



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**DÖKME YÜK GEMİLERİNDE
GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİNİN
SİMULINK İLE MODELLENMESİ**

İsmail Nuri BERTİZLİOĞLU

**DENİZ ULAŞTIRMA MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

EKİM 2021



**DÖKME YÜK GEMİLERİNDE GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİNİN
SİMULINK İLE MODELLENMESİ**

İSMAİL NURİ BERTİZLİOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
DENİZ ULAŞTIRMA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2021

İsmail Nuri BERTİZLİOĞLU tarafından hazırlanan “DÖKME YÜK GEMİLERİNDE GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİNİN SİMULİNK İLE MODELLENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile İskenderun Teknik Üniversitesi Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Seçil GÜLMEZ

Denizcilik İşletmeleri Yönetimi, İskenderun Teknik Üniversitesi)

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

.....
.....

Başkan: Dr. Öğr. Üyesi Seçil GÜLMEZ

Denizcilik İşletmeleri Yönetimi, İskenderun Teknik Üniversitesi

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

.....
.....

Üye: Doç. Dr. Oğuzhan AKGÖL

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İskenderun Teknik Üniversitesi

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

.....
.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Rasim DOĞAN

Elektrik Mühendisliği, Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

.....
.....

Tez Savunma Tarihi:/...../...

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

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
 - Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İsmail Nuri BERTİZLİOĞLU

...../...../.....

DÖKME YÜK GEMİLERİNDE GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİNİN
SİMULİNK İLE MODELLENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

İsmail Nuri BERTİZLİOĞLU

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Ekim 2021

ÖZET

Gemi elektrik sistemlerindeki güç kalitesi kavramı, elektronik kontrol sistemlerinin ve elektrik tahrik sistemlerinin kullanımının yaygınlaşmasıyla daha önemli hale gelmiştir. Düşük güç kalitesi geminin elektrik şebekesi performansı ile beraber enerjinin verimli kullanımını, seyir güvenliğini ve denizde can güvenliğini etkilemektedir.

Bu tez çalışmasında, bir dökme yük gemisi üzerindeki elektrik güç kalitesi kavramı ve elektrik sistemindeki problemlerden kaynaklanabilecek önemli güç kalite bozuklukları yaşanmış bir yolcu gemisi kazası göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Bu gemi kazası sırasında meydana gelmiş olması muhtemel güç kalitesi problemleri MATLAB/Simulink programı aracılığıyla modellenerek sinüzoidal dalgaların olması gerekenden ne kadar saptığı güç kalitesi bozuklukları olarak ortaya konulmuş ve gemilerdeki elektrik güç kalite kavramının önemini vurgulanması amaçlanmıştır. Yolcu gemisinde harmonik güç bozukluğunun önlenmesine yönelik tesis edilen harmonik filtrelerin patlaması sonucu sistem çökmesiyle (blackout) sonuçlanan kaza sırasında harmonik filtrelerin devre dışı kalma durumu kurgusal olarak bir dökme yük gemisine uyarlanarak, harmonik filtreli ve filtresiz durumlar analiz edilmiştir. Ayrıca, filtredeki kondansatörlerin terminallerinin kısa devre olmasıyla yaşanmış olması muhtemel gerilim yükselmesi ve düşmesi olayları incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında, gemi elektrik sistemlerinde güç kalitesini temin etmeye yönelik ekipmanlar incelenmiş, oluşacak muhtemel arızaların gemi kazalarına sebep olabileceği sonucuna varılmış ve bu gibi kazalara maruz kalınmaması adına yapılabilecek ilave iyileştirmeler ve değişikliklere yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Elektrik güç kalitesi, dökme yük gemisi, harmonik, gemi elektrik sistemleri, Simulink.

Sayfa Adedi : 112

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Seçil GÜLMEZ

MODELING OF ELECTRIC POWER QUALITY PROBLEMS IN BULK CARRIERS
WITH SIMULINK
(M. Sc. Thesis)

İsmail Nuri BERTİZLİOĞLU

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

October 2021

ABSTRACT

The concept of power quality in ship electrical systems has become more important with the widespread use of electronic control systems and electrical drive systems. The low power quality affects the ship's electrical network performance, as well as the efficient use of energy, cruise safety and life safety at sea.

In this thesis, the concept of electrical power quality on a bulk carrier and a passenger ship accident with significant power quality disturbances that may arise from problems in the electrical system are examined. Possible power quality problems that may have occurred during this ship accident were modeled through the MATLAB / Simulink program and the extent to which sinusoidal waves deviated from what they should be was revealed as power quality disturbances, and it was aimed to emphasize the importance of the concept of electrical power quality in ships. The failure of the harmonic filters during the accident, which resulted in a blackout as a result of the explosion of the harmonic filters installed for the prevention of harmonic power disturbance on the passenger ship, was adapted to a bulk carrier, fictionally, and the cases with and without the harmonic filter were analyzed. In addition, possible voltage spikes and drops due to short circuit of the terminals of the capacitors in the filters are investigated.

In this thesis, equipment to ensure power quality in ship electrical systems has been examined, it has been concluded that possible malfunctions may cause ship accidents, and additional improvements and changes that can be made in order to avoid such accidents are included.

Key Words : Electric power quality, bulk carrier, harmonic, ship electrical systems
Simulink.
Page Number : 112
Supervisor : Assist. Prof. Dr. Seçil GÜLMEZ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasını hazırlamamda kıymetli görüş ve önerilerini paylaşarak büyük katkıda bulunan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Seçil GÜLMEZ'e teşekkürlerimi ve sonsuz saygılarımı sunarım.

Tez çalışması sürecinde desteklerini esirgemeyen değerli hocalarım Doç. Dr. Alpaslan ATEŞ ve Arş. Gör. Yiğit GÜLMEZ'e teşekkürü borç bilmekteyim.

Öğrenimim boyunca güleryüzlülüğü ve yardımseverliğiyle idari konularda beni yönlendirerek büyük destekleri olan İskenderun Teknik Üniversitesi idari personeli Bünyamin SENDEL'e teşekkürü borç bilmekteyim.

Bu süreçte bana güvenen, düşüncelerini benimle paylaşan ve her konuda bana yardımcı olan başta değerli babam Ökkeş BERTİZLİOĞLU olmak üzere tüm aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. GEMİ ELEKTRİK SİSTEMLERİNDE GÜÇ KALİTESİ VE GÜÇ KALİTE BOZUKLUKLARI	7
2.1. Literatür Taraması	7
2.2. Gemilerde Elektrik Güç Kalitesi ve Gemi Elektrik Sistemleri	9
2.2.1. Güç kalitesi.....	9
2.2.2. Gemi elektrik güç sisteminin yapısı ve teknolojik gelişimi.....	10
2.2.3. Güç kalitesi bozukluklarının sonuçları.....	14
2.3. Gemilerdeki Güç Kalite Bozuklukları	15
2.3.1. Gerilim düşmesi.....	16
2.3.2. Gerilim yükselmesi.....	19
2.3.3. Harmonik bozukluk	20
2.3.4. Geçici durum bozuklukları ve gerilim çentikleri.....	22
2.3.5. Frekans dalgalanmaları.....	25
2.3.6. Kaçak kapasitif akımlar	26

	Sayfa
2.4. Harmonikler.....	27
2.4.1. Harmonik ve güç faktörü	27
2.4.2. Rezonans	31
2.4.3. Harmonik üreten kaynaklar.....	33
2.4.4. Harmoniklerin etkileri.....	35
2.4.5. Harmoniklere karşı alınan tedbirler ve sistem filtreleme yöntemleri.....	42
2.5. Elektrik Güç Kalite İndislerinin Yasal Sınırlamaları	49
2.5.1. Güç kalitesi indislerinin sapmaları.....	50
2.5.2. Güç kalitesi izleme için yasal araçlar ve sınır değerleri.....	51
3. MATERYAL VE YÖNTEM	55
3.1. Dökme Yük Gemisi Elektrik Sistem İncelemesi	55
3.2. Filtre Tasarımı	66
3.3. Queen Mary 2 Yolcu Gemisi Kazası	66
3.3.1. Arka plan	66
3.3.2. Kazanın oluşumu	68
3.3.3. Geminin zararı	71
3.4. Yöntem.....	73
4. MODEL.....	77
4.1. Simulink Modeli	77
4.2. Hassasiyet Analizi	91
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	95
KAYNAKLAR	106
DİZİN	112

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Karasal sistemlerde elektrik güç kalite değerlendirmesi konularına ilişkin önemli standartlar.....	52
Çizelge 2.2. Gemi şebekelerinde elektrik güç kalite değerlendirmesi konularına ilişkin önemli standartlar.....	53
Çizelge 2.3. Gemi güç sistemlerinde elektriksel güç kalitesi indislerinin sınır değerleri	54
Çizelge 4.1. Simülasyonda kullanılan bloklar	79
Çizelge 4.2. Farklı kapasitedeki filtrelerin kıyaslanması.....	93
Çizelge 5.1. Filtreler devre dışıyken gerilim harmonikleri.....	95
Çizelge 5.2. Filtreler devre dışıyken akım harmonikleri	95
Çizelge 5.3. Filtreler devredeyken gerilim harmonikleri.....	96
Çizelge 5.4. Filtreler devredeyken akım harmonikleri	96
Çizelge 5.5. Gerilim yükselmesi ve düşmesi	96
Çizelge 5.6. Gerilim ve akım harmonikleri	97
Çizelge 5.7. Gerilim harmonikleri	99
Çizelge 5.8. Durum 1 ve durum 2 parametreleri	99
Çizelge 5.9. Durum 1 filtreli tasarım	102
Çizelge 5.10. Durum 2 filtreli tasarım	103

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Üç fazlı bir geminin elektrik gücü sisteminin genel diyagramı.....	11
Şekil 2.2. Gemi teknolojisinin gelişmesi sonucu gemi elektrik enerjisi sistem yapılarına bazı örnekler.....	12
Şekil 2.3. Güç sistemindeki arızanın gösterilmesi	16
Şekil 2.4. Farklı arıza tiplerinden dolayı gerilim düşmesi	17
Şekil 2.5. Asenkron motorun çalıştırılması sırasında gerilim düşmesi.....	18
Şekil 2.6. Gerilim yükselmesi	19
Şekil 2.7. Gerilimin harmonik ve temel bileşenlerinin karşılaştırılması	21
Şekil 2.8. Tümü elektrikli bir gemide gerilim dalga biçiminde geçiş bozulması	24
Şekil 2.9. Altı-darbeleri dönüştürücü tarafından üretilen gerilim çentiği.....	24
Şekil 2.10. Çentik derinliği ve alanının tanımı	25
Şekil 2.11. Frekans dalgalanması.....	26
Şekil 2.12. Doğrusal yüklenmede güç faktörü.....	28
Şekil 2.13. Harmonikli sistemde güç faktörü bileşenleri.....	29
Şekil 2.14. Harmonikli üç fazlı sinyallerin akım dalga formu.....	34
Şekil 2.15. Akım dalga formunun harmoniklerle FFT analizi.....	34
Şekil 2.16. Güç kaynağı tarafından çizilen akımların harmonik spektrumu.....	40
Şekil 2.17. Darbe akımları nedeniyle gerilim tepe düzleşmesi.....	41
Şekil 2.18. DC bara geriliminin tepe düzleşmesi etkisi.....	41
Şekil 2.19. Besleme kaynağını azaltan tepe düzleşmesi	42
Şekil 2.20. Pasif filtre çeşitleri	43
Şekil 2.21. Aktif filtreleme	46
Şekil 2.22. Faz kaydırma	47

Şekil	Sayfa
Şekil 2.23. LC filtre	48
Şekil 2.24. Dupleks reaktörler	49
Şekil 3.1. Tahrik sistemi ve harmonik filtre	67
Şekil 3.2. Yüksek gerilimli elektrik şebekesi.....	68
Şekil 3.3. MATLAB FFT analiz penceresi.....	75
Şekil 4.1. Elektrikli gemi tahrik sistemi.....	77
Şekil 4.2. Harmonik filtre devre dışı.....	81
Şekil 4.3. Harmonik filtre devre dışıyken toplam gerilim harmonik bozulma	82
Şekil 4.4. Harmonik filtre devre dışıyken toplam akım harmonik bozulma.....	83
Şekil 4.5. Harmonik filtre devrede.....	84
Şekil 4.6. Harmonik filtre devredeyken toplam gerilim harmonik bozulma	88
Şekil 4.7. Harmonik filtre devredeyken toplam akım harmonik bozulma.....	89
Şekil 4.8. Gerilim düşmesi.....	90
Şekil 4.9. Gerilim yükselmesi.....	91
Şekil 4.10. Küçük kapasitedeki filtrenin toplam akım bozulması	92
Şekil 4.11. Kaynak endüktansı artınca gerilim harmoniği.....	94
Şekil 5.1. Simulasyon sonuçları.....	98

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Dökme yük gemisi.....	1
Resim 3.1. K1ç anakumanda pano odasında hi-Fog cam ampul	69
Resim 3.2. K1ç harmonik filtrede ve ana kumanda pano odasındaki su	70
Resim 3.3. Çöken kondansatör	71
Resim 3.4. Şişen kondansatörün üstten görünümü	72
Resim 3.5. Harmonik filtre baraları üzerindeki arklar	73

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

A	Amper
hz	Hertz
V	volt
VA	VoltAmper
W	Watt

Kısaltmalar

Açıklamalar

AC	Alternative Current (Alternatif Akım)
DC	Direct Current (Doğru Akım)
DG	Diesel Generator (Dizel Jeneratör)
FFT	Fast Fourier Transform
GTG	Gas Turbine Generator (Gaz Türbin Jeneratör)
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical &Electronical Engineers
P	Aktif Güç
Q	Reaktif Güç
QM2	Queen Mary 2
RMS	Root Mean Square
S	Görünür Güç
THD	Total Harmonic Distortion
UPS	Uninterruptable Power Supply
VFD	Variable Frequency Drive

1. GİRİŞ

Deniz taşımacılığı maliyetlerin düşük olması sebebiyle uluslararası ticarete en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Yük gemilerinin büyük kapasiteleri, talebe göre miktarın ayarlanabilme esnekliğinin yüksek olması ve gemilerin uzun ömürlü olması deniz taşımacılığının en önemli avantajlarıdır (Naletina, 2017).

Son 20-30 yılda dökme yük taşımacılığında özel olarak tasarlanmış dökme yük gemileri sıklıkla tercih edilmektedir. Tersanelerde ilk defa 1950'li yıllarda görülmeye başlanan dökme yük gemileri, mevcut ticari gemilerin yaklaşık olarak %33'lük kısmını oluşturması sebebiyle deniz yolu taşımacılığı için oldukça önemlidir (Karanassos, 2016). Dökme yük gemileri, yükleri büyük miktarlarda taşıyan bir gemi türüdür. Bu tür gemilerde taşınan kargo esnek bir kargodur, yani belirli bir ambalajı yoktur ve genellikle tahıl, cevher çeşitleri (kömür, tahıl, boksit ve alümina fosfat taşı) ve çimento gibi öğeler içerir (UNCTAD, 2014).



Resim 1.1. Dökme yük gemisi (Lovstad, 2020)

Dökme yük taşımacılığı uluslararası denizyolu taşımacılık sektöründe %40'luk bir paya sahiptir (UNCTAD, 2018). Bu rakamlara bakıldığında, dökme yük gemisinin, denizcilik sektöründeki genel faaliyet programında önemli bir konuma sahip olduğu sonucuna varılabilir. Emniyet ve güvenliğe yönelik tehditlerin azalmasıyla birlikte, bu gemilerin

gelecek yıllarda denizcilik endüstrisinin önemli bir parçası olmaya devam edeceği tahmin edilmektedir (MI News Network, 2017). Taşınan yüklerin, hasarsız olarak planlanan zamanda hedeflenen noktaya taşınması, lojistiğin en önemli fonksiyonlarından biridir (Nomer, 2014). Bir geminin inşa ve operasyon süreçlerinde statik (gemi konstrüksiyonu), mekanik, elektrik vb. birçok parametresi güvenli olarak yol alabilmesi için büyük önem arz etmektedir. Bahse konu parametrelerin herhangi birinde olabilecek bir hatanın sonucu, maddi ve manevi büyük kayıplar olarak ortaya çıkabilmektedir. Gemilerin inşa ve operasyon süreçlerinde önemli parametrelerden olan elektrik, nitelik ve niceliğinin uygunluğu anlamında literatürde elektrik güç kalitesi adı altında incelenmektedir. Literatürde “gerilim kalitesi”, “güç kaynak kalitesi” veya “temiz güç” olarak ifade edilen bu kavram, kabul edilemeyecek seviyede distürbans (bozukluk) içermeyen güç anlamına gelmektedir (Tulsky, Vamn, Tolba, Sharova ve Diab, 2016). IEEE 1100 standardı güç kalitesini “*Hassas ekipmana kendi çalışmasına uygun düzeyde güç verilmesi ve topraklanması fikri*” olarak tanımlarken (IEEE, 2005), Özdemir ise “*Mükemmel bir elektrik enerjisi kaynağı, her zaman kullanıma hazır, gerilim ve frekans değerleri toleranslar dâhilinde, tamamen gürültüsüz ve sinüs eğrisi şeklinde dalga biçimine sahip elektrik üreten enerji kaynağıdır.*” olarak belirtmiş (Özdemir, 2009), enerji kaynağına ait elektrik dalga biçiminin özelliğini vurgulayarak elektrik güç kalite kriterini ortaya koymuştur. Gerek hassas ekipmanın seviyesine uygun olarak güç verilmesi ve topraklanması, gerekse dalga biçiminin sinüs şeklinde olması kriterleri göz önüne alınırsa, elektrik güç kalitesi bütün olarak gerilim ve akım dalga şekliyle beraber, genlik ve frekanslar gibi tüm durumları kapsar (Tabak ve Yalçın, 2004). Literatürde gemilerde güç kalitesi ile ilgili çeşitli yayınlar bulunmaktadır. Barros ve Diego (2016), önemli güç kalite bozukluklarını ve gemi elektrik sistemi üzerindeki etkilerini ortaya koymayı amaçlamışlar, bu bozuklukların geminin enerji verimliliğini ve seyir gibi kritik sistemler üzerindeki olumsuz sonuçlarını ortaya koymuşlardır. ABS (2006), güç kalitesi bozukluklarından olan harmonik kavramını, harmoniklerin etkilerini ve harmonik üreten kaynakları açıklamayı amaçlamış olup, elektrikli tahrik sistemlerinin artmasıyla beraber harmonik bozukluk konusunun ve harmonikleri azaltma yöntemlerinin giderek daha da önemli hale geldiklerini ortaya koymuştur. Shabbir ve diğerleri (2021), çalışmalarında elektrik güç kalitesi standartlarının karşılaştırmasını yapmayı amaçlamışlar ve güç kalitesinin ilgili standartlar doğrultusunda takibinin etkin olarak yapılması gerektiğini ortaya koymuşlardır. Dallas (2019), elektrik gücünü yönetmek ve optimize etmek için Uluslararası Denizcilik Örgütü kurallarında belirtilen kritik yüklerin genel gemi verimliliği üzerindeki etkilerini izlemeyi amaçlamış olup, elektrik gücü kalitesi izleme sisteminin geliştirilmesi ve

kurulumu için bir yöntem ortaya koymuştur. Jayasinghe, Meegahapola, Fernando, Jin ve Guerrero (2017), gemi elektrik şebekelerinde son yıllarda elektrik tahrik motoru gibi büyük dinamik yüklerin yer aldıkları şebekelerde güç kalite konusunun daha önemli hale gelmesinden dolayı güç kalitesinin iyileştirilmesine yönelik yeni yöntemleri araştırmayı amaçlamışlar, esasen güç kesintilerinde kullanılan enerji depolama sistemlerinin geliştirilerek güç bozukluklarında yavaş bir geçiş yapılabilmesi ve gerilim/frekans dalgalanmalarının azaltılabilmesinin mümkün olduğunu ortaya koymuşlardır. Güç kalitesi problemlerini konu edinen bu literatür çalışmaları, genel olarak güç kalitesi kavramından, güç kalitesi bozukluklarından ve giderilme yöntemlerinden bahsetmektedir. Çalışmanın konusu olan güç kalitesi problemlerinin, farklı gemi tipleri üzerinde incelenmesi üzerine çeşitli literatür çalışmaları vardır. Doerry ve Clayton (2005), Amerika Birleşik Devletleri donanmasının savaş gemilerindeki elektrik güç kalitesi servisinin sürekliliğine önem vermesine rağmen, servis hizmetlerinin sürekliliği ve takibi için herhangi bir ölçüt geliştirmediğini belirtmişlerdir. Bu kapsamda çalışmalarının amacının servis kalitesi (Quality of Service-QOS) adı verilen ve gemideki önemli elektrik üreticilerinin/tüketicilerinin servis/bakım kalitesini takipte kullanılan bir sistemin aktif hale getirilmesi olup, ana başlatıcının, güç dönüştürücünün ve yükün arıza biçimiyle güvenilirliğinin servis kalitesinin önemli parametreleri olduğunu ortaya koymuşlardır. Skjong, Suul, Rygg, Johansen ve Molinas (2016), dizel elektrik sistemiyle tahrik olan deniz taşıtları için model tahmin kontrolü oluşturarak harmonik bozulumu en etkin şekilde bastırmayı amaçlamışlar, model tahmin kontrol yönteminin geleneksel yöntemlerden daha etkin olduğunu ortaya koymuşlardır. Ackermann (2013), çalışmasında harmonik bozulumu gözlemlemeyi amaçlayarak elektrikli tahrik sistemiyle hareket eden bir yolcu gemisi ile offshore noktalarda kurulu olan rüzgar türbinlerinin bakımlarında kullanılan küçük bir deniz taşıtının üzerinde simülasyon yapmış ve güç kalite ekipmanları devrede olsa da farklı çalışma rejimlerinde harmoniklerin sistemi tehlikeye sokacak sonuçlara yol açabileceğini ortaya koymuşlardır. Semin ve Zaman (2018), çalışmalarında bir tanker gemisinin farklı çalışma durumlarındaki harmonik bozulumunu incelemeyi amaçlayarak simülasyon modelleri kurmuş ve güç kalite ekipmanlarının devrede olmadığı durumlardaki güç kalite seviyesinin gemideki elektrikli cihazlara zarar verebileceğini ortaya koymuşlardır. Santoso, Cahyono, Laksana ve Nurfalah (2020), çalışmalarında harmonik, gerilim dengesizliği ve düşük güç faktörü gibi güç kalitesi problemlerini Çapa Tutma Çekici Teknesi (Anchor Handling Tug Supply-AHTS) üzerinde incelemeyi amaçlamışlar, tam yol alırken güç kalitesinin iyi olmasına rağmen manevra sırasında lineer olmayan güç tüketiminin

artmasıyla beraber harmoniklerin önemli bir problem haline geldiğini tespit etmişler ve filtrelemeden sonra ise güç kalitesinin makul düzeye geldiğini belirterek güç kalite ekipmanlarının önemini ortaya koymuşlardır. Farklı gemi tipleri için yapılan bu literatür çalışmalarında simülasyon programları yardımıyla güç kalitesi problemlerinin çeşitli yöntemler kullanılarak giderilmeye çalışılması ve yöntemin başarısı değerlendirilmiş olup, gemilerin tipleri değişse de sistemdeki harmonik bozukluk durumuna uygun olan harmonik filtrelerin tesis edilmesi ve bu sayede güç kalitesinin yüksek düzeyde tutulması gerektiği sonucuna varılmıştır. Literatürden elde edilen çalışmalarda farklı türlerdeki gemilerdeki güç kalitesi problemlerine ve onların çözümlerine dair kullanılan yöntemlere geniş yer verildiği görülmüştür. Ancak elektrik tahrikli olarak tasarlanan bir dökme yük gemisinde yaşanmış muhtemel güç kalitesi problemlerinin elektrik sisteminden kaynaklı yaşanmış bir gemi kazası göz önünde bulundurularak incelenmesine yönelik çalışmaların sınırlı olduğu tespit edilmiştir.

Bu kapsamda, mevcut çalışmanın amaçları aşağıda belirtilmiştir:

- Gemilerde elektrikli tahrik sistemlerinin giderek artmasıyla daha önemli hale gelen elektrik güç kalitesi kavramı ve olması muhtemel güç kalite bozukluklarını tanımak,
- Dökme yük gemilerindeki önemli elektrik tüketicilerini açıklamak,
- Düşük emisyon salımı ve enerji verimliliği ile yaygınlaşmaya başlayan elektrikli tahrik sistemini bir dökme yük gemisine uygulamak,
- Bir yolcu gemisinde güç kalite bozukluklarından harmoniklerin önlenmesine yönelik tesis edilen harmonik filtrelerin patlaması sonucu sistem çökmesiyle (blackout) sonuçlanan kazada yaşanması muhtemel güç kalite bozukluklarını kurgusal olarak dökme yük gemisine uyarlayarak MATLAB Simulink aracılığı ile simüle etmek ve sonuçları değerlendirmektir.

Literatür taramasındaki tespitler ve çalışmanın amaçları doğrultusunda çalışmanın konusu, gerçekleşmiş bir yolcu gemisi kazası sırasında yaşanması muhtemel güç kalite bozukluklarının elektrik tahrikli olarak tasarlanan bir dökme yük gemisi üzerinde simüle edilmesi ve güç kalite ekipmanının devreden çıkmasıyla meydana gelen güç kalitesi problemlerinin grafiksel ve sayısal olarak ortaya konulması olarak belirlenmiştir. Çalışmada, dökme yük gemilerinde konvansiyonel dizel-motor tahrikli sistemler yerine elektrikli tahrik

sistemlerinin kullanılması durumunda daha da önemli hale gelen elektrik güç kalite ekipmanlarının ve bu ekipmanların devre dışı kaldığı zaman gerilim ile akımda meydana gelebilecek bozuklukların neler olduğuna; geminin bu bozukluklara maruz kalmaması için nasıl tedbirler alınabileceğine cevap aranmaktadır.

Gemi elektrik sistemi farklı kademedeki trafolar, kesintisiz güç kaynakları, hem AC hem de DC gerilimlerde çalışan birçok kısımdan oluşan karmaşık bir sistemdir ve birçok cihazın çalışması için gerilim ve frekans değişimi yapıldığından güç kalitesinde farklı türde hatalar ortaya çıkabilmektedir. Bu çalışmada güç kalitesi kavramı ve güç kalitesi bozuklukları üzerinde durulmuş olup, simülasyon çalışmasında harmonik bozukluk, gerilim düşmesi ve gerilim yükselmesi olayları incelenmiştir. Önemli güç kalite bozukluklarından olan harmonik bozukluk, gerilim ve akımın temel frekansın katlarındaki bileşenleridir. Temel frekans katında bileşenler arttıkça, gerilim ve akım ideal sinüsoidal formdan uzaklaşmakta, elektriksel ekipmanlara zarar verebilmekte ve verimliliği düşürebilmektedir. İnvörtörler, AC/DC dönüştürücüler ve transformatörler gibi lineer olmayan cihazların kullanıldığı sistemlerde harmonik bozukluk görülebilmektedir. Çalışmadaki harmonik bozukluk olayı yoğunlukla gerilim kaynağı inverterinden kaynaklanmaktadır. Gerilimin nominal değerden standartların belirlediği limitlerden daha fazla veya daha az olması sırasıyla gerilim yükselmesi ve gerilim düşmesi olarak tanımlanmakta olup, simülasyon kısmında incelenen gerilim yükselmesi ve düşmesi olayları faz-faz ve faz-nötr kısa devre durumlarından kaynaklanmaktadır.

Bu tez çalışmasıyla beraber, 2013 yılında Dünya Denizcilik Örgütü (World Maritime Organization-IMO) ve Denizlerin Gemilerden Kirlenmesini Önleme Uluslararası Sözleşmesi (Maritime Pollution-MARPOL) tarafından, yeni inşa edilen gemiler için Enerji Verimliliği Tasarım İndeksi (Energy Efficiency Design Index-EEDI), mevcut gemiler için ise Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı (Ship Energy Efficiency Management Plan-SEEMP) kuralları kapsamında yayınlanan belgelerdeki enerji verimliliği hesabına, elektrik güç kalitesi için alınması gereken tedbirler ortaya konularak katkı sağlanmıştır.

Çalışma şu şekilde planlanmıştır: 2. bölümde literatür taraması, gemilerde elektrik güç kalitesi kavramı, en yaygın olarak görülen güç kalite bozuklukları, detaylı olarak harmonik bileşenler, etkileri ve önlenmesine yönelik yöntemler ile gemilerdeki yasal olarak kullanılan

güç kalite sınırlamaları açıklanmıştır. Materyal ve Yöntem isimli 3. bölümde, dökme yük gemisi ile yolcu gemisi materyal olarak ortaya konulmuş ve gerekli özellikleri anlatılmış, elektrik güç kalitesini iyileştirmek üzere kullanılan harmonik filtrelerin kondansatörlerinin patlaması ve yanması sonucu sistem çökmesi durumuna maruz kalan elektrik motor tahrikli bir yolcu gemisinin ilgili gemi kaza raporu incelenmiştir. 3. bölümde ayrıca çalışma kapsamında kullanılan yöntem anlatılmıştır. 4. bölümde, 3. bölümde anlatılan ve harmonik filtrelerdeki yangından kaynaklı yaşanan kaza sırasında meydana gelebilecek muhtemel güç kalitesi problemleri MATLAB Simulink programında benzetimi yapılarak modellenmiş ve modelin hassasiyet analizi yapılmıştır. 5. Bölüm olan “Tartışma ve Sonuç” bölümünde analiz sonucu elde edilen bulgular çizelgelerle ortaya konulmuş ve literatür ile ilgili tutarlılığı yorumlanmıştır. Kaza raporunda da bahsedildiği gibi beklenmedik bir şekilde tüm jeneratörlerin devre dışı kalarak kazanın sistem çökmesi ile sonuçlanmasının sebebinin, toplam harmonik bozukluğun artışı, gerilim yükselmesi ve gerilim düşmesiyle ilgili olarak sistemdeki genel kararsızlık durumu olduğu değerlendirilmiş, kazalara maruz kalınmaması adına yapılabilecek ilave iyileştirmeler ve değişikliklere, çalışmanın kısıtlarına ve gelecek çalışmalar için önerilere yer verilmiştir.

2. GEMİ ELEKTRİK SİSTEMLERİNDE GÜÇ KALİTESİ VE GÜÇ KALİTE BOZUKLUKLARI

Bu bölümde yapılan literatür taramasından elde edilen bilgilere göre gemilerde elektrik güç kalitesi kavramı üzerinde durulmuş, en yaygın olarak görülen güç kalite bozuklukları, detaylı olarak harmonik bileşenler, etkileri ve önlenmesine yönelik yöntemler ile gemilerdeki yasal olarak kullanılan güç kalite sınırlamaları açıklanmıştır.

2.1. Literatür Taraması

Güç kalitesinin enerji verimliliği ve geminin işletme maliyeti üzerine etkisi ile ilgili olan ve güç kalitesinin önemini ortaya koyan çalışmalar bulunmaktadır. Bhattacharyya ve Cobben (2011), çalışmalarında düşük güç kalitesinin elektriksel ekipmanlar üzerinde yarattığı teknolojik zorlukları açıklamayı amaçlayarak, düşük güç kalitesinin doğrudan veya dolaylı olarak sistemleri finansal olarak zararlara soktuğunu ortaya koymuşlardır. Schipman ve Delince (2016), çalışmalarında düşük güç kalitesinin bir işletmenin hem kurulum hem de işletme aşamasında ciddi maliyetlere yol açabileceğini belirterek güç kalitesinin önemine dikkat çekmeyi amaçlamışlar, düşük güç kalitesinin olası sonuçlarını ortaya koymuşlardır. Guerrero ve diğerleri (2016), gemi ve feribot gibi izole sisteme sahip olan taşıtların enerji depolama ile kontrol ve izleme özelliklerine sahip olmaları nedeniyle daha gelişmiş sistemler olduğuna değinerek yakıt tüketimini azaltmayı ve enerji verimliliğini arttırmayı amaçlayarak teknolojik çözümler ortaya koymuşlardır. Beleiu, Pavel ve Darab (2018), düşük güç kalitesinin ekonomik sonuçlarını tahmin ederek güç kalitesi yönetimini kolaylaştırmayı amaçlamışlar, hem maliyet hesaplamak için hem de güç kalite bozukluklarını gidermek için yöntemler ortaya koymuşlardır.

Karasal elektrik sistemleri ile gemi elektrik sistemlerinin farklarına değinip gemi elektrik sistemlerinin sınırlı olmasından dolayı daha hassas olduğunu ortaya koyan çalışmalar bulunmaktadır. Mindykowski, Szmit ve Tarasiuk (2004), karasal elektrik sistemleri ile gemi elektrik sistemlerinin farkını ortaya koymayı amaçlayarak, gemi elektrik sistemlerinin karasal sistemlere göre yüksek tüketim/üretim oranına ve jeneratörün yüksek kısa devre empedansına sahip olması sebebiyle elektromanyetik bozulmalardan daha çok etkilenebileceğini ortaya koymuşlardır. Kanellos, Perros ve Sofras (2008), güç kalitesinin

gemi elektrik sistemleri için önemli bir konu haline geldiğini belirterek, güç kalitesi bozukluklarının nedenlerine, çeşitlerine ve sonuçlarına değinmişlerdir. Ayrıca gemilerdeki ve karadaki elektrik sistemlerinin farklarını ortaya koymayı amaçlamışlar ve gemilerin elektrikli tahrikle yol alması yaygınlaştıkça güç kalitesi kavramının çok daha önemli hale geleceğini ortaya koymuşlardır. Spagkouros ve Prousalidis (2015), gemi elektrik sistemlerindeki kısa devre hataları nedeniyle meydana gelen gerilim düşmesi olaylarını incelemeyi amaçlamışlar, yaptıkları simülasyon ile gerilim düşmesinin gemi elektrik sistemindeki ve karasal elektrik sistemindeki kıyaslamasını yaparak sonuçlarını ortaya koymuşlardır. Kumar ve Zare (2019), son yıllarda hem karada hem de denizde verimliliğin ön planda olduğu sistemlerin tercih edilmesiyle güç kalitesinin önemli hale geldiğini belirterek farklı gemi tiplerinde dikkate alınması gereken güç kalite bozukluklarını araştırmayı amaçlamışlar, global olarak geçerli standartlarca güç kalitesinin iyileştirilmesi için alınması gereken tedbirleri ortaya koymuşlardır. Mindykowski (2017), izole bir güç sistemine sahip olan gemilerdeki güç kalite bozukluklarının karasal sistemlerdeki bozukluklardan daha ciddi sonuçlara yol açabileceğini vurgulamayı amaçlamış, denizcilik otoritelerinin, üniversitelerin ve gemi şirketlerinin gemilerin güç kalitesini yükseltmek için mevcut yöntemleri geliştirerek yeni yöntemler bulmalarının önemini ortaya koymuşlardır.

Genel olarak güç kalite bozukluklarına ve harmonik bozuluma değinen, gerekli önlemleri alarak güç kalitesinin artırılmasının önemini ortaya koyan çalışmalar bulunmaktadır. Attachie ve Amuzivi (2013) çalışmalarında rezonans frekansını ve rezonans frekansının harmonik frekanslar ile birleştiğinde meydana gelebilecek problemleri açıklamayı amaçlamış olup, harmonik rezonansı engellemek için indüktör kullanarak sistemin rezonans frekansının harmonik frekansın altına düşürülebileceğini ortaya koymuşlardır. Ellis ve Eng (2001), çalışmalarında harmonik kavramını, harmonik bozulmanın ana nedenlerini, harmonik kaynaklarını ve harmoniklerin yol açtığı problemleri açıklamayı amaçlamış, bir sistemdeki toplam lineer olmayan yük oranının lineer olan yük oranından fazla olması durumunda güç dönüştürücünün darbe sayısı gibi parametrelerin göz önüne alınarak gerekli harmonik filtrelerin tesis edilmesinin gerekliliğini ortaya koymuşlardır. Ashraf (2014), gemi elektrik sisteminin karmaşıklığına ve gemi elektrik sisteminde meydana gelen güç kalitesi bozukluklarına değinerek, çeşitli simülasyonlarda tasarladığı harmonik filtrelerin harmonik bozulumu IEEE standartları limitlerine çektiğini ortaya koymuştur. Su ve Hong (2015), pompaların, üfleyci ve fanların, ısıtma, havalandırma ve klimaların gemilerde arttığını ve bu cihazların doğrusal olmayan yapılarından dolayı harmoniklere yol açtığını belirterek pasif

filtre kullanımıyla harmonikleri azaltmayı amaçlamışlar, enerji verimliliğini başarma konusundaki uluslararası mevzuatlar doğrultusunda filtre kullanımının önemini ortaya koymuşlardır. Mindykowski, Tarasiuk and Gnacinski (2021), bozulmayı izlemek, etkili ve karşılaştırılabilir kriterleri sürdürmek için güç kalitesi endekslerini ve ölçüm prosedürlerini birleştirmeyi amaçlamış olup, gemi sınıflandırma kuruluşlarının mevcut yasal düzenlemelerinin yüksek güç kalitesi bozukluklarından kaynaklanan arızalara karşı gemideki ekipmanlar için yeterli korumayı sağlamadığını ortaya koymuşlardır. Djagarov ve diğerleri (2019), gemi güç sistemlerinin sınırlı kapasitede olduğunu ve bu sistemlerdeki elektrik tahrik motoru gibi yüksek tüketicilerin güç kalitesini bozabildiğini belirtip, gemideki güç üretici ve tüketicilerini matematiksel olarak modelleyerek hızlı Fourier dönüşümüyle harmonik dağılımı gözlemlemeyi amaçlamışlar ve bu sayede sistemdeki ekipmanlara hızlıca müdahale edilip elektrik güç kalitesinin yüksek seviyede tutulabileceğini ortaya koymuşlardır.

2.2. Gemilerde Elektrik Güç Kalitesi ve Gemi Elektrik Sistemleri

Güç kalitesi, bir elektriksel sistemdeki belirli bir noktadaki elektriğin özellikleri olarak tanımlanır ve bir dizi referans teknik parametreye göre değerlendirilir. Uluslararası standartlar, güç kaynağı sistemlerinde nominal koşulları ve bu nominal koşullardan sapmaları tanımlar. Bu sapmalar, güç kalitesi bozuklukları olarak kabul edilir ve bir dizi indis ve ölçüm yöntemi kullanılarak karakterize edilirler (Barros ve Diego, 2016). Bu kısımda gemilerdeki elektrik güç kalitesi kavramından ve farklı elektrik şebekelerine sahip gemilerdeki güç kalitesinden bahsedilmiştir.

2.2.1. Güç kalitesi

Güç kalitesi, gemi üstünde tesis edilen elektrik şebekelerinde önemli bir faktördür. Düşük güç kalitesi sadece gemi üzerindeki elektrik ekipmanlarının performansını etkilemekle kalmaz, aynı zamanda enerji verimliliğini düşürebilir, seyir cihazını bozabilir ve denizdeki can güvenliğini tehlikeye sokabilir (Barros ve Diego, 2016).

Gemilerin elektrik enerjisi şebekeleri, karasal sistemlerden farklıdır. Gemi elektrik sistemleri izole edilmiş sistemlerdir. Bu güç sistemleri, farklı gerilim seviyesine sahip DC (doğru akım) ve AC (alternatif akım) alt sistemlerinden oluşur. Bu durum, gemi

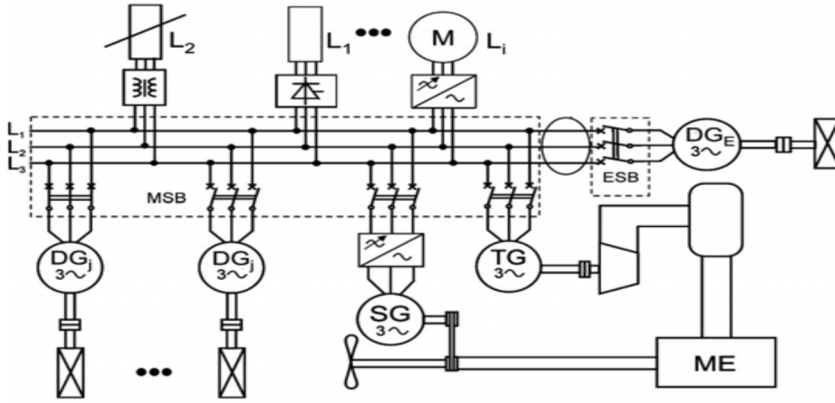
sistemlerinde geniş alanda ve yeniçağın elektronik ekipmanları tarafından kontrol edilmekte olan güç dönüştürücü uygulaması nedeniyle farklı türlerde dalga biçimi bozulmalarına sahip gerilime yol açmaktadır. Güç kalitesi, her kullanım seviyesindeki elektrik tüketicileri için önemli bir konudur ve gemilerde de önemli bir rol oynamaktadır. Güç kalitesi problemlerinin göstergesi olan bazı durumlar şöyledir (Agarwala ve Nair, 2014);

- Ekipmanın bir parçasının günün aynı saatinde hatalı çalışması,
- Devre kesicilerin aşırı yüklenme olmadan açması,
- Olumsuz hava koşullarında yaşanabilecek ekipman arızalanması,
- Otomatik sistemlerin görünürde bir sebep olmadan durması,
- Elektronik sistemlerin sık sık arızalanması,
- Elektronik sistemlerin bir yerde çalışıp, başka yerde çalışmaması.

Gemi elektrik sistemlerinin yukarıda bahsedilen özellikleri, anormal gerilim ve frekans dalgalanmaları, yüksek genlikte ara harmonik bozulmaları, yüksek bozuklukta gerilim ve akım dalga formları, geçici durum bozuklukları ve paralel çalışan jeneratörler arasında yanlış aktif ve reaktif güç dağıtımı gibi durumlar güç kalite konularını gemi elektrik sistemlerinde daha zor hale getirmektedir. Bütünleşik güç kalitesinin tam olarak tanımlanması için günümüzde uluslararası standartlarda ve deniz sınıflandırma topluluklarının düzenlemelerinde tam olarak ele alınmamış yeni ve belirgin güç kalitesi indislerinin ve ölçüm yöntemlerinin tanımlanması gerekmektedir (Barros ve Diego, 2016).

2.2.2. Gemi elektrik güç sisteminin yapısı ve teknolojik gelişimi

Gemi elektrik ve elektronik mühendisliğinin sürekli ilerleme süreci dikkate alındığında, gemi elektrik gücü sistemlerinin yapılandırmasında birçok değişiklik gözlemlenmektedir. Şekil 2.1. üç fazlı bir gemi elektrik güç sisteminin genel bir diyagramını göstermektedir. Güç sisteminin ana bileşenleri dizel motor (DG), şaft jeneratörleri (SG), türbin jeneratörleri (TG), acil durum jeneratörleri gibi jeneratör grupları; transformatörler, koruma sistemli kumanda panoları, güç kabloları ve tüketicilerdir. Elektrik tahrik sistemleri söz konusu olduğunda, tahrik motorları genellikle ana baralara bağlanır. Bu tür gemilerde, güç dönüştürücülerinin genel kullanımı, güç kalitesi sorunlarını konvansiyonel gemilerden daha önemli hale getirmektedir (Barros ve Diego, 2016).

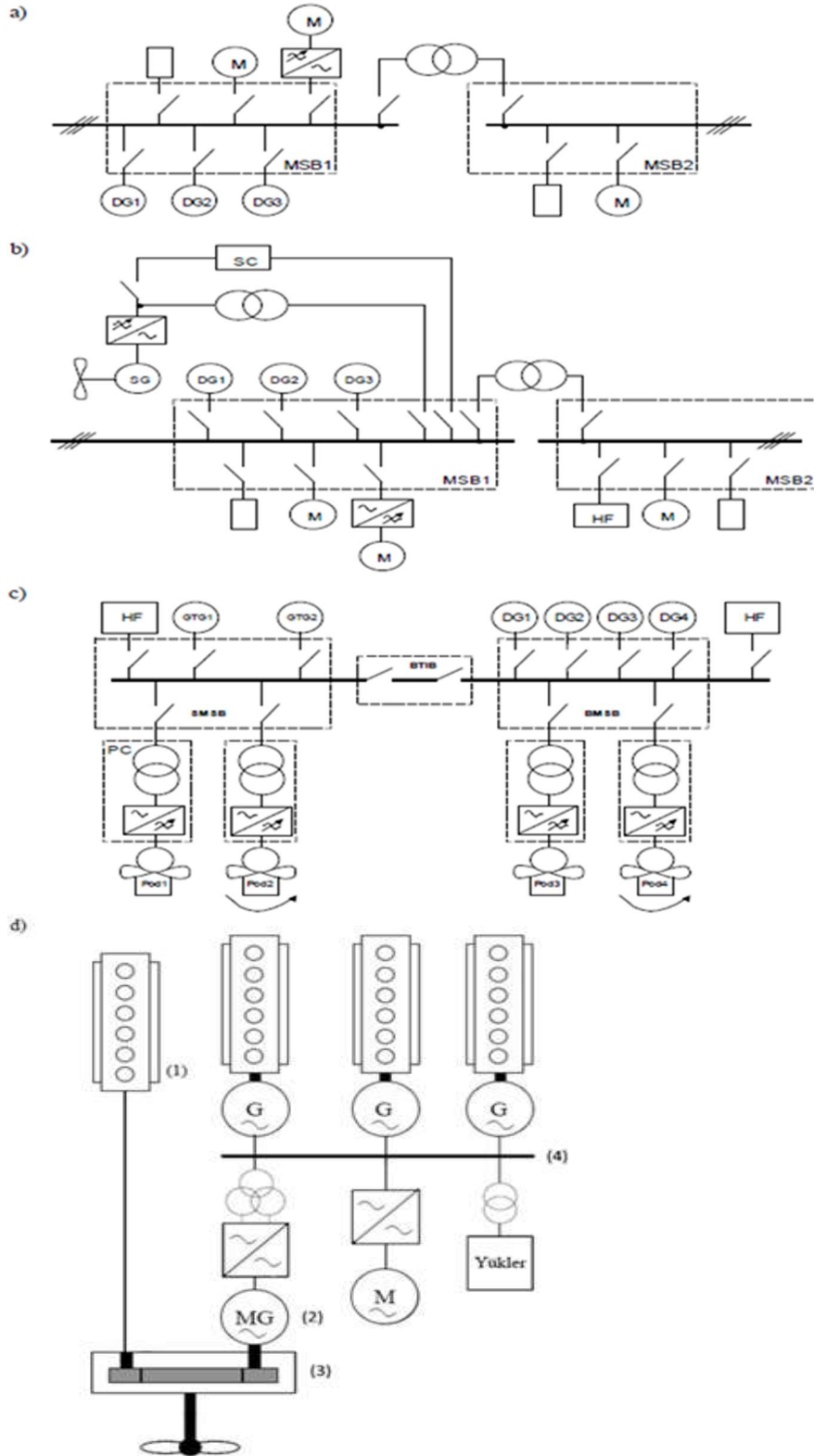


Şekil 2.1. Üç fazlı bir geminin elektrik gücü sisteminin genel diyagramı (Barros ve Diego, 2016)

Gemideki güç sistemleri ile karada kullanılan dağıtım şebekeleri arasındaki fark, gemi tesislerindeki düşük güç kalitesinin etkisini daha önemli hale getirmektedir. Gemideki güç sistemlerinin bazı ana özgül karakteristikleri aşağıda sıralanmaktadır (Barros ve Diego, 2016; Spagkouros ve Prousalidis, 2015):

- Geminin belirli bir kullanım alanına sahip olması ve genişleme ihtimalinin olmamasından dolayı jeneratörler için tesis edilen alanın da sınırlı olması,
- Güç dönüştürücüler ve trafolar gibi ekipmanlarla dönüşümü yapılan farklı gerilim ve frekans seviyelerine sahip alt sistemlerden oluşması, az sayıda farklı kapasitelerde jeneratörlere, ana başlatıcı ve kontrol sistemlerine sahip olması,
- Bazı güç yüklerinin toplam kurulu jeneratör kapasitesine kıyasla önemli bir büyüklükte olması,
- Yerleşik besleme jeneratörlerinin nispeten yüksek kısa devre empedansına sahip olması,
- Doğrusal olmayan yüklerin kullanımı,
- Jeneratörlerin paralel çalışması,
- Karadaki güç sistemlerine kıyasla, tesis edilen yüklerin güç kalitesine daha duyarlı olması.

Bazı gemi tiplerinin elektrik sistemi yapısı Şekil 2.2’de gösterilmektedir. Bu değişiklikler sadece enerji kaynaklarını uygulamadaki yeni olanakları değil, bir şaft jeneratörü, turbojeneratör veya müstakil jeneratör grupları ile birlikte çalışabilen, örneğin ek gaz türbinlerini de kapsamaktadır (Mindykowski, 2014).



Şekil 2.2. Gemi teknolojisinin gelişmesi sonucu gemi elektrik enerjisi sistem yapılarına örnekler, a) Geleneksel yapı, b) Şaft jeneratörlü yapı, c) Tam elektrikli yapı d) Hibrid elektrik sistemli yapı (Mindykowski, 2014; Geertsma, Negenborn, Visser ve Hopman, 2017)

Şekil 2.2.'de belirtilen gemi elektrik enerjisi sistem yapılarına ait detaylar aşağıdaki gibidir:

Geleneksel yapı

Dizel motorlar tarafından tahrik edilen bir geminin, üç fazlı senkron jeneratörlü elektrik sisteminin temel geleneksel yapısı gösterilmektedir. Bu jeneratör grupları, farklı gerilim değerlerindeki baraların iki bölümünü besler. Üç adet DG ile elektrik üretimi olmakla beraber tüketiciler MSB1 (Ana kumanda panosu 3AC 380V/50Hz) ve MSB2 (Anakumanda panosu, 3AC 220V/50Hz) panolarından beslenmektedir.

Şaft jeneratörlü yapı

Ana tahrik şaftı tarafından tahrik edilen şaft jeneratörleri, gemi güç şebekelerinde bulunan jeneratör gruplarıyla işbirliği yapmak için ek bir enerji kaynağı olarak ortaya konulmaktadır. Sabit bir pervanenin kullanılması durumunda şaft jeneratörleri yalnızca ana motor çalışması sırasında sabit hızda, örneğin seyir modunda kullanılır. Hatve kontrollü pervane içeren çözümlerde manevralar sırasında da makine devri sabit kaldığı için şaft jeneratörü kullanmak mümkündür. Sonuç olarak, yakıtlı jeneratör gruplarına dayanan klasik gemi yapısına kıyasla yakıt sarfiyatını azaltıp işletme maliyetlerini düşürürken gemiye elektrik gücü sağladıkları için bazı uygulamalarda şaft jeneratörlü sistemler tesis edilmektedir (Mindykowski, 2014). Şekil 2.2. b'deki yapıda 1 adet şaft jeneratörü ile 3 adet DG'den oluşan jeneratör setiyle elektrik üretilmektedir. Besleme panoları MSB1 (Anakumanda Panosu 3AC 440V/60Hz) ve MSB2 (Ana kumanda 3AC 220V/60Hz)'dir. SC senkronize jeneratör iken HF ise harmonik filtredir.

Tam elektrikli yapı

Tam elektrikli gemi olarak adlandırılan ve tamamen elektrik tahrikli motorlarla yol alan bir yolcu gemisinin güç şeması verilmektedir. Günümüzün CODLAG (tümleşik dizel elektrik ve gaz türbin) motorlu yüksek gerilimli gemi elektrik sistemi çözümüdür. BMSB pruva/ön ana kumanda panosu (3AC 11kV/60Hz), SMSB kıç (arka) ana kumanda panosu (3AC 11kV/60Hz) iken BTIB ana bara kesici, DG dizel motor jeneratörleri, GTG gaz türbin jeneratörleri, HF arka ve ön panolara kurulmuş harmonik filtreler, PC güç dönüştürücüler ve POD mermaid azimuth tahrik tipi tahrik üniteleridir.

Hibrid elektrik sistemli yapı

Şekil 2.2.d'deki hibrid tahrikte, doğrudan bir mekanik tahrik (1), yüksek verimlilikle yüksek hızlar için tahrik sağlar. Ayrıca bir dişli kutusu (3) aracılığıyla aynı mile veya doğrudan pervaneyi tahrik eden mile bağlanan bir elektrik motoru (2), düşük hızlarda tahrik sağlayarak ana motorun kısmi yükte verimsiz çalışmasını engellemektedir. Bu motor aynı zamanda gemi hizmetleri elektrik şebekesinde (4) elektrik yükleri için bir jeneratör olarak da kullanılabilir (Geertsma ve diğerleri, 2017).

2.2.3. Güç kalitesi bozukluğunun sonuçları

Düşük güç kalitesi, elektrik şebekesine bağlı farklı kullanıcılara tekno-ekonomik zorluklar doğurur. Gerilim düşüşleri ve harmonikler gibi güç kalite problemleri, müşteriler ve şebeke operatörleri için önemli tekno-ekonomik etkiler yaratabilir. LPQI (Leonardo Güç Kalite Girişimi) 2004'e göre AB-25 ülkelerinde elektronik ekipmanların, elektrik motorlarının, değişken hızlı ittiricilerin ve statik dönüştürücülerin endüstride en çok etkilenen ekipmanlar olduğu tespit edilmiştir. Etkilenen diğer ekipmanlar kablolar, kondansatörler, aydınlatma ekipmanları ve röle kontaktörleridir. Düşük güç kalitesi nedeniyle bir müşteri için finansal zararları tahmin etmek, çeşitli doğrudan (görünür) ve dolaylı (uzun vadeli) maliyetler içerdiğinden oldukça karmaşıktır (Bhattacharyya ve Cobben, 2011).

Şebekenin güç kalitesi iyi ise, ona bağlı herhangi bir yük tatmin edici ve verimli bir şekilde çalışacaktır. Kurulum işletme maliyetleri ve karbon salımı en az olacaktır. Şebekenin güç kalitesi kötüyse, ona bağlı yükler başarısız olur veya kullanım ömrü kısalarak elektrik tesisatının verimi düşer. Kurulum, işletme maliyetleri ve karbon salımı yüksek olacağından işletmenin devamlılığı mümkün olmayabilir (Schipman ve Delince, 2016). Düşük güç kalitesi, elektrik şebekesiyle ilgili maddi kayıplarla sonuçlanan bir durum olarak tanımlanabilir.

Düşük güç kalitesinin olası sonuçları şunları içerir (Schipman ve Delince, 2016):

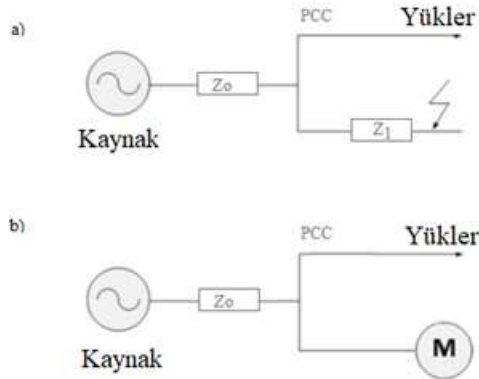
- Beklenmeyen güç kaynağı kesintileri (kesicilerin açması, sigortaların yanması),
- Ekipman çökmesi veya arızası,
- Ekipmanların ömürlerinin azalmasına neden olacak şekilde aşırı ısınmaları (transformatörler, motorlar),
- Hassas ekipmanların zarar görmesi (bilgisayarlar, üretim hattı kontrol sistemleri vb.),
- Elektronik iletişim enterferansları,
- Sistem kayıplarının artması,
- Kurulum ve işletme maliyetlerinin artması ve buna bağlı olarak daha yüksek karbon salımı artışıyla birlikte ek elektriksel stres ile başa çıkmak için tesislerin geniş alanda kurulması,
- Parlaklık veya spektral dağılımı zamanla dalgalanan bir ışık kaynağının neden olduğu görsel duyu zayıflaması,
- Sağlık sorunları ve personel verimliliğinin azalması.

2.3. Gemilerdeki Güç Kalite Bozuklukları

Gemideki elektrik enerjisi sistemi, diğer tüm elektrik sistemleri gibi güç kalitesi problemleriyle karşı karşıyadır. Gemi elektrik sistemi hem AC hem de DC gerilimlerde çalışan birçok kısımdan oluşur. Gerilim ve frekans değişimi, karmaşık sistemi oluşturan birçok cihaz için yapılıdır. Bu karmaşıklık, güç kalitesinde birçok sorunu ortaya çıkarır ve farklı tür hatalar üretir. Örneğin, gerilim seviyesinde düşme ve yükselme gibi sorunlara neden olabilir. Normalde gemi güç sistemindeki jeneratörler karadaki jeneratörlere göre daha küçük çalışma oranına sahiptir. Gemideki tüketicilerin bir kısmı, güç kaynaklarına (jeneratörler) kıyasla daha yüksek çalışma oranına sahiptir. Alternatörlerin gemilerdeki kısa devre empedansları yüksektir. Bu durum sistemi tamamen daha karmaşık kılar ve sistemde elektromanyetik bozulmalara neden olur (Ashraf, 2014). Bu kısımda güç kalite bozuklukları olan gerilim çökmesi, gerilim yükselmesi, harmonikler, geçici durum bozuklukları ve gerilim çentikleri, frekans dalgalanmaları ve kaçak kapasitif akımlar incelenmiştir.

2.3.1. Gerilim düşmesi

Güç frekansındaki AC geriliminin RMS değerinde yarım periyottan bir dakikalık süreye kadar devam edebilen düşüştür (IEEE, 1995). Anahtarlama işlemleri, herhangi bir arıza türü ile arıza giderme işlemi gerilim düşüşüne neden olabilir (Kumaraswamy ve diğerleri, 2012).



Şekil 2.3. Güç sistemindeki arızanın gösterilmesi (Ashraf, 2014), (a) Hat arızası (b) Motorun çalıştırılması

Şekil 2.3'de hat arızasından ve motorun çalışmasından dolayı meydana gelebilecek gerilim düşmesi gösterilmektedir. Genliğin hatanın direncine bağlı olduğu durumlarda, gerilimdeki düşüşün cihaza ne kadar zarar verdiği, ekipmanın hassasiyetine bağlıdır. Burada PCC ortak kaplin noktası olup düşmenin büyüklüğü şu şekilde hesaplanabilir:

$$V_{dip} = \frac{Z_f}{Z_f + Z_s} \cdot E \quad (2.1)$$

V_{dip} : PCC'deki gerilim düşmesi,

Z_f : Hata noktası ile PCC arasındaki empedans,

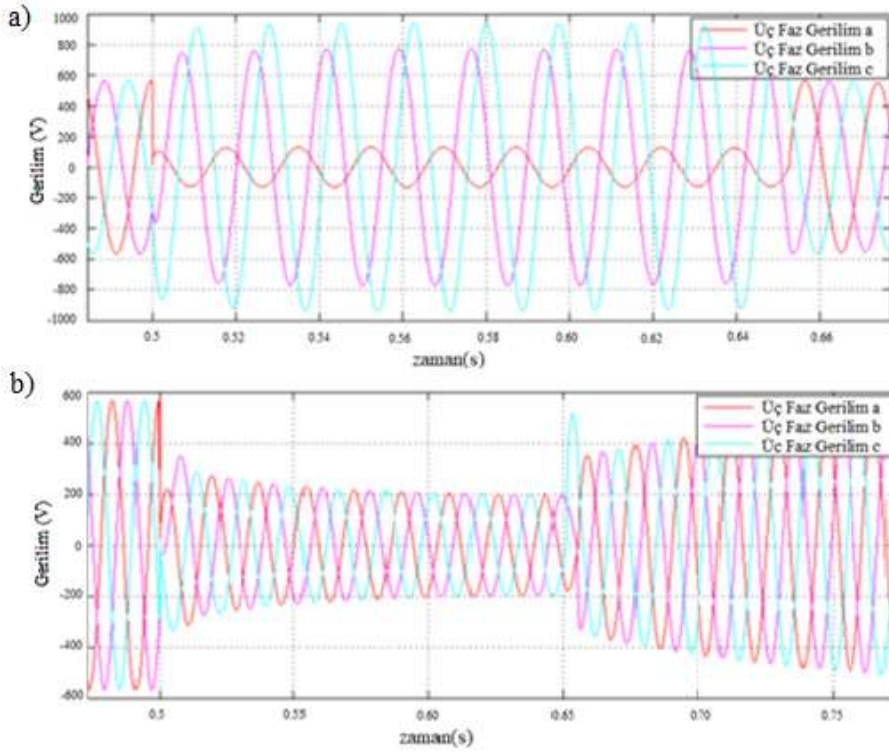
Z_s : Kaynak empedansı,

E: Hatadan önceki gerilim.

Simetrik olmayan arızalarda, negatif ve sıfır dizi empedanslarda eşitlik 2.1'den faydalanılabilmektedir.

Güç sistemindeki gerilim düşmesinin bazı olası nedenleri şunlardır:

- Üç faz toprak hatası,
- İki faz topraklama hatası,
- Büyük yüklerin enerjilendirilmesi,
- Bir güç kaynağından diğerine yük transferi,
- Asenkron motorun çalıştırılması.



Şekil 2.4. Farklı arıza tiplerinden dolayı gerilim düşmesi (a) Tek fazdan toprağa arıza nedeniyle asimetrik arıza (b) Üç fazdan toprağa arıza nedeniyle simetrik arıza (Ashraf, 2014)

Şekil 2.4'te, tek fazdan toprağa ve üç fazdan toprağa arıza durumunda gerilim düşüşü görülmektedir. Şekil 2.4 (a)'da, asimetrik bir arıza olan tek fazdan toprağa arıza görülmektedir. Bu faz-toprak arızasında her fazın geriliminin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Şekil 2.4 (b)'deki üç faz topraklama arızasında, üç fazın da hata oluşuktan sonra aynı gerilim değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum hatanın doğada simetrik olduğunu göstermektedir.

Gerilim düşmesine yol açan başka bir ekipman olan ve geminin tahriki için kullanılan asenkron motorlar, toplam üretimin yaklaşık % 70'ini kullanır ve gemi enerji sistemindeki en büyük tüketicilerdendir. Asenkron motor çalışması sırasında çekilen yüksek akım nedeniyle gerilim düşmesi meydana gelmektedir. Asenkron motorun I_{st} başlangıç akımı şu şekilde hesaplanabilir;

$$I_{st} = \frac{P_m \cdot a^2}{\sqrt{3} \cdot V_m \cdot p_{fm}} \cdot K \quad (2.2)$$

P_m : Asenkron motorunun aktif gücü,

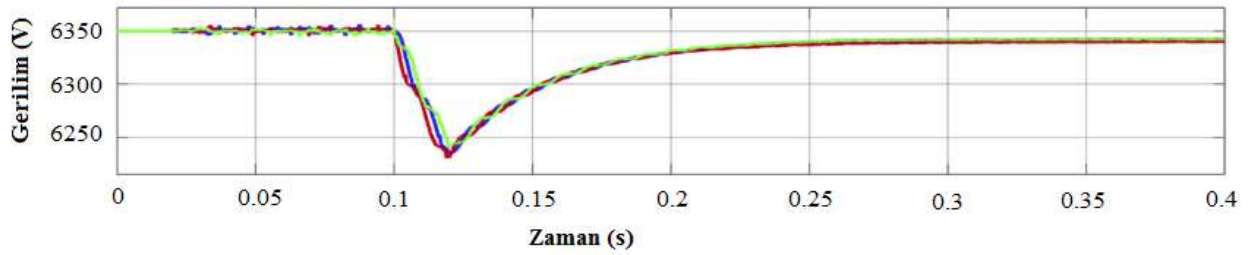
V_m : Nominal gerilim,

p_{fm} : Güç faktörü

K : Başlangıç nominal akımı

a : Aktif gerilimin bir başlangıç yöntemi kullanıldığı zamanki gerilime yüzde oranıdır.

Motorun çalıştırılması sırasında çekilen büyük miktarda akım gerilimin düşmesine neden olur ancak motorun başlangıç akımını azaltmak için yumuşak yol vericiler gibi yöntemler bulunmaktadır (Ashraf, 2014).



Şekil 2.5. Asenkron motorun çalıştırılması sırasında gerilim düşmesi (Sanjeevikumar, Sharmeela, Nielsen ve Sivaraman, 2021)

Şekil 2.5'deki asenkron motorun çalıştırılması durumunda meydana gelebilecek gerilim düşmesi şu şekilde hesaplanabilir:

$$V_{dip} = \frac{Z_M}{Z_0 + Z_M} \cdot E \quad (2.3)$$

E : Giriş gerilimi,

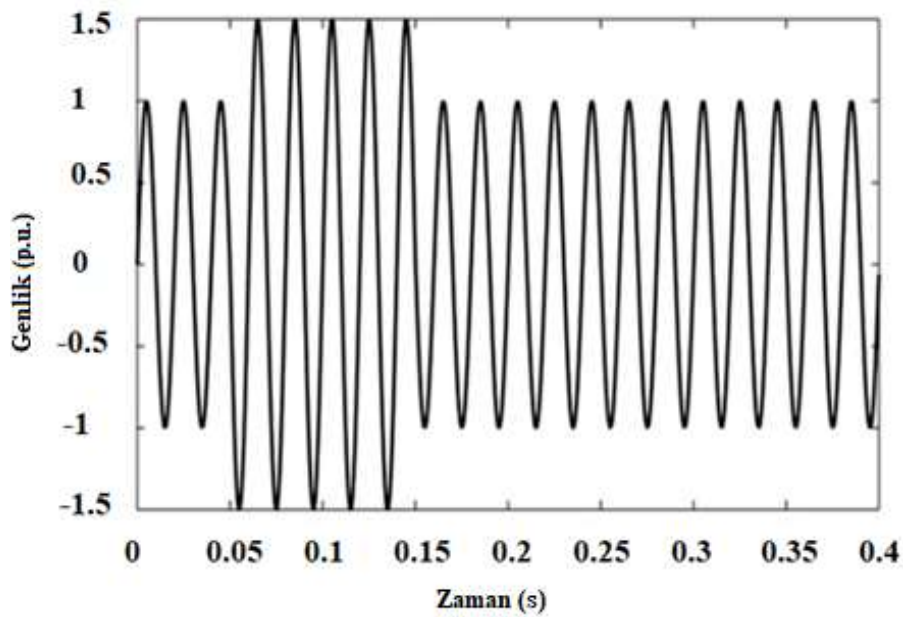
Z_0 : Giriş empedansı,
 Z_M : Motorun empedansıdır.

2.3.2. Gerilim yükselmesi

Güç frekansındaki AC geriliminin RMS değerinde yarım periyottan bir dakikalık süreye kadar devam edebilen yükseliştir (IEEE, 1995). Tipik genlikleri 1.1 ila 1.8 kat arasında olmaktadır. Gerilim yükselmesinin yaygın nedenleri (Sanjeevikumar ve diğerleri, 2021);

- Büyük bir yükün devre dışı bırakılması,
- Kondansatör grubunun enerjilendirilmesi,
- İyi ayarlanmamış transformator,
- Tek faz veya iki faz topraklama hatası olarak sıralanabilmektedir.

Toprak referansındaki ani değişimin topraklanmamış fazlarda gerilim artışı ile sonuçlandığı topraklanmamış veya yüzen topraklamalı sistemlerde de gerilim yükselmesi meydana gelebilmektedir. Gerilim yükselmesi sonucunda; kontrol gecikmesi, ani açma ve aşırı ısınma meydana gelebilmektedir ve elektriksel ekipmanlar kullanılamaz hale gelebilmektedir (Sasikiran ve Manohar, 2016).



Şekil 2.6. Gerilim yükselmesi (Ashraf, 2014)

Yükselmeler, gerilim düşüşlerinden daha az yaygındır. Topraklanmış bir sistemdeki trafo merkezine yakın hatalı fazlarda gerilim artışı olmaz çünkü trafo genellikle üçgen yıldız bağlı olduğundan arıza akımı için düşük bir empedans yolu sağlar. Yükselmeler ayrıca ani yük düşüşleriyle de üretilebilir. Akımın aniden kesilmesi, formülde görüldüğü gibi büyük bir gerilim üretebilir:

$$V = L \cdot \frac{d_i}{d_t} \quad (2.4)$$

Burada;

L: Hattın indüktansdır,

d_i/d_t : Akım akışındaki değişiklik.

2.3.3. Harmonik bozukluk

Harmonikler, bir gerilim veya akım dalga biçimindeki bozulmayı tanımlamanın matematiksel bir yoludur. Harmonik terimi, temel frekansın tam sayı katında meydana gelen bir dalga formunun bir bileşenini ifade eder. Fourier teorisi, herhangi bir tekrarlayan dalga biçiminin, temel frekansın tamsayı katları (veya harmonikleri) olan sinüzoidal dalga formlarının toplamı olarak tanımlanabileceğini ifade etmektedir (Ellis ve Eng, 2001).

Sinüzoidal gerilimlerle beslenen geleneksel ayarlanabilir hız sürücüleri sinüzoidal olmayan veya doğrusal olmayan akım çekmektedir. Alternatif akımdan (alternative current-AC) doğru akıma (direct current-DC) dönüştürme işlemi sırasında, hem silikon kontrollü doğrultucu (silicon controlled rectifier-SCR) sürücüleri hem de AC değişken frekans sürücüleri (variable frequency drive-VFD), besleme frekansının katları kadar (örneğin, 5. harmonik akım $5 \times 60\text{Hz} = 300\text{Hz}$ 'dir) istenmeyen harmonik akımları kaynaktan çekmektedir. Karakteristik harmonik akımları, doğrusal olmayan yük (ler) deki üç fazlı giriş redresörlerinin darbe sayısına bağlıdır ve aşağıdaki formüle dayanır:

$$h = n \cdot p \pm 1 \quad (2.5)$$

Burada n tamsayı, p ise darbe sayısıdır. (Örneğin 6 darbe)

Karakteristik harmonik akımların örnekleri aşağıdaki gibidir;

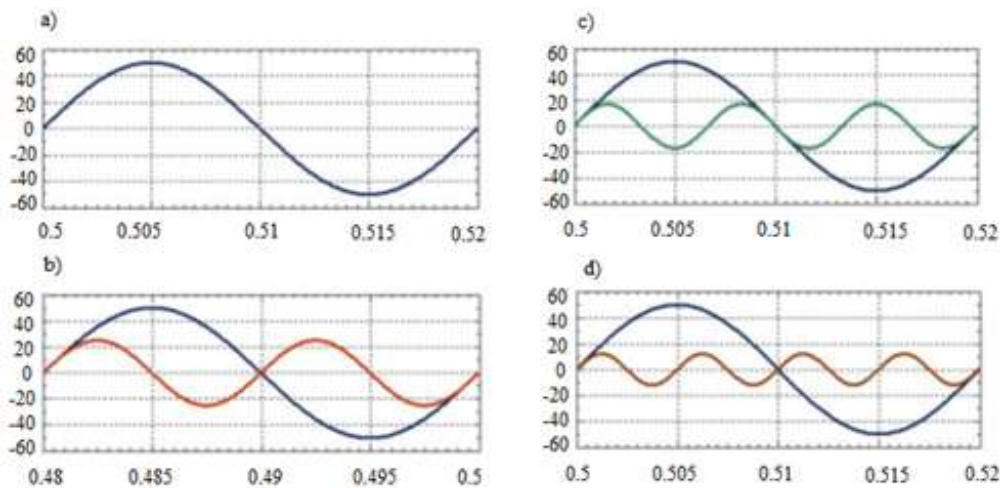
6 darbeli = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25,...

12 darbeli = 11, 13, 23, 25, 35, 37,.....

18 darbeli = 17, 19, 35, 37,.....

24 darbeli = 23, 25, 47, 49,.

Güç sisteminin mevcut dalga biçimindeki bozulma harmoniklerden kaynaklanmaktadır. Harmoniklere sinüzoidal gerilim kaynağından sinüzoidal olmayan akım çeken doğrusal olmayan yükler neden olur. Doğrusal olmayan yük, transformatör ve bozuk hat akımının doygunluğu ve mıknatıslanması, elektrik ark fırınları, statik VAR kompensatörleri, inverterler, DC dönüştürücüler, anahtar modlu güç kaynakları, güç elektroniği cihazları ve AC veya DC motor sürücüler güç sistemindeki harmonik bozulmanın ana nedenleridir. Bir motor tahriki durumunda, redresör girişindeki AC akımı bir sinüs dalgasından çok kare bir dalga gibi görünür. Kaynak akımı ve akımın bu yüklerden etkileşimi harmoniklere neden olur. Bu harmonikler, sistemde gerilim dalgalanması, güç kaybı ve cihazların hatalı çalışması gibi birçok problem yaratır. Değişken frekanslı sürücüler aynı zamanda motorun gördüğü inverter çıkışında harmonik akımlar üretir. Bu harmoniklerin çoğu inverter çalışma frekansının tam katlarıdır ancak sürücü tipine ve inverter yarı iletkenlerinin anahtarlama algoritmasına göre genlikleri büyük ölçüde değişiklik göstermektedir. (Ellis ve Eng, 2001).

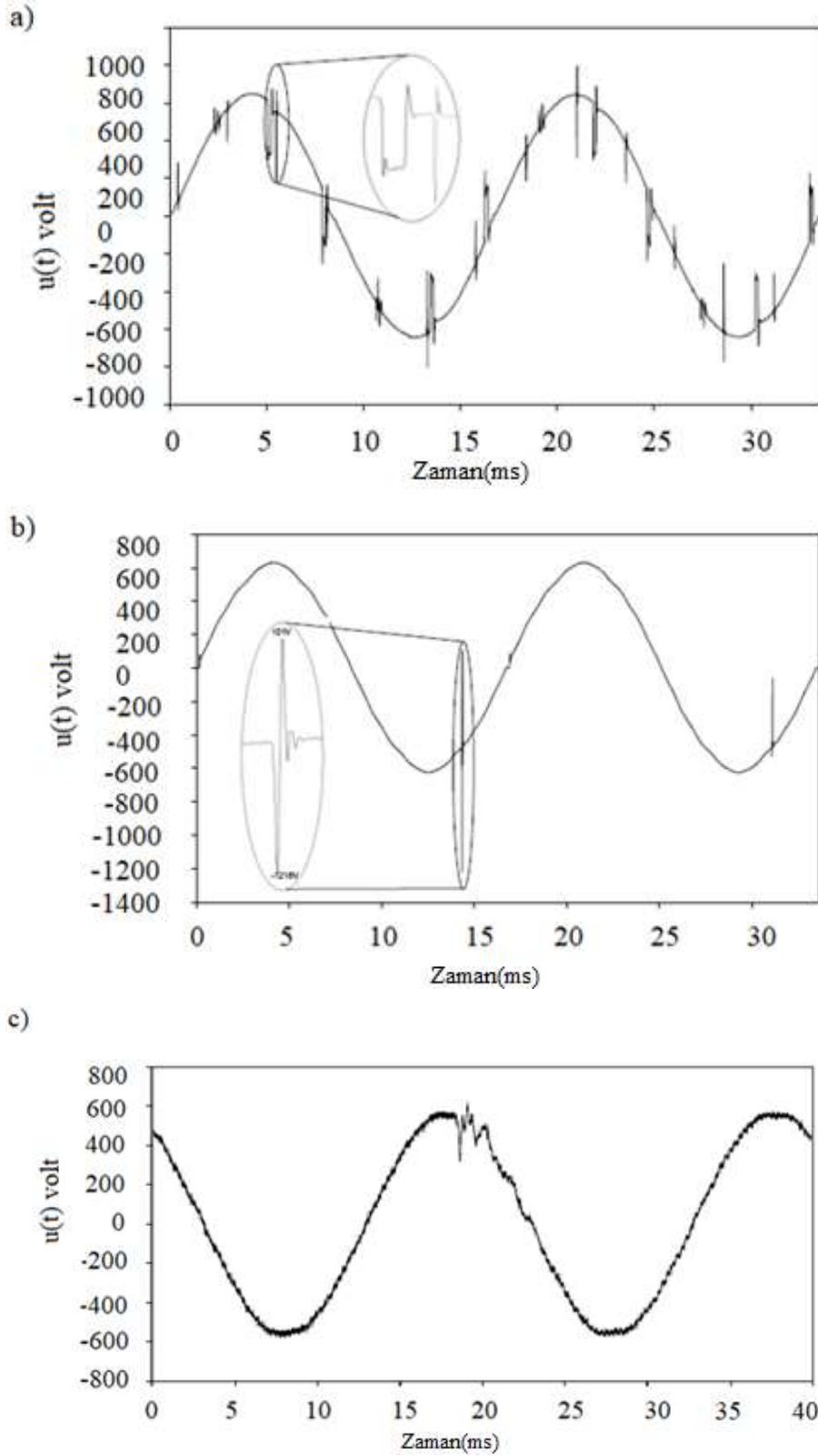


Şekil 2.7. Gerilimin harmonik ve temel bileşenlerinin karşılaştırılması (Ashraf, 2014) (a) Temel bileşen (b) İkinci harmonik ile temel bileşen (c) Üçüncü harmonik ve temel bileşen (d) Dördüncü harmonik ve temel bileşen

Harmonik sayı ifadesi, temel frekansın katlarını temsil eder, yani 2. mertebe harmonikler, sistem frekansı 50Hz ise, bu sinyalin frekansı 100Hz anlamına gelir. Aynı tür dalga formları Şekil 2.7'de gösterilmektedir, burada 2.7 (a) temel frekans bileşenidir ve diğer üçü temelin katıdır (Ashraf, 2014).

2.3.4. Geçici durum bozuklukları ve gerilim çentikleri

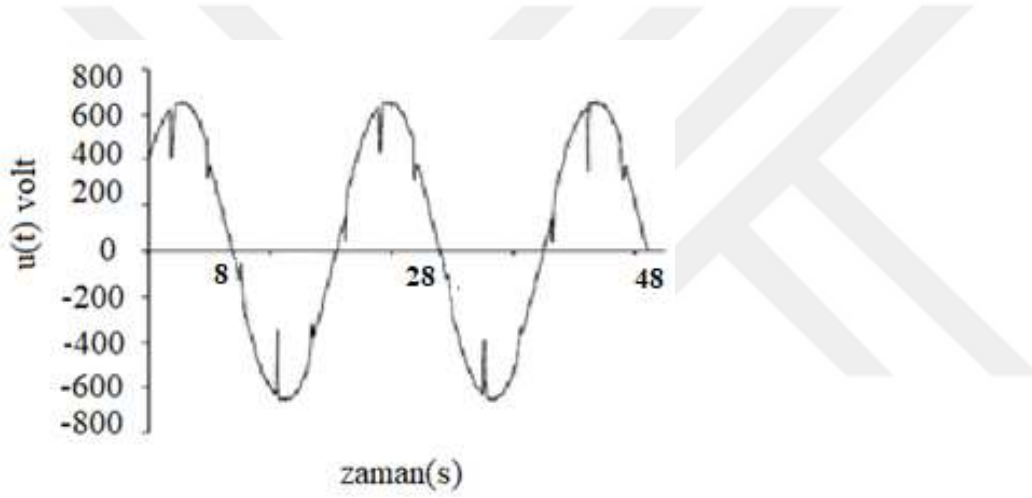
IEEE 1159-1995 standardı, geçici durum bozuklukları ve gerilim çentikleri dahil olmak üzere çeşitli güç kalitesi bozukluklarını tanımlar. Standarda göre, geçici durum bozuklukları iki gruba ayrılır: impulsif ve osilasyonlu. İlk terim olan impulsif sabit durumdaki gerilim koşullarında, akımda veya her ikisinde, kutupsallıkta tek yönlü olan ani bir güç dışı frekans değişimi anlamına gelmektedir. Bir impulsif geçici durum bozukluğu tek yön kutupludur, ancak osilasyonlu bir geçici durum hem pozitif hem de negatif polarite değerini içerir. Benzer tür bir bozukluk tipi olan gerilim çentikleri güç elektroniği cihazlarının çalışmasından kaynaklanan periyodik bir gerilim bozukluğudur. Çentikliği karakterize eden frekans bileşenleri, geçici durum bozukluklarında olduğu gibi oldukça yüksektir. Dolayısıyla bu bozukluğa periyodik geçici durum da denir. IEEE 519-1992 standardına göre, çentiklenme çentik derinliği, toplam harmonik bozulma faktörü (total harmonic distortion-THD) ve ortak kaplin noktasındaki hat çizgisi geriliminin çentik alanı ile tanımlanmalıdır (Szweda, 2009).



Şekil 2.8. Tam elektrikli bir gemide a) Gerilim çentiklenmesi b) İmpulsif geçici durum bozukluğu c) Osilasyonlu geçici durum bozukluğu (Szweda, 2009)

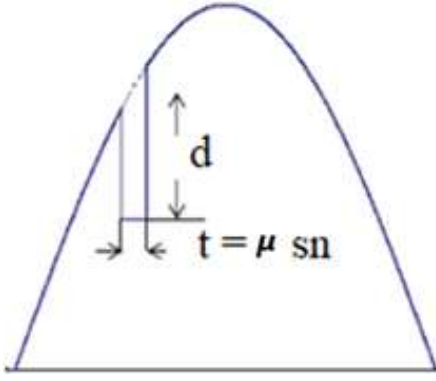
Gemi güç sistemi şebekelerindeki geçici durum akımları normalde büyük yüklerin açılıp kapatılmasından veya darbeli yüklerden kaynaklanmaktadır. Şekil 2.8, tamamen elektrikli

bir geminin 400 V alt sistemine dair kaydedilen gerilim dalga biçimindeki gerilim çentiklenmesi ve geçici durum bozukluklarını göstermektedir. Tespiti ve analizi için standart bir yöntem yoktur. Hiçbiri baskın olmasa da, literatürde hem zaman domeninde hem de frekans domeninde önerilen farklı yöntemler vardır. Gerilim çentikleme, özellikle elektrik tahrik sistemleri bulunan gemilerdeki güç sistemi şebekelerinde yaygın olarak kullanılan güç elektroniği dönüştürücülerinin normal çalışmasıyla üretilen bir tür periyodik dalga şekli bozulmasıdır. Bir güç dönüştürücüsünde akım bir fazdan diğerine geçtiğinde gerilim çentikleri oluşur. Bu süre zarfında, iki faz arasında kısa bir devre vardır. Çentiğin şiddeti, dönüştürücü ve izlenen nokta arasındaki kaynak endüktansı ile belirlenir (Barros, Apraiz ve Diego, 2008).



Şekil 2.9. Altı darbeli dönüştürücü tarafından üretilen gerilim çentiği (Barros ve Diego, 2016)

Şekil 2.9. altı darbeli bir dönüştürücünün çalışması nedeniyle gerilim çentikleri olan bir gerilim dalga biçimini göstermektedir. Gerilim çentiği, geçici durum ve harmonik bozulma arasında kalan bir güç kalitesi bozukluğudur. Çentiklenme sürekli ve periyodik olarak gerçekleştiğinden, gerilim harmonik bozulumu kullanılarak karakterize edilebilir, ancak çentikleme ile ilişkili frekans bileşenleri, geleneksel harmonik ölçüm ekipmanı kullanılarak karakterize edilemeyecek kadar yüksek olabilir. Geçici durum bozukluklarında olduğu gibi, uluslararası deniz standartları ve deniz sınıflandırma topluluklarının kuralları, gerilim çentiklerinin tespiti ve analizi için herhangi bir yöntem belirtmemektedir. IEEE Std.519: 2014 gerilim çentiklerinin karakterizasyonu için bir yöntem ve toplam harmonik bozulma faktörü için sınırlar tanımlar, ancak herhangi bir ölçüm yöntemine referansta bulunmaz.



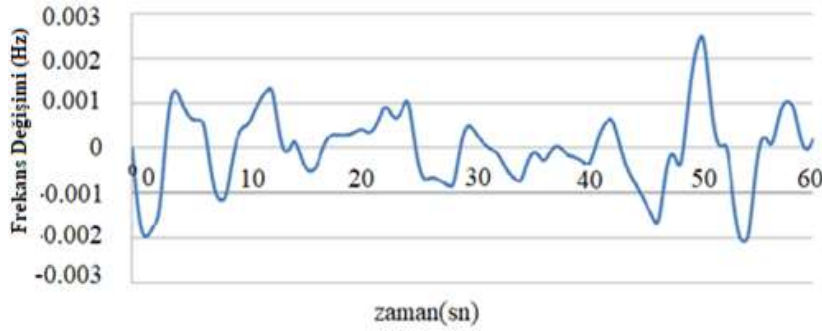
Şekil 2.10. Çentik derinliği ve alanının tanımı (Barros ve Diego, 2016)

Şekil 2.10'de gösterildiği gibi, gerilim çentikleri, derinlik ve alan olmak üzere iki parametre kullanılarak tanımlanır. Derinlik d , sinüs dalgası geriliminden gelen hat gerilimi çentiğinin ortalama derinliği olarak tanımlanır ve yüzde olarak $100 \cdot \frac{d}{v}$ olarak ifade edilir. Çentik alanı AN , çentik derinliğinin genişliği ile çarpımıdır ($AN = d \cdot t$). t mikrosaniye cinsinden ifade edilmektedir (Barros ve Diego, 2016).

2.3.5. Frekans dalgalanmaları

Güç sisteminde, üretim ve tüketim arasındaki herhangi bir eşitsizlik, frekansın nominalden ani bir değişikliğiyle sonuçlandığından frekans her zaman izlenmeli ve kontrol edilmelidir. Geleneksel olarak frekans ayarlaması, rampa oranları sınırlandırılmış olan jeneratörlerin güç çıkışı değiştirilerek sağlanır (Peydayesh ve Baldick, 2019).

Yüksek kapasiteli jeneratörler paralel olarak çalıştırıldığından ve yakın kontrol altında tutulduğundan, güç frekansındaki değişkenlik karasal şebekeye bağlı şebeke sistemlerinde çok dikkate alınmayabilir. Değişkenlikler ve dalgalanmalar dahil olmak üzere frekans değişimi, bir elektrik sistemine büyük yüklerin eklenmesi veya çıkarılmasından ya da bir jeneratör ya da motordaki kanatların zorlanması nedeniyle veya bozuklukta torkun yol açabileceği yük ve üretim kapasitesi arasındaki dengesiz dinamiklerden kaynaklanır. Aynı zamanda elektrik sistemi arızaları veya hız kontrol sistemi kararsızlığı frekans değişikliklerine veya dalgalanmalara neden olur.



Şekil 2.11. Frekans dalgalanması (Peydayesh ve Baldick, 2019)

Şekil 2.11’de görülen hafif bir elektrik gücü frekansı değişimi, döner makine millerinin hasar görmesine neden olabilmektedir.

2.3.6. Kaçak kapasitif akımlar

Kaçak kapasitans olgusu, gemi ana elektrik şebekesi ile gemi gövdesi arasında rastgele ekipman kapasitansları ve/veya elektromanyetik uyumlu (electromagnetic compatibility-EMC) filtre giriş kapasitansları yoluyla dolaşan kapasitif kaçak akımları ifade eder. Kaçak kapasitanslar gerçekte farklı potansiyel seviyelerindeki ve birbirlerinden uzaktaki herhangi iletken elemanlar arasında, örneğin, iki faz veya bir faz ve sıfır potansiyel noktasında yer almaktadır. Bununla birlikte, pratikte sadece bir faz ile toprak arasındaki kapasitif elemanlar önemli değerlere sahiptir. Kaçak kapasitif akım, genelde karşılıklı olarak birbiriyle ilişkili aşağıdaki üç faktörden kaynaklanır (Prousalidis ve diğerleri, 2008) :

- Elektrik yükünün en alt noktalarına enerji sağlayan, yıldız bağlantılı trafo/jeneratör sargılarının nötr noktalarının yüksek empedanslı kapasitansları ile topraklanan elektrik sistemi,
- Makine sargıları ve güç dağıtım kabloları gibi ekipmanların kapasitansları,
- EMC iyileştirmesi ve harmonik bozulmaların giderilmesi için esas olarak kullanılan ekipman giriş filtrelerinin kapasitansları.

Sonuç olarak meydana gelen toplam kapasitans, 50/60 veya 400 Hz çalışma frekansında oldukça düşük bir empedansa sahiptir, dolayısıyla bu durum oldukça büyük bir kapasitif akımın dolaşmasına yol açar. Kapasitif akımlar, ekipmanların sigortalarının ya da devre kesicilerinin yanlış tetiklenip güç kaynağına zarar vermesine yol açabilir ve harmonik

bozulmalarla beraber muhtemel rezonansları tetikleyebilmektedir (Prousalidis ve diğeri, 2008).

2.4. Harmonikler

Harmonikler konusuna bu bölümün 2.3.3 kısmında elektrik güç kalitesi bozukluklarının bir tipi olarak değinilmiş olsa da çalışmamıza konu olan simülasyonda önemli bir yer teşkil ettiğinden dolayı, biraz daha detaylı olarak bu kısımda incelenmesi uygun görülmüştür.

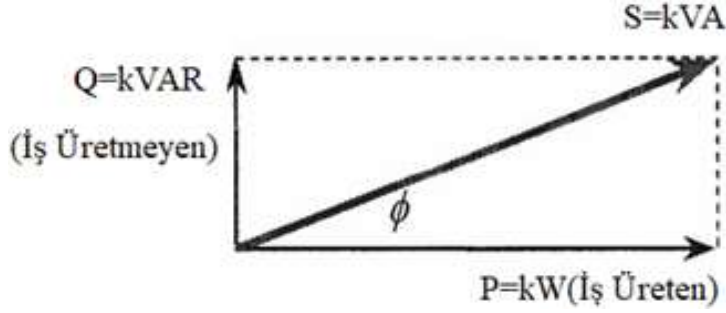
İdeal bir alternatif akım güç sisteminde elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımı belirli gerilim seviyelerinde ve sabit frekansta yapılmalıdır. İdeal alternatif akım güç sisteminde gerilim ve akım tam bir sinüzoidal dalga şeklindedir fakat gerçekte bu şartlar tam olarak sağlanamaz. Enerji kalitesi kavramı, bir güç sistemindeki gerilim ve akım dalga şeklinin genlik, faz ve frekansı ile ilgili tüm konuları kapsar (Tabak ve Yalçın, 2004). İdeal gerilim ve akım dalga şekli elde etmek için kaynağın sinüzoidal olmasının yanında yükün de doğrusal olması gerekir. Ancak sayıları gün geçtikçe artıp elektrik sistemine bağlanan dönüştürücüler, ark fırınları ve güç elektroniği elemanları gibi doğrusal olmayan yüklerin akım-gerilim karakteristikleri de doğrusal olmadığı için akımın ve gerilimin dalga şeklini sinüzoidal biçimden uzaklaştırırlar. Elektrik dağıtım sistemlerinde temel frekanstan farklı frekans değerlerine sahip akım ve gerilim sinyallerinin oluşmasına harmonik bozulma adı verilmektedir (Şahin ve diğeri, 2014).

2.4.1. Harmonik ve güç faktörü

Güç faktörü, doğrusal yüklerde güç faktörü ve harmonikli güç sisteminde güç faktörü olarak incelenmektedir.

Doğrusal yüklerde güç faktörü

Harmonik bozukluğun düşük olduğu ve sıfır olarak kabul edildiği yük doğrusal yük olarak adlandırılmaktadır. Şekilde gösterildiği üzere doğrusal yüklenmelerde güç faktörü akım ve gerilimin ilişkisi ile ilintilidir (ABS, 2006).



Şekil 2.12. Doğrusal yüklenmede güç faktörü

Güç faktörü:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{kW}{kVA} \quad (2.6)$$

Görünür güç:

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

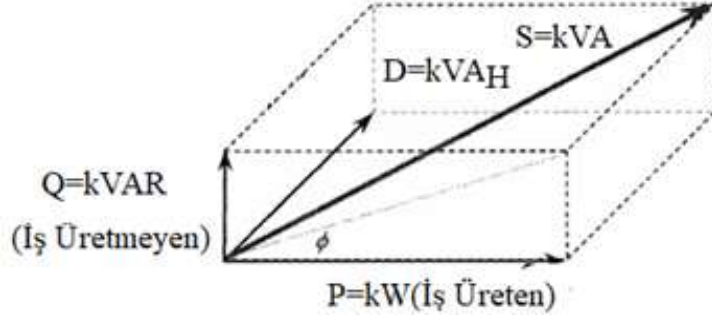
P: Aktif güç (İş üreten, kW)

S: Görünür güç (kVA)

Q: Reaktif güç (İş üretmeyen güç, kVAr)

Harmonikli güç sisteminde güç faktörü

Rezistif, endüktif veya kapasitif olarak tanımlanan doğrusal yükler için, görünen güç reaktif güç Q ve aktif güç P vektörünün toplamıdır. S ve P arasındaki ϕ açısı doğrusal yükler için gerilim ve akım arasındaki yer değiştirme açısı ile aynıdır ve bu nedenle yer değiştirme güç faktörü olarak adlandırılır. Güç faktörü, her zaman Watt (W) cinsinden gerçek güç ile Volt-Amper (VA) cinsinden görünür güç arasındaki oran olarak ölçülür. Doğrusal olmayan yükler için güç vektör ilişkisi, güç sisteminin sağlaması gereken görünür gücü üretmek için klasik güç üçgeninden farklı olarak bozulmuş reaktif güç D'nin de hesaba katılmasıyla üç boyutlu hale gelmektedir. Burada gerçek güç faktörü, yer değiştirme güç faktörü ve distorsiyon (bozulmuş) güç faktörünün birleşimi haline gelmektedir (Das ve Sudhakar, 2017).



Şekil 2.13. Harmonikli sistemde güç faktörü bileşenleri (ABS, 2006)

Şekil 2.13'e göre;

Güç faktörü:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \neq \frac{kW}{kVA} \quad (2.8)$$

Görünür güç:

$$S(kVA) = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} = \sqrt{kW^2 + kVA_r^2 + kVA_{r_H}^2} \quad (2.9)$$

Aktif Güç (P):

$$P = \sum_{h=0}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h = P_0 + P_1 + \sum_{h=2}^{\infty} P_h \quad (2.10)$$

φ_h : n. harmonikteki gerilim ve akım arasındaki açı

P_0 : Aktif güçteki DC içerik

Buna benzer olarak Q de şöyle ifade edilebilir:

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_{H_{rms}} I_{H_{rms}} \sin \varphi_h = Q_1 + \sum_{h=2}^{\infty} Q_h \quad (2.11)$$

φ_h : n. harmonikteki gerilim ve akım arasındaki açı

P_1 / Q_1 : Aktif/Reaktif güç (temel bileşen)

P_n / Q_n : Aktif/Reaktif güç (n. harmonikteki bileşen)

Görünür güç S aşağıdaki formüllerde de gösterilebilir;

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} \text{ (Tek faz için)} \quad (2.12)$$

$$= \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{Hrms}^2 I_{Hrms}^2} \quad (2.13)$$

$$= V_{1rms} I_{1rms} \sqrt{1+THD_V^2} \sqrt{1+THD_I^2} \quad (2.14)$$

$$= S_1 \sqrt{1+THD_V^2} \sqrt{1+THD_I^2} \quad (2.15)$$

S_1 : Temel bileşendeki görünür güç (VA)

THD_V : Toplam gerilim harmonik bozulma (%)

THD_I : Toplam akım harmonik bozulma (%)

Şekil 2.13.'te görüldüğü gibi görünür güç S, aktif güç (P), reaktif güç(Q) ve bozulmuş güç (D) yi içerir.

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

Aşağıda detaylandırıldığı üzere güç faktörü aktif gücün görünür güce oranıdır. Eğer sistem doğrusal olmayan yük çekiyorsa, güç faktörü:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1} \frac{1}{\sqrt{1+THD_V^2} \sqrt{1+THD_I^2}} = \cos(\varphi_{disp}) \cdot \cos(\varphi_{dist}) \quad (2.17)$$

Yer deđiřtirmiř gc Faktörü:

$$\cos \varphi_{disp} = \frac{P}{S_1} \quad (2.18)$$

Bozulma gc faktörü:

$$\cos(\varphi_{dist}) = \frac{1}{\sqrt{1+THD_v^2} \sqrt{THD_I^2}} = \frac{V_{1_{rms}} I_{1_{rms}}}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{S_1}{S} \quad (2.19)$$

Birçok AC PWM sürücü üreticisi tüm yüklerde yüksek gc katsayısı diyerek ürünlerini pazarlamaktadır. Ancak bu bahsi geçen gc faktörü gerçek gc katsayısı değil yer değiştirmiş gc katsayısıdır (ABS, 2006).

2.4.2. Rezonans

Bir elektrik şebekesinin reaktansı frekansa bağlıdır. şebekenin endüktif ve kapasitif bileşenleri, rezonans frekansında birbirleriyle rezonansa başlar. Bu frekans, bileşenlerin indüktans ve kapasitanslarının kombinasyonu ile belirlenen doğal rezonans frekansısıdır. Belirli bir endüktans/kapasitans kombinasyonu için rezonans frekansısı, hangi verilerin mevcut olduğuna bağlı olarak çeşitli formüllerden hesaplanabilir.

Yüksek gerilimlerde, bir şebekenin direnci, kapasitans ve endüktans ile karşılaştırıldığında genellikle küçüktür ve bu nedenle empedans önemli lde değişebilir. Rezonans frekansısı herhangi bir harmonik akım veya gerilimin frekansısıyla çakıştığında harmonik akım veya gerilim artacaktır. Bu durum bazı şebeke bileşenlerinin zarar görmesine neden olabilir. Rezonans frekansları en sık olarak harmonik frekanslar arasında meydana gelir (Attachie ve Amuzivi, 2013).

Seri rezonans devreleri

Seri rezonans, seri bağılı olan kapasitans ve endüktans elemanlarının aynı empedansa sahip olduğu frekanstaki devre tasarımıdır. Sonuç olarak, devre bir gerilim kaynağından beslendiğinde devre akımı yüksek olma eğiliminde olacak ve reaktif devre bileşenleri arasında büyük gerilimler ortaya çıkacaktır (Bayliss ve Hardy, 2012). Seri devrenin özel bir durumu, X_L 'in X_C 'ye sayısal olarak eşit olmasıdır. Bu durumda;

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2} = R \quad (2.20)$$

Akım sadece devrenin direnci ile sınırlıdır. Bu şartlar altında, devre güç faktörü bir bütündür.

$$X_L = X_C \text{ ise ;}$$

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.21)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.22)$$

f_0 : Rezonans frekansı

Paralel rezonans devreleri

Paralel rezonans, harmonik akım kaynağının endüktif ve kapasitif bileşenleri devreye bağlandığı zaman meydana gelebilmektedir. Paralel rezonansta, devrenin empedansı yüksektir. İdeal rezonansta (direnç olmayan devrede), empedans sonsuz yüksektir ve oldukça yüksek gerilime yol açabilmektedir. Paralel rezonans frekansında, verilen akımda gerilim muhtemel en yüksek değerini almaktadır. (Attachie ve Amuzuvi, 2013) Reaktif bileşeni sıfır yapan frekans değeri hesaplanırsa;

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.23)$$

olarak bulunur. Bu frekanslar f_0 rezonans frekansının altında ve üstünde gerilimin en yüksek değerinin (V_{\max}) 0.707'sine düştüğü (gücün yarıya düştüğü) alt kesim ve üst kesim frekansı olarak adlandırılır.

2.4.3. Harmonik üreten kaynaklar

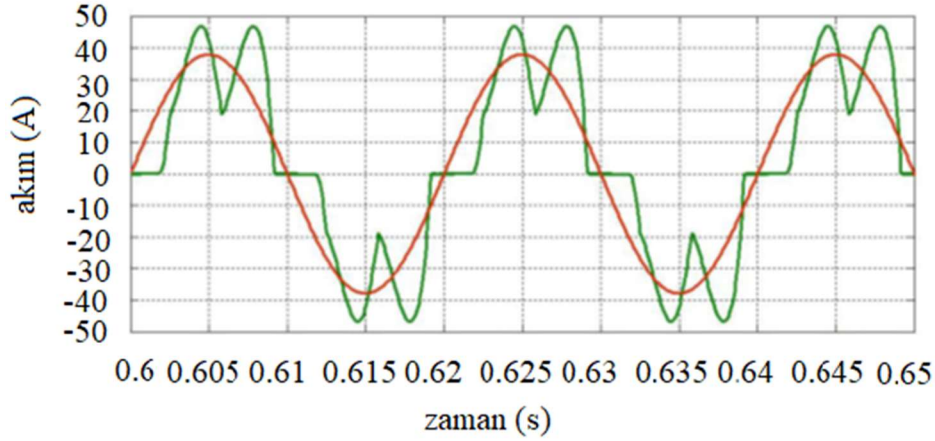
Bu kısımda harmoniklere yol açan önemli kaynaklara değinilmektedir.

Güç dönüştürücüler

Gerilim ve frekans gibi parametrelerin artan kullanımı, özel endüstriyel ve ticari işlemlere uyum sağlayacak şekilde çeşitlendirilmiş güç dönüştürücülerinin, dağıtım sistemlerinde en yaygın harmonik kaynağı olmasına yol açmıştır. 50/60 Hz AC'yi DC gücüne çevirmek için elektronik anahtarlama görevi yapmaktadır. DC uygulamalarında, elektronik anahtarlama cihazının ateşleme açısının ayarlanmasıyla gerilim değişmektedir. Temel olarak, doğrultma işleminde akımın, güç dönüştürücülerinin genellikle enerji tasarrufu sağlayan cihazlar olarak kabul edildiği temel frekans dögüsünün sadece bir kısmı boyunca yarı iletken cihazlardan geçmesine izin verilir. Enerji AC olarak farklı bir frekansta kullanılacaksa, dönüştürücünün DC çıkışı, DC gücünü AC'ye çeviren elektronik bir anahtarlama inverterinden geçirilir (Ahmed ve diğerleri, 2013).

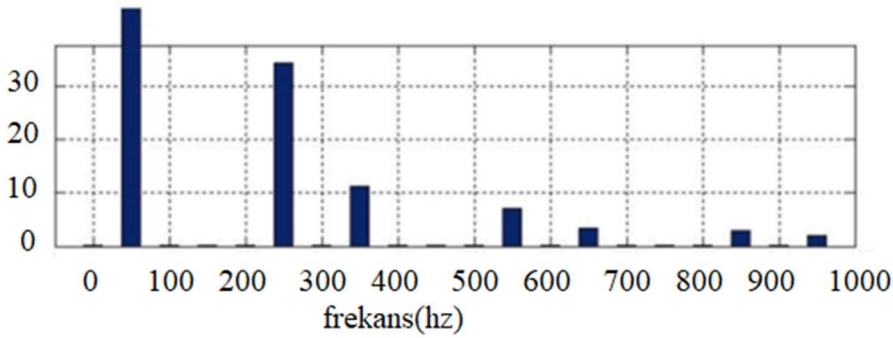
Doğrultucular

Değişken frekanslı sürücü gibi içinde dönüştürücü olan cihazlarda doğrultucu bulunmaktadır. Bu doğrultucular harmonik üretir ve sırası $6n \pm 1$ ile hesaplanabilir. Bu harmonik bileşenlerin, 6 sayısının her çarpanının bir az veya fazla olacağı anlamına gelmektedir. Harmoniğin genliği, sadece sıranın çarpmaya göre tersi alınarak, örneğin 3. sıradaki harmoniğin % 33'ü ve 7. sıradaki harmoniğin % 14'ü alındığında hesaplanabilmektedir (ABS, 2006).



Şekil 2.14. Harmonikli üç fazlı sinyallerin akım dalga formu (ABS, 2006)

Şekil 2.14’de üç fazlı sinyal kırmızı renkte gösterildiği gibi sinüzoidal olması gerekirken, yeşil renkte gösterildiği gibi redresörden kaynaklı harmonik bozukluğa sahiptir.



Şekil 2.15. Akım dalga formunun harmoniklerle Fourier analizi (ABS, 2006)

Şekil 2.15’de ise bu harmonik bozukluğun Fourier dönüşümü analizi görülmektedir.

Transformatörler

Elektrik güç sistemlerinde transformatörler gibi bir demir nüve üzerine yerleştirilmiş bobinlerden meydana gelen elemanlar, doyma özelliğine sahip demir nüvenin mıknatıslanma karakteristiğinin doğrusal olmaması nedeniyle harmonikler meydana getirmektedirler. Transformatörler doyumlukta (aşırı uyarılmış), örneğin gerilimde büyük bir artışa maruz kalırsa, tek sıralı harmonikler (5., 7., 11., 13., ...) üretme eğilimindedir. Harmonikler triplerle de üretilir ancak delta veya topraklanmamış wye konfigürasyonu ile kısıtlanmaktadır (ABS, 2006).

Kesintisiz güç kaynakları

Kesintisiz güç kaynakları (UPS) sistemleri, birçok endüstriyel tesis, ulaşım, telekomünikasyon vb. sistemlerin önemli bir parçasıdır. UPS'ler kararlı AC/DC gerilimleri ile sistemlerin düzgün beslenmesini sağlamaktadırlar. UPS sistemi girişte doğrultucu, akülü DC bağlantı ve yüke bağlı olarak çıkışta invertör veya DC dönüştürücü olarak üç kısımdan oluşmaktadırlar.

Bazı UPS sistemleri genellikle tek fazlıdır ve tek fazlı anahtarlamalı güç kaynakları tarafından üretilene benzer bir giriş akımı dalga şekline ve harmonik akım spektrumuna sahiptir. Üç fazlı UPS sistemlerinde ise genellikle, "darbe sayısı ± 1 " formatına dayalı karakteristik harmoniklere sahip kontrollü bir giriş köprü doğrultucusu (SCR) bulunmaktadır. Bu özellikleriyle UPS'ler harmonik akım kaynaklarıdır. (ABS, 2006; Pilat, Peric, Ban ve Sunde, 2019)

2.4.4. Harmoniklerin etkileri

Harmonik bozulunun hem harmonik kaynakları hem de diğer elektrik ekipmanları üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu kısımda harmoniklerin etkileri incelenmiştir.

Harmoniklerin jeneratörler üzerine etkileri

Karasal şebeke güç kaynaklarına kıyasla harmonik gerilimlerin ve harmonik akımların etkileri, kaynak empedanslarının tipik olarak şebeke trafolarının üç ile dört katı olması nedeniyle gemi sistemlerinde jeneratörler üzerinde belirgin şekilde daha fazla söz konusudur. (ABS, 2006).

Temel olarak, doğrusal olmayan bir yük, jeneratör terminallerinde bir gerilim dalga biçimi bozulması üretir.

Gerilim bozulması bir jeneratörün çalışmasında aşağıdaki sonuçlara sebep olmaktadır (Rosa, 2006):

- Motor ekseninde burulma momentleri ve titreşim üreten pozitif ve negatif dizi akımları üretilebilmektedir,
- Rotorda oluşturulan termodinamik kuvvetler, şaft yataklarını zamanından önce aşındırabilmektedir,
- İlk başlama sistemi besleme devresindeki gerilim dalgası bozulumu gerilim regülasyon problemlerine neden olabilmektedir,
- Aşırı negatif dizi akımı gerilim dengesizliğinin artmasına neden olabilmektedir.

Harmoniklerin trafolar üzerine etkileri

Modern endüstriyel ve ticari şebekeler; değişken hızlı sürücüler, elektrik ve endüksiyon fırınları ve floresan aydınlatma gibi çeşitli doğrusal olmayan yüklerin ürettiği önemli miktarda harmonik akımlardan giderek daha fazla etkilenmektedir. Kişisel bilgisayarlar da dahil olmak üzere kesintisiz güç kaynakları ve çok sayıda ev eğlence cihazını listeye eklemek gerekir. Bu akımların tümü servis transformatörlerinden kaynaklanmaktadır. Transformatörlerin özel bir yönü, doyma koşulları altında, bir harmonik kaynağı haline gelmeleridir. Üçgen bağlantısında dolaşan akımlar akımın RMS değerini artırır ve ilave ısı üretir. Bu durum, takip edilmesi gereken önemli bir husustur (Rosa, 2006).

Sıcaklık değişimi ve trafo sargı endüktansı ve besleme kapasitansı arasındaki olası rezonans da ek kayıplara neden olabilir. Nüve titreşimleri, yüksek gürültü meydana getirebilmektedir. Harmoniklere bağlı olarak artan RMS akımı, bakır kayıplarını artıracaktır. Bakır kayıpları, aşağıda gösterildiği gibi hesaplanabilir:

$$P_{CU} = I_{RMS}^2 R \quad (2.24)$$

P_{CU} : Toplam bakır kayıpları

I_{RMS} : Toplam RMS akımı

R : Sargı direnci

Girdap akımı kayıpları Eş. 2.25 kullanılarak hesaplanabilir:

$$P_{EC} = P_{EF} \cdot \sum_{h_1}^{h_{\max}} I_h^2 \cdot h^2. \quad (2.25)$$

P_{EC} : Toplam girdap akımı kayıpları,

P_{EF} : Temel yükte tam yükte girdap akımı kayıpları,

I_h : RMS akım (birim başına) harmonik h ,

h : Harmonik derecesi.

Harmoniklerin asenkron motorlar üzerine etkileri

Harmonik gerilim bozulması, motorlarda da transformatörlerde olduğu gibi artan girdap akım kayıplarına neden olur. Bununla birlikte, statörde her biri motoru ileri veya geriye doğru farklı bir hızda döndürmeye çalışan harmonik alanların oluşması nedeniyle ek kayıplar ortaya çıkar. Rotorda indüklenen yüksek frekanslı akımlar kayıpları daha da arttırır. Harmonik gerilim bozulmasının mevcut olduğu durumlarda, ilave kayıpları hesaba katan motorlar değerlendirilmelidir (Chapman, 2001). Harmonik bozulma, AC asenkron motorlarındaki kayıpları, ilave bakır kayıpları ve statör sargısı, rotor devresi ve rotor yüzeylerindeki demir kayıpları (girdap akımı ve histerezis kayıpları) nedeniyle sıcaklığı artan transformatörlerde görülene çok benzer bir şekilde yükseltir. Trafo motorlarında bakır kayıplarını ve girdap akım kayıplarını hesaplamak için kullanılan formüller aşağıdaki gibidir (ABS, 2006);

$$P_{CU} = I_{RMS}^2 \cdot R \quad (2.26)$$

P_{CU} : Toplam bakır kayıpları

I_{RMS} : Toplam RMS akımı

R : Sargı direnci

Girdap akımları aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmaktadır;

$$P_{EC} = P_{EF} \cdot \sum_{h_1}^{h_{\max}} I_h^2 \cdot h^2. \quad (2.27)$$

P_{EC} : Toplam girdap akım kayıpları

P_{EF} : Tam yükte temel frekansta girdap akım kayıpları

I_h : RMS akımı (birim başına) harmonik

h : Harmonik derecesi

Harmoniklerin değişken hızlı sürücüler üzerine etkisi

AC veya DC elektriksel değişken hızlı sürücüler, AC giriş gerilimini ve akımını doğrultmak için güç yarı iletkenleri kullanır ve bundan dolayı harmonikler oluştururlar. Bununla birlikte, bu sürücüler giriş hatları harmonikleri nedeniyle bozulma ve ekipman hasarına da uğrayabilir. Harmonik bozulum motorun çalışma verimini olumsuz yönde etkiler ve aşırı ısınmalara neden olabilmektedir (ABS, 2006).

Harmoniklerin aydınlatma sistemleri üzerine etkisi

Harmonikli bileşenlerden oluşan gerilim, aydınlatma sistemlerinde işitilebilecek seslere ve demir kayıplarına yol açmaktadır. Floresan tip aydınlatma sisteminde tek dereceli olan harmonikler devreyi önemli miktarda etkilemektedir. Yine aynı şekilde akkor lamba üzerindeki harmonik bileşenli gerilimin yol açtığı aşırı ısınma patlamaya neden olabilmektedir. Harmonik bozulumun %5'ten daha büyük olduğu noktalarda lambalar ömrünü normalden 2 kat daha erken tamamlayabilmektedir (Kocatepe ve diğerleri, 2003). Aydınlatma üzerinde göze çarpan etkilerden birisi titreme olgusudur (ışık yoğunluğunda tekrarlanan dalgalanmalar). Aydınlatma RMS gerilim değişikliklerine karşı oldukça hassastır; bazı lamba türlerinde % 0,25'lik bir sapma bile insan gözüyle algılanabilir.

Aydınlatma sistemlerindeki titreminin ciddiyeti, aşağıdakileri içeren bir dizi faktöre bağlıdır (ABS, 2006):

- Işık tipi (akkor lamba, floresan veya yüksek yoğunluklu deşarj),
- Gerilim dalgalanmalarının büyüklüğü,
- Gerilim dalgalanmalarının frekansı,
- Lambanın kazanç faktörü (ışık seviyesindeki RMS gerilimde % bağıl değişim, % bağıl dalgalanma ile bölünür.),
- Işıklandırılmış alandaki ortam ışığı miktarı.

$$\phi_v = \phi_n \left(\frac{V}{V_n} \right)^{3.6} \text{ Akkor Lambalar İçin} \quad (2.28)$$

$$\phi_v = \phi_n \left(\frac{V}{V_n} \right)^{1.8} \text{ Floresan Lambalar İçin} \quad (2.29)$$

Burada;

Φ_v : Anma geriliminde ışık akısı

Φ_n : Nominal gerilimdeki ışık akısı

V : Dalgalanan gerilimin RMS büyüklüğü

Herhangi bir gerilim dalgalanması geminin güvenliği ile ilgili olan lambaların ömrünü de etkiler. Akkor lambalar söz konusu olduğunda, gerilim değişimlerinden dolayı çalışma ömründeki azalma şöyle ifade edilebilir:

$$T_v = \left(\frac{V}{V_n} \right)^{-14} \quad (2.30)$$

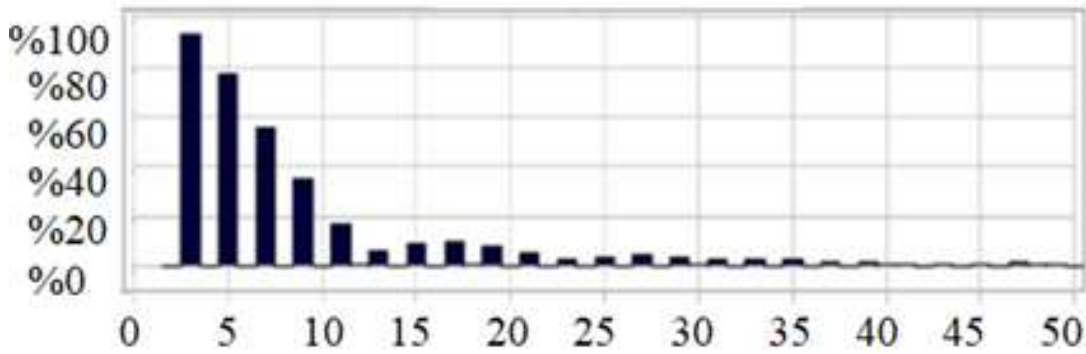
Burada nominal gerilimde dayanıklılık, V_n , genellikle 1000 saate eşittir (ABS, 2006).

Kesintisiz güç kaynakları (UPS)

Bilgisayarlar ve navigasyon veya telsiz haberleşme teçhizatı gibi hassas yüklerdeki artıştan dolayı, kesintisiz güç kaynakları (UPS) artık yaygın olarak temin edilmektedir ve 100 VA ila birkaç MVA arasında aralıkları değişebilmektedir. UPS'ler mimari olarak değişken hızlı sürücülere çok benzemektedir. Bu nedenle, harmoniklerin UPS sistemleri içindeki bileşenler üzerindeki etkileri, güç cihazları üzerinde ilave ısınma ile kondansatörler ve indüktörler üzerindeki düzleştirme etkisi ile aynı olacaktır. Aküler, redresörün DC tarafındaki aşırı harmonikler ve iç harmonikler nedeniyle çok ısınabilmektedir. (ABS, 2006).

Bilgisayarlar ve bilgisayar tabanlı ekipmanlar

Bilgisayar tabanlı ekipmanların çoğu, dâhili gerilim kaynaklarını anahtarlamalı moddan veya benzer güç kaynağı ünitelerinden almakta olup genellikle harmonik sorunların göze çarptığı yerlerdir.



Şekil 2.16. Güç kaynağı tarafından çekilen akımların harmonik spektrumu (ABS, 2006)

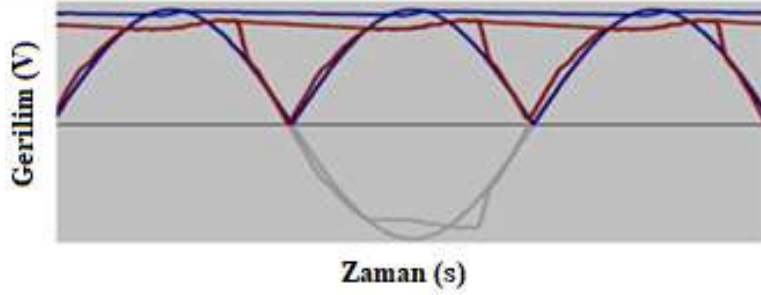
Şekil 2.16, anahtarlamalı seramik kondansatör (switch mode ceramic capacitor-SMPS) şarj olurken döngü başına iki darbe ile beslenen SMPS tarafından çekilen akımı gösterir.



Şekil 2.17. Darbe akımları nedeniyle gerilim tepe düzleşmesi (ABS, 2006)

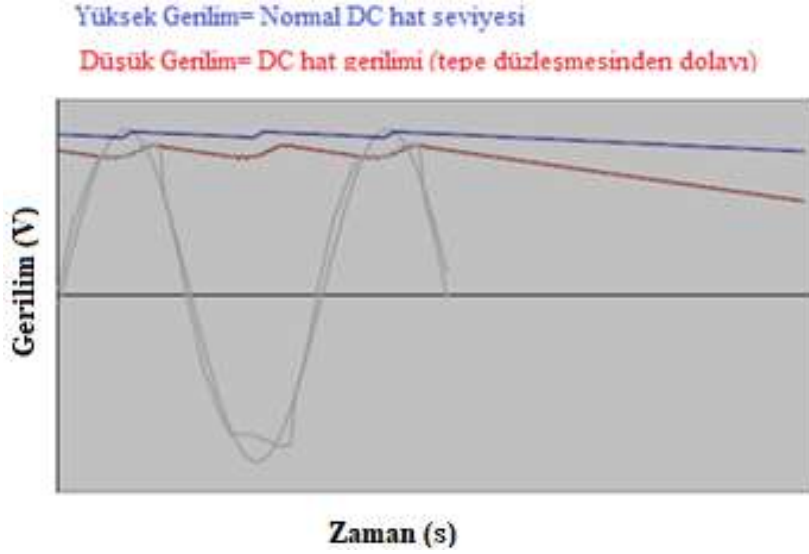
Şekil 2.17'da görülebileceği gibi, akımın darbeleri doğası, gerilim dalgasının zirvesinde bir gerilim düşmesine neden olmaktadır.

Yüksek Gerilim = Normal DC hat seviyesi
Düşük Gerilim = DC hat gerilimi (tepe düzleşmesinden dolayı)



Şekil 2.18. DC bara geriliminin tepe düzleşmesi etkisi (ABS, 2006)

Gerilim tepe düzleşmesi, çalışan DC bara gerilimini (Şekil 2.18.) azaltır, bu da ekipmanda ve buna bağlı olan kablolamada fazla akımın çekilmesine ve yüksek çalışma sıcaklıkları nedeniyle bileşenlerin ömürlerini kısaltabilecek kayıplara yol açmaktadır (ABS, 2006).



Şekil 2.19. Besleme kaynağını azaltan tepe düzleşmesi (ABS, 2006)

Benzer şekilde, şekil 2.19 kondansatörlerdeki DC bara gerilimindeki azalmanın, güç kaynağı içindeki depolanan enerjiyi nasıl azalttığını ve böylece geçiş kabiliyetinin azaldığını göstermektedir (ABS, 2006).

Güç faktörü

Güç faktörü bilindiği üzere aktif gücün görünür güce oranıdır. Güç faktörünün düzeltilmesinin amacı elemanların çektiği gücü görünür güce yaklaştırmaktır. Harmonikli gerilimle çalışan güç sistemindeki güç faktörü harmoniksiz bir gerilimle beslenen devreninkine göre daha düşük olacaktır (Kocatepe ve diğerleri, 2003).

2.4.5. Harmoniklere karşı alınan tedbirler ve sistem filtreleme yöntemleri

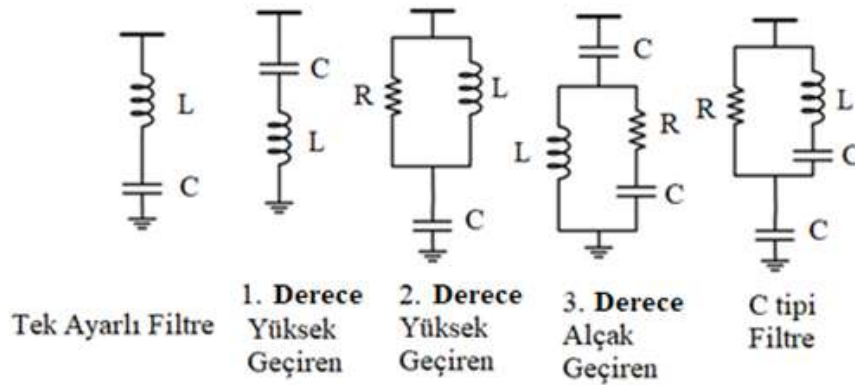
Elektriksel olarak doğrusal olmayan ekipmanların çoğu, özellikle normalde daha büyük güçlerle ilişkili olan üç fazlı tipler, harmonik akımları ve ilgili gerilim bozulmasını gerekli sınırlar içinde tutmak için harmonik azaltma ekipmanlarının eklenmesine ihtiyaç duymaktadır. Harmonik akım ve sonucu olan gerilim bozulmasını önlemeye yönelik sistem filtreleri (pasif, aktif vb.) son yıllarda çok kullanılmaktadır. Sistem filtreleme yöntemleri, belirli bir dağıtım sistemindeki harmonik sorunlara hızlı bir çözüm sunar (ABS, 2006).

Harmonikleri azaltmaya yönelik kullanılan bazı yöntemler aşağıdaki gibidir (ABS, 2006; Srinivas, 2012);

- Pasif filtreler,
- Aktif filtreler,
- Faz kaydırma yöntemi,
- Çoklu darbeleri doğrultucular,
- Standart AC ve DC iletim hattı reaktörler,
- Geniş spektrumlu (reaktör/kondansatör) filtreler,
- Dupleks reaktörler.

Pasif filtreler

Pasif harmonik filtreler farklı gerilim seviyeleri için kullanılan, harmoniklerin seri veya paralel rezonans tipi filtreleri kullanılarak azaltıldığı filtrelerdir. Yüke paralel olarak bağlanmış endüktans ve kapasitans ile seri halde bir filtre akım alıcısı olması, pasif harmonik filtrelerin çalışma şeklidir. Bir akım alıcısı, yüke paralel olan endüktans ve kapasitans ile seri halde olan paralel bir filtredir. Harmonik filtre rezonans frekans noktasına yaklaştıkça filtreden geçen akım artmaktadır (A. Patil, Katkar, Ajit, Vijay, P. Patil ve S. Patil, 2017).



Şekil 2.20. Pasif filtre çeşitleri (ABS, 2006)

Genel olarak pasif filtre çeşitleri tek ayarlı, 1. derece yüksek geçiren, 2. derece yüksek geçiren, 3. derece alçak geçiren ve C filtresi olarak görülmektedir. En çok kullanılan tip, tek ayarlı pasif filtre olup, 5 ve 7. harmonikler ile 11 ve 13. harmonikleri azaltmada oldukça

başarılıdır. Ancak 13. harmonikten sonra pasif filtrenin etkisi çok düşüktür (ABS, 2006). Pasif filtre tasarlaması yapılırken izlenecek yöntem aşağıdaki gibidir (Wakileh, 2001);

Öncelikle sistemin reaktif güç ihtiyacı Q_c belirlenmelidir.

$$Q_c = P.(\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \quad (2.31)$$

Q_c : Reaktif güç ihtiyacı (VAr)

P : Aktif güç (W)

Φ_1 : Mevcut güç katsayısının açısı

Φ_2 : İstenilen güç katsayısının açısı

Burada gerilim değeri (kV) iken kullanılacak kondansatörün reaktansı X_c ;

$$X_c = \frac{kV^2}{Q_c} \quad (2.32)$$

h_n harmoniğini bastırmak için kullanılması gereken reaktör kapasitesi X_L aşağıdaki gibi olacaktır;

$$X_L = \frac{X_c}{h_n^2} \quad (2.33)$$

X_L : Reaktör reaktansı (Ohm)

h_n = Harmonik sırası

Karakteristik reaktans;

$$X_n = \sqrt{X_L \cdot X_C} \quad (2.34)$$

X_n : Karakteristik reaktans (Ohm)

Reaktörün direnci R ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$R = \frac{X_n}{Q} \quad (2.35)$$

R: Reaktör direnci

X_n : Karakteristik reaktans

Q: Kalite faktörü

Filtrenin kapasitesi Q_f aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır;

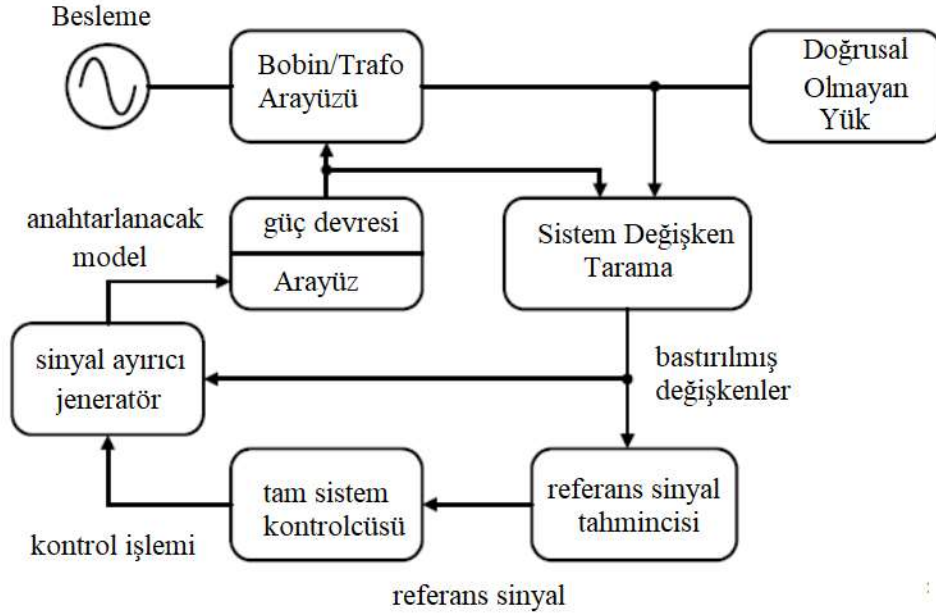
$$Q_f = \frac{kV^2}{X_C - X_L} = Q_C \cdot \frac{h_n^2}{h_n^2 - 1} \quad (2.36)$$

Q_f : Filtre kapasitesi

Aktif filtreler

Aktif filtre, harmonikleri azaltmak için kullanılan elektronik filtrelerdir. Aktif filtreler 1990'ların sonlarından beri mevcuttur ve hem harmonik azaltma hem de reaktif güç faktörü düzeltilmesi için endüstriyel uygulamalarda nispeten yaygındır. Pasif L-C filtrelerinin aksine, aktif filtreler şebekeye potansiyel rezonans yüklemez ve kaynak empedansındaki değişikliklerden etkilenmez (ABS, 2006).

Güç elektroniğindeki kayda değer ilerleme, harmonik bozulmanın azaltılması için aktif filtrelere olan ilgiyi arttırmıştır. AF'nin temel prensibi, doğrusal olmayan yükten kaynaklanan harmonik akım bileşenlerini yok eden belirli akım bileşenleri üretmek için güç elektroniği teknolojilerini kullanmaktır. AF'ler sadece kaynak akım harmoniklerini değil, aynı zamanda reaktif akımları da bastırabilirler (Salam ve diğerleri, 2006).

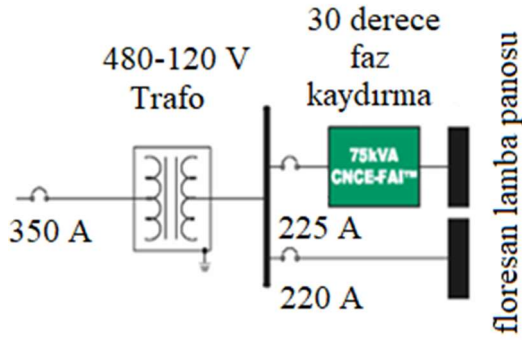


Şekil 2.21. Aktif filtreleme (Salam ve diğerleri, 2006)

Şekil 2.21, tipik bir APF sisteminin bileşenlerini ve bunların bağlantılarını göstermektedir. Harmonik akımlar ve diğer sistem değişkenleriyle ilgili bilgiler kompanzasyon akım/gerilim referansı sinyal tahmincisine iletilir. Tahmin ediciden gelen telafi referans sinyali, genel sistem kontrol cihazına iletilir. Tam sistem kontrolcüsü, sinyal ayırıcı jeneratörü kontrol ederek, güç devresini uygun hangi ara yüz devre üzerinden kontrol edeceğine karar verir. Son olarak, geliştirilmiş blok diyagramındaki güç devresi, ihtiyaca göre kullanılan arayüz indüktöre/transformatöre bağlı olarak paralel, seri veya paralel/seri olarak bağlanarak harmonikler bastırılmaktadır (Salam, Cheng ve Jusoh, 2006).

Faz kaydırma yöntemi

Faz kademeli harmonik indirgeme yöntemi, farklı faz kayma transformatörlerinden beslenebilecek çok sayıda yük olduğunda uygulanır. Dağıtım sistemi harmonikleri, ekipmanın akımı, ekipmanı faz değiştiren trafolardan besleyerek düşürülür. Bir transformatörü oluşturan harmonikler, diğer transformatöre göre 180 derece faz dışı olacak ve daha sonra harmonik bileşeni bastıracaktır. Faz geçişi, dönüştürücülerin her birinin eşit olarak yüklenmesi için en etkili yöntemdir (ABS, 2006).



Şekil 2.22. Faz kaydırma (ABS, 2006)

Şekil 2.22’de öncelikle gerilim 480V’den 120 V’ye düşürülmektedir. Daha sonra ise faz kaydırmalı trafo sayesinde 5. ve 7. harmonikler bastırılmaktadır.

Çoklu darbeli yöntem

Çok darbeli yöntemi güç elektroniği endüstrisinde doğru kullanımla, üç fazlı bir sistemde çalışan ve çevrim başına altıdan fazla DC darbesi sağlayan dönüştürücüler anlamına gelmektedir. Çok darbeli yöntemler, bir dönüştürücünün ürettiği harmoniklerin diğer dönüştürücüler tarafından üretilen harmonikler tarafından yok edilmesi için birbirine bağlı birden fazla dönüştürücüyü içerir. Bu sayede, dönüştürücü sayısına ilişkin bazı harmonikler güç kaynağından ayıklanmış olur (Srinivas, 2012).

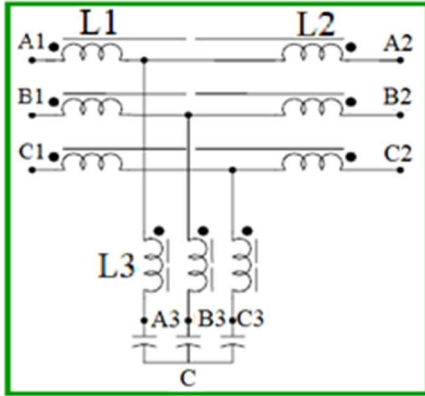
Standart AC ve DC iletim hattı reaktörleri

İndüktörler olarak da bilinen reaktörler, güç transformatörlerinin yapılarına benzer şekilde, lamine çelik çekirdeğin etrafına sarılmış tel bobinleridir. Lamine çelik çekirdek genellikle girdap akımlarından kaynaklanan duyulabilir gürültüyü azaltmak için tesis edilir. Reaktörler doğrusal olmayan yükler tarafından üretilen harmonikleri azaltmak için basit ama etkili bir yöntemdir ve genellikle değişken hızlı sürücüler gibi yüklere tek tek uygulanır. Ek olarak, AC hat reaktörü, sürücünün terminalleriyle veya diğer doğrusal olmayan yüklerle karşılaştırıldığında, reaktör girişindeki toplam harmonik gerilim bozulmasını (V_{thd}) azaltır. Reaktörler elektriksel değişken hızlı sürücülerinin hem AC hem de DC tiplerinde kullanılır. Genellikle diğer harmonik azaltma yöntemlerine ek olarak kullanılırlar. AC sürücülerde, sürücü tasarım tipine ve / veya kaynağın gerekli performansına bağlı olarak AC hattında

(AC hat reaktörleri olarak adlandırılır), DC iletim hattında (DC iletim hattı reaktörleri olarak adlandırılır) veya her ikisinde birden kullanılır (ABS, 2006).

Geniş spektrumlu filtreler

Geniş spektrumlu filtreler, gösterildiği gibi küçük bir kondansatör grubu ile donatılmış reaktörlerdir. (Şekil 2.23). Burada üç reaktör ortak bir çekirdeğe sarılmıştır. Kaynak tarafındaki L_1 'in üstü üzerinde L_1 kaynak tarafı, tasarımı yukarı akış harmoniklerinin geçişini önlemek için ayarlanmış olacak şekilde yapılmış olan yüksek empedans sargısıdır. Yük tarafında, dengeleme sargısı L_2 , empedansı düşürür ve gerilim düşmesini azaltır. L_2 'nin çıkışı, geniş bir yük tarafı harmoniği yayılımını yok etmek için ayarlanmıştır. Farklı bir reaktör tasarımı olan L_3 , yüksüz gerilim artışı ve reaktif gücü azaltmak için daha küçük bir kondansatör grubunun kullanılmasına izin verir.

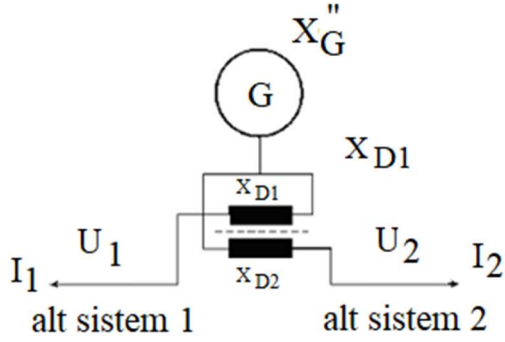


Şekil 2.23. LC filtre (ABS, 2006)

Şekil 2.23'de L_1 , L_2 ve L_3 reaktörleri ortak çekirdeğe sarılmıştır. Kaynak tarafındaki L_1 , yukarı akış harmoniklerinin geçişini önlemektedir.

Dubleks reaktörler

Dubleks reaktörler, 1930'lu yıllarda Avrupa'da ortaya çıkmış ve 1980'lerin ortalarında beri çok sayıda gemide temel tahrik ünitelerinin ürettiği harmoniklerin azaltılması için ve shaft jeneratörleri ile geminin bara sistemine sağlanan gerilimin bozulmasını en aza indirmek için kullanılmaktadır.



Şekil 2.24. Dupleks reaktörler (ABS, 2006)

Şekil 2.24'de görülen dupleks reaktörlerde galvanik olarak ayrılmış fakat sıkıca manyetik olarak bağlı iki tane bobin bulunur. Birincil bobin, standart reaktörler kullanılmasına benzer şekilde bağlanır (yük ile seri halde). İkincil bobin paralel olmayan bağlantı kullanarak birincil bobine bağlanır, böylece bir birinci harmonikli gerilime eklendiğinde temiz bir telafi gerilimi üreten düzeltici bir gerilim elde edilmiş olur (ABS, 2006).

2.5. Gemilerde Elektrik Güç Kalite İndislerinin Yasal Sınırlamaları

Gemi elektroniğindeki elektronik ara yüzü yüklerin ve üretim kaynaklarının kullanılması yönündeki eğilimden dolayı frekans değişimleri ve harmonikler gibi güç kalitesi sorunları önemli hale gelmektedir. Frekans değişimleri ve harmonik konuları yalnızca AC mikro şebekelerde mevcutken gerilim dalgalanmaları hem AC hem de DC mikro şebekelerde meydana gelmektedir. Elektrikli tahrik sistemlerine olan eğilimin artmasıyla birlikte, gemilerdeki güç kalitesi sorunları standardizasyon gerektiren önemli bir alan haline gelmektedir. Bu ihtiyaca cevap olarak, gemi sınıflandırma toplulukları; gemiler, mürettebat, kargo ve denizler için ilgili riski en aza indirmek amaçlı güç kalitesi için düzenlemeleri tanımlamak adına girişimlerde bulunmuştur (Jayasinghe ve diğerleri, 2017). Bu kısımda güç kalitesi indislerinin sapmaları ve bu indislerin küresel bazda geçerli olan gemi sınıflandırma toplulukları tarafından kabul edilen sapma limitleri anlatılmaktadır.

2.5.1. Güç kalitesi indislerinin sapmaları

Gerilim ve frekans ile ilgili güç kalitesi indisleri sapmaları şöyle tanımlanır;

$$\delta_f = \frac{f - f_n}{f_n} \cdot 100 \quad (2.37)$$

$$\delta_{perf} = \frac{f_{max} - f_{min}}{2f_n} \cdot 100 \quad (2.38)$$

$$\delta_V = \frac{V - V_n}{V_n} \cdot 100 \quad (2.39)$$

$$\delta_{perV} = \frac{V_{max} - V_{min}}{2V_n} \cdot 100 \quad (2.40)$$

Burada;

V: Ölçülen RMS gerilimi

f: Ölçülen frekans değeri

V_n : Nominal RMS gerilim değeri

f_n : Nominal frekans değeri

V_{min} : Minimum gerilim değeri

V_{max} : Maksimum gerilim değeri

f_{min} : Minimum frekans değeri

f_{max} : Maksimum frekans değeri

δ_{perf} ve δ_{perV} faktörleri normal çalışma sırasında düzenli olarak veya rastgele tekrarlanan darbe yükünün neden olabileceği periyodik frekans ve gerilim değişimini göstermektedir. Tanım açısından, modülasyonun periyodunun 10 sn'yi geçmediği kabul edilmelidir. Bu tür bir durum gemi sistemlerinde, özellikle şaft jeneratörünün doğrudan çalışması sırasında oldukça yaygındır.

Gerilim asimetrisi Eş.2.41’te tanımlanmıştır.

$$\mu_{L_t_L} = \frac{V_{\max_L_t_L} - V_{\min_L_t_L}}{V_n} \cdot 100 \quad (2.41)$$

Burada;

$V_{\max_L_t_L}$: Fazdan faza maksimum gerilim

$V_{\min_L_t_L}$: Fazdan faza minimum gerilim

Asimetri tanımlamak için alternatif olasılık;

$$\mu_2 = \frac{V_2}{V_1} \cdot 100 \quad (2.42)$$

V_1 : Negatif sekans geriliminin asimetrik bileşeni

V_2 : Pozitif sekans geriliminin simetrik bileşenlerini göstermektedir (Mindykowski, 2014).

2.5.2. Güç kalitesi izleme için yasal araçlar ve sınır değerleri

Elektrik gücü kalitesiyle ilgili birçok standart bulunmaktadır. Karadaki güç kalitesi ile ilgili endüstriyel şebeke standartları birincil standartlar olarak kabul edilmelidir. Kara şebeke standartları, gemi şebekeleri için olan standartların temelini oluşturmaktadır. Gerilim ve frekans dalgalanması ve harmonik bozulma sınırları, güç elektroniği ekipmanlarının güvenilirliğini ve gemideki mürettebatın güvenliğini sağlamak için çeşitli denizcilik standartları tarafından tanımlanmaktadır (Guerrero ve diğerleri, 2016).

Çizelge 2.1. Karasal sistemlerde elektrik güç kalite değerlendirmesi konularına ilişkin standartlar

No	Standart Adı	Standartın Kapsamı
1	IEEE 1159-1995	IEEE'nin Elektrik Güç Kalitesini Görüntülemek İçin Tavsiye Edilen Standart
2	IEC 61000-4-15: 1997/A1:12003	Elektromanyetik Uyumluluk(EMC), Bölüm 4:Test ve Ölçüm Teknikleri Kısım 15: Titreşim Ölçer- Görevsel ve Tasarım Şartnamesi
3	IEC61000-4-30-2003	Test ve Ölçüm Teknikleri-Güç Kalite Ölçüm Yöntemleri
4	IEC61000-4-7-2007	Güç Tedarik Sistemleri ve Bağlı Ekipmanların Harmonikler ve İç Harmonikler Üzerinde Genel Rehber
5	EN-50160-2007	Karasal Dağıtım Şebekesinden Sağlanan Elektriğin Gerilim Karakteristikleri
6	IEEE 1459-2010	IEEE Sinozodial, Sinozodial olmayan, Dengeli veya Dengesiz Durumlarda Elektriksel Güç Büyüklüklerinin Ölçümleri İçin Tanımlar

Konuyla ilgili önemli standartların listesi karada ve gemi şebekelerinde güç kalitesi değerlendirmesi sırasıyla Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2'de gösterilmektedir. Çizelge 2.1'deki 3.,4. ve 5. maddedeki standartlar ile Çizelge 2.2'deki 1., 2., 4. ve 5. maddedeki standartlar gemi teknolojisinde en çok önem arz eden standartlardır (Mindykowski, 2014).

Çizelge 2.2. Gemi şebekelerinde elektrik güç kalite değerlendirmesi konularına ilişkin standartlar (Mindykowski, 2014)

No	Standart Adı	Standartın Kapsamı
1	IEEE Std. 45:2002	Gemi Üstünde Elektrik Kurulumları İçin IEEE Tavsiye Edilen Uygulamaları
2	IEC 60092-101:2002	Gemi İçindeki Elektriksel Kurulumlar, Tanımlamalar ve Genel İhtiyaçlar
3	STANAG 1008:2004	NATO ordusundaki savaş gemilerinin Gemi Elektrik Güç Sistemlerinin Karakteristikleri
4	American Bureau of Shipping, ABS, 2008	Çelik Deniz Taşıtlarının Yapımı ve Sınıflandırması
5	Uluslararası Sınıflandırma Toplulukları Kuralları (PRS/25/P/2006)	Gemi Güç Elektronik Sistemlerinin Teknik Gereksinimleri

Gemi şebekelerinde elektrik güç kalite değerlendirmesi konularına ilişkin standartlar Çizelge 2.2’de verilmektedir.

Çizelge 2.3. Gemi güç sistemlerinde elektriksel güç kalitesi endekslerinin sınır değerleri (Mindykowski, 2014)

Değişken	IEEE45	PN-IEC610092-101	ABS
δ_{ft}	$\pm\%3$	$\pm\%5$	$\pm\%5$
δ_{ft_r} a)değer b)zaman	$\pm\%4$ 2 sn	$\pm\%10$ 5 sn	$\pm\%10$ 5 sn
δ_{perf}	$\%0,5$	$\%0,5$	-
δ_{fmax}	$\%5,5$	$\%12,5$	-
δV_t	$\pm\%5$	$+\%6-\%10$	$+\%6 -\%10$
δV_{t_r} a)değer b)zaman	$\pm\%16$ 2 sn	$\pm\%20$ 1,5 sn	$\pm\%20$ 1,5 sn
δ_{perV}	$\%5$	$\%2$	-
δV_{max}	$\pm\%20$	$\pm\%20$	-
u_{L-L}	$\%3$	$\%7$	-
u_2	-	$\%3$	-
THD	$\%5$	$\%5$	$\%5$
$\%V_h$	$\%3$	$\%3$	$\%3$
δ_u	$\%5$	-	-
u_s	$V_n=380-600$ V iken 2500 V $V_n=120-240$ V iken 1000 V	$5,5 V_n$ $1,2\mu s/50\mu s$ *	-
δP	-	-	$\%15$
δQ	-	-	$\%10$

En sık kullanılan güç kalitesi endekslerine kısa bir genel bakış için, tavsiye edilen sınır değerleri Çizelge 2.3'de gösterilmiştir.

Burada;

δV_t : Gerilim toleransı

δ_{ft} : Frekans toleransı

δV_{tr} : Gerilim geçiş bileşenleri,

δ_{fr} : Frekans geçiş bileşenleri,

u_s : Gerilim yükselmesi

* : yükselme / düşme süresi yalnızca PN-IEC 10092-101 standardı ile ilgilidir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada gemi elektrik sistemlerindeki elektrik güç kalitesi problemlerinin bir dökme yük gemisi üzerinde incelemesi yapıldığından, materyal olarak bir dökme yük gemisinin elektrik sistemi incelenmiş ve bu geminin önemli elektrik tüketicileri işlevleriyle birlikte anlatılmıştır. Ayrıca bir yolcu gemisinin, elektrik güç kalite problemlerinden dolayı yaşadığı gemi kazası kurgusal olarak elektrik tahrikli olarak tasarlanan bir dökme gemisi üzerinde incelendiğinden dolayı kazaya maruz kalan yolcu gemisi 2. materyal olmuş temel verileri açıklanmıştır. Elektrikli tahrikli olarak yol aldığı varsayılan dökme yük gemisinin filtre tasarımı sırasında kullanılacak formülasyonlara da değinilen bu bölümde son olarak tezde kullanılan yöntem açıklanmıştır.

Çalışmanın amacı, literatürden elde edilen bilgiler doğrultusunda MATLAB/Simulink ile sinüzoidal dalgaların olması gerekenden ne kadar saptığının harmonikler, gerilim düşmesi ve gerilim yükselmesi gibi güç kalitesi bozuklukları olarak ortaya konulması aracılığıyla simülasyon modeli oluşturmaktır. Yapılan simülasyonda normalde konvensiyonel dizel-motor tahrik sistemine sahip dökme yük gemisinin elektrik tahrikli olarak yol aldığı varsayılmıştır. Dökme yük gemisi elektrik sisteminin test edilebilmesi için güç kalitesi problemleri sebebiyle yangın olayına maruz kalan Queen Mary 2 gemisindeki girdiler simülasyon modeline dahil edilmiş ve simülasyon modelinin davranışı incelenmiştir.

3.1. Dökme Yük Gemisi Elektrik Sistem İncelemesi

Bir geminin elektrik dağıtım sisteminin görevi, elektrik gücünü kendisine bağlı her ekipmana güvenli bir şekilde iletmektir. Sistemdeki en belirgin eleman ana dağıtım panosudur. Ana dağıtım panosu, motor group starter panolarına bölüm panolarına ve dağıtım panolarına yüksek seviyede güç sağlar. Transformatörler sistemin yüksek gerilim ve alçak gerilim dağıtım bölümlerini birbirine bağlar. Sistemin etrafına yerleştirilmiş devre kesiciler ve sigortalar, şebeke içindeki hatalı devreleri otomatik olarak keser. Ana pano makine kontrol odasına yerleştirilir ve oradan makine dairesi çalışanlarının ekranından elektrik gücünün üretimi ve dağıtımını kontrol edilir. Her mühendisin, geminin gücünün elektriksel dağıtımını hakkında derin bir bilgiye sahip olması çok önemlidir. Çoğu gemide 3 fazlı AC, 3 telli, 440V yalıtımlı nötr sistem bulunur. Bu, yıldız bağlantılı jeneratörlerin nötr noktalarının

geminin gövdesine topraklandığı anlamına gelir. Çok büyük elektrik yüküne sahip olan gemilerde, 3.3 kV, 6.6 kV ve hatta 11 kV yüksek gerilimlerde çalışan jeneratörler bulunmaktadır. Bu yüksek gerilimleri kullanarak, kabloların ve ekipmanların boyutu azaltılabilmektedir. Yüksek gerilim sistemleri, gemi büyüklüğü ve karmaşıklık arttıkça daha yaygın hale gelmektedir. Gemilerde kullanılmak üzere benimsenen en yaygın güç frekansı 60 Hz'dir. Bu yüksek frekans, jeneratörlerin ve motorların daha yüksek hızlarda çalışması ve bunun sonucunda belirli bir güç kademesi için boyutta küçülme anlamına gelir. Aydınlatma ve düşük güçlü tek fazlı tüketiciler genellikle 220 V'ta çalışır (Maes, 2014).

Bu kısımda, bir dökme yük gemisinin elektrik sistemlerinden bahsedilmiştir. Gemide toplamda 3 tane jeneratör bulunmaktadır. Ayrıca gemi kazası, blackout, jeneratör arızası vb. durumlarda gemideki önemli kısımların beslenmesinin sürekliliğini sağlamak için makine dairesi dışına konuşlandırılmış 1 adet acil durum jeneratörü bulunmaktadır. Gemideki önemli elektrik dağıtım panoları ve açıklamaları ile dağıtım panolarının ihtiva ettikleri önemli tüketiciler ise aşağıdaki gibidir (DSEC, 2008) :

MSBD (Main switchboard distribution panel): Gemide ana jeneratörlerin bağlı olduğu pano ana besleme dağıtım panosu olan MSBD (Main Switchboard Distribution)'dir. Ana dağıtım panosu olan MSBD'den doğrudan beslenen tüketicilere ait MSBD 440V No.1 ve No.2 olarak 2 adet Feeder Panel ve trafoyla 220V'a düşürülmek suretiyle beslenen 1 adet MSBD 220V panel yer almaktadır. Bu pano, 3 adet dizel jeneratör ile beslenmektedir. (Pg=950KVA gücünde, $\cos\phi=0,8$, Pa=760 kW)

GSP (Group starter panel): Anabaraya bağlı olarak 2 adet GSP (Group Starter Panel) bulunmaktadır. Bu panoda yer alan ekipmanlar gemide yer alan motor, kompresör ve pompaları korumaya ve kontrol etmeye yaramaktadır.

Yağlama yağı pompası: Ana makine yağlama yağı pompası ana makine çalıştırıldığı zaman devreye alınır ve gemi kalkmadan önce, seyirde iken ve limana yanaştıktan sonra bir süre 2 adet bulunan pompadan biri sürekli çalışır. 3 faz ve 110 kW gücündedir.

Ana deniz suyu soğutma pompası: Ana makine, dizel jeneratör ve diğer yardımcı makinelerle beraber yağ ve hava devrelerinin soğutulması için ana deniz suyu soğutucu pompalarından en az birisi sürekli çalışır. Deniz suyu sıcaklığının artması veya ihtiyaç

durumunda 2. ve 3. pompalar da devreye alınabilir. Toplamda 3 adet olmak üzere bir tanesinin tüketim gücü 45 kW'tır.

LT tatlı su soğutma pompası: Düşük sıcaklıkta soğuk besleme suyu pompasıdır. Gemideki soğutma sisteminin özelliği olarak deniz suyu ana makine, dizel jeneratörler ve diğer yardımcı makineleri deniz suyunun korozyonuna ve kışır oluşuna maruz kalmaması için doğrudan soğutulmamaktadır. Bu amaçla deniz suyu ısı değiştiricilerde "low temperature" soğutma suyu adı verilen tatlı suyu soğutur ve bu soğuyan tatlı su makinelerde gezerek soğutmayı yapar. Ana makine, dizel jeneratör ve diğer yardımcı makinelerin soğutulması için en az biri sürekli çalışır, deniz suyu sıcaklığının artması veya ihtiyaç durumunda 2. ve 3. pompalar da devreye alınabilir. Toplamda 3 adet bulunmakta olup, bir tanesinin tüketim gücü 37 kW'tır.

Ana makine ceket suyu sirkülasyon pompası: Ana makine ceket soğutma suyu pompası ana makine çalıştırıldığı zaman devreye alınır ve bir süre seyir öncesi, seyir sırasında ve bir süre seyir sonrası 2 pompadan biri sürekli çalışır. Toplamda 2 adet bulunmakta olup, bir tanesinin tüketim gücü 22 kW'tır.

Ana makine fuel oil besleme pompası: Ana makine yakıt besleme pompasıdır ve toplam 2 pompadan biri sürekli çalışır. Bir tanesinin tüketim gücü 2,5 kW'tır.

F.O. sirkülasyon pompası: Ana makine yakıt sirkülasyon pompası, yakıtı ısıtıldıktan sonra karıştırma tankından alarak motora kadar basınçlandırır. 2 pompadan biri sürekli çalışır. Bir tanesinin tüketim gücü 4,6 kW'tır.

Kazan besleme suyu pompası: Yardımcı buhar kazanı ve baca kazanı besleme suyu pompasıdır ve kazana su alırken 2 pompadan biri sürekli çalışır. Bir tanesinin tüketim gücü 11 kW'tır.

Jeneratör FO besleme pompası: Dizel jeneratör yakıt besleme pompasıdır ve 2 pompadan biri sürekli çalışır. Bir tanesinin tüketim gücü 0,86 kW'tır.

No:1 jeneratör FO sirkülasyon pompası: Dizel jeneratör yakıt sirkülasyon pompasıdır ve 2 pompadan biri sürekli çalışır. Bir tanesinin tüketim gücü 1,75 kW'tır.

Şaft kovanı yağ transfer pompası: Stern tube transfer pompası geminin kış kısmında bulunan içi boş su sızdırmazlığını sağlayan tüp benzeri bir yapıdır. Kış borusu, geminin kışına monte edilir ve pervane şaftını desteklemek için kullanılan kayar yatakları taşır. 2 pompadan biri sürekli çalışır ve bir tanesinin tüketim gücü 1,25 kW'tır.

Sintine, yangın ve genel servis pompası: Sintine ve yangın pompası genel amaçlı bir pompadır. Yangın devresini besler, ayrıca acil bir durumda makine dairesini, su basması durumunda ise sintineyi denize basmak için kullanılabilir. İhtiyaca göre çalıştırılır. 2 tane bulunmakla birlikte 1 tanesinin tüketim gücü 90 kW'tır.

Ana hava kompresörü: Ana makine ve dizel jeneratörler basınçlı hava ile çalıştırılır dolayısı ile hava tüplerini sürekli belli bir basınçta tutmak için tüketime bağlı olarak devreye girip çıkar. 2 pompadan birisi sürekli olarak devrededir. Bir tanesinin tüketim gücü 43 kW'tır.

Marine dizel oil transfer pompası: Dizel yakıt transfer pompasıdır, yakıt tüketimine bağlı olarak belirli aralıklarla çalıştırılır. Tüketim gücü 4,6 kW'tır.

Yağlama yağı transfer pompası: Yağlama yağı transferi için ihtiyaç durumunda kullanılan bir pompadır. Tüketim gücü 4,6 kW'tır.

AC 440V feeder panel: Ana dağıtım panosunun bir kısmı olan ve 3 fazlı olan yükleri besleyen panodur. 7 adet yerel grup başlama panosu LGSP (Local Group Starter Panel) ile bir kısım önemli ekipman bu panodan beslenmektedir.

PD-1: Birinci kat güç dağıtım panosudur. Bu panoya bağlı ekipmanlar;

- Vinç güç kumanda kutusu (power switch box for E/R crane 6,7 kW),
- Klima (packaged air cond. for E/C/R, 15,01 kW),
- Pis su tasfiye sistemi vakum ünitesi (St vacuum toilet unit 5,1 kW),
- Ana makine silindir yağı transfer pompası (St for m/E CYL. oil. 0,29 kW)
- Hidrolik güç paketi (St for vrc hyd. power pack, 3,6 kW),
- Pis su arıtma tesisi (St for sewage treatment plant, 6,5025 kW),
- Pis su depolama tankı (St for sewage holding tank, 3 kW).

PD-2: İkinci kat güç dağıtım panosudur. Bu panoya bağlı ekipmanlar;

- Torna tezgahı (Lathe, 5,5 kW),
- Egzoz valfi taşlama makinesi (Grinding machine, 0,75 kW),
- Matkap (Drilling machine, 0,75 kW),
- Kaynak makinası (RP for welding machine, 3 kW),
- Kaynak alanı tahliye fanı (Welding area exh. fan, 0,75 kW),
- Klima (Packaged air cond. for workshop, 6,57 kW),
- İncineratör kontrol panosu (Cp for incinerator, 30,195 kW),
- Tatlı su evaporatörü (St for F.W. generator, 20 kW).

PD-3: Üçüncü kat güç dağıtım panosudur. Bu panoya bağlı ekipmanlar;

- Elektrikli ocak (Electric range, 16,7 kW),
- Fırın (Baking oven, 9,4 kW),
- Kızartma fanı (Tilting frying fan, 6,9 kW),
- Su ısıtıcı (Tilting kettle, 10 kW),
- Bulaşık makinesi (Dish washer, 5,1 kW),
- Çöp öğütücü (Waste disposer, 5,1 kW),
- Sauna ısıtıcısı (Cp for sauna, 6 kW),
- Klima (Packaged air conditioner, 32,33 kW),
- 3 adet çamaşır makinası (Çamaşır makinası, 21 kW),
- Ütü (Elec. roller ironer, 3,2 kW),
- Kızartma makinası (Deep fat frier, 7,2 kW).

LGSP-1 (Local group starter panel): Yerel grup başlatma panosudur. Panoda mevcut olan tüketiciler;

- Torna çark (St for M/E turning gear, 5,5 kW),
- Ana makine şoklu yağ filtresi (Cp for M/E L.O. auto filter, 5 kW),
- Sintine seperatörü (Cp for bilge w. seperator, 3,3 kW),
- Ana makine top bracing (St for M/E hyd. top bracing 1&2, 1,1 kW),
- Slaç pompası (Sludge pump, 2,2 kW),

- Hava kuleri dreyn pompası (Clean drain pump, 2,2 kW),
- Tatlı su hidrofor pompası (F.W. hyd pump, 0,4 kW),
- Sıcak su sirkülasyon pompası (Hot. w. circ. pump, 0,4 kW).

LGSP-2 (Local group starter panel): Yerel grup başlatma panosudur. Panoda mevcut olan tüketiciler;

- Tatlı su hidrofor pompası (F.W. hyd. pump, 15 kW),
- Kalorifer sıcak suyu kontrol panosu (Cp for H.W. calorifier, 15 kW).

LGSP-3 (Local group starter panel): Yerel grup başlatma panosudur. Panoda mevcut olan tüketiciler;

- Fuel oil pompası (H.F.O. purifier feed pump, 2,5 kW),
- Fuel-oil seperatörü (H.F.O. purifier, 11 kW),
- Ana makine yağlama yağı seperatörü (M/E No.1 L.O. purifier, 7,5 kW),
- Ana makine yağlama yağı seperatörü besleme pompası (M/E No.1 L.O. purifier feed pump, 1,75 kW),
- Seperatör bölgesi fanı (Purifier space exhaust fan, 5,5 kW),
- Jeneratör dizel oil pompası (G/E M.D.O. service pump, 1,25 kW),
- Ana makine şoklu yağ filtresi (Cp for M/E L.O. auto filter, 1,5 kW),
- Jeneratör şoklu yağ filtresi (Cp For G/E F.O. auto filter, 1,5 kW).

LGSP-4 (Local group starter panel): Yerel grup başlatma panosudur. Panoda mevcut olan tüketiciler;

- S/G/R soğutma fanı (S/G/R supply fan, 5,5 kW),
- Gres yağ trafosu (Trafo 440/230 JB for S/G grease pump, 0,04 kW),
- Can salı mataforası (St for lifeboat davit, 11 kW),
- Tavan kreyni (St for S/G/R davit, 11 kW).

LGSP-5 (Local group starter panel): Yerel grup başlatma panosudur. Panoda mevcut olan tüketiciler;

- Boru kanalı besleme fanı (No:1 pipe duct supply fan 11,5 kW),
- Asansör makine dairesi fanı (Trafo 440/230 elevator mach. room exh. fan, 0,16 kW),
- Sıhhi alan egzoz fanı (sanitary space exhaust fan, 1,73 kW),
- Boyalık ve fenerlik fanı (paint&lamp store exh. fan, 0,75 kW),
- Kumanya kreyini (St for provision crane, 53,3 kW),
- Kurtarma botu ve cankurtaran salı metaforası (St for rescue boat and liferaft davit, 11 kW),
- Taşınabilir pompa (RP for hatch cover portabele pump, 3,5 kW),
- Tortu vinci (Rp/W SW for sediment davit, 1,5 kW),
- Boru kanalı besleme fanı (No:2 pipe duct supply fan, 5,5 kW),
- Tuvalet tahliye fanı (Trafo 440/230 hospital&hospital toilet exh fan, 0,16 kW),
- Kuzine fanı (Galley exh fan, 1,5 kW),
- Muhtelif alan tahliye fanı (Sundry space exh fan, 1,73 kW),
- Ambar kapağı hidrolik pompası (St for hatch cover HYD. power pack, 42 kW),
- Yakıt alım ve süveyş kanalı kreyini (St for FO&Suez mooring boat davit, 11 kW).

LGSP-6 (Local group starter panel): Yerel grup başlatma panosudur. Panoda mevcut olan tüketiciler;

- Bosun starter besleme fanı (3,7 kW),
- Katodik koruma redresör kumanda panosu (Cp for FWD Iccp, 2 kW),
- Kaynak makinası (RP for welding machine, 1 kW),
- LD-6 Bosun Store (11,67 kW)
- Süveyş kanal projektörü (St for suez search light davit, 1,5 kW).

LGSP-7 (Local group starter panel): Yerel grup başlatma panosudur. Panoda mevcut olan tüketiciler;

- Makine dairesi besleme fanı (E/R supply fan, 15 kW),
- Makine dairesi tahliye fanı (E/R sup/exh fan, 15 kW),
- Makine dairesi besleme fanı (E/R supply fan (MSBD no.2 AC 440), 15 kW).

Ana makine no:1 ve no:2 blower: Turbo şarj devrinin dizel motor için yeterli miktarda yanma havasını sağlayacak düzeye gelmediği motor devirlerin dizel motorda gerçekleşen yanma işlemi sırasında kullanılacak havanın karşılanması için kullanılan bloverlere hareket sağlayan motordur. 2 tane bulunmakla beraber 1 tanesi 75 kW gücündedir.

Jeneratör ön yağlama-ön ısıtma pompası: Jeneratördeki ön yağlama pompası ve jeneratör ön ısıtma pompasıdır. 9,85 kW gücündedir.

Blover kontrol paneli: Bloverlerin kontrol edildiği ve Pa=7,2 kW gücündeki panodur.

Steering gear (Dümen): Dümen yelpazesini çevirmek için sadece gemi çalıştığı zaman kullanılan ekipmandır. Pa=80 kW gücündedir.

Buzluk: Gemideki dondurulmuş ve soğutulan gıdaların muhafaza edildiği alandır. Pa=9,2 kW gücündedir.

Kıç güverte makineleri: Geminin kıç üstünde yer alan ırgat ve kreyn gibi ekipmanları kapsayan arka güverte makinelerdir. 75 kW gücünde 2 adet hidrolik pompadan oluşmaktadır. Toplam 150 kW.

Baş güverte makineleri: Geminin baş kısmında yer alan ırgat ve kreyn gibi ekipmanları kapsayan arka güverte makinelerdir. 75 kW gücünde 2 adet hidrolik pompadan oluşmaktadır.

Ballast pump No: 1 ve 2: Balast pompaları, denge ve stabilizasyon sağlamak için büyük miktarlarda deniz suyunu deniz taşıtlarının balastlarının içine veya dışına verimli bir şekilde aktarmak üzere tasarlanmıştır. Balast pompaları çoğu geminin çalışması için önemlidir. Balast olarak eskiden kum, tas veya metal kullanılmakta iken son yıllarda geminin dip kısmındaki ve yan taraflardaki tanklara alınan deniz suyu kullanılır. Gemide 350 kW gücünde 2 adet balast pompası yer almaktadır. İhtiyaç olduğu durumlarda kullanılmaktadır.

220V Feeder panel (220 V Besleme Panosu): 440V'luk anabaradan 2 adet 120 kVA'lık trafo tesis edilerek oluşturulmuştur. Bu kısımdan gemideki 5 adet aydınlatma panosu (LD) beslenmektedir (LD-1, LD-2, LD-3, LD-4, LD-5). Bu panoların toplam tüketimi 320

kVA'dır. Ayrıca bu pano LPD-1 ve LPD2 olarak adlandırılan 2 adet panoyu beslemektedir. Çeşitli ısıtıcılar ve mutfak aletlerini besleyen LPD-1 tüketimi 38,1 kW iken, aynı zamanda acil durum panosu ESBD'den de beslenen ve radar, navigasyon gibi kritik cihazları besleyen LPD-2 tüketimi ise 57,7 kW'tır. Hem 220V Feeder Panel hem de ESBD AC220V'den beslenen tüketiciler bulunmaktadır.

Motor kontrol konsolu: Motor kontrol konsolu 220 V besleme panosundan beslenmektedir. Tüketim gücü 0,8 kW'tır.

Seyir fenerleri kontrol panosu: Seyir feneri kontrol panosu 220 V besleme panosundan beslenmektedir. Tüketim gücü 0,19 kW'tır.

Yangın alarm paneli: Yangın saptama ve yangınla mücadele panosudur. 220 V besleme panosundan beslenmektedir. Tüketim gücü 0,19 kW'tır.

Alarm göstergeleri panosu: Alarm göstergeleri panosu 220 V besleme panosundan beslenmektedir. Tüketim gücü 0,25 kW'tır.

Lokal yangın söndürme sistemi: Lokal yangın söndürme sistemi kontrol panosu 220 V besleme panosundan beslenmektedir. Tüketim gücü 0,19 kW'tır.

Mikroorganizma önleme sistemi kontrol panosu: Elektroliz yöntemiyle gemide kullanılan suyu mikro/makro organizmalardan arındıran önleme sisteminin kontrol panosudur. 220 V besleme panosundan beslenmektedir. Tüketim gücü 0,19 kW'tır.

Genel adres terminali panosu: Gemideki alarm, komuta vb. seslendirme sisteminin kontrol panosudur. 220 V besleme panosundan beslenmektedir. Tüketim gücü 0,25 kW'tır.

Yüksek genleşmeli köpük panosu: Yüksek genleşmeli köpük kontrol panosudur, 220 V besleme panosundan beslenmektedir. Tüketim gücü 0,25 kW'tır.

Köprüüstü konsolu: 220 V besleme panosundan beslenmektedir. Tüketim gücü 0,3 kW'tır.

Yakıt test odası tahliye fanı: 220 V besleme panosundan beslenmektedir. Tüketim gücü 0,25 kW'tır.

Ana makine silindir yağı pompası: 220 V besleme panosundan beslenmektedir. Tüketim gücü 2,2 kW'tır.

Servis hava kompresörü: 220 V besleme panosundan beslenmektedir. Tüketim gücü 35 kW'tır.

İklimlendirme ünitesi: Klima ünitelerine ait beslemedir. 220 V besleme panosundan beslenmektedir. Tüketim gücü 84,3 kW'tır.

DSU kabini: Diyot besleme ünitesi kabinidir. 220 V besleme panosundan beslenmektedir. Doğrultucularda kullanılmaktadır. Tüketim gücü 7,2 kW'tır.

Acil durum dağıtım panosu (Emergency switchboard distribution panel-ESBD): Acil durum dağıtım panosudur. Acil durumlarda kullanılmak üzere tesis edilen acil durum jeneratörü ana baraya bağlı şekilde tesis edilen acil durum panosu (Emergency Switchboard Distribution- ESBD)'ye bağlıdır. Bu pano gemi içerisinde tesis edilen elektriksel yükler için sağlanan gücü kontrol etmektedir. Kaza durumunda, kazanın tipine göre, ilgili elektriksel parçalar için farklı tip güvenlik cihazlarıyla güvenlik koruması sağlamaktadır. Acil durum panosu ESBD, MSBD gibi yine 440V ve 220V gerilimindeki tüketicileri besleyen iki adet dağıtım panosuna sahiptir. Aynı zamanda, ELD-1(8.4 kVA), ELD-2 (10.8 KVA), ELD3 (10,5 kVA) ve LPD-2 (18 kVA) güçlerindeki kat dağıtım panolarını beslemektedir. Bu panoya ait olan acil durum jeneratörü 250 kVA gücünde kapasiteye sahiptir.

Makine dairesi fanları: Makine dairesi besleme/tahliye fanıdır ve 15 kW gücündedir.

Acil durum yangın pompası ve fanı: Acil durumda kullanılan yangın pompası ve fanıdır. 91,5 kW gücündedir.

Acil durum AC220V besleme panosu trafosu: Tek fazlı tüketicileri beslemek için tesis edilmiştir. 20 kVA gücündedir.

Akü şarj panosu: ESB D panosundan beslenmektedir. 440 V besleme panosundan gelen enerji redresör yardımı ile 24V DC olarak regüle edildikten sonra otomasyon sistemine dair gerekli beslemeleri yapar.

Jeneratör dizel yakıt servis pompası: Jeneratörlere ait dizel yakıt transfer pompasıdır. Tüketim gücü 1,25 kW olan pompadır.

No:2 ve no:3 jeneratörler ön yağlama ve ön ısıtma pompaları: Her biri 9,85 kW gücünde toplamda 19,7 kW gücünde tüketime sahiptir.

Steering gear (Dümen): Şebeke geriliminden beslendiği gibi aynı zamanda acil durum panosundan da beslenmektedir. Pa=80 kW gücündedir.

Acil Hava Kompresörü: Acil hava kompresörü acil durumlarda ana makine motoruna ilk hareketi vermek için kullanılır ve 3,6 kW gücündedir.

Yangın köpük pompası: Yangında kullanılan 5,5 kW gücündeki köpük pompasıdır.

Lokal yangın söndürme pompası: Lokal yangın söndürme pompasına ait 6,3 kW gücündeki beslemedir.

Asansör kontrol panosu: Asansörün kontrol paneline ait 11 kW gücündeki beslemedir.

Matafora cankurtaran botu vinci: Matafora cankurtaran botunun vincine ait 12 kW gücündeki elektrik motorudur.

Siren röle kutusu: Siren için röle kutusu 11 kW gücündedir.

440V/230V Trafo: 220/230 V'luk ekipmanları beslemek için tesis edilen 20 kVA gücündeki trafodur.

Motor kontrol konsolu: Motor kontrol konsolu beslemesinin tüketim gücü 0,8 kW'tır.

3.2. Filtre Tasarımı

Çalışmanın simülasyon kısmında, geminin normal seyrinde özellikle değişken frekanslı sürücülü pod tipi elektrik tahrik motorları tarafından üretilen harmonik bozuklukları bastırmak için pasif harmonik filtre kullanıldığından, normal durum için pasif filtrelilik olarak simülasyon yapılmıştır. Bu simülasyona göre elde edilen akım ve gerilim dalgaları, Fourier dönüşümüne tabi tutulmuş ve harmonik bozukluk miktarı ortaya çıkarılmıştır. Gemide gerçekleşen kazadaki yangından dolayı harmonik filtrelerin devre dışı kaldığı durum ise ayrıca simüle edilmiş ve Fourier dönüşümüne göre harmonik bozukluk miktarı ortaya çıkarılmıştır.

Geminin hâlihazırdaki pasif filtre sistemi hesaplanmış ve bilinse de, gemideki pasif filtre tasarımı için Eş. 2.31, Eş. 2.32, Eş. 2.33, Eş. 2.34, Eş. 2.35 ve Eş. 2.36'daki formülasyon izlenmiştir ve hesaba göre elden edilen filtre sisteme entegre edildiği zaman başarılı sonuçlar alınmıştır.

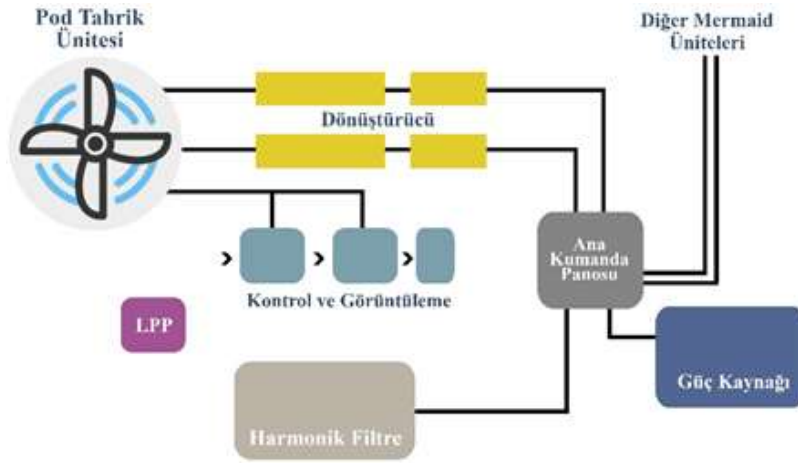
3.3. Queen Mary 2 Yolcu Gemisi Kazası

Bu kısımda, elektrik güç kalitesi ekipmanı olan harmonik filtrelerin patlamasından kaynaklı olarak ortaya çıkan Quenn Mary 2 gemisindeki kaza incelenmiştir. Kaza, 23 Eylül 2010 tarihinde, Queen Mary 2 adlı yolcu gemisi Southampton'dan Barcelona'ya giderken meydana gelmiştir. Harmonik filtrelerin patlamasından sonra, gemide sistem çökmesi gerçekleşmiştir. Bu gemi kazasının incelenmesinin amacı, genel olarak elektrik güç kalitesinin önemini anlaşılması ve bu konunun dökme yük gemileri kapsamında incelenmesidir.

3.3.1. Arka plan

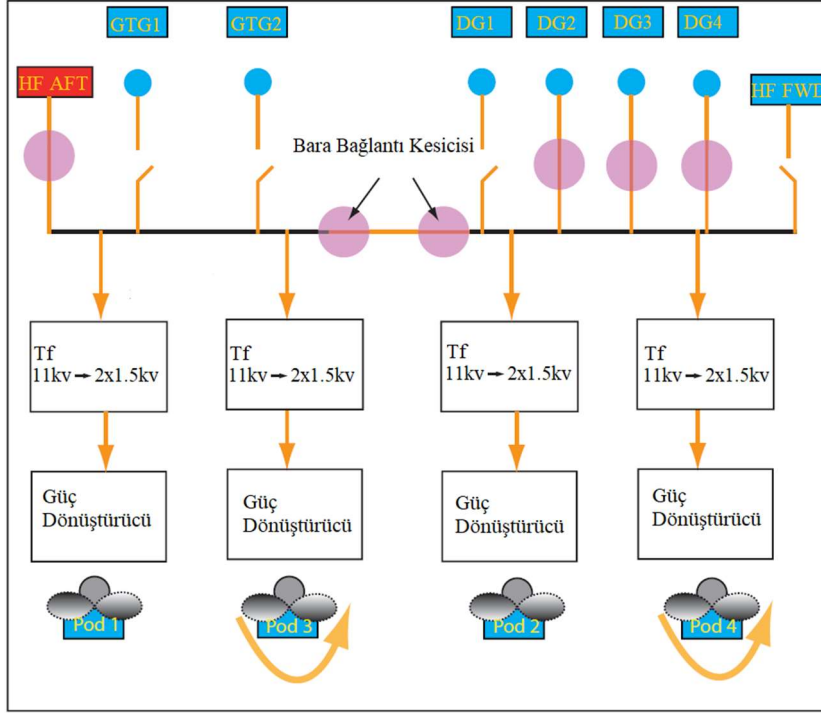
Queen Mary 2, podlu sürücüler olarak bilinen dört değişken hızlı elektrikli tahrik motorları tarafından itilmektedir. Hızın değişmesi, güç kaynağındaki elektrik frekansının motorlarca değiştirilmesiyle sağlanmaktadır. Gerilim dalga biçiminin bozulması, frekansı değiştirmenin istenmeyen bir etkisidir. Bozulma derecesi, toplam harmonik bozulma olarak tanımlanmaktadır ve gemi sınıflandırma toplulukları tarafından belirlenen sınırlar dahilinde tutulmalıdır. QM2'de, bu durum ayarlanmış bir kondansatör ve indüktör yükünden oluşan

ve geminin ön ve arka ana kumanda panolarına bağlanan harmonik filtrelerin (harmonik filtre-HF) kullanılmasıyla başarılmıştır. Her HF, sıra 11.3 ve sıra 4 olarak bilinen iki bölümden oluşmaktadır. Anakumanda panoları (mainswitchboard panel-MSB) birbirlerine devre kesiciler ile bağlanmıştır (Şekil 3.2) Her HF, MSB bölümü içindeki ayrı bir odanın içine yerleştirilmiştir. Hem MSB hem de HF odaları, ticari ismi Hi-Fog olarak bilinen yangın söndürme sistemi ile korunmuştur (MAIB, 2011).



Şekil 3.1. Tahrik sistemi ve harmonik filtre (MAIB, 2011)

Şekil 3.1'de tahrik sistemi olan pod tahrik ünitesinin iki adet güç dönüştürücü üzerinden MSB'ye bağlandığı görülmektedir. Harmonik filtreler de yine MSB'ye bağlı olup, meydana gelen harmonik bozuklukları bastırmaktadır.



Şekil 3.2. Yüksek gerilimli elektrik şebekesi (MAIB, 2011)

Şekil 3.2'de görüldüğü üzere, gemide 4 adet dizel jeneratör (DG) ve 2 adet gaz jeneratörü (GTG) bulunmaktadır. Anabara gerilimi olan 11 kV 4 adet trafo sayesinde 1.5 kV'a indirgenip güç çeviricilere (power converter) aktarılmaktadır (MAIB, 2011).

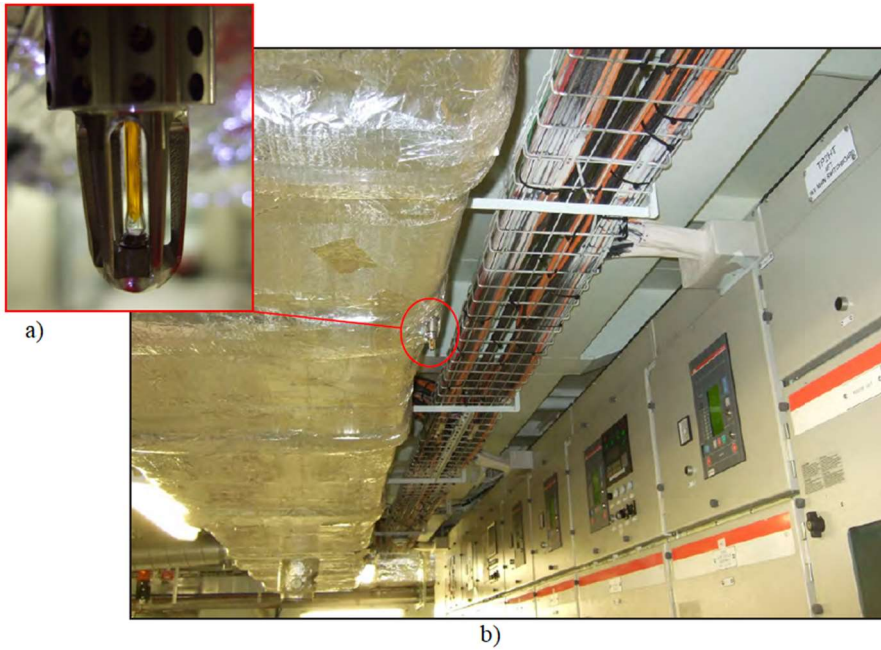
3.3.2. Kazanın oluşumu

23 Eylül 2010 tarih ve 04:15'te, QM2 köprüsündeki vardiya zabiti hazırlıklara başlanması için Barcelona'ya varmaya 2 saat kaldığını haber vermiştir. Gemi, 19 Eylül'de Southampton'dan ayrılmış ve dört pod motor çalışırken 18.6 knot hızında 026° seyrinde kalmıştır. Motor kontrol odasında bulunan dört mühendis saat 04:25'te gürültülü bir patlama duymuş; bu durum, koridordaki aydınlatma hariç, motor odasının aydınlatmasının tamamen kapanmasıyla devam etmiştir. Hemen sonra, ana tahrik motorlarının çıkış gücü 5 MW'ın altına düşmüş ve tüm jeneratörler kapandıktan sonra motorlar yaklaşık 16 saniye sonra durmuştur (MAIB, 2011).

Acil durum jeneratörü otomatik olarak çalışmaya başlamış, aydınlatma ve diğer temel gerekli kısımlar tekrar devreye girmiştir. Bir sonraki vardiyadaki üçüncü mühendis durumu

araştırırken MSB odasından gelen koyu siyah dumanı fark ettikten sonra kontrol odasındaki diğer mühendisleri portatif ultra yüksek frekanslı telsiziyle uyarmıştır. Daha sonra makine dairesini arka ana kumanda panosu odasına götüren alan arasındaki su geçirmez kapıyı kapatmıştır. Ayrıca bir yangın hortumu hazırlamış ve su geçirmez kapının girişine koymuştur. K1ç HF ve K1ç MSB odalarından birkaç duman ve ısı algılama sensörü aktif hale geldikten sonra köprü ekibi, 04:30 civarında, güverte, motor ve otel bölümlerinden altı kıdemli temsilciden oluşan değerlendirme ekibini harekete geçirmiştir. Güverte ve motor yangın ekipleri, soğutma ekipleri (toplam 26 personel) ile birlikte, yolcuların kaygılarını gidermek için özel olarak görevlendirilmiş tüm otel yöneticileri ile birlikte koordineli bir biçimde hareket etmiştir. Herhangi bir yolcu veya genel mürettebat anonsu yapılmamıştır (MAIB, 2011).

04:39'a kadar, hem solunum aparatı takan hem de karbondioksit portatif yangın söndürücüler ve bir termal görüntüleme kamerası taşıyan ikinci bir elektroteknik zabiti ve üçüncü bir mühendis, olayı incelemeye başlamıştır. K1ç MSB odasına girmişler ve HF odasına geçmişlerdir. Kapıdan girdikten sonra alanın kalın siyah bir dumanla dolduğunu görmüşler; ancak yangın çıkmadığını ve termal görüntüleme kameralarını kullanarak herhangi bir sıcak nokta olmadığını tespit etmişlerdir.



Resim 3.1. a) Hi-Fog cam ampul b) K1ç anakumanda pano odası (MAIB, 2011)

Biri kıç HF odasında diğeri kıç MSB odasındaki iki Hi-Fog cam ampulunun (Resim 3.1) kırıldığı ve her iki bölmenin güvertesinde yaklaşık 10 mm su olduğu (Resim 3.2) görülmüştür (MAIB, 2011).



Resim 3.2. Kıç harmonik filtrede ve ana kumanda pano odasındaki su (MAIB, 2011)

Mürettebat, arkadaki MSB odasının dışında bulunan manuel kapatma musluğunu kullanarak Hi-Fog (Yangın söndürme sistemi) su kaynağını kapatmaya çalışmıştır ama zorlamadan dolayı sapı koptuğu için başarısız olmuştur. Hi-Fog sistemi daha sonra merkezi kontrol istasyonundan kapatılmış ve 04:52'de tahliye fanları dumanı temizlemeye başlamıştır. 04:55'te üç dizel jeneratör başlatılmış ve ön MSB'ye bağlanmış kıç MSB'si, iki kumanda panosu arasındaki devre kesicilerin bağlantısının kesilmesi ile izole edilmiştir. 05:23'e kadar QM2, 2 ve 4 numaralı pod tahrik motorlarını kullanarak yola devam etmiş ve 09:00'dan önce Barselona'da rıhtıma yanaşmıştır.

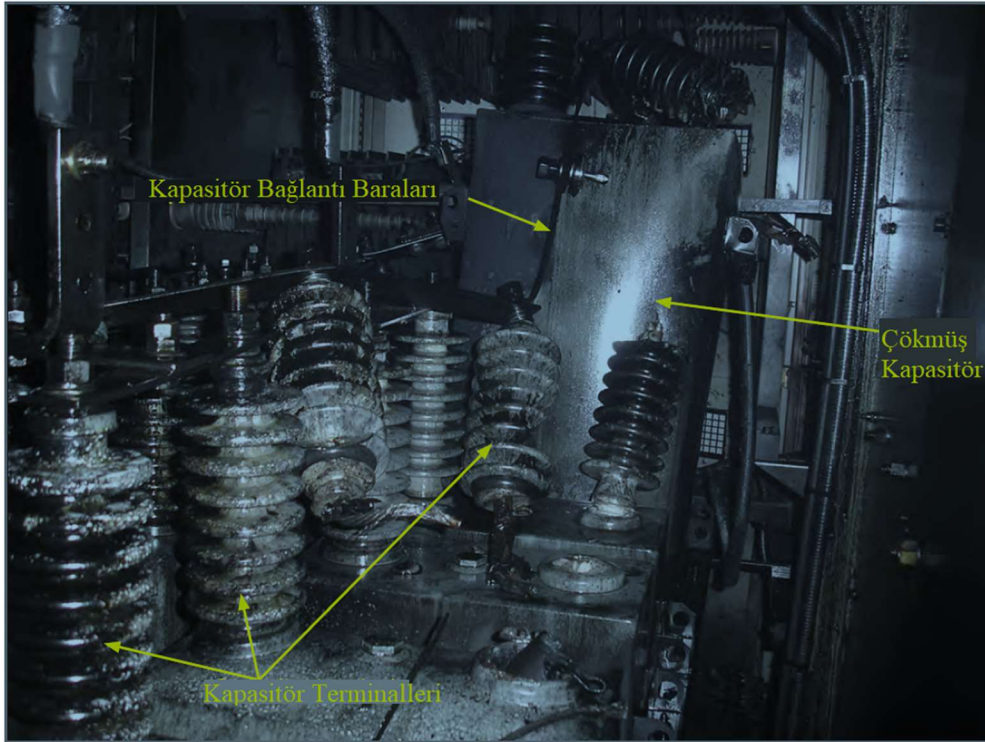
Harmonik filtrelerin ve tahrik sürücüsünün üreticisi olan Converteam ve geminin sınıflandırma topluluğu olan Loyd's Register'ın (LR) Avrupa, Orta Doğu ve Asya temsilcileri, gemi limana alındıktan sonra ayrıntılı bir değerlendirme yapmıştır. MSB ve HF arasındaki devre kesiciyi fiziksel olarak çıkardıktan sonra, arkadaki MSB'yi tekrar devreye sokmanın güvenli olduğu sonucuna varılmıştır. LR, HF sorunu giderilinceye kadar gemiye

hareket etmeme şartı getirmiştir. Gece yarısı civarında gemi Barcelona'dan yola çıkmıştır (MAIB, 2011).

3.3.3. Geminin zararı

K1ç HF odasında büyük hasar meydana gelmiştir ve doğrudan HF odasının yukarısında bulunan altı mürettebat kabinindeki yolcuların çoğu patlama sesini duymuştur. Yolcu kabinlerinde hasar yoktur. K1ç harmonik filtreye ait 11.3 bölmesinde hücrenin her iki tarafındaki panolar kötü şekilde zarar görmüş ve kurumla kaplanmıştır. Bölme 4'ün kabini içindeki panolar da yerinden çıkmıştır. Zemin ve güverte başı kurum ile kaplanmış ve kondansatörlerin altındaki ve muhafazanın üst panelinin içi dahil olmak üzere 11.3 HF bölmesinin üstünde dielektrik yağ bulunmuştur (MAIB, 2011).

Bir kondansatörün normal konumundan yaklaşık 60 cm yukarı kalktığı gözlenmiştir. Alt kapağı dışa doğru bükülmüş ve kaynaklı ek yerinden yanıp sönmüştür. Resim 3.3'de kondansatör kendisini temel cıvatalarından kurtararak içerideki kondansatör elemanlarıyla bağlantıyı koparmıştır.



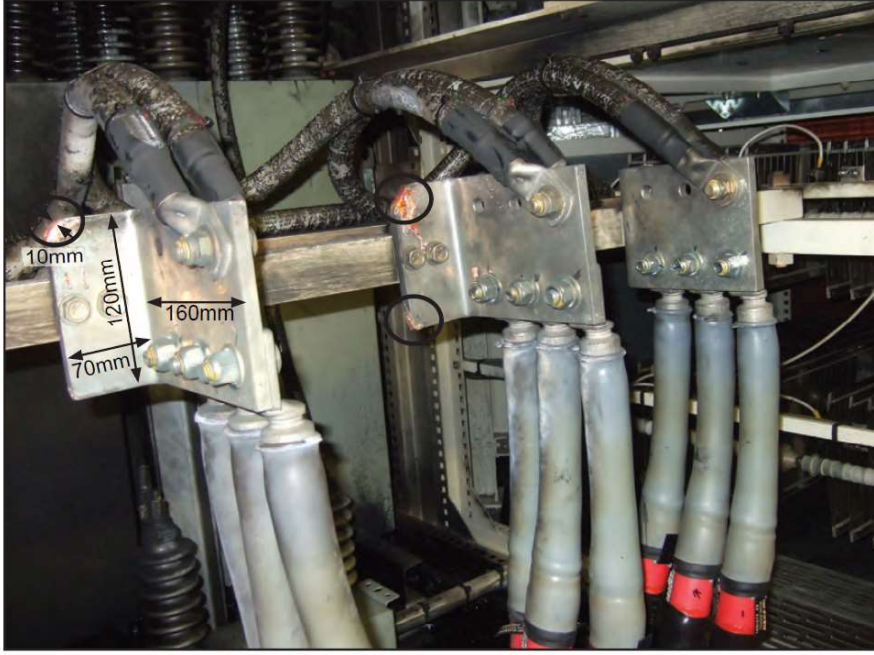
Resim 3.3. Çöken kondansatör (MAIB, 2011)

Resim 3.3'te görüldüğü gibi bozulanla aynı sıradaki tüm kondansatörlerin terminalleri hasar görmüştür.



Resim 3.4. Şişen kondansatörün üstten görünümü (MAIB, 2011)

Resim 3.4'de görüldüğü üzere, başka bir kondansatörün kasasının şiştiği tespit edilmiştir (MAIB, 2011). Bölmeye açılan özel dayanımlı çelik kapı kendi çerçevesinden dışarıya doğru zorlanmış bulunmuş ve MSB odasının bitişiğindeki çelik kapı ise eğilmiş ve ayrılmıştır. K1ç MSB odasının iç girişinde bulunan ve patlama bölgesinin yaklaşık 20 metre uzağında bulunan çelik kapı menteşelerinden dışarıya zorlanmıştır. Kompartıman bölmesindeki sertleştiriciler bükülmüş, HF ve MSB odaları arasındaki çapraz taşıma kanalı üzerindeki çelik kapak plakası MSB odasına doğru eğilmiştir.



Resim 3.5. Harmonik filtre baraları üzerindeki arklar (MAIB, 2011)

Resim 3.5’de görüldüğü üzere, K1ç HF’yi besleyen üç yüksek gerilim barasının köşeleri erimiştir. Arızalı kondansatörden yaklaşık 2 m uzakta bulunan bir yangın söndürücü üzerindeki polietilen örtü yanmış olarak bulunmuştur (MAIB, 2011).

Simülasyonda, Queen Mary 2 adlı yolcu gemisinin 23 Eylül 2010 tarihinde yaşadığı kazadaki muhtemel güç kalite bozuklukları, bir dökme yük gemisi üzerinde uygulanmıştır. QM2’de ana tahrik motorları, bir tanesi 16.8 MW gücünde olan 4 adet dizel jeneratörden ve bir tanesi 25 MW gücünde olan 2 adet gaz jeneratöründe üretilen elektrik enerjisiyle tahrik olmaktadır. Toplamda 4 tane olan ana tahrik motorlarının bir tanesinin gücü 21.5 MW’tır.

3.4. Yöntem

Bu çalışmada gemilerde elektrik güç kalitesi kavramını açıklayabilmek için gemi kaza raporlarından detaylı bilgilerine ulaşılan bir gemi kazası sırasında meydana gelmiş olması muhtemel güç kalitesi problemleri, benzetim ve modelleme yapılarak elektrik tahrikle yol aldığı varsayılan bir dökme yük gemisi üzerinde değerlendirilmiştir. Gemideki harmonik bozukluk güç kalite bozukluğunu iyileştirmek için ve simülasyonunu (benzetimini) yapmak için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Terriche ve diğerleri (2021) çalışmalarında gemilerdeki harmonik bozulumu azaltmak için tristör anahtarlamalı kondansatörler, sabit

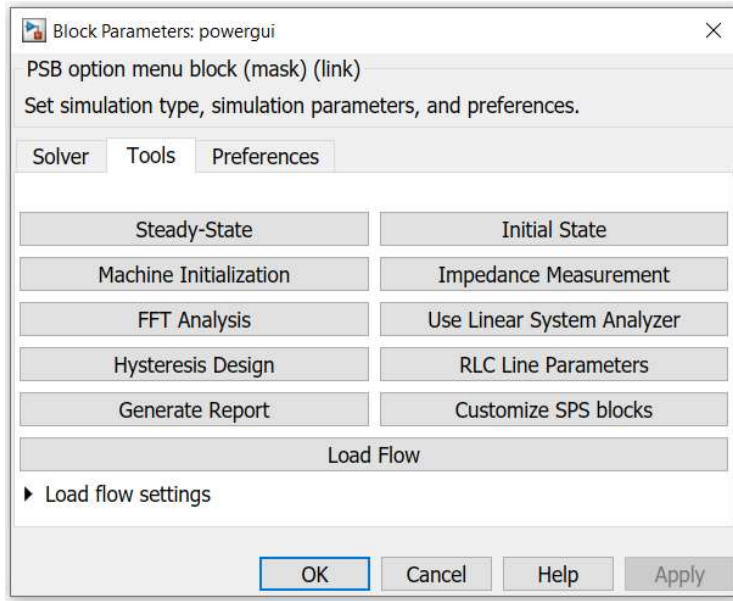
kondansatörler ve tristör kontrollü reaktörler kullanmış ve MATLAB Simulink ile simülasyonunu yapmışlar, Semin ve Zaman (2018) tanker gemisindeki harmonik bozukluğu bastırmak için pasif filtre kullanmış ve ETAP yazılımı ile simülasyonunu yapmışlar, Terriche ve diğerleri (2020) gemilerdeki harmonik bozukluğu azaltmak için pasif filtreler kullanmış ve MATLAB Simulink ile simülasyonunu yapmışlar, Abdollahi (2019) ise çok darbeli doğrultucu kullanarak harmonik bozukluğu azaltmış ve MATLAB Simulink ile simülasyonunu yapmıştır. Çalışmamıza konu olan dökme yük gemisinde ise harmonik güç bozukluğunu bastırmak için sabit kapasitelerde pasif filtreler kullanılmış ve MATLAB Simulink programı ile simülasyonu yapılmıştır.

Çalışmada pasif filtrelerin devrede olduğu ve olmadığı durumlardaki harmonik dağılımı gözlemlemek için kullanılan MATLAB (Matrix Laboratory) mühendislik ve bilimsel hesaplar için nümerik hesaplama programıdır. MATLAB, bilimsel hesaplama için güçlü, kapsamlı ve kullanımı kolay bir ortamdır. Sayısal hesaplamaları ve görselleştirmeleri bütünleştirerek, mühendislere, araştırmacılara ve bilim adamlarına etkileşimli bir sistem sunar. MATLAB Simulink ise, MATLAB'da bulunan zaman tabanlı bir yazılım paketidir ve görevi Adi Diferansiyel Denklemleri sayısal olarak çözmektir (Radi ve Elhami, 2018; Al-Greer ve Giaouris, 2020).

Çalışmaya konu olan ve konvansiyonel dizel motorla yol alan dökme yük gemisinin, emisyonlarının az olması ve enerji verimliliği nedeniyle son yıllarda giderek yaygınlaşan elektrikli tahrik sistemiyle seyir ettiği varsayılmıştır. Elektrikli tahrikli dökme yük gemisinde ana makine ile ilgili aşağıdaki tüketicilerin yükleri toplam yük hesabına katılmayarak yaklaşık toplam yük bulunmuştur:

- Ana deniz suyu soğutma pompası,
- Ana makine ceket suyu sirkülasyon pompası,
- Ana makine fuel oil besleme pompası,
- F.O. sirkülasyon pompası,
- Kazan besleme suyu pompası,
- Ana makine no1 ve no2 blower,
- Ana makine silindir yağı pompası,
- Yağlama yağı pompası.

Dökme yük gemisinin elektrik projelerinde mevcut olan tüm tüketicilerin toplam yük hesabından, yukarıda ana makine ile ilgili olan yükler çıkartılmış ve simülasyon tasarımında diğer yükler olarak adlandırılmıştır. Bu çalışmada, dökme yük gemisinin yol almak için kullandığı dizel motor tahrikli ana makine yerine 4 adet elektrik tahrik motoru ile yol aldığı varsayılmış ve ana makinenin gücü 4 adet elektrik tahrikli motora dağıtılmıştır. Yapılan simülasyonda harmonik üreten en temel ekipmanların elektrik tahrik motorlarını besleyen gerilim kaynağı inverterleri olduğu değerlendirilerek, kapsamlı bir sistem olan gemi elektrik sistemindeki diğer harmonik kaynaklarının simülasyona etkisi ihmal edilmiştir.



Şekil 3.3. MATLAB FFT analiz penceresi

MATLAB programının şekil 3.3'te görülen powergui penceresinden açılan *FFT Analysis* özelliği ile simulink kısmında anabarıdan ölçülen gerilim ve akım değerleri, Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform-FFT) analizi yöntemiyle bileşenlerine ayrılmış ve farklı frekans seviyelerinde sinüzoidal dalgadan ne kadar saptığı harmonikler olarak ortaya konulmuştur. Daha sonra belirlenmiş harmonik seviyelerine göre filtre kapasiteleri belirlenmiş ve filtreler devreye alındıktan sonraki harmonik spektrum gözlemlenmiştir. Filtresiz ve filtreli olarak sistemin simüle edilmesindeki amaç yaşanmış gemi kazası sırasında gemi elektrik sistemi davranışlarını incelerken elektrik güç kalitesi ekipmanlarının ve onların periyodik bakımlarının önemini ortaya koymaktır. Simulasyonda kaza sırasında patlamış kondansatörlerden dolayı meydana gelmiş olduğu varsayılan kısa devre sonucu oluşan gerilim yükselmesi ve düşmesi olayları da arıza bloğu kullanılarak simüle edilmiş ve

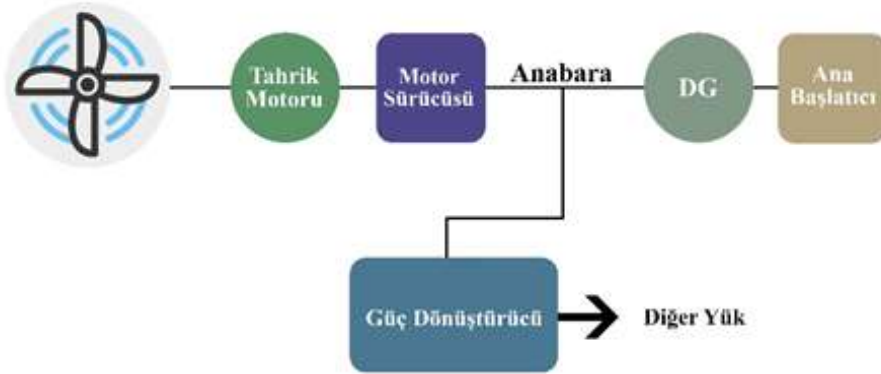
bu sayede farklı tip güç kalite bozukluklarının da incelemesi yapılmıştır. Simulasyon sonuçlarında gemideki elektrik güç kalitesini sağlamak için kullanılan elektriksel güç kalite ekipmanlarının devre dışı kaldığı durumda güç kalitesinin düştüğü görüldüğünden enerji verimliliği için ve kazalara mahal vermemek adına gemideki elektriksel ekipmanların periyodik kontrol ve bakımlarının hassasiyetle takip edilmesinin gerekliliği anlaşılmıştır.

4. MODEL

Bu bölümde, harmonik filtrelerdeki patlamalardan kaynaklı yaşanan yolcu gemisi kazası sırasında meydana gelmiş olması muhtemel güç kalite bozukluklarından olan harmonik bozukluk, gerilim düşmesi ve gerilim yükselmesinin bir dökme yük gemisi üzerinde MATLAB Simulink programında benzetimi yapılarak modeli oluşturulmuş, bu modelin analizi ve hassasiyet analizi yapılmıştır.

4.1. Simulink Modeli

3. bölümde bir dökme yük gemisine ait elektrik güç panoları, panolara bağlı önemli elektrik tüketicilerinden bahsedilmiştir. Normalde tahrik sistemi geleneksel mekanik dizel motor olan bu dökme yük gemisinde 3 adet ana ve 1 adet acil durum jeneratörü olmak üzere 4 adet jeneratör bulunmaktadır. Ancak elektrik güç sistem kalitesi incelenirken, dökme yük gemisinin, dünya genelinde kara taşıtlarında olduğu gibi, deniz taşıtlarında da ciddi bir eğilim gelişim/dönüşüm içinde olan elektrik motoruyla tahrik edildiği varsayılarak, Queen Mary 2 adlı yolcu gemisinin 23 Eylül 2010 tarihinde yaşadığı kaza üzerinde durulmuştur.



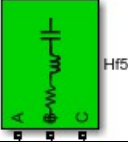
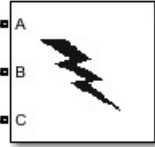
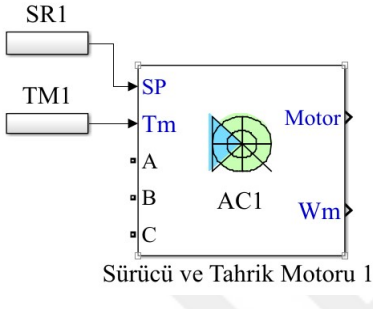
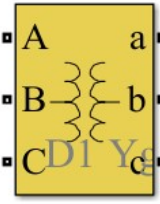

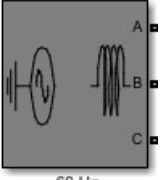
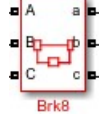
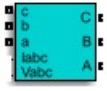
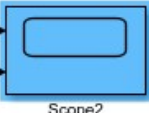
Şekil 4.1. Elektrikli gemi tahrik sistemi

Normalde fazdan faza 440V'lık alternatif akımlı ana baraya sahip dökme yük gemisinin, yapılacak simülasyonda 11000 V'lık ana baraya sahip olacak şekilde 6 adet jeneratörden oluştuğu kabul edilecektir. Mekanik tahrikli olarak yol alan dökme yük gemisinin ana makinasının gücü 18.5 MW gücünde olduğundan, güçlerin yakın olması için elektrikli tahrikli olarak dizayn edilen dökme yük gemisinin 5 MVA gücünde olan 4 adet podded tip elektrikli tahrikli motorla yol aldığı varsayılmıştır. Jeneratörlerden 2 tanesi geminin kıç

kısımında bulunmakta olan ve 12 MW güç üretim kapasitesine sahip gaz jeneratörleridir. Jeneratörlerden 4 tanesi ise geminin ön kısmında bulunan ve 10 MW güç üretim kapasitesine dizel jeneratörlerdir. Dizel ve gaz jeneratörleri her ne kadar ayrı kısımlarda bulunsalar da istenildiği zaman ACB'ler (hava devre kesici-air circuit breaker) kapalı konuma getirilerek ana bara üzerinden birbirlerine paralel olarak çalışabilmektedirler. Bu elektrik motorları önlerindeki, VFD'ler yardımıyla sürülmekte ve kontrolü sağlanmaktadır. 11 kV ana bara hattına sahip gemide, 1510 Volt ile beslenen elektrik tahrik motor sürücüsünün önünde 11/1,51 kV gerilim indirimi yapan trafo mevcuttur.

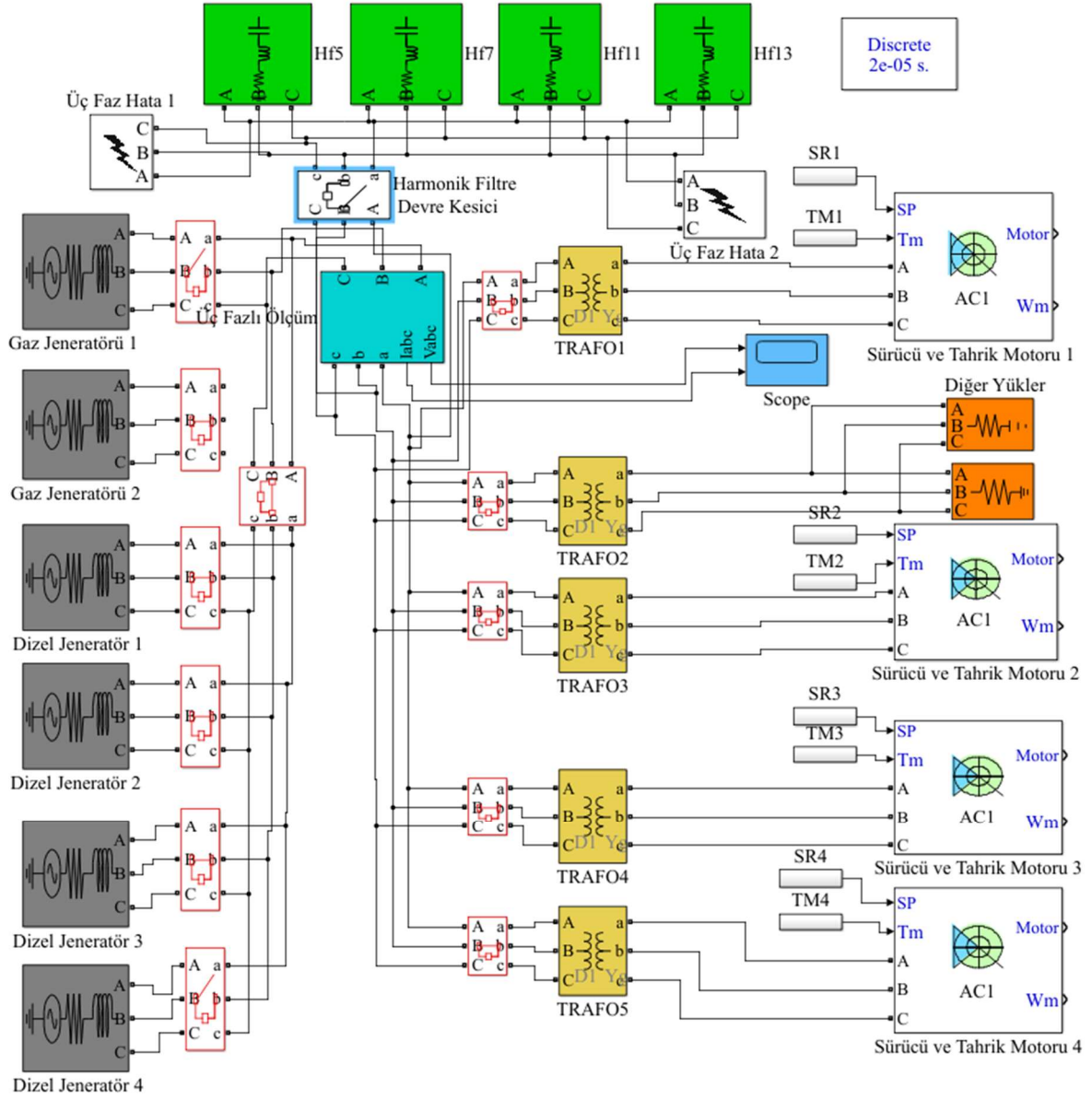
Queen Mary 2 gemisinde meydana gelen kaza incelenmesinde şimdiye kadar anlatılan güç kalite bozukluklarından harmonik bozukluk, gerilim yükselmesi ve gerilim düşmesinin simülasyonu yapılacaktır. Simulink modelinde kullanılan ekipmanlar ve açıklamaları Çizelge 4.1'de görülmektedir.

Çizelge 4.1. Simülasyonda kullanılan bloklar

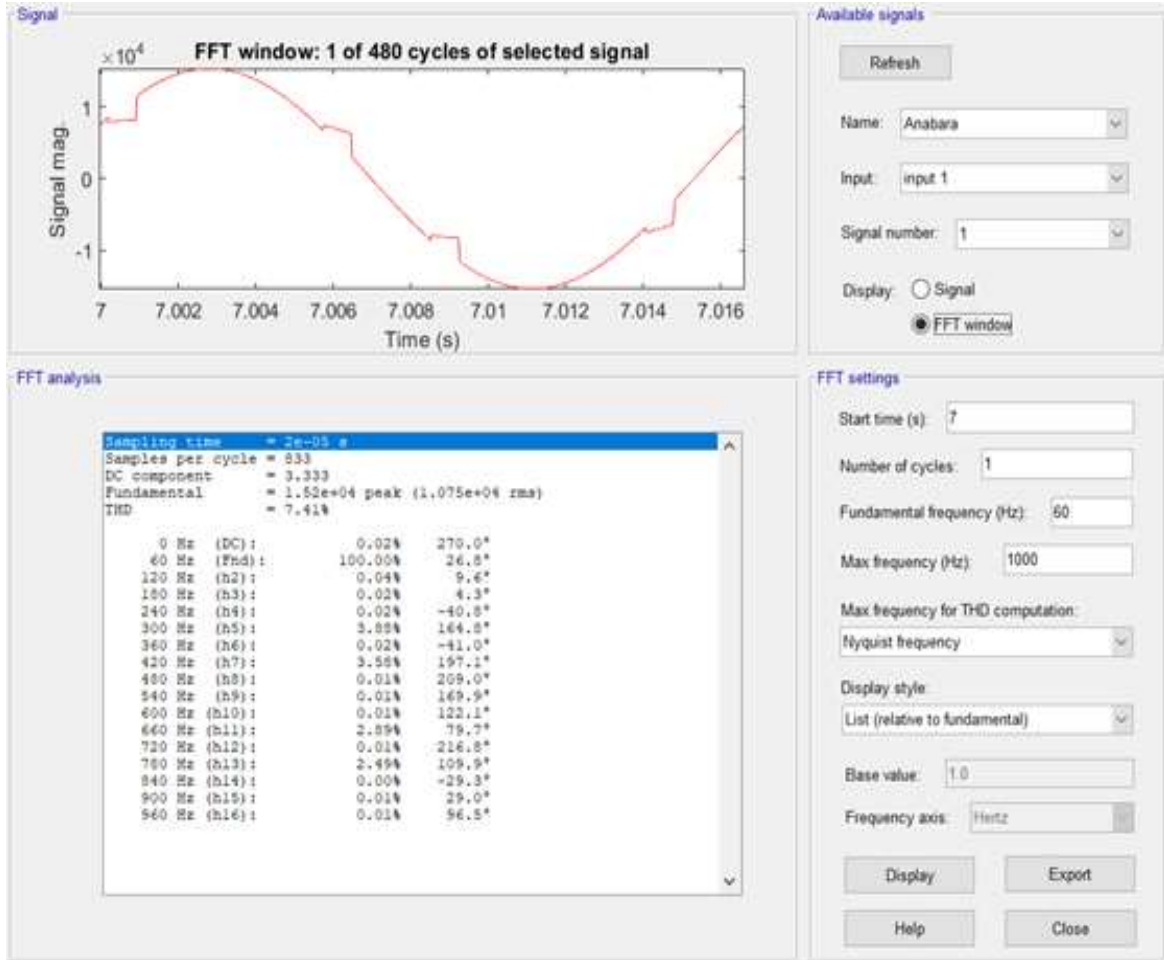
	Harmonik Filtre
	Arıza/Hata Bloğu
 <p>Sürücü ve Tahrik Motoru 1</p>	Sürücü ve Tahrik Motoru
 <p>TRAFO1</p>	Transformatör (trafo)
	Geminin Dahili Yüğü
 <p>60 Hz GTG1</p>	Jeneratör
 <p>Brk8</p>	Devre Kesici
	Üç faz Gerilim Akım Ölçümü
 <p>Scope2</p>	Gösterge (Scope)

Çizelge 4.1'deki ekipmanlardan harmonik filtrelerden 5., 7., 11. ve 13. harmoniği bastırmak üzere 4 adet, filtrelerin patlaması üzerine fazdan faza ve fazdan nötre kısa devre yapmak için arıza/hata bloğundan 2 adet, geminin yol alması için gerekli elektrik tahrik motorundan 4 adet, ana baradaki gerilimi sürücülere ve diğer yüklere iletmeden önce gerilim düşüren trafolardan 5 adet, geminin kalan yükünü temsil eden dahili yük bloğundan paralel ve seri yük olarak 2 adet, geminin elektrik enerji üretiminde kullanılan jeneratörlerden 4 DG ve 2 GTG olarak 6 adet, devre kesicilerden 13 adet, üç faz akım/gerilim ölçüm bloğundan 1 adet ve ölçülen gerekli değerleri görüntülemeye yarayan Scope ekipmanından ise 1 adet kullanılmıştır.

Şekil 4.2.'de gösterilen birinci simülasyonda harmonik filtre kondansatörlerinin patlaması sonucu çıkan yangından dolayı, devre kesicinin açması tasarlanmıştır.

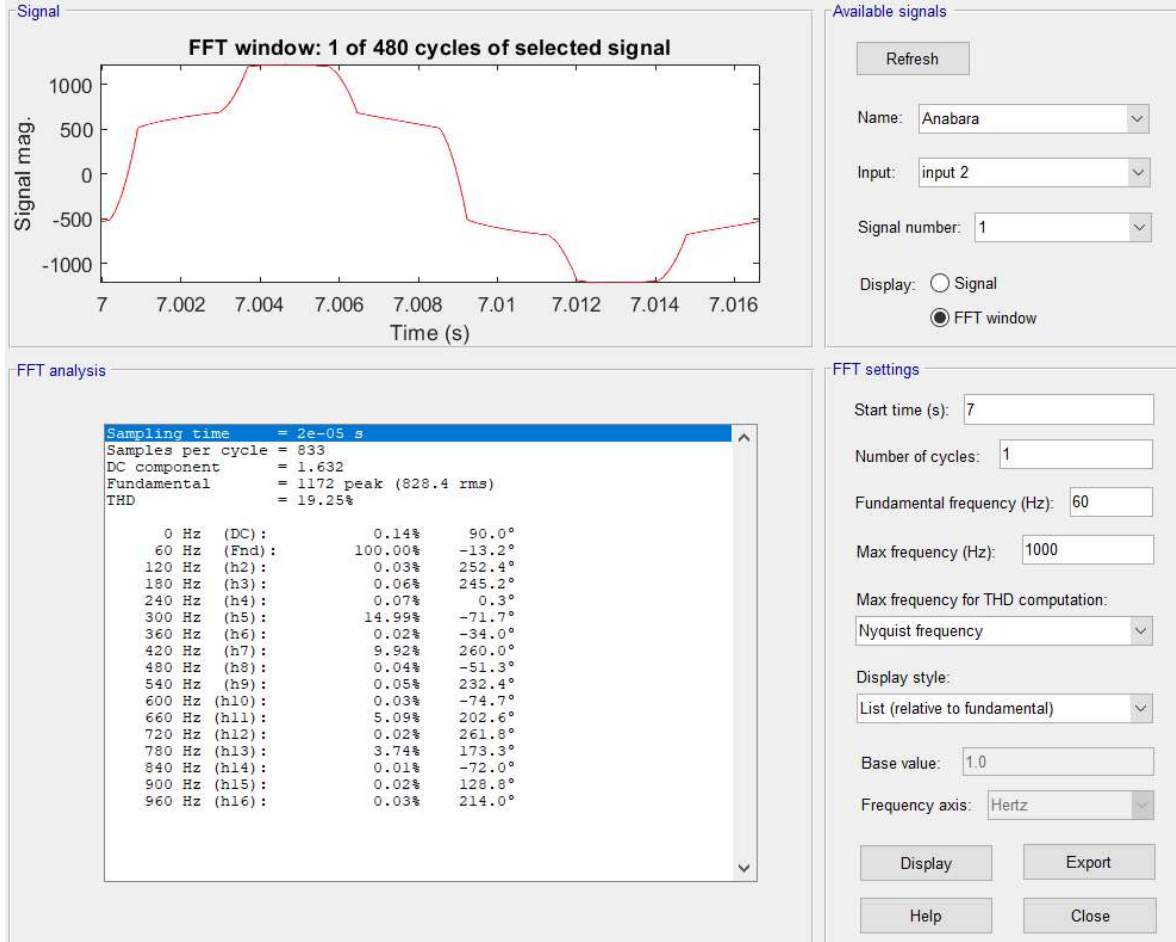


Şekil 4.2. Harmonik filtre devre dışı



Şekil 4.3. Harmonik filtre devre dışıyken toplam gerilim harmonik bozulma

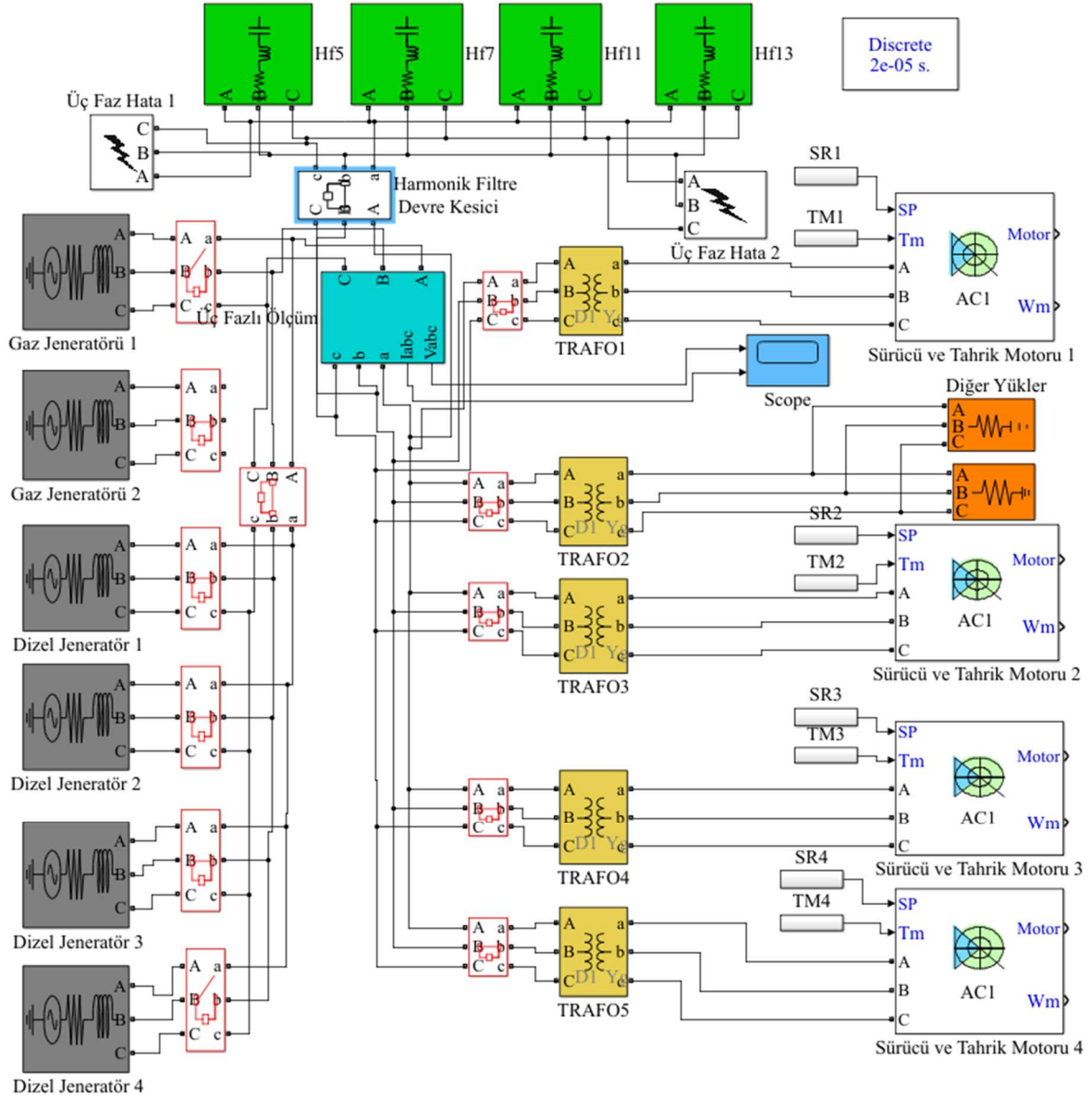
Şekil 4.3'de harmonik filtrenin devre dışı kalması sonucu meydana gelen toplam gerilim harmonik bozulma hesaplatılmıştır ve toplamı %7,41'dir. Discrete analiz bloğunda FFT analiz kısmı açılarak ana bara input 1 kısmı seçilerek gerçekleştirilen bu işlemde fundamental frequency 60 hz olarak seçilmiştir. FFT window seçeneği işaretlenerek, 7. saniyede seçilen sinyalin Fourier dönüşümü görülmektedir. Görüldüğü üzere temel frekans olan 60 hz'de %100 sinyal görüntülenmekte iken sinüzoidal olması istenen sinyali en çok bozan bileşenlerin 5. harmonik seviyesi olan 300 hz'deki %3,88, 7. harmonik seviyesi olan 420 hz'deki %3,58, 11. harmonik seviyesi olan 660 hz'deki %2,89 ve 13. harmonik seviyesi olan 780 hz'deki %2,49 olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4. Harmonik filtre devre dışıyken toplam akım harmonik bozulması

Şekil 4.4’de harmonik filtrenin devre dışı kalması sonucu meydana gelen toplam akım harmonik bozulma hesaplatılmıştır ve toplamı %19,25’tir. Görüldüğü üzere temel frekans olan 60 hz’de %100 sinyal görüntülenmekte iken sinüzoidal olması istenen sinyali en çok bozan bileşenlerin 5. harmonik seviyesi olan 300 hz’deki %14,99, 7. harmonik seviyesi olan 420 hz’deki %9,92, 11. harmonik seviyesi olan 660 hz’deki %5,09 ve 13. harmonik seviyesi olan 780 hz’deki %3,74 olduğu görülmektedir.

Şekil 4.5’da gösterilen ikinci simülasyonda ise harmonik filtrenin devrede olduğu durum tasarlanmıştır.



Şekil 4.5. Harmonik filtre devrede

Şekil 4.5’de birbirine paralel olarak bağlı ve girişleri aynı devre kesiciye bağlı olan 4 adet harmonik filtreyi devreye almak için, devre kesici closed konumuna ayarlanmıştır. Filtresiz durumda 6 darbeleri olarak alınan VFD’nin yarattığı 5., 7., 11. ve 13. harmonikleri bastırmak için pasif filtre tasarımı yapılmıştır. Harmonik filtre kapasite tasarımının yapılması için sistemin genel reaktif güç ihtiyacı belirlenmelidir. Filtreli haliyle güç faktörünü 0,95 değerine çıkarmak için gerekli olan reaktif güç ihtiyacı eşitlik 5.1’e göre aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

Eşitlik 2.31'e göre;

$$Q_c = P \cdot (\tan\phi_1 - \tan\phi_2)$$

$$\Phi_1 = \arccos(0,85) = 31,8^\circ \quad \tan \Phi_1 = 0,62$$

$$\Phi_2 = \arccos(0,95) = 18,2^\circ \quad \tan \Phi_2 = 0,33$$

$$Q_c = \sqrt{3} \cdot 10790 \cdot 846 \cdot 0,85 \cdot (0,62 - 0,33) = 3,9 \text{ MVAr}$$

Q_c hesaplanırken kullanılan akım değeri sistemden ölçülmüş olup, filtresiz sistem incelendiği zaman 5., 7., 11. ve 13. harmonikler öne çıkmaktadır. Dolayısıyla bu harmoniklerin bastırılması gerekmektedir.

Eşitlik 2.32'ye göre;

$$X_c = 11^2 / 3,9 = 31,03 \text{ Ohm}$$

5. harmonik için filtre hesabı aşağıdaki gibidir;

Eşitlik 2.33'e göre;

$$X_L = 31,03 / 5^2 = 1,24 \text{ Ohm}$$

Karakteristik reaktans eşitlik 2.34'e göre;

$$X_n = \sqrt{31,03 \cdot 1,24} = 6,2 \text{ Ohm}$$

Kalite faktörü $Q=100$ seçildiği zaman eşitlik 2.35'e göre;

$$R = 6,2 / 100 = 0,062 \text{ Ohm}$$

Filtre kapasitesi ise eşitlik 2.36'ya göre;

$$Q_f = 3,9 \cdot 5^2 / (5^2 - 1) = 4,09 \text{ MVAr}$$

7. harmonik için filtre hesabı aşağıdaki gibidir;

Eşitlik 2.33'e göre;

$$X_L = 31,03 / 7^2 = 0,63 \text{ Ohm}$$

Karakteristik reaktans eşitlik 2.34'e göre;

$$X_n = \sqrt{31,03 \cdot 0,63} = 4,42 \text{ Ohm}$$

Kalite faktörü $Q=100$ seçildiği zaman eşitlik 2.35'e göre;

$$R = 4,42 / 100 = 0,0442 \text{ Ohm}$$

Filtre kapasitesi ise eşitlik 2.36'ya göre;

$$Q_f = 3,9 \cdot 7^2 / (7^2 - 1) = 3,98 \text{ MVAr}$$

11. harmonik için filtre hesabı aşağıdaki gibidir;

Eşitlik 2.33'e göre;

$$X_L = 31,03 / 11^2 = 0,26 \text{ Ohm}$$

Karakteristik reaktans eşitlik 2.34'e göre;

$$X_n = \sqrt{31,03 \cdot 0,26} = 2,84 \text{ Ohm}$$

Kalite faktörü $Q=100$ seçildiği zaman eşitlik 2.35'e göre;

$$R=2,84/100=0,0284 \text{ Ohm}$$

Filtre kapasitesi ise eşitlik 2.36'ya göre;

$$Q_f=3,9.11^2/(11^2-1)=3,93 \text{ MVAr}$$

13. harmonik için filtre hesabı aşağıdaki gibidir;

Eşitlik 2.33'e göre;

$$X_L=31,03/13^2=0,18 \text{ Ohm}$$

Karakteristik reaktans eşitlik 2.34'e göre;

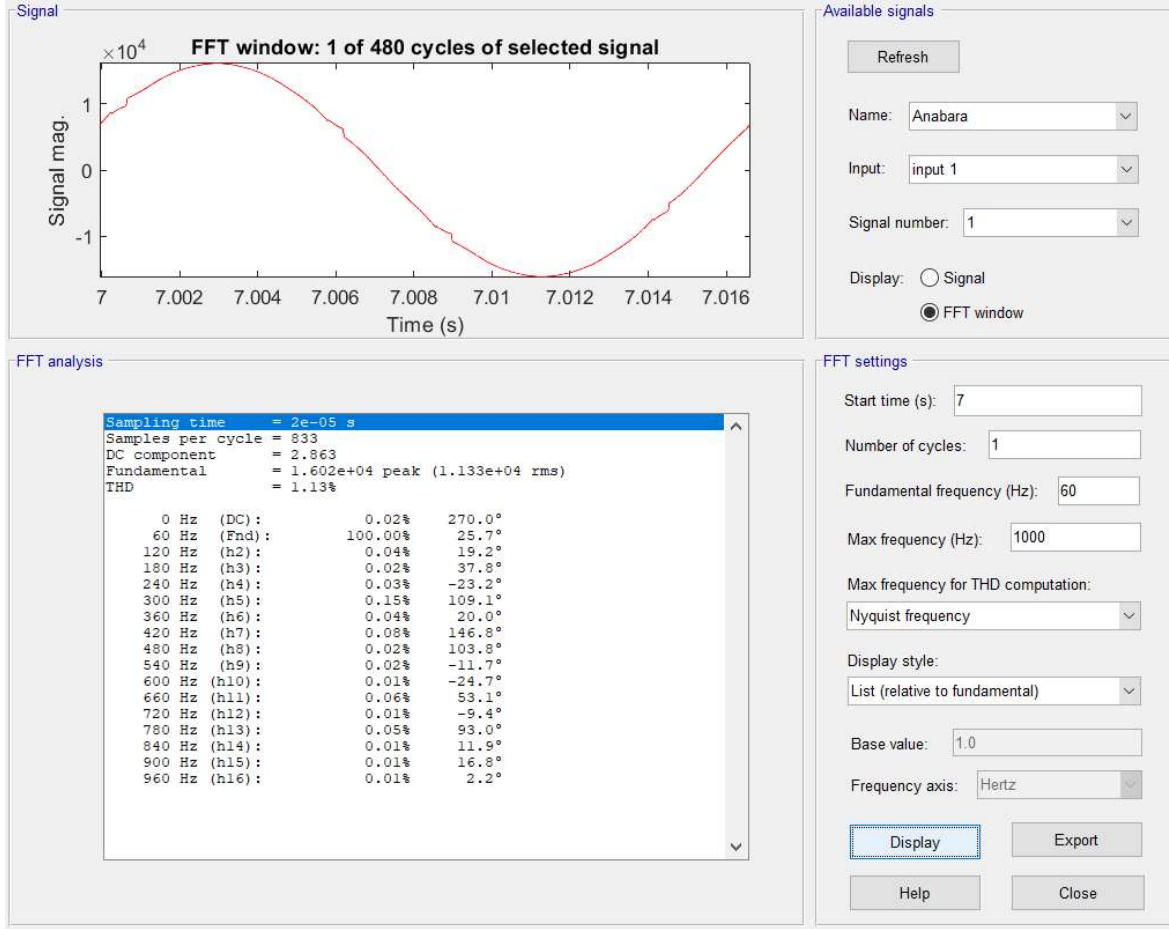
$$X_n=\sqrt{31,03.0,18}=2,36 \text{ Ohm}$$

Kalite faktörü $Q=100$ seçildiği zaman eşitlik 2.35'e göre;

$$R=2,36/100=0,0236 \text{ Ohm}$$

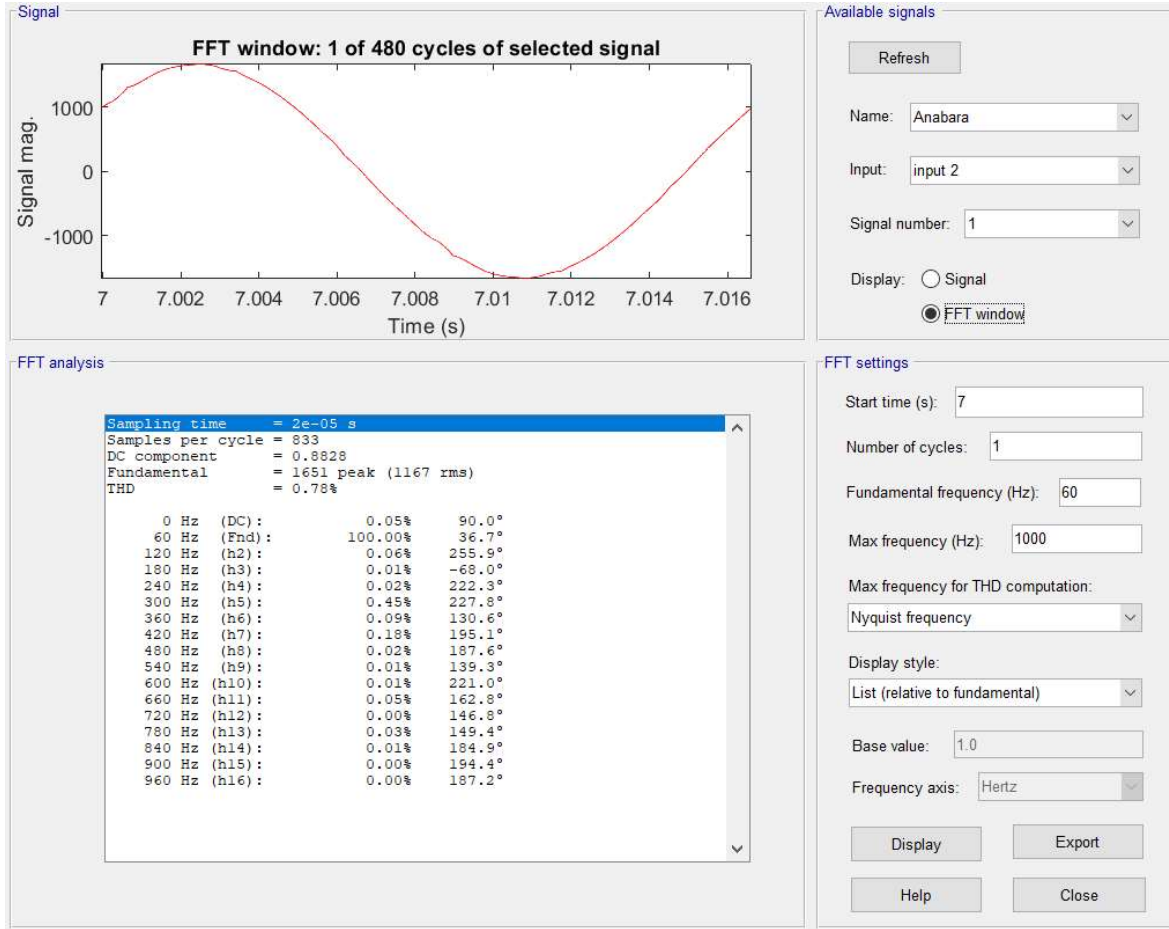
Filtre kapasitesi ise eşitlik 2.36'ya göre;

$$Q_f=3,9.13^2/(13^2-1)=3,92 \text{ MVAr}$$



Şekil 4.6. Harmonik filtre devredeyken toplam gerilim harmonik bozulma

Şekil 4.6'da yukarıdaki hesaplara göre tasarlanan harmonik filtreler 4 MVar olarak seçilerek devredeyken toplam gerilim harmonik bozulma hesaplatılmıştır ve toplamı %1,13'tür. Görüldüğü üzere temel frekans olan 60 hz'de %100 sinyal görüntülenmekte iken 5. harmonik seviyesi olan 300 hz'deki %0,15, 7. harmonik seviyesi olan 420 hz'deki %0,08, 11. harmonik seviyesi olan 660 hz'deki %0,06 ve 13. harmonik seviyesi olan 780 hz'deki %0,05 olduğu görülmektedir.

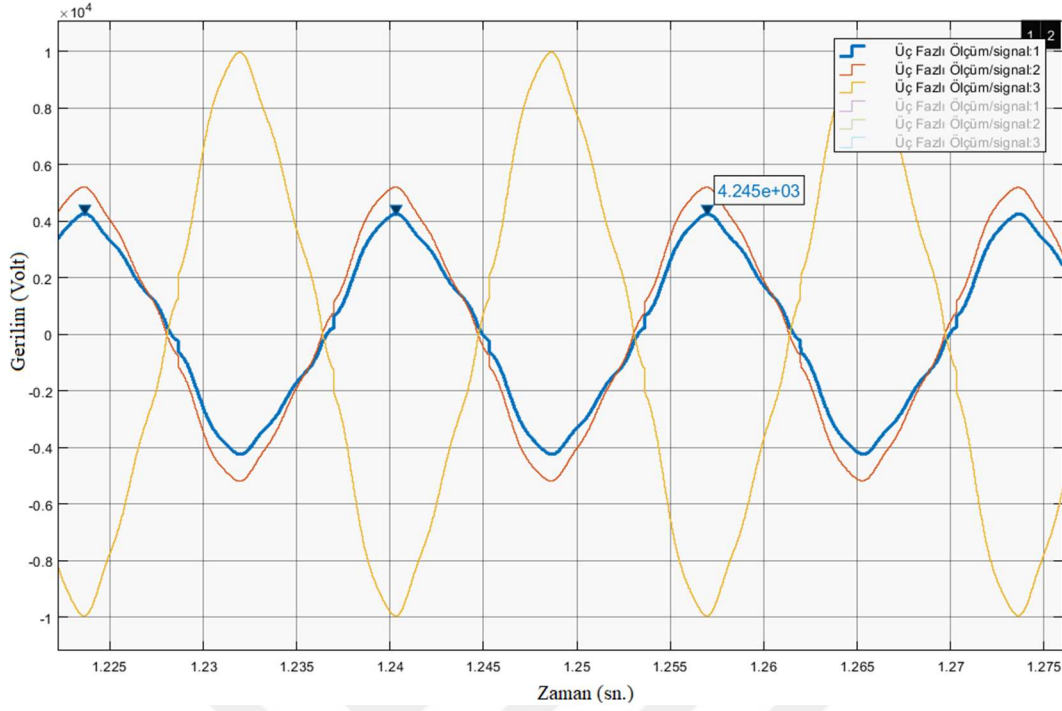


Şekil 4.7. Harmonik filtre devredeyken toplam akım harmonik bozulma

Şekil 4.7’de harmonik filtre devredeyken toplam akım harmonik bozulma hesaplatılmıştır ve toplamı %0.78’dir. Görüldüğü üzere temel frekans olan 60 hz’de %100 sinyal görüntülenmekte iken 5. harmonik seviyesi olan 300 hz’deki %0,45, 7. harmonik seviyesi olan 420 hz’deki %0,18, 11. harmonik seviyesi olan 660 hz’deki %0,05 ve 13. harmonik seviyesi olan 780 hz’deki %0,03 olduğu görülmektedir.

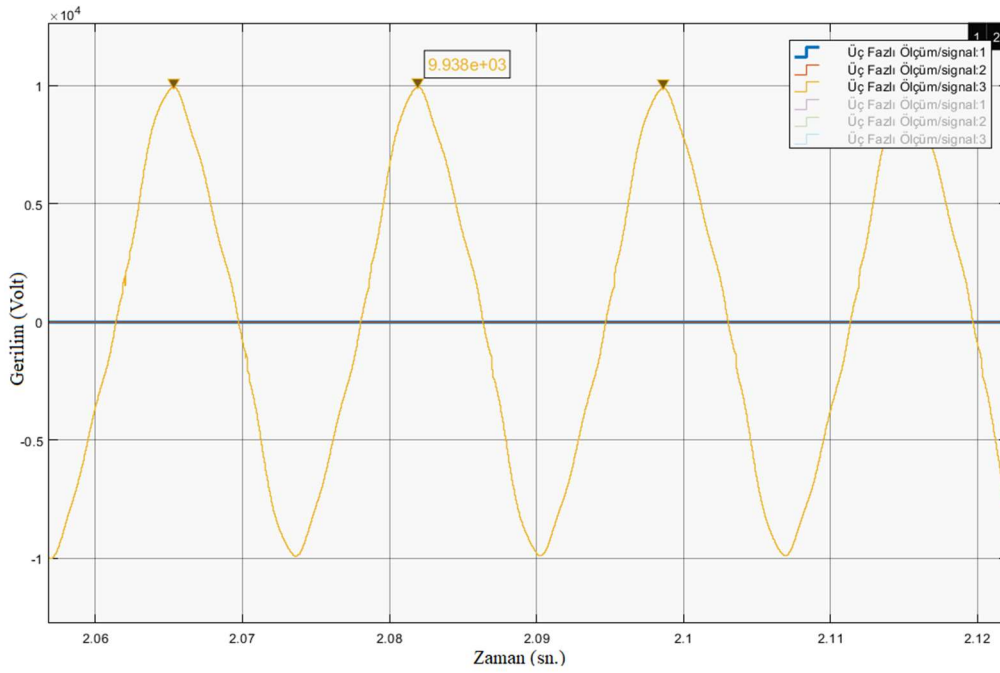
Hesaba göre yapılan harmonik bozukluk filtreleme işlemi sayesinde, harmonik seviyeleri %5’in altına düşerek makul seviyelere çekilmiştir.

Güç kalitesi problemlerinden olan harmonik bozukluğa ek olarak, kaza sırasında kondansatör patlaması ve akması sonucu olmuş olması muhtemel gerilim yükselmesi ve düşmesi olayları, iki adet faz-faz /faz-nötr üç faz kısa devre hatası bloğu kullanılarak simüle edilmiştir.



Şekil 4.8. Gerilim düşmesi

Şekil 4.8’de görüldüğü üzere, 1 ve 1,5 saniyeleri arası iki faz birbirine kısa devre olmuş ve normalde faz-toprak gerilim RMS yaklaşık 6358 V’dan, kısa devre olan fazlarda 3010 V seviyelerine düşerek gerilim düşmesi oluşmuştur.



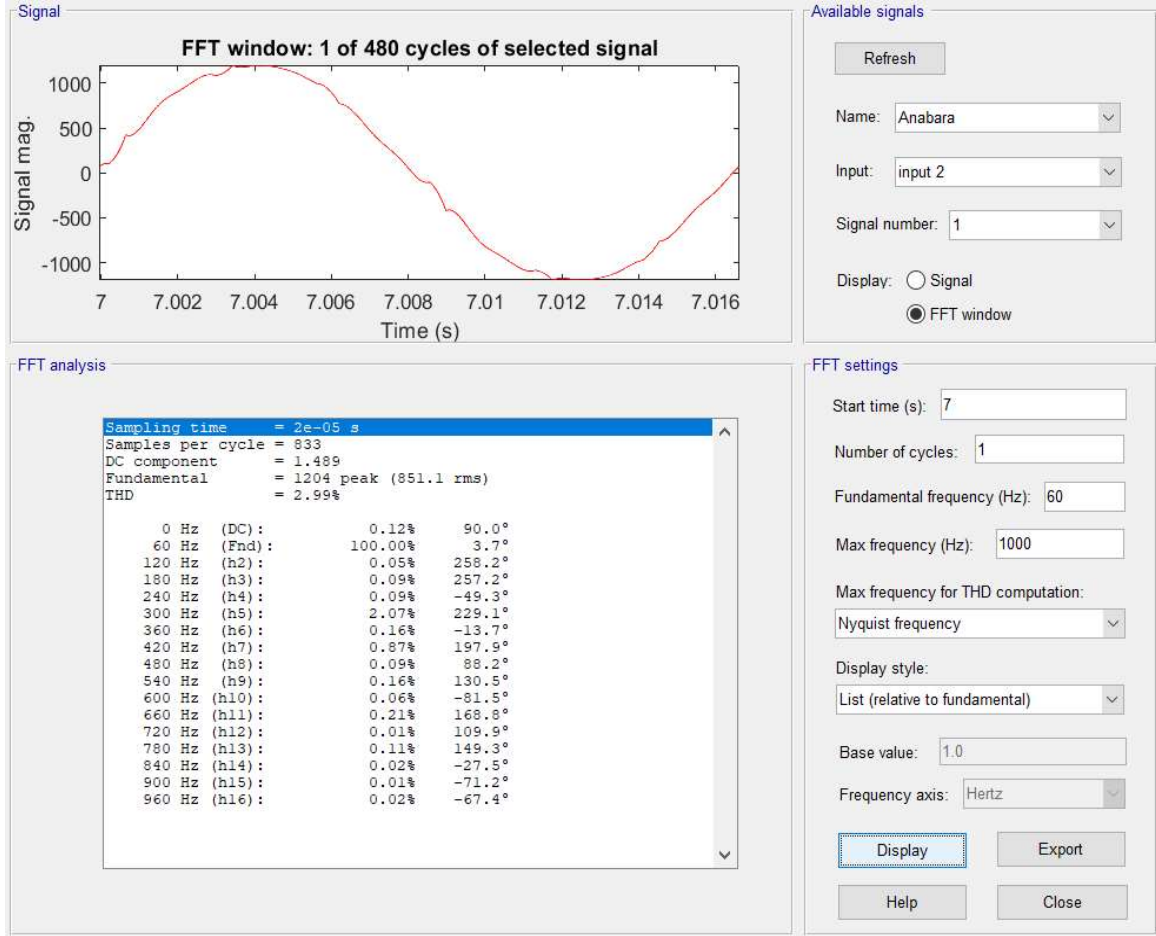
Şekil 4.9. Gerilim yükselmesi

Şekil 4.9'da görüldüğü üzere, 2 ve 2,5 saniye arasında ise iki fazdan toprağa kısa devre olması sonucu, üçüncü fazdaki gerilim RMS 6358 V'dan yaklaşık 7048 V seviyelerine çıkmış ve gerilim yükselmesi meydana gelmiştir.

4.2. Hassasiyet Analizi

Bu tez çalışmasında, normalde fazdan faza 440V'lık alternatif akımlı ana baraya sahip dökme yük gemisinin, 11000 V'lık alternatif akımlı ana baradan beslenecek şekilde, 6 adet jeneratör ve 4 adet pod tipi elektrik tahrik motorundan oluştuğu kabul edildikten sonra, Simulink programında harmonik filtrelerde çıkan yangından dolayı devre dışı kaldığı durumun benzetimi yapılmıştır.

Bahse konu model öncelikle filtresiz olarak dizayn edilmiş ve bu durumda kaza yapan QM2 gemisinde de olduğu üzere yüksek derecede harmonik seviyelere sahip olduğu görülmüştür. Tasarlanan elektrik tahrik motorlu dökme yük gemisinin filtreler devre dışı iken yüksek derecede harmonik üretme model davranışının kazaya maruz kalan Queen Mary 2 gemisinin harmonik filtresiz çalıştığı durumla yakın olduğu belirtilebilmektedir. Simülasyon modelinin davranışını gözlemlemek için farklı kapasitelerdeki filtreler karşı tepkisi ölçülmüştür.



Şekil 4.10. Küçük kapasitedeki filtrenin toplam akım bozulması

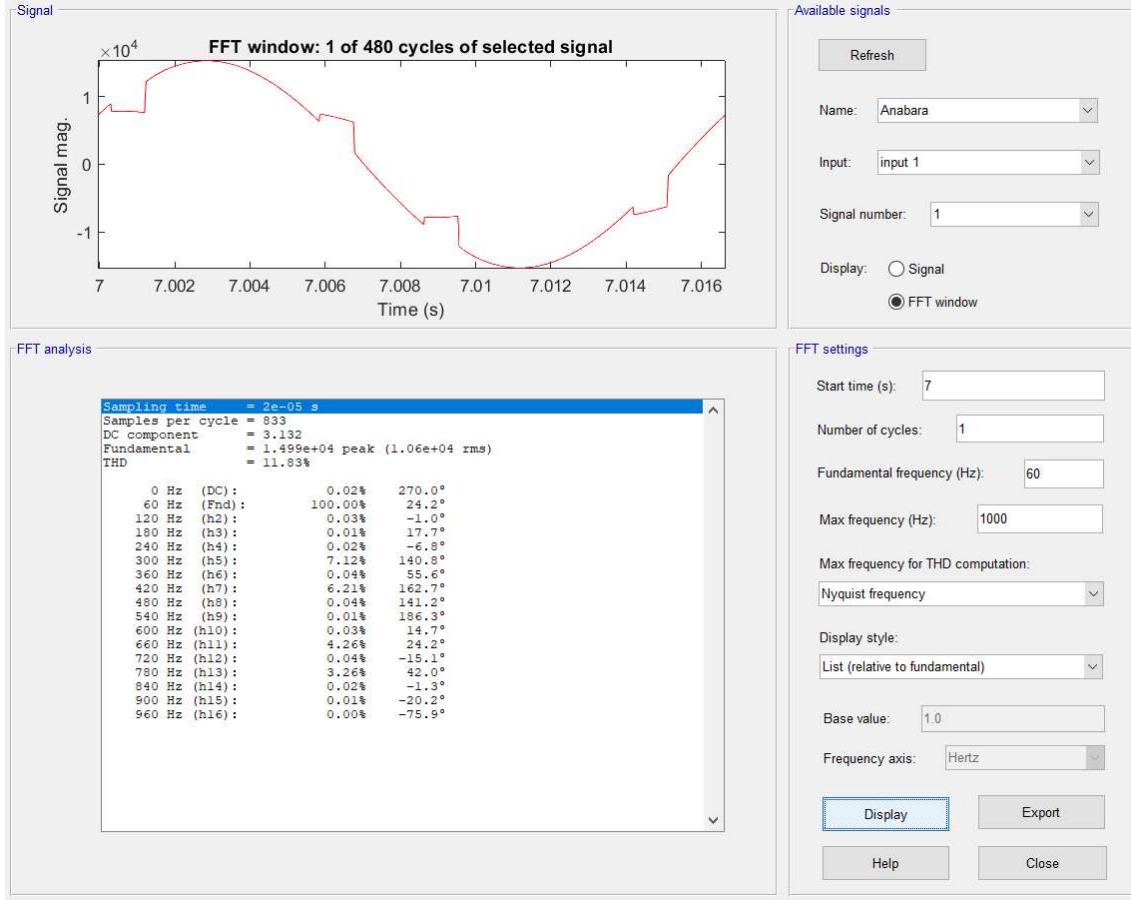
Şekil 4.10'da her biri 1 MVAR seviyelerinde olarak 4 adet harmonik filtre kullanılarak yeniden FFT ile harmonik dağılım hesaplatılmıştır.

Çizelge 4.2. Farklı kapasitedeki filtrelerin kıyaslaması

	Sürücü darbe sayısı	Oluşan darbe sayısı	Yoğunluk Beklenen harmonik seviyeleri	Yoğunluk oluşan harmonik seviyeleri	h5	h7	h11	h13
Filtresiz Durum	6	6	5,7,11,13	5,7,11,13	14,99	9,92	5,09	3,74
Büyük kapasiteli filtre	6	6	5,7,11,13	5,7,11,13	0,45	0,18	0,05	0,03
Küçük kapasiteli filtre	6	6	5,7,11,13	5,7,11,13	2,07	0,87	0,21	0,11

Çizelge 4.2’de simülasyon modelindeki filtrelemenin analizi yapılmaktadır. Daha önce simülasyon sonuçları elde edilen şekil 4.4’deki filtresiz akım harmonik dağılımı, şekil 4.7’deki filtreli akım harmonik dağılımı ve şekil 4.10’daki küçük kapasiteli filtre akım harmonik dağılımı çizelgeye işlenmiştir. Buna göre 6 darbeleri gerilim kaynağı inverteri kullanıldığı durumda, FFT yöntemiyle yapılan analize göre beklendiği gibi 6 darbeleri dalga biçimi oluşmuştur. Harmonik bozunum için $n \pm 1$ (n =darbe sayısı ve katları) durumuna göre 5., 7., 11. ve 13. harmonik seviyelerinde bozunumun yoğunlaşması beklenmektedir. Çizelge 4.2’de 5., 7., 11. ve 13. harmonik seviyelerindeki bozunum görülmektedir. Son olarak, öncelikle çizelgedeki her harmonik seviye için 4 MVAR’lık filtre kullanılarak harmonikler makul seviyelere çekilmiş, daha sonra ise daha küçük kapasiteli filtre kullanılarak harmonik dağılımı hesaplatılmıştır. Filtre modelinde beklendiği üzere kapasite azaldıkça harmonik dağılımı artmıştır.

Simülasyonlarda, 5., 7., 11. ve 13. harmonikler için tasarlanan pasif filtreler sisteme dahil edildikten sonra, ilgili derecelerdeki harmonik bileşenler önemli derecede bastırılmıştır. Quenn Mary 2 gemisinde de aynı şekilde filtreli durumda THD ve yük harmonik seviyeleri düşük olacaktır.



Şekil 4.11. Kaynak endüktansı artınca gerilim harmoniği

Şekil 4.11’de güç kaynağı reaktansı yükseltildikten sonra ölçülen gerilim harmonik dağılımı gösterilmektedir. Reaktans yükseltilmeden önceki toplam gerilim harmoniği görüldüğü üzere, şekil 4.6’daki gibi % 7,41 seviyelerinde iken %11,83 olmuştur. Morton (2015), sistem empedansının değişken frekanslı sürücülerin neden olduğu harmonik bozuluma olan etkilerini incelediği çalışmasında, jeneratör, kesintisiz güç kaynağı gibi kaynakların yüksek empedanslı olmasının gerilim harmoniklerini arttırdığını ortaya koymuştur. Modelin Şekil 4.11’deki gösterildiği şekilde harmoniklerin arttırdığı yönünde bu davranışı, gerilim harmoniklerini engellemek için kaynak empedansının mümkün olduğunca küçük seçilmesi yönündeki çalışmayla da uyumluluk göstermektedir.

Harmonik filtrelerde mevcut kondansatörlerin bir kısmının patlaması sonucu fazdan faza ve fazdan nötre kısa devre yaşandığının varsayılması sonucunda simülasyonda görülen gerilim düşmesi ve yükselmesi olayları modelin hassasiyet analizinde beklenen davranışı sergilediğini göstermektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, harmonik filtrelerin patlaması sonucu sistem çökmesiyle (blackout) sonuçlanan yolcu gemisi kazası sırasında harmonik filtrelerin devre dışı kalma durumu kurgusal olarak bir dökme yük gemisine uyarlanarak, harmonik filtreli ve filtresiz durumlar ile gerilim düşmesi ve yükselmesi olayları analiz edilmiştir. Çalışmanın amacı, literatürden elde edilen bilgiler doğrultusunda MATLAB/Simulink ile sinüzoidal dalgaların olması gerekenden ne kadar saptığının harmonikler, gerilim düşmesi ve gerilim yükselmesi gibi güç kalitesi bozuklukları olarak ortaya konulması aracılığıyla simülasyon modeli oluşturmaktır. Yapılan simülasyonda normalde konvensiyonel dizel-motor tahrik sistemine sahip dökme yük gemisinin elektrik tahrikli pod motorlarla yol aldığı varsayılmıştır. Dökme yük gemisinin elektrik sisteminin test edilebilmesi için güç kalitesi problemleri sebebiyle yangın olayına maruz kalan yolcu gemisindeki girdiler simülasyon modeline dahil edilmiş ve simülasyon modelinin davranışı incelenmiştir. Yapılmış olan simülasyonlarda, anlatılan elektrik güç kalite bozukluklarından olan, harmonik bozukluk, gerilim yükselmesi, ve gerilim düşmesi incelenmiştir.

Birinci simülasyonda filtreler devre dışı kaldığı zaman gerilim ve akım harmonikleri hesaplatılmıştır. Gerilim kaynağı inverteri 6 darbeleri olduğundan 5., 7., 11. ve 13. harmonikler ön plana çıkmıştır. Çizelge 5.1’de gerilim harmonikleri ile ilgili veriler paylaşılmıştır.

Çizelge 5.1. Filtreler devre dışıyken gerilim harmonikleri

V(~)	I(~)	%THD _V	%h5	%h7	%h11	%h13
10790	846	7,41	3,88	3,58	2,89	2,48

Çizelge 5.2’de filtreler devre dışıyken akım harmonikleri ile ilgili veriler paylaşılmıştır.

Çizelge 5.2. Filtreler devre dışıyken akım harmonikleri

V(~)	I(~)	%THD _I	%h5	%h7	%h11	%h13
10790	846	19,25	14,99	9,92	5,09	3,74

İkinci simülasyonda reaktif güç ihtiyacına uygun olarak filtreler yerleştirilmiştir. Filtre kapasitelerini (MVar) ve gerilim harmonik miktarları Çizelge 5.3’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.3. Filtreler devredeyken gerilim harmonikleri

%THD _v	%h5	%h7	%h11	%h13	Q _{h5}	Q _{h7}	Q _{h11}	Q _{h13}
1,13	0,15	0,08	0,06	0,05	4	4	4	4

Filtreler devredeyken sistemdeki akım harmonikleri Çizelge 5.4’teki gibidir.

Çizelge 5.4. Filtreler devredeyken akım harmonikleri

%THD _i	%h5	%h7	%h11	%h13	Q _{h5}	Q _{h7}	Q _{h11}	Q _{h13}
0,78	0,45	0,18	0,05	0,03	4	4	4	4

Üçüncü simülasyonda ise 1-1,5 saniyeleri arası gerilim düşmesi ve 2 ile 2,5 saniyeleri arası ise gerilim yükselmesi olayları simule edilmiştir.

Çizelge 5.5. Gerilim yükselmesi ve düşmesi

Normal Gerilim (RMS)	Gerilim Yükselmesi Gerilim (RMS)	Gerilim Düşmesi Gerilim (RMS)
6358 V	7048 V (%10,8)	3010 V (%52,7)

Buna göre yapılan birinci simülasyonda, bahse konu gemideki pasif harmonik filtrelerin devre dışı olduğu bir durumda, çizelge 5.1 ve çizelge 5.2’de görüldüğü üzere, % 7,41 gerilim THD değeri ile % 19,25 akım THD değerlerinin dünyaca tanınan yasal sınıflandırma toplulukları olan IEEE, IEC ve ABS tarafından kabul görmüş toplam harmonik bozulma (THD) yüzde değeri olan %5’i karşılamadığı görülmüştür. Elde edilen bulgulara göre, kaza sırasında filtrelerin devre dışı kalmasıyla beklendiği şekilde 6 darbeleri gerilim kaynağı inverteri ile sürülen elektrik tahrik motorlarının yer aldığı gemi şebekesi gerilim ve akımında, özellikle 5., 7., 11. ve 13. harmonik seviyelerinde yoğunluk oluşmuştur. Filtrelerin kaza sırasında devre dışı kaldığı durumdaki harmonik dağılım da, kritik cihazlardan oluşan izole bir elektrik sistemi olan dökme yük gemisi elektrik sisteminin harmonik firtsiz olarak güvensiz durumda olduğunu ortaya koymaktadır. 2. simülasyonda sistemin reaktif güç ihtiyacına göre hesaplanan ve 4 MVar kapasitesinde seçilen pasif harmonik filtreler devreye alındıktan sonra çizelge 5.3 ve çizelge 5.4’e göre gerilim THD değerinin %1,13 ve akım

THD değerinin ise %0,78 olarak makul seviyelere geldiği görülmektedir. 3. simülasyonda ise yaşanan gemi kazasında, kondansatörlerin patlaması sonucu fazdan faza ve fazdan toprağa kısa devre olarak gerilim yükselmesinin %10,8 ve gerilim düşmesinin ise %52,7 olduğu çizelge 5.5’de görülmektedir. Tüm bu simülasyonlar, kaza esnasında meydana gelen elektrik güç kalite güç bozukluklarının gemideki sistemleri kararsız hale getirerek gemiyi kaza raporunda bahsedilen sistem çökmesi olayına maruz bırakmış olabileceğini göstermektedir.

Literatürdeki çalışmalarda harmonikleri azaltmak ve enerji verimliliğini arttırmak için çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Vresdian, Yousif, Mnati ve Tofigh (2018), çalışmalarında endüstriyel dağıtım sistemindeki harmonikleri azaltmak için çeşitli pasif filtre tasarımlarını tartışmaktadır. Kullanılan pasif filtreler, tek ve çift ayarlı harmonik filtredir. Tek ve çift ayarlı filtrelerin harmoniği azaltmadaki etkinliğinin yanı sıra filtreleri kurmak için en iyi yerin hangi nokta olduğu, filtrelerin harmonik bozulma ve performansı üzerindeki farklı sistem etkileri ve yük limitleri de incelenmektedir. PSCAD/EMTDC programı kullanılarak elde edilen simülasyon çıktısı, çift ayarlı pasif filtrenin harmonik üreten yüklerin yanına yerleştirildiğinde harmonikleri azaltmada daha etkili olduğunu göstermiştir.

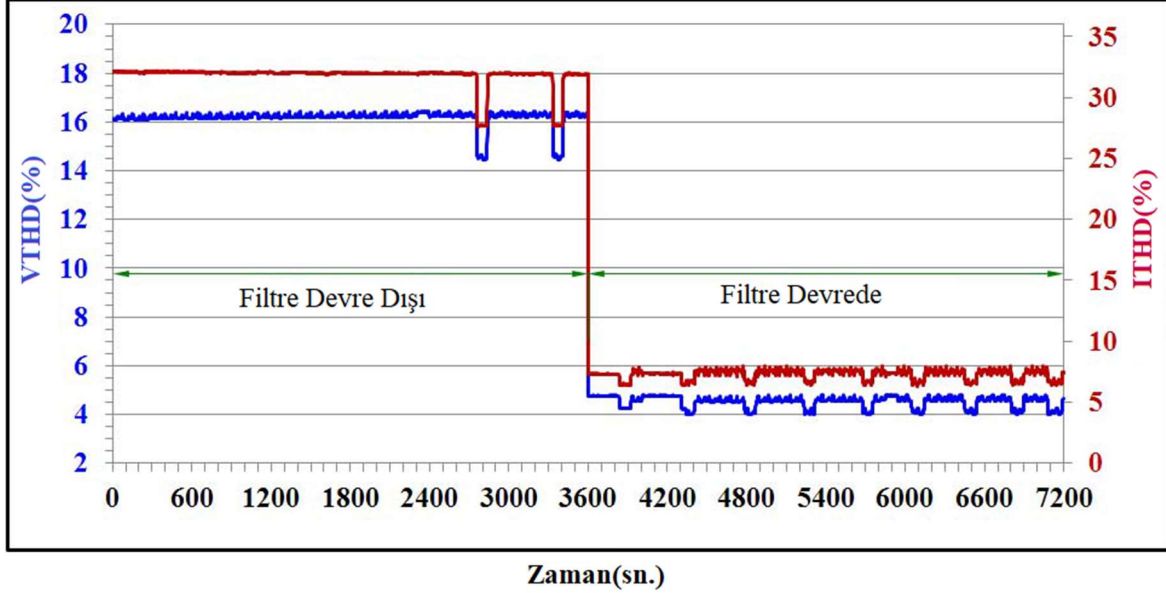
Su ve Hong (2015), çalışmalarında bir gemide yer alan değişken hızlı sürücüler tarafından gerilim ve akım harmoniklerinde bozulmalar olduğunu ve reaktif güç ihtiyacını tespit ederek tasarlanan harmonik filtreler sayesinde harmonik seviyelerin azaltıldığını belirtmişlerdir. Bu kapsamda gemiden alınan gerçek ölçümlerde harmonik filtreli ve filtresiz durumdaki akım ve gerilim harmonikleri yüzdesi çizelge 5.6’dadır.

Çizelge 5.6. Gerilim ve akım harmonikleri

Harmonik Tipi	Minimum (Filtresiz/Filtreli)	Maximum (Filtresiz/Filtreli)	Ortalama (Filtresiz/Filtreli)
% V THD	14.43/4.06	16.45/4.92	16.14/4.52
% I THD	27.59/8.28	32.20/9.66	31.75/9.53

Çizelge 5.6’da gerilim ve akım harmoniklerinin minimum, maksimum ve ortalama değerlerinin pasif filtre kullanılmadan IEEE tarafından belirlenen standartlardan yüksek olduğu görülmekte iken, filtre kullanımı ile beraber gerilim ve akım harmoniğinin düştüğü görülmekte ise de akım harmoniklerinin hala %5 üzerinde olduğu görülmektedir. Gemide filtre kapasitelerini arttırmak değerlerin daha makul seviyelere çekilmesini sağlayacaktır.

Çalışmada Su ve Kong gemideki pasif filtreli ve filtersiz çalışma durumunu Şekil 5.1'de grafiksel olarak ortaya koymuşlardır.



Şekil 5.1. Simülasyon sonuçları

Çalışmaları neticesinde, elektrik güç kalitesinin arttığı filtreli çalışma ile beraber jeneratör yakıt tüketiminin azaltıldığını ve bu sayede emisyonların azaltıldığını ortaya koymuşlardır.

Razak, Islam, Zaman, Fahim ve Dhar (2019), çalışmalarında güneş sistemi teknolojilerinde, yarıiletken cihaz ve güç elektroniği dönüştürücüleri tarafından üretilen harmoniklerin analizi ve azaltılmasını incelemişlerdir. MATLAB/SIMULINK ile gerçekleştirilen çalışmada, filtreli ve filtersiz sistemin toplam harmonik bozulması incelenmiştir. Filtre tipi olarak pasif filtrenin kullanıldığı çalışmada, 5., 7., 11. ve 13. harmoniklerin ağırlıklı olduğu akım THD değeri %1,84 gibi makul bir seviyeye indirgenmiştir.

Semin ve Zaman (2018), çalışmalarında bir tanker gemisindeki harmonik akımları ele almışlardır. Limandayken ya da kargo yüklemesi esnasında herhangi bir harmonik bozukluk olmayan gemide, değişken hızlı sürücülerin çalışmasıyla beraber harmonik bozukluk meydana gelmiştir. Hesaplar sonucunda elde edilen filtre kapasiteleri ile yapılan simülasyonda filtersiz duruma göre hem farklı frekans seviyelerindeki harmonik bileşenler azalmış hem de güç faktörü yükselmiştir.

Çizelge 5.7. Gerilim harmonikleri

	% THD Harmonik Filtresiz	%THD Harmonik Filtreli
Gemi Manevra Pozisyonunda	6.39	2.72
Gemi Denizde Yol Alırken	6.39	2.72

Çizelge 5.7’de çalışmada yer alan kablo 78 noktasından ölçülen harmonik değerlerin filtreli ve filtresiz gerilim harmonik bozulma yüzdeleri görülmektedir. Filtre uygulaması ile beraber gerilim harmonik bozulma değerinin %5’in altına indiği ve DNV GL (Det Norske Veritas-Germanischer Loyd) Kurallarını karşıladığı görülmektedir.

Almutairi ve Hadjiloucas (2017), çalışmalarında güç faktörünü arttırmak, V_{THD} , I_{THD} değerleri ile iletim hattı kayıplarını azaltmak için pasif filtre tasarımı yapmışlardır.

Çizelge 5.8. Durum 1 ve durum 2 parametreleri

Durumlar	Kısa Devre Gücü	R_{S1}	X_{S1}	Filtresiz $V_{THD}(\%)$	Filtresiz $I_{THD}(\%)$
Durum 1	150	0,01154	0.1154	7.61	30.56
Durum 2	80	0.02163	0.2163	10.34	29.99

Almutairi ve Hadjiloucas, bu tasarımı 2 durumda incelemişlerdir. Belirlenen durumlara ait parametreler çizelge 5.8’de verilmektedir. Çalışmada pasif filtre tasarımı genel yaklaşımdan farklı olarak sadece güç faktörünü arttırmaya yönelik filtre tasarımı ile yapılmamış, ayrıca toplam gerilim harmoniklerini düşürmek, toplam akım harmoniklerini düşürmek ve toplam hat kayıplarını azaltmak üzere toplam 4 hedef fonksiyon olarak gerçekleştirilmiştir. 4 hedef fonksiyon gerçekleştirilirken güç faktörü ya da hat kayıpları için herhangi bir kısıt tanımlamadan elde edilen sonuçlarda 2 ve 3. hedef fonksiyonlar çok yüksek oranda gerçekleşse de 1. hedef fonksiyonun güç faktörünün çok bozulmasından dolayı sistemin eski duruma göre daha kötü performansla çalıştığı gözlenmiştir. Dolayısıyla hem güç faktörü ve toplam kayıplar hem de toplam akım ve gerilim harmonik bozulmasının optimal olmasının hedeflendiği durum tabloları çizelge 5.9 ve 5.10’da verilmektedir.

Çizelge 5.9. Durum 1 filtreli tasarım

Durum 1 Filtreli Tasarım				
Parametre	Hedef Fonk 1.	Hedef Fonk 2.	Hedef Fonk 3.	Hedef Fonk 4.
Güç Faktörü (%)	99.25	90.03	90.69	99.25
Hat Kaybı (kW)	5.8	7.28	6.74	5.80
I_{THD} (%)	11.55	12.28	8.58	11.56
V_{THD} (%)	4.53	3.96	5.21	4.53

Çizelge 5.10. Durum 2 filtreli tasarım

Durum 2 Filtreli Tasarım				
Parametre	Hedef Fonk 1.	Hedef Fonk 2.	Hedef Fonk 3.	Hedef Fonk 4.
Güç Faktörü (%)	99.52	91.71	90.79	99.23
Hat Kaybı (kW)	10.73	13.48	12.18	10.69
I_{THD} (%)	9.12	9.26	7.36	9.06
V_{THD} (%)	3.95	3.25	4.90	4.14

Çizelge 5.9 ve 5.10'da 2 farklı durum için tasarlanan filtrede güç faktörü en yüksek değere arttırılmaya çalışılmış ancak toplam akım harmonik bozulma değerlerinin yeteri kadar kompanse edilemediği görülmüştür. Dolayısıyla güç faktörünün en yüksek değere çekilmesinden ziyade %90-95 aralığında ayarlanarak optimal bir pasif filtre tasarımı yapılmasının akım harmonik seviyelerinin standartlar dahilindeki limitlere çekilmesini sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

Noor, Rosmizi, Aminudin ve Farnadia (2018), çalışmalarında 180° iletim modlu üç fazlı inverter üzerinde pasif filtre performansını araştırmaktadır. İnverterin simülasyon modeli MATLAB/SIMULINK kullanılarak geliştirilmiştir. Güç devresinde, anahtarlama cihazı olarak izole edilmiş kapılı ve iki kutuplu transistör (IGBT) kullanılmış, inverterde bipolar sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu tekniği kullanılarak kontrol edilmiştir. LC, RC ve PI (kapasitör-giriş) filtresi olan tüm pasif filtrelerin, %5'den daha az olan THD değeri ile bir sistemde verimli bir şekilde çalıştırılabileceği ortaya konulmuştur.

Mahari, Mawsawi ve Albasri (2018), çalışmalarında alternatif akımdan doğru akıma dönüşümü harmonikler yaratarak güç kalitesi sorunlarına neden olduğundan, bu sorunları azaltmak için pasif filtrelere elektrolitik hücrelerden oluşan pot hattı doğrultucuları entegre etmişlerdir. Çalışmada önerilen yeni pot hattı ve pasif filtre ile beraber PCC noktasındaki

harmonik seviyelerinde ciddi bir zayıflama meydana gelmiştir. Bu pasif filtre ve önerilen pot hattı MATLAB/SIMULINK ortamında başarılı bir şekilde modellenmiş ve simüle edilmiştir.

Hafez, El-Eissawi ve Ayad (2019), çalışmalarında güç kalitesi sorunlarının mikro şebekelerde önemli ve büyüyen bir sorun olduğunu, aktif tüketicilerin sayısının ve yenilenebilir enerji kullanımının artmasıyla sorunların daha da arttığını belirtmişlerdir. Hassas yükleri şebeke ve yenilenebilir enerji kaynakları tarafından üretilen harmoniklerden korumak için çözüm olarak bu çalışmada pasif harmonik filtre önerilmiştir. Bir nükleer araştırma reaktörünün elektrik sistemi hassas yükler olarak ETAP yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Tek ayarlı pasif harmonik filtrenin kullanıldığı bu sistemde, IEEE 519-1992 standardına göre toplam gerilim ve akım harmonik bozulması açısından iyi sonuçlar alınmıştır.

Fahmi, Baafai, Hazmi ve Nasution (2018), çalışmalarında endüstriyel makineler tarafından üretilen doğrusal olmayan yüklerin kullanılmasının, IEEE 519-1992 standartlarına ulaşmayan tutarsız harmoniklere neden olabildiğini belirterek plastik işleme endüstrisinde harmonikleri azaltmada tek ayarlı pasif filtrelerin kullanımını tartışmışlardır. MATLAB SIMULINK simülasyonu kullanılarak yapılan sistem modellemesi sonucunda %15,55 olan toplam akım harmonik bozulma değeri, IEEE 519-1992 standartlarına göre uygun olan %4,77 seviyelerine düşürülebilmektedir. Simülasyon sonuçlarından ayrıca, tek ayarlı pasif filtrenin, indirgenmek istenen akım harmonik değerini %82,23 oranında azaltabildiği ve diğer mertebelerdeki harmonikleri de %7 ile %8 arasında azaltabildiği görülmüştür.

Dovgun, Shandrygin, Boyarskaya ve Andyuseva (2020), çalışmalarında demiryolu elektrifikasyon sistemlerinin güç kalitesi sorunlarını ele almış ve cer yükünü besleyen elektrik güç sistemlerindeki rezonans modlarını analiz edip, cer ağının ve harici güç kaynağı sisteminin karşılıklı etkisini incelemişlerdir. MATLAB/SIMULINK yazılım paketi ile gerçekleştirilen cer yükü ile güç kaynağı sisteminin simülasyon modeli ele alınmıştır. Önerilen model, hatların uzunluğu, harici güç kaynağı sisteminin kısa devre gücü ve lokomotif akımlarının spektral bileşimi dahil olmak üzere, güç kaynağı sisteminin çeşitli parametrelerinin rezonans modları üzerindeki etkisini incelemek için kullanılmıştır. Çalışmada harmonik azaltma ve rezonans sönümlenmesi için pasif bir filtreleme sistemi tasarlanmıştır. Önerilen pasif filtre, yüksek frekanslı gerilim harmoniklerinin zayıflamasını

sağlamış, temel frekansta daha düşük kayıplara ve daha düşük toplam kapasitansa sahip olmuştur.

Wang, Yin, Liu ve Yuan (2021), çalışmalarında güç elektroniği tabanlı cihazların sinüsoidal olmayan akımları emdiğini, bu yüklerin güç şebekesi için doğrusal olmayan ve simetrik olmayan yükler olarak kabul edildiğini ve harmonik akım ürettiklerini belirtmişlerdir. Dinamik ayarlı pasif filtrenin simetrik bir akım dalga biçimi elde etmek için güç kalitesini iyileştirmek ve harmonik akımları filtrelemek için en iyi çözümlerden biri olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada güç kaynağının simetri seviyesini iyileştirmek için dinamik ayarlı pasif filtrenin elektriksel parametrelerini tasarlamak ve optimize etmek için bir yöntem önerilmiştir. Çalışmada tasarlanan pasif filtrenin elektrik parametreleri optimize edilmiş ve harmonik bastırması iyileştirilebilmiş, böylece daha simetrik bir dalga biçimine ulaşılarak güç kalitesi problemleri başarıyla giderilmiştir.

Sahidaini (2018), çalışmasında yük çeşitliliği ve farklı harmonik bozulma seviyeleri olan bir sistem için harmonik bozulma ve harmonikleri azaltma yöntemleri üzerinde çalışmıştır. Harmonik bozulmayı azaltmak ve güç faktörünü düzeltmek için bir grup pasif şönt filtre tasarlamış, önerilen yöntemde pasif harmonik filtrelerden en iyi senaryoyu elde etmek için yük ve bozulma seviyesi değişimine uygun grup filtre kurulumunu optimize etmiştir. Güç faktörü için maksimum seviyenin pozitif olmasını kısıt olarak kabul etmiş, THD ve farklı seviyelerdeki harmonik bozulma içeriğini en aza indirmeyi amaçlamıştır. Çalışmada 5. ve 7. harmonik seviyeleri için tasarlanan filtreyi beraber kullandığında, toplam harmonik seviyelerini en uygun hale getirmiştir.

Park, Lee, Yoo ve Jang (2021), çalışmalarında bir çelik üretim tesisindeki motor sürücülerini içeren bir güç sistemindeki harmonik gerilimi azaltmışlardır. AC/DC dönüştürücü tipi olan sürücü, güç kalitesini olumsuz etkileyen, doğrusal olmayan ve büyük kapasiteli değişken bir yüküdür. Gerilim düşüşü, uygun kapasitede bir güç kondansatör grubu kullanılarak belirli bir limit dahilinde telafi edilmiştir. Ayrıca, motor sürücü yükünün karakteristik harmoniklerine karşılık gelen pasif harmonik filtre kullanılarak ve gerilim bozulması IEEE-519 yönergelerine uygun olarak kontrol edilerek, pasif harmonik filtre uygun bir reaktif güç kaynağı ile harmonik bozulmayı azaltmış ve ekonomik bir çözüm sağlamıştır. Çalışmalarının amacı, filtre uygulamalarının daha iyi anlaşılmasının yanı sıra, harmonik filtrelerin saha ölçümü, analizi ve tasarımını performansı ile birlikte doğrulamaktır. Bu

çalışmada, motor tahrik sisteminde uygun kapasiteye sahip bir pasif harmonik filtre sisteminin reaktif gücü kompanze edeceğini ve harmonikleri azaltan ekonomik bir çözüm sağlayabileceğini doğrulamışlardır.

İncelenen literatür çalışmalarında harmonikleri bastırmak için pasif filtreleme yöntemi kullanılmıştır. Genel olarak pasif filtrelerin seçilme sebebi, maliyetin aktif filtrelere göre düşük olması ve değişken harmonikli yüklerin olmadığı tesislerde iyi performans vermeleridir. Pasif filtre kullanımı ile beraber güç faktörünün arttığı ve gemideki akım/gerilim dalga biçiminin ideal sinüzoidal biçime yakınlığını gösteren harmonik dağılımın ise azaldığı gözlemlenmiş olup, reaktif gücün bastırılmasından dolayı enerji verimliliğinin de arttığı vurgulanmıştır. İlgili çalışmalarda uygun pasif filtrelerin kullanımı ile beraber uluslararası güç kalite standartları doğrultusundaki limitlere erişilebileceği sonucuna varılmıştır. Bu tez çalışmasında, dökme yük gemisi değişken harmonikli yüklere sahip olmadığından harmonikleri bastırmak için pasif filtreleme yöntemi kullanılmış, reaktif güç ihtiyacına göre 4 adet tek ayarlı 5., 7., 11. ve 13. harmonik seviyelerinde pasif filtre tasarlanmıştır. Filtresiz durumda iken gemideki enerji verimliliğinin düşük olacağına ve seyir gibi kritik cihazların arızalanma ihtimalinin yüksek olacağına değinilmiştir. Bu kapsamda, kaza sonrası filtrelerin devre dışı kalması ile meydana gelebilecek filtersiz harmonik dağılım incelenmiştir. Filtre tasarımı hedeflenen güç faktörüne göre yapıldığı için filtre kullanımıyla beraber harmonik seviyelerin düşmesi ile güç faktörü artmış, uluslararası standartlar doğrultusundaki THD limitlerine erişilmiş ve literatür çalışmalarına paralel sonuçlara ulaşılmıştır.

Dökme yük gemisi simülasyon çalışmasında harmonik güç bozukluğunu incelerken harmonikleri oluşturan başlıca ekipman, elektrik tahrik motorunu besleyen gerilim kaynağı inverteri olarak değerlendirilmiş olup, bunun dışında ki farklı harmonik kaynaklarının etkisi ihmal edilmiştir. Bu durum gerçek imalatı yapılacak bir geminin filtre tasarımı ile çalışmada tasarlanan filtre arasında bir sınırlama yaratmaktadır. Simülasyonu yapılan tahrik motorunun tork ve hız gibi parametrelerinden öte, bir harmonik akım kaynağı olduğu değerlendirildiğinden tam güce yakın bir akım çekmesi amaçlanarak konfigürasyonu yapılmıştır. Daha kapsamlı sonuçlar elde etmek için farklı tork ve hızlarda motorun yarattığı harmonik bozukluğun değerlendirilmesi de uygun olacaktır. Elektrik tahrikli olarak tasarlanan dökme yük gemisindeki tahrik motor gücü, mekanik tahrikli olarak projelendirilmiş bir dökme yük gemisinin ana makine gücü ile yakın olarak seçilmiştir. Daha

gerçekçi sonuçlar elde etmek için taşınacak yük miktarına göre yük ve jeneratör kapasitelerinin daha hassas hesaplanması yerinde olacaktır.

Yüksek harmonik bozulma, üretilen elektrik enerjisinin verimli kullanımı hususunda önemli bir engel teşkil etmekle birlikte, farklı güç kalitesi bozukluklarına da yol açabilmektedir. Gemilerde tesis edilen harmonik filtrelerin etkin ve kesintisiz olarak kullanılabilmesi için, filtrelerin belirli periyotlarla bakımı ve bozunuma uğrayan kondansatörlerin değişimi, kapsamlı olarak hazırlanan prosedürler ve talimatlar ile ilgili mürettebatın bu konuda iyi derecede eğitilmesi büyük önem arz etmektedir. Ayrıca harmonik dağılımın çevrimiçi olarak izlenebilmesi ve bu sayede gemi otomasyon sisteminde limitlerin tanımlanıp limit aşımı esnasında otomasyon sisteminin alarm vermesi arızaya derhal müdahale etme imkanı verecektir.

Bu çalışmayla beraber, gemi elektrik sistemlerinde güç kalitesini temin etmeye yönelik ekipmanların önemi ortaya konulmuş, arıza, yangın vb. durumların maddi ve manevi olarak ciddi sonuçlara neden olabilecek kazalara yol açabileceği görülmüştür.

Elektrik güç kalitesi, karasal şebekelerde olduğu gibi gemi elektrik şebekelerinde de her geçen gün daha fazla önem kazanmaktadır. Muhtemel kazaların önüne geçmek ve elektriksel ekipmanların daha uzun ömürlü olması için, gemilerin tasarım aşaması, üretim sonrası testleri ve işletme süreçleri boyunca elektrik güç kalitesine dair parametreler titizlikle ele alınmalı, takibi yapılmalı ve gereken yatırımlar yapılmalıdır.

Gelecekte, tüm gemi tiplerini kapsayacak şekilde bir gemi sistemini güç kalite bozukluklarının sonuçlarından koruyacak “arıza tahmin edici ve önleyici” sistemlerin anlatıldığı bir çalışmanın hazırlanması faydalı olacaktır.

Bu çalışmada dökme yük gemilerindeki güç kalitesi problemlerini incelemek ve güç kalitesinin önemini kavramak için, gemilerde elektrik güç kalitesinden, en yaygın olarak görülen güç kalite bozukluklarından, detaylı olarak harmonik bileşenler ve etkilerinden, gemilerdeki yasal olarak kullanılan güç kalite sınırlamalarından ve çalışmada kullanılan yöntemden bahsedilmiş, elektrik güç sistemi kalitesini iyileştirmek üzere kullanılan harmonik filtrelerin kondansatörlerinin patlaması sonucu sistem çökmesi durumuna maruz kalan bir yolcu gemisinin ilgili gemi kaza raporu incelenmiştir. Harmonik filtrelerdeki

patlamadan kaynaklı yaşanan bu kaza sırasında meydana gelebilecek güç kalite bozukluklarının elektrikli tahrikle yol aldığı varsayılan bir dökme yük gemisinde MATLAB Simulink programı ile modellenmesi yapılmış ve harmonik bozukluğu engellemeye dair gemide kullanılan pasif harmonik filtrenin devrede olması ve patlama sebebiyle devreden çıkması simüle edilmiş, güç kalite bozukluklarından olan gerilim yükselmesi ve düşmesi harmonik filtrelerin kondansatörlerinin akması sonucu terminallerinin kısa devre olduğu varsayılarak simüle edilmiştir. Son olarak simülasyon sonuçları ve literatür ile uyumu değerlendirilmiş, kazaya maruz kalmamak için alınması gereken tedbirlerden ve tezin konusuyla ilgili gelecekte yapılması tavsiye edilen çalışmadan bahsedilmiştir.



KAYNAKLAR

- ABS (2006). Control Of Harmonics In Electrical Power Systems. Houston: American Bureau Of Shipping. *Guidance Notes On Control Of Harmonics In Electrical Power Systems*.
- Abdollahi, R. (2019). A simple harmonic reduction method in 20-pulse AC-DC converter. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 28(1), 1-18.
- Ackermann, G. (2013). Simulation And Control Of Harmonics In Ship Networks. *IPST, International Conference On Power Systems Transients*.
- Agarwala, N. ve Nair, K. (2014). Aspects And Impact Of Power Quality Onboard Ships. *8th International Conference On Capacitors*, 128-131.
- Ahmed, I., Shames, M.Z. ve Alam, M. (2013). An Overview Of Harmonic Sources In Power System. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, 7(3), 1-3.
- Al-Greer, M., ve Giaouris, D. (2020). Getting Started With MATLAB & SIMULINK.
- Almutairi, M., ve Hadjiloucas, S. (2017). Application Of Single Tuned Passive Filters In Distribution Networks At The Point Of Common Coupling. *World Academy Of Science*, 11(2), 177-182.
- Ashraf, U., (2014). Stability Of Autonomous Power Systemson Ships And Offshore Installations. MSC Thesis. *Norwegian University Of Science And Technology*.
- Attachie, J.C. ve Amuzivi, C.K. (2013). Investigating Harmonic Resonance And Capacitor Bank Switching At A Power Distribution Substation Using A Fixed Capacitor Bank. *Research Journal in Engineering and Applied Sciences*, 2(4), 343-348.
- Barros, J., Apraiz, M., Diego, R. I. (2008). Voltage Notch Detection And Analysis Using Wavelets. *VECIMS 2008 – IEEE International Conference On Virtual Environments, Human-Computer Interfaces And Measurement Systems*, 151-155.
- Barros J. ve Diego, R.I. (2016). A Review Of Measurement And Analysis Of Electric Power Quality On Shipboard Power System Networks. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 62(2016), 665-672.
- Bayliss, C., Hardy, B. (2012). Transmission And Distribution Electrical Engineering. *Newnes*, (Fourth Edition).
- Beleiu, H.G, Beleiu, I.N., Pavel, S.G. ve Darab, C.V. (2018). Management Of Power Quality Issues From An Economic Point Of View. *Sustainability (Switzerland)*, 10(7), 1-16.
- Bhattacharyya, S. ve Cobben S. (2011). Consequences Of Poor Power Quality-An Overview. *Technical University Of Eindhoven*, 3-19.

- Chapman, D. (2001). Harmonics-Cause And Effects. *Copper Development Association*, Version 0b.
- Dallas, S. (2019). Power Quality Analysis For Greener Shipping By Implementing An On-Board Electric Power Quality Monitoring System. *Journal Of Marine Engineering & Technology*, 1-11.
- Das, S., ve Sudhadar, P. (2017). Power Factor Correction & Harmonic Distortion Control For AC-DC Fault Tolerant Power Distribution System & Power Quality Qualification Test Results As Per IEC 61000-3-2. *Bhabha Atomic Research Centre Newsletter*, 4-12.
- Djagarov, N., Grozdev, Z., Bonev, M., Tsvetanov, D., Enchev, G., Varbev, V., Predoi, G. ve Djagarova, J. (2019). Power Quality Investigation On A Ship's Power System. *International Journal Of Circuits, Systems And Signal Processing*, 13(19), 494-500.
- Doerry, N. ve Clayton D. (2005). Shipboard Electrical Power Quality Of Service. *Electric Ship Technologies Symposium*, 274-279.
- Dovgun, V., Shandrygin, V., Boyarskaya, N. ve Andyuseva, V. (2020) Passive Filter Design For Power Supply Systems with Traction Loads. *E3S Web Of Conferences*, 209(20), 1-6.
- DSEC (2008). Wiring Diagram Of Bulk Carrier. *Total Ship Building Engineering And Resourcing Company*.
- Ellis, R. ve Eng, P. (2001). Power System Harmonics. *An Allen-Bradley Series Of Issues And Answers*.
- Fahmi, M., Baafai, U., Hazmi, A. ve Nasution, T.H. (2018). Harmonic Reduction By Using Single-Tuned Passive Filter In Plastic Processing Industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 308(1).
- Geertsma, R.D., Negenborn, R., Visser, K. ve Hopman, J.J. (2017). Design And Control Of Hybrid Power And Propulsion Systems For Smart Ships: A Review Of Developments. *Applied Energy*, 194, 30–54.
- Guerrero, J., Jin, Z., Liu, W., Othman, M., Savaghebi, M., Moghaddam, A., Meng, L. ve Vasquez, C. (2016). Shipboard Microgrids: Maritime Islanded Power Systems Technologies. *PCIM ASIA 2016*, 135-142.
- Hafez, M., El-Eissawi, H. ve Ayad, N. (2019). Harmonic Enhancement In Microgrid With Applications On Sensitive Loads. *International Journal Of Electrical And Computer Engineering IJECE*, 9(2), 826-834.
- IEEE (1995). IEEE 1159 Std. Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment. *The Institute Of Electrical And Electronics Engineers*.
- IEEE (2005). IEEE 1100 Std. Recommended Practice For Monitoring Electric Power Quality. *The Institute Of Electrical And Electronics Engineers*.

- Nomer, F. (2014). Deniz Taşımacılığında Gemi Acentelerinin Yeri ve Önemi ve Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Ticaret Üniversitesi*.
- İnternet: Birleşmiş Milletler Ticaret ve Kalkınma Örgütü (UNCTAD). (2014). Review of Maritime Transport 2014. New York: *Birleşmiş Milletler*, https://unctad.org/system/files/official-document/tdr2014_en.pdf, Son Erişim Tarihi: 02.09.2021.
- İnternet: Birleşmiş Milletler Ticaret ve Kalkınma Örgütü (UNCTAD). (2018). Review of Maritime Transport 2018. New York: *Birleşmiş Milletler*, URL: https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2018_en.pdf, Son Erişim Tarihi: 05.09.2021.
- İnternet: Marine Insight (MI News Network). (2017). What Are Bulk Carriers? Types Of Ships. URL: <https://www.marineinsight.com/types-of-ships/what-are-bulk-carrier-ships/>, Son Erişim Tarihi: 09.09.2021.
- Jayasinghe, S.G., Meegahapola L., Fernando, N., Jin, Z. ve Guerrero, J. (2017). A Review Of Ship Microgrids: System Architectures, Storage Technologies And Power Quality Aspects. *Inventions* 2017, 2(1), 1-19.
- Johnson, D., ve Hassan, K. (2016). Issues Of Power Quality In Electrical Systems. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 5(4), 148-154.
- Karanassos, H.A. (2016). Commercial Ship Surveying On/Off Hire Condition Surveys and Bunker Surveys. *Butterworth Heinmann*, 1st edition.
- Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A. ve Arıkan, O., (2003). Elektrik Tesislerinde Harmonikler. İstanbul: *Birsen Yayınevi*, 1. baskı.
- Kumaraswamy, I., Jahnavi, M.V. ve Ramesh, P. (2012). Amelioration Of Power Quality In Isolated Power Systems. *International Journal Of Scientific And Research Publications*, 2(4), 1-4.
- Kumar, D. ve Zare, F. (2019). A Comprehensive Review Of Maritime Microgrids: System Architectures, Energy Efficiency, Power Quality, And Regulations. *IEEE Access*, 67249-67277.
- Lovstad, M. (2020). Ice-Class Laker Bulk Carrier Tops Off Successful Collaboration On 50 Vessels. URL: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Ice-class-laker-bulk-carrier-tops-off-successful-collaboration-on-50-vessels.html>, Son Erişim Tarihi: 05.11.2021.
- Maes, W. (2014). Marine Electrical Knowledge. *Antwerp Maritime Academy Navale Engineering*.
- Mahari, M., Mawsawi, S. ve Albasri, F. (2018). A New Aluminum Pot Line Rectifier Scheme With Effective Harmonic Suppression Capability. *International Journal Of Power Electronics And Drive System (IJPEDS)*, 9(4), 1573-1583.

- MAIB (2011). Report On The Investigation Of The Catastrophic Failure Of A Capacitor In The Aft Harmonic Filter Room On Board RMS Queen Mary 2 While Approaching Barcelona. *Marine Accident Investigation Branch*, Report No:28/2011.
- Mindykowski, J. (2016). Based Overview Of Some Contemporary Challenges To Power Quality In Ship Systems. *Gdynia Maritime University*, 1(2), 1-30.
- Mindykowski, J. (2014). Power Quality On Ships: Today And Tomorrow's Challenges. *EPE 2014*, pp. 1-18.
- Mindykowski, J., Tarasiuk, T. ve Gnacinski, P. (2021). Review Of Legal Aspects Of Electrical Power Quality In Ship Systems In The Wake Of The Novelisation And Implementation Of IACS Rules And Requirement. *Energies 2021*, 14(11), 3151.
- Mindykowski, J., Szmit E. ve Tarasiuk T. (2004). Electric Power Quality And Ship's Safety. *Marine Technology Transactions*, 15, 351-360.
- Morton, D. (2015). Impact Of System Impedance On Harmonics Produced By Variable Frequency Drives. Master Of Science Thesis, *Virginia Polytechnic Institute And State University*.
- Naletina, D. ve Perkov, E. (2017). The Economic Importance Of Maritime Shipping With Special Reference On Croatia, *University Of Zagreb*.
- NATO. (2004). Characteristics of Shipboard Electrical Power Systems in Warships of the North Atlantic Treaty Navies. *STANAG 1008:2004*, Edition 9.
- Noor, M., Rosmizi, N., Aminudin, N. ve Faranadia, A.H. (2018). Investigation Of Passive Filter Performance On Three Phase DC To AC Converter. *International Journal Of Power Electronics And Drive System (IJPEDVS)*, 9(3), 1016-1028.
- Özdemir, E. (2009). Elektrik Enerji Kalitesi. III. *Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, 280-285.
- Park, B., Lee, J., Yoo, H. ve Jang G. (2021). Harmonic Mitigation Using Passive Harmonic Filters: Case Study In A Steel Mill Power System. *Energies 2021*, 14, 2278.
- Patil, A., Katkar, R., Ajit, P., Vijay, C., Patil, P., ve Patil, S., (2017), Harmonic Mitigation Using Passive Filter, Department Of Electrical Engineering. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 45(2), 83-86.
- Peydayesh, M. ve Baldick, R. (2019). The Effects Of Very Fast Response To Frequency Fluctuation. *31st USAEE/IAEE North American Conference*.
- Pilat, N., Peric, A., Ban, Z., ve Sunde, V. (2019). Analysis Of The Uninterruptible Power Supply Influences To The Power Grid. *Energies 2021*, 180-185.
- Prousalidis, J., Styvaktakis, E., Hatzilau, I.K., Kanellos, F., Perros, S. ve Sofras, E. (2008). Electric Power Supply Quality In Ship Systems-An Overview. *Int. J. Ocean Systems Management*, 1(1), 68-83.

- Radi, B. ve Elhami, A. (2018). Introduction To MATLAB. *University Hassan Ier*, Part 3, 181-188.
- Razak, M.A., Islam, N., Zaman, A.U., Fahim, M.J.J. ve Dhar, R.S. (2019). Design And Simulation Of PV Based Harmonic Compensator For Three Phase Load. *International Conference On Computer, Communication, Chemical, Materials And Electronic Engineering*, 1-6.
- Rosa, F. (2006). Harmonics And Power Systems, *CRC Press*, 1st Edition.
- Sahidaini, S.A. (2018). Electrical Power Quality Improvement Through modeling And Optimization Of Passive Harmonic Filter. *International Journal Of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 7(10), 103-110.
- Sasikiran P. ve Manohar G. (2016). UKF Based Estimation Approach For DVR Control To Compensate Voltage Swell In Distribution Systems. *Ain Shams University Journal*, 9(4).
- Salam, Z., Cheng, T. ve Jusoh, T. (2006). Harmonics Mitigation Using Active Power Filter: A Technological Review. *Elektrika*, 8(2), 16-22.
- Sanjeevikumar, P., Sharmeela, C., Nielsen, J. ve Sivaraman, P. (2021). Power Quality In Modern Power Systems. *Academic Press*, 1st Edition.
- Santoso, A., Cahyono, F., Laksana, W., ve Nurfalah, Y. (2020). Analysed Power Quality Of Electrical System AHTS Vessel. *Research, Society And Development*, 9(8).
- Schipman, K. ve Delince, F. (2016). The Importance Of Good Power Quality. *ABB Power Quality Products*, Belgium.
- Semin, S., ve Zaman, M. (2018). Designing Passive Harmonic Filter Of Electric Propulsion System On Tanker Ship. *International Journal Of Marine Engineering Innovation And Research*, 2(3), 182-189.
- Shabbir, N., Kütt, L., Jarkovoi, M., Iqbal, M.N., Rassolkin, A., ve Daniel, K. (2021). An Overview Of Measurement Standards For Power Quality. *Tallinn University Of Technology*, 1-7.
- Skjong, E., Suul, J., Rygg, A., Johansen, T. ve Molinas, M. (2016). System-Wide Harmonic Mitigation In A Diesel Electric Ship By Model Predictive Control. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 63, 4008 - 4019.
- Spagkouros, S. ve Prousalidis, J. (2015). Electric Power Quality Problems In Ship Systems: A Classification Method. *National Technical University Of Athens*.
- Srinivas, K. (2012). Analysis And Implementation Of Multi Pulse Converters For HVDC System. *International Journal Of Emerging Technology And Advanced Engineering*, 2(4), 183-189.

- Su C. ve Hong C., (2015). Design Of Passive Harmonic Filters To Enhance Power Quality And Energy Efficiency In Ship Power Systems. *49th IEEE/IAS Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference*, 1-8.
- Szweda, M. (2009). Dwt Analysis Of Selected Transient And Notching Disturbances. *XIX. IMEKO World Congress Fundamental And Applied Metrology*, 882-886.
- Şahin, M., Oğuz, Y. ve Tuğcu, H. (2014). Güç Sistemlerinde Enerji Kalitesini Etkileyen Harmoniklerin İncelenmesi. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(2), 199-218.
- Tabak, B. ve Yalçın, M.A. (2004). Elektrik Güç Sistemlerinde Enerji Kalitesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(1), 52-54.
- Terriche, Y., Su, C.L., Lashab, A., Mutarraf, M., Mehrzadi, M., Guerrero, M. ve Vasquez, J.C. (2021). Effective Controls Of Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactors For Power Quality Improvement In Shipboard Microgrids. *IEEE Transactions On Industry Applications*, 57(3), 2838-2849.
- Tulsky, V., Sharova A. ve Diab, Z. (2016). Study And Analysis Of Power Quality For An Electric Power Distribution System. *IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference*, 710-716.
- Vresdian, D., Yousif, S., Mnati, M., ve Tofigh, M. (2018). Various Passive Filter Designs Proposed For Harmonic Extenuation in Industrial Distribution Systems. *International Journal Of Engineering & Technology*, 7(4.11), 75-84.
- Wakileh, G. (2001). Power Systems Harmonics. Berlin: *Springer Engineering Online Library*, 1st Edition.
- Wang, Y., Yin, K., Liu, H. ve Yuan, Y. (2021). A Method For Designing And Optimizing The Electrical Parameters Of Dynamic Tuning Passive Filter. *Wuhan University Of Science And Technology, Symmetry 2021*, 13(7), 1-19.

DİZİN

A

Abstract · v

B

Bölüm · 1,7,55,77,95

ÇÇizelge · 52, 53, 54, 79, 93, 95,
96, 97, 99, 102, 103

D

Dizin · 112

EEşitlik · 16, 18, 20, 28, 29, 30,
31, 32, 36, 37, 38, 39, 44, 45, 50,
51
Etik Beyan · iii

G

Giriş · 1

KKaynaklar · 106
Key Words · v

L

Literatür · 2, 3, 4, 7, 8, 9

ÖÖzet · iv
Özgeçmiş · 112

S

Simgeler ve kısaltmalar · xiii

ŞŞekil · 11, 12, 16, 17, 18, 19, 21,
23, 24, 25, 26, 28, 29, 34, 40,
41, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 67,
68, 75, 77, 81, 82, 83, 84, 88,
89, 90, 92, 94, 98

T

Teşekkür · vi



TEKNOVERSITE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

