



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



REAKTİF GÜÇ VE HARMONİKLERİN
ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE KABLO ÖMRÜNE
ETKİLERİ

Kadir OLCAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim-2018
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Kadir OLCAY tarafından hazırlanan “Reaktif Güç ve Harmoniklerin Enerji Verimliliği ve Kablo Ömrüne Etkileri” adlı tez çalışması 22/10/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

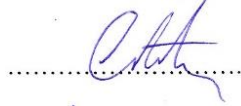
Doç.Dr. A. Afşin KULAKSIZ

İmza



Danışman

Dr.Öğr. Üyesi Nurettin ÇETİNKAYA



Üye

Doç.Dr. Hayri ARABACI



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Yakup KARA
FBE Müdür V.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Kadir OLCAY

Tarih: 22.10.2018



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

REAKTİF GÜÇ VE HARMONİKLERİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE KABLO ÖMRÜNE ETKİLERİ

Kadir OLCAY

Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nurettin Çetinkaya

2018, 72 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. A. Afşin KULAKSIZ

Doç. Dr. Hayri ARABACI

Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ÇETİNKAYA

Tüm dünyada elektrik enerjisi hem sanayide hem de günlük yaşamda temel ihtiyaçların en önemlileri arasındadır. Elektrik enerjisini tüketiciye kaliteli, kesintisiz ve uygun maliyette sunulması gerekmektedir. Bu ihtiyacının istenen standartlarda sağlanması konusunda bazı problemler oluşmaktadır. Reaktif güç ve harmonikler ise bu problemlerin en önemlilerindendir.

Bu çalışmada reaktif güç ve harmoniklerin enerji kalitesine ve elektrik sistemlerinde neden oldukları problemler araştırılmıştır. Reaktif gücün sistemden kompanze edilebilmesi için kurulan reaktif güç kompanzasyon sistemleri incelenerek tasarımı, faydaları ve problemleri anlatılmıştır. Günümüz şartlarında kompanzasyon uzaktan takip sistemleri incelenerek kullanımında ortaya çıkacak durumlar gösterilmiştir.

Elektrik sistemlerinde oluşan harmonikler ve nedenleri araştırılarak giderme yöntemleri incelenmiştir. Harmonik filtre tasarımı hakkında bilgiler verilmiş ve kompanzasyon sistemleri ile birlikte kullanımı anlatılmıştır. Bu bağlamda harmonik filtreli kompanzasyon sistemlerinde filtre tasarımında gerekli değerlerin hesaplanması konusunda örnekleme yapılmış ve harmonik filtrenin kompanzasyon sistemi ile birlikte kullanımında ortaya çıkacak sorunlar, dikkat edilmesi gereken durumlar ve fayda sağlayacak noktalar açıklanmıştır.

Bu çalışmada ayrıca farklı iletken kesitlerine sahip kablolar için lineer yük ve lineer olmayan yükler altında oluşan akımlara iletkenlerin verdiği tepkiler incelenerek harmoniklerin iletken ömrüne etkileri deneysel çalışma ile araştırılarak bilgisayar destekli matematiksel analiz yapılması sonucunda gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kablo ömrü, harmonikler, harmonik filtreler, reaktif güç, kompanzasyon

ABSTRACT

MS THESIS

THE EFFECTS OF REACTIVE POWER AND HARMONICS ON ENERGY EFFICIENCY AND CABLE LIFE

Kadir OLCAY

**KONYA TECHNICAL UNIVERSITY
THE GRADUATE SCHOOL OF EDUCATION INSTITUTE
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ELECTRICAL AND
ELECTRONIC ENGINEERING**

Advisor: Asst.Prof.Dr. Nurettin ÇETİNKAYA

2018, 72 Pages

Jury

Assoc.Prof.Dr. A. Afşin KULAKSIZ

Assoc.Prof.Dr. Hayri ARABACI

Asst.Prof.Dr. Nurettin ÇETİNKAYA

Electrical energy is among the most important basic necessities both in industry and daily life. Electricity energy must be presented to consumers in good quality, uninterrupted and relevant cost. Meeting the needs on the desired standards, occurs some problems. Reactive power and harmonics are the most significant of these problems.

In this study, the problems caused by reactive power and harmonics in energy quality and electrical systems are investigated. Reactive power compensation which is established to be able to compensate reactive power from the system, have been researched and explained the design, benefits and problems are explained. In today's conditions, by examining compensation remote monitoring systems, have been shown the situations that will arise in usage have been shown.

Harmonics in electrical systems, their causes are researched and prevention methods are investigated. Information about harmonic filter design is given and its usage in combination with compensation systems is explained. In this regard, sampling of essential values for filter design in harmonic filter compensation systems has been done and the problems, that will occur when using harmonic filter with the compensation system, the conditions to take into considerations, and the points to benefits are explained.

In this study, the effects of conductors on the currents generated under linear loads and nonlinear loads for the cables with different conductor cross sections are investigated and the effects of harmonics on the conductor life are investigated by experimental study and computer aided mathematical analysis is performed.

Keywords: Cable life, harmonics, harmonic filters, reactive power, compensation

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana desteğini esirgemeyen değerli hocam Dr.Öğr. Üyesi Nurettin ÇETİNKAYA'ya saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Öğretim hayatım boyunca maddi manevi her türlü desteğini benden esirgemeyen değerli aileme, ayrıca yüksek lisans çalışmalarımda birçok olanak sağlayan Mesut ELİBAL'a teşekkürü bir borç bilirim.

Kadir OLCAY
KONYA-2018



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
3. REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU VE TAKİP SİSTEMLERİ	8
3.1. Reaktif Güç Kompanzasyonu Çeşitleri ve Elemanları	9
3.2. Kompanzasyon Hesabı ve Sistem Tasarımı.....	13
3.2. Uzaktan İzleme Sistemi	15
4. HARMONİKLER.....	18
4.1. Harmonik Oluşumunun Nedenleri	21
4.2. Harmonik Bozunma Sınırları.....	22
4.3. Harmonikli Sistemlerde Devre Büyüklükleri	23
4.4. Harmonik Mertebeleri ve Elektrik Sistemlerinde Görülme Durumları	24
4.5. Harmoniklerin Elektrik Tesislerine Etkileri	27
4.5.1. Harmoniklerin iletkenlere etkileri.....	27
4.5.2. Harmoniklerin kondansatörlere etkileri	33
4.5.3. Harmoniklerin güç faktörüne etkileri	34
4.5.4. Rezonans olayı.....	35
4.6. Harmoniklerin Matematiksel Analizi	38
4.7. Harmonikleri Giderme Yöntemleri.....	40
4.7.1. Aktif filtre	41
4.7.2. Pasif filtre.....	42
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	51
5.1. Hesaplama Yöntemi ve Formülasyon Açıklamaları	52
5.2. Deneysel Analiz Çalışmaları	54
5.2.1. Uygulama aşamaları ve açıklamalar	55
6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	61
6.1. Sayısal Analizler ve Sonuçları	61
6.2. Harmoniklerin İletkenlerin Isınmasına Etkisi.....	62
6.3. Harmoniklerin İletkenler Üzerine ve Kablo Ömrüne Etkisi	63
6.4. Harmoniklerin Tek Fazlı Sistemlerde İletkenler Üzerine Etkisi	63

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	64
7.1 Sonuçlar	64
7.2 Öneriler	67
KAYNAKLAR	70
ÖZGEÇMİŞ	72



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

P	: Aktif güç (W)
Q	: Reaktif güç (kVAr)
Q _c	: Toplam kondansatör gücü / Kapasitif reaktif güç (kVAr)
Q _L	: Endüktif reaktif güç (kVAr)
S	: Görünür güç (kVAr)
S _k	: Kısa devre gücü (kVAr)
S _C	: Kondansatör gücü (kVAr)
D	: Sistem bozunum gücü (kVAr)
f	: Frekans (Hz)
f ₁	: Temel harmonik mertebesindeki frekans (Hz)
n	: Harmonik mertebesi
f _n	: n. derece harmonik frekansı (Hz)
f _R	: Rezonans frekansı (Hz)
f _S	: Seri rezonans frekansı (Hz)
f _P	: Paralel rezonans frekansı (Hz)
I	: Akım (A)
V	: Gerilim (Volt)
V ₀	: Gerilim ortalama değeri (V)
I _n	: n. derece harmonik akımı (A)
V _n	: n. derece harmonik gerilimi (V)
V _{rms}	: Gerilim etkin değeri (A)
I _{rms}	: Akım etkin değeri (A)
i(t)	: Akım ani değeri (A)
V(t)	: Gerilim ani değeri (V)
φ	: Akım gerilim arasındaki açı
φ ₁	: Kompanzasyondan önceki akım gerilim arasındaki açı
φ ₂	: Kompanzasyondan sonraki akım gerilim arasındaki açı
h	: Pulse sayısı
R	: Omik direnç (Ω)
R _{AC}	: AC omik direnç (Ω)
R _{DC}	: DC omik direnç (Ω)
L	: Endüktans (H)
C	: Kapasitans (F)
X _L	: Endüktif reaktans (Ω)
X _C	: Kapasitif reaktans (Ω)
X _{Ln}	: n. derecedeki harmonik durumundaki endüktif reaktans (Ω)
X _{Cn}	: n. derecedeki harmonik durumundaki kapasitif reaktans (Ω)
Z	: Empedans (Ω)
T	: Sıcaklık (°K) / Periyot (s)
α ₂₀	: Sıcaklık katsayısı
k _s	: Deri etkisi katsayısı
k _p	: Yakınlık etkisi katsayısı
μ _k	: Transformator bağlı kısa devre gerilimi
w	: Açısal frekans
ρ	: Filtreleme faktörü
F	: Farad

k	: Boltzmann sabiti ($8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$)
E_a	: Aktivasyon enerjisi (eV)
θ	: Sıcaklık ($^{\circ}\text{K}$)
$\Delta\theta$	: Sıcaklık değişimi ($^{\circ}\text{K}$)
p	: $\Delta\theta$ sıcaklık değişimindeki iletken ömrü (gün)
p_i	: θ_i sıcaklığındaki iletken ömrü (gün)

Kısaltmalar

AC	: Alternatif akım (Alternative current)
AG	: Alçak gerilim
DC	: Doğru akım (Direct current)
FT	: Fourier Dönüşümü (Fourier Transform)
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komistonu (International Electrotechnical Commision)
IEEE	: Institute of Electrical and Electronic Engineers (Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
OG	: Orta gerilim
PF	: Güç faktörü (Power Factor)
PVC	: Poli vinil klörür izolasyonlu iletken
THD	: Toplam harmonik distorsiyon
THD_I	: Akımdaki toplam harmonik distorsiyon
THD_V	: Gerilimdeki toplam harmonik distorsiyon değeri
SVC	: Static Var Compensator
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TS	: Türk Standartları
YG	: Yüksek gerilim

1. GİRİŞ

Enerji, tüm dünya ülkeleri için temel ihtiyaçlar arasındadır. Bu nedenle enerji üretimi ve temini konusu dünya gündeminden hiç düşmemektedir. Gelişen ve değişen dünyada enerji talebi her geçen gün artmakta ve bu talebi karşılayan ülkeler bu gelişimi daha hızlı sağlamaktadır. Artan talep rekabeti hızla arttırmakta ve ülkeler enerji taleplerini karşılamak için yeni enerji üretiminin yanında üretilen enerjinin verimli kullanılması konusuna da büyük önem vermektedir. Bu doğrultuda kanuni düzenlemeler yapılmakta, önlemler alınarak hem üretimde hem de tüketimde en verimli şekilde enerjinin kullanılması hedeflenmektedir.

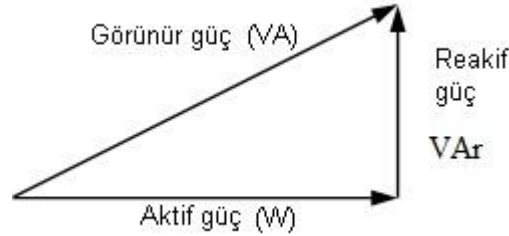
Sanayi ve iş alanlarına bakıldığında enerji yine en temel ihtiyaç olarak ortaya çıkmaktadır. Bir ülkenin gelişmesinde başı çeken sanayileşmede ana talep olarak enerjinin kesintisiz, kaliteli, yeterli seviyede ve düşük maliyetle sunulması gerekmektedir. Bunun için yine enerji verimliliği kavramı ortaya çıkmaktadır. Enerji verimliliği denilince de güç kalitesi kavramı belirleyici unsurdur. Güç kalitesi ise üretilen enerjinin akım dalga şekli ile gerilim dalga şekline ve frekans değerlerine bağlıdır. Bu şekillerin tam sinüs grafiği şeklinde olması istenir. Bu şekilden ne kadar uzak olursa sistem verimliliği o kadar düşmekte ve birçok kayba neden olmaktadır. Dalga şeklinin bozulmasından bahsedildiğinde ise harmonik kavramı ortaya çıkmaktadır. Harmonikler gerilim ve akım dalga şeklinin söylendiği gibi olması gereken ideal formundan yani sinüs grafiğinden sapması şeklinde açıklanabilir. Anlaşılacağı üzere farklı frekans büyüklüklerinde farklı sapmalar meydana gelmektedir. Bu da bizi harmoniklerin enerji verimliliğine etkisini daha iyi anlayabilmemiz için farklı seviyelerdeki harmonikleri de araştırmaya yöneltmektedir.

Enerji verimliliğinin güç kalitesi ile doğru orantılı olduğu yukarıda söylendi. Güç ise elektrik sistemlerinde görünür güç olarak seçimleri yapılmaktadır. Görünür güç ise aktif güç ve reaktif güç olarak bilinen bileşenlerin bileşkesinden oluşan güçtür.

Aktif güç adından da anlaşılacağı üzere aktif olarak işimize yarayan yani iş yapan güçtür. Burada işten kasıt gözle görebildiğimiz şekilde etkiler ortaya çıkartan, örneğin; lambanın ışık vermesi, günlük hayatta birçok yerde kullandığımız rezistansların ısınması, dönen makinalarda dönme aktivitesini sağlaması gibi, görünür güç bileşenidir. Reaktif güç ise genellikle iş yapmayan güç olarak açıklanır. Bu iş yapmamaktan kasıt olarak yukarıda aktif güç örneğinde verdiğimiz lambaların yanması rezistanslarda ısınma durumunu veya döner makinalarda dönme olayını gerçekleştirmemesi gibi birçok gözle

görülen olayları sağlamamasıdır. Tabiki bu iş yapmama tabiri nedeniyle reaktif güç tümüyle gereksiz değildir. Önemli görevleri vardır. Manyetik alanla çalışan sistem yükleri için manyetik alan oluşturmak için reaktif güç mutlaka gerekmektedir. Reaktif güç, üzerinde ayrıntılı durulması gereken bir konudur. Bu nedenle daha ayrıntılı açıklarsak, bobin ve kondansatör özelliği taşıyan elemanlara sahip sistemler alternatif akım devrelerinde pozitif ve negatif alternansta iki kez enerji depolarlar ve iki kez enerji boşaltırlar. Bu durum devre elemanının bobin veya kondansatör özellikli olma durumuna göre ters şekilde gerçekleşir. Yani bobin özellikli eleman enerji depolarken kondansatör özellikli elemanlar enerji boşaltmaktadırlar. Yani bağlandıkları elektrik sistemi ile enerji alışverişinde bulunurlar. Bu enerji alışverişi reaktif güç olarak tanımlanmaktadır. Anlatılan açıklamadan anlaşıldığı üzere devre elemanının karakteristiğine göre enerji alışverişi ters şekilde gerçekleştiğinden iki farklı reaktif güç kavramı ortaya çıkmaktadır. Bunlar bobin özellikli devre elemanlarından dolayı oluşan reaktif güç olan endüktif reaktif güç ve kapasitif özellikli devre elemanlarından dolayı oluşan reaktif güç olan kapasitif reaktif güçtür.

Elektrik enerjisi bir vücudu besleyen damarlar gibi elektrik sistemi içerisinde kablolar (iletkenler) ile taşınmaktadır. Yukarıda Aktif güç ve Reaktif güç bileşenleri görünür gücün birer parçalarıdır.



Şekil 1.1. Güç üçgeni

Elektrik şebeke sisteminde aktif güç ve reaktif güç farklı kavramlar olsa da şebekede akan akım tek bir akımdır. Bu akım aktif güce de reaktif güce de bağlıdır. Şebekede akan akım ölçülmek istendiğinde ampermetreden okunacak akım bu tek bileşke akımdır. Reaktif güç anlatıldığı üzere aktif olarak iş yapmayan güç olduğundan şebekede mümkün olduğunca az taşınması istenir. Çünkü çekilen akım tek olduğundan reaktif gücün büyüklüğünden dolayı oluşan akım nedeniyle kablolar üzerinden gereksiz kayıplar, gerilim düşümleri ve bunlara bağlı olarak ısınmalar meydana gelmektedir. Böylece güç kalitesi düşmektedir. Bu durumu gidermek için kompanzasyon uygulaması

yapılmaktadır. Bu uygulamada temel amaç güç faktörü diye tabir edilen yukarıdaki Şekil 1.1’deki güç üçgeninden de farkedebileceğimiz görünür güç ile aktif güç arasındaki açıdır. Kompanzasyon uygulaması ile bu açının düşürülebildiği kadar düşürülerek görünür gücün mümkün olduğunca aktif güce yaklaşması istenir. Bu sayede elektrik sisteminde taşınacak akım daha çok aktif güce ait olan akım olacak ve iş yapmayan reaktif güç en az düzeye indirilerek güç kalitesi arttırılmış ve enerji mümkün olduğunca verimli şekilde kullanılmış olacaktır. Yukarıda bahsedildiği gibi endüktif reaktif ve kapasitif reaktif olmak üzere iki çeşit reaktif güç vardır ve bunlar birbirine terstir. Kompanzasyon sisteminde de bu terslikten faydalanılır ve endüktif reaktif gücü azaltmak için kapasitif reaktif güç üreten kondansatörler kullanılır. Benzer şekilde kapasitif reaktif gücü azaltarak güç faktörünü düşürmek için endüktif reaktif güç üreten bobin karakteristikli devre elemanları kullanılmaktadır.

Bahsedildiği gibi harmonikler elektrik şebeke sistemlerindeki temel dalga formunu bozarak güç kalitesini düşürmektedir. Bunun yanında başka etkileri de vardır. Harmonikler elektrik şebeke sisteminin damarları olan kablolar üzerinde taşınırlar ve bu iletkenler üzerinde büyük zararlara neden olarak kabloların kullanım ömürlerine etki ederler. Bu nedenle harmoniklerin etkilerinin de giderilmesi enerji verimliliği ve kalite için elzemdir. Bunun için de aktif ve pasif filtreler tasarlanarak harmonik kompanzasyonu yapılmaktadır.

Yukarıda anlatılanlar doğrultusunda bu tezin amacı:

- Reaktif güç kompanzasyon sisteminin anlatılarak gelişen teknolojiyle yaşanan değişimleri anlatmak ve kompanzasyon sisteminin uzaktan takip sistemini anlatmak,
- Harmoniklerin sistemlere ve iletkenler üzerindeki etkilerini vurgulamak, kablo ömrüne ne denli etki ettiğini göstermek,
- Harmoniklerin, reaktif güç kompanzasyon sistemi ile birlikte kullanımını anlatmak ve harmonik kompanzasyonunda kullanılan filtreleri anlatmak,
- Paralel ve seri rezonans durumlarını anlatarak çeşitli harmonik frekanslarında ortaya çıkan etkilerini vurgulayarak filtre seçimlerinde dikkat edilecek hususların gösterilmesi,

olarak söylenebilir.

Bu tez çalışması şu bölümlerden oluşmaktadır:

- Birinci bölüm, tezde anlatılması amaçlanan konuların anlatıldığı, “GİRİŞ” bölümüdür.

- İkinci bölüm, tezde anlatılan konular hakkında yapılan araştırmaların olduğu “KAYNAK ARAŞTIRMASI” bölümüdür.
- Üçüncü bölüm, reaktif güç için yapılan kompanzasyon sistemlerinin, kompanzasyon sisteminin uzaktan takibinin nasıl yapıldığı, kompanzasyon sistemi çeşitleri ve elemanları hakkında bilgilerin verildiği anlatıldığı, piyasa uygulamalarında karşılaşılan sorunlardan ve sistem güvenliğinden, projelendirme ve uygulamada izlenen yöntemlerden ve bunların sakıncalarından bahsedilen “REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU VE TAKİP SİSTEMLERİ” bölümüdür.
- Dördüncü Bölüm, harmonikler hakkında ayrıntılı bilgi verilmiş, harmoniklerin elektrik sistemlerinde tetiklediği sorunları anlatılmış, harmoniklerin temizlenme yöntemlerinden bahsedilmiş, iletkenler üzerindeki etkilerini, harmonikleri giderme yöntemlerini, paralel ve seri rezonans durumunları ve bunların harmoniklerle ilişkileri, aktif ve pasif filtreleri anlatılmış, filtre hesabı için örnek verilen, uygulamada filtre seçiminin nasıl yapıldığı ve bunların sakıncalarından bahsedilmiş, harmonik filtrelerin ve reaktif güç kompanzasyon sisteminin birlikte kullanımının anlatıldığı “HARMONİKLER” bölümüdür.
- Beşinci bölüm, harmoniklerin alçak gerilim kablolarının kullanım ömrüne etkilerinin gösterilmesi için yapılan analizde kullanılan materyallerin, deneysel analizin ve hesaplama yöntemlerinin anlatıldığı “MATERYAL VE YÖNTEM” bölümüdür.
- Altıncı Bölüm, deneysel analiz ve bilgisayar destekli hesaplamalar sonuçlarının değerlendirildiği “ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA” bölümüdür.
- Yedinci bölüm, tez çalışması boyunca tüm bölümlerde anlatılan bilgiler ve yapılan deneysel çalışma sonucunda ortaya çıkan verilerin değerlendirildiği ve yorumlandığı “SONUÇLAR VE ÖNERİLER” bölümüdür.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Reaktif güç kompanzasyonu, kompanzasyonun enerji verimliliğine etkileri, harmonikler ve harmonik filtreleme yöntemleri ile iletken ömrü üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Adak (2003) “Enerji Sistemlerinde Harmonik Distorsiyonun Azaltılması” konulu doktora tezinde harmonik distorsiyonun giderilmesi konusu araştırılmış ve bunun için üçüncü harmonik enjekte yöntemi uygulanmıştır. Ayrıca 3 fazlı tam dalga doğrultucunun elektrik sistemlerinde oluşturduğu harmoniklerin giderilmesi de üçüncü harmonik enjekte yöntemi kullanılarak sağlanmıştır. Ek olarak diğer filtreleme yöntemleri ve harmonikler konusunda da bilgiler verilmiştir.

Akbal, “ Fabrika Beslemelerinde Harmonik Ölçümü ve Filtre Tasarımı” adlı yüksek lisans tezinde reaktif güç kompanzasyonu ve harmoniklerin elektrik sisteminde filtrelenmesi üzerinde çalışılmıştır. Ayrıca bir fabrikanın elektrik sisteminde baskın harmonikler tespit edilerek bir filtre tasarımı yapılmış ve simülasla uygunluğu denenmiştir.

Chapman (2011) “ Application Note Harmonics: Causes and Effects” isimli kitapt harmonik oluşumunun nedenleri ve etkileri konusunda ayrıntılı bilgiler verilmiş, ölçümler ve filtreler anlatılmıştır.

Gencer Ö. Ö., Alboyacı B., Öztürk S., Çetinkaya H. (2003) “Harmoniklerin Güç Faktörüne Etkisi” konulu makalelerinde elektrik sistemlerinde harmoniklerin güç faktöründe neden olduğu bozulma durumu incelenmiş ve doğru güç faktöründe çalışmanın faydaları anlatılmıştır.

Jiango, Jinhui (2016) “Research On Harmonic Analysis Of Low Voltage Distribution Networks And Its Monitoring System” adlı makalede alçak gerilim tüketim ağındaki yükler nedeniyle oluşan harmoniklerin nedenleri ve etkileri araştırılmış ve yorumlanmıştır.

Karaca (2006) Yıldız Teknik Üniversitesi “ Kablolarda Elektriksel ve Isıl Zorlanmaların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Çoklu Analizi” Yüksek Lisans Tezinde birbirinden farklı toprak ısıl öz direnç ve toprak koşullarında, bir adet tek damarlı, üç adet tek damarlı kablonun birbirine uzaklıklarını farklı mesafelerde alarak ve farklı gömülme derinliklerinde kablo üzerindeki yalıtkanın dayanabileceği en yüksek sıcaklık değerine çıkarılarak sonlu elemanlar yöntemiyle akım taşıma kapasiteleri bulunmuş ve kablo üzerindeki sıcaklık takibinin incelenmesi yapılmıştır.

Karahan, Varol, Kalenderli(2007) “ Hava ve Su Ortamında Yer Alan Alçak Gerilim Güç Kablolarında Akım-Sıcaklık İlişkisinin İncelenmesi” adlı makalede alçak gerilim güç kablolarının akım ve sıcaklık ilişkisi deneysel yöntemler kullanılarak anlaşılmasına çalışılmıştır. Labratuar ortamında alçak gerilim güç kablosunun üzerinden akım geçmesi sağlanmış ve bu aşamada kılıf ve iletken üzerindeki sıcaklıklar ölçülmüş ve bu veriler toplanarak kablonun matematiksel modellemesi yapılmıştır. Sonuç olarak kayıpların sıcaklık dağılımına etkisi araştırılmış ve akım taşıma kapasitesi belli koşullar altında nasıl değiştiği incelenmiştir.

Karahan, Varol, Kalenderli (2007) “ Güç Kablolarının Elektrik ve Isıl Zorlanmaların Etkisi Altında Sıcaklık Dağılımlarının ve Ömürlerinin Belirlenmesi ” adlı makalede sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yan yana döşenen yeraltı kablolarının ısı iletkenlik ve iletkenler arası mesafeye göre akım taşıma kapasitesi ve ömrünün değişimi incelenmiştir.

Kocatepe, Arıkan, Kumru, Akbulut (2014) “Yüksek Gerilim Kablolarının Farklı Döşeme Koşullarında Isıl Analizi” adlı çalışmada 154 kV tek damarlı yüksek gerilim hatlarında kullanılan kablonun farklı döşeme koşullarında bilgisayar destekli ısı analizi yapılmıştır.

Küçükaydın, Arıkan (2014) “ Ortam Koşullarının Yeraltı Kablolarının Sıcaklığı ve Akım Taşıma Kapasitesi Üzerindeki Etkisi” konulu çalışmada 380kV gerilim düzeyinde kullanılan bakır iletkenli, XLPE yalıtkanlı yüksek gerilim yeraltı kabloları için tüm termal etkenler göze önüne alınarak ortam koşullarına göre yüksek gerilim kablolarının ısı performansları ve akım taşıma kapasiteleri araştırılmış ve incelenmiştir.

Lienhard (2003) “ A Heat Transfer Text Book” adlı kitabın üçüncü baskısında ısı transferi hakkında tüm detaylar anlatılmış ve çeşitli yaklaşımlar ve denklemler verilerek örnek problemler çözümleriyle verilmiştir.

Özer F. Gülşen (2011) “Nonlinear Yüklü Sistemde Filtreleme ve Güç Kompanzasyonu” adlı yüksek lisans tezinde harmonik filtreleme ve reaktif güç kompanzasyonu sistemlerinin harmonik bozunuma uğramış sistemler için gerçekleştirilmesi durumu incelenmiştir. Bir sistem üzerinde uygulanması ve ölçümler yapılmıştır.

Pacheco ve Ark. (2000) “ Power Quality Impact On Thermal Behaviour and Life Expectancy of Isulated Cables” adlı makalede ideal kaynaklı olmayan durumlarda izoleli güç kablolarının termal davranışları ve bu davranışlar ışığındaki ömür beklentisi ele alınmıştır. Aynı zamanda termal modeller kullanılarak güç kalitesinin bozulması

durumlarının yanısıra fazlar arasındaki termal etkileşimler de incelenmiş ve bilgisayar destekli analizler yapılmıştır.

Sarathi, Nandini, Tanaka (2003) “Thermal Analysis Of Thhe Influence Of Nonlinear, Un Balanced and Asymmetric Loads On Current Conducting Capacity Of LV-Cables” başlıklı çalışmada lineer olmayan yükler ile dengesiz ve asimetrik yüklerin iletkenlere etkisi incelenmiştir.

Sarathi, Nandini, Tanaka (2012) “Understanding Electrical Treeing Phenomena In XLPE Cable Insulation Under Harmonic AC Voltages Adopting UHF Technique” konulu makalede farklı AC voltaj değerlerinde ve farklı harmonik mertebelerinde elektriksel ağaçlandırma nedeniyle XLPE kablo izolasyon ömrünü tahmin etmek için çalışmalar yapılmıştır.

Şahin (2006) “ Harmoniklerin Yeraltı Güç Kablolarına Etkisinin Belirlenmesi” konulu yüksek lisans tezinde harmoniklerin yeraltı güç kablolarına olan etkilerini azaltılması konusu araştırılmış ve orta gerilim sisteminde harmonik analizi yapılarak alınan değerler bilgisayar desteği ile değerlendirilerek yorumlanmıştır.

Vardar T., Çam E., Yalçın E., (2010) “Reaktif Güç Kompanzasyonu ile Enerji Verimliliği ve Kamu Kurumlarında Reaktif Güç Kompanzasyonu” konulu yayın çalışmalarında enerji verimliliğinin ne anlama geldiği, reaktif güç kompanzasyonu ile verimliliğin bağlantısı anlatılmıştır. Yapılacak uygulamalarla elde edilecek kazançlar gösterilmiştir.

3. REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU VE TAKİP SİSTEMLERİ

Reaktif güç elektrik sistemlerinde iş yapmayan güç olarak görülmekte ve sistemde kayıplar, ısınmalara, aşırı yüklenme, elektrik sistemlerinin kurulum ve işletme maliyetlerini arttırma gibi problemlere neden olmaktadır. Bundan dolayı elektrik sistemlerimizde reaktif gücü mümkün olduğu kadar minimize etmek amacıyla kompanzasyon sistemleri tasarlanıp kullanılmaktadır. Bu sistemler gelişen teknoloji ile birlikte üst düzey verimle çalışmakta ve kullanılmaktadır. Ancak zararlarının çok olmasının yanında reaktif enerji tümüyle gereksiz değildir. Manyetik alanla çalışan cihazlar elektrik şebeke sisteminden aktif gücün yanında reaktif güç de çekerler. Bu cihazların çalışması için reaktif güç gereklidir.

Şebekeden reaktif güç çeken cihazlardan bazıları şu şekildedir:

- Senkron motorlar
- Asenkron motorlar
- Transformatörler
- Bobinler ve bobin temelli cihazlar
- Kaynak makineleri
- Havai elektrik hatları
- Flouresan lambaların balastları
- Redresörler
- Endüksiyon fırınları
- Ark fırınları

Elektrik sistemimize zararları olan gereğinden fazla reaktif güç tüketimi için resmi kurumlar da adım atmış ve yönetmeliklerde kullanım zorunluluğunu ve yaptırımları belirleyerek yayınlamıştır.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından Perakende Satış Tarifesi Usul ve Esasları konusunda 08/01/2004 günü alınan 284/2 nolu karara göre meskenler ve tek fazlı aboneler hariç sözleşme gücü 9 kW üzeri tüm aboneler reaktif güç kompanzasyonu yapmak zorundadır.

Ayrıca 2003 tarihli ve 25025 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan tarifeye göre 50 kVA ya kadar olan aboneler için tükettikleri endüktif reaktif gücün aktif güce oranının %33’ü aşması durumunda veya tükettikleri kapasitif reaktif gücün aktif güce oranının

%20'yi aşması durumunda reaktif enerji bedeli öderler. 50 kVA bağlantı gücünün üzerindeki aboneler için ise tüketilen endüktif reaktif enerjinin aktif güce oranının %20'yi geçtiği durumda veya tüketilen kapasitif reaktif enerjinin tüketilen aktif güce oranının %15'i aşması durumunda reaktif enerji bedeli ödenmek zorundadır.

Yukarıdaki durumlar gösteriyor ki hem sistem güvenliği hem enerji kalitesi hem de maliyet kaybının önüne geçmek için doğru bir reaktif güç kompanzasyon sisteminin tasarlanması ve uygulanması oldukça önemlidir.

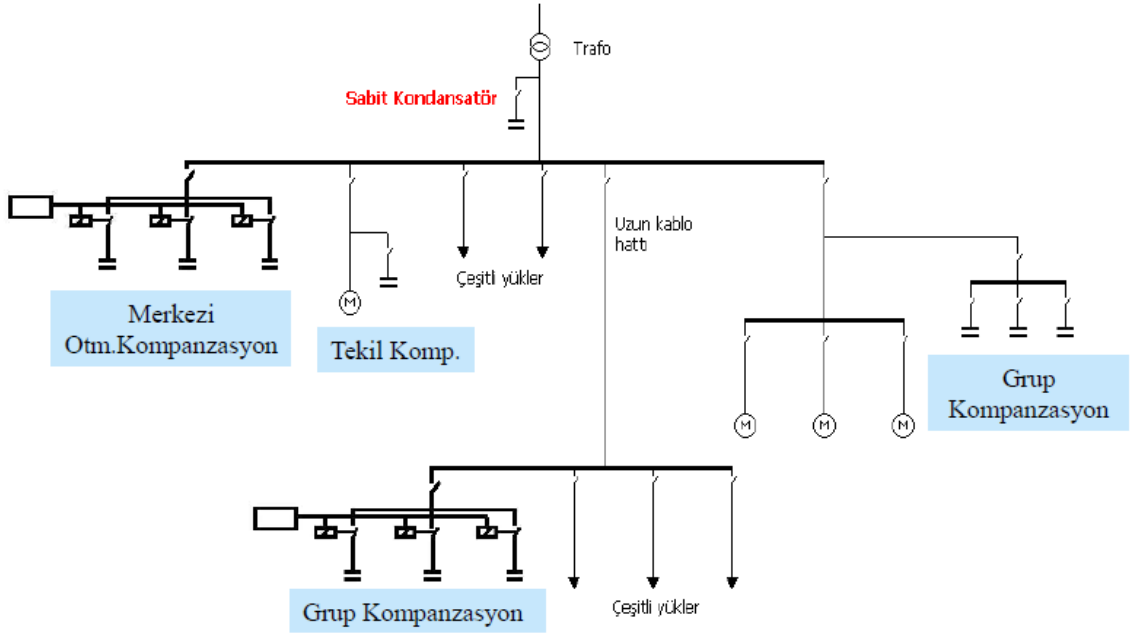
3.1. Reaktif Güç Kompanzasyonu Çeşitleri ve Elemanları

Reaktif güç kompanzasyonu yapılmasının sağladığı faydalar ve kanuni zorunluluklar nedeniyle bu alanda çalışmalar artmış ve farklı durumlar için çeşitli kompanzasyon çözüm önerileri ve uygulamaları ortaya çıkmıştır.

Sanayi ve üretim tesisleri başta olmak üzere elektrik cihazları çok çeşitli maksatlarla kullanılmaktadır. Özellikle sanayide büyük güçlü tekil olarak devreye girip çıkan cihaz veya cihazlar bulunmaktadır. Bu gibi cihazlarda öncelikli olarak kullanılabileceği gibi aslında en ideali tüm elektrik makinelerinde uygulanması uygun olabilecek bir yöntem olan tekil kompanzasyon sistemi uygulanabilmektedir. Kompanzasyon sistemi temel mantığı aygıtın gereksinim duyduğu reaktif gücü temin edebilecek büyüklükte bir kondansatörü aygıtın şebeke bağlantı klemenslerinin arasına montajlayarak cihazla birlikte devreye girip çıkmasını sağlamaktır. Bu sayede bu gibi tesislerde tüm elektrik sistemine kompanzasyon kurulumu yapmaktansa sorunu kaynağında çözmek ideal bir yaklaşım olacaktır.

Bir diğer yöntem ise grup kompanzasyon yöntemidir. Bu yöntem aslında tekil kompanzasyon yönteminin birden fazla tüketiciye uygulanmasıdır. Böyle tesislerde durum tespitinin iyi yapılması durumunda daha pratik ve ekonomik bir çözüm olacaktır.

Son olarak ise genel olarak yüklerin çok ve değişik özelliklerde olduğu tüketim tesislerinde tercih edilen merkezi otomatik kompanzasyon sistemi de bir diğer çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Alçak gerilim tesislerinde çoğunlukla kullanılan yöntemdir. Sistemin idaresi merkezi kompanzasyon sisteminin beyni olarak tabir edebileceğimiz reaktif güç kontrol rölesi tarafından yapılır. Elektrik sisteminden sürekli ölçümler alınarak reaktif güç kontrol rölesinde güç faktörü izlenerek belirlenen değişimlerine göre kademelerde bulunan kondansatörler sırayla devreye alıp çıkartmak suretiyle kompanzasyon yapılır.



Şekil 3.1. Reaktif güç kompanzasyon tipleri

Teknoloji gün geçtikçe hızla gelişmektedir. Tüm diğer alanlarda olduğu gibi elektrik cihazları ve sistemlerinde de bu gelişme artarak devam etmektedir. Kompanzasyon sistemleri için de gelişen teknolojiye paralel olarak çalışmalar yapılmakta olup bu da sistemleri hızla daha iyiye taşımaktadır.

Reaktif güç kompanzasyon sistemlerinde kullanılan elemanlar şu şekilde özetlenebilir:

1. Kondansatör : Sistemde oluşan endüktif reaktif gücü kompanse etmek için kapasitif reaktif güç üreten kondansatörler kullanılır. Çeşitli güçlerde üretilerek kompanzasyon kademelerinde sırayla devreye alınarak endüktif reaktif güç sistemden yok edilmeye çalışılır.
2. Sigortalar : Kompanzasyon panosunda kontaktörleri, iletkenleri aşırı akımlara karşı korumak için kullanılmaktadır. Kompanzasyon sisteminde yaygın olarak anahtarlı otomatik sigortalar ve NH tipi bıçaklı sigortalar kullanılmaktadır. Bunun yanında termik manyetik şalterler de tercih edilebilmekte olup maliyeti arttırdığından yaygınlığı daha azdır.
3. Kompanzasyon Kontaktörleri : Kompanzasyon panolarında kondansatör kademelerini devreye almak ve devreden çıkartmak için kullanılmaktadır. Kondansatörlerin devreye girip çıkması durumdaki yüksek akımları deşarj etmek için deşarj dirençleri bulunmaktadır. Bu tip kontaktörlerin kullanımı verimi ve

kullanım ömrünü arttırmaktadır. Ancak günlük yaşıntıda görülen uygulamalarda blok kontaktörlere de rastlanmaktadır.

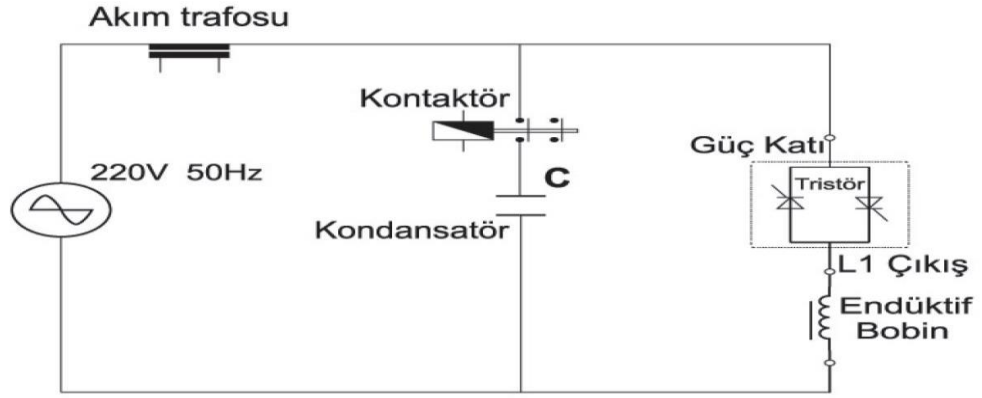
4. Şönt Reaktörler : Sistemdeki kapasitif reaktif gücü kompanze etmek için kullanılırlar. Bu güç kesintisiz güç kaynakları, bilgisayarlar ve çoğu elektronik cihazlar ile floresan lamba ve elektronik balastlar gibi günlük yaşıntıda birçok alanda kullanılan ürünlerden dolayı oluşmaktadır. Ayrıca sistemde aşırı kompanzasyon durumlarının önüne geçmek için de kullanılmaktadır.
5. Endüktif yük sürücüleri : Kompanzasyon sisteminde kullanılan şönt reaktörleri uygun şekilde devreye alıp çıkarmak için kullanılan elemanlardır.
6. Harmonik Filtre Reaktörleri : Kompanzasyon sisteminde kondansatörlere seri bağlanarak rezonans frekansını kaydırırlar. Bu sayede rezonans olaylarının ana harmonik seviyelerinde oluşması engellenerek sistem korunmuş olur. Ayrıca harmonik akımlarına karşı kondansatör empedansı ile birlikte kendi empedansı sayesinde kondansatör üzerinden geçen akımı sınırlayarak kondansatörleri korumaktadır. Ek olarak sistemde oluşan harmonikleri filtreleyerek cihazların ömrünün uzamasını sağlar ve elektronik cihazlar üzerinde bir koruma yapar.
7. Akım Trafoları : Elektrik sistemindeki yüksek akımların okunmasında kullanılır. Akım bilgisi okunarak reaktif güç kontrol rölesine bilgi verilir.
8. Deşarj ünitesi : Dengesiz yük durumlarında, hızlı devreye girip çıkan yüklerin olduğu durumlarda kompanzasyon sistemindeki kondansatörler hızlı devreye girip çıkarılmaktadır. Bu durumlarda yüklenen kondansatörün boşalması için bir süre gerekmekte ve anlatılan durum için bu süre yeterli gelmemektedir. Bu nedenle deşarj üniteleri kullanılarak kondansatörler deşarj edilmektedir.
9. Reaktif Güç Kontrol Rölesi : Kompanzasyon sisteminin beyni olarak nitelendirilebilir. Elektrik sisteminden akım, gerilim örnekleri alarak sistemin aktif güç, reaktif güç, görünür güç ve güç faktörlerini hesaplar. Gerekli durumlara göre kondansatörleri ve şönt reaktörleri devreye alıp çıkartarak reaktif güç kompanzasyonun yapılmasını sağlar.

Kompanzasyon sisteminde eleman seçimleri yapılırken sistemin aktif gücü belirlendikten sonra sistem güç faktörüne göre reaktif güç hesaplanarak bu gücü kompanze etmek için yeterli güçte kondansatörler seçilir ve reaktif güç rölesinin kontrol edebildiği kademe sayısına göre kademelere ayrılarak kontaktörler yardımıyla sıra ile

devreye alınarak sistemdeki endüktif reaktif güce göre kapasitif reaktif güç eklenip kompanzasyon yapılmış olur.

Kompanzasyon sisteminde kontaktör ve sigorta seçimi ise kademelere yerleştirilen kondansatörlerin güçlerine göre yapılmaktadır. Kısaca kademelere seçilen kondansatörler devreye girerken yüksek akımlara neden olduklarından kontaktörler, kondansatör akımının 1,25 ila 1,6 katı civarında seçilmektedir. Yine uygulama örneklerinde sigorta seçimleri ise kontaktör akım değerinin 1,3 ila 1,4 katı arasında seçilmektedir. Bu ise sigortanın termik manyetik eğrisinden ötürü kaynaklandığı şeklinde açıklanmaktadır.

Gelişen teknoloji kompanzasyon sistemlerini de sürekli daha ileri taşımaktadır. Anlatıldığı haliyle yapılan kompanzasyon sistemleri genel itibariyle bir çare olmakla birlikte elektrik sistemi büyüklüğüne ve yük çeşitlerine göre yetmediği durumlar da fazlasıyla görülmektedir. Bazı daha basit sistemlerde elektrik sisteminde tek fazdan örnek alan reaktif güç kontrol rölesi kullanılmıştır. Sistem kompleks hal almaya başladıkça üç fazdan bilgi alan röleler ortaya çıkmıştır. Özellikle hızlı değişen yükler ve dengesiz yük dağılımları nedeniyle bu kompanzasyon sistemleri gerekli çözümü sağlayamamaktadır. Ayrıca kondansatörlerin devreye girmesiyle kompanze işlemi tam anlamıyla sağlanamamaktadır. Çünkü bu sistemde kondansatörler devreye girdiğinde gerekli olan kapasitif reaktif gücü tam olarak sağlanması çok mümkün değildir. Bunun yerine mümkün olduğunca yakın bir değer elde edilmeye çalışılır. Bunun önüne geçmek içinde fazlara tek tek kompanzasyon kademeleri oluşturulması bir çözüm olarak kullanılsada maliyeti arttırmakta ve yinede tam anlamıyla bir sonuç ortaya çıkaramamaktadır. Tüm bunların neticesinde SVC (Static VAr Compensator) sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemde reaktif güç kontrol rölesi üç fazdan da örneklemelerini alarak analizini yapar. Röle tüm fazlara göre endüktif ve kapasitif reaktif güçleri tespit ederek kondansatörleri devreye alır. Sonuçta oluşan kapasitif farkları da şönt reaktörleri devreye alarak kapatarak kompanzasyon işlemini yapmış olur.



Şekil 3.2. SVC Kompanzasyon sistemi

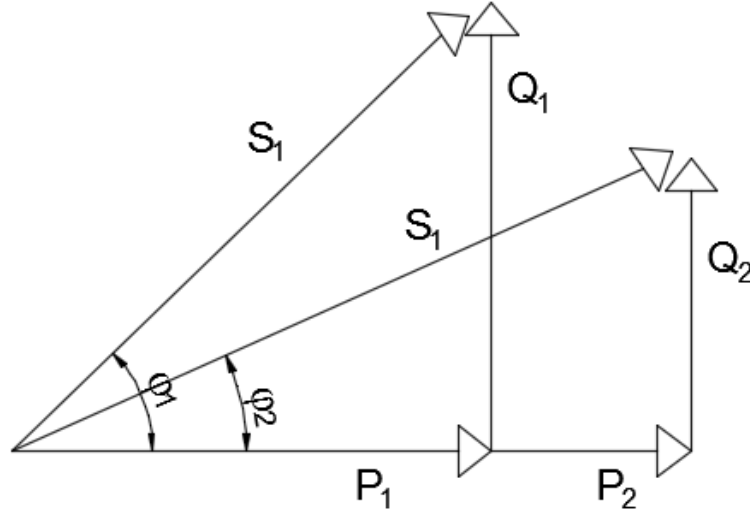
SVC kompanzasyon sistemine ek olarak hızlı devreye girip çıkan ve büyük güce sahip sistemler için kontaktör anahtarlamaıyla devreye alınan kondansatörler sistem için gerekli optimum çözümü sağlayamamaktadır. Bunun yerine tristör anahtarlama kondansatör sürücüleri kullanılarak en uygun zamanda kondansatör devreye alınıp devreden çıkarılarak kompanzasyon yapılır. Bu sayede hem optimum kompanzasyon yapılmış hem de kondansatörün kullanım ömrü arttırılmış olacaktır.

3.2. Kompanzasyon Hesabı ve Sistem Tasarımı

Kompanzasyon sistemleri tasarlanırken sistemin kaç kVAr kapasitif reaktif güce ihtiyacı olduğunu tespit etmek için sistemin ölçülen ve projede hesaplanan aktif güç veya görünür gücüne göre kompanzasyon hesabı yapılarak tespit edilir. Toplam kapasitif güç tespit edildikten sonra seçilecek olan reaktif güç kontrol rölesi özelliklerine ve kontrol ettiği kademe sayısına göre kompanzasyon sistemi kademeleri tasarlanır.

Reaktif güç kompanzasyonu hesabında temel amaç reaktif gücü düşürmek ve güç faktörünü 1 (bir) değerine mümkün olduğunca yaklaştırmaktır. Elektrik sisteminde harmoniklerin bulunmadığını varsayarak bir işletme için kompanzasyon hesabı iki prensibe göre yapılabilir.

Birinci yöntem olarak görünür güç (S) sabit tutularak aktif güç daha büyük bir değer alır ve reaktif güç azalmış olur.



Şekil 3.3. Fazör diyagramı – görünür güç sabit

$$P_1 = S_1 \times \cos \varphi_1 \quad (3.1)$$

$$Q_1 = S_1 \times \sin \varphi_1 \quad (3.2)$$

$$Q_1 = P_1 \times \tan \varphi_1 \quad (3.3)$$

$$P_2 = S_1 \times \cos \varphi_2 \quad (3.4)$$

$$Q_2 = S_1 \times \sin \varphi_2 \quad (3.5)$$

$$Q_2 = P_2 \times \tan \varphi_2 \quad (3.6)$$

Fazör diyagramında görünür güç sabit alınıp sistem φ_2 açısına getirmek için sisteme kompanzasyon yapıldığı düşünülmüştür. Bu durumda sistemde Q_c gücünde bir kapasitif reaktif güç ilave edilmiştir. Bu durumda Q_c değerini tespit edip bu güce göre kompanzasyon kademeleri belirlenir ve kademelere göre de diğer kompanzasyon elemanları seçilir.

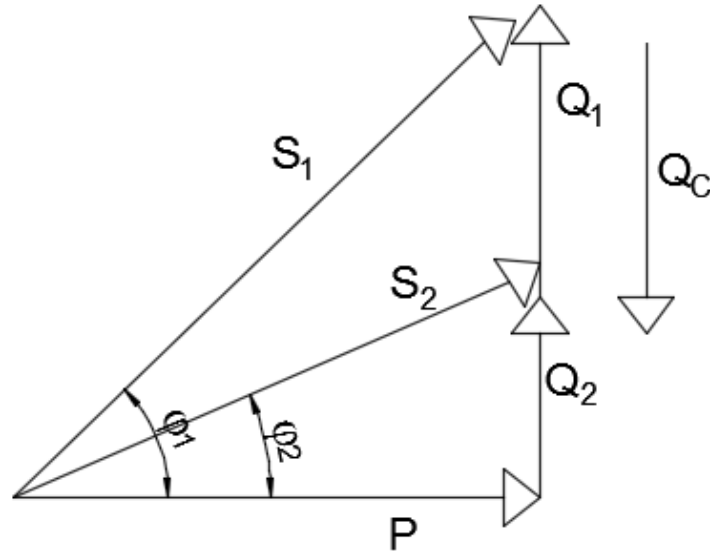
$$Q_c = Q_1 - Q_2 = (P_1 \times \tan \varphi_1) - (P_2 \times \tan \varphi_2) \quad (3.7)$$

Denklem (3.1) ile denklem (3.4)'de tanımlanan P_1 ve P_2 değerleri denklem (3.6)'da yerine konulursa;

$$Q_c = (S_1 \times \sin \varphi_1) - (S_2 \times \sin \varphi_2) \quad (3.8)$$

$$Q_c = S_1 \times (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2) \quad (3.9)$$

İkinci yöntem olarak aktif güç sabit tutulur. Kompanzasyondan sonraki görünür gücün azalması sağlanır ve bu şekilde sisteme ilave edilen kapasitif reaktif güç ile reaktif güç bileşeni azalmış ve güç faktörü 1 (bir) e daha çok yaklaşmış olur.



Şekil 3.4. Fazör diyagramı – aktif güç sabit

$$P = S_1 \times \cos \varphi_1 \quad (3.10)$$

$$P = S_2 \times \cos \varphi_2 \quad (3.11)$$

$$Q_1 = S_1 \times \sin \varphi_1 \quad (3.12)$$

$$Q_2 = S_2 \times \sin \varphi_2 \quad (3.13)$$

S_1 ve S_2 denklem (3.10) ve denklem (3.11)'den elde edilip denklem (3.12) ve denklem (3.14)'de yerine yazılırsa Q_1 ve Q_2 değerlerinin sabit tutulan P değeri ile bağlantısı elde edilir.

$$Q_1 = P \times \tan \varphi_1 \quad (3.14)$$

$$Q_2 = P \times \tan \varphi_2 \quad (3.15)$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = (P \times \tan \varphi_1) - (P \times \tan \varphi_2) \quad (3.16)$$

$$Q_c = P \times (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (3.17)$$

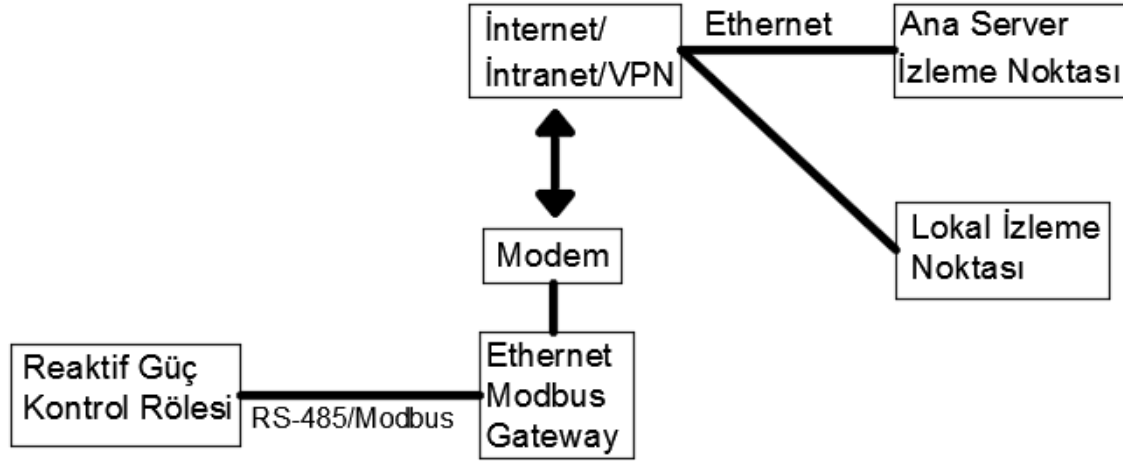
Denklem (3.17) bağıntısından kompanzasyon sistemi gücü bulunur. Bununla güce göre kompanzasyon sistemi kademelere ayrılarak belirlenir ve her kademe bulunan kondansatör gücüne göre gerekli kontaktör ve şalter elemanları ile iletken kesitleri seçilir. Tüm kompanzasyon sistemi burada bulunacak güce göre tasarlanır.

3.2. Uzaktan İzleme Sistemi

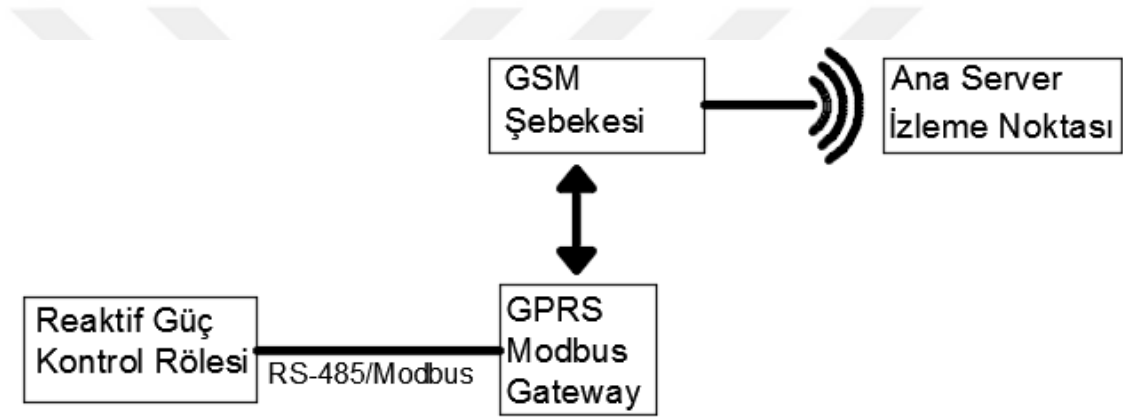
İşletmelere kurulan reaktif güç kompanzasyon sistemleri kurulum ve devreye alma aşamaları tamamlandıktan sonra da sık sık kontrol edilmeli, sistem elemanlarının çalışma durumuna bakılmalı ve cezaya girip girmeme durumu denetlenmelidir. Bu işlemler genelde işletmelerin sorumluları olarak belirlediği mühendisler tarafından

yapılmaktadır. Kompanzasyon sistemleri genellikle kurulduktan sonra arka plana atılıp denetimi yapılmamakta ve cezaya girme durumları oluşmaktadır. Sistemin kontaktörlerin çalışma durumu, bağlantı gevşeklikleri, kondansatör boşalmaları gibi durumlar eğer düzenli kontrol yapılmazsa ve aktif güç, reaktif güç değerleri düzenli olarak kontrol edilmezse reaktif veya kapasitif ceza sınırları aşılmakta ve işletme para cezasına maruz kalmaktadır. Bunun yanında kompanzasyon sisteminde oluşabilecek diğer arızalarda tehlikelere yol açabilmektedir. Bu gibi durumların önüne geçmek amacıyla kompanzasyon ve enerji izleme sistemleri geliştirilmiştir. Bu sayede sistem bilgisayar ortamından takip edilebilir ve istenirse sisteme müdahale dahi yapılabilmektedir.

Uzaktan takip sistemleri üzerinde çalışan firmalar birkaç farklı yol ile işletmelerin enerji ve kompanzasyon takiplerini güvenli ve güvenilir bir şekilde yapabilmektedir. Takip sistemi özetle takip edilmek istenen işletmedeki sayaç veya reaktif güç kontrol rölesi ile haberleşme sağlanarak modem veya GPRS üzerinden merkez sunucuya gönderilir ve takip personeli internet ortamından yetki bilgileri ile sisteme giriş yaparak enerji ve kompanzasyon sistemlerini takip edebilir ve gerektiğinde müdahale edebilir. Cihazların ethernet ve GPRS ile haberleşmesi sağlamak için bazı dönüştürücüler kullanılmaktadır. Modbus açık haberleşme protokolü ile birbiriyle haberleşen cihazlar ile bu dönüştürücülerin bağlantısı yapılarak ana server ile haberleşilir. Bu noktada Modbus hakkında birkaç bilgi vermek gerekirse; Modbus, cihazlar ve sistemler arasında veri transferi ve bilgi alışverişi yapılmasını sağlayan açık bir seri haberleşme protokolüdür. Farklı yapılarıdaki cihazlar dahi Modbus protokolünü kullanarak bilgi transferi ve alışverişi yapabilmektedir. Kısaca master-slave prensibine göre çalışmaktadır. Bir merkez omurga ve buna bağlı tali cihazlar arasında aynı ağ üzerinden haberleşme işlemi prensibine dayalıdır. Seri haberleşmede RS-232 ve RS-485 standartlarını kullanmaktadır. Uzaktan takip sistemi ile bağlantısını kurarsak reaktif güç kontrol rölesi RS-485 ile bir dönüştürücüye bağlanır ve bu dönüştürücü vasıtasıyla modem veya GPRS üzerinden ana server haberleşmesi sağlar. Kullanıcılar da internet/intranet üzerinden bu servera ulaşarak takip işlemini gerçekleştirirler.



Şekil 3.5. Ethernet ile kompanzasyon uzaktan takip sistemi prensip şeması

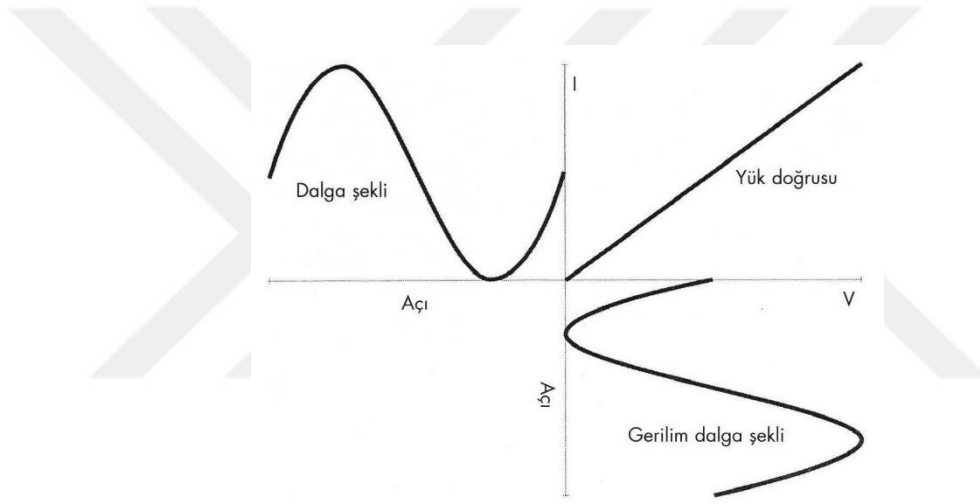


Şekil 3.6. GPRS ile kompanzasyon uzaktan takip sistemi prensip şeması

Kompanzasyon uzaktan takip sistemi akım, gerilim değerleri, aktif güç, reaktif güç, görünür güç ve endüktif ile kapasitif değerlerin oranlarının izlenmesini sağlayabilmektedir. Bunun yanı sıra kompanzasyon sistemindeki kademeleri istenildiği şekilde kullanıcı tarafından devreye alıp çıkarılabilir, enerji parametreleri raporlanabilir, uzun süreli olarak kayıt altına alınabilir, grafikleri çıkarılabilmektedir. Ek olarak takibün sağlıklı ve güvenliği açısından takip kaçırılrsa dahi ayarlanabilecek alarm durumlarında kullanıcıya haber vermek için e-mail ve SMS yoluyla haber verilebilmektedir. Ayrıca veri depolama güvenliği açısından sistemde internet bağlantısı kesilse dahi depolama devam eder ve sorun giderildiğinde verileri ana merkeze göndererek bilgi kaybının önüne geçilmiş olur.

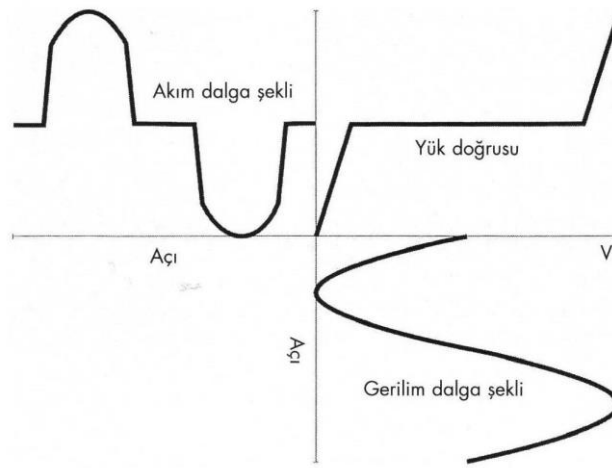
4. HARMONİKLER

Kullandığımız elektrik sistemlerinde gün geçtikçe farklı yükler devreye alınmakta ve hayatımıza girmektedir. Yarı iletken teknolojisinin ilerlemesiyle özellikle non-lineer (lineer olmayan) yükler daha da fazla kullanılmaya başlanmış ve harmonik kavramı ortaya çıkmıştır. Harmonikler ilk olarak demir yollarında alternatif akımın doğru akıma çevrilmesi sırasında ortaya çıkarılmış ve git gide sistemlerde oldukça sık görülmeye başlanmıştır. Elektrik sistemlerindeki yükler lineer yükler ve non-lineer yükler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Lineer yüklerin olduğu bir sisteme belirli bir frekans değerinde sinüsoidal bir gerilim tatbik edildiğinde devreden geçen akım ile gerilim arasında belirli bir oran olduğu görülmektedir. Bu oran doğrusaldır.



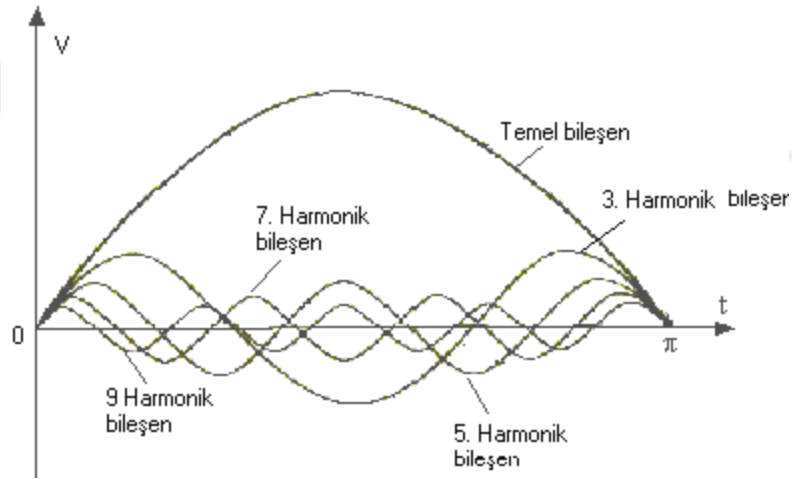
Şekil 4.1. Lineer yük durumunda akım ve gerilim dalga şekli

Non-lineer bir yüke sahip elektrik sistemine belirli bir frekans değerinde sinüsoidal bir gerilim uygulanması durumunda akım ve gerilim arasındaki oran bozulmaktadır. Çekilen akım sistemin temel frekans değerinin katlar olacak şekilde frekanslara sahip akım şekillerinden oluşmaktadır. Bu durumun açıklamasının yapılması için harmonik kavramı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.2. Non-Linear yük durumda akım ve gerilim dalga şekli

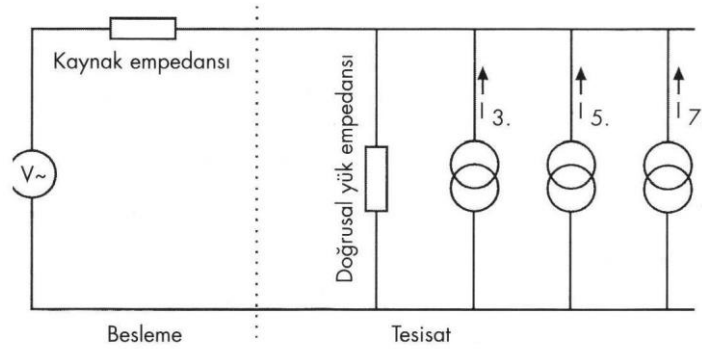
Bu durumda harmonik kavramı özetle temel sinüsoidal dalga dışındaki sinüsoidal dalgalara verilen isimdir.



Şekil 4.3. Yarım periyotluk dalgalarda harmonik bileşenler

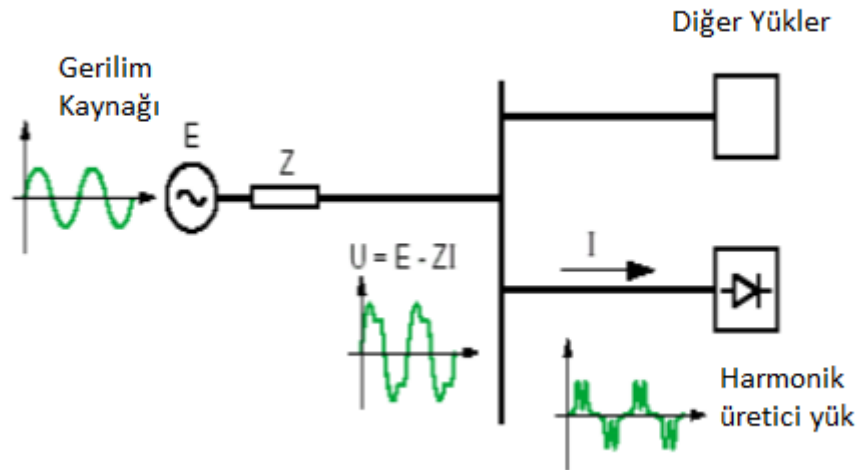
Harmonikler akım harmonikleri olarak sistemde ortaya çıkmaktadır ve sistemin alt kademelerine bu şekilde yansiyarak etki etmektedir. Bu sayede gerilim dalga şekli de bozulmakta ve gerilim harmonikleri ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.2’de görüldüğü üzere lineer olmayan bir yükün temel frekansta gerilime maruz kalması sonucu farklı derecelerde harmonikler oluşmuş ve toplamaları şeklinde grafiğe yansımıştır. Sistemde tek dereceli harmonikler bulunmaktadır. Pozitif ve negatif alternansta aynı genlik ve frekansa

sahip çift dereceli harmonikler birbirini sıfırlamakta ve bu nedenle elektrik sisteminde çift sayılı harmoniklere rastlanmamaktadır.



Şekil 4.4. Non-Linear yük eşdeğer devresi

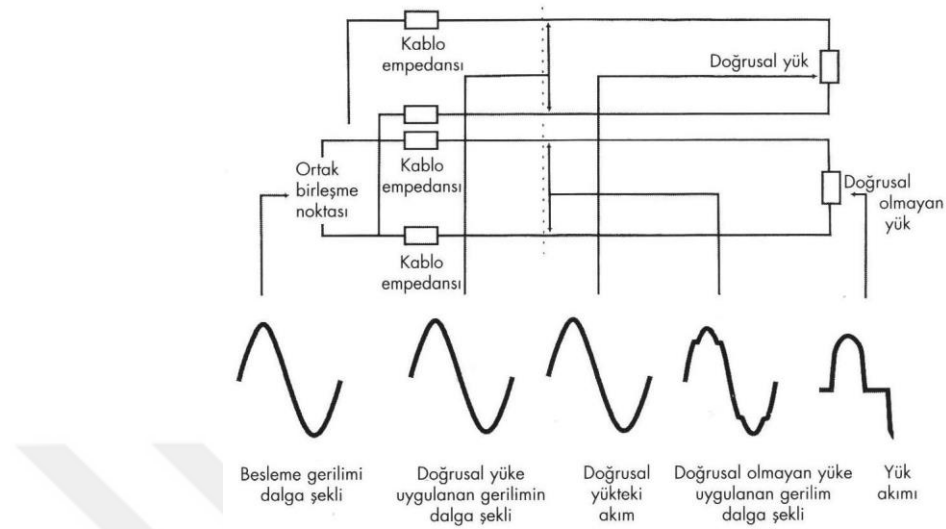
Sinüsoidal bir kaynağa bağlanmış non-lineer yükün farklı derecelerde harmonik akımlar çekeceğinden bu akımlar bir akım kaynağı olarak yüke paralel bağlanmış olarak gösterilebilir. Şekil 4.3’de görüleceği gibi bu akımlar modellenen elektriksel sistemin her tarafında kaynak empedansından kaynağa kadar dolaşacaktır. Bu iletkenler üzerinde dolaşan harmonik akımlardan dolayı harmonik gerilimler meydana gelecektir.



Şekil 4.5. Harmoniklerin elektrik sistemlerine etkisi

Şekil 4.4’ de görüldüğü gibi non-lineer yük olan sistemde oluşan harmonikler tüm elektrik sistemine etki ederek gerilim harmoniklerini oluşturarak diğer sistem elemanlarına da etki etmektedirler. Bu tarz sistemler için çözüm olarak doğrusal olan ve

doğrusal olmayan yükler ayrı ayrı devreler üzerinden beslenmelidir. Bu sayede non-lineer yükten dolayı oluşacak gerilim distorsiyonu lineer yükleri etkilemeyecektir.



Şekil 4.6. Lineer ve Non-Lineer yüklerin ayrı devrelerden beslenmesi durumu

4.1. Harmonik Oluşumunun Nedenleri

Elektrik sistemlerinde harmonikleri non-lineer yükler oluşturmaktadır. Harmonikler güç kalitesinden elektrik şebekesindeki cihazlara kadar tüm sistemi etkilemektedir. Harmoniklere neden olan kaynaklardan bazıları şunlardır :

- Doyma bölgesinde veya aşırı yükteki transformatörler
- Ark fırınları
- Alternatörler
- Gaz deşarjlı lambalar
- Fotovoltaik enerji sistem elemanı olarak kullanılan güç elektroniği ürünleri
- DC iletim sistemindeki yarıiletken elemanlar
- Televizyonlar, Bilgisayar
- Kesintisiz güç kaynakları (UPS)
- Elektrik kaynaklı ulaşım sistemleri
- Aküler
- Kaynak makinaları

- Hız kontrol sistemleri ve cihazları
- SVC kompanzasyon sistemi (Static Var Compensator)

4.2. Harmonik Bozunma Sınırları

Elektrik tesislerinde sistemlerin kontrolü ve güvenliği için harmonik bozunma sınırları tanımlanmıştır. IEEE 519 standardı bu sınırları tanımlamaktadır.

Çizelge 4.1. IEEE 519-2014 Gerilim harmonik distorsiyonu limit değerleri

Bara Gerilimi (Vn)	Temel Harmonik Büyüklüğü (%)	THB Vn (%)
$V_n < 69\text{kV}$	3	5
$69 < V_n < 161\text{kV}$	1,5	2,5
$V_n > 161\text{kV}$	1	1,5

Çizelge 4.2. IEEE 519 Akım harmonik distorsiyonu limit değerleri

Vn<69kV						
I_n/I_1	$n<11$	$11<n<17$	$17<n<23$	$23<n<35$	$n<35$	THB
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50-100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100-1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20
69<Vn<161kV						
<20	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20-50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50-100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
100-1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10
Vn>161kV						
<50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
>50	3	1,5	1,15	0,5	0,22	4

Harmoniklerin üretilmesinde non-linear yüklerin etkisine ek olarak sistemlerin veya devrelerin güç kaynaklarının da non-sinüsoidal olması durumunda yine harmonikler oluşacaktır. Bu durum yük lineer olsa dahi besleme geriliminin sinüs eğrisindeki bir bozunum yine çeşitli mertebelerde harmoniklerin oluşmasına neden olacaktır ve dolayısıyla besleme geriliminin sinüs eğrisindeki bir bozukluk akımın sinüs eğrisine de yansıtılacak ve akım harmonikleri ortaya çıkacaktır.

Harmoniklerin sınırlandırılmasında toplam harmonik distorsiyonu (THD) tanımlaması ortaya çıkmaktadır. Bu kavram gerilim harmonikleri ve akım harmonikleri için ayrı ayrı hesaplanır ancak temelde aynı tanımlamaya oturmaktadır. Toplam harmonik distorsiyon akım harmonikleri için de gerilim harmonikleri için de sinüsoidal eğrilerindeki toplam bozunmayı göstermektedir. Diğer bir ifadeyle akım ve gerilim sinüs eğrilerinin sinüsoidal yapıdan ne kadar uzaklaştığını ifade etmektedir.

$$THD_V = \frac{1}{U_1} (\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2)^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

$$THD_I = \frac{1}{I_1} (\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2)^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

Akım ve gerilim için toplam harmonik distorsiyon denklem (4.1) ve denklem (4.2)'deki bağıntılar ile bulunabilir.

4.3. Harmonikli Sistemlerde Devre Büyüklükleri

Bilindiği gibi harmonikler alternatif akım sistemlerinde görülmektedir. Harmonikler hakkında gerekli analizleri yapabilmek için devre analizi için kullandığımız bazı tanımlamalar ve hesaplamaların bilinmesi gerekir.

Harmonikli akım ve gerilimin ani değerleri şu şekilde ifade edilebilir:

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \times \sin(n\omega t + \gamma_n) \quad (4.3)$$

$$V(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_{mn} \times \sin(n\omega t + \delta_n) \quad (4.4)$$

n. mertebedeki harmonik için etkin değerler akım ve gerilim için şu şekilde hesaplanır:

$$I_n = \frac{I_{mn}}{\sqrt{2}} \quad (4.5)$$

$$V_n = \frac{V_{mn}}{\sqrt{2}} \quad (4.5)$$

Akım ve gerilim için etkin değerler ise sırasıyla;

$$I = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (4.6)$$

$$V = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} V_n^2} = \sqrt{V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2} \quad (4.7)$$

şeklinde hesaplanabilir (Shepherd ve Zand, 1979).

Bir sinüs dalgası bir periyotluk süre boyunca pozitif alternansta bir kez ve negatif alternansta bir kez olmak üzere maksimum değerine ulaşacaktır. Bu noktalarda akım ve gerilim maksimum değerleri I_m ve V_m olarak ifade edilecek olup kaçınıcı harmonik için maksimum değeri ifade ettiğinin anlaşılması için I_{mn} ve V_{mn} şeklinde gösterilecek olup, n. Harmonik için akım ve gerilimin tepe değeri gösterilecektir. Sinüs grafiğinin herhangi bir anındaki akım ve gerilim değerleri ise $i(t)$ ve $V(t)$ ile ifade edilmiştir. I_0 ve V_0 akım ve gerilim için doğru bileşenleri, n ise harmonik derecesini göstermektedir. γ_n n. dereceden harmonik akımı için faz açısını, δ_n ise n. decereden harmonikli gerilim için faz açısını belirtmektedir.

Akım ve gerilim değerleri bulunduktan sonra güç değerleri ise şu şekilde ifade edilebilir.

Sistemin aktif gücü şu şekilde bulunabilir:

$$P = V_0 \cdot I_0 + \sum_{n=1}^N V_n \cdot I_n \cos(\delta_n - \gamma_n) \quad (4.8)$$

Sistemin reaktif gücü şu şekilde bulunabilir:

$$Q = \sum_{n=1}^N V_n \cdot I_n \sin(\delta_n - \gamma_n) \quad (4.9)$$

Sistemin görünür gücü şu şekilde bulunabilir:

$$S = V \cdot I = \sqrt{\sum_{n=0}^N V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^N I_n^2} \quad (4.10)$$

Sistemin bozunum gücü ise:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (4.11)$$

İfadesiyle bulunabilir (Shepherd and Zand, 1979).

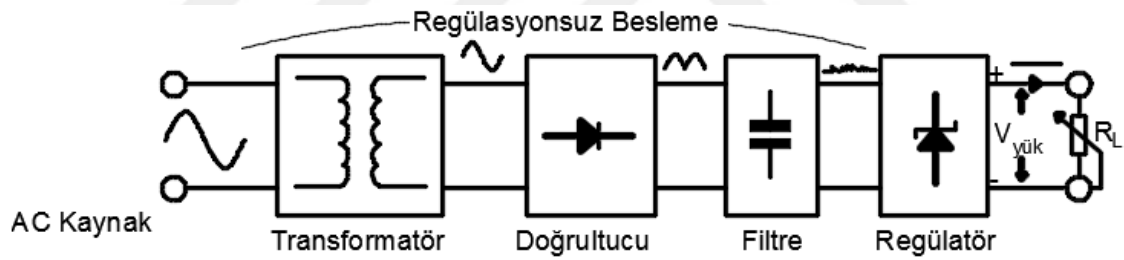
4.4. Harmonik Mertebeleri ve Elektrik Sistemlerinde Görülme Durumları

Harmonikler elektrik tesislerinde sürekli sorun çıkarmaktadır. Bu sorun tek çeşit harmonikten kaynaklı değildir. Tesiste birçok harmonik çeşidine rastlamak mümkündür. Bu harmoniklerin elektrik tesisi içerisinde büyüklükleri ve etki oranları da farklıdır. Bu

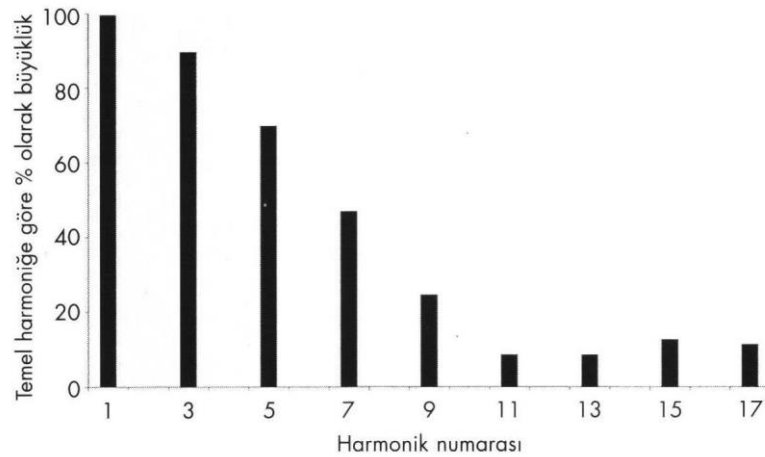
farklılığın yükün yapısı, transformatör bağlantı şekilleri, gerilim kaynağı gibi birçok farklı nedene bağlı olabilir.

Bölüm 4’ de harmonikler başlığı altında anlatıldığı gibi elektrik tesislerinde tek dereceli harmonikler bulunmaktadır. Pozitif ve negatif alternansta aynı genlik ve frekansa sahip çift dereceli harmonikler birbirini sıfırlamakta ve bu nedenle elektrik sisteminde çift sayılı harmoniklere rastlanmamaktadır. Genellikle 3, 5, 7, 11 ve devam eden tek dereceler şeklinde elektrik sistemlerinde harmoniklere rastlanmaktadır. Harmoniklerin analizi yapıldığında harmoniklerin mertebelerinin arttıkça etkilerinin de azaldığı görülmektedir.

Tek fazlı yüklerin baskın olduğu elektrik tesislerinde 3. Dereceden harmoniklerin baskın olduğu görülmektedir. Örnek vermek gerekirse günümüzde elektronik sistemlerin çoğunda anahtarlamalı güç kaynakları kullanılmaktadır. Bunlar bir regülatörle çıkışta DC gerilim vererek elektronik sistemlerde güç kaynağı olarak kullanılmaktadır. Elektrik sistemine bağlandığında sürekli olarak akım çekmemekle birlikte darbe şeklinde ve yüksek miktarda sistemden akım çekmektedir. Çekilen bu akım çoğunlukla 3. ve 5. dereceden harmonikler içermektedir.



Şekil 4.7. Örnek anahtarlamalı güç kaynağı işleyiş şeması



Şekil 4.8. Bir bilgisayarın enerji tüketimine ait tipik harmonik spektrum

Üç fazlı sistemlerde ise daha çok 5. ve 7. harmonikler görülmektedir. Bunun yanı sıra orta gerilim şebekelerinde de yine 5 ve 7. harmonikler baskın olup devamı şeklinde tek katsayılı harmoniklere sıklıkla rastlanmaktadır. 3. Harmonikler arasında faz farkı yoktur. Güç transformatörlerinde yıldız bağlı sekonder yük tarafından nötrden yansıyan 3. harmonikler primer bağlı orta gerilim tarafında sargılarda kapalı çevrime girerek absorbe edilir ve orta gerilim tarafına geçemezler. Bu nedenle orta gerilimde 3. harmoniklere rastlanmamaktadır.

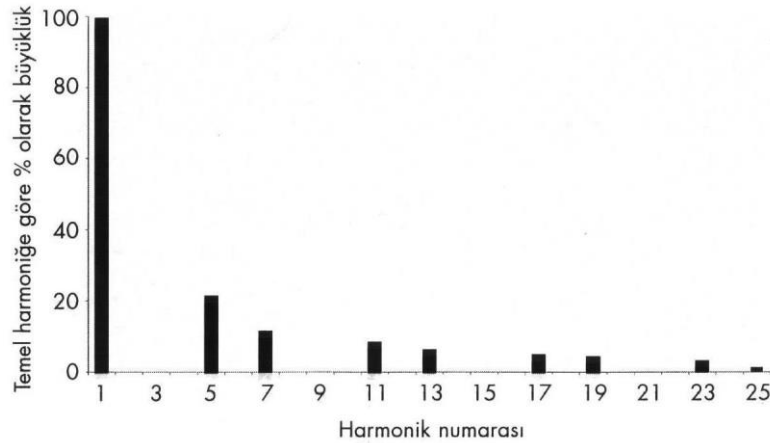
Elektronik sistemler günümüzde yarı iletken malzemelerle adeta kuşatılmış durumdadır. Harmonik dereceleri de cihazların pulse sayısına, diğer bir deyişle cihazın içerdiği diyot veya tristör gibi yarı iletken elemanların sayılarına bağlıdır. Günümüzde genellikle bu cihazlar 6 veya 12 pulse olarak üretilmektedir. Bu türden cihazların oluşturduğu harmonik seviyesi;

$$n = h \cdot q \pm 1 \quad (4.12)$$

Formülüyle hesaplanmaktadır. Burada h pulse sayısını, q ise sıra ile devam eden pozitif sayıları ifade etmektedir. Örneğin 6 pulse bir cihaz için ;

$$n = 6 \cdot 1 \pm 1 = 5 \text{ ve } 7$$

$n = 6 \cdot 2 \pm 1 = 11 \text{ ve } 13$ şeklinde devam ederek belirlenen bu mertebeleri harmonikleri daha baskın ortaya çıkardığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.9. 6 pulse bir darbeli köprünün harmonik spektrumu

Yarı iletken cihazın neden olduğu harmoniklerin temel harmonik üzerindeki yüzdesel etkisi;

$$\% = 100/n \quad (4.12)$$

formülüyle hesaplanmaktadır.

4.5. Harmoniklerin Elektrik Tesislerine Etkileri

Harmonikler elektrik tesislerinde hem gerilim hem de akıma etki ederek sistemin tamamında problemlere neden olmaktadır. Bu problemlerden bazıları şu şekilde sıralanabilir:

- Güç transformatörlerinde aşırı ısınma,
- İletkenler üzerinde gerilim düşümünün artması ve buna paralel olarak kayıpların hızla artması
- Mikrodenetleyici devrelerinde arızaların oluşması,
- Elektronik devrelerde hatalı çalışma,
- Kompanzasyon sistemlerinin aşırı yüklenerek arıza göstermesi,
- Güç faktörünü değiştirmesi ve bazı ölçü aletlerinin hatalı ölçüm yapmasına neden olması,
- Nötr iletkeninin aşırı ısınması
- Rezonansa neden olabilmeleri,
- Devre koruma ekipmanlarının hatalı çalışması,
- Sesli ve görüntülü cihazlarda parazitli çalışma görülmesi veya arıza oluşması,
- İletkenlerin izolasyonlarının delinmesi,
- Motorlarda aşırı ısınma ve sesli çalışma durumu
- Generatöre kadar etki etmesi durumunda tüm sistemin geriliminin distorsiyona uğraması,
- Yalıtım zorlanması ve aşırı ısınma sonucu tesiste kullanılan elemanların ömrünü azaltırlar.
- Harmoniklerin neden olduğu olumsuz durumların hemen hemen hepsi beraberinde maddi kayıpları da getirmektedir.

4.5.1. Harmoniklerin iletkenlere etkileri

Elektrik dağıtımını vücudumuzdaki damarların kanı taşınması misali taşıyan ve organların beslenmesi gibi cihazların beslenmesini sağlanması için kullandığımız iletkenler temel değerler dışında karşılaştığı harmoniklerden oldukça zarar görmektedirler. İletkenler çeşitli malzemeler kullanılarak üretilmektedir. Elektrik

tesislerinde kullandığımız iletkenler genellikle bakır ve alüminyum kullanılarak üretilirler. Her ne malzemeden üretilirse üretilsin iletkenler üzerinde akım taşırken buna karşı bir direnç gösterirler. Bu direnci mekaniksel sistemlerdeki sürtünme kuvvetine benzetebilir. İletkenlerin gösterdikleri bu direnç bazı parametrelere bağlı olarak değişmekte olup özellikle üretildikleri malzeme ve sıcaklık değerlerine göre farklılık gösterirler.

Çizelge 4.3. Kabloların üretiminde kullanılan iletkenlerin 20°C’de elektriksel özdirenç ve sıcaklık katsayısı değerleri

Malzeme	Özdirenç (ρ) 20°C’de (ohm.m)	Sıcaklık katsayısı (α_{20}) 20°C’de (1/°K)
a) İletkenler:		
Bakır	$1,7241 \times 10^{-8}$	$3,93 \times 10^{-3}$
Alüminyum	$2,8364 \times 10^{-8}$	$4,03 \times 10^{-3}$
b) Kılıflar ve Zırh:		
Kurşun veya kurşun alaşımı	$21,4 \times 10^{-8}$	$4,0 \times 10^{-3}$
Çelik	$13,8 \times 10^{-8}$	$4,5 \times 10^{-3}$
Bronz	$3,5 \times 10^{-8}$	$3,0 \times 10^{-3}$
Paslanmaz çelik		

Çizelge 4.3’den görebileceğimiz gibi iletkenlik öz direncin tersi olduğundan bakırın öz iletkenliği alüminyumdan %60 oranda daha fazladır. İç tesisatta çoğunlukla bakır iletkeni kullanılır. Bakır ile aynı seviyede iletkenlik sağlayabilmek için alüminyumun kesitini yaklaşık olarak 1,6 kat büyütmek gerekecektir. İç tesisatta montaj zorluğu yaşandığından tercih edilmemektedir. Diğer iletkenlerin ise maliyeti bakıra göre oldukça fazladır.

İletkenler doğru akımda ve alternatif akımda farklı direnç gösterirler. İletkenlerin DA direncini şu şekilde hesaplayabiliriz:

$$R_{20} = \frac{\rho_{20,l}}{S} \quad (4.13)$$

R_{20} : 20°C’ de iletkenin ait DA direnci, birimi ohm (Ω),

ρ_{20} : 20°C’ de iletkenin özdirenci, birimi ($\Omega.m$),

S : İletkenin kesit alanı (m^2)

Söylendiği gibi iletkenin direnç değerinin bağlı olduğu parametrelerden bir diğeri de sıcaklıktır. Sıcaklık değişimine göre iletken direncini şu şekilde bulunabilir:

$$\frac{R_{T2}}{R_{T1}} = \frac{T_0 + T_2}{T_0 + T_1} \quad (4.14)$$

T_0 : İletken cinsine göre belirlenen sabit değer (Bakır için 234,5 ve alüminyum için 228,1'dir),

R_{T1} : T_1 sıcaklığındaki iletken direnci,

R_{T2} : T_2 sıcaklığındaki iletken direncini ifade etmektedir.

Denklemden de görüldüğü üzere sıcaklık arttıkça direnç değeri de artış göstermektedir.

İletken için çalışabileceği maksimum sıcaklıktaki DA direnci şu formüller hesaplanabilir:

$$R_{DC} = R_0 [1 + \alpha_{20} (T_m - 20)] \quad (4.15)$$

α_{20} : Sıcaklık katsayısı (20°C için her kelvin başına sıcaklık katsayısı)

T_m : İletken için maksimum çalışma sıcaklığıdır. (Karaca G,2006)

Alternatif akımda ise iletken direnci için farklı kavramlar eklenmektedir.

Alternatif akım için iletken direnci şu şekilde hesaplanabilir:

$$R_{AC} = R_{DC} (1 + k_s + k_p) \quad (4.16)$$

R_{AC} : İletkenin maksimum çalışma sıcaklığı ve birim uzunluktaki AA direnci

k_s : Deri etkisini ifade eden katsayı

k_p : Yakınlık etkisini ifade eden katsayı

Denklem (4.16)'da görüldüğü üzere alternatif akımdaki iletken direnci doğru akım iletken direncinden daha fazladır. Alternatif akım sistemlerinde harmoniklerde bu direnç değerlerine etki etmektedir. Özellikle deri etkisini arttırarak kabloların direnç değerlerini arttırmakla birlikte daha fazla kayıp ve ısınmaya neden olmaktadır. Bu nedenle harmonikler kabloların akım taşıma kapasitelerine ve kablo ömrüne negatif yönde etki etmektedir.

4.5.1.1. Deri etkisi ve harmonikler ile değişimi

Alternatif akımda deri etkisi ve yaklaşım etkisinden dolayı iletken direncinin arttığı bilinmektedir. Doğru akım sistemlerinde akım iletkenin tüm kesit alanını kullanma eğiliminde olduğundan direnç değeri alternatif akımdaki durumuna göre azalmaktadır. Alternatif akımda kullanılan iletkenler içinse durum bu şekilde değildir. Akım iletkenin çeperine yakın olan dış yüzeyinden akma eğilimindedir. Bu da akımın aktığı iletken

kesitini düşürmekte ve direnç değerini arttırmaktadır. Bu olaya deri etkisi denmekte ve alternatif akımda direnç değeri hesaplanırken göz önüne alınması gerekmektedir.

Deri etkisi şu şekilde hesaplanır :

$$k_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8X_s^4} \quad (4.17)$$

$$X_s^2 = F_k \times k_s \quad (4.18)$$

$$F_k = \frac{8\omega f \cdot 10^{-7}}{R_{dc}} \quad (4.19)$$

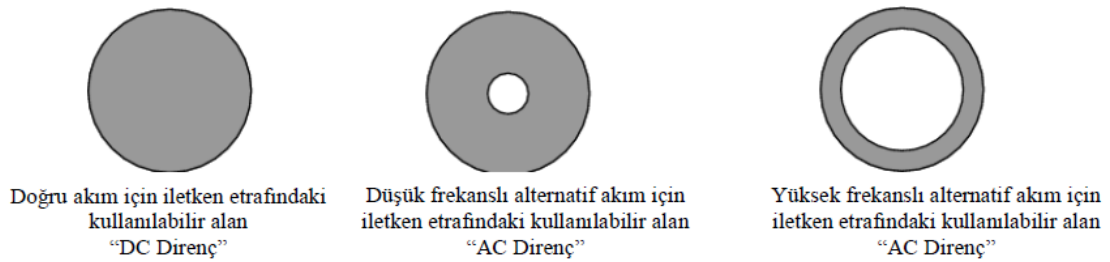
$$X_s^2 = \frac{8\omega f \cdot 10^{-7}}{R_{dc}} \times k_s \quad (4.20)$$

Denklemlerde verilen k_s ve k_p katsayıları iletkenin tipine göre değişen sırasıyla deri etkisi ve yakınlık etkisi katsayılarıdır ve Çizelge 4.4’de verilmiştir(Şahin, 2006).

Çizelge 4.4. Deri etkisi ve yakınlık etkisi katsayıları

İletken	k_s	k_p
Yuvarlak telli	1	0,8
Yuvarlak kompakt	1	0,8
Yuvarlak parçalı	0,435	0,37
Dilimli	1	0,8

Alternatif akım sistemlerinde harmonikler deri etkisini arttırıcı yönde etki eder. Akım iletken çeperine daha yakan seyretme eğiliminde olduğundan harmoniklerin frekansı temel frekans değerinin katları şeklinde devam etmesi deri etkisini de gitgide arttırmaktadır. Artan deri etkisi neticesinde direnç ve kayıplar artmaktadır. Bu nedenle iletkenler çok daha fazla ısınmakta olup buna ek olarak mekanik dayanımı da zorlanmaktadır. Bu durum iletkenin kullanım ömrüne ve elektrik tesisine olumsuz yönde etki etmektedir.



Şekil 4.10. Frekansın artması sonucu deri etkisi sebebiyle değişen iletken direnci

4.5.1.2. Yaklaşım etkisi ve hamonikler ile değişimi

İletkenlerin birbirine yakın olarak yerleştirilmesi sonucu bir iletkenin akan akım diğer iletkenin akan akımını etkileyecek ve uzak olan kısımdan akma isteğine girecektir. Bu duruma yaklaşım etkisi adı verilmektedir. Diğer bir deyişle akım taşıyan iletken etrafında manyetik alan oluşur. Oluşan manyetik alanda yakınındaki iletkenin akısını bozmaktadır. Bu duruma verilen ad yaklaşım etkisidir.

Bir iletkenin akımını çevreleyen akı, yakındaki bir iletkenin kımı tarafından bozulur ve sonuç olarak yüzey akım dağılımı bozulur(Karaca G, 2006).

$$k_p = \frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} \times \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \times 2,9 \quad (4.21)$$

$$X_p = \frac{8\pi f \cdot k_p 10^{-7}}{R_{dc}} \quad (4.22)$$

k_p değeri çizelge 4.2' de verilmiştir. Yukarıda verilen denklemler iki damarlı kablo veya yan yana iki adet tek damarlı kablo için verilmiştir.

Yaklaşım etkisi harmonik akımları oluşan sistemlerde manyetik alan üretimi daha fazla olacağından artış gösterecektir. Bu da direnç değerinin artması anlamına gelecektir. Neticede yine kayıpların artması, ısınma sorunu ve kullanım ömrünün olumsuz etkilenmesi durumu ortaya çıkacaktır.

4.5.1.3. Harmoniklerin nötr iletkenine etkileri

Tek fazlı yüklerin çoğunlukta olduğu elektrik tesislerinde genellikle 3. harmonikler baskın şekilde bulunurlar. 3. Harmoniklerin sinüs eğrisini bozmasından dolayı zaten neden olduğu sıkıntıların yanı sıra özellikle nötr iletkeni üzerinde de büyük sorunlar ortaya çıkarmaktadır. 3 ve üçün katları şeklinde seyreden harmonikler arasında faz farkı bulunmadığından sıfır noktasında birbirlerini sıfırlamamaktadırlar. Bu nedenle nötr noktasında üç katına kadar çıkan değerlere ulaşmaktadır. Bu durumda nötr topraklanmışsa oluşan bu harmonik akımlar toprağa akmaktadır. Eğer topraklanmamışsa nötr iletkenini oldukça zorlamakta ve fazlar arasında da dengesizlik oluşturmaktadır.

$$I_{h3R} = I_{h3R_{max}} \cdot \cos \omega t \quad (4.23)$$

$$I_{h3S} = I_{h3S_{max}} \cdot \cos \left(3\omega t + \frac{3x2\pi}{3} \right) \quad (4.24)$$

$$I_{h3T} = I_{h3T_{max}} \cdot \cos \left(3\omega t + \frac{3x4\pi}{3} \right) \quad (4.25)$$

Denklemlerden de görüldüğü üzere üç ve katları şeklinde seyreden harmonikler arasında faz farkı bulunmamaktadır. Bu durumda uygulama aşamasında ve elektrik projelendirme safhasında genellikle nötr iletkeni 16 mm² bakır iletken uygulamalarına kadar faz kesiti ile aynı seçilip 16 mm² ve sonrası kesitlerde faz iletkeninin en az yarısı olacak şekilde seçilmektedirler. Bu seçim yapılırken harmonikler göz ardı edilerek nötrde aşırı yüklemelere ve ısınmalara neden olmaktadır. Bu durum özellikle labratuvar gibi hassas cihazların bulunduğu sistemlerin yanı sıra tüm elektrik tesisleri için büyük sorun teşkil etmektedir.

Nötr iletkeni için kesit tayin edilmesi konusunda göz önüne alması gereken durumlar TS HD 60364-5-52 standardında verilmiştir. İlgili standarda göre üçüncü harmonik bileşeninin akımı faz akımının %15'inden daha büyük olduğu durumlarda nötr iletken kesiti faz iletkeninin kesitinden küçük olmaması söylenmektedir. Ek olarak üçüncü harmonik bileşeni faz akımının %33'ünden büyük olduğu durumlarda ise nötrden geçecek akım baz alınarak iletken seçimi yapılması gerekmektedir.

4.5.1.4. Harmoniklerin iletkenlerde akım taşıma kapasitesine etkisi

Bir kablo için akım taşıma kapasitesi, kablonun yalıtımı bozulmadan taşıyabileceği maksimum akım değeri olarak tanımlanabilir. Bu değer kablonun ısınmasının yanı sıra çevreye yaydığı ısı, döşendiği veya montajlandığı ortamın ısı iletkenliği, malzeme cinsi, iletken kesiti, siper ve zırh kalınlıkları ve diğer çevresel etkenler olmak üzere birçok değişkene bağlıdır.

İletken kesitlerine göre verilen akım taşıma kapasiteleri normal koşullarda iletkenin taşıyacağı maksimum akım değerine göre verilerek seçimler yapılmaktadır. Ancak bu durumda elektrik tesisinde oluşacak harmonikler gözardı edilmemelidir. Sistemin yapısına göre oluşacak temel frekanstan çok yüksek değerlerde frekansa sahip harmonikler alternatif akım deri etkisi arttıracakı söylenmişti. Bu durumda iletkendeki direnç değeri ve kayıplar da artacaktır. Buna paralel olarak kablo normalden daha fazla ısınmaya maruz kalacak ve normal koşullarda verilen çalışma durumu dışında bir olaya maruz kaldığından hem sistemler hem de kablo ömrü bu problemten ciddi şekilde etkilecektir. Bu durumu kanıtlamak için sonraki bölümde bir deneysel çalışma yapılmış ve sonuçlar verilmiştir.

4.5.1.5. Harmoniklerin iletim hatları üzerindeki etkisi

İletim hatları da endüktif karakterlidir. Harmonikler iletim hatlarında da empedans değerinin artmasına neden olarak kayıpları arttırır.

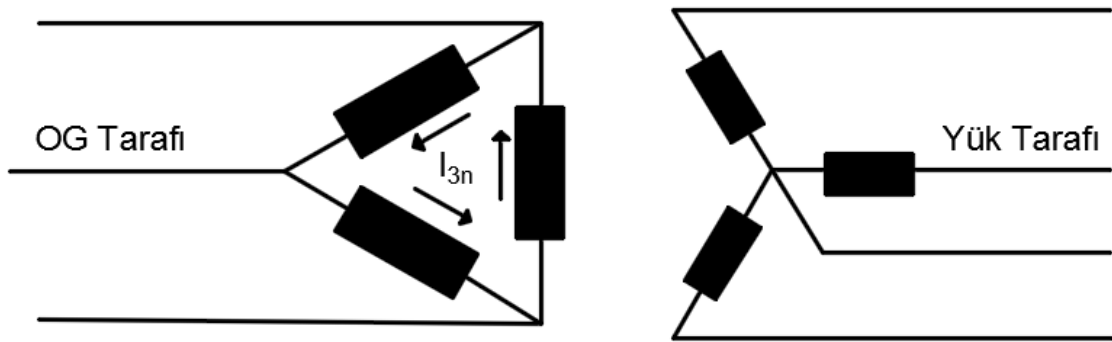
$$Z_n = R_n + jX_n \quad (4.26)$$

İletim hatlarındaki empedans değeri denklem 4.26'da gösterildiği şekliyle bulunur. Gerilim düşümü ise;

$$V_n = I_n(R_n + jX_n) \quad (4.27)$$

formülüyle hesaplanır. Ek olarak iletim hatlarında harmoniklerin gerilim değerlerine de etki etmesi sonucu yüksek frekanslar nedeniyle dielektrik zorlanmayı da arttıracığından iletkenlere zarar verecektir. Ayrıca kesicilerin hatalı açmalarına da neden olma ihtimali vardır.

3. Harmonikler elektrik sisteminde yük tarafında çoğunlukla bulunurlar. Ancak dağıtım sisteminde transformatörün primer yani orta gerilim tarafında primerin üçgen sargılarında absorbe edilir ve iletim hatlarına geçemez. Bu nedenle üç ve katları şeklindeki harmoniklere orta gerilim sisteminde rastlanmaz. Genellikle 5 ve 7. Harmonikler bu sistemlerde daha baskındır.



Şekil 4.11. Üçüncü harmoniklerin transformatör primer sargılarında yok edilmesi

4.5.2. Harmoniklerin kondansatörlere etkileri

Kondansatörlerde kapasitif reaktans değeri harmonikler olan bir sistemde azalma gösterecektir. Buna göre harmonikli sistemde kapasitif reaktans değeri şu şekilde belirlenir:

$$X_{cn} = \frac{X_{c1}}{n} \quad (4.28)$$

Denklemden n değeri harmonik mertebesini, X_{cn} ise n . mertebedeki harmonik için kapasitif reaktans değerini ve X_{c1} ise temel frekansta kondansatörün kapasitif reaktans değerini göstermektedir. Denklem (4.28)' den anlaşılacağı üzere kapasitif reaktans değeri azalan kondansatörde akım artışı meydana gelecektir. Bu durum neticesinde reaktif güç de artış gösterecektir.

$$I_c = \sqrt{I_{c1}^2 + I_{c3}^2 + I_{c5}^2 + I_{c7}^2 + I_{c9}^2} \quad (4.29)$$

Elektrik tesisinde 3, 5, 7 ve 9. harmoniklerin olduğu varsayılırsa akımın etkin değeri denklem (4.29) daki gibi hesaplanır. Bu durumda kondansatörün gücü ise ;

$$Q_n = n \cdot \omega_1 \cdot C \cdot V_n^2 \quad (4.30)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada ifade edilen büyüklüklerde Q_n n . harmonik derecesindeki kondansatör gücünü, ω_1 ise temel harmonik açısal frekansını, V_n ise n . harmonik için gerilim değerini simgelemektedir. Bu durumda ;

$$Q_c = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n = \omega_1 \cdot C \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot V_n^2 \quad (4.31)$$

bağıntısı ile kondansatör gücü bulunur.

Harmonikli sistemde kondansatör üzerinden geçen akım ve kondansatör gücü artacağından bu durum kondansatörün aşırı ısınmasına neden olabilir. Neticede hasar ortaya çıkabilir.

Harmoniklerin olduğu bir sistemde rezonans durumu olma ihtimali olduğundan harmonik salınımlar neticesinde oluşabilecek aşırı akım ve gerilimler, aşırı ısınma ve gerilim zorlanmasını arttırarak kullanım ömürlerini kısaltmaktadır (Freund, 1988).

4.5.3. Harmoniklerin güç faktörüne etkileri

Alternatif akım elektrik şebeke sistemlerinde temel frekans değerinde akım ve gerilim arasında bir faz farkı vardır. φ ile ifade edebileceğimiz bu açının cosinüs değerine sistemin güç katsayısı denmektedir. Bir başka ifade ile aktif gücün görünür güce oranına güç faktörü denmektedir.

$$P = V \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (4.32)$$

$$S = V \cdot I \quad (4.33)$$

$$P/S = \cos\varphi \quad (4.34)$$

Güç faktörünün değeri elektrik sistemindeki omik, endüktif ve kapasitif dirençlere göre değişmektedir. Endüstriyel tesislerde ödenecek reaktif enerji bedeli de bu güç faktörüne göre belirlenmektedir. Sistemde oluşan harmonikler güç faktörüne etki ederek

yanılmalara neden olabilir ve böylece nedenini anlayamadan maddi kayıplar ortaya çıkabilmektedir. Günümüzde kullanılan elektronik sayaçlar güç faktörünü temel frekanstaki akım ve gerilim değerlerine göre değilde harmonikli sistemdeki duruma göre hesaplamakta ve normalde dijital sayaç kullanmayan ve bu durumdayken reaktif bedel ödemeyen tesisler dijital sayaca geçilmesi sonucu cezaya maruz kalabilmektedir.

$$PF_{temel} = \frac{V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi}{V_1 \cdot I_1} \quad (4.35)$$

Temel şebeke frekansındaki güç faktörü (PF) denklem (4.35) deki gibi hesaplanabilmektedir. Ancak harmonikli durumdaki güç faktörü ise;

$$PF_{gerçek} = \frac{P_1}{V_1 \cdot I_1} \frac{1}{\sqrt{1+(THD_I)^2}} \frac{1}{\sqrt{1+(THD_V)^2}} \quad (4.36)$$

Şeklinde hesaplanır. Toplam gerilim bozunumu genellikle %10 dan düşük olacağı için $V \cong V_1$ olarak alınabilir. Bu durumda denklem 4.35 ise;

$$PF_{gerçek} = \frac{P}{V_1 \cdot I_1} \frac{1}{\sqrt{1+(THD_I)^2}} \quad (4.37)$$

$$PF_{gerçek} = \frac{V_1 \cdot I_1 \cos \varphi}{V_1 \cdot I_1} \frac{1}{\sqrt{1+(THD_I)^2}} \quad (4.38)$$

$$PF_{gerçek} = \cos \varphi \frac{1}{\sqrt{1+(THD_I)^2}} \quad (4.39)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bir diğer ifadeyle ;

$$PF_{gerçek} = \mu \cos \varphi \quad (4.40)$$

olarak yazılabilir. Burada μ değeri 1'den küçük olacağından gerçek güç faktörü değeri temel güç faktörü değerinden küçük olacaktır.

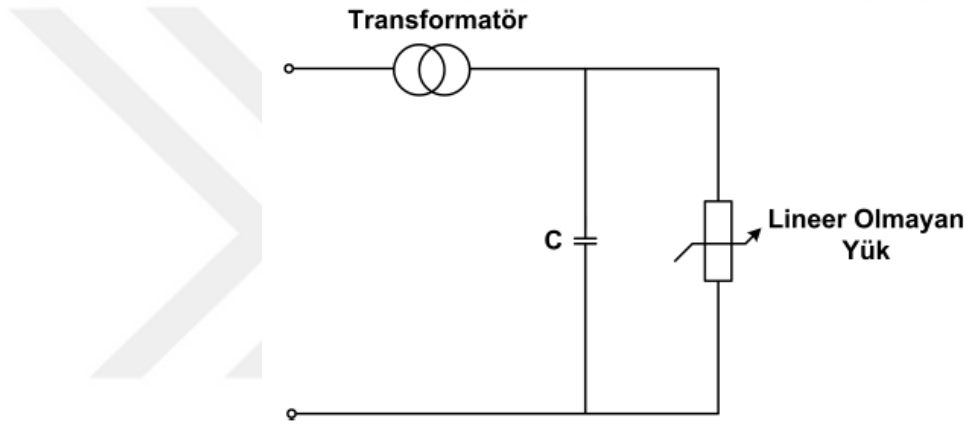
4.5.4. Rezonans olayı

Periyodik bir kuvvetin etkisi altındaki bir sistem, salınımlar sergiler ve eğer etki frekansı sistemin doğal frekansına eşit ise, bu salınımların genliği sınırsız artma eğilimine girer. Sonuç olarak sistem, belli bir genlikten sonra bütünlüğünü veya bulunduğu durumu koruyamayarak ya dağılır ya da bozulur. Buna rezonans denir (Akbal, 2011).

Rezonans durumunun harmonik frekanslarından birinde oluşması sisteme zaten problem olan harmonikleri daha da sakıncalı duruma getirmektedir. Yukarıdaki rezonans tanımı ile bağdaştırılırsa herhangi bir harmonik frekansında rezonans olayı olması durumunda zaten temel dalga yapısını bozan harmonik daha da güçlenerek dalga yapısını

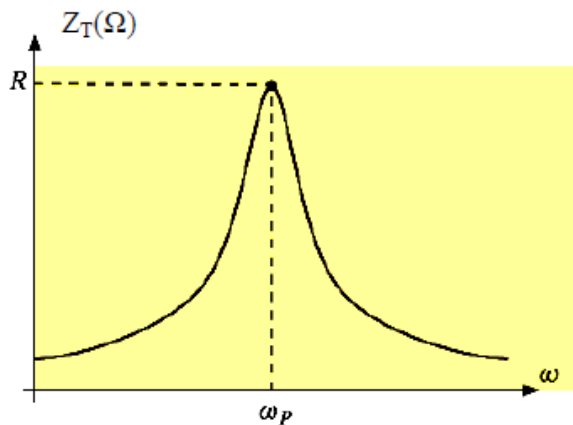
çok daha fazla bozabilir ve rezonans türüne göre alırı gerilim ve akımın ortaya çıkmasına neden olabilmektedir.

Elektrik sistemlerinde rezonans durumu endüktif reaktans ve kapasitif reaktansın birbirine eşit olduğu durumda oluşmaktadır. Sistemlerde seri rezonans ve paralel rezonans olmak üzere iki şekilde karşımıza çıkmaktadır. Elektrik sistemlerinde güç kaysayısını düzeltmek amacıyla kullanılan kompanzasyon sistemlerindeki kondansatörler ile trafo empedansı arasında paralel rezonans meydana gelebilmektedir. Bu durum kondansatör uçlarında aşırı gerilimlere neden olmakta ve kondansatörleri patlatmakta veya kullanım ömrünü azaltmaktadır. Seri rezonans ise trafo ve tüketici arasında meydana gelebilmektedir.



Şekil 4.12. Paralel rezonans örnek devre şeması

Elektrik sistemlerinde paralel rezonans olması durumunda rezonansında olduğu frekansta toplam empedans artacaktır. Bu nedenle sistemde küçük akımlarda bile yüksek gerilimler oluşması mümkün hale gelecektir. Paralel rezonans frekansında sistemin direnç büyüklüğünü gösteren eğri Şekil 4.12' de gösterilmiştir.



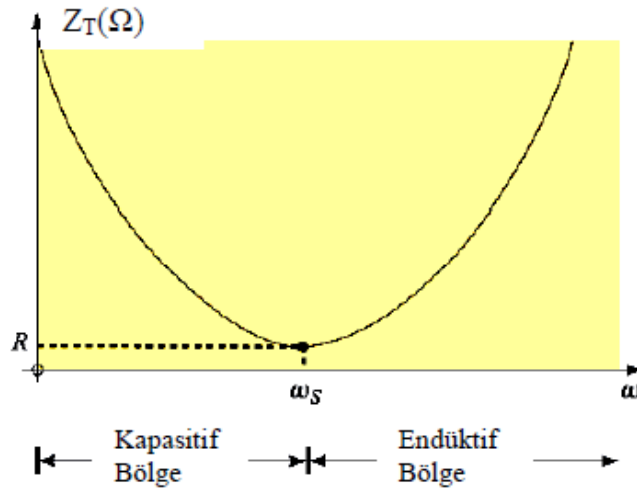
Şekil 4.13. Paralel rezonans frekansında sistemin empedans büyüklüğü

Paralel rezonans durumundaki rezonans frekansı elektrik sisteminin tamamıyla endüktif yapıda olduğu kabul edilerek;

$$f_p = f_1 \sqrt{\frac{S_k}{S_c}} \quad (4.41)$$

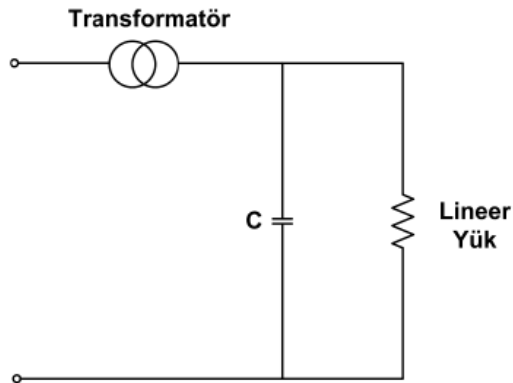
formülüyle hesaplanabilir. Bu denklemde f_1 temel şebeke frekansını, f_p paralel rezonans frekansını, S_k kaynağın kısa devre gücünü ve S_c ise kondansatör gücünü temsil etmektedir.

Elektrik sisteminde seri rezonansın oluşması durumunda ise endüktif reaktans ve kapasitif reaktans değerleri birbirine eşit olur ve sistemin empedans değeri ise sistemin omik direncine eşit olur. Bu durumda sistemdeki seri rezonans frekansında sistemdeki toplam empedans değeri Şekil 4.13’de görüldüğü üzere azalacaktır.



Şekil 4.14. Seri rezonans frekansında sistemin empedans büyüklüğü

Seri rezonans durumunda toplam empedansın azalması neticesinde sistemde aşırı akımlar meydana gelecektir.



Şekil 4.15. Seri rezonans örnek devre şeması

Seri rezonans frekansı ise şu şekilde ifade edilebilir:

$$f_s = f_1 \sqrt{\frac{S_t}{S_c Z_t} - \frac{S_L^2}{S_c^2}} \quad (4.42)$$

Denklem 4.42’de f_s seri rezonans frekansını, f_1 temel şebeke frekansını, S_c kondansatör gücünü, S_L omik yükü, Z_t transformatörün per-ünit empedans değerini ve S_t ise transformatör gücünü temsil etmektedir.

Elektrik sisteminde hangi rezonansın olduğunu tespit etmek için ana baradaki harmonik gerilimi ile birlikte tüketici yükünde ve her bir beslemedeki harmonik akımlarının ölçülmesi gerekmektedir. Genel olarak, harmonik geriliminin değeri yüksek iken baradan güç sistemine akan akımın değeri gücün ise, sistemde rezonans olduğu anlaşılmaktadır. Bir diğer taraftan yüketici yüküne yüksek değerli bir harmonik akımı akıyor ve bu durum barada harmonikli gerilim oluşturuyorsa sistem endüktansı ve yük kapasitörü arasında bir rezonansın var olduğu anlaşılmaktadır (Özer F. Gülşen, 2011).

Elektrik sistemlerinde hangi harmonik mertebesinde rezonans olacağı ise;

$$n = f_1 \sqrt{\frac{S_k}{u_k \cdot Q_T}} \quad (4.43)$$

formülü ile hesaplanabilir. Burada n ; rezonansın oluşacağı harmonik bileşeni, f_1 ; temel şebeke frekansı, u_k ; transformatörün bağıl kısa devre değeri, Q_T ; tesis edilen toplam kondansatör gücüdür (transformatör demir kayıpları için sabit kondansatör grupları da dahil).

4.6. Harmoniklerin Matematiksel Analizi

Harmonikler periyodik olarak farklı frekans ve genliklerdeki sinüs dalgaları şeklinde elektrik sistemlerinde bulunmaktadır. Bu durum tam olarak fourier serisi tanımlamasına uymaktadır. J. Fourier farklı periyodik olan ve sinüsoidal olmayan bir dalga biçiminin farklı genlik ve faz açılara sahip sinüs dalgalarının toplamı şeklinde yazılabildiğini kanıtlamıştır. Bu şekliyle tüm periyodik fonksiyonlar fourier serisi olarak yazılabilir ve ilk terimi sabit, diğer terimleri ise bir değişkenin sinüs ve cosinüsle çarpımlarından oluşur.

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(2\pi f_1 t + \phi_1) + A_2 \sin(2\pi f_2 t + \phi_2) + \dots + A_n \sin(2\pi f_n t + \phi_n) \quad (4.44)$$

Denklem 4.44’ de fourier serisi açılımı gösterilmiştir. Bu fonksiyonda A ile sembollendirilen değerler sabit sayılar olup A_0 değeri ortalama değeri sembolize

etmektedir. 1 indisine ait semboler ise temel harmonik seviyesine ait değerleri ifade etmektedir. A_1 değeri temel harmonik seviyesindeki sinüs dalgasının genliğini ifade etmektedir. $A_2, A_3, \dots A_n$ değerleri 2, 3, ... n. Dereceden harmoniklerin genliklerini ifade etmektedir. Genelleme yaparsak 2,3,...n indislerine sahip olan değişkenler bu mertebedeki harmoniklere ait ifadeler olduğunu belirtmektedir. f ise indisine göre harmoniğin frekansını ω ise indisine göre faz açısını ifade etmektedir.

Ayrıca şu kuralı belirtmekte fourier serilerine açılım konusunda önemlidir. Bir periyodik dalga şeklinin fourier serisi olarak açılabilmesi için Dirichlet şartlarını sağlaması gerekmektedir. Bu şartlara göre;

1. Periyodik dalga fonksiyonunun sonlu sayıda süreksizlik noktasının bulunması gerekmektedir.
2. Fonksiyonun ortalama değerinin bulunması gerekmektedir.
3. Fonsiyon için sonlu sayıda negatif ve pozitif tepe değerlerinin bulunması gerekmektedir.

Fourier serisi katsayıları Çizelge 4.5’den faydalanılarak bulunabilir.

Çizelge 4.5. Fourier serisi katsayıları

Fonksiyonun özelliği	Matematiksel ifadesi	Fourier katsayıları
Çift fonksiyon	$f(-t) = f(t)$	$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(n\omega t) d\omega t$ $A_n = 0$
Tek fonksiyon	$f(-t) = -f(t)$	$B_n = 0$ $A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(n\omega t) d\omega t$
Yarım dalga Simetrisi	$f(t) = -f(t+T/2)$	$A_n = B_n = 0$ (n'nin çift değerlerinde.) $B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos n\omega t d(\omega t)$ (n'nin çift değ.) $B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin n\omega t d(\omega t)$ (n'nin tek değ..)

4.7. Harmonikleri Giderme Yöntemleri

Harmoniklerin elektrik tesislerine ve birçok elemana olumsuz etkileri açıktır. Bunun önlenmesi için harmonikler analiz edilerek bazı müdahaleler ile harmonikleri önleme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu bölümde bu yöntemlerden bazıları anlatılacaktır.

Harmonikleri gidermek için tasarım aşamasında bazı önlemler alınmaktadır.

Elektrik üretimi aşamasında senkron generatörlerde hava aralığındaki manyetik alanın şekli sistemde indüklenen elektromotor kuvvetinin şeklini belirlemektedir. Manyetik alanın şekli sinüsoidal şekilseyse elektromotor kuvveti de sinüsoidal olacaktır. Bu durumu sağlamak için önlem olarak yuvarlak rotorlu senkron makinalarda kutup oluklarının 2/3'ü sarılır ve ya sarım adımları birbirinden farklı sarım şekli uygulanır. Bu sayede sinüsoidal olmayan manyetik alan sinüsoidal dalga şekline yaklaştırılmaya çalışılır.

Elektrik güç sisteminde harmonikleri önlemek için transformatörlerde de bazı önlemler alınabilmektedir. Transformatörde manyetik endüksiyon değerinin yüksek olması durumunda transformatörün demir çekirdeğinden yüksek derecede verim sağlanır fakat bu durum 3. ve 7. harmoniklerin artmasına neden olmaktadır. Çok düşük olması ise demir çekirdekten sağlanan fayda çok azalmaktadır. Bu nedenle belli seviyede tutulması gerekmektedir. Bunun için manyetik endüksiyon 1,3 T (13000 G) değerinin altında tutulmalıdır. Yine güç transformatörlerinde primer sargıları üçgen bağlanarak orta gerilim şebekesine üçüncü harmoniklerin geçişi engellenebilir. Ayrıca tersiyer sargılarda yine üçgen bağlanırsa üçüncü harmonikler buradan da geçemeyerek etkileri yok edilir.

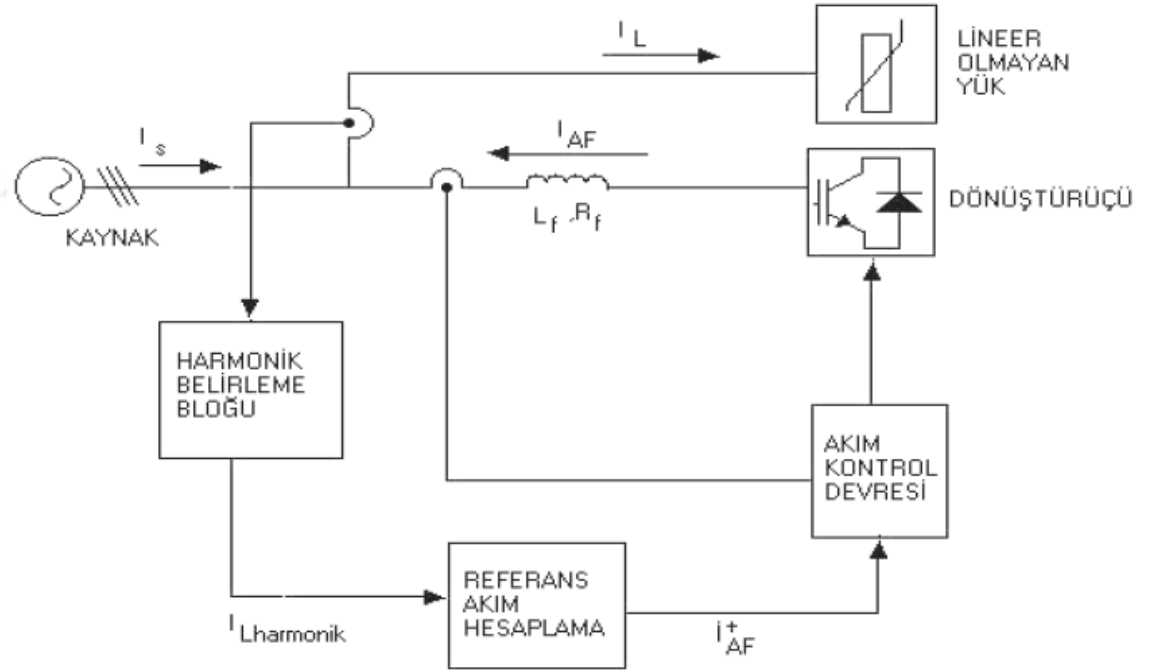
Harmonik etkilerini azaltmak için alınabilecek bir diğer tedbir ise dönüştürücülerde kullanılabilir. Daha önce söylendiği gibi dönüştürücülerde harmonik mertebesi $n = p.k \pm 1$ formülüyle hesaplanmaktadır. Burada harmonik mertebesini n değişkeniyle gösterilir ve k değeri 1'den başlayıp aritmetik olarak artarak devam eden sabit sayılardır. p değeri ise doğrultuculardaki darbe sayısıdır. Bu durumda p değerini arttırarak alçak mertebedeki harmonikleri gidermek mümkün olabilmektedir. Denklemden de görüleceği gibi temel harmonik dışında n değeri 5,7,11 ... şeklinde tek sayılar olarak oluşmaktadır. Bu durumda $I_5=I_1/5$, $I_7=I_1/7$ veya $I_{11}=I_1/11$ şeklinde harmonikli bileşenlerin akımlarının genlikleri azalarak devam etmektedir. Bu durumda eğer darbe sayısı arttırılırsa akım genlikleri yüksek mertebeli harmoniklerden daha büyük olan küçük dereceleri harmonikler giderilmiş olacaktır.

Tasarımdan sonra devreye bağlanan bazı elemanlarla da harmonikler giderilmeye çalışılmaktadır. Bunlar harmonik filtrelerdir. Bu filtreler aktif filtreler ve pasif filtreler olmak üzere ikiye ayrılmatadırlar.

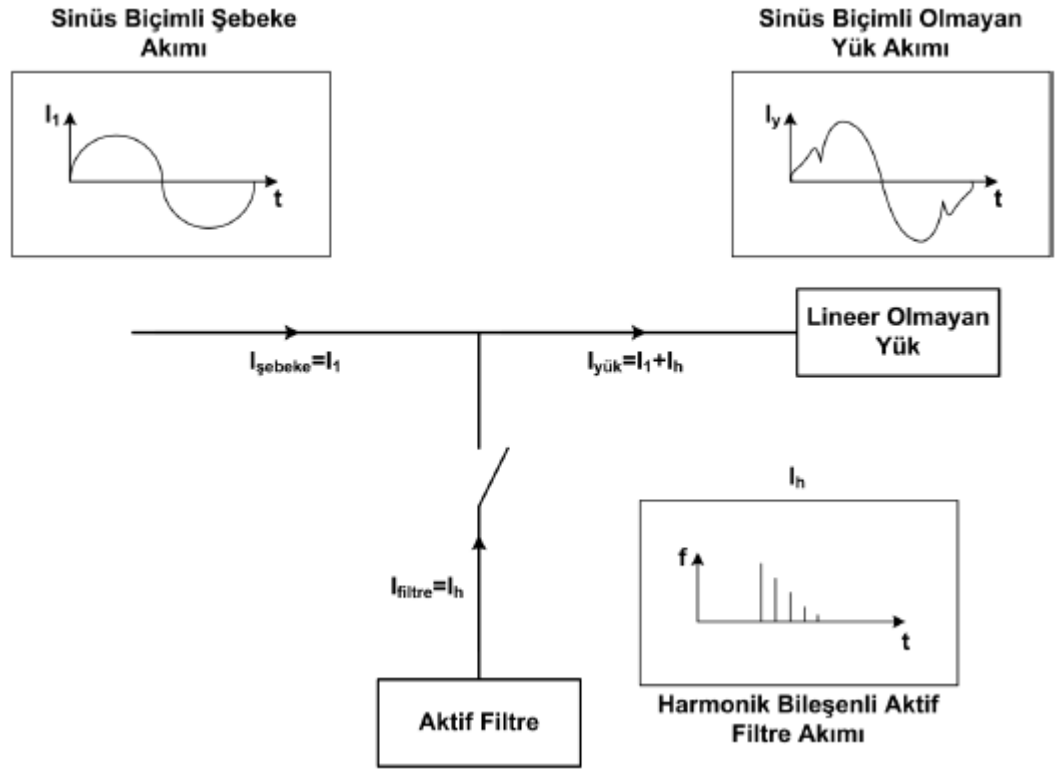
4.7.1. Aktif filtre

Elektrik tesislerindeki harmoniklerin sistemden silinmesi için kullanılan filtrelerdir. Aktif filtreler elektrik sistemlerinde temizlenecek harmonikler için bu harmoniklerle aynı genlikte fakat ters faz açısında bir akım uygulanarak sistemdeki harmoniğin giderilmesi prensibine dayanarak çalışırlar.

Aktif filtreler pasif filtrelere göre çok daha pahalıdır. Bu nedenle pek tercih edilmezler. Pasif filtrelere göre kaynağın empedansına bağımlılıkları daha azdır ve değişen yük durumlarına ayak uydurma konusunda kullanışlılardır. Yük değişimi durumunda yapılması gereken aktif filtre kontrolörünü yeniden programlamaktır.



Şekil 4.16. Aktif filtre örnek blok şeması



Şekil 4.17. Aktif filtre kullanılarak harmoniklerin giderilmesi

4.7.2. Pasif filtre

Pasif filtreler kaynak ile nonlinear yük arasında bağlanarak temel harmonik dışındaki harmonikleri yok etmek için kullanılan bir filtreleme yöntemidir. Endüktans, kapasitans ve ömik direnç gibi elemanlardan oluşmaktadır. Temel prensip olarak rezonans oluşturarak harmonik akımının elektrik sistemlerine zararlarını önleme ilkesine göre çalışmaktadır. Diğer bir deyişle pasif filtreler belirlenen harmonik derecesindeki frekans değerinde endüktans ve kapasitans değerlerinin rezonans oluşturmasını sağlamaktadır. Sistemde öncelikle en baskın harmonik ve rezonans frekansı belirlenir ve buna göre filtre tasarımı yapılır.

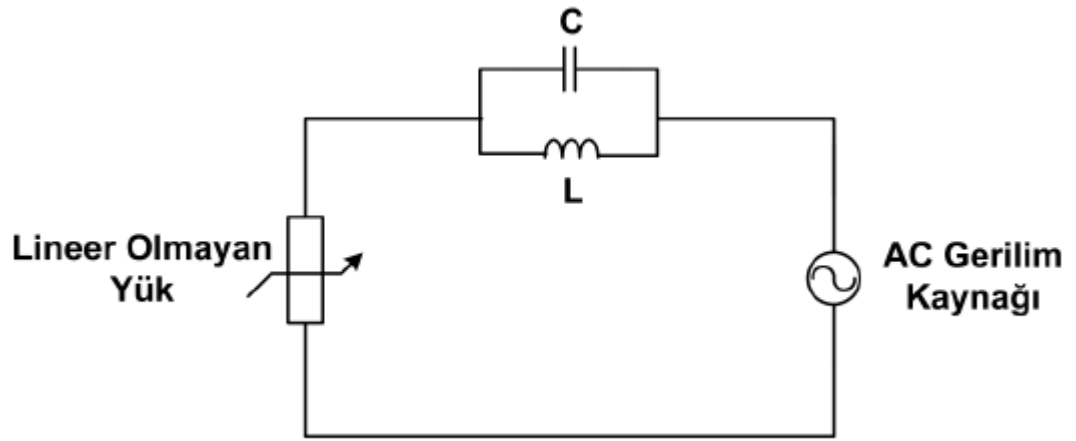
Pasif filtreler her bir harmonik mertebesinde rezonans durumu sağlanabilmesi için ayrı bir tasarım yapılarak kullanılırlar. Bu da pasif filtrelerin değişen yük durumlarına cevap verememesine neden olmaktadır. Yani, eğer bir elektrik tesisinde 5. Harmonikler baskın olduğu durumda filtreler bu harmonik derecesine göre tasarlanmışken yük durumunda herhangi bir değişiklik olması halinde 7. Harmoniklerin baskın hale gelirse bu durumda yeni bir filtre tasarımı ihtiyacı doğacaktır. Bu olay pasif filtre kullanımları

için olumsuz bir durumdur. Ancak pasif filtreler kullanım kolaylığı ve maliyetlerin aktif filtrelerle göre çok daha düşük olması nedeniyle tercih edilmektedirler.

Pasif filtrelerin elektrik tesislerinde bağlantı şekillerine göre seri ve paralel olmak üzere iki şekilde kullanılmaktadırlar.

4.7.2.1. Seri pasif filtre

Bu filtreler kaynak ile lineer olmayan yük arasına seri bağlanarak tasarlanmaktadır. Sistemde belirlenen harmonik derecesindeki akımlar için yüksek empedans oluşturarak bu harmonikleri bloke ederler. Temel harmonik için ise düşük empedans göstermektedir.



Şekil 4.18. Seri pasif filtre devre şeması

Seri pasif filtreler üzerinden akım geçmesi nedeniyle gerilim düşümüne neden olurlar. Bu sakıncalı duruma rağmen bu filtre çeşidinin rezonans problemi yoktur. Genellikle tek fazlı sistemlerde 3. Harmonik baskın olduğundan bu tesislerde harmonik filtresi olarak kullanılırlar.

4.7.2.2. Paralel pasif filtre

Paralel pasif filtreler lineer olmayan yüklere yani harmonik kaynaklarına paralel bağlanarak sisteme entegre edilirler. Sistemde baskın olan harmonik belirlenerek bu harmonik frekansına göre tasarımı yapılır. Baskın harmonik frekansında çok düşük

4.7.2.3. Pasif filtre tasarımı ve dikkat edilmesi gerekenler

Elektrik tesislerinde kompanzasyon sistemleri kurulurken buna ek olarak harmonik filtreler entegre edilerek kullanılabilir. Bu durumda genellikle kompanzasyon sistemi kondansatör gücü seçilirken harmonikler ve harmonik filtreler göz ardı edilmektedir. Bu sorunlar sayısal örnekler verilerek açıklanacaktır.

Örnek olarak bir elektrik tesisinin 630 kVA bir transformatör üzerinden enerjisi sağlandığını, kurulu gücünün 500 kW ve sistemin güç faktörü değerinin $\cos \varphi_1=0,8$ olduğunu kabul edelim. Bu durumda öncelikle tesis için gereken kompanzasyon sistemindeki kondansatör gücü denklem 3.17'den yararlanarak bulunabilir. Bunun için $\cos \varphi_2=0,99$ olması için kompanzasyon sistemi kondansatör gücü belirlenecektir. Bu durumda;

$$Q_c = P \times (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (3.17)$$

$\tan \varphi_1=0,75$ ve $\tan \varphi_2 = 0,14$ olarak verilen bilgilerden bulunabilir.

$$Q_c = 500 \times (0,75 - 0,14) = 305 \text{ kVAr}$$

olarak kompanzasyon sistemindeki gerekli kondansatör gücü hesaplanabilir. Sonuç olarak $Q_c=310$ kVAr seçilmiştir. Bu seçime göre 12 kademeli bir reaktif güç kontrol rölesine göre kademeler 10 10 10 20 20 20 20 40 40 40 40 40 olarak belirlenebilir. Bu seçime ek olarak elektrik tesisindeki toplam kondansatör gücünü belirlemek için trafoda meydana gelecek demir kayıpları için kurulacak sabit kondansatör gruplarının gücü hesaplanmalıdır. Bu hesaplamada;

$$S_k = S \times n \quad (4.45)$$

formülü kullanılmaktadır. Bu denklemde S_k boşa çalışma durumundaki görünür güç kaybını simgelerken, S transformatörün gücünü ve n ise transformatörün boşa akım oranını göstermektedir. Bu değer üretim kataloglarından alınmıştır. Buna göre;

$$n=\%1,6=0,016$$

$$S_k = 630 \times 0,016 = 10,08 \text{ kVA}$$

olarak bulunur. Yine transformatörün boşdaki kaybı üretim bilgilerinden bakılarak $P=1350$ W olarak alınmıştır. Bu durumda;

$$S_k = \sqrt{P_k^2 + Q^2} \quad (4.46)$$

$$Q = \sqrt{S_k^2 - P_k^2} \quad (4.47)$$

$$Q = \sqrt{10,08^2 - 1,35^2} = 9,99 \text{ kVAr}$$

bulunur. Bu durumda $Q_s=10$ kVAr seçilebilir. Bulunan değerler ışığında elektrik tesisinin toplam kondansatör gücü hesaplanabilir. Böylece;

$$Q_T = Q_c + Q_s \quad (4.48)$$

$$Q_T = 310 + 10 = 320 \text{ kVAr}$$

olarak bulunur.

Elde edilen verilerle birlikte devamında kritik olan rezonans frekansı hesaplanmalıdır. Buna göre kritik rezonans frekansını hesaplamak için rezonansın hangi harmonik mertebesinde oluşacağı belirlenmelidir. Bunun içinde Denklem 4.43 'den faydalanılır. Böylece;

$$n_{fR} = \sqrt{\frac{S}{\mu_k Q_T}} = \sqrt{\frac{630}{0,045 \times 320}} = 6,61$$

olarak bulunur. Bu değerden faydalarak kritik rezonans frekansı;

$$f_R = 50 \times n_{fR} = 50 \times 6,61 = 330,5 \text{ Hz}$$

olarak belirlenir. Yukarıdaki denklemde S transformatörün gücünü, Q_T toplam kondansatör gücünü (kVAr), μ_k transformatörün bağıl kısa devre değerini ifade etmektedir.

Rezonans frekansı belirlendikten sonra filtre tasarımı için sektörün sunduğu çözüm önerileri değerlendirilmelidir. Piyasada harmonik filtreler 134 Hz, 189 Hz ve 210 Hz frekans değerlerinde üretilmektedir. Odak noktası olarak belirlenecek frekans değeri baskın harmonik frekansının bir geri noktasında olacak şekilde seçilmelidir. Frekans değeri 330,5 Hz olarak bulunduğuna göre filtre hesabı için 210 Hz frekansı değeri tercih edilebilir.

Tasarlanacak harmonik filtre reaktör değerinin bulunması için işlemlerin devamında filtreleme faktörü bulunacaktır. Filtreleme faktörü;

$$\rho = f/f_R \quad (4.49)$$

formülüyle bulunacaktır. Denklem 4.49' da f şebekenin temel harmonik frekansını ve f_R ise filtre için belirlenen odaklanacak rezonans frekansını göstermektedir. Bu durumda filtreleme faktörü;

$$\rho = \frac{50}{210} = 0,057$$

olarak hesaplanır. Yukarıda harmonik filtrelerin üretimi aşamasında frekans için belli standartlar olduğu ve 134 Hz, 189 Hz ve 210 Hz değerlerinde üretildikleri söylenmiştir. Bu durumda kataloglarda bu değerler gösterilmese dahi filtreleme faktörleri $\rho = \%14$, $\rho = \%7$ ve $\rho = \%5,67$ olarak gösterilmektedir.

Kompanzasyon sisteminde harmonik filtrelerin eklenmesi sonucunda kondansatör uçlarındaki gerilim değeri artacaktır. Bu durumdan ötürü kondansatörün kapasite değerlerinde düşme meydana gelecektir. Kondansatör önüne harmonik filtre reaktörü konulduktan sonraki gerilim değeri;

$$U_c = U/(1 - \rho) \quad (4.50)$$

formülüyle hesaplanmaktadır. Denklem 4.50' de U_c filtre eklendikten sonra kondansatörün terminalleri arasında oluşacak yükselmiş gerilim değerini, U ise başlangıçtaki gerilim değerini ifade etmektedir. Bu durumda

$$U_c = 400/(1 - 0,057)$$

$$U_c = 424,178 \text{ V} \cong 424,18 \text{ V}$$

olarak hesaplanır. Açığa çıkan bu durum toplam kondansatörü gücünün de başlangıçta hesaplandığı gibi olmayacağı göstermektedir. Sektörde kondansatörler 400 V, 415 V, 440 V, 450 V, 500 V ve 525 V gibi çeşitli AC gerilim seviyelerinde üretilmektedirler. Kondansatör terminallerinde artan gerilim kapasite değerini de etkileyeceğinden 440 V işletme gerilimi değerine sahip kondansatör kullanıldığı düşünülecektir. Son durum için toplam kondansatör gücü;

$$Q' = \left(\frac{U_c}{U}\right)^2 \times Q_c \quad (4.51)$$

formülüyle hesaplanabilir. Buna göre son durumdaki kapasitif reaktif güç değeri;

$$Q' = \left(\frac{440}{400}\right)^2 \times 310$$

$$Q' = 375.1 \text{ kVAr}$$

olacaktır. Görüldüğü gibi başlangıçta seçilen 310 kVAr kompanzasyon sistemi kondansatörü güç değeri aslında düşünüldüğü gibi yeterli gelmeyecektir. Reaktif güç kompanzasyonu için gereken asıl kompanzasyon güç değeri 380 kVAr ve 440 V işletme gerilimli kondansatörler kullanılması olduğu görülmektedir. Diğer bir bakış açısıyla ilk kademede bulunan 10 kVAr gücündeki kondansatör 400 V işletme gerilim değerinde seçilirse denklem 4.51' den anlaşılacağı gibi 440 V seviyesine çıkacak bir gerilim artışı sonucunda kapasite değeri;

$$Q' = \left(\frac{U}{U_c}\right)^2 \times Q_c \quad (4.52)$$

formülüyle bulunabilir. Buna göre;

$$Q' = \left(\frac{400}{440}\right)^2 \times 10 = 8,26 \text{ kVAr}$$

olarak bulunacaktır. Görüldüğü gibi 400 V değerinde 10 kVAr kapasite değerine sahip kondansatör 8,26 kVAr değerlerine düşmektedir ki bu durum diğer kademelerdeki kondansatörler için de geçerlidir. Bu durumda kompanzasyon sistemi yetersiz gelmektedir. Bu olayın önüne geçmek için kademelerde en baştan itibaren ilk seçilen kondansatör güçlerine fakat 440 V işletme gerilimine sahip kondansatörler seçilmeli ve kademelerdeki kondansatör güçleri yeniden düzenlenerek toplamda 380 kVAr güce sahip kondansatörler sıralanmalıdır. Bu durum yinede probleme neden olabilir. Çünkü kondansatör uçlarında yükselecek gerilim daha düşük işletme gerilimine sahip kondansatörlerin ömürlerinin kısalmasına hatta arızalanmasına neden olabilmektedir. Bu durum için 12 kademeli reaktif güç kontrol rölesi için kompanzasyon kademeleri 10 10 20 20 40 40 40 40 40 40 40 40 olarak seçilebilir.

Yapılan tespitler ve bulunan değerlerin ardından kademelerin netleşmesinin ardından kademelere konulacak fitre reaktiflerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplama farklı güçteki her bir kademe için ayrı ayrı yapılmalıdır ve aynı filtreleme faktörü aynı alınarak yapılmalıdır. Yoksa bu durum kademelerde beklenenden farklı kapasite değerlerinin oluşmasına veya kondansatörlerin zarar görmelerine neden olabilir. İlk kademedeki 10 kVAr kondansatörün önüne koyulacak reaktör değeri;

$$X_{C_{10}} = \frac{U_c^2}{Q_{10}} \quad (4.53)$$

Denklem 4.53 ile kondansatörün kapasitif reaktans değeri bulunur.

$$X_{C_{10}} = \frac{440^2}{10000} = 19,36 \, \Omega$$

Kapasitif reaktans değeri bulunduktan sonra kapasite değeri denklem 4.55 ile bulunur.

$$X_{C_{10}} = \frac{1}{\omega C_{10}} = \frac{1}{2\pi f C_{10}} \quad (4.54)$$

$$C_{10} = \frac{1}{2\pi f X_{C_{10}}} \quad (4.55)$$

Buna göre;

$$C_{10} = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 50 \times 19,36} = 0,1645 \times 10^{-3} \, F$$

$$C_{10} = 0,1645 \, mF$$

olarak bulunur. Ardından rezonans frekansı için endüktans değeri hesaplanır.

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.56)$$

formülünden L değeri elde edilir. Rezonans frekansı 210 Hz olarak belirlenmişti. Buna göre denklemde kalan tek bilinmeyen L değeri elde edilir.

$$f_R = \frac{1}{2 \times 3,14 \sqrt{L \times 0,1645 \times 10^{-3}}} = 210 \, Hz$$

$$L = \frac{\left(\frac{1}{2 \times 3,14 \times 210}\right)^2}{0,1645 \times 10^{-3}} = 3,495 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$L = 3,495 \text{ mH}$$

olarak bulunur. Son olarak gerilim değeri ve güç değerine göre reaktörün akım taşıma kapasitesi belirlenir. Buna göre;

$$I_{C_{10}} = \frac{Q_{10}}{V_c \sqrt{3}} \quad (4.57)$$

$$I_{C_{10}} = \frac{10000}{440 \times \sqrt{3}} = 13,12 \text{ A}$$

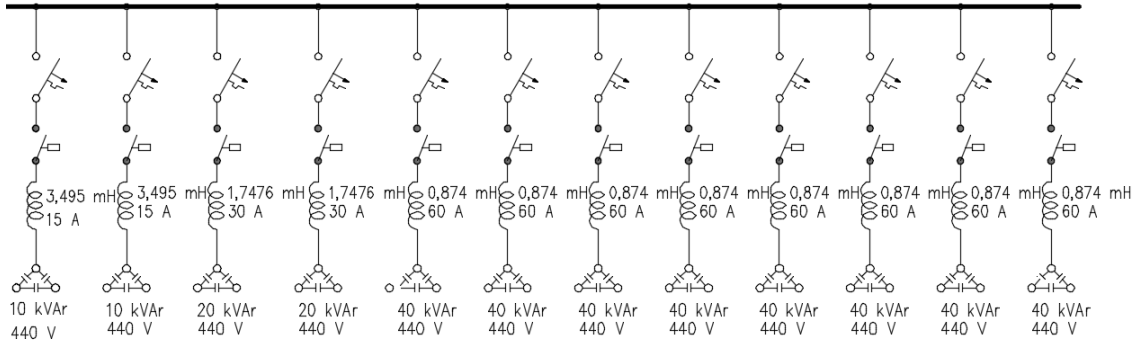
Olarak reaktörün akım taşıma kapasitesi bulunur.

Bulunan değerler ışığında kompanzasyon sisteminin ilk kademesindeki 10 kVAr gücündeki kondansatörün önüne konulacak filtre reaktörü için belirlenen değerler %5,67 filtreleme faktöründe 15 A akım taşıma kapasitesine ve 3,495 mH değerlerine sahip reaktif kullanılmalıdır.

Kompanzasyon sisteminin ilk kademesindeki 10 kVAr kondansatörün önüne konulacak reaktif için hesaplanan değerler diğer kademelerdeki 20 kVAr ve 40 kVAr gücündeki kondansatörler içinde hesaplanmalıdır.

Kompanzasyon sisteminin üçüncü kademesindeki 20 kVAr kondansatör için değerler yukarıda verilen formüller ve belirlenen rezonans frekansı ve gerilim değeri için hesaplanacak olursa kondansatör kapasitif reaktans değeri $X_{C_{20}} = 9,68 \Omega$, $C_{20} = 0,329 \text{ mF}$ ve kondansatör önüne konulacak reaktör için $L = 1,7476 \text{ mH}$ olarak bulunur. Bu değerlere göre akım taşıma kapasitesi de 26,24 A olarak belirlenebilir. Buna göre 20 kVAr gücündeki kondansatörlerin önüne konulacak filtre reaktörü 1,7476 mH ve 30 A akım taşıma kapasitesine sahip olarak seçilebilir.

Kompanzasyon sisteminin beşinci kademesi ve devamındaki kademelerdeki 40 kVAr kondansatör için değerler yukarıda verilen formüller ve belirlenen rezonans frekansı ve gerilim değeri için hesaplanacak olursa kondansatör kapasitif reaktans değeri $X_{C_{40}} = 4,84 \Omega$, $C_{20} = 0,658 \text{ mF}$ ve kondansatör önüne konulacak reaktör için $L = 0,874 \text{ mH}$ olarak bulunur. Bu değerlere göre akım taşıma kapasitesi de 52,49 A olarak belirlenebilir. Buna göre 40 kVAr gücündeki kondansatörlerin önüne konulacak filtre reaktörü 0,874 mH ve 60 A akım taşıma kapasitesine sahip olarak seçilebilir.



Şekil 4.21. Harmonik filtreli kompanzasyon sistemi tek hat şeması

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, her alanda kullanılan PVC izoleli bakır iletkenli tek ve çok damarlı alçak gerilim kablolarında normal kullanım koşullarında ve harmonik kaynaklarının olduğu durumda yapılan deneysel analiz verileri kullanılarak kablo kullanım ömrünün değişimi araştırılmıştır. Kablolarda meydana gelen sıcaklık, iletken üzerinden akan akıma bağlı olarak oluşan kayıplar neticesinde olduğu bilinmektedir. Bu sıcaklığın dolayısıyla kayıpların normal işletme koşullarında iletken üzerinden geçen akıma ve sistemde harmonik üretici kaynakların olması durumunda iletken üzerinden geçen harmonikli akıma göre nasıl değiştiği ve bu değişimler arasında mukayese yapılarak kablo ömrüne etkisi ortaya konulmuştur. Bu bağlamda harmonikli sistemlerin her yapı ve tesiste kullanılan ve kullanılması zaruret olan alçak gerilim kabloları üzerindeki etkisi gösterilerek önlenmesi durumunda sağlayacağı faydalar ortaya çıkarılmıştır.

Günümüzde yapı içerisindeki alçak gerilim enerji dağıtımı çoğunlukla bakır iletkenli kablolar kullanılarak yapılmaktadır. Enerjisi ana dağıtım merkezinden itibaren kabloların tüketim noktasına taşınması işlemi yapının mimari tasarımına bağlı olarak boru içerisinden veya kablo taşıma sistemleri şeklinde genel tanımını yapabileceğimiz kablo kanalları ile taşınmaktadır. Bu durumda hazırlanan projelerde iletken kesiti seçimi ve tasarım yapılırken dikkate alınan tek ölçüt genellikle ve yalnızca tüketici cihazın veya sistemlerin toplam gücüne göre sistemin güç faktörü için bir değer kabulü yapılarak, sistem faz sayısı durumuna göre hesaplanan nominal akım değeridir. Bulunan değer uygunluk analizi Uluslararası Elektroteknik Komitesi'nin belirlediği standartlara göre yapılarak bulunan nominal akım değeri hesabı ortam sıcaklığı, kabloların yerleşim şekli ve iletken cinsine göre yapıp değerlendirilerek seçilmektedir. Bu değerlendirmede kullanılan değişkenler IEC 60364-5-52 standardında verilen tablolara göre seçilerek yapılmaktadır. Ek olarak meydana gelen kayıplar ve ısınma durumunun oluşumunun değerlendirildiği bazı çalışmalar da yapılmış olup elde edilen sonuçlara göre akım taşıma kapasitesi belirlenerek daha doğru sonucun ortaya çıkarılacağı vurgulanmıştır. Yaşadığımız yüzyılda teknoloji hızla gelişmektedir. Gelişen teknolojiye paralel olarak birçok cihaz üretilmekte, ev ve iş hayatımızı kolaylaştırıp yaşantımızın vazgeçilmez parçaları haline gelmektedir. Ancak hızla artan bu hassas cihazların elektrik sistemimizi etkilediği bilinmekte ve birçok araştırmaya da konu olmaktadır. Bu cihazların çoğunun yük karakteristiklerinin lineer olmaması sebebiyle kullandığı akım şekli bozulmaktadır. Bu akım ve dalga periyodik olmakla birlikte temel sinusoidal dalga ile genlikleri ve

frekansları farklı başka sinusoidal dalgaların hepsinin toplamından oluşmaktadır. Frekansın ve genliğin farklı olması iletken üzerinde birçok zararlı etkiye neden olmaktadır. Ek olarak halihazırda zaten sorun olan bazı durumlarında artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle bahsedilen hesaplamalara ve seçim kriterlerine ek olarak sistemde çeşitli nedenlerden dolayı meydana gelen harmonikler de eklenerek iletken kesit seçimi buna göre yapılmalıdır. Bu nedenle anlatılan bu olumsuz durumları göstermek adına bu çalışmada PVC izoleli bakır iletkenli tek ve çok damarlı alçak gerilim kabloların normal işletme koşullarında ve harmonikli durumlardaki sıcaklık değişimi tespit edilmiş, bu durumun kablonun kullanım süresine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

5.1. Hesaplama Yöntemi ve Formülasyon Açıklamaları

Bu bölümde, elektriksel sistemlerde doğrusal olmayan yükler nedeniyle meydana gelen harmonik akımlardan dolayı kablo üzerinde oluşan sıcaklıktan neticesinde kablo ömrünün nasıl etkilendiğini hesaplamak için gerekli temel teorik bilgiler ve formülasyonlar verilmiştir.

Alçak gerilim elektrik iletiminde ana eleman olarak kullanılan kablolar gerilim uygulanması ve içerisindeki iletkenin üzerinden akım taşınması nedeniyle sıcaklık artışı, frekans değişimi, elektriksel zorlanmaların yanı sıra çevresel nedenlerden kaynaklı mekanik etkiler de büyük sorun oluşturmaktadır. Normal işletme koşullarında dahi sorun oluşturan bu durumlara harmonik oluşumunun da eklenmesi bu sorunları çok daha fazla arttırmaktadır. Temel frekansın katları şeklinde seyreden harmonikler akım ve gerilim değerlerine de etki ederek iletken ömrünü ciddi manada kısaltmaktadır. Bu zararlı etkenlerin kablo ömrünü kısaltması durumunun temelinde kimyasal etkiler yatmaktadır. Kablo ömrü Arrhenius Denklemi kullanılarak hesaplanabilir (Pacheco, Oliveire, Vilaca, 2000).

$$\frac{dp}{dt} = A \cdot e^{\frac{-E\alpha}{k\theta}} \quad (5.1)$$

Denklem 5.1’ deki değişken ve sabit elemanların anlamları şu şekildedir:

dp/dt : Zamana bağlı olarak iletken ömründe meydana gelecek değişimi ifade etmektedir.

A : Frekans faktörü olarak adlandırılır. Farklı kaynaklarda, moleküllerin çarpışma sıklığı olarak da tanımlanmaktadır. Hem moleküllerin çarpışma sıklığı hem de doğrultuları hakkında bilgi vermektedir.

k : Boltzman sabiti ($8,617.e^{-5}eV/K$)

θ : Sıcaklık ($^{\circ}K$)

E_a : Aktivasyon enerjisi (eV)

Denklem 5.1’de verilen formülasyon yorumlanırsa bu denkleme ilgili kaynaklarda şu şekilde rastlanmaktadır:

$$k = A. e^{\frac{-E_a}{k\theta}} \quad (5.2)$$

Bu denklemdeki ifadeler;

k : Hız sabiti

A : Frekans faktörü

R : Gaz sabiti

θ : Sıcaklık ($^{\circ}K$)

değerlerini ifade etmektedir. Denklem 5.2 formülündeki “ $e^{\frac{-E_a}{k\theta}}$ ” ifadesindeki kimyasal olayı düşünersek, yeterli enerjiye sahip çarpışmaların oranını anlatmaktadır. Denklem 5.1’deki yaklaşımda “R” gaz sabiti yerine “k” Boltzmann sabiti kullanılmıştır. Bilindiği üzere k sayısı gaz sabitinin avogadro sayısına bölünmesi ile elde edilmektedir. Yani Boltzmann sabiti kullanılarak daha küçük fiziksel durumlar için daha ayrıntılı sonuç elde edilmesi sağlanmıştır. Hız sabiti ifadesi sıcaklığın artışı durumunda zamanla kablo ömrünün nasıl değişeceğini öngörmek amacıyla dp/dt olarak yorumlanmıştır. Sonuç olarak sıcaklığa bağlı olarak kablo ömrünün değişimine ilişkin denklem şu şekilde yazılabilir (Lienhard, 2003):

$$p = p_i. e^{\left(\frac{-E_a}{k}\right) \left(\frac{\Delta\theta}{\theta_i(\theta_i + \Delta\theta)}\right)} \quad (5.3)$$

Denklem 5.3 fomülasyonunun içerdiği değişken ve sabit değerlerin anlamları şu şekildedir:

$\Delta\theta$: Sıcaklık artış miktarı ($^{\circ}K$)

θ_i : İletkenin işletme sıcaklığı ($^{\circ}K$)

E_a : Aktivasyon enerjisi (eV)

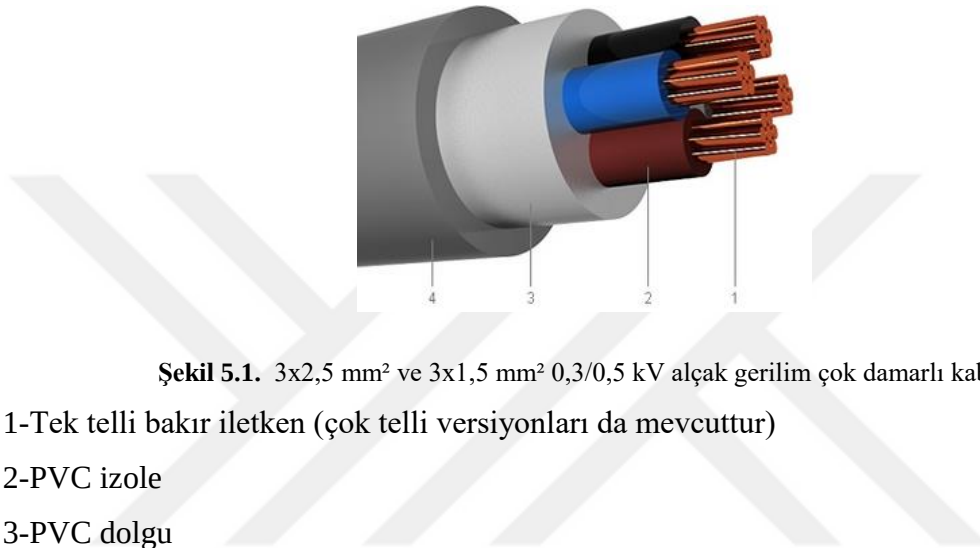
k : Boltzman sabiti ($8,617.e^{-5}eV/K$)

p : $\Delta\theta$ sıcaklık artışıdaki iletken kullanım ömrü (gün)

p_i : θ_i sıcaklığındaki iletken kullanım ömrü (gün)

5.2. Deneysel Analiz Çalışmaları

Deneysel gözlemler $3 \times 2,5 \text{ mm}^2$ ve $3 \times 1,5 \text{ mm}^2$ 0,3/0,5 kV alçak gerilim çok damarlı kablolar ve $1,5 \text{ mm}^2$ 0,3/0,5 kV alçak gerilim tek damarlı kablo üzerinde yapılmıştır. Deneyde kullanılan $3 \times 2,5 \text{ mm}^2$ kablo 3 adet $2,5 \text{ mm}^2$ tek tel bakır iletkenli, PVC izole, PVC dolugu ve PVC dış kılıfa sahiptir (Şekil 5.1). Kablonun dış çapı(yaklaşık) 10.2 mm, akım taşıma kapasitesi 30 A, iletken DC direnci 7,41 ohm/km ve kablo ağırlığı(yaklaşık) 185 kg/km'dir.



Şekil 5.1. $3 \times 2,5 \text{ mm}^2$ ve $3 \times 1,5 \text{ mm}^2$ 0,3/0,5 kV alçak gerilim çok damarlı kablo kesiti

1-Tek telli bakır iletken (çok telli versiyonları da mevcuttur)

2-PVC izole

3-PVC dolgu

4-PVC dış kılıf

Deneyde kullanılan $3 \times 1,5 \text{ mm}^2$ kablo 3 adet $1,5 \text{ mm}^2$ tek tel bakır iletkenli, PVC izole, PVC dolgu ve PVC dış kılıfa sahiptir (Şekil 5.1). Kablonun dış çapı (yaklaşık) 8.9 mm, akım taşıma kapasitesi 22 A, iletken DC direnci 12,1 ohm/km ve kablo ağırlığı (yaklaşık) 130 kg/km'dir. Görünüş bakımından Şekil 5.1 gibidir.

Deneyde kullanılan bir diğer kablo ise $1,5 \text{ mm}^2$ kablo olup $1,5 \text{ mm}^2$ tek tel bakır iletkenli ve PVC izolelidir (Şekil 5.2). Kablonun dış çapı 2.75 mm, akım taşıma kapasitesi 24 A, iletken DC direnci 12,1 ohm/km ve kablo ağırlığı (yaklaşık) 20 kg/km'dir.



Şekil 5.2. $1,5 \text{ mm}^2$ tek damarlı alçak gerilim kablo kesiti

1-PVC izole

2-Tek Damar bakır iletken

5.2.1. Uygulama aşamaları ve açıklamalar

Deneyde kullanılan her kablo çeşidi eşit uzunlukta ikişer çift olarak hazırlanmıştır. Kablolar teker teker bir güç kaynağı ve yük grubu arasına bağlanarak akım taşıma kapasitesi sınırlarında akım çekilmesi sağlanmıştır. Kablolar öncelikle kaynak ile lineer yük arasına bağlanarak harmonik üretmeyecek bu yüklerden ötürü kaynak ile yük arasına çekilen kablo üzerinden akacak akım neticesinde kablonun ısınması gözlenmiş ve belli aralıklarla bu durumdayken sıcaklık ölçümleri yapılarak kaydedilmiştir. Ardından bu kablo yerine aynı kablonun kullanılmamış eşi kaynak ile lineer olmayan yüklerden oluşan aynı güçteki yük grubu arasına bağlanarak aynı amperaj değerinde akım çekilmesi sağlanmıştır. Bu durum altında yine belli aralıklarla kablo üzerindeki sıcaklık ölçümü yapılmış ve bu değerler kaydedilerek yapılan sıcaklık ölçümleri karşılaştırılmıştır. Bu işlemler yukarıda tanımlanan kablo tüm kablo türleri için ayrı ayrı uygulanmıştır.

3x2,5 mm² 0,3/0,5 kV alçak gerilim çok damarlı kablo ilk olarak kaynak ile lineer yük arasına bağlanarak üzerinden 30 A düzeyinde akım geçmesi sağlanmıştır. Bu durumda kablo üzerinde oluşan sıcaklık ölçülerek kaydedilen sıcaklık değişimi belirli bir süre aralığı için aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 5.1. 3x2,5 mm² 0,3/0,5 kV alçak gerilim çok damarlı kablonun lineer yük altında 30 A akım çekilmesi durumunda ölçülen kablo sıcaklığının zamana göre değişimi

Ölçümün Yapıldığı Süre (dk)	Sıcaklık (°C)
0 (Başlangıç)	30 °C (Ortam Sıcaklığı)
3.	41
5.	44
7,5.	49
10.	52,2
15.	56,4
17,5.	60
20.	63
25.	65,4
27,5.	66,1
30.	66,2

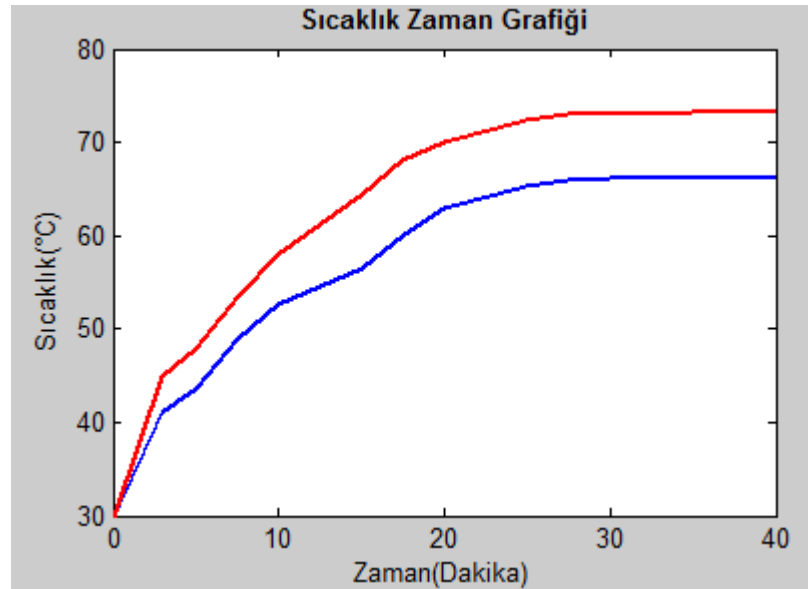
3x2,5 mm² kablonun 30 A akım taşıması sonucu kaydedilen değerler yukarıda gösterilmiştir. Görüldüğü üzere sıcaklık gittikçe artmakta ve bir noktada doyuma ulaşmıştır. Bu noktadan sonra sıcaklık değer neredeyse aynı kalarak artış gözlenmemiştir. Sonrasında aynı kablonun kullanılmamış olan aynı uzunluk ve özelliklere sahip diğer eşi

kaynak ile aynı güçteki lineer olmayan yük arasına bağlanarak 30 A kablo üzerinden 30 A akım akması sağlanarak kabloda oluşan sıcaklık değişimi ölçümleri kaydedilmiş olup aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 5.2. 3x2,5 mm² 0,3/0,5 kV alçak gerilim çok damarlı kablonun lineer olmayan yük altında 30 A akım çekilmesi durumunda ölçülen kablo sıcaklığının zamana göre değişimi

Ölçümün Yapıldığı Süre (dk)	Sıcaklık (°C)
0 (Başlangıç)	30 °C (Ortam Sıcaklığı)
3.	45
5.	48
7,5.	53,4
10.	58
15.	64,5
17,5.	68
20.	70
25.	72,3
27,5.	73
30.	73,1

İki durum içinde belirli zaman aralıklarında alınan sıcaklık değerleri ölçümünü gösteren grafik aşağıdaki gibidir. Anlaşılacağı gibi sıcaklık artışının daha fazla yaşandığı durum nonlinear yük altındaki durumdur ve Şekil 5.3’de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. 3x2,5 mm² 0,3/0,5 kV alçak gerilim çok damarlı kablonun lineer yük ve lineer olmayan yük durumlarındaki sıcaklık- zaman grafiği

Grafikte de görüldüğü gibi ikinci durum için yapılan ölçümlerde de aynı şekilde kablo üzerindeki sıcaklık giderek artarak bir süre sonra sıcaklık artışı neredeyse aynı kaldığı görülmüştür. Ancak ilk duruma göre sıcaklık artışının daha fazla olduğu belgindir.

3x1,5 mm² kablo 3 adet 1,5 mm² tek tel bakır iletkenli alçak gerilim kablosu için aynı işlemler uygulanmıştır. Sırasıyla lineer yük ve non-lineer yük grupları ile kaynak arasına bağlanarak üzerinden 22 A akım geçmesi sağlanmış ve belirli aralıklarla alınan sıcaklık ölçümleri sonucu kaydedilmiştir.

Çizelge 5.3. 3x1,5 mm² 0,3/0,5 kV alçak gerilim çok damarlı kablonun lineer yük altında 22 A akım çekilmesi durumunda ölçülen kablo sıcaklığının zamana göre değişimi

Ölçümün Yapıldığı Süre (dk)	Sıcaklık (°C)
0 (Başlangıç)	30 °C (Ortam Sıcaklığı)
3.	42
5.	45
7,5.	48,4
10.	51,2
15.	55,6
17,5.	59
20.	62,6
25.	66
27,5.	68
30.	68

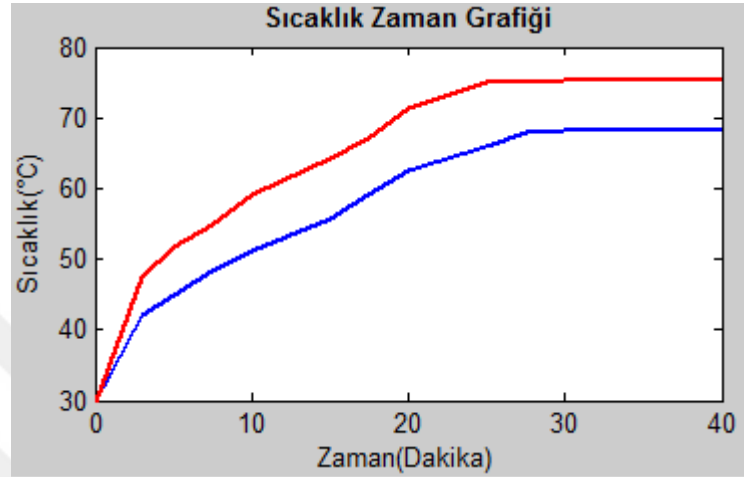
Bu işlemin ardından 3x1,5 mm² kablonun eşit uzunluk ve kesitteki yedeği non-lineer yük altında üzerinden 22 A akım geçmesi durumundaki kablonun sıcaklığının zamanla değişimi takip edilmiş ve ölçülen değerler kaydedilmiştir.

Çizelge 5.4. 3x1,5 mm² 0,3/0,5 kV alçak gerilim çok damarlı kablonun lineer olmayan yük altında 22 A akım çekilmesi durumunda ölçülen kablo sıcaklığının zamana göre değişimi

Ölçümün Yapıldığı Süre (dk)	Sıcaklık (°C)
0 (Başlangıç)	30 °C (Ortam Sıcaklığı)
3.	47,6
5.	51,6
7,5.	55
10.	59
15.	64,2
17,5.	67
20.	71,4

25.	75
27,5.	75,1
30.	75,2

İki durum içinde belirli zaman aralıklarında alınan sıcaklık değerleri ölçümünü gösteren grafik aşağıdaki gibidir. Anlaşılacağı gibi sıcaklık artışının daha fazla yaşandığı durum nonlinear yük altındaki durumdur ve Şekil 5.4’de gösterilmiştir.



Şekil 5.4. 3x1,5 mm² 0,3/0,5 kV alçak gerilim çok damarlı kablonun lineer yük ve lineer olmayan yük durumlarındaki sıcaklık- zaman grafiği

Son olarak 1,5 mm² tek damarlı alçak gerilim kablosu lineer ve non-lineer yük ile kaynak arasına bağlanarak 22 A akım çekilmesi durumunda kablo sıcaklığı değişimi ölçülüp kaydedilmiştir.

Çizelge 5.5. 1,5 mm² 0,3/0,5 kV alçak gerilim tek damarlı kablonun lineer yük altında 22 A akım çekilmesi durumunda ölçülen kablo sıcaklığının zamana göre değişimi

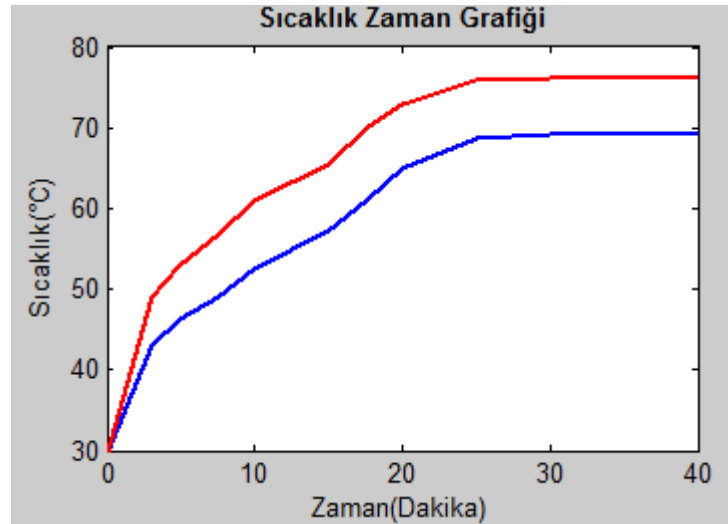
Ölçümün Yapıldığı Süre (dk)	Sıcaklık (°C)
0 (Başlangıç)	30 °C (Ortam Sıcaklığı)
3.	43
5.	46,2
7,5.	49
10.	52,6
15.	57,3
17,5.	61
20.	65
25.	68,6
27,5.	69
30.	69,1

İkinci durum olarak 1,5 mm² kablonun eşit uzunluk ve kesitteki yedeği non-lineer yük altında üzerinden 22 A akım geçmesi durumundaki kablonun sıcaklığının zamanla değişimi takip edilmiş ve ölçülen değerler kaydedilmiştir.

Çizelge 5.6. 1,5 mm² 0,3/0,5 kV alçak gerilim tek damarlı kablonun lineer olmayan yük altında 22 A akım çekilmesi durumunda ölçülen kablo sıcaklığının zamana göre değişimi

Ölçümün Yapıldığı Süre (dk)	Sıcaklık (°C)
0 (Başlangıç)	30 °C (Ortam Sıcaklığı)
3.	49
5.	53
7,5.	56,8
10.	61
15.	65,4
17,5.	70
20.	73
25.	75,8
27,5.	76
30.	76,1

İki durum içinde belirli zaman aralıklarında alınan sıcaklık değerleri ölçümünü gösteren grafik aşağıdaki gibidir. Anlaşılacağı gibi sıcaklık artışının daha fazla yaşandığı durum nonlinear yük altındaki durumdur ve Şekil 5.5’de gösterilmiştir.



Şekil 5.5. 1,5 mm² 0,3/0,5 kV alçak gerilim tek damarlı kablonun lineer yük ve lineer olmayan yük durumlarındaki sıcaklık- zaman grafiği

Yapılan bu deneyde 3 farklı kablonun akım taşıma kapasitesi sınırlarında akım altında harmonik üretmeyen bir yük ve harmonik üreten aynı güce sahip yükler için aynı amprej değerinde kabloda oluşan sıcaklık değişimleri ölçülmüş ve kaydedilen değerler

yukarıdaki tablolarda verilmiştir. Her kablonun iki farklı yük cinsi için aynı koşullar altındaki sıcaklık değişimleri her bir kablo türü için ayrı ayrı grafiksel olarak yorumlanmış ve karşılaştırılmıştır. Kabloların aynı uzunlukta ve aynı özellikte farklı iki eş halinde hazırlanarak kullanılması sonucunda ölçümlerin alınmasının sebebi kabloların aynı dirence ve özelliklere sahip olması sağlanarak birbirinden farklı iki durumu aynı şartlar altında daha doğru şekilde kıyaslama yapabilme şansı yakalamaktır.

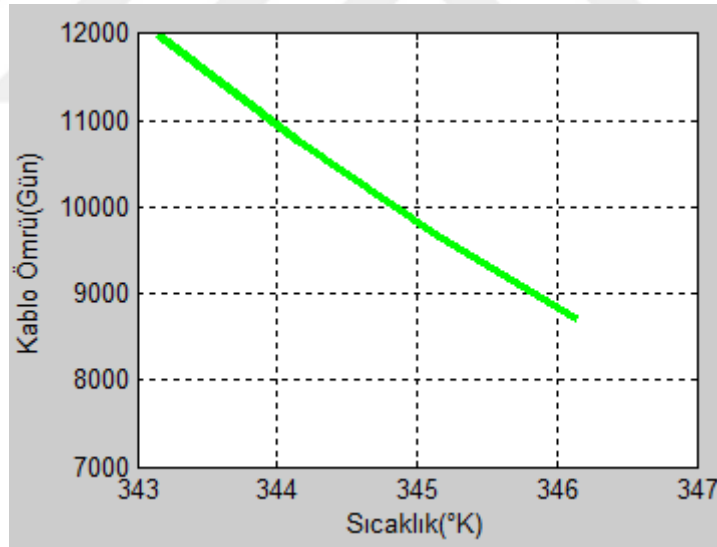


6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

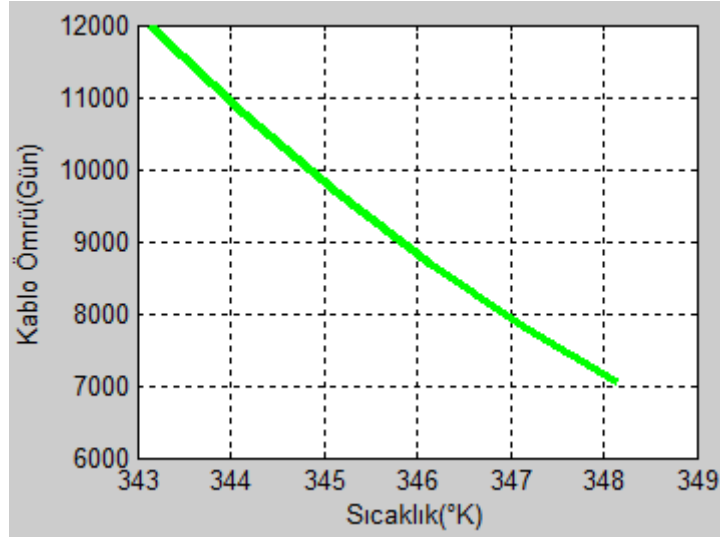
Bu çalışmada, farklı kesitlerde tek ve çok damarlı alçak gerilim kablolarının normal koşullarda ve harmonik üretici yükler altında akım taşıma kapasiteleri seviyelerinde aynı akım düzeylerinde sıcaklık değişimleri incelenmiş, bu sıcaklık değişimleri arasında mukayese yapılmış ve son olarak deneyde kullanılan kabloların harmonikli durumdaki sıcaklık değişiminin kablo ömrüne etkisi için bir hesap yapılmış ve sonuçlar grafiksel olarak verilmiştir.

6.1. Sayısal Analizler ve Sonuçları

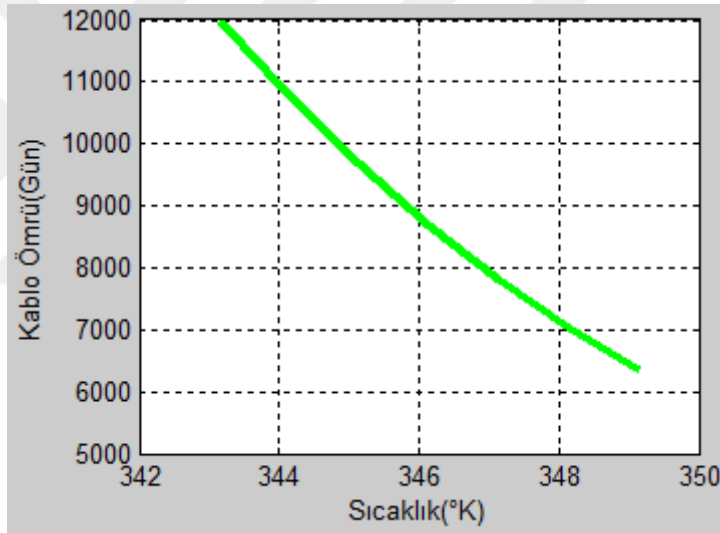
3 çeşit kablo için deneysel veriler toplanmış ve herbirinde non-lineer yük altında sıcaklık artışının belirgin ölçüde daha fazla olduğu tablolarda ve grafiklerde görülmektedir. Bu aşamada bu sıcaklık değişiminin kablo kullanım ömrüne etkisi denklem 5.3 kullanılarak MATLAB yazılımı ile hesaplanmış olup bulunan sonuçlar grafik olarak işlenerek Şekilde 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’de verilmiştir.



Şekil 6.1. 3x2,5 mm² 0,3/0,5 kV alçak gerilim çok damarlı kablonun lineer olmayan yük altındaki sıcaklık değişimi ve kablo ömrüne etkisi



Şekil 6.2. 3x1,5 mm² 0,3/0,5 kV alçak gerilim çok damarlı kablonun lineer olmayan yük altındaki sıcaklık değişimi ve kablo ömrüne etkisi



Şekil 6.3. 1,5 mm² 0,3/0,5 kV alçak gerilim tek damarlı kablonun lineer olmayan yük altındaki sıcaklık değişimi ve kablo ömrüne etkisi

6.2. Harmoniklerin İletkenlerin Isınmasına Etkisi

Çizelgeler ve grafiklerden görüldüğü üzere her kablo türü için harmonikli akımlar altında sıcaklık artışı daha fazla olmaktadır. Tüm kablolarda alınan sıcaklık ölçümler belirli bir noktadan sonra doyuma ulaşmaktadır. Bu durum aslında limit hız durumuna da benzetilebilir. Sıcaklığın doyuma ulaşmasının nedeni kablonun çevreye verdiği ısıdır. Bir noktadan sonra kablonun aldığı ısı ile verdiği ısı neredeyse eşit duruma gelerek sıcaklık artışı durmakta ve sıcaklık sabitlenmektedir.

6.3. Harmoniklerin İletkenler Üzerine ve Kablo Ömrüne Etkisi

İletkenler endüktif özelliklidir. Sistemde oluşan harmonikler nedeniyle frekans da artmaktadır. Bu frekans artışı neticisinde akım iletken dış yüzeyinden daha fazla akacak ve kablo harmonikler nedeniyle deri etkisinin artması sonucu daha fazla ısınacaktır. Bunun yanında çok damarlı kablolarda, elektrik dağıtım sistemlerinde kabloların bir arada yan yana dizilerek taşınmasında yaklaşım etkisi durumu da söz konusu olacağından bu da kablonun sıcaklığının artmasında bir etken olarak göze çarpmaktadır. Harmonikler her iki durumu da arttırıcı yönde etki etmekte ve kablo ömrünü azaltmaktadır. Ek olarak 1.5 mm² tek damarlı kablo ile 3x1.5 mm² ile aynı kesit ve uzunlukta olmasına rağmen nispeten daha fazla ısınmıştır. Bu durumda tek damarlı kablolarda deri etkisinin çok damarlı kablolarla göre daha fazla olması etkilidir.

6.4. Harmoniklerin Tek Fazlı Sistemlerde İletkenler Üzerine Etkisi

Tek fazlı yüklerin olduğu sistemlerde üç ve üçün katı olan harmoniklerin baskın olduğu bilinmektedir. Yapılan deney sisteminde de tek fazlı yükler olduğundan üçüncü harmoniklerin baskın olması kaçınılmazdır. Üç ve üçün katı şeklinde seyreden harmonikler arasında faz farkı olmadığından ötürü birbirini sönmek yerine daha da kuvvetlendirmekte ve dolayısıyla bu da kablo ömrünü azaltıcı bir durum oluşturmaktadır. Ayrıca dikkat edilirse uygulanan deneysel çalışmada lineer yük ve non lineer yük altında da kablolar üzerinden aynı düzeyde akım geçirilmiştir. Bu düzeyler etkin değer kalibreli multimetrelerde görülen değer olarak ölçülmüştür. Çünkü harmoniklerden ötürü frekans değişmekte bu nedenle referans noktasını sıfır olarak alan cihazlar normal şebeke frekansı (50 Hz) durumunda beklenen sıfır noktası geçişi ile harmonikli durumdaki geçiş arasında fark olacağından doğru ölçüm yapılamamaktadır. Buradan da anlaşıldığı gibi her ne kadar aynı seviyede akım geçtiği görülse de sistemde oluşan harmonikler gizli bir tehlike de oluşturmaktadır. Sistemin çok daha kompleks olduğu bir durum düşünüldüğünde harmoniklerin etkisi farklı alanlara kadar uzanacaktır. Yük karakteristiği doğrusal olmayan bir yük grubu sistemden harmonikli akım çekecektir. Çekilen bu harmonikli akım sistemin diğer kısımlarında harmonikli gerilim olarak kendini belli edecek ve aslında yük karakteristiği doğrusal olan cihazlar ve bunları besleyen kablolar da bu durumdan etkilenecek ve kablo ömürleri buna bağlı olarak azalacaktır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1 Sonuçlar

Elektrik tüm dünyada üretim hammaddesi olarak tanımlayabileceğimiz ana ihtiyaçlardan biridir. Bu durum enerji arz talebini karşılamamanın, kaliteli enerji sunmanın önemini daha da arttırmaktadır. Elektrik tesisleri çok farklı amaçlarda kullanılmakta ve bu durum tesisler içerisinde birbirinden farklı yüklerin oluşmasına neden olmaktadır. Böylece bu yük çeşitliliği ve enerji ihtiyacındaki artış güvenilir ve kaliteli enerji kavramının ortaya çıkmasını tetiklemiştir. Tez çalışmasının başından beri bu enerji kalitesini etkileyen durumlar üzerinde durulmuştur. Gerekli bilgiler verildikten sonra deneysel çalışma ile desteklenmiştir. Çalışmadan genel itibariyle şu sonuçlar çıkarılabilir.

Reaktif güç elektrik tesislerinde güç kalitesini bozmakta ve iletkenler üzerinde gereksiz gerilim düşümlerine ve ısınmalara neden olarak olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Bu durumların giderilmesi için kompanzasyon sistemi gerekli ve mecburidir. Fakat reaktif güç kompanzasyon sistemi SVC olarak kullanılması kompanzasyon işleminin mükemmele yakın yapılmasını sağlamaktadır.

Sektör uygulamalarında elektrik tesislerinde kompanzasyon sistemleri projelendirme aşamasında şu şekilde yapılmaktadır. Elektrik projeleri oluşturulup sistemde elektrik enerjisi ile çalışan tüm cihazlar ve sistemlerin toplam güç hesapları yapılarak sistemin talep gücü belirlenir. Tesis için bir güç faktörü kabul edilir ve genellikle karşılaşılan güç faktörü değeri 0,77 ile 0,8 arasında değişmektedir. Buna göre sistemin ihtiyacı olan kapasitif reaktif güç hesabı yapılarak kompanzasyon sistemi kademelerindeki kondansatörler belirlenir. Bu yöntemle elektrik tesislerine otomatik kompanzasyon sistemleri kurulmaktadır. Ancak bu durumda genellikle harmonikler göz ardı edilir. Bu nedenle kompanzasyon sistemi elemanları risk altında kalır. Bu durum gerekli kondansatör gücü değerinin sağlanmama olasılığını da beraberinde getirmektedir. Ek olarak elektrik tesislerindeki talep güç proje üzerinde öngörülerek kompanzasyon sistemi tasarlandığından sistemin ya gerektiğinden fazla ya da gerekli kondansatör gücünden az bir sistemin açığa çıkmasına neden olmaktadır. Ayrıca proje üzerinde işlenip elektrik tesisinde uygulanmayan cihaz veya sistemler de bu gücü etkileyerek proje üzerindeki hesaplamalar neticesinde bulunan kompanzasyon sisteminin doğruluğunu etkilemektedir. Bu değişken durumlar hem yapılan işin doğruluğunu etkileyerek elektrik tesisindeki elektrik sisteminlerini ve cihazlarını riske atmakta hem de gereksiz maliyetler doğurmaktadır. Ayrıca talep güç belirlemede mevcutta bulunan yönetmelikler

doğrultusunda yapılması gerekliliğinden uygulamada gereksiz şalt malzemeleri ve hiç kullanılamayacak bir elektrik gücü için tüm sistemlerin tasarlanması gerekliliğinin açığa çıkma durumları oluşmaktadır. Bu doğrultuda mevcut yönetmeliklerdeki talep faktörlerinin de yeniden gözden geçirilmesi faydalı olabilir.

Elektrik tesislerindeki yük değişkenliği ve teknolojinin ilerlemesiyle lineer olmayan yüklerin kullanımının artması neticesinde bu yüklerden ötürü harmonikler açığa çıkması nedeniyle elektrik sistemlerindeki enerji kalitesi düşmekte ve tüm sistem ve cihazlar bu durumdan olumsuz etkilenmektedir. Oluşan harmonikler nedeniyle standartların üzerine çıkacak THD değerleri hem elektrik tesisleri için problem olacak hem de tesislerin maddi cezalara düşmesine yol açacaktır. Bu nedenle sistemde mümkün olduğunda lineer olmayan yük kullanımının dengelenmesi veya azaltılması iyi bir seçenek olacaktır.

Lineer olmayan yüklerin elektrik tesislerinde kullanımı kaçınılmaz hale geldiğinden bu yüklerin neden olacağı harmoniklere karşı tesislerde önlem alınmalıdır. Elektrik tesisleri projelendirilirken kompanzasyon sistemi ile birlikte harmonik filtreler de projelerde gösterilmektedir. Ancak bu filtre tasarımı tamamen kabuller yapılarak oluşturulmakta ve sistem için uygun olup olmayacağı durumu gözardı edilmektedir. Ayrıca filtre tasarımlarında gerekli hesaplar proje üzerinde gösterilmemekte, seçimlerin nasıl yapıldığı bir muamma olarak kalmaktadır. Buna ek olarak harmonik filtreli kompanzasyon sistemlerinde filtrelerden ötürü kondansatör uçlarında oluşacak gerilim düşümü göz ardı edilmekte olup hem kondansatörün kendisi için tehlikeli bir durum oluşmakta hem de tez içerisinde Bölüm 4.7.2.3’de gösterildiği gibi başlangıçta yapılan kompanzasyon hesabına göre yeterli bulunan toplam kondansatör gücü değeri harmonikler filtreler dahil edildiğinde yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle kompanzasyon sistemi tasarımı ve harmonik filtre tasarımı elektrik tesisleri işletmeye alındıktan sonra gerekli ölçümler yapılması sonucunda tasarlanarak devreye alınmalıdır. Devreye alma işleminden sonra tesislerde yeniden ölçümler yapılarak harmonik filtrelerin ve reaktif güç kompanzasyon sisteminin doğru çalışıp çalışmadığı ve sisteme uygun olup olmadığı kontrol edilmelidir.

Elektrik tesislerinde sürekli söylendiği gibi yük çeşitliliği fazladır ve bu yüklerin çeşitleri veya zaman içerisinde ihtiyaca veya diğer iç ve dış faktörlerden ötürü değişebilmektedir. Bu durum elektrik sistemlerinde oluşan harmoniklerin seviyelerinin değişme ihtimalini de ortaya çıkarmaktadır. Özellikle pasif filtreler elektrik tesisinde baskın olan harmoniklere göre üretildiklerinden sistemde oluşacak bir değişiklik bu

filtrelerin tasarlandığı harmonik mertebesini değiştirebilmekte ve filtreleri işlevsiz kılabilir. Bu nedenle elektrik tesislerinde yük değişimi durumları takip edilmeli ve bu durumlar için yeniden ölçüm yapılmalıdır.

Elektrik sistemlerinde rezonans olayları da dikkate alınmalıdır. Tez içerisinde anlatıldığı gibi paralel rezonans durumuna toplam empedans arttığından bu durumda aşırı gerilimler oluşmaktadır. Seri rezonans durumunda ise sistemde aşırı akımlar meydana gelecektir. Rezonans frekansının harmoniklerin frekansına yakın veya aynı değerde denk gelmesi durumunda dalga şeklindeki bozulmalar ve salınımlar daha da artacaktır. Bu durum temel harmonikteki bozunmanın da oldukça artmasına neden olacaktır. Bu durum hem güç kalitesini fevkalade olumsuz etkileyecek hem de cihazların arızalanmasına neden olacaktır.

Tez içerisinde yapılan deneysel analiz ile harmoniklerin elektrik tesislerine ve iletkenlere olan etkisi gösterilmiştir. Yapılan çalışmada üç farklı iletken kesitinde lineer yük altında ve lineer olmayan yük altında oluşan akımlar neticesinde sıcaklık etkisi olarak kendini belli eden olumsuz durumun iletkenler üzerine oluşturduğu olumsuz etki araştırılmış, bilgisayar destekli matematiksel hesaplamalar ve grafiklerle gösterilmiştir. Çalışma sırasında gözlenmiştir ki harmonik kaynaklarının bulunduğu devrede aynı akım seviyesinde farklı sıcaklık değerleri alınmıştır. Bu durum iletken ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Alternatif akım sistemlerinde oluşan harmonikler temel frekans seviyesinden daha yüksek frekansa sahip olduğundan alternatif akımın doğasından kaynaklı olan iletkenlere etkisi neticesinde (Bölüm 4.5.1.6'da anlatılmıştır) iletken direnci artmakta ve bu duruma paralel olarak daha fazla ısı açığa çıkarak iletken yapısına zarar vermektedir. Bu nedenle işletmelerde maddi kayıplar açığa çıkabilmekte veya cihazlar zarar görmektedir. Yapılan çalışma açıkça göstermiştir ki elektrik sistemlerinde oluşan harmonikler alçak gerilim kablolarını önemli ölçüde etkilemekte, kullanım sürelerini düşürmekte ve bu durum ekonomik açıdan da sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Bu durumu azaltmak ve nispeten önlemek için alçak gerilim için harmonik analizler yapılarak önlemler alınmalı sistemler buna göre tasarlanmalı ve kablo kesitleri seçilirken harmonik etki de göz önüne alınmalıdır.

7.2 Öneriler

Elektrik tesislerinde reaktif güç kompanzasyon sistemlerinde ve harmoniklerin bulunduğu elektrik tesislerinde şu hususlara dikkat çekilebilir;

- Kompanzasyon sistemlerinde gerekli kondansatör gücü belirlenirken elektrik tesisinin talep gücü doğru olarak belirlenmeli ve kompanzasyon elemanları yapılacak hesaba göre doğru seçilmelidir.
- Kompanzasyon sistemlerinde kompanzasyon kontaktörleri kullanılmalıdır.
- Kompanzasyon sistemlerinde kısa devre kesme kapasitesi yüksek sigortalar kullanılmalıdır.
- Kompanzasyon sistemlerinde daha verimli bir kompanzasyon yapılabilmesi için SVC sistemi kullanılması önerilir. Reaktif güç kontrol rölesinin de sisteme uyumlu olmasına dikkat edilmelidir.
- Sanayi tipi elektrik tesislerinde kompanzasyon sistemlerinin sürekli kontrol altında tutulması gerekmektedir. Bu nedenle iş gücünden ve zamandan tasarruf etmek açısından uzaktan takip sistemlerinin kullanılması kompanzasyon çalışma güvenliğini sağlamakta faydalı olacaktır.
- Kompanzasyon sistemleri tasarlanırken harmonikler göz önüne alınmalı ve sistem elemanları buna göre seçilmelidir.
- Kompanzasyon sistemlerinde filtre kullanırken kondansatör uçlarında gerilim artışı olacağı hesaba katılarak kompanzasyon sistemi kondansatör gücü ve gerilimleri bu duruma göre seçilmelidir.
- Kompanzasyon sisteminde kullanılacak harmonik filtrelerin seçimi için herbir farklı kademe için ayrı hesaplama yapılarak sektörün sunduğu üretim çeşitlerine göre harmonik filtreler seçilmelidir.
- Harmonik filtrelerin ve kompanzasyon sistemlerinin tasarımı sırasında rezonans olayları göz önüne alınarak seçimler ve tasarımlar yapılmalıdır.
- Kompanzasyon sistemi ile birlikte tasarlanacak pasif filtrelerin filtreleme faktörleri kompanzasyon sisteminin tüm kademeleri için aynı değerde alınarak tasarım yapılmalıdır.

- Elektrik tesisi için uygulanacak harmonik filtreleri kompanzasyon sistemlerinde filtrelerden ötürü sıcaklık artışı olacağından kompanzasyon panosunda gerekli önlemler alınmalıdır
- Elektrik tesislerinde kullanılacak harmonik filtrelerde aktif filtre ve pasif filtre tercihi maddi ve teknik yönden bir arada ele alınarak değerlendirilmelidir.
- Elektrik tesislerinde kompanzasyon sistemi ve harmonik filtreler bulunsa dahi yük değişimi durumları gibi sistemle olabilecek farklı olaylardan ötürü filtrenin tasarlandığı harmonik mertebesinin baskınlığının başka bir harmonik seviyesine kayma ihtimali olabileceğinden tesislerde belli aralıklarla harmonik ölçümler yapılmalı veya hiç yapılamazsa dahi yük değişim durumlarında harmonik ölçüm yapılarak alınan önlemlerin uygunluğu teyit edilmelidir.
- Harmoniklerin zararları konusunda serbest çalışan mühendisler ve tüketiciler daha çok bilgilendirilmeli, projelendirme aşamasında kompanzasyon sistemi ve harmonikler alanında yapılan çalışmalar geliştirilerek projeler daha kompleks, teknik ve maddi yönler dikkatle göz önüne alınmış şekilde çözüm odaklı uygulanabilir hale getirilmelidir.
- Nötr iletken kesiti ve faz iletken kesiti seçimlerinde harmonikler göz önünde bulundurulmalıdır.
- Elektrik tesislerinde fazlar arası yük dağılımı tasarım ve uygulamada mümkün olduğunca dengeli şekilde yapılmalıdır. Fazlardaki yük dağılımının dengeleri olmaması harmoniklerden ötürü ortaya çıkacak kayıpları daha da arttırmaktadır.
- Çalışmada anlaşılmıştır ki harmonikler neticesinde normal koşullardan fazla ısınan iletkenlerde direnç değeri de artmaktadır. Bu zaten sıcaklık arttıkça direnç değerinin arttığı formülasyonla tez içerisinde gösterilmiştir. Akım iletkenin iki ucu arasında ortamı nötleştirmek için gerçekleşen yük akışından kaynaklı olduğundan iletken üzerinde gerçekleşen yük akışı sırasında iletkenin atom yapısındaki elektronlar ile akımını oluşturan elektronlar arasında bir enerji aktarımı olacaktır ve böylece iletken ısınmaktadır. Bu durumda iletkene aktarılan enerji ne kadar fazla olursa akım da o kadar yavaşlar ve bu durumda bariz şekilde iletken direnci artmaktadır. İletkenin direncinin artması sonucunda ise akım taşıma

kapasitesi düşmekte ve böylece akımın düşmesi sonucu enerji alış verışı yeniden azalacağından iletkenin sıcaklığı düşmesi suretiyle direnç değeri de düşecek ve deneysel çalışma sonuçlarında söylendiği ve görüldüğü gibi bir noktada kararlı hale gelecektir. Bu durum ortam koşulları, kablo izolasyonu, ortamın ısı iletkenliği gibi birçok faktöre de bağlıdır. Bu nedenle kabloların tasarımında harmoniklere, gerekli hesaplamalara, kesiti tayinine gibi durumlara dikkat edilmesinin yanı sıra uygulamada montaj yöntemine, ortam koşullarına, iletkenlerin birbiri arasındaki uzaklıklara da dikkat edilmesi gerekmektedir. Kablolar arası uzaklığın (özellikle yüksek akım taşıyan kablolar için) en az bir kablo çapı kadar olması önerilmektedir (Karahan M., Varol S., Kalenderli Ö., 2007).



KAYNAKLAR

- Adak, S., 2003, Enerji Sistemlerinde Harmonik Distorsiyonun Azaltılması, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Akbal, B., 2011, Fabrika Beslemelerinde Harmonik Ölçümü ve Filtre Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Chapman, 2011, Application Note Harmonics: Causes and Effects, *European Copper Institute, Publication No:Cu119, Iss.02*, Bursa, Bildiri No.228, Kasım.
- De Castro, L. N. and Von Zuben, F. J., 2000, Artificial immune systems: Part I- Basic theory and applications, *DCA-RT 02/00, Brasil*, 23-28.
- Freund, A., 1988, Nonlinear Loads Mean Trouble, *EC&M*, pp.83-90.
- Gencer, Ö. Ö., Alboyacı, B., Öztürk, S., Çetinkaya, H. B., 2003, Harmoniklerin Güç Faktörü Üzerine Etkileri, *Elektrik – Elektronik – Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi*, İstanbul.
- Jiang, Bo., Jinhui, W., 2016, Research On Harmonic Analysis Of Low Voltage Distribution Networks And Its Monitoring System, *Electronic And Automation Control Conference(IMCEC)*, 3-5 October.
- Karaca, G., 2006, Kablolarda Elektriksel ve Isıl Zorlanmaların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Çoklu Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Karahan, M., Varol, S. H., Kalenderli, Ö., 2007, Hava ve Su Ortamında Yer Alan Alçak Gerilim Güç Kablolarında Akım – Sıcaklık İlişkisinin İncelenmesi, *Elektrik – Elektronik – Bilgisayar – Biyomedikal Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi, Bursa*, Bildiri No.148.
- Karahan, M., Varol, S.H., Kalenderli, Ö., 2007, Güç Kablolarının Elektrik ve Isıl Zorlanmaların Etkisi Altında Sıcaklık Dağılımlarının ve Ömürlerinin Belirlenmesi, *Elektrik – Elektronik – Bilgisayar – Biyomedikal Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi, Eskişehir*, Bildiri No.152, 14-18 Kasım 2007.
- Kocatepe, C., Arıkan, O., Kumru C. F., Akbulut A., 2012, Yüksek Gerilim Kablolarının Farklı Döşeme Koşullarında Isıl Analizi, *Elektronik – Bilgisayar – Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Bildiri No.228, 29 Kasım - 01 Aralık.
- Küçükaydın, B., Arıkan, O., 2012, Ortam Koşullarının Yeraltı Kablolarının Sıcaklığı ve Akım Taşıma Kapasitesi Üzerindeki Etkisi, *Elektronik – Bilgisayar – Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Bildiri No.189, 27 - 29 Kasım.
- Lienhard, J.H., 2003, A Heat Transfer Text Book, *Third Ed., Phlogiston Press*, Cambridge, Massachusetts.

- Özer, F. G., 2011, Nonlinear Yüklü Sistemde Filtreleme ve Güç Kompanzasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Pacheco, D., R. C., Oliveira, J. C., Vilaca, A. L. A., 2000, Power Quality Impact On Thermal Behavior and Life Expectancy of Isulated Cables, *IEEE Harmonics and Quality of Power, 9th International Conference*, pp.893-898.
- Sarathi, R., Nandini, A., Tanaka, T, 2003, Thermal Analysis Of Thhe Influence Of Nonlinear, Un Balanced and Asymmetric Loads On Current Conducting Capacity Of LV-Cables, *Power Tech Conference Proceedings, IEEE Bologna*, 23-26 Haziran.
- Sarathi, R., Nandini, A., Tanaka, T, 2012, Understanding Electrical Treeing Phenomena in XLPE Cable Insulation Under Harmonic AC Voltages Adopting UHF Technique, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.19, Iss.3, p.903-909.
- Şahin, Y. G., 2006, Harmoniklerin Yeraltı Güç Kablolarına Etkisinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli.
- Vardar, T., Çam, E., Yalçın, E., 2010, Reaktif Güç Kompanzasyonu ile Enerji Verimliliği ve Kamu Kurumlarında Reaktif Güç Kompanzasyonu, *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol.2, No.2, Ankara.
- Vardar, T, Yıldırım F., Çam, E., 2011, Yeni Nesil Kompanzasyon Sistemi SVC, *TMMOB EMO Ankara Şubesi Haber Bülteni 2011/4*, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Kadir OLCAY
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa – 31/03/1992
Telefon : 0539 420 55 42
Faks : -
e-mail : kadir.olcay06@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Ertuğrulgazi Anadolu Lisesi, Yenişehir, Bursa	2010
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya	2011
Yüksek Lisans	: Konya Teknik Üniversitesi, Selçuklu, Konya	Halen
Doktora	: -	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2013	DSİ Deriner Hidroelektrik Santrali	Stajyer
2014	Global Enerji Elektrik Üretimi A.Ş.	Stajyer
2016	Nursoy Mühendislik LTD. ŞTİ.	Proje Mühendisi
2016	Nursoy Mühendislik LTD. ŞTİ.	Proje Müdürü
2018	Nursoy Enerji A.Ş.	Şirket Müdürü

UZMANLIK ALANI

Elektrik-Elektronik Mühendisliği

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

Olçay Kadir, Çetinkaya Nurettin, 2018, “Experimental Analysis of The Effects of Harmonics and Temperature On Lifespan of Low Voltage Cables”, IPASJ International Journal of Electrical Engineering, Vol.6, Iss.4.