanabilir. Enerji $W = P \cdot t =$ olduğundan

$$C = (2 \cdot P \cdot t) / V^2 \quad (4.12)$$

olur. Burada t, endüktansın tutma zamanı olup yaklaşık olarak 20 ms alınabilir. P ise çıkış gücü olup değeri 150 W alınacaktır. V ise çıkış gerilimi ve $V_{min} = 330$ V olmak üzere 2 farklı değere sahiptir. Buna göre $C = (2 \cdot 150 \cdot 0,02) / (385^2 - 330^2) = 152 \mu F \approx 180 \mu F$ alınacaktır. Tasarlanan GFD devresi öncelikle MATLAB (9.3 Version) / SIMULINK (9.0 Version) Toolbox kullanılarak simüle edilmiş ve Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Simülasyon devresi

Elde edilen simülasyon sonuçlarından akım, gerilim, güç, PF ve THD değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelge 4.1’den görüleceği üzere Simülasyona 85 V_{AA} değerinden başlanmış olup 100 – 115 - 130 - 145 - 160 - 175 – 190 - 205 - 220 - 230 V değerleri sırasıyla uygulanmıştır.

Çizelge 4.1. Hesaplanan akım, gerilim, güç, PF ve THD değerleri

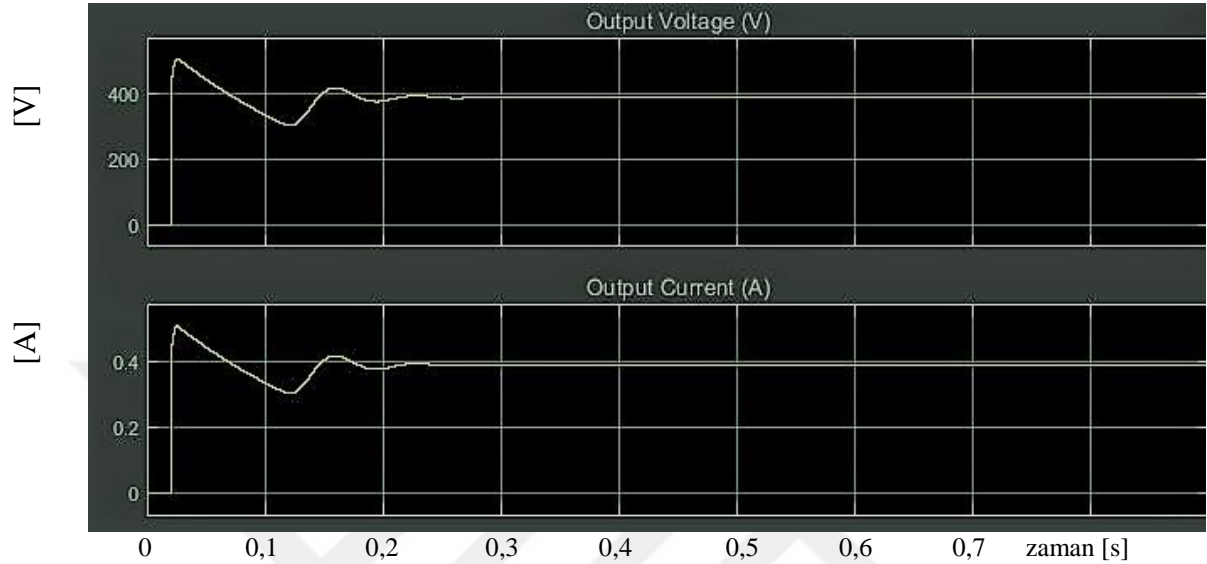
V _{in} [V]	I _{in} [A]	P _{in} [W]	V _o [V]	I _o [A]	P _o [W]	PF	THD [%]
85	2.076	161.36	389.94	0.388	152.05	0.997	6.60
100	1.786	163.55	389.95	0.389	152.06	0.998	7.53
115	1.569	165.34	389.99	0.389	152.09	0.999	8.07
130	1.399	166.71	389.96	0.387	152.07	0.999	7.92
145	1.264	167.97	390.02	0.390	152.12	0.999	8.03
160	1.149	168.33	389.97	0.389	152.08	0.998	8.04
175	1.051	168.42	389.97	0.389	152.07	0.997	8.05
190	0.967	168.20	389.97	0.389	152.08	0.996	8.88
205	0.896	167.84	390.03	0.390	152.12	0.994	9.52
220	0.832	166.58	389.97	0.389	152.08	0.991	12.03
230	0.793	165.37	389.98	0.389	152.08	0.990	13.10

Çıkış geriliminin ve çıkış akımının grafikleri Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Grafikten görüleceği üzere çıkış gerilim yaklaşık 390 V ve çıkış akımı ise 0,39 A’dır. Sistemde gerilim uygulanmasından itibaren 0,15 s lik geçici rejim süresinin oluştuğu; daha sonra gerilim ve akımın kararlı (stabil) durma geçerek sabit değeri aldığı görülmektedir. Bu durum sistem cevabı olarak da ifade edilebilir.

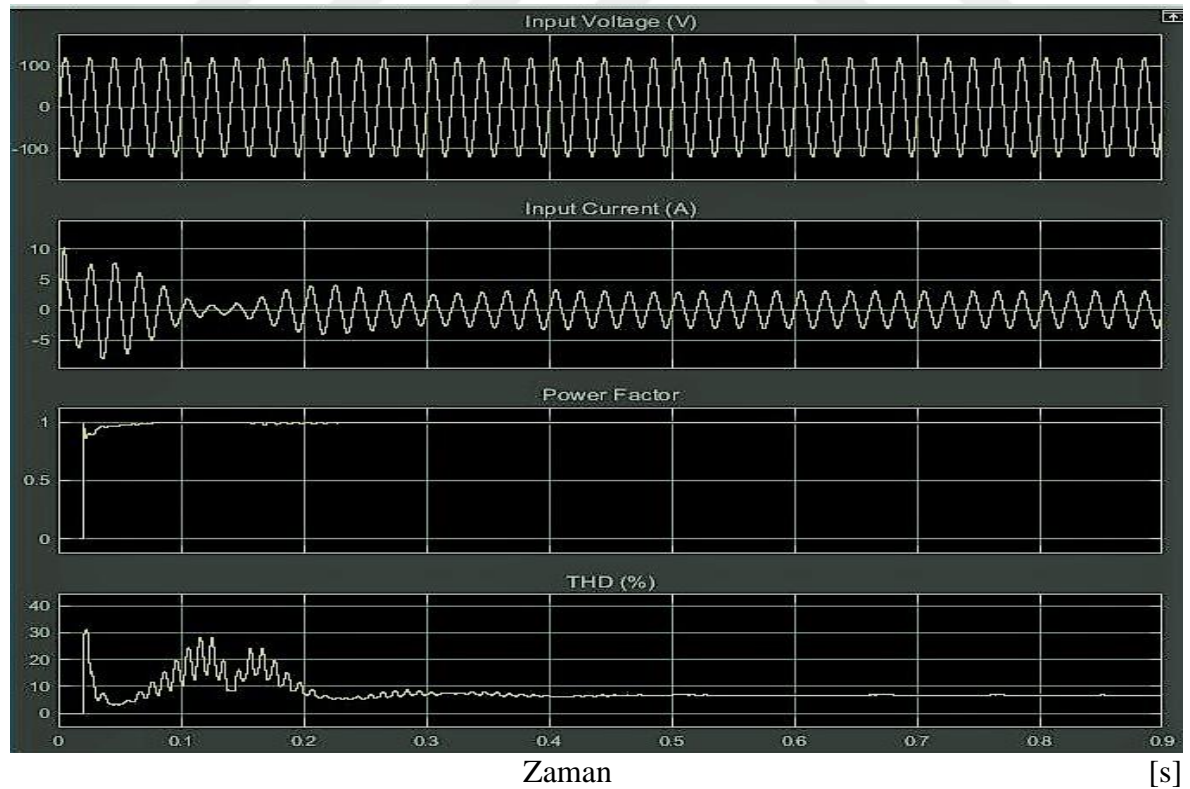
Giriş gerilim değerlerinin sırasıyla 85 - 100 – 115 - 130 - 145 - 160 - 175 – 190 - 205 - 220 - 230 V değerlerine ilişkin:

- Giriş geriliminin zamana göre değişimi,
- Giriş akımının zamana göre değişimi,
- Giriş tarafındaki güç faktörünün (PF) zamana göre değişimi,
- Toplam harmonik distorsiyonun (THD) zamana göre değişim grafikleri elde edilmiştir.

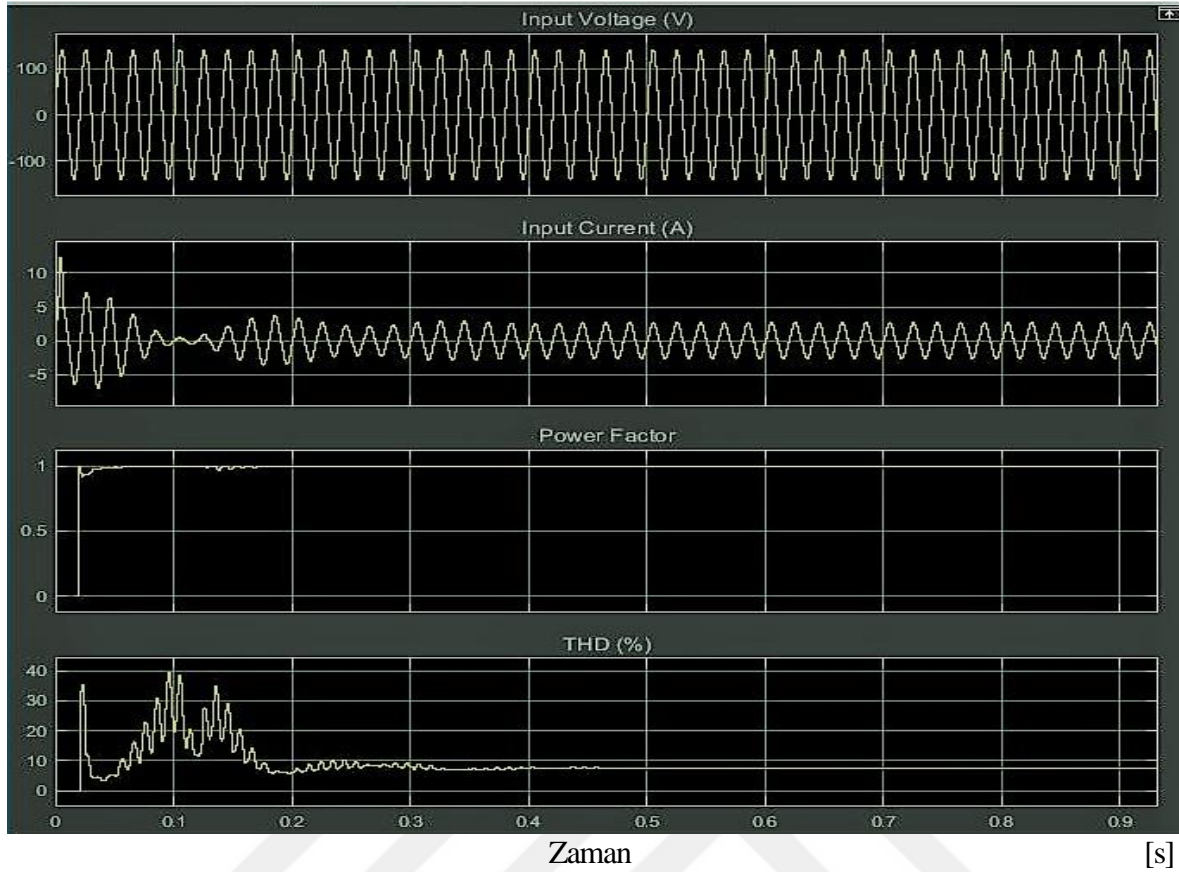
Uygulanan giriş gerilimlerine göre bu grafikler sırasıyla Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



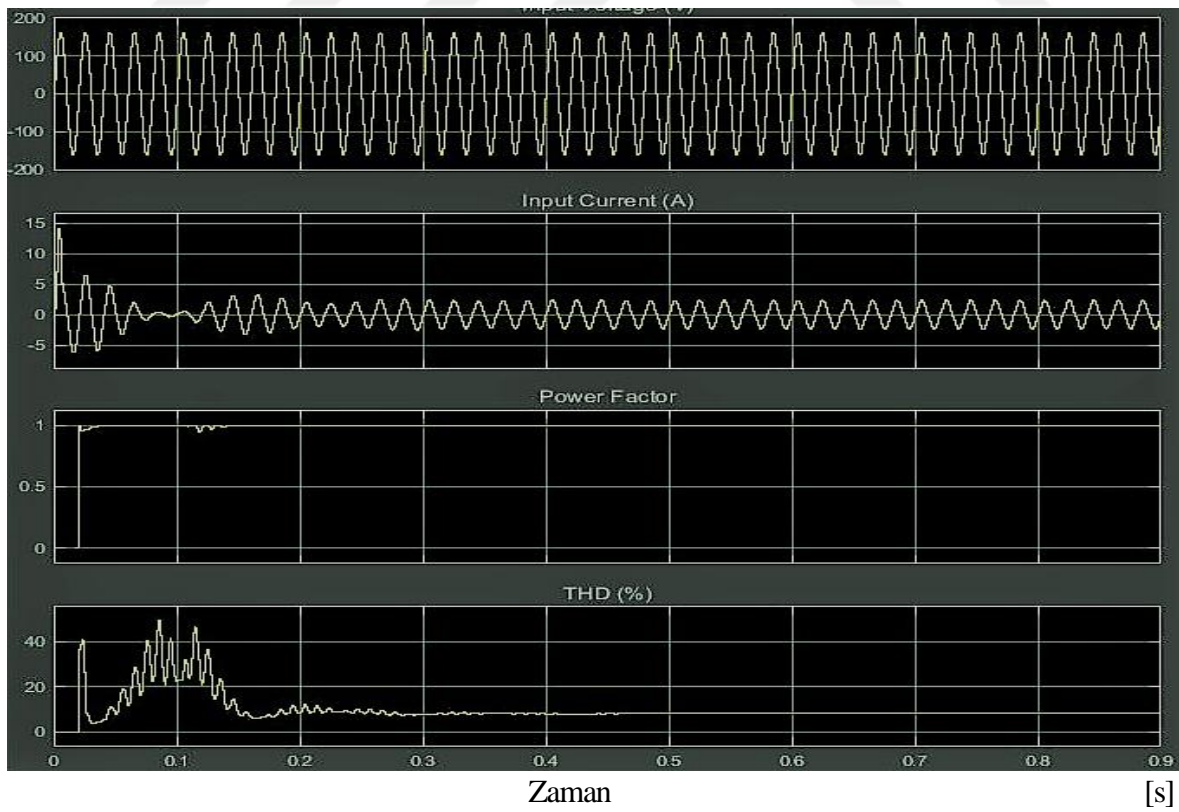
Şekil 4.4 Çıkış gerilimi ve çıkış akımının zamana göre değişimi



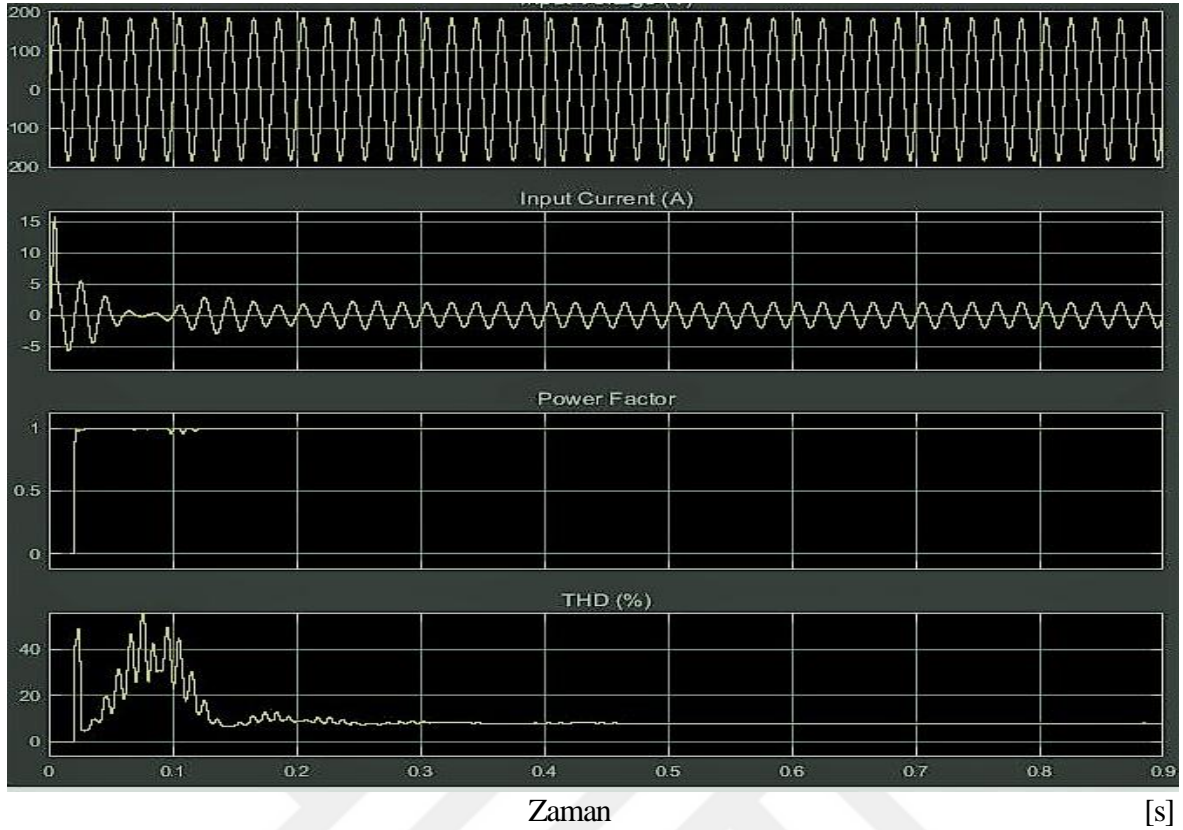
Şekil 4.5. 85 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri



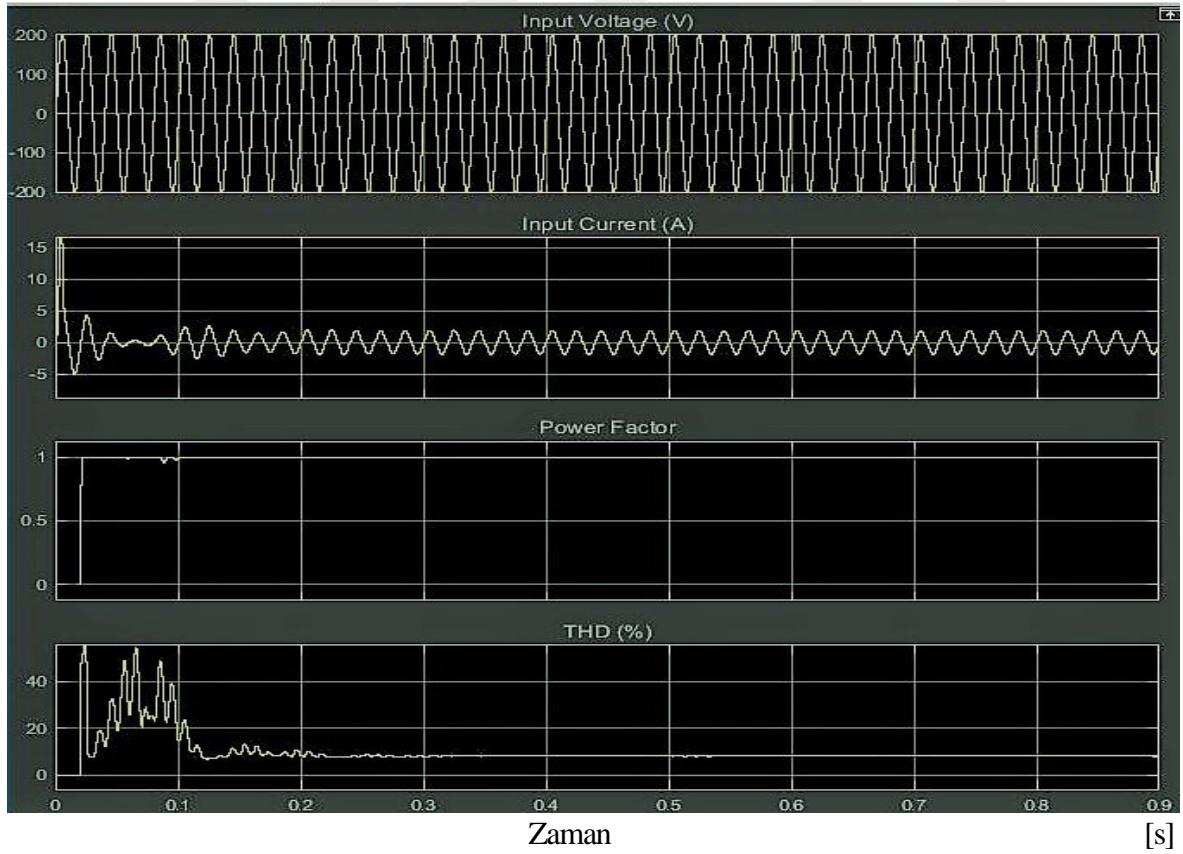
Şekil 4.6. 100 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri



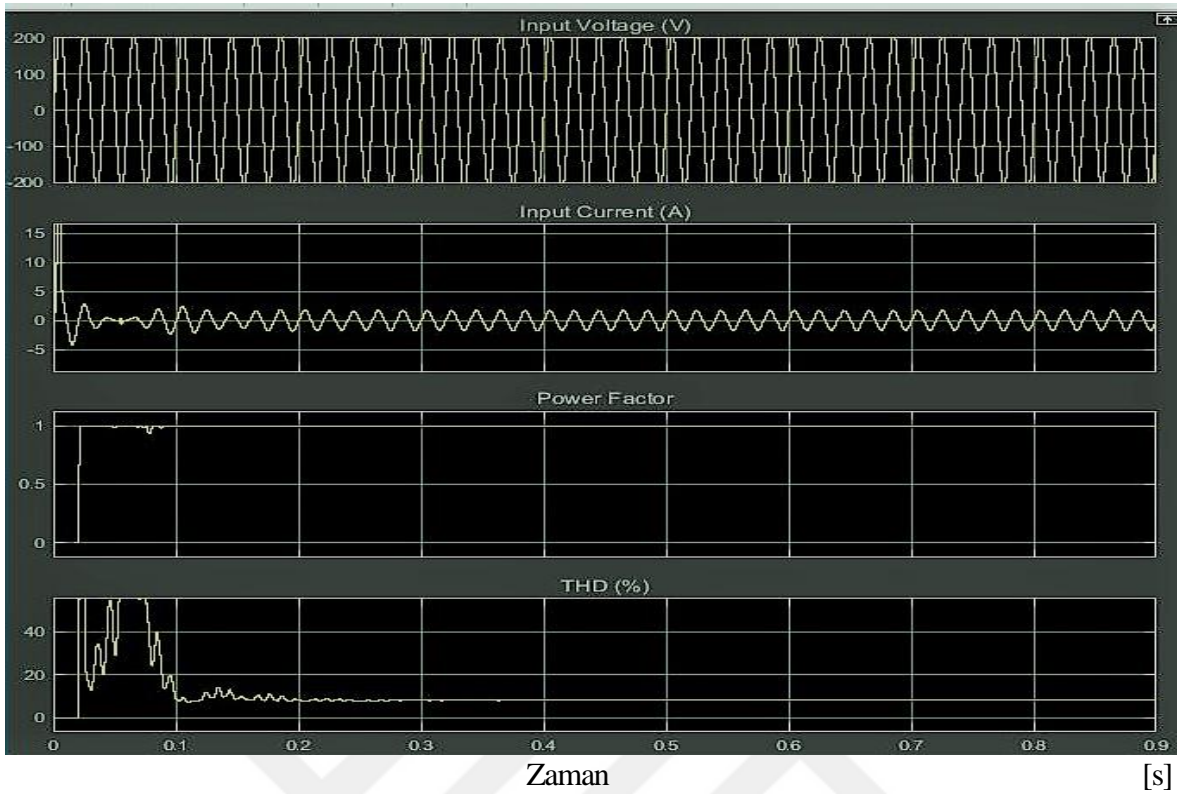
Şekil 4.7. 115 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri



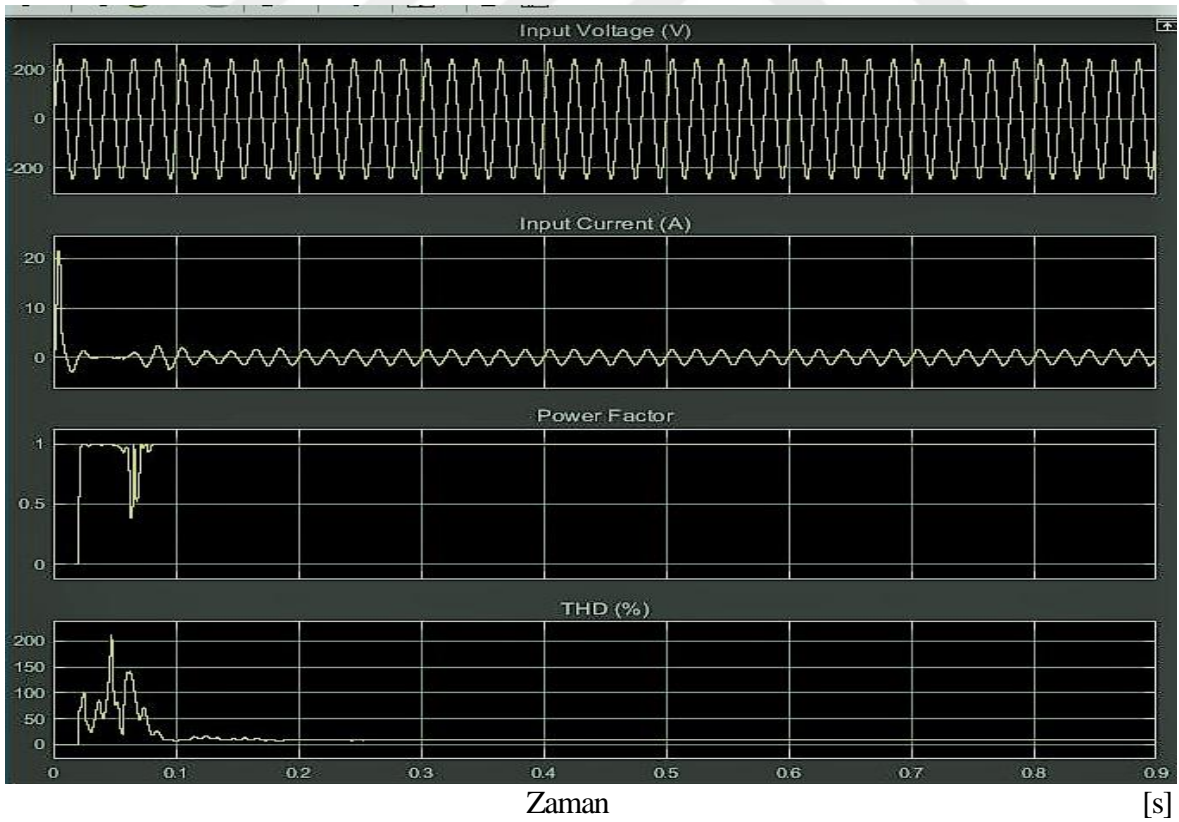
Şekil 4..8. 130 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri



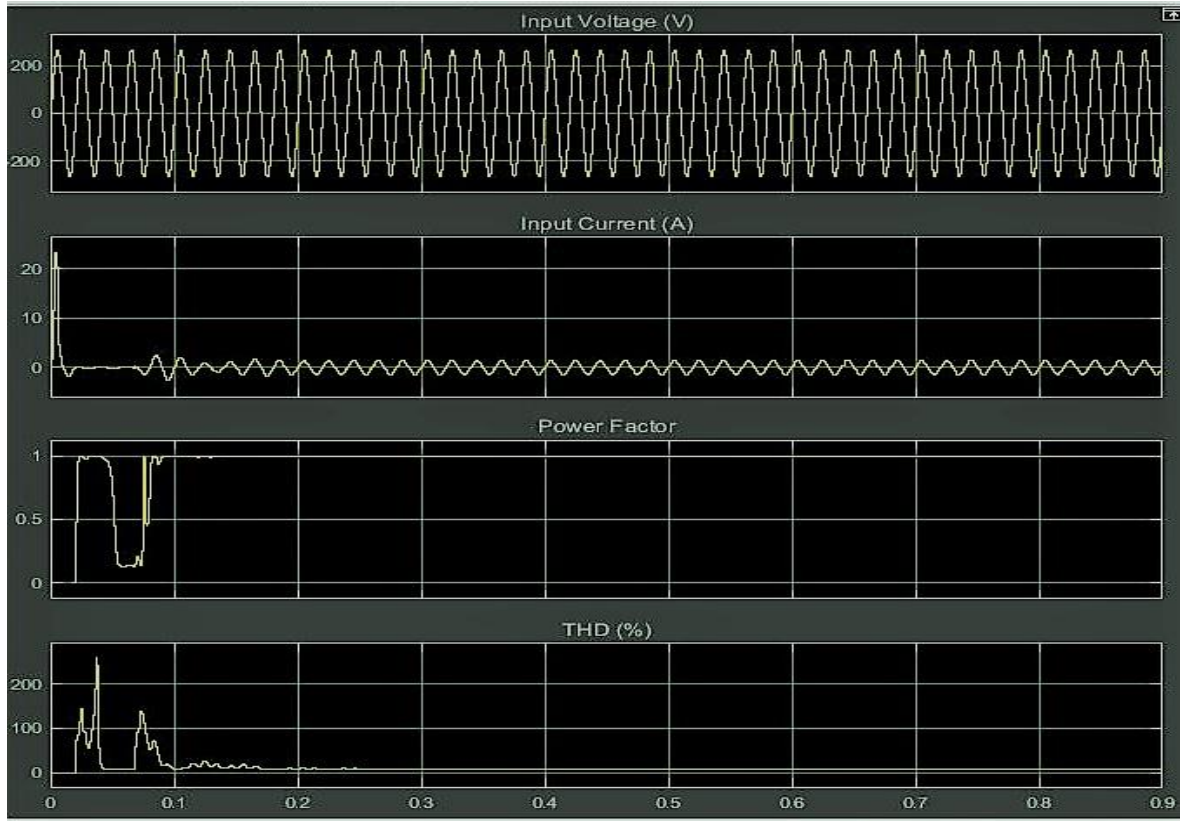
Şekil 4..9. 145 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri



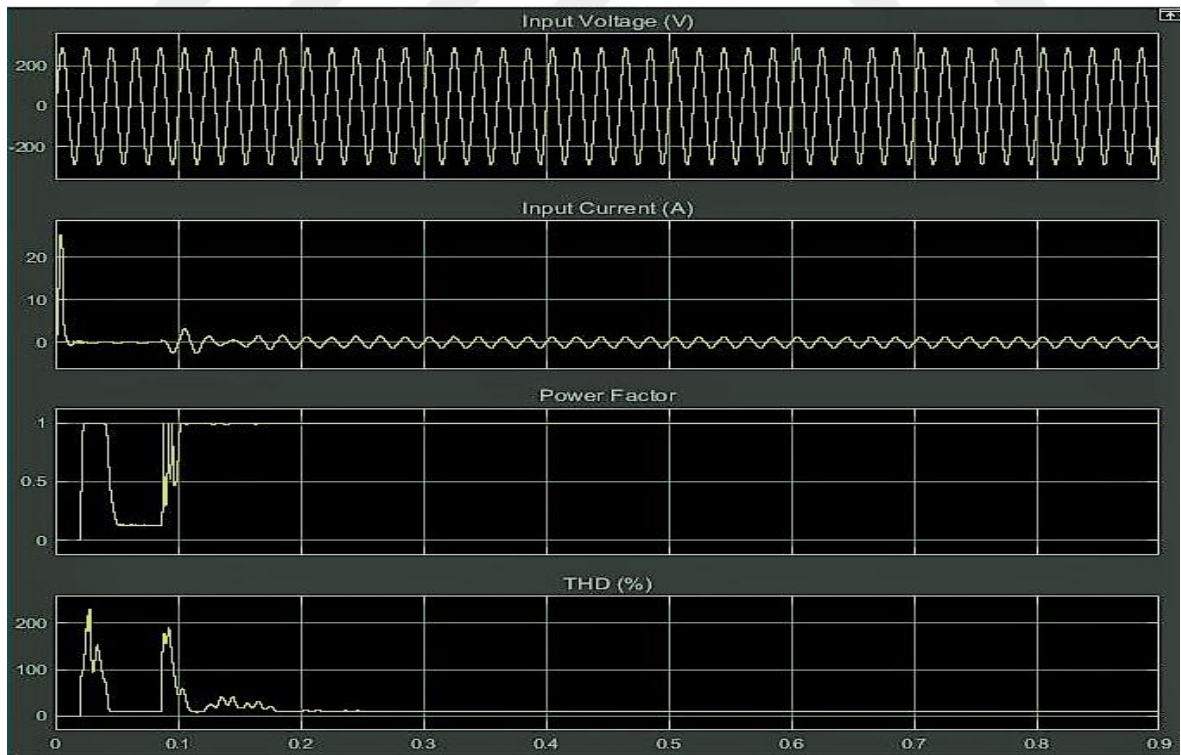
Şekil 4.10. 160 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri



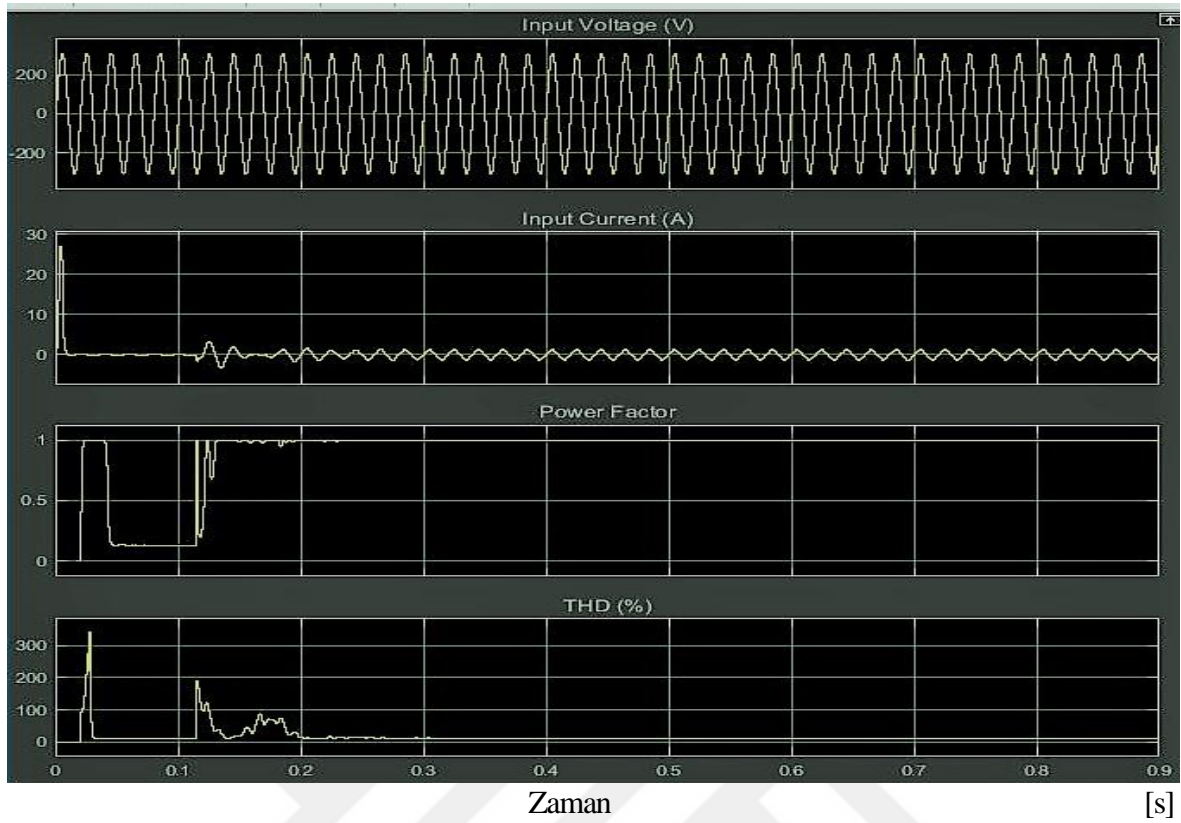
Şekil 4.11. 175 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri



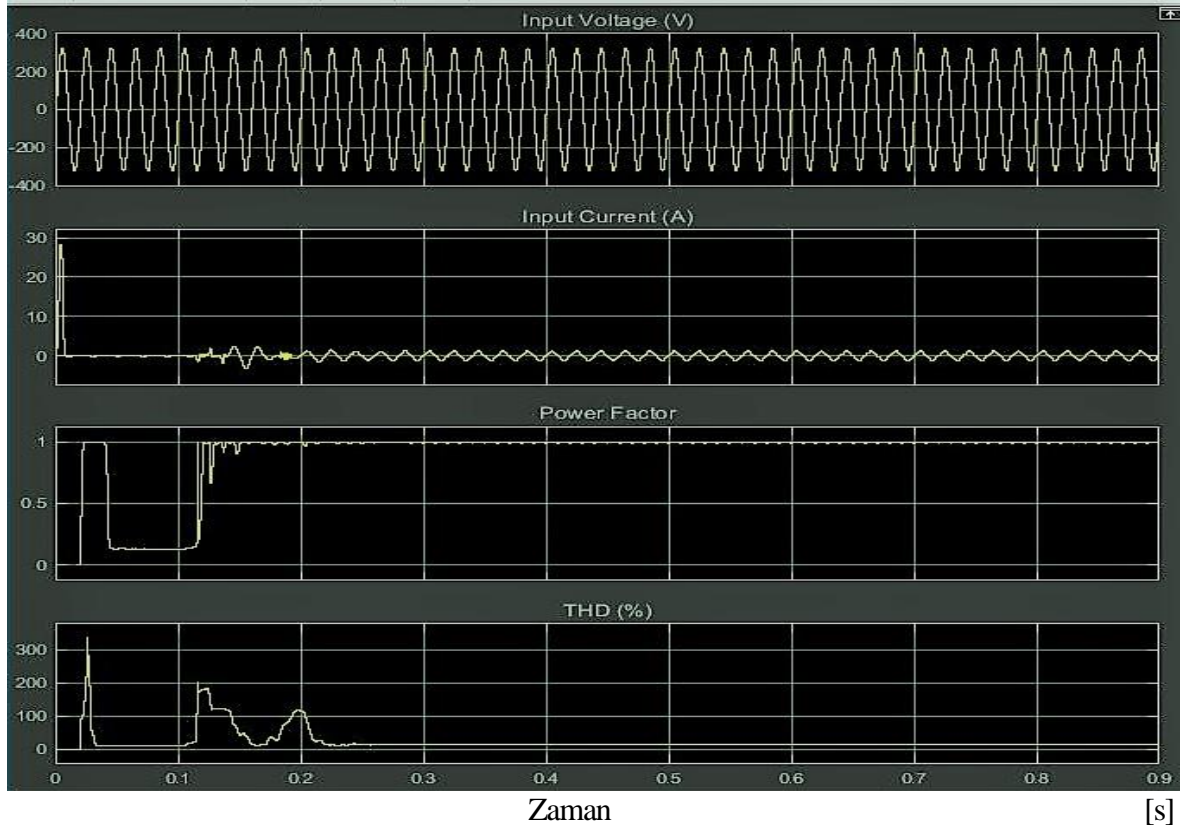
Şekil 4.12. 190 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri



Şekil 4.13. 205 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri



Şekil 4.14. 220 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri



Şekil 4.15. 230 V Giriş geriliminde V_{in} , I_{in} , PF ve THD grafikleri

Uygulanan giriş gerilimlerine göre PF ve THD değerlerine ilişkin Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de verilen grafiklerinin incelenmesinden aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır.

85 V giriş gerilimi için PF için sistem cevabının 0,02 s içerisinde başka bir deyişle AA giriş geriliminin 1. periyodunda kararlı hale geçtiği ve 0,997 değerine ulaştığı anlaşılmaktadır. THD bakımından incelendiğinde sistem cevabının 0,2 s içinde kararlı duruma geçtiği ve THD = % 6,6 değerinde tuttuğu anlaşılmaktadır.

Giriş geriliminin 100 V değeri için grafiklerin incelenmesinden PF ün 0,2 s içinde kararlı duruma geçerek PF= 0,998 değerinde tuttuğu ve THD değerindeki kararlı durma geçiş süresinin 0,18 s sürerek THD değerinin % 7,53 olduğu anlaşılmıştır.

Giriş geriliminin 115 V değeri için grafiklerin incelenmesinden PF ün 0,02 s içinde kararlı duruma geçerek PF= 0,998 değerinde tuttuğu ve THD değerindeki kararlı durma geçiş süresinin kısalarak 0,16 s sürdüğü ve THD değerinin % 7,53 olduğu anlaşılmıştır.

130 V giriş gerilimi için PF için sistem cevabının 0,02 s içerisinde başka bir deyişle AA giriş geriliminin 1. periyodunda kararlı hale geçtiği ve 0,999 değerine ulaştığı anlaşılmaktadır. THD bakımından incelendiğinde sistem cevabının 0,14 s içinde kararlı duruma geçtiği ve THD = % 7,92 değerinde tuttuğu anlaşılmaktadır.

Giriş geriliminin 145 V değeri için grafiklerin incelenmesinden PF ün 0,2 s içinde kararlı duruma geçerek PF= 0,999 değerinde tuttuğu ve THD değerindeki kararlı durma geçiş süresinin 0,12 s sürerek THD değerinin % 8,03 olduğu anlaşılmıştır.

Giriş geriliminin 160 V değeri için grafiklerin incelenmesinden PF ün 0,02 s içinde kararlı duruma geçerek PF= 0,998 değerinde tuttuğu ve THD değerindeki kararlı durma geçiş süresinin kısalarak 0,10 s sürdüğü ve THD değerinin % 8,04 olduğu anlaşılmıştır.

Giriş geriliminin 175 V değeri için grafiklerin incelenmesinden PF ün ilk kararlı duruma 0,2’inci saniye içinde geçtiği ancak THD değerinin 0,06’ıncı saniyede henüz kararlı duruma geçememesi nedeniyle ikinci kararlı duruma 0,06’ıncı saniyeyi müteakiben ulaştığı görülmektedir. Kararlı durumda PF’ün 0,997 değerinde olduğu ve THD değerinin % 8,05 olduğu anlaşılmıştır.

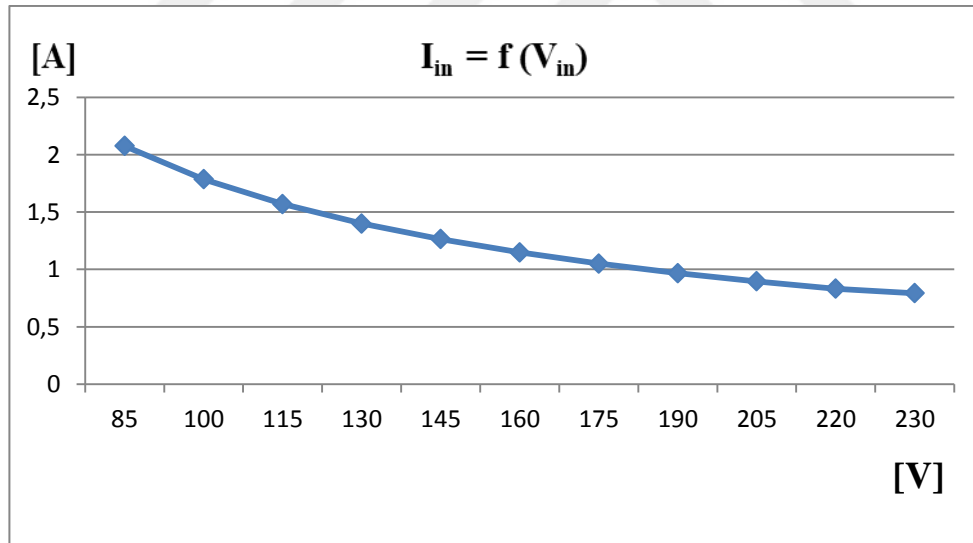
Giriş geriliminin 190 V değeri için grafiklerin incelenmesinden THD değerindeki kararlı durma geçiş süresine bağlı olarak PF ün 0,08 s içinde kararlı duruma geçerek PF= 0,996 değerinde tuttuğu ve THD değerinin % 8,88 olduğu anlaşılmıştır.

205 V giriş gerilimi için PF için sistem cevabının THD'nin kararlı duruma geçişine bağlı olarak 0,994 değerine ulaştığı ve THD değerinin % 9,52 olduğu anlaşılmaktadır.

Giriş geriliminin 220 V değeri için grafiklerin incelenmesinden PF ün 0,12 s içinde kararlı duruma geçerek PF= 0,991 değerinde tuttuğu ve THD değerindeki kararlı durma geçiş süresinin 0,2 s sürerek THD değerinin % 12,03 olduğu anlaşılmıştır.

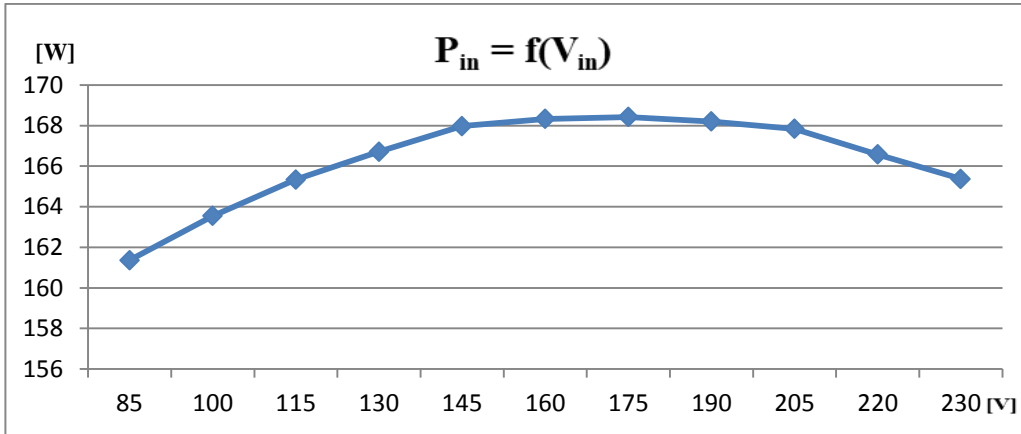
Giriş geriliminin 230 V değeri için grafiklerin incelenmesinden PF ün 0,13 s içinde kararlı duruma geçerek PF= 0,990 değerinde tuttuğu ve THD değerindeki kararlı durma geçiş süresinin kısalarak 0,21 s sürdüğü ve THD değerinin % 13,10 olduğu anlaşılmıştır.

Giriş akımının kaynak gerilimine bağımlılığı Şekil 4.16'da ve kaynaktan çekilen gücün kaynak gerilimine bağımlılığı Şekil 4.17'de verilmiştir.



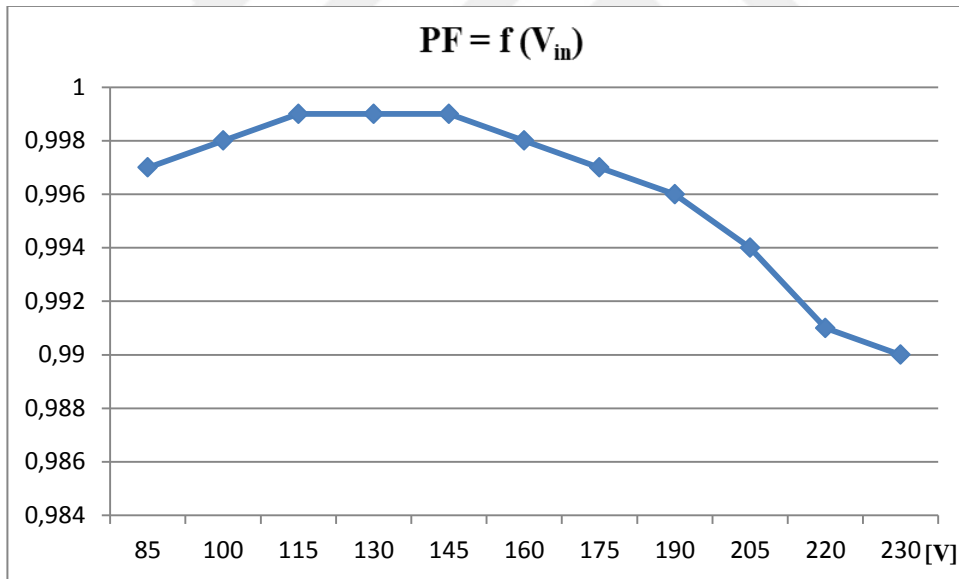
Şekil 4.16. $I_{in} = f(V_{in})$ eğrisi

Şekil 4.17'den görüldüğü üzere giriş geriliminin 160 V ilâ 190 V aralığında giriş gücünün bir maksimum davranış gösterdiği anlaşılmaktadır.



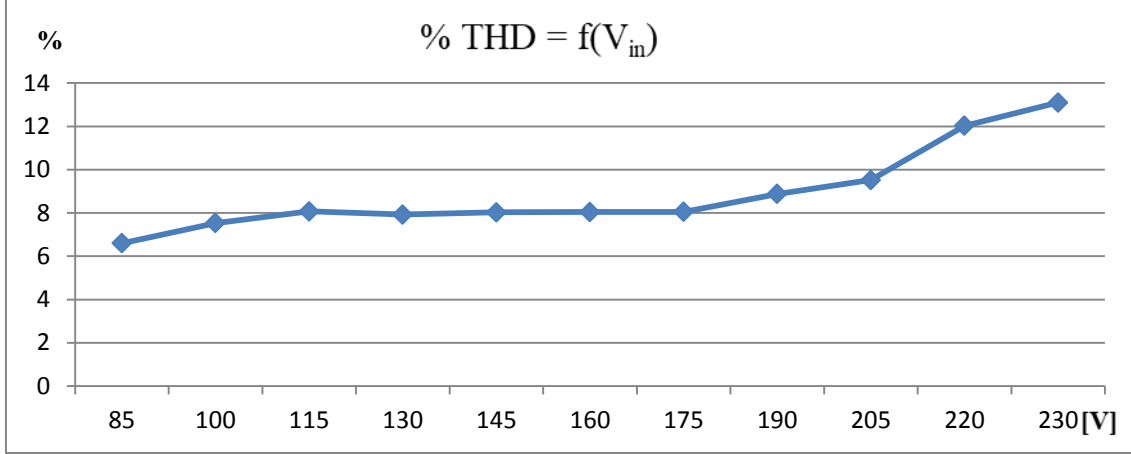
Şekil 4.17 $P_{in} = f(V_{in})$ eğrisi

Kaynak geriliminin değişimine göre giriş güç faktörünün değişimi Şekil 4.18’de verilmiştir. Bu şekilden görüleceği üzere güç faktörü şebeke gerilimine doğru yaklaştıkça PF düşmektedir. Ancak unutulmamalıdır ki şebeke geriliminde bile PF=0,99 değerini korumaktadır.



Şekil 4.18. Güç faktörünün giriş gerilimine bağımlılık eğrisi

Şekil 4.19’da tasarlanan GFD devrenin THD’u önemli ölçüde düzelttiği görülmektedir. Bu düzeltme 175 V’a kadar olan giriş gerilimlerinde % 8 civarında iken AG işletme gerilimi olan 220 V’ta %12,03 değerine ulaşmaktadır.



Şekil 4.19. THD'nin giriş gerilimine bağımlılık eğrisi

Simülasyon sonuçlarına göre tasarlanan GFD devresinin güç faktörünü 0,99 değerinde tutmayı başardığı; bu devrenin aynı zamanda 220 V olan nominal alçak gerilim değerinde akımdaki bozulma değerini $THD = \% 12,03$ olacak şekilde düzelttiği görülmüştür. 5. Bölümde söz konusu devre gerçekleştirilerek gerçek PF ve THD değerleri ölçülecek ve elde edilen değerlerin PF bakımından ilgili yönetmelik değerlerine ve THD bakımından da IEC 61000-3-2 standardına uygunluğu araştırılacaktır.

5. SÜREKLİ İLETİM MODLU BİR AKTİF GFD DEVRESİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Bu bölümde 150 W çıkış gücünde sürekli iletim modunda boost (yükseltici) tipi, giriş gerilimi alçak gerilim şebeke geriliminden beslenebilen devresinin güç faktörünü istenen seviyelere (PF=0,95) yükseltebilen aktif bir GFD devresinin gerçekleştirilmesi yapılacaktır. Esas amaç PF'ün düzeltilmesi olmakla beraber THD ile aralarındaki yakın ilişkisi nedeniyle aynı zamanda THD ölçümü de yapılarak THD seviyesini düzeltmesi de beklenmektedir.

5.1. Devre Elemanlarının Seçilmesi

Bölüm 4'de belirlenen devre elemanlarının en önemli elemanı olanı GFD entegresi istenen güç aralığı için NCP1654 olarak belirlenmiştir [28]. Bu devre elemanı DEMSAY Elektronik San. ve Tic. A.Ş. den satın alınmıştır. Tasarlanan GFD devresinin çıkışına NETES Mühendislik ve Dış Tic. A.Ş. laboratuvarlarında mevcut olan Arcol HS300 model alüminyum ısı yayıcısı olan, saf ohmik 1000 Ω , 300 W'lık bir yük direnci kullanılmıştır[29]. Çıkış geriliminin yaklaşık 390 V olduğu dikkate alındığında P_o çıkış gücünün $P_o = V^2/R = 390^2/1000 = 152,1$ W olacağı ortalama verimin $\eta = \%90-\%95$ aralığında olduğu düşünülerek giriş gücü $P_{in} = P_o/\eta = 152,1 / 0,90 = 169$ W ilâ $P_{out} = P_o/\eta = 152,1 / 0,90 = 160$ W arasında öngörülmüştür. Eğer yük direnci 1,5 k Ω seçilseydi bu durumda $P_o = V^2/R = 390^2/1500 = 101,4$ W'lık bir GFD elde edilebilirdi. Ancak dönüştürücülerin aşırı yüke sorunsuzca dayanabilmelerini sağlamak üzere rezerv katsayısı %50 alınarak çıkış yük direnci 1000 Ω olarak alınacaktır.

Devre elemanlarının aşağıda belirtilen diğer elemanları ise İstanbul Karaköy'de bulunan Çığır Elektronik San. ve Tic. Ltd. Şti'nden satın alınmıştır.

Dirençler [Ω]: $R_1 = R_2 = 1,8$ M, $R_3 = 23,2$ k, $R_4 = 10$ k, $R_5 = 10$, $R_6 = 0,1$, $R_7 = 3,6$ k, $R_8 = 47$ k, $R_9 = R_{13} = 3,3$ M, $R_{11} = 82,5$ k, $R_{12} = 12$ k.

Endüktanslar [μ H]: $L_1 = 650$, $L_2 = 2 \times 6800$, $L_3 = 150$

Kondansatörler [μ F]: $C_1 = C_2 = 0,47$ (275 V), $C_3 = 0,1$ (400 V) $C_4 = 180$ (450 V), $C_5 = 0,22$ (50V), $C_6 = 0,001$ (50 V), $C_7 = 0,47$ (50 V), $C_8 = 22$ (25V), $C_9 = 0,1$ (50 V), $C_{10} = 0,0001$ (50 V), $C_{12} = 2,2$ (50 V).

MOSFET: 20 N60, 600 V, 20 A seçilmiştir [30].

Diyotlar: Köprü Diyot (600 V, 8 A), Boost diyot D1 (MSR860G): (ters tepe çalışma gerilimi 600 V, 8 A)[31], D2 (hızlı anahtarlama diyotu): 1N4148 (Ters tepe çalışma gerilimi 100 V, 2A)[32].

Sigorta: Devreyi korumak için devre girişine cihaz tipi 250 V, 5A koyulmuştur.

Terminaller: AA giriş 220 V AG girişine uygun topraklı dişi fişli terminal, Vcc ve Çıkış terminalleri ise klemensli olarak seçilmiştir. Ayrıca 10x12 cm boyutlarında baskılı devre kartı alınmıştır.

Satın alınan malzemelerin montaj öncesi hali Ek-1 Resim E.1’de gösterilmiştir. NCP 1654 entegresi ve yük direnci Ek-1 Resim E.2’de görülmektedir.

5.2. Devre Montajı

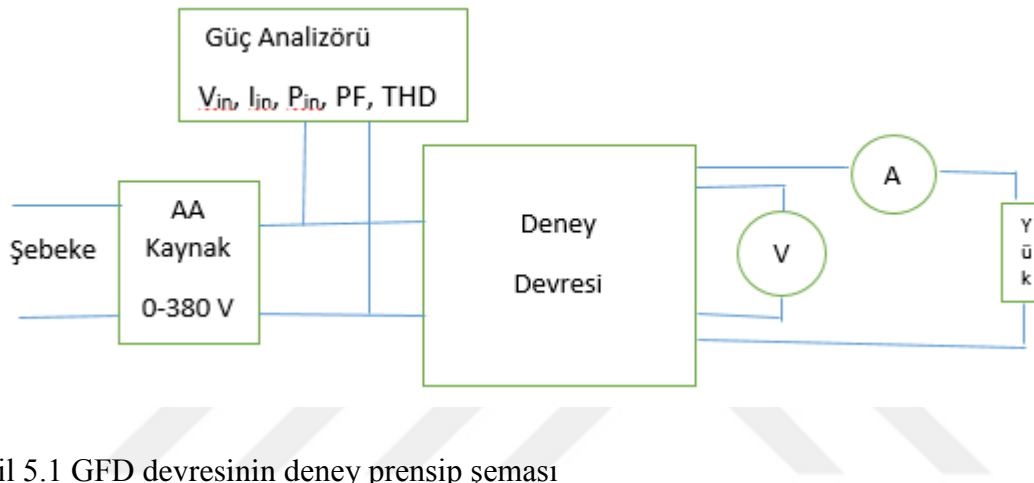
Satın alınan kart üzerine akım yolu çizilerek tüm elemanların montajı yapılmıştır. Devrenin test öncesi önden ve arkadan görünüşü sırasıyla Ek-1 Resim E.3 a ve b’de görülmektedir.

5.3. Testler, Performans Analizi ve Simülasyon Sonuçlarıyla Karşılaştırma

Tasarlanan boost tipi GFD devresinin testleri, TS EN ISO/IEC 17025 ‘e uygun ve Türkiye Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) tarafından akreditasyon belgesi bulunan İstanbul Üsküdar’daki NETES Mühendislik ve Dış Ticaret A.Ş.’nin test laboratuvarında yapılmıştır.

Devrenin AA girişine Tema Elektrik ve Otomasyon Ltd. Şti.’ne ait T model, 6 kVA, çıkış gerilim değeri 0 ilâ 380 V arasında değiştirilebilen bir varyak bağlanmıştır. Devre girişine “FLUKE 435 Güç Kalitesi ve Enerji Analizörü” bağlanmıştır. Devrenin 15 V’luk yardımcı

kaynak gereksinimi GW İnstek marka PSP 405 model, 200 W, 5 A, 0-40 V arasında değeri ayarlanabilen bir Programlanabilir Güç kaynağı bağlanarak yapılmıştır. Çıkış gerilim değerleri FLUKE 87 V. dijital multimetre bağlanarak ölçülmüştür. Çıkış akım değerleri FLUKE 28 II dijital multimetre bağlanarak ölçülmüştür. Çıkış Gerilimi ise Tektronix marka TPS2014 model 4 kanallı bir dijital Osiloskop ile gözlemlenmiştir. Ek-1 Resim E.4'de AA giriş kaynağı ve DA yardımcı kaynağı ve osiloskop, Resim E.5'de ölçüm cihazları görülmektedir. Şekil 5.1'de GFD devresinin deney prensip bağlantı şeması görülmektedir.



Deneylere başlamadan önce 30 dakika kararlı çalışma bölgesine ulaşmak için ön testler yapılmış ve aynı zamanda olası montaj hataları ve akım yolları gözden geçirilmiş ve V_{CC} yardımcı kaynak şasi ve DA çıkış katı arasındaki şasi bağlantı eksikliği giderilerek gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Devre çıkış terminaline 1 k Ω yük direnci ve arkasından 15 V güç kaynağı bağlanarak gerilim kontrol edilmiştir.

Laboratuvarın 220 V_{AA}, 50 Hz lik AG şebeke prizine bağlı deneyde kullanılan Varyak üzerinden NCP 1654 kataloğunda belirtilen minimum çalışma gerilimi olan 85 V_{AA} etkin değerli gerilim değerinden başlayarak aynı giriş gerilim değerinde 3 ölçüm yapılmış ve ölçülen değerlerin ortalaması kaydedilmiştir. Daha sonra giriş gerilimi ayarlı varyak üzerinden 15'er Volt artırılmak suretiyle sırasıyla 100 – 115 – 130 – 145 – 160 – 175 - 190 - 205 – 220 V olmak üzere toplam 10 adet AA deney giriş gerilimi verilmiştir. Daha sonra devreye verilen giriş gerilimi değeri olarak AB ülkelerindeki nominal AG işletme gerilimi

değeri olan 230 V verilmek suretiyle toplam 11. deney yapılmıştır. Böylece ülkemiz AG nominal işletme gerilimi olan 220V'un $(230-220)/220 = 1,045$ katı olması halinde GFD davranışı gözlemlenmiştir. Yapılan 11 deneyin sonuçları Çizelge 5.1de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Ölçülen akım, gerilim, güç, PF ve THD değerleri

V_{in} [V]	P_{in} [W]	V_o [V]	I_o [A]	P_o [W]	PF	THD [%]
85,3	158,97	381,67	0,391	149,88	0,995	6,29
100,6	156,39	381,55	0,393	150,11	0,995	6,68
115,7	158,93	381,59	0,394	151,23	0,992	7,35
130,0	160,23	381,48	0,392	150,39	0,993	7,62
145,6	160,78	381,44	0,395	151,14	0,987	7,69
160,3	160,69	381,51	0,393	150,45	0,986	7,93
175,7	164,02	381,39	0,396	151,38	0,978	7,91
190,7	163,79	381,46	0,395	151,44	0,978	8,07
205,3	164,11	381,53	0,400	152,87	0,976	8,37
220,3	164,50	381,43	0,397	152,29	0,975	10,03
230,2	165,82	381,39	0,399	152,37	0,970	13,30

Deney sonuçlarından görüleceği üzere tasarlanan GFD devrenin güç faktörünü değerini Güç faktörünün düzeltilmesine ilişkin yönetmelikte öngörülen 0,95 değerinin üstünde tuttuğu görülmektedir. Deney sonuçlarının Çizelge 4.1de verilen simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu görülebilir. Bu amaçla hesaplanan ve ölçülen PF değerleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.2’de verilmiştir. Çizelge 5.2de ayrıca PF ile ilgili olarak ölçülen değer ile gerçek değer arasındaki “mutlak hata” değerleri herbir giriş gerilim değeri için hesaplanmıştır. Aynı çizelgede giriş gerilim değerlerine bağlı olarak PF’nin mutlak hata değerleri ölçülen değere oranlanarak “bağlı hata” değerleri de hesaplanarak verilmiştir. Güç faktöründeki mutlak hata değerleri 0,002 ilâ 0,02 arasında değişmektedir. Güç faktörü

için gerçekleştirilen GFD devresinde yapılan bağıl hata değerleri ise % 0,2 ilâ %2,02 arasında değişmektedir. PF için minimum giriş gerilim değeri olan 85 V'tan nominal giriş gerilim değerine doğru gerek mutlak hata ve gerekse bağıl hata değerleri gerilim büyüdükçe büyümekle birlikte; 220 V nominal giriş geriliminde bile bağıl hatanın %2 değerinin altında kaldığı görülmektedir.

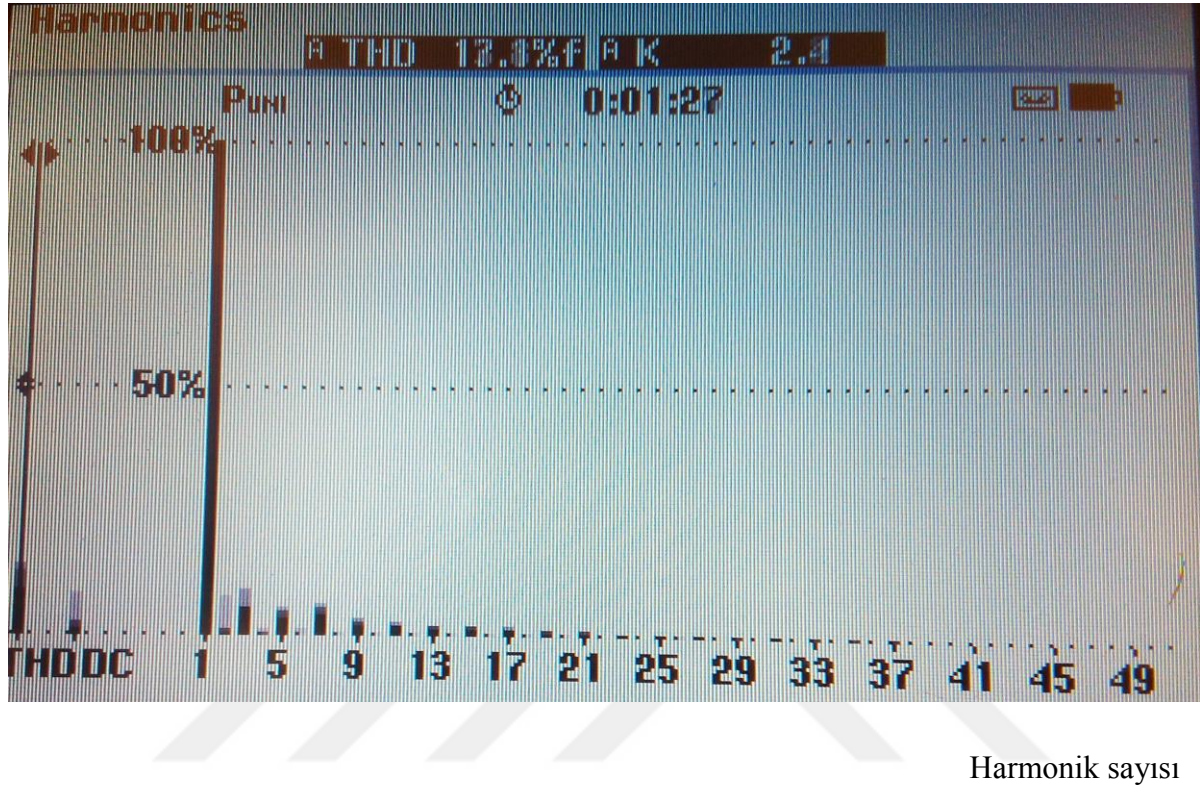
Çizelge 5.2. Ölçülen ve hesaplanan PF değerlerine ilişkin mutlak ve bağıl hatalar

V_{in} [V]	Ölçülen PF	Hesaplanan PF	Mutlak hata $\times 10^{-3}$	Bağıl hata [%]
85,3	0,995	0,997	2	0,2
100,6	0,995	0,998	3	0,3
115,7	0,992	0,999	7	0,70
130,0	0,993	0,999	6	0,60
145,6	0,987	0,999	12	1,20
160,3	0,986	0,998	12	1,20
175,7	0,978	0,997	19	1,90
190,7	0,978	0,996	18	1,80
205,3	0,976	0,994	18	1,81
220,3	0,975	0,991	16	1,61
230,2	0,970	0,990	20	2,02

Öte yandan deney sonuçları içinde en büyük THD için Çizelge 2.3'de verilen IEC 61000-3-2 sınır değerlerinin aşılmadığının kontrol edilmesi için ölçüm sonuçları içinde en büyük THD=13,3 değerini veren FLUKE 435 ekran görüntüsü Resim 5.1'de verilmiştir. Resim 5.1'den görüleceği üzere:

- 3. harmonik (n=3) için temel bileşenin yüzdesi olarak “Harmonik Distorsiyon”: %5;
- 5. harmonik (n=5) için temel bileşenin yüzdesi olarak “Harmonik Distorsiyon”: %4;
- 7. harmonik (n=7) için temel bileşenin yüzdesi olarak “Harmonik Distorsiyon”: %5;

9. harmonik (n=9) için temel bileşenin yüzdesi olarak “Harmonik Distorsiyon”: %2
Diğer harmoniklerin temel bileşenin yüzdesi olarak “Harmonik Distorsiyon”: < %2
değerleri elde edilmiştir.



Resim 5.1 En büyük THD değerleri

Bu harmonik distorsiyon değerlerinin IEC 61000-3-2'ye göre Çizelge 2.3'e uygun oldukları araştırılacak olup diğer harmonik bileşenlerin dikkate değer bir büyüklük içermedikleri için dikkate alınmayacaktır.

“Eş.4.5” de verilen akımlar için THD değeri:

$$THD = [(I/I_1)^2 - 1]^{1/2}$$

olarak verilmişti. Bu eşitlikte THD= %13,3 yerine koyulursa:

$$(I/I_1)^2 = 1,017689 \text{ ve } (I/I_1) = 1,0088$$

elde edilir.

Öte yandan $P_{in} = U_{in} \cdot I_{in} \cdot PF$ eşitliğinden:

$I_{in} = P_{in} / (U_{in} \cdot PF) = 165,82 / (230,2 \cdot 0,97) = 0,742$ A bulunur.

Buradan $I_1 = 0,742 / 1,0088 = 0,736$ A bulunur. Buna göre harmonik akımları:

3. harmonik akımı: $I_3 = \%5 \cdot I_1 = 0,05 \cdot 0,736 = 0,0368$ A = 36,8 mA

5. harmonik akımı: $I_5 = \%4 \cdot I_1 = 0,04 \cdot 0,736 = 0,0294$ A = 29,4 mA

7. harmonik akımı: $I_7 = \%5 \cdot I_1 = 0,05 \cdot 0,736 = 0,0368$ A = 36,8 mA

9. harmonik akımı: $I_9 = \%2 \cdot I_1 = 0,02 \cdot 0,736 = 0,0147$ A = 14,7 mA

elde edilir.

Çizelge 2.3'e göre W başına mA olarak limit değerler verilmiştir. Bu bakımdan harmonik akımlarının kaynaktan çekilen güç ($P = 165,32$ W) başına değerleri hesaplanmış ve Çizelge 2.3' deki limit değerlerle karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Tasarlanan GFD için Watt başına izin verilen en büyük harmonik akım değerleri

Harmonik sayısı (n)	Birim güç başına harmonik akım değerleri	
	Hesaplanan değerler [mA/W]	İzin verilen en büyük değerler [mA/W]
3	$36,8 / 165,32 = 0,22$	3,4
5	$29,4 / 165,32 = 0,17$	1,9
7	$36,8 / 165,32 = 0,22$	1
9	$14,7 / 165,32 = 0,089$	0,5

Görüldüğü üzere tasarlanan GFD devresinin tüm kritik harmonik akımlarının birim güç başına izin verilen harmonik akım değerleri [mA/W]'nin altında kaldığı ve IEC 61000-3-2'nin bu kuralına uygun olduğu anlaşılmaktadır.

IEC 61000-3-2'nin Ocak 2018 yılında yeni yürürlüğe giren ve AB ülkeleri CENELEC kurumu tarafından Mart 2019'da kabul edilerek yürürlüğe giren EN IEC61000-3-2 standardında ayrıca her bir harmonik için izin verilen harmonik akım değerleri Çizelge 5.4'ün son sütununda verilmiştir. EN standardı haline gelen bu standart ülkemizde Türk Standardları Enstitüsü tarafından da TS EN IEC 61000-3-2 standardı olarak Nisan 2019 tarihinde yürürlüğe girmiştir [33]. Tasarlanan GFD devresinin ölçülen harmonik akımları Çizelge 5.4'ün ilk sütununda verilmiştir.

Çizelge 5.4. Tasarlanan GFD için izin verilen en büyük harmonik akım değerleri

Harmonik sayısı (n)	Ölçülen harmonik akım değerleri [mA]	İzin verilen en büyük harmonik akım değerleri [A]
3	36,8	2,30
5	29,4	1,14
7	36,8	0,77
9	14,7	0,40

Ölçülen ve aşılmaması gereken limit değerler karşılaştırıldığında her bir ölçülen değer için IEC 61000-3-2'de verilen limit değerlerin altında kaldığı Çizelge 5.4'den görülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektrik enerjisine olan talep artışı büyümekte ve gelişmekte olan ülkelerde daha hızlı artmakta ve bu da elektrik üretim, iletim ve dağıtım sektörlerinde büyük yatırımlara neden olmaktadır. Gelişmekte olan ülkemizde de enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle mevcut elektrik gücü kapasitesini de en verimli şekilde kullanmak gerekir.

Güç sistemlerinde enerjinin verimli kullanılması ve sistem kapasitesinden maksimum fayda sağlanması için gerilim ve akım arasındaki faz açısının mümkün olduğunca küçük olması, başka bir deyimle bu açının kosinüsü olan güç faktörünün 0,95 ilâ 1,00 arasında bir değerde tutulması istenir. Ancak günümüzde özellikle sanayi ve ticaret sektörünün kullandığı tüm elektrik motorları, transformatörler gibi manyetik enerji gereksinimleri, elektronik araç ve cihazların çektiği sinüsoidal olmayan akımlar vb. sebeplerden dolayı güç faktörü değerleri bu tür cihazlarda 0.6 ilâ 0.8 arasında değişmektedir. Yaklaşık 24 milyon konut abonesinin bulunduğu ülkemizde konut abonelerinin içinde elektrik motoru bulunan tüm cihazlar ile dizüstü bilgisayarları, yazıcılar, deşarj lambaları, balastlar gibi nonlineer yükler de düşük PF değerine sahiptirler. Şebekeden çekilen reaktif akım, abonelerin kendi elektrik tesisinden başlayarak, sırasıyla dağıtım şebekesi, iletim sistemi ve üretim santrallerine kadar, elektrik üretim-iletim-dağıtım ve tüketim zincirindeki hatlar, kablolar, primer işletme araçları, transformatörler ve generatörlerden geçerek bunların kapasitelerinden yararlanmamızı olumsuz etkilemektedir. Bunun yanı sıra, gerilim düşümü, enerji kayıplarında artış gibi zararlara da neden olmaktadır. Öte yandan dönüştürücülerde olduğu gibi anahtarlama güç uygulamaları neticesinde hem güç faktörü düşmekte ve hem de harmonik akımlar çekilerek nötr teli akımlarında artış, primer teçhizatta harmonikli bileşenlerin neden olduğu ısınmalar ve kayıplar daha çok söz konusu olmaktadır.

Bu çalışmada öncelikle güç faktörünün önemi, teknik özellikleri, güç faktörünü düzeltmenin elektrik üretim, iletim ve dağıtım sistemine olan teknik katkıları, makro ve mikro ekonomik faydaları analiz yapılarak araştırılmıştır. Çalışmada ayrıca güç faktörü düzeltme yöntemleri pasif ve aktif yöntemler olmak üzere incelenerek birbirlerine göre üstünlükleri araştırılmıştır.

Pasif GFD yöntemleri kapsamında santral generatör üniteleri ile PF'ün yükseltilmesinin mümkün olduğu, ancak santral birim maliyetlerinin yüksek oluşu ve yapılan reaktif güç kompanzasyonunun generatör gücü ile sınırlı olduğu sonucuna varılmıştır. Benzer şekilde senkron motorların uyarma akımının artırılması ile senkron kompanseör olarak şebekeye reaktif enerji vermelerinin de mümkün olduğu; ancak bu yöntemin de birim yatırım maliyeti açısından ancak zorunlu durumlarda uygulanması gerektiği sonucuna varılmıştır. Kondansatörler kullanarak yapılan reaktif güç kompanzasyonunun maliyetinin en ucuz olması nedeniyle halen yaygın olarak kullanıldığı; ancak nonlineer yükler nedeniyle harmonikli akım çeken yüklerde bu yöntemin kullanılamayacağı sonucuna varılmıştır. Enerji iletim sisteminde uzun enerji iletim hatlarında hat endüktif reaktansını düşürmek üzere hatta seri kapasitör bağlanmasının iletim sistemlerinde uygun bir çözüm olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca uzun orta ve yüksek gerilim hatlarında hattın az enerjili ve yüksüz olması durumunda hat sonu geriliminin hat başı geriliminden büyük olması durumunda bu defa aşırı kompanzasyonun önüne geçmek üzere devreye şönt endüktanslardan oluşan reaktörlerin de kullanılmasının faydalı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışmada daha sonra pasif ve aktif filtreler kullanan yöntemler de incelenmiştir. Nonlineer yüklerin şebekeden çektiği harmonikli akımların meydana getirdiği THD'nun PF ile yakın bir ilişkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Harmonikli akım çeken cihazların PF değerlerinin yükseltilmesini sağlayacak ve aynı zamanda THD değerlerini de standartlarda öngörülen değerler arasında tutan kritik iletim modlu, kesintili modlu ve sürekli iletim modlu aktif GFD yöntemleri incelenmiştir. Çalışmada daha sonra 150 W gücünde anahtarlamalı bir güç kaynağı için sürekli iletim modlu boost tipi güç faktörü düzeltme (GFD) yöntemi uygulama devresi tasarlanmış ve önce MATLAB/SIMULINK Toolbox'da simüle edilerek sonuçlar analiz edilmiştir. Simülasyonda 85 V- 230 V aralığındaki giriş

gerilimleri için Giriş gerilimi, giriş akımı, PF ve THD grafikleri çizdirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre PF'nin %99 olduğu THD değerinin % 6,6 ilâ % 13,10 arasında değiştiği, görülmüştür. Ayrıca giriş gücünün, PF'ün ve THD'nin giriş gerilimine olan bağımlılığı ayrı ayrı grafik çizilerek incelenmiştir.

Son bölümde simülasyonu yapılan GFD uygulama devresi gerçekleştirilmiş ve kurulan deney setinde giriş gerilimleri 85 V ilâ 230 V aralığında 11 farklı değerde değiştirilerek; giriş gücü, PF, THD, çıkış gerilimi ve çıkış akımı değerleri ölçülmüştür. Deneysel sonuçlar simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve PF değerinin %97 ilâ %99 arasında değiştiği ölçülmüş olup deney ve simülasyon sonuçları arasındaki bağıl hatanın %2yi aşmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca giriş gerilimi büyüdükçe PF'ün ve verimin düşmeye başladığı ve THD değerinin de büyümeye başladığı sonucuna varılmıştır. Verimdeki değişim aralığı %94 ilâ %92 arasında olduğu tespit edilmiştir. Yapılan 11 farklı giriş gerilimi değeri için en büyük THD değeri %13,30 olarak ölçülmüş ve harmonik akım analizi yapılarak gücü 600W'ı geçmeyen faz başına akımı 16 A'den küçük olan ve gerçekleştirilen GFD devresinin de tâbi olduğu D sınıfı cihazlar için harmonik akımların IEC 61000-3-2 standardına, hem mA/W bakımından ve de harmonik akım limit değerleri bakımından uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Halen ülkemizde tüm konut aboneleri ve gücü 9 kW'a kadar olan aboneler şebekeden çektikleri elektrik için güç faktörünü 0,95 değerinin üstüne yükseltmekten muaf tutulmaktadır. Oysa çağımızın gereği tüm bireylerin elektronik donanım kullanımındaki üstel artış nedeniyle elektrik şebekesinden harmonikli akım çektikleri bilinen bir gerçektir. Bu harmonikli akımların meydana getirdiği olumsuzlukları abone bazında takip etmek yerine nonlineer yüke sahip bu tür cihazların üretim aşamasında GFD devreleriyle teçhiz edilmelerinin zorunlu kılınması ve denetlenmesinin; hem PF ve hem de THD açısından ülke ekonomisine önemli katkı sağlayacağı sonuç ve kanaatine varılmıştır.



KAYNAKLAR

1. Otlu, M.C. (1998), Güç Faktörünün Düzeltilmesinin Elektrik Abonesine ve Ulusal Elektrik Şebekesine Sağlayacağı Faydalar, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (Yüksek Lisans Tezi), 1-70.
2. Çakır, Z. (2000), Sürekli Bağlı Kondansatörlerle Güç Faktörü Düzenlenen Endüksiyon Motorunun Kendinden Uyarılması, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (Yüksek Lisans Tezi), 1-95.
3. İşen, E. (2005), Üç Fazlı AC-DC Dönüştürücülerde Güç Faktörünün Düzeltilmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (Yüksek Lisans Tezi), 1-145.
4. Akın, B. (2008), Yeni Bir Yumuşak Anahtarlamalı Tek Fazlı Güç Faktörü Düzeltme Devresinin Geliştirilmesi Ve Gerçekleştirilmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (Doktora Tezi), 1-111.
5. Gürbüz, Y. (2012), Güç Faktörü Düzeltmeli güç LED Sürücü Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, (Yüksek Lisans Tezi), 1-99.
6. Erdem, U. (2013), Optimal Reaktif Güç Kompanzasyonu ve Harmoniklerin Güç Faktörüne Etkisi, Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tunceli, (Yüksek Lisans Tezi), 1-80.
7. Büyükkatırcı, O. (2017), Tek Fazlı Güç Faktörü Düzeltme Devrelerinin İncelenmesi ve Bir Uygulamanın Gerçekleştirilmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (Yüksek Lisans Tezi), 1-74.
8. Çavdar, M. (2017), Tek Fazlı Güç Faktörü Düzeltmeli (PFC) Köprüsüz AC_DC Dönüştürücülerin İncelenmesi ve Karşılaştırılması, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (Yüksek Lisans Tezi), 1-114.
9. Çınar, A.O. (2017), Güç Faktörü Düzeltme Devrelerinin Karşılaştırılmalı Analizi ve Uygulama Devrelerinin Gerçekleştirilmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (Yüksek Lisans Tezi), 1-121.
10. Şehirli, E. (2017), Güç Faktörü Düzeltmeli AA-DA Dönüştürücü Yapılarının Doğrusal Olmayan Denetimi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, (Doktora Tezi), 1-178.
11. Düzgün B. (2018), “Türkiye elektrik iletim ve dağıtım şebekesinin enerji verimliliğinin değerlendirilmesi ve 2023 projeksiyonları”, Politeknik Dergisi, 21(3): 621-632.
12. Özen Ş.,(2017), *Düşük Gerilim Güç Sistemleri*. EMO Yayınları, 143-144.

13. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2004), Elektrik İç Tesisleri Yönetmeliği, 16/06/2004 tarih ve 25494 sayılı resmi gazete, Türkiye.
14. Uçku K. (1975), *Enerji Dağıtımı I ve II*, Yükseliş yayınevi, Ankara.
15. Özkaya M. (2004), *Aydınlatma Tekniği*, Birsen yayınevi, İstanbul ,115-178.
16. https://www.academia.edu/5140123/ASENKRON_VE_SENKRON_MAK%C4%B0NELER . (Erişim tarihi: 15.04.2019)
17. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (2015), Dağıtım lisansı sahibi tüzel kişiler ve görevli tedarik şirketlerinin tarife uygulamalarına ilişkin usul ve esaslar, 31.12.2015 tarih ve 29579 sayılı resmi gazete, Başbakanlık yayınevi.
18. EIA (2013), Updated Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants. Independent Statistics & Analysis. U.S. Energy Information Administration, U.S. Department of Energy
19. <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik>, (Erişim tarihi: 15.04.2019)
20. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (1998), Elektrik projelerinin hazırlanması ve elektrik tesislerinin gerçekleştirilmesi sürecinde güç faktörünün iyileştirilmesi ile ilgili tebliğ, 01.12.1998 tarih ve 20006 sayılı resmi gazete, başbakanlık yayınevi.
21. IEC (2018), IEC 61000-3-2: Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions, Switzerland.
22. CENELEC, (2015), EN50160: Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, Belgium.
23. IEEE (2014), IEEE Std 519, Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, USA.
24. <https://kondas.com.tr/pdf/ag.pdf>, (Erişim tarihi: 15.04.2019)
25. Özkaya M. (1988), *Yüksek Gerilim Tekniği I*, İTÜ matbaası, 255-261.
26. Kocatepe C. Uzunoglu M., Karakaş A. Yumurtacı R., Arıkan O. (2003), *Enerji Sistemlerinde Harmonikler*, Birsen yayınevi, 6-7.
27. Rashid M. (2016) “*Power Electronics Devices, Circuits, and Applications*”, Pearson, 285.
28. <https://html.alldatasheet.com/htmlpdf/174994/ONSEMI/NCP1654/660/3/NCP1654.html>, (Erişim tarihi: 15.02.2019)
29. <http://www.arcolresistors.com/resistors/hs300-aluminium-housed-resistor/>, (Erişim tarihi: 15.02.2019)
30. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-SPP_I_A20N60C3-DS-v03_02EN.pdf?fileId=db3a304412b407950112b42d841f488f, (Erişim tarihi: 15.02.2019)

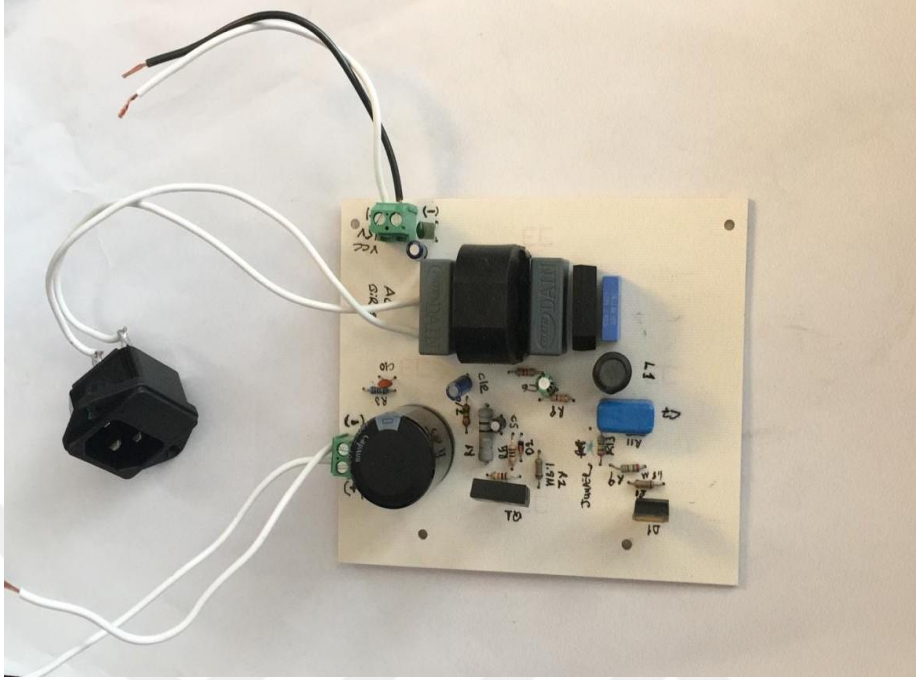
31. <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MSR860-D.PDF>, (Erişim tarihi: 15.02 .2019)
32. <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/26129/VISHAY/1N4148.html>, (Erişim tarihi: 15.02 .2019)
33. Türk Standardları Enstitüsü (2019), TS EN IEC 61000-3-2: Elektromanyetik uyumluluk (EMU) – Bölüm 3-2: sınırlar – harmonik akım yayınımları için sınırlar, Ankara, Türkiye.



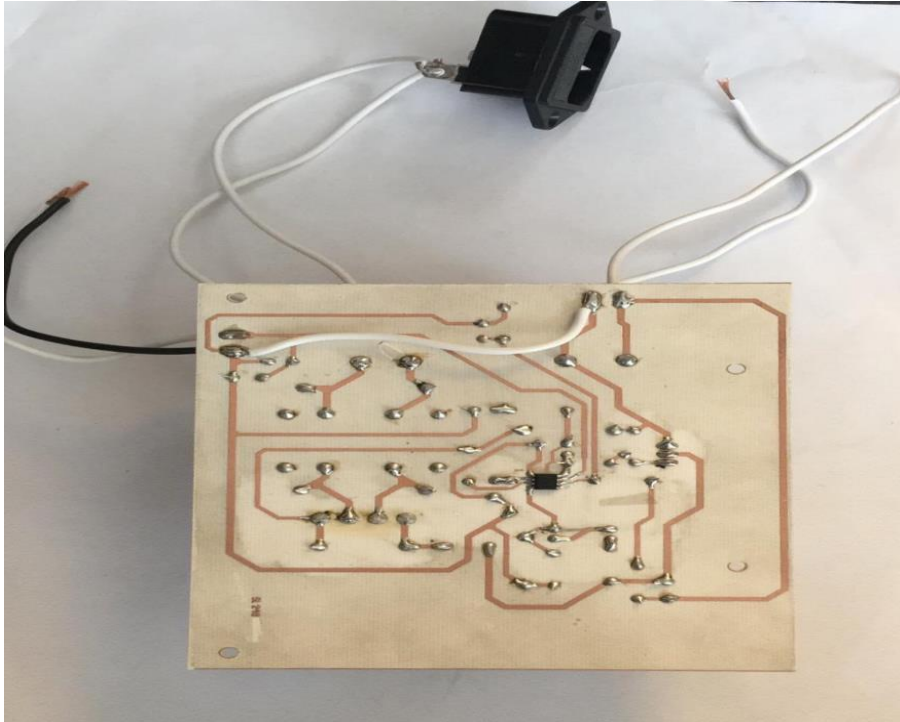


EKLER

Devrenin test öncesi görünüşü Resim E.3'de görülmektedir.

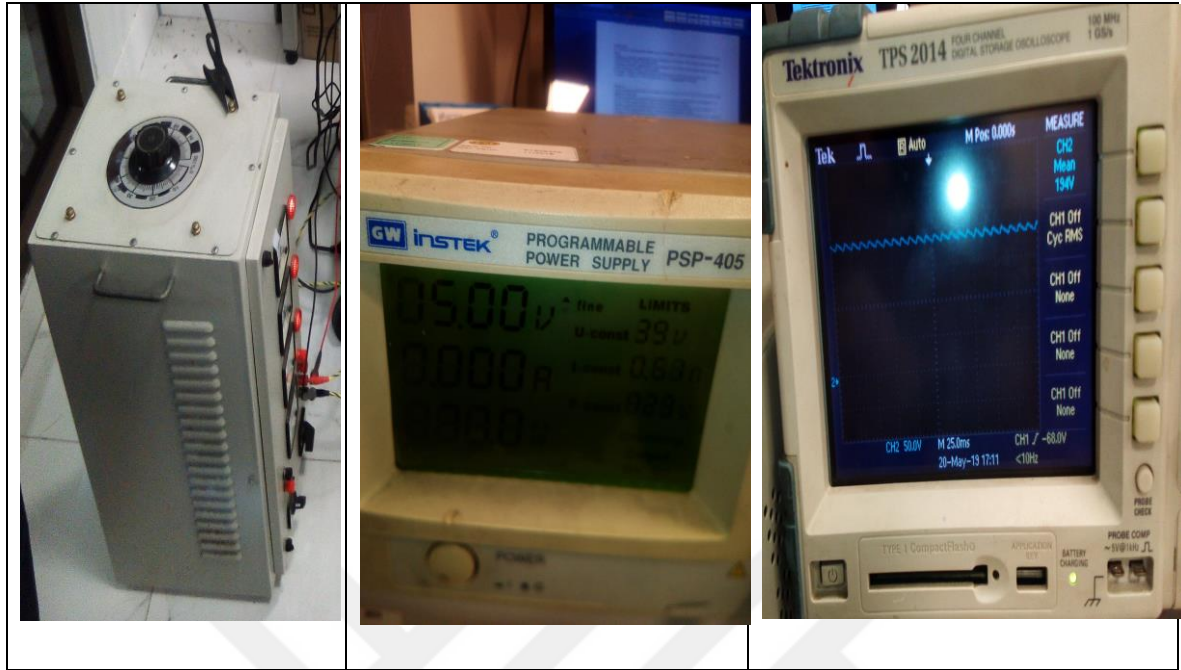


Resim E.3a. Montaj sonrası GFD devresi (ön)



Resim E.3b. Montaj sonrası GFD devresi (arka)

Deneyslerde kullanılan kaynaklar ve osiloskop, Resim E.4'de görölmektedir.



(a)

(b)

(c)

Resim E.4 Deneysde kullanılan a) AA güç kaynağı, b) yardımcı DA kaynağı, c) osiloskop

Deneyslerde kullanılan güç analizörü, ampermetre ve voltmetre Resim E.5'de görölmektedir.



(a)

(b)

(c)

Resim E.5 Deneysde kullanılan ölçü aletleri a) Fluke 435, b) Fluke 87 V, c) Fluke 28 II

Deneilerin gerçekleştirildiği NETES Laboratuvarlarında deney devresinin genel görünümü Resim E.6’da görülmektedir.



Resim E.6 Deney devresi genel görünümü

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Şenol Yeşim
 Uyuğu : T.C
 Doğum tarihi ve yeri : 23.10.1988 / Kütahya
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : +90 534 521 24 81
 Faks : -
 e-mail : yesimsenol@hotmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Başkent Üniversitesi (MBA)	2016 (Onur derece ile)
Lisans	Yeditepe Üniversitesi (Elk. Eln. Müh.)	2012 (Onur derece ile)
Lise	Ayrancı Anadolu Lisesi	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-2016	Elko Elektrik Tic ve San AŞ	OG Elektrik Yatırımları Çözüm Müh.
2017-2018	Vekmar Elek. Sis Yat ve Tic AŞ	OG Elektrik Yatırımları Çözüm Müh.
2019-Halen	Boğaziçi Elektrik Dağ. AŞ	Enerji Talep Değerlendirme Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayımlar

Hobiler

Farklı kültürleri keşfetmek, balık tutmak, yüzmek, kayak yapmak, sinema / tiyatroya

gitmek,



ĞELİŐİM ĞELİŐMEKTİR..