



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TÜNEL OTOMASYON SİSTEMLERİNDE HARMONİK KİRLENMENİN
KOMPANZASYONA ETKİLERİ**

Furkan ARSLAN

DANIŞMAN

Doç. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

Mayıs, 2022

TEZ KABUL VE ONAYI

Furkan ARSLAN tarafından, **Doç. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU** danışmanlığında hazırlanan " **TÜNEL OTOMASYON SİSTEMLERİNDE HARMONİK KİRLLENMENİN KOMPANZASYONA ETKİLERİ** " başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **10/06/2022** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi		
	İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Doç. Dr. Cengiz Polat	
	UZUNOĞLU	
	İstanbul Üniversitesi-	☒
	Cerrahpaşa	Kabul
	Elektrik-Elektronik	☐
	Mühendisliği Anabilim Dalı	Ret
ÜYE	Doç. Dr. Aysel ERSOY	
	İstanbul Üniversitesi-	☒
	Cerrahpaşa	Kabul
	Elektrik-Elektronik	☐
	Mühendisliği Anabilim Dalı	Ret
ÜYE	Doç. Dr. Serkan KURT	
	Yıldız Teknik Üniversitesi	☒
	Elektrik ve Otomasyon	Kabul
	Anabilim Dalı	☐
		Ret

Bu tez çalışmasını eşim Papatya'ya, oğlum Yusuf'a ve doğacak olan kızım Zeynep'e ithaf ediyorum...

BÜTÇE DESTEKLERİ

TÜNEL OTOMASYON SİSTEMLERİNDE HARMONİK KİRLLENMENİN KOMPANZASYONA ETKİLERİ

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.



TEŞEKKÜR

Vecdi Diker Tüneli'nde çalışan İstanbul Büyükşehir Belediye çalışanları ile yüksek lisans eğitimim boyunca ve tez hazırlama sürecinde yardımlarını esirgemeyen, bilgisi ve desteğiyle sürekli yönlendirmelerine ihtiyaç duyduğum Doç. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU'na katkılarından dolayı en derin saygı ve şükranlarımı sunarım.

Mayıs 2022

Furkan ARSLAN



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI	ii
BEYAN	iii
BÜTÇE DESTEKLERİ	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ.....	xii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	xiii
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	4
2.1. TEMEL ELEKTRİK KAVRAMLARI.....	4
2.1.1. Elektrik İletim Sistemine Genel Bakış	6
2.1.2. Elektrik Dağıtım Sistemine Genel Bakış	8
2.1.3. Elektriksel Güç Çeşitleri	8
2.2. KOMPANZASYON	10
2.2.1. Kompanzasyon Tesisinin Düzenlenmesi	11
2.2.1.1. Bireysel Kompanzasyon.....	12
2.2.1.2. Grup Kompanzasyonu	14
2.2.1.3. Merkezi Kompanzasyon.....	15
2.2.2. Kompanzasyon Sistemleri.....	16
2.2.2.1. Şönt Reaktörlü Kompanzasyon.....	16
2.2.2.2. Statik Kontaktörlü Kompanzasyon	17
2.2.2.3. Sürücülü Reaktif Röleli Kompanzasyon	17
2.2.2.4. Orta Gerilim Referanslı Kompanzasyon	18
2.2.2.5. Harmonik Filtreli Kompanzasyon	18
2.3. HARMONİK	19

2.3.1. Harmoniklerin Matematiksel Analizi.....	20
2.3.1.1. Bozulma (B).....	22
2.3.1.2. Toplam Harmonik Bozulması (THB).....	22
2.3.1.3. Tekil Harmonik Bozulma (HB).....	23
2.3.1.4. Toplam Talep Bozulma (TTB).....	23
2.3.2. Harmonik Kirlenmenin Sisteme Etkileri.....	23
2.3.3. Harmoniklerin Neden Olduğu Rezonans Olayları	25
2.3.4. Harmonik Filtreler.....	26
2.3.4.1. Pasif Filtreler	26
2.3.4.2. Aktif Filtreler.....	27
3. YÖNTEM	28
3.1. TÜNEL ELEKTROMEKANİK SİSTEMLERİNDE KULLANILAN ELEKTRİK EKİPMANLARI	28
3.1.1. Jeneratör	29
3.1.2. Kesintisiz Güç Kaynakları	30
3.1.3. Aydınlatma Sistemleri.....	33
3.1.4. Yangın Algılama ve Kontrol Sistemleri.....	36
3.1.5. Trafik İzleme ve Kamera Sistemleri	37
3.1.6. Kamu Anons Ses ve Acil Durum (SOS) Sistemleri.....	38
3.1.7. Havalandırma Sistemleri.....	40
3.1.8. Enerji Analizörü	42
4. BULGULAR	44
4.1. İŞLETME YÜK ANALİZİ.....	44
4.2. SİSTEM YÜK ALTINDAYKEN KOMPANZASYON VE HARMONİK İNCELEMESİ.....	46
4.2.1. Sistemde 2’li Gruplar Halinde 0’dan 6’ya Kadar Olan Jet Fanlar Devreye Girerken Kompanzasyon ve Harmonik Analizi	49
4.2.2. Sistemde 2’li Gruplar Halinde 6’dan 14’e Kadar Olan Jet Fanlar Devreye Girerken Kompanzasyon ve Harmonik Analizi	52
5. TARTIŞMA.....	56
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	58
KAYNAKLAR.....	60
EKLER	64
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI	65
ETİK KURUL İZİN YAZISI	66

KURUM İZNİ YAZILARI.....	67
ÖZGEÇMİŞ	68



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: İletken Üzerinde Elektron ve Akım Yönleri [34].	4
Şekil 2.2: Örnek Bir Doğrusal Akımlı Voltaj Gösterimi.	5
Şekil 2.3: Alternatif Akım.	5
Şekil 2.4: İletim ve Dağıtım Hattının Genel Görünümü [12].	6
Şekil 2.5: İletim ve Dağıtım Şebekesinin Enterkonnekte Sistemde Görünümü [41].	7
Şekil 2.6: Alternatif Akımda Faz Farkı.	9
Şekil 2.7: Güç Faktörü.	9
Şekil 2.8: Reaktif Gücün Üretildiği Yerde Tüketilmesi Gerekliliğinin Gösterimi [12].	11
Şekil 2.9: Omik, Endüktif ve Kapasitif Sistemin Grafikte Gösterimi [33].	11
Şekil 2.10: Motorların Sargı Uçlarına Bağlı Olan Kondansatör Örnekleri [40].	14
Şekil 2.11: Örnek Bir Grup Kompanzasyon Gösterimi [12].	15
Şekil 2.12: Örnek Bir Merkezi Kompanzasyon Devre Şeması Gösterimi [35].	16
Şekil 2.13: Şönt Reaktör [36].	17
Şekil 2.14: Statik Kontaktör [37].	17
Şekil 2.15: Tristörlü Reaktif Röle [38].	18
Şekil 2.16: Harmonik Filtreli Kompanzasyon Panosu.	19
Şekil 2.17: Harmonik Frekans Seviyelerinin Gösterimi [16].	20
Şekil 2.18: Pasif ve Aktif Filtre Şematik Gösterimi [39].	26
Şekil 3.1: Tünellerde Kullanılan Elektromekanik Sistemlerin Örnek Gösterimi [42].	28
Şekil 3.2: Jeneratör Transfer Panosu Tek Hat Şeması.	29
Şekil 3.3: Tünel İşletme Merkezinde Jeneratör Gösterimi.	30
Şekil 3.4: Tünelde Kullanılan İnform Markalı UPS Gösterimi.	31

Şekil 3.5: Aydınlatma Panosu Tek Hat Şeması.....	32
Şekil 3.6: UPS Panosu Tek Hat Şeması.	33
Şekil 3.7: UPS Panosu Tek Hat Şemasının Devamı.....	33
Şekil 3.8: Tünelde Kullanılan İsbak LED Armatürü.....	34
Şekil 3.9: Tünelin Ümraniye Giriş Kısmı.....	35
Şekil 3.10: Tüneldeki Aydınlatmaların SCADA Ekranındaki Gösterimi.	36
Şekil 3.11: Tüneldeki Yangın Algılama Sistemi Sensor Kablosunun Gösterimi.....	37
Şekil 3.12: Tünel Girişinde Direk Üzerinde Bulunan Kamera Sistemi.....	37
Şekil 3.13: Tünel Girişinde Bulunan DMI Yapısı.....	38
Şekil 3.14: Tünel İşletme Merkezi Trafik Kameralarının SCADA Ekranında Gösterimi.	38
Şekil 3.15: Tünelde Kullanılan Kamu Anons Sistemi.....	39
Şekil 3.16: Tünel Girişinde Kullanılan Acil Durum Sistemi.	39
Şekil 3.17: Bir Tünelde Kullanılan Jet Fan Gösterimi [47].....	40
Şekil 3.18: Tüneldeki 2 Adet Örnek Jet Fanın Tek Hat Şeması Gösterimi.....	41
Şekil 3.19: Tüneldeki Enerji Analizörü.....	42
Şekil 4.1: Ana Dağıtım Panosu Tek Hat Şeması.....	44
Şekil 4.2: Ana Dağıtım Pano Odası.....	45
Şekil 4.3: Kompanzasyon Panosundaki Kapasitörlerin Gösterimi.....	47
Şekil 4.4: Kompanzasyon Panosundaki Şönt Reaktörlerin Gösterimi.	47
Şekil 4.5: Tünelde 8 Adet Jet Fanın Devrede Olduğu Gösteren SCADA Ekranı.	52

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Sistemden Çekilen Endüktif ve Kapasitif Enerjinin EPDK'ya Göre Oranları.	12
Tablo 2.2: Bazı Güç ve Gerilimlerde Transformatörlerin Kompanzasyonu İçin Gerekli Kondansatör Güçleri.....	13
Tablo 2.3: Temel Frekans Değeri 50 Hz Olan Bir Sinüsoidal Dalganın Harmonik Seviyeleri.	19
Tablo 2.4: IEEE Gerilim Harmonik Bozulma Sınır Değerleri.	24
Tablo 2.5: IEEE Alçak Gerilim İşletmeleri Harmonik Bozulma Sınır Değerleri.	24
Tablo 4.1: Sistem En Düşük Güç Ayarlarında Devredeyken Enerji Analizöründeki Değerler.	48
Tablo 4.2: k Faktörü Hesaplama Tablosu.....	49
Tablo 4.3: 6 Jet Fan Devreye Girene Kadar Güç Kademelerinin Analizleri.....	50
Tablo 4.4: 6'dan 13'e Kadar Olan Jet Fanlar Devreye Girene Kadar Güç Kademelerinin Analizleri.	53

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
S	: Görünen Güç
Q	: Zahiri Güç
P	: Aktif Güç
U	: Gerilim
I	: Akım
R	: Direnç
L	: İndüktans
C	: Kondansatör
Z	: Empedans
F	: Frekans
Vf	: Faz Gerilimi
Vh	: Hat Gerilimi
Ip	: Aktif Akım
Iq	: Reaktif Akım

Kısaltmalar	Açıklama
V	: Volt
A	: Amper
AA	: Alternatif Akım
DA	: Doğrusal Akım
VA	: Volt Amper
EMK	: Elektromotor Kuvveti
OHM	: Direncin Birimi
M	: Motor
TR	: Tranformatör
S	: Saniye
LED	: Işık Yayan Diyot
UPS	: Kesintisiz Güç Kaynağı

TTB	: Toplam Talep Bozulma
THB	: Toplam Harmonik Bozulması
HB	: Tekil Harmonik Bozulma
B	: Bozulma Gücü
EPDK	: Enerji Piyasaları Düzenleme Kurulu
YG	: Yüksek Gerilim
OG	: Orta Gerilim
AG	: Alçak Gerilim
GF	: Güç Faktörü
CAD/CAM	: Bilgisayar Destekli Dizayn ve Tasarım Yazılımları
IEEE	: Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
NYN	: Yer Altında Kullanılan Elektrik Kablosu Türü
N	: Nötr Kablosu
PE	: Topraklı Kablo
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
VDE	: Elektrik, Elektronik ve Bilişim Teknolojileri Kuruluşu
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
NFAP	: Ulusal Yangından Korunma Kuruluşu
CE	: Avrupa Birliği Standardı
ANSI	: Amerika Ulusal Standardları Enstitüsü
CIE	: Uluslararası Aydınlatma Komisyonu
TS	: Türkiye Standartları
DALI	: Dijital Adreslenebilir Aydınlatma Arayüzü
PLC	: Programlanabilir Mantıksal Denetleyici
CCTV	: Kapalı Devre Televizyon Sistemi
DMİ	: Değişken Mesaj İşaretleri
ADP	: Ana Dağıtım Panosu
k	: Kompanzasyon Katsayı Faktörü

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TÜNEL OTOMASYON SİSTEMLERİNDE HARMONİK KİRLENMENİN KOMPAZASYONA ETKİLERİ

Furkan ARSLAN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

Danışman : Doç. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU

Endüktif ve kapasitif etki sonucunda gerilim ve akım sinyali arasında faz farkı oluşur. Elektrik enerjisini yine elektrik enerjisine veya farklı bir enerjiye dönüştüren indüktör, elektrik motorları, kapasitörler veya benzeri elektrik ekipmanları bu faz farkına sebebiyet verebilir. Harmonikler enerji verimliliğini önemli oranda düşürebilir, elektriğin üretim ve tüketim gibi tüm aşamalarında teknik sorunlara ve maddi kayıplara yol açabilir. Motorda manyetik alan meydana getirmeye yarayan endüktif reaktif güç, elektromekanik sistemlerde gereksiz yere enerji kaybına neden olmaktadır. Reaktif enerjinin motora yakın bir yerden kompanzasyon tesisleri ile azaltılması ve böylece tesisin aynı işi daha az akımla yapması mümkündür. Gücü yüksek olan ve özellikle çok yük çeken motorlarda güç kaybı daha gözle görülür seviyede olmaktadır. Bu problemi çözmek için kullanılacak olan ekipman seçimi yapılırken harmonik etkisi hesaplanmalı ve daha az harmonik üreten ekipmanlar kullanılmalı, harmonik üreten ekipman kullanılıyorsa filtre ile harmoniğin minimize edilmesi gerekmektedir. Tünel otomasyon sistemlerinde bulunan elektromekanik sistemlerde çekilen yüksek güçler sebebiyle kompanzasyon ihtiyacı bulunmaktadır. Tünelde özellikle çok güç çeken jet fanlar aynı anda yüklendiği zaman sistemde reaktif güç çekme ihtiyacı oluşacaktır, jet fanlar devrede olmadığı zaman ise sistem endüktif etki altında olacağı için yine kompanzasyon sistemine giren şönt reaktör ihtiyacı olacaktır.

Bu tez çalışmasında İstanbul Üsküdar'da bulunan Vecdi Diker Tüneli'ndeki elektrik ekipmanlarının elektriksel değerleri incelenmiştir. Vecdi Diker Tüneli'nde jet fanlar, aydınlatma sistemleri, yangın algılama sistemleri, kamera izleme sistemleri, kesintisiz güç

kaynakları gibi ekipmanlar kullanılmaktadır. Sistem değişken yük altındayken harmonik ve kompanzasyon incelemesi yapılmıştır. Tünelde sisteme bağlı olan enerji analizörleriyle ve uzaktan kontrollü otomasyon sistemleriyle çevrimiçi olarak aktif ve reaktif güç, güç faktörü, akım, gerilim seviyeleri incelenmiştir. |

Mayıs 2022 , |86| sayfa.

Anahtar kelimeler: |elektriksel güç, kompanzasyon, harmonik, tünel otomasyonu, elektromekanik sistemler |



ABSTRACT

|M.Sc. THESIS|

|HARMONIC DISTORTION EFFECTS ON COMPENSATION AT TUNNEL AUTOMATION SYSTEMS |

|Furkan ARSLAN|

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronics Engineering

Programme of Electrical and Electronics Engineering

|Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU |

As a result of inductive and capacitive effects, a phase difference occurs between the voltage and current signal. Inductor, electric motors, capacitors or similar reactive electrical equipment that converts electrical energy to electrical energy or a different energy can cause this phase difference. Harmonics can significantly reduce energy efficiency and may cause technical problems and economic problems at all parts of electricity generation, transmission and distribution. Inductive reactive power, which creates a magnetic field in the motor, causes unwanted energy loss in electromechanical systems. It is possible to reduce the reactive energy by compensation systems which is connected to the motor, so the power plant can operate with less current and same amount of work. Power loss is more disturbing in high powered motors and especially in heavy loads. In order to solve this problem while selecting the equipment to be used, the harmonic effect should be taken into consideration and less harmonics producing equipment should be used. There is a need for compensation due to the high reactive power in the electromechanical systems especially in the tunnel automation systems. In the tunnels, when the jet fans, which draw considerably high power, are operated at the same time, there will be naturally a need for reactive power in the system.

In this thesis, Vecdi Diker Tunnel in Üsküdar, Istanbul is analyzed and the electrical values of the electrical equipment in the tunnel are examined. Equipment such as jet fans, lighting systems, fire detection systems, camera monitoring systems, uninterruptible power supplies are used in the Vecdi Diker Tunnel. When the system is under variable load, harmonic and

compensation analyses are conducted. Active and reactive power, power factor, current and voltage levels are interpreted on-line with energy analyzers and remote controlled automation systems connected to the system in the tunnel.

May 2022, 86 pages.

Keywords: electrical power, compensation, harmonic, tunnel automation, electromechanical systems



1. GİRİŞ

Enerji gereksinimi dünyada her geçen gün gittikçe artmaktadır. Elektrik enerjisinin verimli kullanılması ülkemizde olduğu kadar Dünya’da da önemli olduğu açıktır. Mesken ve sanayi sektöründe kullanılan enerjinin büyük bölümü elektrik enerjisidir. Elektrik enerjisinin yaklaşık %72’lik kısmı mesken dışı sanayi amaçlı kullanılmaktadır [1]. Elektrik enerjisi santraller aracılığı ile üretilir. Enerjisi üretilen santral tipleri olarak termik santraller, hidroelektrik santraller, nükleer santraller ve yenilenebilir enerji kaynakları olan güneş panelleri ile rüzgar tribünleri örnek olarak gösterilebilir. Elektrik enerjisinin üretimden tüketime doğru iletilerek dağıtılması gerekmektedir.

Elektrik santralleri ile tüketim merkezleri arasındaki bağlantı, iletim şebekelerinin kullandığı enterkonnekte sistemler ile sağlanır ve ayrıca elektrik santralleri ile üretilen elektrik enerjisini kullanıcılara iletmek için oluşturulan bileşik ağa ise elektrik şebekesi denir. Elektrik şebekesi, elektrik gücü üreten enerji santralleri, üretilen elektriği tüketim merkezlerine aktaran iletim hatları ve kullanıcılara bağlantı sağlayan bileşik dağıtım hatlarından oluşur. Elektrik enerjisinin üretimden tüketime en az kayıpla taşınmasının yolları ve hesapları yapılmalıdır [29].

Yapılan yeni yatırımlar ve mevcut kaynakların verimli olarak kullanılması gerektiği için elektrik enerjisi ihtiyacı sürekli artmaktadır. Endüstride yük talebinin büyümesi ile yaygın olarak kullanılan elektrik enerjisi ihtiyacı artmış, mevcut durumda olan enerji kaynaklarının daha verimli ve kaliteli bir şekilde kullanılması konusunda çalışmalar yapılmasına ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının yaygınlaşmasına vesile olmuştur [2].

Santrallerde üretilen enerji, tüketim noktasına kadar olan aşamalarda aktif ve reaktif akım olarak, transformatörlerde, kablolarda veya havai hatlarda istenmeyen kayıplar meydana getirmektedir. Elektrik şebekelerinde transformatörler, motorlar, indüksiyon motorları, jeneratörler, ısıtma sistemleri, ark fırınları, aydınlatma sistemleri aktif güç ile birlikte reaktif güç tüketirler ve bunun sonucunda güç tüketim dengesi bozulup güç katsayısında dengesizlik oluşur [30]. Reaktif güç tüketimi dengesizleşirse, güç katsayısının kontrolsüz düşüşüyle birlikte elektrik şebekelerindeki dağıtım tesislerinin aktif güç açısından olması gereken kapasitenin çok altında çalışması gözlemlenebilir. Bu sebeple şebekede enerji kaybı oluşacağı gibi tesisin

ekonomik açıdan işletilmesi zora girebilir ve oluşabilecek enerji verimsizliği de diğer bir sorun olarak karşımıza çıkabilir [31].

Elektrik enerjisi bakımından akım ve gerilim büyüklüklerinin dalga şekilleri teorik olarak saf sinüs biçiminde olmalıdır. Dalga şeklinin sinüs olması için şebekede bulunan güç kaynağı ile sistemdeki yükün özellikleri önemli olup şebekenin sinüs dalgalı kaynakla beslenmesi ve doğrusal yüklerle yüklenmesi istenir [4]. Elektrik şebekelerinde motorlar, jeneratörler ve aydınlatma sistemleri gibi doğrusal olmayan yükler, gerilim ve akımın sinüs dalga biçiminin bozulmasına ve sistemde harmonik bozulmanın oluşmasına sebep olmaktadır. Harmonik kirlenmeler şebekelerde rezonans problemlerine, koruma elemanlarında zamansız arızalara, sigorta atmalarına, elektrik ekipmanlarının aşırı ısınmalarına ve ömürlerinin azalmasına, ayrıca elektromanyetik cihazların çalışma esnasında gürültülü ses çıkarmasına sebebiyet vermektedir [28]. Tüm bunların sonucunda harmonik kirlenme sistemde enerji kaybına sebebiyet vermekte, elektronik cihazların çalışma kapasitesini düşürmekte ve işletme maliyetinin yükselmesine sebep olmaktadır.

EPDK, güç faktörlerinin belirli bir değerin aşağısına düşmemesi için elektrik yönetmelikleri ile tarifelere zorlayıcı cezalar getirerek elektrik işletmelerinin enerji kayıplarını önlemektedir. Şebekelerde kullanılan kapasitörler, kullanıldığı amaca göre reaktif güç üretebilirler. Aktif ve reaktif güç talebi jeneratörlerle karşılanırsa da sistemin işletilmesi sırasında oluşacak teknik ve ekonomik sebeplerden dolayı bu yöntem kullanılmamaktadır. Bu sebeple sistemde aktif ve reaktif güç dengesinin sağlanması için kullanılabilecek en önemli yöntem kompanzasyondur [27].

Teknolojik gelişmelerle birlikte artan elektrik enerji talebi sonucunda mevcut enerjinin en uygun verimlilik ile kullanılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Son yıllarda dünyanın yüzleştiği enerji krizi, insanları yeni enerji kaynaklarına, sistemlerde enerji optimizasyonu sağlamaya ve elektrik enerjisinde kaybı minimuma indirmeye yöneltmiştir [5]. Elektrik enerjisinin iletimini sağlarken verimini yükseltmek ve enerji kaybını düşürmek amacıyla reaktif güç kompanzasyonu kullanımının önemi giderek artmaya başlamıştır.

İdeal bir elektrik işletmesinde reaktif güç kompanzasyonu gerekli olup devrenin her aşamasında gerilim ile frekans sabit tutulmalı ve enerji sinyali harmoniksiz olmalıdır. Ayrıca enerji yönetmeliklerine istinaden güç katsayısı bire yakınsamalıdır. Harmonik kirlenmeyi azaltmak, kompanzasyon sistemlerinin verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak ve ayrıca işletmelerdeki

enerji optimizasyonunu arttırmak için harmonik filtre kullanılması ve sistemde oluşan harmoniklerin filtrelenmesi gerekmektedir [6].

Şebekede harmonik kirlenmenin azaltılması için birtakım önlemler alınmakta olup pasif veya aktif filtreler bunlara örnek olarak gösterilebilir. Pasif filtreler genelde performans ve boyutu sebebiyle verimli olmamakla birlikte aktif filtreler ise reaktif güç kompanzasyonunda kullanılmakta olup gerilim ve akımı dengeleyerek harmonik kirlenmeyi azaltırlar [7].

Bu çalışmada Vecdi Diker Tüneli baz alınmış, karayolu tüneline bulunan sistemler değerlendirilmiştir. Vecdi Diker Tüneli'ndeki ekipmanların detaylarına girilip sistemlerin işlevleri ana hatlarıyla incelenmiştir. Sistemde bulunan ekipmanların elektriksel değerleri hesaplanmıştır. Ekipmanların tek hat şemaları ve SCADA ekranında gösterimleri şekiller ile desteklenmiştir. Tek hat şemaları üzerinden sistem analizleri yapılmıştır.

Tünel işletme merkezinde saha çalışması yapılmış olup, sistemin kurulu gücü ve sistem boşayken güç analizleri yapılmıştır. Sistem yüke bindirildiğinde kademeli olarak güç, reaktif güç ve harmonik değerleri incelenmiştir. Sahadan alınan veriler ile enerji analizörünün değerleri karşılaştırılmıştır. Sistemin yük durumlarına göre detaylı değerlendirilmesi yapılmış olup harmonik ve kompanzasyonun tünel otomasyon sistemlerinin çalışmasına olan etkileri incelenmiştir.

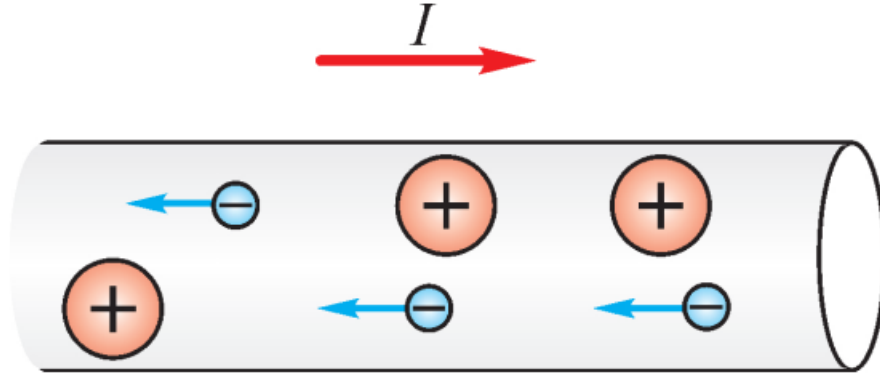
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. TEMEL ELEKTRİK KAVRAMLARI

İletkenler, dış elektronları çekirdekleriyle nispeten zayıf bağlara sahip atomlardan yapılmıştır. Bir grup metal atomu bir arada olduğunda, dış elektronlarını birbirleriyle paylaşırlar ve belirli bir çekirdekle ilişkili olmayan bir elektron "sürü" yaratırlar. Çok küçük bir elektrik kuvveti elektron sürüsünü hareket ettirebilir. Bakır, altın, gümüş ve alüminyum iyi iletkenlerdir [32].

Yalıtkanlar, dış elektronları çekirdeklerine sıkıca bağlı olan malzemelerdir. Elektrik kuvvetleri bu elektronları serbest bırakamaz. Bir elektrik kuvveti uygulandığında, atomun etrafındaki elektron bulutları, kuvvete tepki olarak gerilir ve deforme olur ancak elektronlar ayrılmaz. Cam, plastik, taş ve hava ve benzeri yalıtkanlarda elektrik kuvveti elektronları koparmak için yeterince yükseğe çıkarılabilir ve buna bozulma denir.

Akım, elektronların yük akışıdır. Yük bir akımda akar. Bir elektrik akımı, bir elektrik iletkeni veya uzayda hareket eden elektronlar veya iyonlar gibi yüklü parçacıkların akışıdır. Bir yüzeyden veya bir kontrol hacmine elektrik yükünün net akış hızı olarak ölçülür [8].

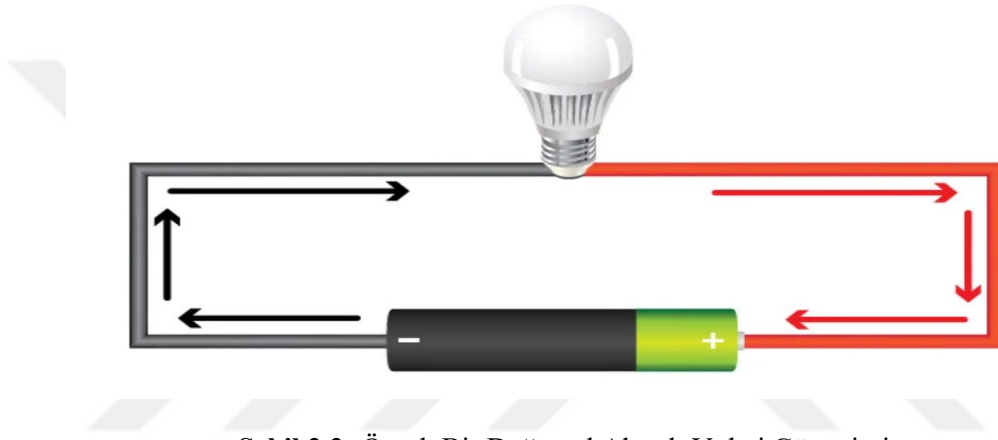


Şekil 2.1: İletken Üzerinde Elektron ve Akım Yönleri [34].

Hareket eden parçacıklara, iletkene bağlı olarak çeşitli parçacık türlerinden biri olabilen yük taşıyıcıları denir. Elektrik devrelerinde yük taşıyıcılar genellikle bir tel boyunca hareket eden elektronlardır. Yarı iletkenlerde elektronlar veya delikler olabilirler. Elektronlar metallerde serbestçe hareket edebildiğinden, metallerde akımı oluşturan etkidir. Metal atomlarındaki

pozitif çekirdekler yerinde sabitlenir ve akıma katkıda bulunmaz. Elektronlar negatif bir yüke sahip olsalar ve çoğu elektrik devresinde neredeyse tüm işi yapsalar da pozitif bir yükün hareket edeceği yön olarak pozitif bir akım tanımlanır. Yüklü nesneler elektrik ve manyetik kuvvetlere tepki olarak hareket eder. Bu kuvvetler elektrik ve manyetik alanlardan gelmektedir.

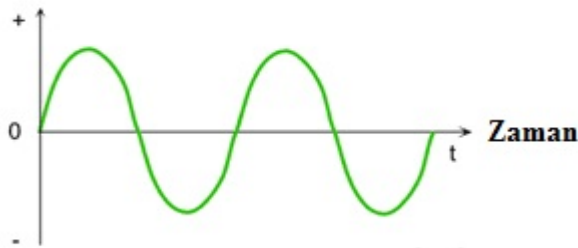
Voltaj, bir elektrik devresinin güç kaynağından gelen ve yüklü elektronları (akım) iletken bir döngü boyunca iten ve onların bir ışığı aydınlatmak gibi işler yapmalarını sağlayan potansiyel farkıdır. Elektriğin ilk günlerinde voltaj, elektromotor kuvveti (EMK) olarak biliniyordu. Bu nedenle OHM Yasası gibi denklemlerde voltaj V sembolü ile temsil edilir.



Şekil 2.2: Örnek Bir Doğrusal Akımlı Voltaj Gösterimi.

Voltaj ve "potansiyel fark" terimi genellikle birbirinin yerine kullanılır. Potansiyel fark, bir devredeki iki nokta arasındaki potansiyel enerji farkı olarak daha iyi tanımlanabilir. Fark miktarı (volt olarak ifade edilir), elektronları belirli bir noktadan diğerine taşımak için ne kadar potansiyel enerji bulunduğunu belirler. Miktar, potansiyel olarak devre aracılığıyla ne kadar iş yapılabileceğini tanımlar. Devreler, küçük bir cihazdan bir ev aletine ve bir endüstriyel motora kadar bir yüke enerji vermek için kullanılır. Voltaj, alternatif akım (AA) voltajı veya doğru akım (DA) voltajıdır.

Alternatif Akım



Şekil 2.3: Alternatif Akım.

2.1.1. Elektrik İletim Sistemine Genel Bakış

Elektrik iletimi, elektrik santrallerinde (hidro, termik ve rüzgar gibi) üretilen büyük miktarlardaki elektriğin tüketiciler tarafından nihai kullanım için uzun mesafelere taşınması işlemidir. İletim normalde uzun mesafelerde meydana gelen kayıpları azaltmak için yüksek gerilimde (154 kV veya üzeri) gerçekleşir. Elektrik genellikle nüfuslu bir alanın yakınındaki bir trafo (transformatör) merkezine iletilir. Trafo merkezinde, yüksek voltajlı elektrik, tüketici kullanımına uygun daha düşük voltajlara dönüştürülür ve daha sonra yerel elektrik kuruluşlarının sahip olduğu ve işlettiği nispeten düşük voltajlı elektrik dağıtım hatları aracılığıyla son kullanıcılara iletilir.



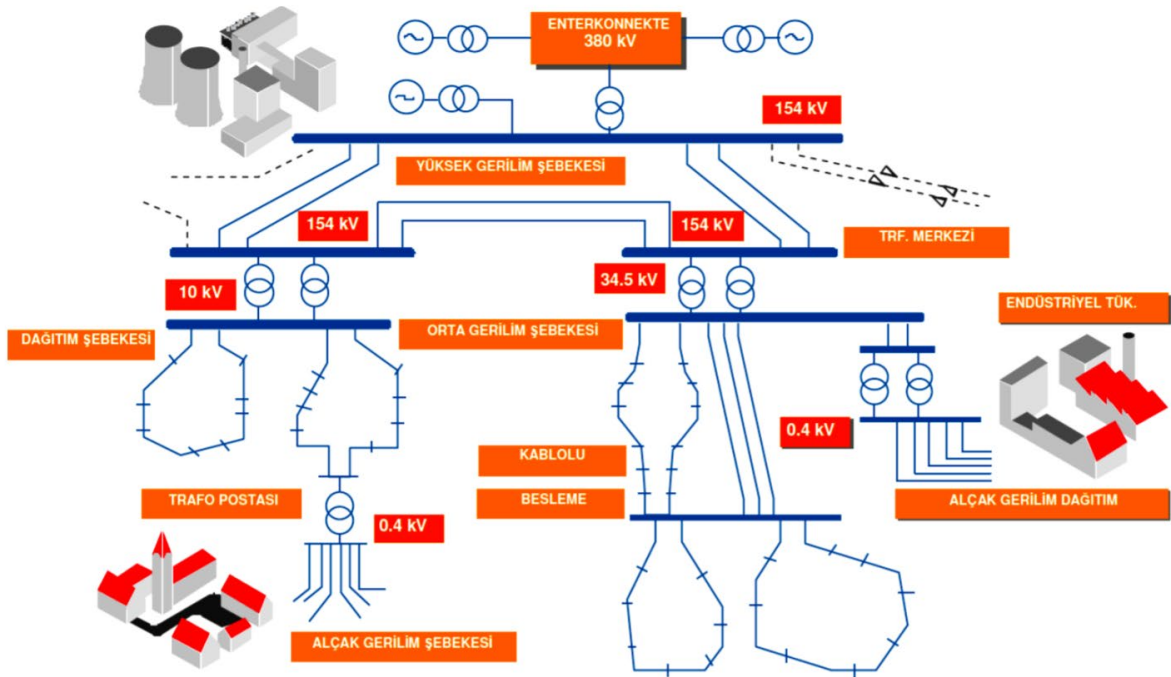
Şekil 2.4: İletim ve Dağıtım Hattının Genel Görünümü [12].

Yüksek voltajlı elektrik iletim hatlarının ve ilgili tesislerin ana bileşenleri olarak iletim kuleleri, iletkenler ile iletim hatları, bağlantı elemanları ve trafo merkezleri gösterilmektedir [9]. İletim kuleleri, elektrik iletim sisteminin en önemli elemanlarından biridir. Kuleler, yerden yüksek voltajlı iletkenleri (elektriği ileten kablolar, aksi halde hatlar) destekler ve bunları diğer hatlardan, binalardan ve insanlardan ayırır.

İletkenler, elektriği trafo merkezlerine taşıyan iletim kuleleri üzerindeki kablolardır. İletkenler esas olarak bükülmüş metal şeritlerden yapılmıştır, ancak daha yeni iletkenler, daha hafif ağırlıkla ek güç için bir alüminyum matrisinde seramik lifler içerebilir.

Hem hat inşaatı hem de bakım için iletim kulesi sahalarına erişim gereklidir. Erişim yolu inşaatı için derecelendirme ve bitki örtüsünün temizlenmesi gerekebilir. Yollar genellikle çakılıdır. Ulaşım yolları, inşaat ve arazi kullanımı sırasında ihtiyaca göre kalıcı veya geçici olabilir. Geçiş haklarının çoğunda, kalıcı erişim yolları, kuleleri ve hattı onarmak ve bakım yapmak için bir yol sağlar ve acil durumlar için kullanılabilir.

Elektrik iletimi için kullanılan yüksek voltajlar (örneğin, 154 kV), trafo merkezlerinde tüketici kullanımı için daha düşük voltajlara (örneğin, 230/380 V) dönüştürülür. Trafo merkezleri büyüklük ile konfigürasyon bakımından farklılık gösterir. Bu merkezlerin kurulumları bitki örtüsünden arındırılmış ve çakılla kaplanmış olan birkaç dönümlük alanlara yapılmaktadır. Trafo merkezlerine erişim yetkili elektrik dağıtım personeliyle sınırlı olup güvenlik için çitle çevrilmiştir. Genel olarak, trafo merkezleri, "endüstriyel" bir görünümle sonuçlanan çeşitli yapılar, iletkenler, çitler, aydınlatmalar ve diğer yapıları içermektedir.



Şekil 2.5: İletim ve Dağıtım Şebekesinin Enterkonnekte Sistemde Görünümü [41].

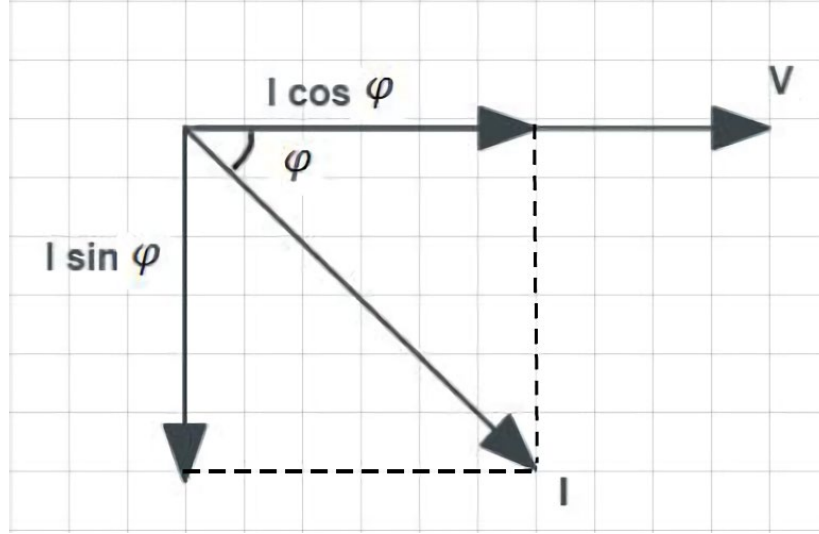
2.1.2. Elektrik Dağıtım Sistemine Genel Bakış

Elektrik enerjisi dağıtımı, elektrik enerjisinin tüketiciye teslimindeki son aşamadır ve elektriği iletim sisteminden bireysel tüketicilere taşır. Dağıtım trafo merkezleri, iletim sistemine bağlanır ve transformatör kullanımı ile iletim gerilimini düşürür. Birincil dağıtım hatları, bu orta gerilim gücünü müşterinin tesislerinin yakınında bulunan dağıtım transformatörlerine taşır. Dağıtım trafo merkezleri, voltajı aydınlatma, endüstriyel ekipman ve ev aletleri tarafından kullanılan kullanım gerilimi olan 230/380 V'a düşürür. Genellikle birkaç müşteri, ikincil dağıtım hatları aracılığıyla bir transformatörden beslenir. Ticari ve konut müşterileri, hizmet kesintileri yoluyla ikincil dağıtım hatlarına bağlanır. Çok daha büyük miktarda güç talep eden müşteriler, doğrudan birincil dağıtım düzeyine veya alt iletim düzeyine bağlanabilir.

Transformatörler, elektrik güç dağıtım sisteminde çok önemli bir elektrik makinesidir. Şebeke transformatörleri, tipik olarak kamu hizmetleri tarafından müşterilerinin binalarına giren elektriğin voltajını düşürmek için kullanılan yüksek voltajlı dağıtım transformatörleridir. Dağıtım transformatörleri, elektrik dağıtım sisteminde en yaygın kullanılan elemanlardan biridir. Şebeke iletim sistemlerindeki yüksek voltaj seviyelerinden elektriği, işyerlerinde ve evlerde güvenle kullanılacak voltajlara dönüştürürler. Dağıtım transformatörleri ya bir tepe direğine ya da bir beton üzerine monte edilir. Çoğu ticari ve endüstriyel bina, şebekeden alınan elektriğin voltajını aydınlatma sistemine, bilgisayarlara ve diğer elektrikle çalışan ekipmanlara güç sağlamak amacıyla istenilen seviyelere düşürmek için birkaç düşük voltajlı transformatör gerektirir.

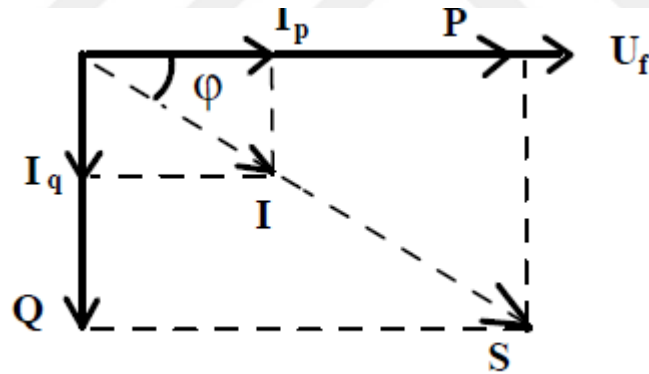
2.1.3. Elektriksel Güç Çeşitleri

Birim zamanda yapılan işe güç adı verilir. Doğrusal akım (DA) devreye sabit akım verirken, alternatif akım (AA) faz farkı ile akım vermektedir. Alıcının akım ile gerilimi arasında faz farkı vardır. Bu faz farkı yük dirençli değilse sinüsoidal şeklindedir.



Şekil 2.6: Alternatif Akımda Faz Farkı.

Şekil 2.6’de görüldüğü üzere yük, direnç ve reaktanstan oluşmakta olup endüktif yük oluşmaktadır. Bu şekilde olan devrede, fazör diyagramından görüldüğü gibi akım ve gerilim arasında faz farkı var olup φ işaretiyle gösterilmiştir. Endüktif yükün gerilim kaynağında çektiği reaktif güç pozitif, kapasitif bir yükün çektiği reaktif güç ise negatiftir.



Şekil 2.7: Güç Faktörü.

Şekil 2.7’de gösterildiği üzere üç fazlı sistemlerde güç formülleri Denklem 2.1, 2.2 ve 2.3’de verilmiştir.

$$\text{Görünür Güç: } S = 3 V_f I = \sqrt{3} V_h I \quad (2.1)$$

$$\text{Aktif Akım: } I_p = I \cos \varphi \quad (2.2)$$

$$\text{Aktif Güç: } P = S \cos \varphi \quad (2.3)$$

$$\text{Reaktif Akım: } I_q = I \sin \varphi \quad (2.4)$$

$$\text{Reaktif Güç: } Q = S \sin \varphi \quad (2.5)$$

Denklem 2.1’de ifade edilen V_f faz ile nötr arasındaki faz gerilimini, V_h ise faz ile faz arasındaki hat gerilimini gerilimi göstermektedir. Ayrıca hat akımı ile görünür güç arasındaki bağlantı aşağıdaki şekilde açıklanabilir.

$$I = \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (2.6)$$

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

Aktif güç (P) ile hat akımı (I) arasında ya da görünür güç (S) arasındaki ϕ açısına faz açısı denir. Bu faz açısının kosinüsüne ise güç katsayısı denilmektedir [10].

Tüketicilerin elektrik şebekesinden çektiği görünür akım, aktif ve reaktif olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Aktif akım ile ortaya çıkan aktif güç, tüketici tarafından kullanılmaktadır. Kısaca aktif güç, motorlarda mekanik güce, aydınlatmada ise ışık akısı gibi elektriğin faydalı hale dönüştürülmüş şeklidir [11].

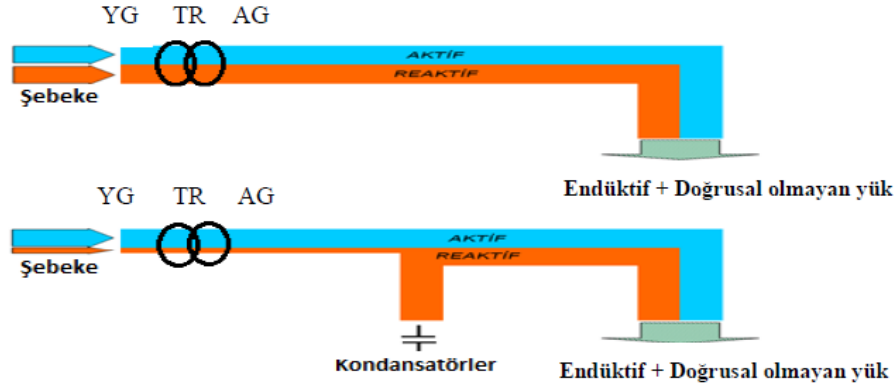
2.2. KOMPANZASYON

Elektrik şebekelerinde reaktif güç kompanzasyonu önemli bir konudur. Son yıllarda aktarılan gücün kapasitesini ve kontrol edilebilirliğini artırmak ve sistemin reaktif güç talebini verimli bir şekilde karşılamak için kompanzasyonda statik kontrolörler ve güç elektroniği bileşenleri kullanılmaktadır. Yarı iletken tabanlı anahtarlama tip invertörler ve şönt reaktif kondansatörler gibi kompanzasyon için cihazlar kullanılır [12].

Alternatif gerilim ihtiyacı olan tüketiciler elektrik şebekesinden alternatif akım çeker. Alternatif akım aktif akım ve reaktif akım olmak üzere iki ögeye ayrılır. Aktif güç aktif akım ile doğru orantılı olandır. Örnek vermek gerekirse aktif akım bir motorun milini döndüren aktif güç ile ilişkili iken motor sargılarında manyetik alan oluşmasını sağlayan reaktif güçtür. Haliyle reaktif güç tamamen yok edilirse indüksiyon prensibine göre çalışan cihazlar çalışmayacaktır. İşte kompanzasyonun amacı bu fazla çekilen reaktif gücün minimuma indirgenmesidir [13].

Aktif gücün elektrik santrallerinde üretilmesi gerekmektedir fakat reaktif gücün elektrik santralinde üretilmesiyle ilgili bir zorunluluk bulunmamaktadır. Tüketici tarafından çekilen gücün yanında kurulabilecek yardımcı sistemler ile reaktif güç üretimi yapılabilir. Yüke paralel bağlanan kapasitörler ile reaktif güç üretimi yapılması, şebekenin güç katsayısının düzeltilmesini sağlar. İhtiyaç duyulan reaktif enerji elektrik şebekesinden çekilirse devre

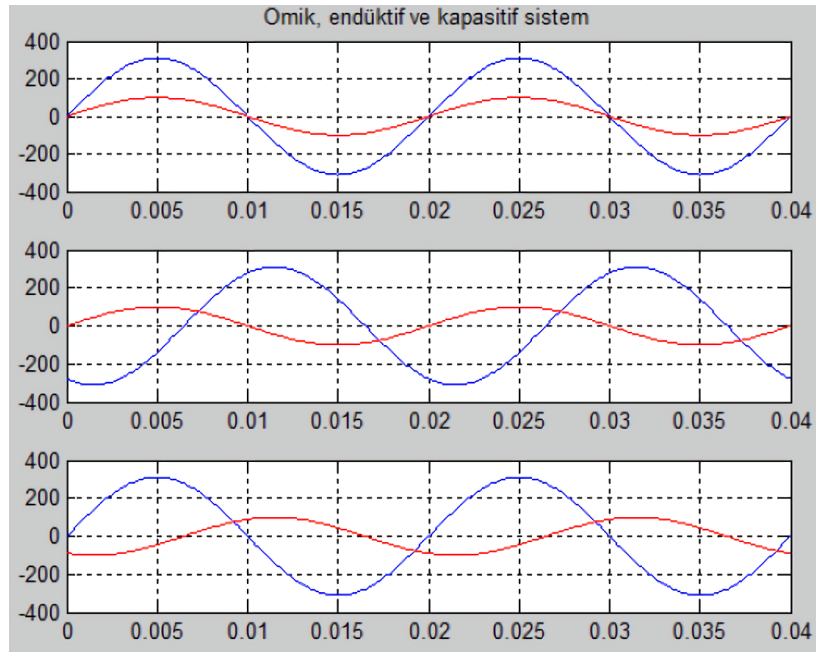
bileşenlerini gereksiz yere yükleyip güç sığasını azaltacağından işletmenin elektrik faturasını da arttırabilmektedir [14].



Şekil 2.8: Reaktif Gücün Üretildiği Yerde Tüketilmesi Gerekliliğinin Gösterimi [12].

2.2.1. Kompanzasyon Tesisinin Düzenlenmesi

Aktif güç ile birlikte sistemin ihtiyacının karşılanması için elektrik dağıtım sistemlerinde reaktif güç akışı da olmalıdır. Aktif gücün elektrik santrallerinde üretilip tüketiciye iletilmesi zorunludur ancak reaktif güç için böyle bir zorunluluk bulunmamaktadır. Reaktif güç, ihtiyaç bulunan kısımlarda istenildiği kadar değişik şekillerle üretilebilir.



Şekil 2.9: Omik, Endüktif ve Kapasitif Sistemin Grafikte Gösterimi [33].

Sinüsoidal gerilim ile akım arasındaki faz farkıyla oluşan açının kosinüsü güç faktörü (GF) olarak adlandırılmaktadır. Bu açının sıfıra mümkün olduğunda yaklaşılması,

kompanzasyonun yegâne amacıdır. EPDK'nın 2010 tarihli elektrik iletim sistemi arz güvenilirliği ve kalitesi yönetmeliğinin reaktif enerji kompanzasyonu başlıklı 11. Maddesine göre “İletim sistemine bağlı olan tüketiciler ile elektrik dağıtımını yapan tüzel kişiler; iletim sistemine bağlantıyla ilgili ölçüm noktalarında, sistemden çekilen endüktif reaktif elektrik enerjisinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranı yüzde on dördü (%14), sisteme verilen kapasitif reaktif enerjinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranı ise yüzde onu (%10) geçemez” ifadesi bulunmaktadır. Bu tanımları gösteren tablo aşağıdadır [15].

Tablo 2.1: Sistemden Çekilen Endüktif ve Kapasitif Enerjinin EPDK'ya Göre Oranları.

Tesiste Bulunup Endüktif Olan Reaktif Enerji	≤ 14
Tesiste Bulunup Endüktif Olan Aktif Enerji	
Tesiste Verilip Kapasitif Olan Reaktif Enerji	≤ 10
Tesiste Bulunup Aktif Olan Enerji	

Yapılan kompanzasyon sistemi ile tüketici tarafındaki güç faktörü düzenlenmektedir. Dağıtım sistemine bağlı ve kompanzasyonu yapılmamış bir sistemde ani güç değişimleri meydana gelebilmektedir ve bu durum gerilim değişikliğine yol açabilmektedir. Gerilimde bu şekilde ani değişimler meydana geldiği takdirde aynı sisteme bağlı olan diğer tüketicileri de olumsuz etkilemektedir. Kompanzasyonun bir amacı da gerilim ve akımdaki ani değişimleri minimuma indirmektedir. Kompanzasyon tesisleri 3 ana başlık altında incelenir.

2.2.1.1. Bireysel Kompanzasyon

Kondansatörler, kompanzasyonu yapılacak olan indüktif yüklerin şalterlerine bağlanmaktadır. En etkili kompanzasyon yöntemlerinden biridir. Çoğunlukla sabit kompanzasyon olarak yapılmaktadır. AG tarafındaki transformatörlerde, asenkron motorlarda ve aydınlatmalarda olmak üzere bireysel kompanzasyon sistemi kullanılmaktadır.

Bireysel kompanzasyon, sürekli olarak işletmede bulunan sabit güçlü tüketicilerin cihazlarına paralel olarak bağlanmak koşuluyla reaktif güç ihtiyacını karşılayan, kontaktör veya devre kesici üzerinden tüketiciyle birlikte devreye girip çıkan kompanzasyon çeşidi olarak ifade edilmektedir.

Transformatörün yükü sürekli değişebileceğinden kompanzasyon sistemi için gerekli olan kondansatör gücü, en büyük reaktif güç ihtiyacına göre seçilmez. Seçildiği takdirde düşük yüklerde uzun süreler boyunca aşırı kompanzasyon ortaya çıkabilir ve transformatör sekonder uçlarında gerilim yükselebilir. Transformatör kompanzasyonunda kullanılan kondansatörün, transformatörün boşa çektiği reaktif gücü karşılayacak şekilde olması gerekmektedir. Bundan dolayı elektrik idareleri transformatörün yüküne bağlı olmadan, nominal gücün %5 - %10 değerinde sabit kondansatör bağlanmasını tavsiye etmektedir. Tablo 2.2’de örnek olması açısından bazı transformatörlerin kompanzasyonunda kullanılan kondansatör güçleri gösterilmiştir [40].

Tablo 2.2: Bazı Güç ve Gerilimlerde Transformatörlerin Kompanzasyonu İçin Gerekli Kondansatör Güçleri.

Sıra Numarası	Temel	6 kV'a Kadar	6 – 15 kV	15 kV ve Üzeri
	Transformatör Güçleri (kVA)	Kondansatör Güçleri (kVar)		
1	10	1,5	1,5	2
2	25	2,5	2,5	3,5
3	50	5	6	8
4	63	6	8	10
5	100	8	10	12
6	125	10	10	12
7	160	10	12	15
8	200	12	15	20
9	250	15	20	25
10	315	20	20	25
11	400	20	25	30
12	500	25	30	35
13	630	30	35	40
14	1000	40	45	50
15	2000	60	65	80

Motorların kompanzasyonunda boşa çekilen kapasitif güce göre kondansatör gücünün hesaplanması gerekmektedir. Asenkron motorlar, manyetik alanın üretilmesi için endüktif reaktif güç çekerler. Motorların çektikleri reaktif güç, motorun nominal gücüne ve devir sayısına bağlıdır. Haliyle düşük devirli motorlar daha yüksek manyetik alan akımı çekmektedirler. Hatta boşa çalışan motorlar elektrik şebekesinden sadece manyetik alan akımı çekmektedirler. Yıldız-üçgen şalterlerle yol verilen asenkron motorların kompanzasyonunda kondansatörler motor sargılarının uçlarına paralel bağlanmaktadır.



Şekil 2.10: Motorların Sargı Uçlarına Bağlı Olan Kondansatör Örnekleri [40].

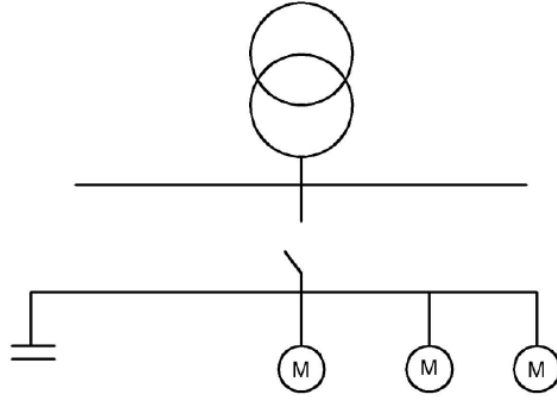
Aydınlatmada kullanılan modern lambalarda (floresan, cıva ve sodyum buharlı lambalar) bulunan yardımcı malzemelerden dolayı elektrik şebekesinden kapasitif reaktif güç çekilmektedir. Bunun sonucunda;

- Elektrik sistemlerinin gereksiz şekilde yüklenmesi ve besleme kapasitelerinin azalması,
- Gereksiz olarak çekilen akımın enerji kaybına sebep olarak karşımıza çıkar.

Aydınlatma sistemlerindeki endüktif gücün kondansatörler yardımıyla ve çekilen kapasitif güç ile kompanse edilmesi ile bu kayıplar ortadan kalkmaktadır. Bireysel kompanzasyon dezavantajı, yatırımı uzun vadede geri döndürmesidir.

2.2.1.2. Grup Kompanzasyonu

Benzer grupta bulunan cihazların olduğu sistemlerde bireysel kompanzasyon yerine ortak bir kompanzasyon yapılması daha çok pratik ve ekonomik olabilmektedir. Bu tip kompanzasyonlarda güç faktörü, doğrultma elemanları ile cihazların aynı anda ve aynı kontaktör üzerinden birlikte kademeli olarak kompanse edilmektedir. Kondansatörler açma kapama esnasında ark meydana getirdiğinden dolayı uygun anahtarlar kullanılmalıdır. Bu anahtarlar açıldığında ani deşarj direnci üzerinden topraklanmalıdır.



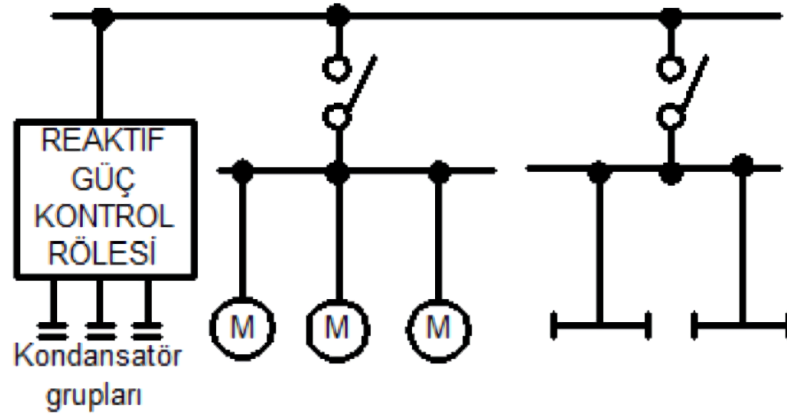
Şekil 2.11: Örnek Bir Grup Kompanzasyon Gösterimi [12].

Grup kompanzasyonun dezavantajı, kondansatör bloklarının güçlerinin dağıtımındaki zorluklar ile reaktif akım kayıplarının tam olarak yok edilememesidir.

2.2.1.3. Merkezi Kompanzasyon

Merkezi kompanzasyon, grup kompanzasyonun kapsamlı ve daha geniş hale getirilmiş şekline denilmektedir. Bu kompanzasyon sisteminde fazla sayıda tüketici için otomatik ayar düzeneği bulunmaktadır. Bunun nedeni tüm tüketim cihazlarının aynı anda devrede olmaması ve aynı yüklerde de çalışmamasıdır. Bunda dolayı kondansatör güçleri, değişen kompanzasyon ihtiyacına uyum sağlamalıdır. Otomatik ayar düzeneği, düşük ve yüksek kompanzasyon durumlarını engellemektedir.

Güç değeri yüksek kondansatörlerin devreye girip çıkarken oluşabilecek anahtarlama darbelerini engellemek için yükün bölünmesi gerekmekte olup, anahtarlamanın buna uygun yapılması gerekmektedir. Yüksek yüklü cihazların anahtarlamalarında reaktif güç rölesinden alınan kontaktör sinyali, diğer kontaktörlere ilk kontaktörün yardımcı kontağında sinyal vererek yük bölünür ve uygun bir kompanzasyon yapılmış olur. Merkezi kompanzasyonun dezavantajı, reaktif akımın, kullanılan tüm iletkenlerde akmaya devam etmesi durumunda kayıpların tam olarak yok edilememesidir.



Şekil 2.12: Örnek Bir Merkezi Kompanzasyon Devre Şeması Gösterimi [35].

Sistemdeki reaktif güç kontrol rölelerinin gelişmesi, internet hattı ile uzaktan kontrol ve takibe izin vermesi sayesinde sistemin doğru çalışması açısından oldukça kolaylık sağlamaktadır. Bundan dolayı merkezi kompanzasyon sistemi günümüzde en yaygın kullanılan sistemlerden biri olarak ortaya çıkmaktadır.

2.2.2. Kompanzasyon Sistemleri

Elektrik iletim ve dağıtım sistemlerinde, büyük sanayi işletmelerinin elektrik şebekelerinde, orta gerilim tesislerinde, alçak gerilim ve benzeri tesislerde reaktif enerji sarfiyatını düşürmek ve oluşan enerji kaybını en aza indirmek için kompanzasyon sistemlerinin kurulması gerekmektedir. Kompanzasyon sistemleri beş ana başlık altında toplanır.

2.2.2.1. Şönt Reaktörlü Kompanzasyon

Kapasitif yüklerin bulunduğu işletmelerde (UPS, LED Aydınlatma vb.) şönt reaktörlü kompanzasyon kullanılmaktadır. Kapasitif güç üreten sistemde, endüktif güç üreterek sistemi dengeleyen transformatör sarımları olup sisteme endüktif yük basan reaktöre denir. Reaktif güç kontrol rölesi, kondansatör ve şönt reaktör kullanılarak yapılan bir sisteme denir. Şönt reaktörler tek fazlı ve üç fazlı olarak üretilirler ve kapasitif etkiyi yok etmek amacıyla sisteme paralel bağlanırlar.



Şekil 2.13: Şönt Reaktör [36].

2.2.2.2. Statik Kontaktörlü Kompanzasyon

Hızlı devreye girip çıkan bazı yükler klasik sistemlerde kullanılan kontaktörler ile verimli olarak kompanze edilemeyebilir. Statik kontaktörlü kompanzasyonun ortalama tepki süresi 20 milisaniyedir. Reaktif röleden gelen devreye alma sinyali ile akım ve gerilim eşit olduğu en ideal noktada statik kontaktörlü kompanzasyon sistemleri deşarj süresini beklemeden hızlıca devreye girmektedirler. Düşük işletme maliyetine karşılık yüksek yatırım maliyeti bulunmaktadır.



Şekil 2.14: Statik Kontaktör [37].

2.2.2.3. Sürücülü Reaktif Röleli Kompanzasyon

Kaynak makinesi, ark ocağı gibi yüklerin çok hızlı değiştiği sistemlerde ve dengesiz yüklerin olduğu sistemlerin kompanzasyonunda kullanılmaktadır. Reaktörün tam olarak istenilen oranda devreye girmesi sayesinde olabilecek en düşük hatayla sistem kompanze

edilmektedir. Sürücülü reaktif röle sistemine sahip olanlar sürücüsüz olanlara kıyasla daha az sayıda kademe kullanmaktadır. Bu sayede pano içerisindeki ekipman kalabalığı azalmakta olup pano boyutundan ve ek eleman maliyetinden tasarruf sağlanmaktadır. Sürücülü kompanzasyonda sürücü bağlı olan şönt reaktörü, sistemin kapasitif yük durumuna göre küçük bölmelere ayırarak devreye alır. Rölenin tristör ile kontrolü sağlandığından kontaktörlere göre ömürleri uzundur.



Şekil 2.15: Tristörlü Reaktif Röle [38].

2.2.2.4. Orta Gerilim Referanslı Kompanzasyon

Sanayileşmenin yoğun olduğu kompanzasyon panosuna sahip bölgelerde ve sezonluk işletmelerin bulunduğu bölgelerde şebekeler yüksek akımlar çekmekte olup enerji kaybı oluşmaktadır. Bu sistemlerde orta gerilim referans tabanlı kompanzasyon sistemi kullanılmaktadır. Akım bilgisini orta gerilim transformatörünün primer ucu olan orta gerilim tarafından, gerilim bilgisini ise alçak gerilim tarafı olan sekonder ucundan almaktadır.

2.2.2.5. Harmonik Filtreli Kompanzasyon

Elektronik malzemelerin yoğun olduğu, yüksek akımlar çekilen ve kesintisiz güç kaynağı bulunan sistemlerden olan tünel otomasyon sistemlerinde harmonik oluşmaktadır. Sistemde oluşan harmoniği azaltmak ve sistemi kompanse etmek için harmonik filtreli kompanzasyon kullanılmaktadır. Filtreli kompanzasyon sayesinde güç faktörünün düzeltilmesi, harmonik rezonanslarının engellenmesi ve harmonik problemin giderilmesi sağlanmaktadır.



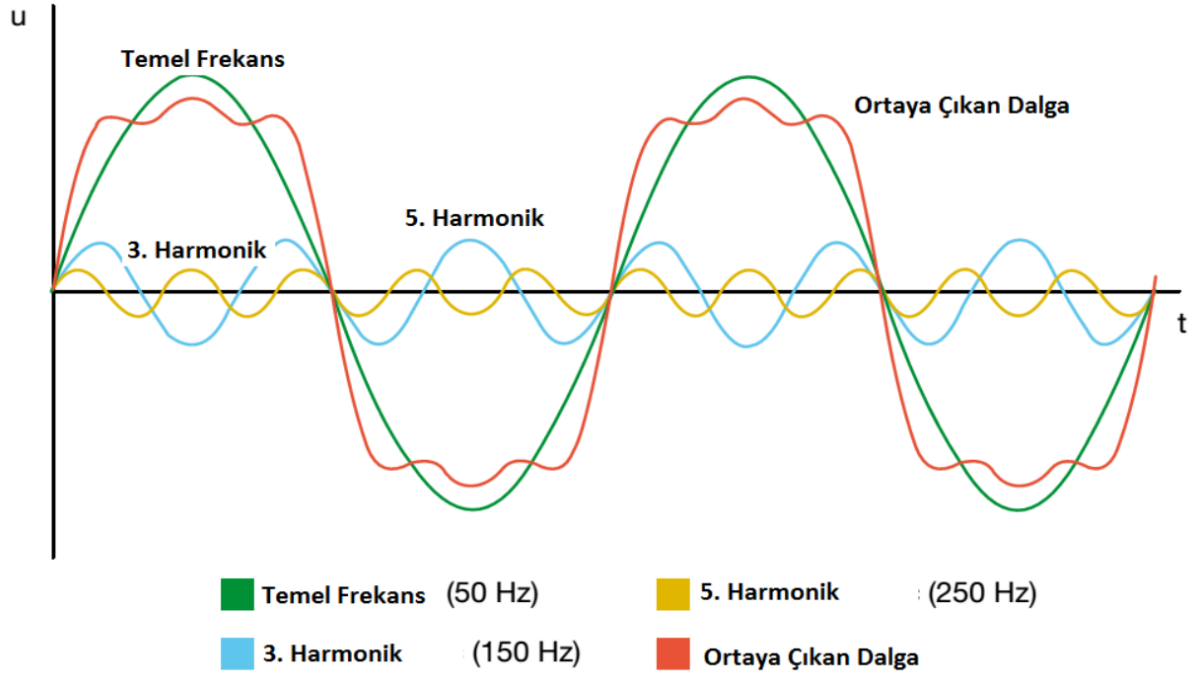
Şekil 2.16: Harmonik Filtreli Kompanzasyon Panosu.

2.3. HARMONİK

Elektrik sistemlerinde enerjinin üretilmesi ve dağıtılması esnasında akım ve gerilimin 50 Hz frekansında ve sinüsoidal dalga şeklinde olması gerekmektedir. Günümüz şartlarında harmoniği oluşturan yegâne sebeplerden biri güç elektroniği cihazlarıdır [33]. Gelişen güç elektroniği teknolojisi ile birlikte işletmelerdeki tristörlü yükler, çalışma prensiplerinden dolayı çeşitli frekans seviyelerinde akımların oluşmasına ve gerilimin endüklenmesine sebep olurlar. Oluşan harmonik seviyeleri 1., 2., 3., 4., 5., 6. şeklinde harmonik seviyesini numaralandırarak ifade edilirler.

Tablo 2.3: Temel Frekans Değeri 50 Hz Olan Bir Sinüsoidal Dalganın Harmonik Seviyeleri.

Sıra Numarası	Harmonik Seviyeleri	Frekans (Hz)
1	Normal	50
2	2. Harmonik	100
3	3. Harmonik	150
4	4. Harmonik	200
5	5. Harmonik	250
6	6. Harmonik	300



Şekil 2.17: Harmonik Frekans Seviyelerinin Gösterimi [16].

Harmonikleri ifade etmek ve göstermek için Fourier serileri kullanılmaktadır. Sinüsoidal olmayan periyodik dalgaların genlik ve frekansları aynı olmayan dalgaların toplamından oluşan matematiksel ifadeler Fourier serileri denmektedir [17]. Şekil 2.17’de görüldüğü üzere Fourier serisindeki frekansı farklı sinüsoidal dalgalar harmonik olarak tanımlanmıştır.

2.3.1. Harmoniklerin Matematiksel Analizi

Doğrusal olmayan elemanlar ile sinüsoidal olmayan kaynaklardan herhangi birisinin sistemde olmasıyla devredeki akım ve gerilim dalga şekilleri bozulabilmektedir. Fourier Analizi olarak bilinen analiz yöntemi uygulanarak bozulan dalga şekillerinin analizi yapılabilmektedir [18]. Fourier serisi ile sinüsoidal olmayan akım $i(t)$ ve gerilim dalga $V(t)$ formları aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{n_{maks}} \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \sin(w_n t - \varphi_n) \quad (2.8)$$

$$V(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{n_{maks}} \sqrt{2} \cdot V_n \cdot \sin(w_n t) \quad (2.9)$$

Denklemlerde V_n gerilimi h. harmonik geriliminin anlık değeri olup I_n akımı ise h. harmonik akım değerinin anlık değeridir. Bu denklemde φ_n ise n. harmonik için faz açısıdır.

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{n_{maks}} A_n \cos(nw_0 t) + B_n \sin(nw_0 t) \quad (2.10)$$

İfade edilen 2.10 Denkleminde, A_0, A_n ve B_n Fourier katsayılarını göstermektedir. Fonksiyon periyodik olduğunda $f(t)$ 'nin frekansı ω_0 olarak gösterilmektedir. Harmonikli durumlarda ise $n\omega_0$ değerinde $f(t)$ 'nin harmonik frekanslarını vermektedir.

Harmonik kademelerinin fazla olduğu ve harmonik filtreli kompanzasyon kullanılmadığı sistemlerde harmonik seviyeleri daha da yükselmektedir. Harmonikler yüksek frekanslara sahiptirler. Bunun sonucunda deri etkisi olarak da adlandırılan bir etki ortaya çıkmaktadır. Doğru akımda bir iletken direnci, alternatif akımdakine oranla daha azdır. Bu direnç harmonikli elemanlarda daha da fazla yükselmektedir. İletkenin dış yüzeyinden akan yüksek frekanslı harmonik akımlarının iletilmesi için gereken kesitin düşmesi ve direncin yükselmesine olanak sağlamaktadır. Deri etkisi sonucunda bu iletkenlerde kayıplar çoğalabilir ve ısınin ortaya çıkmasıyla birlikte iletkenlerin ömrünün azalmasına vesile olmaktadır [16].

Kondansatörün reaktansı, yükselen frekans değeriyle ters orantılı azalacaktır. Bir kondansatörün n . harmonik akım değeri Denklem 2.11'de gösterildiği şekliyle bulunabilir.

$$I_n = 2\pi \cdot f_n \cdot C \cdot V_n = n \cdot \omega_1 \cdot C \cdot V_n \quad (2.11)$$

f_n değeri n . harmonik derecesindeki frekansını, V_n ise n . harmonik derecesindeki gerilim değerini göstermektedir.

Nominal olarak, Q reaktif gücüne sahip kondansatöre harmonikli bir gerilim uygulanması durumunda reaktif güç Denklem 2.12'de gösterildiği şekliyle bulunabilir.

$$Q_T = Q + \sum_{n=2}^{n_{maks}} W_n \cdot C \cdot V_n^2 \quad (2.12)$$

Kondansatörün ideal olmadığı, kayıp gücü ve iç direncinin dikkate alındığı durumlarda kondansatörün aktif güç kaybı 2.13'de bulunan denklemden de bulunabilir.

$$P_k = \sum_{n=1}^{n_{maks}} C \cdot (\tan \alpha) \cdot W_n \cdot V_n^2 \quad (2.13)$$

Denklem 2.13'de $\tan \alpha = R \cdot \left(\frac{1}{\omega C}\right)$ kayıp faktörü olarak tanımlanmaktadır.

$$W_n = 2\pi f n \quad (2.14)$$

W_n harmonik için açısal frekans değeri olup V_n ifadesi n . gerilimin anlık değeridir.

Şebekeye bağlı doğrusal olmayan yükler sonucunda oluşan harmoniklerin güç faktörü Denklem 2.15’de gösterilen ile ifade edilebilir.

$$GF = \frac{V.I_1.\cos\varphi}{V.\left[\sum_{n=1}^N I_n^2\right]^{\frac{1}{2}}} = \frac{I_1}{I} . \cos\varphi \quad (2.15)$$

Denklem 2.15’in solunda bulunan eşitlik distorsiyonu, sağında bulunan eşitlik ise kayma faktörünü tanımlamaktadır.

2.3.1.1. Bozulma (B)

Akım ve gerilimi sinüsoidal biçimde değişen güçler 2.16’da gösterilen denklemde bulunmaktadır.

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

Harmonik akım ya da gerilim içeren sistemlerde güç ifadesi Denklem 2.17’de gösterildiği gibi açıklanmaktadır.

$$S^2 = P^2 + Q^2 + B^2 \quad (2.17)$$

Yukarıdaki denklemde B ifadesi distorsiyon gücü olarak tanımlanmakta olup birimi VAr olarak gösterilmektedir.

2.3.1.2. Toplam Harmonik Bozulması (THB)

Toplam harmonik bozulması, akım ve gerilim için ayrı ayrı verilmektedir. Gerilim için 2.18’de ki denklem, akım için ise 2.19’da ki denklem kullanılır.

$$THB_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (2.18)$$

$$THB_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.19)$$

Denklemde gerilimin toplam harmonik bozulmasını THB_V , akımın toplam harmonik bozulmasını THB_I , devreye uygulanan gerilimin ve akımın n . derecesindeki harmoniğin anlık değerini V_n ve I_n , devreye uygulanan gerilimin ve geçen akımın temel frekanstaki anlık değeri V_1 ve I_1 olarak ifade edilmektedir. THB değerleri çoğunlukla yüzde cinsinden ifade edilmektedirler. Denklem 2.18 ile 2.19’da çıkan değerler 100 ile çarpıldığı takdirde yüzde

ile ifade edilmiş olur. THB değerinin sıfır olduğu durumlar yalnızca temel frekanstan oluşan sinüsoidal dalgalar ile ifade edilir.

2.3.1.3. Tekil Harmonik Bozulma (HB)

Harmonik derecesi n olan akım ve gerilim için tekil harmonik bozunum 2.20 ve 2.21’de ifade edilen denklemlerdeki gibidir.

$$HB_v = \frac{V_n}{V_1} \quad (2.20)$$

$$HB_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (2.21)$$

Bu denklemde HB_v , gerilimin tekil harmonik bozulmasını göstermektedir. HB_I ise akımın tekil harmonik bozulmasını göstermektedir [19].

2.3.1.4. Toplam Talep Bozulma (TTB)

Bir yüke ait olan değerin yıl boyunca yük tarafında talep edilen maksimum akımların ortalamasına TTB denmektedir.

$$TTB = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (2.22)$$

Yukarıdaki denklemde I_L yük tarafından sistemin ortak bağlantı noktasından çekilen temel frekanslı maksimum akımdır.

2.3.2. Harmonik Kirlenmenin Sisteme Etkileri

Sistemde ölçülen THB akım ve gerilim değerlerine göre enerji kirliliğiyle ilgili aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

- $THB_v < \%3$ veya $THB_i < \%15$ ise sistemde harmoniklerden dolayı enerji kirliliği bulunmamaktadır.
- $\%3 \leq THB_v < \%5$ veya $\%15 \leq THB_i < \%20$ ise sistemde harmonik filtre kullanılması gerekmektedir ancak sistemin maliyeti yatırım maliyetini karşılamayabilir.
- $THB_v \geq \%5$ veya $THB_i \geq \%20$ ise rezonans riski vardır. Sistem için tehlikeli olduğundan harmonik filtre kullanılması ve harmoniklerin düşürülmesi gerekmektedir [16].

Tablo 2.4: IEEE Gerilim Harmonik Bozulma Sınır Değerleri.

Ölçümü Yapılan Noktanın Harmonik Gerilimi (V_n)	Harmonik İçin Gerilim Bozulma Yüzdesi (%)	Gerilimin Toplam Harmonik Bozulması THB_{V_n} (%)
$V_n \leq 69kV$	3	5

Harmoniklerin kabul edilebilecek en az ve en fazla değerlerinin belirlenebilmesi için Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE) çeşitli standartlar belirlemiştir. Tablo 2.4 ve Tablo 2.5’de gerilim harmoniklerin bozulma değerleri gösterilmiştir [12].

Tablo 2.5: IEEE Alçak Gerilim İşletmeleri Harmonik Bozulma Sınır Değerleri.

Alçak Gerilim İşletmesi ($\leq 1kV$) Not: $k=0,2+12,5/n$					
Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün Katı Harmonikler	
n	$\%V_n$	n	$\%V_n$	n	$\%V_n$
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6	0,5	15	0,3
13	3	8	0,5	≥ 21	0,2
17	2	10	0,5		
19	1,5	≥ 12	0,2		
23	1,5				
25	1,5				
≥ 29	k				

Harmonik kirlenmenin sisteme etkileri:

- Kompanzasyonda kullanılan kondansatörlerin yalıtımlarının bozulması veya aşırı yük sebebiyle çalışma verimlerinin düşmesi,
- Kompanzasyon ölçüm rölelerinde hatalı ölçümler alınması,
- Kondansatörlerde güç kayıpları ve patlamalar,
- Analog ölçü cihazlarında yanlış ölçümler,
- Senkron ve asenkron motorlarda mekanik titreme ve rezonansların artması,

- Senkron ve asenkron motorlarda aşırı ısınmalar ve buna bağlı olarak enerji kayıplarının oluşması,
- Elektronik cihazların sebepsiz arıza kodları vermesi,
- Sistemde kullanılan sigortaların veya şalterlerin açması,
- Termik manyetik şalter ve rölelerin anormal şekilde durması,
- CAD/CAM terminallerinde hafıza silinmeleri,
- Akkor lambaların kullanım ömürlerinin azalması, deşarjlı aydınlatma sistemleri çalışırken gürültü seviyesinin artması,
- Dağıtım sisteminde kullanılan transformatörlerde aşırı ısınmalar,
- Enerji nakil hatlarında dalgalanmalar,
- Haberleşme ve iletişim sistemlerindeki parazitlenmeler ile endüktif etkiler şeklinde tanımlanmaktadır [20].

2.3.3. Harmoniklerin Neden Olduğu Rezonans Olayları

Harmoniklerin akımdaki miktarları gerilimden daha yüksek olabilmektedir. Kondansatör ve bobinlerin aynı anda kullanıldığı sistemlerde harmonikli elemanlar rezonans etkisi de gösterebilmektedir. Alçak gerilim güç sisteminin rezonans frekansına ait olan harmonik derecesi 2.23’de denklemde gösterildiği şekilde bulunabilmektedir.

$$n = \frac{S_K}{Q_c} \quad (2.23)$$

Denklem 2.23’de S_K kaynak görünür gücü, Q_c kapasitif gücü temsil etmektedir. Kondansatördeki reaktif güç, kondansatöre uygulanan gerilim değeriyle bağlantılı olarak değişmektedir [21].

Bireysel kompanzasyonlarda tesislerdeki akımların yükselmesine rezonans sebebiyet verebilmektedir. Motorlara paralel bağlı olan kondansatörlerin şebeke tarafındaki harmoniklerde kapasitif etkide olmalarından dolayı sigortalar zarar görebilmekte olup rezonans durumu oluşabilmektedir.

Sistemin rezonans frekansı, harmonik frekanslardan birine yakın değerdayken rezonans meydana gelirse yüksek seviyelerde harmonik akım ve gerilim değerleri ortaya çıkacaktır. [22]

Sistemlerde motorlar ile kondansatörler aynı anda devrede olduğunda rezonans durumu oluşmamaktadır. Rezonansı oluşturabilecek harmonik frekanslardan kaçmak için harmonik

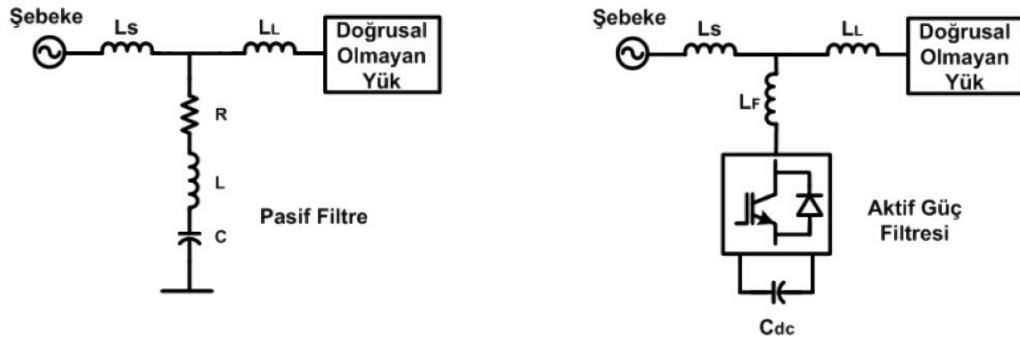
filtrelerin kullanılması gerekmekte olup seri ve paralel olmak üzere iki türlü rezonans durumu vardır [23].

2.3.4. Harmonik Filtreler

Harmoniklerin sistemlerde oluşturdıkları olumsuz etkilerden dolayı filtrelenmesi gerekmektedir. Elektrik sistemlerinde devreye yerleştirilen harmonik akımların yok edilmesini sağlayan devrelere harmonik filtresi adı verilmektedir. Bu filtrelerin amacı akım veya gerilimdeki harmonik kademelerin etkilerinin azaltmaktır [25]. Pasif, aktif olmak üzere iki çeşit harmonik filtre bulunmaktadır.

2.3.4.1. Pasif Filtreler

Pasif filtreler, üretici ile alıcı arasına koyulan frekans dışındaki bileşenleri yok etmek amacıyla tasarlanan, kondansatör, endüktans ve direnç elemanlarından oluşan devrelere denmektedir. Pasif filtrelerde amaç yok edilmek istenen harmonik frekansın rezonansa girecek bobin ve kapasitör değerlerini belirlemektir.



Şekil 2.18: Pasif ve Aktif Filtre Şematik Gösterimi [39].

Pasif filtreler sistemde rezonans problemlerini önleyemezler ve şebeke empedansı ile paralel rezonans noktası oluşturmaktadırlar. Pasif filtre elemanlarının değerleri, ısı ve aşırı yükten etkilenebilmektedirler ve bunun sonucunda frekanslarda değişim oluşmakta olup pasif filtrenin harmonik filtreleme performansında değişim gözlenebilir [26]. Pasif filtreler seri pasif ve paralel pasif olmak üzere iki gruba ayrılırlar.

Seri pasif filtreler üretici ile tüketici arasına seri olarak bağlanan endüktans elemanından oluşmaktadırlar. Seri pasif filtreler belirli bir frekans değeri için ayarlanmalarında sadece o frekans bileşenine karşı yüksek empedans göstermektedirler ancak temel frekanslarda düşük

empedans göstermektedirler. Seri filtreler motor sürücü devrelerinin ve inverterlerin önlerinde kullanılmaktadırlar.

Paralel pasif filtreler üretici ile tüketici arasına kondansatör, endüktans bağlanmasından oluşan devrelerdir. Birden fazla harmonik akımı için birden fazla filtre sisteme eklenerek harmonik akımının filtre edilmesi sağlanabilir.

2.3.4.2. Aktif Filtreler

Doğrusal olmayan yüklerin ürettiği akım harmoniklerini veya doğrusal üreticilerin ürettiği gerilim harmoniklerini yok etmek amacıyla güç elektroniği elemanlarını harmonikli yük akımına veya kaynak gerilimine ters fazda ve eşit büyüklükte harmonik akım veya gerilim üreterek sisteme bağlayan elemanlarına denir. Aktif filtrelerde pasif filtre elemanlarına ilaveten transistör ve yarıiletken devre elemanları da kullanılır. Aktif güç filtreleri harmonik akım ile reaktif güç ve nötr akım kompanzasyonu için de kullanılmaktadır. Aktif filtreler pasif filtrelere göre maliyetleri yüksektir ancak birden fazla harmonik frekansını etkileyerek enerji kalitesini düzenlerler. Aktif güç filtreleri geniş bir frekans aralığında filtreleme yapabildiğinden sistemde değişiklik yapılsa bile etkili bir harmonik kompanzasyonu yapmaya devam eder.

Aktif filtreler paralel, seri ve hibrit olmak üzere üç bölüme ayrılmaktadırlar. Paralel güç filtreleri, yüke paralel bağlanarak akımın harmoniklerini yok etmek ve reaktif güç kompanzasyonu yapmak için sisteme ters fazda ve eşit değerde akımlar verir ve bunun sonucunda üreticiden çekilen akımların dalga şekilleri sinüsoidal şekline bürünmektedir.

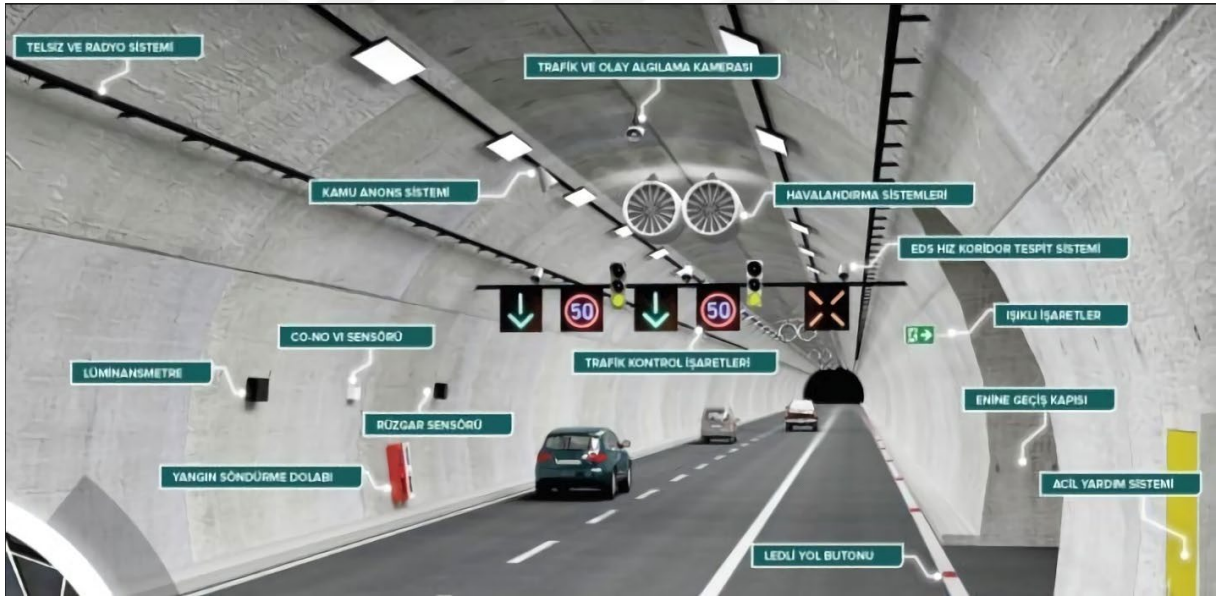
Seri güç filtreleri, yüke aktif bağlanarak gerilim harmoniklerini yok etmek için sisteme ters fazda ve eşit değerde harmonik gerilimler verir ve bunun sonucunda sistemdeki harmonikler ortadan kaldırılırlar. Doğrusal olmayan harmonik gerili kaynakları için seri aktif filtreler daha etkilidir.

Hibrit güç filtreleri, paralel pasif ve aktif güç filtrelerinin birlikte kullanılmasıyla oluşan sistemlere denir. Bu filtreler özellikle düşük kademeler olan 3, 5, 7'lerde harmonikleri kompanze etmek için kullanılmaktadır.

3. YÖNTEM

3.1. TÜNEL ELEKTROMEKANİK SİSTEMLERİNDE KULLANILAN ELEKTRİK EKİPMANLARI

Tünel, uluslararası olarak tanımının kullanımında görüş birliğine varılmamış olsa da, iki dağı veya geçilmesi gereken mesafeleri birbirine bağlayan yeraltı veya sualtından geçişi sağlanan üstü kapalı geçitlere denir. Tünellerin kullanım amaçları arasında motorlu araçların, metroların veya suyun ulaşımı vardır. Ayrıca hayvan, bisiklet veya yaya geçişleri de tünellerin kullanım amaçları arasındadır. Tüneller Karayolları ve otobanlar üzerinde bulunmakta olup içerisinde bulunan elektrik ekipmanları, sinyalizasyon ve elektromekanik sistemlerde dolayı trafik güvenliğinin bir parçasıdır.



Şekil 3.1: Tünellerde Kullanılan Elektromekanik Sistemlerin Örnek Gösterimi [42].

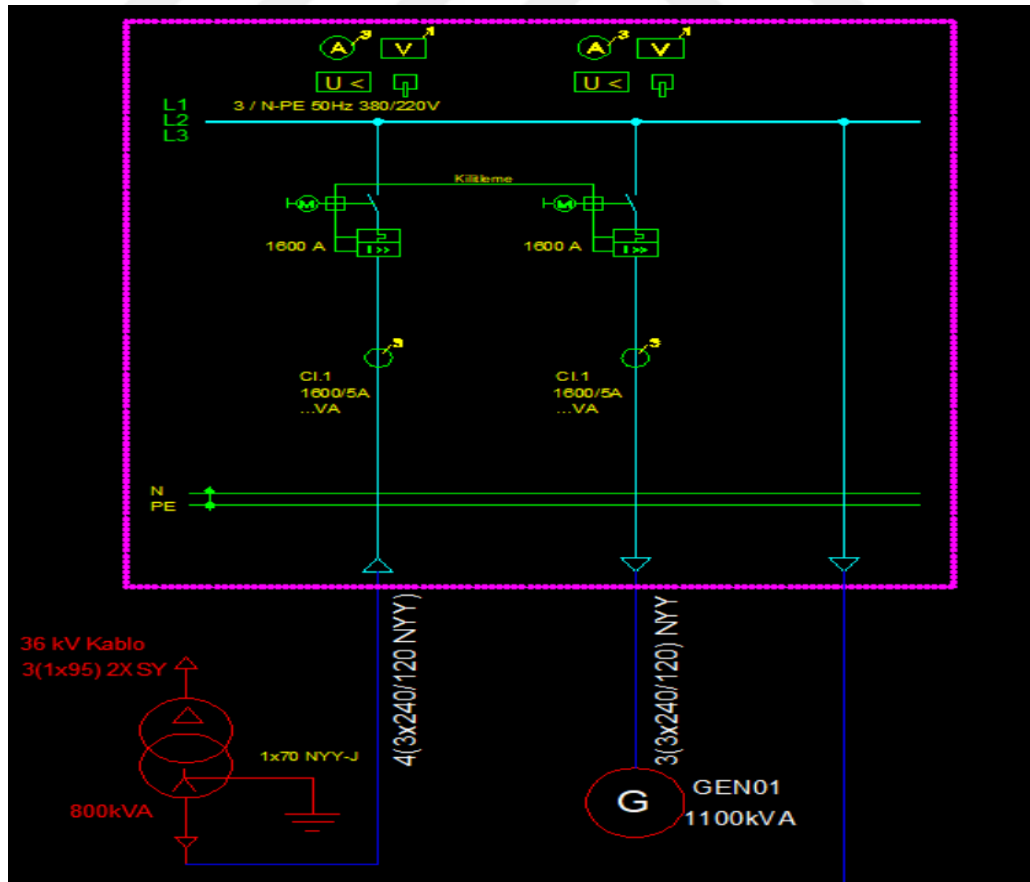
Tünellerde karayolu taşıtlarının güvenli bir geçiş sağlaması amacıyla IEC, VDE, NFPA, IEEE, CE, ANSI gibi standartlara uygun olarak elektromekanik sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Tünellerin içerisinde ve giriş bölgelerinde aydınlatma, tünel içerisinde trafik yönlendirme ve sinyalizasyon sistemleri, yangın algılama ve havalandırma kontrol sistemleri, kamera izleme sistemleri, kamu anons ve radyo telsiz sistemleri, SCADA (Merkezi Kontrol ve Veri Toplama Sistemi) vb. sistemler bulunmaktadır.

Bu teze konu olan Vecdi Diker Tüneli Altunizade'den Ümraniye'ye ve Ümraniye'den Altunizade'ye şeklinde iki tüplü olup bahsi geçen iki ilçe arasındaki geçişleri sağlamaktadır. Tünel içerisinde bulunan sistemler alt başlıklarda verildiği gibidir.

3.1.1. Jeneratör

Tünellerde elektromekanik sistemlerin kesintisiz olarak çalışabilmesi için jeneratöre ihtiyaç bulunmaktadır. Jeneratörler elektromanyetik indüksiyon prensibine göre bobin ve mıknatısla birlikte mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek çalışır. Jeneratörler alternatör ve motor elemanlarına sahiptir. Jeneratör fosil yakıt kullanacak elektromanyetik alan sayesinde motoru döndürerek elektrik enerjisi üretir.

Vecdi Diker Tüneli'nde elektromekanik ekipmanların elektrik ihtiyacını 800kVA'lık trafo merkezinden sağlamaktadır. Bu transformatör tünel yönetim merkezi yerleşkesinin yanında bulunmaktadır. Transformatöre gelen 36kV'luk enerji alçak gerilim 220V'a dönüştürülmekte olup transformatörün enerji beslemesi 3x240'lık NYY tipi kablolar ile jeneratör transfer panosunda bağlanmıştır. Jeneratör transfer panosunun tek hat şeması Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Jeneratör Transfer Panosu Tek Hat Şeması.

Tünelin içinde tüm sistemler birbirine elektrik kabloları ile bağlıdır. Aydınlatmalarda, şebekelerde, orta ve alçak gerilimlerde NYY tipi kablolar kullanılır. Bu kablo türü toprak altında, kablo kanallarında ve özel olarak üretildiğinde tatlı ile tuzlu sularda kullanılabilir. Yapısında bir veya çok telli bakır iletken olup PVC izolesi, dolgulu ve dış kılıfı bulunmaktadır.

Jeneratörün gücü 1100kVA olup 3x240'lık NYY tipi kablolar ile panoya bağlanmıştır. Transformatör ve jeneratörde 1600A'lık sigortalar bulunmakta olup transformatör ile jeneratör kilitleme sistemi ile birbirlerine bağlıdır. Transformatörde arıza olup devreden çıkar veya bakım amaçlı enerjisi kesilirse jeneratör devreye girecek şekilde kontaktörler ile birbirlerine bağlanmıştır. Enerji kontaktörlerden sonra Şekil 3.3'de gösterildiği gibi L1, L2 ve L3 fazlarının olduğu ana baraya bağlanmakta olup bu bara nötrlü (N) ve topraklıdır.



Şekil 3.3: Tünel İşletme Merkezinde Jeneratör Gösterimi.

Jeneratör 880kW aktif güç, 400V gerilim, 1584A akım, 50Hz frekans, 0,8 güç faktörü, 4 kutup, 1500 devir ve 1196 beygir gücüne sahiptir.

3.1.2. Kesintisiz Güç Kaynakları

Tünelde kullanılan elektronik cihazların kesintisiz elektrik enerjisine ihtiyacı bulunmaktadır. Örnek vermek gerekirse olası bir elektrik kesintisinde ve yangın durumunda yangın algılama

sistemlerinin devreye girip yangın söndürme sistemini devreye sokması ve jet fanlara çalışma için sinyal göndermesiyle hava sirkülasyonunun sağlanması, acil durumlarda kamu anons sisteminden bilgilendirme yapılabilmesi veya trafik sinyalizasyonunun doğru yapılarak trafik kazalarının önüne geçilmesi gerekmektedir.

Kesintisiz güç kaynağı (UPS), sisteme bağlı olan şebekede olası gerilim dalgalanmalarından, harmoniklerden, faz farklılıklarından, elektrik kesintilerinden koruyan sistemdeki yüke temiz enerji veren elektronik cihazlara denir. UPS'lerin çalışma mantığı, elektrik sistemine bağlı olarak akülerin üzerinden sistem ile aynı frekansta çalışan eviriciyle yük beslenmesine dayanır. Elektrik sisteminde kesinti olursa aküden alınan enerji yüke verilir ve şebekenin bu şekilde enerjilenmesi UPS'in çıkış ucundaki gerilimin kalitesini veya sürekliliğini değiştirmemektedir.

Elektrik kesintilerinden koruma amaçlı kullanılan UPS'ler yalnızca elektronik cihazları beslemekle kalmaz, aynı zamanda şebeke enerjisini üzerinden geçirerek frekansı ve gerilimi doğrultulmuş kararlı bir AA güçle sistemin beslenmesini sağlar. 800kVA'lık transformatör ile beslenen sistemde endüktif ve kapasitif yüklü güç ile çalışan cihazlardan dolayı harmonik oluşacağından ve bu harmoniklerin CCTV, otomasyon, aydınlatma ve benzeri sistemleri etkileyebileceğinden dolayı UPS'lerin tüneldeki elektronik cihazlardan önce bağlanması elzemdir.



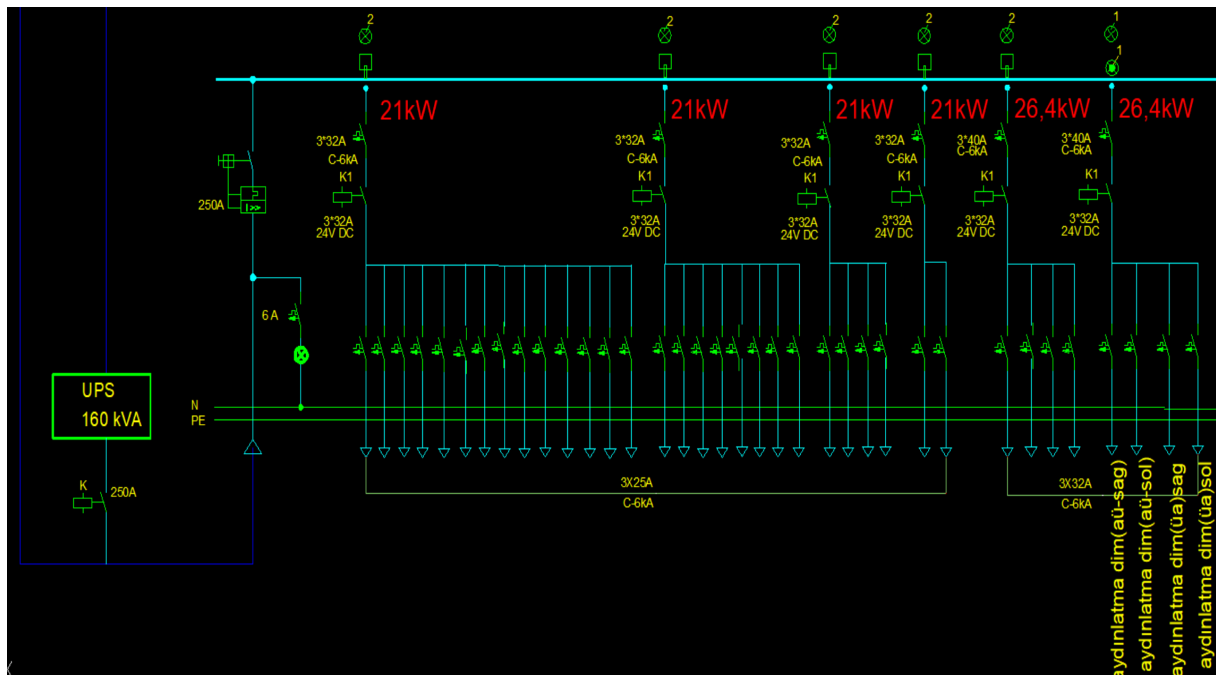
Şekil 3.4: Tünelde Kullanılan İnform Markalı UPS Gösterimi.

Şekil 3.4'te gösterilen tünelde kullanılan İnform markalı UPS'in sahip olduğu özellikler:

- GF düzeltimi,
- Doğrultucu,
- 80, 160kVA,

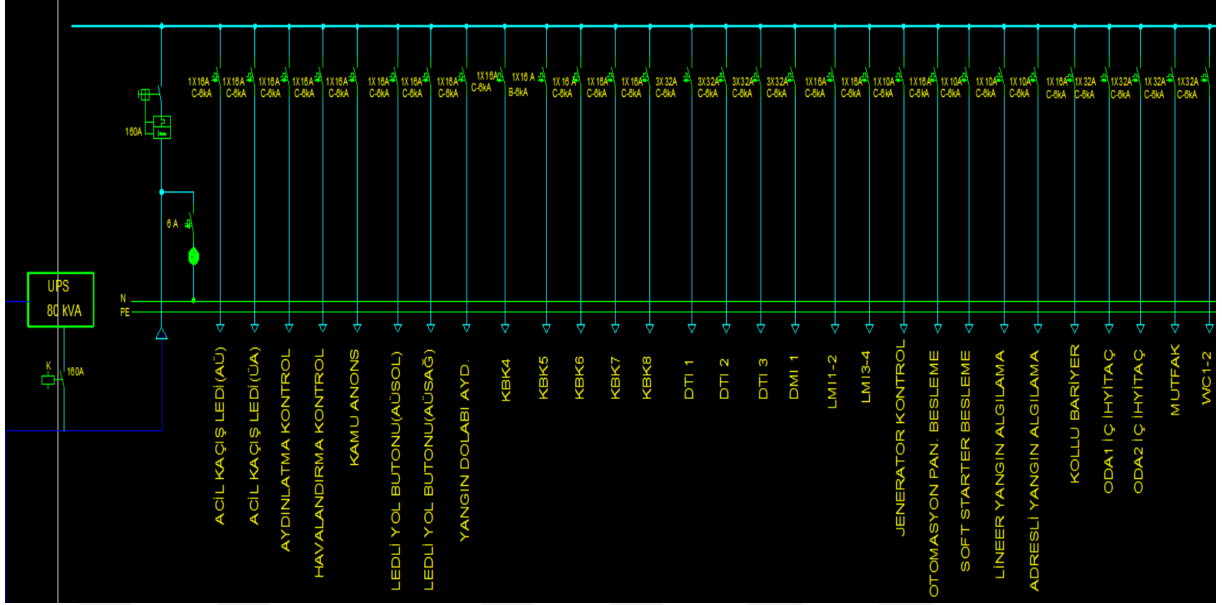
- Akıllı akü şarj sistemi,
- Aktif harmonik düzeltimi şeklinde açıklanmıştır [43].

Vecdi Diker Tüneli'nde birinin gücü 160kVA diğer ikisinin gücü 80kVA olmak üzere 3 adet UPS bulunmaktadır. 160kVA'lık UPS tüneldeki tüm aydınlatma sistemlerinin bağlandığı aydınlatma panosunun giriş ucuna bağlıdır. Şekil 3.5'te aydınlatma panosunun tek hat şeması gösterilmiştir.



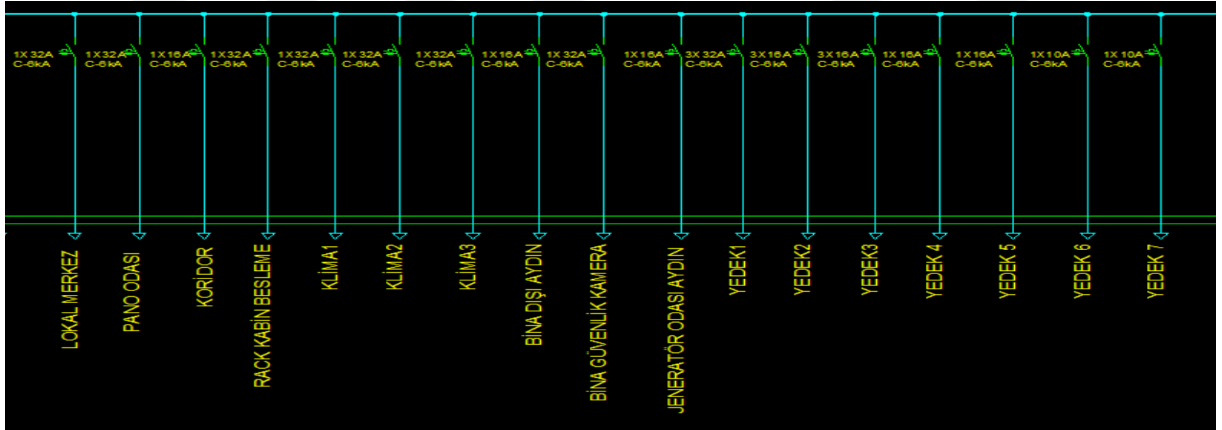
Şekil 3.5: Aydınlatma Panosu Tek Hat Şeması.

80kVA gücüne sahip olan UPS acil kaçış, CCTV, prizler, yangın algılama sistemleri, otomasyon panosu, kollu bariyer, tünel yönetim sistemi, kamu anons sistemi vb. tüm elektronik cihazların bağlı olduğu UPS panosunun giriş ucuna bağlıdır. Şekil 3.6 ve 3.7’de UPS panosunun tek hat şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.6: UPS Panosu Tek Hat Şeması.

Elektronik cihazları gerilim dalgalanmalarından koruyan UPS arızalandığında devreye almak amaçlı yedekte bir 80kVA'lık UPS hazırda beklemektedir. Bu 3 UPS Vecdi Diker Tüneli'nin işletme merkezi ana dağıtım pano odasında bulunmakta olup bahsi geçen UPS'ler sistemin kesintisiz enerji ihtiyacını karşılamaktadırlar.



Şekil 3.7: UPS Panosu Tek Hat Şemasının Devamı.

3.1.3. Aydınlatma Sistemleri

Aydınlatma sistemleri kurulum ve işletmesi bakımından tünelin maliyetinin önemli bir bölümünü kapsamaktadır. Tünellerin kapalı yapısından dolayı girişleri, çıkışları ve içerisinde trafik güvenliğine uygun, sürücülerin gözlerini yormayıp sürüş kalitesini yükselten aydınlatma sistemlerine ihtiyaç bulunmaktadır. Tünel aydınlatma sistemlerinin amacı tünelin içinde akan trafikte gece ve gündüz, tünelin çıkışındaki parlaklığın içindekinden az olmayacak şekilde,

emniyet ve sürüş güvenliğini destekler biçimde tüneldeki yolculuğun sağlıklı bir şekilde yapılmasını sağlamaktır.

Yeterince iyi aydınlatılmayan tünellerin girişinde sürücülerin gözünde kara delik etkisi oluşabilir ve trafik kazalarına sebebiyet verebilir. Tünel eşik bölge aydınlatması olarak adlandırılan tünel giriş ve çıkışlarının aydınlatma seviye kontrolünde yaklaşma bölge parıltısı ve trafik akış hızı baz alınmaktadır [44]. Eşik bölgesinin parıltısı, tünel girişini merkez alacak şekilde fren mesafesinden çekilen fotoğraf ile belirlenmektedir. Fren mesafesine bağlı olarak bulunan değer tünelin aydınlatma seviyesi ve maliyetini belirleyen önemli bir parametredir. Gözün karanlık adaptasyonunun hesaba katılarak tünel içindeki aydınlatmaların tünel dışındaki havanın aydınlık seviyesine paralel olarak gerektiğinde kuvvetli veya sönük olarak ayarlanabilir olması gerekmektedir. Tünel aydınlatma sistemleri, tünel eşik bölgesinden sonra göz adaptasyon sürecine de uygun aşamalı olarak parıltı seviyesinin düşürülmesine olanak verilecek şekilde kurulumlarının yapılması gerekmektedir.

Tünellerde kullanılan aydınlatmalar bazı standartlara (CIE-88 vb.) uygun olması gerekmekte olup Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE) tünellerin aydınlatma sistemlerinin hangi parametrelere sahip olması gerektiğini açıklamıştır [45].



Şekil 3.8: Tünelde Kullanılan İsbak LED Armatürü.

Vecdi Diker Tüneli'nde CIE ve TS standartlarına uygun, dış mekanik darbelere karşı korumalı, DALI (Dijital Adreslenebilir Aydınlatma Arayüzü) haberleşme protokolü destekli, verimleri

%92-94 arası değişen, güç faktörü 0,97'den büyük ve toplam harmonik bozunumu (THBi) %10-20 arasında olan İsbak markalı LED aydınlatmalar kullanılmaktadır.



Şekil 3.9: Tünelin Ümraniye Giriş Kısmı.

Tünelin Ümraniye girişinde yaklaşık 65 adet simetrik 185W gücünde, 85 adet asimetrik 300W gücünde ve 70 adet asimetrik 185W gücünde armatürler bulunmaktadır. Tünelin Altunizade girişinde ise yaklaşık 70 adet simetrik 185W gücünde, 95 adet asimetrik 300W gücünde ve 75 adet asimetrik 185W gücünde armatürler bulunmaktadır.

Asimetrik aydınlatmalar tünel giriş bölgelerinde zıt yönlü aydınlatma yapılabilmesi amaçlı, simetrik aydınlatmalar ise tünel iç bölgesinde simetrik ışık dağılımlı aydınlatma yapılabilmesi amacıyla kullanılmaktadır.

Tünelin iç ve dışında bulunan aydınlık şiddetini belirleyen luminansmetreler sayesinde PLC ve SCADA yazılımı yardımıyla sürücülerin göz adaptasyonu sağlanmaktadır. Tünelde CIE standardında belirtildiği üzere dimmerli (ayarlanabilir ışık akılı) armatür kullanılmakta olup ışık akısı % 0 ile % 100 arası değerler arasında ayarlanabilir. Tünel aydınlatmalarının SCADA ekranında gösterimi Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Tüneldeki Aydınlatmaların SCADA Ekranındaki Gösterimi.

3.1.4. Yangın Algılama ve Kontrol Sistemleri

Tünellerin yapıları itibariyle üstü kapalı tüp olmaları yangın olduğunda tehlikeli sonuçlara yol açabilir. Tekli yangın detektörleri yangın algılamak için tünel gibi uzun mesafeli ve kapalı ortamlarda yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple tünellerin durumlarına göre fiber optik sensörlü, kamera ile duman algılamalı, hava örneklemeli duman detektörleri veya en sık olan doğrusal kablolu yangın algılama sistemleri kullanılmaktadır.

Yangın algılama sistemlerinin amacı yangını söndürmek olmayıp söndürülme aşamasından önce yangını erken tespit ederek tünelde bulunan insanları duman zehirlenmesinden korumak ve kaçabilmelerini sağlamaktır. Bu sistemler yangın olduğu durumda yangının lokasyonuna göre alarm vererek ilgili havalandırma sistemlerinin devreye girmesini sağlamaktadır. Ayrıca sistemin bir diğer amacı yangın olduğundan verilen alarm ile tünelin kapatılması, trafik kontrolünün sağlanması ve yangının söndürülmesi için uygun ortam sağlamasıdır.

Doğrusal kablolu yangın algılama sistemlerinin kontrolör ünitesi, sensor kablosu, röle modülü, bağlantı kutusu ve bağlantı kablosundan meydana gelmektedir. Şekil 3.11’de doğrusal kablolu yangın algılama sisteminin sensor kablosu gösterilmiştir. Vecdi Diker Tüneli’nde Lios markalı 70VA gücüne sahip lineer kablolu yangın algılama sistemi kullanılmaktadır.



Şekil 3.11: Tüneldeki Yangın Algılama Sistemi Sensor Kablosunun Gösterimi.

3.1.5. Trafik İzleme ve Kamera Sistemleri

Tünellerde trafik kontrolü, yol güvenliği amacıyla kapalı devre televizyon sistemleri (CCTV) ve değişken mesaj işaretleri (DMİ) kullanılmaktadır. CCTV, kameralarla çekilen anlık görüntünün istenilen konum veya lokasyona iletebilen sisteme denmektedir. CCTV, Televizyon gibi merkezden kullanıcılara yayın yapmak yerine istenilen alandaki görüntüyü izlemeye olanak sağlar. Kullanım amaçları arasında güvenlik ve trafik kontrolü vardır. CCTV sistemi kamera, monitör, lens, switch ve kayıt cihazı gibi elektronik malzemelerden meydana gelmektedir. Şekil 3.12’de tünel girişinde direk üzerinde bulunan kamera gösterilmiştir.



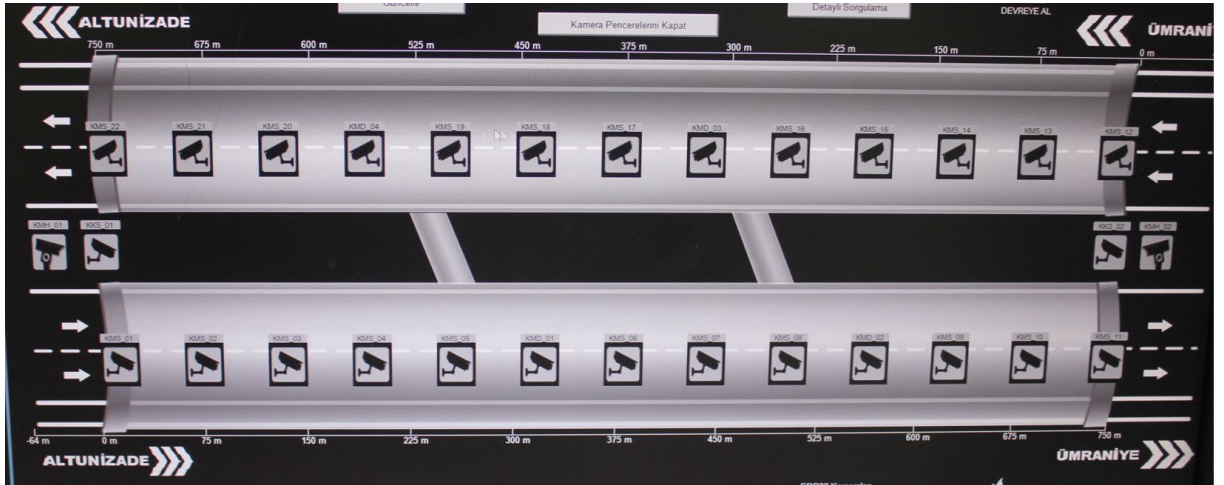
Şekil 3.12: Tünel Girişinde Direk Üzerinde Bulunan Kamera Sistemi.

DMİ, sürücülere trafik, yol veya meteorolojik bilgileri vermek amacıyla kullanılan LED teknolojisine sahip ve işletme merkezinden yönetilebilen sistemlere denmektedir. Ayrıca DMİ’ler kötü hava koşullarında, yoğun trafik, kaza veya yol çalışması gibi durumlarda sürücülerin yönlendirilmesini sağlamaktadır. DMİ, şehir içi, tüneller, altgeçitler gibi vb. yerlerde kullanılmaktadır. 3.13 numaralı şekilde tünel girişinde bulunan DMİ gösterilmiştir.



Şekil 3.13: Tünel Girişinde Bulunan DMİ Yapısı.

Vecdi Diker Tüneli'nin giriş ve çıkışı ile içerisinde Pelco markalı yaklaşık 15W güce sahip ortalama 35 adet kamera ile İntetra markalı yaklaşık 120W güce sahip ortalama 6 adet DMİ sistemleri bulunmaktadır. Şekil 3.14'de tünel işletme merkezi trafik izleme ekranı gösterilmiştir.



Şekil 3.14: Tünel İşletme Merkezi Trafik Kameralarının SCADA Ekranında Gösterimi.

3.1.6. Kamu Anons Ses ve Acil Durum (SOS) Sistemleri

Tünel içerisinde herhangi bir sebepten dolayı kalan sürücü veya yolculara gerekli uyarılarda bulunmak üzere kamu anons sistemi kullanılmaktadır. Tünele giren araçların kaza, yangın gibi durumlarda tünel işletmecisi tarafından yapılan uyarı ve yönlendirmeler sürücü veya yolcular

için önem taşımaktadır. Şekil 3.15’de Vecdi Diker Tüneli’nde kullanılan Bosh markalı kamu anons sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.15: Tünelde Kullanılan Kamu Anons Sistemi.

Tünelde acil durumlarda her türlü ağır ortam koşullarında çalışmak için tasarlanmış olan acil yardım telefonları kullanılmaktadır. Tünelde ortalama 150 metrede bir olan konumlardaki kişilerin tünel işletme merkezi ile arasında iletişimin analog olarak sağlanması amacıyla acil durum telefonları bulunmaktadır. Bu telefonlarla acil durumlarda mevcut durum bilgilendirmesi yapılması ve benzeri amaçlarla merkez ile iletişim sağlanır. Şekil 3.16’da Vecdi Diker Tüneli’nin girişinde Wind markalı acil durum sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.16: Tünel Girişinde Kullanılan Acil Durum Sistemi.

3.1.7. Havalandırma Sistemleri

Tünellerde egzoz gazları nedeniyle meydana gelen hava kirlenmesi olmaktadır. Bu kirlenmeye yol açan maddelerin içerisinde nitrojen oksitleri, yanmamış hidrokarbon ve aldehitler, karbon monoksit ve kurşun bileşiklerleri vardır. Özellikle sık sık yoğun trafiğin yaşandığı tünellerin içerisinde araçlardan çıkan egzoz dumanıyla ısıdan dolayı oluşan hava kirlenmesinden ve yangın gibi acil durumlarda oluşan duman ile sıcak havanın tahliye edilmesi için havalandırma sistemlerine ihtiyaç bulunmaktadır.

Tünellerde havalandırma sistemleri, görüş mesafesine göre makul seviyede hava kirliliği durumlarının belirtildiği belli standartlara (PIARC, 2017:7 vb.) göre yapılmaktadır [46]. Havalandırma sistemleri tayin edilirken en önemli faktörler aşağıda sıralanmıştır:

- Tünel mesafesi ve şerit adedi,
- Yol eğim ve yüksekliği,
- Trafik yoğunluğu ve kontrolü,
- Çevre tesirleri.

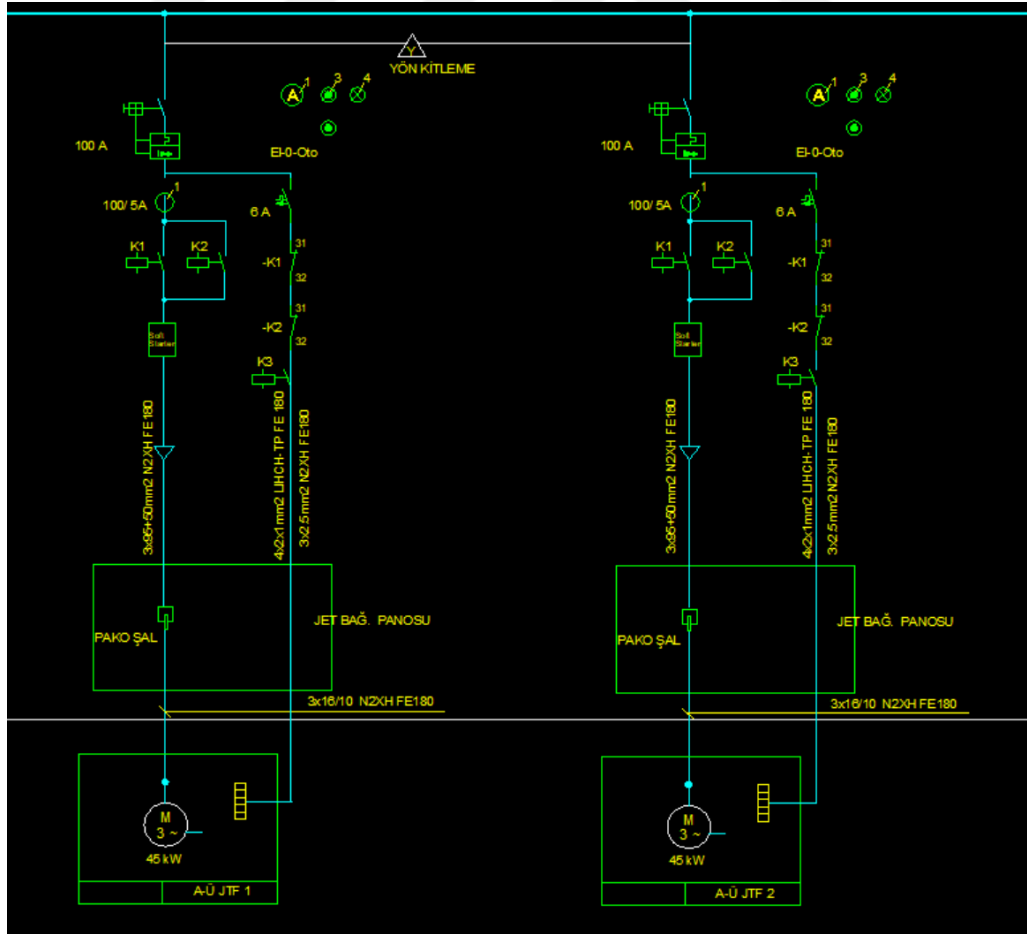
Tünellerde havalandırma sistemleri boyuna, enine ve yarı enine olmakta olup en yaygın kullanılanı boyuna havalandırma sistemidir. Hava, yapay bir şekilde de oluşturulabilen rüzgar sayesinde basınç farkıyla tünelin bir ucundan diğerine hareket eder. Hava kütlelerini istenilen yöne doğru yönlendirerek yapay bir hava akımı oluşturulmak istenilen tünellerde bu görevi jet fanlar üstlenmektedirler.



Şekil 3.17: Bir Tünelde Kullanılan Jet Fan Gösterimi [47].

Havalandırma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan jet fanlar, uzunlamasına montajı yapıp hava hız yön sensörleri ve hava kalite sensörleriyle birlikte kullanılmaktadırlar. Jet fanlar, tünellerde günlük havalandırma ihtiyacı ile yangın gibi acil durumlarda yangının lokasyonuna göre oluşan dumanı tünelin dışına taşımayı ve bu süre zarfında insanların tahliyesine yardımcı olmak amacıyla kullanılmaktadır. Tek yönlü veya çift yönlü tipleri bulunan ve askı sistemi vasıtasıyla tünellerin tavanına asılan jet fanlar, hava ölçüm sensörlerinin değerlerine veya doğrusal yangın algılama sistemlerinden gelen bilgilere istinaden çalışmaktadır. Tünel içine kurulan hava kalite sensörleri sayesinde hava kalitesinin düştüğü durumlarda jet fanlar otomatik olarak devreye girmektedirler. Jet fanların kontrol ve yönetimi SCADA ve PLC yazılımları ile otomatik, jet fan panosundan elle veya uzaktan olarak yapılabilmektedir.

Vecdi Diker Tüneli'nin Ümraniye girişinde 8 adet, Altunizade girişinde 6 adet olmak üzere toplam 14 adet Airon markalı jet fan havalandırma sistemleri bulunmaktadır. 2 şerli gruplar halinde tünelin tavanlarına asılan jet fanlar, 1600mm çapa, 4100mm uzunluğa, 1748 itme kuvvetine, 6 kutuplu ve 3 fazla çalışan asenkron motora ve 45kW güce sahiptir [48].



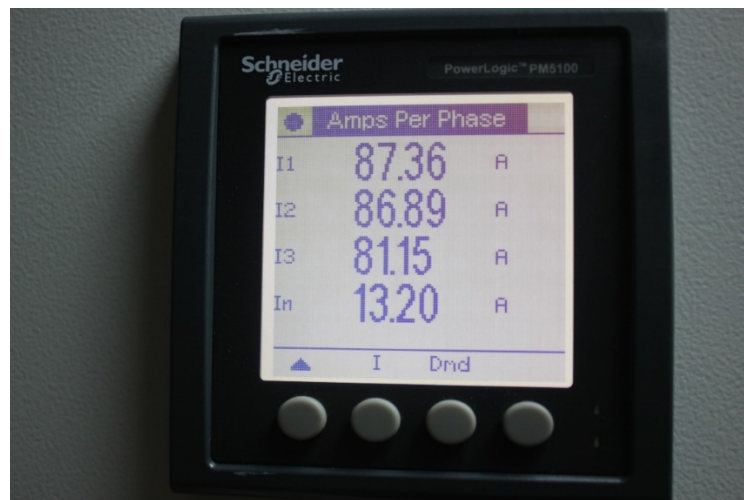
Şekil 3.18: Tüneldeki 2 Adet Örnek Jet Fanın Tek Hat Şeması Gösterimi.

Şekil 3.18’de görüldüğü gibi ana dağıtım panosundan gelen kablo 100A sigortaya, K1 ve K2 kontaktörlerine, yumuşak yol verici (Soft Starter), pako şalter ve jet fan motoruna bağlanmaktadır. Jet fanlar 45kW güce sahip olduklarından yaklaşık 70A akım çekmeleri beklenmektedir ve bundan dolayı 100A’lık sigorta yeterlidir.

Tünelde kullanılan jet fanlar şekil 3.18’de gösterildiği üzere yön kilitleme ile birbirlerine bağlı olup aynı yöne doğru hava taşımaktadırlar. Çift yönlü olarak da çalışabilen jet fanlar, tünelde çıkan yangın gibi acil durumlarda yangın algılama sensöründen aldıkları veriyle yangının başladığı lokasyona en yakın yerden başlayarak tünelin çıkış noktasına kadar olan jet fanların hepsi birlikte aynı yönde çalışarak duman ve isi dışarıya taşımaktadırlar.

3.1.8. Enerji Analizörü

Günümüzde elektrik enerjisi kalitesinin önemi artmaktayken, dağıtım noktasındaki tüketicilerin kesintisiz enerjiyi yüksek verimlilikle elde etmesi de önemli hale gelmeye başlamıştır. Elektriğin verimliliği aktif, kapasitif ve görünür güç ile ölçülürken kalitesi ise harmonik bileşenlerin yok edilmesi ile sağlanmaktadır. Özellikle doğrusal olmayan ve yüksek güç çeken elektrik ekipmanlarının sistemlerde kullanılması ve kesintisiz güç kaynakları sinüs dalga formunda olan elektrik enerjisinin formunu bozmakta olup harmonik üretmektedirler. Ayrıca elektrik enerjisinde verimi artırmanın en önemli yollarında biri, otomasyon sistemi ile şebekeyi izlemek ve kontrol edebilmek olup, elektrik şebekesinde enerjinin verim veya kalitesindeki düşüşler anlık olarak takip edilmelidir. Elektrik enerjisinin anlık olarak takibini, ölçülen verilerin kayıt altına alınmasını, ihtiyaç halinde cihazlarla veya yazılımlarla iletişimi sağlayan cihaza enerji analizörü denir.



Şekil 3.19: Tüneldaki Enerji Analizörü.

Enerji analizörü ile sistemde ölçümü yapılabilen değerler aşağıda verilmiştir:

- Tek faz ve üç faz gerilim ile akım değerleri,
- Nötr ve toprak akım değerleri,
- Faz-faz, faz-nötr ve nötr-toprak gerilimleri,
- Tek faz, üç faz ve toplam aktif güç değerleri,
- Tek faz, üç faz ve toplam reaktif (kapasitif & endüktif) güç değerleri,
- Tek faz, üç faz ve toplam görünür güç değerleri,
- Güç faktörü ve frekans değerleri,
- Tek faz ve üç faz gerilim ile akım harmonikleri,
- Nötr ve toprak akım harmonik değerleri,
- Faz-faz, faz-nötr ve nötr-toprakın ortalama ve anlık gerilim değerleri.

Bu değerler anlık olarak SCADA ve PLC yazılımları aracılığıyla takip edilip bilgisayar ortamına aktarılabilir. Enerji analizörlerinin bir diğer görevi ise yukarıdaki enerji değerlerini okuyarak ileride fatura ve ceza gibi karşılaşılabilecek verimsiz kullanımların önüne geçmektir.

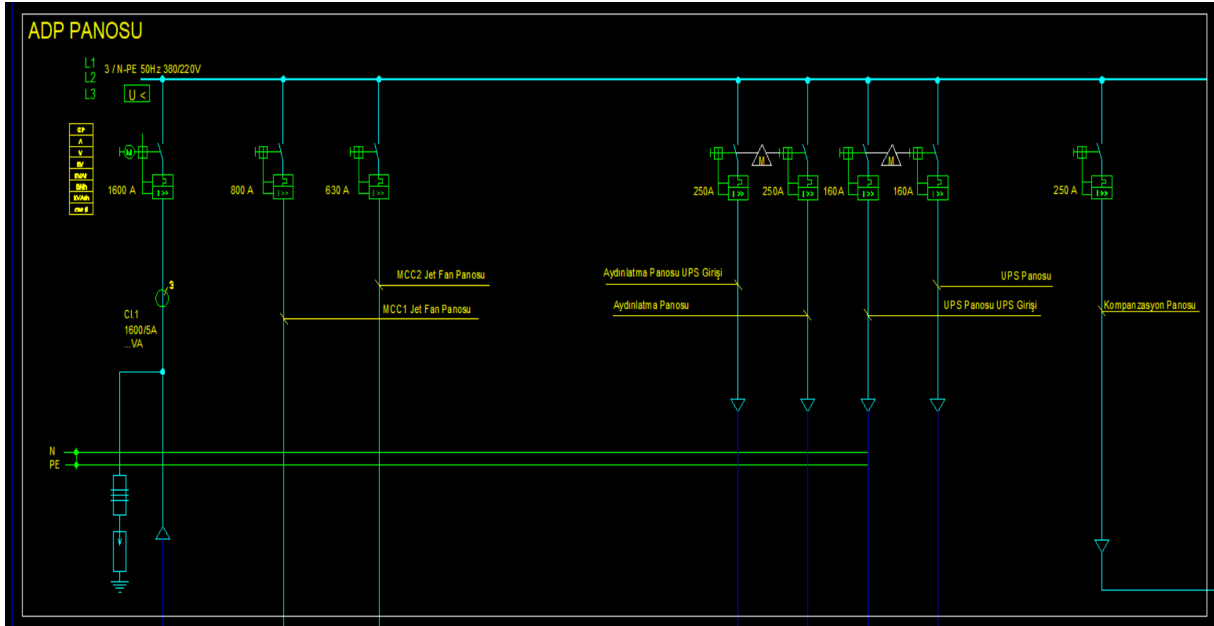
Vecdi Diker Tüneli'nde Schneider markalı PM 5100 serili enerji analizörü kullanılmaktadır. Analizör, transformatör ve jeneratörden çıkıp ana dağıtım panosuna giren kablolarla yani şebekenin giriş L1, L2 ve L3 fazlarına bağlıdır. Yukarıda bahsedilen elektrik verilerini okuyup anlık olarak SCADA ile tünel işletme merkezine göndermekte ve merkezden bu değerler izlenebilmektedir.

4. BULGULAR

Bu kısımda Vecdi Diker Tüneli'nde bulunan elektrik ekipmanlarının işletme yük analizleri yapılmıştır. Sistem boştayken elektriksel değerleri incelenmiş ve jet fanların aşama aşama devreye girmesiyle sahada incelemeler yapılmış, enerji analizöründe veri ile teorik veriler kıyaslanmıştır.

4.1. İŞLETME YÜK ANALİZİ

Vecdi Diker Tüneli'ndeki elektrik ekipmanları 800kVA'lık transformatör ile beslenmekte olup ayrıca transformatörde arıza olması durumunda yedek olarak boşta duran 1100kVA'lık jeneratör ile de beslenebilmektedir. 800kVA'lık transformatör 0,99 güç faktörüyle çalıştığı düşünülürse jeneratörün 0,8 güç faktörü olduğundan tam yükte 880kW güçle çalışacaktır. Transformatör ile jeneratör enerji kabloları jeneratör panosuna bağlanıp buradan ana dağıtım panosuna (ADP) gitmektedirler. Ana dağıtım panosunun tek hat şeması şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Ana Dağıtım Panosu Tek Hat Şeması.

ADP'nin girişinde 1600A'lık sigorta bulunmaktadır. L1,L2 ve L3 fazlarına bağlı enerji analizörü bulunmaktadır. Fazlar ilk olarak MCC1 jet fan panosuna bağlıdır. MCC1 panosu

Ümraniye girişindeki tünellerde bulunan 8 adet jet fanı beslemekte olup panoya 800A'lik sigorta bağlanmıştır. MCC2 jet fan panosu ise Altunizade girişli tünelde bulunan 6 adet jet fanı beslemekte olup panoya 630A'lik bir sigorta bağlanmıştır. Aydınlatma panosu ile 160kVA'lik UPS birbirine bağlanmış olup panolara 250A değerinde sigortalar bağlanmıştır. 160A değerinde sigortaların bağlandığı UPS panosu ile 80kVA güce sahip UPS birbirlerine bağlanmıştır. 250A'lik sigorta kompanzasyon panosuna bağlanmaktadır.

Jeneratör ve ADP tünel işletme merkezinde bulunmaktadır. Tek hat şemasında gösterilen ADP odasının içerisinde odanın solunda başlayarak sırasıyla enerji şalter panosu, jet fan panoları, UPS panosu, otomasyon panosu, kompanzasyon panosu ve 160kVA ile 80kVA'lik UPS'ler bulunmakta olup Şekil 4.2'de ADP odası gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Ana Dağıtım Pano Odası.

Jet fanlar 45'er kW güce sahip olup hepsi çalıştığında MCC1 panosunda 360kW ve MCC2 panosunda 270kW olmak üzere toplam 630kW güç çekeceklerdir. Aydınlatma panosuna bağlı toplam 280 adet 185W ve 180 adet 300W armatür bulunmakta olup hepsi çalıştığında toplam 106kW güç çekeceklerdir. UPS panosuna bağlı UPS'in gücü 80kVA olup cihazların güç faktörü 0,6 olduğu varsayılırsa 48kW ortalama güç çekecektir. Vecdi Diker Tüneli'nde bulunan tüm ekipmanlar tam güçte çalıştığında sistemin gücü 784kW çıkmaktadır.

Transformatörler her zaman tam yükte çalışmayacağından TEDAŞ tarafından transformatör kompanzasyonu %3-%5 arası alınması uygun görülmektedir [49].

$$\text{Sabit transformatör kompanzasyonu} = 800\text{kVA} \times \%4 = 32\text{kVAr} \quad (4.1)$$

Denklem 2.7'yi transformatörün aktif gücünü bulmak için uygularsak transformatörün aktif gücü 799,35kW olarak hesaplanmaktadır. 800kVA'lık bir transformatör %98,97 verimle çalışacağından dolayı bahsi geçen transformatör %100 güçle çalıştığında ortalama 790kW ile yüklenebilecektir [50].

4.2. SİSTEM YÜK ALTINDAYKEN KOMPANZASYON VE HARMONİK İNCELEMESİ

Tünelde bulunan jet fanlar asenkron motor barındırdıklarından çalıştıklarında reaktif enerji üretmektedirler. LED'li aydınlatmalar, elektrik kabloları UPS panosuna bağlı olan diğer ekipmanlar ise çalıştıklarında kapasitif enerji üretmektedirler. Bu ekipmanlar çalıştıklarında sistemi endüktif veya kapasitif yapacaklarından sistemin kapasitör ve reaktörler ile kompanze edilmesi gerekmekte olup ADP odasında kompanzasyon odası bulunmaktadır.

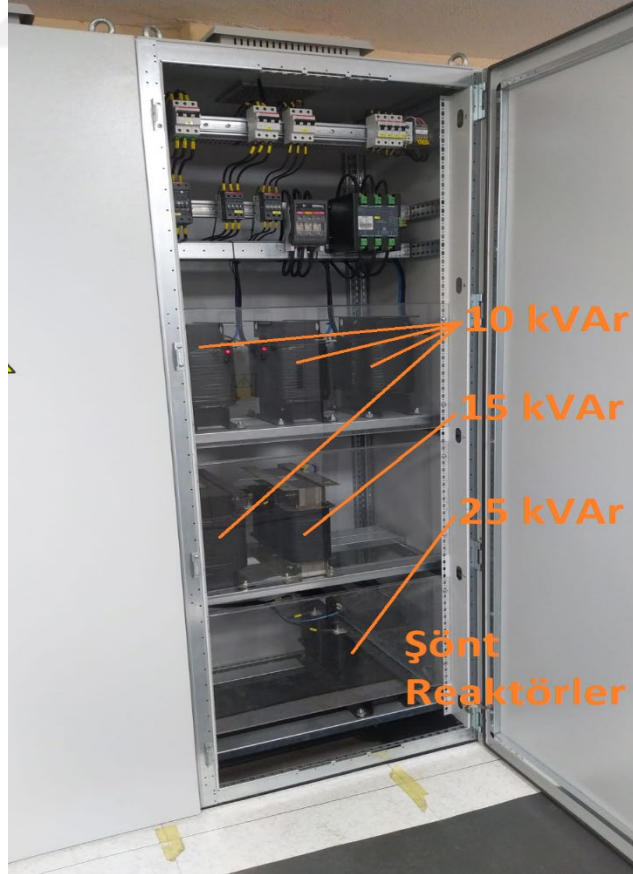
Kompanzasyon panosunda bulunan kapasitör ve reaktörler sistemin harmonik seviyesini ayarlamak için harmonik filtrelidir. Kontaktörler aracılığı ile sistemin endüktif veya kapasitif durumuna göre kapasitör ve reaktörler devreye girip sistemi kompanze etmektedirler. Kompanzasyon panosunda bulunan kapasitörleri ve şönt reaktörler aşağıdaki gibidir:

- 1 adet 5kVAr kapasitör
- 1 adet 10kVAr kapasitör
- 1 adet 15kVAr kapasitör
- 7 adet 25kVAr kapasitör
- 4 adet 10kVAr şönt reaktör
- 1 adet 15kVAr şönt reaktör
- 1 adet 25kVAr şönt reaktör

Şekil 4.3'te kompanzasyon panosundaki bazı kapasitörler ve Şekil 4.4'te şönt reaktörler gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Kompanzasyon Panosundaki Kapasitörlerin Gösterimi.



Şekil 4.4: Kompanzasyon Panosundaki Şönt Reaktörlerin Gösterimi.

Analizler tünel işletme merkezinden yapılan verilerle yapılmıştır. Sistem boşta olup yalnızca tünelde bulunan bazı aydınlatmalar en düşük akıyla çalışırken ve UPS panosundaki bazı cihazlar devredeyken enerji analizöründen değerler alınmış olup Tablo 4.1'e ayrıntılı belirtilmiştir.

Tablo 4.1: Sistem En Düşük Güç Ayarlarında Devredeyken Enerji Analizöründeki Değerler.

Enerji Analizöründeki Elektriksel Değerler	L1	L2	L3
Faz Akımı (A)	33,735	33,04	29,04
Nötr Akımı (A)	13,64		
Toprak Akımı (A)	0		
Faz-Faz Gerilimi (V)	380,1	379,38	380,5
Faz-Nötr Gerilimi (V)	219,85	218,92	219,4
Nötr Toprak Gerilimi (V)	0		
Aktif Güç (W)	6,76	6,64	5,69
Aktif Güç Toplamı (W)	19		
Reaktif Güç (kVAr)	3,06	2,87	2,87
Reaktif Güç Toplamı (kVAr)	8,79		
Görünür Güç (VA)	7,42	7,23	6,37
Görünür Güç Toplamı (VA)	21,02		
Güç Faktörü	0,91	0,92	0,89
Toplam Güç Faktörü	0,91		
Frekans (Hz)	49,98		
Faz Akım Harmoniği THB _i (A)	44,14	42,48	48,43
Nötr Akım Harmoniği (A)	240,41		
Toprak Akım Harmoniği (A)	0		
Faz-Faz Gerilim Harmoniği THB _v (V)	2,37	2,10	2,36
Faz-Faz Ortalama Gerilim Harmoniği (V)	380		
Faz-Nötr Gerilim Harmoniği THB _v (V)	2,44	2,24	2,18
Nötr-Toprak Gerilim Harmoniği (V)	32768		
Faz-Nötr Ortalama Gerilim Harmoniği THB _v (V)	2,34		

Tablo 4.1'e istinaden sistemin aktif güç toplamı 19kW, reaktif güç toplamı 8,79kVAr, güç faktörü ise 0,91 olarak hesaplanmıştır. Sistemin güç faktörü istenilen değere çıkarılmak istendiğinde k değeri hesaplama tablosundan faydalanılır ve Denklem 4.2 ile sistemin kondansatör değeri bulunur [51].

$$Q_c = P \times k \quad (4.2)$$

Tablo 4.2: k Faktörü Hesaplama Tablosu.

Kompanzasyon Öncesi Güç Faktörü	Kompanzasyon Sonrası Tesiste Ölçülen Güç Faktörü												
	0,8	0,82	0,85	0,88	0,9	0,92	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1
0,6	0,58	0,64	0,71	0,79	0,85	0,91	0,97	1	1,04	1,08	1,13	1,19	1,33
0,62	0,52	0,57	0,65	0,73	0,78	0,84	0,9	0,94	0,97	1,01	1,06	1,12	1,27
0,64	0,45	0,5	0,58	0,66	0,72	0,77	0,84	0,87	0,91	0,95	1	1,06	1,2
0,66	0,39	0,44	0,52	0,6	0,65	0,71	0,78	0,81	0,85	0,89	0,94	1	1,14
0,68	0,33	0,38	0,46	0,54	0,59	0,65	0,72	0,75	0,79	0,83	0,88	0,94	1,08
0,7	0,27	0,32	0,4	0,48	0,54	0,59	0,66	0,69	0,73	0,77	0,82	0,88	1,02
0,72	0,21	0,27	0,34	0,42	0,48	0,54	0,6	0,64	0,67	0,71	0,76	0,82	0,96
0,74	0,16	0,21	0,29	0,37	0,43	0,48	0,55	0,58	0,62	0,66	0,71	0,77	0,91
0,76	0,11	0,16	0,23	0,32	0,37	0,43	0,49	0,53	0,56	0,6	0,65	0,7	0,86
0,78	0,05	0,1	0,18	0,26	0,32	0,38	0,44	0,47	0,51	0,55	0,6	0,66	0,8
0,8		0,05	0,13	0,21	0,27	0,32	0,39	0,42	0,46	0,5	0,55	0,61	0,75

Tablo 4.2’de dikey ekseninde tesiste kompanzasyon yapılmadan önceki güç faktörü değerlerini, yatay ekseninde ise tesiste ölçülen toplam güç faktörü değerlerini göstermektedir. Tabloda iki ekseninde buluşan hücreler k faktörünü göstermektedir.

Şebekelerde talep güç faktörü genelde 0,8 kabul edilir. Tablo 4.2’ye göre 0,8 olarak kabul edilen sistemin güç faktörünün şebekenin 0,91 olan güç faktörüne yükseltilmesi için k faktörünün 0,9 ve 0,92’nin ortalaması olan 0,295 olarak alınması gerektiği anlaşılmaktadır. Aktif gücü 19kW olan sistem en düşük güç düzeyinde çalışırken sistemin ürettiği kapasitif güç miktarı için Denklem 4.2’de ki formülü uyguladığımızda yaklaşık 5,6kVAr olmaktadır. Sahada yapılan analiz sonucunda kompanzasyon panosunda 1 adet 15kVAr şönt reaktör devreye girdiği gözlemlenmiştir. Denklem 4.3’te gösterildiği üzere teorik hesaplama göre reaktif güç 9,4kVAr hesaplanmaktadır, enerji analizöründe ise 8,79kVAr olduğu görülmektedir.

$$\text{Reaktif Güç } Q_C = 15\text{kVAr} - 5,6\text{kVAr} = 9,4\text{kVAr} \cong 8,79\text{kVAr} \quad (4.3)$$

4.2.1. Sistemde 2’li Gruplar Halinde 0’dan 6’ya Kadar Olan Jet Fanlar Devreye Girerken Kompanzasyon ve Harmonik Analizi

Başlangıçta sistemde aydınlatmaları ve UPS panosuna bağlı cihazlar çalışır halde olup hiç jet fan devrede değilken enerji analizörü aracılığı ile sistem analizi yapılmıştır. Sonrasında 1. ve 2. jet fanları devreye alınıp analizler yapılmıştır. Bu şekilde 6. jet fana devreye girene kadar sahadan gerekli veriler alınıp Tablo 4.3’e elektriksel değer yazılmıştır.

Tablo 4.3: 6 Jet Fan Devreye Girene Kadar Güç Kademelerinin Analizleri.

	Jet Fanlar Devrede Değilken			2 Jet Fan Devredeyken			4 Jet Fan Devredeyken			6 Jet Fan Devredeyken		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Faz Akımı (A)	111	110	104,8	255,3	261,9	254,7	371,6	386,5	380,9	497,8	524	513,4
Nötr Akımı (A)	11,74			11,06			11,39			12,2		
Toprak Akımı (A)	0			0			0			0		
Faz-Faz Gerilimi (V)	380,1	381,8	382,2	380,6	382,2	382,5	379	380,8	381,1	379	380,8	380,8
Faz-Nötr Gerilimi (V)	220	219,5	221	220,2	219,7	221,8	219,3	218,8	220,6	219,2	218,7	220,6
Nötr Toprak Gerilimi (V)	0			0			0			0		
Aktif Güç (W)	24,2	23,95	22,9	55,48	56,76	55,75	81,35	84,4	83,78	108,8	114,4	112,7
Aktif Güç Toplamı (W)	71			168			250			336		
Reaktif Güç (kVar)	3,3	3,01	3,41	-9,09	-9,52	-8,22	5,28	-4,99	6,53	7,82	6,99	10,83
Reaktif Güç Toplamı (kVar)	9,72			-26,83			6,82			25,64		
Görünür Güç (VA)	24,42	24,14	23,15	56,22	57,56	56,35	81,52	84,54	84,04	109,1	114,6	113,2
Görünür Güç Toplamı (VA)	71,71			170,12			250,1			336,94		
Güç Faktörü	0,99	0,99	0,99	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Toplam Güç Faktörü	0,99			1			1			1		
Frekans (Hz)	50			50,01			50,01			49,95		
Faz Akım Harmoniği THB _i (A)	13,73	12,68	14,73	10,4	9,84	10,69	6,09	5,7	6,27	6,18	5,53	6,29
Nötr Akım Harmoniği (A)	143			120,72			173,34			221,87		
Toprak Akım Harmoniği (A)	0			0			0			0		
Faz-Faz Gerilim Harmoniği THB _v (V)	1,48	1,5	1,52	1,85	1,9	1,96	1,76	1,81	1,84	1,97	2,08	2,15
Faz-Faz Ortalama Gerilim Harmoniği (V)	381,34			381,75			380,32			380,16		
Faz-Nötr Gerilim Harmoniği THB _v (V)	1,56	1,51	1,61	1,91	1,9	2,04	1,79	1,79	1,93	2,05	2,01	2,22
Nötr-Toprak Gerilim Harmoniği (V)	32768			32768			32768			32768		
Faz-Nötr Ortalama Gerilim Harmoniği THB _v (V)	1,54			1,9			1,79			2,03		

Sistemde jet fanlar devrede değilken sahada yapılan analizler sonucunda kompanzasyon panosunda:

- 1 adet 25kVAr,
- 1 adet 15kVAr ve
- 1 adet 10kVAr şönt reaktör devreye girmiştir.

Aktif güç 71kW, güç faktörü 0,99 olup öngörülen 0,8 güç faktörü 0,99'a yükseltileceğinde Tablo 4.2'de verilere göre k faktörü 0,61 alınır ve bunun sonucunda 43kVAr'lık kapasitif güç oluştuğu görülmektedir. Buna istinaden sahada alınan değerler incelendiğinde 50kVAr şönt reaktör devreye girmiş, reaktif güç yaklaşık 7kVAr bulunmuştur. Enerji analizöründe ise 9,72kVAr reaktif güç olduğu görülmektedir. Sahadaki veriler ile teorik veriler birbirlerine yakın çıkmıştır.

Şebekede 2 adet jet fan devreye girdiği zaman kompanzasyon panosunda:

- 2 adet 25kVAr kapasitör devreye girmiş,
- 1 adet 25kVAr,
- 1 adet 15kVAr ve
- 1 adet 10kVAr şönt reaktör devreden çıkmıştır.

Sisteme bağlı enerji analizöründe 2 jet fan devreye girdiğinde aktif güç değişimi 97kW, güç faktörü ise 1 olmaktadır. K faktörünü Tablo 4.2'ye göre 0,75 aldığımızda 72,75kVAr endüktif güç oluştuğu görülmektedir. Buna istinaden kompanzasyon panosuna göre 100kVAr kapasitif güçlük kompanzasyon elemanları devreye girip çıkmış, reaktif güç yaklaşık -27,5kVAr bulunmuştur. Enerji analizöründe ise -26,83kVAr reaktif güç görülmektedir. Sahadaki ölçümlerle teorik hesaplamalar birbirleriyle uyumaktadır.

Şebekede 2 adet jet fan haricinde 2 adet daha devreye girdiği zaman kompanzasyon panosunda:

- 2 adet 25kVAr kapasitör devreye girmiştir.

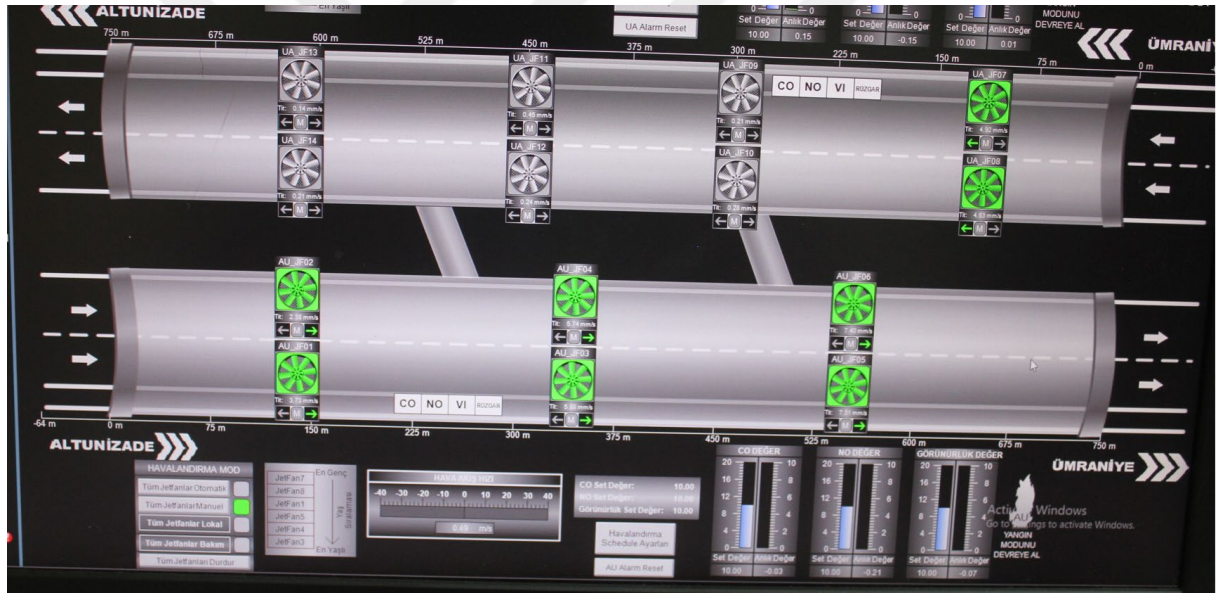
Enerji analizöründe aktif güç değişimi 82kW, güç faktörü ise 1 olmaktadır. Tablo 4.2'de verilere göre k faktörü 0,75 alındığında 61,5kVAr endüktif güç oluştuğu görülmektedir. Buna istinaden kompanzasyon panosuna göre 50kVAr kapasitif güçlük kapasitör devreye girmiş, reaktif güç yaklaşık 11,5kVAr bulunmuştur. Enerji analizöründe ise 6,82kVAr reaktif güç

görülmektedir. Teorik hesaplamamanın doğru olması gerektiği varsayılırsa enerji analizöründe gösterilen reaktif güç değerindeki hata payının yüksek olduğu görülmektedir.

Şebekede 4 adet jet fan haricinde 2 adet daha devreye girdiği zaman kompanzasyon panosunda:

- 1 adet 25kVAr,
- 1 adet 15kVAr kapasitör devreye girmiştir.

Enerji analizöründe aktif güç değişimi 86kW, güç faktörü ise 1 olmaktadır. K faktörü 0,75 alındığında 64,5kVAr endüktif güç olduğu görülmektedir. Buna istinaden kompanzasyon panosuna göre 40kVAr kapasitif güçlük kapasitör devreye girmiş, reaktif güç yaklaşık 24,5kVAr bulunmuştur. Enerji analizöründe ise 25,64kVAr reaktif güç görülmektedir. Sahada yapılan ölçümler ile teorik hesaplamalar birbirlerine yakın çıkmıştır.



Şekil 4.5: Tünelde 8 Adet Jet Fanın Devrede Olduğu Gösteren SCADA Ekranı.

4.2.2. Sistemde 2'li Gruplar Halinde 6'dan 14'e Kadar Olan Jet Fanlar Devreye Girerken Kompanzasyon ve Harmonik Analizi

Tünel sisteminde 6. jet fandan sonra kademeli olarak 8, 10, 12 ve 13. Jet fanlar devreye alınmış olup enerji analizöründen okunan elektriksel değerler Tablo 4.4'te gösterilmiştir. Fanlardan birisinde bakım olduğunda dolayı bir jet fan devreye alınamamıştır. Tablo 4.4'te enerji analizör değerlerinde güç faktörünün 0,97'lere kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Faz-faz ortalama gerilim ve faz-akım harmonik değerleri her jet fan devreye girdiğinde düşmüştür.

Tablo 4.4: 6'dan 13'e Kadar Olan Jet Fanlar Devreye Girene Kadar Güç Kademelerinin Analizleri.

	8 Jet Fan Devredeyken			10 Jet Fan Devredeyken			12 Jet Fan Devredeyken			13 Jet Fan Devredeyken		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Faz Akımı (A)	629,9	664,9	651,8	778,5	825,1	811,6	951,9	1011	990,6	1025	1084	1065
Nötr Akımı (A)	12,41			11,52			11,79			10,07		
Toprak Akımı (A)	0			0			0			0		
Faz-Faz Gerilimi (V)	381,5	383,8	383,5	378,1	380,5	379,9	374,4	376,9	375,9	375	377,4	376,5
Faz-Nötr Gerilimi (V)	220,6	220,2	222,4	218,5	218,3	220,5	216,3	216,1	218,4	216,7	216,4	218,7
Nötr Toprak Gerilimi (V)	0			0			0			0		
Aktif Güç (W)	138,2	145,9	143,9	168,7	179	176,5	202	215	210,5	216,7	229,6	225,4
Aktif Güç Toplamı (W)	428			524			627			672		
Reaktif Güç (kVAr)	-13,5	-12,9	17,41	21,8	19,84	29,61	3,84	39,02	49,91	48,02	47,25	58,48
Reaktif Güç Toplamı (kVAr)	-8,99			71,24			128,77			153,75		
Görünür Güç (VA)	138,9	146,4	145	170,1	180,1	178,9	205,9	218,5	216,3	222	234,4	232,9
Görünür Güç Toplamı (VA)	430,26			529,15			640,69			689,33		
Güç Faktörü	1	1	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,98	0,98	0,97
Toplam Güç Faktörü	0,99			0,99			0,98			0,97		
Frekans (Hz)	49,93			49,99			50			50		
Faz Akım Harmoniği THB _i (A)	9,59	8,46	11,49	6,53	5,64	7,3	4,39	3,84	4,84	3,92	3,45	4,2
Nötr Akım Harmoniği (A)	269,44			303,1			216,48			284,4		
Toprak Akım Harmoniği (A)	0			0			0			0		
Faz-Faz Gerilim Harmoniği THB _v (V)	2,45	3,04	3,15	2,33	2,68	2,81	2,16	2,41	2,52	2,13	2,34	2,44
Faz-Faz Ortalama Gerilim Harmoniği (V)	382,91			379,47			375,71			376,27		
Faz-Nötr Gerilim Harmoniği THB _v (V)	2,64	2,65	3,39	2,47	2,44	2,97	2,27	2,26	2,67	2,22	2,22	2,58
Nötr-Toprak Gerilim Harmoniği (V)	32768			32768			32768			32768		
Faz-Nötr Ortalama Gerilim Harmoniği THB _v (V)	2,65			2,46			2,27			2,22		

Şebekede 6 adet jet fan haricinde 2 adet daha devreye girdiği zaman kompanzasyon panosunda:

- 2 adet 25kVAr,
- 1 adet 10kVAr,
- 1 adet 5kVAr kapasitör devreye girmiştir.

Enerji analizöründe aktif güç değişimi 92kW, güç faktörü ise 0,99 olmaktadır. K faktörü Tablo 4.2'ye göre 0,61 alındığında 56,12kVAr endüktif güç olduğu görülmektedir. Buna istinaden sahadaki veriler incelendiğinde kompanzasyon panosunda 65kVAr kapasitif güçlük kapasitör devreye girmiş, reaktif güç yaklaşık -8,88kVAr bulunmuştur. Enerji analizöründe -8,99kVAr reaktif güç görülmektedir. Sahadaki veriler ile teorik hesaplamalar birebir uyuşmaktadır.

Şebekede 8 adet jet fan haricinde 2 adet daha devreye girdiği zaman kompanzasyon panosunda:

- 2 adet 10kVAr şönt reaktör devreye girmiştir.

Analizöre göre aktif güç değişimi 96kW, güç faktörü ise 0,99 olmaktadır. K faktörü 0,61 alındığında sistemde 58,56kVAr'lık endüktif güç olduğu görülmektedir. Buna istinaden kompanzasyon panosuna göre 20kVAr endüktif güçlü şönt reaktör devreye girmiş, reaktif güç yaklaşık 78,56kVAr bulunmuştur. Enerji analizöründe 71,24kVAr reaktif güç görülmektedir. Sahadaki veriler ile teorik hesaplamalar birbirine yakın çıkmaktadır.

Şebekede 10 adet jet fan haricinde 2 adet daha devreye girdiği zaman kompanzasyon panosunda herhangi bir değişiklik olmamıştır. Panoda tüm kapasitörler devrededir. Analizöre göre aktif güç değişimi 103kW, güç faktörü 0,98 olduğu görülmektedir. K faktörü 0,55 alındığı zaman sistemde 56,65kVAr endüktif güç olduğu görülmektedir. Buna istinaden kompanzasyon panosunda bir değişiklik olmadığından analizörde 10 jet fan devredeyken olan bir önceki reaktif güç değeri 71,24kVAr ile 56,65kVAr'ı topladığımızda 127,89kVAr reaktif güç bulunmuştur. Enerji analizöründe ise 128,77kVAr reaktif güç olduğu görülmektedir. Sahadaki incelemeler ile teorik hesaplamalar birbirleriyle uyuşmaktadır.

Şebekede 12 adet jet fan haricinde 1 adet daha devreye girdiği zaman kompanzasyon panosunda herhangi bir değişiklik olmamıştır. Panoda tüm kapasitörler hala devrededir. Analizöre göre aktif güç değişimi 45kW, güç faktörü 0,97 olduğu görülmektedir. K faktörü 0,50 alındığı zaman sistemde 22,5kVAr endüktif güç olduğu görülmektedir. Buna istinaden kompanzasyon panosunda bir değişiklik olmadığından analizörde 12 jet fan devredeyken olan bir önceki reaktif

güç değeri 128,77kVAr ile 22,5kVAr'ı topladığımızda 151,27kVAr reaktif güç bulunmuştur. Enerji analizöründe 153,75kVAr reaktif güç görülmektedir. Sahadaki veriler ile teorik hesaplamalar birbirlerine yakın çıktığı görülmektedir.



5. TARTIŞMA

Dünyada ve ülkemizde elektrik enerjisine olan talep gün geçtikte artmaktadır. Enerjinin iletim ve dağıtım aşamalarında yük artışları yaşanmaktadır. Tüketicie verilen enerjinin kesintisiz ve verimli şekilde olması gerekmektedir. Özellikle yüksek güç çeken işletmelerde güç değerlerinin doğrultulmuş ve kaliteli olması gerekmektedir. Bu kısımda reaktif ve kapasitif güçlerin kompanze edildiği sistemler ile harmoniklerin azaltılmasının önemi artmaktadır.

Şebekelerde çekilen gücün miktarına paralel olarak sistemlerde kayıplar oluşmaktadır. Bu kayıplar neticesinde şebekenin aktif güç dengesi bozulabilmektedir. Ayrıca anlık güç değeri yüksek olan sistemlerde harmonikler de elektronik cihazlara ve elektrik ekipmanlara zarar verebileceğinden harmonik akımlarının filtrelenmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Elektrik sistemlerinde oluşan bu kayıpları azaltmak için reaktif güç kompanzasyonu yapılması gerekmektedir.

Tünel otomasyon sistemlerinde, şebekede bulunan tüm ekipmanlar birbirleriyle bağlantılı olarak çalışmaktadır. Jeneratörlerden, transformatörde olası arıza durumunda sistemin enerji ihtiyacını karşılaması gerektiği beklenmektedir. UPS'lerin, tünelde bulunan elektronik ekipmanların elektriksel değerlerinin doğrultulmasını ve anlık enerji dalgalandırmalarından korunmasını sağladığı belirtilmiştir. Aydınlatma sistemlerinden, tünelin içinde bulunan araç sürücülerine uygun görüş mesafesi için gerekli olan aydınlatma ihtiyacını karşılaması gerektiğinin beklendiği ifade edilmiştir. Yangın algılama ve kontrol sistemleri, tünelde oluşabilecek yangın durumlarını noktasal tespit ederek otomasyon sistemine bilgi gönderdiği tespit edilmiştir. Trafik izleme ve kamera sistemleri ile tünelin içindeki trafiğin akışı izlenmekte olup tünelin güvenliğini sağladığı belirlenmiştir. Kamu anons ve acil durum sistemleri, tünelde bulunan vatandaşların acil durumlarda tünel yetkilileriyle iletişim kurmasını sağlamaktadır. Havalandırma sistemleri, tünelin içinde bulunan havayı asenkron motora sahip jet fanlar sayesinde uygun seviyelere getirdiği görülmüştür. Enerji analizörü, şebekenin elektriksel değerlerini anlık olarak okuyarak ileride fatura ve ceza gibi karşılaşılabilecek verimsiz kullanımların önüne geçmeyi sağladığı ortaya koyulmuştur.

Bu tezde Vecdi Diker Tüneli baz alınarak tünellerde hangi sistemlerin olduğu incelenmiştir. Tüneldeki ekipmanların detaylarına bakılmış ve sistemlerin işlevleri genel olarak incelenmiştir. Tüneldeki sistemlerin elektriksel değerleri tek hat şemaları üzerinden hesaplanmış, SCADA ekranı gösterimleri şekiller ile desteklenmiştir. Tek hat şemaları üzerinden sistemlerin analizleri yapılmıştır.

Tünel işletme merkezinde saha çalışması yapılmış, sistemin kurulu gücü belirlenmiş, sistem en düşük güçteyken güç analizleri yapılmıştır. Tüneldeki sistemler kademeli olarak yüke bindirilmiş, sahada alınan veriler ile enerji analizörünün okuduğu değerler karşılaştırılmış, teorik hesaplar ile desteklenmiştir. Tüneldeki teorik hesaplamalar literatürde bulunan k faktörü tablosunun yardımıyla yapılmıştır.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında tünel elektromekanik sistemlerinde kullanılan ekipmanların hangi amaçlar doğrultusunda kullanıldıkları irdelenmiştir. Tünellerde bulunan elemanların elektriksel güç değerlerinin hangi aralıklarda olabileceği gösterilmiştir. Olası acil durumlarda tüneldeki ekipmanların çalışma prensipleri gösterilmiştir.

Şebeke boştayken aydınlatmalardan ve elektrik kablolarından dolayı sistemin kapasitif olduğu tespit edilmiş ve bu sebeple endüktif güç ihtiyacını karşılamak için 50 kVAr reaktif güce sahip şönt reaktörlerin kullanıldığı belirlenmiştir. Fazlar arası gerilim dengesizlikleri oluşmadığı görülmüştür.

Bu tez çalışmasında tünelin kompanzasyonunun 7 adet jet fana göre yapıldığı tespit edilmiştir. Sistemin 14 adet jet fana göre değil de 7 adet jet fana göre kompanze edilmesinin nedeni şu sebeplerle açıklanmaktadır:

- Tünelin iki farklı girişi olup her iki tünelde acil durum çıkma olasılığının düşüktür,
- Aynı anda iki tünelde de yangın ve benzeri durumların olması durumunda sistem tam yükte çalışabilmektedir ve şebekenin toplam gücü endüktif yüklü olsa da sistemin aylık ortalama çektiği gücü değiştirmeyecektir
- Şebeke 14 adet jet fana göre kompanze edilmesi kurulum ve işletme maliyetlerini arttırmaktadır.

Sistem en az yükte beslenip normal çalışma şartlarından daha düşük düzeylerde çalıştığında teorik hesaplama ile analizördeki reaktif enerjinin oranı %7, sistem normal yükte beslendiğinde ancak jet fanların devrede olmadığı zaman teorik hesaplama ile analizördeki reaktif enerjinin oranı %38 olarak bulunmuştur. Sistemde iki jet fan devredeyken oran %2,4, dört jet fan devredeyken %68,6, altı jet fan devredeyken %4,6, sekiz jet fan devredeyken %1,2, on jet fan devredeyken %10,2, on iki jet fan devredeyken %0,6, on üç jet fan devredeyken ise %1,6 olarak hesaplanmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda teorik hesaplamalar ile enerji analizöründe okunan reaktif enerjinin aritmetik ortalaması %15 olarak bulunmuştur.

Sistem en az yükle beslenip normal çalışma şartlarından daha düşük düzeylerde çalıştığında fazlarda harmonik akımları %42-%48 gibi yüksek oranlarda, harmonik gerilimleri ise %2-%2,5 arası düşük oranlarda görülmüştür. Sistemde jet fanlar kademeli olarak devreye alındığında harmonik akımları genelde %3-%15 arasında kabul edilebilir düzeylerde, harmonik gerilimleri ise %1,5-%3,5 arası düşük oranlarda olduğu tespit edilmiştir.

Vecdi Diker Tüneli'ndeki sistemler harmonik filtreli şönt reaktör ve harmonik filtreli kapasitörlere sahip oldukları tespit edilmiş olup sistemlerin anlık ihtiyacına göre devreye girmektedirler. Sistemde bulunan yüksek güç çeken jet fanlar kademeli olarak devreye alındığında elektriksel değerlerin paralel olarak yükseldiği görülmüştür. Sistem iyi kompanze edilmiş olup ihtiyaca göre kapasitif veya reaktif güç değerlerini dengelemektedir. Sistem sadece en az yükle normal çalışma şartlarından daha düşük düzeyde çalıştığında harmonik akımlarının yüksek çıktığını gözlemlenmiş olup bu senaryoda oluşan harmonik akımlarını düşürmek için harmonik filtre sayısı artırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1]. <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/sektorlere-gore-toplam-enerji-tuketimi-i-85800>, [Ziyaret tarihi: 02 Ekim 2021].
- [2]. Gökcan, A. O., 2016, *Reaktif Güç Kompanzasyonu Eğitimi İçin Sanal Bir Laboratuvarın Oluşturulması*, Tez(Yüksek Lisans), Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [3]. Kocabaş, E., 2006, *Reaktif Güç Kompanzasyonu ve Simülasyonu*, Tez(Yüksek Lisans), Marmara Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Elektronik Ve Otomasyon Bölümü.
- [4]. Özer, F. G., 2011, *Nonlinear Yüklü Sistemde Filtreleme ve Güç Kompanzasyonu*, Tez(Yüksek Lisans), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [5]. Erol, S., 2011, *Reaktif Güç Kompanzasyonunun Orta Gerilim Şebekesinde Uygulanması ve Enerji Kalitesine Etkilerinin Araştırılması*, Tez(Yüksek Lisans), Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [6]. <https://www.ent.es.com.tr/harmonik-filtre-nedir-nerelerde-kullanilir/>, [Ziyaret tarihi: 03 Ekim 2021].
- [7]. Balaman, O., 2012, *Reactive Power Compensation*, Thesis(Master Degree), Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences.
- [8]. <https://www.khanacademy.org/science/physics/circuits-topic/circuits-resistance/a/ee-voltage-and-current>, [Ziyaret tarihi: 03 Kasım 2021].
- [9]. Koyuncu, M. A., 2012, *Statik VAR Kompanzasyon Sistemlerinin Harmonikler Bakımında İncelenmesi*, Tez(Yüksek Lisans), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [10]. Çetin, A., 2007, *Design And Implementation Of A Voltage Source Converter Based Statcom For Reactive Power Compensation And Harmonic Filtering*, Thesis(The Degree Of Doctor Of Philosophy) The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University.
- [11]. Bayram, M., *Kuvvetli Akım Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu*. Birsen Yayınevi, İstanbul, 254s., 2000
- [12]. Doğan, H. V., 2020, *Dinamik Reaktif Kompanzasyon Sisteminin Dağıtım Transformatörlerine Uygulanması Üzerine Bir Analiz*, Tez(Yüksek Lisans), Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [13]. Özdemir, M., 2011, *Petrol Sondajı Tesislerinde Klasik Kompanzasyon Sistemi Yerine Statik Var Kompanzasyon Sisteminin Uygulanması*, Tez(Yüksek Lisans), Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi.
- [14]. Engin, B., 2008, *Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Kompanzasyon Ve Enerji Kalitesi Sorunları*. Tez(Yüksek Lisans), İstanbul Teknik Üniversitesi.

- [15]. Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği Ve Kalitesi Yönetmeliği, T. C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2010.
- [16]. Kürker, F., & Taştaltın, R. (2016), Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, *Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Meydana Getirdiği Kayıpların Analizi*, pp. 21-38.
- [17]. Özer, F. G., 2011, *Nonlinear Yüklü Sistemde Filtreleme ve Güç Kompanzasyonu*, Tez(Yüksek Lisans), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [18]. Elmaslar, B., & Balcı, M. E. (2009), *Aktif Enerji Ölçen Sayaçların Sinüsoidal Olmayan Şartlarda Performans Analizi*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü
- [19]. Özsürekcı, O., 2008, *Filtreli Dinamik Kompanzasyon*, Tez(Yüksek Lisans), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [20]. Kocatepe Celal ve diğ. (2003). *Elektrik Tesislerinde Harmonikler*. İstanbul: Birsan Yayınevi.
- [21]. Şerbetçi, M. B., 2019, *Harmoni Problemi Olan Tesislerde Harmonik Filtreli Kompanzasyon Sistemlerinin Tasarımı ve Analizi*, Tez(Yüksek Lisans), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [22]. Sucu, M., 2003, *Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyonu*, Tez(Yüksek Lisans), Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [23]. Atmaca, H., 2020, *Alçak Gerilim Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu*, Tez(Yüksek Lisans), Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [24]. Balcı, M. E., 2009, *Harmonik Üreten Yüklerin Belirlenmesi ve Optimum Kompanzasyon İçin Yeni Bir Güç İfadesi*, Tez(Yüksek Lisans), Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [25]. Erdem, U., 2013, *Optimal Reaktif Güç Kompanzasyonu ve Harmoniklerin Güç Faktörüne Etkisi*, Tez(Yüksek Lisans), Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [26]. Uçar, F., 2012, *Paralel Aktif Güç Filtresi Kullanarak Harmonik ve Reaktif Güç Kompanzasyonu Yapılması*, Tez(Yüksek Lisans), Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [27]. <https://www.enerjiportali.com/kompanzasyon-nedir-cesitleri-nelerdir/>, [Ziyaret tarihi: 5 Ocak 2022]
- [28]. Düzgün, A., 2012, *Güç Sistemlerinde Harmoniklerin İncelenmesi Ve Akım Harmoniklerinin Azaltılması İçin Aktif Güç Filtre Tasarımları*, Tez(Yüksek Lisans), Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [29]. <http://hbogm.meb.gov.tr/MTAO/1EnerjiUretimiIletimiVeDagitimi/unite10.pdf>, [Ziyaret tarihi: 5 Ocak 2022].
- [30]. Alwan, I. M., 2017, *Investigation of Reactive Power Compensation in a Power Distribution Network*, Thesis(Master Degree), University of Turkish Aeronautical Association Institute of Science and Technology.
- [31]. Olcay, K., 2018, *Reaktif Güç ve Harmoniklerin Enerji Verimliliği ve Kablo Ömrüne Etkileri*, Tez(Yüksek Lisans), Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

- [32]. Üstünel, M., 2012, *Elektrik Bilgisi*, Meb Hayat Boyu Öğrenme Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.
- [33]. Baş, Z., 2014, *Güç Sistemlerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu ve Harmonik Analizi*, Tez(Yüksek Lisans), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [34]. Karaoğlu, B., 2020, *Üniversiteler İçin Fizik*, Seçkin Akademik ve Mesleki Yayınlar
- [35]. Milli Eğitim Bakanlığı, 2011, *Elektrik Elektronik Teknolojisi Kompanzasyon Cihazları ve Montajı*, Ankara, 523EO0048
- [36]. <https://www.arselektrik.com/trifaze-sont-reaktor-15-kvar-400v-sr-15-t>, [Ziyaret tarihi: 14 Şubat 2022].
- [37]. <https://www.elektrikpiyasa.com/urun/entes-50kvar-400vda-690v-3-tristorlu-statik-kontaktor-m2020>, [Ziyaret tarihi: 14 Şubat 2022].
- [38]. <https://kondas.com.tr/urun/tristorlu-kompanzasyon-anahtarlama-modulleritsc-tcr/>, [Ziyaret tarihi: 14 Şubat 2022].
- [39]. Palta, O., 2015, *Bir Fazlı Paralel Aktif Güç Filtresi Devrelerinin Modellenmesi Ve Benzetimi*, Tez(Yüksek Lisans), Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [40]. Milli Eğitim Bakanlığı, 2012, *Elektrik Elektronik Teknolojisi Kompanzasyon Sistemi*, Ankara, 523EO0079
- [41]. <https://alitlfrlgl.blogspot.com/2017/12/elektrik-sebekeleri.html>, [Ziyaret tarihi: 26 Şubat 2022].
- [42]. <https://ogunhaber.com/amp/yazarlar/necmi-ozdemir/isbakta-bir-gun-akilli-sehrin-mimari-10230m.html>, [Ziyaret tarihi: 26 Şubat 2022].
- [43]. https://www.inform.com.tr/kesintisiz_guc_kaynagi_inform_3_faz-giris-3_faz_cikis_pyramid_dsp_p.html, [Ziyaret tarihi: 5 Mart 2022].
- [44]. Akbulut, A., 2006, *Tünel Aydınlatması*, Tez(Yüksek Lisans), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [45]. Cengiz, M., S., 2019, Tünel Aydınlatma Sistemlerinde Aydınlik Düzeyi Toleransının Bakım Faktörüne Göre Saptanması, *Uluslararası Mühendislik ve Araştırma Geliştirme Dergisi*, 11, 432-441.
- [46]. Dinler, N. & Kaçan, Ö., 2020, Uzun Bir Karayolu Tünelinde Acil Durum Simülasyonu, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 40, 2, 319-334.
- [47]. <https://zitron.com/tr/tunel-havalandirmasi/>, [Ziyaret tarihi: 20 Mart 2022].
- [48]. <https://www.aironn.com.tr/urunler/duman-egzoz-fanlari/tunel-fanlari>, [Ziyaret tarihi: 21 Mart 2022].
- [49]. <http://makale.eceylan.com/trafoda-kompanzasyon-gucu-hesabi/>, [Ziyaret tarihi: 21 Mart 2022]
- [50]. <https://www.maksan.com.tr/transformatorlerin-ana-olculeri-ve-teknik-degerler/>, [Ziyaret tarihi: 13 Nisan 2022]

- [51]. <https://enerji360.com/guc-kalitesi/k-faktoru-tablosu-ile-kompanzasyon-hesabi-nasil-yapilir>, [Ziyaret tarihi: 29 Mayıs 2022]



EKLER

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

Furkan_Arslan

ORJİNALLİK RAPORU

% 13	% 11	% 1	% 6
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	% 3
2	acikerisim.sakarya.edu.tr İnternet Kaynağı	% 2
3	acikerisim.kirklareli.edu.tr:8080 İnternet Kaynağı	% 1
4	gonenmem.meb.k12.tr İnternet Kaynağı	% 1
5	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	% 1
6	enerjiveotomasyon.wordpress.com İnternet Kaynağı	% 1
7	Submitted to Gumushane University Öğrenci Ödevi	<% 1
8	www.fluke.com İnternet Kaynağı	<% 1
9	hdl.handle.net İnternet Kaynağı	<% 1