



**REAKTİF GÜCÜN VE HARMONİKLERİN
ENERJİ VERİMLİLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

MERİÇ ILGIN

**Yüksek Lisans Tezi
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Hikmet ESEN
AĞUSTOS-2019**

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**REAKTİF GÜCÜN VE HARMONİKLERİN
ENERJİ VERİMLİLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MERİÇ ILGIN

(162135103)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 10 Temmuz 2019

Tezin Savunulduğu Tarih: 9 Ağustos 2019

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hikmet ESEN (F.Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Resul ÇÖTELİ (F.Ü.)
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÜSTÜNDAĞ (B.Ü.)

AĞUSTOS-2019

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Hikmet ESEN'e, ilgisini ve önerilerini göstermekten kaçınmayan Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı Başkanı sayın Prof. Dr. Mehmet ESEN'e sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Bu çalışmayı hazırlarken geçirdiğim süreçte her konuda bilgi ve yardımını benden esirgemeyen Fora Güç Sistemleri şirketi yönetim kurulu başkanı Sayın Gökhan KARAKOYUNLU'ya, ayrıca manevi desteğini her an yanımda hissettiğim aileme ve arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Meriç ILGIN

Elazığ – 2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	i
ÖZET	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xii
KISALTMALAR.....	xiii
SİMGELER.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı	3
1.2. Kullanılacak Yöntem.....	4
1.3. Kaynak Araştırması	4
1.4. Tezin Yapısı.....	8
2. ELEKTRİK SİSTEMLERİNDE GÜÇ KALİTESİ	10
2.1. Güç Kalitesi Nedir?	10
2.2. Güç Kalitesi Sorunlarının Önemi	10
3. REAKTİF GÜÇ KOMPAZASYONU	13
3.1. Güç Kompanzasyonu Tanımı	13
3.2. Güç Çeşitleri, Tanımlamaları ve Güç Üçgeni	14
3.2.1. Aktif(Gerçek) Güç	14
3.2.2. Reaktif Güç.....	15
3.2.3. Görünür Güç	16
3.2.4. Güç Üçgeni	16
3.3. Güç Faktörü (PF)	17
3.3.1. Güç Faktörü Düzeltme	18
3.3.2. Düşük Güç Faktörü Dezavantajları	18
3.3.3. Güç Faktörünü İyileştirmenin Faydaları	18
3.4. Güç Sistem Ağında Reaktif Gücün Önemi.....	19
3.4.1. Gerilim Kontrolü	20
3.4.2. Elektrik Kesintileri	20
3.4.3. Çeşitli Cihazların/Makinelerin Düzgün Çalışması (Manyetik Akı Üretmek)	21
3.5. Reaktif Enerji Yönetiminin Avantajları	21
3.6. Reaktif Güç Kaynakları	22
3.7. Kompanzasyon Elemanları.....	23

3.8. Kompanzasyon Panosu Tek Hat Şematik Gösterimi.....	25
4. HARMONİKLER.....	26
4.1. Giriş	26
4.2. Harmonik Tanımlamalar	27
4.3. Harmoniklerden Kaynaklanan Karmaşık Dalga Formları.....	29
4.4. Harmonik Üreten Ekipman Türleri	31
4.4.1. Anahtarlama Mod Güç Kaynakları (SMPS)	31
4.4.2. Floresan Aydınlatma Balastları	32
4.4.3. Değişken Hızlı DC Sürücüler	32
4.4.4. Kesintisiz Güç Kaynakları(UPS).....	33
4.4.4.1. Çevrimiçi UPS.....	34
4.4.4.2. Çevrimdışı UPS	34
4.4.4.3. Çizgi Etkileşimli Teknoloji	34
4.4.5. Manyetik Özlü Cihazlar.....	35
4.5. Harmoniklerin Neden Olduğu Genel Sorunlar	35
4.5.1. Harmonik Akımların Neden Olduğu Problemler	36
4.5.1.1. Nötr İletkenlerin Aşırı Yüklenmesi	36
4.5.1.2. Transformatörlerin Aşırı Isınması	37
4.5.1.3. Devre Kesicilerin Arızalı Açılması	38
4.5.1.4. Güç Faktörü Düzeltme Kapasitörlerinin Aşırı Gerilmesi.....	39
4.5.1.4.1. Rezonans Problemlerinden Kaçınmak	39
4.5.1.5. Cilt Etkisi.....	40
4.5.2. Harmonik Gerilimlerden Kaynaklanan Problemler.....	40
4.5.2.1. Voltaj Bozulması	40
4.5.2.2. Endüksiyon Motorları.....	41
4.5.2.3 Sıfır Geçiş Gürültüsü	41
4.5.2.4. Arız Etkileyen Harmonik Problemler.....	42
4.6. Harmonikleri Azaltmak İçin Çözümler	42
4.6.1. Nötr Kablolamada Boy Ölçümü	42
4.6.2. Ayrı Nötr İletkenlerin Kullanımı	42
4.6.3. Harmoniklerden Etkilenmeyen DC Güç Kaynaklarının Kullanımı	43
4.6.4. Güç Dağıtım Bileşenlerinde K Dereceli Transformatör Kullanımı.....	43
4.6.5. Filtreleme.....	43
5. HARMONİK FİLTRE TASARIM YÖNTEMİ VE FİLTRELENMESİ.....	45
5.1. HARMONİK FİLTRE TASARIM YÖNTEMİ	45

5.1.1. Harmonik Filtre Modellenmesi	45
5.1.2. Harmonik Filtre Bankı kVAR Boyutu Belirleme.....	45
5.1.3. İlk Harmonik Filtre Ayarının Seçilmesi	45
5.1.4. Bileşen Belirleme	46
5.1.5. Harmonik Filtre Kondansatörleri.....	46
5.1.6. Harmonik Filtre Reaktörleri	48
5.1.7. Filtre Dirençleri	48
5.1.8. Devre Kesiciler	48
5.1.9. Geçici Anahtarları Değiştirme.....	49
5.2. HARMONİKLERİN FİLTRELENMESİ.....	49
5.2.1. Pasif Harmonik Filtreler	50
5.2.1.1. Seri Pasif Filtre	50
5.2.1.2. Paralel (Şönt) Pasif Filtre	51
5.2.1.2.1. Tek Ayarlı Filtreler.....	51
5.2.1.2.2. Çift Ayarlı Filtreler.....	52
5.2.1.2.3. Yüksek Geçişli Filtreler.....	53
5.2.2. Aktif Harmonik Filtreler.....	56
5.2.2.1. Şönt (Paralel) Aktif Güç Filtreleri.....	60
5.2.2.2. Seri Aktif Güç Filtreleri.....	61
5.2.2.3. Hibrit Aktif Güç Filtreleri	62
6. HARMONİK ANALİZİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER.....	65
6.1. Ölçme Yöntemi	65
6.2. Harmoniklerin Matematiksel Analizleri.....	65
6.2.1. Fourier Analizi.....	66
6.3. Harmonik Büyüklüklere Ait Temel Kavramlar.....	66
6.3.1. Distorsiyon (D).....	66
6.3.2. Toplam Harmonik Distorsiyon (THD).....	67
6.3.3. Toplam Talep Distorsiyon (TDD).....	68
6.3.4. Toplam Harmonik Faktör (THF).....	68
6.3.5. Güç Faktörü (PF).....	69
6.3.6. Tepe (Crest) Faktörü.....	69
6.3.7. Harmonik Spektrum	69
7. BULGULAR VE İNCELEME	70
7.1. Harmonik Analizinde Kullanılan Ölçüm Cihazları	70
7.1.1. Chauvin Arnoux Harmonik Analizörü	70

7.1.2. Entes MPR-63-21 Şebeke Analizörü.....	72
7.1.3. Entes RG3-12C Reaktif Güç Kontrol Rölesi.....	72
7.2. Harmonik Ölçümler ve Yorumlamalar.....	73
7.2.1. Kompanzasyon Panosu Ölçümleri.....	75
7.2.1.1. Tekstil Fabrikası Ölçümü	76
7.2.1.2. Plastik Fabrikası Ölçümü	88
7.2.1.3. Baskı Fabrikası Ölçümü	100
7.3. Pasif Filtre Tasarımı	118
8. TARTIŞMA VE SONUÇ	125
KAYNAKLAR.....	136
ÖZGEÇMİŞ	142

ÖZET

Bir ülkenin sosyal ve ekonomik olarak kalkınmasında en önemli destek unsurlarından biri hiç şüphesiz elektrik enerjisidir. Gelişen teknoloji, yükselen yaşam düzeyi ve artan nüfusla birlikte bu enerjiye olan gereksinim her geçen gün büyük ölçüde artmaktadır. Günümüzde elektrik güç sistemleri geniş bir alana yayılmakta ve enerji sistemine çok çeşitli yükler bağlanmaktadır. Bu tip elektrik yükleri doğrusal değildir. Doğrusal olmayan yükler, gerilim ve akım dalga biçimlerinin bozulmasına neden olur. Bunun sonucunda da güç sistemlerinde ek kayıplara, gerilim düşümlerine, rezonans olaylarına, ölçme ve kontrol sistemlerinin hatalı çalışmalarına, cezai durumlara gibi birçok istenmeyen sonuçlar oluşmaktadır. Bu durumların kontrol altına alınabilmesi için enerji kalitesi kavramı oluşturulmuş ve uluslararası standartlar oluşturularak bu sorunların yaşanmaması için tedbirler alınmıştır. Bu çalışmada, çeşitli bölgelerdeki tesislerin analizör yardımıyla ölçümleri yapılmış ve harmoniklerin enerji kalitesi üzerindeki olumsuz etkileri tespit edilerek uygun filtreleme örneği verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji verimliliği, Güç faktörü, Harmonik bozulma, Enerji kalitesi, Harmonik filtre

SUMMARY

The Effects of Reactive Power and Harmonics on Energy Efficiency

Undoubtedly, one of the most important support elements in the social and economic development of a country is electricity. Together with the developing technology, rising life level and increasing population, the need for this energy is increasing day by day. Nowadays, electrical power systems are spread over a wide area and various loads are connected to the energy system. Such electrical charges are non-linear. Non-linear loads cause distortion of voltage and current waveforms. As a result of this, many undesirable consequences occur in power systems such as additional losses, voltage drops, resonance events, faulty operation of measurement and control systems, and penal situations. In order to control these situations, the concept of energy quality has been established and international standards have been established and measures have been taken to prevent these problems. In this study, industrial machinery and equipments in various regions have been measured with the help of analyzer and the negative effects of harmonics on the energy quality have been determined and the appropriate filtering example has been given.

Key Words: Energy efficiency, Power factor, Harmonic distortion, Energy quality, Harmonic filter

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1. $Z\angle 0^\circ = R + j0$ Aktif Güç Fazör Gösterimi.....	14
Şekil 3.2. $Z\angle 90^\circ = 0 + jX$ Reaktif Güç Fazör Gösterimi	15
Şekil 3.3. Güç Üçgeni Gösterimi.....	16
Şekil 3.4. Harmonik filtre reaktörlü 5 kademedan oluşan kompanzasyon panosu tek hat gösterimi	25
Şekil 4.1. Temel frekans sinüs dalga formu	27
Şekil 4.2. Harmonik kaynaklı dalga formları	29
Şekil 4.3. Dengesiz akım sistemi grafiği	37
Şekil 5.1. Silindirik tip (Tüp) kondansatör ve iç yapısı.....	47
Şekil 5.2. Kutu tip kondansatör ve iç yapısı	47
Şekil 5.3. Harmonik filtre reaktörü.....	48
Şekil 5.4. Seri Pasif Filtre devre şeması	51
Şekil 5.5. Tek ayarlı filtre devre şeması ve empedans-frekans değişimi	52
Şekil 5.6. Tek ayarlı filtre devre şeması ve empedans-frekans değişimi	53
Şekil 5.7. Birinci, ikinci, üçüncü ve C tipi yüksek geçişli (sönümlü) filtreler	54
Şekil 5.8. Yüksek geçişli (sönümlü) filtrenin empedans-frekans değişimi	55
Şekil 5.9. Pasif harmonik filtre kompanzasyon panosu iç görünümü	56
Şekil 5.10. Doğrusal olmayan yük tarafından çekilen tüm harmonik akımları telafi eden şönt aktif filtrenin basitleştirilmiş şeması.....	58
Şekil 5.11. Seri aktif filtre dengeleme harmonikleri ve voltaj düşüşünün basitleştirilmiş şeması	59
Şekil 5.12. Birleşik güç kalitesi şartlandırıcısının basitleştirilmiş şeması (UPQC)	60
Şekil 5.13. Paralel aktif filtrenin prensip şeması	61
Şekil 5.14. Seri aktif filtrenin prensip şeması	62
Şekil 5.15. Hibrit pasif filtre yapılandırması	63
Şekil 5.16. Aktif filtre içyapısı	64
Şekil 7.2. Harmonik analizörü bağlantı şeması	71
Şekil 7.3. Şebeke analizörü bağlantı şeması.....	72
Şekil 7.4. Reaktif güç kontrol rölesi bağlantı şeması	73
Şekil 7.5. ADP ve kompanzasyon panosunun yanmış hali	74
Şekil 7.6. Kompanzasyon panosunun yanması sonucu köşkte oluşan hasar.....	74
Şekil 7.7. Tekstil fabrikasına ait tek hat şeması	76
Şekil 7.8. Tekstil fabrikasının kompanzasyon panosu görüntüsü	77
Şekil 7.9. Tekstil fabrikasına ait frekans grafiği.....	77

Şekil 7.10. Tekstil fabrikasına ait faz-nötr gerilim grafiği	78
Şekil 7.11. Tekstil fabrikasına ait faz-faz gerilim grafiği.....	78
Şekil 7.12. Tekstil fabrikasına ait akım grafiği	79
Şekil 7.13. Tekstil fabrikasına ait ortalama güç faktörü grafiği	79
Şekil 7.14. Tekstil fabrikasına ait toplam aktif güç grafiği	80
Şekil 7.15. Tekstil fabrikasına ait toplam reaktif güç grafiği	80
Şekil 7.16. Tekstil fabrikasına ait toplam görünür güç grafiği.....	81
Şekil 7.17. Tekstil fabrikasına ait toplam faz-faz gerilim harmonik bozulma oranı (THD _U) grafiği	81
Şekil 7.18. Tekstil fabrikasına ait toplam akım harmonik bozulma oranı (THD _I) grafiği ..	82
Şekil 7.19. Tekstil fabrikasına ait toplam faz-nötr harmonik bozulma oranı (THD _V) grafiği	82
Şekil 7.20. Tekstil fabrikasına ait akım dengesizliği.....	83
Şekil 7.21. Tekstil fabrikasına ait akım crest faktörü grafiği	83
Şekil 7.22. Tekstil fabrikasına ait faz-faz gerilim crest faktörü grafiği.....	84
Şekil 7.23. Tekstil fabrikasına ait faz-nötr gerilim crest faktörü grafiği	84
Şekil 7.24. Tekstil fabrikasına ait akım spektrumu (2.harmonik-4.harmonik arası).....	85
Şekil 7.25. Tekstil fabrikasına ait akım spektrumu (5.harmonik-10.harmonik arası).....	85
Şekil 7.26. Tekstil fabrikasına ait akım spektrumu (11.harmonik-16.harmonik arası)	86
Şekil 7.27. Tekstil fabrikasına ait akım spektrumu (17.harmonik-21.harmonik arası)	86
Şekil 7.28. Tekstil fabrikasına ait akım spektrumu (22.harmonik-25.harmonik arası)	86
Şekil 7.29. Tekstil fabrikasına ait gerilim spektrumu (2.harmonik-4.harmonik arası)	86
Şekil 7.30. Tekstil fabrikasına ait gerilim spektrumu (5.harmonik-10.harmonik arası)	87
Şekil 7.31. Tekstil fabrikasına ait gerilim spektrumu (11.harmonik-16.harmonik arası) ...	87
Şekil 7.32. Tekstil fabrikasına ait gerilim spektrumu (17.harmonik-21.harmonik arası) ...	87
Şekil 7.33. Plastik fabrikasına ait tek hat şeması.....	88
Şekil 7.34. Plastik fabrikasının kompanzasyon panosu görüntüsü.....	89
Şekil 7.35. Plastik fabrikasına ait frekans grafiği.....	89
Şekil 7.36. Plastik fabrikasına ait faz-nötr gerilim grafiği	90
Şekil 7.37. Plastik fabrikasına ait faz-faz gerilim grafiği.....	90
Şekil 7.38. Plastik fabrikasına ait akım grafiği.....	91
Şekil 7.39. Plastik fabrikasına ait ortalama güç faktörü grafiği	91
Şekil 7.40. Plastik fabrikasına ait toplam aktif güç grafiği	92
Şekil 7.41. Plastik fabrikasına ait toplam reaktif güç grafiği	92
Şekil 7.42. Plastik fabrikasına ait toplam görünür güç grafiği	93

Şekil 7.43. Plastik fabrikasına ait toplam faz-faz gerilim harmonik bozulma oranı (THD_U) grafiği	93
Şekil 7.44. Plastik fabrikasına ait toplam akım harmonik bozulma oranı (THD_I) grafiği ..	94
Şekil 7.45. Plastik fabrikasına ait toplam faz-nötr gerilim harmonik bozulma oranı (THD_V) grafiği	94
Şekil 7.46. Plastik fabrikasına ait akım dengesizliği	95
Şekil 7.47. Plastik fabrikasına ait akım crest faktörü grafiği	95
Şekil 7.48. Plastik fabrikasına ait faz-faz gerilim crest faktörü grafiği	96
Şekil 7.49. Plastik fabrikasına ait faz-nötr gerilim crest faktörü grafiği	96
Şekil 7.50. Plastik fabrikasına ait akım spektrumu (2.harmonik-4.harmonik arası)	97
Şekil 7.51. Plastik fabrikasına ait akım spektrumu (5.harmonik-10.harmonik arası)	98
Şekil 7.52. Plastik fabrikasına ait akım spektrumu (11.harmonik-16.harmonik arası)	98
Şekil 7.53. Plastik fabrikasına ait akım spektrumu (17.harmonik-21.harmonik arası)	98
Şekil 7.54. Plastik fabrikasına ait akım spektrumu (22.harmonik-25.harmonik arası)	98
Şekil 7.55. Plastik fabrikasına ait gerilim spektrumu (2.harmonik-4.harmonik arası)	99
Şekil 7.56. Plastik fabrikasına ait gerilim spektrumu (5.harmonik-10.harmonik arası)	99
Şekil 7.57. Plastik fabrikasına ait gerilim spektrumu (11.harmonik-16.harmonik arası) ...	99
Şekil 7.58. Plastik fabrikasına ait gerilim spektrumu (17.harmonik-21.harmonik arası)	99
Şekil 7.59. Plastik fabrikasına ait gerilim spektrumu (22.harmonik-25.harmonik arası)	99
Şekil 7.60. Baskı fabrikası 1.trafoya ait tek hat şeması	101
Şekil 7.61. Baskı fabrikasının kompanzasyon panosu görüntüsü	102
Şekil 7.62. Baskı fabrikası 1.trafoya ait frekans grafiği	102
Şekil 7.63. Baskı fabrikası 1.trafoya ait faz-nötr gerilim grafiği	103
Şekil 7.64. Baskı fabrikası 1.trafoya ait faz-faz gerilim grafiği	103
Şekil 7.65. Baskı fabrikası 1.trafoya ait akım grafiği	104
Şekil 7.66. Baskı fabrikası 1.trafoya ait ortalama güç faktörü grafiği	104
Şekil 7.67. Baskı fabrikası 1.trafoya ait toplam aktif güç grafiği	105
Şekil 7.68. Baskı fabrikası 1.trafoya ait toplam reaktif güç grafiği	105
Şekil 7.69. Baskı fabrikası 1.trafoya ait toplam görünür güç grafiği	106
Şekil 7.70. Baskı fabrikası 1.trafoya ait toplam faz-faz gerilim harmonik bozulma oranı (THD_U) grafiği	106
Şekil 7.71. Baskı fabrikası 1.trafoya ait toplam akım harmonik bozulma oranı (THD_I) grafiği	107
Şekil 7.72. Baskı fabrikası 1.trafoya ait toplam faz-nötr gerilim harmonik bozulma oranı (THD_V) grafiği	107
Şekil 7.73. Baskı fabrikası 1.trafoya ait akım dengesizliği	108

Şekil 7.74. Baskı fabrikası 1.trafoya ait akım crest faktörü grafiği.....	108
Şekil 7.75. Baskı fabrikası 1.trafoya ait faz-faz gerilim crest faktörü grafiği	109
Şekil 7.76. Baskı fabrikası 1.trafoya ait faz-nötr gerilim crest faktörü grafiği.....	109
Şekil 7.77. Baskı fabrikası 1.trafoya ait akım spektrumu (2.harmonik-4.harmonik arası)	110
Şekil 7.78. Baskı fabrikası 1.trafoya ait akım spektrumu (5.harmonik-10.harmonik arası)	111
Şekil 7.79. Baskı fabrikası 1.trafoya ait akım spektrumu (11.harmonik-16.harmonik arası)	111
Şekil 7.80. Baskı fabrikası 1.trafoya ait gerilim spektrumu (2.harmonik-4.harmonik arası)	111
Şekil 7.81. Baskı fabrikası 1.trafoya ait gerilim spektrumu (5.harmonik-10.harmonik arası)	111
Şekil 7.82. Baskı fabrikası 2.trafoya ait tek hat şeması.....	113
Şekil 7.83. Baskı fabrikası 2.trafoya ait toplam faz-faz gerilim harmonik bozulma oranı (THD _U) grafiği.....	114
Şekil 7.84. Baskı fabrikası 2.trafoya ait toplam akım harmonik bozulma oranı (THD _I) grafiği	115
Şekil 7.85. Baskı fabrikası 2.trafoya ait toplam faz-nötr gerilim harmonik bozulma oranı (THD _V) grafiği.....	115
Şekil 7.86. Baskı fabrikası 2.trafoya ait akım spektrumu (2.harmonik-4.harmonik arası)	116
Şekil 7.87. Baskı fabrikası 2.trafoya ait akım spektrumu (5.harmonik-10.harmonik arası)	116
Şekil 7.88. Baskı fabrikası 2.trafoya ait akım spektrumu (11.harmonik-16.harmonik arası)	116
Şekil 7.89. Baskı fabrikası 2.trafoya ait akım spektrumu (17.harmonik-22.harmonik arası)	116
Şekil 7.90. Baskı fabrikası 2.trafoya ait gerilim spektrumu (2.harmonik-4.harmonik arası)	117
Şekil 7.91. Baskı fabrikası 2.trafoya ait gerilim spektrumu (5.harmonik-11.harmonik arası)	117
Şekil 7.92. Tasarıma uygun harmonik filtreli kompanzasyon panosu üç hat gösterimi-1	122
Şekil 7.93. Tasarıma uygun harmonik filtreli kompanzasyon panosu üç hat gösterimi-2	123
Şekil 8.1. Toplam harmonik gerilim distorsiyonun aktif filtreyle değişimi	132
Şekil 8.2. 3. harmoniğin aktif filtrelemede devre dışı bırakılma durumu	133
Şekil 8.3. 3. harmoniğin aktif filtrelemede devrede olması durumu	133
Şekil 8.4. Toplam harmonik akım distorsiyonun aktif filtreyle değişimi.....	134
Şekil 8.5. 3. harmoniğin aktif filtrelemede devre dışı bırakılma durumu	134
Şekil 8.6. 3. harmoniğin aktif filtrelemede devrede olması durumu	135

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Güç kalitesi birimleri ve tanımlamaları.....	11
Tablo 3.1. Güç faktörünün transformatör güç çıkışındaki etkisi.....	21
Tablo 3.2. Güç faktörünün transformatör güç çıkışındaki etkisi.....	22
Tablo 4.1. Harmonik sıralama	31
Tablo 4.2. Harmonik sıralama etkileri.....	31
Tablo 5.1. UPQC işlevleri	60
Tablo 7.1. Tekstil fabrikasına ait DPF, PF ve Tanjant değerleri	85
Tablo 7.2. Plastik fabrikasına ait DPF, PF ve Tanjant değerleri	97
Tablo 7.3. Baskı fabrikası 1.trafoya ait DPF, PF ve Tanjant değerleri	110
Tablo 7.4.Baskı fabrikası 2.trafoya ait grafik değerleri.....	114
Tablo 8.1. Baskı fabrikası 1. trafoya ait pasif harmonik filtreli kompanzasyon panosunun maliyeti	128
Tablo 8.2. Baskı fabrikası 2.trafoya ait pasif harmonik filtreli kompanzasyon panosunun maliyeti	130
Tablo 8.3. Aktif filtrenin maliyeti	132

KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım
ADP	: Ana Dağıtım Panosu
DC	: Doğrusal Akım
DVR	: Dinamik Voltaj Düzeltici
EMI	: Elektromanyetik Paraziti
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
HBP	: Hibrit Pasif Filtre
HVDC	: Doğru Akım Enerji İletim Sistemi
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
MCB	: Minyatür Devre Kesicisi
PCC	: Ortak Bağlantı Noktası
PF	: Güç Faktörü
PFC	: Güç Faktörü Düzeltme
RCCB	: Akım Devre Kesicisi
SMPS	: Anahtarlama Mod Güç Kaynağı
SPF	: Seri Tip Pasif Filtre
TDD	: Toplam Talep Distorsiyonu
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
TCPF	: Tristör Kontrollü Paralel Pasif Filtre
THD	: Toplam Harmonik Distorsiyon
THD _I	: Akımın Toplam Harmonik Distorsiyonu
THD _u	: Gerilimin Toplam Harmonik Distorsiyonu
THF	: Toplam Harmonik Faktör
UPS	: Kesintisiz Güç Kaynağı
VA	: Volt Amper
VAR	: Volt Amper Reaktif
VSD	: Değişken Hızlı Sürücü

SİMGELER

C	: Kapasitans, Kondansatör
C_f	: Tepe Faktörü
$\cos\phi$	: Aktif Güç Çarpanı, Güç Faktörü
D	: Distorsiyon Gücü
f	: Frekans
f_r	: Rezonans Frekansı
I	: Akım
I_1	: Devreden geçen akımın temel frekanstaki etkin değeri
I_h	: Devreye uygulanan akımın n. mertebedeki harmoniğinin etkin değeri
I_{THD}	: Harmonikteki Toplam Akım Bozulması
L	: Endüktans (Bobin)
L_{fp}	: İndüktör filtresi
P	: Gerçek, Aktif Güç
PF	: Güç Faktörü
R	: Direnç
RMS	: Efektif değeri
S	: Görünür Güç
U_h	: Devreye uygulanan gerilimin n. mertebedeki harmoniğinin etkin değeri
U_1	: Devreye uygulanan gerilimin temel frekanstaki etkin değeri
V	: Gerilim
V_{DC}	: DC Hat Voltajı
V_s	: Şebeke Voltajı
V_{THD}	: Harmonikteki toplam gerilim bozulması
Z	: Empedans
Z_{fp}	: Pasif filtre
W	: Watt
Q	: Reaktif Güç, Kalite faktörü
ϕ	: Faz Açısı
ω	: Açısal Hız

1. GİRİŞ

Bir ülkenin sosyal ve ekonomik olarak kalkınmasında en önemli destek unsurlarından biri hiç şüphesiz elektrik enerjisidir. Gelişen teknoloji, yükselen yaşam düzeyi ve artan nüfusla birlikte bu enerjiye olan gereksinim her geçen gün büyük ölçüde artmaktadır. Bu ülkeler gelişmişliklerini, kaynaklarını (ister yerli ister ithal ederek) verimli ve doğru kullanarak ürettikleri elektrik enerjisinden faydalanmalarına borçludurlar. Günümüzde elektrik güç sistemleri geniş bir alana yayılıyor ve enerji sistemine çok çeşitli yükler bağlanmaktadır. Güç sistemlerinin planlanması ve yönetimi sırasında, güç sistemine bağlı yük özelliklerinin doğru belirlenmesi çok önemlidir. Böylece ortaya çıkabilecek güç sistemi problemleri önceden belirlenebilir ve bunlara karşı önlemler alınabilir. Elektrik dağıtım sistemlerinde meydana gelebilecek bir arızadan dolayı tüketicilerin etkilenmesi, üretim ve iletim sistemlerinde meydana gelebilecek arızalardan daha da önemlidir. Elektronik anahtarlama cihazlarının modern üretim tesislerinde kullanımının artması ile birlikte, elektrik sistemi güç kalitesi için yeni endüstriyel standartlar getirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Elektrik gücünün kalitesi, cihazların verim, titreşim, ses gücü seviyeleri ve beklenen ömür açısından performansını doğrudan etkilemektedir.

Tüm dünyada enerji verimliliğini denemek ve arttırmak için birçok çaba gösterilmektedir. En büyük sorunlardan biri gereksiz ve aşırı enerji kullanımıdır. Enerji verimliliği ne kadar az enerji harcayabileceğinizle ilgili değil, enerji talebi ile enerji arzı arasında denge kurmakla ilgili olabilir. Enerji verimliliği, enerji tüketimindeki büyümeyi yönetmenin ve sınırlamanın bir yoludur[1].

Günümüzde alçak gerilim elektrik enerjisi kalitesindeki sorunlar giderek endişe verici problemler yaratmakta ve güç kalitesinden kaynaklanan şikâyetler giderek artmaktadır. Enerji kesilmeleri, ani gerilim yükselmeleri ve düşmeleri, iklim şartlarından kaynaklanan hatalar, elektrik enerjisinin ayarlanması ve dönüştürülmesi için kullanılan doğrusal olmayan alıcılar (bilgisayarlar, yüksek frekans kaynakları, anahtar modu güç kaynakları, elektronik balastlı lambalar, AC (Alternatif Akım) motorlu inverter sürücüler ve kesintisiz güç kaynakları gibi) çeşitli problemler ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, alçak gerilim sistemlerinde koruma cihazları gereksiz açmakta, otomatik kontrol sistemleri etkilenmekte, elektrik arkları oluşmakta ve aşırı harmonikler güç kalitesini bozarak elektriğin verimli kullanımını engellemektedir[2].

Bu tip elektrik yükleri doğrusal değildir. Doğrusal olmayan yükler, AC gücünde gerilim ve akım dalga biçimlerinin bozulmasına neden olur, bu da bir AC güç sisteminde harmonik akımların akışını ve voltaj bozulmalarına neden olmaktadır. Harmonik içeren devrelerde akı, akım ve gerilim gibi temel elektriksel büyüklüklerin sinüs eğrisi şeklindeki yapısı bozularak, temel frekansın tam sayı katlarıyla orantılı istenmeyen dalga şekilleri oluşur. Bu güç kalitesi sorunları iletişim devreleriyle etkileşime neden olabilir. AC motorlarda aşırı ısınma ve titreşim; transformatörlerde, şalt ürünlerinde ve güç kablolarında kayıplar meydana getirebilmektedir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi oluşabilecek güç kalitesi sorunlarını engellemek ve güç faktörünü arttırmak için pasif filtre ve aktif filtreler kullanılmaktadır. Ancak filtreleme tercih ederken ani yük değişimleri, doğrusal olmayan yüklerin oranı (harmonik dereceleri), rezonans riskleri kompanzasyon yapısına uygun seçilmelidir.

Ülkemizde reaktif güç kompanzasyonu ile ilgili bir takım yasal sınırlandırmaları zorunluluk haline getirilmiştir. Kullanıcılar tarafından bu sınırlamalara uyulmadığında cezai durumlar oluşabilmektedir. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) tarafından 29013 sayılı ve 28 Mayıs 2014 tarihinde resmi gazetede yayımlanan Elektrik Şebeke Yönetmeliğinin 9. maddesindeki sınırlamalar 22 Nisan 2017 tarihinden itibaren 30046 sayılı resmi gazetede “Elektrik Şebeke Yönetmeliğinde değişiklik yapılmasına ilişkin yönetmelik” yayımlanarak elektrik şebekelerindeki kompanzasyon ihtiyacı sınırlamaları düzenlenmiştir. Bu yönetmeliğe göre;

“İletim sistemine doğrudan bağlı tüketiciler ve dağıtım lisansına sahip tüzel kişiler tarafından; aylık olarak sistemden çekilen endüktif reaktif enerjinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranı yüzde yirmiyi, aylık olarak sisteme verilen kapasitif reaktif enerjinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranı ise yüzde onbeşi geçemez”[3].

Uluslararası Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE 519-1992) standartlarına göre harmonik bozulma değerleri; Toplam Harmonik Akım Bozunumu (THD_i) %5, Toplam Harmonik Gerilim Bozunumu (THD_u) %3’ün altında olması gerekmektedir[4].

Avrupa güç kalitesi araştırma raporuna göre 25 Avrupa Birliği ülkelerinde meydana gelen güç kalitesi sorunlarının maliyeti yaklaşık olarak yıllık 150 milyar €’dur. Bu değer, güç kalitesi problemlerinin neden olduğu maliyetin boyutunu göz önüne sermektedir. 150 milyar € tutarındaki maliyetin %29’u darbe gerilimleri ve gerilim yükselmelerinden,

%23,6'sı gerilim çökmelerinden, %18,8'i kısa kesintilerden, %12,5'i uzun kesintilerden, %10,7'si diğer problemlerden ve %5,4'ü harmoniklerden kaynaklanmaktadır[4].

Sanayileşmiş bazı ülkelerde akım harmonik bozulma oranı yüzde 6'nın üzerine çıktığında dağıtım şirketleri hiç haber vermeden enerjiyi kesebiliyor. Bu sistemi en iyi uygulayan ülke Almanya'dır. Almanya, eğer harmonikten dolayı aynı trafodan beslenen diğer aboneler şikâyetçi olurlarsa ve dağıtım şirketi bunu tespit ederse problemin çözümü için harmonik yaratan aboneye 1 ay süre vermektedir. Bu sistem, 10 yılı aşkın süredir istikrarlı bir şekilde uygulanmaktadır[4-5].

Türkiye Elektrik İletim Sistemi'nin genelinde, ilgili yönetmeliklere göre, hem akım hem de gerilimde 5. harmonik problemi olduğu gözlenmiştir[5].

Elektrik şebekesinin ve tesislerinin güvenliği açısından, sistemler tasarlanırken bu değerler göz önünde bulundurularak, harmonik kompanzasyon işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ülkemizde henüz tüketiciler açısından harmonik sınırlamalarla ilgili herhangi bir cezai yaptırım bulunmamaktadır. Ancak TEİAŞ, TÜBİTAK bu konu hakkında son yıllardaki en önemli projelerden birisi olan “Güç Kalitesi Milli Projesi”ni hayata geçirerek güç kalitesi iyileştirme konusuna önemli bir katkı sağlamışlardır[6].

1.1.Tezin Amacı

Güç faktörü ve harmonikler, enerji verimliliği üzerindeki etkileri nedeniyle, elektrik tesisatlarının yönetimi için dikkate alınması gereken önemli konulardır. Enerjinin verimli kullanılması için en önemli yöntemlerden bir tanesi de reaktif güç kompanzasyonu yapmaktır.

Bu tez çalışmasında, enerji verimliliği, reaktif güç kompanzasyonu, şebekedeki harmonikler, harmoniklerin sisteme ve iletkenlere etkileri, harmonik kaynaklar, harmonik filtreleme yöntemleri ve filtre çeşitleri gibi konular üzerinde değinilmiş olup matematiksel modellemeden de bahsedilmiştir.

Ayrıca yüklerin güç sisteminde oluşan harmoniklerin azaltılması ve en uygun filtreleme optimizasyonunun uygulanması için, taşınabilir harmonik analizör ile ölçüm yapılarak; rezonans frekanslarının detaylı analizi, gerilim ve akım toplam harmonik bozulma oranları, şebekeden çekilen akım, gerilim, toplam güç grafikleri, akım spektrumları incelenerek uygun harmonik filtre seçilmiştir.

Elde edilen sonuçlar tartışılmış ve verimlilik üzerinde durulmuştur.

1.2.Kullanılacak Yöntem

Reaktif güç kompanzasyonu, endüktif yüklerde kondansatör, kapasitif yüklerde endüktif reaktör yardımıyla güç kalitesini arttırmada en etkili yöntemdir. Reaktif güç kompanzasyonu ile istenilen güç faktörü seviyesine getirilerek güç kalitesi yükseltilir. Bu sayede arızalar ve kayıplar en düşük seviyede tutulur.

Harmonik kompanzasyonu, elektrik cihazlarının teçhizatlarındaki değişikliklerle yapılacağı gibi filtreler ile de yapılmaktadır. Fakat en verimli sonuçlar filtre kullanılmasıyla elde edilmektedir.

Geçtiğimiz son birkaç yılda elektrik dağıtım sistemlerindeki, tüketici baralarındaki ve belirli tipteki binalarda kullanılan donanımlardaki harmonik akım ve gerilimlerle ilgili Kawamoto ve arkadaşları çok sayıda araştırma yapmışlardır[7-8].

Bu çalışmada Chauvin Arnoux enerji analizörü yardımıyla elde edilen veriler doğrultusunda endüstriyel tesislerde nonlinear yükler sebebiyle meydana gelen harmonik bozulmaların pasif filtre yardımıyla harmoniklerden arındırılmasına yönelik uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

1.3.Kaynak Araştırması

ABB Elektrik (2010) yayınlamış olduğu teknik yazıda; güç faktörü düzeltmesinin tanımından başlayarak, teknik-ekonomik avantajların analizinden ve güç faktörü düzeltmesini elde etmek için formları ve çeşitlerin tanımlanmasından bahsetmiştir. Ayrıca, harmonik, harmonik bileşenler, kullanım alanları, ölçüm değerleri, kondansatör, filtre, reaktif güç kompanzasyonu ile verimliliğin bağlantısını ele almıştır. Dahası, lineer olmayan yüklerden oluşan mevcut harmoniklerin hem pasif hem de aktif filtrelemesi için bazı çözümler verilmiştir[9].

Doğan (2017) yapmış olduğu seminerde; enerji verimliliği, güç sorunları, reaktif güç kompanzasyonu, harmonik ve harmonik kaynakları, pasif harmonik filtreleme, aktif harmonik filtreleme konuları anlatılmıştır ve reaktif güç kompanzasyonuna ait tüm tesisat elemanları hakkında soru cevap yapılmıştır[10].

Adak (2003) çalışmasında; harmonikleri, harmoniklerin filtrelenmesi, harmonik bozulmalarının giderilmesi konularını araştırmıştır. Harmonik bozulmaların azaltılması için üçüncü enjekte yöntemini kullanmıştır. Enerji sistemlerinde sürekli kullanılmakta olan

3 fazlı tam dalga doğrultucunun harmoniklerinin giderilmesi bu yöntem ile sağlanmıştır[11].

Akbal (2011) çalışmasında; reaktif güç kompanzasyonu ve harmoniklerin filtreleme yöntemini incelemiş ve harmonik analizörü ile yaptığı ölçümler ile harmonikleri azaltmak için pasif filtre tasarlamış ve simülasyon ile uygunluğunu denetlemiştir[12].

Ataç (2004) yayınında; Kesintisiz Güç Kaynaklarının güç kalitesine etkisi hakkında bilgiler verilmiştir. Güç kalitesinden dolayı oluşan kayıpları düzeltmek için yapılması gereken önlemler sırasıyla bahsedilmiş ve toplam harmonik bozulma oranları hakkında bilgiler verilmiştir[13].

Avcı (2008) çalışmasında; akım kaynaklı aktif güç filtrelerinin çalışma prensipleri ve yapısı açıklanmıştır. Akım harmoniklerinin elenmesi, reaktif güç kompanzasyonu ve dengesiz akımların dengelenmesi gibi güç kalitesi problemlerinin çözümünde kullanılan paralel aktif güç filtrelere değinilmiştir[14].

Bayliss ve Hardy (2011) çalışmalarında harmoniklerin doğası, üretimi, etkileri, sınırlandırılması, ferorezonans olayları ve harmonik çalışmalar gibi konularda detaylı bilgiler verilmiştir[15].

Bilge (2008) çalışmasında; elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen en önemli etken harmonik nedenler hakkında bilgi vermiş ve güç analizörü ile harmonik ölçümü yapmıştır. İlave olarak pasif filtreleme yöntemi uygulamış ve devreye aldıktan sonra tekrar ölçüm yaparak, elde ettiği akım ve gerilim toplam bozulmaları MATLAB simülasyonu yapmıştır[16].

Demirkol (2006) çalışmasında; reaktif güç kompanzasyonunun tanımı, harmoniklerin şebeke üzerindeki etkisi, gerilim düşümleri, frekans bozukluğu etki etkenleri incelemiştir[17].

Efe (2006) yayınladığı makalede; güç sistemlerinde ve endüstriyel tesislerdeki harmoniklerin analizi yapılmış, MATLAB/PSPICE kullanılarak pasif filtre tasarlanmış ve güç elektroniği üzerindeki etkileri incelenmiştir[18].

Ekiz ve Tümay (2003) yayınladıkları makalede; bir fabrikanın harmonik analizör ile ölçümünü yaparak harmoniklerin simülasyonunu yapmışlardır[19].

Eroğlu (2009) çalışmasında; enerji kalitesine ilişkin genel bilgiler vermiştir. Harmonikler hakkında detaylı bilgiler ve filtreleme yöntemleri incelenmiştir. Ayrıca, dağıtım şebekesinde güç analizörü ile yapılan ölçümde harmonik değerler hakkında bilgiler verilmiştir[20].

Erol (2011) çalışmasında; bir orta gerilim şebekesinde uygulanan güç kompanzasyonunun enerji kalitesine etkileri incelemiştir. Bu çalışmada değişik güçlere sahip orta gerilim motorlarına uygulanan güç kompanzasyon sistemi kullanılmıştır. Orta gerilimde ölçüm yapma kabiliyetine sahip bir şebeke analizör cihazı ile kompanzasyon sisteminin şebekeye etkilerinin grafiksel analizi yapılmıştır[21].

Ertay (2012) çalışmasında; güç kalite standartları, harmonik bozulma sınırları hakkında bilgiler verip, pasif filtre devre yapılandırması, tasarımı ve örnek sistem incelenmiştir[22].

Filiz (2006) çalışmasında; harmoniklerin sistem üzerine etkileri, standartlar, harmonik üreten kaynaklar, harmoniklerin matematiksel analizi gibi konular incelenmiştir. Harmoniklerin azaltılması konusunda detaylı filtreleme yöntemlerinden bahsedilmiştir. Ayrıca, yaptığı araştırmalar eşliğinde alınması gereken önlemlerden bahsedilmiştir[23].

Gencer vd. (2003) yazdıkları makalede; elektrik sistemlerindeki harmoniklerin güç faktörü üzerinde oluşturduğu bozulmaları incelemiş ve istenilen güç faktöründeki çalışmaların faydalarını anlatmışlardır[24].

Khan vd. (2009) yazdıkları kitapta; güç sistemi harmonik sinyallerinin tanımlanması, sınıflandırılması, ölçülmesi ve azaltılması, kamu hizmetleri, tüketiciler ve üreticiler üzerindeki etkilerinden bahsetmiştir. Bahsetmiş olduğu konuları, MATLAB ve Elektriksel Geçici Analiz Programı (ETAP) gibi matematiksel modellemeyi bu araştırmayı yaparken kullanmıştır. Harmoniklerle ilgili deneysel çalışma ve simülasyon yaparak, kapsamlı bir şekilde anlatılmak istenmiştir[25].

Kocatepe vd. (2005) yayınladıkları çalışmada; farklı yapıdaki harmonikli devreler için güç faktörüne bağlı olarak güçlerin nasıl değişim gösterdiklerini incelemiştir. Ayrıca nonsinüsoidal kaynaktan beslenen devrede kapasitif ve endüktif elemanların olmasında değişecek güçler analiz edilmiştir[26].

Kürker vd. (2016) yayınladıkları dergi çalışmasında; lazer torna tezgâhı, CNC dik torna makinası ve endüksiyon eritme ocağına sahip bir tesiste güç analizörü ile sisteme ait akım, gerilim ve güç gibi parametreleri kaydetmişlerdir. Elde edilen veriler bilgisayara aktararak güç analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde, akım ve gerilim harmonikleri incelenmiş, akım ve gerilim harmoniklerinin sistemde ne kadar kayıp meydana getirdiği hesaplanmıştır[27].

Olçay (2018) çalışmasında; elektrik sistemlerinde oluşan harmonikler ve nedenlerini araştırarak giderme yöntemlerini incelemiştir. Harmonik filtre tasarımı hakkında bilgiler

verilmiş ve kompanzasyon sistemleri ile birlikte kullanımı anlatılmıştır. Ayrıca harmonik filtreli kompanzasyon sistemlerinde filtre tasarımında gerekli değerlerin hesaplanması konusunda örneklemeler yapılmış ve harmonik filtrenin kompanzasyon sistemi ile birlikte kullanımında ortaya çıkacak sorunlar, dikkat edilmesi gereken durumlar ve fayda sağlayacak noktalar detaylı bir şekilde anlatılmıştır[28].

Owen (1998) çalışmasında; güç sistemlerinde harmoniklerin ilk defa fark edilmesinden günümüze kadar oluşan süreç hakkında değerlendirme yapmıştır[29].

Özcan (2006) çalışmasında; güç kalitesi, harmonikler, harmonik üreten elemanlar, ulusal ve yerel standartlar gibi konulardan bahsedilmiştir. Ayrıca, endüstriyel tesislerde oluşabilecek harmonikler hakkında bilgiler verip, harmoniklerin önemini vurgulamıştır. Farklı fabrikalarda ve farklı noktalardan ölçümler yaparak, yaptığı ölçümleri karşılaştırarak; ilerde kurulacak yeni endüstriyel kuruluşlarda yatırım ve maliyet açısından değerlendirerek bilgilendirmeler yapmıştır[30].

Özdemir (2009) yayınında; elektrik enerji kalitesi hakkında detaylı bilgiler verilmiş olup enerji kalitesine etki eden bileşenler anlatılmıştır. Ayrıca enerji kalitesinin neden olduğu tipik problemler ve bunların nedenleri açıklanmakta ve enerji kalitesinin iyileştirmeye yönelik önlemler anlatılmaktadır[31].

Özer (2011) çalışmasında; reaktif güç kompanzasyonu ve harmonik filtreleme ile harmonik bozulmalara uğramış sistemler üzerinde etkileri incelenmiştir. Bu incelemeler ölçümler ile gerçek veriler grafiklerle oluşturulmuştur[32].

Rao vd. (1998) makalesinde; sistemde bulunan harmoniklerin kondansatörler üzerindeki etkilerini incelemiş ve harmonik etkilerden dolayı oluşan rezonansın simülasyonu yapılmıştır[33].

Rüstemli vd. (2013) makalesinde; bir tesiste güç analizörü gibi yapılan ölçümler ile güç kalitesine etki eden harmonikler incelenmiş, harmoniklerin tesis üzerindeki etkileri yorumlanmış, aktif filtre ile çözüm sağlanmış ve uygun olan filtreleme ile simülasyon karşılaştırılmıştır[34].

Sahoo vd. (2018) çalışmalarında; harmonik bozulmaların etkileri, IEEE harmonik standartlar, Adaptif filtre ile değişen güç kalitesi olaylarının takip edilmesi, matematiksel modellerle anlatılmış olup MATLAB simülasyonu uygulanarak üçüncü, beşinci gibi harmonik dereceleri analiz etmişlerdir[35].

Sevgi (2005) çalışmasında; güç kalitesine etki eden harmonik etkenlerin analizini detaylı olarak incelemiştir[36].

Vardar vd. (2010) çalışmalarında; enerji verimliliği ve elektrik enerjisinde verimliliğin uygulama alanları hakkında bilgiler vermiş ve bunun yanında reaktif güç kompanzasyonu ile verimliliğin bağlantısına değinmişlerdir. Yapılacak uygulamalarla elde edilecek kazançlar gösterilmiştir. Reaktif güç katsayısının düzenlenmesi alanıyla ilgili basit çalışmalar sonucu yüksek kazançlar elde edilebileceği üzerine kamudan örneklerden yararlanmışlardır[37].

Zobaa vd. (2018) yayınladıkları kitapta; güç kalitesi olaylarından bahsetmiş ve güç kalitesinden kaynaklanan rahatsızlıkları detaylı olarak açıklamış ve çözümler hakkında bilgiler vermiştir. Ayrıca, tek fazlı şebekeye bağlı PV invertöründe neden harmonik bozulma olduğu ve harmonik filtreleme olan aktif güç filtresi hakkında detaylı bilgiler vermektedir[38].

1.4.Tezin Yapısı

Bu tez çalışması 8 bölümden oluşmaktadır;

Birinci bölümde; Giriş, tez çalışmasının amacı, kullanılacak yöntem ve kaynak araştırılmasının anlatıldığı bölümdür.

İkinci bölümde; Elektrik enerjisinde güç kalitesine dair bilgiler verilmiş olup, güç kalitesinin öneminden bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde; Reaktif güç kompanzasyonu hakkında detaylı bilgiler verilmiş ve güç çeşitleri, güç faktörünün önemi, reaktif güç kaynakları ve kompanzasyon elemanları gibi dikkat edilmesi gereken kompanzasyon gereksinimleri hakkında anlatımlar yapılmıştır.

Dördüncü bölümde; Harmoniklerin ne olduğu, harmoniklerden kaynaklanan dalga formları, harmonik üreten cihazlar, harmoniklerin oluşturabileceği sorunlar gibi harmonik hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

Beşinci bölümün birinci kısmında, harmonik filtre tasarımı esnasında bilinmesi gereken bilgiler verilmiş olup; ikinci kısmında ise çeşitli harmonik filtrelere; pasif ve aktif filtreler ve bu filtrelerin avantajları, dezavantajları, uygulama alanları hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca aktif, pasif, hibrit ve birleşik güç kalite düzenleyici filtrelerden oluşan farklı filtre özellikleri ve çalışma prensipleri anlatılmıştır.

Altıncı bölümde; Endüstriyel tesislerde harmonik ölçümlerin nasıl yapıldığını ve ölçümler yapılırken hangi yöntemlerin kullanıldığının anlatıldığı bölümdür.

Yedinci bölümde; Türkiye’de farklı sektörlerde faaliyet gösteren endüstriyel tesislerin enerji problemlerini azaltmak, enerji verimliliğinin sürekliliğini sağlamak ve gelecekte kurulacak yeni tesislerin kompanzasyon panosu seçiminde ve tasarımında; harmonik analizör ile ölçümler yapılmış, sonuçları değerlendirilmiş ve uygun tasarımlardan bahsedilmiştir.

Sekizinci bölümde; Tez çalışması boyunca tüm bölümlerde anlatılan bilgiler ve yapılan ölçümler sonucunda ortaya çıkan verilerin uluslararası IEEE standartları çerçevesinde karşılaştırıldığı bölümdür.



2.ELEKTRİK SİSTEMLERİNDE GÜÇ KALİTESİ

2.1. Güç Kalitesi Nedir?

Elektrik enerjisi dağıtım sistemindeki, elektrik üretimi, iletimi, dağıtımını yapan kuruluşlar ile kullanıcılar tarafından güç kalitesinin önemi bilinmekle birlikte üzerinde tam uzlaşıya varılmış bir güç kalitesi tanımlaması yoktur. Bu nedenle güç kalitesi ile ilgili çok farklı tanımlamalar yapılabilmektedir. Örneğin, elektrik dağıtım şirketleri güç kalitesini, istatistiksel olarak sistemin %99,98 oranda kararlı şekilde olması olarak tanımlayabilir. Cihaz üreticileri ise güç kalitesini cihazın istenilen özellikte çalışması için gerekli şebeke gerilimi olarak tanımlayabilir. Güç kalitesinin tanımı, kuruluş ve kişilerin elektrik güç dağıtım sistemindeki yerine bağlı olarak değişebilmekte ve farklı tanımlamalar yapılabilmektedir.

Belirgin tanımlama olarak güç kalitesi, elektrikli cihazların kendisine verilen enerjiyi tüketme yeteneğini ifade eder. Elektriksel harmonikler, zayıf güç faktörü, voltaj dengesizliği ve dengesizliğin elektrikli cihazların verimliliği üzerindeki etkisi gibi güç kalitesi sorunları belirtilebilir. Güç kalitesinin doğurduğu bazı sonuçları şöyle ifade edebiliriz;

- Daha yüksek enerji kullanımı ve maliyetleri
- Daha yüksek bakım maliyetleri
- Cihaz dengesizliği ve arızası

Enerji yönetimi herhangi bir işletme için önemli bir husustur ve enerji kalitesinin herhangi bir enerji yönetimi stratejisinin bir parçası olarak değerlendirilmelidir[39-41].

2.2. Güç Kalitesi Sorunlarının Önemi

Yukarıda belirtildiği gibi, güç kalitesi sorunları genellikle üç geniş kategoriye ayrılır:

1. Harmonik gerilimler ve akımlar AC dalga formunu bozan ve güç kullanımını artıran bir dizi genel elektrikli cihazla sağlanır. Harmonik filtreler veya reaktörler piyasaya sürülerek harmonikler ortadan kalkar ve sonuç daha verimli güç kullanımı ve maliyet tasarrufu sağlanır.

2. Zayıf güç faktörü sistemdeki fazla reaktif güç anlamına gelir. Bu reaktif güç gerçek bir iş yapmaz ve masraflıdır. Güç Faktörü Düzeltme (PFC), bu reaktif gücü azaltır

ve neredeyse ortadan kaldırabilir, enerji maliyetlerini düşürür ve cihazın aşırı ısınmasını, rahatsız edici açma ve motor arızasını durdurabilir

3. Voltaj dengesizliği, şebekeden gelen yüksek veya düşük voltajlı elektrik beslemesinin bir yan etkisidir. Yüksek voltaj, cihaz gücünü arttırmaz ve cihaz performansına ve ömrüne zarar verir, düşük voltaj kahverengileşmeye ve verimliliğin azalmasına neden olabilir. Voltaj optimizasyonu, sisteme sağlanan voltajın, ekipmanın sahada gerektirdiği şekilde sabit kalmasını sağlar[39-41].

Yüksek güç kalitesi ideal olarak her zaman kullanılabilen, gürültüsüz, sinüzoidal bir dalga şekline sahip ve her zaman voltaj ve frekans toleransları dâhilinde olan mükemmel bir güç kaynağı oluşturur.

Çeşitli endüstriyel işlemlerden artan ve değişen enerji talepleriyle, birçok yük düzenli olarak şebekeye rahatsızlık verir, bu da ideal koşullardan sapmaları birçok ağır sanayide sıkça meydana gelir. Bu zayıf güç kalitesi olarak bilinir[40].

Tablo 2.1. Güç kalitesi birimleri ve tanımlamaları[40]

DEĞER	BİRİM	AÇIKLAMA
S	kVA	Görünür güç
Q	kVAR	Reaktif güç
P	kW	Aktif güç
$\cos\phi$	-	Güç faktörü
I	A RMS	Harmonikteki toplam akım
I_{harm}	A RMS	A RMS'deki toplam akım bozulması
I_{THD}	%	Harmonikteki toplam akım bozulması
V	V	Gerilim, voltaj
V_{unb}	%	Voltaj dengesizliği, % olarak verilir
V_{THD}	%	Harmonikteki toplam gerilim bozulması

En yaygın güç kalitesi sorunları aşağıdaki gibidir;

Reaktif güç: Bir AC sistemindeki akım ve gerilim dalga formları arasındaki faz açısıdır. Motorlarda manyetik alan geliştirmek için kullanılır, düşük güç faktörüne neden olur.

Harmonikler: Sinüzoidal dalga formunda oluşan bozulmadır. Yani, şebekedeki akım ve gerilim dalga şekillerinin sinüs dalga formundan uzaklaşması olarak söylenebilir. Eğer besleme frekansı 50 Hz ise, besleme frekansının katları, yani beşinci harmonik 250

Hz olacaktır. Örneğin; değişken hızlı sürücüler, UPS (Kesintisiz Güç Kaynağı) sistemleri, Transformatör, Jeneratör gibi güç elektroniğı yüklerinden kaynaklanır.

Ağ dengesizliğı: Farklı hat voltajlarıdır. Tek fazlı yükler, faz-faz yükler veya kaynak cihazları gibi dengesiz üç faz yükler neden olur.

Geçici Olaylar: Hem gerilim hem de akım dalga formlarında oluşan sinüs dalgasında hızlı değişiminden kaynaklanır. Cihazların değiştirilmesi, yüksek güçlü cihazların başlatılması veya durdurulmasından kaynaklanabilir.

Gerilim değişimleri: Hat voltajı, kısa bir süre için nominal voltajdan daha yüksek veya daha düşük olmasıdır. Örneğin, şebeke arızalarına, kapasitif yüklerin değişmesine veya aşırı yükleme neden olur.

Titreşimler: Voltajda rastgele veya tekrarlayan değişikliklerdir. Örneğin; değirmenler, ark ocakları, kaynak cihazları veya öğütücüler gibi.

Salınımlar (Rezonanslar): Elektrik enerjisinin akışının değişmesidir. Örneğin, bir indükleyicinin manyetik alanı ile bir kapasitörün elektrik alanı arasında, periyodik olarak yön değiştirir.

Güç kalitesi sorunları;

- Düşük üretim hızı,
- Artan enerji tüketimi,
- Reaktif güç tüketimi için ödenen cezalar,
- Duraksamış üretim,
- Hasar görmüş veya cihazlar,
- Azalan cihaz ömrü,
- Veri kaybı,
- İşletme maliyetleri,
- Pazar payı kaybı gibi işletmeyi olumsuz yönde etkileyebilir[39-41].

3.REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU

Günlük yaşantımızın ve endüstrinin temeli elektrik enerjisidir. Çok özel durumlar olması dışında, elektrik enerjisi üretilir, iletilir, dağıtılır ve alternatif akım olarak kullanılır. Yüksek güçteki elektrik enerjisini uzak mesafelere ekonomik taşıyabilmek, alternatif akım sistemi ile sağlanmaktadır. Ancak alternatif akımın birçok farklı dezavantajları da vardır. Bunlardan biri aktif güç ile birlikte tedarik edilmesi gereken reaktif gücün gerekliliğidir. Tüketilen veya iletilen enerjiye katkıda bulunan aktif güç olmasına rağmen, reaktif güç enerjiye katkıda bulunmaz[41].

Elektrik dağıtım şebekelerinin temel amacı elektrik enerjisini son kullanıcılara gerekli verimlilik, kalite ve güvenilirlik standartlarıyla taşımak, bu da enerji kayıplarını en aza indirmeyi ve taşıma işlemlerini iyileştirmeyi gerektirir. Reaktif güç kompanzasyonu, diğer kayıpların yanı sıra, enerji kayıplarının azaltılmasına olan katkısı iyi bilinen yöntemlerden biridir. Güç faktörü düzeltilmesi, hatların ve şebekenin cihazlarının taşıma ve çalışma kapasitesinin artırılması, voltaj kararlılığı ve voltaj görünümünün iyileştirilmesi gibi hepsi farklı çalışma kısıtlamalarına tabidir[42].

3.1.Güç Kompanzasyonu Tanımı

Günümüzde, artan elektrik ihtiyacını karşılamak için yeni kaynaklar oluşturma yanında var olanları da efektif ve verimli bir biçimde kullanmak gerekmektedir. Bunu gerçekleştirmenin en önemli yolu ve yöntemlerinden birisi de reaktif güç kompanzasyonu yapmaktır. Böylece enerjide verimlilik artacaktır. Reaktif güç kompanzasyonu ile jeneratörlerin, transformatörlerin ve hatların kapasitesi artmakta ve hat kayıpları ile gerilim düşümleri azalmaktadır.

Elektrik enerjisinin verimli kullanılmasında en önemli etkenlerinden birisi de güç faktörüdür. Güç faktörü ne kadar büyükse ve istenilen seviyede tutulursa elektrik enerjisi de o kadar verimli kullanılmaktadır. Eğer güç faktörü istenilen seviyede değilse, güç faktörünün $\cos\phi$ 'nin 1'e doğru yükseltilmesi için kompanzasyon tesisi yapılarak, şebekenin kalitesi ve daha verimli kullanılması sağlanmaktadır. Güç faktörünün $\cos\phi$ 'nin 1'e yaklaştırılmasına reaktif güç kompanzasyonu denilmektedir.

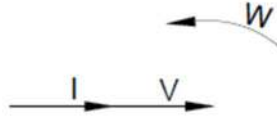
3.2.Güç Çeşitleri, Tanımlamaları ve Güç Üçgeni

3.2.1.Aktif(Gerçek) Güç

Gerçek, etkin veya aktif güç olarak bilinen gerçek güç (P), bir elektrik devresindeki gerçek işi yapan güçtür. Örneğin, motorun dönmesini, lambaların yanmasını gerçekleştirmesi gibi sayılabilir.

Watt (W) olarak ölçülen gerçek güç, bir devrenin dirençli kısmı tarafından tüketilen gücü tanımlar ve bir AC (Alternatif Akım) devresindeki gerçek güç, bir DC (Doğrusal Akım) devresindeki güç ile aynıdır. Dolayısıyla, DC devrelerinde olduğu gibi, her zaman $I^2 \times R$ olarak hesaplanır, burada R devrenin toplam dirençli bileşenidir.

Dirençler, voltaj ve akım dalga formları arasında fazör farkı (faz kayması) üretmediğinden, tüm yararlı güç doğrudan dirence iletilir ve ısıya, ışığa ve çalışmaya dönüştürülür. O zaman bir direnç tarafından tüketilen güç, temelde devrelerin ortalama gücü olan gerçek güçtür.



Şekil3.1. $Z \angle 0^\circ = R + j0$ Aktif Güç Fazör Gösterimi

Dirençli bir devrede gerilim ve akım arasındaki faz farkı olmadığından, iki dalga formu arasındaki faz kayması sıfır olacaktır.

AC devresinde gerçek güç;

$$P = V \times I \times \cos\theta \quad (3.1)$$

$$\cos(0^\circ) = 1 \quad (3.1.1)$$

$$P = V \times I \times 1 \quad (3.1.2)$$

$$P = V \times I \text{ (Watt)} \quad (3.1.3)$$

denklemleri ile gösterilir.

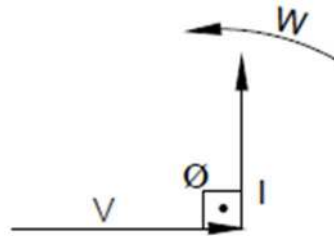
Sonuç olarak gerçek güç, Watt cinsinden ölçülen $I^2 \times R$ direnç elementidir ve elektrik şebekesinde okunan değerlerdir. Watt (W), Kilowatt (kW) ve Megawatt (MW) cinsinden birimleri vardır. Gerçek güç (P) Şekil3.1’de de görüldüğü gibi daima pozitifdir[43].

3.2.2.Reaktif Güç

Reaktif güç (Q), bazen Wattsız güç olarak adlandırılan, bir AC devresinde tüketilen ve herhangi bir işe yaramayan, ancak gerilim ve akım dalga formları arasındaki faz kayması üzerinde büyük bir etkiye sahip olan güçtür. Reaktif güç, indüktörler ve kapasitörler tarafından üretilen reaktansa bağlanır ve gerçek gücün etkilerini önler. DC devrelerinde reaktif güç mevcut değildir.

Gerçek güç yararlı bir iş gerçekleştirirken reaktif güç, sistem güvenilirliği için kontrol edilmesi gereken voltajı destekler.

Endüktif devrelerde (Trafo, Bobin, Asenkron motorlar gibi) manyetik alanın uyartımı için kullanılan fakat yük üstünde kullanılmayıp tekrar geri gönderilen güç birimidir. Bu nedenle şebeke kaynağı ile endüktif yük arasında sürekli reaktif güç alışverişi olur ve çekilen akımında artmasına sebep olur. Birimi VAR’dır.



Şekil3.2. $Z \angle 90^\circ = 0 + jX$ Reaktif Güç Fazör Gösterimi

AC devresinde Reaktif güç;

$$Q = V \times I \times \sin \theta \quad (3.2)$$

$$\sin(90^\circ) = 1 \quad (3.2.1)$$

$$Q = V \times I \times 1 \quad (3.2.2)$$

$$Q = V \times I \text{ (VAR)} \quad (3.2.3)$$

denklemleri ile gösterilmektedir[43].

3.2.3.Görünür Güç

Gerçek (aktif) güç ile reaktif gücün birleşimine görünen güç denir. Herhangi bir faz açısına referans olmadan, voltaj ve akımın ürünü görünür gücü verir.

Yüklerin şebeke hattı üzerinden çektiği toplam güç olarak tanımlanır. Eğer bir devrede direnç ve reaktanslar varsa bu devrede hem aktif hem de reaktif güç beraber çekilir. Bu güce de görünür güç denir. Yüklerdeki gerçek ve reaktif güç tüketimini karşılamak için elektrik devresine sağlanan güçtür. Bir AC devresindeki toplam güç, hem dağıtılmış hem de emilmiş / geri alınmış, görünür güç olarak adlandırılır.

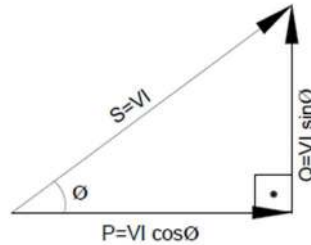
Görünür güç; aktif (P) ve reaktif güç (Q) değerlerinin karelerinin toplamının karekökü ile bulunabilir.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ (VA)} \quad (3.3)$$

3.2.4.Güç Üçgeni

Aktif, reaktif ve görünür güçler arasındaki geometrik bağıntıyı gösteren üçgene güç üçgeni denir.

Bir AC devresinde güç oluşturan üç eleman, empedans üçgeni ile aynı şekilde dik açılı bir üçgenin üç tarafı ile grafik olarak gösterilebilir. Yatay (bitişik) taraf, devrelerin gerçek gücünü (P), dikey taraf devrelerin reaktif gücünü (Q) ve hipotenüs ile gösterilen güç üçgenini görünen gücünü (S) temsil eder.



Şekil3.3. Güç Üçgeni Gösterimi

- P, Watt cinsinden ölçülen işi yapan gerçek güçtür.
- Q, volt-amper-reaktif, VAR cinsinden ölçülen reaktif güçtür.
- S, Volt-amper, VA cinsinden ölçülen görünür güçtür.
- Ø derece cinsinden faz açısıdır. Faz açısı arttıkça, reaktif güç de artar.
- $\cos\emptyset = \frac{P}{S} = \frac{W}{VA} = \text{Güç Faktörü}$ (3.4)
- $\sin\emptyset = \frac{Q}{S} = \frac{VAR}{VA}$ (3.5)
- $\tan\emptyset = \frac{Q}{P} = \frac{VAR}{W}$ (3.6)

Güç faktörü, gerçek gücün görünür güce oranı olarak hesaplanır çünkü bu oran $\cos\emptyset$ 'ye eşittir.

Yukarıdaki güç üçgeninden AC devrelerinin iki tür güç kaynağı sağladığını veya tükettiğini görebiliriz: aktif güç ve reaktif güç. Aynı zamanda, aktif güç hiçbir zaman negatif değildir, oysa reaktif güç değeri pozitif ya da negatif olabilir, bu nedenle sistem verimliliğini artırmak için reaktif gücü azaltmak her zaman avantajlıdır.

3.3. Güç Faktörü (PF)

Güç faktörü $\cos\emptyset$, bir AC devresinin devre empedansı veya devre gücü olarak da ifade edilebilir. Güç faktörü, gerçek gücün görünür güce oranı olarak tanımlanır ve genellikle ondalık bir değer olarak ifade edilir.

Güç faktörü, akım ve voltaj dalga formları arasındaki faz açısını tanımlar; I ve V ise akım ve voltajın değerlerinin büyüklüğüdür.

Matematiksel ilişki şöyle verilir:

$$\text{Güç Faktörü} = \frac{\text{Watt}}{\text{VoltAmper}} = \frac{P}{S} = \frac{VI\cos\emptyset}{VI} = \cos\emptyset \quad (3.7)$$

Dirençli bir devrede, akım ve gerilim dalga formlarının birbirleriyle aynı fazdadır, bu nedenle tüketilen gerçek gücün, faz farkı sıfır derece (0°) olduğundan görünen güçle de aynı olacaktır. Böylece güç faktörü;

$$\text{Güç Faktörü, PF} = \cos 0^\circ = 1$$

Yani tüketilen Watt sayısı, 1 veya %100'lük bir güç faktörü üreten-tüketilen volt-amper sayısı ile aynıdır.

Gerçek güç, görünen güç ve devrelerin güç faktörü arasındaki ilişkiyi şöyle yazabiliriz:

$$\text{Gerçek Güç(P)} = \frac{\text{Görünür Güç(S)}}{\text{Güç faktörü(PF)}} \quad (3.8)$$

$$\text{PF} = \frac{\text{P(Watt)}}{\text{S(VA)}} \quad (3.8.1)$$

olarak ifade edilebilir.

3.3.1.Güç Faktörü Düzeltme

Güç faktörü düzeltmesi, güç faktörünü 1'e yakınlaştırmak için elektrik devresinin bir ayarıdır.

1'e yakın güç faktörü, devredeki reaktif gücü azaltır ve devredeki gücün çoğu gerçek güç olacaktır. Bu aynı zamanda elektrik hattı kayıplarını azaltacaktır.

Güç faktörü düzeltmesi genellikle, devrede bir elektrik motoru gibi endüktif bileşenlere sahip olduğundan yük devresine kondansatörler eklenerek yapılır.

3.3.2.Düşük Güç Faktörü Dezavantajları

Birinci dezavantajı, iletim hatlarının ve diğer güç devresi elemanlarının genellikle dirençten daha reaktif olmasıdır. Akımın reaktif bileşenleri dirençli bileşenlerden daha büyük voltaj düşüşleri üretir ve toplam $IZ = (I (R + LX))$ düşüşüne neden olur.

İkinci dezavantajı, iletim cihazların verimsiz kullanılmasıdır; çünkü enerji hatlarında taşınan reaktif güç nedeniyle iletilen gerçek güç birimi başına daha fazla akım gerekir. Reaktif gücü sağlamak için gerekli akım azaltılabilirse, mevcut sistemden daha faydalı güç aktarılabilir.

Üçüncü dezavantaj, iletim hatlarındaki artan güç kaybının maliyetidir. Artan güç kaybı, sistemdeki gereksiz reaktif güçten kaynaklanmaktadır. Reaktif güç kayıpları, reaktif akımın karesi veya kare olan güç faktörünün tersi olarak değişir[44].

3.3.3. Güç Faktörünü İyileştirmenin Faydaları

Elektrik ark fırınları gibi bazı yüklerde, reaktif güç tüketimi çok hızlı ve ağır bir şekilde dalgalanır. Bu, görünen gücün ve toplam arz akımının da hızla değiştiği anlamına gelir. Güç kaynağından tüketim noktasına voltaj düşüşü, besleme yolunun direnci ve

reaktansı ile doğru orantılı olduğu için, aşırı dalgalı yük akımı, voltaj büyüklüğünde de değişikliklere neden olur.

Dalgalanan voltaj, diğer güç kullanıcılarını da etkiler. Gerilim değişikliklerinin en tipik sonucu, titreşimsiz olarak bilinen ışık kaynaklarının parlaklığındaki değişiktir. Birkaç yüzdelik küçük voltaj değişimleri bile voltaj değişimlerinin frekansı 8 ila 10 Hz civarında olduğunda titremeye neden olabilir ve sistemimizin performansını etkiler.

Dalgalanan voltaj da verimliliği düşürebilir, örneğin bir elektrik ark fırınının erime süresi dalgalanan besleme voltajı ile uzatılır. Hızla dalgalanan voltajla beslenen yükler verimi düşürür ve daha hızlı arızalanmasına neden olur. Örneğin, endüksiyon makinelerinin torku ve hızı, üretim işlemlerini etkileyebilecek olan voltaj dalgalanmalarından etkilenir. Gerilim dalgalanmaları şiddetli ise, maksimum torkta çalışan endüksiyon motorları bile durabilir. Voltaj dalgalanmaları ayrıca rölelerin yanlış şekilde açılmasına neden olabilir veya hassas elektronik cihazın çalışmasını engelleyebilir; Her ikisi de üretim kayıplarından dolayı önemli ekonomik etkilere sahip olabilir. Hat komütasyonlu dönüştürücülerin güç faktörü, yer değiştirme güç faktörü ve harmonik üretimi de giriş voltajına tabidir.

Özetle, reaktif gücün telafi edilmesinin faydaları şunlardır:

- Gerilimin dengelenmesi
- Titreşimsiz eleme
- Güç faktörü iyileştirilmesi
- İletim kapasitesi geliştirme
- Bazı endüstriyel işlemlerde artan verimlilik olarak sayılabilir[45].

3.4. Güç Sistem Ağında Reaktif Gücün Önemi

Güç sistemi ağında, birçok yerli ve endüstriyel kuruluş tarafından elektrik enerjisine olan talebin artmasıyla reaktif gücün önemi artmaktadır. Elektrik güç sisteminin kararlılığı ve güvenilirliği reaktif güç yönetimine bağlıdır.

Reaktif güç ihtiyacını karşılamak, gerilimi arttırmak, ağ kaybını azaltmak, acil durumlarda sistem güvenliğini sağlamak ve diğer fonksiyonlar gibi çeşitli fonksiyonlar için elektrik güç sisteminde önemli bir rol oynar.

Reaktif güç, iletim hattını ve üretim istasyonu kaynaklarını tüketir.

Reaktif gücün başlıca önemi, sıkışık bir aktarım ara yüzünde transfer edilebilecek gerçek gücün değerini artırmak için, reaktif güç akışları en aza indirilebilir. Benzer şekilde, reaktif güç üretimi bir jeneratörün gerçek güç kapasitesini sınırlayabilir. İletim sistemindeki reaktif gücü hareket ettirmek, gerçek güç kayıplarına neden olur. Bu kayıpların yerini almak için hem kapasite hem de enerji sağlanmalıdır.

3.4.1.Gerilim Kontrolü

Güç sistemi ekipmanları, nominal gerilimlerin $\pm\%5$ 'i içerisinde çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Voltaj seviyelerindeki dalgalanmalar, çeşitli cihazların arızalanmasına neden olur. Yüksek voltaj, düşük voltajlı ampüllerde aydınlatma, asenkron motorların aşırı ısınması vb. gibi çeşitli cihazların düşük performans göstermesine neden olduğu sargıların yalıtımına zarar verir.

Eğer güç talebi, hatların iletilmesi ile sağlanandan daha fazlaysa, besleme hatlarından çekilen akım daha yüksek bir seviyeye yükselir, bu da voltajın alıcı uç tarafında sert bir şekilde düşmesine neden olur. Bu düşük voltaj daha da azalırsa, jeneratör ünitelerinin tetiklenmesine, motorların aşırı ısınmasına ve diğer donanım arızalarına yol açar.

Bunun üstesinden gelmek için, reaktif indüktör veya reaktörleri iletim hatlarına koyarak yüke reaktif güç sağlanmalıdır. Bu reaktörlerin kapasitesi, tedarik edilecek görünür güç miktarına bağlıdır.

Güç talebi, sağlanan reaktif güçten daha düşükse, yük voltajı, iletim cihazlarının otomatik olarak açılmasını, düşük güç faktörünü, kabloların yalıtım hatalarını ve çeşitli mekanik cihazların sargılarını açan yüksek seviyeye yükselir.

Bunun üstesinden gelmek için sistemde mevcut ek reaktif güç telafi edilmelidir. Çeşitli kompanzasyon cihazları senkron kondansatörler, şönt kapasitörler, seri kapasitörler ve diğer PV sistemleridir. Bu cihazlar sistemdeki endüktif reaktif gücü telafi etmek için kapasitif reaktif gücü enjekte eder.

3.4.2.Elektrik Kesintileri

Elektrik kesintilerinde, elektrik enerjisi olmadığından dolayı reaktif güç yetersiz kalacaktır. Yani, düşük voltaj nedeniyle çeşitli cihazların ve üretim ünitelerinin

kapatılmasına neden olur. Bu nedenle, elektrik sisteminin düzgün çalışmasını sağlamak için, içinde yeterli miktarda reaktif güç bulunmalıdır.

3.4.3. Çeşitli Cihazların/Makinelerin Düzgün Çalışması (Manyetik Akı Üretmek)

Transformatörler, motorlar, jeneratörler ve diğer elektrikli cihazlar manyetik akı üretmek için reaktif güç gerektirir. Bunun nedeni, bu cihazların yararlı işler yapması için manyetik akı oluşumunun gerekli olmasıdır. Reaktif güç, motorda manyetik alan oluşturmaya yardımcı olur, ancak güç faktörünü azaltır. Bu nedenle, kapasitif reaktif güç sağlayarak endüktif reaktif gücü telafi etmek için bir kapasitör yerleştirilir[46].

3.5. Reaktif Enerji Yönetiminin Avantajları

Optimum reaktif enerji yönetimi ekonomik ve teknik avantajlar sağlar.

Elektrik faturasından tasarruf:

- Reaktif enerji cezalarının ortadan kaldırılması ve kVA talebinin azaltılması,
- Tesisatın transformatörler ve iletkenlerinde oluşan güç kayıplarının azalması.

Kullanılabilir gücün artırılması:

- Yüksek güç faktörü bileşenlerin daha iyi kullanılmasını sağlayarak elektrik kurulumunu uygun hale getirir.
- Böylelikle bir OG/AG transformatörünün sekonderinde bulunan güç, alçak gerilim tarafına bir güç faktörü düzeltme cihazları takılarak artırılabilir.

Tablo 3.1.'de, güç faktörünün 0,7'den 1'e çıkarılmasıyla transformatör çıkışında artan kullanılabilir güç gösterilmiştir[46].

Tablo 3.1. Güç faktörünün transformatör güç çıkışındaki etkisi[46]

Güç Faktörü	Artan Kullanılabilir Güç
0.7	0%
0.8	14%
0.85	21%
0.9	28%
0.95	36%
1	43%

Kurulum boyutlarının azaltılması:

- Güç faktörü düzeltme cihazlarının kurulması, aynı aktif güç için daha az akım tüketimine neden olduğundan iletken kesitinin azaltılmasını sağlar.

Aşağıda Tablo 3.2’de, farklı güç faktörü değerlerine göre iletken kesitinin katsayısı gösterilmiştir[46].

Tablo 3.2. Güç faktörünün transformatör güç çıkışındaki etkisi[46]

Güç Faktörü	Kablo Kesiti Katsayısı
1	1
0.8	1.25
0.6	1.67
0.4	2.5

Tesisattaki gerilim düşüşlerinin azaltılması:

- Kondansatörlerin kurulması, güç faktörü düzeltme cihazının bağlı olduğu noktanın şebeke tarafında gerilim düşüşlerinin azalmasını sağlar. Şebekenin aşırı yüklenmesini önleyip harmoniklerin azalmasını sağladığı için tesisat değerlerinin büyük alınmasına gerek kalmaz[47].

3.6. Reaktif Güç Kaynakları

Reaktif güç, güç sistemi ağına bağlı birçok cihaz tarafından üretilir veya absorbe edilir. Bu nedenle ağdan geçen reaktif güç akışı bu cihazlar tarafından kontrol edilir. Bu reaktif güç kaynaklarının bazıları şunlardır:

Jeneratörler: DC sargılarına uyarılmaya bağlı olarak reaktif güç üretebilen veya emebilen senkronize makinelerdir. Aşırı uyarıldığında reaktif güç üretir ve az uyarıldığında reaktif gücü emer. Voltaj kontrolü için en sık kullanılan reaktif güç kaynağıdır.

Kapasitör ve Reaktörler: Kapasitif ve endüktif cihazlar seri ve şönt kompanzasyon tekniklerinde reaktif gücü kontrol etmek, böylece sistem voltajını ve kararlılığını düzenlemek için kullanılır. Kapasitif bir kompansatör (kondansatör) reaktif güç üretirken, endüktif kompansatör reaktif gücü emer.

Seri kapasitör kompanzasyonu, genellikle en çok ihtiyaç duyulduğunda reaktif güç üretmek için iletim hatlarına uygulanırken, şönt kapasitörler reaktif güç üretmek ve gerilimi sınırlar içinde tutmak için yük alanlarındaki trafo merkezlerine kurulur.

Reaktörler, gerilimi düşük tutmak için reaktif gücü emmek ve hat üzerindeki kapasitif yükü dengelemek için kullanılır.

İletim Hatları ve Yeraltı Kabloları: Hem iletim hatları hem de kablolar reaktif güç emer veya üretir. Çok yüklü bir iletim hattı reaktif güç tüketir, hattın voltajını azaltırken hafif yüklü bir iletim hattı reaktif güç üretir ve hattın voltajını artırır.

Katı Hal Dönüştürücüler: Güç sistemi işleminde HVDC dönüştürücüler gibi kullanımda olan birkaç katı hal dönüştürücü vardır. Bu dönüştürücüler çalıştıklarında her zaman reaktif güç tüketirler. Bu nedenle, çoğu dönüştürücü, reaktif güç gereksinimini kontrol etmek için reaktif kompanzasyon cihazları kullanır.

Transformatörler: Manyetik alan üretmek için transformator reaktif güce ihtiyaç duyar, bu nedenle reaktif gücü emer. Bir transformatorün reaktif güç tüketimi, derecelendirmeye ve akım yüküne bağlıdır.

Yükler: Veri yolu veya sistem voltajı ve kararlılığı üzerinde büyük etkisi olan birçok reaktif güç tüketen yük vardır. Bu yüklerin bazıları, indüksiyon motorlarını, indüksiyon jeneratörleri, ark ocakları, flüoresan lamba balastları, indüksiyonla ısıtma, mekân ısıtma, su ısıtma ve iklimlendirme gibi sabit yükleri içerir.

Sodyum, cıva ve metal buharlı lamba balastları, Neon lamba transformatorleri, Redresörler, Düşük uyarmalı senkron makineler, bobinler vs. gibi kaynaklar da ilave olarak reaktif güç harcayan yükler sayılabilir[48].

3.7. Kompanzasyon Elemanları

➤ **Kondansatör:** Sistemde oluşan endüktif reaktif gücü kompanze etmek için kapasitif reaktif güç üreten kondansatörler kullanılır. Çeşitli güçlerde üretilerek kompanzasyon kademelerinde sırayla devreye alınarak endüktif reaktif güç sistemden yok edilmeye çalışılır.

➤ **Sigortalar:** Kompanzasyon panosunda kontaktörleri, iletkenleri aşırı akımlara karşı korumak için kullanılmaktadır. Kompanzasyon sisteminde yaygın olarak anahtarlı otomatik sigortalar ve NH tipi bıçaklı sigortalar kullanılmaktadır. Bunun yanında termik manyetik şalterler de tercih edilebilmekte olup maliyeti arttırdığından yaygınlığı daha azdır.

➤ **Kompanzasyon Kontaktörleri:** Kompanzasyon panolarında kondansatör kademelerini devreye almak ve devreden çıkartmak için kullanılmaktadır.

Kondansatörlerin devreye girip çıkması durumundaki yüksek akımları deşarj etmek için deşarj dirençleri bulunmaktadır. Bu tip kontaktörlerin kullanımı verimi ve kullanım ömrünü arttırmaktadır. Ancak günlük yaşantıda görülen uygulamalarda blok kontaktörlere rastlanmaktadır.

➤ **Şönt Reaktörler:** Sistemdeki kapasitif reaktif gücü kompanze etmek için kullanılırlar. Bu güç kesintisiz güç kaynakları, bilgisayarlar ve çoğu elektronik cihazlar ile floresan lamba ve elektronik balastlar gibi günlük yaşantıda birçok alanda kullanılan ürünlerden dolayı oluşmaktadır. Ayrıca sistemde aşırı kompanzasyon durumlarının önüne geçmek için de kullanılmaktadır.

➤ **Endüktif Yük Sürücüler:** Kompanzasyon sisteminde kullanılan şönt reaktörleri uygun şekilde devreye alıp çıkarmak için kullanılan elemanlardır.

➤ **Harmonik Filtre Reaktörleri:** Kompanzasyon sisteminde kondansatörlere seri bağlanarak rezonans frekansını kaydırırlar. Bu sayede rezonans olaylarının ana harmonik seviyelerinde oluşması engellenerek sistem korunmuş olur. Ayrıca harmonik akımlara karşı kondansatör empedansı ile birlikte kendi empedansı sayesinde kondansatör üzerinden geçen akımı sınırlayarak kondansatörleri korumaktadır. Ek olarak sistemde oluşan harmonikleri filtreleyerek cihazların ömrünün uzamasını sağlar ve elektronik cihazlar üzerinde bir koruma yapar.

➤ **Akım Trafoları:** Elektrik sistemindeki yüksek akımların okunmasında kullanılır. Akım bilgisi okunarak reaktif güç kontrol rölesine bilgi verilir.

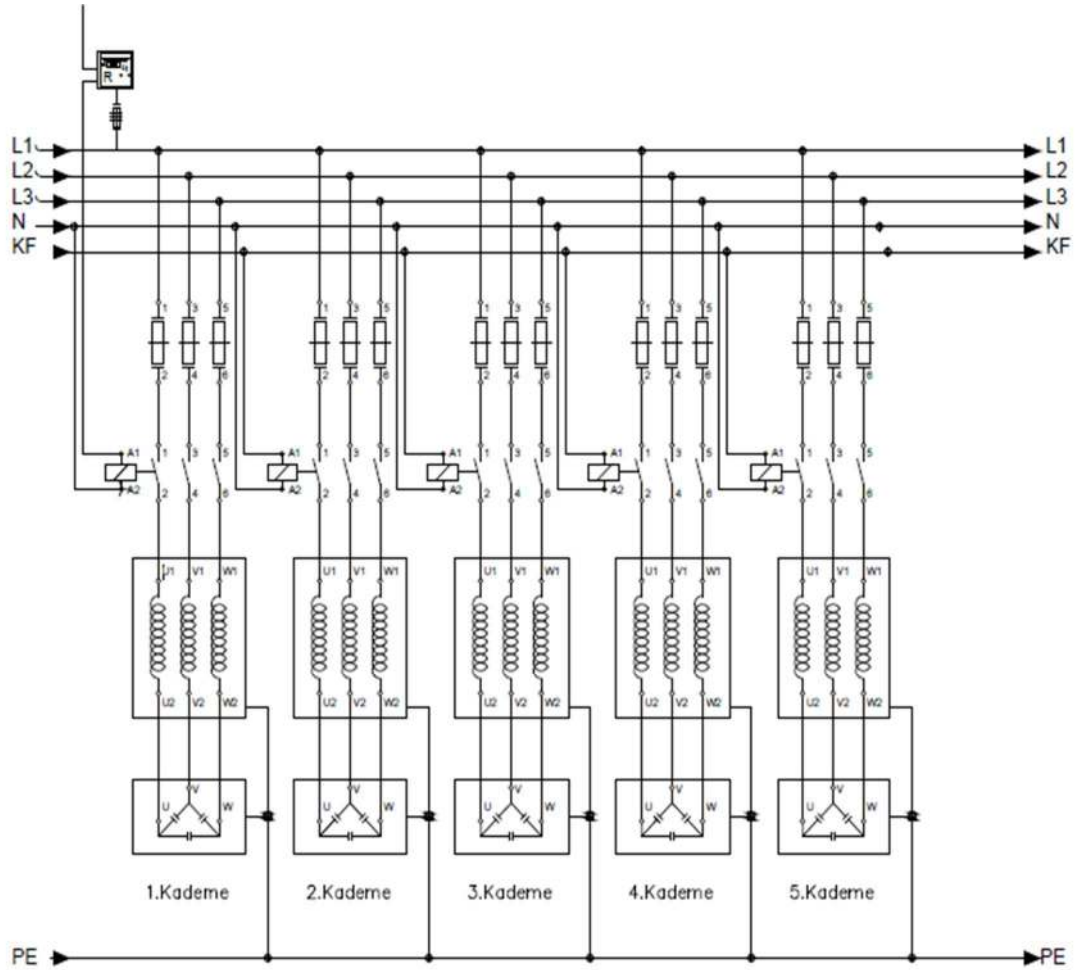
➤ **Deşarj ünitesi:** Dengesiz yük durumlarında, hızlı devreye girip çıkan yüklerin olduğu durumlarda kompanzasyon sistemindeki kondansatörler hızlı devreye girip çıkarılmaktadır. Bu durumlarda yüklenen kondansatörün boşalması için bir süre gerekmektedir. Bu nedenle deşarj üniteleri kullanılarak kondansatörler deşarj edilmektedir.

➤ **Reaktif Güç Kontrol Rölesi:** Kompanzasyon sisteminin beyni olarak nitelendirilebilir. Elektrik sisteminden akım, gerilim örnekleri alarak sistemin aktif güç, reaktif güç, görünür güç ve güç faktörlerini hesaplar. Gerekli durumlara göre kondansatörleri ve şönt reaktörleri devreye alıp çıkartarak reaktif güç kompanzasyonun yapılmasını sağlar[41,49].

3.8. Kompanzasyon Panosu Tek Hat Şematik Gösterimi

Örnek olarak, 5 kademeli, harmonik filtre reaktörlü ve nominal gerilimi 400V ile 690V arasında olan kompanzasyon panosu tek hat şeması aşağıdaki Şekil 3.4.'de gösterilmiştir.

3 fazlı sistemde, sırası ile L1, L2, L3 fazlarına bağlı ve yukarıdan aşağıya doğru yük ayırıcı sigortaları, güç kontaktörleri, harmonik filtre reaktörleri ve kondansatörler kullanılmıştır. Ana dağıtım panosundan, akım trafolarından gelen bilgilere göre güç faktörünü düzeltmek için ve çeşitli güç değerlerini görebilmemiz için reaktif güç rölesi kullanılmaktadır.



Şekil 3.4. Harmonik filtre reaktörlü 5 kademeden oluşan kompanzasyon panosu tek hat gösterimi

4. HARMONİKLER

4.1.Giriş

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte nonlinear elamanların aktif ve yaygın hale gelmesi ile birlikte elektrik dağıtım sistemine bağlı yük türlerinde son birkaç yılda önemli bir değişiklik yaşanmaya başlanmıştır. Bir süre önceye kadar evde, tesislerde ve üretim merkezlerinde elektrik kullanırken cihazların çalışıp çalışmadığının dışında ve gerilimden başka hiçbir şey düşünülmezdi. Günümüzde elektronik cihazların yaygınlaşması ve gelişmesi, güç sistemlerinde istenilmeyen sinüzoidal olmayan büyüklüklere sebep olmuştur.

Harmonikler, bir AC güç kaynağına doğrusal olmayan bir yük uygulandığında ortaya çıkan dalga formlarıdır. Harmonikler, herhangi bir periyodik dalga şeklini temsil etmeyi sağlar. Besleme sisteminde çalışmak üzere tasarlandığı frekansın tam katları olan frekanslara sahip sinüzoidal voltajlar veya akımlardır (50 Hz veya 60 Hz).

Harmonikler, kısa devrelerde ani akım çeken doğrusal olmayan yüklere sahip elektronik cihazlar tarafından oluşturulur. Kısa darbeler, harmonik akımların güç sisteminin diğer parçalarına geri akmasına neden olan çarpık akım dalga biçimlerine neden olur. Harmonikler, motorlar, fanlar ve pompalar için elektronik sürücüler, redresör, güç dönüştürücüleri ve tristörlü güç kontrolörleri gibi güç kaynağı anahtarlama devreleri ve birçok lineer olmayan elektronik faz kontrollü güç kaynakları; özellikle birçok kişisel bilgisayar, lazer yazıcı, faks makinesi, fotokopi makinesi veya tıbbi test cihazları, floresan aydınlatma, kesintisiz güç kaynakları (UPS'ler) ve elektrik sistemindeki değişken hızlı sürücülerin kullanımının artmasıyla daha da yaygınlaşmıştır[50].

Elektrik güç dağıtım sistemindeki harmonikler, voltaj veya akım dalga biçimlerinin bozulmasını sağlamak için temel frekans (50 Hz veya 60 Hz) beslemesini birleştirir. Bu bozulma, elektrik cihazları ve elektrik hatları üzerinde olumsuz etkiye sahip olabilecek bir dizi harmonik frekanstan oluşan karmaşık bir dalga şekli oluşturur. Harmonikler, temel frekansın üzerine, yani devrenin frekansı olan ve dalga şeklini deforme etmek için yeterli olan üst dalga frekanslarıdır. Temel dalgaya uygulanan bozulma miktarı tamamen mevcut harmoniklerin türüne, miktarına ve şekline bağlı olacaktır.

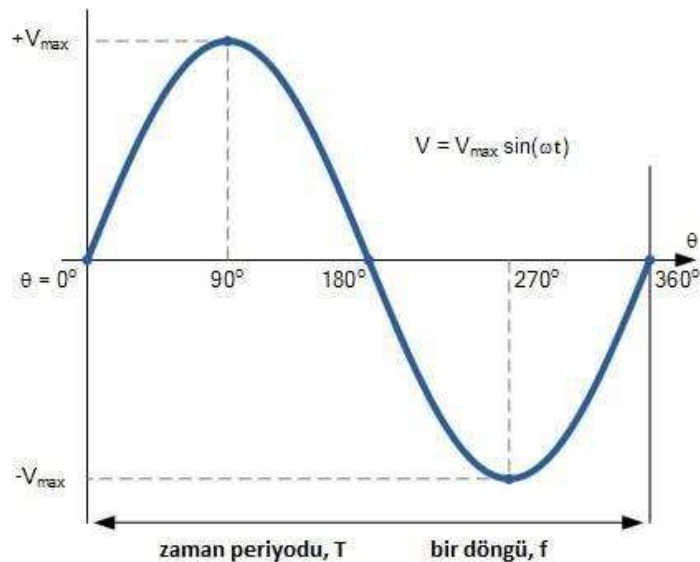
Karmaşık bir dalga biçimine kendine özgü şekli veren mevcut dalga şekli bozulma miktarı, harmonik frekansı temel frekansın katları olan en baskın harmonik bileşenlerin frekansları ve büyüklükleriyle doğrudan ilgilidir.

Harmonikler, özellikle ticari bir bina veya endüstriyel tesiste güç kalitesi seviyesini ve verimliliğini düşürür. Genel olarak, çoğu bina, toplam elektrik sistemi kapasitesinin %15'ine kadar olan doğrusal olmayan yüklere kaygı duymadan dayanabilir. Doğrusal olmayan yükler %15'i aşarsa, görünmeyen bazı olumsuz sonuçlar ortaya çıkabilir[51].

Yüksek frekanslı harmonik elektriğin güç sisteminden akması iletişim hatalarına, aşırı ısınmaya ve aşağıdaki gibi donanım hasarlarına neden olur:

- Elektrik dağıtım cihazlarının, kabloların, trafoların, jeneratörlerinin vb. aşırı ısınmasına,
- Harmonik rezonansın neden olduğu yüksek voltaj ve sirkülasyon akımına,
- Aşırı voltaj artışı nedeniyle cihaz arızasına,
- Ekipmandaki yüksek iç enerji kayıpları, bileşen arızasına ve ömrünün kısılmasına,
- Devre kesicilerin yanlış açılmasına,
- Ölçüm hatalarına,
- Kablolama ve dağıtım sistemlerinde yangınlara,
- Jeneratör arızalarına,
- Aylık faturalarda para cezalarına gibi ciddi sorunlara neden olabilir[51].

4.2.Harmonik Tanımlamalar



Şekil 4.1. Temel frekans sinüs dalga formu[52]

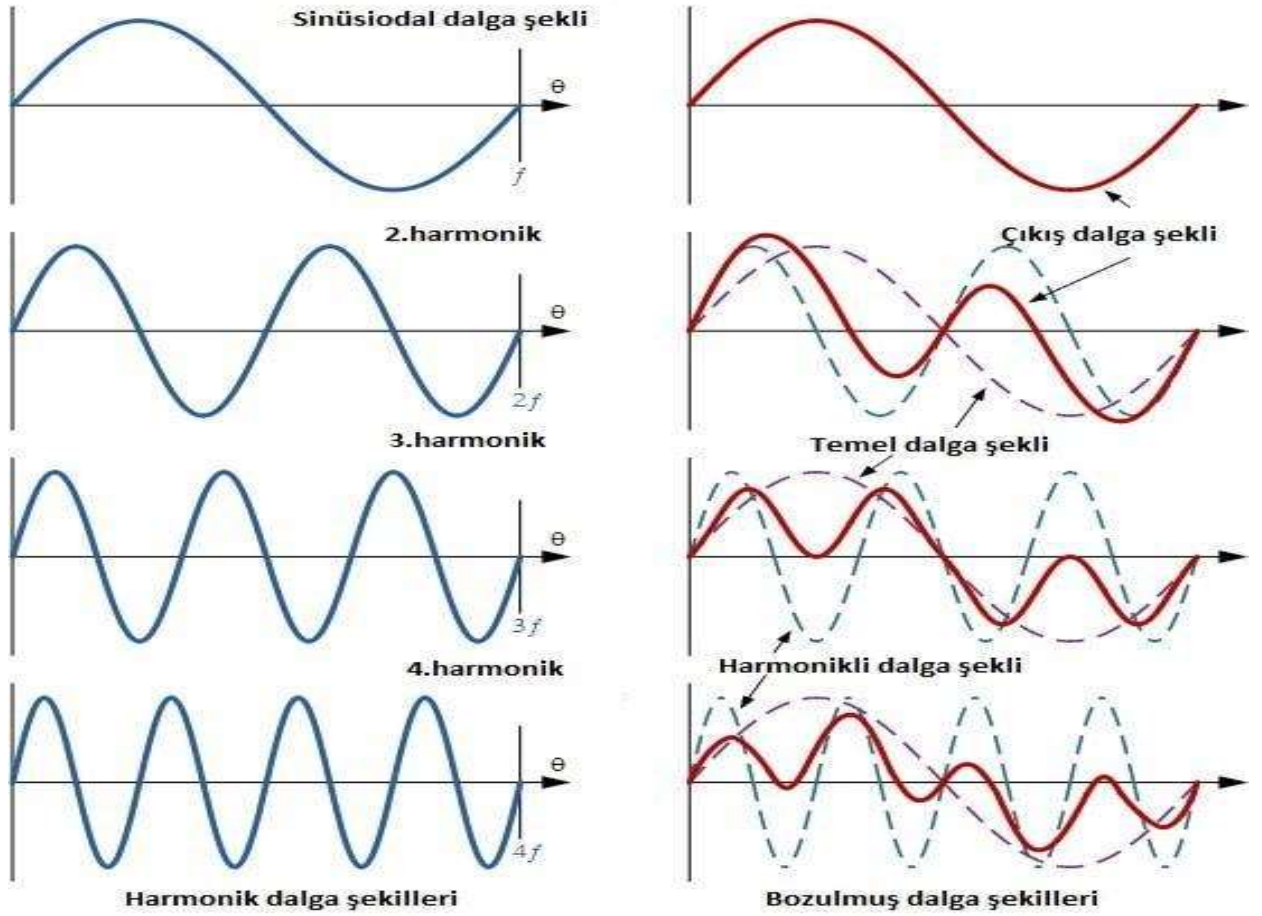
AC devresinde bir direnç, DC devresinde olduğu gibi davranır. Yani, dirençten geçen akım, üzerindeki voltajla orantılıdır. Bunun nedeni, rezistansın doğrusal bir cihaz olmasıdır ve kendisine uygulanan voltajın sinüs dalgası durumunda, içinden geçen akımın da bir sinüs dalgası olması ve böylece iki sinüzoidal arasındaki faz farkının sıfır olmasından kaynaklanmasıdır.

Genel olarak, elektrik devrelerinde değişen voltaj ve akımlarla uğraşırken, bunların *temel frekans* olarak adlandırılan sadece bir frekans değerinde saf ve sinüzoidal oldukları varsayılır, ancak bu her zaman böyle değildir.

Harmonikler, temel frekansın bir tamsayısı katı olan bir frekansta çalışan voltajlar veya akımlardır. Böylece, 50 Hz'lik temel bir dalga biçimi verildiğinde; 2. harmonik frekansın 100 Hz (2x50 Hz), 3. Harmonik frekansın 150 Hz (3x50 Hz), 5.harmonik frekansın 250 Hz (5x50 Hz) benzeri olduğu anlamına gelir. Benzer şekilde, 60 Hz'lik bir temel dalga biçimi verildiğinde, 2., 3., 4. ve 5. harmonik frekanslar sırasıyla 120 Hz, 180 Hz, 240 Hz ve 300 Hz olacaktır.

Başka bir deyişle, harmoniklerin temel frekansın katları olduğunu ve bu nedenle $2f$, $3f$, $4f$ vb. ifade edilebileceğini söyleyebiliriz (f = frekans)[52,53,55].

4.3. Harmoniklerden Kaynaklanan Karmaşık Dalga Formları



Şekil 4.2. Harmonik kaynaklı dalga formları[52]

Temel dalga biçimi aynı zamanda bir birinci harmonik dalga biçimidir. Bu nedenle, ikinci bir harmonik, temelin iki katı bir frekansa sahiptir; üçüncü harmonik, temelin üç katı bir frekansa sahiptir ve dördüncü bir harmonik, temelin dört katı frekansa sahiptir[52].

Şekil 4.2.'de sağ taraftaki sütun, temel dalga formunun eklenmesi ile farklı harmonik frekanslardaki harmonik dalga formları arasındaki etki sonucu oluşan karmaşık dalga şeklini gösterir. Ortaya çıkan karmaşık dalga formunun şeklinin yalnızca mevcut harmonik frekansların sayısına ve genliğine değil, aynı zamanda temel frekans ile bireysel harmonik frekansları arasındaki faz ilişkisine de bağlıdır.

Karmaşık bir dalganın, her biri kendi tepe değeri ve faz açısına sahip olan temel bir dalga formunun artı (+) harmoniklerden oluştuğunu görebiliriz.

Eğer temel frekans;

$$E = V_{\max}(2\pi ft) \text{ veya } V_{\max} (\omega t) \quad (4.1)$$

Harmoniklerin değerleri şu şekilde gösterilebilir:

İkinci bir harmonik için:

$$E_2 = V_{2\max} (2 * 2\pi ft) = V_{2\max} (4\pi ft) = V_{2\max} (2\omega t) \quad (4.1.1)$$

Üçüncü bir harmonik için:

$$E_3 = V_{3\max} (3 * 2\pi ft) = V_{3\max} (6\pi ft) = V_{3\max} (3\omega t) \quad (4.1.2)$$

Dördüncü bir harmonik için:

$$E_4 = V_{4\max} (4 * 2\pi ft) = V_{4\max} (8\pi ft) = V_{4\max} (4\omega t) \quad (4.1.3)$$

Sonuç olarak karmaşık bir dalga formunun değeri için verilen denklem şöyle olacaktır:

$$E_T = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_{(n)} \quad (4.2)$$

$$E_T = V_{1\max} \sin(2\pi ft) + V_{2\max} \sin(2*2\pi ft) + V_{3\max} \sin(3*2\pi ft) \dots \quad (4.3)$$

Harmonikler genellikle adlarına ve sıklıklarına, örneğin 100 Hz'de temel frekansın 2.harmoniği ve aynı zamanda bunların frekanslarına göre sınıflandırılır. Harmonik dizi, dengeli, 3 fazlı 4 telli bir sistemde harmonik gerilimlerin ve akımların temel dalga biçimine göre fazör dönüşünü ifade eder.

Pozitif dizi harmoniği (4., 7., 10.,...), temel frekans ile aynı yönde (ileri yönde) dönecektir. Negatif dizi harmoniği ise (2., 5., 8.,...) temel frekansın zıt yönünde (ters yönde) döner.

Genel olarak, pozitif dizi harmonikleri istenmez çünkü dalga formlarının eklenmesi nedeniyle iletkenlerin, elektrik hatlarının ve transformatörlerin aşırı ısınmasına neden olacaktır.

Diğer yandan negatif dizi harmonikleri, motorlarla ek problemler yaratan fazlar arasında dolaşır, zıt fazör rotasyonu motorların gerektirdiği dönen manyetik alanı zayıflatır ve özellikle endüksiyon motorlarının daha az mekanik tork üretmelerine neden olur.

Üçlü (üçte bir) adı verilen bir başka özel harmonik grubu sıfır dönüş sırasına sahiptir. Ülüler , üçüncü harmoniğin (3., 6., 9.,...) katlarıdır , bu nedenle isimleri ve dolayısıyla sıfır dereceyle değiştirilirler. Sıfır dizi harmonikleri faz ile nötr veya toprak arasında dolaşır.

Birbirini iptal eden pozitif ve negatif dizi harmonik akımlarının aksine, üçüncü derece harmonikleri iptal olmaz. Bu üçlü harmonikler nedeniyle nötr teldeki akım

genliğinin, temel frekanstaki faz akımının genliğini daha az verimli ve aşırı ısınmasına neden olacaktır[50-54].

Dizi etkilerini 50 Hz'lik temel frekansın katları olarak özetleyebiliriz:

Tablo 4.1. Harmonik sıralama [52]

İsim	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Frekans, Hz	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Sıra	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Tablo 4.2. Harmonik sıralama etkileri [52]

Sıra	Yön	Harmonik etkisi
+	İleri	Aşırı ısınma etkisi
-	Ters	Motor tork problemleri
0	Yok	Nötr telde ısınmaya neden olan gerilim yada akımı ekler

Aynı harmonik dizinin 60 Hz temel dalga formları için de geçerlidir.

4.4. Harmonik Üreten Ekipman Türleri

Harmonik yük akımları tüm doğrusal olmayan yükler tarafından üretilir. Bazı harmonik üreten elemanlar şunlardır:

1. Anahtarlama Mod Güç Kaynakları (SMPS)
2. Elektronik Flüoresan Aydınlatma Balastları
3. Değişken Hızlı Sürücüler (VSD'ler)
4. Kesintisiz Güç Kaynakları (UPS)
5. Manyetik Özlü Cihazlar

4.4.1. Anahtarlama Mod Güç Kaynakları (SMPS)

Modern elektronik birimlerin çoğunda, anahtarlama mod güç kaynakları (SMPS) kullanılır. Bunlar, geleneksel azaltma transformatörü ve redresör için gerekli olan çıkış

gerilimi ve akımına uygun bir yöntem ile elde edildiği bir hazne kondansatör şarj kaynağının doğrudan kontrol ederek düzeltilmesi ile önceki elektronik cihazlardan farklıdır.

Avantajı, cihaz üreticisinin büyüklüğünün, maliyetinin ve ağırlığının önemli ölçüde azaltılması ve güç ünitesinin neredeyse tüm gerekli form faktörlerinde üretilebilmesidir. Dezavantaj ise herkes için arzdan sürekli akım çekmek yerine, güç kaynağı ünitesinde büyük miktarda üçüncü ve daha yüksek harmonikler ve önemli yüksek frekans bileşenleri içeren akım darbeleri çekmesidir.

Yüksek frekans bileşenlerini hattan ve nötrden toprağa atlamak için besleme girişine basit bir filtre takılabilir, ancak kaynağa geri akan harmonik akımlar üzerinde etkisi yoktur.

4.4.2.Floresan Aydınlatma Balastları

Elektronik aydınlatma balastları, verimlilik artışı taleplerinin ardından son yıllarda popüler hale gelmiştir. Genel olarak en iyi manyetik balastlardan sadece biraz daha verimlidirler ve aslında kazancın çoğu, elektronik balastın kendisinden ziyade yüksek frekansta sürüldüklerinde lambanın daha verimli olmasına bağlanabilir.

Dezavantajları ve büyük tesisatlarda önemli olan, invertörün hem akım hem de elektriksel gürültüde harmonik üretmesidir.

Manyetik balastlar da harmonikler oluşturur, ancak seviyeler genellikle elektronik birimler tarafından üretilenlerden daha düşüktür. Genellikle harmonik akımlar için düşük empedanslı şönt görevi yapan yerel bir güç faktörü düzeltme kondansatörü içerirler. Sonuç olarak, dağıtım sistemine yayılan bozulma seviyesi düşüktür ve daha az problem ortaya çıkmaktadır.

4.4.3.Değişken Hızlı DC Sürücüler

Pratikte, DC motorlar sonlu endüktansa sahiptir, bu nedenle DC akımı üzerinde 300 Hz'lik bir dalgalanma (yani besleme frekansının altı katı) vardır. Bu, besleme akımının harmonik görüntüsünü değiştirir ve bazı motorlarda %50'ye varan beşinci harmonik akımlara rastlanır.

Maliyetleri düşürmek için düşük endüktanslı motorları kullanma eğilimi vardır, ancak bu yanlış ve ekonomik sorun oluşturabilir. Yüksek harmonik seviyelerinin

üstesinden gelmek daha zordur ve genellikle teorik durum için tasarlanmış harmonik filtreler zarar görebilir.

Harmoniklerin (5. veya 6.) büyüklüğü, on iki darbeli bir köprü kullanılmasıyla önemli ölçüde azaltılır. Bu, iki yıldız darbeli köprüdür, bir yıldızdan beslenir ve aralarında 30° faz kayması sağlayan bir delta transformatör sarımıdır. Beşinci ve yedinci harmonikler teorik olarak kaldırılmıştır, ancak pratikte bunlar sadece %20 ile %50 arasında bir faktör tarafından azaltılır.

Daha yüksek harmonikler, toplam harmonik akımının sıfır kaynak empedansı varsayarak yaklaşık %12 azaltarak değişmeden kalır. Toplam harmonik akımını sadece düşürmekle kalmaz, aynı zamanda da filtrenin tasarımını daha kolay hale getirir.

15 derecelik faz kayması ile iki paralel on iki darbeli ünite kullanılarak elde edilen darbe sayısının %24 daha da artması, toplam harmonik akımı yaklaşık %4,5'e düşürür. Ekstra gelişmişlik elbette ki maliyeti artırır, bu nedenle bu kontrol cihazı yalnızca elektrik tedarikçisinin sınırlarına uymak için gerekli olduğunda kullanılacaktır.

Yukarıda verilen harmonik akım bozulma değerleri kaynak empedansının sıfır olduğunu varsaymaktadır. Öyle olsaydı, harmoniklerin seviyesi önemsiz olurdu, çünkü voltaj bozulmasına neden olmaz ve diğer tüketiciler etkilenmezdi. Gerçekte, kaynak empedansı sonludur ve bu koşullar altında mevcut bozulma önemli ölçüde azaltılmıştır.

AC motorlar için değişken hız kontrol cihazları, DC üretmek için benzer dönüştürücüler, ardından sürücü için gerekli frekansta AC üretmek için bir invertör kullanır. Dönüştürücü için beklenebilecek harmoniklerin yanı sıra, sürücünün çalışma hızı ile ilgili diğer akım bileşenleri de üretilir.

Harmonik akım görünümü, konvertör ve invertörün tasarımına bağlıdır. Bu tür sürücülerin büyüklüğü nedeniyle, yerel filtreleme normalde sağlanır, ancak bu sistemler için filtre tasarımı genellikle çok zordur.

4.4.4.Kesintisiz Güç Kaynakları(UPS)

UPS, güç dönüşümünün nasıl sağlandığına ve hariciden dâhili beslemeye nasıl geçildiğine bağlı olarak pek çok farklı formda mevcuttur. Birkaç MVA'ya kadar olan çoğu ünite, çıkış gücünü üretmek için katı hal invertörlerini kullanır, çok büyük üniteler ise motor jeneratörlerini kullanır.

Tipik yapılandırmalar şunları içerir:

4.4.4.1.Çevrimiçi UPS

Bir çevrimiçi UPS, bir bataryayı şarj etmek için AC hattı gücünü DC'ye dönüştürür ve AC üretmek için DC batarya gücünü tersine çevirir. Yük, besleme koşullarından bağımsız olarak sürekli akü gücünden sürekli beslenir.

Tedariğin tamamı iki kere dönüştürüldüğü için, bu UPS tipleri nispeten yetersizdir ve sadece küçük üniteler için kullanılır.

4.4.4.2.Çevrimdışı UPS

Çevrimdışı bir UPS, mevcut olduğunda yükü ana beslemekten besler. İnvertör/konvertör normal olarak, akü invertöre güç sağladığında, DC gücünü tekrar yük için AC gücüne dönüştüren bir kesinti oluşana kadar etkin değildir.

Dezavantajı, AC'den aküye aktarmak için gereken zamanın, bilgisayarlar ve sunucular gibi bazı hassas cihaz için bir sorun yaratabileceğidir.

4.4.4.3.Çizgi Etkileşimli Teknoloji

Çizgi etkileşimli tasarım, çevrimiçi ve çevrimdışı tasarımların özelliklerini birleştirir. Bu tasarımdaki invertör çift işlev görür. Normal işletimde pili tamamen şarj edilmiş halde tutar. Bir güç kaynağı arızası tespit edildiğinde, eviricinin güç kaynağı ile bağlantısı kesilir ve eviriciden yüke aküden güç sağlanır.

Çevrimdışı bir UPS'e benzer şekilde, etkileşimli teknoloji etkindir, çünkü güç normalde doğrudan hattan sağlanır. Isı ve gerilmeler en aza indirgenir çünkü hat etkileşimli çıkış trafosu üzerinden hat gerilimi düşüşlerini telafi eder ve sadece güç artışı sağlar. Çevrimiçi UPS gibi, sürekli güç de sağlar.

Bununla birlikte, hat etkileşimli UPS, hat içi UPS tarafından sunulan hat ile yük arasında tam anlamıyla yalıtım sağlamamaktadır.

Bir UPS'nin giriş dönüştürücüsü yukarıda belirtilen değişken hız sürücüsüne benzer harmonik bozulmalarla sonuçlanır.

Normal çalışma sırasında, çevrimdışı ve çizgi etkileşimli tasarımlar, yalnızca akü şarjını korumak için olan nispeten düşük bir giriş akımı çekerler, ancak kurulum tasarımı, geri kazanılırken akacak olan tam yük akımının etkisini dikkate almalıdır.

UPS çıkışındaki yük, kaçınılmaz olarak BT cihazından oluşur ve bu nedenle doğrusal değildir ve düşük mertebeden harmonikler bakımından zengindir. UPS'in çıkış transformatörü, ortaya çıkacak aşırı ısıtma ile başa çıkmak için uygun şekilde derecelendirilmelidir.

Üç fazlı sistemlerde üçlü N harmonikleri (yani üçün tek katı olan harmonikler) nötrü de ilave eder. KGK içindeki ve dağıtım devresinin geri kalanındaki tüm nötr iletkenler, faz akımının iki katına yaklaşabilen bu artan akımları taşıyacak şekilde uygun şekilde derecelendirilmelidir.

UPS çıkışında üçüncü bir harmonik filtrenin sağlanması arzu edilir, ancak genellikle çok büyük ve pahalı bileşenler gerektirir. Bir UPS belirlerken, yükün doğru seçilebildiğinden ve tedarikçiye uygun şekilde iletildiğinden emin olmak gereklidir.

4.4.5. Manyetik Özlü Cihazlar

Manyetik çekirdekli bir indüktörde mıknatıslanma akımı ve sonuçta ortaya çıkan akı yoğunluğu arasındaki ilişki içsel olarak doğrusal değildir. Eğer mevcut dalga formu sinüzoidal olmakla sınırlıysa, yani devrede seri direnç yüksekse, manyetik alan harmoniklerini içerecektir. Buna zorla mıknatıslanma denir. Bobin üzerindeki voltaj sinüzoidal ise yani seri direnç düşükse, akı yoğunluğu da sinüzoidal olacaktır, ancak akım harmonikler içerecektir, buna da serbest mıknatıslanma denilmektedir.

Transformatörler tipik olarak, çıkış dalga formuna yaklaşık %1,5 oranında az miktarda voltaj bozulumu getirir. Kullanan flüoresan lamba parçaları, lambanın kendisinin doğrusal olmayan davranışı (negatif bir dinamik dirence sahiptir) ve çekirdeğin doğrusal olmayan davranışı nedeniyle bazı harmonikler oluşturur. Seviyeler genellikle elektronik balastlar tarafından üretilenlerden daha düşüktür[50,56,57].

4.5. Harmoniklerin Neden Olduğu Genel Sorunlar

Harmonik akımlar hem besleme sisteminde hem de tesisatta sorunlara neden olabilir. Etkileri ve çözümleri çok farklı ve ayrı ayrı incelenmesi gerekir. Tesis içindeki

harmoniklerin etkilerini kontrol etmek için uygun olan önlemler, arz ve bunun tersi yolundaki bozulmaları bazen azaltılamayabilir.

Harmonik problemler akım ve gerilimden kaynaklanır. Harmonik problemler;

➤ Harmonik akımların neden olduğu problemler:

1. Nötr iletkenlerin aşırı yüklenmesi
2. Transformatörlerin aşırı ısınması
3. Devre kesicilerin arızalı çalışması
4. Güç faktörü düzeltme kapasitörlerinin aşırı gerilmesi
5. Cilt etkisi

➤ Harmonik gerilimlerden kaynaklanan problemler:

1. Voltaj bozulması
2. Endüksiyon motorları
3. Sıfır geçiş gürültüsü
4. Arzı etkileyen harmonik problemler

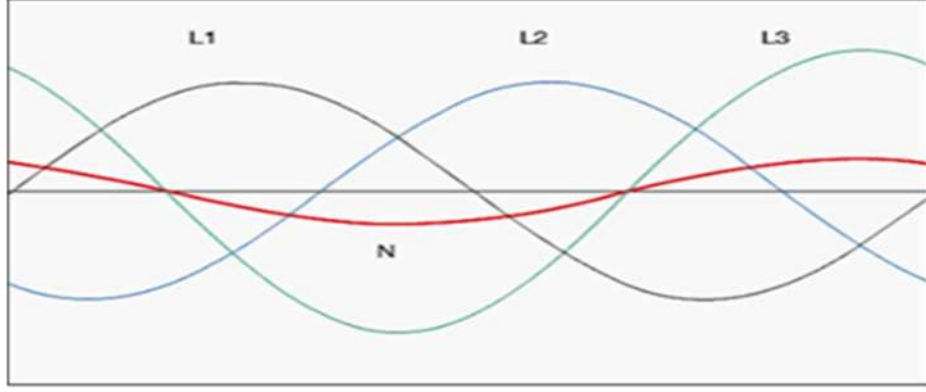
4.5.1. Harmonik Akımların Neden Olduğu Problemler

4.5.1.1. Nötr İletkenlerin Aşırı Yüklenmesi

Üç fazlı sistem, üç ayrı faz iletkeni ve nötr bir iletkenle oluşur. Tüm faz iletkenleri aynı akımı taşırsa, faz akımları dengeli bir yük olması koşuluyla birbirini iptal etme eğilimindedir. Bu dengeli yük, nötr iletkenin boyutunu azaltmayı mümkün kılar. Ne yazık ki, bilgisayarlarda kullanılan anahtarlamalı mod güç kaynakları çok yüksek bir üçüncü harmonik akıma sahiptir. Harmonik akımlar nötr kabloda iptal olurken, üçüncü harmonik akım nötrde katkı maddesidir. Çok sayıda yüklü kişisel bilgisayarı olan binalarda, nötr tel, telin yerleştirmek için tasarlandığından çok daha yüksek akımlar taşıyabilir ve bu da potansiyel bir yangın tehlikesi oluşturur.

Nötrlü üç fazlı simetrik ve dengeli bir sistemde, fazlar arasındaki dalga formları 120° faz açısı ile değiştirilir, böylece fazlar eşit olarak yüklendiğinde, nötrdeki akım sıfır olur.

Dengesiz yüklerin varlığı (faz-faz, faz-nötr vb.), dengesiz bir akımın nötrde akmasına izin verir.



Şekil 4.3. Dengesiz akım sistemi grafiği[58]

Şekil 4.3.'te dengesiz bir akım sistemini göstermektedir (3 faz diğer iki fazdan %30 daha fazla bir yüke sahip) ve nötrde meydana gelen akım kırmızı renkle vurgulanmıştır. Bu şartlar altında, standartlar nötr iletkenin faz iletkenlerinden daha küçük bir kesitle boyutlandırılmasını sağlar.

Aslında, üç fazdaki temel frekanstaki akımlar birbirini iptal etse de, üçüncü harmoniğin bileşenleri, temelin üçte birine eşit bir süreye sahiptir, yani fazlar arasındaki faz kaymasına eşittir.

Aynı durumlar üçün katları harmonikler için de geçerlidir[58].

4.5.1.2. Transformatörlerin Aşırı Isınması

Harmonik üreten yükleri besleyen transformatörler için, sargılardaki girdap akımı kaybı, transformatördeki en baskın kayıp bileşenidir. Bu girdap akım kaybı, ürünün harmonik akımının karesine ve buna karşılık gelen frekansa oranla artar. Lineer olmayan bir yük sağlayan bir tam yüklü transformatöre giden toplam transformatör kaybı, eşdeğer bir lineer yükten iki kat daha yüksektir. Bu, aşırı trafo ısınmasına neden olur ve trafodaki yalıtım malzemelerine hasar verir, bu da trafo arızasına yol açar.

Transformatörlerin içindeki harmoniklerin etkileri temel olarak üç yönü içerir;

- Demir kayıplarının artması (veya yüksüz kayıplar)
- Bakır kayıplarının artması
- Sargılarda dolaşan harmoniklerin varlığı

Demir kayıpları, histerezis ve girdap akımlarından kaynaklanan kayıplardan kaynaklanır. Gecikmeden kaynaklanan kayıplar frekansla orantılıdır, oysa girdap akımlarından kaynaklanan kayıplar frekansın karesine bağlıdır.

Bakır kayıpları, transformatör sargılarındaki Joule etkisi ile dağıtılan güce karşılık gelir. Frekans arttıkça (350 Hz'den başlayarak) akım, iletkenlerin yüzeyinde kalınlaşma eğilimindedir (cilt etkisi). Bu koşullar altında, iletkenler Joule etkisindeki kayıplar arttığından, mevcut akış için daha küçük bir kesit sunar.

Bu iki ilk özellik, bazen trafonun bozulmasına neden olan aşırı ısınmayı etkiler.

Üçüncü özellik, üçlü N harmoniklerin (homopolar harmonikler) transformatör sargıları üzerindeki etkileri ile ilgilidir ve harmonikler sargılardan akar[59].

4.5.1.3. Devre Kesicilerin Arızalı Açılması

Kapasitans ve endüktans içeren tüm devrelerde bir veya daha fazla rezonans frekansı vardır. Rezonans frekanslarından herhangi biri doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonik frekansa karşılık geldiğinde harmonik rezonans oluşabilir. Rezonans frekansı sırasında voltaj ve akım çok fazla bozulabilir. Bu bozulma, bir elektrik güç sisteminde nihayetinde üretim kayıplarına neden olabilecek sıkıntılara neden olabilir.

Akım devre kesicileri (RCCB), faz ve nötr iletkenlerdeki akımı toplayarak ve gücü yükten ayırarak çalışır. Arızalı açma, iki nedenden dolayı harmoniklerin varlığında ortaya çıkabilir.

Birincisi, elektromekanik bir cihaz olan RCCB, yüksek frekans bileşenlerini doğru şekilde toplayamayabilir ve bu nedenle hatalı şekilde açılır.

İkincisi, harmonikleri üreten cihazlar aynı zamanda cihazların güç bağlantısında filtrelenmesi gereken anahtarlama gürültüsünü de oluşturur. Normalde bu amaç için kullanılan filtreler, hattan ve nötrden toprağa bir kapasitöre sahiptir ve bu nedenle toprağa küçük bir akım sızdırır. Bu akım, standartlarla 3.5 mA'dan daha az ile sınırlıdır ve genellikle daha düşüktür, ancak cihaz bir devreye bağlandığında, kaçak akım RCCB'yi kapatmak için yeterli olabilir.

Minyatür devre kesicilerin (MCB) sıkıntıya neden olması genellikle devrede akan akımın harmonik akımların varlığı nedeniyle hesaplamadan veya basit ölçümden beklenenden daha yüksek olmasından kaynaklanır.

Çoğu taşınabilir ölçüm cihazı gerçek RMS değerlerini ölçmez ve sinüzoidal olmayan akımları %40 oranında hafife alabilir[9].

4.5.1.4.Güç Faktörü Düzeltme Kapasitörlerinin Aşırı Gerilmesi

Güç faktörü düzeltme kapasitörleri, endüksiyon motorları gibi endüktif bir yük tarafından çekilen gecikme akımını dengelemek için ana faz açısına sahip bir akım çekmek için sağlanmıştır. Doğrusal olmayan yüke sahip bir PFC kondansatörü için etkili eşdeğer devre, PFC kapasitörünün empedans frekansı arttıkça azalır ve kaynak empedansı genellikle endüktif olur ve frekansla artar. Bu nedenle, kapasitörün oldukça yüksek harmonik akımlar taşıması muhtemeldir ve özellikle onları idare etmek için tasarlanmadıkça hasar oluşabilir.

Potansiyel olarak daha ciddi bir problem, besleme sisteminin kapasitörünün ve başıboş endüktansının harmonik frekanslardan birine veya yakınında (elbette 100 Hz aralıklarla meydana gelen) rezonans edebilmesidir. Bu olduğunda, çok büyük voltajlar ve akımlar meydana gelebilir, bu da çoğu zaman kapasitör sisteminin başarısızlığına yol açar[60].

4.5.1.4.1.Rezonans Problemlerinden Kaçınmak

Hem kapasitif hem de endüktif cihazların dağıtım sistemlerinde kullanılması, rezonans olaylarına neden olarak aşırı yüksek veya düşük empedans değerlerine neden olur. Empedanstaki bu değişiklikler, dağıtım sistemindeki akımı ve voltajı değiştirir.

Rezonans problemlerini önlemek için en iyi yaklaşım, ana veri yoluna büyük kapasitör bankları yerleştirmektir.

Bu çözüm ile aşağıdaki avantajlar sağlanabilir;

- Bir bütün olarak sisteme daha uygun reaktif güç,
- Harmonik gerilimlerin ve akımların daha kolay kontrolü,
- Büyük banklar satın alma maliyeti açısından daha ekonomik olduğu için düşük sermaye maliyetleri,
- Rezonans frekansını, harmonik frekansından uzağa kaydırmak için reaktörler eklenebilir.

Kondansatörler ayrıca rezonans harmonik frekanslarında, harmonik filtreler geliştirmek için reaktörler ile birleştirilebilir. Kapasitör veri yolundaki rezonans frekansı şu şekilde hesaplanabilir:

$$f_r = f_s \sqrt{\frac{kVA_{sc}}{kVA_c}} \quad (4.4)$$

- f_r , Rezonans frekansı
- f_s , Sistem frekansı, 50 Hz
- kVA_{sc} , kVA'da üç fazlı sistem hata seviyesi
- kVA_c , kVA'da üç fazlı kondansatör derecelendirmesi[5]

4.5.1.5.Cilt Etkisi

Alternatif akım bir iletkenin dış yüzeyinde akma eğilimindedir. Bu cilt etkisi olarak bilinir ve daha yüksek frekanslarda daha belirgindir. Cilt etkisi normalde göz ardı edilir, çünkü güç kaynağı frekanslarında çok az bir etkiye sahiptir. Ancak yaklaşık 350 Hz'in üzerinde, yani yedinci harmonik ve üstü, cilt etkisi belirgin hale gelir ve ek kayıp ve ısınmaya neden olur. Tasarlanan paneller, yüksek frekanslı harmonik akımların ürettiği manyetik alanlara mekanik olarak rezonans yapabilir. Bu olduğunda, panel titreşir ve harmonik frekanslarda bir ses çıkarır. Harmonik akımların olduğu yerlerde, tasarımcılar cildin etkisini hesaba katmalı ve kabloları buna göre seçmelidirler. Bu sorunun üstesinden gelmek için birden fazla kablo çekirdeği veya lamine bara kullanılabilir. Ayrıca baraların montaj sistemlerinin harmonik frekanslarda mekanik rezonanstaki kaçınmak için düzgün tasarlanması ve işçiliği iyi yapılması gerekmektedir.

4.5.2. Harmonik Gerilimlerden Kaynaklanan Problemler

4.5.2.1.Voltaj Bozulması

Besleme kaynak empedansına sahip olduğundan, harmonik yük akımları, voltaj dalga formunda harmonik voltaj bozulmasına neden olur.

Empedans için iki unsur vardır, ortak bağlantı noktası (PCC) ve ortak bağlantı noktasından gelen iç kablolama.

Doğrusal olmayan yük tarafından çekilen çarpık yük akımı, kablo empedansında çarpık bir voltaj düşmesine neden olur. Ortaya çıkan çarpık gerilim dalga formu, aynı

devreye bağılı diğerk tüm yüklerle uygulanır ve doğrusal yük olsa bile harmonik akımların içlerinde akmasına neden olur. Bunu engellemek için harmonik üreten yükleri besleyen devreleri, harmoniklere duyarlı yükleri besleyen yüklerden ayırmaktır.

Harmonik voltaj bozulmasının büyüklüğü göz önüne alındığında, bir güç kesintisi sırasında yükün bir UPS veya bekleme jeneratörüne aktarıldığında kaynak empedansının ve ortaya çıkan voltaj bozulmasının çok daha yüksek olacaktır.

4.5.2.2.Endüksiyon Motorları

Harmonik voltaj bozulması, motorlarda, transformatörlerde olduğu gibi artan girdap akım kayıplarına neden olur. Bununla birlikte, statorda her biri motoru ileri veya geri doğru farklı bir hızda döndürmeye çalışan harmonik alanların oluşması nedeniyle ek kayıplar ortaya çıkar. Rotorda indüklenen yüksek frekanslı akımlar kayıpları daha da arttırır.

Veri işleme cihazları gibi harmonik üreten yükler için acil destek sağladıkları için, genellikle daha savunmasızdırlar. Aşırı ısınmaya ek olarak, belirli harmonik tipleri mevcut dalga formunun sıfır geçişinde bozulma meydana getirir ve bu da jeneratörün kontrol devreleri için parazite ve dengesizliğe neden olur.

Harmonik voltaj bozulmasının mevcut olduğu durumlarda, ilave kayıpları hesaba katan motorlar değerlendirilmelidir.

4.5.2.3. Sıfır Geçiş Gürültüsü

Pek çok kontrolör, yüklerin ne zaman açılacağını belirlemek için besleme voltajının sıfır voltajı geçtiği noktayı tespit eder. Bu, endüktif yüklerin sıfır voltajda değiştirilmesi, geçici üretmediğinden, elektromanyetik paraziti (EMI) ve yarı iletken anahtarlama cihazlarındaki gerilimi azalttığı için yapılır.

Arz üzerinde harmonikler veya geçici olaylar mevcut olduğunda, geçitteki voltaj değişiminin oranı daha hızlı hale gelir ve tanımlanması daha zor hale gelir, bu da kararsız çalışmaya yol açar.

4.5.2.4.Arız Etkileyen Harmonik Problemler

Beslemeden harmonik bir akım çekildiğinde, ortak bağlantı noktasındaki ve akımdaki kaynak empedansı ile orantılı bir harmonik gerilim düşmesine neden olur.

Besleme ağı genellikle endüktif olduğundan, kaynak empedansı yüksek frekanslarda daha yüksektir. Tabii ki, PCC'deki voltaj zaten diğer tüketiciler tarafından çekilen harmonik akımlar ve transformatörlerde bulunan bozulmalardan dolayı bozulmakta ve her tüketici ek bir katkı sağlamaktadır.

4.6. Harmonikleri Azaltmak İçin Çözümler

Harmonik akımların oluşumunu sınırlayan standartlar göz önüne alındığında, harmonik kontrol bugün temel olarak iyileştirici tekniklere dayanmaktadır. Güç sistemindeki harmonikleri telafi etmek veya azaltmak için, çeşitli etkililik derecelerinde ve verimlilikte alınabilecek birkaç yaklaşım vardır.

4.6.1. Nötr Kablolamada Boy Ölçümü

Modern tesislerde, nötr kablolama her zaman güç kablolarıyla aynı kapasitede veya daha büyük olarak belirtilmelidir. Elektrik kodları nötr kabloların boyutunun küçültülmesine izin verse de çağrı merkezi gibi birçok kişisel bilgisayar bir araya getirecek uygun bir tasarım, faz kablo kapasitesini yaklaşık %200 oranında aşacak nötr kabloları belirtecektir.

4.6.2. Ayrı Nötr İletkenlerin Kullanımı

Üç fazlı dallanma devrelerinde, bir nötr iletkeni paylaşan çok telli bir dallanma devresi kurmak yerine, her faz iletkeni için ayrı nötr iletkenler kullanılabilir. Bu, dal devrelerinin harmonik yükleri taşıma kapasitesini artırır.

Bu yaklaşım, dal devresi nötrleri üzerindeki harmonik akımların eklenmesini başarıyla ortadan kaldırır, ancak panel panosu nötr barası ve besleyici nötr iletkeni göz önünde bulundurulmalıdır.

4.6.3. Harmoniklerden Etkilenmeyen DC Güç Kaynaklarının Kullanımı

Tipik veri merkezinde güç dağıtım sistemi, 480 voltluk AC güç kaynağını, sunucu raflarını besleyen 208 volt AC gücüne düşüren bir transformatörden dönüştürür. Her sunucudaki bir veya daha fazla güç kaynağı bu AC girişini ünitenin dâhili bileşenlerine uygun DC voltajına dönüştürür.

Enerji ve Güç Yönetimi dergisindeki makaleye göre, AC güç kaynakları yerine DC güç kaynaklarına sahip bilgisayarlar ve sunucular %20 ila %40 daha az ısı üretir, güç tüketimini %30 oranında düşürür, sunucu güvenilirliğini artırır, kurulumlarda esneklik sunar ve düşük bakım gereksinimi yaşatır.

Ancak maliyet, uyumluluk, güvenilirlik ve verimlilik bir arada ele alındığında, AC'den DC gücüne geçiş çoğu veri merkezi için uygun değildir. AC gücü biraz daha az verimli olsa bile mevcut donanım için evrensel olarak kabul edilebilir.

4.6.4. Güç Dağıtım Bileşenlerinde K Dereceli Transformatör Kullanımı

Standart bir transformatör, doğrusal olmayan yükler tarafından üretilen yüksek harmonik akımlar için tasarlanmamıştır. Bu yüklere bağlandığında aşırı ısınır ve erken arızalanır. Harmonikler elektrik sistemlerine zararlı etkiler gösteren seviyelerde (1980 yıllarında) kullanıldığında, endüstride K dereceli transformatörler geliştirilerek üstesinden gelinmeye çalışılmıştır.

K dereceli transformatörler harmonikleri işlemek için kullanılmazlar ancak harmonik akımların ürettiği ısıyı kullanabilirler ve K faktörü değerleri altında kullanıldığında çok verimlidirler.

K faktörü değerleri 1 ile 50 arasındadır. Doğrusal yükler için tasarlanmış standart bir transformatörün K faktörü 1 olduğu söylenir. K faktörü ne kadar yüksekse, harmonik akımlardan daha fazla ısı transformatörün üstesinden gelebilir. Doğru K faktörü seçimini yapmak çok önemlidir, çünkü maliyet ve güvenliği etkiler[61-64].

4.6.5. Filtreleme

Birçok filtre her frekans aralığında verimli çalışmamakla birlikte, seçilecek olan filtreleme için özel bir araştırma yapması gerekir. Kullanıcının, bir filtre seçmeden önce

ortadan kaldırması gereken harmonik bozulma miktarını bilmesi önemlidir. Örneğin, aktif filtreler; UPS, VFD ve DC sürücüler gibi birden fazla yük tipi olduğunda idealdir.

Filtreleme Bölüm 5’te detaylı olarak incelenecektir.



5. HARMONİK FİLTRE TASARIM YÖNTEMİ VE FİLTRELENMESİ

5.1. HARMONİK FİLTRE TASARIM YÖNTEMİ

5.1.1. Harmonik Filtre Modellenmesi

Harmonik filtre tasarlamak için, çevresel veriler de dâhil olmak üzere yerel güç sistemi hakkında detaylı bilgiye sahip olmak gerekir. Güç sistemi bilgisi, nominal hattaki hat voltajı, sistem voltaj seviyesi, temel frekans, sistem konfigürasyonu ve sistem bileşenlerinin empedansı gibi özellikleri içerir. Ekipman konumu (iç veya dış mekân), çalışma kısıtlamaları, cihazın mevcut çalışma döngüsü, anahtarlama çalışma oranları, çevresel veriler (ortam sıcaklığı ve rüzgâr gibi), harmonik ölçümler veya üretici harmonik özellikleri hakkında net bir bilginin bilinmesi gerekmektedir.

5.1.2. Harmonik Filtre Bankı kVAR Boyutu Belirleme

Filtreleme cihazları, harmonikleri filtrelemenin yanı sıra ağır yükler sırasında voltajın korunmasına yardımcı olan güç faktörü iyileştirmesi için kapasitif ve reaktif güç sağlar. Filtrenin “Etkili kVAR” boyutu, güç faktörü için kapasitif, reaktif güç gereksinimlerinin yanı sıra istenen değerin güç akış programları tarafından genel olarak belirlendiği voltaj kontrolüne bağlıdır.

5.1.3. İlk Harmonik Filtre Ayarının Seçilmesi

Gerekli harmonik performansını karşılamak için, harmonik voltajını ve akım bozulmasını azaltmak için filtre ayarlama gereklidir. Harmonik filtre tipik olarak en önemli harmoniğin düşük frekansına ayarlanır. Bununla birlikte, harmonik filtrenin yeterli harmonik filtrelemeyi sağlamak ve ayrıca muhtemel filtrenin tespiti için yer açmak için istenen frekansın %3 ila %15'in altına ayarlanması gerekir. Filtre konumu tarafında (hem normal hem de beklenmedik koşullar için) tüm frekans spektrumunda harmonik filtre performansı dikkate alınmalıdır.

Filtreyi istenen harmoniğin altına ayarlamanın asıl nedeni, sistemle olan filtre etkileşiminin niteliğidir. Yani, filtrenin kendisi paralel rezonans frekansını harmoniğe çok yaklaştırabilir. Bu, filtre ve sistem konfigürasyonundaki bir değişiklik nedeniyle oluşabilir: Transformatör kaybı, cihaz değişimi veya rutin bakım gibi doğal sistem varyasyonları, hem

filtre reaktörlerinde hem de kapasitörlerde üretici toleransları, sıcaklık değişimlerinden dolayı kapasitör değişiklikleri, sigorta çalışması nedeniyle harmonik filtre kapasitör ünitesi veya elemanı arızası (toplam kapasitansı azaltır ve filtre rezonans frekansını arttırır) gibi sayılabilir.

Harmonik bozulma seviyesi çok önemli değilse, kullanıcı harmonik filtre kapasitörünü harmonik akımlarla aşırı yüklemekten kaçınmak isteyebilir, çünkü sistem ile rezonans oluşturmaz. Ardından filtre, sistemle 3. harmonik rezonanstan kaçınmak için topraklanmalı ve karakteristik harmonikte rezonanstan kaçınmak için 5. harmoniğin altına ayarlanmış olmalıdır.

Harmonik filtrelerin sayısı, filtre ayarlama ve yan konumlar, kapasitans değerleri, endüktans ve reaktans, kapasitans için izin verilen toleranslar, endüktans ve direnç, ayarlanan frekansta harmonik filtre reaktörünün $Q=(X/R)$ oranı ve aynı zamanda harmonik filtre dirençleri için durum enerji harcayan gereksinimler, harmonik çalışma analizinin sonuçları olabilir. Harmonik voltaj ve akım spektrumları, normal ve beklenmedik sistem koşulları için temel ve tüm önemli harmonik frekansları ile analizin önemli bir sonucudur.

5.1.4. Bileşen Belirleme

Harmonik filtre kapasitör derecesi genellikle belirlenecek ilk değerdir, bunu reaktör, direnç ve anahtar değerleri izler. Bazı harmonik filtre konfigürasyonları için geçici simülasyon çalışmaları da gerekli olabilir.

5.1.5. Harmonik Filtre Kondansatörleri

Harmonik filtre kondansatörleri, voltaj ve kVAR değerine göre derecelendirilir. Harmonik spektrumlara bağlı olarak, geçici aşırı gerilimler, VAR gereksinimleri ve sistem verilerine göre seçilmelidir. Kapasitör bankasının nominal kVAR'ı, filtre reaktörünün etkisinden dolayı etkili reaktif güce eşit değildir.

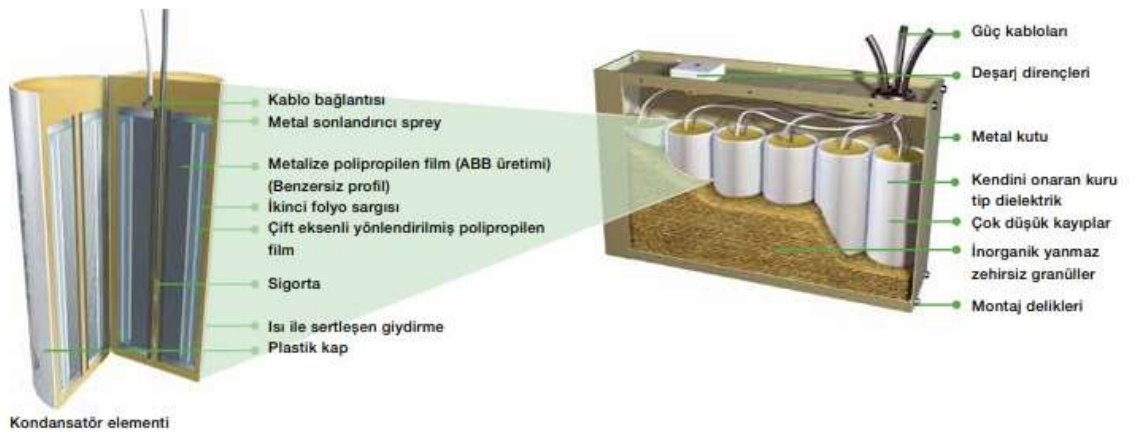
Kapasitör voltaj derecesi, kararlı durumda (harmonikler dâhil), filtre anahtarlama ile ilişkili geçici ve bazen devre kesici işletiminde ve mekanik dinamiklerde (birkaç saniyeye kadar süren) en yüksek voltaj değerinden belirlenir. Tek ayarlı uygulamaların çoğunda, harmonik filtre kapasitör gerilimi sabit durum görevlerine dayanır. Harmonik filtre kapasitörlerine uygulanan en yüksek tepe voltajı, normal sistem çalışması ve beklenmedik durumlar için, tepe kapasitör voltaj oranının %100'ünden fazla olmamalıdır.

Belirlenen kVAR ve voltaj için, harmonik filtre kapasitörlerinden geçen toplam RMS akımı, kondansatör ünitesinin normal akımının %135'inden az olmalı ve akım, kondansatör sigortalarının kapasitesinde tutulmalıdır. Ek bir kontrol, harmonik filtre kapasitörünün dielektrik ısıtma tahminini içerir. Ayrıca, harmonik yüklerin gerektirdiğinden daha fazla kapasiteye sahip bir harmonik filtrenin bulunması ilave gereksinim duyulmasında avantaj sağlayabilir.

Silindirik tip ve kutu tip olmak üzere iki çeşit kondansatör kullanılmaktadır.



Şekil 5.1. Silindirik tip (Tüp) kondansatör ve iç yapısı[9]



Şekil 5.2. Kutu tip kondansatör ve iç yapısı[9]

5.1.6. Harmonik Filtre Reaktörleri

Harmonik filtre kondansatörüne göre harmonik filtre reaktörünün fiziksel konumu, termal sorunları, manyetik akı ısıtmasını, reaktör kısa devre derecesi göz önüne alınmalıdır.

Temel ve harmonik akımlardan dolayı aşırı ısınma, metal kaplı filtrelerin içine yerleştirilmiş demir çekirdekli harmonik filtre reaktörleri için ciddi bir sorun olabilen bileşen bozulmasına neden olur. Metalik yapılarda indüklenen girdap akım kayıplarının hava çekirdekli filtre reaktörleri tarafından manyetik akı etkisi tasarım aşamasında analiz edilmelidir.

Harmonik filtre kapasitansı işlemine benzer şekilde, geçici ve dinamik aşırı voltaj seviyeleri kontrol edilmelidir. Harmonik filtre reaktörünün kısa akım kapasitesini kontrol etmek için, maksimum çalışma voltajının koşulu için kısa devre akım analizi yapılmalıdır.



Şekil 5.3. Harmonik filtre reaktörü[9]

5.1.7. Filtre Dirençleri

Harmonik filtre direncinin fiziksel konumu, harmonik filtre kapasitörüne göre, termal sorunları, direnç kısa devre derecesini etkiler.

Temel ve harmonik akımlardan dolayı bileşenlerin bozulmasına yol açan aşırı ısınma, metal filtreler için ciddi bir sorun olabilir.

5.1.8. Devre Kesiciler

Kapasitif anahtarlama gereklilikleri, maksimum sistem gerilimi, kapasitif toleranslar ve harmonikler içeren en kötü senaryo koşullarına dayanmalıdır. Kısa devre analizinin

yakın ve mandallı ve anlık akım kontrolünü içermesi ve bir kapasitör anahtarının kısa devre akım seviyesini işlemesi gerekir, bununla birlikte bir devre kesicinin aksine bir kapasitör anahtarının kesmemesi gerekir. Ayrıca, filtre yuvalarının bir şönt kapasitör bankına kıyasla bir anahtar boyunca daha yüksek geri kazanım voltajı geliştirdiğini hatırlamak önemlidir. Bu nedenle, doğru bir anahtarlama cihazını seçmenin farkında olmak gerekir.

5.1.9. Geçici Anahtarları Değiştirme

Akımın büyüklüklerini ve süresini, geçici durumun en kötü kısmındaki harmonik sıraya göre belirlemek için bazı en kötü durum harmonik yükleme senaryolarını modellemek mümkündür. Bazı tipik senaryolar aşağıda belirtilmiştir.

Harmonik filtre ayarlama reaktörünün varlığı nedeniyle, arka arkaya anahtarlama akımı büyüklüklerinin şönt reaktör sıralarına göre daha düşük olması ve bu nedenle ilave akım sınırlama reaktörlerinin kurulması gerekmemektedir. Normal durumlarda, tek ayarlı harmonik filtrenin değiştirilmesi, şönt kapasitör bankası için beklenen kapasitörler veya reaktörler için olağandışı bir görev gerektirmez.

Filtrenin sisteme bağlı olması ve bir sistem kesintisinden sonra enerjilendirilmesi gerekiyorsa, trafo doygunluğundan kaynaklanan harmonikler harmonik filtrenin kısa süre aşırı yüklenmesine neden olabilir. Filtre üzerindeki benzer etki, trafo doygunluğuna ve filtre aşırı yüklenmesine neden olan yakınlardaki arızaların bir sonucu olabilir. Harmonik filtre performansını belirlemeye yönelik geçici çalışmalar oldukça arzu edilebilir[57,65,66].

5.2. HARMONİKLERİN FİLTRELENMESİ

Harmonik filtreler, harmonik akımları azaltmak veya engellemek için tasarlanmış seri veya paralel rezonans devreleridir. Güç sisteminde akan harmonik akımları kaynaktan alırlar ve sistemdeki harmonik voltaj bozulmalarını azaltırlar. Bu tür cihazlar pahalıdır ve yalnızca harmonikleri sınırlayan diğer yöntemler de değerlendirildiğinde kullanılmalıdır. Belirli bir durumda filtrelerin uygulanması her zaman kolay değildir. Filtrelerin kendisi başlangıçta beklenmedik rezonanslar üretmek için sistemle veya diğer filtrelerle etkileşime girebilir. Bu nedenle, en basit vakaların hepsinde harmonik çalışmalar filtre grubunun

türünün, dağılımının ve derecelendirmesinin belirlenmesine yardımcı olmak için kullanılmalıdır.

Harmonik rezonans ve bozulmayı azaltmak veya ortadan kaldırmak için stratejik çalışma devre noktalarında gerçek bir harmonik filtrenin kullanılması gerekir. Harmonik filtreler, cihazların içindeki ve dışındaki aşırı akımların neden olduğu harmonik bozulmasını ortadan kaldırmak için kullanılır. Büyük miktarda harmoniklerin ekipmana zarar vermesini, çalışmama süresini ve işletme maliyetlerinde bir artışı engellemesini önleyebilir.

Harmonik bir filtrenin iç kısmı, istenmeyen harmonik akımları yönlendirebilen ve toprağa gönderen bir dizi direnç, indüktör ve kondansatörden oluşur. Bu filtrelerin bazıları, belirli bir frekansın veya frekansların harmoniklerini saptırması için tasarlanmıştır. Pasif harmonik filtre ve aktif harmonik filtre olmak üzere 2 çeşit harmonik filtre çeşidi vardır.

5.2.1.Pasif Harmonik Filtreler

Pasif harmonik filtrele; direnç (R), indüktör (bobin, L) ve kapasitörler (Kondansatör, C) gibi bir dizi pasif bileşen ile üretilmiştir. Bu cihazlar en yaygın harmonik filtre türüdür ve tüm voltaj seviyelerinde kullanılır. Aktif harmonik filtreler çoğunlukla alçak gerilim şebekelerinde kullanılır. Bunlar, ağıdaki istenmeyen harmonikleri ortadan kaldırmak için negatif harmonikler ekleyen çok hızlı elektronik cihazlardır.

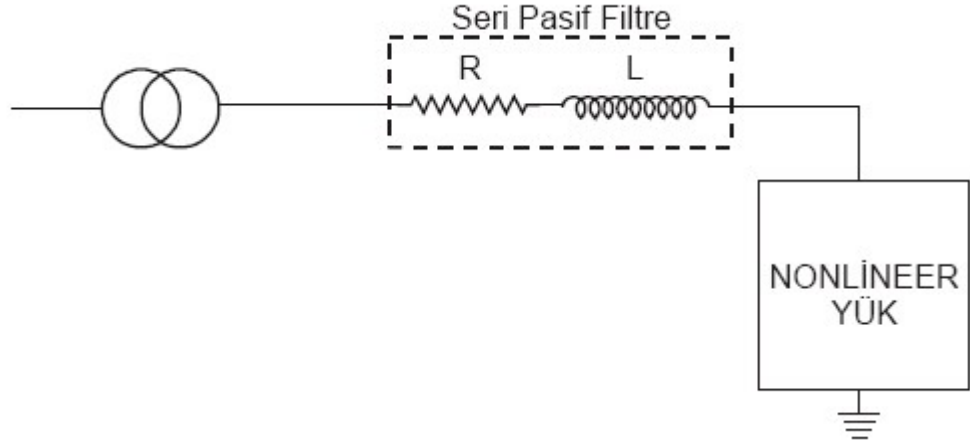
Pasif filtreler, seri pasif filtre ve paralel pasif filtre olmak üzere kendi içerisinde ikiye ayrılmaktadır[15,65].

5.2.1.1.Seri Pasif Filtre

Seri pasif filtreler, harmonik kaynağı ve harmonik üreten eleman arasına seri olarak bağlanan endüktans (L) elemanlarından oluşmaktadır. Seri bağlanan bu empedans;

$$X_L = 2\pi fL \quad (5.1)$$

formülüne göre harmonik frekanslarına yüksek empedans göstererek onların geçişlerini engeller. Temel frekansta ise düşük empedans gösterirler. Seri filtre uygulamasına örnek bir devre şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4. Seri Pasif Filtre devre şeması[20]

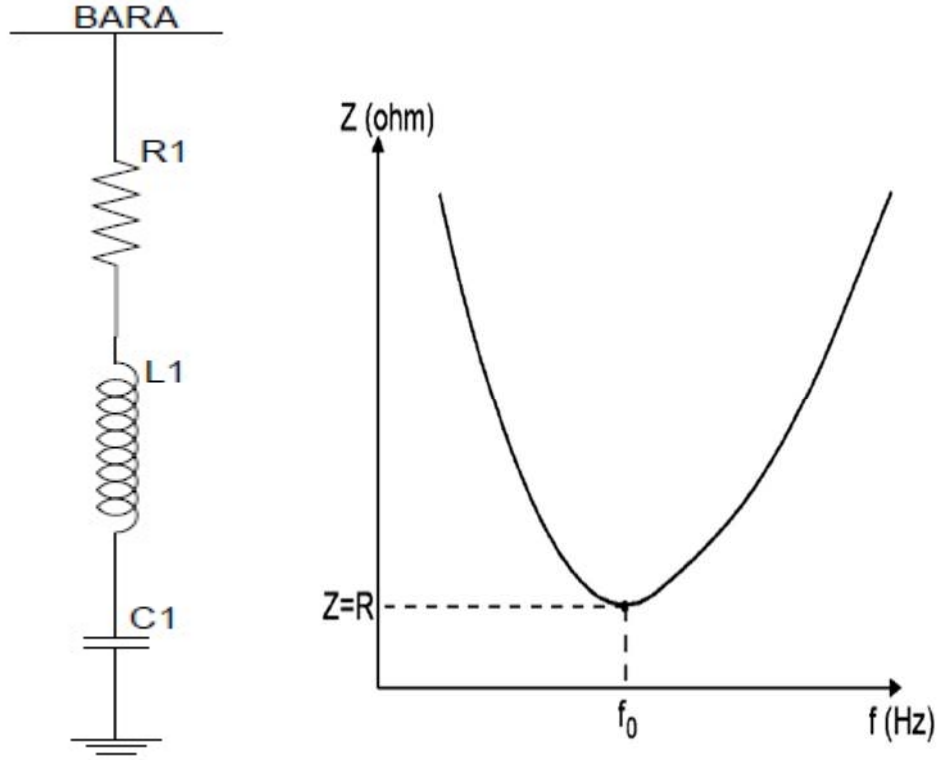
5.2.1.2.Paralel (Şönt) Pasif Filtre

Paralel (şönt) pasif filtreler, harmonik kaynağı ve yük arasına direnç (R), endüktans (bobin, L) ve kondansatörün (C) paralel olarak bağlanması ile oluşturulan devrelerdir. Harmonik kaynağa paralel olarak bağlayarak hem harmonikleri filtreleyebilir hem de reaktif güç kompanzasyonu sağlanabilir. Ayrıca endüktans ve kondansatörden oluşan LC filtresiolarak da bilinir. LC filtreleri, sık kullanılan tek ayarlı filtre, çift ayarlı filtre ve yüksek geçişli filtre olarak üçe ayrılır.

5.2.1.2.1.Tek Ayarlı Filtreler

Tek ayarlı filtre, seri filtre harmonik bastırıcı pasif filtre olarak adlandırılır. Bu filtre en basit yapım özelliklerine sahiptir. Sadece üç pasif bileşen; tek bir kondansatör (C1), endüktans (L1) ve direnç (R1) seri olarak bağlanır. Bu filtre tek bir frekansı ortadan kaldırır.

Bu filtrenin yapısı, aşağıdaki gibi tek ayarlı seri harmonik filtresini oluşturmak için seri olarak 3 pasif bileşenin bağlandığı aşağıdaki şekilde gösterilebilir.



Şekil 5.5. Tek ayarlı filtre devre şeması ve empedans-frekans değişimi[20]

Tek ayarlı filtre için ω açısal frekansındaki empedans Z_f

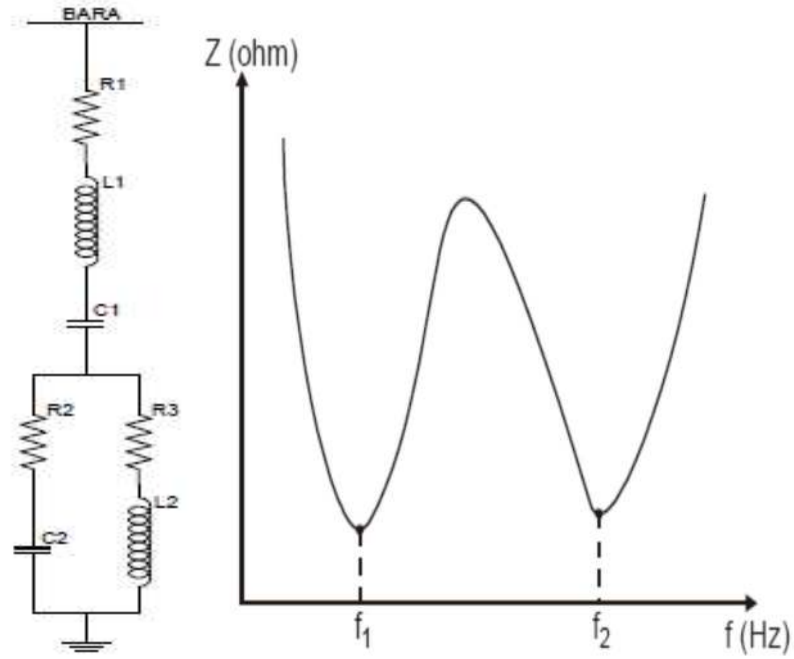
$$Z_f = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (5.2)$$

ifadesiyle hesaplanabilir.

5.2.1.2.2.Çift Ayarlı Filtreler

Çift ayarlı filtre, iki rezonans frekansına sahip olduğu ve bu iki frekanstaki harmonikleri süzdüğü için iki adet paralel bağlı tek ayarlı filtrelerin empedans değerleri aynı olacaktır. Bu filtre iki farklı frekansı ortadan kaldırabilir.

Normal şartlarda, seri devrede temel frekans empedansı, paralel devreye göre oldukça yüksektir. Bu nedenle; çift ayarlı filtrede meydana gelen güç-frekans gerilimi, tek ayarlı filtreye göre daha düşüktür. Çift ayarlı filtre oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir ve ayarlanması zordur.

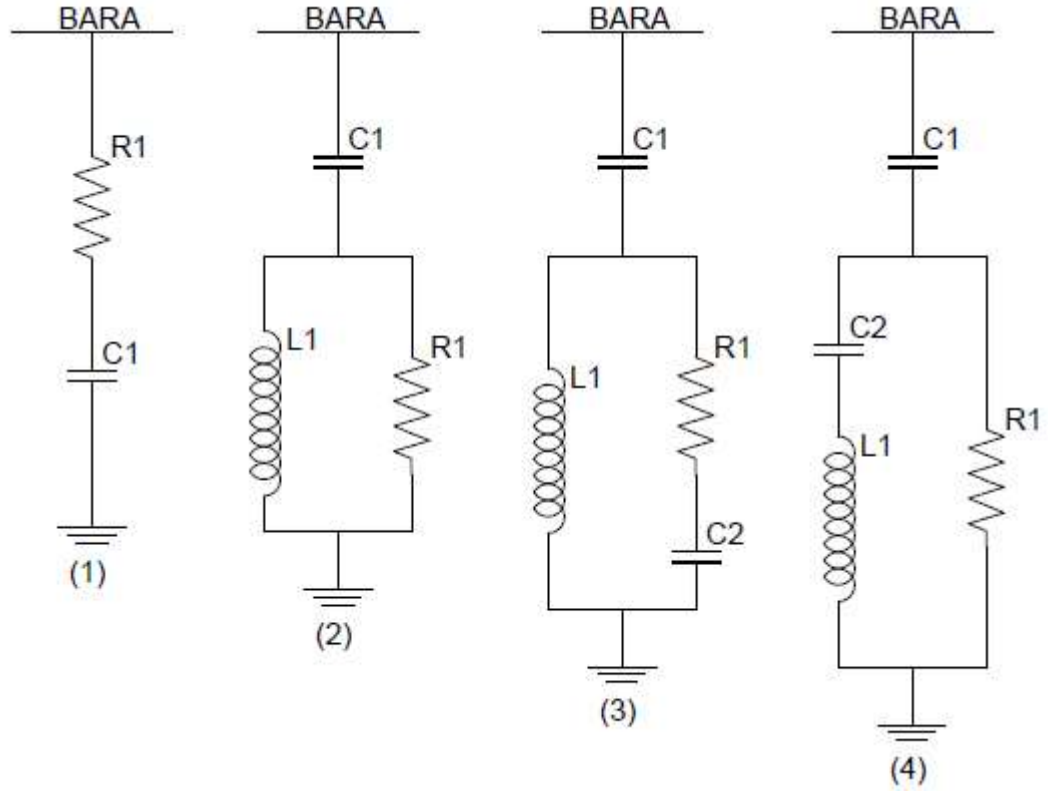


Şekil 5.6. Tek ayarlı filtre devre şeması ve empedans-frekans değişimi[20]

5.2.1.2.3.Yüksek Geçişli Filtreler

Yüksek geçişli filtreler aynı zamanda sönümlü filtre olarak da adlandırılır. Yüksek mertebeden harmonikleri ortadan kaldırmak ve çok çeşitli frekanslar üzerinde esnek kontrol sağlamak için kullanılır. Yüksek pasif harmonik filtreler, yüksek mertebeden harmonikleri ortadan kaldırmak ve çok çeşitli frekanslar üzerinde esnek kontrol sağlamak için kullanılır.

Şekil 5.7’te gösterildiği gibi sırasıyla birinci, ikinci, üçüncü ve C tipi olmak üzere dört tip sönümlü filtre vardır.



Şekil 5.7. Birinci, ikinci, üçüncü ve C tipi yüksek geçişli (sönümlü) filtreler[20]

Bu tip filtreler çoğunlukla 5., 6. veya daha yüksek dereceli akımı filtrelemek için kullanılır. Genellikle farklı filtreler, düşük dereceli veya düşük frekanslı uygulamalarda kullanıldığında güç kaybını önlemek için yüksek geçişli harmonik filtrelerle birleştirilir.

Düşük frekanslı harmonik gerektiren sistemlerde kullanılması yüksek maliyet gerektirdiği için bu tür filtreler yüksek frekanslı harmoniklerin süzülmesinde kullanılır.

Bu filtrelerden her birinin farklı özellikleri vardır:

Birinci dereceden yüksek geçişli filtre; çok yüksek kapasiteye sahip bir kapasitör gerektirir ve bu nedenle çok yüksek temel frekansta kayıplara neden olur. Bu nedenle nadiren kullanılır.

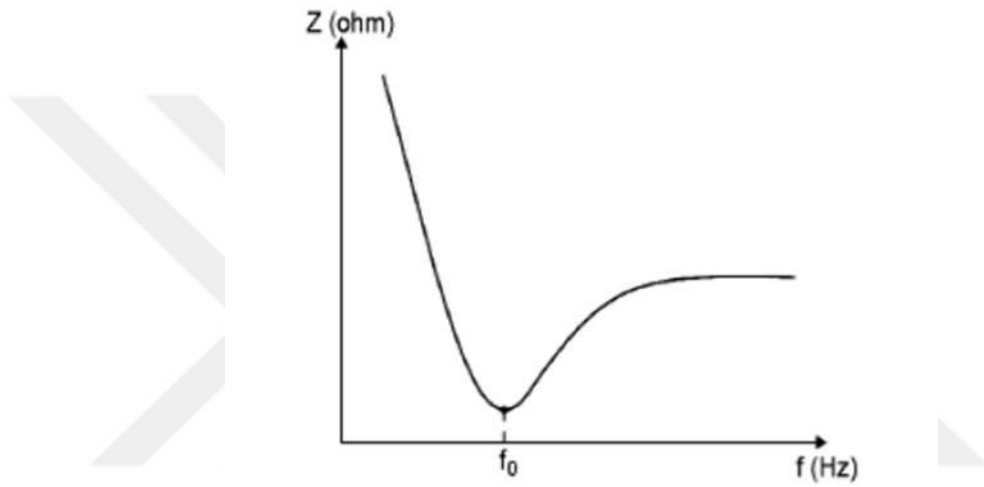
İkinci dereceden yüksek geçişli filtre; çok iyi performansa sahiptir, ancak üçüncü derece ile kıyaslandığında yüksek temel frekans kayıplarına neden olur.

Üçüncü dereceden yüksek geçiren filtre; C2 kondansatörü olmasından dolayı temel frekans empedansını artırır ve temel frekans kayıpları önemli ölçüde azalır. Bu, üçüncü dereceden yüksek geçişli filtrenin önemli bir avantajıdır.

C tipi yüksek geçişli filtre; performans olarak üçüncü dereceden filtre ve ikinci dereceden filtre arasındadır. C1-2 ve L seri olarak bağlandığında temel frekans kayıplarını azaltır. Dezavantaj olarak ise temel frekanstaki sapmalar ve cihazların değerlerinin zamanla değişmelerine karşı hassas olmasıdır.

Yukarıdaki dört yüksek geçişli filtre tipi arasında, en yaygın kullanılan ikinci dereceden yüksek geçişli filtrelerdir.

Frekans ile empedans eğrisi aşağıdaki gibi gösterilebilir.



Şekil 5.8. Yüksek geçişli (sönümlü) filtrenin empedans-frekans değişimi[20]

Bu filtre, yüksek frekanslar için düz olan bir empedans özelliğine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Empedansın frekansla değişimini temsil eden denkleme göre;

$$Z(W) = \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{jWL} \right)^{-1} + \frac{1}{jWC_1} \quad (5.3)$$

Düşük direnç değerlerinin, bobinle paralel bağlanmasından dolayı frekans kayıplarını arttıracak ve yüksek geçişli filtreler, yüksek temel frekanslarda çalışabilmesi için tasarlandığından yüksek bobinlere sahip olabilmek daha kolay olacaktır.

Bu tip filtreler, 5.harmonik sıra akımlarını veya daha yüksek harmonikleri engellemek için uygulanır. Direnç ayrıca empedansta en yüksek değere ulaşır ve yüksek frekanslarda maksimum değeri sınırlar. Bu, seri filtre için ters olan kalite faktörü ile ölçülür ve 0,5 ile 2 arasında değerlere sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.

$$Q = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \frac{R}{X_{LN}} = \frac{R}{X_{CN}} \quad (5.4)$$

- Q = Kalite faktörü (0,5 ile 2 arasında değer),
 - R =Yüksek geçiren sönümlü filtrede kullanılacak direnç değeri,
 - X_{LN} =Yüksek geçiren sönümlü filtrede kullanılan endüktif reaktans değeri,
 - X_{CN} =Yüksek geçiren sönümlü filtrede kullanılan kapasitif reaktans değeridir.
- Burada $X_{LN} = X_{CN}$ ayarlanan frekanstaki değerlerdir[20,35,65,67,68].



Şekil 5.9. Pasif harmonik filtre kompanzasyon panosu iç görünümü

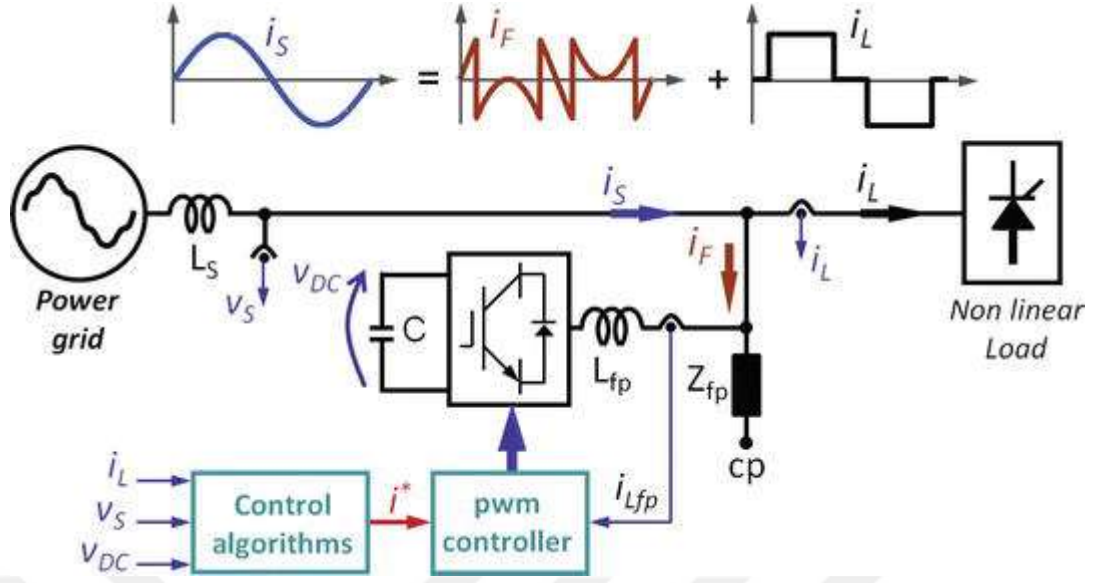
5.2.2. Aktif Harmonik Filtreler

Aktif güç filtreleri; harmonik ve dengesiz bileşenler, güç faktörü, voltaj düşüşleri veya yükselmeleri, salınımları, düşük frekanslı harmoniklerin sönümlenmesi gibi farklı güç

kalitesi problemlerini telafi edebilen kontrollü bir akım kaynağı veya kontrollü voltaj kaynağı olarak anlaşılabilir. İlave olarak, yeni dağıtılmış üretim türlerinde yenilenebilir enerji kaynakları için bir ara yüz olarak kullanılırlar ve hatta merkezi olmayan mikrogridlerin uygulanmasını güvenilir kılarlar[60].

Aktif harmonik filtreleri birçok değişken hızlı sürücü ile çalışabilir ve elektriği sürekli izleyerek harmonikleri azaltmak için akımları enjekte ederek gürültüyü aktif olarak azaltır. Aktif filtreler birçok doğrusal olmayan yüke sahip sistemler için idealdir. Aktif harmonik filtreler, filtrenin kendi ürettiği harmonik bileşenleri kullandığı ve bunu istenmeyen harmonikleri iptal eden güç hattına enjekte ettiği mükemmel bir yöntem kullanır.

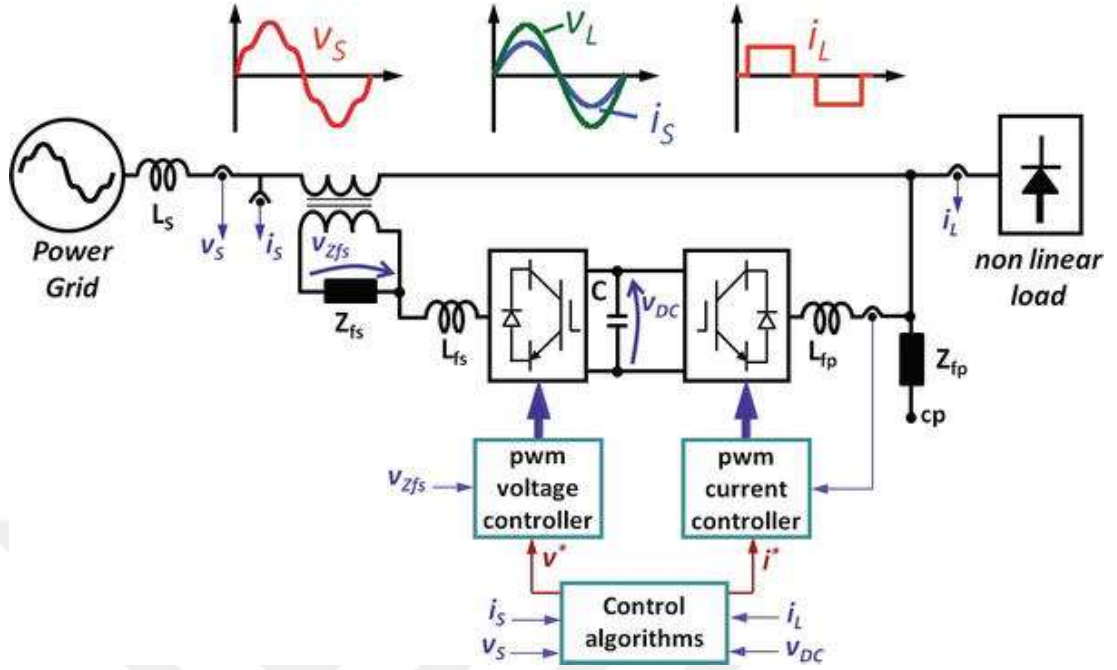
Yük tarafından çekilen tüm harmonik akımları telafi eden şönt aktif filtrenin basitleştirilmiş bir şeması, Şekil 5.10.'da gösterilmektedir. Aktif bir filtre, güç ve kontrol aşamalarıyla anlaşılmaktadır. Güç kademesi, DC bağlantısında bir depolama enerjisi elemanı (kapasitör), indüktör filtresi (L_{fp}) ve yüksek pasifliğe düşük empedanslı bir yol sağlamak için küçük pasif filtreler (Z_{fp}) içeren bir voltaj kaynağı dönüştürücüsünü (VSI) içerir. VSI ($I_{L_{fp}}$) üretilen akımın frekans bileşenlerini gösterir. Kontrol aşaması, ölçüm ve enstrümantasyon devreleri, mikrodenetleyiciler ve VSI sürücüleri sunar. Şekil 5.10.'da belirtildiği gibi, VSI tarafından üretilen referans akımı (i^*) giriş akımı olarak yük akımı (i_L), şebeke voltajı (v_s) ve DC hat voltajını (v_{DC}) sunan uygulanan kontrol algoritmalarına göre belirlenir. $i_{L_{fp}}$ 'yi referans akımına uygun olarak tutmak için bir pwm kontrol cihazı da vardır. Ortak nokta (cp), üç fazlı bir devrede pasif filtrelerin devrenin bu noktasına bağlandığını belirtmek için düşünülmüştür.



Şekil 5.10. Doğrusal olmayan yük tarafından çekilen tüm harmonik akımları telafi eden şönt aktif filtrenin basitleştirilmiş şeması[38]

Şebeke kablolarının ve güç transformatörlerinin endüktans özelliklerini yansıtan genellikle bir empedansı temsil etmek için genellikle bir indüktörün (L_s) uygulandığını söylemek önemlidir. Bununla birlikte mevcut araştırmalar, elektrik şebekesinden dinamik olarak bağlanan ve çıkartılan önemli miktarda doğrusal olmayan yük nedeniyle dinamik olarak değiştirilmiş eşdeğer empedanslarla temsilini değiştirdiğine işaret etmektedir. Bu konu günümüzde, güç dönüştürücü ara yüzü yenilenebilir enerji kaynaklarının çoğalması nedeniyle daha da önemli hale gelmektedir.

Şekil 5.11.'de referans gerilimi (v^*) ile harmonikler ve gerilim sarkmayı dengeleme dizisi aktif filtre basitleştirilmiş bir şemasını göstermektedir. İzgara akım (sunulur uygulanan kontrol algoritmaları yoluyla belirlenir i_s), şebeke geriliminin (V_s) ve DC-link gerilimi (V_{DC}) giriş olarak. Ayrıca, VSI filtrelenmiş voltajı (v_{Zsf}) üretmek için bir pwm kontrol cihazı vardır.



Şekil 5.12. Birleşik güç kalitesi şartlandırıcısının basitleştirilmiş şeması (UPQC)[38]

Tablo 5.1. UPQC işlevleri

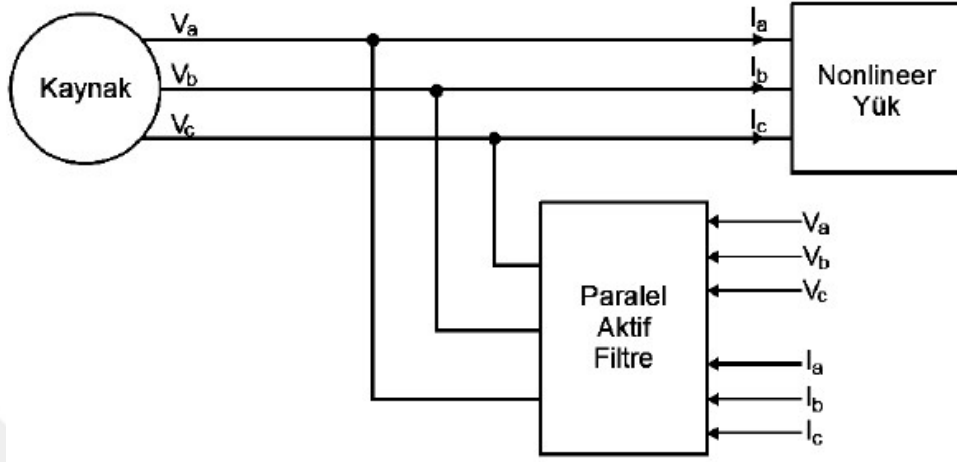
Aktif filtre	Görevi
Seri aktif filtre	Harmonik ve dengesiz voltaj kompanzasyonu
	Gerilim düşmesi
	Güç şebekesi kararlılığın iyileştirilmesi
Şönt aktif filtre	Harmonik ve dengesiz akımların telafisi
	Güç faktörü düzeltme

Akım ve gerilim kompanzasyonu için aktif güç filtreleri, yük ile devrede bağlantısına göre şönt, seri, yukarıda da anlatıldığı gibi birleşik güç kalitesi düzenleyicisi ve hibrit filtre olarak sınıflandırılmaktadır.

5.2.2.1. Şönt(Paralel) Aktif Güç Filtreleri

Şönt aktif filtrenin çalışma prensibi, ağa yük tarafından tüketilen harmonik akımı ancak ters fazda enjekte etmeye dayanır, böylece mevcut kaynak saf bir sinüzoidal dalga formu sunar. Pasif filtrelerin aksine, sistemin empedansı filtreleme özelliklerini nadiren etkiler, bu yüzden pasif filtreler tarafından sunulan sorunlardan birini önler. Ancak, aktif

filtre tarafından ağı enjekte edilen akım, sisteme bağı diğr pasif filtrelerden veya kapasitörler içinden de akabilir.



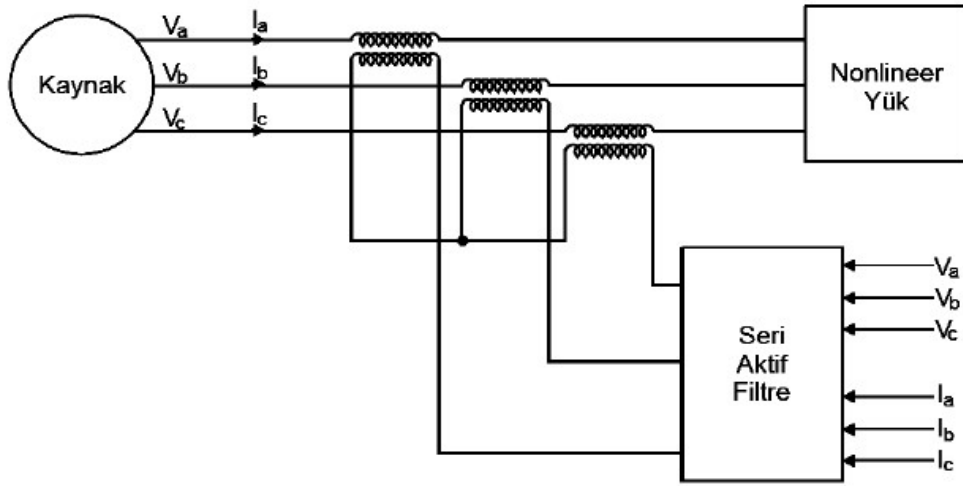
Şekil 5.13. Paralel aktif filtrenin prensip şeması [70]

5.2.2.2. Seri Aktif Güç Filtreleri

Bu yapılandırmada, aktif filtre yük ile seri bağlanır. Bu düzenleme voltaj sinyalindeki (dengesizlikler, harmonikler vb.) bozulmaların giderilmesine izin verir. Aktif filtre tarafından oluşturulacak kontrol tipine göre, bir yandan yük tarafından üretilen dalga biçimi gerilimindeki bozulmayı ortadan kaldırmak, diğr yandan yük terminallerinde gerilimi ne olursa olsun düzenlemek mümkündür. Besleme gerilimlerinde voltaj düşüşü, aşırı voltaj, bozulma veya dengesizlikleri düzenler. Bu, dinamik voltaj düzeltici (DVR) olarak bilinen bir yapılandırma ile gerçekleştirilir.

Seri aktif filtre, yükün oluşturduğu voltaj harmoniklerini dengelemek için tasarlandığında, yükün neden olduğu voltaj bozulmasını nötr etmek için uygun dalga formunu oluşturur, böylece bu besleme voltajına iletilmez.

Voltaj düzeltici (DVR) çalışma prensibi, besleme voltajındaki dengesizlikleri veya bozulmaları etkisiz hale getirmek için uygun frekans ve büyüklükte bir voltaj dalga formu oluşturmaya dayanmaktadır, böylece yük terminallerinde voltaj uygun dalga formuna sahip olacaktır.



Şekil 5.14. Seri aktif filtrenin prensip şeması [70]

5.2.2.3. Hibrit Aktif Güç Filtreleri

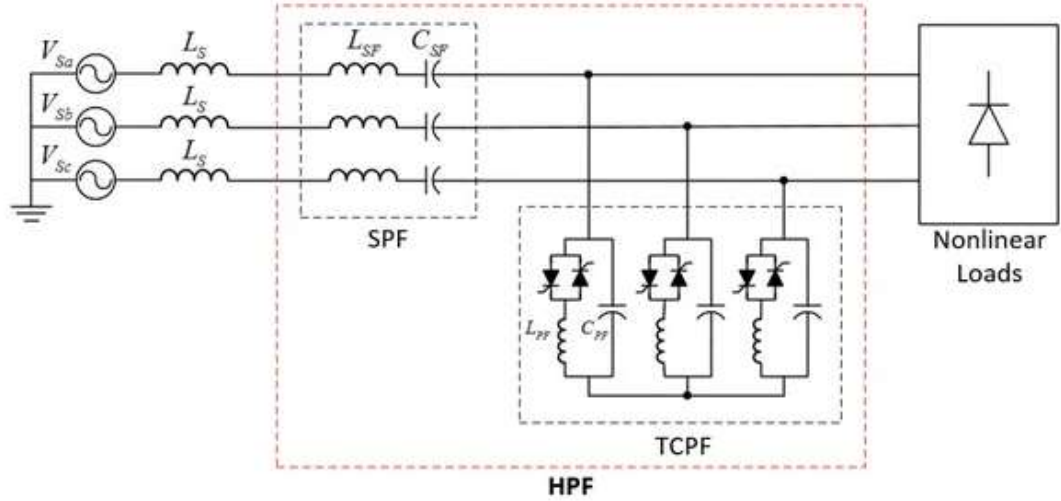
Filtreleme yöntemlerinin her birinin çeşitli güçlü yönlerinden yararlanmak için, farklı filtre kombinasyonları yapılabilir. Bunlardan bazıları ve en çok kullanılan kombinasyonlar aşağıda belirtilmiştir.

Pasif filtre ile yüke paralel olarak bağlanmış aktif filtre kombinasyonu yapılabilir. Pasif filtre, en önemli harmonikleri ortadan kaldırarak aktif filtrenin gücünü azaltır. Bu yöntem, daha önce belirtilen paralel bağlantılı pasif filtrelerle aynı dezavantajlara sahiptir.

Kaynakla seri olarak aktif bir filtreden ve yüke paralel olarak pasif bir filtreden oluşan hibrit bir topolojiyi göstermektedir. Yükteki gerilimi kontrol etmeyi ve aktif filtrede, besleme akımının harmoniğine orantılı bir voltaj oluşturmaktır. Burada aktif filtre, yük akımının harmoniğine karşı yüksek bir empedans engelleme görevi görür. Bu, pasif filtrenin performansını, olası rezonanslardan kaçınarak ve ikincisi pasif filtrenin filtreleme özelliğini, kaynak empedansından bağımsız hale getirerek artırır. Ayrıca, bu, azaltılmış bir nominal güç aktif filtresi ile başarılabilir.

Aktif ve pasif filtre seri halde bağlandıktan sonra yüke paralel olarak bağlanır. Aktif filtre için kontrol stratejisi, kaynak akımının harmoniğine orantılı bir voltaj üretilmesine dayanır. Bu tarz pasif filtrenin, yüke paralel olarak bağlanmış bir aktif filtre için gereken güce kıyasla, düşük güçte bir aktif filtre ile performansını artırır. Bu konfigürasyon,

harmonik akımların azaltılması ve yükün reaktif güç kompanzasyonu için gelişmiş bir davranış göstermiştir[20,41,45,60,69].



Şekil 5.15. Hibrit pasif filtre yapılandırması[70]

Bu yapılandırmada, SPF (Seri tip pasif filtre) ve TCPF (İki tristör kontrollü paralel pasif filtre) sırasıyla bir bant geçiş filtresi ve bir bant durdurucu filtre olarak çalışır. HPF (Hibrit pasif filtre), gerilim ve akım harmonik tipleri üreten lineer olmayan yükler ile güç sisteminde ortak bağlantı noktası (PCC) arasına bağlanır.

SPF, temel frekansta düşük bir empedans sunar, böylece ilgili voltaj harmoniklerini emer. SPF, voltaj beslemeli harmonik türlerini engellerken, TCPF mevcut beslemeli harmoniklerin elemesini engeller. Bu nedenle, HPF doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu her türlü harmoniği telafi edebilir[70].



Şekil 5.16. Aktif filtre içyapısı

6. HARMONİK ANALİZİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER

6.1.Ölçme Yöntemi

Güç kalitesi ölçümü için çeşitli ölçüm araçları mevcuttur. Güç kalitesi analizörleri, ilgili frekans spektrumlarındaki voltaj ve akım dalga şekillerini, gerçek zamanlı okumaları ve enerji dağıtımını kesintiye uğratabilecek veya şebekeye bağlı ekipmanlara zarar verebilecek elektrik hatlarını gözlemlemek, analiz ve verileri belirlemek, güç kalitesinin detaylı analizini yapmak için en etkili araçtır. Bu verileri kullanarak, harmonik oran fonksiyonu, sinüzoidal olmayan ve sinüzoidal dalga formunun sapmasını göstermek için %0 ile 100 arasında bir değer hesaplar ve bu değer harmoniklerin varlığını gösterir.

Panele sabitlenen reaktif güç kontrol röleleri, sistemdeki yükler tarafından kullanılmayan ve yüklerin özelliklerinden dolayı ağdan çekilen endüktif ve kapasitif güçleri azaltmak için tasarlanmıştır.

Taşınabilir güç kalitesi analizörleri oldukça hafiftir ve çeşitli parametreleri ölçer. Bunlardan en önemlileri; AC/DC akım ölçümü, AC/DC gerilim ölçümü, güç faktörü, harmonik akımlar ve bunun sonucunda oluşan bozulma ve tepe faktörü ölçümü, güç ve enerji ölçümü, motor kalkış akımı ölçümü, gerilim ve akım dengesizliği ölçümü, ani akım değerleri, dalga formları gibi birçok ölçümleri anlık olarak görebilmemizi sağlar.

6.2.Harmoniklerin Matematiksel Analizleri

Harmonik analiz, periyodik olarak tekrarlayan nitelikteki olayları tanımlamak ve analiz etmek için matematiksel yöntemdir. Karmaşık matematiksel eğrileri nispeten basit bileşenlerin toplamına bölme tekniği ile birçok karmaşık sorun yönetilebilir terimlere indirgenmiştir.

Ses dalgaları, alternatif elektrik akımları, gelgitler ve makine hareketleri ve titreşimler gibi birçok fiziksel olay, karakter olarak periyodik olabilir. Bu tür hareketler bağımsız değişkenin ardışık değerlerinde, genellikle zamanda ölçülebilir ve bu veriler veya onlardan çizilen bir eğri, bu bağımsız değişkenin bir fonksiyonunu temsil eder.

Fransız matematikçi Joseph Fourier, herhangi bir periyodik dalganın daha basit dalgalara bölünebileceğini keşfetti. Başka bir deyişle, karmaşık bir periyodik dalga, bir dizi basit dalganın toplamı olarak yazılabilir. Matematikçiler sinüs ve kosinüs dalgalarını basit dalgalar olarak kullanırlar ve daha karmaşık dalgaları ise sinüs ve kosinüslerin toplamı

olarak farklı genliklerle ifade ederler. Fourier, bu basit dalgaları ve onların genliklerini karmaşık periyodik fonksiyondan belirlemek için Fourier serisi olarak bilinen bir analiz yöntemi bulmuştur.

6.2.1. Fourier Analizi

Fourier analizi, karmaşık periyodik dalga formlarını analiz etmenin bir yöntemidir. Herhangi bir sinüzoidal süre fonksiyonunun sinüs veya kosinüs dalgalarına, muhtemelen sonsuz bir sayıya ve bir DC bileşenine çözülmesine izin verir. Bu, daha fazla analize izin verir ve dalga formunu diğer sinyallerle birleştirmenin etkisini belirlemenizi sağlar.

Fourier serisinin matematik teoremi göz önüne alındığında, $f(t)$ periyodu işlevi şu şekilde yazılabilir:

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos \omega t + A_2 \cos \omega t + \dots + A_n \cos \omega t + B_1 \sin \omega t + B_2 \sin \omega t + \dots + B_n \sin \omega t \quad (6.1)$$

Periyodik fonksiyonun Fourier serisi $x(t)$ olarak ifade edilir:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2\pi n x}{T} + b_n \sin \frac{2\pi n}{T} \right) \quad (6.2)$$

Bu, frekans alanındaki periyodik fonksiyonun bir temsilini oluşturur.

A_0 = Sinüsoidal dalganın DC bileşeni (Dalgada DC bileşen yok ise A_0 sıfıra eşit olacaktır.)

$A_1 \cos \omega t + B_1 \sin \omega t$ = Temel bileşen (sinüsoidal dalga ile aynı frekansa ve süreye sahip)

$A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t$ = n. dereceden harmonik

- A, B = Katsayılar

Cevabın her frekans bileşeni, periyodik dalga formunun karşılık gelen harmoniği ile üretilir. Her terim ayrı bir kaynak olarak kabul edilir ve toplam cevap her terimin ürettiği cevapların toplamıdır. Harmoniklerin sırası arttıkça harmoniklerin genliğinin giderek azalacağı yani az sayıda terimin iyi bir yaklaşım getirdiğini göstermektedir.

6.3. Harmonik Büyüklüklere Ait Temel Kavramlar

6.3.1. Distorsiyon (D)

50 Hz veya 60 Hz sinüzoidal gerilim veya akım dalga biçiminde oluşan harmonik bozulmalardır.

Harmonik bozulma, güç ve güç faktörlerinin hesaplanmasını zorlaştırır, çünkü voltaj ve akım denklemleri (ve bunların ürünlerini) harmonik bileşenler içerir. Sinüzoidal koşullar altında, güçle ilgili dört standart miktar vardır:

- Etkin görünen güç (S_1) RMS temel gerilim ve akımının ürünüdür,
- Etkin aktif güç (P_1), ortalama enerji dağıtım oranıdır,
- Temel reaktif gücü (Q_1) titreşimli bir görünen güç kısmı olduğu ve
- Temel frekanstaki güç faktörü (veya yer değiştirme faktörü)

$$\cos \phi_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (6.3)$$

Bu büyüklükler arasındaki ilişki güç üçgeni ile tanımlanır:

$$S_{12} = P_{12} + S_{12} \quad (6.4)$$

Voltaj ve akım dalga formları nonsinüzoidal ise (6.4) denklemi geçerli değildir. Çünkü S, Fourier serisinin ürünlerindeki farklı terimlerdeki gerilimlere ve akımlara karşılık gelen çapraz terimler içerdiğinden, P ve Q aynı frekanstaki akımlara ve gerilimlere karşılık gelir. Harmonikli akım veya gerilim içeren sistemlerde güç ifadeleri,

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (6.5)$$

şeklinde verilebilir. Verilen bu bağıntıdaki D ifadesi distorsiyon gücü olarak tanımlanır ve aşağıda verilen bağıntıyla bulunur.

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (6.6)$$

Yukarıda verilen bağıntıda;

Ddistorsiyon gücünü (VAR), S görünür gücü (VA), P aktif gücü (W), Q reaktif gücü (VAR) ifade etmektedir.

6.3.2. Toplam Harmonik Distorsiyon (THD)

Toplam harmonik bozulma anlamına gelir. Toplam harmonik bozulma, bir sinyal içindeki harmonik bozulmanın bir ölçüsüdür. Harmonik bozulma seviyesi genellikle alternatif bir sinyaldeki harmonik içeriğin derecesini tanımlamak için kullanılır.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} y_h^2}}{y_1} \quad (6.7)$$

Standartta göre, h genellikle 50 ile sınırlandırılabilir. Bu denklem, bir dağıtım sisteminde belirli bir noktada akan bir voltajın veya bir akımın bozulmasını gösteren tek bir değer üretir. Harmonik bozulma genellikle yüzde olarak ifade edilir.

Akım ve gerilim için THD denklemleri şu şekilde ifade edilir;

Akım harmonikleri için denklemi için,

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (6.8)$$

Yukarıdaki denklem, toplam RMS değeri bilindiğinde kullanımı;

$$THD_I = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (6.9)$$

Gerilim harmonikleri için denklemi için,

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \quad (6.10)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada,

- THD_I : Akımın Toplam Harmonik Distorsiyonu,
- THD_u : Gerilimin Toplam Harmonik Distorsiyonu,
- U_h : Devreye uygulanan gerilimin n' inci mertebedeki harmoniğinin etkin değeri,
- I_h : Devreye uygulanan akımın n' inci mertebedeki harmoniğinin etkin değeri
- U_1 : Devreye uygulanan gerilimin temel frekanstaki etkin değeri,
- I_1 : Devreden geçen akımın temel frekanstaki etkin değeridir.

6.3.3. Toplam Talep Distorsiyon (TDD)

Toplam talep bozulma TDD, belirli bir yük ile ilgilidir ve toplam harmonik akım bozulma olarak tanımlanır.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (6.11)$$

- I_L , ortak bağlantı noktasında PCC'de olan maksimum talep yük akımıdır. Bu akım değeri, yük tarafından talep edilen maksimum akımların ortalamasıdır.

6.3.4. Toplam Harmonik Faktör (THF)

Farklı çalışma alışkanlıklarına sahip bazı ülkelerde, harmonik bozulmayı belirlemek için farklı bir denklem kullanılır. Bu denklemde, U_1 etkin değeri gerilimi ve I etkin akımı, U_{rms} ise RMS teki etkin gerilimi gösterir.

İki denklemi birbirinden ayırmak için ikinciye toplam harmonik faktör (THF) denir ve gerilim THF denklemi

$$THF_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_{rms}} \quad (6.12)$$

şeklinde tanımlanabilir.

Gerilim veya akım için toplam harmonik faktörü her zaman %100'den azdır. Sinyallerin analog ölçümlerini kolaylaştırır, ancak bir sinyal önemli ölçüde bozulmadığında sonuç yukarıda tanımlanan THD'ye çok yakın olduğu için daha az kullanılır. Ve yüksek derecede çarpık sinyaller için uygun değildir, çünkü THD'nin aksine %100 değerini geçemez.

6.3.5.Güç Faktörü (PF)

Güç faktörü, gerçek gücün (P) görünür güce (S) oranı olarak tanımlanır ve genellikle ondalık bir değer olarak ifade edilir.

$$PF = \frac{P}{S} \quad (6.13)$$

6.3.6.Tepe (Crest) Faktörü

Yüksek anlık akımlar sağlamak için bir jeneratörün (veya UPS) yeteneğini karakterize etmek için kullanılır. Örneğin, bilgisayar cihazı, tepe faktörünün 3 ila 5'e ulaşabileceği yüksek oranda bozulmuş akım çeker. Crest faktörü, tepe akım veya gerilimin değeri (I_M veya U_M) ile RMS değeri arasındaki orandır.

Sinüzoidal olmayan bir dalganın tepe faktörü,

$$C_f = \frac{\text{Tepe Değeri}}{\text{RMS Değeri}} \quad (6.14)$$

6.3.7.Harmonik Spektrum

Elektrik sinyallerinin farklı bir gösterimini sağlar ve bozulmalarını değerlendirmek için kullanılabilir. Harmonik spektrum, her harmonik sırasının genliğinin frekansına göre gösterimidir[5,50].

7.BULGULAR VE İNCELEME

Bu bölümde Türkiye’de farklı sektörlerde çalışan endüstriyel tesislerin enerji problemlerini azaltmak, enerji verimliliğinin sürekliliğini sağlamak ve gelecekte kurulacak yeni tesislerin kompanzasyon panosu seçiminde ve tasarımında göz önüne alınması gereken bilgilerden bahsedilmiştir.

Elektrik dağıtım sistemlerinde, çeşitli fabrikalarda hangi tür harmoniklerin üretildiği, birbirleri üzerindeki etkileri araştırılmış, bunların şebeke üzerindeki etkileri incelenmiş ve Alçak Gerilim (AG) ve orta gerilim (OG) baralarından harmonikleri analiz etmek için ölçümler yapılmıştır.

Kullanılacak olan harmonik analizörler; akım bilgisini AG ve OG baralarında bulunan akım trafoları sayesinde almaktadır. Gerilim bilgisini ise, AG barasından direk, OG barasından gerilim trafoları ile öğrenilmektedir.

Fabrikalarda yapılan ölçümler yapılırken çalışma koşulları göz önüne alınarak yapılmış ve harmonik bozulma oranları değişimi öğrenilmesi için, transformatörün boşa ve yükte çalışma durumu referans alınmıştır.

7.1.Harmonik Analizinde Kullanılan Ölçüm Cihazları

Harmonik analizinde çeşitli ölçü aletleri kullanılmaktadır. Kullanılan analizör çeşitleri ise, panel üzerinde sabit olarak kullanılan şebeke analizörü, reaktif güç kontrol röleleri ve taşınabilir harmonik ölçüm analizörleridir. Analizörlerin bazıları hem AG’de hem de OG’de gerilim ölçümü yapabilmektedir.

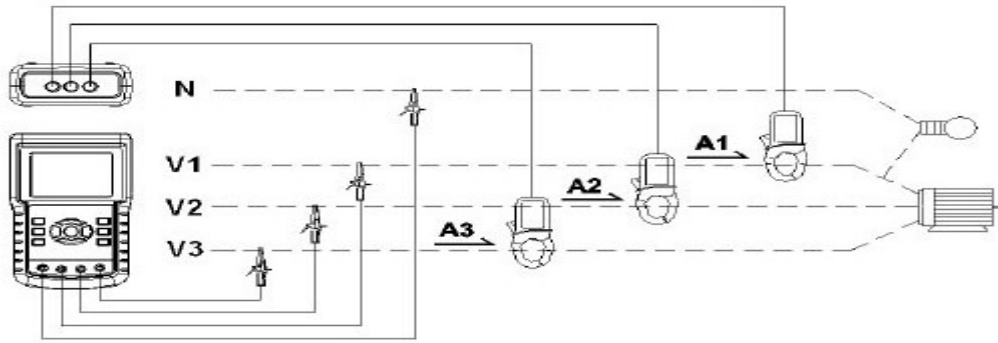
7.1.1. Chauvin Arnoux Harmonik Analizörü

Kullanılan harmonik analizörü, Chauvin Arnoux marka QualiSTAR Plus CA 8335 modeli kullanılmış olup, elektrik şebekeleri ve geçici sistemler için üç fazlı bir sistem için tasarlanmış harmonik analizörüdür. Endüstriyel ve idari binalardaki denetim ve bakım ekipleri için tasarlanmıştır. Kullanıcının, elektrik şebeke kalitesinin ana özelliklerinin anlık bir görüntüsünü elde etmesini sağlar. Chauvin Arnoux, voltaj, akım, enerji, reaktif güç değerleri, harmonikler (üçlü harmonikler dâhil), titreşim, güç tüketimi, üç fazlı şebeke dengesizliği ve verileri kaydetme ve izleme kapasitesine sahip geçici ölçümleri ölçer. Ek

olarak, güç kalitesi ölçüm cihazının üst kısmı, çalıştırıldığında bir elektrikli cihazın çizdiği maksimum giriş akımını ölçebilen bir giriş seçeneğine sahiptir. Bu ölçüm elektrik tesisatının doğru boyutlandırılmasına yardımcı olur. Ayrıca grafik, tablo veya vektörel resim olarak kullanılabilen dört girişin tümünü aynı anda sunar. Chauvin Arnoux, 4 voltaj girişi, 1000 Volt'a kadar ve 4 akım girişi 6500 Amper'e kadar tüm voltaj, akım ve güç parametrelerinin elektrik tesisatının tam teşhisi için ölçülmesini sağlar. Chauvin Arnoux, harmoniklerin nötr veya dönen makinelerin ısınması üzerindeki etkisini analiz etmek için kullanılabilecek seçeneklere sahiptir. Güç ve enerji seçeneğinde W, Var, VA, Wh, Warh, Vah ve Güç Faktörü dâhil olmak üzere güç ve enerji ile ilgili tüm değerleri görüntüler[71].



Şekil 7.1. Chauvin Arnoux harmonik analizör

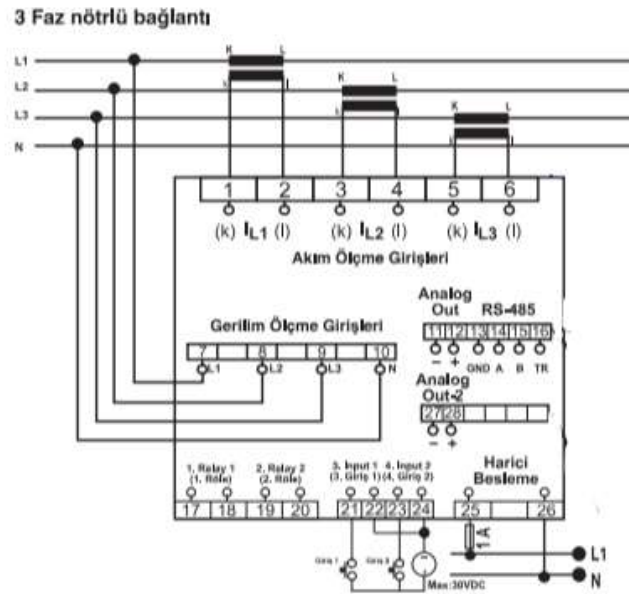


Şekil 7.2. Harmonik analizörü bağlantı şeması

7.1.2. Entes MPR-63-21 Şebeke Analizörü

Entes marka MPR-63-21 şebeke analizörü, panele sabit montajlı bir analizördür. Elektrik tesisine ait bütün elektriksel değerleri, gerilim ve akım gibi toplam harmonik bozulmaları ölçebilen haberleşme özelliği ile bilgisayar, telefon gibi teknolojik cihazlar ile uzaktan bağlantıya uygun cihazdır. Bu analizör, farklı akım ve gerilim dalga şekillerini göstermemektedir.

Bölüm 7’de de belirtildiği gibi analizör istenilen ölçümleri yapabilmek için; akım bilgisini AG ve OG’de bulunan akım transformatöründen, gerilimi ise AG barasından direk, OG barasından ise gerilim transformatörlerinden sağlamaktadır.

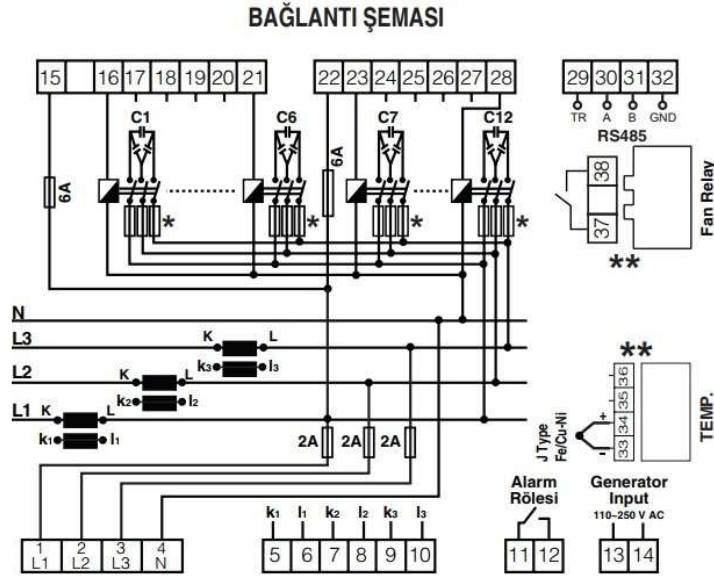


Şekil 7.3. Şebeke analizörü bağlantı şeması[72]

7.1.3. Entes RG3-12C Reaktif Güç Kontrol Rölesi

Entes marka RG3-12C röle panoya sabit olarak montaj edilir. AG ve OG barasında çeşitli ölçümler yapabilmesi için gerilim ve akım transformatörü için girişleri bulunmaktadır. Chauvin Arnoux taşınabilir harmonik analizör ile aynı görevi yapmaktadır.

RG3-12C reaktif güç kontrol rölesi akım ve gerilim dalga formları, harmonik oranları, akım ve gerilim değerleri, çeşitli güç değerleri, dalga formlarına ait grafikler gibi birçok özelliğe sahiptir.



Şekil 7.4. Reaktif güç kontrol rölesi bağlantı şeması[72]

7.2. Harmonik Ölçümler ve Yorumlamalar

Ölçümler yapılmadan önce sistemdeki sorunlar incelendiğinde ve elektrikten sorumlu yetkiliden alınan bilgilere göre; sisteme ilave güçlerin eklenmesi (kapasite artırımı), hassasiyetlerin oluşmaması, yeni eklenen teknolojik cihazlar, fabrika çalışma süreleri, panel havalandırmaları, çevresel faktörler, gerilim ve akım değişimleri, şebeke empedans gibi sistemi olumsuz etkileyecek sorunlardan kaynaklanan bazı sonuçlar şöyledir:

- Kondansatörlerde patlamalar,
- Kondansatörlerde değer azalması,
- Kompanzasyon panelinde aşırı ısınma,
- Kondansatör kablolarında ısınma ve ısınma sonucu erimeler,
- Kompanzasyon elemanlarında oluşacak arklar,
- Yüklerde oluşan ek kayıplar,
- Güç faktörünün normal değerinden düşük olması,
- AG odasında bulunan ADP ana şalterinin gürültülü çalışması,
- Motor yanmaları,
- Sürücülerde kartların bozulması,
- AG odasında bulunan ve transformatör çıkışına bağlı ana şalterin istemsiz açması,

- Tesis geriliminde flicker artışı,
- Trafoların aşırı ısınması ve gürültülü çalışması,
- Devre kesicilerinin ve sigortaların istemsiz açması,
- Para cezaları gibi

Aşağıdaki resimlerde, harmonikten kaynaklı oluşan problemin sonuçlarından birisi gösterilmiştir.



Şekil 7.5. ADP ve kompanzasyon panosunun yanmış hali



Şekil 7.6. Kompanzasyon panosunun yanması sonucu köşkte oluşan hasar

Şekil 7.5.'de, elektrik odasında bulunan ADP ve kompanzasyon panosunun yanmış hali gözükmemektedir. Aşırı harmonikten dolayı, kompanzasyon panosunda oluşan kondansatörlerin patlaması, panel içi aşırı ısınma ve reaktör patlaması gibi nedenlerden dolayı kompanzasyon panosunda sonucunda yanma meydana gelmiştir. Kompanzasyon panosunun yanında ADP panosu da olduğu için alevler atlamış ve kullanılmaz hale gelmiştir.

Kompanzasyon panelinin yanına ADP paneli bulunmaması gerekmektedir. Çünkü kompanzasyon panelinde oluşabilecek bir problem ADP panelini de etkileyeceği için işletmenin enerjisinin gitmesine, üretim yapılmamasına neden olabilecek ve işletmenin uzun süre durmasına neden olabilecektir.

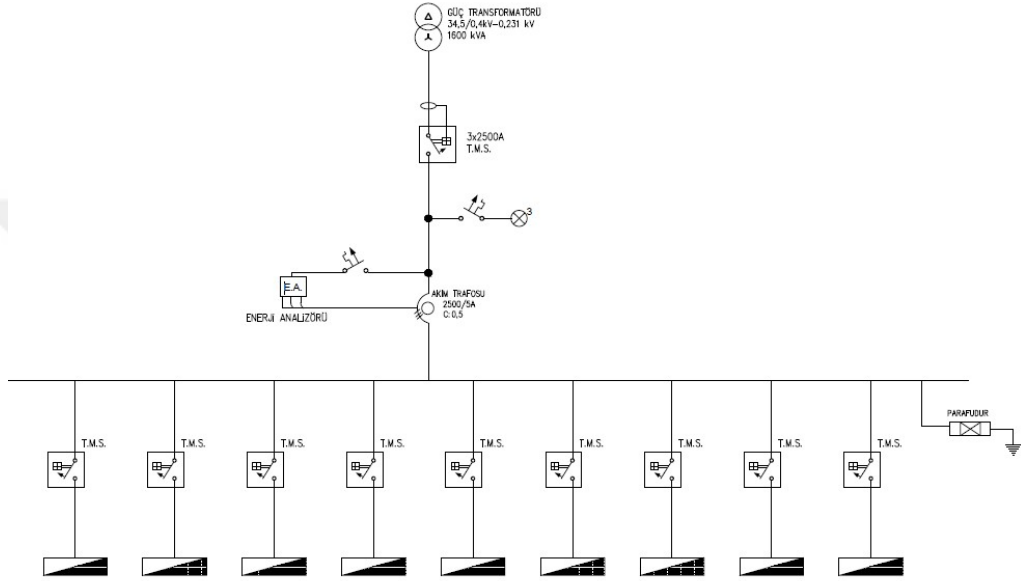
7.2.1.Kompanzasyon Panosu Ölçümleri

Örnek olarak fabrikalarda ölçümler yapılmıştır. Bu fabrikalardan birincisi 1600 kVA transformatör gücüne sahip tekstil fabrikası, ikincisi 1250 kVA transformatör gücüne sahip plastik fabrikasıdır, üçüncüsü ise 2 adet toplam 2850 kVA'lık transformatör gücüne sahip baskı fabrikasıdır. Tekstil fabrikası, Tekirdağ ilinin Çerkezköy ilçesinde kurulmuş olup, iplik ve elyaf ürünleri üretimi yapmaktadır. Fabrikadaki çoğu üretim, invertörlü hız kontrol sürücüler tarafından gerçekleştirilmektedir. Fabrika OG'den kendi trafosundan beslenmektedir. Bu fabrikanın ölçümü AG tarafındaki 1600 kVA'lık kendi trafosundan yapılmıştır. Plastik fabrikası, İstanbul ilinin Selimpaşa ilçesinde kurulmuş olup, taşıtlar için plastik aksamaların üretimini yapmaktadır. Fabrikada teknolojik cihazların yanı sıra elektronik elemanlar, plastik enjeksiyon kalıp makineleri, kırma makineleri, thermoform makineleri gibi birçok cihazlar bulunmaktadır. Fabrika OG'den kendi trafosundan beslenmektedir. Bu fabrikanın ölçümü AG tarafındaki 1250 kVA'lık kendi trafosundan yapılmıştır. Baskı fabrikası ise Gebze ilinin Çayırova ilçesinde kurulmuş olup; kağıt ürünleri ile ilgili, kreatif ve fabrikasyon gibi tüm cilt işlemlerini yapabilen baskılama tesisidir. Tesiste kalıp makineleri, 3D yazıcılar, güç kaynakları, motor sürücüler, elektronik kartlar ve PLC'ler gibi birçok cihazlar kullanılmaktadır. Fabrikanın ölçümü AG tarafındaki trafolardan yapılmıştır. Bu fabrikalardaki ölçümler Chauvin Arnoux marka analizör ile yapılmıştır. Ölçümler kompanzasyon sistemi devredeyken gerçekleştirilmiştir.

Tüm ölçüm grafikler çizgi gösterimleri; 1.faz siyah, 2.faz kırmızı, 3.faz mavi renkli; tekil gösterimler mor, ortalaması alınan gösterimler yeşil renk ile gösterilmiştir.

7.2.1.1. Tekstil Fabrikası Ölçümü

Şekil 7.7.'de tekstil fabrikasına ait tek hat şeması gösterilmiştir. Fabrika OG'den kendi trafosundan beslenmektedir. Bu fabrikanın ölçümü güç trafosunun AG barasından ve 3 fazdan (L_1 , L_2 , L_3) yapılmıştır. Ölçüm süresi boyunca fabrika normal çalışır vaziyette ve kompanzasyon sistemi devrededir.

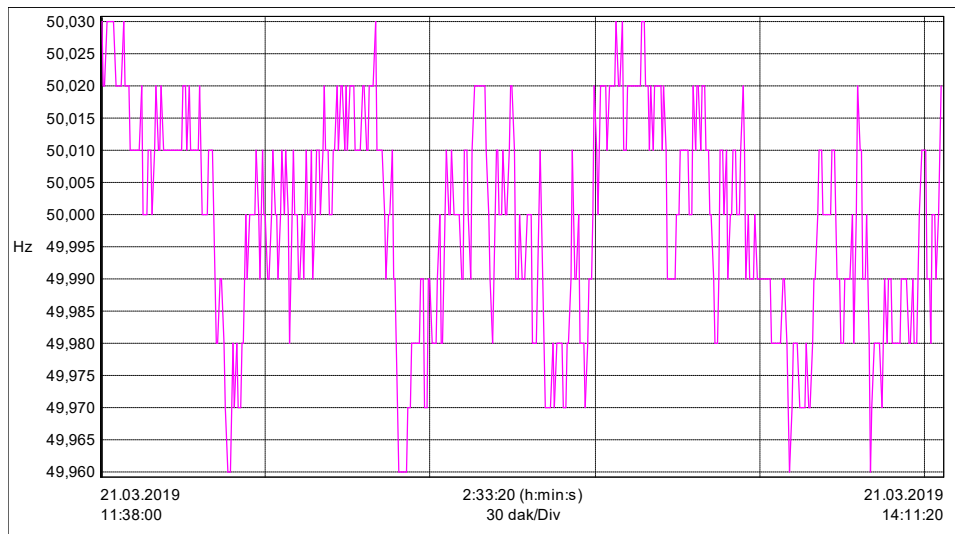


Şekil 7.7. Tekstil fabrikasına ait tek hat şeması



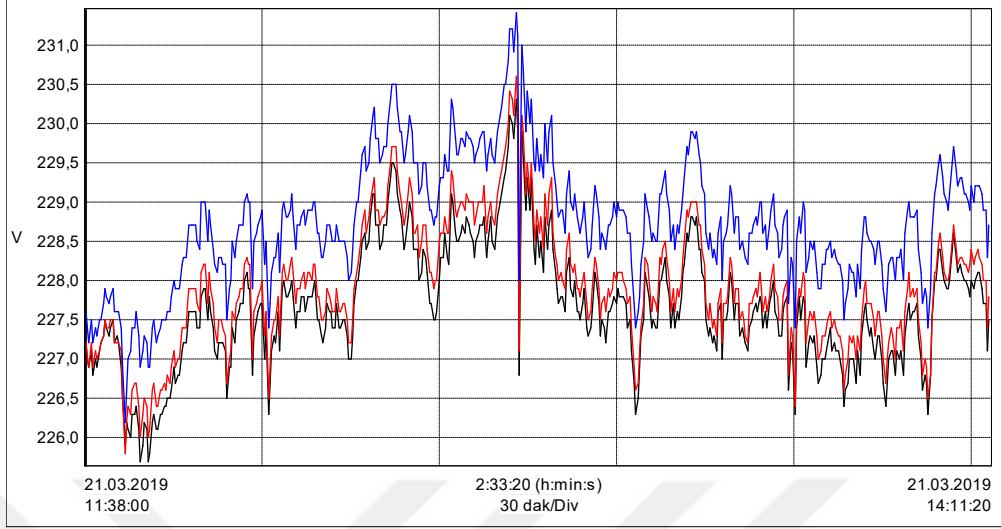
Şekil 7.8. Tekstil fabrikasının kompanzasyon panosu görüntüsü

A.G. ana dağıtım panosu barasından, saat 11.38 ile 14.11 arası, 20 saniyelik periyotlar halinde ve 2 saat 30 dakika süreyle veriler toplanmıştır. Toplanan veriler grafikler olarak gösterilmiş ve değerlerinden bahsedilmiştir.



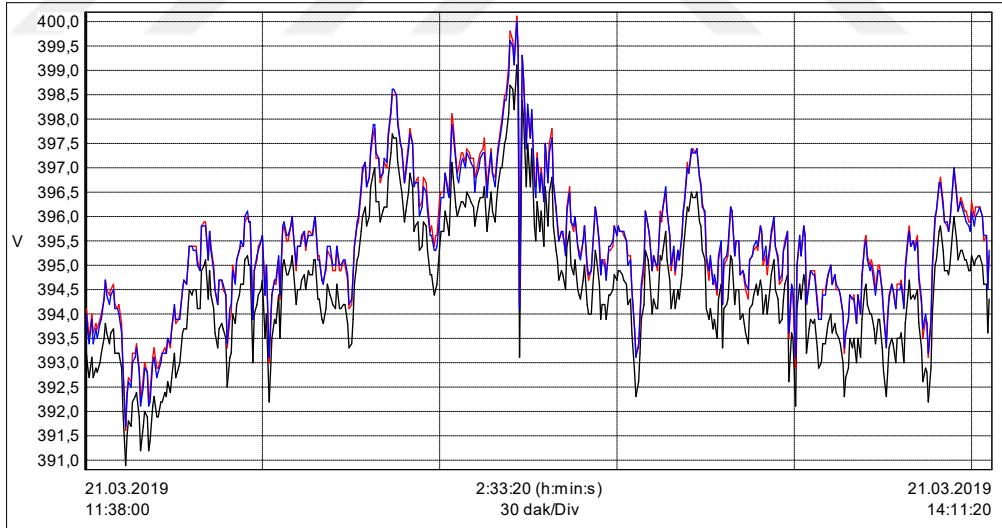
Şekil 7.9. Tekstil fabrikasına ait frekans grafiği

Ölçümün süresi boyunca frekans değeri 49,96-50,03 Hz olarak ölçülmüştür.



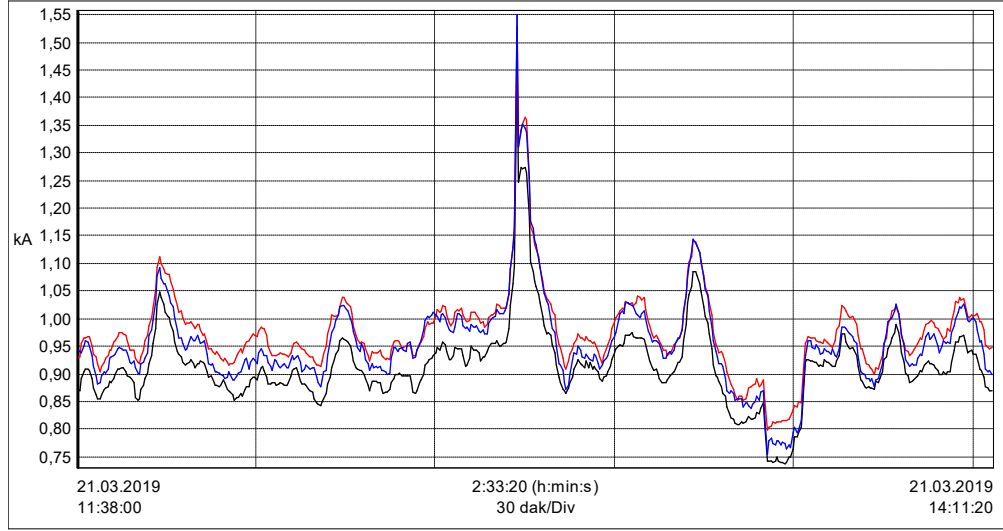
Şekil 7.10. Tekstil fabrikasına ait faz-nötr gerilim grafiği

Ölçüm süresi boyunca tespit edilen faz-nötr gerilim 225,7-231,4 V mertebelerindedir.



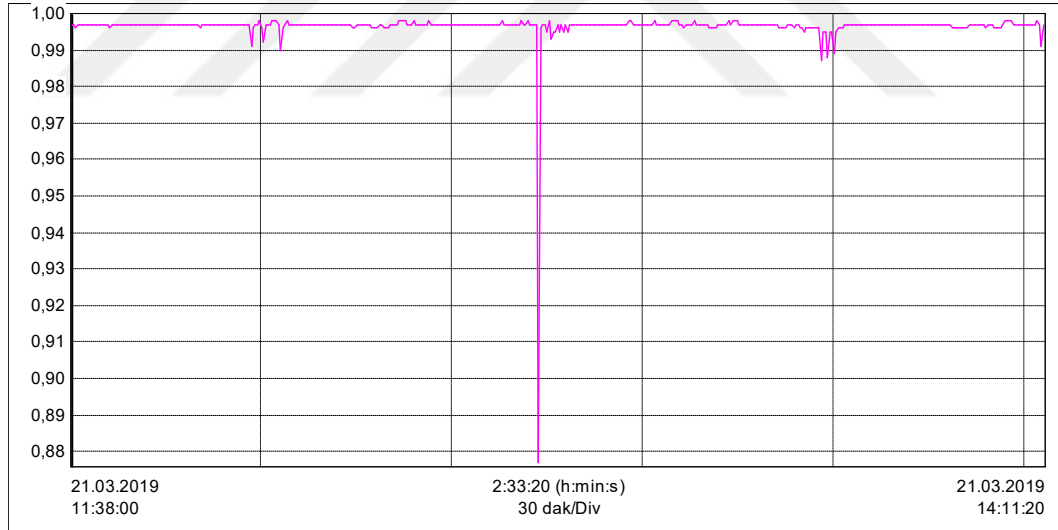
Şekil 7.11. Tekstil fabrikasına ait faz-faz gerilim grafiği

Ölçüm süresi boyunca tespit edilen faz-faz gerilim 390,9-400,1V mertebelerindedir.



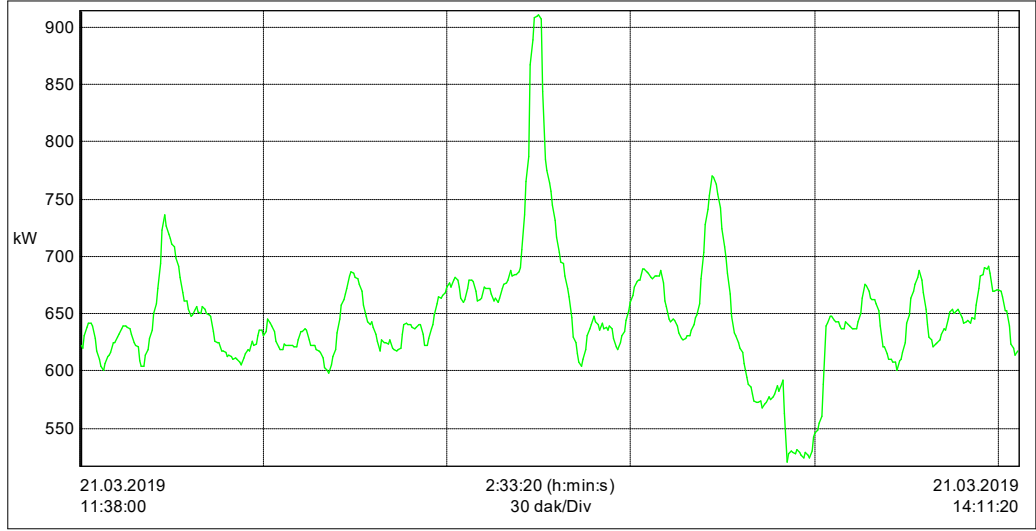
Şekil 7.12. Tekstil fabrikasına ait akım grafiği

Ölçüm süresi boyunca yük akımları 738-1550 A olarak ölçülmüştür.



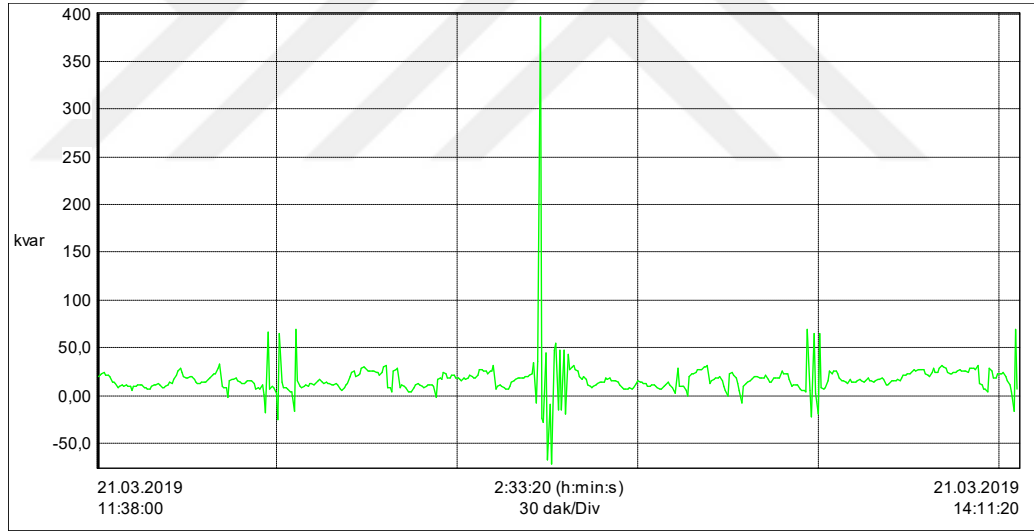
Şekil 7.13. Tekstil fabrikasına ait ortalama güç faktörü grafiği

Ölçüm süresi boyunca ortalama güç faktörü değeri 0,877-0,998 arası ölçülmüştür.



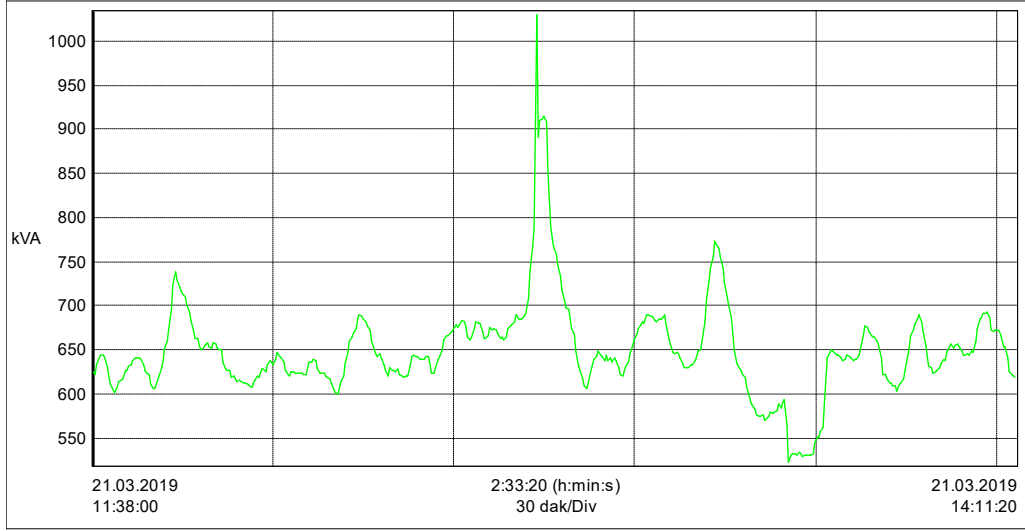
Şekil 7.14. Tekstil fabrikasına ait toplam aktif güç grafiği

Ölçüm süresi boyunca toplam aktif güç değeri 521-910,2 kW arası ölçülmüştür.



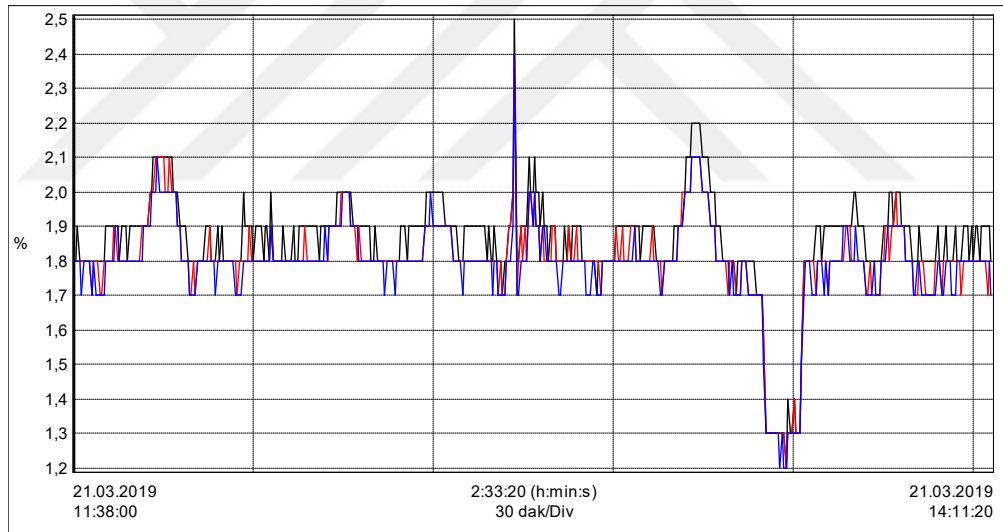
Şekil 7.15. Tekstil fabrikasına ait toplam reaktif güç grafiği

Ölçüm süresi boyunca toplam reaktif güç değeri -71,42-396,1 kVAR arası ölçülmüştür.



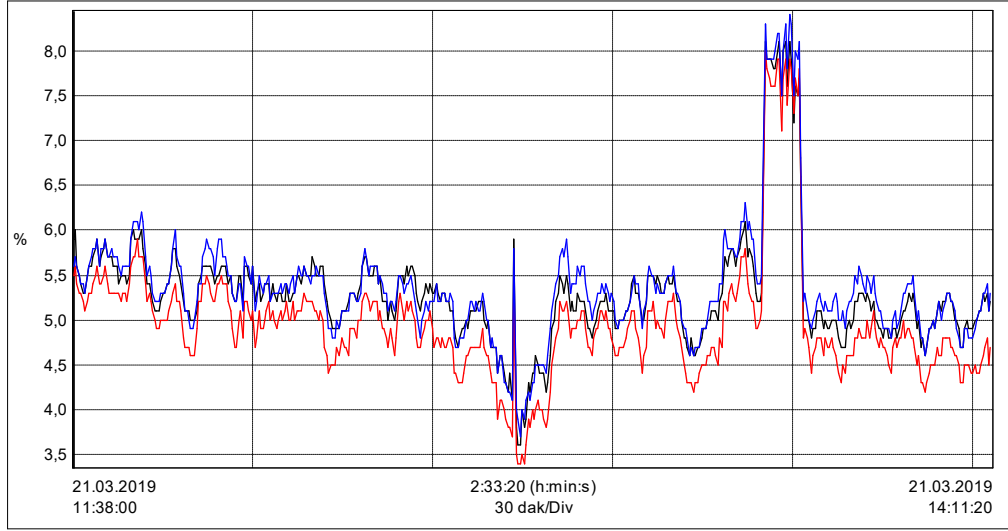
Şekil 7.16. Tekstil fabrikasına ait toplam görünür güç grafiği

Ölçüm süresi boyunca toplam görünür güç değeri 523-1029 kVA arası ölçülmüştür.



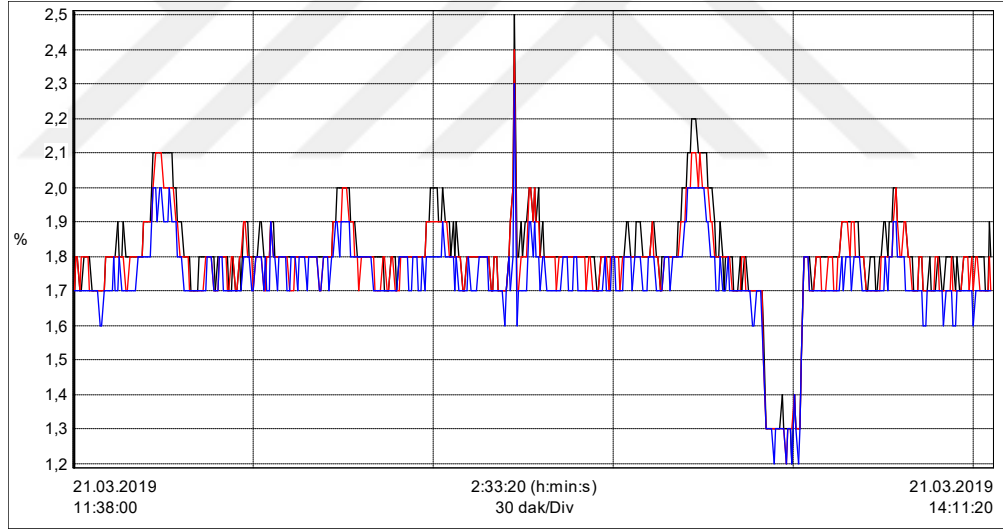
Şekil 7.17. Tekstil fabrikasına ait toplam faz-faz gerilim harmonik bozulma oranı (THDU) grafiği

Toplam faz-faz gerilim harmonik bozulma oranı (THDU) %1,2-%2,5 seviyelerinde gözlenmiştir.



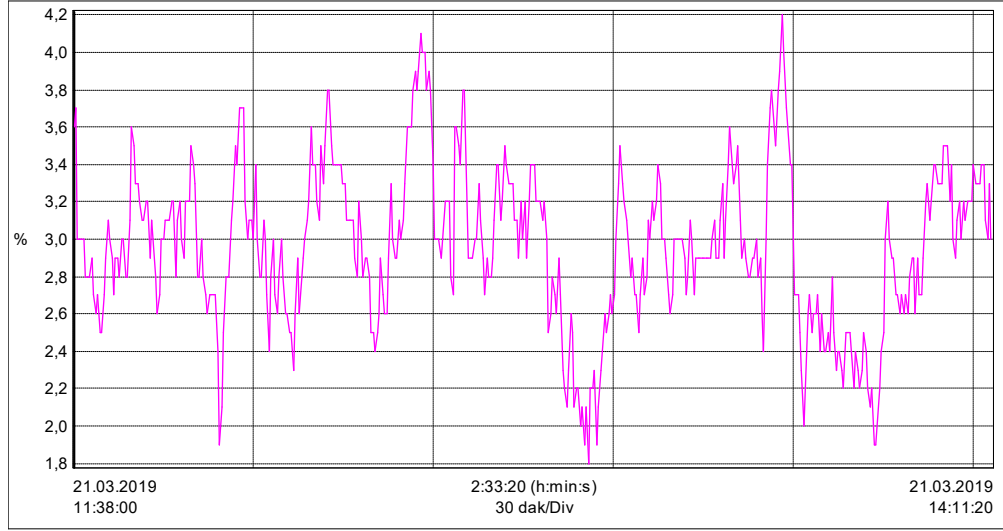
Şekil 7.18. Tekstil fabrikasına ait toplam akım harmonik bozulma oranı (THD_i) grafiği

Toplam akım harmonik bozulma oranı (THD_i) %3,4-%8,4 seviyelerinde gözlenmiştir.



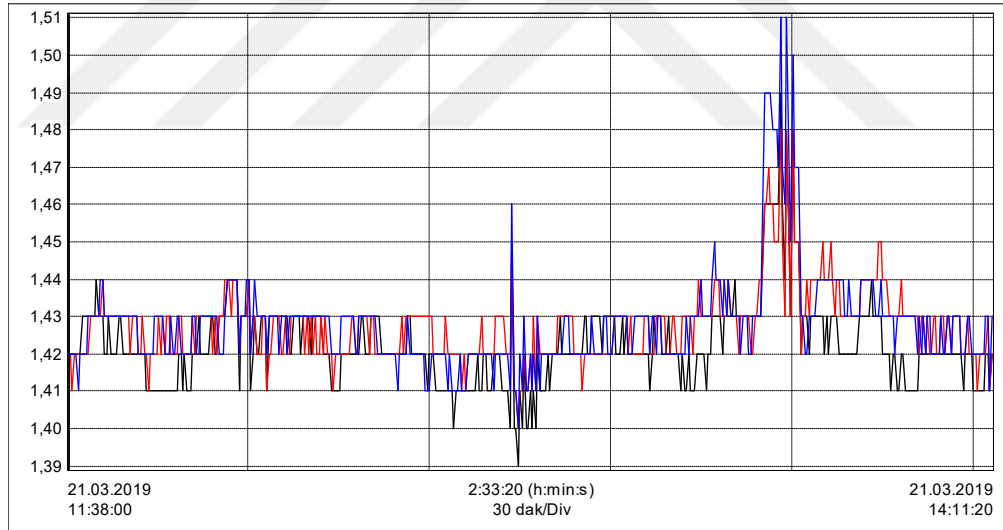
Şekil 7.19. Tekstil fabrikasına ait toplam faz-nötr harmonik bozulma oranı (THD_v) grafiği

Toplam faz-faz gerilim harmonik bozulma oranı (THD_U) %1,2-%2,5 seviyelerinde gözlenmiştir.



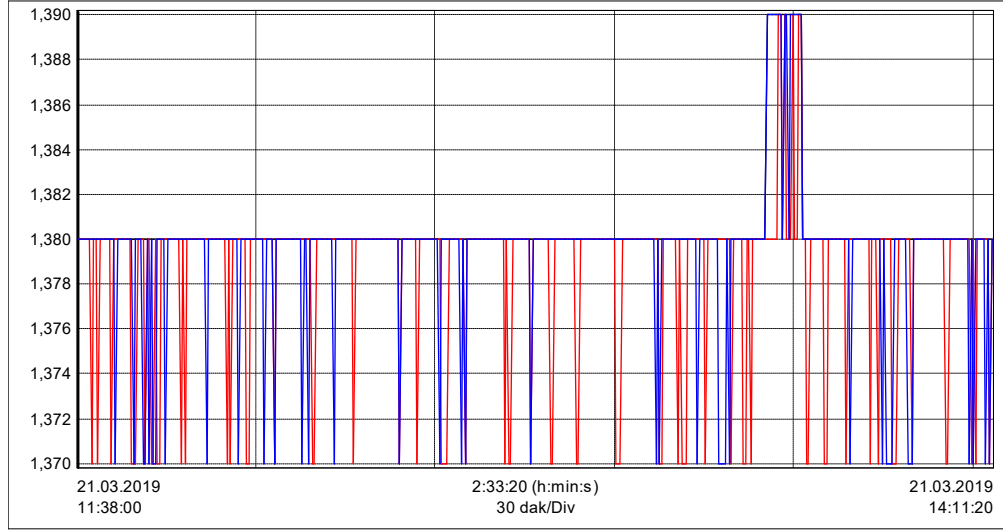
Şekil 7.20. Tekstil fabrikasına ait akım dengesizliği

Akım dengesizliği (A_{unb}) % olarak 1,8-4,2 olarak ölçülmüştür.



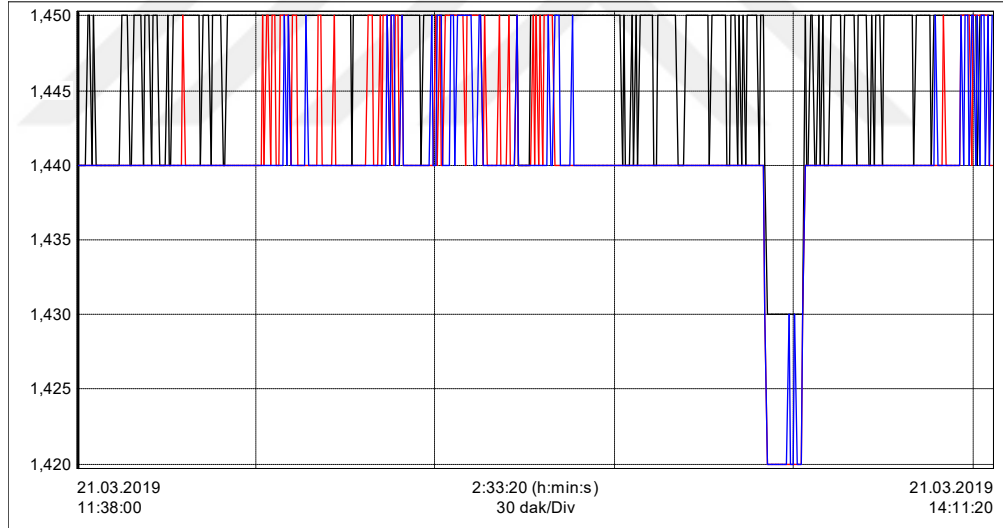
Şekil 7.21. Tekstil fabrikasına ait akım crest faktörü grafiği

Ölçüm süresi boyunca yük akımı crest faktör oranları 1,39-1,51 seviyelerinde gözlenmiştir.



Şekil 7.22. Tekstil fabrikasına ait faz-faz gerilim crest faktörü grafiği

Ölçüm süresi boyunca faz-faz gerilimlerinin crest faktör oranları 1,37-1,39 seviyelerinde gözlenmiştir.



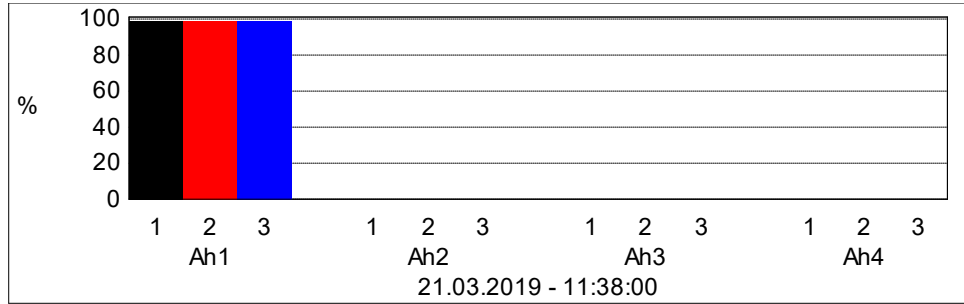
Şekil 7.23. Tekstil fabrikasına ait faz-nötr gerilim crest faktörü grafiği

Ölçüm süresi boyunca faz-nötr gerilimlerinin crest faktör oranları 1,42-1,45 seviyelerinde gözlenmiştir.

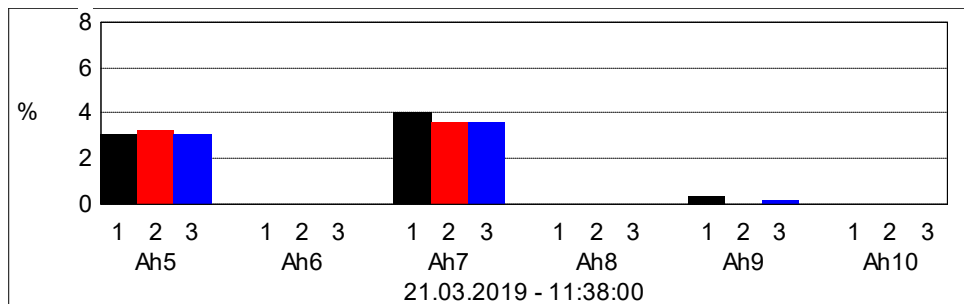
Tablo 7.1. Tekstil fabrikasına ait DPF, PF ve Tanjant değerleri

İsim	Tarih	Zaman	Ort.	Min.	Max.	Birimler	Süre(h:min:s)
DPF Ortalama	21.03.2019	11:38:00	0,999	0,876	1,000		02:33:40
DPF1	21.03.2019	11:38:00	0,998	0,869	1,000		02:33:40
DPF2	21.03.2019	11:38:00	0,999	0,889	1,000		02:33:40
DPF3	21.03.2019	11:38:00	0,999	0,878	1,000		02:33:40
PF Ortalama	21.03.2019	11:38:00	0,997	0,877	0,998		02:33:40
PF1	21.03.2019	11:38:00	0,996	0,868	0,998		02:33:40
PF2	21.03.2019	11:38:00	0,997	0,887	0,999		02:33:40
PF3	21.03.2019	11:38:00	0,996	0,876	0,998		02:33:40
Tan Ortalama	21.03.2019	11:38:00	0,033	0,017	0,429	%	02:33:40
Tan1	21.03.2019	11:38:00	0,048	-0,064	0,464	%	02:33:40
Tan2	21.03.2019	11:38:00	-0,006	-0,116	0,385	%	02:33:40
Tan3	21.03.2019	11:38:00	0,036	-0,081	0,438	%	02:33:40

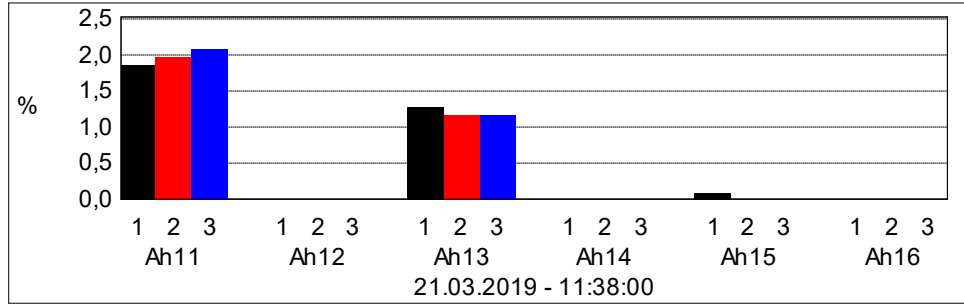
Ölçümde güç faktörü (PF) değeri ortalama 0,997 iken kayma faktörü (DPF) değerinin ortalaması 0,999 olduğu görülmektedir. Sistemde bulunan kompanzasyon panosundaki reaktif güç kontrol rölesinin $\cos\phi$ değeri 1'e ayarlı olmasına rağmen ölçümde görülen $\cos\phi$ değerine karşılık gelen DPF değerinin 0,999 geridir. Bunun nedeni, sistemde sabit olan reaktif güç kontrol rölesi ve ölçüm yapılan taşınabilir ölçü aletinin hassasiyetlerinin farklı olmasından kaynaklanabilir.



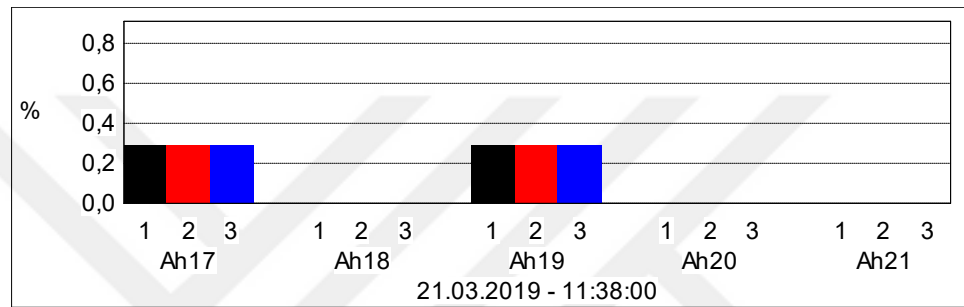
Şekil 7.24. Tekstil fabrikasına ait akım spektrumu (2.harmonik-4.harmonik arası)



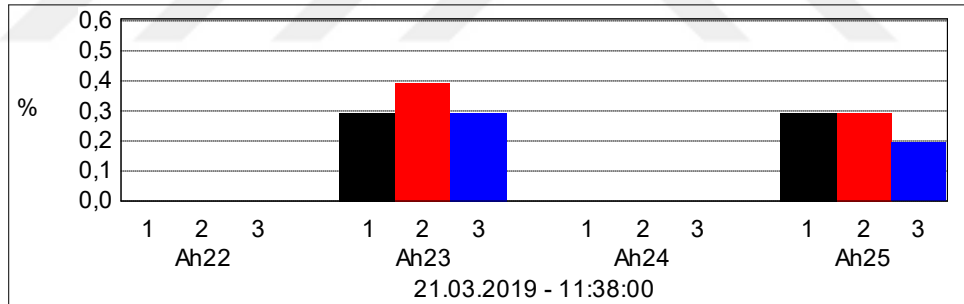
Şekil 7.25. Tekstil fabrikasına ait akım spektrumu (5.harmonik-10.harmonik arası)



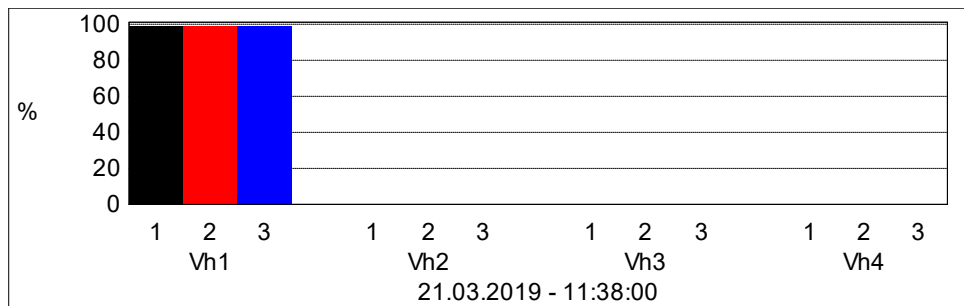
Şekil 7.26. Tekstil fabrikasına ait akım spektrumu (11.harmonik-16.harmonik arası)



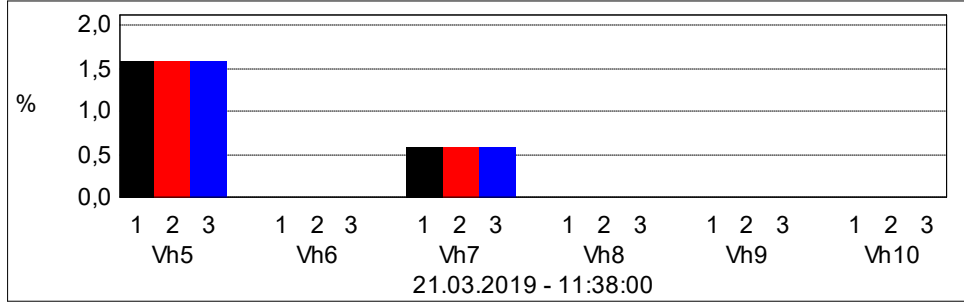
Şekil 7.27. Tekstil fabrikasına ait akım spektrumu (17.harmonik-21.harmonik arası)



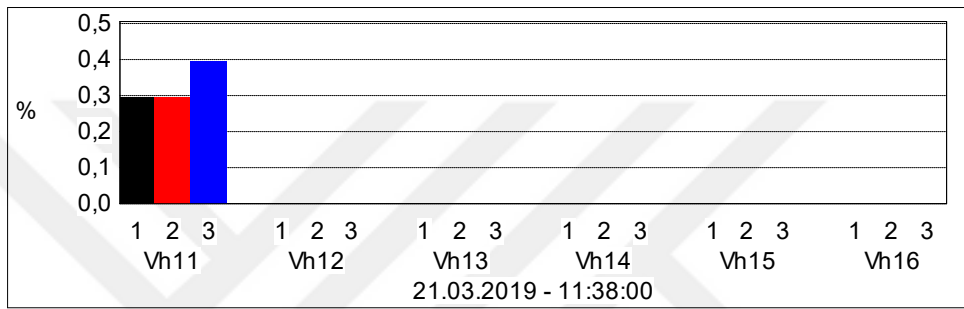
Şekil 7.28. Tekstil fabrikasına ait akım spektrumu (22.harmonik-25.harmonik arası)



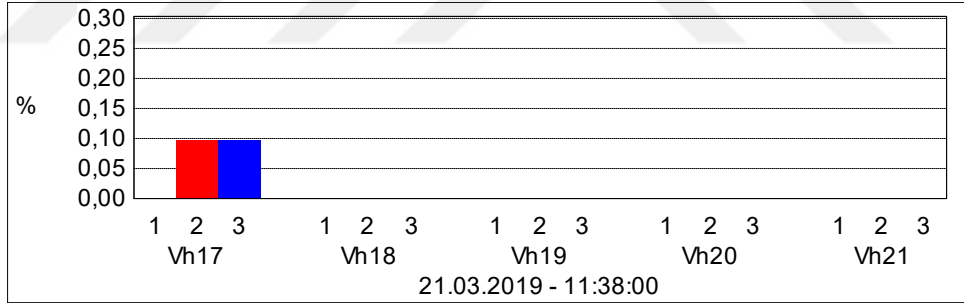
Şekil 7.29. Tekstil fabrikasına ait gerilim spektrumu (2.harmonik-4.harmonik arası)



Şekil 7.30. Tekstil fabrikasına ait gerilim spektrumu (5.harmonik-10.harmonik arası)



Şekil 7.31. Tekstil fabrikasına ait gerilim spektrumu (11.harmonik-16.harmonik arası)



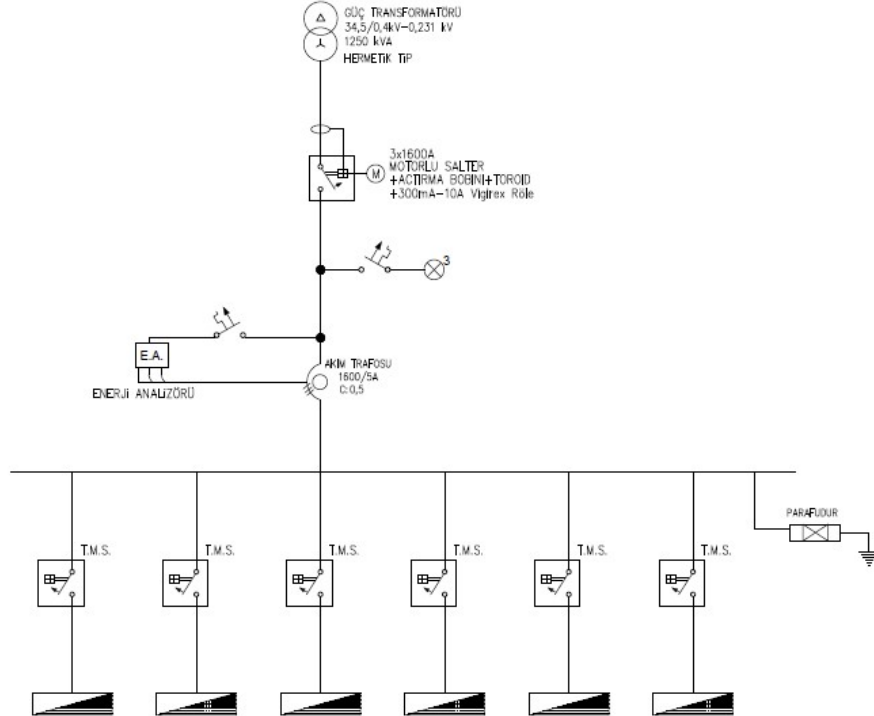
Şekil 7.32. Tekstil fabrikasına ait gerilim spektrumu (17.harmonik-21.harmonik arası)

Şekil 7.17, Şekil 7.18 ve Şekil 7.19’da akım ve gerilimin toplam harmonik bozulmaları görülmektedir. Bozulma değerlerine bakıldığında, gerilim harmoniğinin (THD_U) maksimum %2,5 seviyelerinde gözlenmiştir. Bu değer EPDK’nın belirlemiş olduğu sınır değerinin altında bir değerdir. Akım harmoniği incelendiğinde ise (THD_I) maksimum %8,4 seviyelerindedir. Bu değer EPDK’nın belirlediği sınır değerinin üstünde olduğu görülmektedir. Ancak büyük organize sanayi bölgelerinde şebekeden kaynaklı bozulmalar (genellikle kirlilik oluşması) sık sık rastlandığı için akım toplam harmonik bozulma %10’a kadar kabul edilebilir seviyededir.

Akım ve gerilimde toplam harmonik bozulmalara bakıldığında; baskın harmoniklerin akımda %4 değerinde 7.harmonik ve %3 değerinde ise 5.harmonik olduğu görülmektedir. Zamanla akımdaki bozulmalardan dolayı 11,13,17,19,23 ve 25. harmonik değerleri; gerilimde ise 5,7,11 ve 17. harmonik değerleri zamanla değişkenlik gösterebileceği için ilerde sorun oluşturabilir.

7.2.1.2. Plastik Fabrikası Ölçümü

Şekil 7.33.'de plastik fabrikasına ait tek hat şeması gösterilmiştir. Fabrika OG'den kendi trafosundan beslenmektedir. Bu fabrikanın ölçümü güç trafosunun AG barasından ve 3 fazdan (L_1 , L_2 , L_3) yapılmıştır. Ölçümler Chauvin Arnoux marka taşınabilir güç analizörü ile yapılmıştır. Ölçüm süresi boyunca fabrika normal çalışır vaziyette ve kompanzasyon sistemi devrededir.

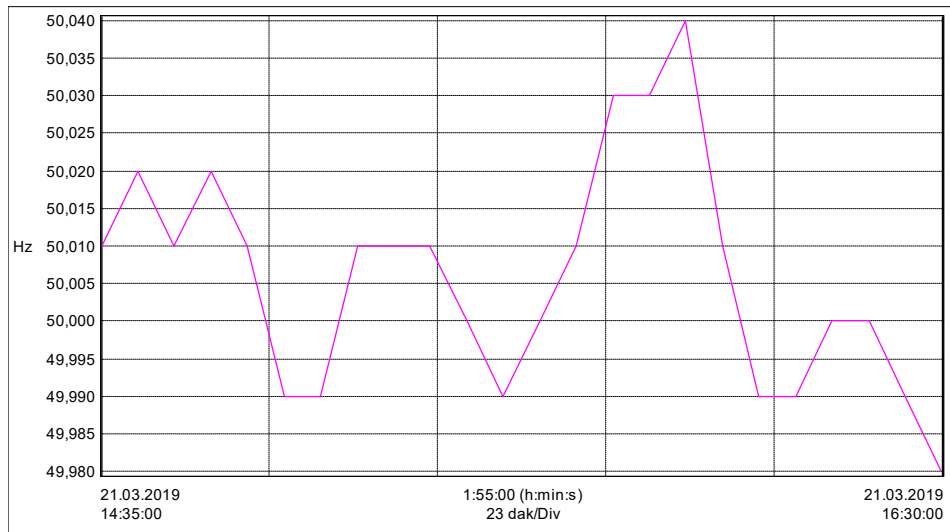


Şekil 7.33. Plastik fabrikasına ait tek hat şeması



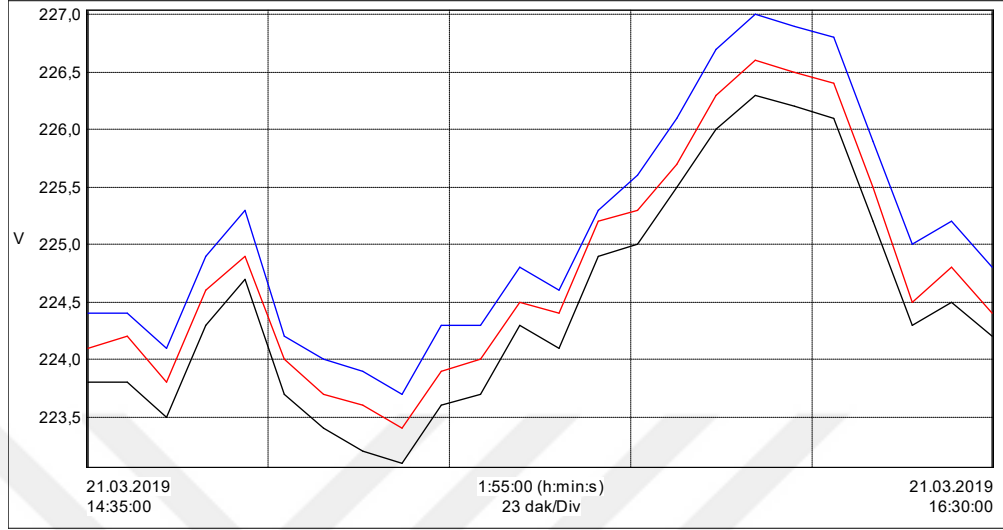
Şekil7.34. Plastik fabrikasının kompanzasyon panosu görüntüsü

A.G. ana dağıtım panosu barasından, saat 14.35 ile 16.30 arası, 5 dakikalık periyotlar halinde ve 1 saat 55 dakika süreyle veriler toplanmıştır. Toplanan veriler grafikler olarak gösterilmiş ve değerlerinden bahsedilmiştir.



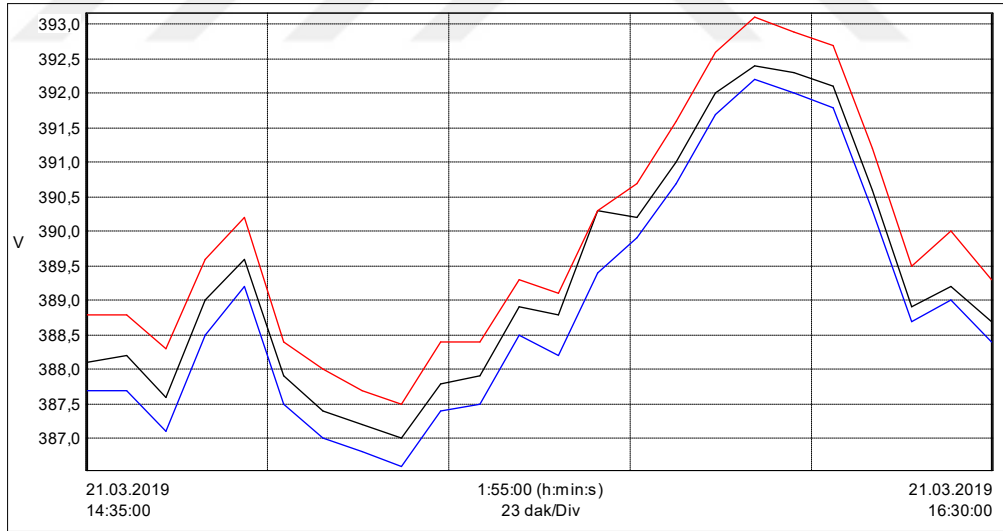
Şekil 7.35. Plastik fabrikasına ait frekans grafiği

Ölçümün süresi boyunca frekans değeri 49,98-50,04 Hz olarak ölçülmüştür.



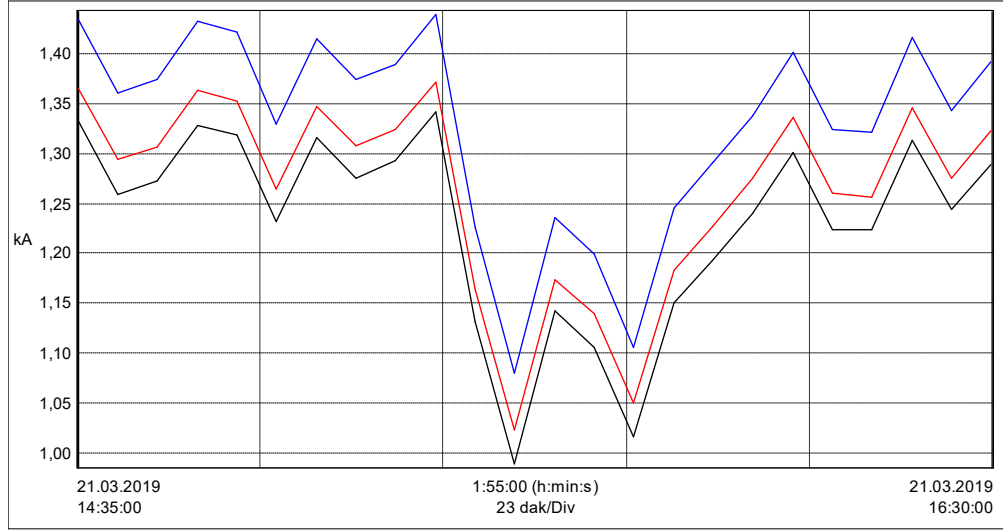
Şekil 7.36. Plastik fabrikasına ait faz-nötr gerilim grafiği

Ölçüm süresi boyunca tespit edilen faz-nötr gerilim 223,1-227 V mertebelerindedir.



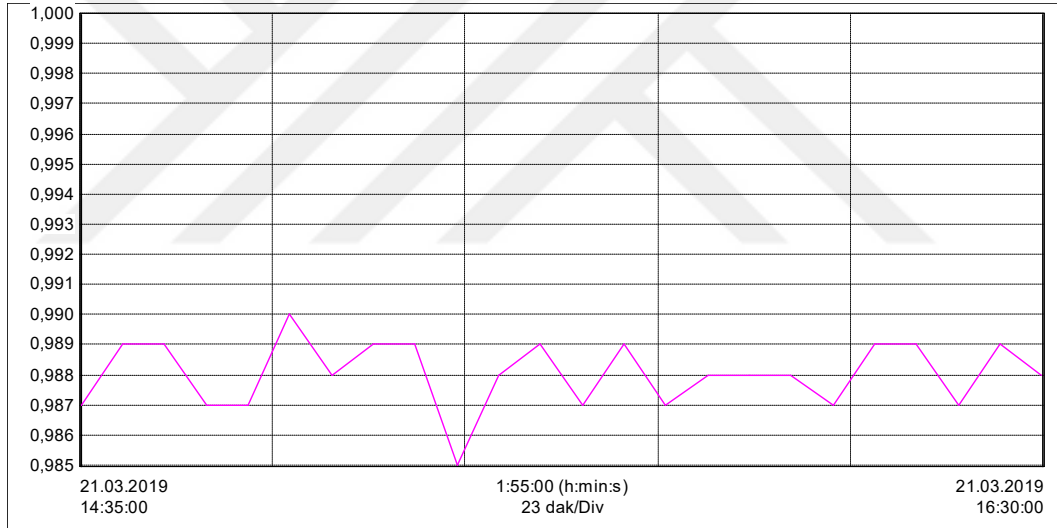
Şekil 7.37. Plastik fabrikasına ait faz-faz gerilim grafiği

Ölçüm süresi boyunca tespit edilen faz-faz gerilim 386,6-393,1 V mertebelerindedir.



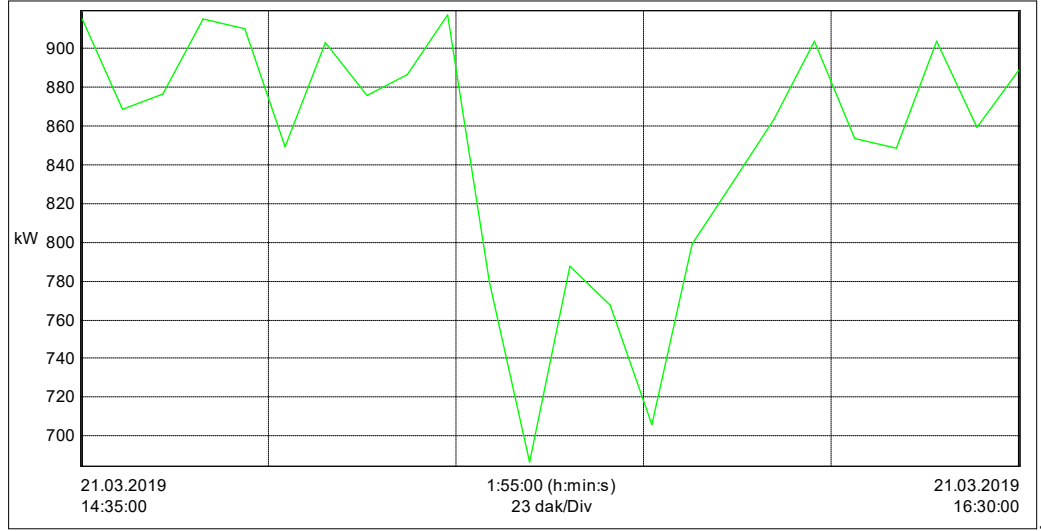
Şekil 7.38. Plastik fabrikasına ait akım grafiği

Ölçüm süresi boyunca yük akımları 989-1439 A olarak ölçülmüştür.



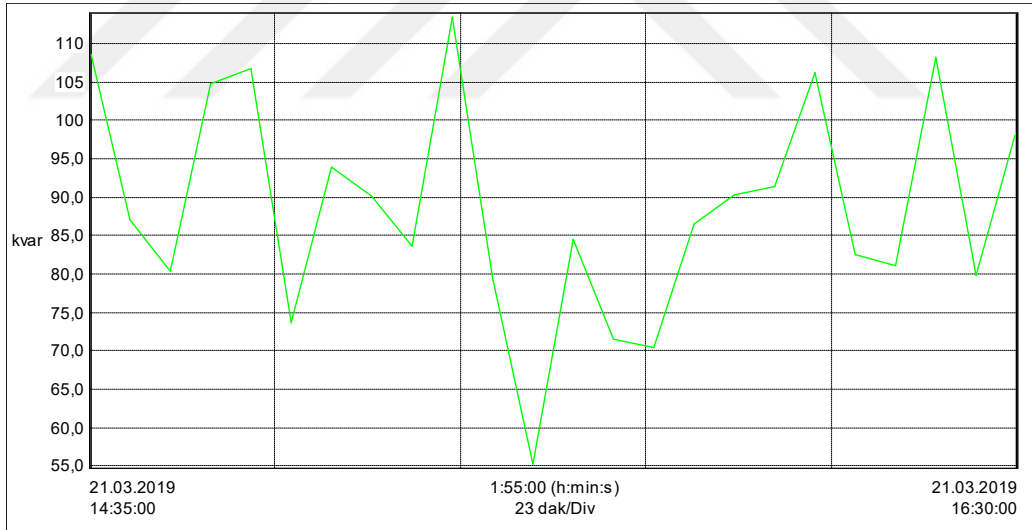
Şekil 7.39. Plastik fabrikasına ait ortalama güç faktörü grafiği

Ölçüm süresi boyunca ortalama güç faktörü değeri 0,985-0,990 arası ölçülmüştür.



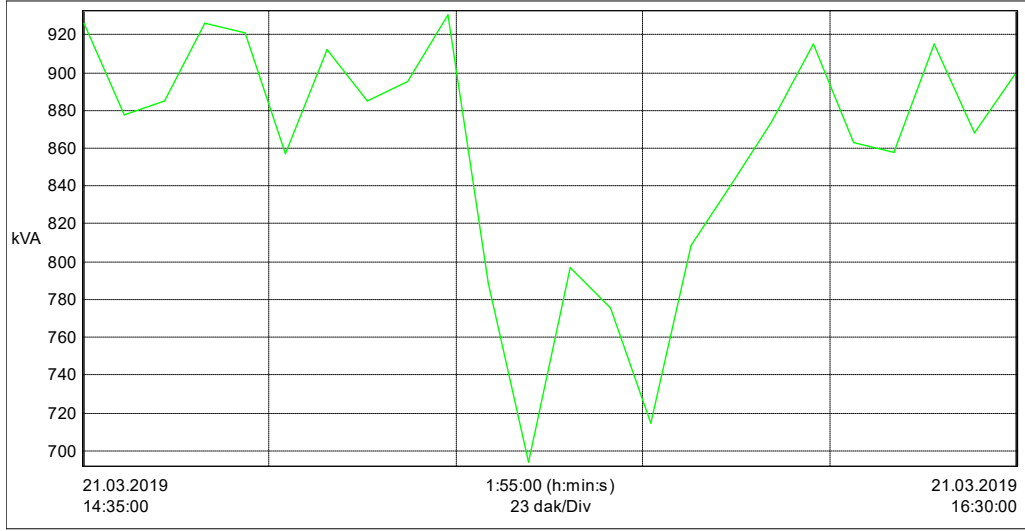
Şekil 7.40. Plastik fabrikasına ait toplam aktif güç grafiği

Ölçüm süresi boyunca toplam aktif güç değeri 686,8-916,9 kW arası ölçülmüştür.



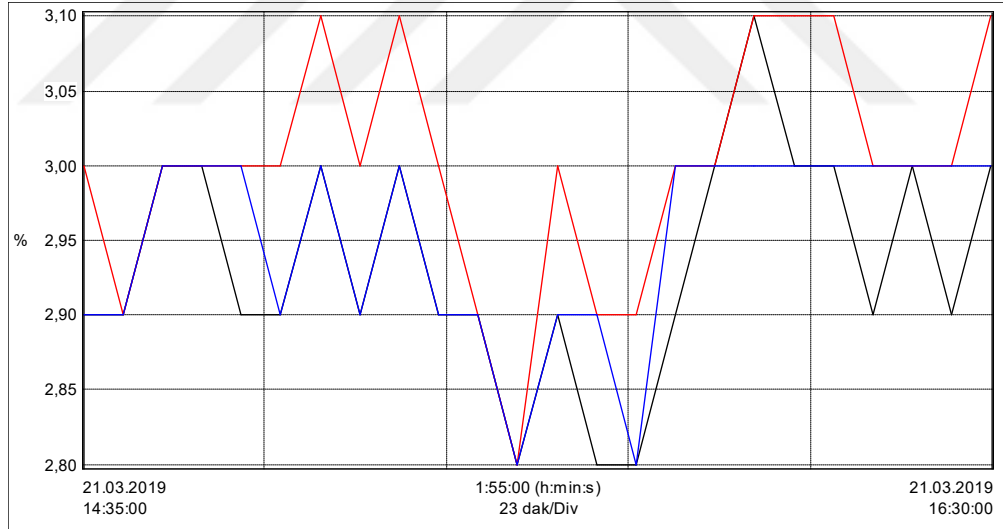
Şekil 7.41. Plastik fabrikasına ait toplam reaktif güç grafiği

Ölçüm süresi boyunca toplam reaktif güç değeri 55,28-113,4 kVAR arası ölçülmüştür.



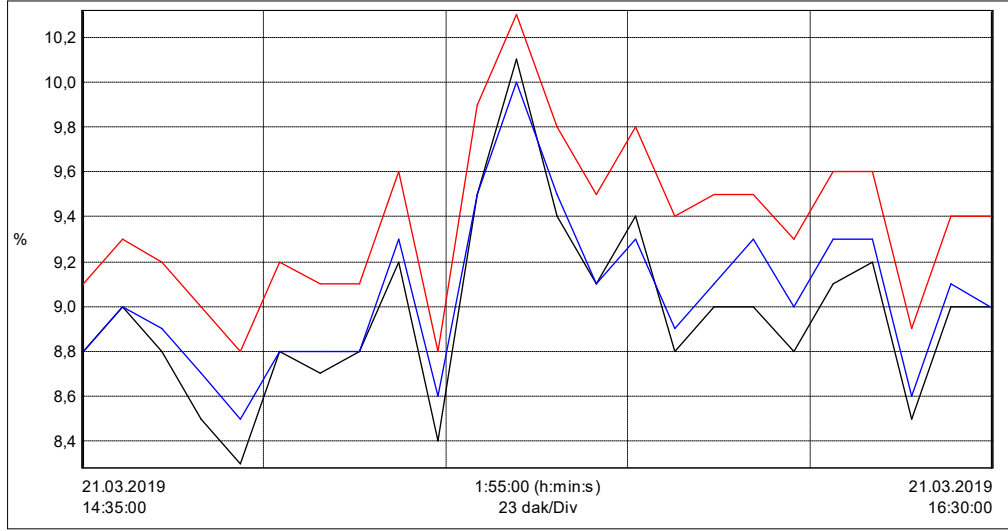
Şekil 7.42. Plastik fabrikasına ait toplam görünür güç grafiği

Ölçüm süresi boyunca toplam görünür güç değeri 694,2-930,4 kVA arası ölçülmüştür.



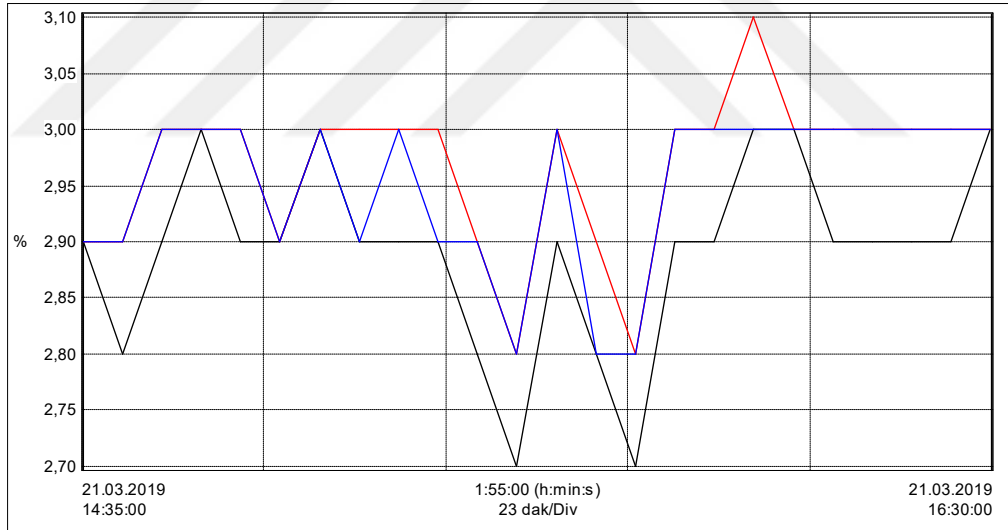
Şekil 7.43. Plastik fabrikasına ait toplam faz-faz gerilim harmonik bozulma oranı (THD_U) grafiği

Toplam faz-faz gerilim harmonik bozulma oranı (THD_U) %2,8-%3,1 seviyelerinde gözlenmiştir.



Şekil 7.44. Plastik fabrikasına ait toplam akım harmonik bozulma oranı (THD_I) grafiği

Toplam akım harmonik bozulma oranı (THD_I) %8,3-%10,3 seviyelerinde gözlenmiştir.



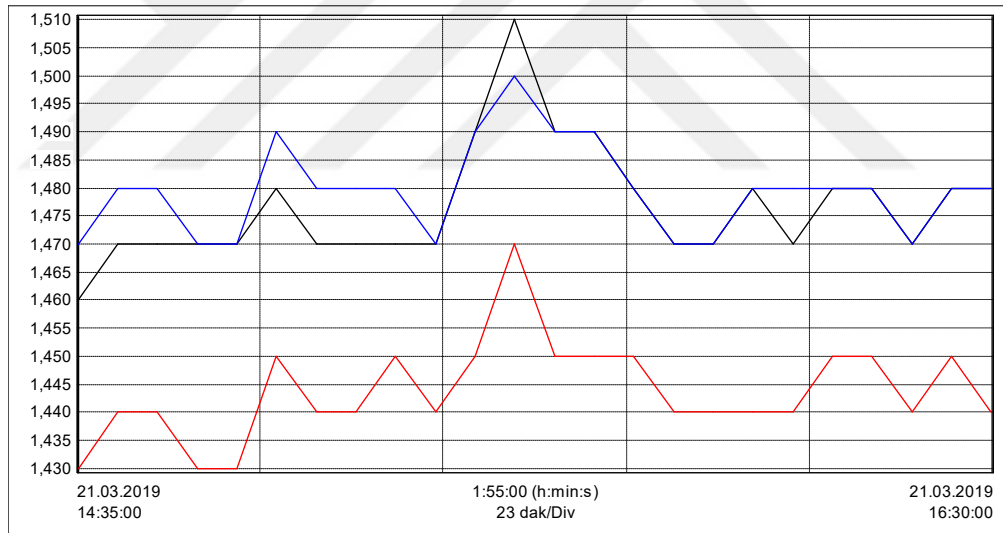
Şekil 7.45. Plastik fabrikasına ait toplam faz-nötr gerilim harmonik bozulma oranı (THD_V) grafiği

Toplam faz-nötr gerilim harmonik bozulma oranı (THD_I) %2,7-%3,1 seviyelerinde gözlenmiştir.



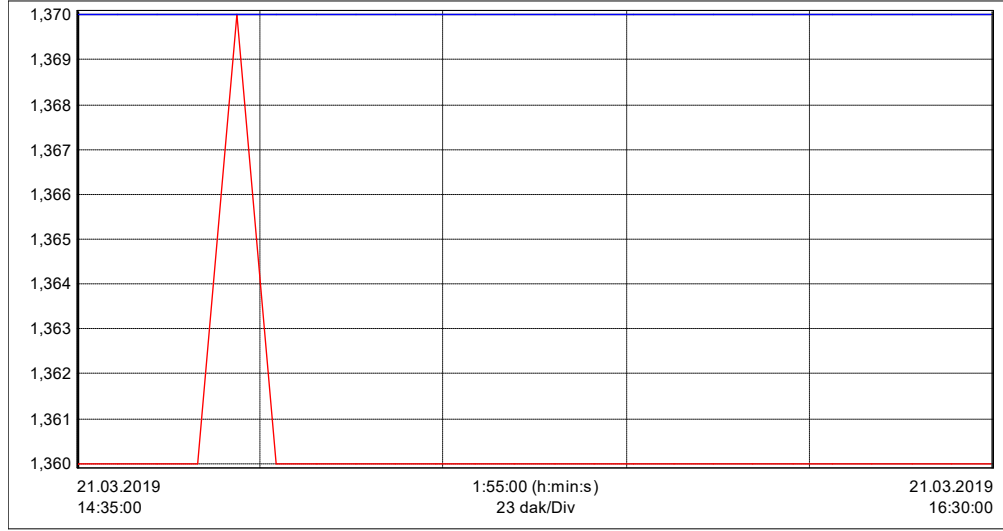
Şekil 7.46. Plastik fabrikasına ait akım dengesizliği

Akım dengesizliği (A_{unb}) %100olarak ölçülmüştür.



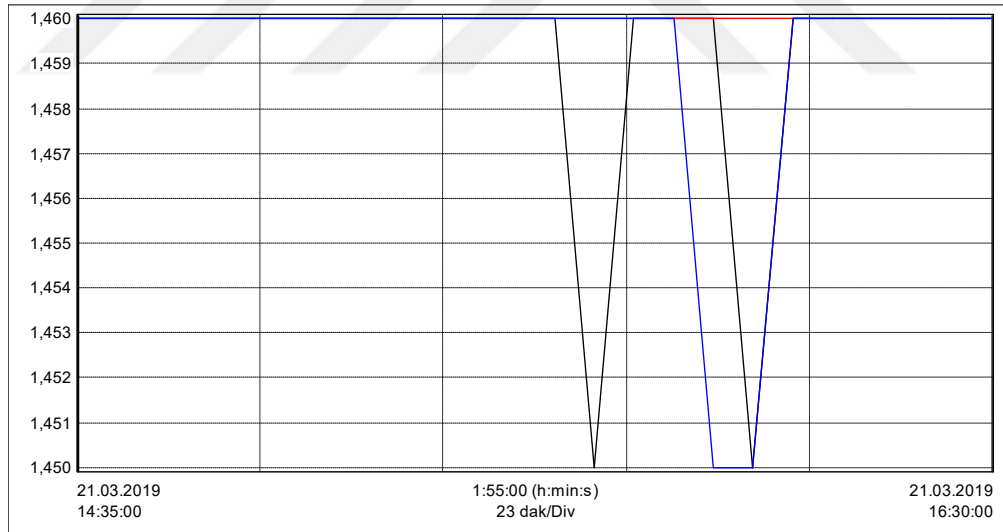
Şekil 7.47. Plastik fabrikasına ait akım crest faktörü grafiği

Ölçüm süresi boyunca yük akımı crest faktör oranları 1,43-1,51 seviyelerinde gözlenmiştir.



Şekil 7.48. Plastik fabrikasına ait faz-faz gerilim crest faktörü grafiği

Ölçüm süresi boyunca faz-faz gerilim crest faktör oranları 1,36-1,37 seviyelerinde gözlenmiştir.



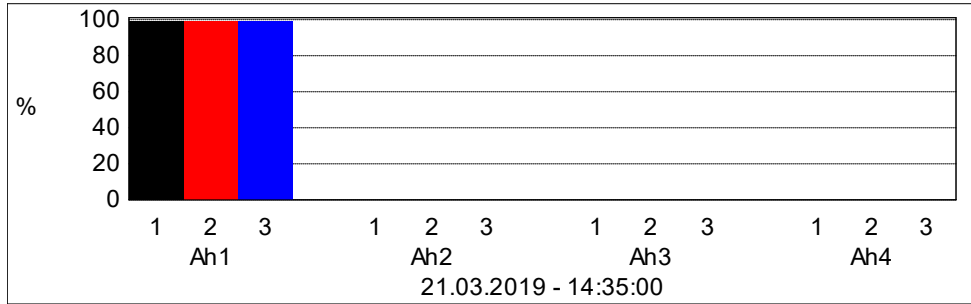
Şekil 7.49. Plastik fabrikasına ait faz-nötr gerilim crest faktörü grafiği

Ölçüm süresi boyunca faz-nötr gerilim crest faktör oranları 1,45-1,46 seviyelerinde gözlenmiştir.

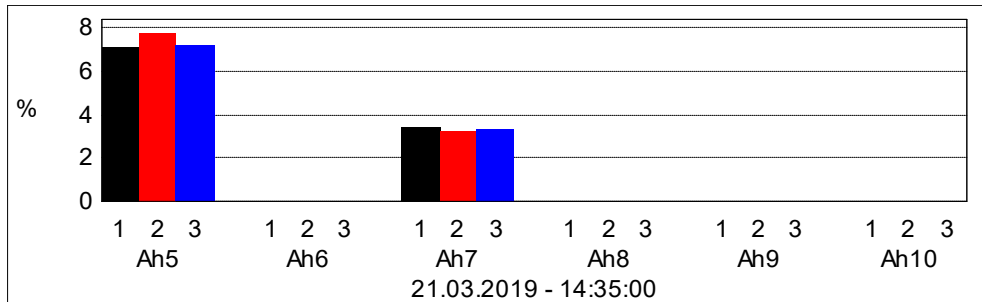
Tablo 7.2. Plastik fabrikasına ait DPF, PF ve Tanjant değerleri

İsim	Tarih	Zaman	Ort.	Min.	Max.	Birimler	Süre(h:min:s)
DPF Ortalama	21.03.2019	14:35:00	0,993	0,990	0,995		02:00:00
DPF1	21.03.2019	14:35:00	0,996	0,993	0,998		02:00:00
DPF2	21.03.2019	14:35:00	0,988	0,984	0,990		02:00:00
DPF3	21.03.2019	14:35:00	0,996	0,993	0,998		02:00:00
PF Ortalama	21.03.2019	14:35:00	0,988	0,985	0,990		02:00:00
PF1	21.03.2019	14:35:00	0,991	0,998	0,992		02:00:00
PF2	21.03.2019	14:35:00	0,982	0,979	0,985		02:00:00
PF3	21.03.2019	14:35:00	0,991	0,989	0,992		02:00:00
Tan Ortalama	21.03.2019	14:35:00	0,103	0,080	0,122	%	02:00:00
Tan1	21.03.2019	14:35:00	0,080	0,052	0,101	%	02:00:00
Tan2	21.03.2019	14:35:00	0,152	0,135	0,168	%	02:00:00
Tan3	21.03.2019	14:35:00	0,078	0,050	0,098	%	02:00:00

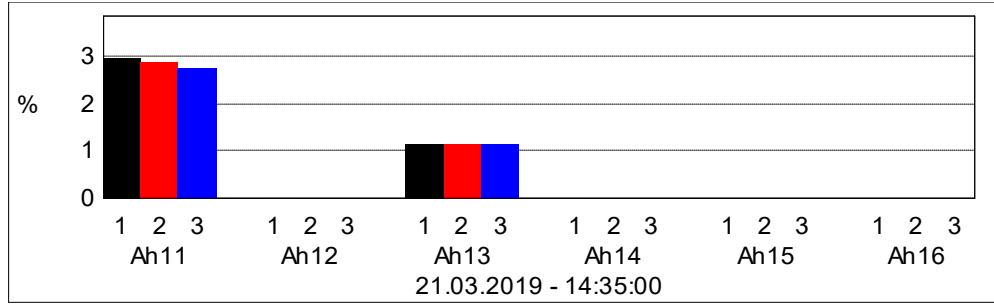
Ölçümde güç faktörü (PF) değeri ortalama 0,988 iken kayma faktörü (DPF) değerinin ortalaması 0,993 olduğu görülmektedir. Sistemde bulunan kompanzasyon panosundaki reaktif güç kontrol rölesinin $\cos\phi$ değeri 1'e ayarlı olmasına rağmen ölçümde görülen $\cos\phi$ değerine karşılık gelen DPF değerinin 0,993 geridir. Bunun nedeni, sistemde sabit olan reaktif güç kontrol rölesi ve ölçüm yapılan taşınabilir ölçü aletinin hassasiyetlerinin farklı olmasından kaynaklanabilir.



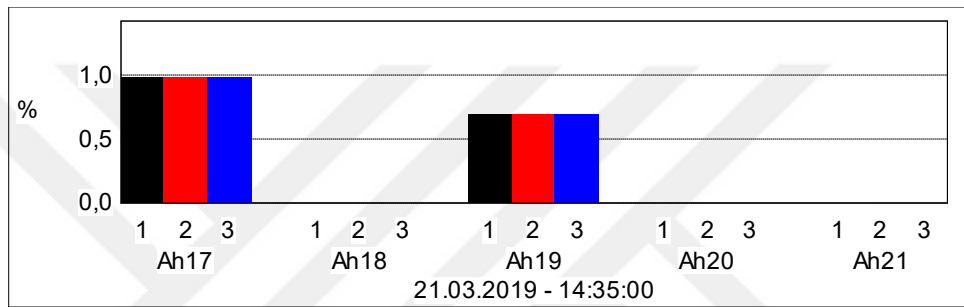
Şekil 7.50. Plastik fabrikasına ait akım spektrumu (2.harmonik-4.harmonik arası)



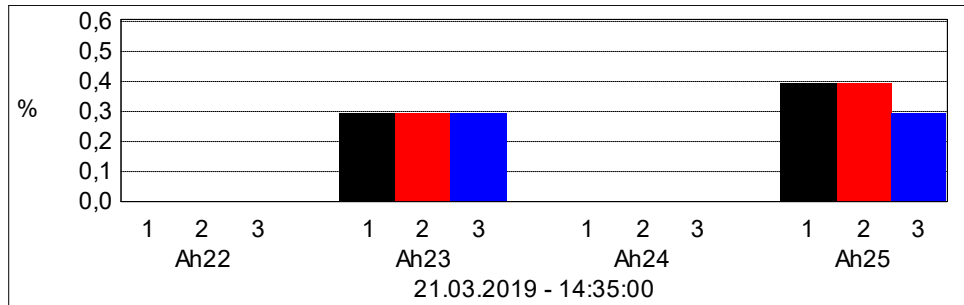
Şekil 7.51. Plastik fabrikasına ait akım spektrumu (5.harmonik-10.harmonik arası)



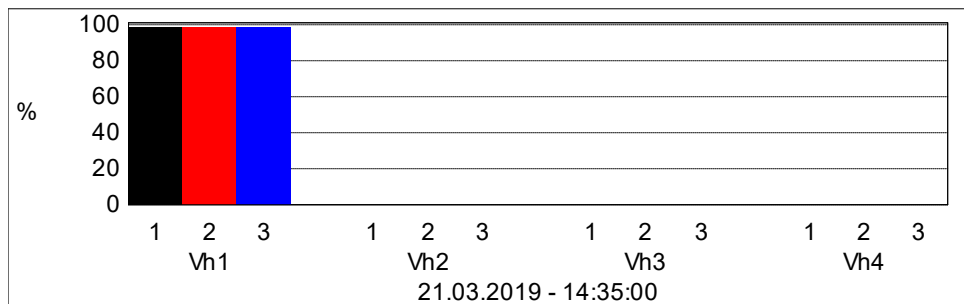
Şekil 7.52. Plastik fabrikasına ait akım spektrumu (11.harmonik-16.harmonik arası)



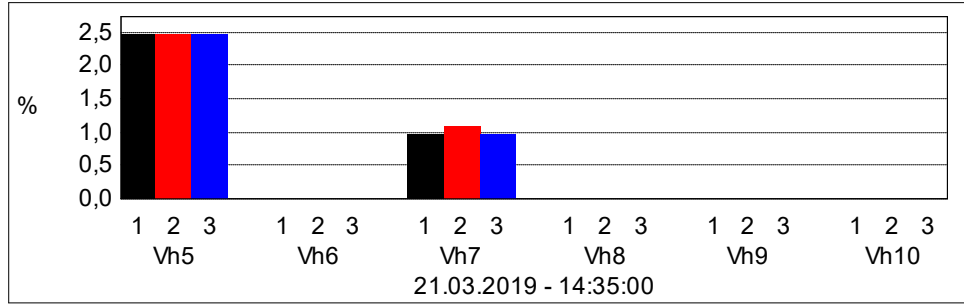
Şekil 7.53. Plastik fabrikasına ait akım spektrumu (17.harmonik-21.harmonik arası)



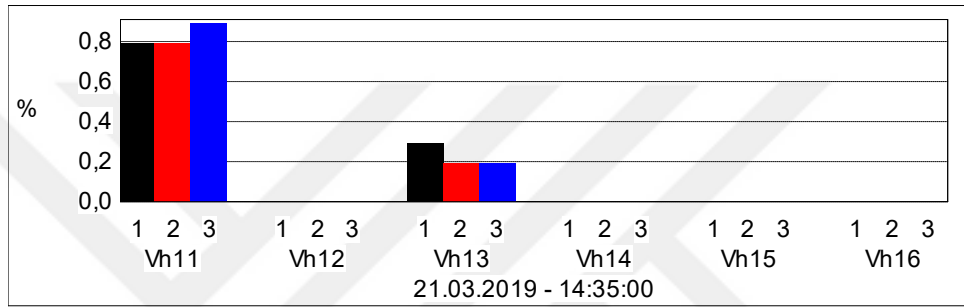
Şekil 7.54. Plastik fabrikasına ait akım spektrumu (22.harmonik-25.harmonik arası)



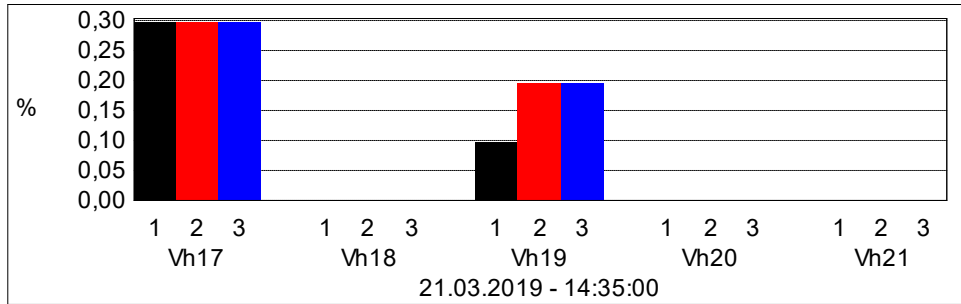
Şekil 7.55. Plastik fabrikasına ait gerilim spektrumu (2.harmonik-4.harmonik arası)



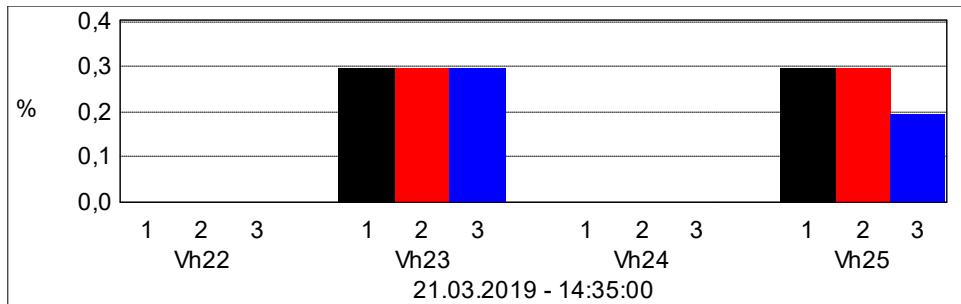
Şekil 7.56. Plastik fabrikasına ait gerilim spektrumu (5.harmonik-10.harmonik arası)



Şekil 7.57. Plastik fabrikasına ait gerilim spektrumu (11.harmonik-16.harmonik arası)



Şekil 7.58. Plastik fabrikasına ait gerilim spektrumu (17.harmonik-21.harmonik arası)



Şekil 7.59. Plastik fabrikasına ait gerilim spektrumu (22.harmonik-25.harmonik arası)

Şekil 7.50 ile 7.59 arası fazlarda bulunan harmoniklerin dereceleri ve yüzde olarak oranları gösterilmektedir.

Şekil 7.43, Şekil 7.44 ve 7.45’de akım ve gerilimin toplam harmonik bozulmaları görülmektedir. Bozulma değerlerine bakıldığında, gerilim harmoniğinin (THD_U) maksimum %3,1 seviyelerinde gözlenmiştir. Bu değer EPDK’nın belirlemiş olduğu sınır değerine göre kabul edilebilir değerdir. Akım harmoniği incelendiğinde ise (THD_I) maksimum %10,3 seviyelerindedir. Bu değer EPDK’nın belirlediği sınır değerinin üstünde olduğu görülmektedir. Bu fabrikada meydana gelen arızaların çoğu harmoniklerden kaynaklandığı görülmektedir. Uygun filtreleme seçilerek ya da mevcut filtrelemede iyileştirme yaparak, akım harmoniklerinin bastırılması ve enerji kalitesinin artırılması gerekmektedir.

Akım ve gerilimde toplam harmonik bozulmalara bakıldığında; baskın harmoniklerin akımda %8 değerinde 5.harmonik ve %4 değerinde ise 7.harmonik olduğu görülmektedir. Zamanla akımdaki bozulmalardan dolayı 11,13,17,19,23 ve 25. harmonik değerleri; gerilimde ise 5,7,11,13,17,19,23 ve 25. harmonik değerleri zamanla değişkenlik gösterebileceği için ileride sorun oluşturabilir.

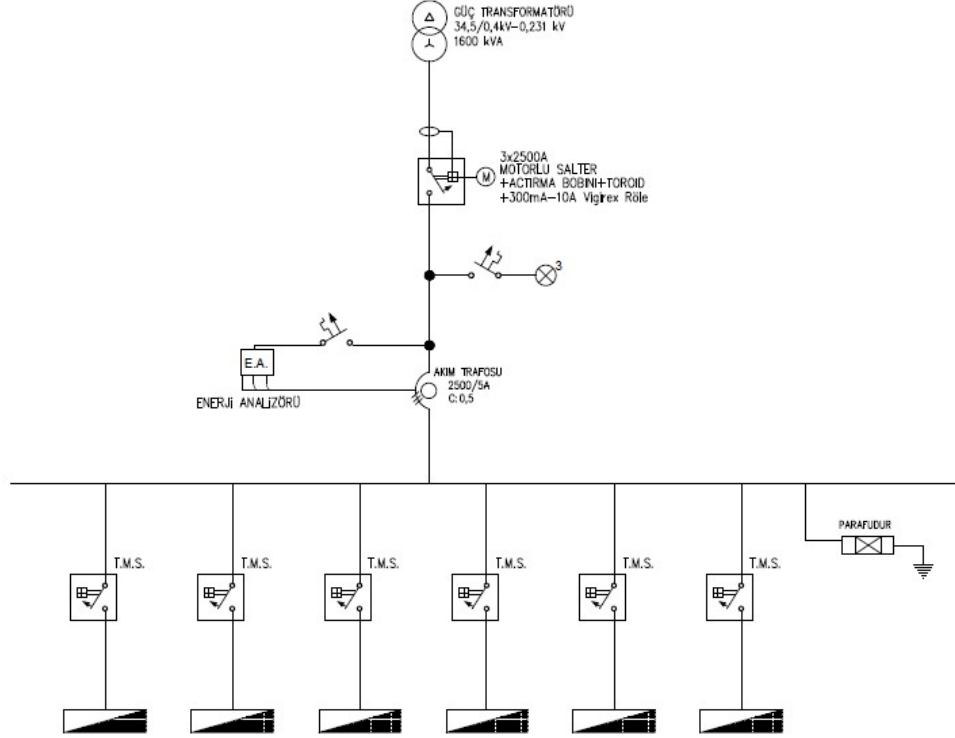
7.2.1.3.Baskı Fabrikası Ölçümü

Şekil 7.61.’de baskı fabrikasına ait tek hat şeması gösterilmiştir. Fabrikada 1600 kVA ve 1250 kVA güçlere sahip transformatörler kullanılmaktadır. Fabrika OG’dan kendi trafolarından beslenmektedir. Bu fabrikanın ölçümü güç trafolarının AG barasından ve 3 fazdan (L_1 , L_2 , L_3) yapılmıştır. Ölçümler Chauvin Arnoux marka taşınabilir güç analizörü ile yapılmıştır. Sistemdeki mevcut kompanzasyon panelleri tasarlanırken, kontaktör anahtarlama seri reaktörlü pasif filtre uygulanmış ve filtreleme reaktörü (p) %5,67 oranı seçilmiştir.

Toplam harmonik bozulma değerinin yüksek olmasından dolayı oluşan sorunların; dağıtım şebekesinden mi yoksa tesis şebekesinden mi kaynaklandığı araştırılmış ve uygulanması gereken filtreleme türü hakkında bilgiler verilmiştir.

1.trafo ve 2.trafo farklı alanları beslediği için ölçüm değerleri ayrı ayrı incelenmiştir. 1.trafoya ait değerler grafik olarak, 2.trafoya ait değerler tablo ve grafik olarak

gösterilmiştir. Ölçüm süresi boyunca fabrika normal çalışır vaziyette ve kompanzasyon sistemi devrededir.

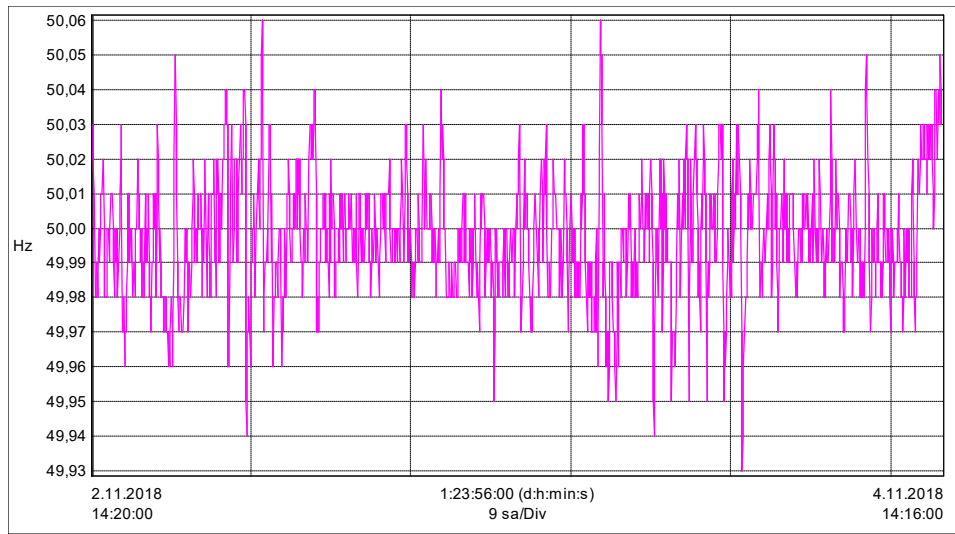


Şekil 7.60. Baskı fabrikası 1.trafoya ait tek hat şeması



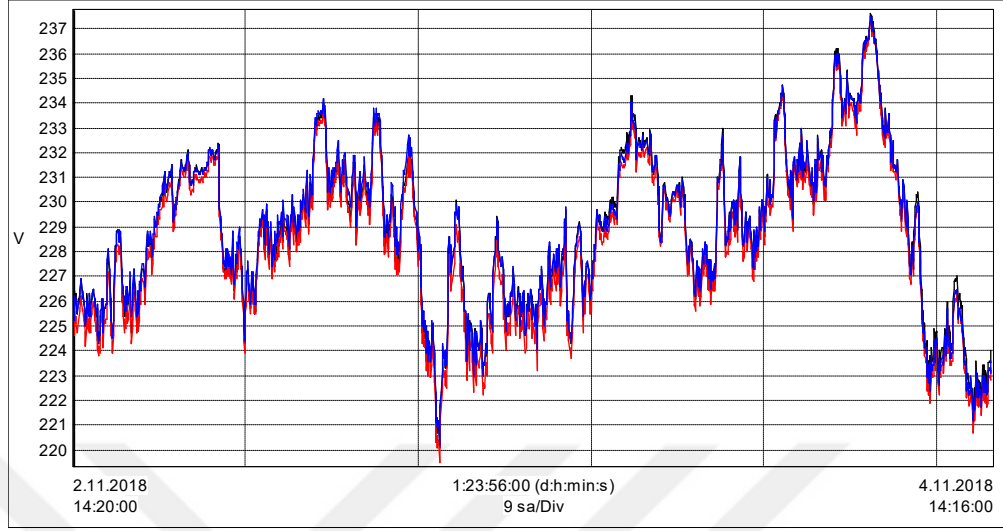
Şekil 7.61. Baskı fabrikasının kompanzasyon panosu görüntüsü

1.trafo A.G. ana dağıtım panosu barasından, saat 14.20 ile 14.16 arası, 2 dakikalık periyotlar halinde ve 1 gün 23 saat 56 dakika süreyle veriler toplanmıştır. Toplanan veriler grafikler olarak gösterilmiş ve değerlerinden bahsedilmiştir.



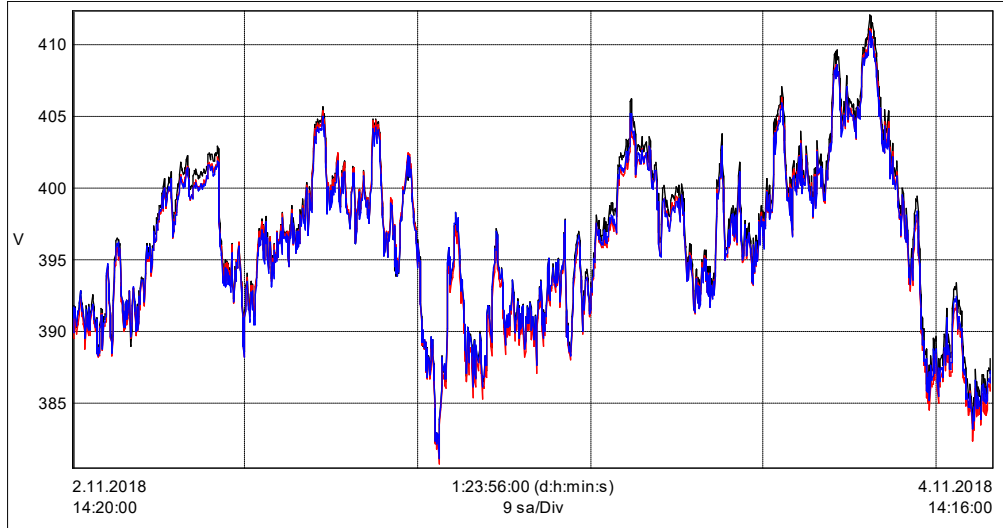
Şekil 7.62. Baskı fabrikası 1.trafoya ait frekans grafiği

Ölçümün süresi boyunca frekans değeri 49,93-50,06 Hz olarak ölçülmüştür.



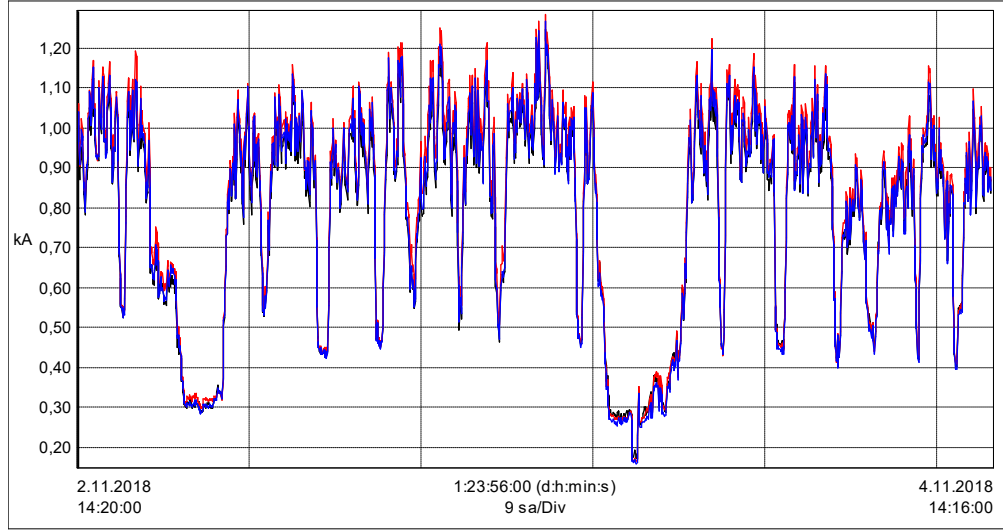
Şekil 7.63. Baskı fabrikası 1.trafoya ait faz-nötr gerilim grafiği

Ölçüm süresi boyunca tespit edilen faz-nötr gerilim 219,5-238 V mertebelerindedir.



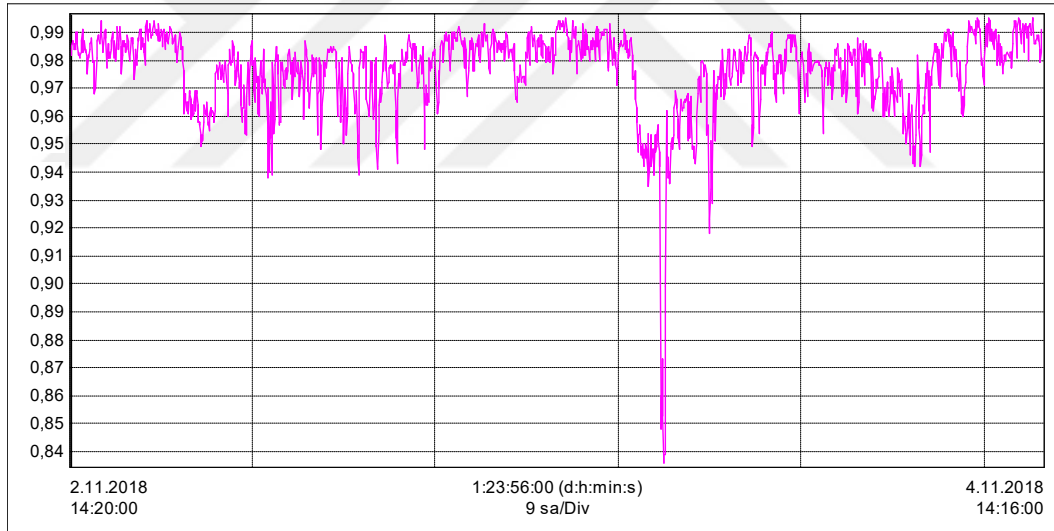
Şekil 7.64. Baskı fabrikası 1.trafoya ait faz-faz gerilim grafiği

Ölçüm süresi boyunca tespit edilen faz-faz gerilim 380,8-412 V mertebelerindedir.



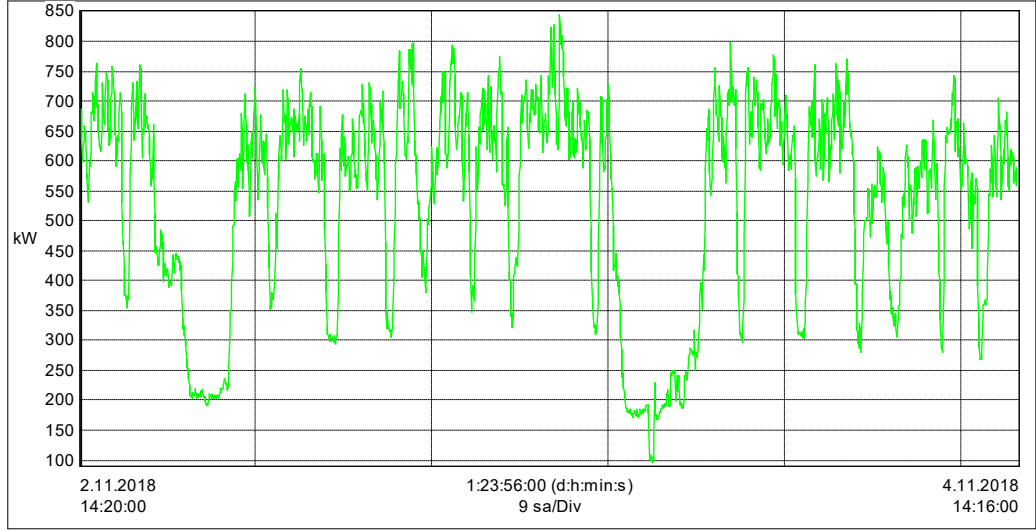
Şekil 7.65. Baskı fabrikası 1.trafoya ait akım grafiği

Ölçüm süresi boyunca yük akımları 160-1282 A olarak ölçülmüştür.



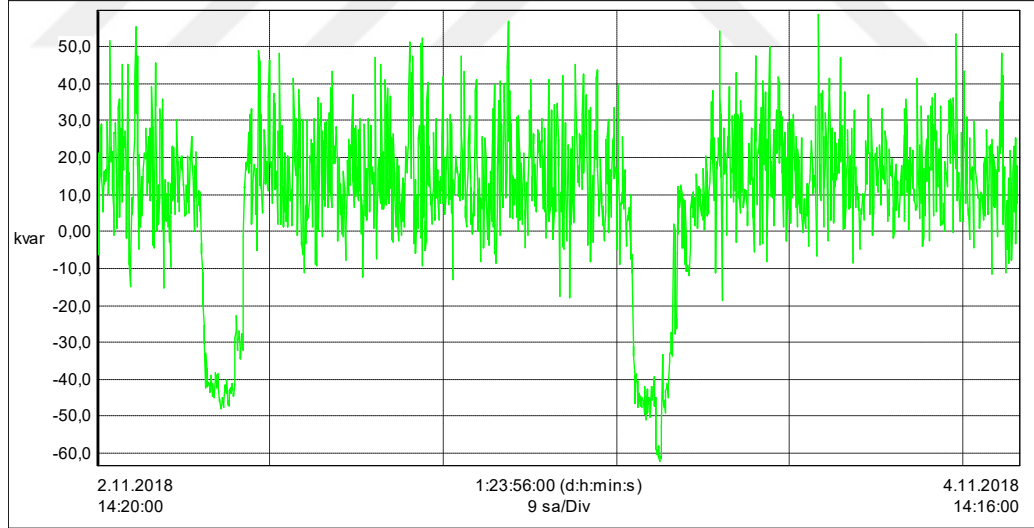
Şekil 7.66. Baskı fabrikası 1.trafoya ait ortalama güç faktörü grafiği

Ölçüm süresi boyunca ortalama güç faktörü değeri 0,836-0,995 arası ölçülmüştür.



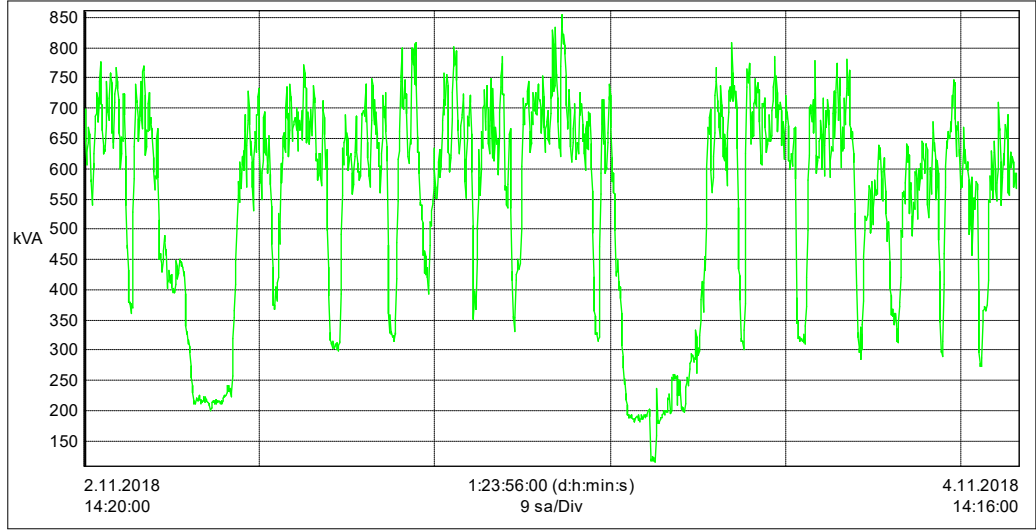
Şekil 7.67. Baskı fabrikası 1.trafoya ait toplam aktif güç grafiği

Ölçüm süresi boyunca toplam aktif güç değeri 97,12-843,7 kW arası ölçülmüştür.



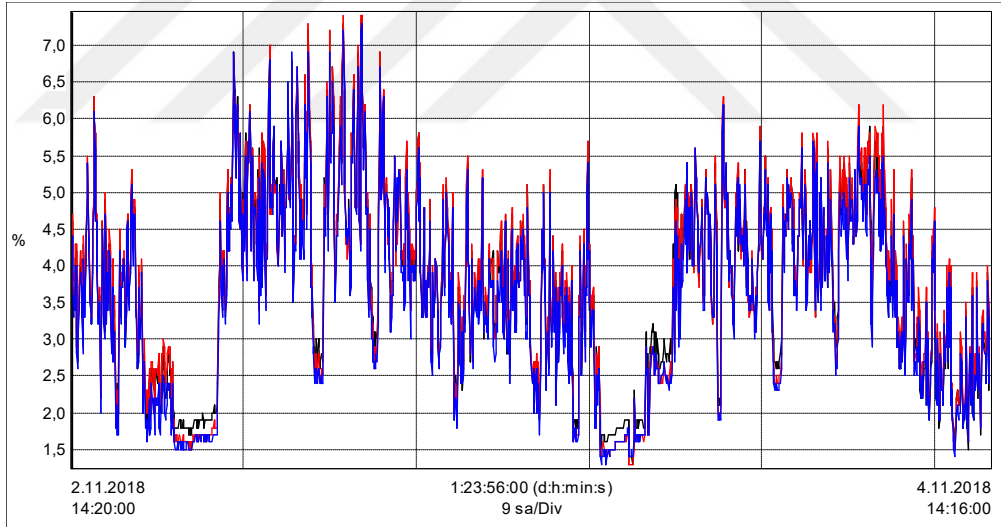
Şekil 7.68. Baskı fabrikası 1.trafoya ait toplam reaktif güç grafiği

Ölçüm süresi boyunca toplam reaktif güç değeri -62,14-58,55 kVAR arası ölçülmüştür.



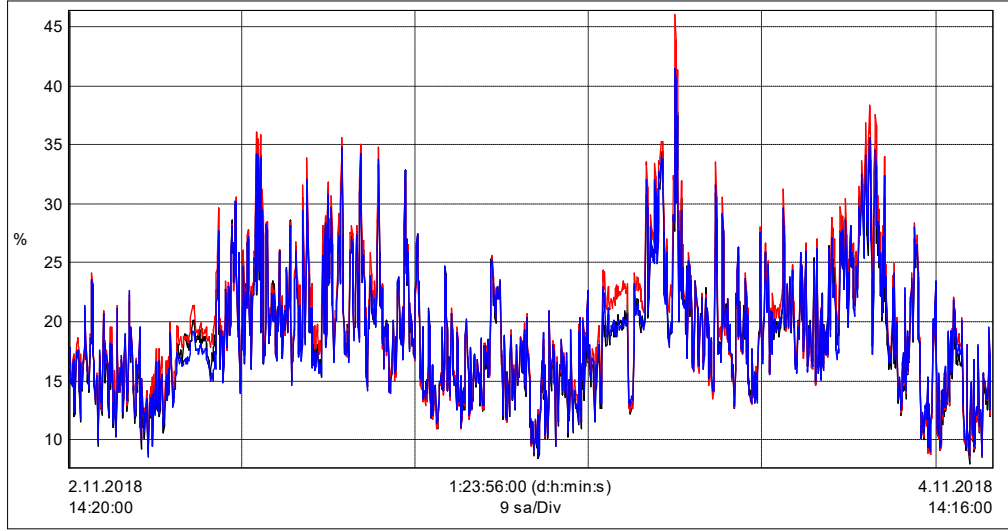
     7.69. Baskı fabrikası 1.trafoya ait toplam görünür güç grafiği

    m süresi boyunca toplam görünür güç değeri 115,7-853,9 kVA arası     lm   t r.



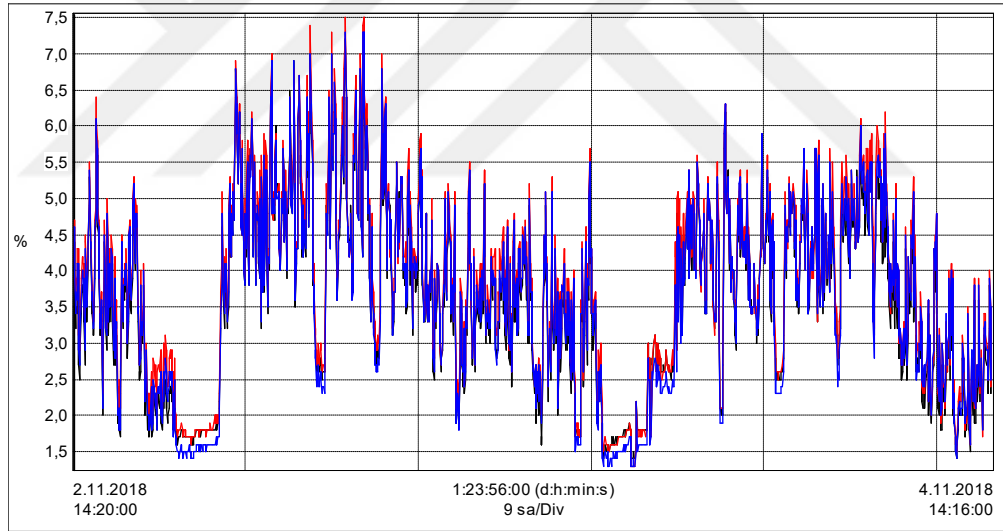
     7.70. Baskı fabrikası 1.trafoya ait toplam faz-faz gerilim harmonik bozulma oranı (THD ) grafiği

Toplam faz-faz gerilim harmonik bozulma oranı (THD ) %1,3-%7,4 seviyelerinde g    nm   t r.



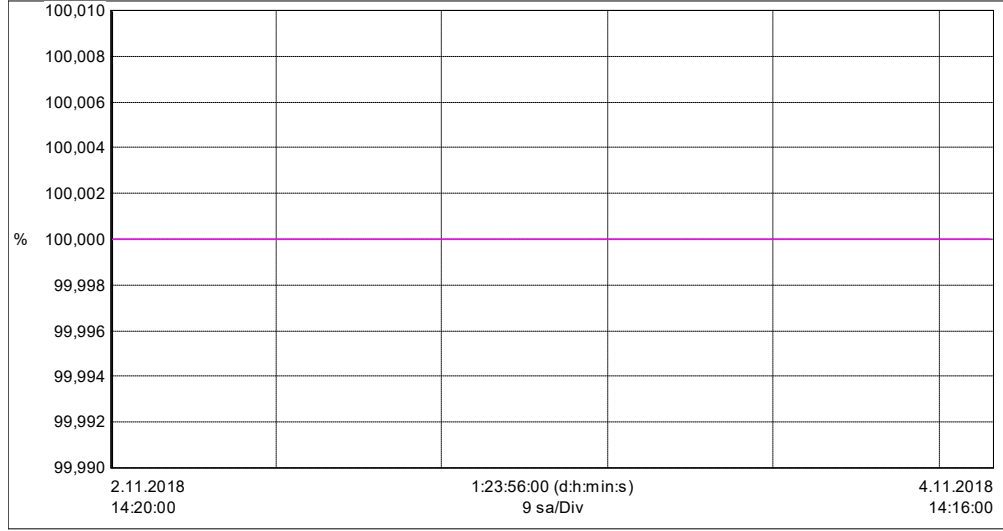
Şekil 7.71. Baskı fabrikası 1.trafoya ait toplam akım harmonik bozulma oranı (THD_i) grafiği

Toplam akım harmonik bozulma oranı (THD_i) %8-%46 seviyelerinde gözlenmiştir.



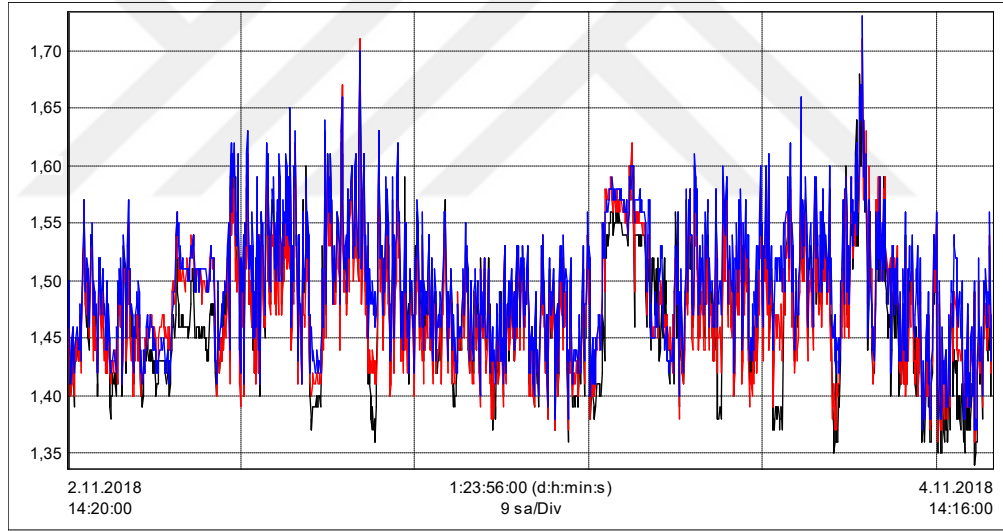
Şekil 7.72. Baskı fabrikası 1.trafoya ait toplam faz-nötr gerilim harmonik bozulma oranı (THD_v) grafiği

Toplam faz-nötr gerilim harmonik bozulma oranı (THD_v) %1,3-%7,5 seviyelerinde gözlenmiştir.



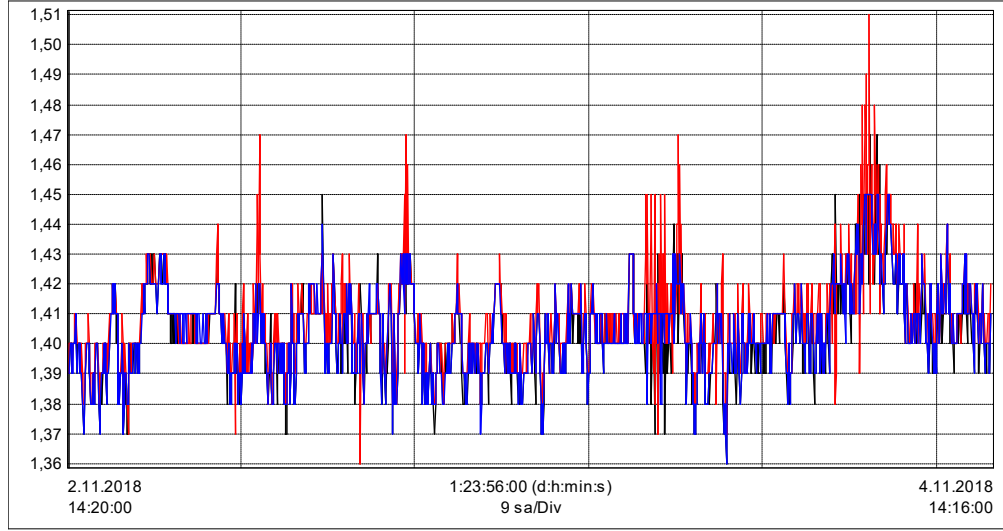
Şekil 7.73. Baskı fabrikası 1.trafoya ait akım dengesizliği

Akım dengesizliği (A_{unb}) %100 olarak ölçülmüştür.



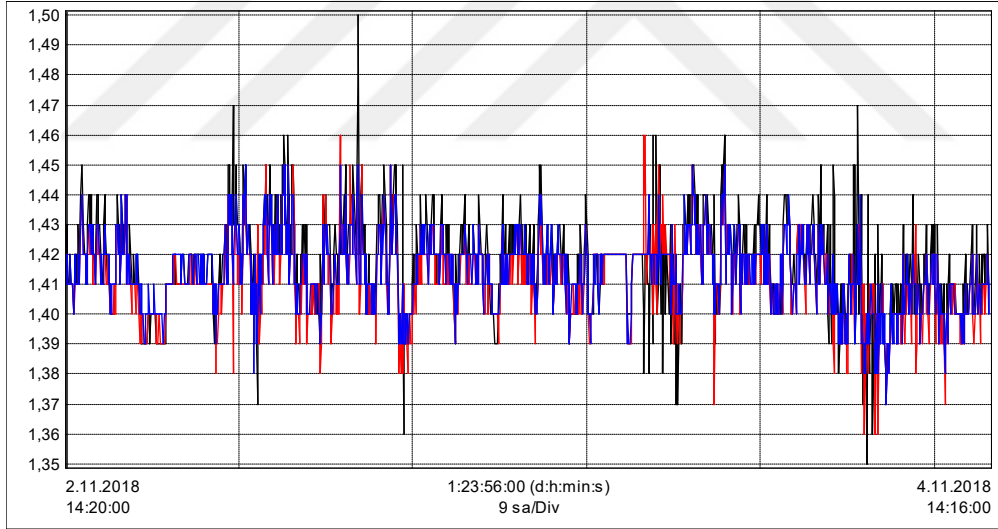
Şekil 7.74. Baskı fabrikası 1.trafoya ait akım crest faktörü grafiği

Ölçüm süresi boyunca yük akımı crest faktör oranları 1,34-1,73 seviyelerinde gözlenmiştir.



Şekil 7.75. Baskı fabrikası 1.trafoya ait faz-faz gerilim crest faktörü grafiği

Ölçüm süresi boyunca faz-faz gerilim crest faktör oranları 1,36-1,51 seviyelerinde gözlenmiştir.



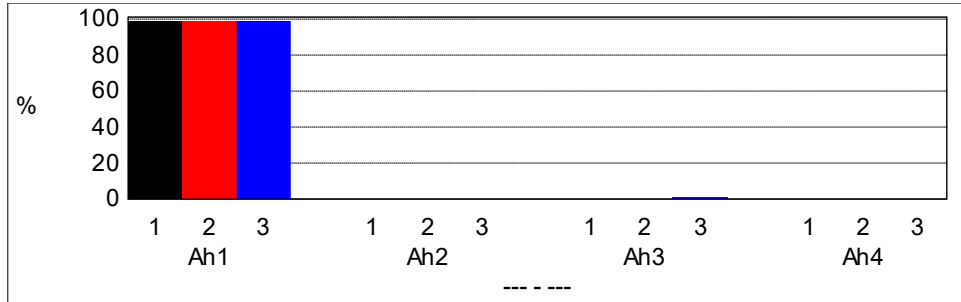
Şekil 7.76. Baskı fabrikası 1.trafoya ait faz-nötr gerilim crest faktörü grafiği

Ölçüm süresi boyunca faz-nötr gerilim crest faktör oranları 1,35-1,5 seviyelerinde gözlenmiştir.

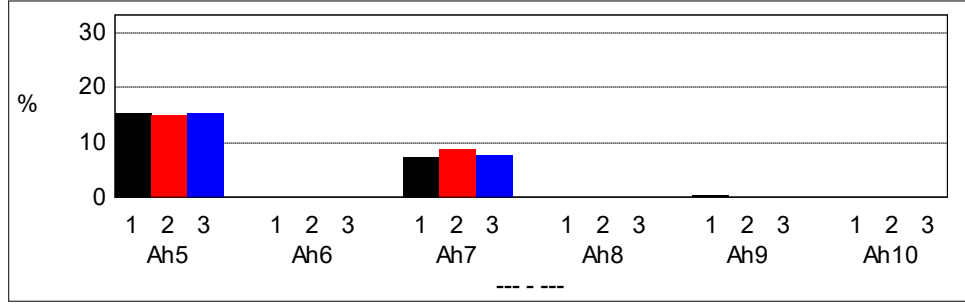
Tablo 7.3. Baskı fabrikası 1.trafoya ait DPF, PF ve Tanjant değerleri

İsim	Tarih	Zaman	Ort.	Min.	Max.	Birimler	Süre(h:min:s)
DPF Ortalama	2.11.2018	14:20:00	0,995	0,844	0,999		1:23:58:00
DPF1	2.11.2018	14:20:00	0,996	0,864	0,999		1:23:58:00
DPF2	2.11.2018	14:20:00	0,995	0,801	0,999		1:23:58:00
DPF3	2.11.2018	14:20:00	0,996	0,852	0,999		1:23:58:00
PF Ortalama	2.11.2018	14:20:00	0,976	0,836	0,995		1:23:58:00
PF1	2.11.2018	14:20:00	0,977	0,856	0,996		1:23:58:00
PF2	2.11.2018	14:20:00	0,974	0,795	0,995		1:23:58:00
PF3	2.11.2018	14:20:00	0,977	0,843	0,995		1:23:58:00
Tan Ortalama	2.11.2018	14:20:00	0,047	0,001	0,634	%	1:23:58:00
Tan1	2.11.2018	14:20:00	0,015	-0,581	0,106	%	1:23:58:00
Tan2	2.11.2018	14:20:00	-0,005	-0,745	0,081	%	1:23:58:00
Tan3	2.11.2018	14:20:00	-0,003	-0,613	0,081	%	1:23:58:00

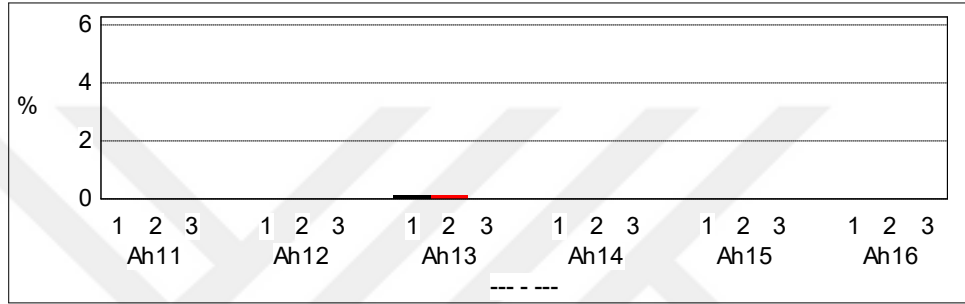
Ölçümde güç faktörü (PF) değeri ortalama 0,976 iken kayma faktörü (DPF) değerinin ortalaması 0,995 olduğu görülmektedir. Sistemde bulunan kompanzasyon panosundaki reaktif güç kontrol rölesinin $\cos\phi$ değeri 1'e ayarlı olmasına rağmen ölçümde görülen $\cos\phi$ değerine karşılık gelen DPF değerinin 0,995 geridir. Bunun nedeni, sistemde sabit olan reaktif güç kontrol rölesi ve ölçüm yapılan taşınabilir ölçü aletinin hassasiyetlerinin farklı olmasından kaynaklanabilir.



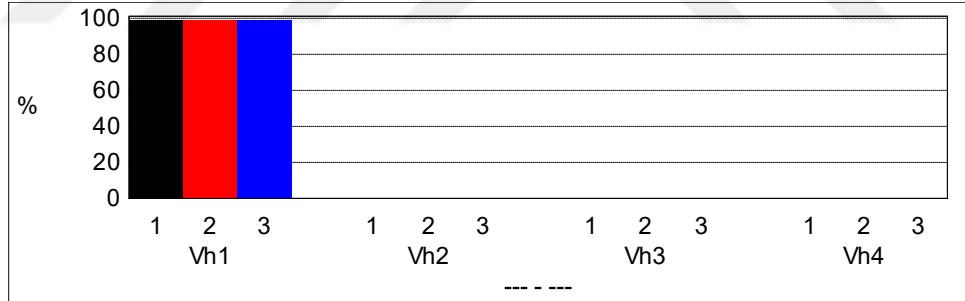
Şekil 7.77. Baskı fabrikası 1.trafoya ait akım spektrumu (2.harmonik-4.harmonik arası)



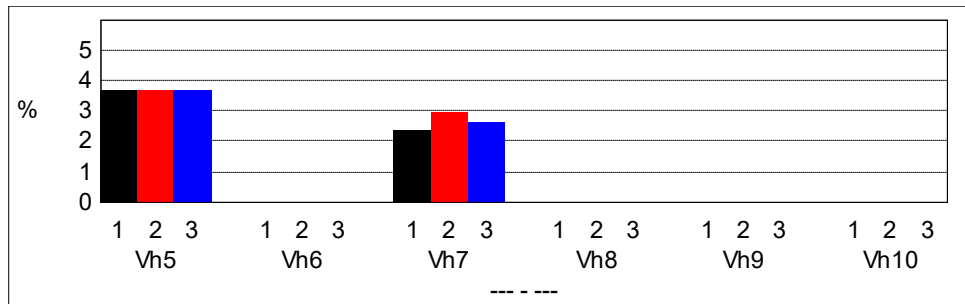
Şekil 7.78. Baskı fabrikası 1.trafoya ait akım spektrumu (5.harmonik-10.harmonik arası)



Şekil 7.79. Baskı fabrikası 1.trafoya ait akım spektrumu (11.harmonik-16.harmonik arası)



Şekil 7.80. Baskı fabrikası 1.trafoya ait gerilim spektrumu (2.harmonik-4.harmonik arası)



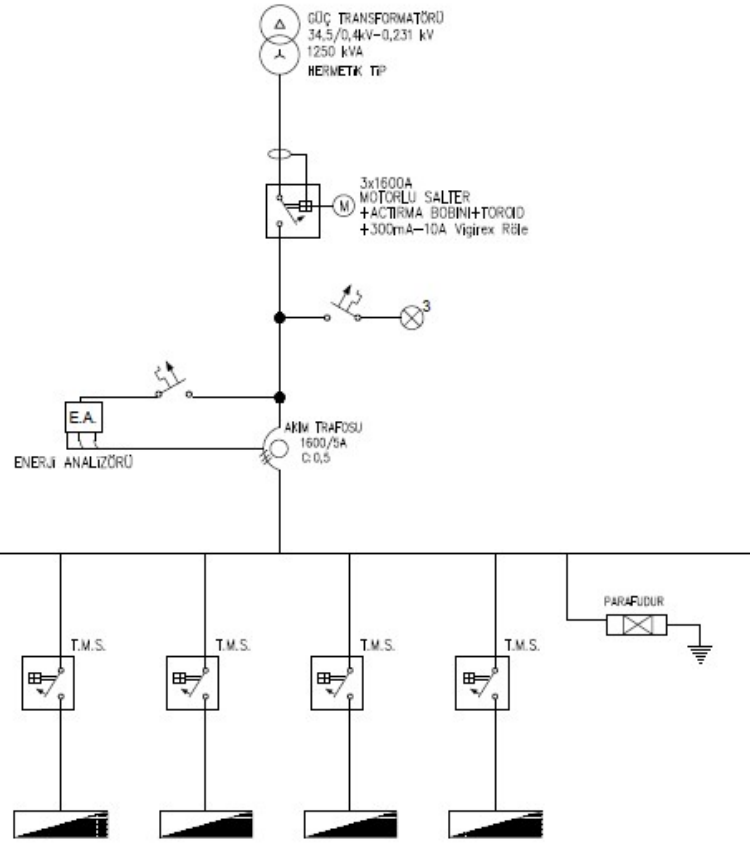
Şekil 7.81. Baskı fabrikası 1.trafoya ait gerilim spektrumu (5.harmonik-10.harmonik arası)

Şekil 7.77 ile Şekil 7.81 arası fazlarda bulunan harmoniklerin dereceleri ve yüzde olarak oranları gösterilmektedir.

Şekil 7.70, Şekil 7.71 ve Şekil 7.72’de akım ve gerilimin toplam harmonik bozulmaları görülmektedir. Bozulma değerlerine bakıldığında, gerilim harmoniğinin (THD_U) maksimum %7,4 seviyelerinde gözlenmiştir. Akım harmoniği incelendiğinde ise (THD_I) maksimum %46 seviyelerindedir. Bu gerilim ve akım değeri incelendiğinde EPDK’nın belirlediği sınır değerinin üstünde olduğu görülmektedir. Bu fabrikada meydana gelen arızaların çoğu harmoniklerden kaynaklandığı görülmektedir. Uygun filtreleme seçilerek ya da mevcut filtrelemede iyileştirme yaparak, akım harmoniklerinin bastırılması ve enerji kalitesinin artırılması gerekmektedir.

Akım ve gerilimde toplam harmonik bozulmalara bakıldığında; baskın harmoniklerin akımda %15 civarında 5.harmonik ve %9 civarında ise 7.harmonik olduğu görülmektedir. Zamanla akımdaki bozulmalardan dolayı 3,9 ve 13. harmonik değerleri; gerilimde ise 5 ve 7. harmonik değerleri zamanla değişkenlik gösterebileceği için ileride sorun oluşturabilir değerdedir.

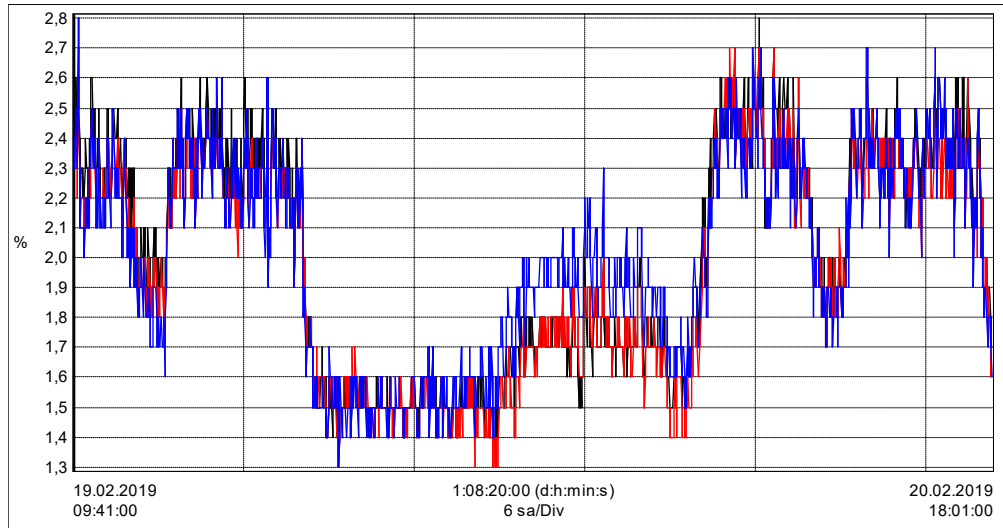
2.trafo A.G. ana dağıtım panosu barasından, saat 09.41 ile 18.01 arası, 1 dakikalık periyotlar halinde ve 1 gün 8 saat 20 dakika süreyle veriler toplanmıştır. Toplanan veriler tablo ve grafik olarak gösterilmiş ve değerleri verilmiştir.



Şekil 7.82. Baskı fabrikası 2.trafoya ait tek hat şeması

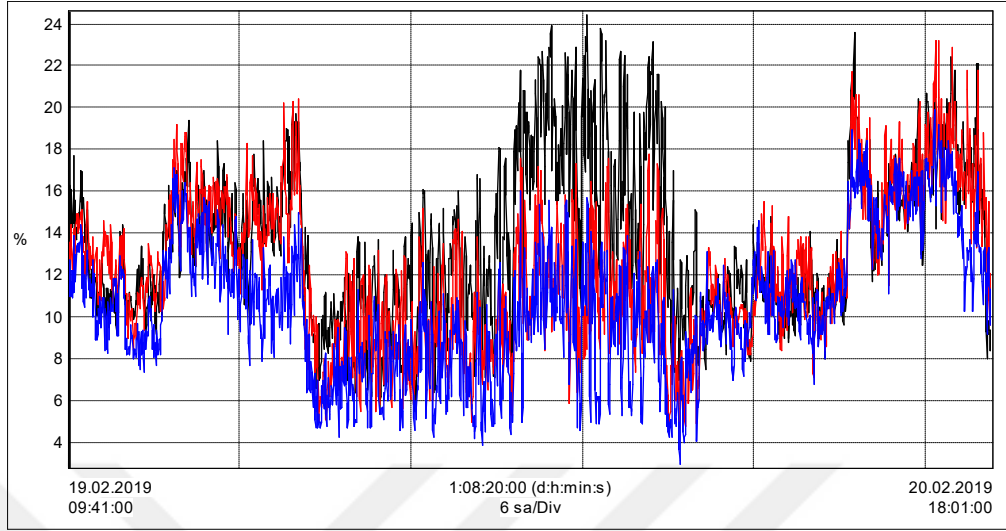
Tablo 7.4. Baskı fabrikası 2.trafoya ait grafik değerleri

		min	max
Frekans	Hz	49,95	50,02
Gerilim (P-P)	U_{RMS}	380,0	411,0
Gerilim (P-N)	V_{RMS}	218,8	231,0
Akım	A_{RMS}	213	1214
Ortalama Güç Faktörü	$\cos\phi$	0,645	0,890
Aktif Güç	kW	110	812
Reaktif Güç	kVAR	-18,93	55,76
Görünür Güç	kVA	296,8	712,1
Toplam faz-faz Gerilim Harmonik Bozulma Oranı (THD _U)	%	1,3	2,8
Toplam Akım Harmonik Bozulma Oranı (THD _I)	%	3,0	24,4
Toplam faz-faz Gerilim Harmonik Bozulma Oranı (THD _V)	%	1,3	2,9
Akım Dengesizliği	A_{unb}	100	100
Akım Crest Faktörü	CF_A	1,39	1,63
P-P Crest Faktörü	CF_U	1,35	1,41
P-N Crest Faktörü	CF_V	1,34	1,42



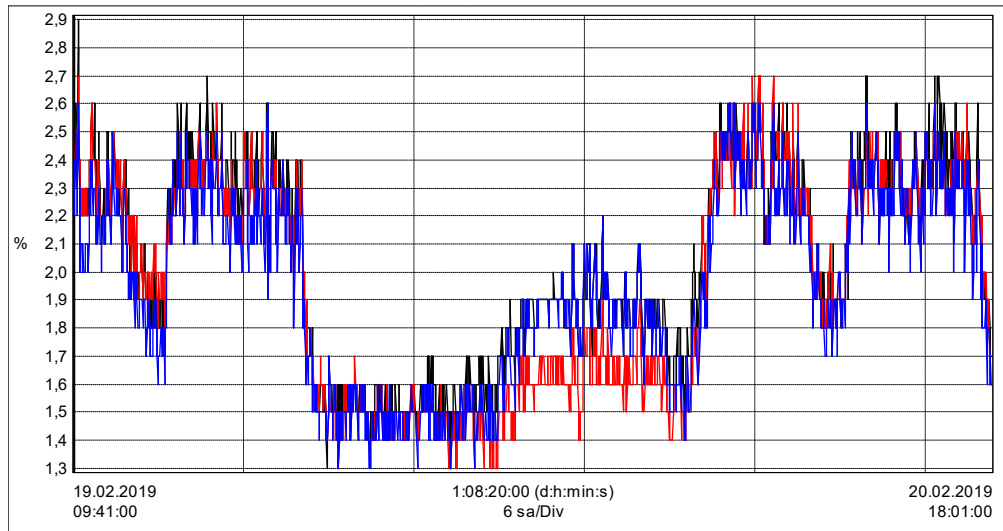
Şekil 7.83. Baskı fabrikası 2.trafoya ait toplam faz-faz gerilim harmonik bozulma oranı (THD_U) grafiği

Toplam faz-faz gerilim harmonik bozulma oranı (THD_U) %1,3-%2,8 seviyelerinde gözlenmiştir.



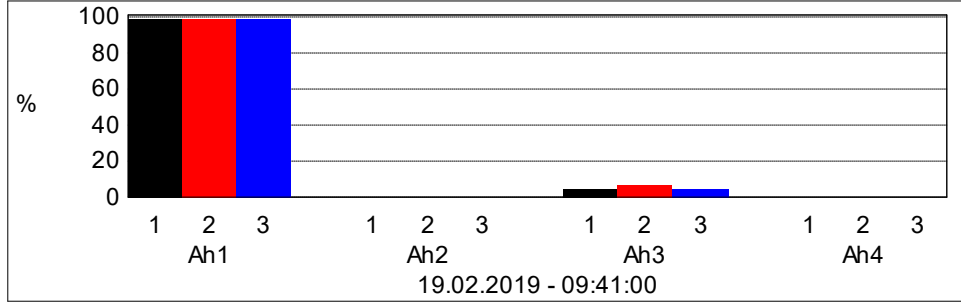
Şekil 7.84. Baskı fabrikası 2.trafoya ait toplam akım harmonik bozulma oranı (THD_I) grafiği

Toplam akım harmonik bozulma oranı (THD_I) %3-%24,4 seviyelerinde gözlenmiştir.

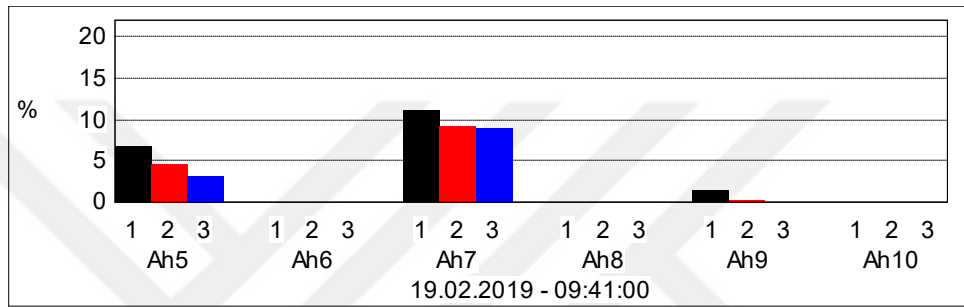


Şekil 7.85. Baskı fabrikası 2.trafoya ait toplam faz-nötr gerilim harmonik bozulma oranı (THD_V) grafiği

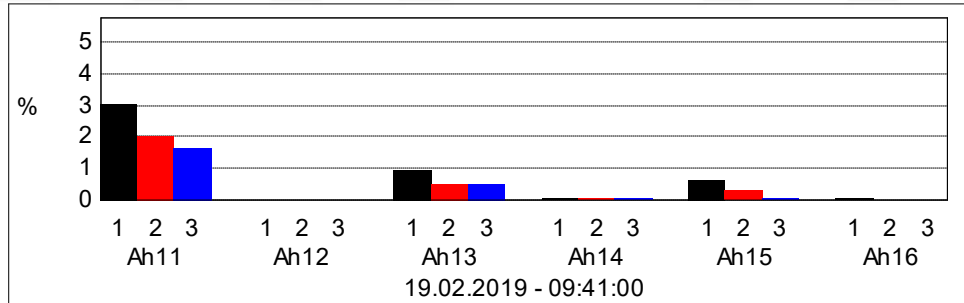
Toplam faz-nötr gerilim harmonik bozulma oranı (THD_V) %1,3-%2,9 seviyelerinde gözlenmiştir.



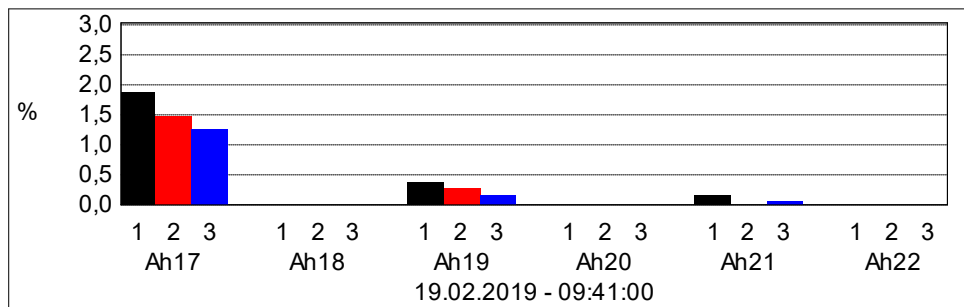
Şekil 7.86. Baskı fabrikası 2.trafoya ait akım spektrumu (2.harmonik-4.harmonik arası)



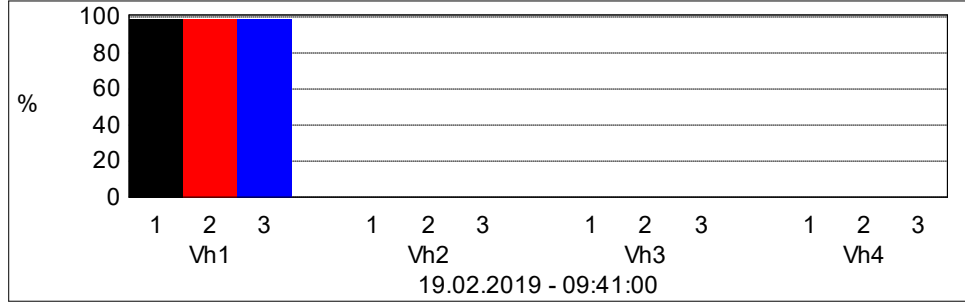
Şekil 7.87. Baskı fabrikası 2.trafoya ait akım spektrumu (5.harmonik-10.harmonik arası)



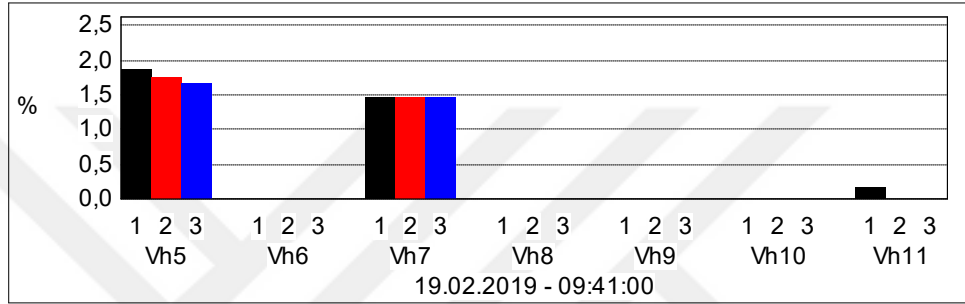
Şekil 7.88. Baskı fabrikası 2.trafoya ait akım spektrumu (11.harmonik-16.harmonik arası)



Şekil 7.89. Baskı fabrikası 2.trafoya ait akım spektrumu (17.harmonik-22.harmonik arası)



Şekil 7.90. Baskı fabrikası 2.trafoya ait gerilim spektrumu (2.harmonik-4.harmonik arası)



Şekil 7.91. Baskı fabrikası 2.trafoya ait gerilim spektrumu (5.harmonik-11.harmonik arası)

Şekil 7.86 ile Şekil 7.91 arası fazlarda bulunan harmoniklerin dereceleri ve yüzde olarak oranları gösterilmektedir.

Şekil 7.83, Şekil 7.84 ve Şekil 7.85’de akım ve gerilimin toplam harmonik bozulmaları görülmektedir. Bozulma değerlerine bakıldığında, gerilim harmoniğinin (THD_U) maksimum %2,8 seviyelerinde gözlenmiştir. Bu değer EPDK’nın belirlemiş olduğu sınır değerinin altında bir değerdir. Akım harmoniği incelendiğinde ise (THD_I) maksimum %24,4 seviyelerindedir. Bu değer EPDK’nın belirlediği sınır değerinin üstünde olduğu görülmektedir. Bu fabrikada meydana gelen arızaların çoğu harmoniklerden kaynaklandığı görülmektedir. Uygun filtreleme seçilerek ya da mevcut filtrelemede iyileştirme yaparak, akım harmoniklerinin bastırılması ve enerji kalitesinin artırılması gerekmektedir.

Akım ve gerilimde toplam harmonik bozulmalara bakıldığında; baskın harmoniklerin akımda %11 değerinde 7.harmonik ve %7 değerinde ise 5.harmonik olduğu görülmektedir. Zamanla akımdaki bozulmalardan dolayı 3,9,11,13,14,15 ve 16. harmonik değerleri; gerilimde ise 5,7 ve 11. harmonik değerleri zamanla değişkenlik gösterebileceği için ileride sorun oluşturabilir.

7.3.Pasif Filtre Tasarımı

Bir filtre tasarımı yapılacağı zaman; akım eğrileri, toplam harmonik bozulma değerleri, sistemdeki reaktif güç, sisteme etki eden kaynakların etkileri gibi kriterlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Tasarlanacak olan filtre, aktif veya pasif filtre olabilir. Aktif filtrenin şebekeye uyumu pasif filtreden çok daha iyidir. Ölçümleri incelenen ve filtrelenecek istenen baskı fabrikasında beş ve yedinci harmonikler etkili olduğundan dolayı kullanışlılık, yük çeşidinin çok fazla değişmemesinden ve maliyet gibi etkenlerden dolayı tek ayarlı pasif harmonik filtre uygulanması tercih edilmiştir.

Şekil 5.5'te belirtmiş olduğum tek ayarlı filtre devresinde ve aşağıda belirtmiş olduğum denklem 7.1 yardımıyla hesaplamak mümkündür.

Tek ayarlı filtre için ω açısal frekansındaki empedans Z_f

$$Z_f = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (7.1)$$

Filtre uygulanacak f_r rezonans anındaki frekans değeri aşağıdaki denklem 7.2 ile L endüktans ve C kapasite değerleri hesaplanarak bulunur.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7.2)$$

İstenen harmonik değeri sırası n olmak üzere X_{Ln} endüktif reaktansa ve X_{cn} kapasitif reaktansa olmak üzere;

$$X_{Ln} = n\omega L \quad (7.3)$$

$$X_{cn} = \frac{1}{n\omega C} \quad (7.4)$$

Rezonans anında ise;

$$X_{Ln} = X_{cn} \quad (7.5)$$

Denklem 7.2'de sanal kısım sıfıra eşit olacağından direnç değeri R, denklem 7.5.'te de görüleceği gibi empedansa eşit olacaktır.

Q_c kondansatör kapasitesi olmak üzere;

$$Q_c = \omega C V^2 \quad (7.6)$$

k paralel filtre kol sayısı olmak üzere;

$$C_r = \frac{C}{k} \quad (7.7)$$

X_{cn} kalite faktörü olmak üzere;

$$X_{cn} = \frac{\sqrt{L}}{R} = \frac{X_{Lr}}{R} = \frac{X_{Cr}}{R} \quad (7.8)$$

Denklem 7.2.'deki rezonans frekansı, L endüktans ve L_s kaynak öz endüktans değeri olmak üzere;

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(L_s + L)C}} \quad (7.9)$$

S görünür güç olmak üzere;

$$S = \frac{P}{\cos\phi} \quad (7.10)$$

Q reaktif güç olmak üzere;

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (7.11)$$

Yukarıdaki denklemler sayesinde bilinmesi gereken değerler bulunarak, sistemin kondansatör gücü aşağıdaki denklem 7.12 ile hesaplanabilir.

$$C_t = \frac{Q}{2\pi (V_{bara})^2} \quad (7.12)$$

Bobin direnç değeri;

$$X_{rn} = \frac{1}{n\omega C} = \frac{1}{n2\pi f C} \quad (7.13)$$

Her bir harmonik değeri için bobin direnci ayrı ayrı hesaplanır.

Yukarıda verilen denklemler sayesinde tasarlanacak filtreye dair uygun değerler bulunur.

Baskı fabrikasının 1.transformatörüne baktığımızda 5.harmonik etkilidir. Bu harmoniği gidermek için 210 Hz rezonans frekansında harmonik filtre kullanılacaktır. 5.harmoniğin frekansı $5 \times 50 \text{ Hz} = 250 \text{ Hz}$ 'dir. Bu frekans değerinde, paralel rezonans oluşması durumunda toplam empedans artacaktır. Harmoniklerin etkilerini azaltmak için rezonans frekansı, harmonik filtre ile 210 Hz'e indirilecektir. Böylece 5.harmoniğin oluşturduğu 250 Hz'lik frekans empedans değeri düşürülmüş olacaktır.

Tesiste bulunan reaktif güç kompanzasyonundaki şalt ürünlerinin yanlış seçilmesi, ürün kalitesi, reaktöre uygun kondansatör seçilmemesi gibi nedenlerden dolayı çıkan problemlerin çözümü için uygun pasif harmonik filtreli kompanzasyon panosu tasarlanacaktır.

Tesiste ihtiyaç olan kompanzasyon gücü maksimum 900 kVAR'dır. 12 kademe olarak düşünülerek kademeler;

$(25+25+50+50+50+100+100+100+100+100+100+100)$ kVAR olarak sıralanabilir.

Sistemde harmoniklerden dolayı kondansatörlerin üzerindeki gerilim artar ve bunun sonucunda kondansatörlerin kapasitelerini düşürür. Kapasite düşümünü azaltmak için seçilecek kondansatör gerilimi daha yüksek olmalıdır.

Seçilmesi gereken gerilime uygun kondansatör denklemi;

$$U_c = \frac{U}{1-p} \quad (7.14)$$

Seçilen harmonik filtre reaktörünün rezonans frekansı (p) %5,67 seçildiğine göre ve nominal gerilimimiz 400 V olduğuna göre uygun kondansatör gerilimi minimum $U_c = 424$ V olmalıdır.

Kondansatör gücünün değişim denklemi; Q_0 kondansatör gücü, U_n şebeke gerilimi, U_c kondansatör gerilimi ve Q_r anma reaktif güç olmak üzere;

$$Q_0 = \left(\frac{U_n}{U_c}\right)^2 Q_r \quad (7.15)$$

Buna göre seçilen birinci kademe 12,5 kVAR kondansatör değeri 400V seçilirse, gerilim artışından dolayı 10,32 kVAR seviyelerine inecektir. Bunu engellemek için 440 V değerinde kondansatör seçilmelidir.

Pasif harmonik filtrenin rezonans frekansı denklemi;

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7.16)$$

Bu rezonans frekansında pasif harmonik filtre için uygun olan reaktör ve kondansatör değerleri belirlenir.

Kapazitif direnç hesaplama denklemi;

$$X_C = \frac{U^2}{Q} \quad (7.17)$$

Endüktif direnç hesaplama denklemi;

$$p = \frac{X_L}{X_C} \quad (7.18)$$

Pasif harmonik filtrenin endüktans denklemi;

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (7.19)$$

Pasif harmonik filtrenin kapasitans değeri denklemi;

$$C = \frac{1}{X_C 2\pi f} \quad (7.20)$$

Yukarıda verilen denklemlere göre;

Seçilen filtre kademeleri; rezonans frekansı 210 Hz, filtreleme faktörü %5,67 ve kullanılacak kondansatör gerilimleri 440 V olarak seçilmiştir.

25 kVAR filtre kademesi için, denklem 7.17 kullanılarak kapasitif direnç $X_c = 15,48 \Omega$ olacaktır. Denklem 7.20 kullanılarak filtre kapasitansı $C = 411 \mu F$ olarak hesaplanır. Denklem 7.18 ve denklem 7.19 kullanılarak $L = 1,39$ mH olarak hesaplanır. 25 kVAR

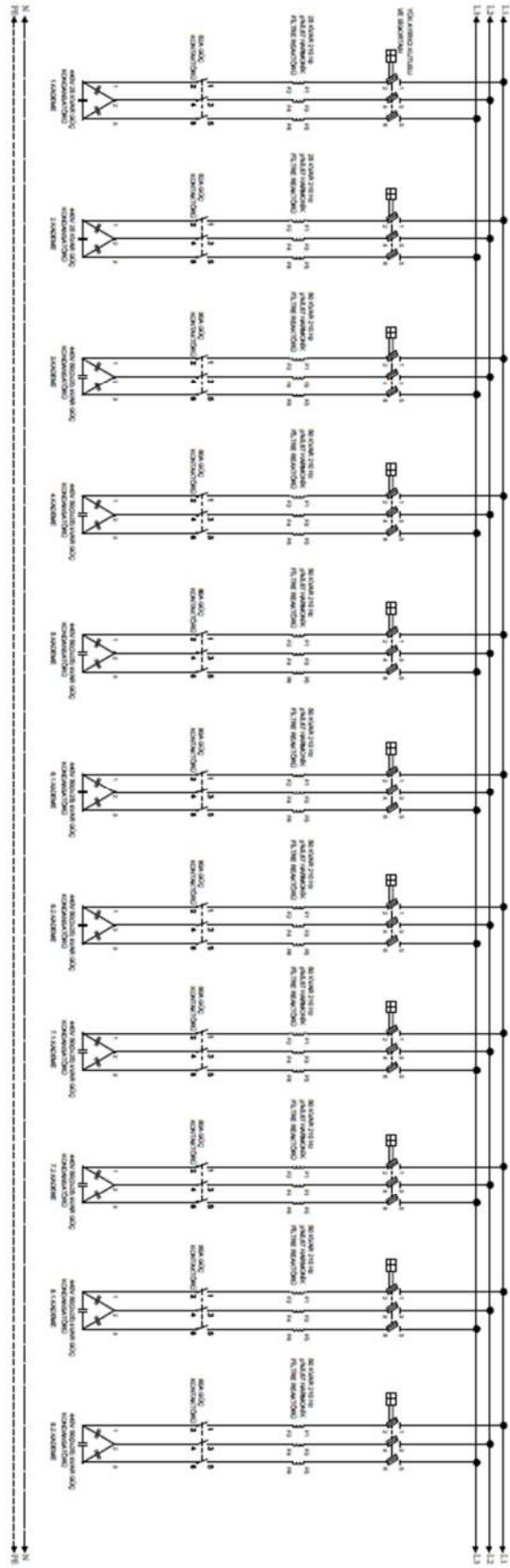
reaktöre, $C=411 \mu\text{F}$ kapasitanslı, 25 kVAR ve gerilimi 440 V geriliminde kondansatör kullanılmalıdır.

50 kVAR filtre kademesi için ise uygun denklemler kullanılarak $C=821 \mu\text{F}$ ve $L=0,7 \text{ mH}$ olarak hesaplanmıştır. 50 kVAR reaktöre, $C=2 \times (411 \mu\text{F})$ kapasitanslı, 2x25 kVAR ve gerilimi 440 V geriliminde kondansatör kullanılmalıdır.

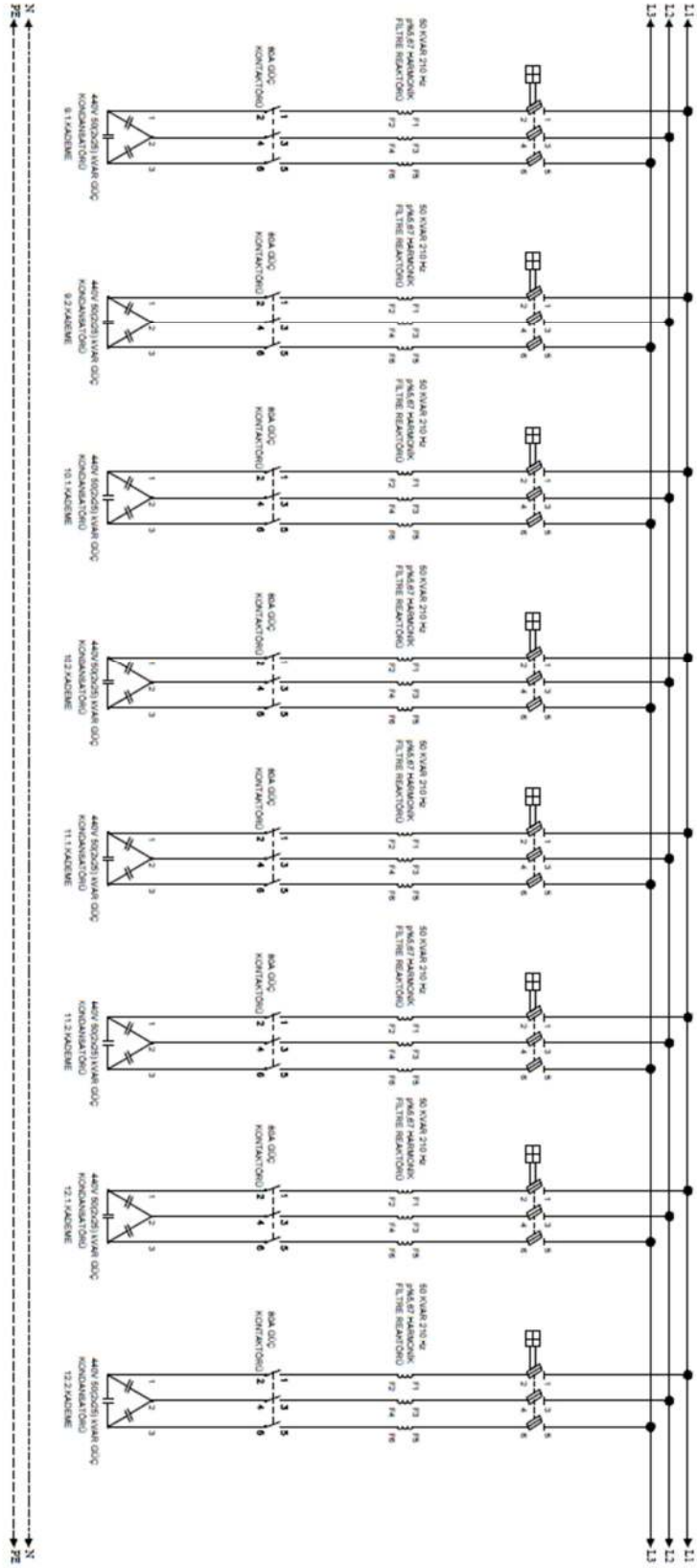
100 kVAR filtre kademesi için ise uygun denklemler kullanılarak $C=1643 \mu\text{F}$ ve $L=0,35 \text{ mH}$ olarak hesaplanmıştır. 100 kVAR reaktöre (2x50 kVAR), $C=4 \times (411 \mu\text{F})$ kapasitanslı, 4x25 kVAR ve gerilimi 440 V geriliminde kondansatör kullanılmalıdır.

Şekil 7.92 ve şekil 7.93'te yukarı değerleri verilen ve uygulanması gereken harmonik filtreli kompanzasyon panosunun üç hat şeması verilmiştir.





Şekil 7.92. Tasarıma uygun harmonik filtreli kompanzasyon panosu üç hat gösterimi-1



Şekil 7.93. Tasarıma uygun harmonik filtreli kompanzasyon panosu üç hat gösterimi-2

Baskı fabrikasının 2.transformatörüne baktığımızda 7.harmonik etkilidir. Bu harmoniği gidermek için 189 Hz rezonans frekansında harmonik filtre kullanılacaktır. 7.harmoniğin frekansı $7 \times 50 \text{ Hz} = 350 \text{ Hz}$ 'dir. Bu frekans değerinde, paralel rezonans oluşması durumunda toplam empedans artacaktır. Harmoniklerin etkilerini azaltmak için rezonans frekansı, harmonik filtre ile 189 Hz'e indirilecektir. Böylece 7.harmoniğin oluşturduğu 350 Hz'lik frekans empedans değeri düşürülmüş olacaktır.

Tesiste ihtiyaç olan kompanzasyon gücü maksimum 700 kVAR'dır. 12 kademe olarak düşünülerek kademeler;

$(25+25+50+50+50+50+50+50+50+100+100+100)$ kVAR olarak sıralanabilir.

Sistemde harmoniklerden dolayı kondansatörlerin üzerindeki gerilim artar ve bunun sonucunda kondansatörlerin kapasitelerini düşürür. Kapasite düşümünü azaltmak için seçilecek kondansatör gerilimi daha yüksek olmalıdır.

Verilen denklemlere göre;

Seçilen filtre kademeleri; rezonans frekansı 189 Hz, filtreleme faktörü %7 ve kullanılacak kondansatör gerilimleri 440 V olarak seçilmiştir.

25 kVAR filtre kademesi için, denklem 7.17 kullanılarak kapasitif direnç X_c hesaplanmıştır. Denklem 7.20 kullanılarak filtre kapasitansı $C=411 \mu\text{F}$ olarak hesaplanır. Denklem 7.18 ve denklem 7.19 kullanılarak $L = 1,71 \text{ mH}$ olarak hesaplanır. 25 kVAR reaktöre, $C=411 \mu\text{F}$ kapasitanslı, 25 kVAR ve gerilimi 440 V geriliminde kondansatör kullanılmalıdır.

50 kVAR filtre kademesi için ise uygun denklemler kullanılarak $C=821 \mu\text{F}$ ve $L=0,86 \text{ mH}$ olarak hesaplanmıştır. 50 kVAR reaktöre, $C=2 \times (411 \mu\text{F})$ kapasitanslı, 2x25 kVAR ve gerilimi 440 V geriliminde kondansatör kullanılmalıdır.

100 kVAR filtre kademesi için ise uygun denklemler kullanılarak $C=1643 \mu\text{F}$ ve $L=0,43 \text{ mH}$ olarak hesaplanmıştır. 100 kVAR reaktöre (2x50 kVAR), $C=4 \times (411 \mu\text{F})$ kapasitanslı, 4x25 kVAR ve gerilimi 440 V geriliminde kondansatör kullanılmalıdır.

8.TARTIşMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, harmoniklerin dağıtım şebekelerindeki davranışlarının anlaşılabilmesi için, farklı bölgelerde ve farklı çalışma koşullarında bulunan fabrikaların kompanzasyon sistemlerinde ölçümler yapılmıştır. Yapılan lmler çeşitli zamanlarda ve srelerde yapılarak, elde edilen sonuçlar incelenerek harmonik akım değerlerinin IEEE standartlarına uygun olup olmadığı incelenmiştir. İncelenen değerlere göre harmonik bozucu etkilerin bilinmesi ve harmonik kaynaklarının bastırılması için filtre tasarımı yapılmıştır.

Harmonik artışını engellemek için oluşan paralel rezonans frekansı, harmonik frekansından uzaklaştırmak gerekmektedir. Bunu engellemek için seri reaktörlü pasif harmonik filtre uygulanmalıdır. Seri reaktörlü pasif harmonik filtre, oluşan paralel rezonans frekansı kendi frekans noktasına yaklaştırır. Bunun sonucunda da yüksek empedans oluşmaz ve gerilimlerde genlikler artmaz.

Pasif filtre seçilmesinin sebebi, aktif filtreye göre maliyeti daha uygun olması, kullanış açısından daha kolay olması, yk çeşidinin çok fazla değişmemesi ve en önemli etken mevcutta daha önce pasif filtreli sistem bulunmasından kaynaklanmasıdır.

İncelenen tesislerin kompanzasyon panellerinde görülen başlıca sorun, g kondansatörün seçilmesinde hatalar yapılmasıdır. Yanlış seçim sonucu harmoniklerin artmasıyla paralel rezonans oluşumuna neden olur. Paralel rezonans durumunda sistemin empedansı artar ve rezonans frekansı en yüksek değerine ulaşır. Bunun sonucunda da harmonik bozunum miktarı artmaktadır.

Tekirdağ ilinde bulunan tekstil fabrikasında 1600 kVA gücünde transformatör bulunmaktadır. Ölçümler transformatörün AG barasından yapılmış ve toplam harmonik bozulmaların standartların altında olduğu gözlenmiştir. Gerilim değerleri incelendiğinde, nominal değerlerde olduğu gözlenmiş ve gerilim çökmesi, notch vb. gerilim kaynaklı herhangi bir sorun gözlenmemiştir.

İstanbul ilinde bulunan plastik fabrikasında 1250 kVA gücünde transformatör bulunmaktadır. Ölçümler transformatörün AG barasından yapılmış ve toplam harmonik bozulmalara bakıldığında; gerilim değerinin standartların altında olduğu, akım değerinin ise standartların çok az üstünde olduğu gözlenmiştir. Sistemde rezonans olayları, kontrol sistemleri ve şalt malzemelerinde hatalı çalışma vb. gibi sorunlarla karşılaşılmadığı için göz ardı edilebilir. Ayrıca toplam harmonik bozulmaları standartların altına düşürmek için

kompanzasyon panelinde işlem yapılması sonucunda gereksiz maliyet yükü ortaya çıkaracaktır. Gerilim değerleri incelendiğinde ise, nominal değerlerde olduğu gözlenmiş ve gerilim çökmesi, notch vb. gerilim kaynaklı herhangi bir sorun gözlenmemiştir.

Gebze ilinde bulunan baskı fabrikasında 2 adet 1600 kVA ve 1250 kVA güçlerinde farklı bölümleri besleyen transformatör bulunmaktadır. Tesiste mevcut kompanzasyon panellerinde, filtreleme reaktörü %5,67 olan seri reaktörlü pasif harmonik filtre kullanılmıştır ve ölçümler transformatörlerin AG barasından yapılmıştır. Ölçümler sonucunda, toplam harmonik bozulmaların standartların üstünde olduğu gözlenmiştir.

1600 kVA transformatör gücüne sahip sistemde, toplam gerilim bozulma oranı maksimum %7,4 değerinde, toplam akım bozulma oranı ise maksimum %46 değerinde görülmektedir. Bu değerler standartların çok üstündedir. Akım spektrumlarında ise %15 değerinde 5.harmoniğin baskın olduğu görülmektedir.

1250 kVA transformatör gücüne sahip sistemde, toplam gerilim bozulma oranı maksimum %2,8 değerinde, toplam akım bozulma oranı ise maksimum %24,4 değerinde görülmektedir. Bu değerler standartların çok üstündedir. Akım spektrumlarında ise %11 değerinde 7.harmoniğin baskın olduğu görülmektedir.

Baskı fabrikasının ölçümlerine bakıldığı zaman;

Mevcut sistemde bulunan harmonik akımlar, kondansatörlerin yüksek frekanslarda düşük empedans gösterecek düzeyde olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla sistemdeki kondansatörlerin arızalanmasına, ömrünün çabuk bitmesine neden olacaktır.

Sistemdeki şalt ürünlerinde hatalı açmalar, arızalanmalar, kondansatörlerde patlamalar veya güç kayıpları, motorlarda aşırı vibrasyon, kart yanmaları vb. olumsuz durumlar oluşturabilir.

Gerilim değerleri incelendiğinde her iki transformatör içinde nominal değerlerin üzerinde olduğu gözlenmiştir. Gerilim çökmesi, notch vb. gerilim kaynaklı herhangi bir sorun gözlenmemiştir.

1250 kVA transformatör sistemine ait mevcut kompanzasyon panelinde; rezonans frekansının 210 Hz, filtreleme faktörünün %5,67 olduğu görülmektedir. Ölçümler incelendiğinde ise rezonans frekansı 189 Hz, filtreleme faktörünün %7 olduğu gözlenmiştir. Mevcuttaki reaktör seçiminin yanlış olduğu gözlenmiştir.

Ölçümlere göre tasarlanan pasif filtreli kompanzasyon panosu ile; kompanzasyon sisteminin iyileştirilmesi, sistemdeki harmonik yükün azaltılması, sistemin veriminde artış sağlanması, kondansatör ve cihaz ömürlerinin arttırılması, cihazlardan dolayı oluşan

sorunların azaltılması, kondansatör kaynaklı yangın risklerinin önlenmesi, reaktif güç ve harmoniklerden kaynaklanan gerilim düşümlerinin önlenmesi, güç faktörünün düzeltilmesi, rezonans olayları, ek kayıpların azaltılması ve sistem kararlılığının artmasıyla enerji kalitesi üst seviyelere çıkarılması sağlanmıştır.

Endüstriyel bir tesiste kompanzasyon paneli yapılacağı zaman; ilk akla pasif filtreli kompanzasyon panosu yapmak gelir. Bunun nedeni, firma yetkililerin maliyet açısından bütçe planlamasında cüzi miktarda pay bırakması ve kompanzasyon hakkında bilgisinin az olması ya da ilgilenmemesidir.

Pasif filtrenin ve aktif filtrenin arasındaki farklar Bölüm 5'te belirtilmiştir. Pasif filtre yerine aktif filtre uygularsak ve maliyet açısından kıyaslamasını incelersek;

Baskı fabrikasına ait ADP'de yapılan ve Bölüm 7'de verilen ölçüm değerleri incelendiğinde; Tablo 8.1 ve Tablo 8.2'de pasif filtre; Tablo 8.3'te ise aktif filtre uygulanmasında maliyetleri verilmiştir.

Tablo 8.1. Baskı fabrikası 1.trafoya ait pasif harmonik filtreli kompanzasyon panosunun maliyeti

KADEMELENDİRME: $2 \times 25 \text{ KVA} + 3 \times 50 \text{ KVA} + 7 \times 100 \text{ KVA} = 900 \text{ KVA}$ (400 V ETKİN GÜÇ)				
1.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:25kVA, p:%5,67 (fr:210Hz) THD _(U) %8	440V 25KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	50A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH – Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:00 63A BUŞON
2.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:25kVA, p:%5,67 (fr:210Hz) THD _(U) %8	440V 25KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	50A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:00 63A BUŞON
3.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:50kVA, p:%5,67 (fr:210Hz) THD _(U) %8	440V 2x25KVA =50KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	95A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:00 160A BUŞON
4.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:50kVA, p:%5,67 (fr:210Hz) THD _(U) %8	440V 2x25KVA =50KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	95A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:00 160A BUŞON
5.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:50kVA, p:%5,67 (fr:210Hz) THD _(U) %8	440V 2x25KVA =50KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	95A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:00 160A BUŞON
6.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:100kVA, p:%5,67 (fr:210Hz) THD _(U) %8	440V 4x25KVA =100KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	190A 3KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:1 200A BUŞON
7.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:100kVA, p:%5,67 (fr:210Hz) THD _(U) %8	440V 4x25KVA =100KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	190A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:1 200A BUŞON

8.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:100kVAr, p:%5,67 (fr:210Hz) THD _(U) %8	440V 4x25KVA =100KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	190A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:1 200A BUŞON
9.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:100kVAr, p:%5,67 (fr:210Hz) THD _(U) %8	440V 4x25KVA =100KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	190A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:1 200A BUŞON
10.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:100kVAr, p:%5,67 (fr:210Hz) THD _(U) %8	440V 4x25KVA =100KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	190A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:1 200A BUŞON
11.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:100kVAr, p:%5,67 (fr:210Hz) THD _(U) %8	440V 4x25KVA =100KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	190A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:1 200A BUŞON
12.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:100kVAr, p:%5,67 (fr:210Hz) THD _(U) %8	440V 4x25KVA =100KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	190A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:1 200A BUŞON
REAKTİF GÜÇ KONTROL RÖLESİ (1 ADET)				
2600x2140x800 (GxYxD) DİKİLİ TİP KOMPANZASYON PANOSU, SARF MALZEMELER VE MONTAJ İŞÇİLİĞİ (1 SET)				
FAN, FAN MODÜLÜ, TERMOSTAT VE OTOMATİK SİGORTA (3 SET)				
BAKIR BARA ELEKTROLİTİK (245 kg)				
TOPLAM FİYAT (EURO) : 12.846 €				

Tablo 8.2. Baskı fabrikası 2.trafoya ait pasif harmonik filtreli kompanzasyon panosunun maliyeti

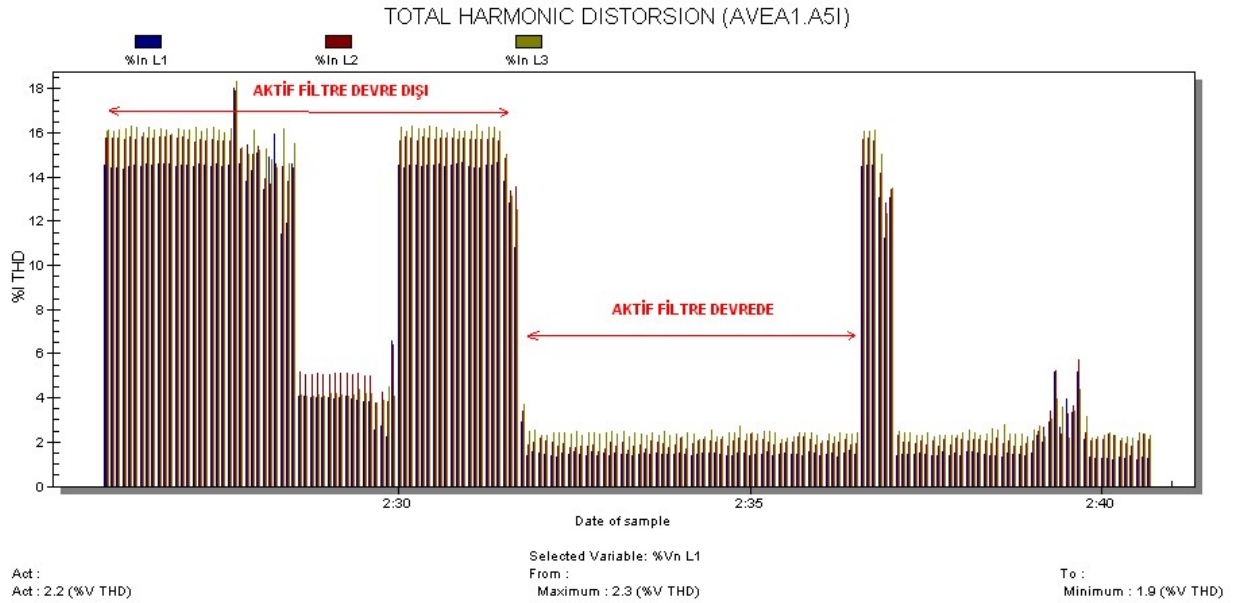
KADEMELENDİRME: $2 \times 25 \text{ KVA} + 7 \times 50 \text{ KVA} + 3 \times 100 \text{ KVA} = 700 \text{ KVA}$ (400 V ETKİN GÜÇ)				
1.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:25kVA, p:%7 (fr:189Hz) THD _(U) %8	440V 25KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	50A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH – Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:00 63A BUŞON
2.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:25kVA, p:%7 (fr:189Hz) THD _(U) %8	440V 25KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	50A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:00 63A BUŞON
3.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:50kVA, p:%7 (fr:189Hz) THD _(U) %8	440V 2x25KVA =50KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	95A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:00 160A BUŞON
4.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:50kVA, p:%7 (fr:189Hz) THD _(U) %8	440V 2x25KVA =50KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	95A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:00 160A BUŞON
5.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:50kVA, p:%7 (fr:189Hz) THD _(U) %8	440V 2x25KVA =50KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	95A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:00 160A BUŞON
6.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:50kVA, p:%7 (fr:189Hz) THD _(U) %8	440V 2x25KVA =50KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	95A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:00160A BUŞON
7.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:50kVA, p:%7 (fr:189Hz) THD _(U) %8	440V 2x25KVA =50KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	95A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:0050A BUŞON

8.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:50kVAr, p:%7 (fr:189Hz) THD _(U) %8	440V 2x25KVA =50KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	95A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:00160A BUŞON
9.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:50kVAr, p:%7 (fr:189Hz) THD _(U) %8	440V 2x25KVA =50KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	95A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:00160A BUŞON
10.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:100kVAr, p:%7 (fr:189Hz) THD _(U) %8	440V 4x25KVA =100KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	190A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:1 200A BUŞON
11.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:100kVAr, p:%7 (fr:189Hz) THD _(U) %8	440V 4x25KVA =100KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	190A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:1 200A BUŞON
12.KADEME	3 faz, 50Hz, 400V,Qn:100kVAr, p:%7 (fr:189Hz) THD _(U) %8	440V 4x25KVA =100KVA 3 FAZLI, A.G. GÜÇ KONDANSATÖRÜ	190A 3 KUTUPLU, 400V,50 Hz GÜÇ KONTAKTÖRÜ	NH - Bıçaklı sigortalı yük kesici Boy:1 200A BUŞON
REAKTİF GÜÇ KONTROL RÖLESİ (1 ADET)				
2400x2140x800 (GxYxD) DİKİLİ TİP KOMPANZASYON PANOSU, SARF MALZEMELER VE MONTAJ İŞÇİLİĞİ (1 SET)				
FAN, FAN MODÜLÜ, TERMOSTAT VE OTOMATİK SİGORTA (3 SET)				
BAKIR BARA ELEKTROLİTİK (232 kg)				
TOPLAM FİYAT (EURO) : 11.710 €				

Tablo 8.3. Aktif filtrenin maliyeti

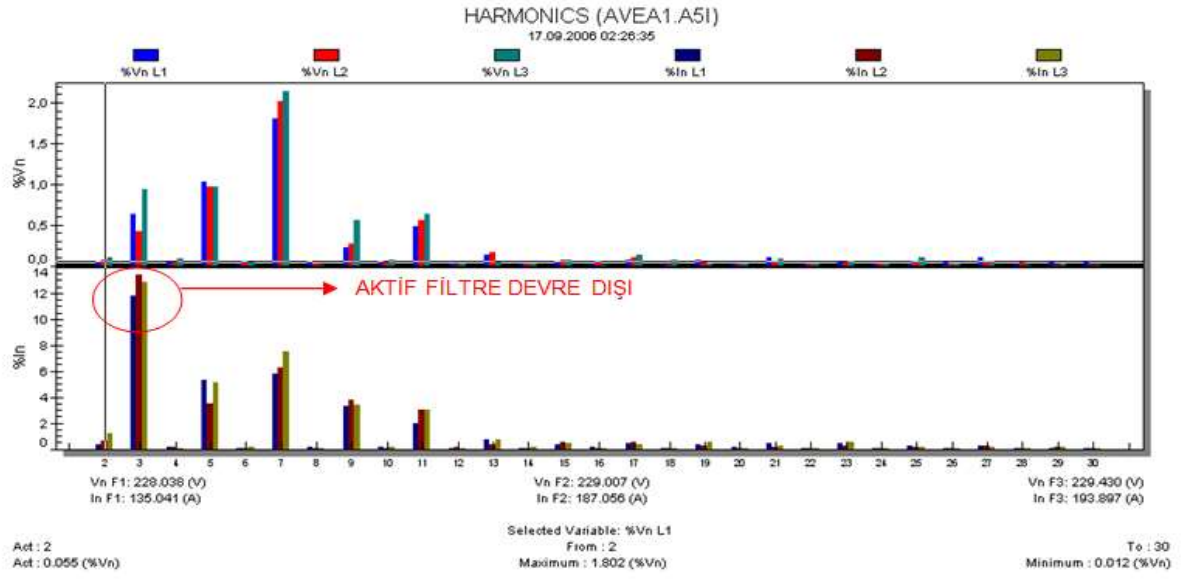
	ÜRÜN TERCİHİ	TOPLAM FİLTRE HAT AKIMI	AKTİF FİLTRE+İŞÇİLİK/MONTAJ FİYATI
1.Trafoya ait aktif filtre	PQF _I (450 A) PQF _M (150 A)	600 A	95.000 €
2.Trafoya ait aktif filtre	PQF _I (320 A)	320 A	40.000 €

Bir sistemde bulunan UPS panosuna aktif filtre uygulaması yapılırsa ve bozulmaların giderilmesinde verimi; aktif filtrenin devrede olması ve olmaması olarak incelenirse;

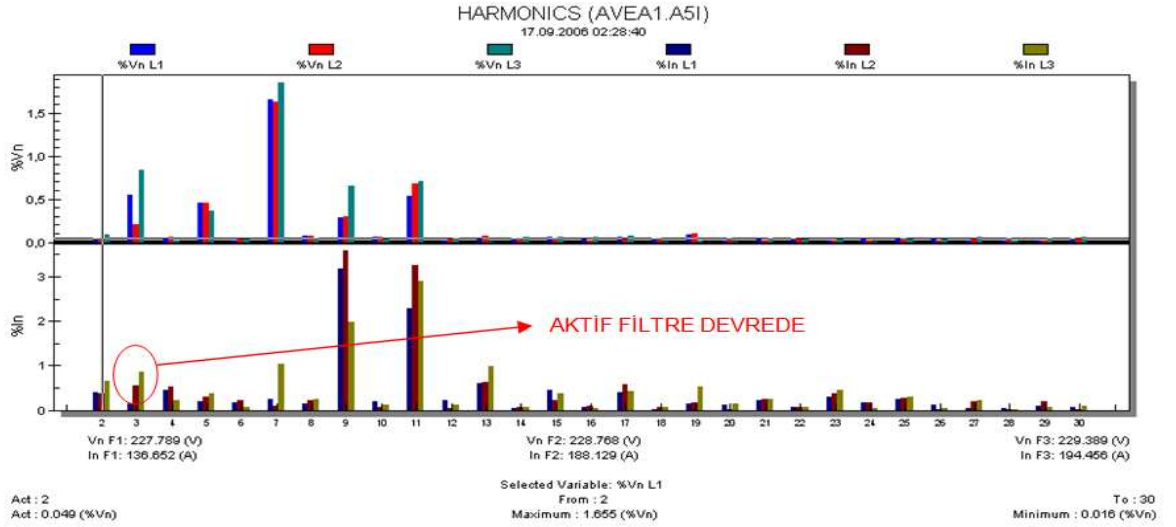


Şekil 8.1. Toplam harmonik gerilim distorsiyonunun aktif filtreyle değişimi

Aktif filtre devrede değil iken harmonik spektrumunda THD_v %16 dolaylarındadır. Aktif filtre devreye girdiğinde 3., 5. ve 7. harmonikleri süzerek gerilim bozulma değerini %2.3 mertebelerine indirmiştir.



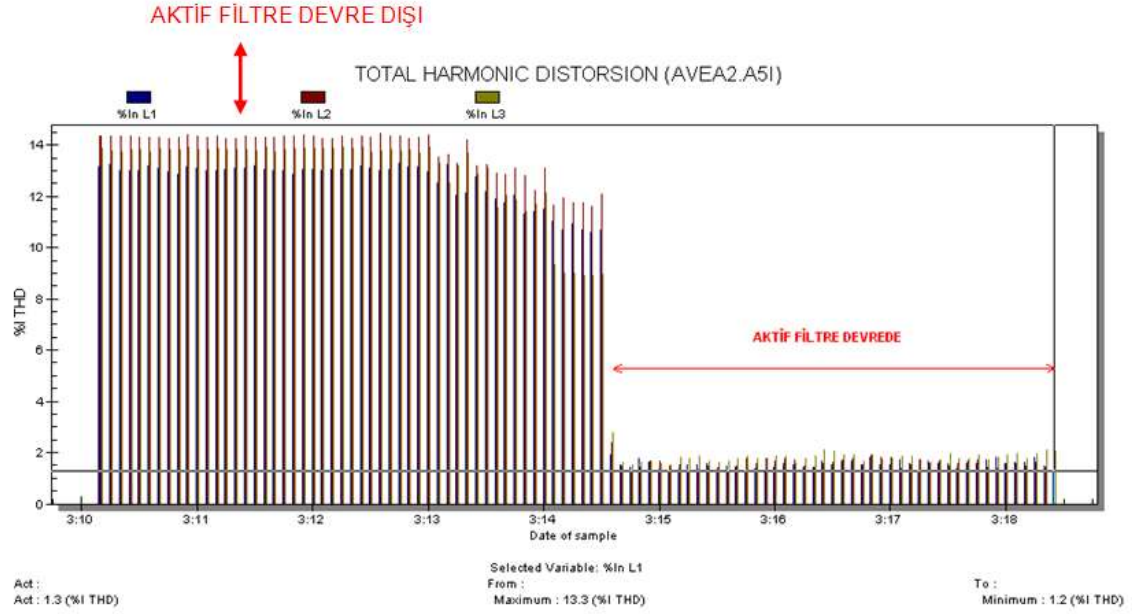
Şekil 8.2. 3.harmoniğin aktif filtrelemede devre dışı bırakılma durumu



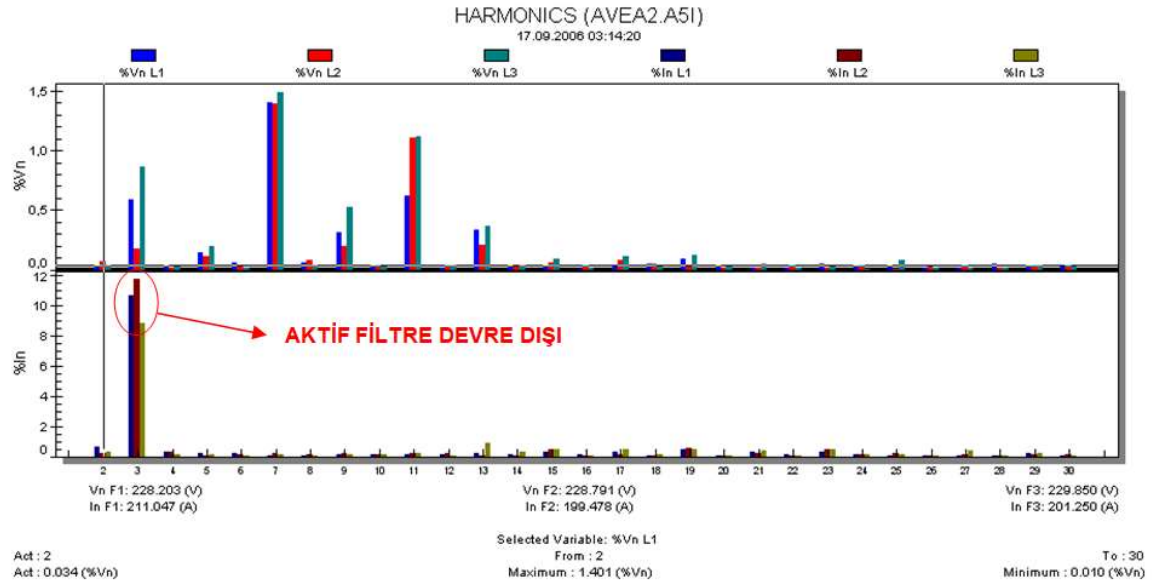
Şekil 8.3. 3.harmoniğin aktif filtrelemede devrede olması durumu

3.harmoniğe ait %14 gerilim bozulması, aktif filtrenin devreye girmesi ile %1'in altına indirilmiştir.

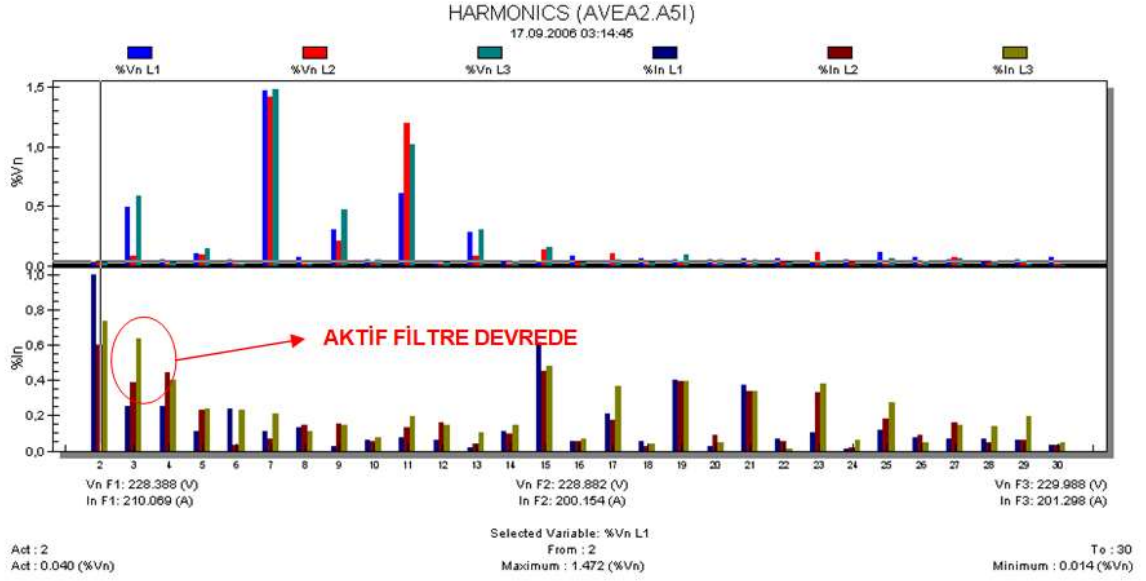
Aktif filtre devrede değil iken harmonik spektrumunda THD_I %14 dolaylarındadır. Aktif filtre devreye girdiğinde 3., 5. ve 7. harmonikleri süzerek akım bozulma değerini %1.3 mertebelerine indirmiştir.



Şekil 8.4. Toplam harmonikakım distorsiyonun aktif filtreyle değişimi



Şekil 8.5. 3.harmoniğin aktif filtrelemede devre dışı bırakılma durumu



Şekil 8.6. 3.harmoniğin aktif filtrelemede devrede olması durumu

Sonuçlardan da anlaşılacağı gibi aktif filtre devrede değil iken 3. harmonik akımları sistemde bulunmakta idi. Aktif filtre devreye alındıktan sonra bağlı bulundukları sistemde bulunan 3. harmoniklerin tamamını süzmüştür.

Verim açısından, harmonik filtreleme %10 ile çalışırken aktif filtreler %90 civarında çalışabilmekte ve tepkime süreleri çok kısa sürede (0,5 ms'den daha kısa) gerçekleşmektedir. Böyle üstün teknoloji ile tasarlanan aktif filtreler maliyet açısından incelendiğinde, Tablo 8.1 ve Tablo 8.2 harmonik filtreleme yapıldığı zaman oluşan bütçe ile aynı sisteme tasarlanan aktif filtrenin Tablo 8.3'te gösterilen maliyeti ile karşılaştırıldığı zaman çok ciddi derecede fiyat farkı görülmektedir. Böyle bir durum göz önüne alındığında, ciddi yük değişimleri oluşmadığı ve pasif harmonik filtrenin görevinde yetersiz kalmadığı durumlar hariç pasif harmonik filtreleme yöntemi uygulanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Christopher F.**, 2002. Analyzing and Quantifying the Effects of electric Power Quality. <https://www.plantengineering.com/articles/analyzing-and-quantifying-the-effects-of-electric-power-quality>, 24 Kasım 2018.
- [2] **Özdemir Ş.**, 2003. Aktif Filtrelerin Güç Kalite Düzenleyicisi Olarak Kullanımı, *3e Electrotech Aylık Dergisi*. 2003/2(105).
- [3] www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2014/05/20140528M1-1.doc S:18 Elektrik Şebeke Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına İlişkin Yönetmelik. 11 Ocak 2019.
- [4] **Kürker F., Taştan R.**, 2016. Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Meydana Getirdiği Kayıpların Analizi, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 5, 2016/21-38.
- [5] **Küçük D., Salor Ö., Guder M., Demirci T., Akkaya Y., Ermiş M., Çadırcı I.**, 2009. Türkiye Elektrik İletim Sisteminde Harmonik Bozulma ve Kırpışma Parametrelerinin Oluşturulan Güç Kalitesi Veri Tabanı Yapısıyla Değerlendirilmesi, III. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli, 21-22 Mayıs.
- [6] **Uçar F.**, 2012. Paralel Aktif Güç Filtresi Kullanarak Harmonik ve Reaktif Güç Kompanzasyonu Yapılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [7] **Kawamoto, K., Koomey, J.G., Nordman, B., Brown, R.E., Piette, M.A., Ting, M. ve Meier, A.K.**, (2001), Electricity Used by Office Equipment and Network Equipment in the U.S.: Detailed Report and Appendices, Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-45917, Berkeley, CA.
- [8] **Vorsatz, D., Shown, L., Koomey, J.G., Moezzi, M., Denver, A. ve Atkinson, B.**, (1997), Lighting Market Sourcebook for the U.S., Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-39102, Berkeley, CA.
- [9] **ABB SACE**, 2010. Power factor correction and harmonic filtering in electrical plants, *Technical Application Papers*, 8, 1SDC007107G0202, 10/2010, Italy.
- [10] **Doğan S.**, 2017. Harmonik Sorunlarına Kesin Çözüm, Seminer Notları, ABB Elektrik San. A.Ş., Dudullu-2 Robotik-Motor-Sürücü-Servis Fabrikası, Hall 4, İstanbul, 11-15 Şubat.

- [11] **Adak S.**, 2003. Enerji Sistemlerinde Harmonik Distorsiyonun Azaltılması, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [12] **Akbal B.**, 2011. Fabrika Beslemelerinde Harmonik Ölçümü ve Filtre Tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [13] **Ataç C.**, 2004. Üç Fazlı Kesintisiz Güç Kaynağı Kullanımında Harmonikler, 3e *Electrotech Aylık Dergisi*, (116), 84-86 s.
- [14] **Avcı T.**, 2008. Akım Kaynaklı Aktif Güç Filtresi İçin Çeşitli Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [15] **Bayliss C., Hardy B.**, 2011. Transmission and Distribution Electrical Engineering, Fourth Edition, Elsevier Science Press, USA.
- [16] **Bilge M.**, 2008. Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Pasif Filtrelerle Eliminasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- [17] **Demirkol Ö.**, 2006. Harmonik İçeren ve Dengesiz Şebekelerde Ölçme ve Kompanzasyon, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [18] **Efe S.B.**, 2006. Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Harmoniklerin Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [19] **Ekiz A., Tümay M.**, 2003. Fabrikalardaki Harmoniklerin MATLAB/SIMULINK Kullanılarak Modellenmesi, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, Lütfi Kırdar Kongre ve Sergi Sarayı, İstanbul, 18-21 Eylül.
- [20] **Eroğlu H.**, 2009. Bir Dağıtım Şebekesinin Güç Kalitesi ve Harmonikler Yönünden İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [21] **Erol S.**, 2011. Reaktif Güç Kompanzasyonunun Orta Gerilim Şebekesinde Uygulanması ve Enerji Kalitesine Etkilerinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- [22] **Ertay M.**, 2002. Elektrik Güç Sistemlerinde Kalite: Pasif Filtreler, Düzce Üniversitesi Ders Notları, <https://docplayer.biz.tr/37903263-Elektrik-guc-sistemlerinde-kalite-yrd-doc-dr-m-mustafa-ertay-duzce-universitesi.html>, Düzce, 24-27 Nisan.

- [23] **Filiz C.**, 2006. Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Filtrelemelerin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- [24] **Gencer Ö., Alboyacı B., Öztürk S., Çetinkaya H.**, 2003. Harmoniklerin Güç Faktörü Üzerine Etkileri, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10.Ulusal Kongresi, Elektrik Mühendisliği Bölümü Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 18-21 Eylül.
- [25] **Khan A., Junaid M.**, 2009. Harmonics Modelling and Simulation, IntechOpen, Pakistan.
- [26] **Kocatepe C., Köroğlu S., Arıkan O.**, 2005. Nonsinüsoidal Şartlar Altında Güç Faktörünün ve Güç Tanımlarının İncelenmesi, *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, **2**, 117-126.
- [27] **Kürker F., Taşaltın R.**, 2016. Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Meydana Getirdiği Kayıpların Analizi, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **5**, 21-38.
- [28] **Olçay K.**, 2018. Reaktif Güç ve Harmoniklerin Enerji Verimliliği ve Kablo Ömrüne Etkileri, *Yüksek Lisans Tezi*, Konya Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [29] **Owen E.L.**, 1998. A History of Harmonics in Power Systems, *IEEE Industry Applications Magazine*, 6-12, January/February.
- [30] **Özcan İ.**, 2006. Endüstriyel Tesislerde Harmonik Sorunları ve Çözümleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [31] **Özdemir E.**, 2009. Elektrik Enerji Kalitesi, Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli, 280-285, 21-22 Mayıs.
- [32] **Özer F.**, 2011. Nonlineer Yüklü Sistemde Filtreleme ve Güç Kompanzasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [33] **Rao N.D., Sporea S.I., Sawma A.**, 1998. Analysis of Resonance Problems and Harmonic Filter Design in Power Factor Correction Capacitor Applications, IEEE Canadian Electrical and Computer Engineering Conference, Kat. No.98TH8341, Canada.
- [34] **Rüstemli S., Cengiz M.S., Dinçer F.**, 2013. Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Aktif Filtre Kullanılarak Yok Edilmesi ve Simülasyonu, *Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **c.2, c.1**, 30-38.

- [35] **Sahoo H.K., Subudhi U.**, 2018. PowerSystemHarmonicsEstimation Using AdaptiveFilters. *Compendium of New Techniques in Harmonic Analysis*, IntechOpen, Morocco.
- [36] **Sevgi L.**, 2005. EMC, Güç Kalitesi ve Harmonik Analizi, *Endüstriyel & Otomasyon Dergisi*.
- [37] **Vardar T., Çam E., Yalçın E.**, 2010. Reaktif Güç Kompanzasyonu ile Enerji Verimliliği ve Kamu Kurumlarında Reaktif Güç Kompanzasyonu, *International Journal of Engineering Research and Development*, **2** (2), Ankara.
- [38] **Monteiro L.F.C.**, 2018. Power System Harmonics: Analysis, Effects and Mitigation Solutions for Power Quality Improvement, BoD–Books on Demand, IntechOpen, Brazil.
- [39] <https://www.captech.com.au/what-is-power-quality/>, What is PowerQuality. 11 Şubat 2019.
- [40] https://adfpowertuning.com/en/technology/powerquality.html?gclid=CjwKEAajwzN27BRDFn9aAwLmH2yISJABWuEXcuO8tEaA42mnHLHWNdj0bTYoyiNNWVin9RwDs7PyPpxoC9Rjw_wcB, PowerQuality. 11 Şubat 2019.
- [41] **Aktif Mühendislik Dış Tic. Ltd.**, 2011. Enerji Kalitesi Mühendisliği, Kapasitör & Filtre Bankları Kondansatörler & Reaktörler, Doc. Nr. AMDT-PQ 1114/C.Tr, Katalog.
- [42] **Águila T.A., López G., Isaac I., Gonzalez J.W.**, 2018. Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review. *Heliyon*. **4**(8),e00746. doi:10.1016/j.heliyon.2018.e00746
- [43] <https://www.electronics-tutorials.ws/accircuits/power-triangle.html>, Power Triangle and Power Factor. 16 Şubat 2019.
- [44] **Chauhan S.**, 2017. Disadvantages of LowPowerFactor. <https://www.electricalidea.com/disadvantages-low-power-factor/#>, 7 Mart 2019.
- [45] **ST TeknoElk. Elek. Mak. San. Tic. Ltd. Şti.**, 2017. MerusPower, Aktif Harmonik Filtre, Bilgi Kitapçığı.
- [46] <https://www.elprocus.com/importance-of-reactive-power-in-power-system-network/>, TheImportance of ReactivePower in PowerSystem Network. 8 Mart 2019.
- [47] **Schneider Elektrik**, 2011. Reaktif Enerji Yönetimi - Alçak Gerilim Komponentleri-Güç Kalitesi Düzeltme, Teknik Bilgi Kitapçığı, PFCED111008TR, İstanbul.

- [48] <https://www.electricaltechnology.org/2016/05/importance-of-reactive-power.html>, Is ReactivePowerUseful? Importance of ReactivePower. 8 Mart 2019.
- [49] <https://www.voltimum.com.tr/haberler/elektrikte-harmonik-nedir>, Elektrikte Harmonik Nedir? 3 Nisan 2018
- [50] **Kocatepe C., Uzunoğlu M., Karakaş A., Yumurtacı R., Arıkan O.**, 2003. Harmoniklerin filtrelenmesi ve filtre tasarımı, Elektrik Tesislerinde Harmonikler, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Birsan Yayınevi.
- [51] **Tomak Ö., Mengi O.Ö.**, 2017. K-Nearest Neighbor Classification of Harmonics Using Akaike Information Criterion, *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, **7 (1)**, 1-8.
- [52] <https://www.electronics-tutorials.ws/accircuits/harmonics.html>, Harmonics. 12 Nisan 2019.
- [53] **IEEE 519**, 1992. Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Standards Department, New Jersey.
- [54] **Gonzalez D.A., Mc Call J.C.**, 1987. Design of FilterstoReduceHarmonic Distribution in IndustrialPowerSystems, *IEEE Transactions on PowerIndustry Applications*, Vol. IA-23, **3**, 504-511.
- [55] **Kazmierkowski M.P., Malesani L.**, 1998. Current Control Techniquefor Three-PhaseVoltage Source PWM Converters, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **45**, 691-703.
- [56] **Kocatepe C., Demir A.**, 1998. Güç Sistemlerinde Harmonik Üreten Elemanlara Genel Bakış, *Kaynak Elektrik Dergisi*, 113.
- [57] **Ellis R.G.**, 1996. Harmonicanalysis of industrialpowersystems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **32 (2)**, 417-420.
- [58] **Karaca G.**, 2006, Kablolarda Elektriksel ve Isıl Zorlanmaların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Çoklu Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [59] **Boduroğlu T.**, 1988, Transformatörler, Beta Yayınları, No:155, İstanbul, 114-132.
- [60] **ABB Elektrik**, 2009. LV Capacitor Bank APC, Teknik Bilgi Kitapçığı, Belçika.
- [61] **IEEE Tutorial on HarmonicsModelingandSimulation**, 1999. ModelingandSimulation of PowerSystemHarmonics, IEEE Educational Product, CD-ROM, ISBN: 0-7803-4597-5.

- [62] **IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations**, 1996. Practical Definitions for Powers in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **11(1)**, 79-101.
- [63] **İlaslaner İ.**, 2006. Güç Kalitesinde Harmonikler Ve Filtrelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [64] **Baysal M.**, 2008. Harmonik İçeren Güç Sistemlerinin Gerilim Kararlılığının Yük Modellemeleri ve Facts Elemanları Bakımından İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [65] **Fusheng L., Ruisheng L., Fengquan Z.**, 2016. Microgrid Technology and Engineering Application, Academic Press, China.
- [66] **Ay S.**, 1996. Alçak Gerilim Tesislerindeki Gerilim Harmonikleri ve Filtre Tasarımı, *Kaynak Elektrik Dergisi*, **95**, 81-88.
- [67] **Mohammad M., Ewald F.**, 2015. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines, Second Edition, Academic Press, Elsevier, England.
- [68] **Rüstemli S., Cengiz M.S., Dinçer F.**, 2013. Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Aktif Filtre Kullanılarak Azaltılması ve Simülasyonu, *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, **2 (1)**, 30-38.
- [69] **Erdoğan, N.**, 2001. Aktif Güç Filtrelerinin İncelenmesi ve MATLAB ile Bir Simülasyon Örneği, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [70] **Rahmani S., Mendalek N., Hamadi A., Haddad E.K.**, 2009. A New Control Technique for Three-Phase Shunt Hybrid Power Filter, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **56**, 2904-2915.
- [71] **Chauvin Arnoux**, 2011. Three Phase Power Quality Analyser C.A 8332B- C.A 8334B, User's manuel, Code 689142E01- Ed 5, France.
- [72] **Entes**, 2018. Ürün kataloğu, 59.basım Ocak 2018, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Meriç ILGIN
Doğum Yeri : UZUNKÖPRÜ
Doğum Tarihi : 24.07.1993
Medeni Hali: : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : meric.ilgin54@gmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ

Lisans : Fırat Üniversitesi/Teknoloji Fak./ Enerji Sis. Müh.
(2012-2017)
Yüksek Lisans : Fırat Üniversitesi/Fen Bil. Ens./Enerji Sist. Müh. Anabilim Dalı
(2017-2019)