

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

**BİR DAĞITIM ŞEBEKESİNİN GÜÇ KALİTESİ
VE HARMONİKLER YÖNÜNDEN İNCELENMESİ**

078221001002

Hasan EROĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

KONYA, 2009

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİR DAĞITIM ŞEBEKESİNİN GÜÇ KALTESİ VE HARMONİKLER YÖNÜNDEN İNCELENMESİ

Hasan EROĞLU

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Musa AYDIN

2009, 207 Sayfa

Jüri: Yrd. Doç. Dr. Musa AYDIN

Doç. Dr. Salih GÜNEŞ

Yrd. Doç. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA

Günümüz elektrik güç sistemlerinde günden güne sayıları artan nonlineer yüklerden dolayı elektrik enerjisinin kararlılığı daha da önem kazanmıştır. Nonlineer yükler, akım ve gerilim karakteristiği doğrusal olmayan yüklerdir. Sistemdeki bu nonlineer yüklerden dolayı harmonik akım ve gerilimler oluşur.

Harmonikler elektrik enerji sistemlerinde enerji kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Gerilim ve akım dalga şeklinin ideal sinüs şeklinden uzaklaşması olarak bilinen harmonikler, sinüzoidal bir kaynağın nonlineer bir yüke uygulanması veya nonsinüzoidal bir kaynaktan beslenen lineer ya da nonlineer bir yük tarafından oluşmaktadır. Genel olarak harmonik kaynakları; güç elektroniği elemanları, transformatörler, generatörler, kesintisiz güç kaynakları (UPS), dönüştürücüler ve yüksek güçlü endüksiyon motorlarıdır.

Harmoniklerin elektrik güç sistemleri üzerindeki etkileri ise ek kayıplar ve aşırı ısınma, gerilim düşümleri, rezonans olayları, dielektrik zorlanması, ölçme, koruma ve kontrol sistemlerinin hatalı çalışması vb. şeklinde özetlenebilir.

Herhangi bir harmonik kaynağı tarafından üretilen harmonikler aynı elektrik şebekesinden beslenen diğer alıcılarda da büyük zararlara neden olur. Bu nedenden dolayı harmoniklerin oluşmadan veya oluşuktan sonra giderilmesi önem taşımaktadır. Günümüzde harmoniklerin azaltılması için birçok filtre uygulaması vardır. Fakat harmoniklerin eliminasyonunda en önemli etken kullanıcıların harmoniklerin zararlı etkilerine karşı bilinçlendirilip filtre uygulamalarının yaygınlaştırılmasıdır.

Bu çalışmada; öncelikle enerji kalitesine ilişkin problemlerle ilgili genel bilgiler verilmiştir, sonraki bölümlerde harmoniklerle ilgili temel bilgiler verilerek nasıl ve neden oluştukları, analiz yöntemleri, elektrik enerji sistemleri üzerindeki etkileri, standartları ve filtreleme yöntemleri incelenmiştir. Daha sonra bir elektrik dağıtım şebekesinde yapılan ölçümler incelenmiş ve harmoniklerin bu dağıtım şebekesi üzerindeki etkileri yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrik Enerji Kalitesi, Harmonikler, Harmonik Filtreleme.

ABSTRACT

MS Thesis

HARMONIC AND POWER QUALITY ANALYSIS OF A DISTRIBUTION SYSTEM

Hasan EROĞLU

Selçuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Electrical and Electronic Engineering Department

Advisor: Assist. Prof. Dr. Musa AYDIN

2009, 207 Pages

Jury: Assist. Prof. Dr. Musa AYDIN

Assoc. Prof. Dr. Salih GÜNEŞ

Assist. Prof. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA

Nowadays in electric power systems, due to the increasing of the numbers of nonlinear loads from day to day, the stability of electric energy gets more importance. Current and voltage characteristics of nonlinear loads aren't linear. Because of these nonlinear loads harmonic currents and voltages occur.

Harmonics affect the energy quality substantially in energy power systems. Harmonics known as the distortion of an ideal sinusoidal voltage or current waveform are occurred when a sinusoidal waveform is applied to a nonlinear load. Also they may be resulted from linear or nonlinear loads that are fed by a sinusoidal source. Power electronic components, transformers, generators, uninterruptible power supplies (UPS), converters and high-power induction motors are some power system elements that cause harmonics.

The effects of harmonics on power systems can be summarized such as additional power loss, heating, inconstant voltage level, resonance, dielectric constrained, failure of control, safe and measurement systems.

The harmonics generated by any harmonic source can be very harmful for other electric energy users that are fed by the same energy system. Owing to the fact that kind of reasons, elimination of harmonics is too important before the harmonic appearance or after the harmonic appearance in electrical systems. Nowadays there are lots of applications for elimination of harmonics. But the most significant factor to eliminate harmonics is making electric users conscious of harmonics' losses in electric power systems and spreading applications of harmonic filters.

In this thesis, at first, common information about power quality problems is given, afterwards fundamental knowledge about harmonics is given then some investigation about how and why harmonics are produced, analyzing methods, effects on electric power systems, harmonic standards and methods of filtering are examined. On the other hand, the measurements taken on an electric distribution system are examined and the effects of harmonics on this distribution system are commented.

Keywords: Electric Energy Quality, Harmonics, Harmonic Filters.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bir dağıtım şebekesinin güç kalitesi ve harmonikler yönünden incelendiği bu tez çalışmasında Konya 2. ve 3. Organize Sanayi Bölgesinde bulunan farklı baralardan güç analizörleriyle ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler sırasında bana yardımcı olan Bölge Müdürlüğü personellerine, özellikle Elk-Elktro. Müh. Mehmet ŞEKER'e ve Elk. Teknikeri Hasan UZUNKÖPRÜ'ye, çalışmalarım esnasında bana maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen aileme, yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen tez danışmanım Yrd.Doç. Dr. Musa AYDIN'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|-----------|
| ÖZET | iii |
| ABSTRACT | v |
| ÖNSÖZ | vii |
| İÇİNDEKİLER | viii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | xii |
| TABOLAR LİSTESİ | xxv |
| SİMGELER | xxvii |
| 1.GİRİŞ | 1 |
| 2.KAYNAK ARAŞTIRMASI | 4 |
| 3.ENERJİ KALİTESİ VE ENERJİ KALİTESİNE İLİŞKİN PROBLEMLER | 7 |
| 3.1.Geçici Olaylar | 12 |
| 3.1.1. Darbesel geçici olay | 12 |
| 3.1.2. Titreşimli geçici olay | 13 |
| 3.2.Uzun Süreli Gerilim Değişimleri | 14 |
| 3.2.1. Gerilim yükselmesi | 14 |
| 3.2.2. Gerilim düşmesi | 15 |
| 3.2.3. Sürekli kesintiler | 15 |
| 3.3. Kısa Süreli Gerilim Değişimleri | 15 |
| 3.3.1. Kesinti | 16 |
| 3.3.2. Azalmalar-salınımlar | 17 |
| 3.3.3. Gerilim veya akım artmaları | 18 |
| 3.4.Gerilim Dengesizliği | 19 |
| 3.5.Dalga Şekli Bozulması | 20 |
| 3.5.1. DC ofset | 20 |
| 3.5.2. Harmonikler | 20 |
| 3.5.3. Ara harmonikler | 21 |
| 3.5.4. Çentik | 22 |
| 3.5.5. Gürültü | 23 |
| 3.6.Gerilim Dalgalanmaları | 23 |
| 3.7.Güç Frekansı Değişimleri | 24 |
| 4.HARMONİKLER | 26 |
| 4.1.Harmonik Tanımı | 27 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2.Harmonik Analizi..... | 28 |
| 4.2.1. Analitik yöntem..... | 29 |
| 4.2.2. Grafik yöntem..... | 30 |
| 4.2.3. Hızlı fourier dönüşümü(FFT)..... | 31 |
| 4.2.4. Ölçme yöntemi | 31 |
| 4.3.Harmonikler İle İlgili Genel Terimler..... | 32 |
| 5. HARMONİKLERİN KAYNAKLARI VE SİSTEME ZARARLI ETKİLERİ .. | 35 |
| 5.1.Harmoniklerin Kaynakları..... | 36 |
| 5.1.1. Harmonik kaynağı olarak ticari yükler | 37 |
| 5.1.1.1. Tek fazlı güç kaynakları | 38 |
| 5.1.1.2. Florasan aydınlatma | 40 |
| 5.1.1.3. İklimlendirme ve asansörlerde kullanılan hız kontrol sürücüleri..... | 42 |
| 5.1.2. Harmonik kaynağı olarak sanayi yükleri | 43 |
| 5.1.2.1. Üç fazlı güç konverterleri | 43 |
| 5.1.2.1.1. DC sürücüler | 45 |
| 5.1.2.1.2. AC sürücüler | 46 |
| 5.1.2.2. Ark makineleri | 48 |
| 5.1.2.3. Nüveli (Doyuma gidebilen) cihazlar | 51 |
| 5.1.2.3.1. Transformatörler..... | 51 |
| 5.1.2.3.2. Generatörler | 56 |
| 5.1.3. Diğer harmonik kaynakları..... | 57 |
| 5.1.3.1. Statik VAR kompanzatörleri | 57 |
| 5.1.3.2. Fotovoltaik sistemler | 59 |
| 5.1.3.3. Bilgisayarlar..... | 59 |
| 5.1.3.4. Kesintisiz güç kaynakları..... | 59 |
| 5.2.Harmoniklerin Sisteme Zararlı Etkileri..... | 61 |
| 5.2.1. Transformatörler üzerindeki etkileri..... | 63 |
| 5.2.2. Dönen makineler üzerindeki etkileri..... | 65 |
| 5.2.3. İletim hatları üzerindeki etkileri | 68 |
| 5.2.4. Kondansatörler üzerindeki etkileri | 70 |
| 5.2.5. Devre kesiciler ve sigortalar üzerindeki etkileri..... | 72 |
| 5.2.8. Güç elektroniği elemanları üzerindeki etkileri..... | 74 |
| 5.2.9. Koruyucu sistemler (röleler) üzerindeki etkileri | 74 |

| | |
|--|------------|
| 5.2.10.Ölçme aygıtları üzerindeki etkileri..... | 75 |
| 5.2.11.Aydınlatma elemanları | 76 |
| 5.2.12.Harmoniklerden kaynaklanan rezonans olayları..... | 77 |
| 5.2.12.1.Paralel rezonans | 79 |
| 5.2.12.2.Seri rezonans | 81 |
| 5.2.12.3.Rezonansın etkileri | 84 |
| 5.2.12.4.Rezistansın ve rezistif yükün rezonansa etkisi..... | 85 |
| 5.2.13.Üçüncü harmonik nedeniyle oluşan problemler | 87 |
| 5.3.Harmonik Standartları..... | 92 |
| 5.4.Harmonikler ve Diğer Şebeke Olaylarının Sanayi Tesislerine Verdikleri Maddi Zararlar | 100 |
| 5.5.Sistemdeki Harmoniklerin Belirlenmesi | 103 |
| 5.6.Birden Çok Düğüm Noktası Bulunan Sistemlerde Ölçüm Noktasının Belirlenmesi..... | 104 |
| 5.6.1. Gerilim harmoniği ölçümü | 106 |
| 5.6.2. Akım harmoniği ölçümü | 106 |
| 5.6.3. Harmonik ölçüm süresi | 107 |
| 5.6.4. Harmonik kaynağının bulunması..... | 107 |
| 5.7.Harmonik Kaynaklı Reaktif Güç Bedeli | 109 |
| 6. HARMONİKLERİN KONTROLÜ | 112 |
| 6.1.Tasarım Aşamasında Alınabilecek Önlemler | 112 |
| 6.1.2. Dönüştürücülerde alınabilecek önlemler | 114 |
| 6.1.3. Transformatörlerde alınabilecek önlemler | 114 |
| 6.2.Harmoniklerin Azaltılması İçin Kullanılan Cihazlar | 115 |
| 6.2.1. Hat reaktörleri ve tıkaçlar..... | 115 |
| 6.2.2. Zigzag transformatörleri | 119 |
| 6.2.3. Pasif filtreler | 121 |
| 6.2.3.1.Paralel pasif filtreler | 121 |
| 6.2.3.2.Seri pasif filtreler..... | 130 |
| 6.2.4. Aktif güç filtreleri | 131 |
| 6.2.4.1.Paralel aktif filtre..... | 132 |
| 6.2.4.2.Seri aktif filtre | 133 |
| 6.2.4.3.Aktif güç filtresinin yapısı | 134 |

| | |
|--|-----|
| 7. DAĞITIM ŞEBEKESİNDE YAPILAN HARMONİK ÖLÇÜMLERİ VE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI | 135 |
| 7.1.Yapılan Ölçümlerden Alınan Grafikselsel Veriler..... | 143 |
| 7.1.1.MM1 Ölçümü | 143 |
| 7.1.2.MM2 Ölçümü | 146 |
| 7.1.3.MM3 Ölçümü | 148 |
| 7.1.4.MM6 ölçümü | 150 |
| 7.1.5.Döküm fabrikası 1 (OG) | 152 |
| 7.1.6.Plastik fabrikası 1 | 154 |
| 7.1.7.Plastik fabrikası 2 | 156 |
| 7.1.8.Döküm fabrikası 2 | 158 |
| 7.1.9.Döküm fabrikası 3 | 161 |
| 7.1.10.Gıda fabrikası..... | 164 |
| 7.1.11.Döküm fabrikası 4..... | 167 |
| 7.1.12.Tekstil fabrikası..... | 169 |
| 7.1.13.Döküm fabrikası 5 | 172 |
| 7.2. Simülasyon Çalışmaları..... | 174 |
| 7.2.1.Dyn11 bağlantı grubu için devrenin modellenmesi ve referans simülasyonu | 184 |
| 7.2.2.Nonlinear yüklerin diğer şebeke yükleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi..... | 186 |
| 7.2.3.Transformatör bağlantı grubunun dağıtım şebekesindeki harmoniklere etkilerinin incelenmesi | 193 |
| 7.2.3.1.Dyn1 bağlantı gruplu transformatörlerin şebeke harmoniklerine etkileri | 193 |
| 7.2.3.2.Yyn bağlantı gruplu transformatörlerin şebeke harmoniklerine etkileri | 195 |
| 7.2.4.Transformatörlerin empedanslarının şebeke harmoniklerine etkilerinin incelenmesi..... | 196 |
| 7.2.5.Manevra merkezleri arasındaki hat empedanslarının şebeke harmoniklerine etkilerinin incelenmesi | 197 |
| 7.2.6.Manevra merkezlerindeki harmoniklerinin diğer manevra merkezleri üzerinde ve TEİAŞ 3 TM üzerindeki etkilerinin incelenmesi | 197 |
| 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 199 |
| 9. KAYNAKLAR | 204 |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Şekil 3.1. Klasik elektrik enerjisi üretim, iletim, dağıtım ve tüketim sistemi. | 7 |
| Şekil 3.2. Enerji kalitesinde bozulmaya sebep olabilen bazı durumlar. | 8 |
| Şekil 3.3. NORDEL (Northern Synchronous System) enterkonnekte sistemi..... | 10 |
| Şekil 3.4. Danimarka'daki GPS uyumlu bir harmonik ölçüm uygulamasının ölçüm noktaları..... | 10 |
| Şekil 3.5.Yıldırım darbesi akımı darbesel geçici olayı..... | 13 |
| Şekil 3.6. Ard arda kapasitör anahtarlanmasıyla oluşan titreşimli geçici olay akımı.14 | |
| Şekil 3.7. Bir arıza ve tekrar kapama işleminden dolayı anlık kesintinin oluşumu ... | 16 |
| Şekil 3.8. Tipik bir gerilim azalması-salınımı. | 17 |
| Şekil 3.9. Bir tek faz toprak hatasından kaynaklanan ani gerilim artması..... | 18 |
| Şekil 3.10. Bir gerilim dengesizliği sisteminin simetrik bileşenleri | 19 |
| Şekil 3.11. Kaynak sistemi dengesizken üç-faz diyot doğrultucuların hat akım dalga biçimleri. | 19 |
| Şekil 3.12. Nonlineer yük nedeniyle şebeke gerilimindeki bozulma. | 21 |
| Şekil 3.13. Harmonik kaynaklarının karakteristikleri..... | 22 |
| Şekil 3.14. Sinüs dalgasındaki çentik. | 23 |
| Şekil 3.15. Sinüs dalgasındaki gürültü..... | 23 |
| Şekil 3.16. Ark fırını çalışmasıyla oluşan bir gerilim titreşimi örneği | 24 |
| Şekil 4.1. Bir tam periyottaki sinüs formundaki dalga şekilleri..... | 26 |
| Şekil 4.2. Harmoniklerin gösterimi..... | 27 |
| Şekil 5.1. Bir lineer yükün akım dalga şekli. | 35 |
| Şekil 5.2. Bir nonlineer yükün akım dalga şekli..... | 36 |
| Şekil 5.3. Nonlineer olmayan yükler ile harmonik akım kaynakları..... | 37 |
| Şekil 5.4. Anahtarlama güç kaynağı. | 39 |
| Şekil 5.5. Anahtarlama güç kaynağının akım ve harmonik akım genlikleri..... | 40 |
| Şekil 5.6. Manyetik balastlı floresan lambanın akım dalga formu (a), harmonik spektrumu(b) | 41 |
| Şekil 4.7. Elektronik balastlı floresan lambanın akım dalga formu (a), harmonik spektrumu(b)..... | 42 |
| Şekil 5.8. Akım kaynağı tipi hız kontrol sürücüsünün akım ve gerilim spektrumu. ... | 44 |
| Şekil 5.9. PWM tipi hız kontrol sürücüsünün akım ve gerilim spektrumu..... | 44 |

| | |
|--|----|
| Şekil 5.10. 6-Darbeli DC hız kontrol sürücü..... | 45 |
| Şekil 5.11. PWM'li hız kontrol sürücü..... | 46 |
| Şekil 5.12. Büyük boyutlu AC hız kontrol sürücü..... | 47 |
| Şekil 5.13. PWM'li hız kontrol sürücüsünün hız değişiminin harmoniklere etkisi. ... | 48 |
| Şekil 5.14. Bir ark fırınının gösterimi. | 48 |
| Şekil 5.15. Tipik bir ark fırınının frekans spektrumu a) ilk eritme anında (aktif ark) b) arıtma anında (kararlı ark)..... | 49 |
| Şekil 5.16. DC veya AC güçle beslenen ark fırınlarının gösterimi. | 50 |
| Şekil 5.17. Transformatörlerin mıknatıslanma karakteristiği..... | 51 |
| Şekil 5.18. Uyarlama gerilimi olarak transformatör aşırı uyartım akımının harmonik içeriği | 52 |
| Şekil 5.19. Transformatörün mıknatıslanma akımı ve harmonik spektrumu..... | 53 |
| Şekil 5.20. Tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlama kapasitörün a) temel elemanları, b) gerilim ve dalga akım şekli. | 57 |
| Şekil 5.21. Tristör kontrollü reaktörün temel bileşenin yüzdesi olarak harmonik akımlarının dalga şekli (Harlow 2004) ve spektrumu | 58 |
| Şekil 5.22. Fotovoltaik enerji üretimi blok şeması. | 59 |
| Şekil 5.23. Güç sistemindeki seri rezonans tehlikesi..... | 61 |
| Şekil 5.24. Harmonikli sistemler için transformatörün eşdeğer devresi (n. harmonik için)..... | 65 |
| Şekil 5.25. n. Harmonik için asenkron makinenin eşdeğer devresi..... | 67 |
| Şekil 5.26. Harmoniklerin iletim hatlarıyla telekomünikasyon hatlarının beraber kullanıldığı yerlerdeki etkisi..... | 69 |
| Şekil 5.27. 6 Darbeli harmonik akımların bulunduğu bir sistemde kabloların akım taşıma kapasiteleri..... | 70 |
| Şekil 5.28. Endüktif sistemler için empedansın frekansa bağlı değişimi..... | 77 |
| Şekil 5.29. Bir dağıtım sistemindeki tehlikeli bir paralel rezonans örneği. | 78 |
| Şekil 5.30. Harmonik frekanslarda kapasitör, transformatör ve kaynak endüktansı ile paralel bağlı kabul edildiği şekil a) basitleştirilmiş dağıtım devre şekli b) harmonik kaynağı tarafından görülen rezonans devre şekli. | 79 |
| Şekil 5.31. Transformatör değerine bağlı olarak kapasitörün değerinin değişimine sistemin verdiği frekans cevabı. | 80 |
| Şekil 5.32. Sistemdeki seri rezonans tehlikesi | 82 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 5.33. Harmonikli devrenin frekans cevabı. | 83 |
| Şekil 5.34. Rezistif yükün paralel rezonans üzerine etkisi..... | 86 |
| Şekil 5.35. Üç fazında eşit olarak yüklendiği simetrik şebekelerde nötr iletkeni üzerinden geçen akım..... | 88 |
| Şekil 5.36. Dengesiz üç faz yükteki nötr akımı..... | 88 |
| Şekil 5.37. Üçüncü harmoniğin bulunması halinde nötr hattındaki akım..... | 89 |
| Şekil 5.38. Birden fazla alıcının beslenmesi durumunda PCC'nin belirlenmesi | 105 |
| Şekil 5.39. Üçüncü harmoniğin yoğun olduğu bir sistemde üçgen-yıldız transformatörü üzerinden primer taraftaki akımın dalga şekli | 106 |
| Şekil 5.40. Birden fazla endüstriyel yükün beslendi bir sistemdeki gerilim distorsiyon değerlerinin grafiği ve sistemdeki harmonik bozulmaya sebep olan ve aynı şebekeden beslenen ark fırınlı bir diğer kullanıcının çalışma karakteristiği..... | 108 |
| Şekil 6.1. Doğrultucuların çeşidine göre harmonik distorsiyonun değeri..... | 113 |
| Şekil 6.2. Doğrultucuların türleri ve harmonikli dalga şekilleri..... | 113 |
| Şekil 5.3. Doğrultucuların darbe sayısına göre harmonik spektrumunun değişimi.. | 114 |
| Şekil 6.4. Bir harmonik tıkaçının şekli. | 115 |
| Şekil 6.5. Bir PWM tipi ASD için giriş tıkaçının fonksiyonu olarak harmonik akım distorsiyonunun değişimi grafiği. | 116 |
| Şekil 6.6. Farklı değerlerdeki hat tıkaçının harmonik spektrumuna etkisi. | 117 |
| Şekil 6.6. Giriş transformatörü kVA değerine göre farklı değerlerde boyutlandırılmış ASD için %3'lük hat tıkaçı ve hat tıkaçının olmaması durumu için harmonik akım distorsiyonu değerinin değişimi grafiği | 117 |
| Şekil 6.8. Endüktörün dalga şekline etkisi. | 118 |
| Şekil 6.9. Sürüclerde kullanılan izolasyon transformatörlü 12 darbeleri dönüştürücünün harmonik azaltma etkisi | 119 |
| Şekil 6.11. Zigzag transformatör kullanıldığı ve kullanılmadığı durum için nötr hattının dalga şekli | 120 |
| Şekil 6.10. Zigzag reaktansı | 120 |
| Şekil 6.12. Tipik bir pasif filtre | 121 |
| Şekil 6.13. Pasif filtre için örnek bir devre (tek ayarlı paralel pasif filtre) | 122 |
| Şekil 6.14. Tek ayarlı paralel pasif filtre..... | 124 |
| Şekil 6.15. Tek ayarlı paralel pasif filtre için frekans-empedans ilişkisi. | 125 |
| Şekil 6.16. Çift ayarlı filtre (a), çift ayarlı filtrelerin frekans-empedans ilişkisi (b).127 | |

| | |
|--|-----|
| Şekil 6.17. Yüksek geçiren sönümlü filtreler (a) birinci derece, (b) ikinci derece, (c) üçüncü derece, (d) C tipi | 129 |
| Şekil 6.18. Yüksek geçiren sönümlü paralel pasif filtre için frekans-empedans ilişkisi. | 130 |
| Şekil 6.19. Seri Pasif Filtre Örneği. | 131 |
| Şekil 6.20. Paralel aktif filtrenin prensip şeması. | 133 |
| Şekil 6.21. Seri aktif filtrenin prensip şeması. | 133 |
| Şekil 6.22. Aktif güç filtresinin blok şeması..... | 134 |
| Şekil 7.1. Manevra merkezlerinin kurulu güçleri. | 135 |
| Şekil 7.2. Ölçüm yapılan Konya 2 ve 3 nolu organize sanayisinin trafo tek hat şeması ve fabrikalarda yapılan ölçümlere ait trafo yerleri. | 136 |
| Şekil 7.3. MM1 Gerilim grafiği. | 143 |
| Şekil 7.4. MM1 Akım grafiği. | 143 |
| Şekil 7.5. MM1 Görünür güç grafiği (üç faz toplamı)..... | 143 |
| Şekil 7.6. MM1 Üç faz THD grafiği. | 143 |
| Şekil 7.7. MM1 THD'nin en büyük değerinde olduğu durum için akım-gerilim dalga şekilleri. | 143 |
| Şekil 7.8. MM1 THD'nin en büyük olduğu durum için akım-gerilim harmonik spektrumları. | 143 |
| Şekil 7.9. MM1 Farklı zamanlardaki harmonik spektrumlarının değişimi. | 144 |
| Şekil 7.10. MM1 Farklı zamanlardaki harmonik spektrumlarının değişimi. | 145 |
| Şekil 7.11. MM2 Gerilim grafiği. | 146 |
| Şekil 7.12. MM2 Akım grafiği. | 146 |
| Şekil 7.13. MM2 Görünür güç grafiği (üç faz toplamı)..... | 146 |
| Şekil 7.14. MM2 Üç faz THD grafiği..... | 146 |
| Şekil 7.15. MM2 THD'nin en büyük değerinde olduğu durum için akım-gerilim dalga şekilleri. | 146 |
| Şekil 7.16. MM2 THD'nin en büyük olduğu durum için akım-gerilim harmonik spektrumları. | 146 |
| Şekil 7.17. MM2 Farklı zamanlardaki harmonik spektrumlarının değişimi. | 147 |
| Şekil 7.18. MM3 Gerilim grafiği. | 148 |
| Şekil 7.19. MM3 Akım grafiği. | 148 |
| Şekil 7.20. MM3 Görünür güç grafiği (üç faz toplamı)..... | 148 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 7.21. MM3 Üç faz THD grafiği. | 148 |
| Şekil 7.15. MM3 THD'nin en büyük değerinde olduğu durum için akım-gerilim dalga şekilleri. | 148 |
| Şekil 7.16. MM3 THD'nin en büyük olduğu durum için akım-gerilim harmonik spektrumları. | 148 |
| Şekil 7.24. MM3 Farklı zamanlardaki harmonik spektrumlarının değişimi. | 149 |
| Şekil 7.25. MM6 Gerilim grafiği. | 150 |
| Şekil 7.26. MM6 Akım grafiği. | 150 |
| Şekil 7.27. MM6 Görünür güç grafiği (üç faz toplamı). | 150 |
| Şekil 7.28. MM6 Üç faz THD grafiği. | 150 |
| Şekil 7.29. MM6 THD'nin en büyük değerinde olduğu durum için akım-gerilim dalga şekilleri. | 150 |
| Şekil 7.30. MM6 THD'nin en büyük olduğu durum için akım-gerilim harmonik spektrumları. | 150 |
| Şekil 7.31. MM6 Farklı zamanlardaki harmonik spektrumlarının değişimi. | 151 |
| Şekil 7.32. Döküm fabrikası 1 gerilim grafiği. | 152 |
| Şekil 7.33. Döküm fabrikası 1 akım grafiği. | 152 |
| Şekil 7.34. Döküm fabrikası 1 görünür güç grafiği (üç faz toplamı). | 152 |
| Şekil 7.35. Döküm fabrikası 1 üç faz THD grafiği. | 152 |
| Şekil 7.36. Döküm fabrikası 1 THD'nin en büyük değerinde olduğu durum için akım-gerilim dalga şekilleri. | 152 |
| Şekil 7.37. Döküm fabrikası 1 THD'nin en büyük olduğu durum için akım-gerilim harmonik spektrumları. | 152 |
| Şekil 7.38. Döküm fabrikası 1 farklı zamanlardaki harmonik spektrumlarının değişimi. | 153 |
| Şekil 7.39. Plastik fabrikası 1 gerilim grafiği. | 154 |
| Şekil 7.40. Plastik fabrikası 1 akım grafiği. | 154 |
| Şekil 7.41. Plastik fabrikası 1 görünür güç grafiği (üç faz toplamı). | 154 |
| Şekil 7.42. Plastik fabrikası 1 Üç faz THD grafiği. | 154 |
| Şekil 7.43. Plastik fabrikası 1 THD'nin en büyük değerinde olduğu durum için akım-gerilim dalga şekilleri. | 154 |
| Şekil 7.44. Plastik fabrikası 1 THD'nin en büyük olduğu durum için akım-gerilim harmonik spektrumları. | 154 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 7.45. Plastik fabrikası 1 farklı zamanlardaki harmonik spektrumlarının değişimi. | 155 |
| Şekil 7.46. Plastik fabrikası 2 gerilim grafiği. | 156 |
| Şekil 7.47. Plastik fabrikası 2 akım grafiği. | 156 |
| Şekil 7.48. Plastik fabrikası 2 görünür güç grafiği (üç faz toplamı). | 156 |
| Şekil 7.49. Plastik fabrikası 2 üç faz THD grafiği. | 156 |
| Şekil 7.50. Plastik fabrikası 2 THD'nin en büyük değerde olduğu durum için akım-gerilim dalga şekilleri. | 156 |
| Şekil 7.51. Plastik fabrikası 2 THD'nin en büyük olduğu durum için akım-gerilim harmonik spektrumları. | 156 |
| Şekil 7.52. Plastik fabrikası 2 farklı zamanlardaki harmonik spektrumlarının değişimi. | 157 |
| Şekil 7.53. Döküm fabrikası 2 gerilim grafiği. | 158 |
| Şekil 7.54. Döküm fabrikası 2 tek faz için gerilim THD değişim grafiği. | 158 |
| Şekil 7.55. Döküm fabrikası 2 R,S,T fazları akım grafikleri. | 158 |
| Şekil 7.56. Döküm fabrikası 2 R,S,T fazları akım THD değişim grafikleri. | 158 |
| Şekil 7.57. Döküm fabrikası 2 R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım dalga şekilleri. | 159 |
| Şekil 7.58. Döküm fabrikası 2 R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım harmonik spektrumları. | 159 |
| Şekil 7.59. Döküm fabrikası 2 tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki gerilim dalga şekli. | 159 |
| Şekil 7.60. Döküm fabrikası 2 tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerdeki gerilim harmonik spektrumu. | 159 |
| Şekil 7.61. Döküm fabrikası 2 nötr hattı için THD değişim grafiği. | 160 |
| Şekil 7.62. Döküm fabrikası 2 fabrikası nötr hattı için akımın RMS değeri değişim grafiği. | 160 |
| Şekil 7.63. Döküm fabrikası 2 nötr hattı için THD'nin en yüksek olduğu değerdeki akım harmonik spektrumu. | 160 |
| Şekil 7.64. Döküm fabrikası 2 nötr hattı için THD'nin en yüksek olduğu değerdeki akım dalga şekli. | 160 |
| Şekil 7.65. Döküm fabrikası 3 gerilim grafiği. | 161 |
| Şekil 7.66. Döküm fabrikası 3 tek faz için gerilim THD değişim grafiği. | 161 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 7.67. Döküm fabrikası 3 R,S,T fazları akım grafikleri. | 161 |
| Şekil 7.68. Döküm fabrikası 3 R,S,T fazları akım THD değişim grafikleri. | 161 |
| Şekil 7.69. Döküm fabrikası 3 R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım dalga şekilleri. | 162 |
| Şekil 7.70. Döküm fabrikası 3 R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım harmonik spektrumları. | 162 |
| Şekil 7.71. Döküm fabrikası 3 tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki gerilim dalga şekli. | 162 |
| Şekil 7.72. Döküm fabrikası 3 tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki gerilim harmonik spektrumu. | 162 |
| Şekil 7.73. Döküm fabrikası 3 nötr hattı için THD değişim grafiği. | 163 |
| Şekil 7.74. Döküm fabrikası 3 fabrikası nötr hattı için akımın RMS değeri değişim grafiği. | 163 |
| Şekil 7.75. Döküm fabrikası 3 nötr hattı için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım harmonik spektrumu. | 163 |
| Şekil 7.76. Döküm fabrikası 3 nötr hattı için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım dalga şekli. | 163 |
| Şekil 7.77. Gıda fabrikası gerilim grafiği. | 164 |
| Şekil 7.78. Gıda fabrikası tek faz için gerilim THD değişim grafiği. | 164 |
| Şekil 7.79. Gıda fabrikası R,S,T fazları akım grafikleri. | 164 |
| Şekil 7.80. Gıda fabrikası R,S,T fazları akım THD değişim grafikleri. | 164 |
| Şekil 7.81. Gıda fabrikası R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım dalga şekilleri. | 165 |
| Şekil 7.82. Gıda fabrikası R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım harmonik spektrumları. | 165 |
| Şekil 7.83. Gıda fabrikası tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki gerilim dalga şekli. | 165 |
| Şekil 7.84. Gıda fabrikası tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki gerilim harmonik spektrumu. | 165 |
| Şekil 7.85. Gıda fabrikası nötr hattı için THD değişim grafiği. | 166 |
| Şekil 7.86. Gıda fabrikası fabrikası nötr hattı için akımın RMS değeri değişim grafiği. | 166 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 7.87. Gıda fabrikası nötr hattı için THD'nin en yüksek olduğu değerdeki akım harmonik spektrumu. | 166 |
| Şekil 7.88. Gıda fabrikası nötr hattı için THD'nin en yüksek olduğu değerdeki akım dalga şekli..... | 166 |
| Şekil 7.89. Döküm fabrikası 4 gerilim grafiği..... | 167 |
| Şekil 7.90. Döküm fabrikası 4 tek faz için gerilim THD değişim grafiği..... | 167 |
| Şekil 7.91. Döküm fabrikası 4 R,S,T fazları akım grafikleri. | 167 |
| Şekil 7.92. Döküm fabrikası 4 R,S,T fazları akım THD değişim grafikleri. | 167 |
| Şekil 7.93. Döküm fabrikası 4 R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım dalga şekilleri..... | 168 |
| Şekil 7.94. Döküm fabrikası 4 R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım harmonik spektrumları | 168 |
| Şekil 7.95. Döküm fabrikası 4 tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki gerilim dalga şekli..... | 168 |
| Şekil 7.96. Döküm fabrikası 4 tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerdeki gerilim harmonik spektrumu. | 168 |
| Şekil 7.97. Tekstil fabrikası gerilim grafiği. | 169 |
| Şekil 7.98. Tekstil fabrikası tek faz için gerilim THD değişim grafiği. | 169 |
| Şekil 7.99. Tekstil fabrikası R,S,T fazları akım grafikleri. | 169 |
| Şekil 7.100. Tekstil fabrikası R,S,T fazları akım THD değişim grafikleri. | 169 |
| Şekil 7.101. Tekstil fabrikası R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım dalga şekilleri..... | 170 |
| Şekil 7.102. Tekstil fabrikası R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım harmonik spektrumları. | 170 |
| Şekil 7.103. Tekstil fabrikası tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki gerilim dalga şekli..... | 170 |
| Şekil 7.104. Tekstil fabrikası tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerdeki gerilim harmonik spektrumu. | 170 |
| Şekil 7.105. Tekstil fabrikası 3 nötr hattı için THD değişim grafiği..... | 171 |
| Şekil 7.106. Tekstil fabrikası fabrikası nötr hattı için akımın RMS değeri değişim grafiği..... | 171 |
| Şekil 7.107. Tekstil fabrikası nötr hattı için THD'nin en yüksek olduğu değerdeki akım harmonik spektrumu..... | 171 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 7.108. Tekstil fabrikası nötr hattı için THD'nin en yüksek olduğu değerdeki akım dalga şekli. | 171 |
| Şekil 7.109. Döküm fabrikası 5 gerilim grafiği. | 172 |
| Şekil 7.110. Döküm fabrikası 5 tek faz için gerilim THD değişim grafiği. | 172 |
| Şekil 7.111. Döküm fabrikası 5 R,S,T fazları akım grafikleri. | 172 |
| Şekil 7.112. Döküm fabrikası 5 R,S,T fazları akım THD değişim grafikleri. | 172 |
| Şekil 7.113. Döküm fabrikası 5 R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım dalga şekilleri. | 173 |
| Şekil 7.114. Döküm fabrikası 5 R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım harmonik spektrumları. | 173 |
| Şekil 7.115. Döküm fabrikası 3 tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki gerilim dalga şekli. | 173 |
| Şekil 7.116. Döküm fabrikası 3 tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerdeki gerilim harmonik spektrumu. | 173 |
| Şekil 7.117. Döküm fabrikası 3 nötr hattı için THD değişim grafiği. | 174 |
| Şekil 7.118. Döküm fabrikası 3 fabrikası nötr hattı için akımın RMS değeri değişim grafiği. | 174 |
| Şekil 7.119. Sistemin elektriksel modeli. | 175 |
| Şekil 7.120. Manevra merkezinin aktif ve reaktif güçleri ile birlikte güç faktörlerinin ölçümü. | 180 |
| Şekil 7.121. MM1'den beslenen trafolar. | 181 |
| Şekil 7.122. TR10 trafosundan beslenen fabrikalar. | 182 |
| Şekil 7.123. Dokum6 fabrikasının içindeki yük ve harmonik kaynağı. | 182 |
| Şekil 7.124. Fabrikalardaki harmoniklerin simülasyondaki eşdeğer devresi. | 183 |
| Şekil 7.124. Akım ve gerilim dalga şekilleri ve verilerin workspace'e gönderilmesi. | 183 |
| Şekil 7.126. Workspace'e gönderilen verilerin fourier analizinin yapılışı (TR10 AG akım dalga şekli). | 184 |
| Şekil 7.127. MM1 Gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 185 |
| Şekil 7.128. MM1 Akım grafiği ve harmonik spektrumu. | 185 |
| Şekil 7.129. MM2 Gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 185 |
| Şekil 7.130. MM2 Akım grafiği ve harmonik spektrumu. | 185 |
| Şekil 7.131. MM3 Gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 185 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 7.132. MM3 Akım grafiği ve harmonik spektrumu..... | 185 |
| Şekil 7.133. MM6 Gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 186 |
| Şekil 7.134. MM6 Akım grafiği ve harmonik spektrumu..... | 186 |
| Şekil 7.135. Dokum2 ve Dokum6 devredeyken Dokum4'ün gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 187 |
| Şekil 7.136. Dokum2 ve Dokum6 devredeyken Dokum4'ün akım grafiği ve harmonik spektrumu. | 187 |
| Şekil 7.137. Dokum2 ve Dokum6 devredeyken Dokum6'nın gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 187 |
| Şekil 7.138. Dokum2 ve Dokum6 devredeyken Dokum6'nın akım grafiği ve harmonik spektrumu. | 187 |
| Şekil 7.139. Dokum2 ve Dokum6 devredeyken lineer yükün gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 187 |
| Şekil 7.140. Dokum2 ve Dokum6 devredeyken lineer yükün akım grafiği ve harmonik spektrumu. | 187 |
| Şekil 7.141. Dokum2 ve Dokum6 devredeyken Dokum2'nin gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 188 |
| Şekil 7.142. Dokum2 ve Dokum6 devredeyken Dokum2'nin akım grafiği ve harmonik spektrumu. | 188 |
| Şekil 7.143. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla MM1'in gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 188 |
| Şekil 7.144. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla MM1'in akım grafiği ve harmonik spektrumu. | 188 |
| Şekil 7.145. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla MM2'nin gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 188 |
| Şekil 7.146. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla MM2'nin akım grafiği ve harmonik spektrumu. | 188 |
| Şekil 7.147. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla MM3'ün gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 189 |
| Şekil 7.148. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla MM3'ün akım grafiği ve harmonik spektrumu. | 189 |
| Şekil 7.149. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla MM6'nın gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 189 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 7.150. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla MM6'nın akım grafiği ve harmonik spektrumu. | 189 |
| Şekil 7.151. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla Dokum4'ün gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 189 |
| Şekil 7.152. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla Dokum4'ün akım grafiği ve harmonik spektrumu. | 189 |
| Şekil 7.153. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla Dokum6'nın gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 190 |
| Şekil 7.154. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla Dokum6'nın akım grafiği ve harmonik spektrumu. | 190 |
| Şekil 7.155. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla Lineer Yükün gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 190 |
| Şekil 7.156. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla Lineer Yükün akım grafiği ve harmonik spektrumu. | 190 |
| Şekil 7.157. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla MM1'in gerilim grafiği ve harmonik spektrumu..... | 191 |
| Şekil 7.158. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla MM1'in akım grafiği ve harmonik spektrumu..... | 191 |
| Şekil 7.159. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla MM2'nin gerilim grafiği ve harmonik spektrumu..... | 191 |
| Şekil 7.160. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla MM2'nin akım grafiği ve harmonik spektrumu..... | 191 |
| Şekil 7.161. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla MM3'ün gerilim grafiği ve harmonik spektrumu..... | 191 |
| Şekil 7.162. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla MM3'ün akım grafiği ve harmonik spektrumu..... | 191 |
| Şekil 7.163. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla MM6'nın gerilim grafiği ve harmonik spektrumu..... | 192 |
| Şekil 7.164. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla MM6'nın akım grafiği ve harmonik spektrumu..... | 192 |
| Şekil 7.165. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla Dokum4'ün gerilim grafiği ve harmonik spektrumu..... | 192 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 7.166. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla Dokum4'ün akım grafiği ve harmonik spektrumu..... | 192 |
| Şekil 7.167. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla Lineer Yükün gerilim grafiği ve harmonik spektrumu..... | 192 |
| Şekil 7.168. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla Lineer Yükün akım grafiği ve harmonik spektrumu..... | 192 |
| Şekil 7.169. Dyn1 bağlantı grubu için MM1 gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 193 |
| Şekil 7.170. Dyn1 bağlantı grubu için MM1 akım grafiği ve harmonik spektrumu. | 193 |
| Şekil 7.171. Dyn1 bağlantı grubu için MM2 gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 194 |
| Şekil 7.172. Dyn1 bağlantı grubu için MM2 akım grafiği ve harmonik spektrumu. | 194 |
| Şekil 7.173. Dyn1 bağlantı grubu için MM3 gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 194 |
| Şekil 7.174. Dyn1 bağlantı grubu için MM3 akım grafiği ve harmonik spektrumu. | 194 |
| Şekil 7.175. Dyn1 bağlantı grubu için MM6 gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 194 |
| Şekil 7.176. Dyn1 bağlantı grubu için MM6 akım grafiği ve harmonik spektrumu. | 194 |
| Şekil 7.177. Yyn bağlantı grubu için MM1 gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 195 |
| Şekil 7.178. Yyn bağlantı grubu için MM1 akım grafiği ve harmonik spektrumu. . | 195 |
| Şekil 7.179. Yyn bağlantı grubu için MM2 gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 195 |
| Şekil 7.180. Yyn bağlantı grubu için MM2 akım grafiği ve harmonik spektrumu. . | 195 |
| Şekil 7.181. Yyn bağlantı grubu için MM3 gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 195 |
| Şekil 7.182. Yyn bağlantı grubu için MM3 akım grafiği ve harmonik spektrumu. . | 195 |
| Şekil 7.183. Yyn bağlantı grubu için MM6 gerilim grafiği ve harmonik spektrumu. | 196 |

Şekil 7.184. Yyn bağlantı grubu için MM6 akım grafiği ve harmonik spektrumu. .196

TABOLAR LİSTESİ

| | |
|---|-----|
| Tablo 3.1. Güç sistemi elektromanyetik olay karakteristikleri ve kategorileri | 11 |
| Tablo 4.1.Çeşitli simetri durumlarında fourier katsayıları..... | 30 |
| Tablo 5.1. Bir ark fırınına ait harmonik akım değerleri (Temel bileşenin yüzdesi) ... | 49 |
| Tablo 5.2. Mıknatıslanma akımlarının oranı. | 54 |
| Tablo 5.3. Manyetik endüksiyonu ortalama 16000 gauss olan soğukta haddelenmiş ve kristalleri yönlendirilmiş bir transformatörde mıknatıslanma akımının harmoniklerinin temel harmoniğe oranı..... | 55 |
| Tablo 5.4. Sıcakta haddelenmiş yüksek alaşımlı saçlardan imal edilmiş bir transformatörde mıknatıslanma akımının harmoniklerinin temel harmoniğe oranları | 55 |
| Tablo 5.5. Darbeli bir dönüştürücüyle bağlantılı durumda harmonik karakteristikleri ve stator harmoniği ile harmonik dönüş yönleri..... | 66 |
| Tablo 5.6. Generatörler için akım distorsiyon sınırlamaları | 67 |
| Tablo 5.7. 3. Harmonik seviyelerine göre düzeltme faktörleri..... | 90 |
| Tablo 5.8. IEEE-519 Gerilim sınırları | 92 |
| Tablo 5.9. Dağıtım sistemleri için akım bozulma sınırları..... | 94 |
| Tablo 5.10. A sınıfı donanımlar için harmonik sınır değerleri..... | 95 |
| Tablo 5.11. TS EN 61000-3-2 yük sınıfları | 95 |
| Tablo 5.12. B sınıfı donanım için harmonik sınır değerleri. | 96 |
| Tablo 5.13. C sınıfı donanım için harmonik sınır değerleri. | 96 |
| Tablo 5.14. D sınıfı donanım için harmonik sınır değerleri..... | 97 |
| Tablo 5.15. Copper Development Assosiation'ın gerilim dalgalanması finansal kayıp araştırması | 111 |
| Tablo 6.1: Filtrelerin Karşılaştırılması..... | 132 |
| Tablo 7.1. Manevra merkezleri arasındaki hatlar ve bunlara ait değerler..... | 137 |
| Tablo 7.2.TEİAŞ ana besleme kaynağına ait değerler..... | 176 |
| Tablo 7.3. Dyn1,Dyn11 ve Yyn bağlantı gruplu dağıtım transformatörlerinin değerleri..... | 176 |
| Tablo 7.4. Anma üst gerilim seviyelerine göre % u_k değerleri. | 177 |
| Tablo 7.5. Anma güçlerine göre % u_r değerleri..... | 178 |
| Tablo 7.6. Anma güçlerine göre % u_k değerleri. | 178 |

| | |
|--|-----|
| Tablo 7.7. Manevra merkezleri arasında kullanılan kablolar için direnç ve endüktans değerleri..... | 180 |
| Tablo 7.8. Hat mesafelerine göre omik direnç ve endüktans değerleri..... | 181 |
| Tablo 7.9. Dokum2 ve Dokum6 fabrikalarının devreden çıkarılmasıyla dağıtım şebekesindeki diğer fabrikalara ve manevra merkezlerinin THD değerlerine etkisi. | 193 |
| Tablo 7.10. Transformatörler bağlantı gruplarının değiştirilmesiyle manevra merkezlerinden elde edilen THD değerleri. | 196 |
| Tablo 7.11. Simülasyonda kullanılan transformatörlerin referans empedansları ve artırılmış değerleri..... | 196 |
| Tablo 7.12. Trafo empedanslarının artırılmasıyla elde edilen değerler. | 197 |
| Tablo 7.13. Hat empedansındaki % 50'lik bir artışın şebeke harmoniklerine etkisi. | 197 |
| Tablo 7.14. Manevra merkezlerinin birbirleri üzerindeki % THD değerleri. | 198 |

SİMGELER

| | |
|-----------|---|
| Hz | : Hertz |
| ns | : Nano saniye |
| μ s | : Mikro saniye |
| ms | : Mili saniye |
| pu | : Birim Değer |
| Va1 | : Pozitif Sequence |
| Va2 | : Negatif Sequence |
| Va0 | : Sıfır Sequence |
| fn n. | : Harmonik Frekansı |
| A0 | : Ortalama Değer Genlik |
| f1 | : 1. Harmonik Frekansı |
| i(t) | : Harmonik Akım Ani Değeri |
| v(t) | : Harmonik Gerilim Ani Değeri |
| In | : n. Harmonik Akım Etkin Değeri |
| Vn | : n. Harmonik Gerilim Etkin Değeri |
| Imn | : n. Harmonik Akım Tepe Değeri |
| Vmn | : n. Harmonik Gerilim Tepe Değeri |
| Rn | : n. Harmonik Frekansın Direnci |
| X_L | : Endüktif Endüktans |
| X_C | : Kapasitif Endüktans |
| hr | : Ana Frekansın Katı Olarak Rezonans Frekansı |
| kVAsc | : Çalışma Noktasında Kısa Devre Akımı |
| kVARc | : Sistem Geriliminde Kapasitör Oranı |
| Zg | : Generatörün Temel Bileşen Empedansı |
| Zgn | : n. Harmonik için Generatör Empedansı |
| jx'' | : n. Harmonik için Generatör Subtransient reaktansı |
| R1 | : Motorun Stator Sargı Direnci |
| L1 | : Motorun Kaçak Reaktansı |
| R2' | : Motorun Statora indirgenmiş Rotor Direnci |
| L2' | : Motorun Statora indirgenmiş Kaçak Reaktansı |
| Rm | : Motorun Bosta Esdeğer Direnci |
| Lm | : Motorun Miknatıslanma Reaktansı |
| s | : Kayma |
| n1 | : Stator Döner Alanının Senkron Devir Sayısı |
| n2 | : Rotorun Devir Sayısı |
| Rp | : Transformator Primer Sargı Direnci |
| X_P | : Transformator Primer Kaçak Reaktansı |
| R_s' | : Transformator Primere indirgenmiş Sekonder Sargı Direnci |
| X_s' | : Transformator Primere indirgenmiş Kaçak Reaktansı |
| R_{FE} | : Transformator Demir Kayıplarını Temsil Demir Çekirdek Direnci |
| Im | : Miknatıslanma Akımı |
| k(n) | : n. Harmonik için Deri Etkisi Katsayısı |
| Bh | : Harmonik genliği |
| SSC | : Ortak birleşme noktasında kaynak kısa-devre gücü |
| ST | : Üç fazlı transformatorün görünür gücü |
| I_h/I_1 | : Harmonik akım bozulması |

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun en temel ihtiyaçlarından biri olan elektrik enerjisi, geçmişten günümüze kadar farklı yerlerdeki farklı kaynaklardan elde edilip gerekli yerlerde kullanılmak üzere en az kayıpla iletmeye çalışılmıştır. Elektriğin kullanıcılara iletilmesi aşamalarında en önemli nokta üretilen elektrik enerjisini en az kayıpla ve en kaliteli bir şekilde kullanıcılara iletmektir. Bu sebepten dolayı elektrik enerji kalitesi kavramı karşımıza çıkmaktadır. Enerji kalitesi; elektrik enerjisinin sürekliliği, akım ve gerilim dalgalarının sinüs formuna yakınlığı, $\cos \phi$ değerinin 1'e yakınlığı, frekansın sabitliği v.b. tanımlamaları içerir. Bir ülkede enerji kalitesinin yüksek seviyelerde oluşu o ülkenin gelişmişlik seviyesi için bir kriter teşkil etmektedir.

Güç sistem harmonikleri konusu ilk olarak 1985'te J. Wiley&Sons tarafından yayımlanan akım ve gerilim harmoniklerin varlığını, etkilerini, çıkış nedenlerini, standartlarını, ölçüm metotlarını, filtrelenmesi ve davranışlarının anlaşılmasını kapsayan bir kitapta ele alınmıştır. Günümüze kadar elektriğin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılmasında kullanılan güç elektronik devrelerinin sayılarının artmasıyla güç sistemlerindeki harmonik problemleri de artmıştır. Dolayısıyla harmoniklerin güç sistemlerine verdiği zararların azaltılmasına yönelik çalışmalarda her geçen gün biraz daha önem kazanmıştır. Ve güç sistemlerinde harmonik analizi artık tasarım ve planlamanın kaçınılmaz bir parçası haline gelmiştir (Arrillaga 1997).

Elektrik enerji sistemlerinde akım, gerilim gibi büyüklüklerin dalga şekli temel frekanslı sinüzoidal bir değişime sahip olmalıdır. Bu değişim için sistemin sinüzoidal kaynakla beslenmesi ve lineer yüklerle yüklenmesi gereklidir. Ancak, güç sistemine bağlanan ve sayıları gittikçe artan konverterler, ark fırınları, güç elektroniği elemanları, statik VAR kompanzatörleri gibi nonlineer yükler, sistemdeki akım ve gerilim büyüklüklerinin nonsinüzoidal olmasına, yani harmonik distorsiyonuna neden olabilirler. Nonlineer yüklerin güçleri düşük değerde olsa bile, yine de geriliminin dalga şeklini bozarlar. Enerji sisteminde çok sayıda düşük güçlü nonlineer yük bulunduğu düşünülürse, ek kayıpların, harmonik gerilimlerin ve distorsiyon değerlerinin yüksek değerlere ulaşması kaçınılmaz bir gerçektir.

Harmonikler; motorlar, generatörler, kondansatörler, transformatörler ve enerji iletim hatlarında ilave kayıplara neden olurlar. Bazı durumlarda da harmonikler, güç sistem elemanlarının zarar görmesine veya devre dışı kalmalarına yol açabilirler. Ayrıca harmonikler nedeniyle sistemde çeşitli frekansta akım ve gerilim bileşenleri bulunacağından, rezonans olayının meydana gelme olasılığı artar. Rezonans sonucu oluşabilecek aşırı akım ve gerilimler, işletmedeki elemanlara büyük zararlar verirler (Kocatepe ve ark. 2003).

Elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen ana faktörlerden biri olan temel frekanslı sinüsel dalga şekli, devredeki elemanların özelliğine ve kaynağın durumuna göre sinüsel özelliğinden uzaklaşır. Sinüsel olmayan dalga olarak isimlendirilen bu dalga biçimi temel frekanslı sinüsel dalga ile frekans ve genlikleri farklı diğer sinüsel dalgaların toplamından oluşmaktadır. Temel sinüsel dalga dışındaki dalga şekilleri harmonik olarak adlandırılmaktadır. Sinüsel olmayan dalga şekilleri fourier serileri ile ifade edilebilmektedir. Periyodik bir sinyal, çeşitli genlik ve frekanstaki birçok sinüs sinyalinin toplamı şeklinde ifade edilebilir. Bu şekilde elde edilen seri fourier serisi olarak adlandırılırken, serinin elemanları fourier bileşenlerini göstermektedir. Serideki en düşük frekanslı sinüs sinyali birinci harmonik (temel dalga), diğerleri ise harmonik bileşenler adını almaktadır. Fourier serisi elde etme işlemi dalga analizi veya fourier analizi olarak tanımlanır.

Fourier serisinin katsayıları analitik yöntem, grafik yöntem ve ölçme yöntemi ile bulunabilmektedir. Ölçme yöntemi ile fourier analizinin yapılması için harmonik analiz ölçüm cihazları kullanılır. Harmonik analiz cihazı, analizi yapılacak sinyali veri toplama kartı ile işlenebilecek şekle dönüştüren sensörler, sensörlerden alınan verileri sayısal bilgiye dönüştürerek bilgisayara aktaran veri toplama kartları ve bilgisayar yazılımından oluşmaktadır. Bu analiz cihazları ile yapılan ölçümlerle harmonik büyüklükler, akım, gerilim, güç, güç faktörü değerleri, harmonik bileşenlerin genlik ve faz açıları hesaplanabilmektedir. Akım ve gerilim için harmonik bileşenler frekans spektrumları ile gösterilmektedir.

Harmonik analiz cihazları ile yapılan analizlerde sinyalin örneklenmiş verileri kullanılarak hızlı fourier dönüşümü yöntemi ile harmonik bileşenler hesaplanmaktadır. Hızlı fourier dönüşümü, ayrık fourier dönüşümünün faz faktörünün simetri ve periyodiklik özelliğini kullanarak analiz süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır.

Analiz sonucunda elde edilen harmonik büyüklük değerleri ile standartlarla belirli izin verilen harmonik sınır değerleri karşılaştırılmakta ve harmonik standartlarına uygunluğu tespit edilebilmektedir (Şenyurt 2006).

Harmonik standart sınırlarını aşan sistemlerde hassas cihazların harmoniklerden etkilenmemesi ve harmonik distorsiyon değerini azaltmak için hat reaktansları, harmonik filtreleri, k-faktör transformatörleri vb. gibi önlemler alınabilir (Robert 1994).

Sistem için en uygun çözüm yönteminin uygulanabilmesi ve rezonans frekanslarının belirlenmesi için sistemde detaylı bir harmonik analizinin yapılması gerekir. Ve bu analiz yapıldıktan sonra sistemde harmoniklerin etkilerinin azaltılması için en uygun filtre optimizasyonunun uygulanması gerekir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Elektrik tesislerinde büyük bir problem olarak karşımıza çıkan harmonik problemleri ve çözümleriyle ilgili birçok çalışma yapılmıştır.

Aydın (2007) tarafından yapılan tez çalışmasında, örnek ölçüm bölgesi olarak Sakarya Üniversitesi yerleşkesi seçilmiş olup beş ayrı transformatör merkezinde ölçüm yapılmış, sistemin gereksinimleri, yeni yönetmelikle birlikte karşı karşıya kalınacak problemler belirtilmiş, bu transformatör merkezlerinden birine kompanzasyon ve enerji analizörü görevi yapan reaktif güç kontrol rölesi yerleştirilmiş, uzaktan izleme ve anında veri alabilmek amacıyla cihaz yerel alan ağı üzerinden görüntülenebilir hale getirilmiştir. Sakarya Üniversitesi ve bağlı birimlerine ait 2006 yılının tüm elektrik faturaları incelenmiş, 2008 yılı ve sonrasına yönelik, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'nca yürürlüğe alınması planlanan yönetmelik gereği cezai uygulamaya maruz kalması muhtemel trafo merkezleri belirlenmiştir. Sakarya Üniversitesi'nin yakın gelecekteki enerji politikası değerlendirilmiştir.

Varetsky ve Nakonechny (2007) yaptıkları çalışmalarında, radyal güç dağıtım sistemlerinde, nonlinear yüklerde, sınırlı sayıda ölçüm cihazıyla harmonik kaynaklarının denetimi için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntemin en önemli yanı, sistemin bazı düğüm noktalarında yapılan sınırlı sayıdaki ölçümlerle güç sistemin davranışının belirlenebilmesidir. Güç sistemden simüle edilmiş veriler üzerinde yapılan bir yapay sinir ağı mimarisinin harmonik kaynaklarının denetiminde kullanılabileceği gösterilmiştir. Makalede, elde edilen bulgulardan ileride yapay sinir ağı mimarisiyle daha kompleks radyal şebekelerin davranışlarının bulunabileceğine değinilmiştir.

İlaslaner (2006) tarafından yapılan tez çalışmasında, halen TEİAŞ tarafından kullanılan bir enerji nakil hattının (Akdağmadeni–Tokat Enerji Nakil Hattının) simülasyonu yapılmış, enerji kalitesi için gerekli uygulamalar hat üzerinde denenmiş ve özellikle elektriksel bileşenler için kararlılık çalışmaları sağlanmıştır. Tezde enerji

kalitesi için karma bir filtre kullanılmıştır. Bu filtre aktif ve pasif filtrelerden oluşmaktadır. Üretimden tüketim noktasına kadar enerji sistemindeki kararlılık için gerekli seri ve paralel kompanzasyonlar yapılmış, sonuç olarak harmonik bileşenlerde azalma sağlanmış ve enerji kalitesindeki artış gözlemlenerek örnek hat için raporlanmıştır.

Adak (2003) yapmış olduğu çalışmada, harmonik distorsiyonunun azaltılması hedeflenmiş olup, üçüncü harmonik enjekte yöntemi kullanılmıştır. Enerji sistemlerinde çokça kullanılan 3 fazlı tam dalga doğrultucunun harmoniklerinin giderilmesi kullanılan bu yöntem ile sağlanmıştır. Konu ile ilgili sayısal uygulama gerçekleştirilerek çeşitli tetikleme açıları için toplam harmonik distorsiyon değeri hem analitik yöntemle hem de MATLAB programı ile elde edilmiştir. Harmoniklerle ilgili tanımlar ve matematiksel bağıntılar verilmiş, harmoniklere sebep olan elemanlar genel olarak incelenmiştir ve harmoniklerin güç sistemine etkileri verilmiştir. Ayrıca harmoniklerin giderilme metotları, üçüncü harmonik akımını enjekte ederek harmonik distorsiyonunun azaltılması incelenmiş ve konu ile ilgili sayısal uygulamalar yapılmıştır.

Surapong ve arkadaşları (2006) tarafından yapılan çalışmada, Bangkok (Tayland'ın başkenti) yakınlarında, ark fırınlarının termal verimliliği, voltaj düşmesi ve harmonik etkileri incelenmiştir. Ark fırınlarının performansının artırılması, harmonik ve voltaj düşmesi etkilerinin azaltılması için çalışmalar yapılmıştır. Ark fırınlarının elektriksel ve termik karakteristiklerini içeren bir dinamik model geliştirilmiştir. Bu model ark fırınlarının yoğun kullanıldığı yerlerde önemli gelişmeler kat edilebilmesi için önem taşımaktadır. Elektrik şebekesindeki harmoniklerin ve gerilim düşmelerinin etkileri ark fırınlarıyla aynı hattan beslenen diğer bir fabrikadaki ölçümlerle incelenmiştir. Simülasyon çalışmalarıyla da ark fırınlarını işleten fabrikada filtre kullanıldığı durumda aynı hattan beslenen diğer fabrikadaki harmonik sonuçlar incelenmiştir.

Jayasinghe ve arkadaşları (2003) yılındaki çalışmalarında, yük akımı ve geriliminin dağıtım transformatörleri üzerindeki etkileri, harmonik etkilerinin hesaplanması için standart yollar, harmonikli ortamlarda düzgün çalışan K-Faktör

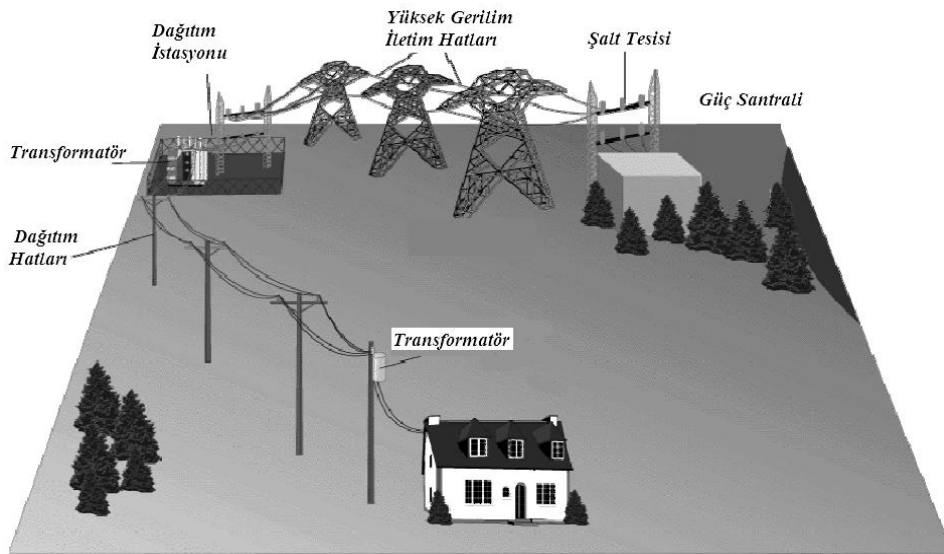
transformatörün dizaynı ve geliştirilmesi incelenmiştir. Bilindiği gibi harmonikli ortamlarda dağıtım transformatörlerinde kayıplar artar, transformatör ısınır ve ömrü kısılır. K-Faktör metodu harmonik kayıpların eklenmesiyle, toplam kayıpların ısı etkilerinin tahmin edilmesiyle yeni transformatör dizaynıdır. K-Faktör dizaynı, sarımların sarımında paralel iletken kullanımı, daha düşük akı yoğunluğu gibi yeni dizayn tekniklerini içermektedir. Tahmini sonuçlar yapılan gerçek uygulamalı sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

3. ENERJİ KALİTESİ VE ENERJİ KALİTESİNE İLİŞKİN PROBLEMLER

Vazgeçilmez bir enerji kaynağı olan elektrik enerjisini üreten, ileten ve dağıtan kuruluşların görevi; kesintisiz, ucuz ve kaliteli bir hizmeti tüketicilerine sunmaktır. Güç kalitesi kavramında amaç; sabit şebeke frekansında olan sabit ve sinüzoidal biçimli kullanıcı gerilimidir (İlaslaner 2006).

Güç kalitesi, şebekenin tanımlanan ucunda gerilimin genlik ve frekans değerlerinin anma değerlerini koruması ve gerilim dalga şeklinin sinüs biçimini koruması olarak tanımlanır. Tersine, gerilim genliğinin dalgalanması, kesintiler, darbesel değişimler, frekansın değişimi, kırpışma ve üç faz dengesizlikleri başlıca güç kalitesizliği biçimleri olarak görülür. Genelde güç kalitesi şebekeden enerji çeken kullanıcılar (yükler) tarafından bozulur ve gerilim dalga şeklinin sinüs biçiminden sapması ve bozulmalar başta harmonikler olmak üzere istenmeyen etkiler gösterir ve Fourier analizi ile modellenebilmektedirler (Sevgi 2005).

Yüksek derecede hassas bir yapıya sahip bilgisayar kontrollü ekipmanların giderek yük kısmında daha fazla yer almasıyla tüketicilere sağlanan elektrik gücünün kalitesini gözden geçirmede başlıca etken olmuştur. Günümüzde, güç kalitesi (PQ) çok hassas, sıkı disiplin isteyen, güç ve güç elektroniği mühendislerinin her ikisiyle beraber dijital işaret işleme, yazılım mühendisliği, şebekeçilik konularını içeren bir



Şekil 3.1. Klasik elektrik enerjisi üretim, iletim, dağıtım ve tüketim sistemi.

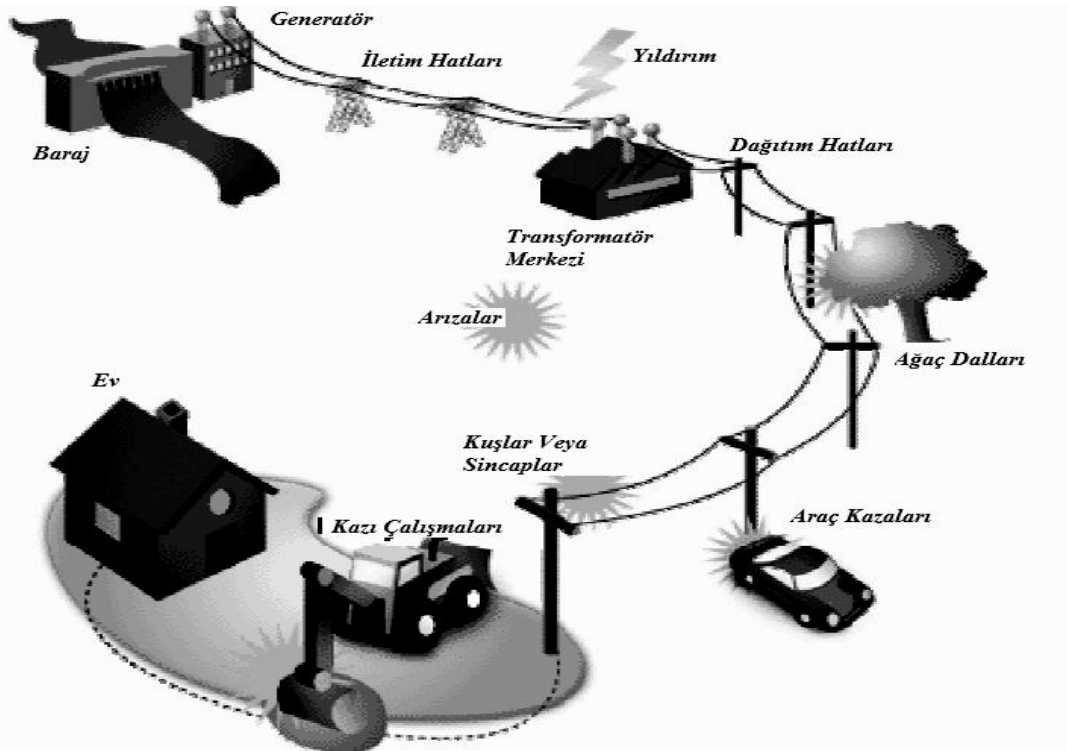
konu haline gelmiştir (Özcan 2006).

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi elektrik enerjisi kalitesinin sağlanması; sadece güç santrallerinde biten bir olay değildir, bu noktada başlayıp, bir ekip çalışması gibi sistemin tüm parçalarının da belirli kalitede bulunması ile mümkündür.

Kaliteli bir enerjinin sağlanabilmesi için; enerjinin sürekliliği, gerilim ve frekansın tolere edilebilir seviyelerde olması, güç faktörünün bire (1) yakınlığı, faz gerilimlerinin dengeli olması, gerilim ve akımdaki harmonik miktarının belirli değerde kalması gibi bir takım kriterlerin göz önüne alınması gereklidir .

Enerji kalitesini belirleyecek bir takım tanımlamaların ve standartların oluşması kaçınılmaz olmuştur. Standartların konulmaması, enerjiyi tüketen ve üreten arasında farklı “kalite” anlayışlarının çıkmasına sebep olmaktadır. Bunun için tüketici odaklı olarak bu konuya yönelik enerji kalitesi problemleri; “kullanıcı aletlerinin yanlış veya hiç çalışmamasına neden olacak gerilim, akım ve/veya frekanstaki değişimler” olarak tanımlanabilir. Şekil 3.2’de enerji kalitesine yönelik problem oluşturabilecek bazı olaylar örneklenmiştir.

Güç sistem kalitesinin bozulması, arızalar ve tüketicilerin enerji talebinin sürekli olarak değişmesi gerilim dalgalanmalarına neden olur. Sinüzoidal gerilim



Şekil 3.2. Enerji kalitesinde bozulmaya sebep olabilen bazı durumlar.

değerinden sapma geçici durum olaylarından (tranzient) ya da sistemde var olan nonlinear yüklerden kaynaklanmaktadır (Demirkol 2006).

Güç kalitesine verilen önemin her geçen gün artmasının nedenlerinden bir kaçı:

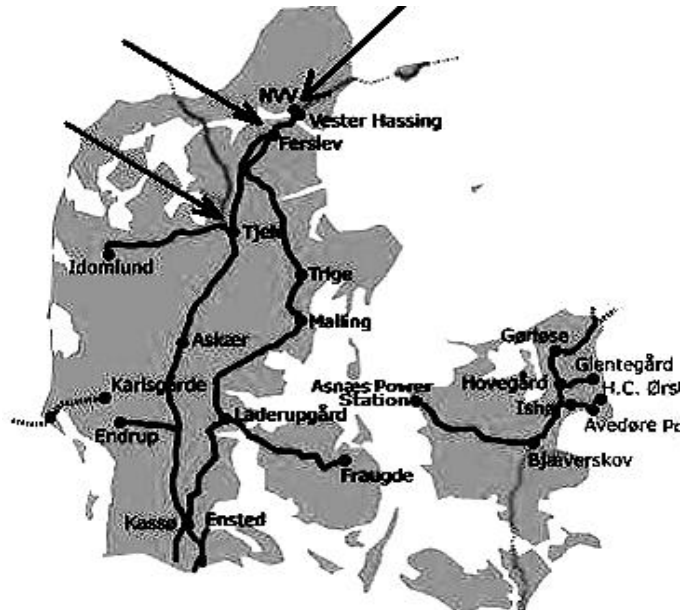
- ✓ Standartlaşmanın ve performans kriterlerinin gün geçtikçe daha da gelişmesi.
- ✓ Kullanılan cihazların her geçen gün dalgalanmalara, parazitlere ve diğer güç kalitesi problemlerine karşı daha da hassasiyet göstermeleri.
- ✓ Günümüz teknolojisinde sayıları artan hız kontrol cihazları gibi elemanların enerji kalitesini azaltması.
- ✓ Güç kalitesi izleme cihazlarının her geçen gün daha da gelişmesi.
- ✓ Enerji sektöründe rekabetin artması ve bununla paralel olarak kullanıcıların daha kaliteli enerji talep etmeleri (Hemetsberger 2003).

Avrupa Birliği tarafından yapılan araştırmalarda enerji kalitesi problemlerinden dolayı endüstriyel ve ticari alanda meydana gelen kaybın, her yıl milyonlarca Euro civarında olduğu tahmin edilmektedir. Bu duruma karşın kalite problemlerinin giderilmesine yönelik harcamalar bu rakamın %5'i civarındadır (Chapman 2001).

Dünya enerji kalitesi gelişim mühendisliği topluluğu iyi bir güç kalitesi elde etmek için birçok ülkeyi kapsayan çok geniş bölgelerde büyük güçlü enerji kaynaklarını içeren enerji havuzları (enterkonnekte sistemi) oluşturmaya çalışmaktadır. Birbirleriyle senkron çalışan bu enerji şebekeleri kaliteli enerji verebilmesi için her bir şebekenin düzenli seviyelerde enerji sağlayabilmesi gerekmektedir. Elbette enerji kalitesinin iyi olması için kaliteli elektrik üretiminin yanı sıra enerji kullanımının düzenli ve harmoniksiz olması gerekir. Bu elektrik sistemlerden biri NORDEL (Northern Synchronous System) sistemidir. Bu sistem İsviçre, Norveç, Finlandiya ve Danimarka'nın doğu kısmını AC gerilimle; Danimarka'nın batısı, Doğu ve Orta Avrupa'yı ise DC gerilimle birleştirmektedir (Şekil 2.3). Sistemin kurulu gücü 85000 MW ve yıllık üretimi ise 380 TWh'dır. 110 ve 400 kV AC ve DC gerilimle 75000 km'den daha uzun bir iletim hattına sahiptir. Danimarka'da bir enerji sisteminin kalitesinin sürekli izlenebilmesi ve harmonik seviyelerinin kontrol edilebilmesi için GPS uyumlu bir harmonik ölçüm uygulaması yapılmıştır. Bu uygulamanın temel amacı enerji sisteminin bilgisayar modelinin oluşturularak harmonikleri kontrol edebilmektir. Harmonik akım ve gerilimleri analiz



Şekil 3.3. NORDEL (Northern Synchronous System) enterkonnekte sistemi (1999) (Larsson M. 2000).



Şekil 3.4. Danimarka'daki GPS uyumlu bir harmonik ölçüm uygulamasının ölçüm noktaları (Wiechowski ve ark. 2007).

cihazlarıyla eşzamanlı olarak 400 kV'luk üç yerden (şekil 2.4.) yapılarak GPS üzerinden alınmaktadır (Wiechowski ve ark. 2007).

Endüstriyel ekipman ve işlemlerin doğru çalışmasını engelleyen elektromanyetik karışıklıklar, iletilen ve yayılan karışıklıkla bağıntılı olarak çeşitli sınıflar içerisinde sıralanmıştır: i. Alçak frekans (<9 kHz), ii. Yüksek frekans (>=9kHz), iii. Elektrostatik deşarj. Güç kalitesi ölçümleri, genelde karakteristikleri alçak frekansla iletilen elektromanyetik karışıklıkları göstermektedir: Gerilim azalmaları ve kesintiler, harmonikler ve ara harmonikler, süresiz güç frekansı aşırı

Tablo 3.1. Güç sistemi elektromanyetik olay karakteristikleri ve kategorileri (Özcan 2006).

| Kategoriler | Spektral İçerik | Süre | Gerilim Genliği |
|-----------------------------|-----------------|---------------|-----------------|
| 1. Geçici Olaylar | | | |
| 1.1 Darbeli | | | |
| • Nanosaniye | 5-ns yükseliş | <50 ns | |
| • Mikrosaniye | 1-µs yükseliş | 50 ns-1 ms | |
| • Milisaniye | 0.1-ms yükseliş | >1 ms | |
| 1.2 Titreşimli | | | |
| • Alçak frekans | <5 kHz | 0.3-50 ms | 0-4 pu |
| • Orta frekans | 5-500 kHz | 20 µs | 0-8 pu |
| • Yüksek frekans | 0.5-5 MHz | 5 µs | 0-4 pu |
| 2. Kısa süreli değişimler | | | |
| 2.1 Ani | | | |
| • Kesinti (interruption) | | 0.5-30 çevrim | <0.1 pu |
| • Azalma (sag-dip) | | 0.5-30 çevrim | 0.1-0.9 pu |
| • Artma (swell) | | 0.5-30 çevrim | 1.1-1.8 pu |
| 2.2 Anlık | | | |
| • Kesinti (interruption) | | 30 çevrim-3 s | <0.1 pu |
| • Azalma (sag-dip) | | 30 çevrim-3 s | 0.1-0.9 pu |
| • Artma (swell) | | 30 çevrim-3 s | 1.1-1.4 pu |
| 2.3 Geçici | | | |
| • Kesinti (interruption) | | 3 s-1 dakika | <0.1 pu |
| • Azalma (sag-dip) | | 3 s-1 dakika | 0.1-0.9 pu |
| • Artma (swell) | | 3 s-1 dakika | 1.1-1.4 pu |
| 3. Uzun süreli değişimler | | | |
| 3.1 Kesinti | | >1 dakika | 0.0 pu |
| 3.2 Gerilim düşmesi | | >1 dakika | 0.1-0.9 pu |
| 3.3 Gerilim artması | | >1 dakika | 1.1-1.2 pu |
| 4. Gerilim dengesizliği | | Sürekli hal | 0.5-2 % |
| 5. Dalga biçimi bozulmaları | | | |
| 5.1 dc ofset | | Sürekli hal | 0.5-0.1 % |
| 5.2 Harmonikler | 0-100. harmonik | Sürekli hal | 0.5-20 % |
| 5.3 Araharmikler | 0-6 kHz | Sürekli hal | 0-20 % |
| 5.4 Çentik | | | |
| 5.5 Gürültü | Geniş bant | Sürekli hal | 0-1 % |
| 6. Gerilim dalgalanmaları | <25 Hz | Süresiz | 0.5-7 % |
| 7. Güç frekansı değişimleri | | <10 s | |

gerilimleri, gerilim artmaları, geçici aşırı gerilimler, gerilim salınımları, gerilim dengesizliği güç frekansı değişimleri. Bu tip karışıklıklar dört kategoride yer alabilir: i.Genliği etkileyenler, ii. Dalga biçimi, iii. Frekans, iv. Gerilim simetrisi (Özcan 2006).

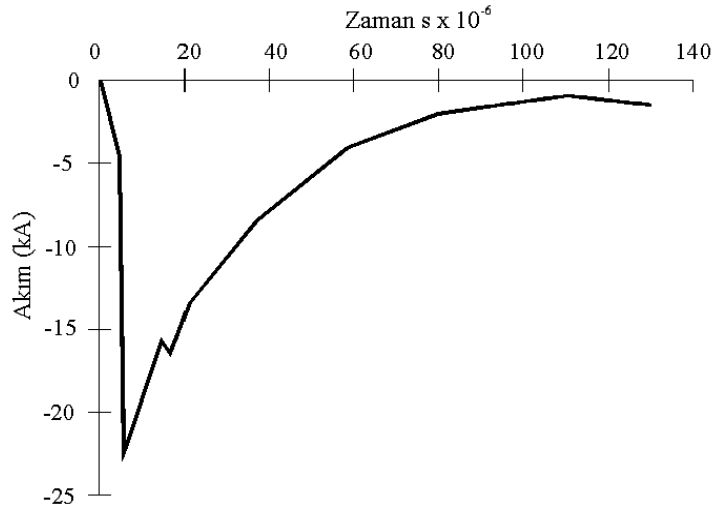
Tablo 3.1 güç kalitesi topluluğu için elektromanyetizma olayının sınıflandırılmasını göstermektedir. Çizelgede listelenmiş olaylar, daha başka bir biçimiyle kendine ait özelliklerin listelenmesiyle ifade edilmektedir. Sürekli hal olay yaklaşımları belirtilen nitelikler kullanılabilir: Genlik, frekans, spektrum, modülasyon, kaynak empedansı, çentik derinliği, çentik alanı. Sürekli olmayan olay yaklaşımları için, gereksinim duyulan nitelikler şunlar olabilir: Yükseliş oranı, genlik, süre, spektrum, frekans, modülasyon, tekrarlama oranı, enerji potansiyeli, kaynak empedansı (Özcan 2006).

3.1.Geçici Olaylar

Bu terim bir geçici gerilim yükselmesi olarak bilindiği gibi, aynı zamanda güç veya bilgisayar veri hattından birinde oluşan karışıklık olarak da çevrilebilir. Güç sistemi değişimlerinin analizinde istenmeyen, gerçekte anlık bir olayı anlatmak amacıyla kullanılmaktadır. Geçici olaylar iki kategoride sınıflandırılabilir: i.Darbesel olanlar, ii. Titreşimli olanlar. Bu tanımlamalar, bir akım veya gerilim dalga şeklini yansıtmaktadır.

3.1.1.Darbesel geçici olay

Darbesel geçici olay, polarite bakımından tek yönlü gerilim, akım veya bunların her ikisinin sürekli hal koşulunda güç frekansında olmayan ani bir değişimdir. Darbe şeklindeki geçici olaylar, artma ve azalma süreleri ile karakterize edilirler.



Şekil 3.5. Yıldırım darbesi akımı darbesel geçici olayı (Dugan ve ark. 1996).

Örnek olarak, bir $1.2 \times 50 \mu\text{s}$ 2000 V darbesel geçici olayı, nominalde sıfırdan, onun tepe değeri olan 2000 V değerine $1.2 \mu\text{s}$ süresinde ulaşır ve yarı tepe değerine $50 \mu\text{s}$ süresinde düşer. Bir darbesel geçici olayın en bilineni, yıldırım oluşumudur. Şekil 3.5'te yıldırımla oluşan bir akım darbesel geçici olayını gösterilmektedir.

3.1.2. Titreşimli geçici olay

Titreşimli geçici olay, darbesel geçici olay gibi çabuk bozulmaya uğramaz. $0,5-3$ çevrim aralığında devam etme eğilimindedir ve iki kez de nominal gerilim-akıma ulaşır. Titreşimli geçici olayın bir diğer nedeni, dağıtım sistemi üzerindeki güç hatlarının ve ekipmanın anahtarlanması olmaktadır. Ard arda kapasitör enerjilendirilmesinde, Şekil 3.6'da ifade edilen titreşimli geçici olay akımının frekansı kHz'ler mertebesinde sonuçlanmaktadır.

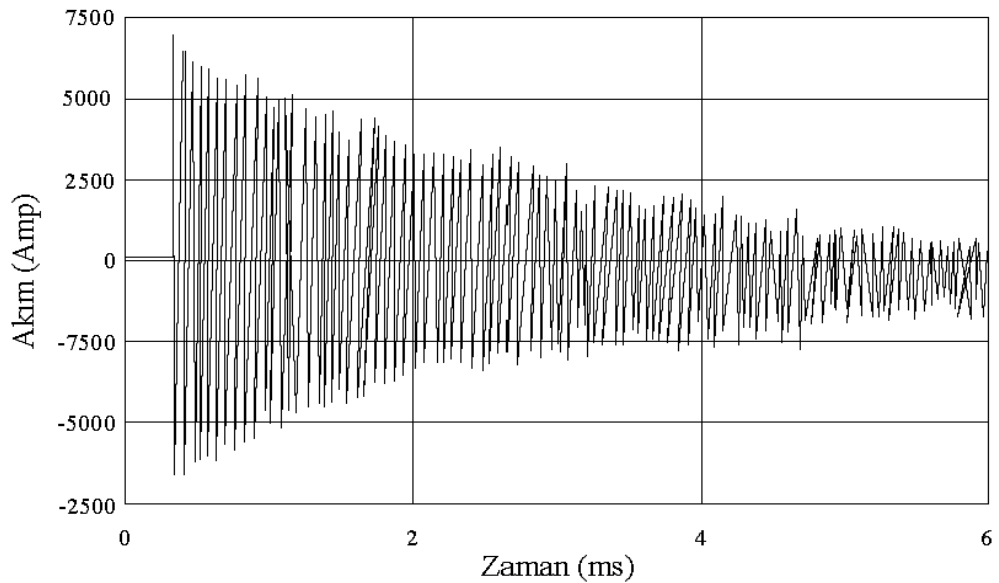
Kablo anahtarlaması, aynı frekans dizisi içerisinde titreşimli geçici olayların oluşmasına neden olur. Orta frekans geçici olayları, aynı zamanda sistemin bir darbesel geçici olaya tepkisinin sonucudur (Sağlam 2005).

3.2.Uzun Süreli Gerilim Değişimleri

Uzun-süreli değişimler, bir dakikadan daha uzun bir süreç için güç frekanslarında efektif değer değişimlerine göre ifade edilen değişimlerdir. ANSI C84.1 bir güç sisteminde beklenen sürekli durum gerilim tolerans değerlerinin belirlenmesi için ortaya konulmuş bir standarttır. Bir gerilim değişikliği, ANSI sınırlamalarını 1 dakikadan daha büyük bir değerle aştığında, uzun süreli bir değişim olarak ifade edilir. Gerilim yükselmeleri veya gerilim azalmaları, genel olarak sistem hatalarının bir sonucu değildir, fakat sistemdeki anahtarlama işlemleri ve yük değişimleri tarafından oluşturulurlar (Sağlam 2005).

3.2.1. Gerilim yükselmesi

Birkaç saniye veya daha uzun bir süre için kaynak gerilim sınırının üzerindeki bir durumdur. Gerilim yükselmesi gerilim regülâtörlerinin veya kapasitörlerin uygunsuz ayarlanmaları gibi nedenlerden kaynaklanır (Jose 2000).



Şekil 3.6. Ard arda kapasitör anahtarlamaıyla oluşan titreşimli geçici olay akımı (Dugan ve ark. 1996).

Uzun süreli gerilim yükselmeleri, gerilim artmalarına bir yakınlık gösterir, fakat daha uzun sürede sonlanırlar. Gerilim artmaları gibi, nominal gerilimin % 110'u aştığında oluşan rms gerilim değişimleridir. Gerilim yükselmesinin üç tipi vardır: Geçici güç frekansı, anahtarlama ve yıldırım gerilim yükselmeleri (Ferracci 2001).

3.2.2. Gerilim düşmesi

Birkaç saniye süresince servis geriliminin, nominal alçak gerilim işletme limitinin altına düştüğü durum, bir gerilim düşümedir. Aşırı yüklerden dolayı bir gerilim düşümü veya şebeke sisteminde oluşan gerilim azalmaları birer örnektir (Jose 2000).

Son kullanıcılar tarafından ışıklar sönmeye başladığı ve motorlar yavaşlama eğilimine girdikleri zaman fark edilirler (Sağlam 2005).

3.2.3. Sürekli kesintiler

Bir kesinti tamamıyla gerilimin kaybolmasıdır, genel olarak sonlanması birkaç çevrimden birkaç saate kadar sürer. Eğer bir kesinti 0.5-150 çevrim dizisi içerisinde ise anlık bir kesinti olarak sınıflandırılabilir. 3 saniyeden 1 dakikaya kadar olan kesintiler kısa süreli kesintiler olarak ifade edilir (Jose 2000).

3.3. Kısa Süreli Gerilim Değişimleri

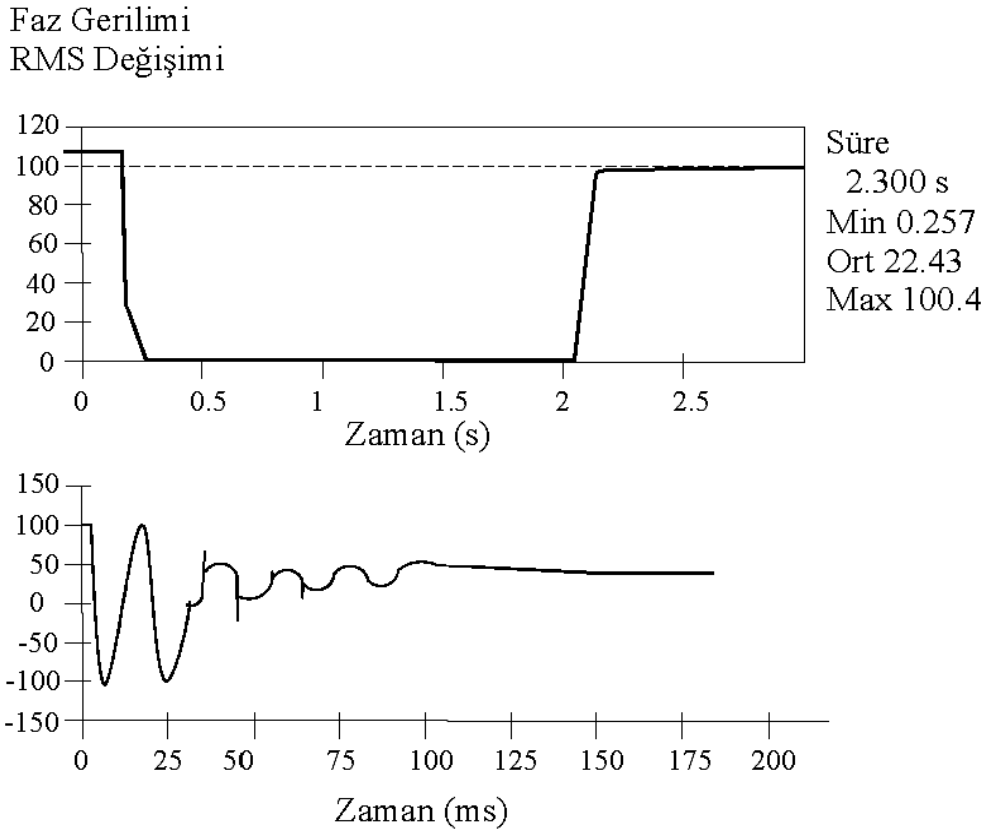
Bu kategori, gerilim azalmalarıyla ve kısa kesintilerle ilgili IEC kategorisini çevrelemektedir. Değişikler, Tablo 3.1'de tanımlandığı gibi oluşum sürelerine bağlı olarak ani, anlık ve geçici olmaktadır. Kısa süreli gerilim değişimleri, hata şartlarının oluşmasından, yüksek başlangıç akımları gerektiren büyük yüklerin enerjilendirilmesinden veya güç iletiminde kesik kesik kayıpların oluşmasından

kaynaklanan değişimlerdir. Hata yerine ve sistem şartlarına göre, gerilim yükselmelerinin oluşmasına veya gerilimin yok olmasına neden olabilirler.

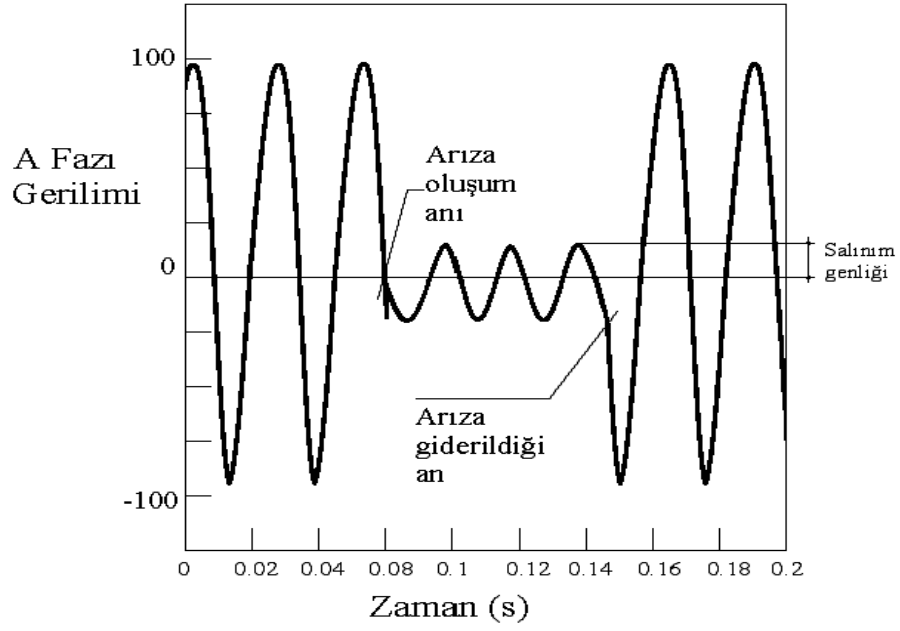
3.3.1. Kesinti

Kesintiler nominal gerilimin % 10'unun altına bir düşüş olması gibi bir gerilim kaybının oluşması anlamına gelmektedir. IEEE Std. 1159-1995, üç tip kesinti tanımlaması yapmaktadır. Kesintilerin oluştuğu zaman periyotları ile kategorize edilmişlerdir: Anlık, geçici ve uzun süreli kesintiler. Şekil 3.7 üç çevrim civarında yüzde 20 olarak beliren gerilim salınımı gibi anlık bir kesintiye göstermektedir.

Tekrar enerjilendirme aygıtı kapama yapana kadar geçen 1,8 s içinde sıfıra düşer. Salınım dalga biçimi bir ark oluşumu hatasının benzeridir (Sağlam 2005).



Şekil 3.7. Bir arıza ve tekrar kapama işleminden dolayı anlık kesintinin oluşumu (Dugan ve ark. 1996).



Şekil 3.8. Tipik bir gerilim azalması-salınımı.

3.3.2. Azalmalar-salınımlar

Bir azalma veya salınım olayı rms gerilimin 0,1 ve 0,9 pu değerler arasında veya güç frekansında 0,5 çevrimden 1 dakikaya varan sürelerde oluşan azalışdır. Bir “yüzde 20 azalma” ifadesi gerilimin 0,8 pu veya 0,2 pu olarak sonuçlanması şeklinde ifade edilebilir (Dugan ve ark. 1996).

Bir arıza tüketicinin yerleşim noktasından uzağında oluşsa bile gerilim azalmaları meydana gelir. 4-5 çevrim içerisinde sonlansa da, çok hassas tüketici ekipmanlarının geniş bir kısmında açmaya neden olur. Gerilim azalmaları genellikle sistem arızaları ile bütünleşiktir fakat aynı zamanda büyük güçlü yüklerin veya büyük motorların çalışmaya başlamasıyla oluşabilir. Örneğin bir indüksiyon motoru kalkış anında tam yük akımının 6-10 katı bir değere ulaşır. Bu kalkış anında çekilen akım sistemdeki o noktada olağan arıza akımına yakın bir değerde olduğundan, oluşan gerilim azalması önemli derecede olabilir. Örnek gerilim azalması Şekil 2.8’de görülmektedir (Sağlam 2005).

3.3.3. Gerilim veya akım artmaları

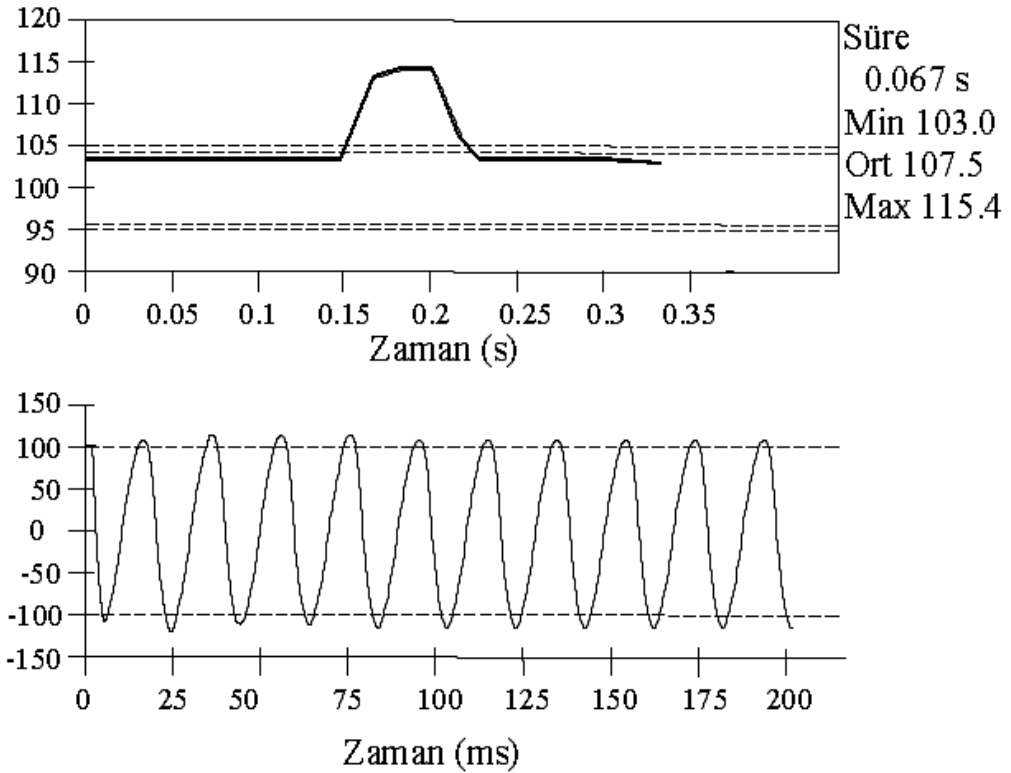
Nominal kaynak gerilimindeki kısa süreli artışın birkaç değişik biçimi vardır (% 106'dan büyük değerlerde). Gerilim artmaları, milisaniyeden saniye aralığında sonlanan bir artışı ifade eder (Sağlam 2005).

Bir artma olayı efektif değer olarak akım veya gerilimde, güç frekansında 0,5 çevrimden 1 dakikaya kadar olan süreçler içerisinde 1,1 ve 1,8 pu aralığında bir artıştır (Dugan ve ark. 1996).

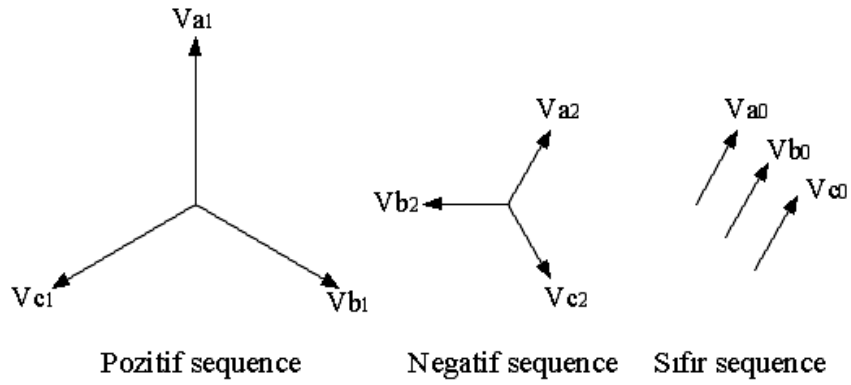
Şekil 3.9'da görüldüğü gibi bir tek faz-toprak arızası süresince hata görmemiş fazlar üzerinde geçici gerilim yükselmesi, gerilim artmasının bir nedenidir.

Gerilim artmaları, kaynak sisteminde oluşan ani yük artması ve dağıtım gerilim düzenleme ekipmanlarının yanlış ayarlanmasını içeren olayların çeşitliliğidir. Büyük bir kapasitör bankasının enerjilendirilmesi buna neden olabilir (Sağlam 2005).

Faz Gerilimi
RMS Değişimi



Şekil 3.9. Bir tek faz toprak hatasından kaynaklanan ani gerilim artması (Dugan ve ark. 1996).

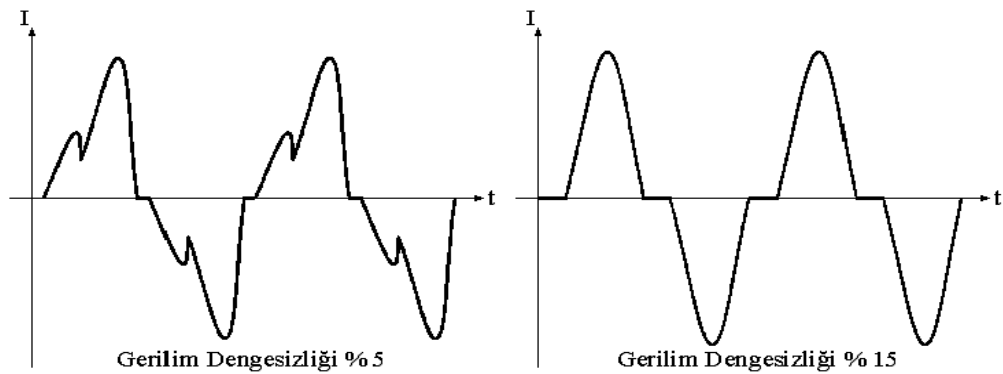


Şekil 3.10. Bir gerilim dengesizliği sisteminin simetrik bileşenleri (Gosbell 2002)

3.4. Gerilim Dengesizliği

Gerilim dengesizliği olayının derecesini belirlemek için bir sistemin ifade edilebileceği yaygın olarak kullanılan bir tanım mevcuttur. Bu tanım, Avrupa standartlarında geniş olarak kullanılan matematiksel olarak bir dengesiz sistemin üç dengeli sisteme indirgendiği Simetrik Bileşenler teorisidir. Bu üçlü pozitif, negatif ve sıfır bileşendir (Şekil 2.10).

Kusursuz dengeli bir sistemde, negatif ve sıfır bileşenler bulunmamaktadır (Gosbell 2002). Gerilim dengesizliği her fazda, üç faz ortalama gerilim değerinden bir sapmanın olmasıdır. Ekipmanların çoğu, özellikle motorlar, gerilim dengesizliğinde %2'lik bir değişime elverişlidir. % 2'den daha büyük bir gerilim



Şekil 3.11. Kaynak sistemi dengesizken üç-faz diyot doğrultucuların hat akım dalga biçimleri (Sağlam 2005).

dengesizliği motorlarda ve transformatörlerde aşırı ısınmaya neden olacaktır (Sağlam 2005).

Şekil 3.11’de kaynak sistemi dengesizken üç faz diyot doğrultucuların hat akımı dalga biçimleri, gerilim dengesizliğinin % 5 ve % 15 olduğu durumlar için ayrı ayrı görölmektedir.

3.5. Dalga Şekli Bozulması

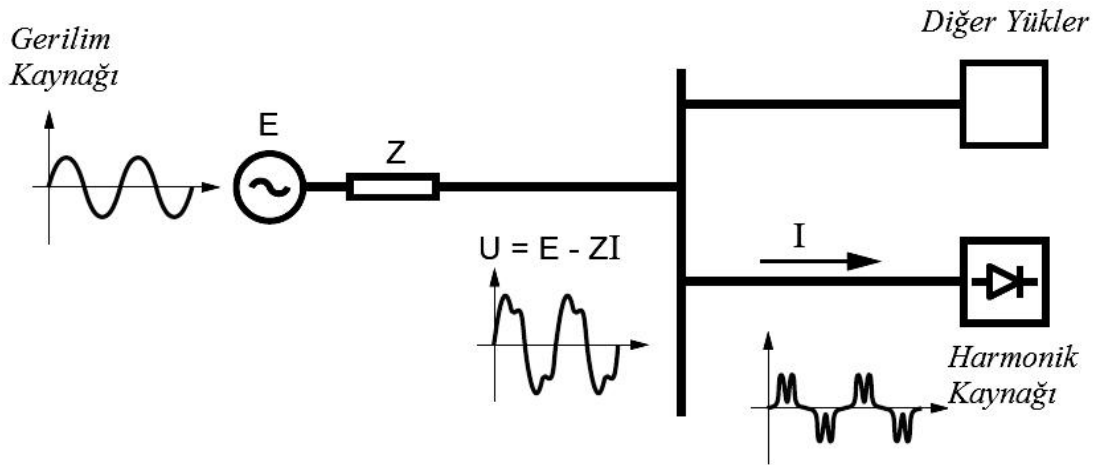
Dalga şekli bozulması, sapmanın spektral içeriği tarafından karakterize edilen güç frekansının ideal bir sinüs dalga biçiminden sürekli hal sapmasıdır. Dalga biçimi bozulmalarının beş esas biçimi mevcuttur: DC ofset, harmonikler, ara harmonikler, çentikler, gürültü (Özcan 2006).

3.5.1. DC ofset

Bir AC güç sisteminin içerisinde bir DC akım veya gerilimin bulunması DC ofset olarak tanımlanmıştır. Bu durum yarım-dalga doğrultucuların etkisiyle ortaya çıkabilir. Alternatif akım şebekelerindeki doğru akı transformatör çekirdeklerinde zararlı bir etkiye sahip olabilir ve normal çalışmada saturasyona uğrarlar. Bu durum ilave ısınmaya ve transformatör ömrünün azalmasına neden olur (Özcan 2006).

3.5.2. Harmonikler

Harmonikler bozulmuş bir güç frekansı dalga biçiminin esas frekansta olmayan bileşenleridir. Ana frekansın tam sayı katları şeklinde frekanslara sahiptirler. Harmonik bozulma bir sinüzoidal gerilim ve akımda oluşan bir bozulmadır. Harmoniklerin spektrumu yüklerin yapısına bağlıdır. Harmonik



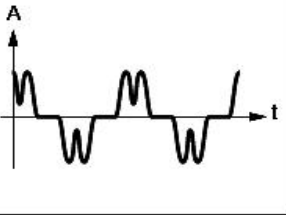
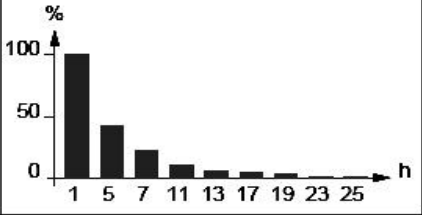
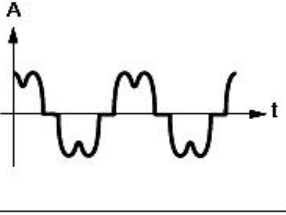
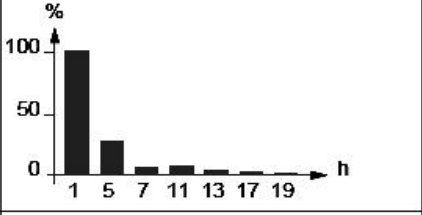
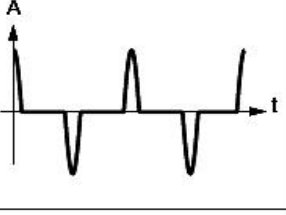
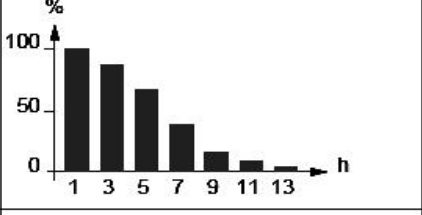

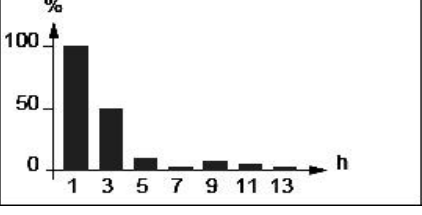
Şekil 3.12. Nonlineer yük nedeniyle şebeke gerilimindeki bozulma (Ferracci 2001).

gerilimler aynı kaynaktan beslenen diğer tüketicilerin işletmesini de rahatsız edebilecek bozulmuş gerilimler olarak işletme empedansları vasıtasıyla oluşur. Bozulmuş dalga biçimleri, esas frekansın ve harmoniklerin bir toplamı şeklinde ayrıştırılabilir. Harmonik bozulma, güç sistemindeki aygıtların ve yüklerin doğrusal olmayan karakteristiklerinden kaynaklanmaktadır. Harmonik bozulma kademeleri, her bir harmonik elemanın faz açıları ve genlikleri ile harmonik spektrumları tarafından tanımlanmıştır (Özcan 2006).

Harmoniklerin seviyeleri, harmonik kaynağı olarak kullanılan cihazın kullanım moduna, gece, gündüz ya da mevsimlerin durumuna (ısınma ve soğumaya) göre değişiklik gösterir. Harmonik kaynakları Şekil 3.13'te görüldüğü gibi çok değişik harmonik bileşenler üretirler.

3.5.3. Ara harmonikler

Ara harmonikler kaynak esas frekansının tamsayı katları olmayan spektral bileşenlerdir. Bir gerilim dalga biçimi ara harmonikleri içerdiğinde, dalga biçiminin efektif ve tepe genlik değerlerinde yükselip alçalma gözlenir. Bunun nedeni ara harmonik bileşen periyotlarının esas frekans çevrimiyle senkron olmamasıdır. Bu yükselen alçalan genlik gerilim titreşimi biçimidir. Ara harmoniklerin oluşmasında iki esas mekanizma söz konusudur. İlki kaynak gerilim frekansının kenar bandı

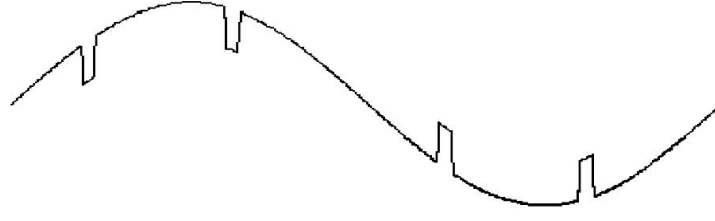
| <i>Nonlinear Yük</i> | <i>Akım Dalga Formu</i> | <i>Spektrum</i> | THDI |
|-------------------------------|--|---|-------------|
| <i>Hız Kontrol Sürücüleri</i> |  |  | 44% |
| <i>Doğrultucu</i> |  |  | 28% |
| <i>Bilgi İşlem Yüklere</i> |  |  | 115% |
| <i>Fluoresan Aydınlatma</i> |  |  | 53% |

Şekil 3.13. Harmonik kaynaklarının karakteristikleri (Ferracci 2001).

içerisinde bileşenlerin üretilmesi ve genlikleri ile faz açılarındaki değişimlerin bir sonucu olarak harmoniklerin oluşmasıdır. İkinci mekanizma ise statik konverterlerdeki yarı iletken aygıtların oluşturduğu güç sistemindeki asenkron anahtarlama (Özcan 2006).

3.5.4. Çentik

Şebeke geriliminin bir tam dalgasında (20 ms süresince) doğrultucu darbe sayısı kadar tekrarlanan çökmelere çentik denir. Genelde doğrultucuları besleyen trafo ve hat endüktanslarının anahtar aktarımını geciktirmesiyle oluşur.



Şekil 3.14. Sinüs dalgasındaki çentik (Şahin 2006).

3.5.5. Gürültü

Gürültü (Şekil 3.15.), faz iletkenlerindeki güç sistemi akım veya gerilimin üzerine eklenen veya nötr iletkenlerinde bulunan, 200 kHz'den daha düşük geniş bantlı spektral içerikli, istenmeyen elektriksel işaretler olarak tanımlanmaktadır. Güç sistemindeki gürültü, güç elektroniği aygıtları, kontrol devreleri, katı-hal doğrultucular ve anahtarlamalı güç kaynakları ile oluşturulabilir. Gürültü problemleri, güç sisteminden gürültüyü uzaklaştırmada uygunsuz topraklamayla başarısız kalarak daha yoğun bir hal alır. Gürültü programlanabilir kontrol aygıtları ve mikro devrelerde karışıklık yaratır. Bu problem filtreler, izolasyon transformatörleri ve hat düzenleyicileri kullanılarak azaltılabilir (Özcan 2006).

3.6. Gerilim Dalgalanmaları

Gerilim dalgalanmaları, nominal gerilimin izin verilen 0.95-1.05 genlik değerleri içerisinde gerilimde oluşan hızlı değişimlerdir. Ark fırınları ve kaynak



Şekil 3.15. Sinüs dalgasındaki gürültü (Şahin 2006).

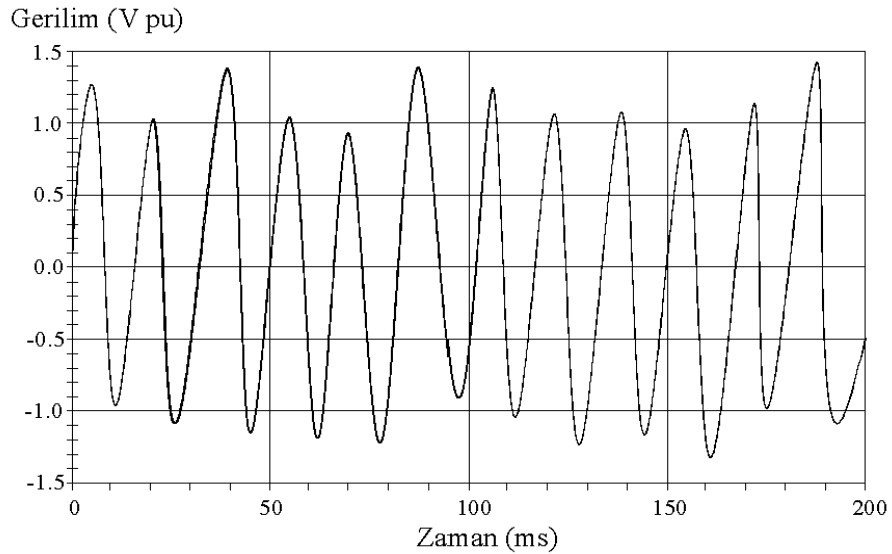
makinaları gibi yük akımında ani değişimler gerilim dalgalanmalarına neden olmaktadır (Sağlam 2005).

Gerilim değişimleri, frekans değişimi veya genlik ile karakterize edilen gerilim zarfı içerisinde çevrimsel veya gelişigüzel değişimlerdir. Yavaş gerilim değişimleri, şebekeye bağlı yüklerdeki yavaş değişimlerden kaynaklanır (Ferracci 2001).

Yükler, daha çok titreşim olarak bahsedilen yük akımı genliğinde sürekli, hızlı değişimleri oluşturarak gerilim dalgalanmalarına neden olurlar. Titreşim terimi, insan gözü tarafından lambalardaki gerilim dalgalanmalarının etkisinin bir titreşim olarak algılanması şeklinde elde edilmiştir. Yaygın kullanılan bir terim olarak gerilim titreşimi terimini aynı zamanda gerilim dalgalanmaları için de kullanmak mümkündür. şekil 3.16'da titreşimin oluştuğu bir gerilim dalga şeklinin örneği görölmektedir.

3.7. Güç Frekansı Değişimleri

Frekans değişimleri güç sistemi esas frekansının, belirlenmiş nominal değerinden sapma olarak tanımlanır. Güç sistem frekansı, sistemi besleyen



şekil 3.16. Ark fırını çalışmasıyla oluşan bir gerilim titreşimi örneği (Dugan ve ark. 1996).

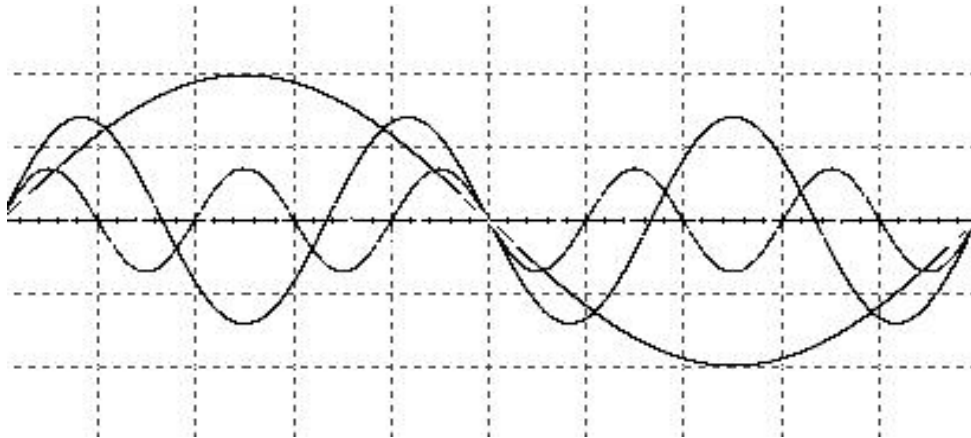
generatörlerin devir hızıyla doğrudan ilişkilidir. Üretim ve yük değişimleri arasında dinamik bir denge olarak frekansta yavaş değişimler mevcuttur. Frekans kaymasının genişliği ve süresi yük karakteristiklerine ve üretim kontrol sisteminin yük değişimlerine tepkisine bağlıdır. Güç sisteminde normal kararlı çalışma için frekans değişimlerinin limitlerin dışına çıkması, yüklü güç iletim sistemlerindeki hataların oluşmasından, büyük bir yük bloğunun ayrılmasından veya geniş bir üretim kaynağının sistem dışı kalmasından kaynaklanmaktadır (Sağlam 2005).

4. HARMONİKLER

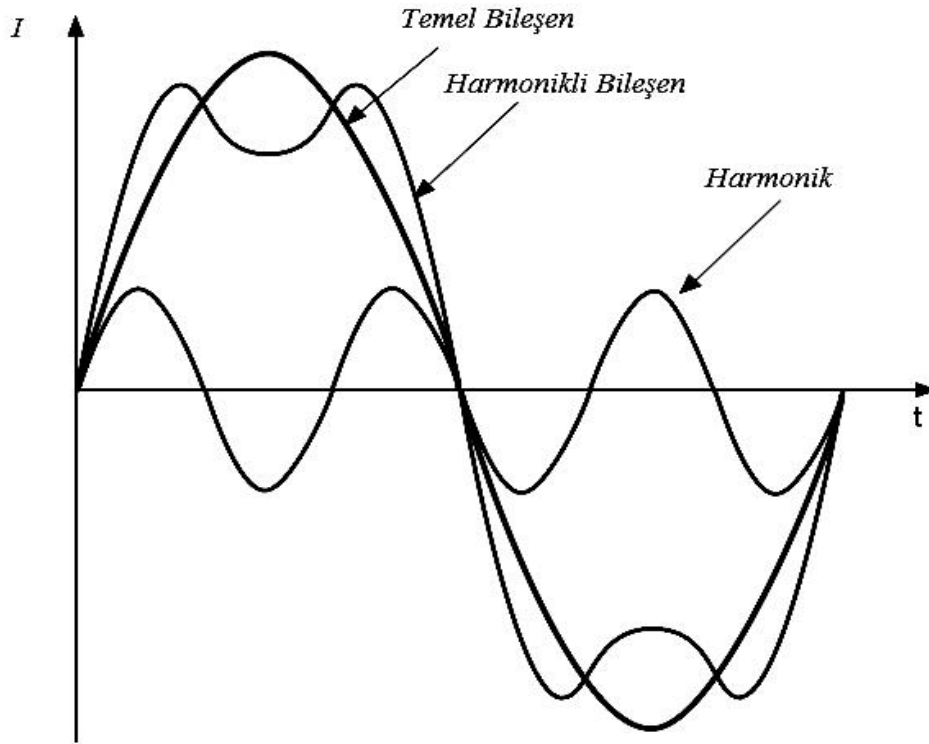
Bilindiği gibi elektrik enerjisi üç aşamadan geçerek alıcılara ya da yüklerle ulaşmaktadır. Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımı aşamalarında akım ve gerilim büyüklüklerinin sinüzoidal biçimli olması gereklidir. Fakat bu her zaman gerçekleşmeyebilir. Çeşitli nonlinear yükler nedeniyle sistemde çeşitli frekansta sinüzoidal dalgalar görülebilir (Şekil 4.1) (Adak 2003).

Elektrik enerji sistemlerinde manyetik ve elektrik devre lineersizlikleri, harmoniklerin ortaya çıkmasında en önemli etkenlerdir. Harmoniklerin meydana gelmesi ile de sinüzoidal dalga şeklinden uzaklaşılacak yani dalga şeklinde bir bozulma (distorsiyon) görülecektir. Akım ve gerilimde oluşan bu bozulma elektrik tesisleri ve bu tesislere bağlı güç sistemlerine zarar vermekte ve hatta bazen sistemleri çalışamaz hale getirmektedir.

Manyetik devre lineersizliği, demir çekirdekli bobin, transformatör, generetör gibi elemanların doymaya giderek manyetik bakımdan lineer olmayan bir olayın meydana gelmesidir. Elektrik devre lineersizliği ise, akımı ile gerilimi arasında ilişkisi doğrusal olmayan bir elemanda arka çalışan işletme araçlarında yarı iletken elemanlar kullanılarak sinüzoidal dalganın bazı kısımlarının kırılması sonucunda meydana gelir. Bu lineersizlikler şebekenin akım ve gerilim dalga şeklinin sinüzoidallikten uzaklaşmasına sebep olmaktadır. Bu tür elemanlara örnek olarak



Şekil 4.1. Bir tam periyottaki sinüs formundaki dalga şekilleri (50hz, 150hz, 250hz, 350hz) (Şenyurt 2006).



Şekil 4.2. Harmoniklerin gösterimi (Ferracci 1999).

şunlar verilebilir. DC çevirici, DC evirici, motor kontrol devreleri, statik VAR generatörleri, anahtarlama güç kaynakları gibi güç elektroniği elemanlı devre, flüoresan, cıva arki, cıva buharı, neon, ksenon ve yüksek basınçlı sodyum lambalar gibi gaz deşarjlı aydınlatma elemanları, akü ve fotovoltaik sistemleri ve elektrikli ulaşım sistemleri gibi sistemler sayılabilir (Adak 2003).

4.1. Harmonik Tanımı

Günümüzde endüstriyel yöntemlerin modernizasyonu, elektriksiz cihaz ve makineler hakkında çok fazla bilgi sahibi olunması, güç elektroniğinde de oldukça büyük bir gelişmeye imkân tanımıştır. Bu gelişim sonucu, tristör ve IGBT gibi yüksek frekanslarda anahtarlama yapabilen sistemler endüstride oldukça sık kullanılmaya başlanmıştır.

Bu sistemler, elektriksel karakteristiklerinden dolayı lineer olmayan (Nonlinear) yüklere ihtiyaç duyarlar. Lineer olmayan yük, akımı ile gerilimi arasında bir ilişki olmayan yük demektir. Yük kaynağı olan gerilim ve akım eğrileri sinüzoidal değildir. Fourier analizine göre, sinüzoidal olmayan bu terimler harmonik olarak adlandırılırlar.

Enerji dağıtım sistemlerinde sinüs formundaki bir gerilim kaynağı yarı iletken teknolojiye sahip bir sisteme uygulanırsa (DC veya AC Sürücü, UPS, vb) sistemin vereceği akım cevabı kare dalga şekline yakın olacaktır.

Sinüs formunda ve sistem empedansı oranında genliğe sahip olması gereken bu akım dalga şeklinin kare dalgaya yakın olmasının nedeni içerdiği temel şebeke frekansı dışındaki sinüs dalgalarıdır. Temel şebeke frekansı (50 Hz) dışındaki diğer sinüs formundaki bu akımlara “Harmonik” denir.

Harmonikler genel olarak nonlinear elemanlar ile nonsinüzoidal kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasından meydana gelirler. Akım-gerilim karakteristiği doğrusal olmayan elemanlara nonlinear elemanlar denir. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde bulunması, sinüzoidal dalganın bozulması anlamına gelir. Bozulan dalgalar nonsinüzoidal dalga olarak adlandırılır. Bu dalgalar, fourier analizi yardımıyla temel frekans ve diğer frekanslardaki bileşenler cinsinden ifade edilebilir. Bu analiz ile nonsinüzoidal dalgalar, frekansları farklı sinüzoidal dalgaların toplamı şeklinde matematiksel olarak yazılabilir. Bu sayede harmoniklerin analizi kolaylıkla yapılabilir. Harmonikler güç sistemlerinde; ek kayıplar, ek gerilim düşümleri, rezonans olayları, güç faktörünün değişmesi vb. gibi teknik ve ekonomik problemlere yol açar (Ferracci 2001).

4.2. Harmonik Analizi

Harmoniklerin analizinde, periyodik dalganın bir doğru bileşeni ile bir temel frekanslı sinüs dalgası ve frekansları temel bileşenden farklı saf sinüs dalgalarının toplamından oluştuğu gösterilebilir. Böylece nonsinüzoidal dalgaların “harmonik spektrumu” elde edilmeye çalışılır (Özcan 2006).

4.2.1. Analitik yöntem

Periyodik bir nonsinüzoidal dalganın değişik genlik ve faz açlarına sahip sinüzoidal dalgaların toplamı olarak yazılabileceği veya çeşitli genlik ve faz açlarına sahip sinüzoidal dalgaların toplamı ile nonsinüzoidal dalgaların meydana geldiği J.Fourier tarafından kanıtlanmıştır. Böyle bir fonksiyon,

$$F(t)=A_0+A_1(\sin 2\pi f_1 t+\varphi_1)+A_2(\sin 2\pi f_2 t+\varphi_2)+\dots(\sin 2\pi f_n t+\varphi_n) \quad (4.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada A_0 “ortalama değeri”, 1 indisi ile gösterilen terim ise “temel bileşeni” ifade etmektedir. Temel bileşen dışındaki 2, 3, 4, ..., n indisleri ile gösterilen bileşenlere ise “harmonik bileşen” adı verilmektedir. A_2, A_3, A_n harmoniklerin genliklerini, f_1 temel bileşen frekansını, f_2, \dots, f_n harmonik bileşenlerin frekanslarını ifade etmektedir. φ_1 temel bileşen faz açısını, $\varphi_2, \dots, \varphi_n$ harmonik bileşenlerin faz açılarını göstermektedir. Temel bileşen frekansı ile n.harmonik frekansı arasında,

$$f_n = n. f_1 \quad (4.2)$$

bağıntısı vardır. Denklem (3.1)’deki gibi ifade edilen seriye “Fourier Serisi”, bu seri elemanlarına da “Fourier Bileşenleri” adı verilir. Bir nonsinüzoidal dalga denklemi denklem (3.1)’deki sinüzoidal bileşenlerle ifade edildiği gibi aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir.

$$F(t)=A_0+A_1 \sin(w_1 t) + \dots + A_n \sin(w_n t) + B_1 \cos(w_1 t) + \dots + B_n \cos(w_n t) \quad (4.3)$$

Bu şekildeki ifadelerin Fourier katsayıları aşağıdaki denklemler ile elde edilir.

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(wt) dwt \quad (4.4)$$

Tablo 4.1.Çeşitli simetri durumlarında fourier katsayıları(Özcan 2006).

| Fonksiyonun özelliği | Matematiksel ifadesi | Fourier katsayıları |
|-----------------------|---|--|
| Çift fonksiyon | $f(-t) = f(t)$ | $A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n.\omega t) d\omega t$ $B_n = 0$ |
| Tek fonksiyon | $f(-t) = -f(t)$ | $A_n = 0$ $B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n.\omega t) d\omega t$ |
| Yarım dalga simetrisi | $f(t) = -f\left(t + \frac{T}{2}\right)$ | $A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n.\omega t) d\omega t \quad (n\text{'in çift değerlerinde})$ $B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n.\omega t) d\omega t \quad (n\text{'in tek değerlerinde})$ |

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(\omega t) d\omega t \quad (4.5)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(\omega t) d\omega t \quad (4.6)$$

Nonsinüzoidal dalganın özelliğine göre bu katsayılardan bazıları bulunacak ve bazıları ise sıfır olacaktır. Tablo 4.1’de bu durum özetlenmiş bulunmaktadır.

4.2.2. Grafik yöntem

Grafik yöntemi fonksiyonun matematiksel olarak ifade edilemediği durumlarda kullanılır. Nonsinüzoidal dalganın Fourier katsayıları ile ifade edilmesi

için osiloskoptan alınan veya deney yoluyla elde edilen dalga şekli bir periyot için “s” eşit parçaya bölünür. Formüller yardımıyla fourier katsayıları hesaplanabilir.

$$A_0 = \frac{2}{s} \sum_{k=1}^{\alpha} f_k \quad (4.7)$$

$$A_n = \frac{2}{s} \sum_{k=1}^{\alpha} f_k \sin\left(k \frac{2\pi \cdot t}{s}\right) \quad (4.8)$$

$$B_n = \frac{2}{s} \sum_{k=1}^{\alpha} f_k \cos\left(k \frac{2\pi \cdot t}{s}\right) \quad (4.9)$$

Bu eşitliklerdeki, f_k fonksiyonun her k değerine karşılık elde edilen değerdir. Bölme sayısı (s) ne kadar büyük olursa fonksiyonun ifadesi o oranda doğru olacaktır (Özcan 2006).

4.2.3.Hızlı fourier dönüşümü(FFT)

Bilgisayar desteği ile yapılan fourier analizidir. Hızlı transformu çözümü için matematiğe dayalı algoritmalar kullanılır. Bu algoritmalarda sıra önemlidir. Yapılan işlemlere “kelebek” adı verilir. Özel entegre devrelerde kullanılır.

4.2.4.Ölçme yöntemi

Bu konuda üretilmiş olan ölçme aletleri ile bir akım ya da gerilime ait harmonik bileşenler direkt olarak tespit edilir.”Harmonik Analizörü” olarak adlandırılan bu cihazlar ölçme kapasitelerine bağlı olarak yüksek dereceli harmonik bileşenlerini belirleyebilmektedir (Özcan 2006).

4.3. Harmonikler İle İlgili Genel Terimler

Sinüsel olmayan büyüklüklerin güç sistemine olumsuz etkilerinin giderilmesi ve güç kalitesinin iyileştirilmesi bakımından harmoniklerin analizi ve büyüklüklerin seviyesinin bilinmesi gereklidir. Elektrik büyüklükleri sinüsel sürekli durum için tanımlanmıştır. Sistemde harmoniklerin var olması elektrik büyüklüklerinin yeniden tanımlanmasını gerektirir (Kocatepe ve ark. 2003).

Aşağıda elektrik sistemlerinde güç kalitesinin belirlenebilmesi için gerekli bazı tanımlamalar yapılmıştır. Bu değerler ne kadar küçük olursa enerji tesislerinden tüketiciler tarafından çekilen enerji o kadar kaliteli ve sinüzoidal dalga şekline yaklaşmış olur.

a) Distorsiyon (D): 50 veya 60 Hz sinüzoidal gerilim veya akım dalga biçiminde oluşan herhangi bir kötüleşme ve bozulmadır.

b) Spektrum: Spektrum çeşitli harmoniklerin genliklerinin harmonik numaralarının bir fonksiyonu olarak histogram biçiminde grafik edildiği dağılımdır.

c) Toplam harmonik distorsiyonu (THD): Toplam harmonik distorsiyonu akım veya gerilim için harmonikli efektif değerlerin, esas bileşenin efektif değerine bölünmesiyle ortaya çıkan orandır. Toplam harmonik distorsiyonu harmoniklerin bütününe ait olan termal etkiyi nitelemektedir. Harmonikli bileşenlerin temel bileşene göre seviyesini belirlemede dikkate alınan en önemli ölçüttür. Hem gerilim, hem de akım için verilebilir. Gerilim için toplam harmonik distorsiyonu,

$$\text{THD}_v = \frac{1}{U_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.10)$$

şeklinde ifade edilir. Akım için toplam harmonik distorsiyonu,

$$\text{THD}_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.11)$$

şeklindedir.

d) Distorsiyon faktörü (DF): Akım değeri için distorsiyon faktörü,

$$DF_I = \frac{1}{I} \left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.12)$$

şeklindedir (Kocatepe ve ark. 2003).

Gerilim değeri için distorsiyon faktörü denklemi,

$$DF_V = \frac{1}{V} \left(\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.13)$$

e) Tepe faktörü (CF): Sinüzoidal olmayan dalgalar için tepe faktörü,

$$CF = \frac{\text{Dalga'nın Tepe Değeri}}{\text{Dalga'nın Efektif Değeri}} \quad (4.14)$$

ifadesi ile belirtilir (Kocatepe ve ark.2003).

f) K faktörü: Kuru tip transformatörlerin K faktörü, nonlineer yüklenen ve genellikle 500kVA'nın altındaki transformatörlerde yüklenmenin bir ölçütüdür. Bu faktör imalatçılar tarafından ifade edilen bir büyüklük olup,

$$K_{\text{Faktörü}} = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 (p.u.) \cdot n^2 \quad (4.15)$$

olarak ifade edilir. Burada In per-unit olarak transformatörün akım bileşeninin ifadesidir (Kocatepe ve ark. 2003).

g) Harmonik faktörü (HF): Her bir harmonik bileşenin seviyesini belirlemede kullanılır. Örneğin gerilim için,

$$\mathbf{HF}_n = \frac{V_n}{V_1} \quad (4.16)$$

V_n : n.harmonik gerilimine ait efektif değeri,

V_1 : geriliminin temel bileşenin efektif değerini göstermektedir (Kocatepe ve ark. 2003).

h) Toplam talep distorsiyonu (TTD):Toplam talep distorsiyonu, bir yüke ait değer olup toplam harmonik akım distorsiyonu olarak aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\mathbf{TTD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (4.17)$$

Burada I_L yük tarafından, besleme sisteminin ortak bağlantı noktasından çekilen, temel frekanslı maksimum akımdır. On iki ay öncesinden başlanarak hesaplamının yapılacağı ana kadar olan süre zarfında yük tarafından talep edilen maksimum akımların ortalaması olarak hesaplanır. TTD kavramı IEEE “Standart 519” uygulamasında özellikle belirtilmiştir (Kocatepe ve ark. 2003).

i) Şekil (Form) faktörü: Şekil faktörü nonsinüzoidal bir dalga için,

$$\mathbf{k}_f = \frac{\mathbf{Efektif\ Değer}}{\mathbf{Ortalama\ Değer}} \quad (4.18)$$

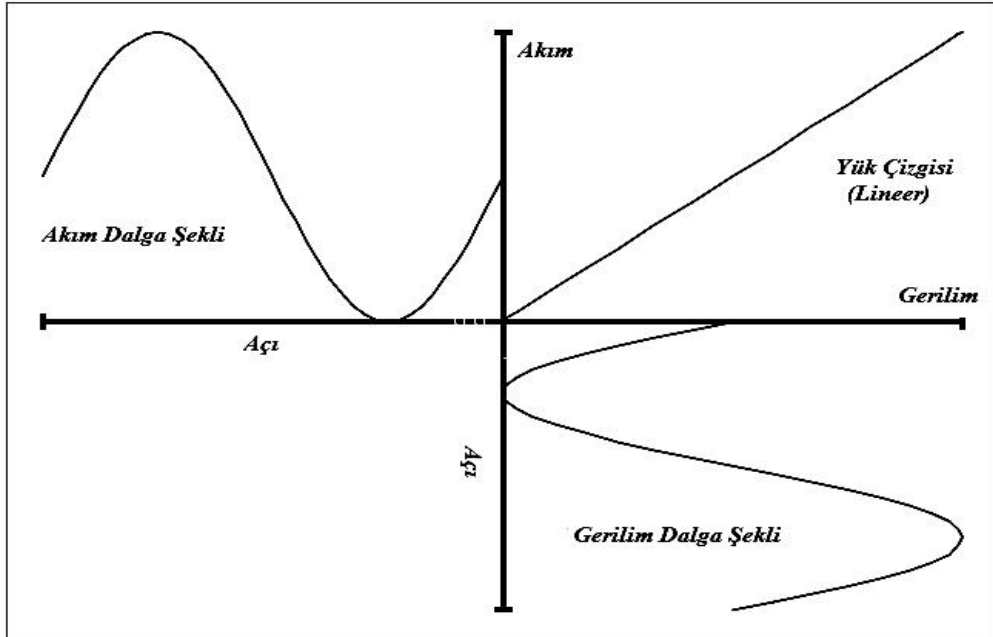
olarak tanımlanır. Bozulmuş sinüzoidal bir dalganın bozulma ölçütü verecek olan bu faktör sinüzoidal bir dalga için, 1,11 değerine eşittir (Kocatepe ve ark. 2003).

5. HARMONİKLERİN KAYNAKLARI VE SİSTEME ZARARLI ETKİLERİ

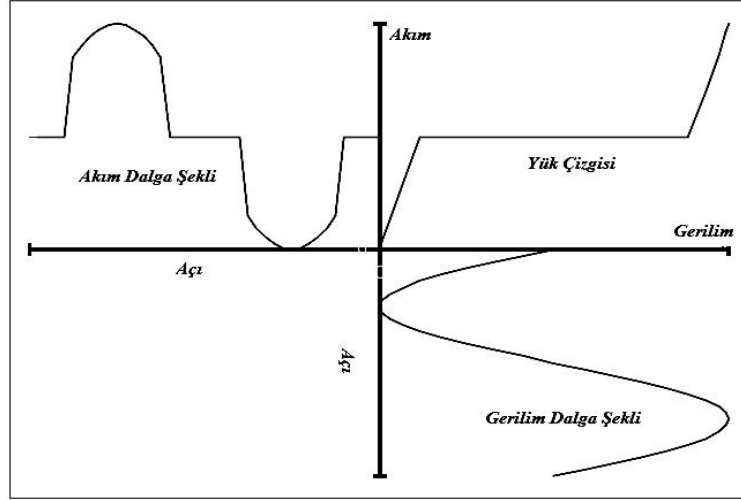
İdeal bir güç sisteminde akım ve gerilim dalga formu saf sinüs şeklindedir. Uygulamada ise gerilim kaynağından uygulanan gerilimle yükten akan akım birbirleriyle lineer olarak uyumlu değilse bu durumda yükten akan akımlara “nonsinüzoidal akımlar” denir. İçerisinde yalnızca lineer devre elemanlarını –direnç, endüktans ve kapasitans içeren basit bir devreden akan akım kaynaktan uygulanan gerilimle orantılıdır. Dolayısıyla Şekil 5.1’de gösterildiği gibi sinüzoidal bir gerilim uygulandığında sinüzoidal bir akım akar.

Şekil 5.1’de gösterilen ve lineer bir yüke ait olan yük çizgisi uygulanan gerilim ile yükten akan akım arasındaki ilişkidir. Reaktif bir elemanın bulunduğu bir devrede akım ile gerilim arasında bir faz kayması olacağı unutulmamalıdır. Fakat devre yine lineerliğini kaybetmeyecektir.

Şekil 5.2’de ise yükün tam dalga doğrultucu ve kapasitör olduğu durumu göstermektedir. Bu durumda akım yalnızca uygulanan gerilimin kapasitör gerilimini aştığında, örneğin yük çizgi şeklinde gösterildiği gibi sinüs dalgasının pik değerine yaklaştığında akar (Marshall1997).



Şekil 5.1. Bir lineer yükün akım dalga şekli.



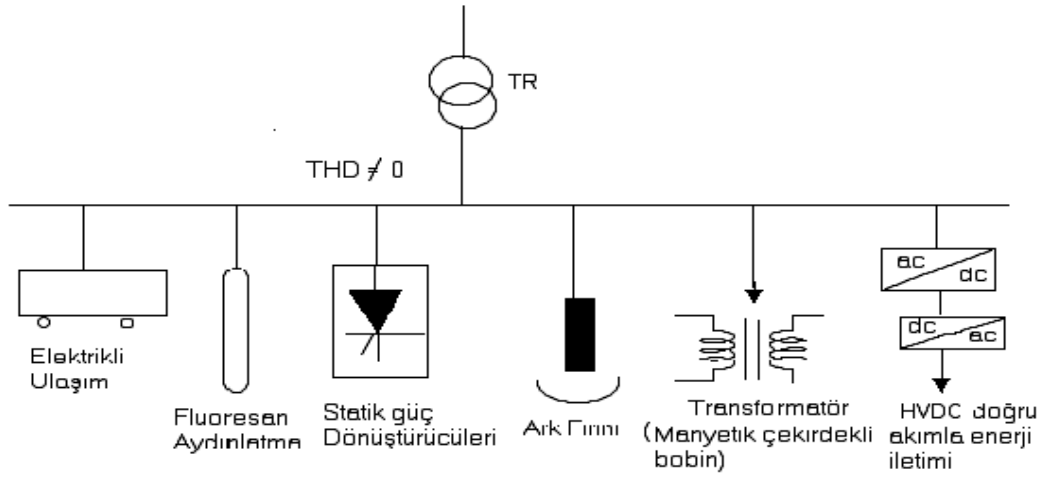
Şekil 5.2. Bir nonlinear yükün akım dalga şekli.

Uygulamada ise yük çizgisi (dolayısıyla akım dalga şekli) örnektekinden oldukça kompleks bir şekildedir. Yük çizgisinde bazen simetrik olmayan, histerezis, kesinti, eğim vb. şekil bozuklukları akım dalga şeklini de bozacaktır (Marshall1997).

Bu şekildeki değişken bir yük eğrisine sahip yüklere “nonlineer yükler” denir. Her geçen gün sayıları artan lineer olmayan yükler nedeniyle şebekeden çekilen akım dalga formu sinüs formundan uzaklaşmaktadır. Özellikle güç elektroniği cihazları gibi sinüs dalgasını kırpma mantığıyla çalışan cihazların endüstriyel, sanayi ve ticari alanlarda kullanımının artması en büyük harmonik kaynağı olarak göze çarpmaktadır.

5.1. Harmoniklerin Kaynakları

Harmoniklerin oluşmasının başlıca sebebi, elektrik devrelerinde kullanılan lineer olmayan devre elemanlarıdır. Bu devre elemanlarının, gerilimi ile akımı arasındaki bağıntının lineer olmayışından harmonikler oluşmaktadır. Manyetik devrelerin aşırı doyması, elektrik arkları ve güç elektroniğindeki sinüzoidal gerilimin anahtarlanması ve kıyılması lineer olmayan olaylardır. Harmoniklerin oluşmasına neden olan kaynakların başlıcaları şunlardır:



Şekil 5.3. Nonlineer olmayan yükler ile harmonik akım kaynakları (Kocatepe ve ark. 2003).

- Transformatörler
- Statik dönüştürücüler (Konverterler)
- Generatörler
- Ark fırınları
- Gaz deşarjlı aydınlatma armatürleri
- Statik VAR kompanzatorleri
- Fotovoltaik sistemler
- Bilgisayarlar
- Kesintisiz güç kaynakları
- Doğru akım ile enerji iletimi
- Elektrikli ulaşım sistemleri

Harmonik kaynaklarını ticari ve sanayi yükleri olarak ikiye ayrılabilir.

5.1.1. Harmonik kaynağı olarak ticari yükler

Ticari yükler; ısıtma, havalandırma, iklimlendirme yükleri, asansör motorları, tek fazlı anahtarlamalı güç kaynağıyla beslenen hassas elektronik cihazlar gibi yüksek verimlilikle çalışan cihazlar özellikle elektronik balastlı floresan lambalı

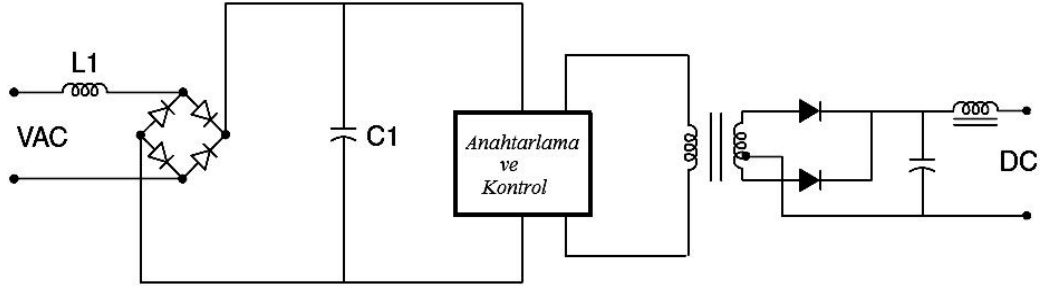
aydınlatma elemanlarıyla donatılmış ofisler, büyük mağazalar, hastaneler, büyük bilgi işlem merkezleri olarak sıralanabilir. Diğer bir deyişle ticari yükler, birçok küçük harmonik kaynağından oluşur. Birbirinden farklı bu harmoniklerin çeşitliliğine bağlı olarak harmonik bileşenler birbirlerini destekleyebilir ya da birbirlerini sönmüleyebilir. Sistemin gerilim distorsiyon değeri sistem empedansına ve sistemde baskın olan harmonik akım distorsiyon değerine bağlıdır. Genellikle ticari tesislerde güç faktörü düzeltme kapasitörleri kullanılmadığından, sistemin empedansı sistem transformatörü ve hat empedansına bağlıdır. Bu yüzden sistemin voltaj distorsiyonu harmonik frekansıyla değişen sistem empedansıyla akımın çarpımından elde edilebilir. Ticari nonlineer yüklerin karakteristikleri aşağıdaki bölümlerde verilmiştir (Dugan ve ark. 1996).

5.1.1.1. Tek fazlı güç kaynakları

Elektronik güç konverterleri elektrik güç sistemlerinde büyük harmonik üretme kapasiteleriyle en önemli yeri teşkil etmektedir. Son yıllardaki yarıiletken teknolojisindeki ilerleme güç elektroniği cihazlarının sayısını artırmış ve bu ilerleme gelecek yıllarda da devamlılığını koruyacağı anlaşılmaktadır. Hız kontrol sürücüleri, elektronik enerji kaynakları, DC motor sürücüleri, batarya şarj cihazları ve elektronik balastlar bu yüklere örnek olarak gösterilebilir.

Ticari tüketicilerdeki bir fazlı cihazlar için kullanılan tek fazlı güç kaynakları çok fazla harmonik ürettiğinden iletkenler üzerindeki zararı önemli bir konu olarak ortaya çıkmaktadır. Ofislerdeki mikroişlemcili elektronik cihazlar için gerekli DC gerilim tek fazlı tam dalga köprü diyotlu doğrultuculardan elde edilmektedir. Ofislerdeki bireysel bilgisayar sistemlerinin artışı aşırı bir şekilde bu diyotlu doğrultucu uygulamalarının sayısını da gün geçtikçe artırmaktadır.

Tek fazlı güç kaynaklarının iki çeşidi vardır. Eski teknolojinin kullanıldığı sistemlerde gerilimin düşürülmesi transformatör vb. gibi elemanlar kullanılarak AC tarafta yapılmaktaydı. Transformatörün giriş empedansı harmoniklerin azalması için

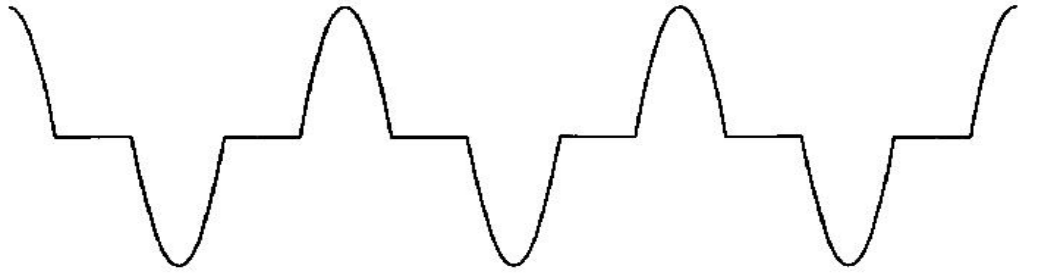


Şekil 5.4. Anahtarlama güç kaynağı.

faydalı bir etki teşkil etmekteydi. Yeni nesil teknolojiye ise düzgün bir DC gerilim elde edilmesi ve gerilimin düşürülmesi için Şekil 5.4'te gösterilen ve eski teknolojiye göre daha az yer kaplayan DC-DC dönüştürme cihazları kullanılmaktadır. Giriş diyotu direkt olarak AC gerilime bağlanarak transformatör elimine edilmiştir. Bu kapasitör girişine kabaca bir DC sinyal girişini sağlamaktadır. Bu DC sinyal daha sonra yüksek frekansta anahtarlama yapılarak AC sinyale çevrilir ve tekrar doğrultulur. Kişisel bilgisayarlar, fotokopi makineleri, yazıcılar vb. tek fazlı cihazların neredeyse tamamı anahtarlama güç kaynağı kullanmaktadır. Bu güç kaynaklarının avantajları ağırlık ve boyutlarının küçük olmaları, verimli çalışmaları ve en önemlisi de transformatörlere az ihtiyaç göstermeleridir. Ayrıca bu kaynaklar cihazların girişlerindeki şebekeden kaynaklanan gerilim dalgalanmalarını da önlemektedir.

Çok büyük AC giriş empedansı olmaması nedeniyle kaynak giriş akımı çok kısa darbelerle geldiğinden dolayı kaynak giriş kondansatörü ilk yarım periyotta gerekli enerjiyi almaktadır. Şekil 5.5 birkaç çeşit elektronik elemanı besleyen bir anahtarlama güç kaynağının akım dalga formunu ve genlik değerlerini göstermektedir.

Anahtarlama güç kaynağının kendine özgü diğer bir özelliği de üç ve üçün katı harmonikleri içermesidir. Anahtarlama güç kaynaklarının sayılarının artmasıyla üç ve üçün katı harmoniklerin artışı dolayısıyla üç fazlı sistemlerde nötr hattının aşırı yüklenmesi özellikle eski binalarda normal kesitinden düşük kesitlerde kullanılan nötr iletkenlerde aşırı ısınma problemleri ortaya çıkmıştır (Dugan ve ark. 1996).



| Harmonik | Genlik | Harmonik | Genlik |
|----------|--------|----------|--------|
| 1 | 1.00 | 9 | 0.157 |
| 3 | 0.81 | 11 | 0.024 |
| 5 | 0.606 | 13 | 0.063 |
| 7 | 0.370 | 15 | 0.079 |

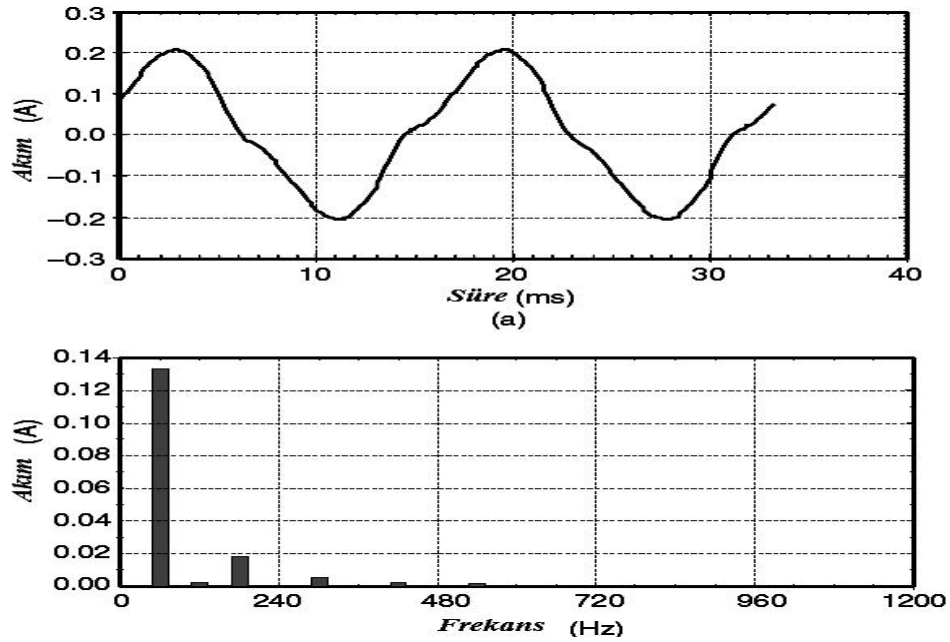
Şekil 5.5. Anahtarlamalı güç kaynağının akım ve harmonik akım genlikleri (IEEE Std 141-1993).

5.1.1.2. Florasan aydınlatma

Aydınlatma ticari binalarda elektrik yükünün %40-%60'ını teşkil etmektedir. 1995'te U.S. Energy Information Administration tarafından yapılan ticari binaların enerji tüketimi çalışmasına göre binaların %77'si florasan lamba kullanırken %14'lük kesimi ise akkor flamanlı lamba kullanmaktadır. Enerji tasarrufu için florasan lambalar kaçınılmaz bir tercihtir.

Florasan lambaları deşarj lambaları sınıfındandır. Bu sebepten florasan lambaların iki elektrodu arasında deşarjın gerçekleşmesi için gerilimin yüksek seviyelere çıkarılması gerekir. Deşarj olayı gerçekleşir gerçekleşmez gerilim düşürülür ve dolayısıyla deşarj akımı artar. Lambanın yanması için iki elektrot arasında ark oluştuktan sonra balastın ark akımını gerekli lümen seviyesini elde edebilmek için azaltması gerekir. Bu şekilde balast aydınlatmada bir akım sınırlayıcı olarak da kullanılmaktadır.

İki çeşit balast vardır, manyetik ve elektronik. Standart bir balast, demir çekirdekli bir transformatörün bir kapasitörle birlikte bir izolasyon maddesinin içine konulmasından ibarettir. Normal manyetik bir balast bir veya iki lambayı çalıştırabilir ve çalışabilmesi için 50-60 Hz'lik şebeke frekansı gerekmektedir. Demir

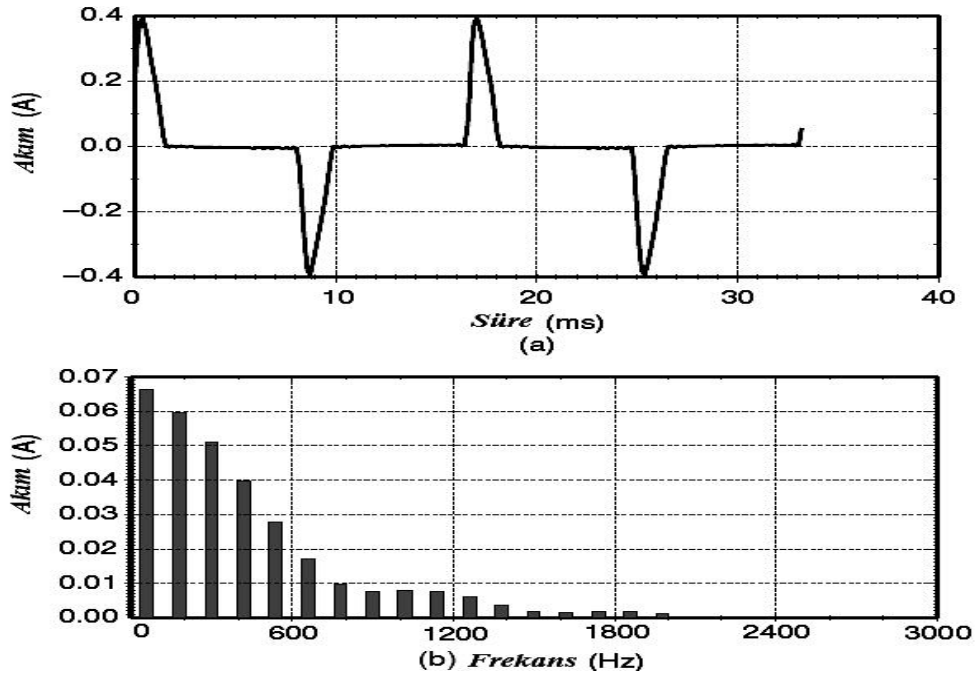


Şekil 5.6. Manyetik balastlı florasan lambanın akım dalga formu (a), harmonik spektrumu(b) (Dugan ve ark. 1996).

çekirdek fazladan ısı kayıplarına sebep olduğundan elektronik balasta göre daha seyrek kullanılır.

Bir elektronik balastta giriş frekansı gerilimini 25-40 kHz değerleri arasındaki çok yüksek frekans gerilim değerine çevirmek için anahtarlamalı güç kaynağı kullanılmaktadır. Bu yüksek frekansın iki avantajı vardır. Biri, ark akımını önlemek için küçük bir endüktör yeterli gelmektedir. Diğeri, yüksek frekans demir çekirdekli bir manyetik balastın ürettiği 100-120 Hz fliker'i azaltır ya da tamamen elimine eder. Normal bir elektronik balast dördün üzerinde lambayı besleyebilir.

Standart manyetik balastlar arktan kaynaklanan harmonik distorsiyonun yanında manyetik devreden dolayı da harmonik üretirler. Şekil 5.6 normal bir florasan lambanın akımını ve harmonik spektrumunu göstermektedir. Akımın THD değeri yaklaşık %15 değerindedir. Manyetik balastlı florasan ile elektronik balastlı arasında bir karşılaştırma yapılacak olursa elektronik balastlı florasanın manyetik balastlıya göre 2-3 kat daha fazla harmonik ürettiği görülür. Şekil 5.7'de % 144'lük akım THD'sine sahip elektronik balastlı bir florasan lambanın akım ve harmonik spektrumu gösterilmektedir. Elektronik balastlarda harmoniklerin azaltılması için filtre kullanılmaktadır. Böylece akım THD değeri % 20 oranında azaltılabilmektedir.



Şekil 5.7. Elektronik balastlı florasan lambanın akım dalga formu (a), harmonik spektrumu(b).

Florasan lambalar ticari binalarda önemli harmonik kaynakları arasında yer almaya başladığından beri lambaların fazlara eşit dağılımı yapılmaya çalışılmaktadır.

Üçgen bağlı bir besleme transformatörüyle üç ve üçün katları harmonikleri azaltılabilir. Bununla birlikte yıldız-yıldız bağlı genel bir besleme trafosunun yük dağılımı fazlar arasında dengeli bir şekilde yapılmamışsa üç ve üçün katı harmoniklerini önlemekte yetersiz kalacaktır (Dugan ve ark. 1996).

5.1.1.3. İklimlendirme ve asansörlerde kullanılan hız kontrol sürücüleri

Ayarlanabilir hız kontrol sürücüleri genel olarak asansör motorlarında, pompalarda, fanlarda ve iklimlendirmede kullanılır. Bir hız kontrol sürücüsü ac gerilimi ve frekansı ayarlanabilir gerilim ve frekansa dönüştüren bir elektrik güç konverterinden oluşmaktadır. Ayarlanabilir gerilim ve frekans, hız kontrol sürücüsünün motorun hızını istenilen değerde azaltıp artırabilmesini sağlar. Bu

avantajından dolayı ayarlanabilir hız kontrol sürücülerini sanayide birçok uygulamada yer almaktadır (Dugan ve ark. 1996).

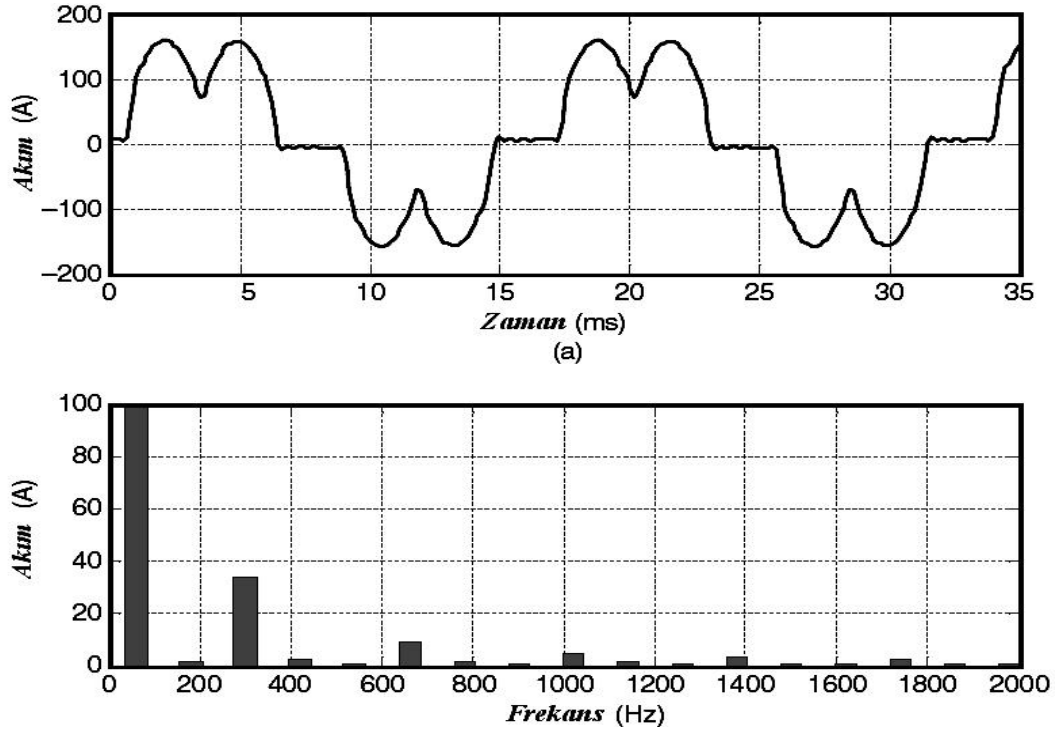
5.1.2. Harmonik kaynağı olarak sanayi yükleri

Günümüzde modern sanayi tesisleri birçok nonlineer yükler içermektedir. Bu tip yükler sanayi elemanları içerisinde büyük bir paya sahip olmaktadır ve tesislerde harmonik kirliliğe sebep olmakla beraber güç faktörünü de düşürmektedir. Sanayi kuruluşları endüktif güç yüzünden ceza almamak için kompanzasyon sistemlerini kullanmaktadır. Fakat tesislerdeki harmonik kirliliğinden dolayı sistemin endüktif reaktansı ile kapasitif reaktansı rezonans frekanslarında sıfırlanarak kompanzasyon sisteminden yüklü akımların geçmesine neden olmaktadır. Yüksek değerlerdeki gerilim distorsiyonu, şebekenin alçak gerilim tarafında kapasitörlerin bulunduğu tarafta oluşmaktadır. Rezonans elektrik motorlarında ve transformatörlerinde aşırı ısınmalara sebebiyet verir ve hassas elektronik cihazların yanlış çalışmasına neden olur.

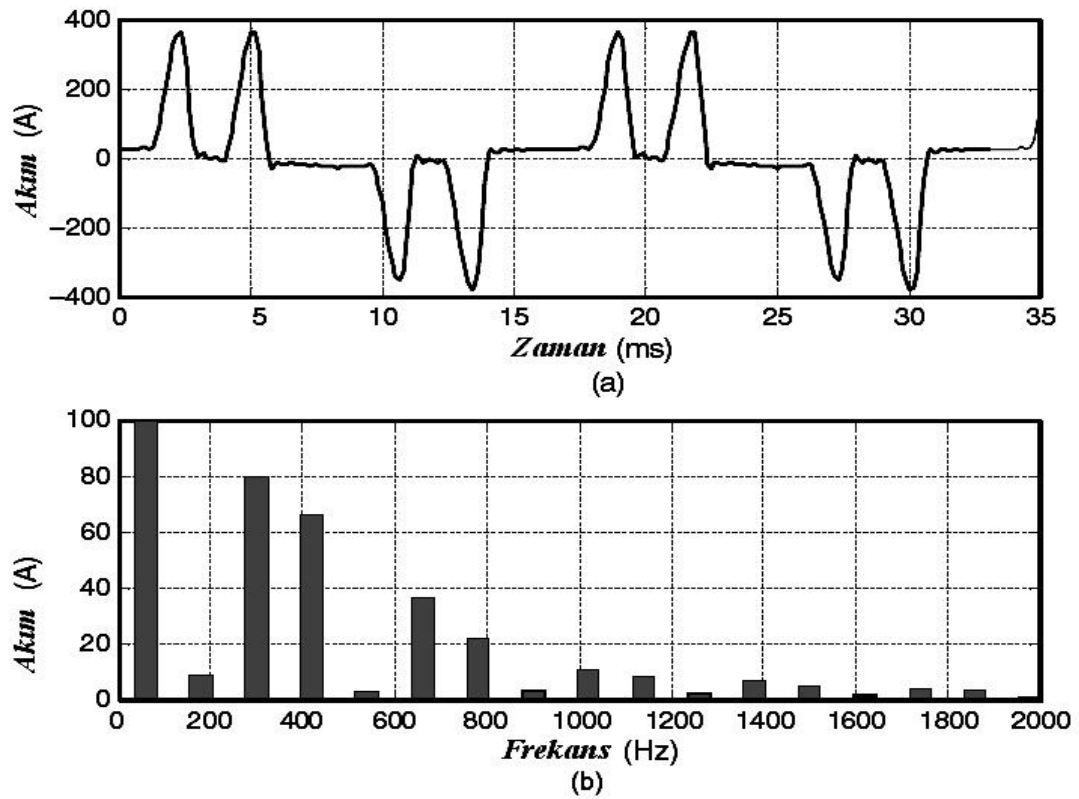
Nonlineer sanayi yükleri üç grupta incelenebilir: Üç fazlı güç konverterleri, ark makineleri ve doyumlu (saturasyonlu) makineler.

5.1.2.1. Üç fazlı güç konverterleri

Üç fazlı güç konverterlerinin tek fazlı güç konverterlerinden farklı yönü üçüncü harmonikleri üretmemeleridir. Bu üçüncü harmoniğin en büyük bileşen olmasından dolayı büyük bir avantajdır. Ancak şekil 5,8'de de görüldüğü bu cihazlar yine de büyük harmonik kaynakları arasındadır. Bu şekildeki değerler bir ayarlanabilir hız kontrol sürücüsünün tipik bir akım kaynağı çeşididir veya tipik bir DC motor sürücüsünün giriş akımı olabilir. Şekil 5.8'deki voltaj kaynağı dönüştürücü sürücüsü daha yüksek distorsiyon değerlerine sahip olabilir.



Şekil 5.8. Akım kaynağı tipi hız kontrol sürücüsünün akım ve gerilim spektrumu.



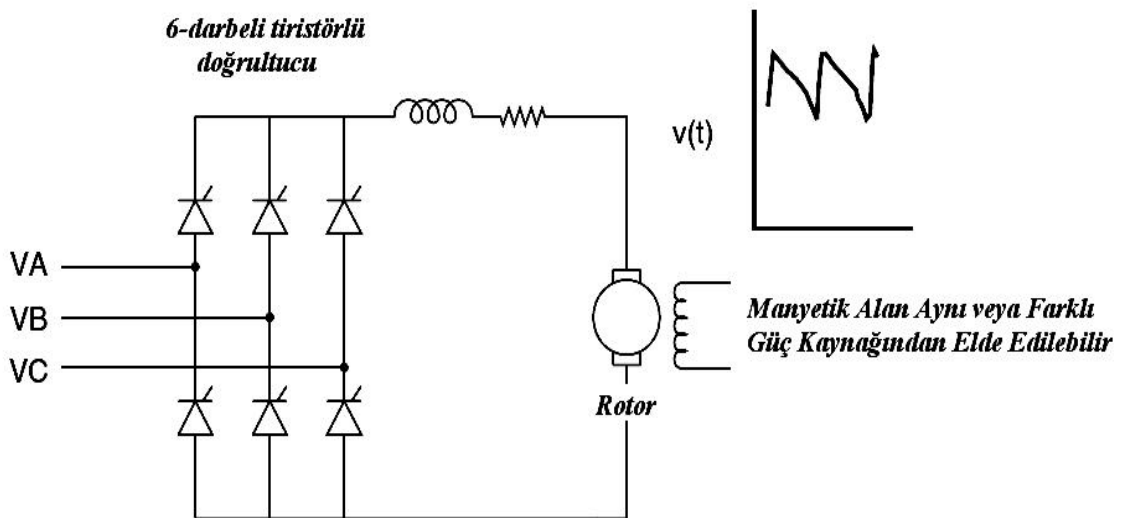
Şekil 5.9. PWM tipi hız kontrol sürücüsünün akım ve gerilim spektrumu.

PWM tipi sürücünün girişi, bilgisayarlardaki anahtarlamalı güç kaynaklarının üç fazlı şekilde tasarlanmış haline benzer şekilde tasarlanırlar. Doğrultucu AC baradan beslenir ve AC bara ile DC kapasitör arasındadır. Çok küçük bir endüktansın yerleştirilmesiyle kapasitör çok kısa bir sinyalle şarj olur ve ayırıcı “Rabbit Ears” (tavşan kulağı: Televizyonun iki kulaklı ayarlanabilir anteni manasındaki terim) AC tarafı akım dalga formunu çok yüksek distorsiyon seviyesiyle oluşturur. Anahtarlamalı güç kaynakları çok küçük yükler için kullanılmaktayken PWM tipi sürücüler 500 beygir gücüne (HP) kadar yükler için kullanılabilir. Bu da PWM tipi sürücülerinin güç elektroniği mühendisleri tarafından ilgi çekici bir yanındır.

5.1.2.1.1. DC sürücüler

DC sürücüler için en önemli şey doğrultmadır. Bununla beraber DC sürücülerini gerçekten basit kontrol sistemleri arasındadır. AC sürücülere kıyasla daha geniş hız aralığı vardır ve daha büyük kalkış momentleri vardır. Elektronik elemanların fiyatları her geçen gün azalmasına karşın DC sürücülerin fiyatları ve bakımları pahalıdır. Bu yüzden ekonomik koşullar, DC sürücülerle hız ve moment kontrolünün gerektiği yerlerde kullanımını kısıtlamaktadır.

Çoğu DC sürücüler şekil 5.10’da gösterilen 6-darbeleri doğrultucu



Şekil 5.10. 6-Darbeleri DC hız kontrol sürücüsü.

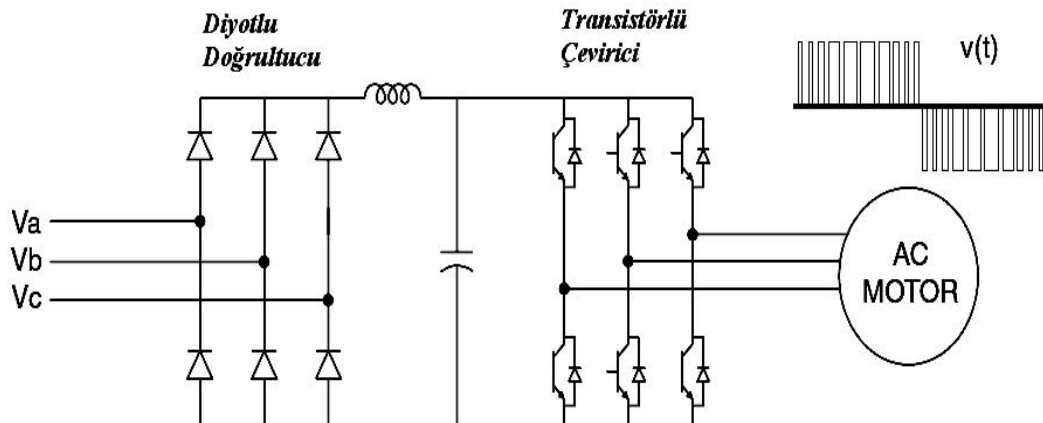
kullanmaktadır. Daha büyük sürücüler 12-darbeli doğrultucu kullanabilmektedir. Bu tristör akımını ve bazı baskın harmonikleri bastırır. 6-darbeli doğrultucunun baskın harmonikleri 5. ve 7. harmoniklerdir. Bu harmonik bileşenler elektrik tesislerinde sistemin harmoniklere karşı vereceği tepkinin kestirilmesi bakımından en çok sıkıntı çekilen harmoniklerdir. Böyle bir sistemde 12-darbeli doğrultucu kullanılması, sistemin dengesizlik durumuna göre 5. ve 7. harmonik bileşenlerinde %90 oranında azalma sağlar. 12-darbeli doğrultucunun dezavantajı ise daha çok elektronik eleman ve genellikle ikinci bir transformatör gerektirmesidir (Dugan ve ark. 1996).

5.1.2.1.2. AC sürücüler

AC sürücülerde doğrultucunun çıkışı, motor için ayarlanabilir frekanslı AC gerilim üretmek için doğrultulur. Doğrultucular akım kaynaklı ve gerilim kaynaklı doğrultucular olmak üzere iki kısımdır. Gerilim kaynaklı doğrultucuların inverter girişine sabit bir DC gerilim gereklidir. Bu DC gerilim bir kapasitörden ya da DC bağlantıdaki LC filtresinden elde edilir. Akım kaynaklı doğrultucuda ise sabit bir giriş akımı gereklidir. Bu yüzden seri bir endüktör DC bağlantıya eklenmiştir.

AC sürücüleri genellikle standart sincap kafesli endüksiyon motorlarında kullanılır. Bu motorlar genellikle dayanıklı, ucuz ve bakım gerektirmezler. Senkron motorlar genellikle hassas hız kontrolünün gerektiği yerlerde kullanılır.

Şekil 5.11'de ayarlanabilir genişlikli DC genliğe sahip bir AC dalgayı PWM



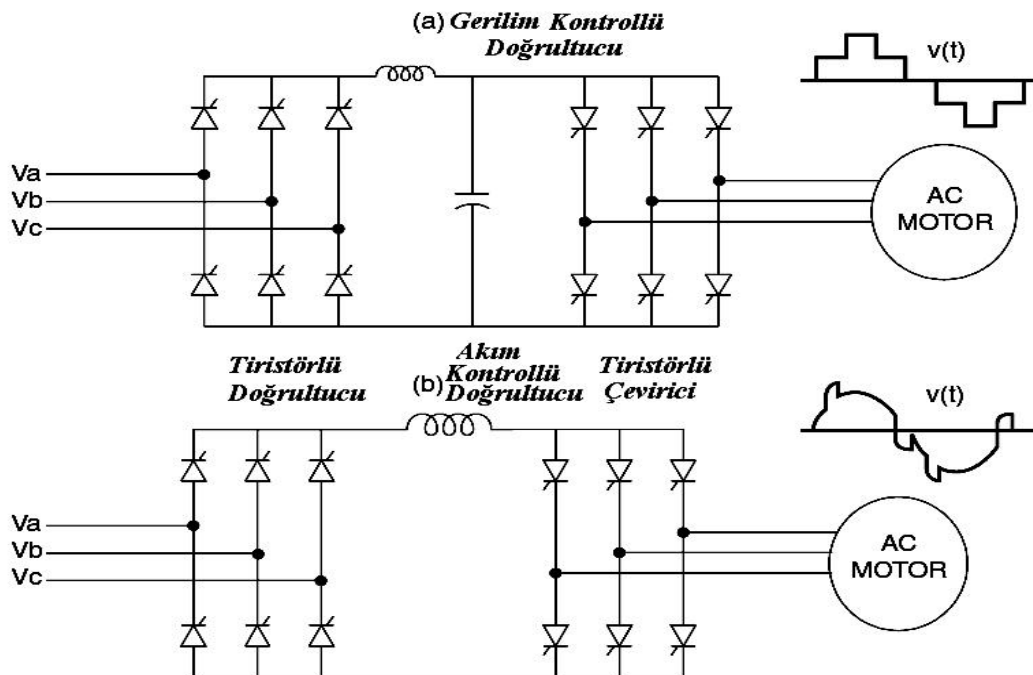
Şekil 5.11. PWM'li hız kontrol sürücü.

yöntemiyle gerilim kaynaklı doğrultucu kullanan ve kullanımı çok yaygın bir AC sürücünün şekli görülmektedir. Doğrultucu bu işi yapabilmek için SCRs, GTO ya da güç transistörlerini kullanır. Halen PWM'li gerilim kaynaklı doğrultucu 500 HP'ye kadar olan uygulamalarda en yüksek enerji verimliliğini sağlamaktadır. Diğerlerinden farklı olarak PWM'li doğrultucunun avantajı hız kontrolü yapmak için doğrultucunun çıkış gerilimini değiştirmemesidir. Bu da doğrultucu tristörlerinin yerine diyotların kullanılabilmesini sağlar.

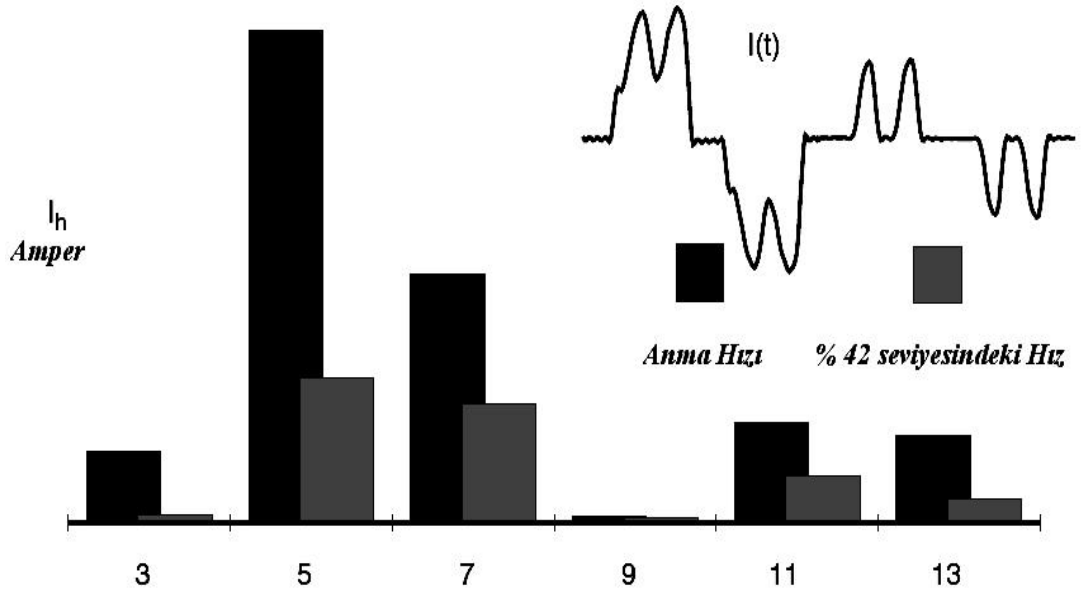
Çok büyük güçlü hız kontrol sürücüleri SCRs ve doğrultucu kullanır. Bunlar Şekil 5.12'de gösterildiği gibi 6-darbeli veya 12-darbeli dc sürücüler olabilir. Gerilim kaynaklı doğrultucular hız kontrolünde çabuk değişim yapamadığı için yaygın olarak kullanılmamaktadır. Akım kaynaklı doğrultucu ise çok çabuk hız ayarı yapmaktadır. Fakat doğrultucu tristörlerini çevirmek için güç faktörü iyi olan bir motor ya da ilave bir devre kullanılması gerekmektedir.

Akım kaynaklı doğrultucularda kullanılan ve sürücünün fiyatını artıran tristörler ani akım yükselmelerine karşı korunmalıdır.

Ayarlanabilir hız kontrol sürücülerinde harmonik akım distorsiyonu sabit değildir. Dalga şekli değişen hıza ve momente bağlı olarak değişmektedir. Şekil



Şekil 5.12. Büyük boyutlu AC hız kontrol sürücü.

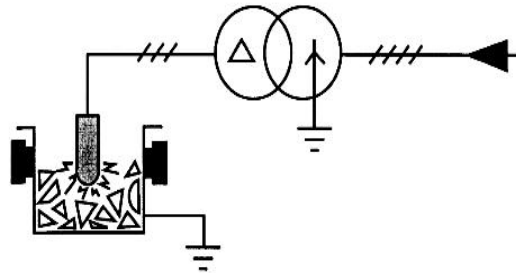


Şekil 5.13. PWM'li hız kontrol sürücüsünün hız değişiminin harmoniklere etkisi.

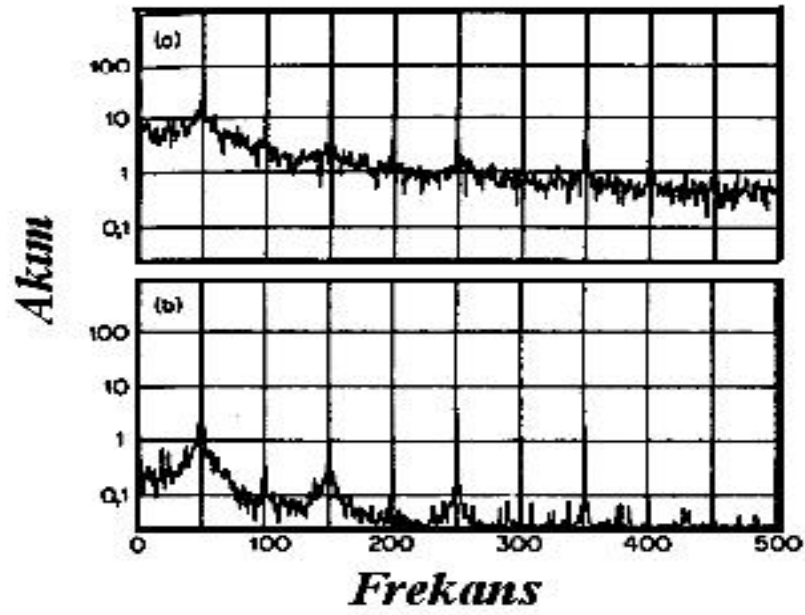
5.13'te bir PWM hız kontrol sürücüsünün çalışma durumunu göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere % 42 seviyelerindeki hızda dalga formundaki distorsiyon daha yüksektir. Anma hızında ise harmonikli bileşenlerin seviyesi daha da yükselmektedir.

5.1.2.2. Ark makineleri

Bu kısım ark fırınlarını, elektrikli kaynak makinelerini, manyetik balastlı



Şekil 5.14. Bir ark fırınının gösterimi.

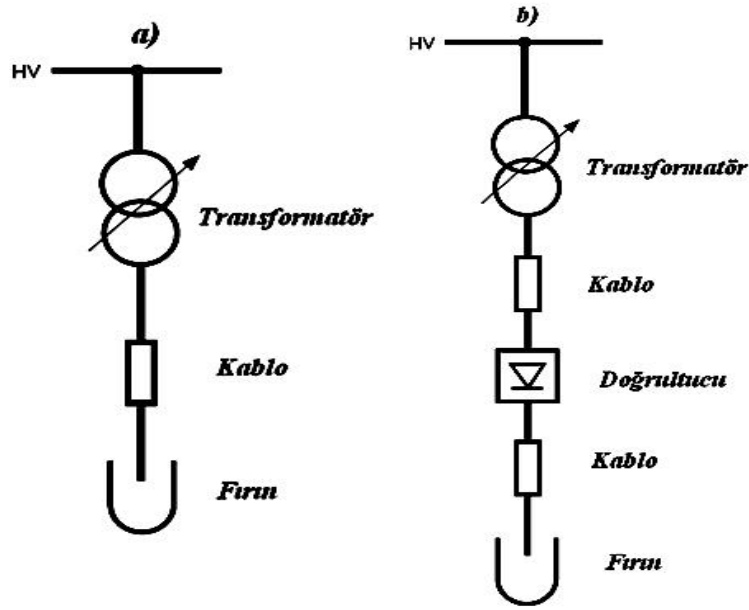


Şekil 5.15. Tipik bir ark fırınının frekans spektrumu a) ilk eritme anında (aktif ark) b) arıtma anında (kararlı ark)

Tablo 5.1. Bir ark fırınına ait harmonik akım değerleri (Temel bileşenin yüzdesi) (Engin 2008).

| Fırının Çalışma Durumu | Harmonik dereceleri | | | | |
|------------------------|---------------------|-----|-----|-----|-----|
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 |
| İlk eritme (aktif ark) | 7,7 | 5,8 | 2,5 | 4,2 | 3,1 |
| Arıtma (kararlı ark) | 0 | 2 | 0 | 2,1 | 0 |

deşarj lambalarını (florasan, sodyum buharlı, cıva buharlı) içermektedir. Elektrik arkının gerilim karakteristiği lineer değildir. Arkın başlamasıyla gerilim düşer ve akım artar. Akımı sınırlandıran güç sisteminin empedansıdır.



Şekil 5.16. DC veya AC güçle beslenen ark fırınlarının gösterimi (Ferracci 1999).

Ark fırını uygulamalarında sınırlayıcı empedans, kullanılan kablo empedansı, ark uçlarının empedansı, sistem ve ark fırını transformatörlerinin empedanslarıdır. 60,000 A'e kadar varan akım değerli fırınlar yaygın olarak kullanılmaktadır.

Elektrik arkı başlı başına gerilim harmonik kaynağı olarak kabul edilebilir. Herhangi bir prop bir arkın arasına yerleştirildiğinde ikizkenar yamuğa benzer ve genliği ark uzunluğunun bir fonksiyonu olan bir dalga şekli görülür. Bununla birlikte balastların empedansı ya da ark fırınının ark noktasındaki uçların empedansı bir tampon görevi yaptıklarından sistem gerilim dalgası kısmen bozulur. Bu yüzden ark yükleri sistemlerde genel olarak çoğu analizin yapılabilmesi için uygun olan sabit harmonik akım kaynakları olarak bulunur. İstisnai durumlar sistemin rezonans frekansına yakın olduğu durumlarda meydana gelir. Ark kaynaklarının ve bu mantıkla çalışan diğer cihazların harmonik spektrumları Şekil 5.6'daki manyetik balastlı florasan lambanın spektrumuna benzemektedir.

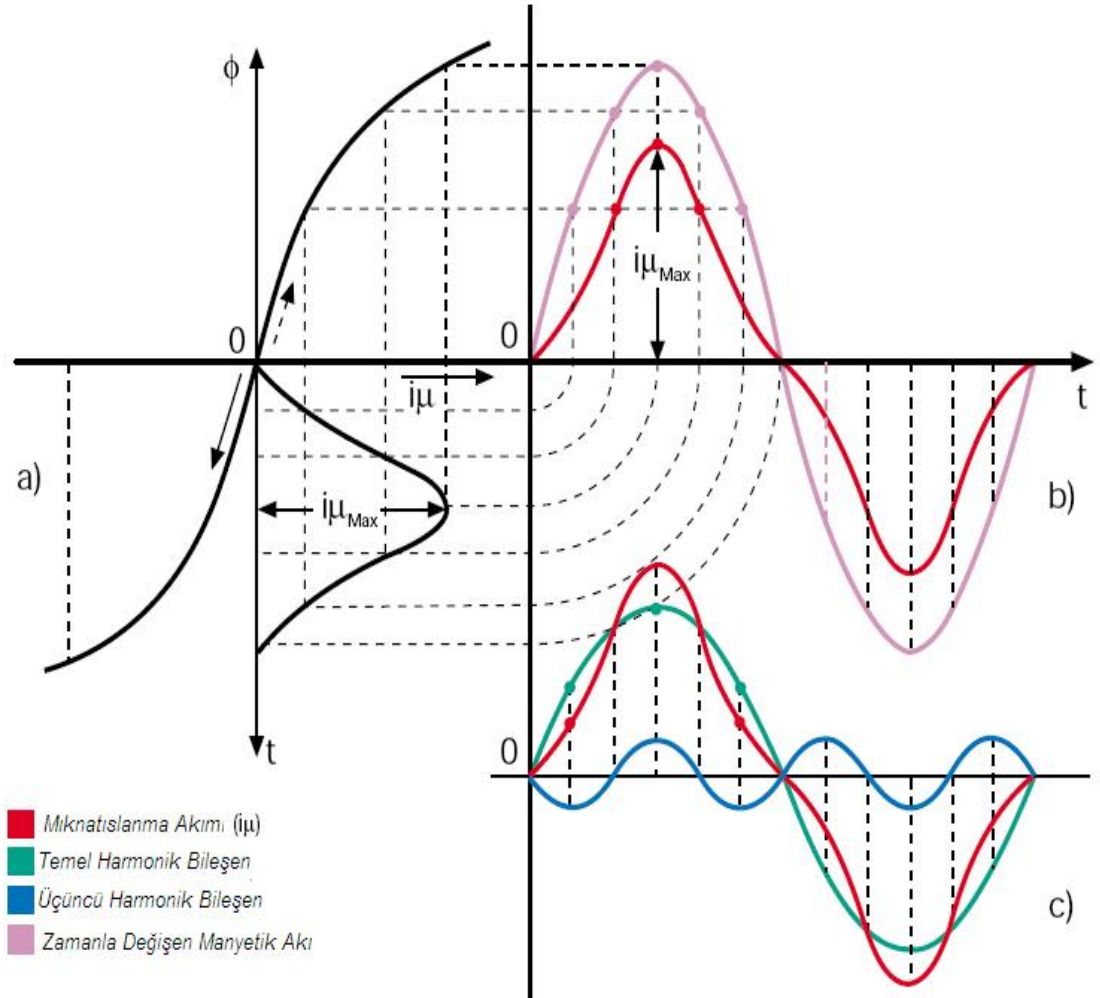
Üç fazlı ark cihazlarının ürettiği triplen harmonikleri transformatörün bağlantı şekline göre azaltılabilir. Fakat bu harmonik azaltma işlemi fazlardaki eritme işlemlerinde frekans dengesizliği bulunmasıyla sonuç vermeyebilir. Eritme işleminin yapıldığı süreç içerisinde ark daha düzenli olduğu için harmonikler daha az oluşur (Dugan ve ark. 1996).

5.1.2.3. Nüveli (Doyuma gidebilen) cihazlar

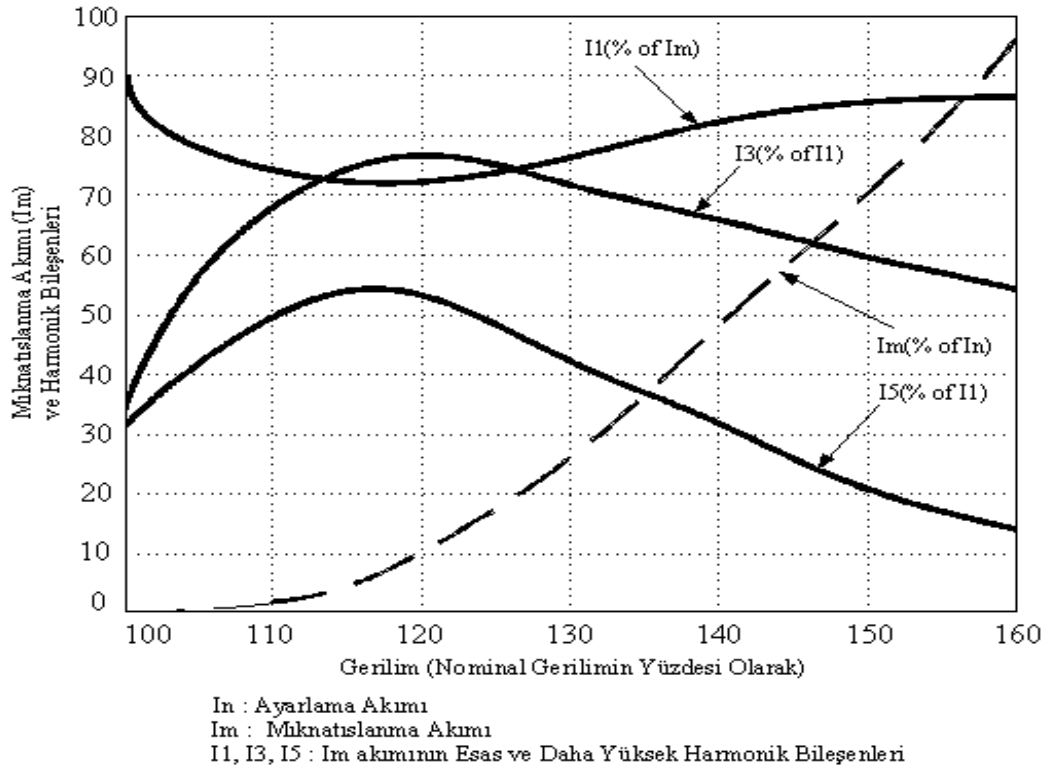
Bu bölümdeki cihazlar motorları da kapsayan demir çekirdekli elektromanyetik makineleri içine almaktadır. Genel olarak harmonikler demir çekirdeğin nonlineer mıknatıslanma karakteristiğinden kaynaklanmaktadır (Dugan ve ark. 1996).

5.1.2.3.1. Transformatörler

Transformatörler sinüzoidal manyetik akı üretmelerine karşın manyetik



Şekil 5.17. Transformatörlerin mıknatıslanma karakteristiği (Baioni 2006).



Şekil 5.18. Uyarlama gerilimi olarak transformatör aşırı uyartım akımının harmonik içeriği (Sağlam 2005).

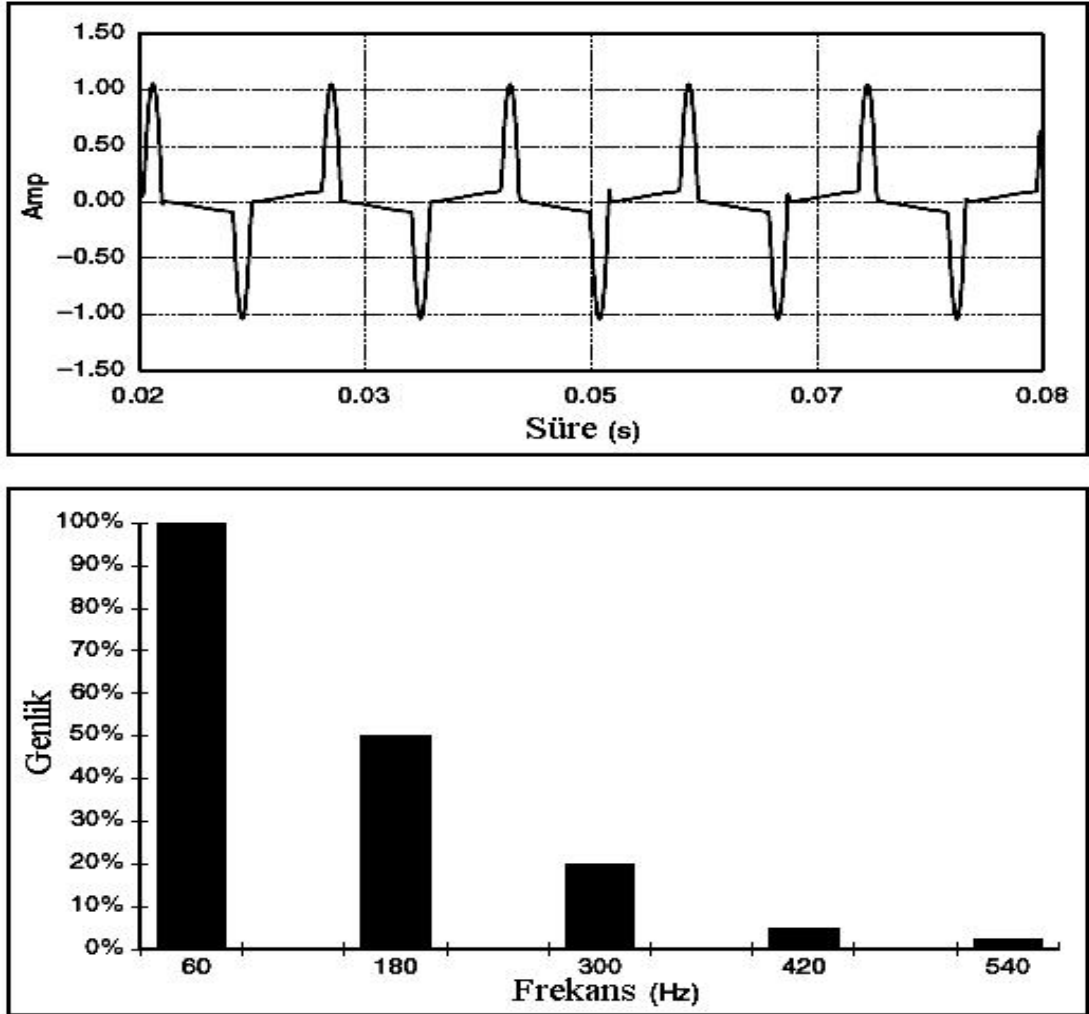
nüvenin doyuma gitmesiyle nonsinüzoidal miknatıslanma akımı üretirler. Transformatörlerin miknatıslanma karakteristiği Şekil 5.17 'de gösterilmektedir (Baioni 2006).

Transformatörlerin nominal değerlerin dışında çalışması nüvede daha çok doymaya sebep olur. Doyma Şekil 5.18'de görüldüğü gibi harmonik akımların seviyesinde hızlı artmaya sebep olur (Adak 2003).

Transformatörler sinüzoidal gerilimle çalışma altında lineer miknatıslama karakteristiği bölgesinde sinüzoidal çıkış büyüklüğü verecek şekilde tasarlanırlar. Transformatörlerin nominal değerlerinin dışında çalışması nüvede daha çok doymaya ve harmonik akımları seviyesinde hızla artmaya sebep olabilir. Miknatıslanma akımı harmonikleri, günün erken saatlerinde en yüksek seviyeye ulaşır. Çünkü sistem yükü az olup, gerilim yükselerek aşırı uyartım meydana gelir. Aşırı uyartımla oluşan akım harmoniklerinde 3., 5. ve 7. harmonikler etkilidir. Şekil 5.19'da bir transformatörün miknatıslanma akımı ve harmonik spektrumu görülmektedir.

Harmonik akımları transformatörün primer reaktansı, hattın reaktansı ve generatörün kaçak reaktansı üzerinden geçerek harmonik gerilim düşümü meydana getirir; generatörde sinüs şeklinde emk üretildiği halde çıkış uçlarındaki gerilim şekli bozulabilir. Bununla beraber mıknatıslama akımlarının şebekeye geçip geçmemesi transformatörün bağlantı grubu, primerin yıldız bağlı olması halinde yıldız noktasının şebekenin nötrüne bağlı olup olmaması ve transformatördeki manyetik devrenin geometrik yapısına bağlı olarak değişmektedir (Adak 2003).

Transformatörlerde genelde iki türlü harmonik oluşur. Bu harmonikler akım harmonikleri ve gerilim harmonikleri olarak sınıflandırılır. Akım devresinde akan yüksek harmoniklerden dolayı ilave joule ($I^2.R$) kayıpları oluşur. Çekirdek demir kayıpları artar. Haberleşme devreleri üzerinde manyetik etkiler yapar. Gerilim harmoniklerinin etkileri: Dielektrik zorlanmasını artırır. Haberleşme devrelerine



Şekil 5.19. Transformatörün mıknatıslama akımı ve harmonik spektrumu (Dugan ve ark. 1996).

Tablo 5.2. Mıknatıslanma akımlarının oranı.

| Harmonik Bileşenler (n) | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 |
|-------------------------|------|------|------|------|------|
| I_{mn}/I_m | 0.86 | 0.40 | 0.23 | 0.12 | 0.07 |

elektrostatik etki yapar. Transformatörün endüktansı ile transformatöre bağlı tüketicilerin kapasitesi arasında rezonans oluşmasına sebep olur. Bu etkiler istenmeyen etkilerdir.

Akım şiddeti bakımından en önemli harmonik 3. harmoniktir. 3 ve 3'ün katı harmoniklerin en önemli özellikleri, bunlar arasındaki faz farkının 360 derecenin tam sayılı katlarına eşit olması, yani bunların hepsinin aynı fazda olmalarıdır.

Üç fazlı transformatörlerde mıknatıslanma akımı transformatörün bağlantı şekline ve manyetik devresinin yapısına bağlı olarak değişir. Üç ve üçün katı harmonikler çeşitli bağlantı grupları ile yok edilebilirler. 5, ve 7, harmoniklerin etkileri soğukta haddelenmiş ve kristalleri yönlendirilmiş saçlar kullanılarak azaltılabilir.

Transformatörlerde mıknatıslanma akımının 3 ve 3'ün katı harmoniklerin şebekede bulunmasını önlemek için primer yıldız bağlı transformatörlerin yıldız noktası, şebekenin nötr hattına bağlanmaz veya sargıların biri üçgen bağlanır veya büyük güçlü transformatörlerde olduğu gibi üçgen bağlı tersiyer sargı kullanılır.

Transformatörlerde kristalleri manyetik yönlendirilmiş saçlar kullanarak harmoniklerin etkileri azaltılabilir. 1600 Gauss' ta kristalleri manyetik yönlendirilmiş saclardan oluşan trafo çekirdeklerinde muhtelif harmoniklerin etkin değeri ile toplam mıknatıslanma akımının etkin değeri arasındaki oranlar Tablo 5.1'de verilmiştir.

Mıknatıslanma akımlarının harmoniklerinin tepe değerleri, temel mıknatıslanma akımının tepe değerinden oldukça küçüktür. Transformatörlerin mıknatıslanma akımları nominal akımlarının % 0.5 ile % 1'i kadardır. Buna rağmen seri bağlı generatör, hat ve transformatör reaktansları frekansla orantılı arttıklarından, özellikle düşük yüklerde yüksek harmonik akımlarının bunlar üzerinde sebep oldukları reaktif gerilim düşümleri büyük değerler alır. Mıknatıslanma akımlarının şebekeye geçişleri aşağıdaki faktörlere bağlıdır.

Tablo 5.4. Sıcakta haddelenmiş yüksek alaşımlı saçlardan imal edilmiş bir transformatörde mıknatıslanma akımının harmoniklerinin temel harmoniğe oranları (Adak 2003).

| Çekirdek endüksiyonu (Gaus) | I_3/I_1 | I_5/I_1 | I_7/I_1 | I_9/I_1 |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 10000 | -0.162 | 0.05 | 0.011 | 0.009 |
| 12000 | -0.287 | 0.095 | -0.013 | 0.01 |
| 14000 | -0.528 | 0.267 | -0.013 | 0.062 |
| 16000 | -0.658 | 0.331 | -0.121 | 0.031 |
| 18000 | -0.658 | 0.275 | -0.053 | -0.018 |

Tablo 5.3. Manyetik endüksiyonu ortalama 16000 gauss olan soğukta haddelenmiş ve kristalleri yönlendirilmiş bir transformatörde mıknatıslanma akımının harmoniklerinin temel harmoniğe oranı (Adak 2003).

| I_3/I_1 | I_5/I_1 | I_7/I_1 | I_9/I_1 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.08 | 0.44 | 0.27 | 0.14 |

- ✓ Transformatör sargılarının bağlantı tarzı (bağlama grubu)
- ✓ Primlerdeki yıldız bağlı sargılarda, yıldız noktasının şebekenin nötr hattına bağlanıp bağlanmamasına,
- ✓ Transformatörlerde mıknatıslanmanın serbest veya zorunlu olmasına bağlıdır.

Buna rağmen şebekeden 5. ve 7. harmonikler geçmeye devam eder. Bu tür harmonikler rezonansa sebep olabilir. Bunu önlemek için transformatörlerde konstrüktif tedbirlere başvurulabilir. Şebekedeki mıknatıslanma akımını düşürmek için en uygun tedbir manyetik endüksiyonu düşük tutmaktır. Transformatörlerde soğuk haddelenmiş ve kristalleri yönlendirilmiş saç kullanmakla bu sonuca ulaşılmaktadır. Bu tür saçları kullanmakla harmonikler değerlerinin 1/5 değerine kadar düşmektedirler. Böylece harmoniklerin tehlikesi büyük çapta önlenmiş olur.

Tablo 5.3'te sıcakta haddelenmiş yüksek alaşımlı saçlardan imal edilmiş bir transformatörde mıknatıslanma akımının harmoniklerinin temel harmoniğe oranları gösterilmiştir.

Tablo 5.4'te manyetik endüksiyonu ortalama 16000 gauss olan soğukta haddelenmiş ve kristalleri yönlendirilmiş bir transformatörde mıknatıslanma akımının harmoniklerinin temel harmoniğe oranı gösterilmiştir (Adak 2003).

5.1.2.3.2. Generatörler

Dönen makineler, makine ve endüvi oluk sayısına bağlı olarak harmonik üretirler. En tabii harmonik üreticileri generatörlerdir. Alan şekline ve manyetik devrenin doyuma ulaşmasına ya da manyetik direncin değişimine bağlı olarak harmonik üretirler. Bu nedenlerden dolayı generatör sargılarının yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılması tercih edilir. Generatör dört iletkenli bir şebekeye bağlı ise, bu koşulda nötr hattı, zigzag bağlı bir bobinle oluşturulan suni yıldız noktasına bağlanır. Stator sargı adımlarının uygun seçildikten sonra kırılganlık yolu ile alan eğrisindeki 3. harmonik ile 5. ve 7. harmonikler gerilim eğrisinde tamamen ortadan kaldırılabilmektedirler. Burada dikkate değer en düşük harmonik 2. harmoniktir (Adak 2003).

Generatör bağlantı şekilleri de harmonik frekansında belirleyici özellik taşırlar:

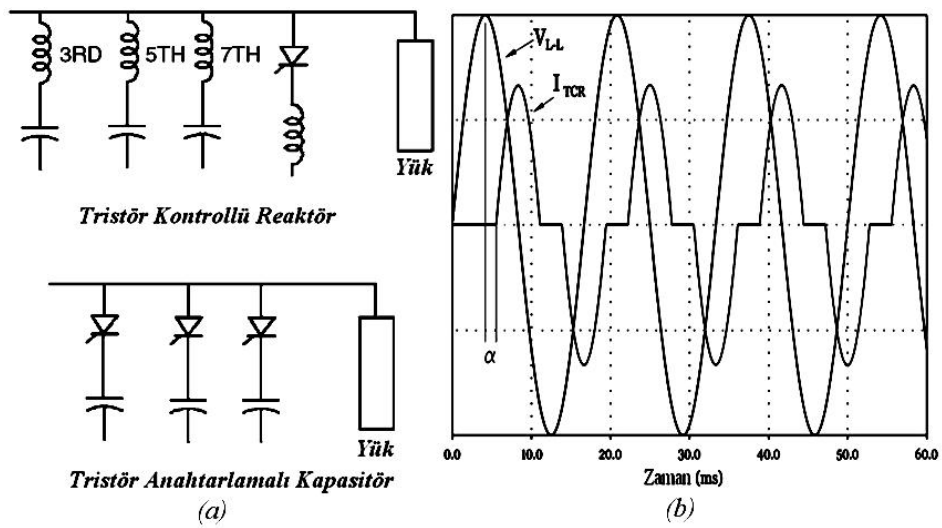
- Eğer statorun sargısı yıldız bağlanmışsa, 3 ve 3'ün katı frekanslı harmonikler sadece faz gerilimlerinde bulunmakta olup fazlar arası gerilimlerde ise bulunmazlar.
- Eğer yıldız bağlı generatöre üç fazlı dengeli bir tüketici bağlanırsa ve yıldız noktası generatörün yıldız noktasına bağlanmazsa, 3 ve 3'ün katı harmonikli akımlar geçmezler. Yıldız noktası nötr'e bağlı bir yükte ise faz iletkenlerinden 3 ve 3'ün katı frekanslı I_0 akımı, nötr üzerinden de bunların toplamı olan $3.I_0$ değerinde bir akım geçer. Bu akımlar, aynı şekilde 3 ve 3'ün katlarına eşit frekanslı bir gerilim düşümü meydana getirirler.
- Eğer generatör sargıları üçgen bağlı ise, bu sargılarda 3'ün katları frekanslı bir sirkülasyon akımı geçer. Bu akım, yüke bağlı olmayıp sargılarda büyük kayıplara neden olur.

Bu sebeplerden dolayı, generatör sargılarının yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılması tercih edilir, generatörün dört iletkenli bir şebekeyi beslemesi gerekiyorsa, zigzag bağlı bir bobinde oluşturulan suni yıldız noktasına bağlanır. Generatörlerin sebep olduğu 3 ve 3'ün katları harmonik akımları, generatör veya blok transformatörün birinde üçgen bağlama kullanılmak suretiyle bloke edilir. Kutular ve endüvi olukları uygun tasarlanarak 5. ve 7. harmonik gerilimlerini sınırlamak mümkündür. Burada dikkate değer en düşük harmonik 11. harmoniktir (Özcan 2006).

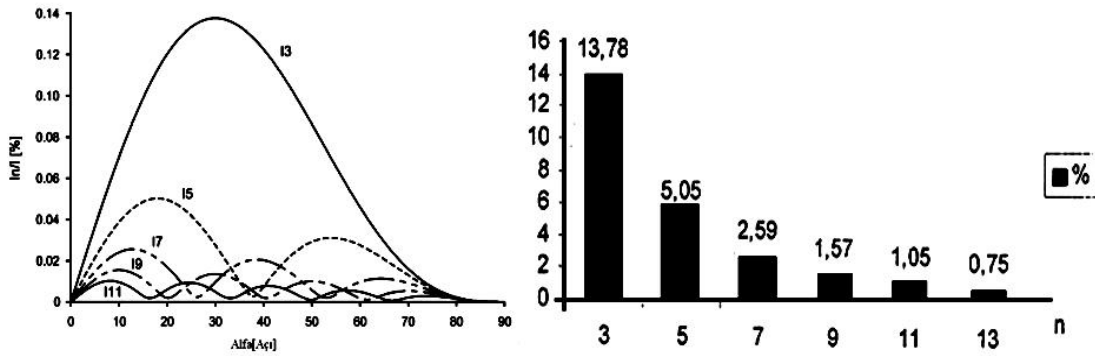
5.1.3. Diğer harmonik kaynakları

5.1.3.1. Statik VAR kompanzatorleri

Tristör kontrollü reaktör (TKR) içeren statik Var kompanzatorleri, ilk olarak 1970'li yıllarda kullanılmaya başlanmış olup günümüzde de iletim hatlarında yaygın kullanıma sahiptirler. Sürekli ve hızlı bir reaktif güç ve gerilim kontrolü sağlama kabiliyetleri sebebiyle tristör kontrollü reaktörler, güç sisteminin performansını pek çok yönden geliştirebilirler. Bunlar, güç frekansında geçici aşırı gerilimlerin kontrolü, gerilim çökmesinin önlenmesi, geçici kararlılığın artırılması, iletim ve dağıtım sistemlerinde dengesiz yükleri besleyen üç fazlı sistemlerin dengelenmesi ve kesintili sürelerde çalışan yüklerin sebep olduğu gerilim salınımları önlenmesi olarak sıralanabilir. Güç sistemlerinde reaktif güç kontrolü amacıyla kullanılan tristör kontrollü reaktör içeren statik Var kompanzatorleri, içerdikleri nonlineer elemanlar sebebiyle lineer olmayan uç karakteristiğine sahiptirler. Statik VAR kompanzatorleri bu sebeple bağlı oldukları güç sisteminde nonsinüzoidal büyüklüklere neden olurlar. Bu büyüklükler güç sisteminde bir takım olumsuz etkiler meydana getirdiklerinden, sistemin davranışı harmonik bileşenler göz önüne alınarak analiz edilmelidir.



Şekil 5.20. Tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlama kapasitörün a) temel elemanları (Dugan ve ark. 1996), b) gerilim ve dalga akım şekli (Harlow 2004).



Şekil 5.21. Tristör kontrollü reaktörün temel bileşenin yüzdesi olarak harmonik akımlarının dalga şekli (Harlow 2004) ve spektrumu (Özcan 2006).

Bir tristör kontrollü reaktörün temel elemanları ters paralel bağlı iki tristör ile buna seri bağlı reaktörden oluşur. Bu iki ters paralel bağlı tristör simetrik bir biçimde tetiklenmektedir. Buradaki tristörler zamana bağlı olarak akımın temel bileşenini kontrol eder. Tristörlerin her biri uçlarındaki gerilimin sıfır geçiş anından itibaren ölçülen tetikleme açısına (α) ya da iletim açısına (σ) bağlı olup dönüşümlü olarak yarım periyotluk sürelerle iletimde olurlar. Tam iletim hali, tetikleme açısının 90 dereceye eşit olmasıyla elde edilir. Bu durumda akım, tam endüktif karakterde ve sinüzoidaldir. Şekil 5.20.b'de görüldüğü gibi tetikleme açısının 90 derece ile 180 derece değerleri arasında kısmi iletim söz konusudur. Tetikleme açılarının 0 derece ile 90 derece değerleri arasında olması durumunda, doğru akım bileşenli asimetrik akımlar meydana geleceğinden, bu aralıklarda işletimine pratikte müsaade edilmez (Özcan 2006).

Dengeli yüklenme koşulları altında TKR, tek dereceli harmonikler üretir. Eğer TKR'de üçgen bağlantı yapılırsa 3.harmonik ile 3'ün katları olan harmonikler şebekeye verilmez ve bağlantı içinde elimine edilir. Bir TKR' ye ait olan harmonik akımların (I_{rn}) temel bileşen akımına (I_{r1}) oranı yüzde olarak Şekil 5.21'de verilmiştir.

Nonsinüzoidal büyüklüklerin içerdikleri harmonik bileşenlerden herhangi biri sistemi rezonansa sokabilir ve bu durumda, TKR içeren devrelerin rezonans sonucu etkin harmonik üretimine ve süreksizliğe sebep olacak çalışma noktalarında işletilmemesine çok dikkat edilmelidir (Özcan 2006).



Şekil 5.22. Fotovoltaik enerji üretimi blok şeması.

5.1.3.2. Fotovoltaik sistemler

Fotovoltaik sistemler harmonik üretme bakımından genel olarak konverterlerden kaynaklanan harmonik etkinliğe sahiptirler. Bu sistemler elektrik enerjisini fotovoltaik yoldan elde eden sistemler olup, ürettikleri doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek için konverterleri kullanırlar. Dolayısıyla dönüşüm esnasında yarı iletken elemanların sebep olduğu harmonikler söz konusu olmaktadır. Fotovoltaik enerji üretimi blok şeması Şekil 5.22’de görülmektedir

5.1.3.3. Bilgisayarlar

Hassas yüklerden biri olan bilgisayar sistemleri, yalnızca bozucu etkilerden etkilenmekle kalmayıp aynı zamanda birer etki kaynağıdır. Bilgisayarların nonlineer yük karakteristikleri, güç sistemlerinde anormal gerilim düşümleri, nötr iletkenlerinin aşırı yüklenmesi ve hat geriliminin distorsiyonları gibi bozucu etkilere neden olabilmektedir. (Özcan 2006).

5.1.3.4. Kesintisiz güç kaynakları

Kesintisiz güç kaynakları, güç elektroniği elemanları ile anahtarlama yaparak alternatif gerilimi doğru gerilime çevirip, enerjinin depolanması ve sonra evirici yardımı ile alternatif akıma çevirerek elektrik kesintisi anında tüketiciye iletmesi prensibine göre çalışır. Hem doğrultucu hem de evirici tarafında harmonikler oluştururlar. (Özcan 2006).

Yukarıda açıklanan belli başlı bu harmonik kaynaklarına ilaveten diğer harmonik kaynakları da aşağıdaki gibidir.

- Elektrik makinelerindeki diş ve oluklar
- Çıkık kutuplu senkron makinelerde hava aralığındaki relüktans değişimi
- Senkron makinelerde hava aralığı döner alanı
- Senkron makinelerde ani yük değişimlerinin meydana getirdiği manyetik akı dalga şeklindeki bozulmalar
- Transformatörlerin ilk enerjilenmesi ve motorların kalkış akımları
- Güç üretim tesislerinde pompa, ateşleyici ve fanları sürmede kullanılan elektronik kontrol düzenleri
- Özellikle çimento ve maden sanayisinde kullanılan lineer motorları sürmek için kullanılan frekans dönüştürücüler İndüksiyonla ısıtmanın kullanıldığı çelik sanayi, haddehaneler, kaynak makineleri
- Başta teyp, portatif TV adaptörleri, ütü, tıraş makinesi ve uzun ömürlü tekrar dolabilen piller gibi şarjlı cihazlarda kullanan doğrultucu devreler
- Reaktif gücün çok hızlı ve ani değiştiği (özellikle ark fırınlarında) sistemlerde tristör anahtarlamalı statik VAr kompanzasyonu
- Bilgisayar / network sistemleri ve bunlarla yönetilen otomasyona dayalı üretim tesisleri
- Doğru akım ile enerji iletimi kontrolü ve dönüştürücü istasyonlar
- Elektrikli trenler ve tek-raylı ulaşım araçlarında yüksek güçlü doğrultucuları, universal ve üç fazlı motorları beslemek için kullanılan dönüştürücüler, elektrikli taşıtlarda akü şarj devreleri
- Konutlarda kullanılmaya başlanan fuzzy kontrollü çamaşır ve bulaşık makineleri, özellikle çok ekranlı televizyonlar, akıllı fırınlar ve mikro dalga fırınları, otomatik ayarlı aspiratörler ve hava düzenleyiciler (klimalar).
- Elektrokimya teknolojisinde plakalara şekil verme, elektro kaplama işlemlerinde ve elektrophoretic boya spreylерinde kullanılan statik dönüştürücüler
- Rüzgâr ve güneş enerjisi gibi alternatif enerji kaynaklarında özellikle ac/dc dönüştürücülerde kullanılan yarı iletken teknolojisi.

5.2. Harmoniklerin Sisteme Zararlı Etkileri

Harmonikler akım ve gerilim harmonikleri olarak ikiye ayrılır. Bunların etkileri;

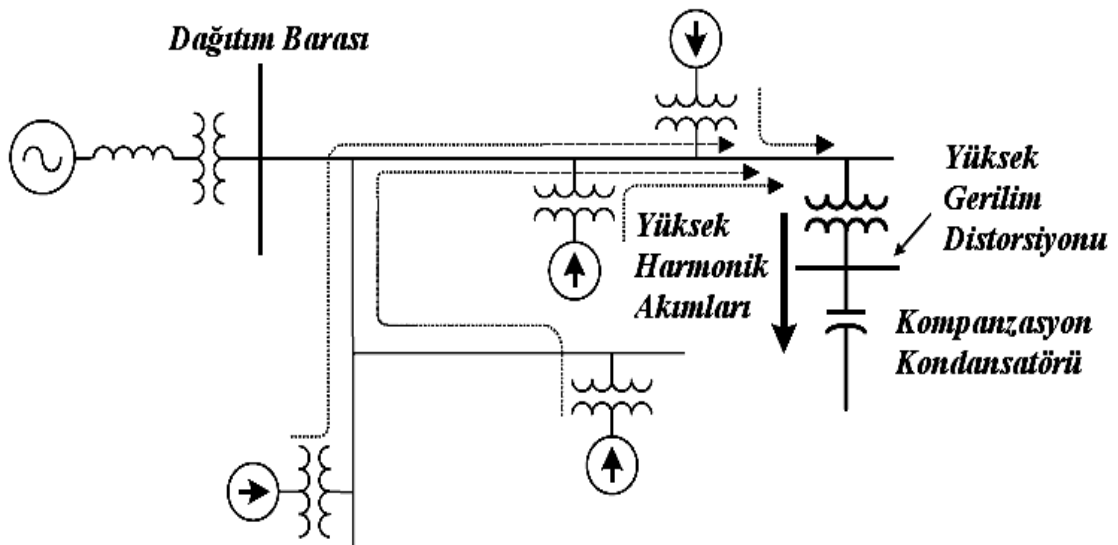
Akım harmonikleri:

- Nötr hattının aşırı yüklenmesi
- Transformatörlerdeki kayıpların artması
- Deri Etkisi'nin (Skin Effect) artması

Gerilim harmonikleri:

- Voltaj distorsiyonu
- İndüksiyon motorlarında torkdaki dengesizlikler (Baioni 2006).

Harmoniklerin elektrik sistemlerinde sinüzoidal dalga biçimini bozmalarının yanı sıra sistemdeki mevcut elemanlardan şebeke frekansından yüksek frekanslarda akımlar geçirerek sistem elemanlarının aşırı ısınmasına neden olur. Günümüzde özellikle birçok elektronik eleman kullanıldığı sanayide sistemlerin yanlış çalışmasına ve dolayısıyla prosesin durmasına neden olur. Bunun yanında harmonik kaynağı olan bir fabrikanın ürettiği harmonikler fabrikanın endüktif reaktansıya, harmonik kaynağı olmayan ve aynı şebekeden beslenen diğer bir fabrikanın



Şekil 5.23. Güç sistemindeki seri rezonans tehlikesi (Dugan ve ark. 1996).

kompanzasyon sisteminin kapasitif reaktansı baskın harmonik frekanslarda Şekil 5.32'deki gibi seri rezonansa girerek harmoniksiz fabrikanın kompanzasyon sistemi üzerinde yüksek gerilim düşümü oluşmasına ve dolayısıyla arızalara hatta bazı durumlarda kondansatör patlamasıyla yangına sebep olmaktadır.

Harmonikler ölçüm sistemlerinde de yanlış ölçümler yapılmasına neden olmaktadır. Sanayide ve diğer kuruluşlarda çıkarılan yasayla genellikle akım ve gerilim değerinin çarpılmasıyla hesaplama yapan sayaçlar bulunmaktadır. Bu sayaçlar harmonikli ortamlarda neredeyse hatasız ölçüm yapmaktadır. Ancak döner telli konvansiyonel elektrik sayaçları ile faturalandırma yapılan yerlerde harmonikli ortamlarda hatalar %20 seviyelerine ulaşmaktadır.

Harmoniklerin enerji sistemine zararları genel itibarıyla şöyle sıralanabilir:

- Kondansatör gruplarının yalıtkanlıklarının bozulmasına veya kondansatörün aşırı yükten dolayı kötü çalışmasına,
- Taşıyıcı güç sistemleri ve dalga kontrolünde parazite, yük kontrolü, ölçme uzaktan anahtarlama yapan sistemlerin kötü çalışmasına,
- Asenkron ve senkron makinelerde aşırı ısınmaya ve bundan dolayı kayıplara,
- Rezonans nedeniyle sistemde aşırı gerilim ve aşırı akımlara,
- Sistemde oluşturduğu aşırı gerilimden dolayı, kullanılan iletkenlerin yalıtkanlıklarının bozulmasına,
- İletişim sistemlerinde parazite,
- Endüksiyon prensibine göre çalışan ölçü aletlerinde hatalara,
- İşaret parazitlerine ve rölelerin kötü çalışmasına (özellikle mikroişlemci kontrollü sistemlerin kötü çalışmasına),
- Yaygın olarak kullanılan motor denetleyicilerinde ve güç istasyonu uyarım sistemlerinde parazite,
- Asenkron ve senkron makinelerde mekaniksel titreşime,
- Sıfır gerilim geçişine veya tetiklemeye dayanan ateşleme devrelerinin kararsız çalışmasına,
- Motorlar ve diğer aparatlarda fazladan ses oluşmasına,
- Kompanzasyon kapasitörleri ve kablo kapasitansının varlığı, bozulmaya sebep olan yükten uzak bir noktada bile, şebekede gerilim artışlarına neden olan seri ve paralel rezonanslara yol açabilmektedir.

5.2.1. Transformatörler üzerindeki etkileri

Harmonikli akımların transformatörler üzerindeki ilk etkisi aşırı ısınmadır. Transformatör endüktansı ile sistem kapasitansı arasındaki paralel rezonans tehlikesini de içine alan diğer etkileri ise transformatör iletkenlerindeki izolasyonlarda zorlanmalar, üçgen bağlı transformatörlerde döngü akımları sonucu aşırı ısınma, yüksek frekanslı harmoniklerin bulunmasıyla çekirdekte titreşimler ve gürültü oluşmaktadır.

Sistem harmoniklerinden dolayı transformatörlerdeki ısınmalar transformatörün kapasitesini arttırmayı ya da harmonikli ortamlarda çalışabilen transformatör dizaynını gerektirmektedir. Transformatörün ömrü harmonikli ortamlarda aşırı ısınmayla normal ömrünün altına düşmektedir (Wagner 1993).

Transformatör ve generatörler, aşırı ısınmadan dolayı anma değerlerinin %70'ine ulaştıklarında devre dışı kalabilirler (Özcan 2006).

Akım harmonikleri bakır kayıplarında artışa, gerilim harmonikleri ise demir kayıplarında artışa neden olurlar (Adak 2003).

Transformatörlerdeki harmonik kaynaklı başlıca kayıplar; sarımlardaki $I^2.R$ kayıpları, eddy akımı kayıpları, sarımlar, çekirdek, bağlantı uçları ve tanktaki elektromanyetik akıdaki kaçak kayıplarıdır. $I^2.R$ kayıpları aynı zamanda iletkenlerde ısınmalara ve deri etkisine neden olur. Sargılardaki eddy akımı kayıpları harmonikli akım ve frekansın karesiyle orantılı olarak artacaktır.

Sarımlardaki per-ünit eddy akımı kayıpları;

$$P_{ec} = P_{ec-r} \sum I_n^2 n^2 \quad n = 1,2,3,4 \dots \quad (5.1)$$

formülü ile bulunabilir. Burada

P_{ec} : Sarımlardaki eddy akım kaybı ($I^2.R$ 'nin per-ünit değeri olarak)

P_{ec-r} : Nominal yük ve frekansta sarımlardaki eddy akım kaybı ($I^2.R$ 'nin per-ünit değeri olarak)

I_n : n. Harmonik bileşenin rms akım değeri (nominal yükteki rms akımın per-ünit değeri)

n: Harmonik bileşeni

Fakat bu formül 9. harmoniğe kadar olan bileşenler için söz konusudur. 11. harmonik bileşenden 25. harmonik bileşene kadar olan aralıkta bu formül farklılık gösterir.

IEEE standartları transformatör tarafından nakledilen yük akımındaki harmoniklerde bir sınırlama önermektedir. Bu standart da transformatörün kararlı durumda dayanabileceği maksimum aşırı gerilimin etkin değerini vermektedir. Bu değer yüksüz durumda % 10 ve nominal yükte %5'tir. Akım sınırı ise %5'tir (IEEE Std 141-1993).

Üçgen bağlı bir transformatörün yüklenmesi triplen (monopolar) harmoniklerinin sirkülasyon akımı nedeniyle yanıltıcı olabilir. Dengelenmiş 3 ve 3'ün katı harmonikleri transformatörün üçgen bağlı tarafında sirkülasyon yaparak primer tarafa bu akımların geçmesini önler. Dolayısıyla primer taraftaki harmonik ölçümleri şebekedeki harmonik seviyelerini doğru olarak yansıtmaz. Özellikle tek fazlı yüklerin üçüncü harmonik üretmesinden dolayı üçgen bağlı transformatörler için önem arz etmektedir (Wagner 1993).

Harmonik frekanslarının karesiyle orantılı olan iletkenlerdeki girdap akımı kayıplarının toplamı;

$$W_E = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n \cdot I_n}{I_1} \right)^2 \quad (5.2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

W_E : Toplam girdap akımı kaybı

W : Nominal temel akımda girdap akımı kaybı

I_n : n. harmonik akımı

I_1 : Nominal temel akım

n: Harmonik derecesi

Sinüs şeklinde bir gerilimle beslenen bir transformatörün çekirdek kayıpları;

$$P_{\text{çekirdek}} = k_h \cdot f \cdot B_{\text{max}}^{1,6} + k_f \cdot f^2 \cdot B_{\text{max}}^2 \quad (5.3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada ilk terim histerezis kaybı ve ikinci terim çekirdekteki girdap akımı kaybıdır.

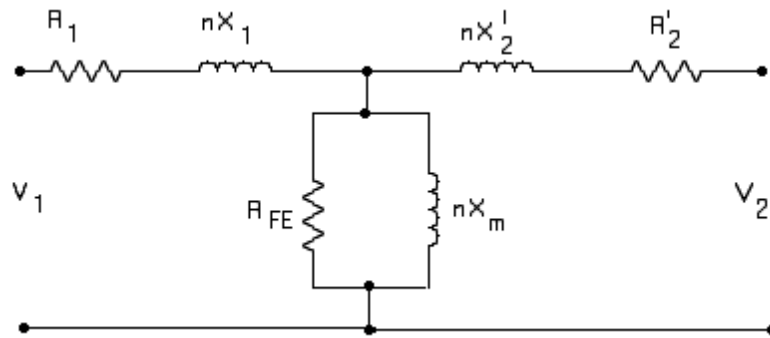
Şekil 5.24'te harmonikli sistemler için transformatörün eşdeğer devresi gösterilmektedir.

R_1 primer sargı direncini, X_1 primer sargı kaçak reaktansını, R'_2 primere indirgenmiş sekonder omik direnci, X'_2 primere indirgenmiş sekonder kaçak reaktansını, R_{FE} demir kaybını sembolize eden direnci, X_m mıknatıslanma reaktansını göstermektedir.

5.2.2. Dönen makineler üzerindeki etkileri

Harmonikli akımlar dönen makinelerde aşırı ısınmalara, titreşimli çalışmaya ve gürültüye sebep olur. Özellikle sanayide birçok alanda kullanılan inverterli hız kontrol sürücüleriyle kontrol edilen motorlarda yüksek seviyelerde gerilim distorsiyonu oluşur. Gerilim distorsiyonu neticesinde rotorda ısınmalar olur.

Elektrik makinelerinin kayıpları uygulanan gerilimin frekansına göre değişir. Herhangi bir inverter tarafından beslenen bir endüksiyon motorunun demir kayıpları ve kaçak akı kayıpları inverterin yüksek frekanslı harmoniklerinden dolayı önemli sorunlar oluşturabilir. Motordaki ısı kaybı motorun ömrünün azalması anlamına gelmektedir. Tek fazlı motorlar harmoniklerden en fazla etkilenmektedirler.



Şekil 5.24. Harmonikli sistemler için transformatörün eşdeğer devresi (n. harmonik için) (Adak 2003).

Tablo 5.5. Darbeli bir dönüştürücüyle bağlantılı durumda harmonik karakteristikleri ve stator harmoniği ile harmonik dönüş yönleri (Adak 2003).

| Harmonik Mertebe | Simetrik Bileşen | Stator Harmoniği | Harmonik Dönüş yönü |
|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|
| 1 | + | 1 | İleri |
| 5 | - | 5 | Geri |
| 7 | + | 7 | İleri |
| 11 | - | 11 | Geri |
| 13 | + | 13 | İleri |
| 17 | - | 17 | Geri |
| 19 | + | 19 | İleri |
| 23 | - | 23 | Geri |
| 25 | + | 25 | İleri |

Motorlardaki harmonik frekanslardaki kayıplar motorun karakteristiğine bağlıdır. Motorun kaçak empedansı harmonik frekanslarda artış gösterecektir. Gerilim kaynaklı inverterle beslenen bir motorun harmonik akımlarını sınırlandırabilmek için büyük değerlerde kaçak empedans gereklidir. Diğer yandan akım kaynaklı inverterler ise motora harmonik akımı enjekte ettiğinden düşük gerilim distorsiyonu oluşması için düşük kaçak empedans gereklidir (Wagner 1993).

IEEE 519-1992 standartlarına göre gerilimdeki % 5'lik ve harmonik bileşenleri için maksimum % 3'lük bozulma motorlar için tehlikeli değildir (IEEE P519A/D5 1996).

Aşırı ısınma problemleri gerilim distorsiyonunun %8 ile %10 seviyelerine ulaşmasıyla oluşur.

Motorlar elektrik sistemlerinde rotor devresinin X/R oranlarına bağlı olarak harmonikleri sönmeme etkisi yapmaktadırlar. Birçok küçük boyutlu ve düşük X/R oranına sahip motorun bulunduğu sistemlerde harmonik rezonans riski azalır. Ancak bu büyük motorlar için geçerli değildir (Dugan ve ark. 1996).

Tablo 5.6. Generatörler için akım distorsiyon sınırlamaları (Özcan 2006).

| Generatörün türü | İzin verilen % |
|--------------------|----------------|
| Silindirik rotorlu | |
| Endirekt soğutma | 10 |
| Direkt soğutma | |
| 960 MVA'e kadar | 8 |
| 961-1200MVA | 6 |
| 1201-1500 MVA | 5 |

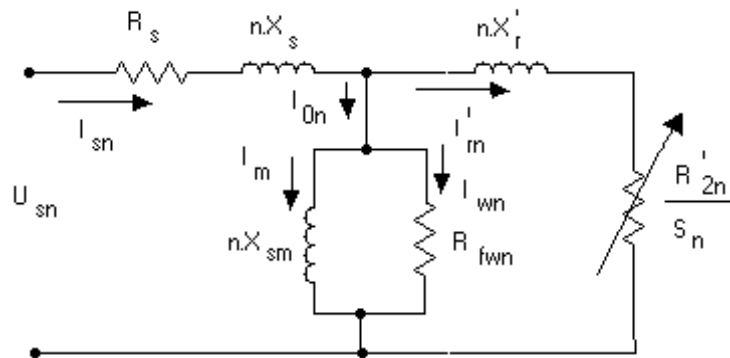
Şekil 5.25'te n. harmonik için asenkron makinenin eşdeğer devresi verilmiştir.

R_s , stator omik direnci X_s , stator kacak reaktansı X_r' , statora indirgenmiş rotor kacak reaktansı R_r' , statora indirgenmiş rotor omik direncini S_n , nominal yükteki kayma değerini göstermektedir. Tablo 5.5'te altı darbeli bir dönüştürücüyle bağlantılı durumda harmonik karakteristikleri ve stator harmoniği ile harmonik dönüş yönleri verilmiştir.

$$S_n = \frac{(n n_s \pm n_s)}{n \cdot n_s} = \frac{(n \mp 1) \pm S_1}{n} \quad (5.4)$$

Harmonik bileşenler, motor performansını %5-10 arasında azaltmaktadırlar.

Bilindiği gibi endüktif reaktans, frekansla orantılı olarak artar. Bu nedenle



Şekil 5.25. n. Harmonik için asenkron makinenin eşdeğer devresi (Adak 2003).

temel harmonikteki değeri X_L olan endüktif bir reaktans, harmonik derecesi n olan bir akım karşısında;

$$X_{Ln} = n.X_L \quad (5.5)$$

değerini alır. Yani akımın frekansı büyüdükçe endüktif reaktans değeri de büyür. Her ne kadar boşta çalışan generatörlerde sinüs şeklinde bir gerilim indüklenirse de şebekede üretilen harmonikler nedeniyle, yüklenen generatör sargılarından harmonikli akımlar geçtiğinde, bunlar, stator kaçak reaktanslarında (generatörde indüklenen gerilim sinüs şeklinde olmasına rağmen) kaçak alanlar ve yüksek harmonikli gerilim düşümü meydana getirirler. Bu nedenle generatör uçlarındaki gerilimin ve şebeke geriliminin şekli bozulur (Özcan 2006).

5.2.3.İletim hatları üzerindeki etkileri

İletim hatlarında harmoniklerin hatların ısınmasına ve akımın efektif değerinin artmasına neden olan iki etken vardır. Birinci etken iletim hatlarındaki iletkenlerdeki deri etkisi ile akımın iletkenin yüzeyine yakın yerlerinden akması bunun yanında bitişik iletkenlerdeki manyetik kayıpların artmasıdır. Deri etkisi olayıyla akımın geçtiği iletkenin yüzey alanı azaldığından kayıplar ve dolayısıyla ısı kayıpları artar. Deri etkisi olayı frekans ve iletken çapına bağlı olarak artar (Wagner 1993).

Beşinci harmonik frekansa kadar olan frekanslarda deri etkisi çok önemli değildir. Fakat yedi ve üzeri harmoniklerde deri etkisi önem arz etmektedir. Dolayısıyla harmonikli ortamlarda elektrik tesisleri tasarlanırken deri etkisi problemi göz önüne alınıp iletken kesitleri buna göre seçilmelidir (Marshall1997).

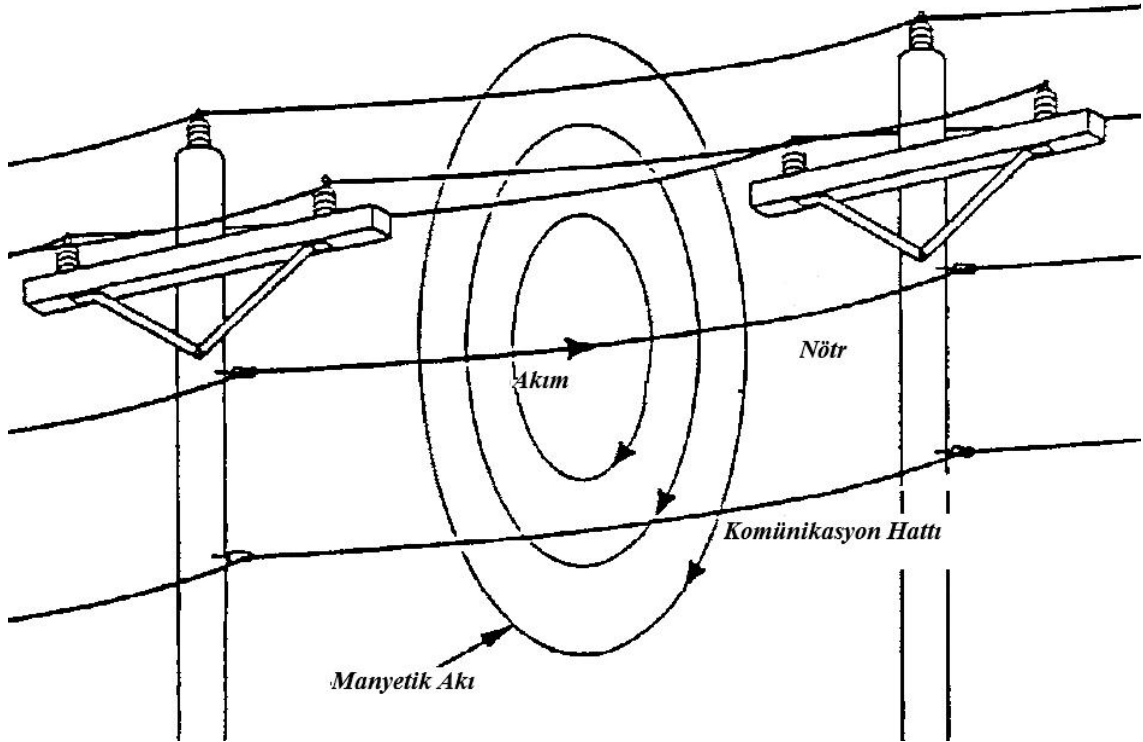
Yakınlık etkisi ise bitişik iletkenlerdeki akımın düzgün olarak yayılmasını olumsuz etkiler. Dairesel iletkenlerde yakınlık etkisi deri etkisine göre daha az telaffuz edilir. Metal kılıf ve kablo kanalları yakınlık etkisini artırır.

İletim hatlarındaki harmoniklerin diğer istenmeyen etkisi ise 3 fazlı 4 telli dağıtım sistemlerindeki nötr iletkeninin aşırı yüklenmesidir. Anahtarlamalı güç

kaynakları gibi tek fazlı yükler büyük değerlerde üçüncü harmonik üretirler. Üçüncü harmonik üç fazlı sistemlerde nötr hattı üzerinde birleştiğinden nötr iletkeninden geçen akım faz iletkeninden geçen akımın 1,7 katına kadar çıkabilmektedir. Bu da nötr hattının aşırı ısınmasına neden olur. Nötr hattındaki bu problem genellikle tek fazlı yüklerin çoklukla bulunduğu ticari binalarda bulunur (Wagner 1993).

Ayrıca nonlinear bir yük tarafından şebekenin AG tarafında oluşturulan harmonikler iletim hattının empedansı üzerinde gerilim distorsiyonu oluşturarak diğer kullanıcıların beslendiği OG hattındaki gerilimin bozulmasına neden olmaktadır.

İletim hatlarıyla telekomünikasyon hatlarının Şekil 5.26'daki gibi beraber kullanıldığı yerlerde harmonikler telekomünikasyon sistemlerinde bozucu etkiler yapmaktadır. Dokuzla yirminci harmonik frekansları arasındaki frekanslar telekomünikasyon sistemi için bozucu etkiye sahiptir. Bozulmanın miktarı frekansın artmasıyla artar. Özellikle üç ve üçün katı harmoniklerin (triplen, homopolar) 4 telli sistemlerde nötr hattında birleşmesi telekomünikasyon iletkenleri için oldukça sıkıntılı durumların oluşmasına neden olur (Dugan ve ark. 1996).

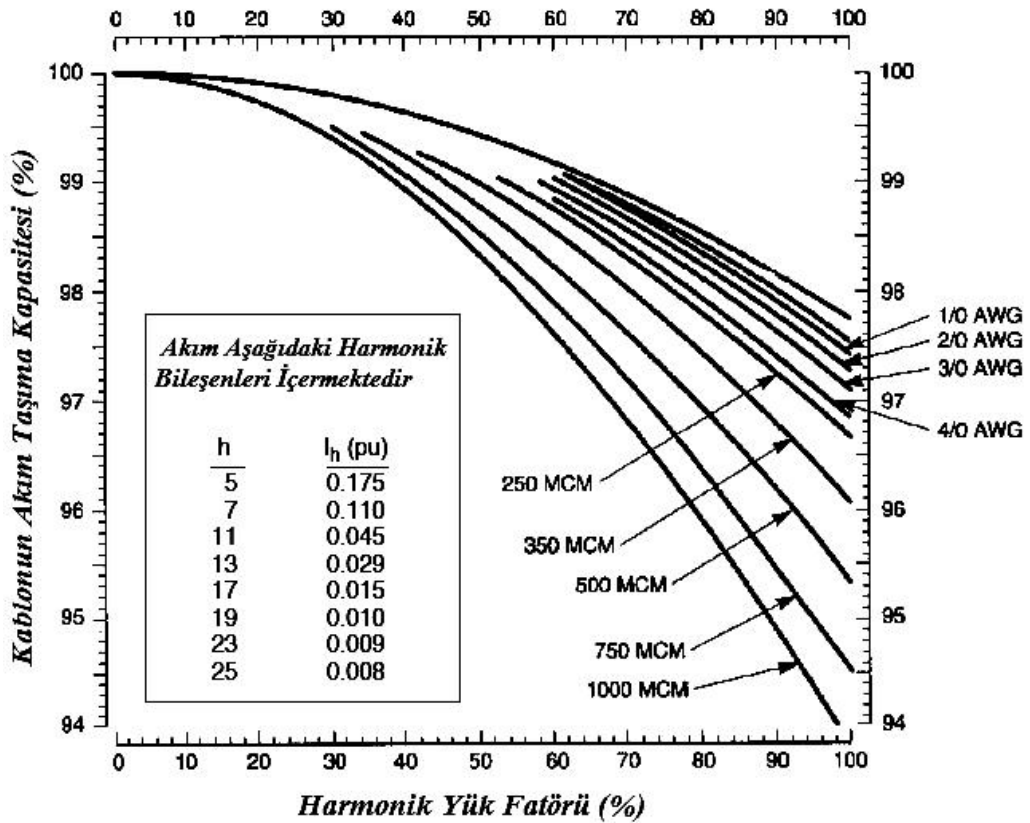


Şekil 5.26. Harmoniklerin iletim hatlarıyla telekomünikasyon hatlarının beraber kullanıldığı yerlerdeki etkisi (Dugan ve ark. 1996).

Şekil 5.26'da 6 darbeli harmonik akımların bulunduğu bir sistemde kabloların akım taşıma kapasitelerinin grafiği verilmiştir. Burada harmoniklerin THD'nin %5-15 arasında 500 MCM'den daha küçük kesitlerdeki iletkenlerdeki etkisinin küçük olması, sistemler için tehlikeli olan 400 Hz ve üzeri harmonik frekansların etkilerinin olmaması anlamına gelmemektedir (IEEE Std 141-1993).

5.2.4. Kondansatörler üzerindeki etkileri

Güç katsayısının düzeltilmesi için kullanılan kondansatörlerin kendileri harmonik üretmezler, ancak sistemdeki harmonik seviyesi üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Elektrik tesislerine kompanzasyon amacıyla eklenen kapasitörler sistemin baskın harmonik frekanslarda rezonansa girmesine neden olabilir. Rezonans nedeniyle sistemde aşırı seviyelerde akım ve gerilim düşümleri oluşabilir. Bir



Şekil 5.27. 6 Darbeli harmonik akımların bulunduğu bir sistemde kabloların akım taşıma kapasiteleri (IEEE Std 141-1993).

kondansatör grubunun reaktansı, artan frekans ile birlikte azalmaktadır. Bir kondansatörün h . harmonik için akım değeri,

$$I_h = 2\pi f_h C V_h = h\omega_1 C V_h \quad (5.6)$$

ile belirlenir. Denklem (5.6)'da görüldüğü gibi herhangi bir harmoniğin, akımdaki oranı gerilimdeki oranından büyük olmaktadır. Harmonik bileşenler, kondansatörlerin ve bobinlerin birlikte kullanıldığı sistemlerde rezonansa sebep olabilirler. Q_S sistemin kondansatör grubunun bulunduğu noktadaki kısa devre gücünü, Q_C ise kondansatörlerin toplam gücünü göstermek üzere, bir alçak gerilim güç sisteminin rezonans frekansına ait harmonik derecesi,

$$h = \sqrt{\frac{Q_S}{Q_C}} \quad (5.7)$$

bağıntısı ile bulunur (Wagner 1993).

Paralel kapasitörlerin harmonikli ortamlardaki kullanımları için IEEE standart (IEEE Std 18TM-2002) limitleri aşağıdaki gibidir:

- Maksimum rms voltajın % 110'u
- Maksimum gerilimin pik değerinin % 120'si, örneğin 1, 2. $\sqrt{2}$. (nominal rms voltaj) değerini aşmamak şartıyla (harmonikler dâhil, aşırı gerilimler dâhil değil)
- Maksimum reaktif güç ve maksimum gerilime bağlı nominal akımın % 135'i
- Maksimum reaktif gücün % 135'i aşılmamalıdır (IEEE Std 18-2002).

Gerilim harmoniklerinden dolayı kondansatör gücü de artar. Şebeke işletmesinde sadece temel bileşene ait güç önem taşır. Buna karşılık, kondansatörün dielektrik kayıpları, yani ısıl zorlanma bakımından toplam kondansatör gücü geçerlidir. Dolayısıyla ısıl zorlanma da artar. Temel bileşeni ve harmonikleri içeren toplam reaktif güç ifadesi;

$$\theta_T = \sum_{n=1}^{\infty} \theta_n \quad (5.8)$$

olarak verilir. Toplam reaktif güç ifadesi, reaktif gücün anma değerini aşmamalıdır (Filiz 2006).

5.2.5. Devre kesiciler ve sigortalar üzerindeki etkileri

Yük akımı harmonik bileşenler içeriyorsa, sinüs dalgası için sıfır geçiş noktasında di/dt oranı yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Bu da bir kesicinin devreyi açmasını zorlaştırmaktadır. Aynı durum yarı iletken anahtarlar için de söz konusu olmaktadır. Yüksek di/dt oranının yanında akımı ısı yoluyla ve manyetik olarak hisseden kesiciler harmoniklerin getirdikleri ilave manyetik ve ısı etkisinden de olumsuz etkilenmektedirler. Sıcaklığa duyarlı olan sigortalarda benzer şekilde harmoniklerden olumsuz etkilenmektedir (Wagner 1993).

Bununla beraber, açma esnasında oluşan ark, bobin tarafından oluşturulan manyetik alan ile ark hücrelerine sürülmektedir. Bobinin çalışmasındaki anormallikler arkın yeniden tutuşmasına ve kesicinin yeniden kapanmasına neden olmaktadır. Harmonik akımlar, anahtarlama elemanlarında ısınmayı ve kayıpları artırır. Böylece, sürekli hal akım taşıma kapasitesi azalır ve bazı izolasyon malzemelerinin ömrü kısalmır (Acarkan 2006).

5.2.6. Harmoniklerin dirençler üzerindeki etkileri

Harmoniklerin frekansının artması ile deri etkisi (skin effect) sonucu iletkenin kullanılan kesiti azalmaktadır. İletkenin temel bileşen omik direnç değerine harmoniklerden dolayı R_h direnci ilave olmaktadır. Harmonikli akıma gösterilen omik direnç değeri $R = R_0 + R_h$ olmaktadır. Deri etkisi ile oluşan direnç değeri literatürde yaygın olarak kabul edilen ampirik bir bağıntıyla hesap edilebilir.

$$X = 1,585 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{f}{R_0}} \quad (5.9)$$

olmak üzere,

$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq 3 \text{ için } R &= R_0 \cdot K_1 \\ x > 3 \text{ için } R &= R_0 \cdot K_2 \end{aligned} \quad (5.10)$$

dir. Burada,

$$K_1 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{X^4}{48}} + 1 \right] \quad (5.11)$$

$$K_2 = \left[\sqrt{\frac{X}{2,828}} + 0,26 \right] \quad (5.12)$$

dir. Burada,

f: frekans

R_0 =Doğru akım direnci

R=Deri etkisi dahil direnç

olarak tanımlanmıştır (Filiz 2006).

5.2.7. Harmoniklerin reaktanslar üzerindeki etkileri

Elektrik şebekelerinin (hatların, motorların, transformatörlerin v.b.) modellenmesinde reaktanslar oldukça geniş bir yer tutmaktadır. Temel frekanstaki değeri X_L olan bir endüktif reaktansın, n . harmonikteki endüktif reaktansı;

$$X_{L_n} = n \cdot X_L \quad (5.13)$$

değerini alır. Benzer şekilde, temel frekanstaki değeri X_C olan bir kapasitif reaktansın, n . harmonikteki kapasitif reaktansı;

$$X_{C_n} = \frac{X_C}{n} \quad (5.14)$$

değerini alır. Her iki durum için de, reaktansın lineer bir eleman olduğu kabul edilmektedir (Filiz 2006).

5.2.8. Güç elektroniği elemanları üzerindeki etkileri

Güç elektroniği elemanları birçok durumda çok önemli bir harmonik kaynağı olmalarının yanı sıra, harmonik bozulmaya karşı çok duyarlıdırlar. Bu elemanların düzenli çalışmaları gerilimin sıfır geçişlerinin doğru belirlenmesine bağlıdır. Sıfır geçiş noktası birçok elektronik kontrol devresi için kritik noktalardır. Harmonik bozulmasının bu noktaları kaydırması sonucu oluşan komütasyon hataları, elemanın çalışmasını olumsuz yönde etkiler. Ayrıca, gerilimin tepe değerine göre cevap vererek çalışan elemanlarda da sorunlar çıkabilir. Buna en güzel örnek diyottur. Eleman, dalga şeklinin etkin değerine tam olarak karşılık gelmeyen tepe değerine karşı duyarlı olduğundan, harmoniklerin varlığında düzenli çalışmayabilir. Güç elektroniği cihazlarına ait diğer arızalar şöyle sıralanabilir;

- Ölçme cihazlarında hatalar
- Röleler ve kesicilerde oluşan arızalar
- Sıfır gerilim geçişli ateşleme devrelerinin kararsız çalışması
- Motor kontrolleriyle ilgili parazitler.

5.2.9. Koruyucu sistemler (röleler) üzerindeki etkileri

Bilindiği gibi koruyucu sistemler çoğunlukla temel gerilim ve akımlara göre tasarlanırlar. Tepe gerilimine, akım veya gerilimin sıfır geçişlerine göre çalışan röleler harmonik distorsiyonundan çeşitli biçimlerde etkilenirler. Olabilecek harmoniklerin süzüldüğü veya ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilirse, elektromanyetik röle uygulamalarında (aşırı akım koruması gibi) yüksek harmoniklerin çok fazla etkinliğinin olmadığı söylenebilir. Ancak özellikle mesafe korumalarında, harmonik akımları (özellikle 3. harmonik bileşeni) büyük oranda

ölçme değerlendirme hatalarına ve toprak rölelerinin hata yapmasına neden olabilmektedir. Dijital mesafe koruma sistemlerinde, akım ve gerilim harmoniklerinin mutlaka filtre edilmesi gerekmektedir. Rölelerin harmoniklerden başlıca etkileniş biçimleri şunlardır;

- Röleler daha büyük tepe değerleri ile yavaş çalışmak yerine daha küçük tepe değerleri ile hızlı çalışma eğilimi gösterirler.
- Statik rölelerin çalışma karakteristiklerinde önemli değişiklikler gözlenir.
- Aşırı akım ve gerilim rölelerinin çalışma karakteristikleri değişir.
- Harmonik bileşene bağlı olarak rölelerin çalışma momentlerinin yönü değişebilir.
- Çalışma zamanları, ölçülen büyüklükteki frekansın bir fonksiyonu olarak oldukça büyük bir farklılık gösterebilir.
- Dengeli empedans röleleri hem ayar ötesi hem ayar gerisi çalışma gösterebilirler.
- Fark röleleri yüksek hızla çalışmayabilirler.

Genelde rölelerin çalışmasını etkileyen harmonik seviyeleri, diğer elemanlar için kabul edilebilir maksimum harmonik seviyelerinden daha büyüktür. Bununla birlikte, koruyucu elemanlar (röleler) üzerinde yapılan testlerden %20'lik bir harmonik seviyesine kadar rölelerde fazla bir işletme probleminin oluşmadığı gözlenmiştir (Filiz 2006).

5.2.10. Ölçme aygıtları üzerindeki etkileri

Ölçü aletleri, başlangıçta tam sinüzoidal işaretlere göre kalibre edilirler. Gerilimin karesi ile orantılı döndürme momentine göre ölçüm yapan sayaçlarda, gerilim harmoniklerinin oluşması bazı kayıt hatalarına yol açacaktır. Şebeke frekansından başka frekanslardaki enerjileri okumak için tasarlanmayan konvansiyonel sayaçların harmoniklerin varlığında daha yüksek değerler okuyabildikleri görülmüştür (Filiz 2006).

Bu aletler frekans karakteristiklerinden ve doğrusal olmayan davranışlardan ötürü hatalı çalışmaktadır. Akım ve gerilimin her ikisinin de dalga şekli değişmiş olduğu bir testte, bu sayaçlar %2 0'lere varan hatalara sebep olmuşlardır (Akgeyik 2005).

Ancak gelişmiş elektronik sayaçlar bozulmuş dalga şekillerini hassasiyetle okuyabilmektedirler.

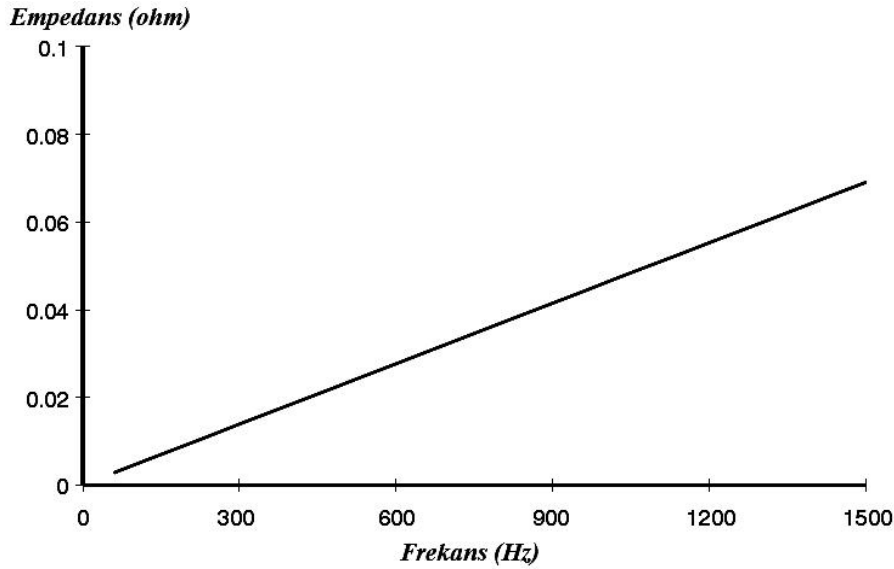
Elektrik saatleri ve aşırı akım röleleri gibi indüksiyon disk aygıtları sadece temel bileşene göre çalışırlar. Diskte oluşan moment, akımın ve diskte indüklenen girdap akımlarının çarpımı ile orantılıdır. Her ikisi de yüksek frekanslarda orantısız olarak azalır. Bu da elektrik sayacının temel frekanstan daha yüksek frekanslarda hatalı ölçme yapmasına neden olur. Harmonik distorsiyonunun oluşturduğu faz dengesizlikleri de bu elemanların hatalı çalışmalarına neden olur. Genelde önemli hataların oluşması için distorsiyon seviyesinin %20' den büyük olması gerekir (Filiz 2006).

Etkin değer ölçümü için kalibre edilmiş olan voltmetre ve ampermetreler harmoniklerin var olması durumunda hatalı sonuçlar vermektedir. Örneğin, 45'lik bir ateşleme açısıyla kıyılmış bir sinüs işaretinin etkin değerini bu tip aletler, %13 oranında düşük ölçmektedir. Eğer söz konusu alet ampermetre ise, aşırı yüklenmiş bir iletkenin fark edilmemesi gibi bir takım sakıncalı durumların ortaya çıkması söz konusu olabilir. Akım ve gerilimin elektronik olarak çarpıldığı modern wattmetreler, mükemmel bir performans göstermektedir. Yapılan testler sonucunda bu aletlerin sinüs biçimli olmayan akım ve gerilimlerden kaynaklanan hatalarının % 0,1'den daha az olduğu tespit edilmiştir (Akgeyik 2005).

5.2.11. Aydınlatma elemanları

Harmonikli bileşenleri bulunan gerilimlerin, floresan lambalar üzerinde kulağın duyabileceği gürültülerle birlikte demir kayıplarının da artışında etkin bir rolü vardır. Floresan aydınlatmada tek dereceli harmoniklerin seviyesi önemli oranda devreyi etkiler.

Akkor telli lambaların ömrü, distorsiyona maruz kalmış gerilimle çalıştırıldıklarında kısalmaktadır. Bu durum lambaların içerisindeki flamanın aşırı



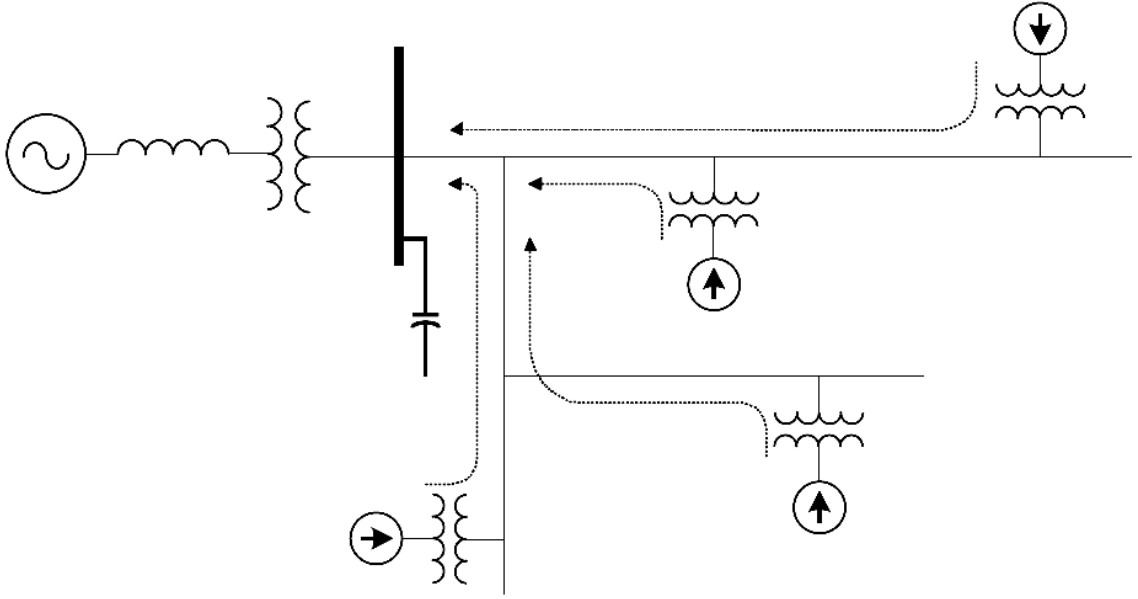
Şekil 5.28. Endüktif sistemler için empedansın frekansa bağlı değişimi.

ısınmasından kaynaklanmaktadır. Harmonikler nedeniyle oluşan gerilim artışının küçük değerlerde olması durumunda dahi akkor flamanlı lambanın ömrü büyük değerlerde azalmaktadır, örneğin normal geriliminin % 5 üstünde bir gerilimle kullanıldıklarında akkor lambaların ömürlerinin ortalama olarak % 50 oranında kısalabilmektedir (Akgeyik 2005).

5.2.12. Harmoniklerden kaynaklanan rezonans olayları

Harmoniklerin şebeke ve sistem üzerinde yaptığı en büyük etkilerden birisi rezonans olaylarına sebebiyet vermesidir. Rezonans; şebekeden çekilen akımı endüktif ve kapasitif etkiden kurtulup tamamen omik yük etkisi altında kalmasıdır. Bir başka deyişle sistemdeki kapasitif ve endüktif yüklerin eşitlenmesiyle devrede tamamen omik yükün etkili olmasıdır. Bu olayın gerçekleşmesi sistemden maksimum akım akmasına neden olmaktadır.

Şebeke reaktansının değeri Şekil 5.28'de de görüldüğü gibi sabit olmayıp şebekenin o anki durumuna bağlı olarak değiştiğinden sönümsüz salınımın gerçekleştiği frekans değeri tam olarak hesaplanamaz, ancak bu değer genellikle 250 Hz ile 350 Hz arasındadır. Şebeke reaktansındaki değişimler sonucunda sönümsüz salınımın gerçekleştiği değer 5. harmonik frekansı olan 250 Hz'e veya 7. Harmonik



Şekil 5.29. Bir dağıtım sistemindeki tehlikeli bir paralel rezonans örneği.

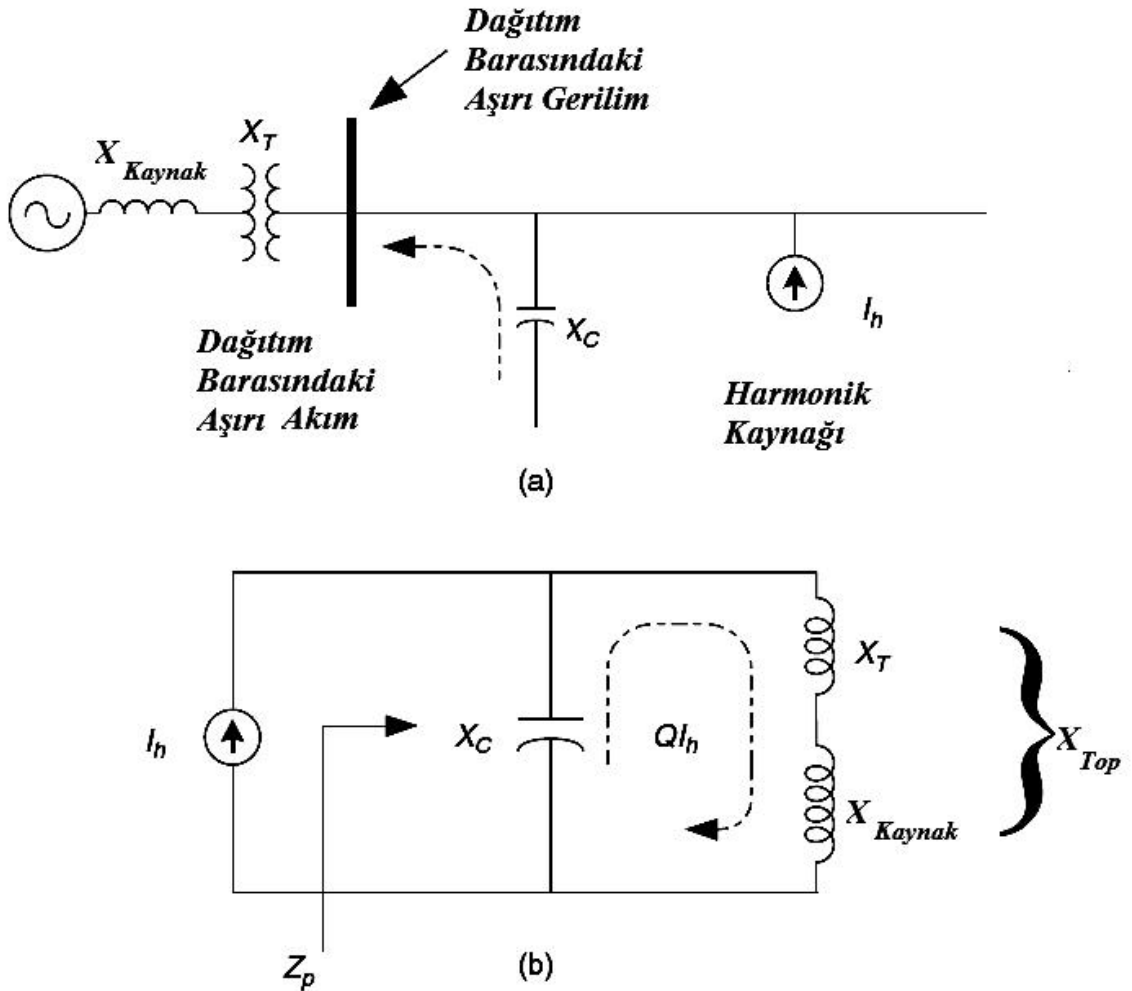
frekansı olan 350 Hz'e gelirse, gerilimin 5. veya 7. harmonik değerleri toprağa kısa devre olur. Bu durum kondansatörlerin zarar görmesine yol açar. Bu istenmeyen durumu engellemek için kondansatör reaktansı ile şebeke reaktansının mutlak değerlerinin eşit olduğu frekans değerinin güvenli bir bölgeye çekilmesi gerekmektedir. Bu nedenle kompanzasyon sistemlerindeki kondansatörlerin önüne uygun değerli bir şok bobini yerleştirilmesi gerekmektedir (Demirkol 2006).

Kapasitif reaktansın endüktif reaktansa eşit olduğu frekansa rezonans frekansı adı verilmektedir. Sistemde oluşabilecek bir rezonans frekansı, mevcut harmonik frekanslardan birine yakın bir değerde ise, aşırı büyüklüklerde harmonik akım ve gerilimleri meydana çıkacaktır. Rezonans durumu harmonik seviyelerini etkileyen en önemli etkenlerden birisidir. Paralel rezonans harmonik akım akışına yüksek empedans değerleri gösterirken seri rezonans düşük bir empedans değeri göstermektedir. Herhangi bir rezonans durumu mevcut değilse sistemde önemli seviyelerdeki harmonik akımları taşıyabilmektedir. Bu yüzden sistemin cevap karakteristikleri incelenerek sistemin rezonans problemlerinin ortadan kaldırılması çok önemlidir. Rezonans durumlarını seri rezonans ve paralel rezonans olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür.

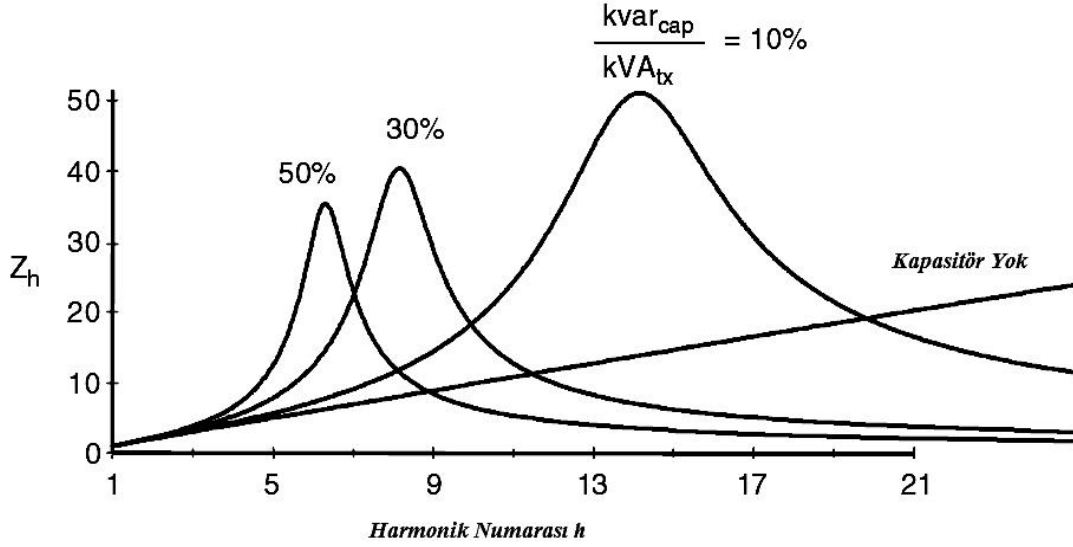
5.2.12.1. Paralel rezonans

İçerisinde kapasitans ve endüktans bulunduran sistemlerin endüktif ve kapasitif reaktans değerlerinin sıfırlandığı rezonans frekans değerleri bulunmaktadır. Bu frekans değeri sistemde üretilen akım ve gerilimin frekansıyla çakışması durumunda empedans değerinin kalkmasıyla sistemde yüksek değerlerde akım ve gerilim değerleri görülür. Elektrik sistemlerinde ortaya çıkan birçok arızanın temelinde yatan etken budur (Dugan ve ark. 1996).

Şekil 5.30. bir dağıtım sistemindeki tehlikeli bir paralel rezonans örneğini



Şekil 5.30. Harmonik frekanslarda kapasitör, transformatör ve kaynak endüktansı ile paralel bağlı kabul edildiği şekil a) basitleştirilmiş dağıtım devre şekli b) harmonik kaynağı tarafından görülen rezonans devre şekli.



Şekil 5.31. Transformatör değerine bağlı olarak kapasitörün değerinin değişimine sistemin verdiği frekans cevabı.

göstermektedir. Harmonik kaynağı tarafından sisteme bakıldığında kapasitörler eşdeğer sistem endüktansı (kaynak ve transformatör endüktansı) Şekil 4.30.b'de gösterildiği gibi paralel bağlı görülmektedir. Bunun yanı sıra güç sistemi yalnızca temel şebeke frekansında gerilim kaynağı eşdeğeri olarak kabul edildiğinden Şekil 4.30.b'de harmonik frekanslarda gerilim kaynağı kısa devre olduğu kabul edilmiştir. Paralel rezonans frekansı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{eş}C} - \frac{R^2}{4L_{eş}^2}} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{eş}C}} \quad (5.15)$$

Burada;

R : kaynak ve transformatörün eşdeğer direnci (şekil 4.30'da gösterilmemiştir)

$L_{eş}$: kaynak ve transformatörün eşdeğer endüktansı

C : Kapasitörün kapasitansıdır.

Akım ve gerilim değerlerindeki artış miktarı paralel kapasitörün değerine bağlıdır. Şekil 5.31'de kapasitörün olmadığı durumla veya transformatörün değeriyle ilişkili olarak kapasitörün değerindeki değişimle harmonik kaynağı tarafından görülen eşdeğer empedansın değişim grafiği görülmektedir. Paralel harmonik rezonans frekansı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_{SC}}} = \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{Mvar_{cap}}} \approx \sqrt{\frac{kVA_{tx} \cdot 100}{kvar_{cap} \cdot Z_{tx}(\%)}} \quad (5.16)$$

Burada;

h_r : Rezonans harmoniği

X_C : Kapasitör reaktansı

X_{SC} : Sistemin kısa devre reaktansı

MVA_{SC} : Sistemin kısa devre MVA gücü

MVA_{CAP} : Kapasitörün MVAR değeri

kVA_{tx} : indirici trafonun kVA değeri

Z_{tx} : indirici trafonun empedans değeri

$kvar_{cap}$: Kapasitörün kVAR değeri

Örneğin transformatör empedansının baskın olduğu bir sistemde 1500 kVA, % 6 ve 500 kVAR kapasitör değerleri için harmonik rezonans bileşeni:

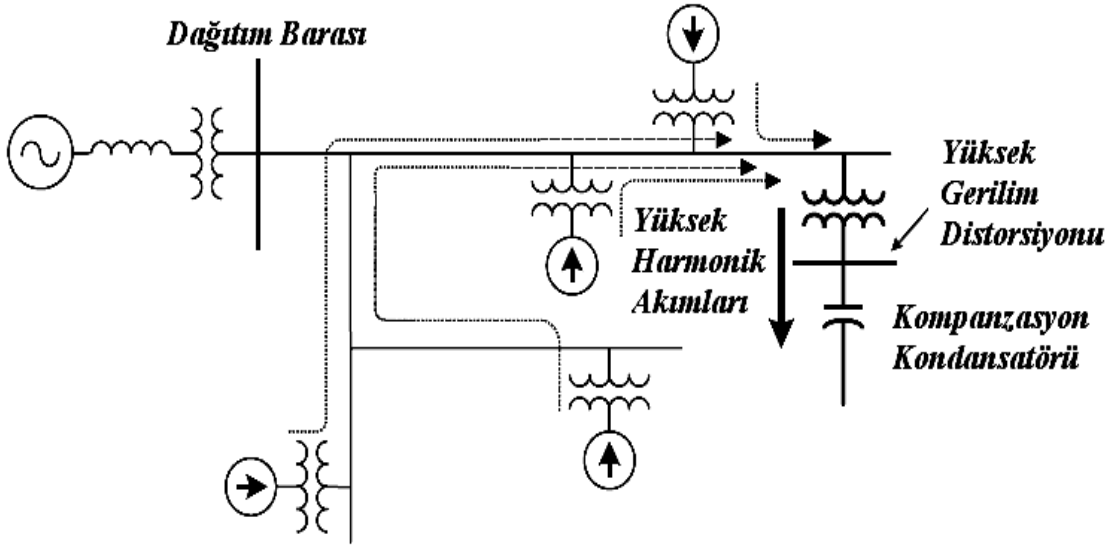
$$h_r = \sqrt{\frac{kVA_{tx} \cdot 100}{kvar_{cap} \cdot Z_{tx}(\%)}} = \sqrt{\frac{1500 \cdot 100}{500 \cdot 6}} = 7.07$$

olarak bulunur (Dugan ve ark. 1996).

Teorik olarak sonsuz büyüklükteki empedans demek olan bu değer pratik uygulamalarda üretilen harmonik akımların 3 ila 6 katına çıkmasına neden olur. Bu durum trafo hattı için ve kompanzasyon sistemi için oldukça tehlikelidir.

5.2.12.2. Seri rezonans

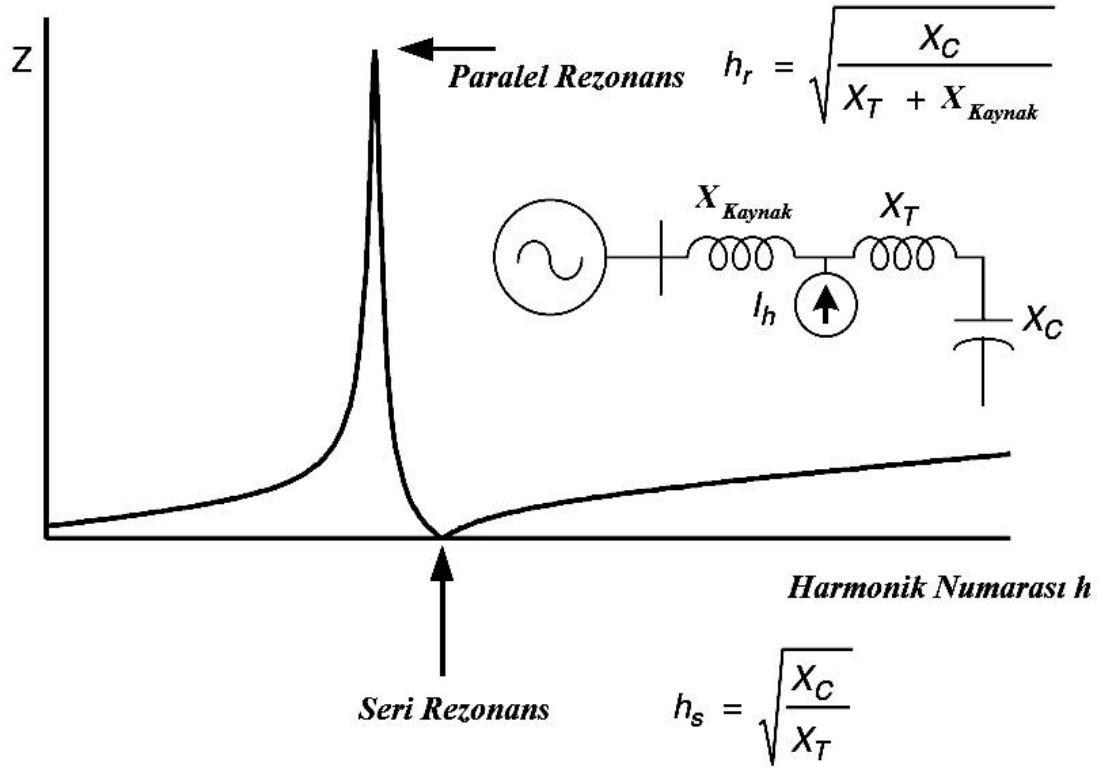
Elektrik tesislerinde paralel bir kapasitör ile transformatör ya da iletim hattı endüktansı herhangi bir harmonik kaynağı için seri *LC* devresi olarak görülebilir. Eğer bu seri *LC* devresini rezonans frekansı nonlineer yükün ürettiği harmonik frekansla çakışırsa sistemden rezonans frekansında yüksek akımlar geçer.



Şekil 5.32. Sistemdeki seri rezonans tehlikesi (Dugan ve ark. 1996).

Bunun yanında harmonik kaynağı olan bir fabrikanın ürettiği harmonikler fabrikanın endüktif reaktansıya, harmonik kaynağı olmayan ve aynı şebekeden beslenen diğer bir fabrikanın kompanzasyon sisteminin kapasitif reaktansı baskın harmonik frekanslarda Şekil 5.32'deki gibi seri rezonansa girerek harmoniksiz fabrikanın kompanzasyon sistemi üzerinde yüksek gerilim düşümü oluşmasına ve dolayısıyla arızalara hatta bazı durumlarda kondansatör patlamasıyla yangına sebep olmaktadır.

Seri rezonans durumunda güç faktörü düzeltme kondansatörü Şekil 5.33'te görüldüğü gibi transformatör ve harmonik kaynağıyla seri bir devre gibi görünmektedir. Şekilde gösterilen harmonik akım kaynağı diğer yükler tarafında üretilen toplam harmonikleri temsil etmektedir. Kapasitöre seri bağlı olan endüktans transformatör endüktansıdır. Seri bağlı kapasitör ve transformatör endüktansları toplamı seri rezonans frekansında teorik olarak sıfırdır. Yalnızca sistemin omik direnci ile sınırlanmaktadır. Dolayısıyla harmonik rezonans frekansındaki harmonik bileşen bu devre üzerinde oldukça yüksek değerlere ulaşmaktadır. Güç faktörü düzeltme kapasitörünün üzerindeki gerilim yüksek değerlerde ve harmonikli akımlardan dolayı oldukça bozulmaktadır. Bu değer aşağıdaki formül ile ifade edilmektedir:



Şekil 5.33. Harmonikli devrenin frekans cevabı.

$$V_s(\text{Güç faktörü düzeltme kapasitöründe}) = V_h \frac{X_c}{X_T + X_C + R} \approx \frac{X_C}{R} V_h \quad (5.17)$$

burada,

V_h : I_h harmonik akımına bağlı harmonik gerilim değerleri

V_s : ise güç faktörü düzeltme kapasitöründeki gerilim değeridir.

Şekil 5.33'te seri rezonans direnci reaktansa nispeten çok küçük olduğundan gösterilmemiştir. Seri rezonans frekansı herhangi bir çentik (notch) filtresiyle arttırılıp seri rezonansın önüne geçilebilir. Birçok elektrik sisteminde seri ve paralel rezonans riski sistemin devre yapısına bağlıdır. Şekil 5.33'te paralel rezonans seri X_T ve X_C ile X_{KAYNAK} 'ın paralel kombinasyonundan elde edilmiştir. Sonuç olarak çıkan paralel rezonans frekansı X_{KAYNAK} değerinin paydada bulunmasından her zaman seri rezonans frekansından küçük çıkar. Paralel rezonans frekansı aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Dugan ve ark. 1996):

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_T + X_{KANAK}}} \quad (5.18)$$

Rezonans durumunda $X_L = X_C$ olduğu için devre empedansı saf omik olur. Bu durumda empedans minimum olduğu için akım maksimum değer alır. Bu durum Şekil 5.33'te gösterilmiştir. Seri rezonansa büyük değerler alan kondansatör ve endüktans gerilimleri birbirine eşit fakat ters yönlü olduklarından toplamları sıfır olur. Bu nedenle seri rezonansa gerilim rezonansı da denir.

Görüldüğü gibi rezonans durumu sistemlerde arızalar ve ekipmanlarda hasarlar meydana getirebilir. Sistem yükünün az olduğu zamanlarda, örneğin gecenin geç saatleri ve tatil günlerinde harmonik rezonansın etkisi daha fazladır. Yük seviyesi arttıkça akımın akabileceği daha küçük empedans yollarından dolayı rezonans nedeniyle oluşan harmonik artışı zayıflar. Birçok endüstriyel tesiste olduğu gibi, devreler daha az yüklendiklerinde ve yüklerin tümü motor olduğunda, rezonans nedeniyle oluşan harmoniklere karşı daha duyarlı olurlar (Demirkol 2006).

5.2.12.3. Rezonansın etkileri

Rezonans oluşumu, elektrik dağıtım sistemlerinde ciddi arıza ve hasarlar oluşturabilir

- Endüktans ve kondansatörün gerilimleri yükselir, aşırı akım geçer.
- Devredeki elemanların yalıtımlarında zorlanmalar, özellikle kondansatörlerin yalıtkan malzemelerinde delinmeler ve aşırı ısınmadan ötürü kalıcı hasarlar oluşabilir ya da devre elemanlarının ömrü kısılır.
- Harmonik gerilimleri yükselir. Harmonik bozunumunun artmasıyla tüketicideki gerilimin dalga şekli bozulur.

Dağıtım sistemlerinde rezistif yükler, harmonikleri azaltmaya önemli ölçüde katkı sağlayabilirler. Bu sayede çok ciddi sorunlara yol açabilecek rezonans durumları da önlenmiş olur. Buna karşın endüstriyel şebekelerde durum farklıdır; sistemin frekans cevabı büyük kondansatör bankları ve kısa devre endüktansı ile

belirlenir. Harmonik kaynaklarının (doğrultucular, motor sürücüleri, ark fırınları vb.) oranı, endüstriyel şebekelerde daha fazladır. Ayrıca rezonans frekansında harmonikleri rezistif yük sayısı da daha azdır. Bu nedenle sistemde aşırı miktarda harmonik bozunumu meydana gelebilir (Engin 2008).

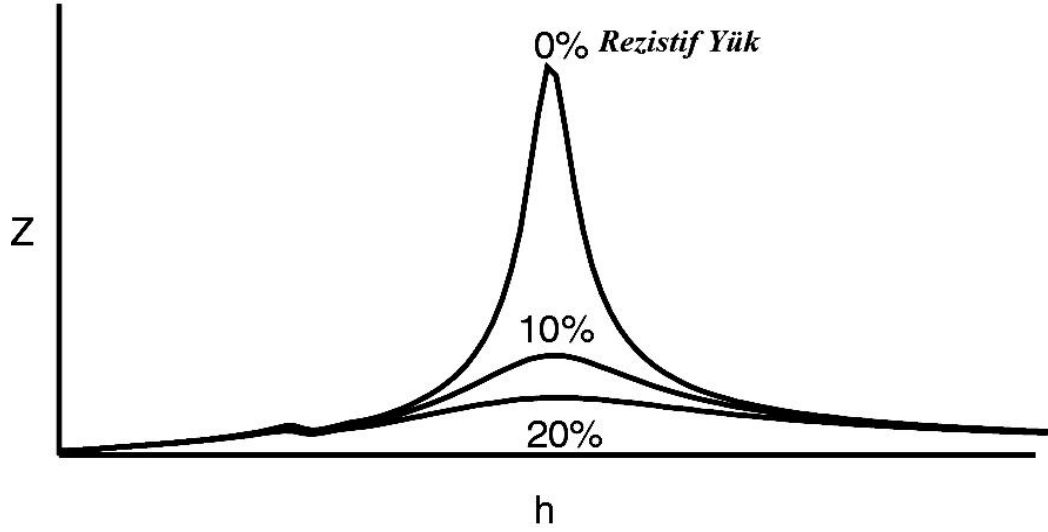
Seri rezonans, harmonik akımının devredeki düşük empedanslı hattı izlemesiyle, endüktans ve kondansatör arasında yüksek gerilim distorsiyonlarına sebep olabilir. Enerji sistemlerinde seri rezonans çok sık görülmez. Ancak oluştuğunda devre elemanları üzerinden büyük akımların akmasına neden olur. Ayrıca devre bağlantı iletkenlerinde özellikle kondansatör bağlantılarında aşırı ısınmalara ve kısa devrelere yol açabilir. Ayrıca kondansatörlerin zarar görme olasılıkları artar.

Paralel rezonans ise empedans çok büyük değerler aldığından dolayı harmonik akımları, gerilim harmoniklerine neden olur. Gerilim harmonikleri hem kondansatörde hem de sistem reaktansında yüksek harmonik akımları doğurur. Böylece paralel rezonans, doğrusal olmayan yükün oluşturduğu harmonik akımlarını büyütmiş olur. Ayrıca kondansatör uçlarındaki gerilim aşırı yükseldiği için kondansatör bundan zarar görebilir. Yüksek harmonik frekansları ile orantılı olarak şebeke reaktansı da büyüdüğünden büyük harmonikli gerilim düşümleri oluşur (Kocatepe ve ark. 2003).

Dağıtım sistemine çeşitli yerlerden bağlanmış çok sayıda kondansatör, çeşitli rezonans frekanslarının doğmasına sebep olur. Bu kondansatörler devreye alındığında ise sistemin rezonans karakteristiğini belirlemek zorlaşır. Diğer yandan sistemde bir yerine çok sayıda rezonans frekansının olması, bunların büyüklüklerinin küçük olmasına yol açar. Bu nedenle kondansatörleri sistemin çeşitli noktalarına dağıtmak, rezonansın dolaylı olarak oluşacak sorunları azaltacaktır (Engin 2008).

5.2.12.4. Rezistansın ve rezistif yükün rezonansa etkisi

Dağıtım sistemi yeni yapılan bir sistemse, henüz planlama aşamasında gerekli analizler yapılarak sistemde rezonans durumlarının oluşması önlenir. Mevcut bir sistemde değişiklikler yapılması durumunda, harmonik rezonansın zararlı etkilerine karşı sistem harmonik filtrelerle korunmalıdır. Ayrıca sistemdeki doğrultucular



Şekil 5.34. Rezistif yükün paralel rezonans üzerine etkisi.

yüksek darbeleri seçilerek harmonik üretmeleri önlenir. Örneğin 6 yerine 12 veya daha yüksek darbeleri doğrultucuların kullanılması ile oluşan harmoniklerin dereceleri yükselir ve genlikleri azalır. Ayrıca kompanzasyon tesislerinin bulunduğu yerlerdeki transformatörler üçgen sargılı seçilir. Bu sayede en büyük genliğe sahip olan 3 ve üçün katı harmonikler şebekeye geçemez (Engin 2008).

Sistemde harmonik üreten bir elemandan dolayı oluşan rezonans, her zaman endişe edilecek bir durum değildir. Sistemin empedansı sayesinde tehlikeli olabilecek gerilim ve akım artışları önlenir. Şekil 5.34'te paralel rezonans devre karakteristiğinin kapasitansa paralel değişik büyüklüklerdeki rezistif yüke bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. Örneğin kondansatöre paralel yerleştirilen % 10'luk bir direnç ile önemli oranda fayda sağlanabilir. Benzer şekilde kondansatörle bir üst seviyedeki transformatör arasındaki kabloların uzunluğu fazla ise, yine rezonans bastırılabilir. Çünkü kablolar, devrenin direncine büyük katkı sağlarlar.

Elektrik dağıtım sistemlerinde kondansatörlerden kaynaklanan harmonik problemlerinin çok ender görülmesinin sebebi, kablo dirençlerinin katkısıdır. Bu, harmonik kaynaklı rezonans problemleri hiç olmayacak anlamına gelmez; bu problemler, ekipman üzerinde genellikle fiziksel bir hasara sebep olmayacak demektir. Ancak transformatör merkezlerine kurulan kondansatörler tehlikeli rezonanslara sebep olabilir çünkü transformatörler yüksek X/R oranına sahip olduklarından sistem empedansını bastırıp paralel rezonansa yol açabilirler.

5.2.13. Üçüncü harmonik nedeniyle oluşan problemler

Üç faz – dört telli sistemlerde üç ve üçün katı harmoniklerden dolayı nötr iletkeni etkilenir. Üç fazlı dengeli nonlinear yük akımının n. harmonik bileşeninin etkin değeri I_n ve temel frekans için açısız frekans ω_1 olmak üzere; a, b, c faz akımlarının n. harmonik bileşenlerinin ani değerleri,

$$\begin{aligned} I_{a_n}(\omega t) &= \sqrt{2}I_n \sin(n. \omega_1. t) \\ I_{b_n}(\omega t) &= \sqrt{2}I_n \sin(n. \omega_1. t - n. 120^\circ) \\ I_{c_n}(\omega t) &= \sqrt{2}I_n \sin(n. \omega_1. t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (5.19)$$

eşitlikleri ile hesaplanabilir. Üçüncü harmonik için (n=3),

$$\begin{aligned} I_{a_3}(\omega t) &= \sqrt{2}I_3 \sin(n. \omega_1. t) \\ I_{b_3}(\omega t) &= \sqrt{2}I_3 \sin(n. \omega_1. t - 360^\circ) \\ I_{c_3}(\omega t) &= \sqrt{2}I_3 \sin(n. \omega_1. t + 360^\circ) \\ I_{a_3} &= I_{b_3} = I_{c_3} \end{aligned} \quad (5.20)$$

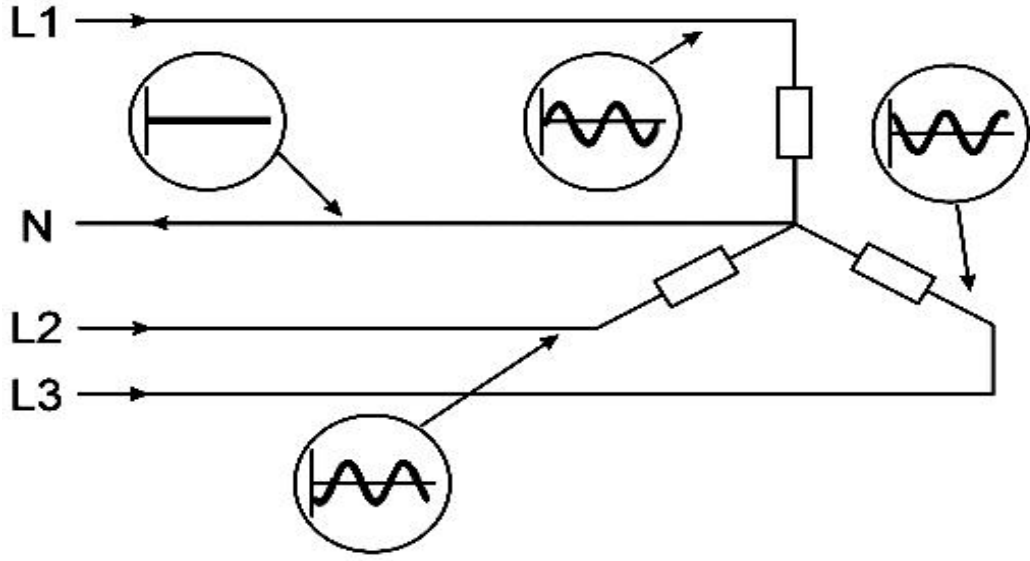
olur. Burada;

I_n : Üç fazlı dengeli nonlinear yük akımının n. harmonik bileşeninin etkin değeri

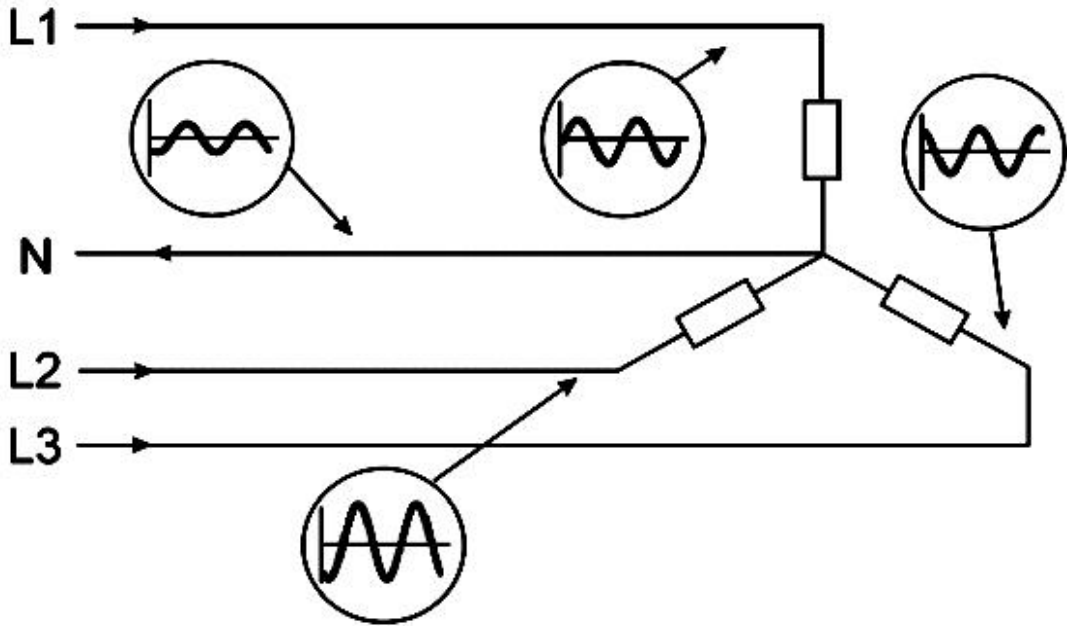
ω_1 : Temel frekans için açısız frekans olmak üzere;

I_a, I_b, I_c : Faz akımlarının n. harmonik bileşenlerinin ani değerleridir (Çakıroğlu 2007).

Yukarıdaki eşitlikte görüldüğü gibi, dengeli şebeke ve yük koşulları altında üç ve üçün katı harmonik bileşenlerinin her üç faz akımları birbirine eşittir. Şekil 5.35'ten de anlaşıldığı gibi üç fazın da eşit olarak yüklendiği simetrik şebekelerde nötr iletkeni üzerinde herhangi bir akım yoktur.

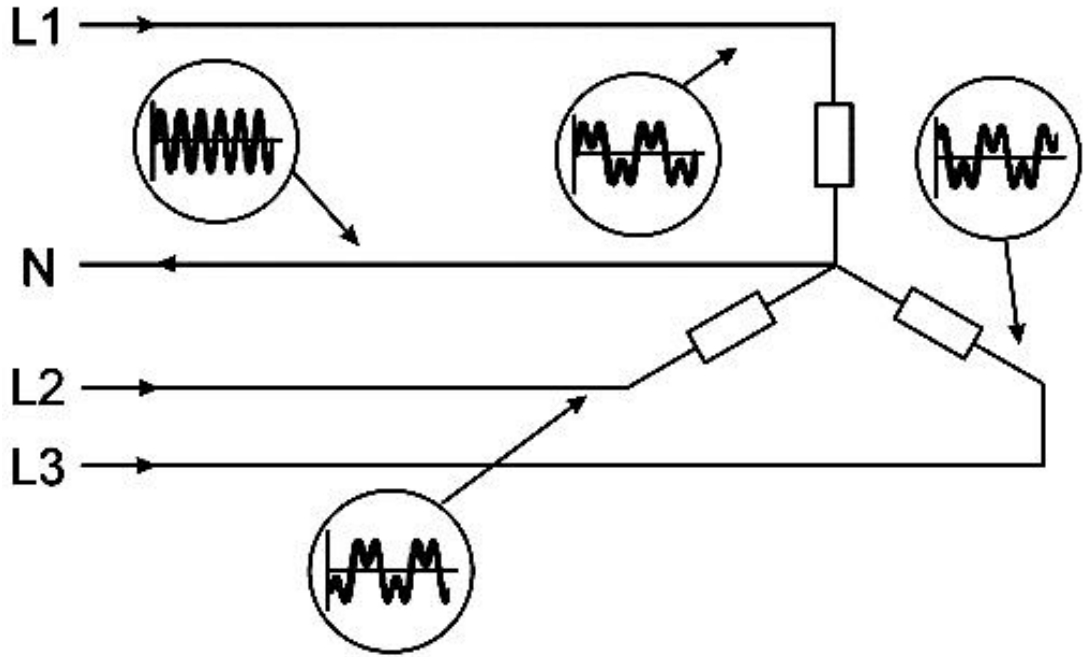


Şekil 5.35. Üç fazında eşit olarak yüklendiği simetrik şebekelerde nötr iletkeni üzerinden geçen akım.



Şekil 5.36. Dengesiz üç faz yükteki nötr akımı (Baggini 2003).

Dengesiz üç-faz yükte ise Şekil 5.36'daki gibi nötr akımı sıfır değildir, fakat faz akımından daha küçüktür.



Şekil 5.37.Üçüncü harmoniğin bulunması halinde nötr hattındaki akım.

Ancak şebekede üçüncü harmonik varsa Şekil 5.37'teki gibi nötr iletkeni üzerinde faz akımından daha büyük değerlerde akımlar görülür.

Kompakt flüoresan lambalar ve elektronik balastlı flüoresan lambalar büro ve konutlarda yer alan, büyük ölçüde üçüncü harmonik üreten nonlineer yüklerdir. Nötr hattından üçüncü harmonik akımlarının toplamının geçmesi sebebiyle nötr hattı aşırı yüklenir, kayıplar ve gerilim düşümleri artar. Bir deşarj lambası şebekede 1A/kW değerinde 150 Hz frekansa haiz üçüncü harmonik akımı üretir.

İş hanları, bankalar, ticari binalarda florasan lambaların bilgisayarların ve bilgisayarlara bağlı kesintisiz güç kaynaklarının artmasıyla nötr iletkenlerde görülen 3. Harmonik akımları her bir faz iletkeninden akan akım değerlerinin % 150 ila % 210 katına ulaşmıştır (Çakıroğlu 2007).

Söz konusu sorunlara karşı alınan en yaygın önlem, nötr iletkeninin kesitinin faz iletkeninin kesitinden daha büyük seçilmesidir (Baggini 2003).

Nötr iletkeni 16mm² bakır ve 25 mm² alüminyum kesitten sonra faz iletkeninin kesitinin yarı değerinde boyutlandırıldığı tesislerde nötr iletkeninin aşırı yüklenmesi durumu ortaya çıkar. Bu durumda nötr iletkeni, sigorta veya herhangi bir aşırı akım açıcısıyla korunmadığından yangın tehlikesi ortaya çıkarır (Çakıroğlu 2007).

Tablo 5.7. 3. Harmonik seviyelerine göre düzeltme faktörleri (Baggini 2003).

| 3. Harmonik Akımı (%) | Faz Akımı Esas Alınarak Seçilen Değer | Nötr Akımı Esas Alınarak Seçilen Değer |
|------------------------------|--|---|
| 0-15 | 1.00 | - |
| 15-33 | 0.86 | - |
| 33-45 | - | 0.86 |
| > 45 | - | 1.00 |

Amerikan CBEMA (Computer-Business Equipment Manufacture Association) kuruluşu üçüncü harmonik tarafından ortaya çıkan yangın riskinden dolayı nötr iletkeninin kesitinin faz iletkeninin kesitinin 1.73 katı olması gerektiğini tavsiye etmiştir.

Uluslararası EMC direktiflerine uygun olarak yapılan yeni düzenlemelerde nötr iletkenin boyutlandırılmasında mutlaka üçüncü harmoniğin meydana getirdiği akımlar hesaba katılacaktır. Nötr iletkeninin kesiti bir fazlı sistemlerde kesit değerine bakılmaksızın ve üç fazlı sistemlerde faz iletkeni 16 mm² bakır, 25mm² alüminyum kesite kadar faz iletkeni ile aynı kesitte olacaktır. Üç fazlı 16mm² bakır, 25mm² alüminyum kesitten daha büyük faz iletkenine sahip sistemlerde aşağıdaki şartların hepsinin gerçekleşmesi durumunda nötr iletkeni faz iletkeninin kesitinden daha düşük değerde olabilir.

- En yüksek (harmoniği de ihtiva eden) normal kullanım esnasında nötr iletkeninde görülebilecek akım nötr iletkeninin akım taşıma kapasitesinden daha büyük olmamalıdır (Normal kullanımdan yükün fazlar arasında eşit bölünmesi kastedilmiştir).
- Nötr iletkeni şartnamelere uygun olarak aşırı akıma karşı korunmuş olmalıdır.
- Nötr iletkeninin kesiti en az 16mm² bakır ve 25mm² alüminyum olmalıdır.

Tesisin planlama safhasında harmoniklerin üretilmesi ve miktarları önceden tahmin edilmesi mümkün olmadığından Nötr iletkenleri ya yüksek değerlerde boyutlandırılmalı ve nötr iletkeninin kesiti en az faz iletkeni kesitinde olmalıdır veya özellikle eski tesislerde harmonik üreten cihazların üreteceği harmonik miktarı nötr iletkenini zorlamayacak seviyede olmalıdır.

THF yani üçüncü harmonik filtresi kullanıldığında nötr iletkende üçüncü harmonik akımları meydana gelmesi engellenir ve üçüncü harmonik akımlarının engellenmesiyle nötr iletkeninin yüksek değerlerde boyutlandırılmasına gerek kalmaz (Bilge 2008).

Aşağıdaki örnekte PVC (70 °C) izolasyonlu ve 4 damarlı sıva üstü bir kablonun kullanılacağı üç-fazlı ve yük miktarı 39 A olan bir devrenin tesis edileceği durumda uygun kesit hesabı yapılmaktadır. Harmonik mevcut olmaması durumunda her zaman yapılacak olan şey 6 mm² kesitinde ve 41 A kapasitede bir bakır kablo seçmekten ibarettir.

Tablo 5.7’de 3. harmonik seviyelerine göre düzeltme faktörleri verilmiştir. Görüldüğü gibi harmonik seviyesi % 33’ü geçtiğinde artık kablo değerleri nötr akımı esas alınarak bulunmaktadır.

3. Harmonik seviyesi % 20 olması halinde, 0.86 indirim faktörü uygulanarak yük akımı:

$$\frac{39}{0,86} = 45 \text{ A}$$

olarak hesaplanır ve 10 mm² kesitli bir kablo kullanmak gereklidir.

3. harmonik seviyesinin % 40 olması durumunda kablo kesiti hesabı artık nötr hattına göre yapılır,

$$39 \cdot 0,4 \cdot 3 = 46,8 \text{ A}$$

olan nötr akımına göre seçilmesi ve 0.86 indirim faktörü uygulanarak bu yük için

$$\frac{46,8}{0,86} = 54,4 \text{ A}$$

düzeyinde, yani 10 mm² kesitinde bir kablo kullanılacaktır. 3. harmonik seviyesinin % 50 harmonikte ise, seçilmesi gereken kablonun kesiti yine nötr akım miktarına bağlı olur ve

$$39 \cdot 0,5 \cdot 3 = 58,5 \text{ A}$$

seviyesinde 16 mm² kesitli bir kablo gerekecektir (Bu durumda indirim faktörü 1'e eşit olmaktadır) (Baggini 2003).

5.3. Harmonik Standartları

IEEE 519-1992 standardı, (Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems), harmonik akımların primer kaynağı ölçümlerinin olduğu dağıtım şebekesi tüketicilerinde oluşmuş nonlineer yükleri tanımlamaktadır. Harmoniklerin transformatörlerde potansiyel bir tahrip etkeni olması nedeniyle, IEEE özellikle harmoniklerin transformatörlerdeki etkilerini sınırlandırmak amacıyla bir standart geliştirmiştir. Bu standart IEEE C57.110-1996, (Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents) standardıdır. IEEE Standardı C57 serileri transformatörde aşırı ısınmaya neden olan harmonik problemleri inceler. IEC 1000 3-2 standardı, (Limits for Harmonic Current Emmissions), tek faz ekipmanlar tarafından üretilen üç ve üçün katı harmonikler için sınırlamalar getirmiştir. Birçok uygulamada bu standartların gerçekleştirilmesi zor değildir ve ekonomik tercihlerin büyük bir kısmı bu konuyla ilgili hala geliştirilmeye devam etmektedir. IEEE ve uluslararası harmonik standartlar üç kategoride ele alınabilir:

- Tüketici/sistem sınırları: IEEE 519-1992, IEC 1000-2-2, IEC 1000-3-6.
- Ekipman sınırları: IEC 1000-3-2 (16 A'e kadar), IEC1000-3-4 (16-75 A).
- Harmoniklerin ölçülmesi: IEC 1000-4-7.

Tablo 5.8. IEEE-519 Gerilim sınırları (Sağlam 2005).

| Bara Gerilimi | Maksimum tek harmonik komponent (%) | Maksimum THDV (%) |
|---------------|-------------------------------------|-------------------|
| 69 kV ve altı | 3.0 | 5.0 |
| 115 kV-161 | 1.5 | 2.5 |
| 161 kV üzeri | 1.0 | 1.5 |

IEC 1000-3-2 ve 1000-3-4 özel harmonik içerikler için özel sınırlandırmalar getirmektedir ve güç elektroniği tasarımında en etkili standartlar olarak değerlendirilmektedir. IEEE 519 aynı zamanda bazı özel harmonikler için sınırlandırmalar getirmektedir ve bunun amacı harmonikleri ortak birleşme noktasında sınırlandırmaktır. En çok alıntı yapılan harmonik standardı IEEE 519-1992 standardıdır. IEEE 519 nonlineer yükleri içeren elektrik sistemleri için, mantıklı harmonik hedefleri oluşturmaya çalışmıştır. Sürekli hal harmonik limitlerini, elektrik şebekeleri ve tüketicilerinin her ikisi için değerlendirerek öneride bulunmaktadır.

Bunun altında yatan sebep, tüketicilerin harmonik akımları sınırlandırması, elektrik şebekelerin harmonik gerilimleri sınırlandırma zorunlulukları ve iki kısmın harmonik seviyelerini kontrol altında tutmak için sorumluluğun paylaşılmasıdır. IEEE 519 standardında, tek harmoniklerin genlik değerinin % 3'den ve harmonik gerilim distorsiyon değerinin ise % 5'den büyük olmayacağı Tablo 4.8'de belirtilmiştir (Baggini 2003).

Gerilim bozulmasının doğal bir sonucu olarak sinüs şeklinde olmayan akımlar, kısa devre gücünün yüksek (empedansın küçük) olduğu noktalarda yüksek genlikli harmonik akımlar üretirler. Böyle durumlarda gerilim harmonikleri etkisiz olmasına karşın, akım harmonikleri haberleşme devrelerinde önemli problemler oluşturur. Bu nedenlerle, elektromanyetik girişimi ve sistem donanımındaki kayıpları izin verilebilir değerler içinde tutmak için akım harmoniklerinin de sınırlandırılması gerekir. Gerilim bozunumu verilen sınırlar içinde tutulabilirse, diğer elemanlar normal olarak çalışabilir (Özcan 2006).

IEEE 519 Standardı harmonik gerilimin ve akımın sınırlarını belirler. Bu standardın amacı harmonik akımların geriye doğru hareket ederek güç sistemini ve diğer tüketicileri etkilemesini engellemektir. Dağıtım sistemleri için akım bozulma sınırları (IEEE519-1992) Tablo 5.9'da listelenmiştir. Bu tabloda, tam sınırlar, maksimum kısa-devre akımı I_{KD} , ve maksimum aylık talep yük akımının ortalaması I_L akımlarının uygulandığı kısa-devre oranıyla ($SCR = I_{KD}/I_L$) belirlenir. Çift harmonikler tek harmonik limitlerin % 25'inde sınırlandırılmıştır.

Tablo 5.9. Dağıtım sistemleri için akım bozulma sınırları (IEEE519-1992) (Adak 2003).

| $V_n < 69 \text{ kV}$ | | | | | | |
|--------------------------------|----------|------------------|------------------|------------------|-------------|------|
| I_{KD}/I_L | $h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $h \geq 35$ | %TDD |
| <20 | 4.0 | 2.0 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5.0 |
| 20 – 50 | 7.0 | 3.5 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 8.0 |
| 50-100 | 10.0 | 4.5 | 4.0 | 1.5 | 0.7 | 12.0 |
| 100- 1000 | 12.0 | 5.5 | 5.0 | 2.0 | 1.0 | 15.0 |
| > 1000 | 15.0 | 7.0 | 6.0 | 2.5 | 1.4 | 20.0 |
| $69 < V_n \leq 161 \text{ kV}$ | | | | | | |
| < 20 | 2.0 | 1.0 | 0.75 | 0.3 | 0.15 | 2.5 |
| 20- 50 | 3.5 | 1.75 | 1.25 | 0.5 | 0.25 | 4.0 |
| 50- 100 | 5.0 | 2.25 | 2.0 | 0.75 | 0.35 | 6.0 |
| 100-1000 | 6.0 | 2.75 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 7.5 |
| > 1000 | 7.5 | 3.5 | 3.0 | 1.25 | 0.7 | 10.0 |
| $V_n > 161 \text{ kV}$ | | | | | | |
| < 50 | 2.0 | 1.0 | 0.75 | 0.3 | 0.15 | 2.5 |
| ≥ 50 | 3.0 | 1.5 | 1.15 | 0.5 | 0.22 | 4.0 |

Harmonik sorunlarını azaltmak için en uygun seçenek yüklerin tasarımını değiştirerek harmonik akım tüketimini sınırlandırmaktır. Bu yaklaşımda, yüklerin temel frekans dışındaki diğer frekanslardaki tüketimleri sınırlandırılmalıdır. Sınırlama yaklaşımı en fazla bilgisayarları ve elektrik kontrollü donanımları etkilemektedir. Bu nedenle birçok üretici, ek yatırım gerektirmesi nedeniyle bu

Tablo 5.10. TS EN 61000-3-2 yük sınıfları (Sağlam 2005).

| TS EN 61000-3-2 - Harmonik İçeren Yüklerin Sınıfları | |
|--|---|
| A Sınıfı: | <ul style="list-style-type: none"> • Dengelenmiş üç fazlı donanım • D sınıfında belirlenmiş donanımların dışındaki ev aletleri • Taşınabilir aletlerin dışındaki aletler • Akkor lambalar için ışık zayıflatıcıları • Ses donanımı |
| B Sınıfı: | <ul style="list-style-type: none"> • Taşınabilir aletler • Mesleki olmayan ark kaynak donanımı |
| C Sınıfı: | <ul style="list-style-type: none"> • Aydınlatma donanımı |
| D Sınıfı: | <ul style="list-style-type: none"> • Kişisel bilgisayarlar ve kişisel bilgisayar monitörleri • Televizyon alıcıları |

Tablo 5.11. A sınıfı donanımlar için harmonik sınır değerleri.

| | Harmonik Derecesi n | İzin verilen maksimum harmonik akımı n |
|---------------------|------------------------|---|
| Tek harmonikler | 3 | 2.30 |
| | 5 | 1.14 |
| | 7 | 0.77 |
| | 9 | 0.40 |
| | 11 | 0.33 |
| | 13 | 0.21 |
| | $15 \leq n \leq 39$ | $2.55/n$ |
| Çift harmonikler | 2 | 1.08 |
| | 4 | 0.43 |
| | 6 | 0.30 |
| | $8 \leq n \leq 40$ | $1.84/n$ |

sınırlamalara karşı çıkmaktadır. Yürürlüğe giren bu standartlar ile elektriksel cihazlara üretim aşamasında sınırlar getirilmiştir.

TS-EN 61000-3-2 standardında faz başına 16 A'den küçük, tek fazlı veya üç fazlı yüklerin harmonik akım sınırları düzenlenmektedir. TS EN 61000-3-4 standardı ise faz başına 16 A'den büyük yükler için harmonik akım sınırlarını düzenlemektedir. Avrupa Birliği'nde geçerli olan TS EN 61000-3-2 standardı, üreticilerin ürünlerindeki harmonik akım tüketimine sınırlama getiren yaklaşımı

benimsemiştir. Standart, elektriksel yükleri Tablo 5.10'da gösterildiği gibi sınıflandırmaktadır.

Her bir sınıftaki donanım için geçerli olan harmonik akım sınırları görülmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, bu sınırların her bir harmonik derecesi için ayrı ayrı verilmiş olmasıdır. Tablo 5.11 A sınıf donanım için harmonik sınır değerlerini göstermektedir (Sağlam 2005).

Tablo 5.12. B sınıfı donanım için harmonik sınır değerleri.

| | Harmonik Derecesi n | İzin verilen maksimum harmonik akımı n |
|---------------------|------------------------|---|
| Tek harmonikler | 3 | 3.45 |
| | 5 | 1.71 |
| | 7 | 1.155 |
| | 9 | 0.60 |
| | 11 | 0.495 |
| | 13 | 0.315 |
| | $15 \leq n \leq 39$ | $3.375/n$ |
| Çift harmonikler | 2 | 1.62 |
| | 4 | 0.645 |
| | 6 | 0.45 |
| | $8 \leq n \leq 40$ | $2.76/n$ |

Tablo 5.13. C sınıfı donanım için harmonik sınır değerleri.

| Harmonik Derecesi n | Temel frekanstaki giriş akımının yüzdesi olarak ifade edilen izin verilen maksimum harmonik akımı % |
|---|---|
| 2 | 2 |
| 3 | $30 \times \text{Devrenin güç faktörü}$ |
| 5 | 10 |
| 7 | 7 |
| 9 | 5 |
| $11 \leq n \leq 39$ (yalnız tek harmonikler) | 3 |

Tablo 5.14. D sınıfı donanım için harmonik sınır değerleri.

| Harmonik Derecesi n | Watt başına izin verilen en büyük harmonik akım mA/W | İzin verilen maksimum harmonik akımı (A) |
|---|--|--|
| 3 | 3.4 | 2.30 |
| 5 | 1.9 | 1.14 |
| 7 | 1.0 | 0.77 |
| 9 | 0.5 | 0.40 |
| 11 | 0.35 | 0.33 |
| $13 \leq n \leq 39$ (yalnız tek harmonikler) | $3.85/n$ | 0.21 |

TS EN 61000-3-3 standardı, genel alçak gerilim besleme sistemlerindeki gerilim değişiklikleri, dalgalanmaları ve kırışmayla ilgili sınırlamaları kapsamaktadır ve faz başına 16 A'e kadar (16 A dahil) bir giriş akımına sahip olan ve 50 Hz'te faz-nötr gerilimi 220 V ile 250 V arasındaki genel alçak gerilim dağıtım sistemlerine bağlanmak üzere tasarlanmış elektrik ve elektronik cihazlar ile şartlı bağlantıya tabi olmayan cihazlara uygulanır. Belirtilen sınır değerleri karşılamayan ve bu nedenle bu standardı karşıladığına dair bir açıklama yapılmayan cihazlar; beyan giriş akımı faz başına 75 A'e kadar (75 A dâhil) ve şartlı bağlantıya tabi olan cihazlar için hazırlanan IEC 61000-3-11 standardını karşıladığını göstermek amacıyla yeniden deneyden geçirilebilir veya değerlendirilebilir. Bu standartta verilen sınır değerleri, besleme gerilimindeki dalgalanmalar sebebiyle 230 V/60 W sarılmış bobin flamanlı lambaların verdiği ışık üzerine bindirilen kırışmanın subjektif şiddet derecesine dayanır. Faz-nötr arası anma gerilimleri 220 V'tan daha düşük ve/veya frekansı 60 Hz olan sistemler için sınır değerleri ve referans devre değerleri inceleme aşamasındadır.

TS EN 61000-3-11 standardı, gerilim değişimleri emisyonu, gerilim dalgalanmaları ve genel alçak gerilim besleme sistemini etkileyen ve donanımla oluşturulan kırışmayı kapsar. Belirlenmiş şartlar altında deneyden geçirilen donanımla oluşturulmuş gerilim değişimlerinin sınırlarını belirlemektedir ve 16 A'den daha fazla (75 A'i içeren) beyan edilen giriş akımına sahip elektrik ve elektronik donanıma uygulanabilir. Söz konusu akımların 50 Hz'lik ve bağlantısı şarta dayalı hattan nötre 220 V ve 250 V arasındaki anma gerilimlerine sahip alçak

gerilimli şehir şebekesi besleme sistemlerine bağlandığı düşünülmelidir. Belirlenmiş kırpışma sınırları IEC 61000-3-3 ile aynı olan bu standart, deneyden geçirildiği ve sınır değerlere uyulmayan IEC 61000-3-3'ün kapsamı içindeki donanıma da uygulanabilir.

TS EN 61000-4-7 Bu standart, belli standartlarda verilen emisyon sınır değerlerine (örneğin IEC 61000-3-2'de verilen harmonik akım sınır değerlerine) göre deneyden geçirmek amacıyla tasarlanmış olan ölçme cihazlarını ve 50/60 Hz şebeke besleme sistemlerindeki harmonik gerilimlerin ve akımların 9 kHz'e kadar olan frekans aralığındaki spektral bileşenlerin ölçülmesinde kullanılan ölçme cihazlarını kapsamaktadır. Uygulama değerlendirmeleri bakımından harmonik frekans aralığından 9 kHz'e kadar olan harmonikler, ara harmonikler ve diğer bileşenler birbirinden ayrılmıştır.

İki ardışık harmonik frekans arasında bulunan bir frekansa sahip bir elektrik sinyalinin spektral bileşeni "ara harmonik" olarak tanımlanır. Haberleşme sistemleri güç sistemine bağlanabilir. Haberleşme sistemlerinin harmonikler tarafından bozulmalarını önlemek için, kullanılan frekanslar genelde iki harmonik frekans arasındadır, başka bir deyişle ara harmonik frekanslarıdır.

Ara harmonik bileşenler temelde iki kaynak nedeniyle oluşur:

- Temel bileşenin ve/veya harmonik bileşenlerin genliğindeki ve/veya faz açısındaki değişimler sonucunda (örneğin doğrultucu sürücüler gibi),
- Besleme kaynağı frekansıyla eş zamanlı hale getirilmemiş anahtarlama frekanslarına sahip güç elektroniği devreleri (örneğin anahtarlama güç kaynakları ve güç faktörü düzelticileri gibi).

Olası etkilerine ilişkin örnekler şunlardır:

- Ses yükselteçlerindeki gürültü,
- Motorlardaki ve üreteçlerdeki ek torklar,
- Bozulmuş sıfır geçiş detektörleri,
- Endüktif bobinlerdeki ek gürültü (manyetik büzülüm).

Ara harmonik bileşenlerin sadece büyüklükleri değil, frekansları da değişir. Ardışık iki harmonik bileşen arasındaki aralıkta yer alan spektral bileşenlerin

gruplandırılması bir “ara harmonik grup” oluşturur. Bu gruplandırma, iki ayrı harmonik arasındaki ara harmonik bileşenler için genel bir değer sağlar. Bu değer harmonik bileşenlerin dalgalanma etkilerini de kapsamaktadır.

TS EN 61000-6-1 Bu standart, belirli bir ürün veya ürün grubu için bağışıklık standardı bulunmayan yerleşim birimleri, işyeri ve hafif sanayi ortamlarında kullanılmak üzere tasarlanmış elektrikli ve elektronik cihazlar için 0 Hz–400 GHz frekans aralığındaki bağışıklık şartlarını kapsamaktadır ve doğrudan alçak gerilim şebekesine veya ilgili cihaz için tasarlanmış DC kaynağa bağlanacak şekilde tasarlanmış cihazlara uygulanır. Endüstriyel bir güç kaynağına bağlanacak şekilde tasarlanmış cihazlar ve endüstriyel ortamlarda çalışacak şekilde tasarlanmış cihazlar, IEC 61000-6-2, endüstriyel genel standardı tarafından değerlendirilmelidir.

Bu standardın amacı, kapsam içinde tanımlanmış olan cihazlar için elektrostatik boşalmaları da kapsayan sürekli veya geçici olan, iletilen ve yayılan elektromanyetik bozucu etkilerle ilgili bağışıklık deney şartlarını belirlemektir. Bağışıklık şartları, yerleşim birimleri, ticari ve hafif sanayi ortamlarındaki cihazların yeterli seviyede bağışıklığa sahip olduklarından emin olunacak şekilde seçilmiştir. Bununla beraber verilen bağışıklık şartları, oluşumu oldukça düşük olasılıkta olan ve herhangi bir ortamda oluşan özel durumları kapsamamaktadır.

Bu standardın kapsamındaki cihazların EMU kapsamındaki emisyon şartları ise IEC 61000-6-3 standardında ele alınmıştır.

IEEE 1159-1995 standardının içeriği güç kalitesinin izlenmesini, güç kalitesi terminolojisini, düşük güç kalitesinin enerji üreticileri ve tüketicilerinin donanımları üzerindeki etkilerini ve elektromanyetik olaylarla ilgili ölçümleri kapsamaktadır. Elektromanyetik bozulma ve dalga biçiminin distorsiyonuyla ilgili bölümlerde harmoniklerle ilgili tanımlara ve sınır değerlere yer verilmiştir (Acarkan 2006).

IEEE 1531-2003 (IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters) standardı harmonik filtrelerin elemanlarının seçimi, korunması ve kontrolünü içermektedir. Ayrıca 50-60 Hz'lik güç sistemlerinde harmonik eliminasyonunun yapılabilmesi için paralel pasif filtrelerin kullanımının ana hatlarını belirtmektedir (IEEE Std 1531-2003).

5.4. Harmonikler ve Diğer Şebeke Olaylarının Sanayi Tesislerine Verdikleri Maddi Zararlar

Güç kalitesi problemleri özellikle sanayi kuruluşlarını olumsuz yönde etkilemektedir. Bir sanayi kuruluşu için, makine ve teçhizatının onarımı, yenilenmesi ve iş kaybı milyon dolarları bulabilmektedir. Örneğin; kısa süreli bir elektrik kesintisi veya gerilim dalgalanması ya da harmonik gibi etkenlerle birbiri ile eşzamanlı çalışan makinelerin daha ürüne dönüşmemiş malzemeleri işlenemez duruma gelebilir, ya da bir bankanın sunucusunun çalışmaması bir çok kişiyi etkileyebilir.

Bilgi işlem cihazları, motor hız kontrol sürücüleri gibi cihazlarda voltaj düşmesi, yükselmesi ya da harmonik gibi güç kalitesi problemlerinde sistemin davranışını önceden kestirmek mümkün değildir.

Kağıt yapımı gibi sürekli sistemlerde yukarıdaki problemler sistemi bütünüyle kilitleyerek tamamen enerji kesintisi etkisi yaparak maddi zararlar verebilir. Bilgisayar destekli sistemlerde, sistemin tekrar başlatılması, askıda kalan işlemlerin tekrar yapılması ve kaydedilmeden kaybolan verilerin tekrar elde edilmesi gibi sorunlar oluşur.

Yarıiletken sanayisi özellikle hassasiyet arz eder. Çünkü yarıiletkenlerin katmanları birçok üretim evrelerinden geçmektedir. Bazen toplu üretimde yarıiletkenlerin katmanlarının tamamlanma süresi birkaç gün sürebilir. Dolayısıyla, böyle bir üretimde, katmanlardan birinde prosesin sonlarına doğru bozulma olması durumunda diğer bütün katman çalışmaları da boşa gidecektir. Yarıiletken sanayisinde gelişme çok hızlı rekabet yoğun ve ürün ömrü çok kısadır. Dolayısıyla üretim kaybı, sadece üreticiler için değil, aynı zamanda kendi ürünlerinin üretim ve sevkiyatındaki aksamalar nedeniyle müşteriler için de son derece büyük önem taşımaktadır (Chapman 2001).

Örneğin otomobil sanayisinde saatte 2.000 Dolarlık elektrik tüketimi olan bir sistemde, saniyenin 1/10'unda meydana gelen gerilim düzensizliği yüzünden 200.000 Dolarlık kayba neden olabilir. sistemdeki birbirleriyle uyumlu ard arda çalışan cihazları tekrar başlatmak, kumanda cihazlarını tekrar programlamak, çalışma sırasında tahrip olan maddeleri temizlemek (işçi başına saatte 25 dolardan 2.000 işçinin saatte toplam 50.000 Dolar) gibi oldukça masraflı sorunlara sebep olur. Bir

otomobil firması anlık bir elektrik kesintisinin faturasının her bir arızada 40.000 dolar olduğunu, ve kendi bünyesindeki diğer bütün fabrikalarla beraber yılda 10 milyar dolar toplam zarara sebep olduğunu hesaplamıştır (Power Quality Service Center 2005).

Çelik veya kâğıt sanayileri gibi çok büyük miktarlarda enerji kullanan sektörler ikinci bir enerji kaynağı olarak enterkonnekte sistemin farklı bir kısmından beslenirler. Her iki kaynağı da etkileyebilecek bir problem olasılığı oldukça zayıftır. Uygun ve yeterli yakıt temin edilebildiği takdirde ihtiyaç duyulan enerjinin tamamının tüketim bölgesinde üretilmesi alternatif olabilir. Her iki durumda da ilk yatırım masrafı çok yüksek olur, ancak güç kesintisinin potansiyel maliyeti de aynı derecede yüksektir. Tekstil, kâğıt, cam, çelik vb. sanayi kuruluşlarında bir saniyelik bir enerji kesintisi bile büyük mali kayıplara sebep olmaktadır. Örneğin kâğıt, 500 metreden daha uzun ve içerisinde yüzlerce haddenin hassas bir şekilde devir kontrollerinin yapıldığı makinelerle üretilmektedir. Herhangi bir güç kesintisi, gerilim azalması veya harmonik gibi olumsuz etkiler senkronizasyonu bozarak işlemi durdurabilir. Üretimin tekrar başlamasından önce saatler süren çalışmalar yapılarak kısmen işlemde geçmiş kâğıt ve kâğıt hamurunun sistemden temizlenmesi gerekir. Üretim kaybından başka hammadde ve insan gücü kayıpları ve siparişlerin zamanında teslim edilememesi ortaya çıkabilecek son derece olumsuz sonuçlardır. Gerek üretici ve gerekse müşteri olarak stok yapmanın imkânsız olduğu basın sektöründe, birkaç gün içinde sirküle edilerek çok büyük miktarlarda kullanılmakta olan kâğıdın basılamadığı ve dağıtılamadığı düşünüldüğünde tahmin edilemeyen olumsuz sonuçlarla karşı karşıya kalınacaktır (Chapman 2001).

Enerji kalitesizliğinin Kayseri sanayisinde oluşturduğu etkiler ve maliyetler yapılan bir araştırmaya (Cesur 2006) göre aşağıdaki gibidir:

2007 yılı KCETAŞ görev bölgesinde tüketilen toplam elektrik enerjisi miktarı 2.260.000 MWh'tir. Sanayi abone grubu bu tüketimin % 54'ünü oluşturmakta ve bu miktar 1.750.000 MWh'tir. Sanayi tüketiminin % 80'lik bölümünü ise 5 adet yüksek tüketimli müşterileri olan Kayseri OSB, Karsu Tekstil, HES Grubu, Birlik Mensucat, ÇİMSA, Orta Anadolu A.Ş. oluşturmaktadır.

Bu kuruluşların enerjiden sorumlu yetkilileri ile yapılan görüşmelerde enerji kalitesizliğinin oluşturduğu reel maliyetlerle ilgili tespitler şu şekildedir (Cesur 2006).

- **Çimsa Çimento A.Ş.**

Kurulu güç: 16000 kVA, Sözleşme gücü: 15456 kW

- ❖ En küçük zamanlı bir elektrik kesintisinin fabrikaya maliyeti 80 ton çimento üretim kaybı = 84.281 \$.
- ❖ 1 saatlik kesinti 160 ton çimento üretim kaybı = 168.562 \$.
- ❖ Enerji kalitesizliğinden dolayı arızalanan cihazlar ve elektronik kart arızalarının 1 aylık maliyeti 2.350 TL.

Enerji kalitesine yönelik yatırımlar

- ✓ Kompanzasyon ve harmonik filtre = 95.000 Euro.
- ✓ UPS = 11.000 \$.

- **Karsu Tekstil**

Kurulu güç: 13880 kVA, Sözleşme gücü: 8400 kW

- ❖ En küçük zamanlı bir elektrik kesintisinin fabrikaya maliyeti 800 kg iplik kaybı=2.800 Euro.
- ❖ 1 saatlik kesinti 2.400 kg iplik üretim kaybı =8.400 Euro
- ❖ Enerji kalitesizliğinden dolayı arızalanan cihazlar ve elektronik kart arızalarının 1 aylık maliyeti 1.500 \$.

Enerji kalitesine yönelik yatırımlar

- ✓ Kompanizasyon = 54.000 \$
- ✓ UPS = 11.000 \$

- **Birlik Mensucat A.Ş.**

Kurulu Güç: 9850 kVA, Sözleşme Gücü: 4600 kW

- ❖ En küçük zamanlı bir elektrik kesintisinin fabrikaya maliyeti = 6.000 \$.
- ❖ 1 saatlik kesinti maliyeti = 13.000 \$.
- ❖ Enerji kalitesizliğinden dolayı arızalanan cihazlar ve elektronik kart arızalarının 1 aylık maliyeti 2.000 \$.

- **Hes Kablo A.Ş.**

Kurulu güç: 19480 kVA, Sözleşme gücü: 10900 kW

- ❖ En küçük zamanlı bir elektrik kesintisinde 100.000 TL üretim kaybı, 20.000 TL fire oluşmakta,
- ❖ 1 saatlik kesintide 200.000 TL üretim kaybı oluşmakta,
- ❖ Enerji kalitesizliğinden dolayı arızalanan cihazlar ve elektronik kart arızalarının 1 aylık maliyeti 12.500 Euro,

Enerji kalitesine yönelik yatırımlar

- ✓ Harmonik filtre = 300.000 Euro,
- ✓ UPS = 350.000 Euro,
- ✓ Otomatik Kademeli Trafo = 50.000 Euro,
- ✓ Jeneratör = 500.000 Euro,

- **Orta Anadolu A.Ş.**

Kurulu Güç: 11200 kVA

- ❖ En küçük zamanlı bir elektrik kesintisinde 20-25.000 avro kayıp oluşmakta,
- ❖ 1 saatlik kesintide 22.000 Euro üretim kaybı oluşmakta,
- ❖ Enerji kalitesizliğinden dolayı arızalanan cihazlar ve elektronik kart arızalarının 1 aylık maliyeti 20.000 Euro.

Enerji kalitesine yönelik yapılan toplam yatırımlar 200.000 Euro (Cesur 2006).

5.5. Sistemdeki Harmoniklerin Belirlenmesi

Harmoniklerin belirlenmesinde aşağıdaki ölçüm ve bulgular yardımcı olabilir:

- ❖ En iyi metot arızalara ihtimal vermeden sistemde harmonik ölçümü yapılması.
- ❖ Çok sık kondansatör ve ilgili ekipmanlar değiştirmek zorunda kalınıyorsa.
- ❖ Besleme şalterleri rezonans olayları ile belirsiz zamanlarda açma yaparak işletmeyi durduruyor ise.

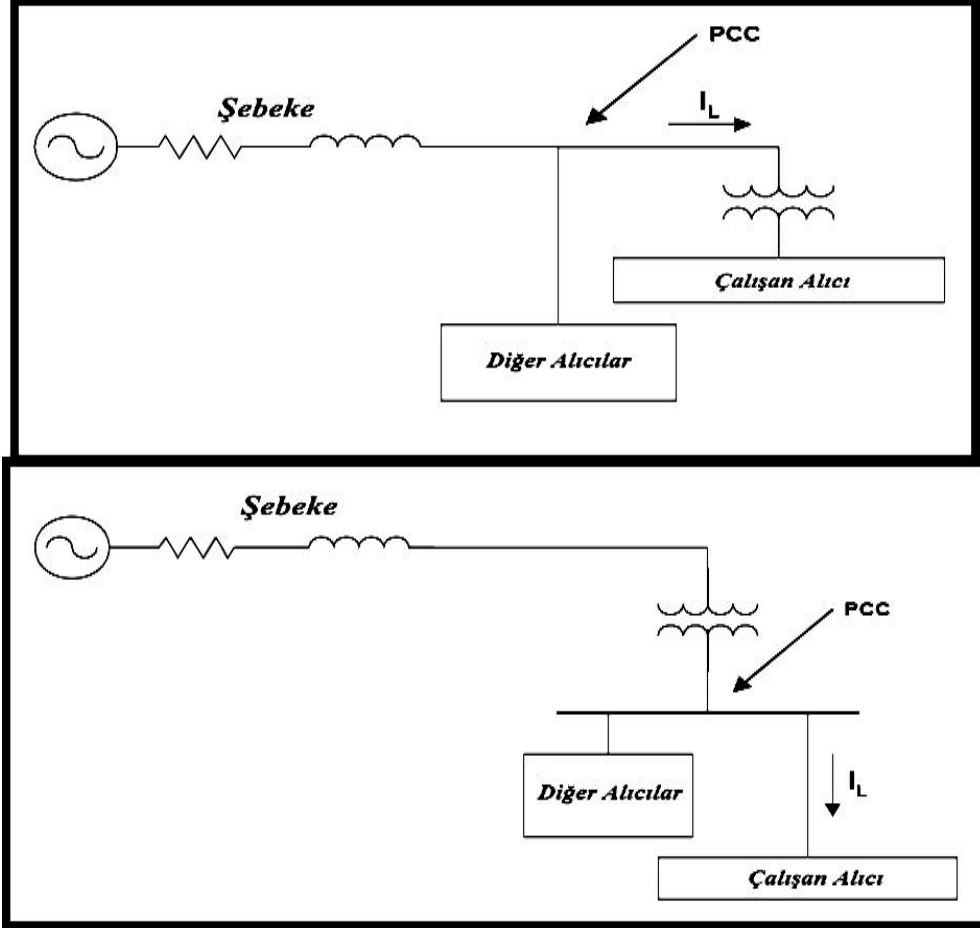
- ❖ Ölçüm cihazları hatalı ölçüm yapıyorsa.
- ❖ Nötr kablosu çok yükleniyor ve ısınıyorsa.
- ❖ Senkron ve asenkron motorlarda moment salınımları ve aşırı ısınmalar meydana geliyorsa.
- ❖ Uzaktan kumanda, yük kontrolü v.b. yerlerde çalışma bozuklukları varsa.
- ❖ İzolasyon malzemelerinde delinme oluyorsa.
- ❖ Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit ve anormal çalışma varsa.
- ❖ Ateşleme devrelerinde anormal çalışma varsa.
- ❖ Kompanzasyon sigortalarında atmalar oluyorsa.
- ❖ Elektrik cihazlarının ömürlerinde kısalma varsa, sistemde ki harmoniklerin varlığını göstermektedir.

5.6. Birden Çok Düğüm Noktası Bulunan Sistemlerde Ölçüm Noktasının Belirlenmesi

Harmonik limitleri elektrik sistemiyle birden fazla alıcı arasında PCC (Point of Common Coupling) noktalarında uygulanır. Diğer bir deyişle PCC diğer bir alıcının sistem üzerinden beslendiği noktadır. PCC bir veya birden fazla kullanıcının beslendiği bir transformatörün primer ya da sekonder tarafı olarak kabul edilebilir. Şekil 5.38’de PCC için iki farklı durum gösterilmiştir.

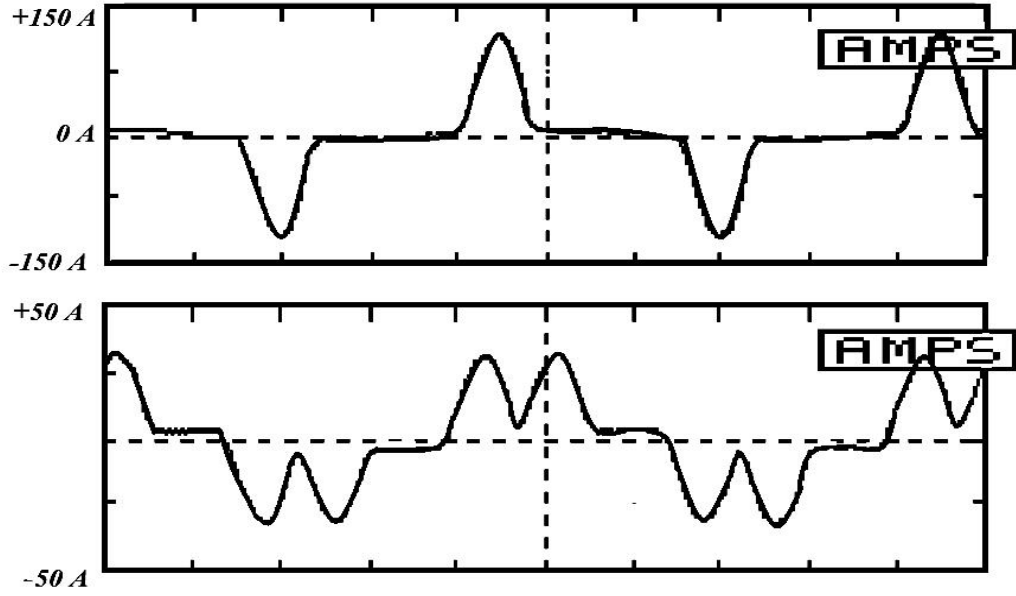
PCC’nin dışındaki her hangibir noktada yapılan ölçüm o sistemin harmonikleri hakkında genel bilgi vermektedir. Örneğin nonlinear yüklerle yakın yerlerde yapılan ölçümler bu yüklerin sistemin bir parçası olarak karakterize edilebilmesini sağlar. Sistemin farklı kollarında yapılan ölçümler ise sistemin farklı kollarında farklı cihazlar tarafından üretilen harmoniklerin birbirlerine sönümlenme ya da artırma etkileri anlaşılabilir.

Burada önemli bir nokta; eğer PCC sistemin primer (yüksek gerilim) tarafında ise akım ölçümü sekonder taraftan yapılabilir. Alınan değerler transformatörün dönüştürme oranı uygulanarak primer tarafa uygulanabilir. Yalnızca transformatörün bağlantı gurubuna dikkat edilmelidir. Nitekim bazı transformatör bağlantı gurupları sıfır sequence harmonik bileşenlerini filtreleyebilmektedir. Örneğin üçgen-yıldız bağlantı şeklinde sıfır sequence harmonik bileşenleri (tek fazlı yüklerin ürettiği harmonik bileşenler) transformatörün primer tarafına geçmeyeceği



Şekil 5.38. Birden fazla alıcının beslenmesi durumunda PCC'nin belirlenmesi (IEEE P519A/D5 1996).

için böyle bir transformatörün primerinde yapılan ölçüm değerlerinin sekonderdeki PCC noktasına aktarılması durumunda yanlış değerler bulunacaktır. Birçok sistemde sekonder taraftaki triplen harmoniklerin primer tarafa geçmemesi için bu tip bağlantı kullanılmaktadır. Bu tip bağlantı durumlarında sekonder taraftan ölçüm yapılabilir. Ancak kısa devre oranının (short circuit ratio SCR) primer tarafta hesaplanması gerekmektedir. Eğer sistemde yalnızca pozitif ve negatif sequence harmonik bileşenleri varsa (çoğu üç fazlı sanayi yükleri gibi) transformatörün bağlantı gurubu harmonik akımların genliklerini etkilemez yalnızca faz açılarını etkiler. Şekil 5.39 üçüncü harmoniğin yoğun olduğu bir sistemde üçgen-yıldız transformatörü üzerinden primer taraftaki akımın dalga şeklini göstermektedir (IEEE P519A/D5 1996).



Şekil 5.39. Üçüncü harmoniğin yoğun olduğu bir sistemde üçgen-yıldız transformatörü üzerinden primer taraftaki akımın dalga şekli (IEEE P519A/D5 1996).

5.6.1. Gerilim harmoniği ölçümü

Alçak gerilim şebekesinde gerilim ölçümü ölçü aleti direk hatta bağlanarak yapılabilir. Yüksek gerilimde ise ölçü transformatörleri, ölçüme uygun gerilim değeri elde edebilmek için kullanılır. Ölçü transformatörleri 3000 Hz'e varan oldukça iyi frekans cevabı verebilmektedir. Kapasitif gerilim bölücüleri ise harmonik frekanslarda hatalara sebebiyet verdiklerinden harmonik ölçümlerinde kullanılmamalıdır (IEEE P519A/D5 1996).

Ancak son yıllarda geliştirilen kapasitif gerilim bölücüleri harmonik ölçümlerinde kullanılmaktadır (Tanaskovic ve ark. 2005).

5.6.2. Akım harmoniği ölçümü

Sistemlerde harmonik limitlerinin uygulanabilmesi için akım harmoniklerinin ölçülmesi gerekmektedir. Burada hatırlanması gereken en önemli husus, harmonik limitleri ortalama bir maksimum talep yük akımı değeri ile uygulanabilmesidir.

Bunun için harmonik ölçümünde alınan değerler temel bileşenin yüzdesi şeklinde olmasından ziyade her bileşenin amper değerleri bulunması gerekmektedir. Temel bileşenin değeri yükün değişmesiyle sürekli değiştiği için temel bileşenin yüzdesi ile bulunan diğer harmonik bileşenlerin hesaplanması zor olacaktır ve bazı durumlarda yanlış değerlerin hesaplanmasına neden olacaktır. Örneğin temel bileşenin yüzdesi ile ifade edilen THD seviyesi küçük yük seviyelerinde çok yüksek değerlerde olacaktır fakat harmonik bileşenlerin amper değerleri makul değerlerde olacaktır.

Herhangi bir sistemin akım harmonikleri ölçülürken harmonik bileşenlerin açılarıyla ölçülmesi gerekli olabilir. Bu sistemdeki harmoniklerin birbirlerini sönmüleme etkisi yapıp yapmadığı hakkında bilgi edinilebilmesi için gereklidir. Bu faz açıları için seçilen referanslar aynı olması gerekmektedir. Genellikle bu fazlardan birini referans seçilerek yapılmaktadır.

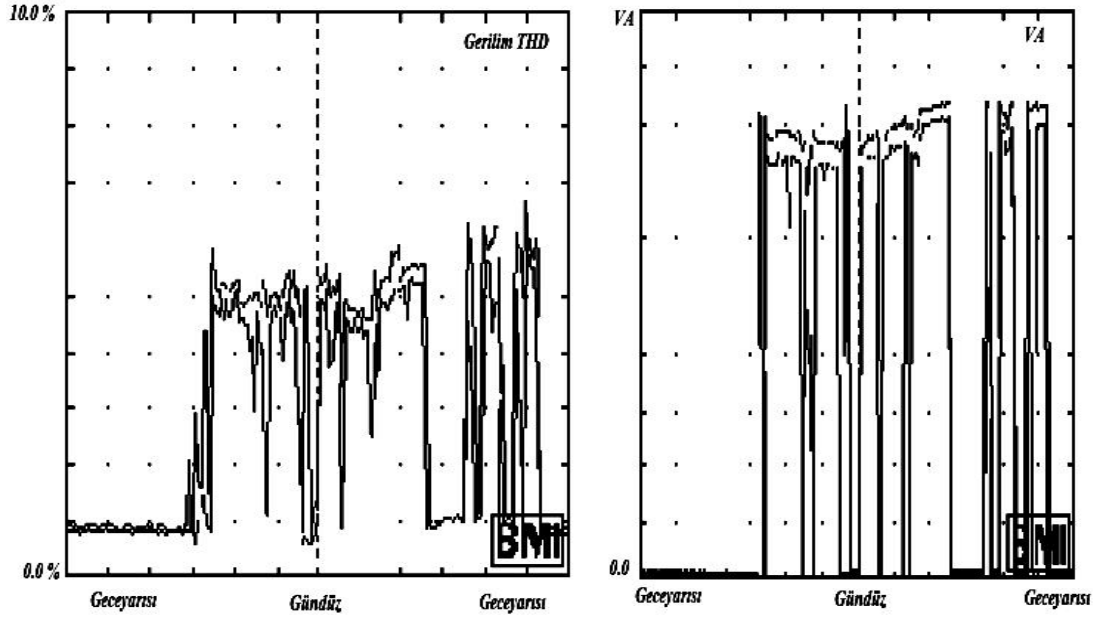
Yüksek gerilimde kullanılan akım transformatörlerinin karakteristikleri de oldukça önem arz etmektedir. Trafonun frekans cevabı karakteristiğinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Genellikle akım transformatörleri harmonikli bileşenler üzerinde, faz açılarında genliğe göre daha büyük değerlerde değişimler göstermektedir.

5.6.3. Harmonik ölçüm süresi

Yük değişimi fazla olmayan sistemlerde bir günlük bir ölçüm harmonik seviyelerinin anlaşılması için yeterli olacaktır. Fakat değişken yüklü sistemlerde sisteminin harmonik seviyeleri hakkında doğru bilgi edinebilmek için en az bir haftalık ölçümler yapılmalıdır. Metal sanayisi gibi ark fırınlarının sıklıkla kullanıldığı yerlerde sistem yükü çok farklılık gösterdiğinden buralarda uzun süreli ölçümlerin yapılması tavsiye edilmektedir.

5.6.4. Harmonik kaynağının bulunması

Elektrik sisteminde harmonik sorunu aşırı gerilim düşümü sebebiyle kendini gösterdiğinde sistemdeki bu aşırı gerilim düşümüne sebep olan kaynağın bulunması



Şekil 5.40. Birden fazla endüstriyel yükün beslendi bir sistemdeki gerilim distorsiyon değerlerinin grafiği ve sistemdeki harmonik bozulmaya sebep olan ve aynı şebekeden beslenen ark fırınlı bir diğer kullanıcının çalışma karakteristiği (IEEE P519A/D5 1996).

gerekmektedir. Genellikle aşırı gerilim düşümü problemi sistemde bir veya daha fazla harmonik kaynağının sisteme harmonik akım enjekte etmesi ve sistemin buna karşı vermiş olduğu cevaptan bazı harmonik bileşenlerin seviyelerinin artmasından kaynaklanmaktadır. Sistemin vereceği cevap simülasyonla ve kapasitör banklarının yerlerinin değiştirilmesiyle bulunabilir. Bazı durumlarda sistemdeki harmonik kaynağının tam olarak yerinin bulunması oldukça zorlaşmaktadır.

Harmonik kaynağının bulunması için iki temel yaklaşım vardır:

a) Sistemdeki zamanla değişen yüklerin gerilim distorsiyon değerinin karşılaştırılması: Harmonik distorsiyonu sistemdeki yüklerin değişmesi, kesicilerin devreye girip çıkmasıyla değişmektedir. Sistemde belirli aralıklarla çalışan hadde makineleri, sürücüler ve ark makineleri gibi sistemin akımını baskın olarak etkileyen cihazların devreye çıkıp girmesinin incelenmesiyle sistemdeki gerilim düşümünün kaynağı olup olmadığı anlaşılabilir. Şekil 5.40'da birden fazla endüstriyel yükün beslendiği bir sistemdeki gerilim distorsiyon değerlerinin grafiği gösterilmektedir. Bu kullanıcılardan birisi normal çalışma saatlerinde bilgisayar kontrollü torna

tezgâhlarını şebekedeki gerilim düşümünden dolayı çalıştıramamaktadır. Torna tezgâhları gerilim düşümünün % 5,5 olması durumunda çalıştırılmaması gerekmektedir. Şekil 4.40'daki ikinci şekil aynı şebekeden beslenen ark fırınlı bir diğer kullanıcının çalışma karakteristiğini göstermektedir. Şebekedeki gerilim bozulma grafiğinin bu kullanıcının yük grafiğine benzerliği, şebekedeki harmoniğin kaynağının büyük olasılıkla bu kullanıcı olduğunu göstermektedir.

b) Kapasitör banklarını devre dışı bırakarak şebeke tarafından kullanıcıya doğru ölçüm yapılması: Harmoniklerin normal akışı kullanıcıdan şebekeye doğrudur. Bu sebepten dolayı harmonik kaynağı şebeke üzerinde kaynaktan kullanıcıya doğru ölçüm yapılarak bulunabilir. Unutulmaması gereken şey, bu yöntem yalnızca kapasitör bankları devre dışı iken yapılabilir. Kapasitörler sistemde rezonans etkisi yapabildiğinden ölçüm harmonik kaynağı tam olarak bulunamayabilir.

Eğer yukarıdaki iki yöntemle de harmonik kaynağı tam olarak bulunamazsa bunun sebebi sistemdeki harmonik kaynaklarının dağılmış olmasıdır. Böyle bir durumda sistemde tek tek harmonik kaynaklarını bulmak sistemdeki problemin çözümü için fayda sağlamayacaktır. Dolayısıyla dağıtım sisteminde filtreleme kullanımı gerekli olacaktır (IEEE P519A/D5 1996).

5.7. Harmonik Kaynaklı Reaktif Güç Bedeli

Enerji dağıtım sistemlerinde temel şebeke frekansındaki akım ile gerilim arasındaki faz farkını işaret eden büyüklüğe “ $\cos\phi$ ” denir ve bu değer bir endüstriyel hattın enerji aldığı üreticiye ödeyeceği reaktif güç bedelini belirler. Döner telli elektrik sayaçları ile faturalandırma yapan sistemlerde durum yukarıda bahsedildiği gibidir. Ancak son yıllarda kanunla da zorunlu olan dijital sayaçlara geçilmesi ile bu durum farklılık göstermiştir. Zira dijital sayaçlarda güç faktörü ile bilinen yukarıdaki değer hesaplanması için sadece temel şebeke frekansındaki akım ve gerilim arasındaki açıya bakılmaz, harmonik denilen diğer frekanslardaki akım ve gerilimin etkisi de göz önüne alınır. Buna “Güç Faktörü” denir.

Kısaca güç faktörü, $\cos\phi$ değerinden farklı olarak, harmonikler dâhil olan akım ile harmonikler dahil olan gerilim arasındaki faz farkıdır. Bu iki değer arasında harmonikli ortamlarda aşağıdaki formül kadar bir fark oluşur.

$$PF = \mu \cdot \cos\phi \quad (5.21)$$

$$\mu = 1 / [1 + (THD(I))^2] \quad (5.22)$$

Örnek olarak döner telli bir sayaç kullanan ve şebekesinde $THD(I) = \%30$ seviyelerinde harmonik akımı olan bir tüketici $\cos\phi = 0,96$ değerine sahipken;

$$\mu = 1 / [1 + (0,3)^2] = 0.917$$

$$PF = 0,917 \times 0.96 = 0,88$$

değerinde bir güç faktörüne sahip olacaktır. Bunun temel sonucu olarak döner telli bir sayaçtan dijital sayaca geçilmesi ile aynı yük ve kondansatör sistemi ile daha önce ödemediği reaktif güç bedelini ceza olarak ödeyecektir.

5.8. Harmoniklerin Ve Güç Kalitesi Problemlerinin Bedeli

Copper Development Assosiation'a göre Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde, elektrik enerjisi kalite problemlerinin endüstride ve ticari alanlarda yaptığı zararların yılda 10 milyar Euro olduğu tahmin edilmektedir ve problemlerin ortadan kaldırılması için yapılan harcamalar bu rakamın %5'i civarındadır (2001) (Chapman 2001).

Eurelectric'in araştırmasında harmoniklerin dünyadaki yıllık zararı birkaç yüz milyar Euro olduğu tahmin edilmektedir (2003) (Keulenaer 2004).

IBM'in son yıllarda Amerika'da yapmış olduğu bir araştırma, güç kalitesi problemlerinin faturasının 15 milyar \$ olduğunu ve bu zararın her firma başına tahminen 79.000 Dolar olduğunu göstermektedir (Faltis 2008).

EPRI'nin araştırmasında, güç kalitesi problemlerinin faturasının Amerika'da yılda 400 milyar \$ (1994),US Department of Energy'ye göre yılda 150 milyar \$ (1995), Fortune Magazine' e göre yılda 10 milyar \$ (1998) olduğu belirtilmiştir (Almeida 2003).

Fransa'da bir cam fabrikasında düşük güç kalitesinden dolayı iki transformatörün ard arda arızalanmasıyla üç günlük üretim kaybıyla beraber 600.000 Euro maddi zarar olmuştur.

Bir bankada nötr hattının aşırı ısınmasından dolayı çıkan yangınla 1 milyon Euro maddi kayıp olmuştur (Keulenaer 2004).

Bir jeneratör firması tarafından yapılan orta ölçekli ölçümlerde yük talebinin 5 ve 30 MVA arasında değiştiği 12 noktada gerilim dalgalanmaları ölçülmüş ve on aylık bir dönemde 858 adet gerilim dalgalanması tespit edilmiştir. Bunlardan 42'sinde kesinti ve finansal kayıplar meydana gelmiştir. Söz konusu 12 noktada eski teknolojiler kullanılarak katma değeri düşük imalat işleri yapılıyor olmasına rağmen finansal kayıplar 600 000 Euro (ortalama olarak bir olayda 14 300 Euro veya her bir noktada 50 000 Euro) toplam değere kadar yükselmiş, tek bir noktadaki en yüksek kayıp 165 000 Euro olmuştur.

Dolayısıyla, katma değeri yüksek ürünlerin imal edildiği veya yarıiletken sanayisi gibi çok aşamalı işlemler içeren imalatların yapıldığı işletmelerde kayıpların çok daha yüksek olacağı açıktır. Tablo 5.15'te, hesaplanan bu değerlerin yüksek teknolojide yüksek maliyetli alanlara uygulanarak hesaplanmış değerler verilmiştir (Chapman 2001).

Tablo 5.15. Copper Development Assosiation'ın gerilim dalgalanması finansal kayıp araştırması (Chapman 2001).

| Sanayi | Her bir olaydaki finansal kayıp |
|---------------------|--|
| Yarıiletken üretimi | 3.800.000 Euro |
| Finans sektörü | 6.000.000 Euro bir saatte |
| Bilgi işlem merkezi | 750.000 Euro |
| Telekomünikasyon | 30.000 Euro bir dakikada |
| Çelik tesisleri | 350.000 Euro |
| Cam sanayisi | 250.000 Euro |

6. HARMONİKLERİN KONTROLÜ

Harmoniklerin elektrik sistemlerine zararlı etkilerinin azaltılması için iki yöntem vardır:

- Sistemin tasarım aşamasında alınabilecek önlemler,
- Sistem tasarımı yapıp uygulamaya geçirildikten sonra sisteme harmonik filtreleri gibi ek eleman bağlayarak alınabilecek önlemlerdir.

6.1. Tasarım Aşamasında Alınabilecek Önlemler

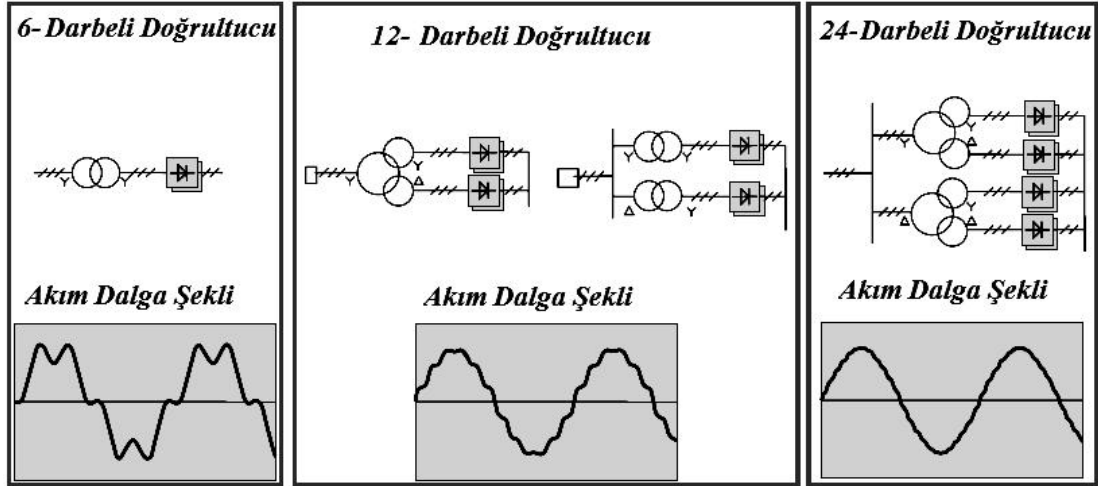
Elektrik sisteminin kurulumundan önceki tasarım aşamasında sistemin daha az harmoniklerle çalışması için, sistemde kullanılan elemanların seçiminde harmonikler göz önünde bulundurularak seçilmesi ve bu elemanların harmonik üretimini azaltabilmek için malzeme ve tasarımlarındaki değişiklikleri kapsar(Adak 2003).

Nonlineer yüklerde daha az harmonik üretimi için birkaç yüz kW ve üzeri yüklerde 12-darbeli,18-darbeli doğrultucuları, birkaç yüz kW'ın altındaki yükler için PWM doğrultucularının ASD uygulamalarında kullanılması ve transformatörsüz PWM'li doğrultucu kullanan UPS'lerin kullanılması tasarım aşamasında alınabilecek önlemlere örnek teşkil etmektedir (Özkaya 2007).

Şekil 6.2'de doğrultucuların çeşidine göre harmonik distorsiyonun değeri ve grafiksel gösterimi verilmiştir.

6.1.1. Generatörlerde alınabilecek önlemler

Senkron generatörlerde hava aralığındaki manyetik alanın şekli endüklenen elektromotor kuvvetini belirler. Eğer manyetik alan sinüzoidal ise endüklenen elektromotor kuvveti de sinüzoidal olacaktır. Yuvarlak rotorlu senkron makinelerde



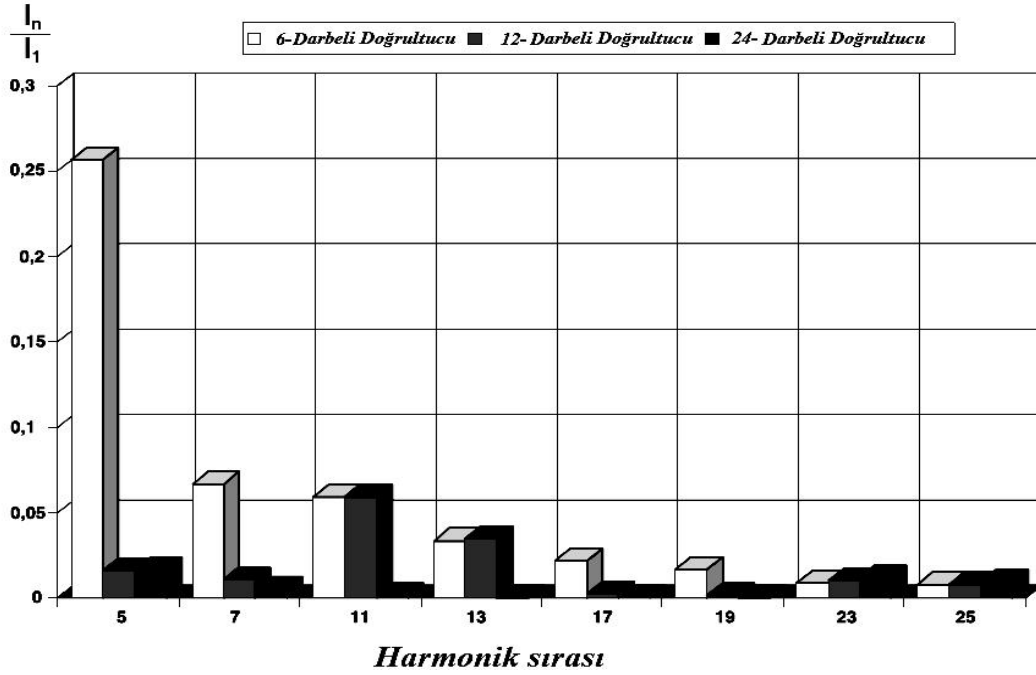
Şekil 6.1. Doğrultucuların çeşidine göre harmonik distorsiyonun değeri (ABB Technical Guide 2000).

| <i>Kaynak Tipi</i> | <i>Akım THD(%)</i> | <i>Gerilim THD(%) RSC=20</i> | <i>Gerilim THD(%) RSC=100</i> | <i>Akım Dalga Şekli</i> |
|------------------------------|--------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| <i>6- Darbeli Doğrultucu</i> | 30 | 10 | 2 | |
| <i>12-Darbeli Doğrultucu</i> | 10 | 6 | 1.2 | |
| <i>IGBT Kaynak Birimi</i> | 4 | 8 | 1.8 | |

Bozulma RMS Değerinin % Değerindedir.

Şekil 6.2. Doğrultucuların türleri ve harmonikli dalga şekilleri.

sinüzoidal olmayan alan eğrisinin sinüs eğrisine yaklaştırmak için kutup oluklarının 2/3'ü sarılır ya da sarım adımları birbirlerinden farklı olan sarım tipi kullanılır.



Şekil 6.3. Doğrultucuların darbe sayısına göre harmonik spektrumunun değişimi.

6.1.2. Dönüştürücülerde alınabilecek önlemler

Doğrultucularda darbe sayısı p ise, harmonik mertebesi $n=k.p \pm 1$ formülü ile bulunur. Bu formülde $k=1, 2, 3, \dots$ gibi tam sayılardır. Darbe sayısının artırılması ile küçük dereceli harmoniklerin giderilmesi mümkündür. Dönüştürücülerde $n=5, 7, 11, 13$ olduğu için, harmonik akımlar, $I_5 = I_1/5$ ve $I_7 = I_1/7$, gibi değerler almaktadır. Bundan dolayı darbe sayısı ne kadar büyük olursa, harmonik mertebeleri de o kadar küçük olur.

6.1.3. Transformatörlerde alınabilecek önlemler

Büyük transformatörlerde manyetik endüksiyon değerinin büyük tutulması ile demir çekirdekten en büyük yarar sağlanır. Ancak büyük endüksiyon değerinde, doyma nedeni ile mıknatıslanma akımında harmonikli bileşenler artar.

Mıknatıslanma akımının harmonik bileşenlerini azaltmak için alınabilecek en iyi tedbir, manyetik endüksiyonu düşük tutmaktır.

6.2. Harmoniklerin Azaltılması İçin Kullanılan Cihazlar

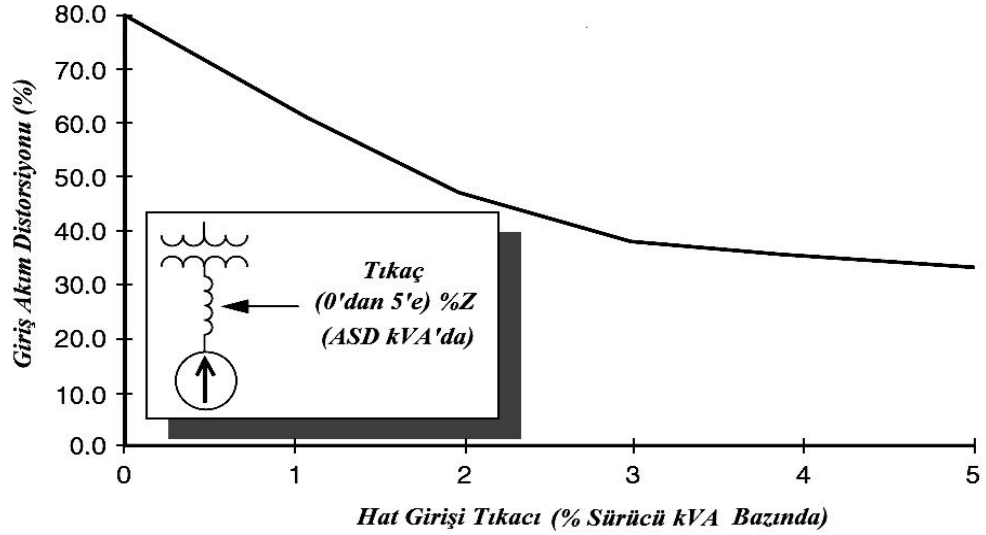
Harmoniklerin kontrolü için birden çok eleman vardır. Bunlar kapasitör bankları, reaktör ya da daha kompleks olarak aktif filtreler olabilir. Daha önceki konularda değinildiği gibi sistemdeki kapasitörün değeri değıştiğinde sistemin vereceği cevap değışeceğinden sistemde harmonik seviyeleri kabul edilebilir seviyelere inebilmekteydi. Aynı şekilde sisteme bağlanan reaktörle sistemin frekans cevabı değıştirilerek zararlı harmoniklerin etkileri azaltılabilir.

6.2.1. Hat reaktörleri ve tıkaçlar

ASD uygulamalarında hat girişı tarafına bağlanan hat reaktörleri ya da hat tıkaçları, harmoniklerin azaltılması için basit fakat genelde başarılı bir yöntemdir. Bu genelde PWM tipi sürücülerde sonuç vericidir.



Şekil 6.4. Bir harmonik tıkaçının şekli.

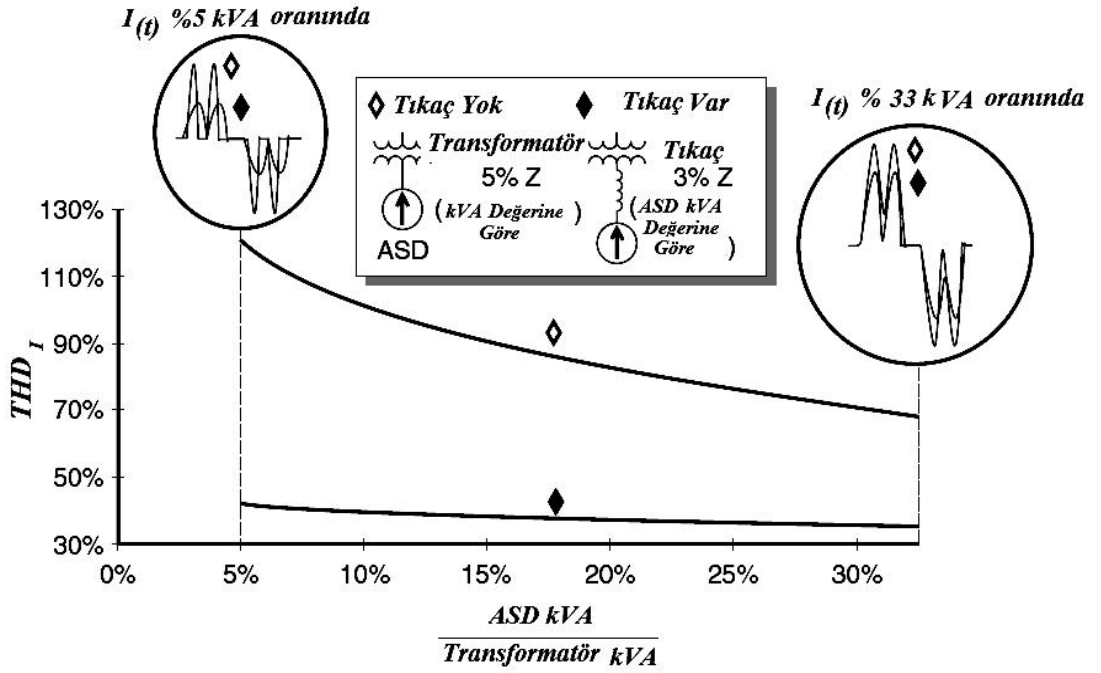


Şekil 6.5. Bir PWM tipi ASD için giriş tıkaçının fonksiyonu olarak harmonik akım distorsiyonunun değişimi grafiği.

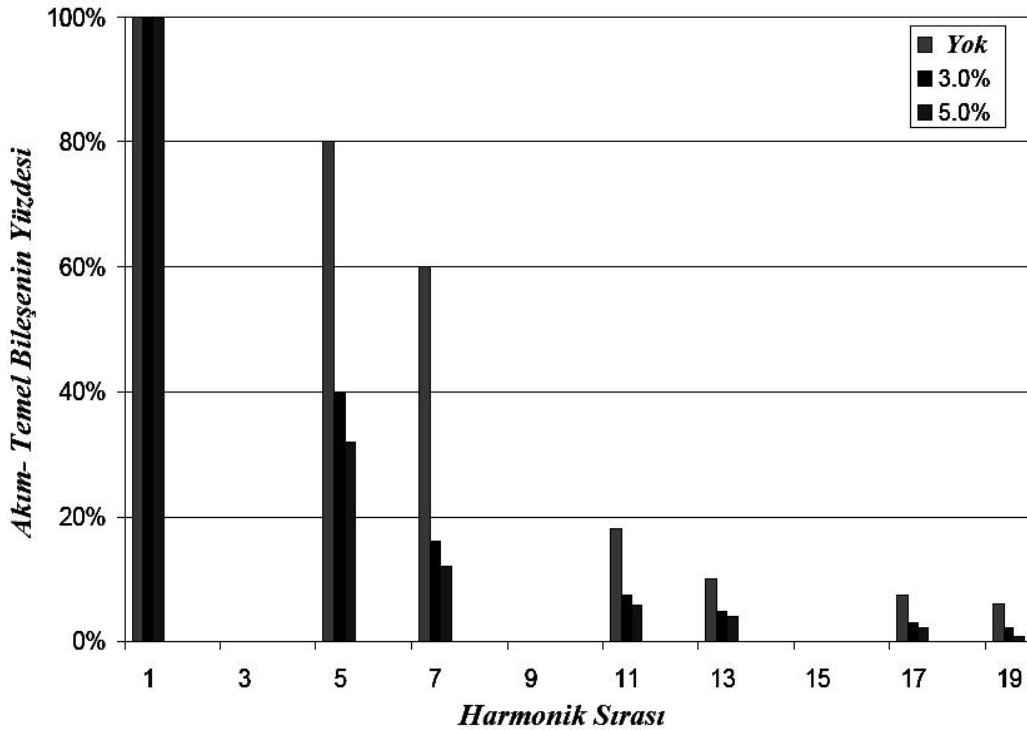
Hatta bağlanan endüktans, hat üzerinde doyuma gidebilen kapasitörün doyumunu yavaşlatır ve sürücüyü akımı daha uzun süreli kullanmaya zorlar. Sonuçta aynı enerji ile daha düşük genlikli ve daha düşük harmonik bileşenli akım elde edilir.

Tipik %3'lük bir hat tıkaçı, PWM tipi bir sürücünün harmonik akım distorsiyonunu %80'den %40 seviyesine indirebilir. Bu tip bir harmonik eliminasyonu Şekil 6.5'te gösterilmektedir. %3'ten büyük değerlerdeki endüktans değerleri buna nispeten daha az etki yapmaktadır. Tıkaçın empedans değeri sistemin baz empedansının %'si olarak hesaplanır.

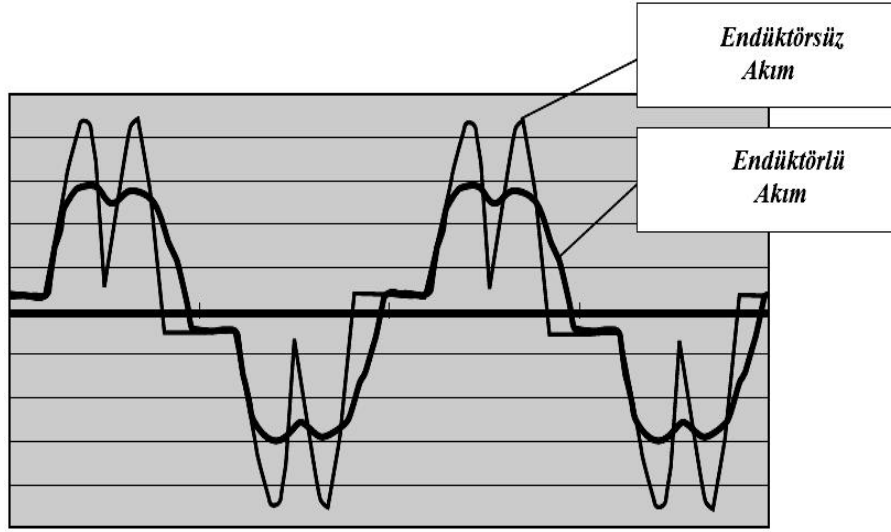
Şekil 6.6'da giriş transformatörü kVA değerine göre farklı değerlerde boyutlandırılmış ASD için %3'lük hat tıkaçı ve hat tıkaçının olmaması durumu için harmonik akım distorsiyonu değerinin değişimi grafiği verilmiştir. Her bir durum için dalga formu şekillerle gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere hat tıkaçının yerleştirilmesiyle distorsiyon değerinde fark edilebilir bir azalış görülmektedir. Hat tıkaçının yerleştirilmesiyle akımdaki THD değeri %120'den %80 değerine düşmektedir. ASD'nin değeri transformatörün değerinden çok küçük olduğu durumda harmonik azaltılmasında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. ASD'nin değeri transformatörün değerinin %5'i seviyelerine indiği durumda akımdaki THD değeri %125'ten %40 seviyesine düşmektedir.



Şekil 6.7. Giriş transformatörü kVA değerine göre farklı değerlerde boyutlandırılmış ASD için %3'lük hat tıkaçı ve hat tıkaçının olmaması durumu için harmonik akım distorsiyonu değerinin değişimi grafiği (Dugan ve ark. 1996).



Şekil 6.6.Farklı değerlerdeki hat tıkaçının harmonik spektrumuna etkisi.

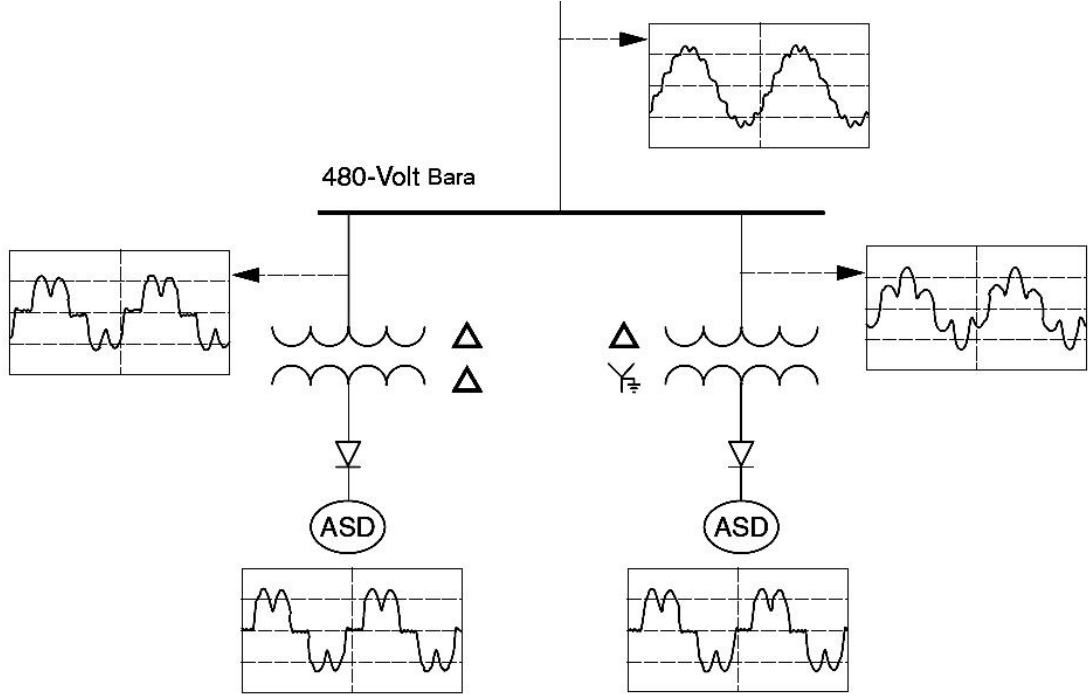


Şekil 6.8. Endüktörün dalga şekline etkisi.

Diğer önemli bir nokta hat tıkaçının ASD sistemlerinde başka avantajları da vardır. Hat tıkaçının kapasitörün şarjını yavaşlatmasının hatta yüksek frekanslardaki tranziyentleri önlemesidir. Bu da önemli bir problem olan kondansatörün dolması esnasında sürücüdeki hataların oluşmasını önler.

İzolasyon transformatörü hat tıkaçıyla aynı görevi görür fakat daha pahalıdır. Bununla birlikte birden çok sürücü ile kullanılan izolasyon transformatörü faydalı olarak 12 darbeli dönüştürücünün harmonik azaltma etkisini yapabilir. Şekil 6.8. bu durumu göstermektedir.

12 darbeli dönüştürücü, üçgen-yıldız bağlı bir transformatörle beslenen 6 darbeli bir sürücü ile üçgen-üçgen bağlı 6 darbeli diğer bir sürücünün birleştirilmesi ile elde edilebilir. Şekil 6.8'de birbirinden ayrı iki 6 darbeli ASD'nin dalga şekli görülmektedir. Primer taraftaki iki dalga şekli birbiriyle toplandığında şebeke tarafındaki dalga şekli 5. ve 7. harmonik bileşenlerin birbirlerini elimine etmesiyle daha az distorsiyon seviyesine inmektedir. Bu iki harmonik bileşen 6 darbeli sürücünün baskın harmonikleridir.

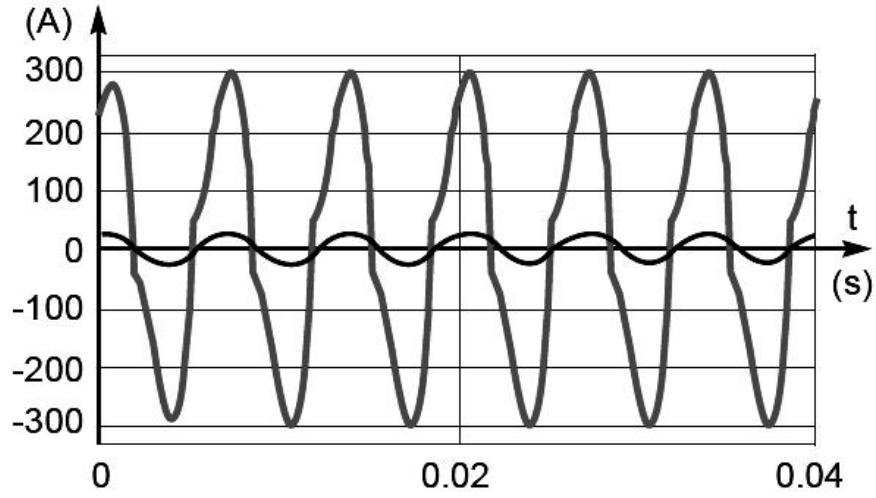


Şekil 6.9. Sürüclerde kullanılan izolasyon transformatörlü 12 darbeleri dönüştürücünün harmonik azaltma etkisi (Dugan ve ark. 1996).

6.2.2. Zigzag transformatörleri

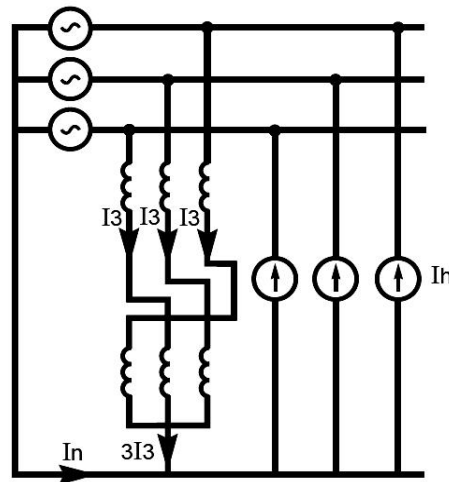
Zigzag transformatörleri genelde ticari binalarda sıfır sequens harmonik bileşenlerin elimine edilmesi için kullanılırlar. Zigzag transformatör sıfır sequens bileşen akımlarının nötr üzerinden akmaları için düşük bir empedans değeri göstererek harmonik filtre etkisi yapmaktadır. Bu da nötr üzerinden transformatöre giden akımlar için daha kısa bir yol olarak bu akımların oranını azaltır. Etkinliği arttırmak için transformatör devrede korunmak istenen yükün yakınına yerleştirilmesi gerekir.

Ticari yüklerin çoklukla kullanıldığı yerlerde nötr hattının ısınma problemleri ile karşılaşılır. Bu tip problemler uygun zigzag transformatörün seçilmesiyle çözümlenebilir. Bazı yeni ticari binalar 480/280 V transformatörün sekonder tarafında zigzag sargı kullanılmaktadır. Kaynak transformatörün sekonderine yerleştirilen zigzag transformatörü nötr hattının ısınma problemine uygun bir çözüm olmamaktadır.



Şekil 6.11. Zigzag transformör kullanıldığı ve kullanılmadığı durum için nötr hattının dalga şekli (Schonek 2001).

Şekil 6.10'da görüldüğü gibi tek bir nüvedeki amper sarım değeri diğer nüvelerdekini sönmlemektedir. Böylece eşdeğer devrede üçüncü harmonik akımlarının geçtiği empedans çok küçük değerdedir. Zigzag reaktansı üç ve üçün katı harmoniklerinin sirkülasyonu için düşük bir empedans sağlamaktadır. Dolayısıyla elektrik sistemiyle nötr hattı arasında dolaşan triplen harmoniklerinin azalmasına neden olur. Zigzag transformörlerle ilgili yapılan çalışmalar bu



Şekil 6.10. Zigzag reaktansı (Schonek 2001).

transformatörlerin üçüncü harmonik akımlarının % 50'sini köprülediğini göstermektedir. Dolayısıyla zigzag transformatörleri sıfır sequense akımlarından kaynaklanan nötr akımlarını istenen seviyelere düşürebilir.

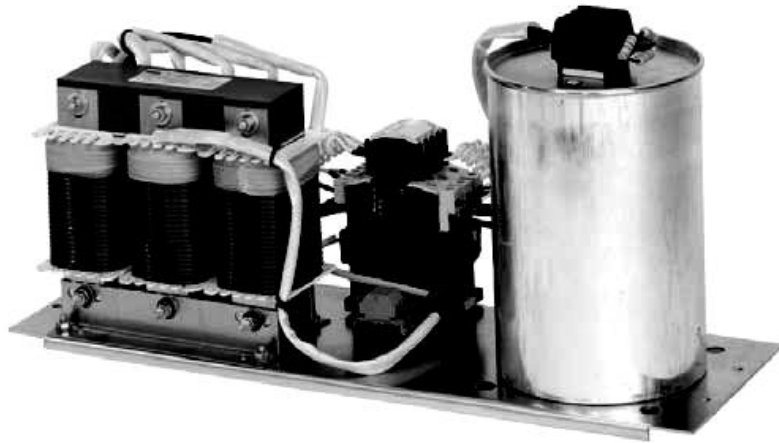
Zigzag transformatörleri üçüncü harmoniklerin bulunduğu, nötr hattında ısınmaların olduğu ve transformatörlerin yıldız noktalarında problemlerin olduğu yerlerde kullanılmalıdır (Dugan ve ark. 1996).

6.2.3. Pasif filtreler

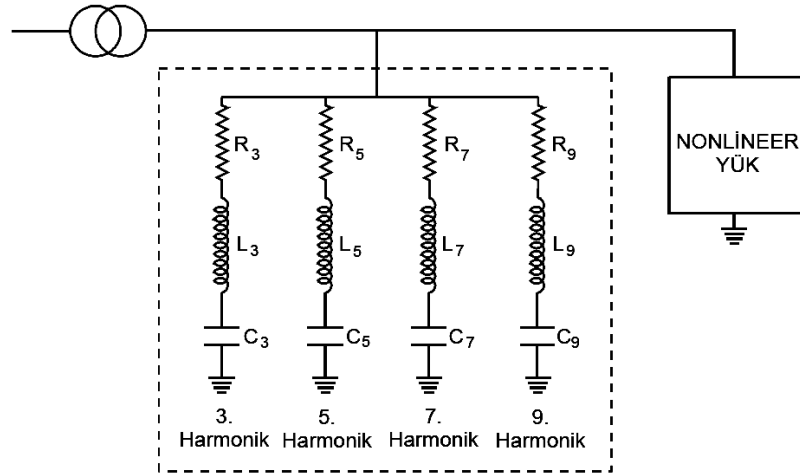
Pasif filtreler harmoniklerin kontrol edilebilmesi için endüktif, kapasitif ve rezistif elemanlardan oluşmaktadır. Bu tip filtreler yaygın olarak kullanılan ve diğer harmonik çözümlerine nazaran daha ucuzdur.

6.2.3.1. Paralel pasif filtreler

Paralel pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik frekansı için rezonansa gelecek L , C değerleri hesaplayarak bu devreyi güç sistemine bağlamaktır. Şekil 6.12'de tipik bir pasif filtre görülmektedir (Dugan ve ark. 1996).



Şekil 6.12. Tipik bir pasif filtre (Fassbinder 2003).



Şekil 6.13. Pasif filtre için örnek bir devre (tek ayarlı paralel pasif filtre) (Sucu 2003).

Her bir harmonik frekansı için ayrı rezonans kolları oluşturularak bu kolların güç sistemine bağlanması gerekmektedir. Ancak bu işlem en etkin yani genlik değeri yüksek harmonik frekansları için yapılmalıdır. Her harmonik bileşeni için ayrı bir rezonans kolu oluşturmak optimum bir çözüm olmayacağından sadece genlik değeri yüksek harmonik frekansları için rezonans kolu oluşturulmalı, genliği yüksek olmayan harmonik frekansları için ise bunların etkinliğini azaltacak tek bir rezonans kolu oluşturmak yeterli olacaktır (Sucu 2003). Paralel pasif filtre için örnek bir devre (Tek ayarlı paralel pasif filtre) Şekil 5.13'te görülmektedir.

Burada;

R_n : n . harmonik mertebesi için rezonansa getirilen kapasite ve endüktans elemanının iç direnci (Ω),

X_{Ln} : n . harmonik mertebesi için kapasite elemanı ile rezonansa sokulan endüktans (Ω),

X_{Cn} : n . harmonik mertebesi için endüktans elemanı ile rezonansa sokulan kapasitanstır (Ω).

Pasif filtreler sistemde tehlikeli problemlere neden olabilmekte ve tasarlanmadan önce sistemin özellikleri ve bu elemanlara sistemin cevabı iyi bilinmelidir. Resim 6.1'de iyi kontrol edilmeyen bir sistemde oluşan rezonans sonucu kapasitif elemanların tahribatı gösterilmektedir (Fassbinder 2003).



Resim 6.1. İyi kontrol edilmeyen bir sistemde oluşan rezonans sonucu kapasitif elemanların tahribatı (Fassbinder 2003).

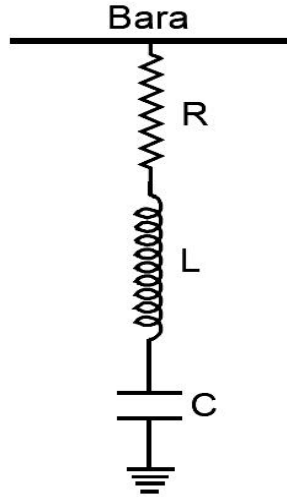
4 farklı paralel pasif filtre çeşidi vardır;

- ✓ Tek ayarlı (bant geçiren) filtreler,
- ✓ Çift ayarlı filtreler,
- ✓ Otomatik ayarlı filtreler,
- ✓ Yüksek geçiren sönümlü filtreler.

a) Tek ayarlı (bant geçiren) filtreler: Tek ayarlı (bant geçiren) filtreler, tek bir frekanstaki harmonik akımı için bir kısa devre yol oluşturarak bu akımın hattan saptırılmasını sağlar. Tek ayarlı filtreler seri R-L-C devresinden meydana gelir. Tek ayarlı filtre örneği Şekil 6.14'te görülmektedir.

Tek ayarlı filtrenin, temel frekansta ve ayarlandığı harmonik frekans dışındaki harmonik frekanslarındaki filtre empedansı,

$$Z \cdot Z_T = R + j(X_L - X_C) = R + j \left(2\pi f_n \cdot L - \frac{1}{2\pi f_n C} \right) \quad (6.1)$$



Şekil 6.14. Tek ayarlı paralel pasif filtre.

şeklindedir. Bu filtrenin çalışma prensibi, istenen harmonik frekansında filtrenin rezonansa gelerek $X_L = X_C$ şartının sağlanmasıdır. Bu durumda filtre empedansı (ayarlandığı harmonik frekansındaki empedansı),

$$Z_{T0} = R \quad (6.2)$$

olur. Yani filtre ayarlanan frekans için minimum empedans değerini gösterir ve ayarlanan frekanstaki harmonik toprağa akar.

Burada,

Z_T : Temel frekansta ve ayarlandığı harmonik frekans dışındaki harmonik frekanslarında tek ayarlı filtrenin empedansı (Ω),

R : Tek ayarlı filtredeki endüktans ve kapasitansın iç direnci (Ω),

X_L : Tek ayarlı filtrenin endüktif reaktansı (Ω),

X_C : Tek ayarlı filtrenin kapasitif reaktansı (Ω),

f_n : n. harmonikteki frekans (Hz),

L : Tek ayarlı filtrenin endüktansı (H),

C : Tek ayarlı filtrenin kapasitansı (F),

Z_{T0} : Tek ayarlı filtrenin istenen harmonikte rezonansa gelmesi sonucu oluşan empedans (Ω),

f_0 : Tek ayarlı filtrenin ayarlandığı harmonik frekansı, yani rezonans frekansıdır (Hz).

Tek ayarlı filtre seri rezonans ilkesine göre çalıştığı için bu filtrelerde $X_L=X_C$ şartı aranmaktadır. Bu X_L ve X_C değerleri sisteme uygun seçilmelidir. Tek ayarlı filtreler sisteme uygulandığında filtredeki kapasite, sistemin temel frekansı ve ayarlanan harmonik frekansı dışındaki frekanslarda sistemde kompanzasyon etkisi göstereceğinden filtre hesaplanırken, filtrede kullanılacak kapasite değeri sistemin kompanzasyon ihtiyacını karşılayacak değerde belirlenmeli ve daha sonra bu değerle rezonansa gelecek endüktans değeri hesaplanmalıdır. Bu hesaplamalar aşağıdaki sıra ile gerçekleştirilmelidir.

Öncelikle sistemin reaktif güç ihtiyacı belirlenmelidir. Bunu için,

$$Q=P(\tan\varphi_1-\tan\varphi_2) \quad (6.3)$$

formülünden yararlanılır.

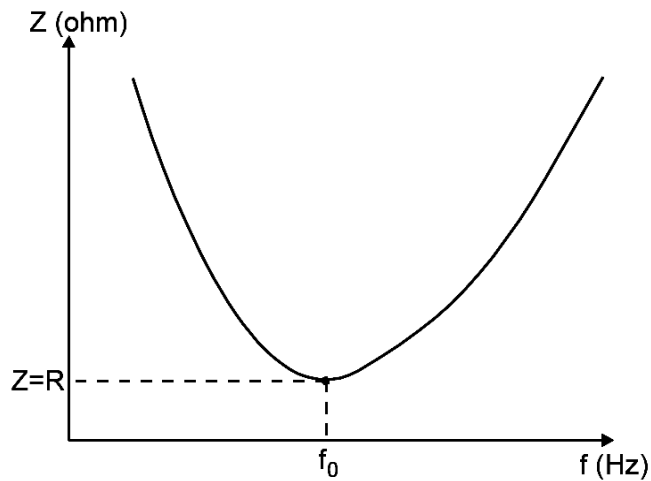
Burada,

Q : Sistemin istenilen güç faktörü değerine ulaşabilmesi için sisteme bağlanması gereken kondansatörün gücü (Var),

P : Sistemin toplam aktif gücü (W),

$\tan \varphi_1$: Sistemin kompanzasyon yapılmadan önceki güç aşısının tanjantı,

$\tan \varphi_2$: Sistemde kompanzasyon uygulandıktan sonraki elde edilmek istenen güç aşısının tanjantıdır.



Şekil 6.15. Tek ayarlı paralel pasif filtre için frekans-empedans ilişkisi.

Denklem 6.3'ten hesaplanan kompanzasyon gücünden sonra,

$$X_{CT} = \frac{U^2}{Q} \quad (6.4)$$

formülünden sisteme bağlanması gereken kondansatörün kapasitif reaktansı belirlenmelidir.

Burada;

X_{CT} : Sisteme bağlanması gereken kapasitif reaktans değeri (Ω),

U: Sistemin çalışma gerilimidir (V).

Sisteme bağlanması gereken kapasitif reaktans değeri hesaplandıktan sonra bu değer; sistemdeki etkin harmonik mertebelerine göre ayrı ayrı ayarlanan tek ayarlı filtreler, üzerlerinden akacak akımlara göre orantılı olarak dağıtılmalıdır. Daha sonra her filtre kademesi için bilinen X_C değerine karşılık gelen X_L değeri filtrenin ayarlandığı harmonik frekansına göre hesap edilerek sisteme monte edilmelidir.

Tek ayarlı filtrelerin olumlu özellikleri şunlardır:

- ✓ Eğer istenerek eklenmiş bir direnç yoksa kayıplar çok azdır.
- ✓ Ayarlanan harmonik frekansı için harmonik akımına sifıra yakın bir empedans gösterir.
- ✓ Filtre edilecek birden fazla harmonik akımı için birden fazla filtre paralel kullanılabilir.

Tek ayarlı filtrelerin olumsuz yanları ise:

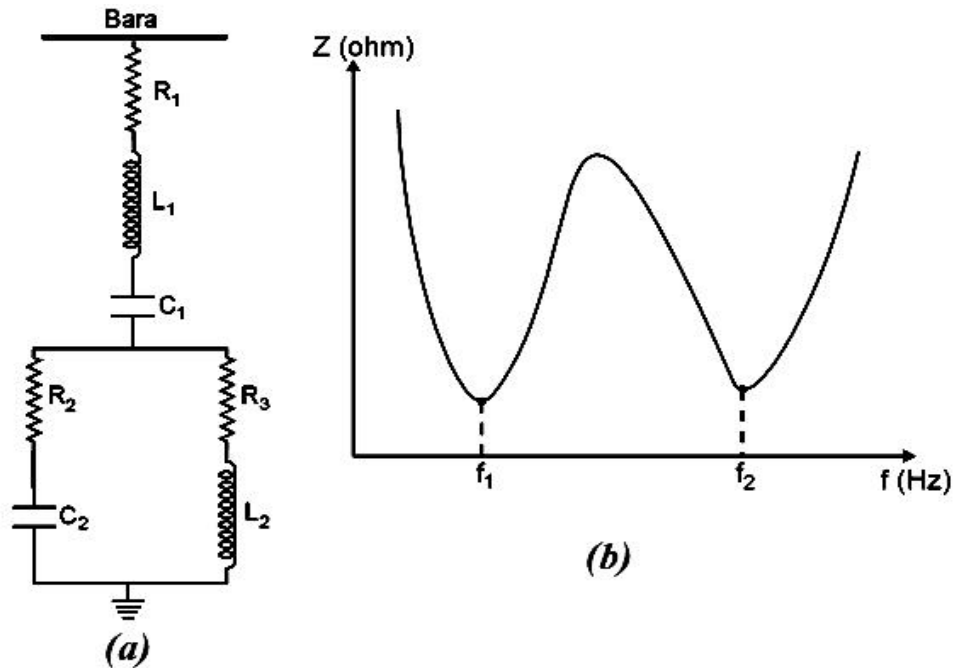
- ✓ Hassas yapılan hesaplamalarından dolayı filtreyi oluşturan elemanların değerinde zamanla oluşan değişmelere karşı oldukça duyarlı olmasıdır. Bu durum ilave kondansatör ve direnç değerleri ile giderilebilir.

✓ Tek ayarlı filtreler sadece gücü sabit olan nonlinear yüklü sistemlerde kullanılabilir. Çünkü üzerlerindeki kapasite değerleri değişken olmadığından sistemdeki endüktif yükler kalktığında kondansatörler devrede kalmaya devam edeceğinden bu durumda aşırı kompanzasyon oluşabilir. Veya nonlinear yüklerden bir kısmı devreden çıktığında, örneğin sistemdeki 5. harmoniğin büyük bir kısmını oluşturan yük devreden çıktığında 5. harmoniği süzen tek ayarlı filtre kolu sistemde kalacağından bu kol enerji kaybına yol açacaktır. Bu yüzden bu filtreler sabit nonlinear yüklerin bulunduğu sistemlerde kullanılmalıdır. Sabit yük devreden çıktığında tek ayarlı filtreler de devreden çıkarılmalıdır.

b) Çift ayarlı filtreler: Çift ayarlı filtrenin eşdeğer empedansı iki adet tek ayarlı filtrenin eşdeğer empedansı ile aynıdır. Çift ayarlı filtre iki farklı harmoniği elimine edebilir. Çift ayarlı filtre Şekil 6.16.a'da gösterilmiştir.

Tek ayarlı filtre ile karşılaştırıldığında temel frekanstaki güç kaybının az olması bu filtrelerin en önemli özelliğidir. Çift ayarlı filtrelerin frekans-empedans ilişkisi Şekil 6.16.b'de verilmiştir.

Buradan da görülmektedir ki çift ayarlı filtrenin iki farklı rezonans noktası vardır (iki adet tek ayarlı filtrenin birleşiminden meydana gelmesinden dolayı). Üç



Şekil 6.16. Çift ayarlı filtre (a), çift ayarlı filtrelerin frekans-empedans ilişkisi (b).

ve dört ayarlı filtrelerde tasarlamak mümkündür, ancak bunlar ayar zorluklarından dolayı kullanılmazlar.

c) Otomatik ayarlı filtreler: Bu filtrelerin ayarlanabilir olması, hem kapasitenin hem de endüktansın otomatik olarak ayarlanması ile gerçekleştirilebilir. Bu ayarın sınırları \pm %5 gibi bir değerdir. Bu filtreler, reaktif gücü ölçen ve bu gücün işaretine ve büyüklüğüne göre L ve C değerlerini kontrol eden bir kontrol sisteminden oluşmaktadır.

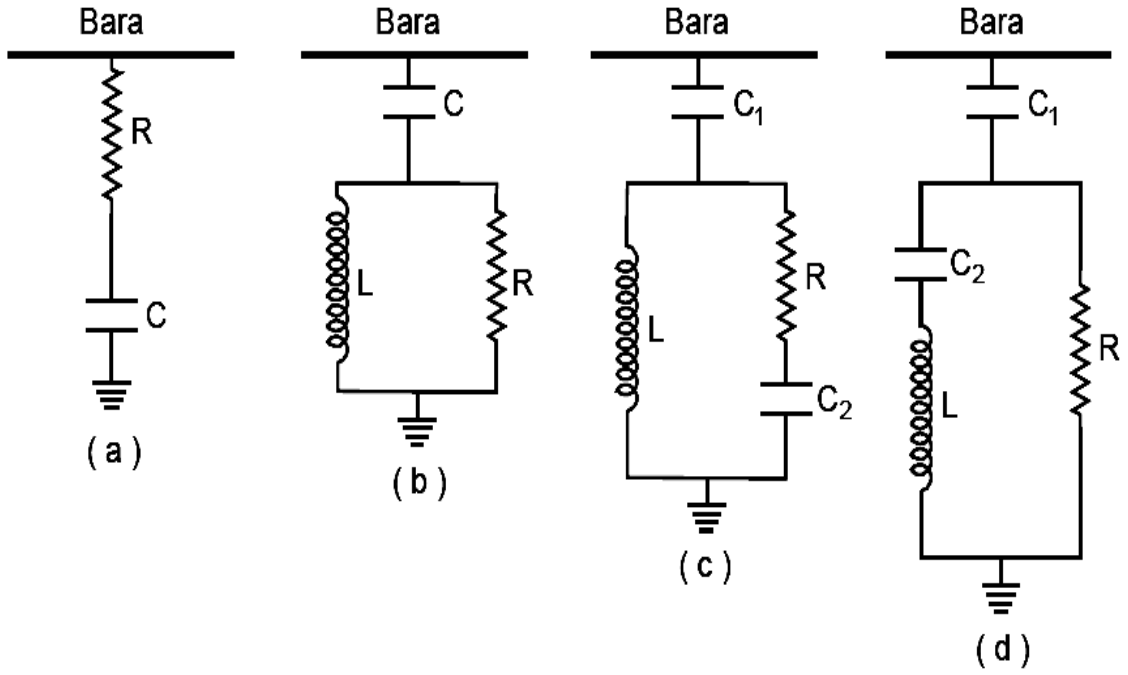
d) Yüksek geçiren sönümlü filtreler: Yüksek geçiren filtreler, belirli bir frekansın üzerinde düşük empedans gösteren filtrelerdir. Bu filtrelerin tek ayarlı filtreler ile birlikte kullanılması uygundur. Tek ayarlı filtreler yüksek genlik değerine sahip düşük harmonik frekanslarını her harmonik için farklı paralel kollarla süzerken, yüksek geçiren filtreler genlik değeri düşük yüksek harmonik frekanslarını tek bir paralel kol yardımı ile süzerler. 4 farklı çeşit yüksek geçiren filtre mevcuttur, bunların birbirlerine göre çeşitli avantajları ve dezavantajları vardır. Yüksek geçiren filtre çeşitleri Şekil 6.17’de verilmiştir.

Birinci dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre; büyük bir kondansatör gücü gerektirdiğinden ve temel frekansta aşırı bir kayba sebep olduğundan tercih edilmezler.

İkinci dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre; en iyi filtreleme performansına sahip olan filtredir. Fakat üçüncü dereceden filtre ile karşılaştırıldığında daha yüksek temel frekans kayıplarına sahiptir.

Üçüncü dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre; ikinci dereceye göre en büyük avantajı, C_2 kondansatöründen dolayı temel frekansta empedansının artmasına karşılık bu frekansta kayıpları önemli ölçüde azaltılmış olmasıdır.

C tipi yüksek geçiren sönümlü filtre; bu filtrenin filtreleme performansı, ikinci ve üçüncü derecen filtrelerin filtreleme performansı arasındadır. Temel avantajı, C_2 ve L seri olarak bağlandığından temel frekansta kayıplarının düşük olmasıdır. Bu tip filtreler, temel frekanstaki sapmalar ve elemanların değerlerinin zamanla değişmelerine karşı oldukça hassastır.



Şekil 6.17. Yüksek geçiren sönümlü filtreler (a) birinci derece, (b) ikinci derece, (c) üçüncü derece, (d) C tipi

Yüksek geçiren sönümlü filtrelerde elemanların seçimi tek ayarlı filtrelerdeki gibi yapılır. Ancak, yüksek geçiren sönümlü filtrelerdeki direnç değerini hesaplayabilmek için kalite faktörü adında bir eşitliğin tanımlanması gerekmektedir.

Bu eşitlik,

$$K = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{X_C} \quad (6.5)$$

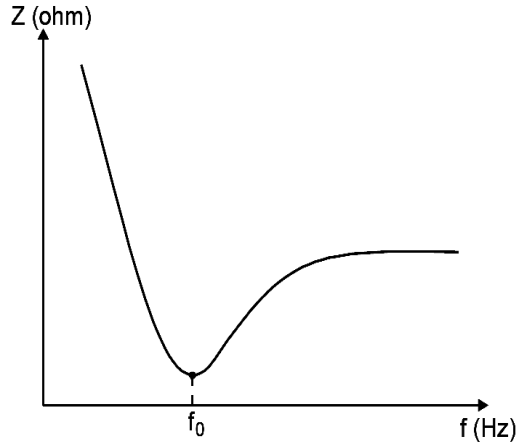
şeklindedir. Burada;

K: Kalite faktörü (0,5 ile 2 arasında sabit bir katsayı),

R: Yüksek geçiren sönümlü filtrede kullanılacak direnç değeri (Ω),

X_L : Yüksek geçiren sönümlü filtrede kullanılan endüktif reaktans değeri (Ω),

X_C : Yüksek geçiren sönümlü filtrede kullanılan kapasitif reaktans değeridir (Ω).



Şekil 6.18. Yüksek geçiren sönümlü paralel pasif filtre için frekans-empedans ilişkisi.

Yüksek geçiren bir filtrenin frekans-empedans ilişkisi Şekil 5.19’da verilmiştir. Buradan da görülmektedir ki filtre belirli bir frekansın üzerinde düşük empedans göstererek yüksek mertebeli harmoniklerin sistemden uzaklaşmasını sağlamaktadır.

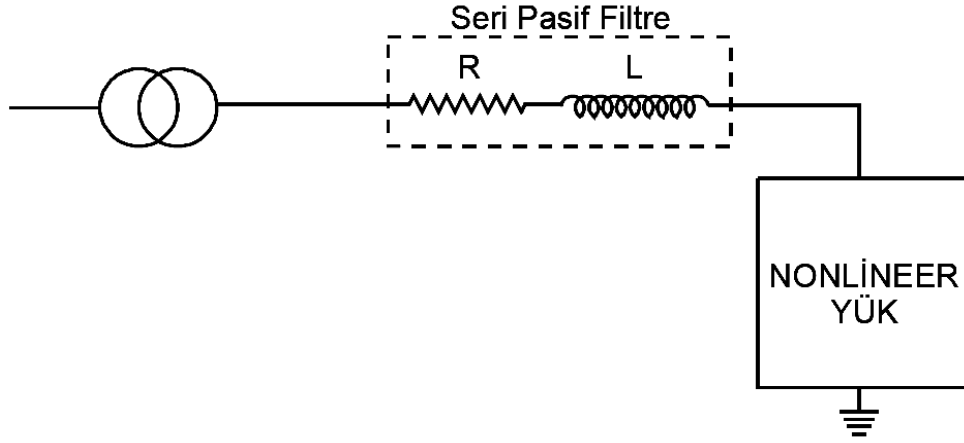
6.2.3.2. Seri pasif filtreler

Seri filtreler adından da anlaşılacağı gibi, kaynak ile harmonik üreten eleman arasına seri olarak bağlanan endüktans (L) elemanından oluşmaktadır. Seri bağlanan bu empedans,

$$X_L = 2\pi fL \quad (6.6)$$

formülüne göre harmonik frekanslarına yüksek empedans göstererek onların geçişlerini engeller. Temel frekansta ise düşük empedans gösterirler (Sucu 2003).

Güç sistemine paralel bağlanan filtrelerin aksine olarak seri filtreler yüke seri bağlanır. Endüktans ve kapasitans ayarlandıkları frekansta yüksek empedans göstermek için birbirlerine paralel bağlanırlar. Yüksek empedans yalnızca ayarlanan



Şekil 6.19. Seri Pasif Filtre Örneği.

frekanstaki bileşenlere uygulanır. Temel bileşen frekansında ise düşük bir empedans değerine ayarlanarak temel frekanstaki bileşende kayıpların önlenmesi sağlanır.

Seri filtreler uygulamada; AC motor sürücü devrelerinin ve yüksek güçlü AC/DC inverterlerin önlerinde kullanılır. Seri filtrelerinin uygulanmasındaki zorluk; tüm yük akımı filtre üzerinden geçmekte, tam hat gerilimleri için yalıtılması gerekmekte ve hatta gerilim düşümüne sebep olmaktadır.

6.2.4. Aktif güç filtreleri

Elektrik enerji sistemlerindeki harmoniklerin giderilebilmesi için, düşük maliyetleri yüzünden çoğunlukla pasif filtreler kullanılmaktadır. Ancak uygulamada pasif filtrelerin birçok dezavantajı vardır. Bunlar;

- ✓ Filtrede kullanılan elemanların (kondansatör, bobin ve direnç), zamanla değerinde sapmalar olacağından ve buna bağlı olarak filtrenin ayar frekansı da sapacağından filtreleme işlevinde azalmalar olur.

- ✓ Zamanla sistemdeki nonlineer yükler arttığında filtre buna bağlı olarak aşırı yüklenerek zarar görebilir.

- ✓ Güç sistemindeki elemanlarla filtre elemanları arasında farklı harmonik frekanslarında seri veya paralel rezonans meydana gelebilir.

Tablo 6.1: Filtrelerin Karşılaştırılması.

| KONU | PASİF FİLTRE | AKTİF FİLTRE |
|---|---|---|
| Harmonikli akımların kontrolü. | Her harmonik frekansı için bir filtre ister. | Aynı anda birçok harmonik akımı kontrol edilebilir. |
| Harmonik frekanslarının değişiminin etkisi. | Filtrenin etkinliği azalır. | Etkilenmez. |
| Empedans modifikasyonu etkisi. | Rezonans riski vardır. | Etkilenmez. |
| Akım yükselmesi riski. | Aşırı yüklenme ve bozulma riski vardır. | Aşırı yüklenme riski yoktur. |
| Sisteme yeni yük ilave edilmesi. | Filtrenin değiştirilmesi gerekebilir. | Herhangi bir probleme yol açmaz. |
| Sistemdeki temel dalganın frekans değişimi. | Değiştirilmesi gerekir. | Ayar ile uyum mümkündür. |
| Boyutlar ve ağırlık. | Harmonik genliği ve derecesine göre değişken. | Küçüktür. |
| Maliyet. | İlk maliyet çok düşük ama bakım yüksek. | İlk maliyet çok yüksek ama bakım düşük. |

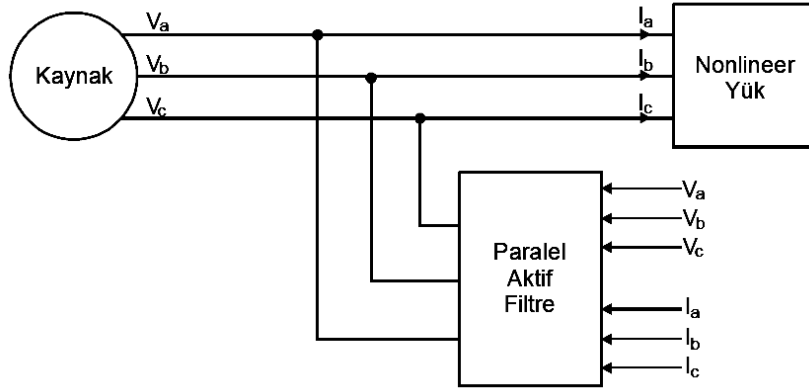
Bu olumsuz etkilerden dolayı, ilerleyen yarı iletken teknolojisi ve kontrol sistemleri sayesinde Aktif Güç Filtreleri geliştirildi.

Aktif güç filtreleri, güç sisteminde nonlinear yüklerin ürettiği harmoniklerle aynı genlikte fakat ters fazda bir akımı güç sistemine enjekte ederek çalışır. Bunu yapabilmek için, güç elektroniği anahtarlama elemanlarını ve sistemdeki harmonikleri belirleyerek anahtarlama elemanını sürebilmek için çeşitli kontrol düzenleri kullanır.

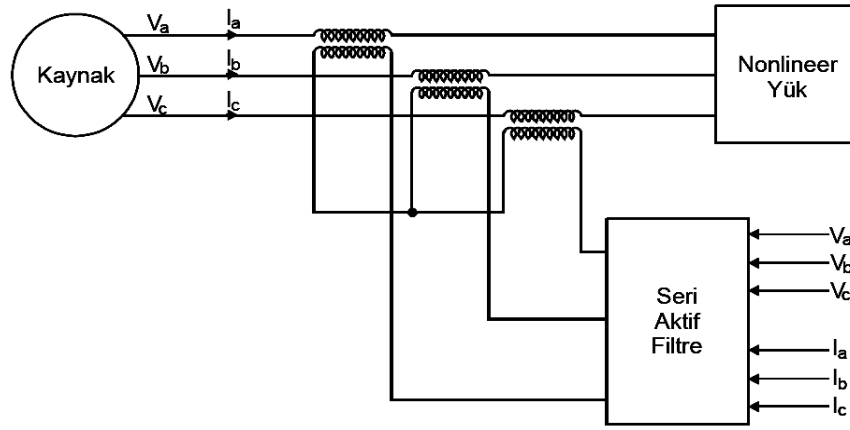
Aktif güç filtreleri ile sisteme enjekte edilen akım, sistemdeki harmoniklerin etkinliğini azaltır. Bu, nonlinear yüklerin şebekeden çekmek istediği harmoniklerin aktif güç filtresi ile karşılanması anlamına gelir. Aktif güç filtreleri sistemdeki harmonikleri yok etmek için kullanılmasının yanında, reaktif güç kompanzasyonu, gerilim ve akım dengesizlikleri, nötr akımı kompanzasyonu ve şebeke geriliminin regülasyonu için de kullanılırlar.

6.2.4.1. Paralel aktif filtre

Paralel aktif filtre adından da anlaşılacağı gibi sisteme paralel bağlı olarak çalışır. Yükün çektiği harmonikli akımları tanımladıktan sonra bunlarla aynı genlikte fakat ters fazdaki akımları sisteme enjekte eder. Paralel aktif filtre, akım kaynağı gibi



Şekil 6.20. Paralel aktif filtrenin prensip şeması.



Şekil 6.21. Seri aktif filtrenin prensip şeması.

davranan nonlineer yükler için etkilidir. Paralel aktif filtre akım ile ilgili kompanzasyonlarını (reaktif güç kompanzasyonu, akım dengesizlikleri gibi) yapar. Paralel aktif filtrenin yapısı Şekil 6.20’de görülmektedir.

6.2.4.2. Seri aktif filtre

Seri aktif filtreler sisteme bir transformatör ile bağlanır. Seri aktif filtre ile gerilim harmonikleri elimine edilir. Harmonikli gerilim kaynağı gibi davranan kaynaklar için etkilidir. Seri aktif filtre ile gerilime bağlı kompanzasyonlar gerilim dengesizlikleri, dalgalanmaları ve regülasyonu gerçekleştirilir. Yapısı Şekil 6.21’de görülmektedir.

6.2.4.3. Aktif güç filtresinin yapısı

Aktif güç filtresi, dönüştürücü (PWM Generatörü), akım kontrol devresi ve harmonik belirleme bloğu olmak üzere 3 ana bölümden oluşmaktadır (Şekil 6.22).

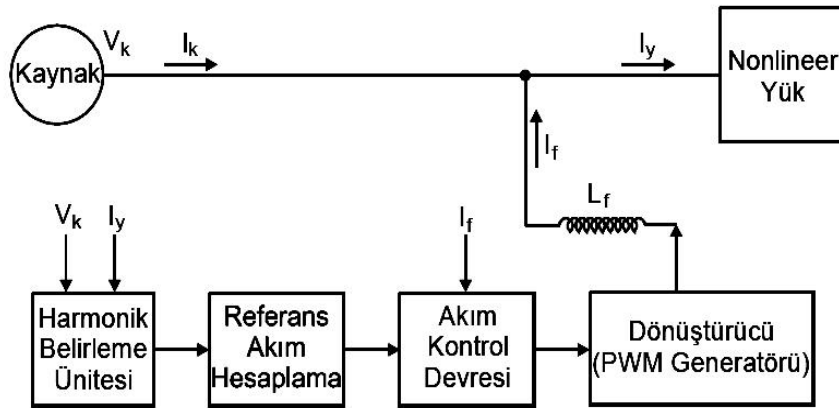
V_k : Kaynak gerilimi (V),

I_k : Kaynak akımı (A),

I_y : Yük akımı (A),

I_f : Aktif güç filtresi akımı (A),

L_f : kaynak uçlarındaki gerilim ile filtre tarafından üretilen PWM (Darbe genişlik modülasyonu) gerilimi arasında tampon görevi gören endüktanstır (L).



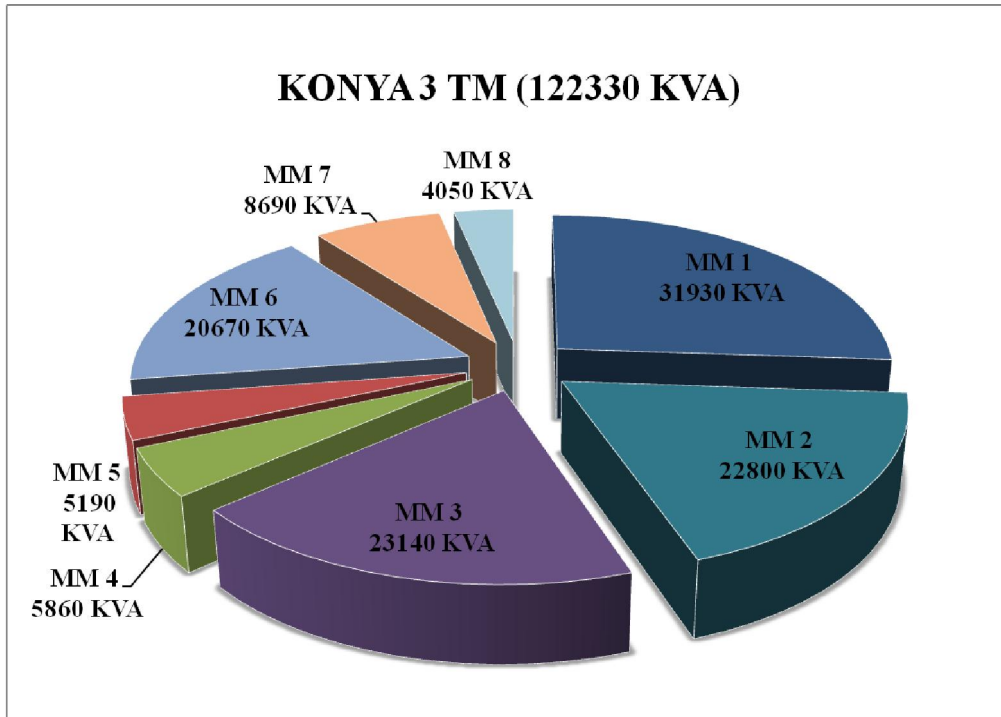
Şekil 6.22. Aktif güç filtresinin blok şeması (Sucu 2003).

7. DAĞITIM ŞEBEKESİNDE YAPILAN HARMONİK ÖLÇÜMLERİ VE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Elektrik dağıtım sistemlerindeki harmonik kaynaklarının incelenmesi ve birbirleri üzerindeki etkilerinin araştırılması için bir dağıtım şebekesi üzerinde farklı yerlerde AG ve OG’de ölçümler yapılmıştır. Dağıtım şebekesi olarak Konya 2. ve 3. Organize Sanayi Bölgesi seçilmiştir. Konya 2. ve 3. Organize sanayisinde TEİAŞ KONYA 3 TM’den beslenen 8 tane manevra merkezi bulunmaktadır. Her bir manevra merkezinin kurulu güçleri Şekil 7.1’deki gibidir.

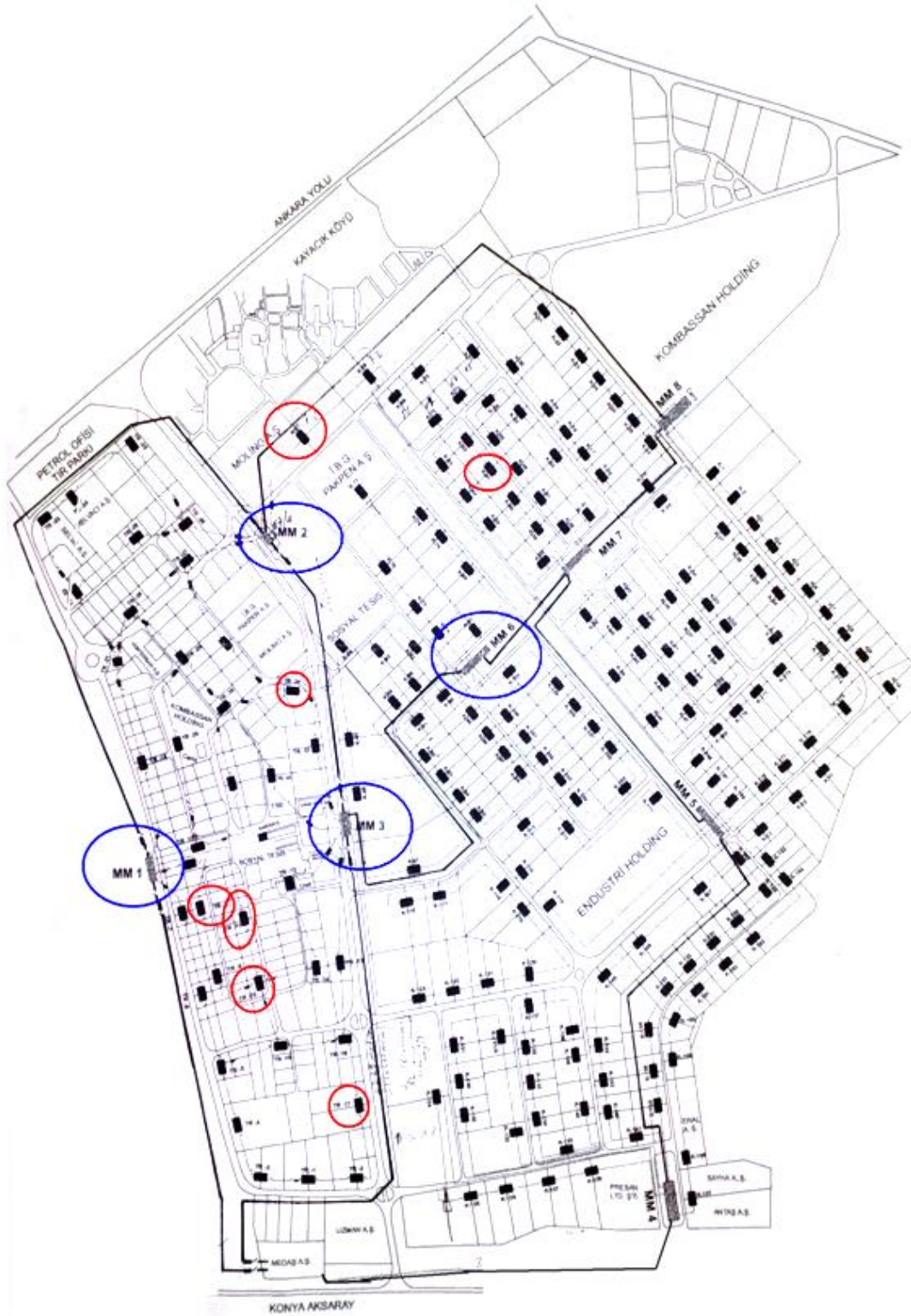
Manevra merkezleri arasında bazı yerlerde havai hat, bazı yerlerde yer altı hattı kullanılmaktadır. Manevra merkezleri arasındaki hatlar ve bunlara ait değerler Tablo 7.1’de verilmiştir. Buradaki güç değerleri ve yönleri zamanla değişken değerlerdir.

Ölçümler genellikle farklı alanda üretim yapan fabrikalarda yapılmış olup farklı fabrika tiplerinin hangi tür harmonikleri ürettiği incelenmiş ve bunların şebeke üzerindeki etkileri bulunmaya çalışılmıştır.



Şekil 7.1. Manevra merkezlerinin kurulu güçleri.

Yapılan ölçümler iki tip güç analizörü ile yapılmıştır. Genellikle AG tarafında yapılan ölçümler ANALYST 2060 tek fazlı güç analizörü cihazıyla, OG tarafında yapılan ölçümler ise RUDOLF PAK 5 üç fazlı güç analizörü cihazıyla yapılmıştır.



Şekil 7.2. Ölçüm yapılan Konya 2 ve 3 nolu organize sanayisinin trafo tek hat şeması ve fabrikalarda yapılan ölçümlere ait trafo yerleri.

Ölçüm yapılan fabrikaların nötr hatları mümkün oldukça ölçülmeye çalışılmış bazı durumlarda ise nötr hattında birden fazla iletkenin kullanıldığı ve iletkenlerin pens ampermetre ile birleştirilemediği yerlerde ölçülememiştir. AG tarafındaki ölçümler 1-5 dakika arasında yapılmış, OG tarafındaki ölçümler ise daha uzun süreli yapılmaya çalışılmıştır. Ölçüm saati fabrikaların yoğun olarak çalışma yaptıkları saatlerde yapılmıştır. Bazı ölçümler, döküm fabrikalarının elektriğin saat 22:00'den sonra ucuz olması nedeniyle gece çalışma saatlerinde yapılmıştır.

Yapılan harmonik ölçümlerinin sıhhatli olabilmesi için trafolarında birden fazla fabrikanın beslendiği yerlerde yalnızca ölçüm yapılan fabrikanın çalıştığı saatlerde ölçümler yapılmaya çalışılmıştır.

Resim 7.1, Resim 7.2 ve Resim 7.3'te fabrika trafolarında yapılan ölçümler ve ölçüm cihazlarının baralara bağlantıları gösterilmektedir.

Tablo 7.1. Manevra merkezleri arasındaki hatlar ve bunlara ait değerler.

| Hat | Kullanılan Kablo Cinsi | Uzunluğu | Hatlardan Geçen Aktif Güçler |
|-----------|------------------------|----------|------------------------------|
| TEİAŞ-MM1 | 477 MCM | 1715mt | 17527 kw |
| MM1-MM2 | 3(1x240+25)XLPE | 1842mt | 3941kw |
| MM2-MM3 | 477 MCM | 1339mt | 2115kw |
| MM2-MM8 | 3(1x240+25)XLPE | 2646mt | 720kw |
| TEİAŞ-MM4 | 3(1x240+25)XLPE | 2200mt | 16828kw |
| MM4-MM5 | 3(1x240+25)XLPE | 1850mt | 5751kw |
| MM5-MM7 | 3(1x240+25)XLPE | 1600mt | 4428kw |
| MM3-MM6 | 3(1x240+25)XLPE | 1936mt | 2165kw |
| MM6-MM7 | 3(1x240+25)XLPE | 700mt | 2163kw |
| TEİAŞ-MM3 | 477 MCM | 2229mt | 14280kw |
| MM7-MM8 | 3(1x240+25)XLPE | 920mt | 1422kw |



Resim7.1. Baralarda yapılan ölçümler (ANALYST 2060 tek fazlı güç analizörü).



Resim 7.2. Tek fazlı güç analizörünün bilgisayar bağlantısı ve ölçüm cihazının baralara bağlanması (RUDOLF PAK 5 üç fazlı güç analizörü).



Resim 7.3. Akım klemplarının baralara bağlanmış hali (RUDOLF PAK 5 üç fazlı güç analizörü) ve Gerilim klemplarının bağlanması (ANALYST 2060 tek fazlı güç analizörü).

Dağıtım şebekesi SCADA sistemiyle kontrol edilmekte olup sekiz tane manevra merkezi bulunmaktadır. Ölçüm yapılırken bu manevra merkezlerinin fazla güç çekenleri tercih edilmiştir. Ölçüm yapılan manevra merkezleri MM1, MM2, MM3 ve MM6'dır.

Ölçüm yapılan bazı fabrikalar ve özellikleri aşağıdaki gibidir.

- **Plastik Fabrikası**

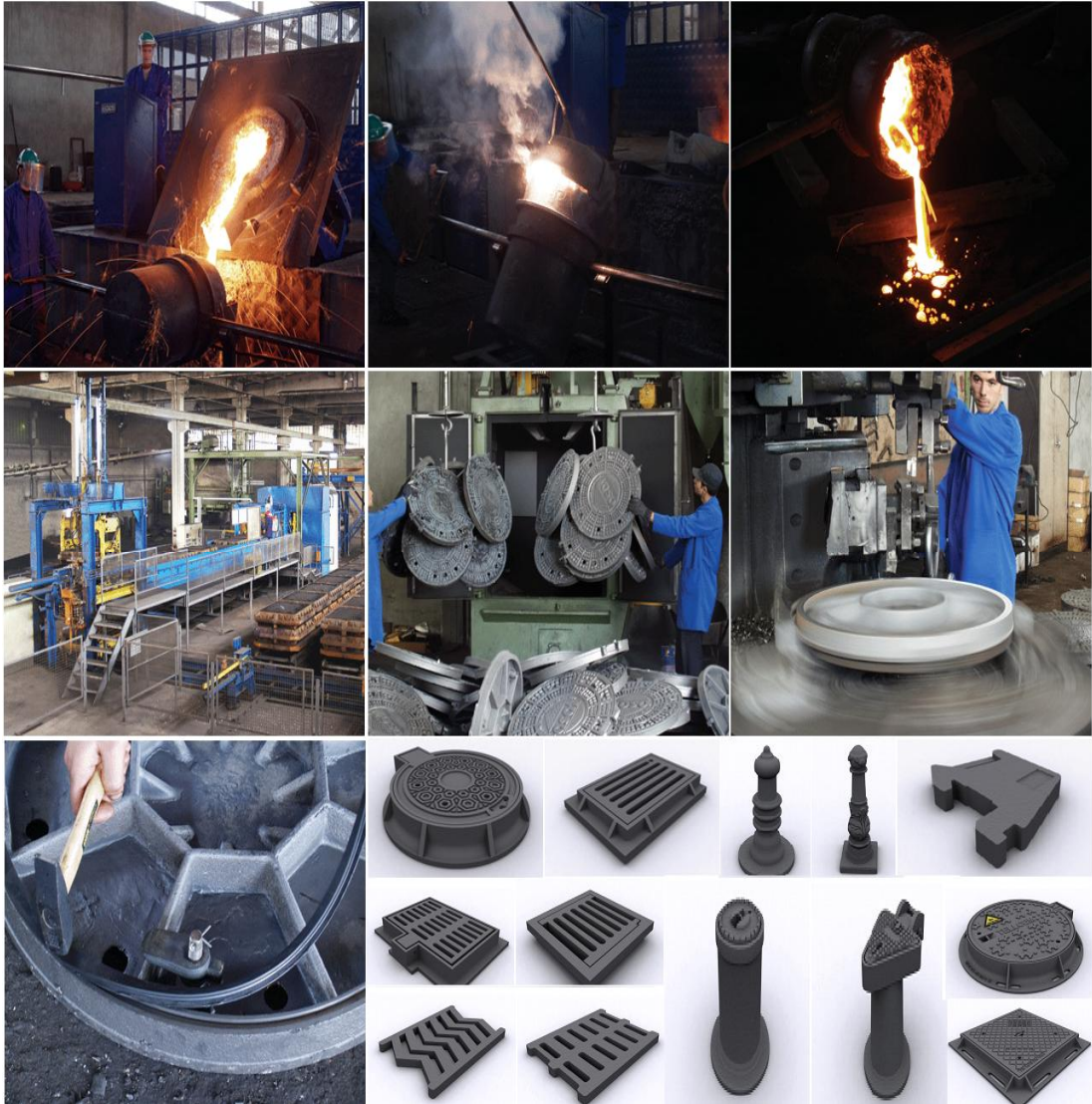
Plastik fabrikası sulama borularının yanında bu boruları üretmek için gerekli cihazları üretmektedir. Aşağıda fabrika içinin görünümü ve üretilen damlama borularıyla makinelerin şekli verilmiştir. Fabrika 1250 kVA'lık TR-6 trafosundan beslenmektedir. Kurulu gücü 304.340kW'dır.



Resim 7.4. Plastik fabrikasının iç görünümü ve üretilen damlama borularıyla makinelerin şekilleri.

- **Döküm Fabrikası 1**

Ölçüm yapılan döküm fabrikası, telekomünikasyon, kanalizasyon, doğalgaz, yağmur suyu ve atık su alt yapılarının elemanlarından olan menhol kapakları, rögar kapakları ve ızgaraların imalatı yapılmaktadır. Bunların yanında, ürün çeşitliliğini artırarak park, bahçe ve ev dekorasyonunda kullanılan döküm ürünleri ile traktör ve oto yedek parçaları alanında da üretim yapmaktadır. Aşağıda fabrika içinin görünümü ve üretilen elemanların resimleri verilmiştir (Resi 7.4). Bu fabrika OG'den kendi trafosu üzerinden beslenmektedir. Bu fabrikanın ölçümü OG tarafından yapılmıştır.



Resim 7.4. Döküm fabrikasının iç görünümü ve üretilen elemanların şekilleri.

- **Tekstil Fabrikası**

Ölçüm yapılan tekstil fabrikası elyaf ürünleri ve iplik üretimi yapmaktadır. Fabrikada yeni teknolojinin kullanıldığı inverterli hız kontrol sürücülerini kullanılmaktadır. Fabrika OG'den kendi trafosu üzerinden beslenmektedir. Bu fabrikanın ölçümü AG tarafından 1600 kVA'lık kendi trafosu üzerinden yapılmıştır. Aşağıda fabrika için görünümü ve ürünlerin resimleri verilmiştir (Resim 7.5).



Resim 7.5. Tekstil fabrikasının iç görünümü.

- **Gıda fabrikası**

Bu fabrika küp şeker ve pudra şekeri imalatı ve toz şeker paketleme yapmaktadır. Fabrikada yoğun olarak motor sürücüleri ve elektronik elemanlar bulunmaktadır. Bu fabrika Döküm fabrikası 3 ile aynı trafodan beslenmektedir. Bu iki fabrikanın beslendiği trafoda arızalar olmakta ve bu arızalarda fabrikalarda büyük maddi kayıplar olmaktadır. Bu fabrika OG hattından 400 kVA'lık kendi trafosu üzerinden beslenmektedir.

- **Döküm ve Kalıp fabrikası 2**

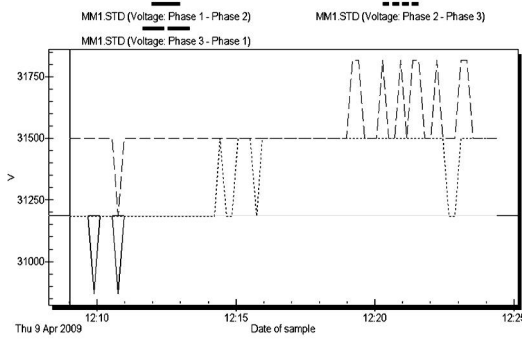
Bu fabrika enjeksiyon pres kalıpları, metal enjeksiyon döküm, kum döküm ve talaşlı imalat yapmaktadır. Fabrikada alüminyum enjeksiyon cihazları bulunmaktadır. Aşağıda fabrika içinin görünümü ve ürünlerin resimleri verilmiştir (Resim 7.6).



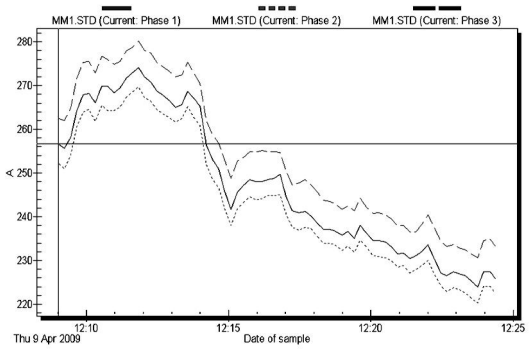
Resm 7.6. Döküm fabrikası 2'nin iç görünümü ve üretilen elemanlar.

7.1.Yapılan Ölçümlerden Alınan Grafiksel Veriler

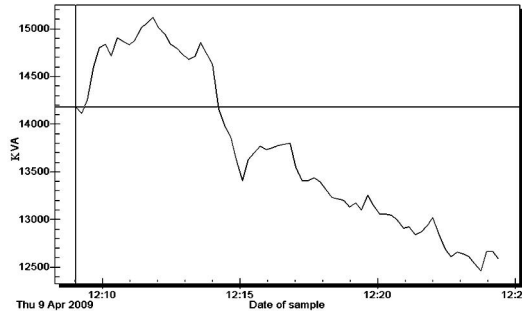
7.1.1.MM1 Ölçümü



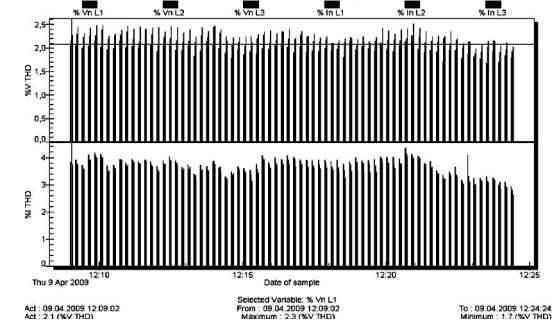
Şekil 7.3. MM1 Gerilim grafiği.



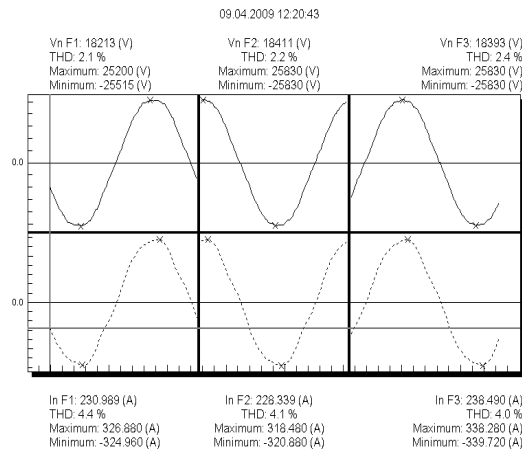
Şekil 7.4. MM1 Akım grafiği.



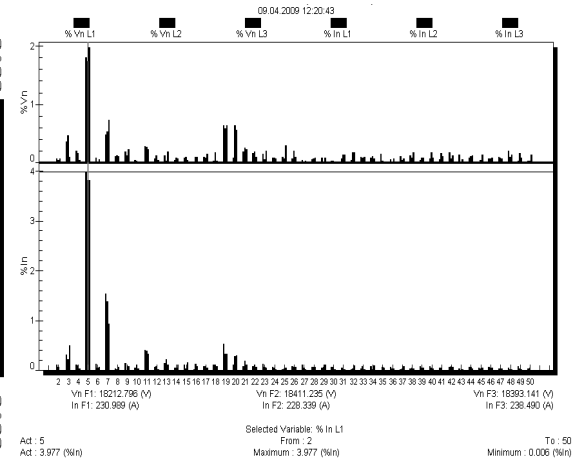
Şekil 7.5. MM1 Görünür güç grafiği (üç faz toplamı).



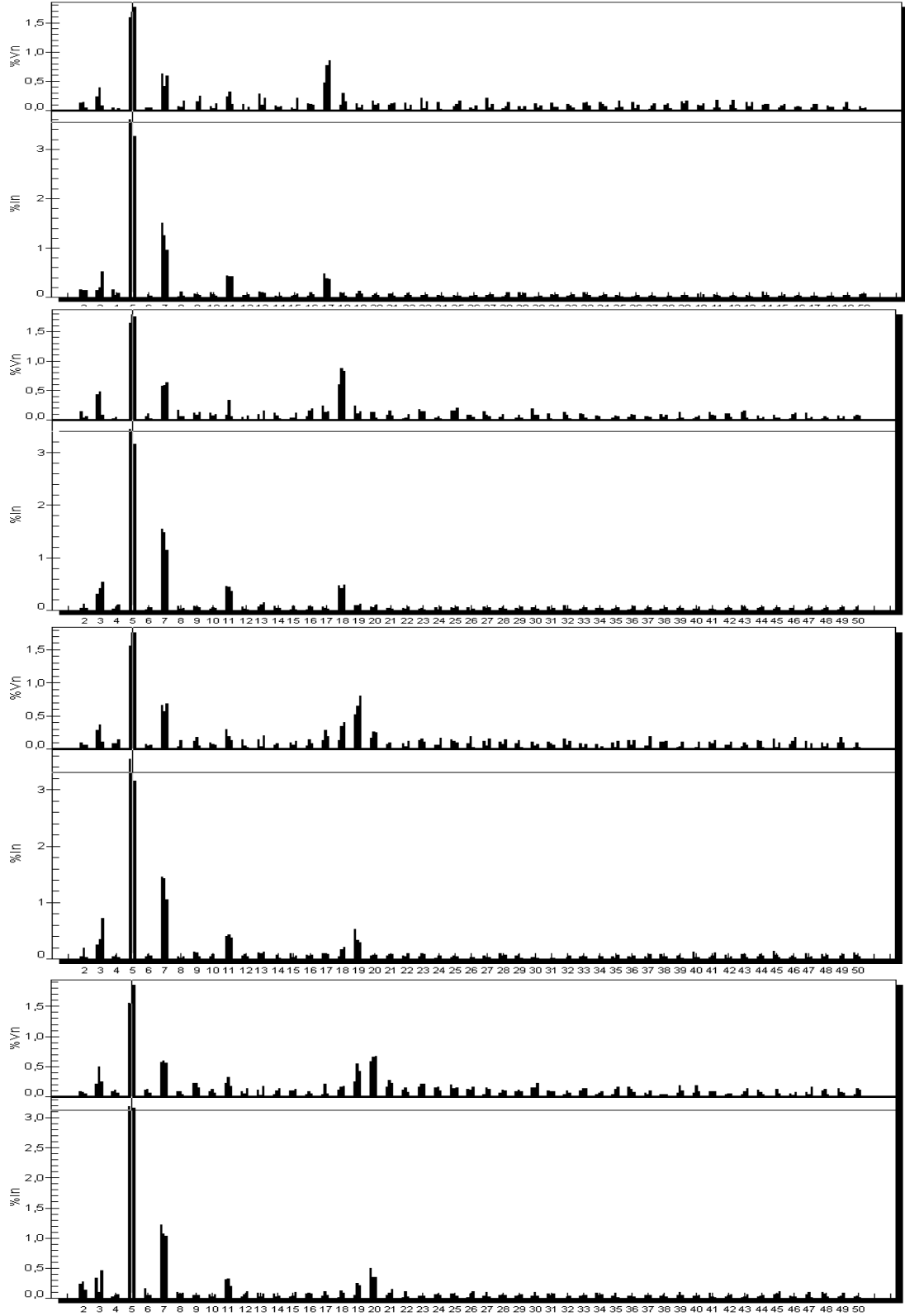
Şekil 7.6. MM1 Üç faz THD grafiği.



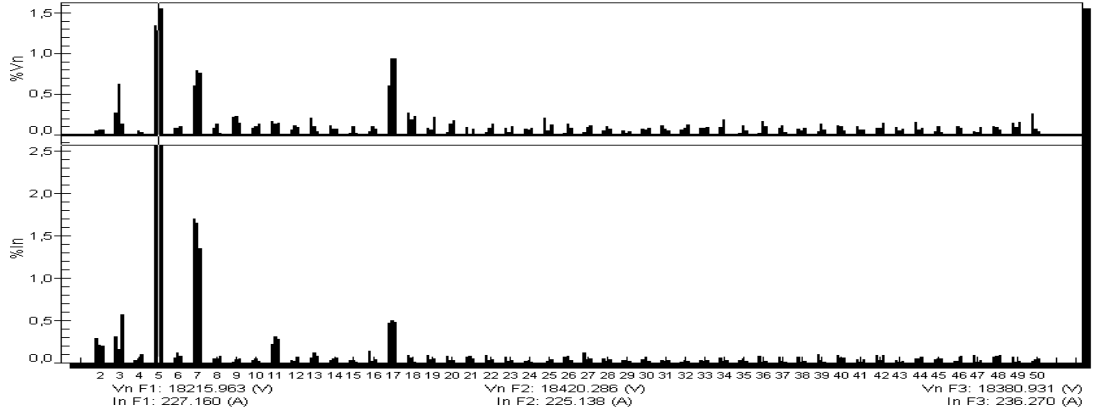
Şekil 7.7. MM1 THD'nin en büyük olduğu durumda için akım-gerilim dalga şekilleri.



Şekil 7.8. MM1 THD'nin en büyük olduğu durumda için akım-gerilim harmonik spektrumları.



Şekil 7.9. MM1 Farklı zamanlardaki harmonik spektrumlarının değişimi.

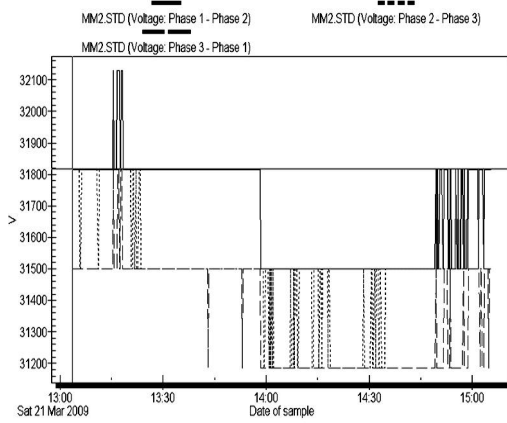


Şekil 7.10. MM1 Farklı zamanlardaki harmonik spektrumlarının değişimi.

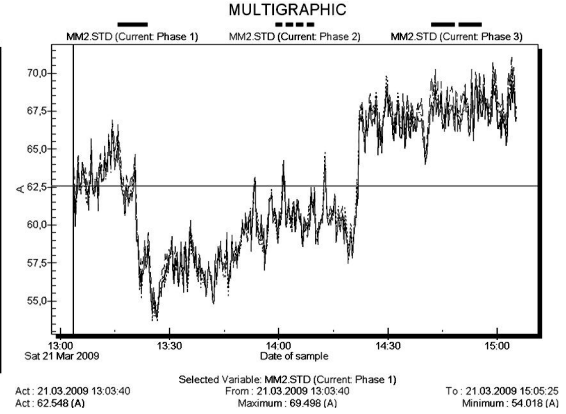
Grafiklerden de anlaşılacağı üzere akımla gerilim ters orantılı bir şekilde değişim göstermektedir. Akım seviyesi yükseldiğinde gerilim seviyesi düşmektedir. Üç fazlı THD grafiklerine bakıldığında gerilim THD değerlerinin %2,5'i, akım THD değerlerinin ise % 4,1'i geçmediği görülmektedir. Bu değerler daha önce 4. bölümde değerleri verilen IEEE-519 standartlarının altındadır. MM1'den beslenen fabrikaların bazıları harmonik limitlerini aşmasına rağmen OG tarafına yansımamasının nedeni OG'den çekilen toplam akımda diğer fabrikaların çekmiş olduğu akımların da bulunmasıdır. Sistemdeki harmonik akım seviyeleri düşük fabrikaların etkisiyle MM1'den çekilen akımın THD değeri de azalmaktadır. Bununla birlikte harmonikli bileşenlerin açı farkından dolayı birbirlerini azaltması da söz konusudur.

Bu manevra merkezindeki baskın harmoniklerin akımda % 4 seviyelerindeki 5. harmonik ve % 2 seviyelerinde 7. harmonik olduğu görülmektedir. Ayrıca zamanla akımdaki 17,18,19,20 ve 21. harmonik bileşenlerin de arttığı görülmektedir. Şekil 7.16'daki grafiklerden anlaşılacağı üzere harmonik bileşenler zamanla oldukça değişkendir. Özellikle yüksek frekanslı 17,18,19,20,21. vb. harmonik bileşenler zamana göre değişkenlik arz etmektedir. Bu sebepten bir sistem hakkında yüksek seviyeli harmonikler için baskın harmoniği belirlemek güç olabilir. Sistemin nonlineerliğinden dolayı sürekli olarak harmonikli bileşenler değişecektir. Ancak düşük frekanslı yüksek genlikli baskın harmonikler genellikle belirgindir. Yalnızca genlik değerinde zamana göre küçük değişiklikler görülür.

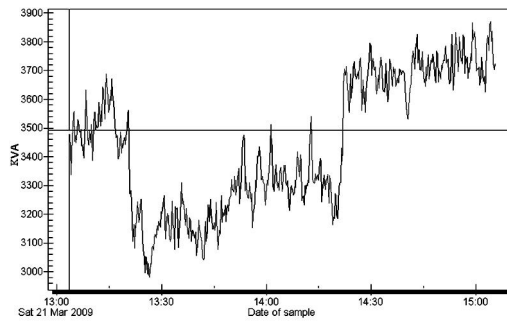
7.1.2. MM2 Ölçümü



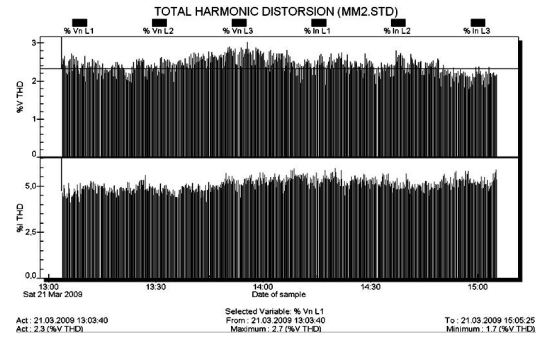
Şekil 7.11. MM2 Gerilim grafiği.



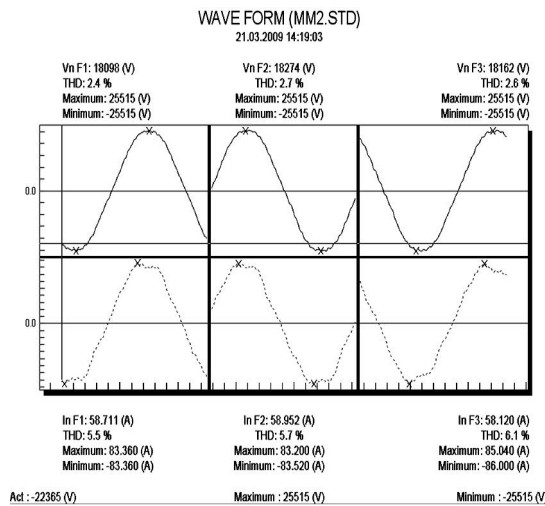
Şekil 7.12. MM2 Akım grafiği.



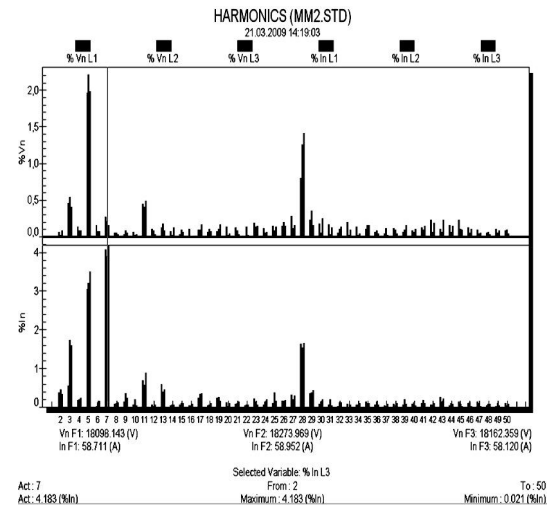
Şekil 7.13. MM2 Görünür güç grafiği
(üç faz toplamı)



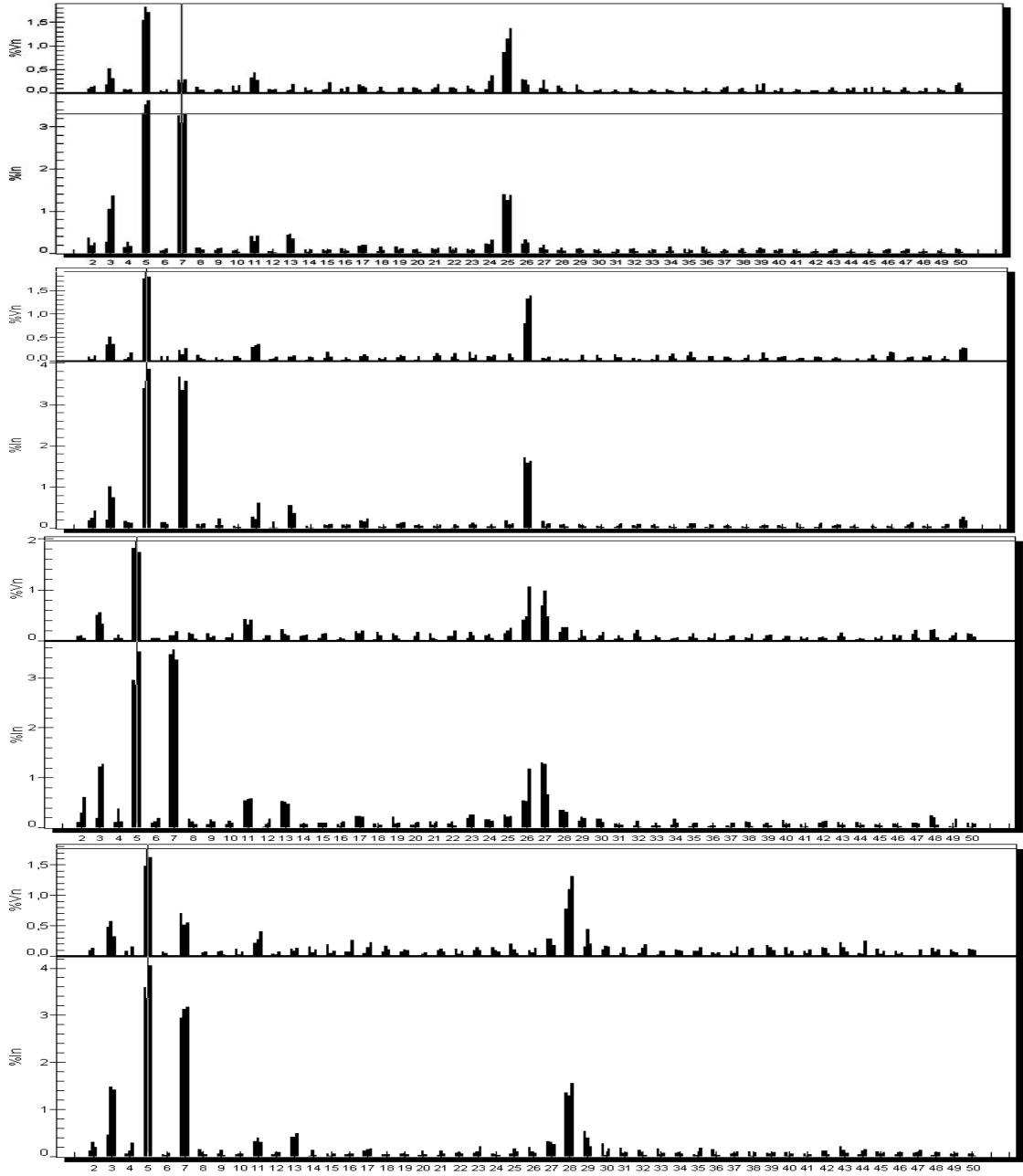
Şekil 7.14. MM2 Üç faz THD grafiği



Şekil 7.15. MM2 THD'nin en büyük değerinde olduğu durum için akım-gerilim dalga şekilleri.



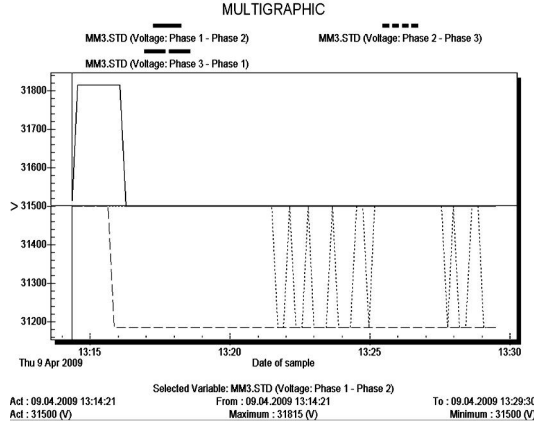
Şekil 7.16. MM2 THD'nin en büyük değerinde olduğu durum için akım-gerilim harmonik spektrumları.



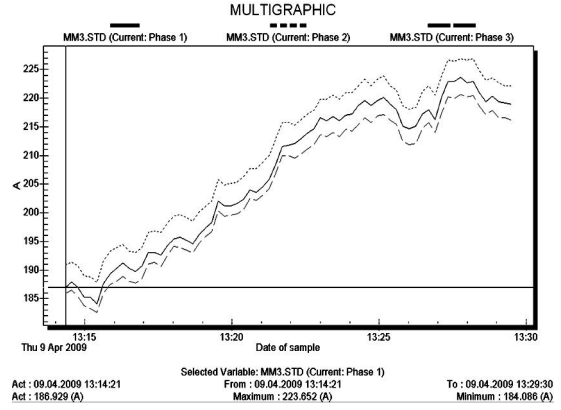
Şekil 7.17. MM2 Farklı zamanlardaki harmonik spektrumlarının değişimi.

MM2'deki baskın harmonikler 5 ve 7. harmoniklerdir. 11. ve 13. harmonikler de mevcuttur. 7. harmonik seviyesi bazı durumlarda 5. harmonik seviyesini geçmektedir. Bunun yanında 25,26,27,28 ve 29. harmonik bileşenler de zamanla yükselmektedir. Üç fazlı THD grafiklerine bakıldığında gerilim THD değerlerinin %2,5, akım THD değerlerinin ise % 5,1 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Bu değerler IEEE 519 standartlarının altındadır.

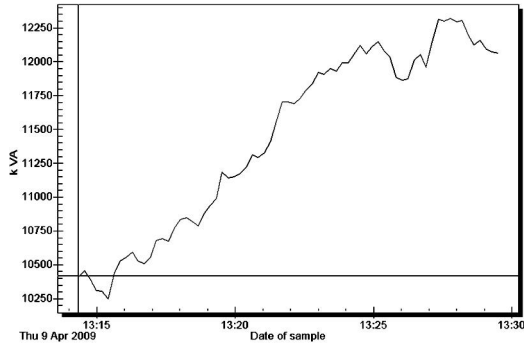
7.1.3.MM3 Ölçümü



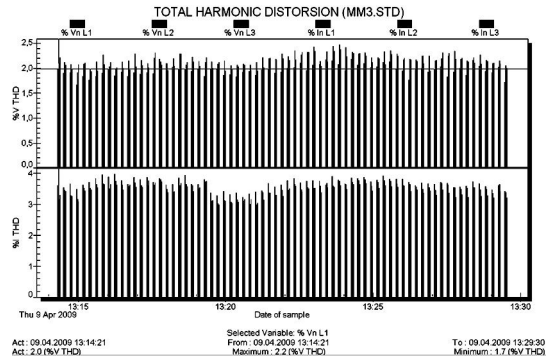
Şekil 7.18. MM3 Gerilim grafiği.



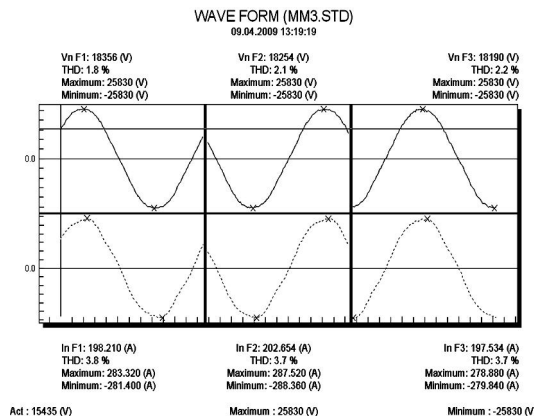
Şekil 7.19. MM3 Akım grafiği.



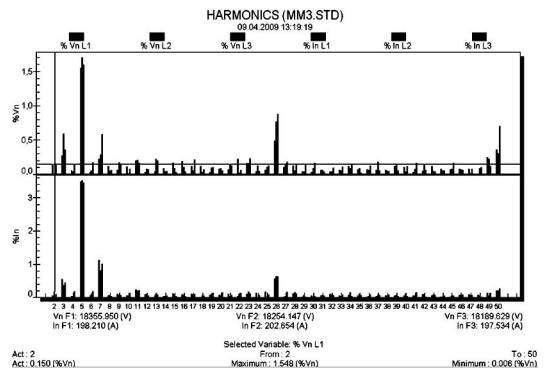
Şekil 7.20. MM3 Görünür güç grafiği (üç faz toplamı).



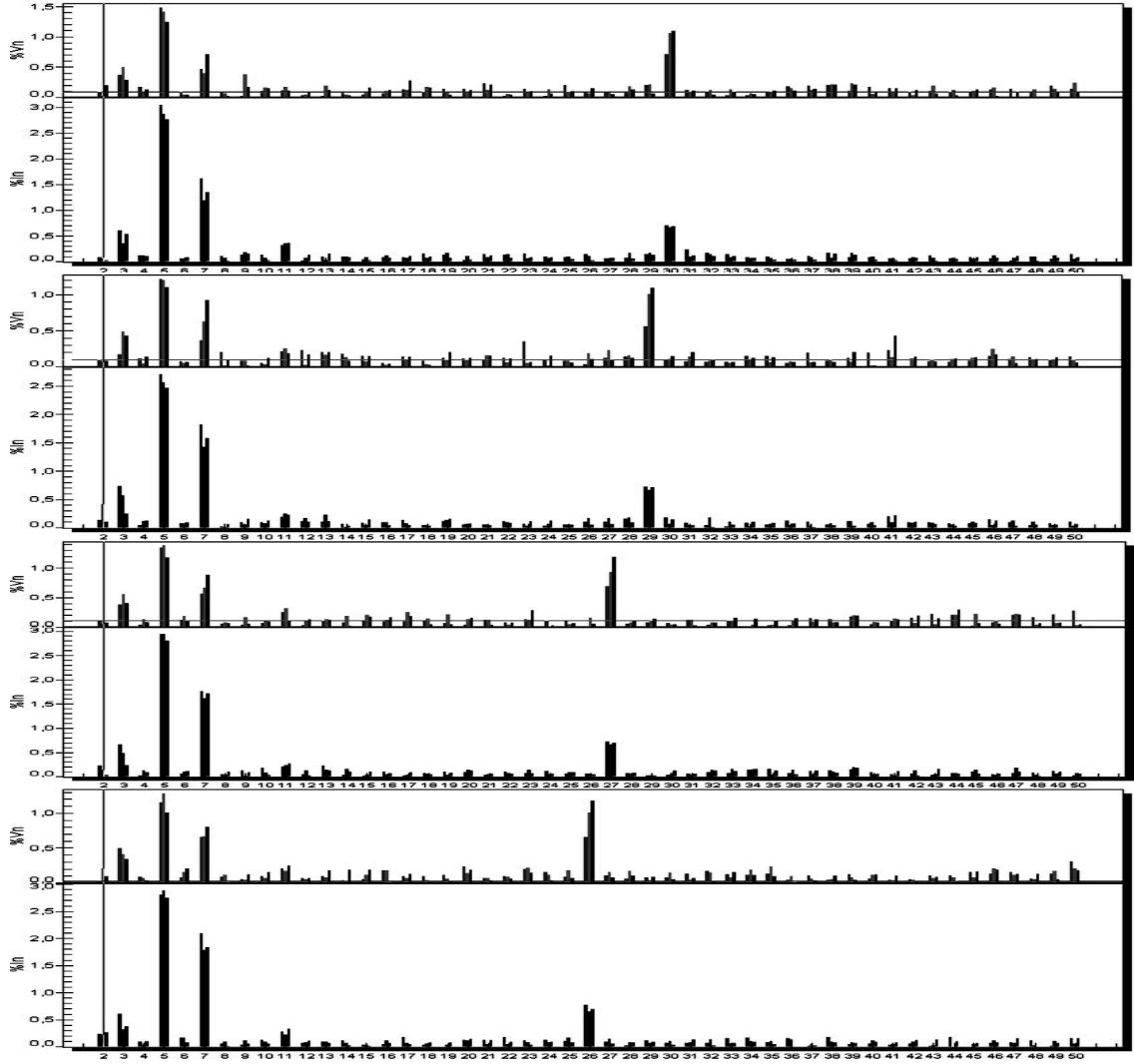
Şekil 7.21. MM3 Üç faz THD grafiği.



Şekil 7.22. MM3 THD'nin en büyük değerde olduğu durum için akım-gerilim dalga şekilleri.



Şekil 7.23. MM3 THD'nin en büyük olduğu durum için akım-gerilim harmonik spektrumları.

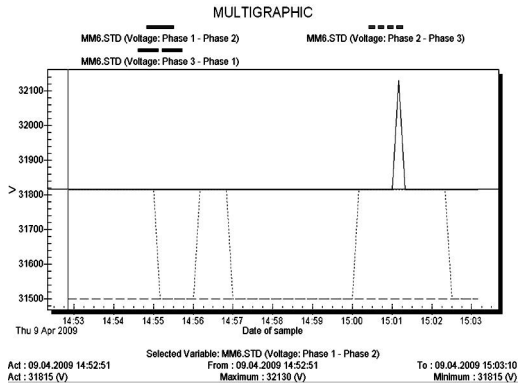


Şekil 7.24. MM3 Farklı zamanlardaki harmonik spektrumlarının değişimi.

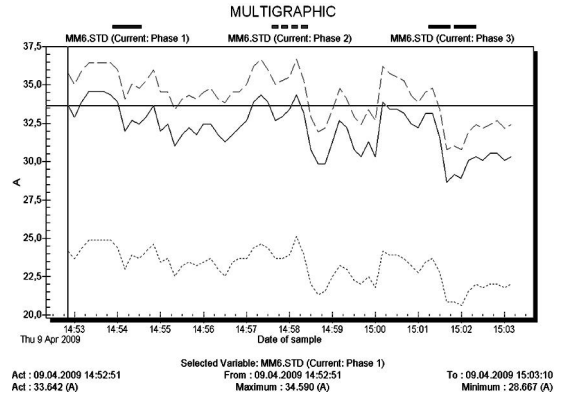
Üç fazlı THD grafiklerine bakıldığında gerilim THD değerlerinin % 2,5'i, akım THD değerlerinin ise % 4'ü geçmediği görülmektedir.

Bu manevra merkezindeki baskın harmoniklerin akımda % 3,5 seviyelerindeki 5. harmonik ve % 1,2 seviyelerinde 7. harmonik olduğu görülmektedir. Ayrıca zamanla akımdaki 26,27,28,29 ve 30. harmonik bileşenlerin de arttığı görülmektedir. Şekil 7.16'daki grafikte görüldüğü gibi bazı aralıklarda düşük seviyede de olsa 50. harmonik bileşen mevcuttur. Yüksek frekanslı harmonikli bileşenler düşük frekanslara göre sistem elemanlarının daha çok ısınmasına neden olmaktadır. Ayrıca hatlardaki deri etkisi olaylarına da etkileri vardır.

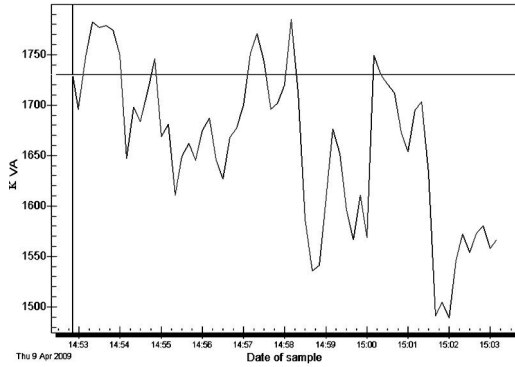
7.1.4.MM6 ölçümü



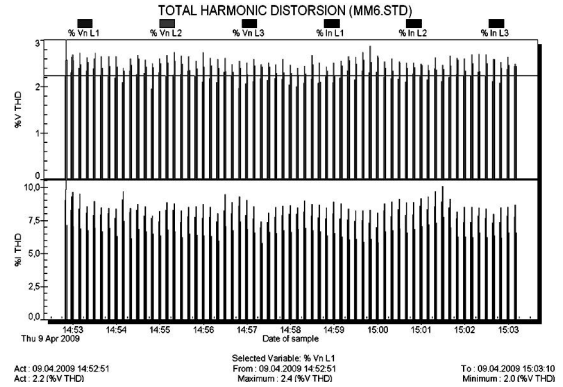
Şekil 7.25. MM6 Gerilim grafiği.



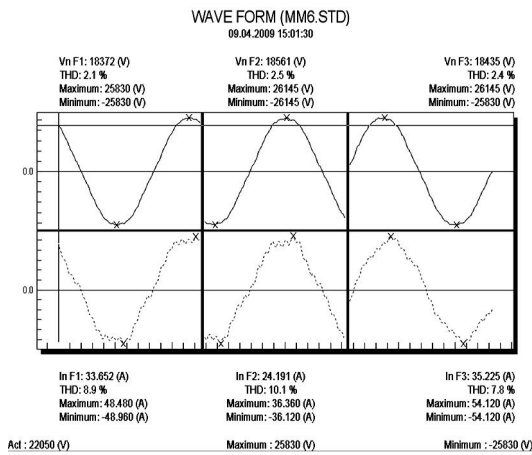
Şekil 7.26. MM6 Akım grafiği.



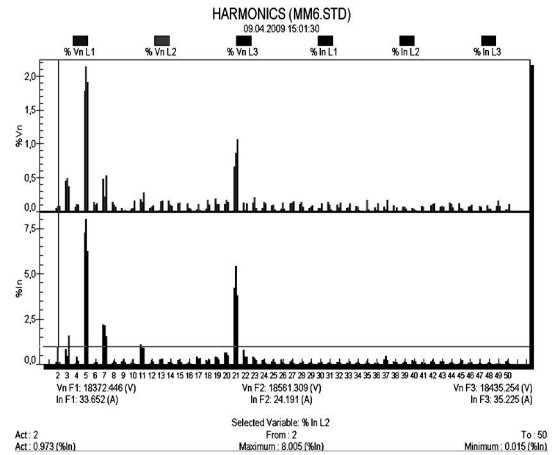
Şekil 7.27. MM6 Görünür güç grafiği (üç faz toplamı).



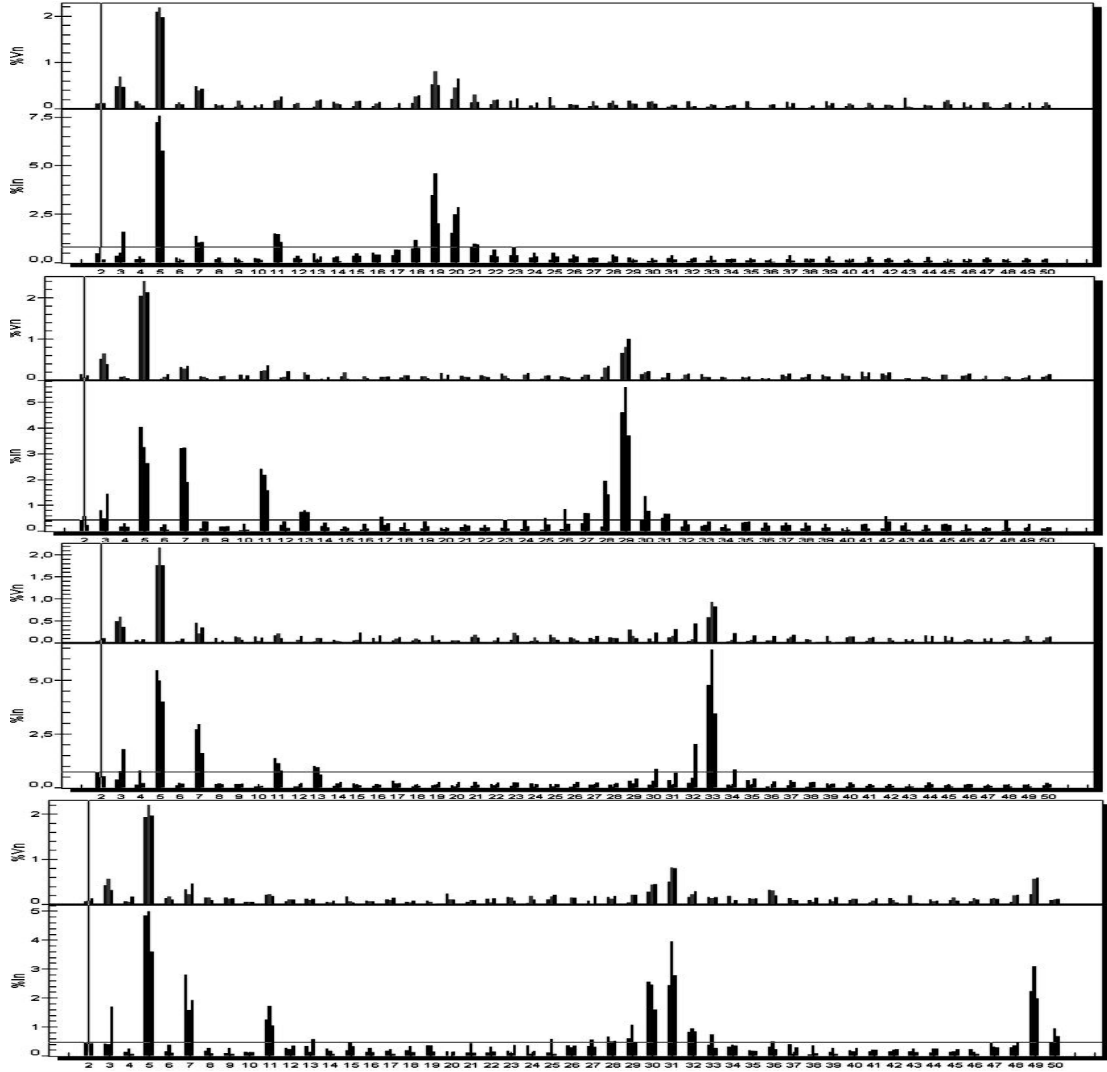
Şekil 7.28. MM6 Üç faz THD grafiği.



Şekil 7.29. MM6 THD'nin en büyük değerinde olduğu durum için akım-gerilim dalga şekilleri.



Şekil 7.30. MM6 THD'nin en büyük olduğu durum için akım-gerilim harmonik spektrumları.

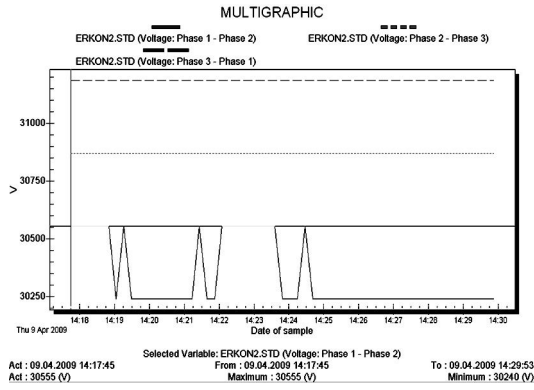


Şekil 7.31. MM6 Farklı zamanlardaki harmonik spektrumlarının değişimi.

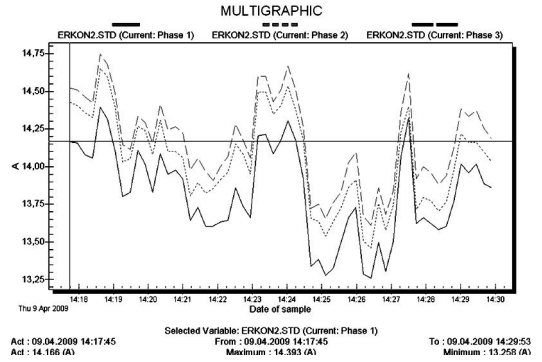
Yapılan ölçümlerden elde edilen yukarıdaki verilere göre MM6 Akım THD değeri bazı aralıklarda % 10 seviyelerine ulaşmaktadır. Bu değer standartların üzerindedir. Gerilimdeki THD değeri ise % 2,8 civarındadır. Bu değer standartların altındadır. Fakat OG'de 31,5 kV için % 3'lük bir değer yaklaşık 1000 V yapacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

MM6'da baskın harmoniklerin akımda % 7,5 seviyelerindeki 5. harmonik, % 4 seviyelerinde 7. harmonik, % 3 seviyelerinde 11. harmonik ve bazı aralıklarda da 28, 29, 30, 31 ve 32. harmonikler olduğu görülmektedir. Ayrıca zamanla akımdaki 45, 46, 47, 48, 49 ve 50. harmonik bileşenlerin de arttığı görülmektedir.

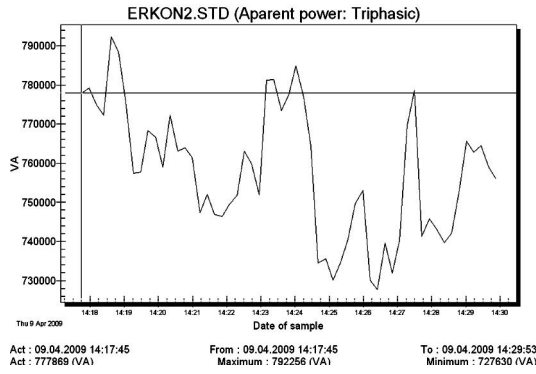
7.1.5.Döküm fabrikası 1 (OG)



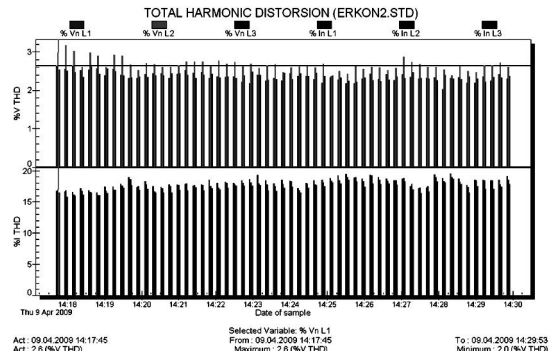
Şekil 7.32. Döküm fabrikası 1 gerilim grafiği.



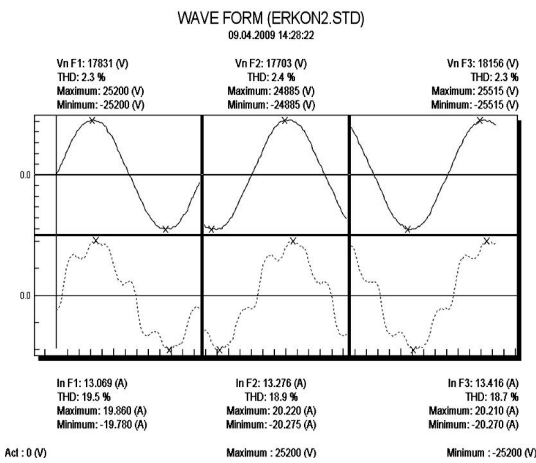
Şekil 7.33. Döküm fabrikası 1 akım grafiği.



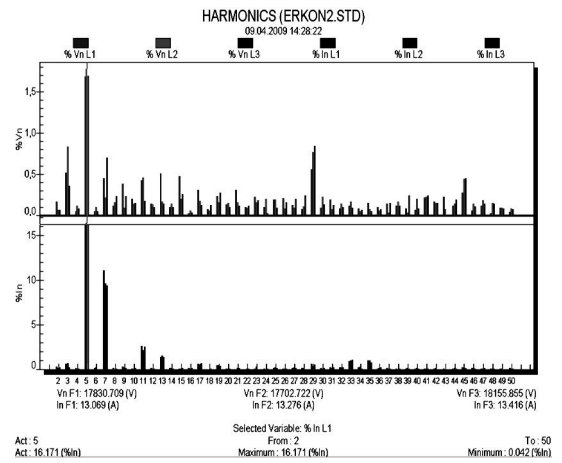
Şekil 7.34. Döküm fabrikası 1 görünür güç grafiği (üç faz toplamı).



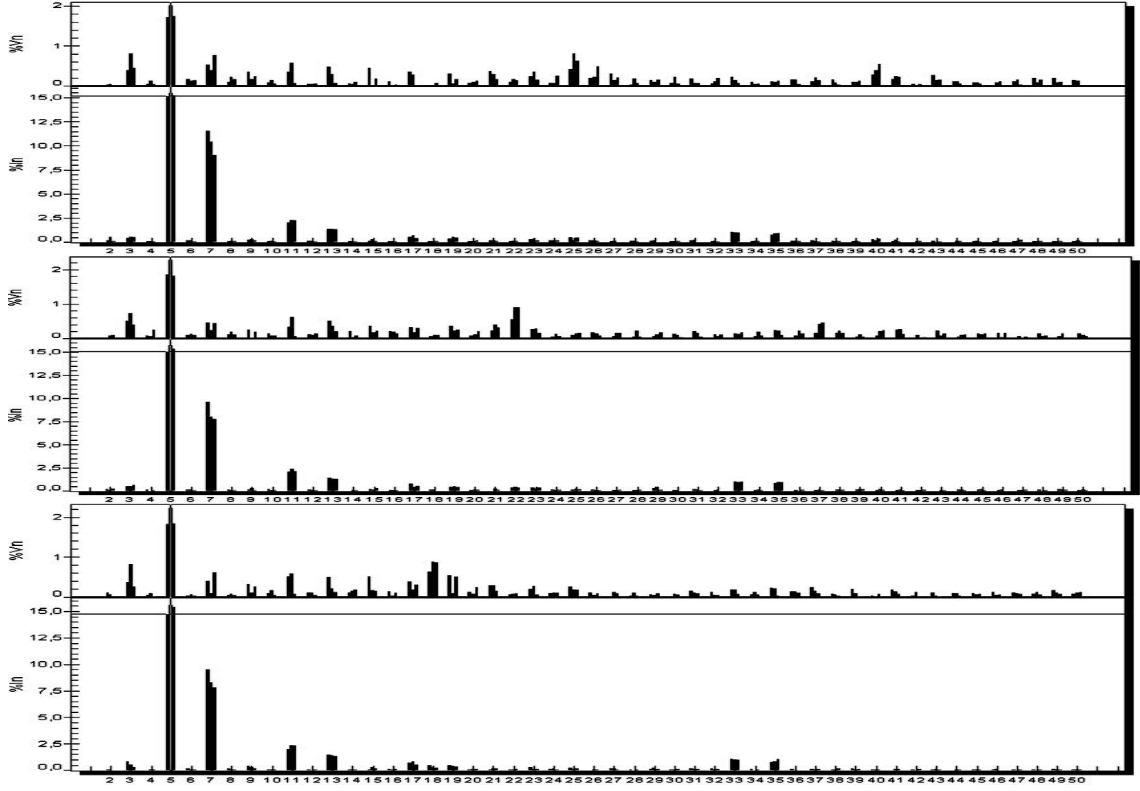
Şekil 7.35. Döküm fabrikası 1 üç faz THD grafiği.



Şekil 7.36. Döküm fabrikası 1 THD'nin en büyük olduğu durum için akım-gerilim dalga şekilleri.



Şekil 7.37. Döküm fabrikası 1 THD'nin en büyük olduğu durum için akım-gerilim harmonik spektrumları.

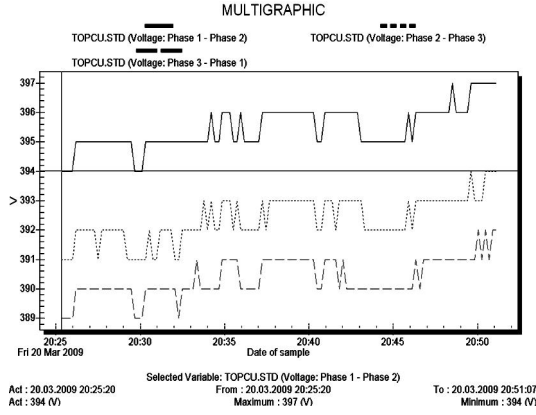


Şekil 7.38. Döküm fabrikası 1 farklı zamanlardaki harmonik spektrumlarının değişimi.

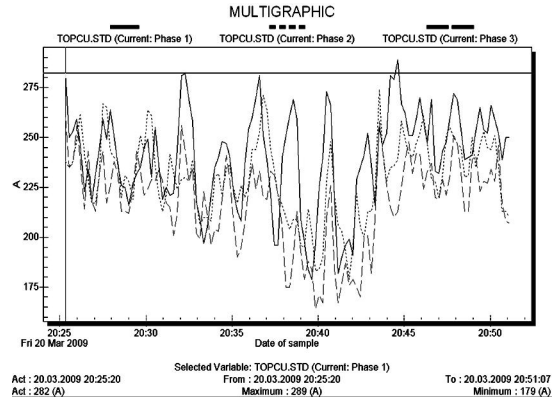
Yapılan ölçümler bu döküm fabrikasının kendi fiderinde yapıldığı için akım harmonik değerleri oldukça yüksek seviyelerdedir. Manevra merkezlerinde alınan değerlerde ise birden çok fabrikanın akım değerleri bulunduğundan toplam akımdaki harmonik seviyesi düşmektedir.

Akımdaki THD değeri % 20 seviyelerine ulaşmaktadır. Bu değer standartların üzerinde bir değerdir. Gerilim THD seviyesi ise % 2,5 seviyelerindedir. Döküm fabrikalarında genelde yüksek frekanslarda metalin eritilmesi yapıldığı için bu tip fabrikalar yüksek harmonik kaynaklarıdır ve çevredeki diğer fabrikalara zarar verilmemesi için harmonik filtre sistemlerinin uygulanması gerekmektedir. Gerilim THD'sindeki değerin küçük olması ise üretilen harmonikli akımların sistem empedansı üzerinde oluşturdukları gerilim düşümünün küçük değerlerde olmasından kaynaklanmaktadır. Gerilim harmonikleri akım harmoniklerinin dolaylı olarak bir sonucudur. Fakat bu gerilim düşümleri sistemdeki bütün kullanıcıları etkileyeceğinden önlemlerin alınması gerekmektedir. Standartlarda gerilim harmoniğine akım harmoniğine nispeten daha az izin verilmesinin sebebi budur.

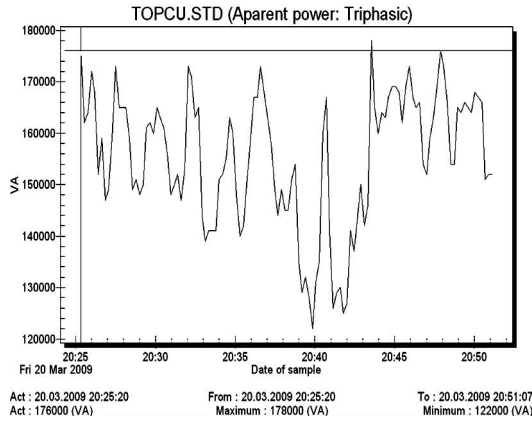
7.1.6. Plastik fabrikası 1



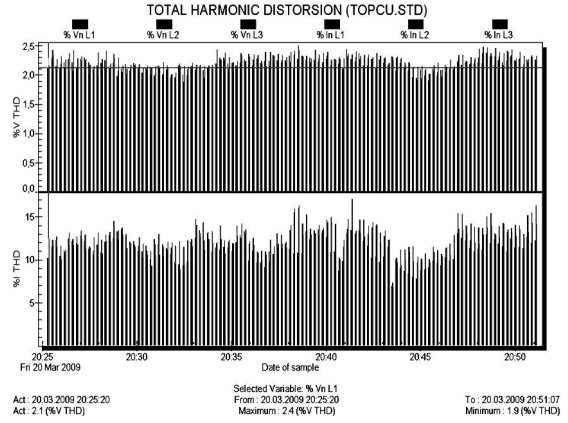
Şekil 7.39. Plastik fabrikası 1 gerilim grafiği.



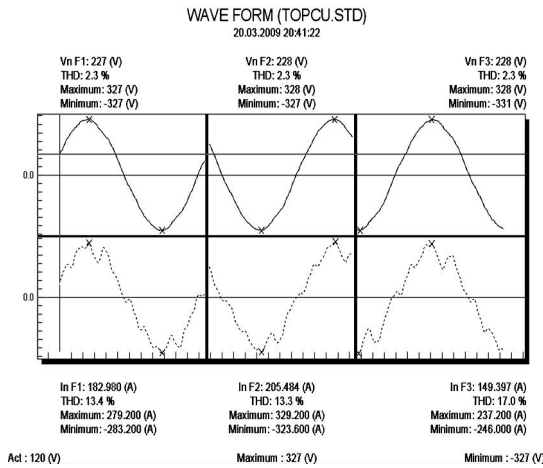
Şekil 7.40. Plastik fabrikası 1 akım grafiği.



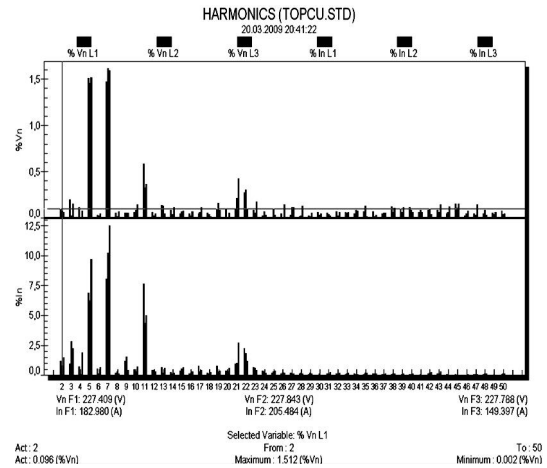
Şekil 7.41. Plastik fabrikası 1 görünür güç grafiği (üç faz toplamı).



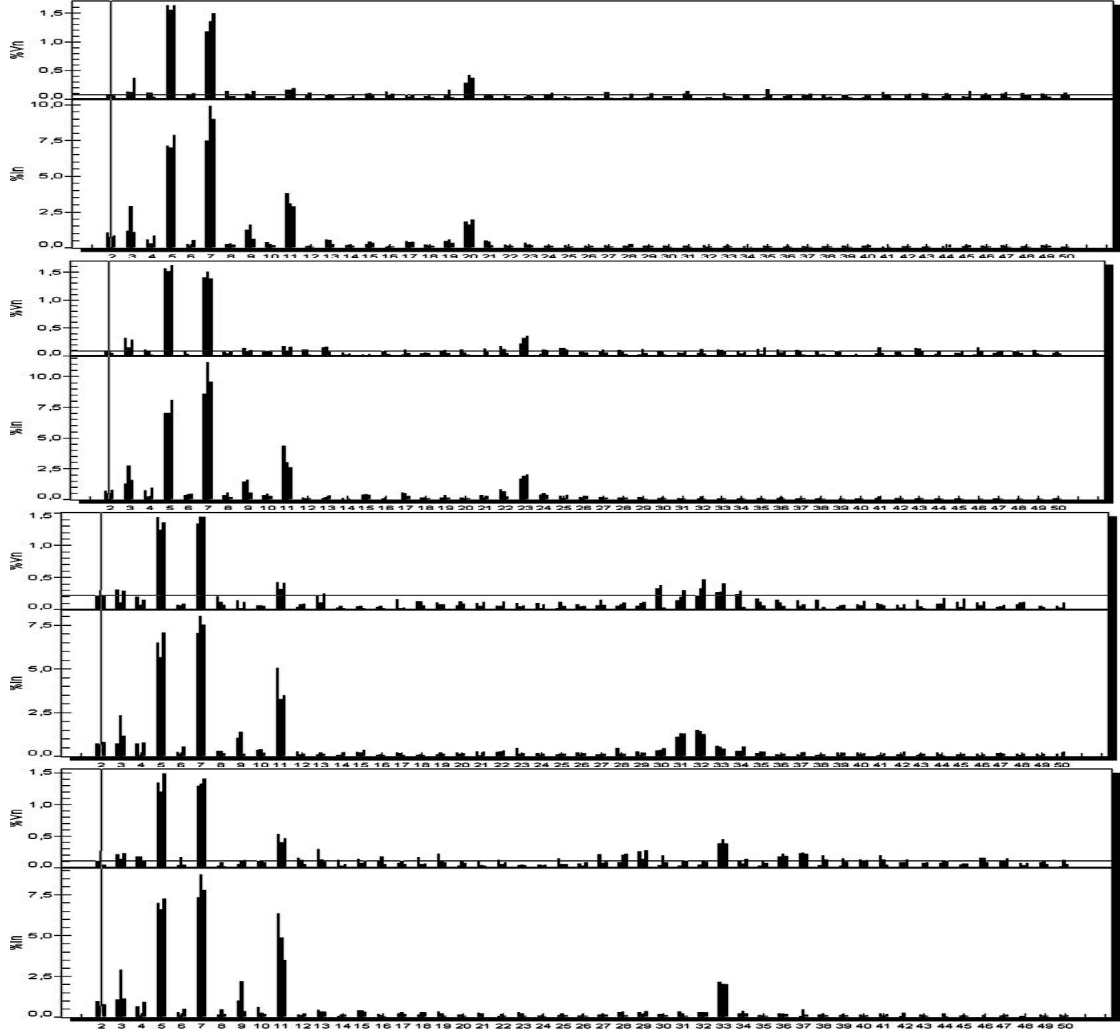
Şekil 7.42. Plastik fabrikası 1 Üç faz THD grafiği.



Şekil 7.43. Plastik fabrikası 1 THD'nin en büyük değerde olduğu durum için akım-gerilim dalga şekilleri.



Şekil 7.44. Plastik fabrikası 1 THD'nin en büyük olduğu durum için akım-gerilim harmonik spektrumları.

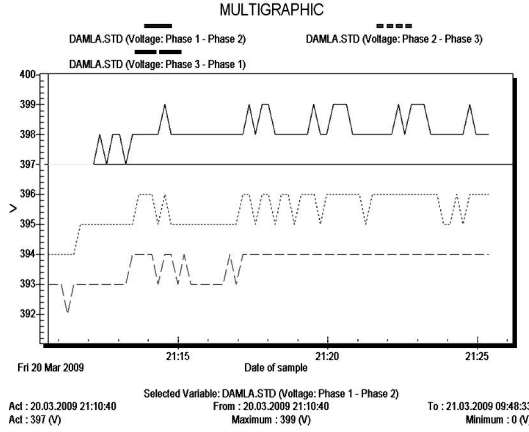


Şekil 7.45. Plastik fabrikası 1 farklı zamanlardaki harmonik spektrumlarının değişimi.

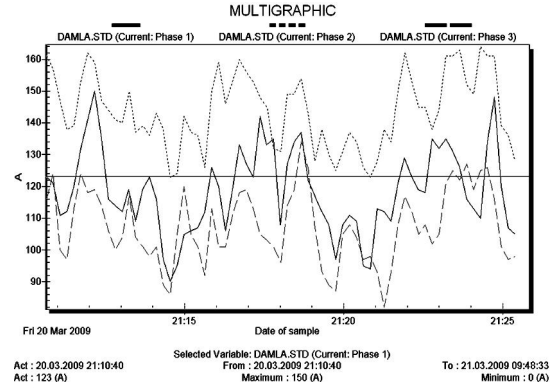
Bu fabrikanın akım THD'si % 15 seviyelerine ulaşmaktadır. Gerilim THD'si ise % 2,2 seviyelerindedir. Baskın harmonikleri 5, 7, 11. harmoniklerdir.

Döküm fabrikalarında 5. harmonik genliğinin 7. harmonik genliğinden büyük olmasına karşın bu fabrikada 7. harmonik daha baskındır. Bazı aralıklarda 3 ve 3'ün katı harmoniklerinin az da olsa genliklerinin artması bu fabrikada kullanılan tek fazlı nonlineer yüklerin varlığını göstermektedir. Organize sanayi bölgesinde yapılan ölçümlerden, sanayide kullanılan yüklerin genellikle 3 fazlı olması nedeniyle 3 ve 3'ün katı harmoniklerin üretilmedikleri görülmüştür. Genellikle üç fazlı nonlineer yüklerde 5, 7, 11 ve bazı uygulamalarda 13. harmonik bileşenleri baskın olarak görülmektedir. Özellikle döküm fabrikalarının bulunduğu sistemlerde 5 ve 7. harmonikler baskın olarak görülür.

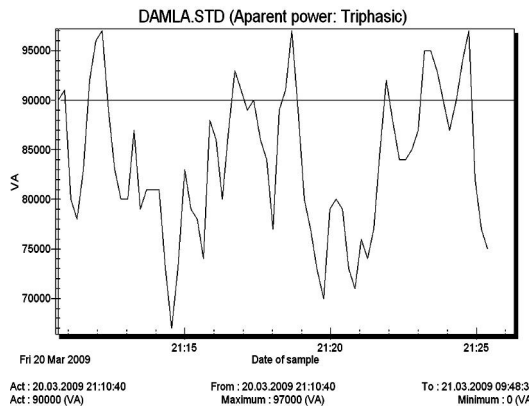
7.1.7. Plastik fabrikası 2



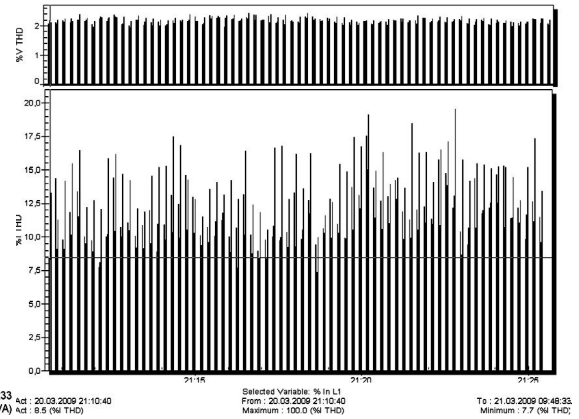
Şekil 7.46. Plastik fabrikası 2 gerilim grafiği.



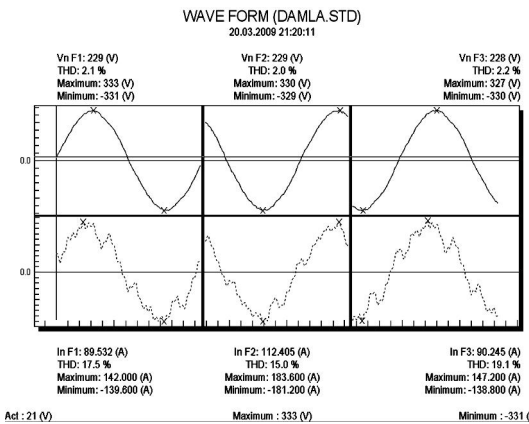
Şekil 7.47. Plastik fabrikası 2 akım grafiği.



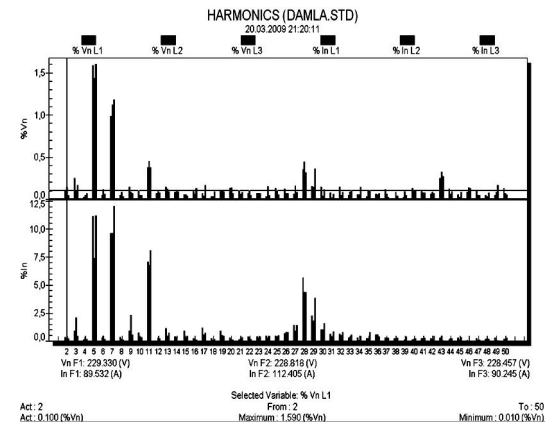
Şekil 7.48. Plastik fabrikası 2 görünür güç grafiği (üç faz toplamı).



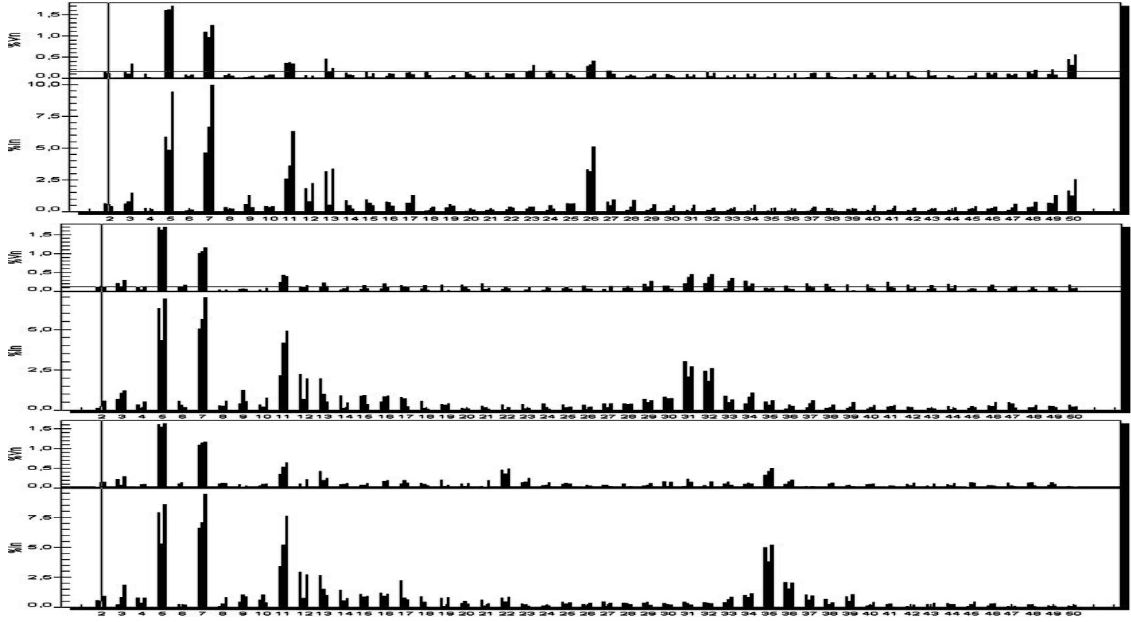
Şekil 7.49. Plastik fabrikası 2 üç faz THD grafiği.



Şekil 7.50. Plastik fabrikası 2 THD'nin en büyük değerde olduğu durum için akım-gerilim dalga şekilleri.



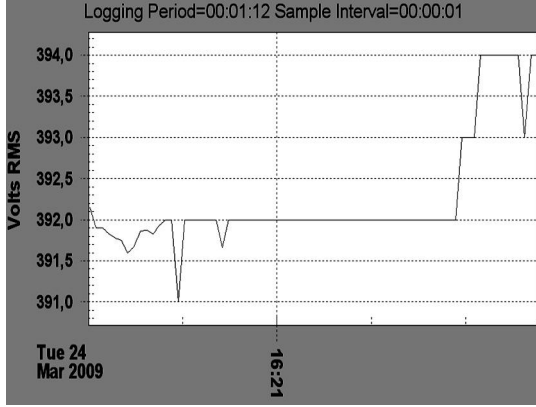
Şekil 7.51. Plastik fabrikası 2 THD'nin en büyük olduğu durum için akım-gerilim harmonik spektrumları.



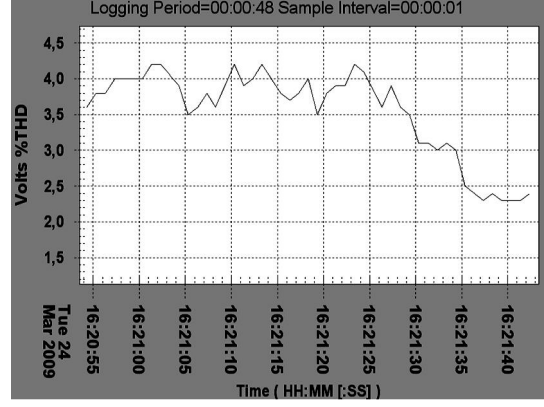
Şekil 7.52. Plastik fabrikası 2 farklı zamanlardaki harmonik spektrumlarının değişimi.

Plastik fabrikası 1'e benzer olarak plastik fabrikası 2'de de benzer harmonik değerler görülmektedir. Akımdaki THD değeri % 15 seviyelerine ulaşmaktadır. Gerilim THD'si ise % 2,2 seviyelerindedir. Baskın harmonikleri 5, 7, ve 11. harmoniklerdir. Bazı zaman dilimlerinde 26, 27,...36. harmoniğe kadar geniş bir frekans spektrumundaki bileşenlerin genlik değerlerinin yükselmesi dikkat çekicidir. Bu değerler fabrikada kullanılan yüksek frekansta çalışan makinelerin ve hız kontrol sürücülerinin farklı zamanlarda farklı hızlarda çalışmalarının sonucunda ortaya çıkmaktadır. Uygulamalarda genellikle sabit hızlarda aynı performansla çalışan yükler bulmak çok zordur. Bu yüklerin enerjilendirilmesi, çalışması, anahtarlanması, kalkınması vb. olaylarda şebeke tarafındaki harmonikler çok farklılık göstermektedir. Böyle farklı karakteristikli yüzlerce makinenin aynı fabrikada kullanıldığı bir durumda harmonikli bileşenlerin zamanla farklılık gösterecektir. Farklı cihazların ürettikleri harmonikli bileşenler açılı farklılıklarından dolayı birbirlerini destekleyebilir ya da sönmüleyebilir. Bu da fabrikanın kurulumunda kullanılacak cihazların harmonik karakteristiklerinin iyi araştırılıp simüle edilmesini gerektirir. Örneğin sürücüler için 6-darbeleri doğrultuculu cihazların yerine 18- darbeleri doğrultucuların kullanılması harmonikli bileşenlerin birbirlerini sönmüleyerek distorsiyon değerinin düşmesine neden olur.

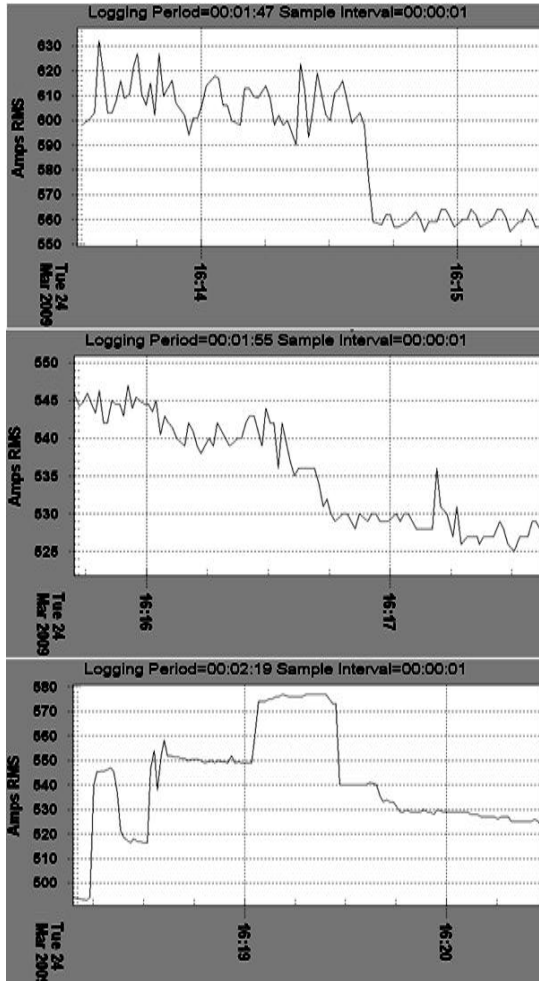
7.1.8.Döküm fabrikası 2



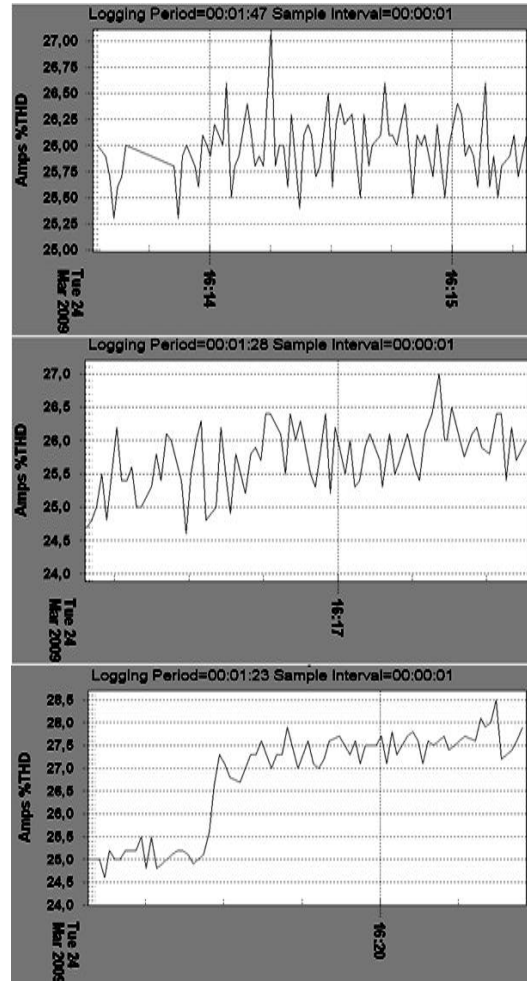
Şekil 7.53. Döküm fabrikası 2 gerilim grafiği.



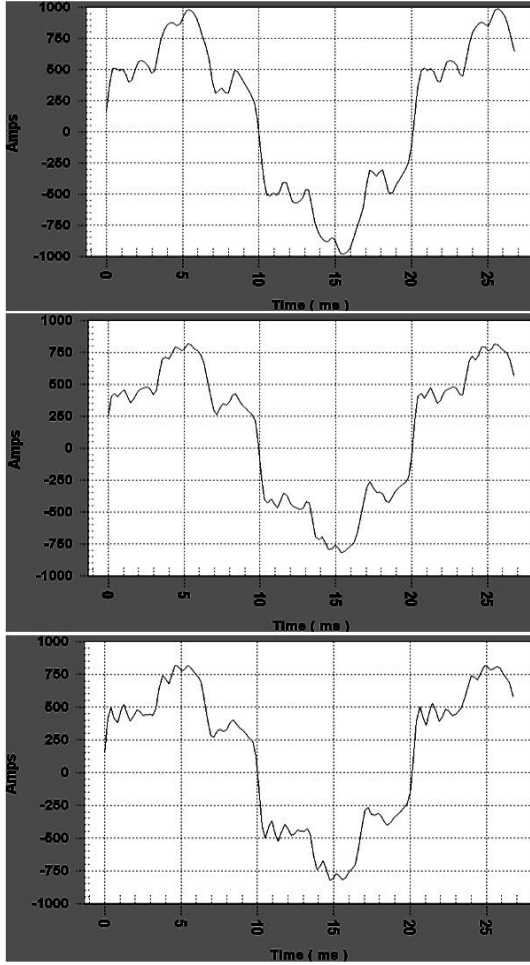
Şekil 7.54. Döküm fabrikası 2 tek faz için gerilim THD değişim grafiği.



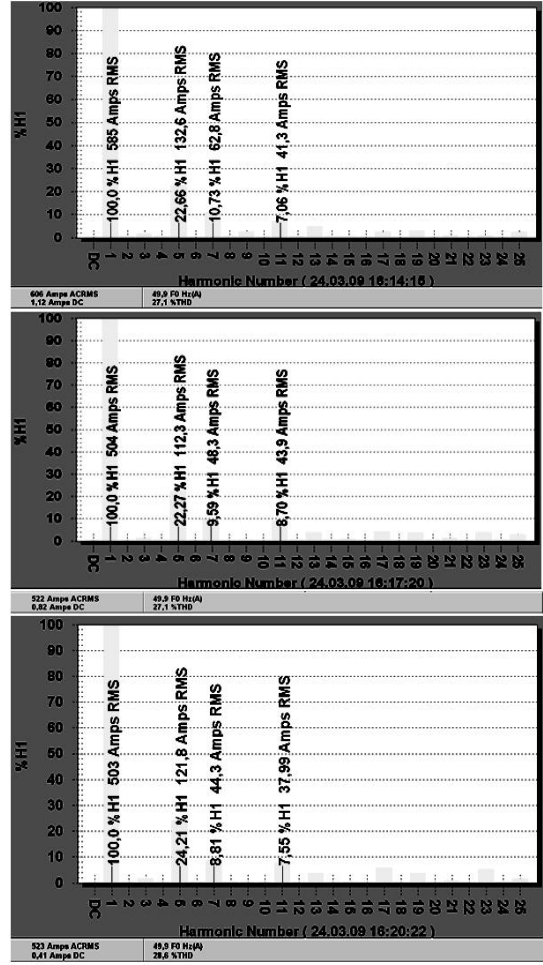
Şekil 7.55. Döküm fabrikası 2 R,S,T fazları akım grafikleri.



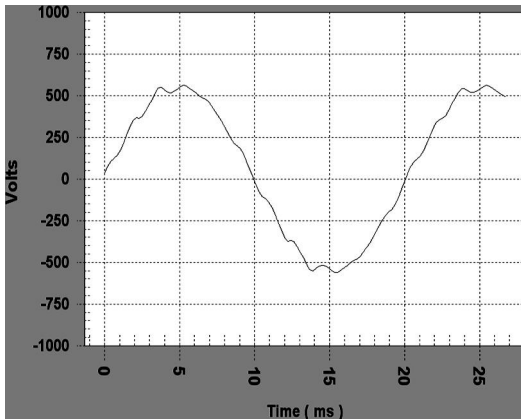
Şekil 7.56. Döküm fabrikası 2 R,S,T fazları akım THD değişim grafikleri.



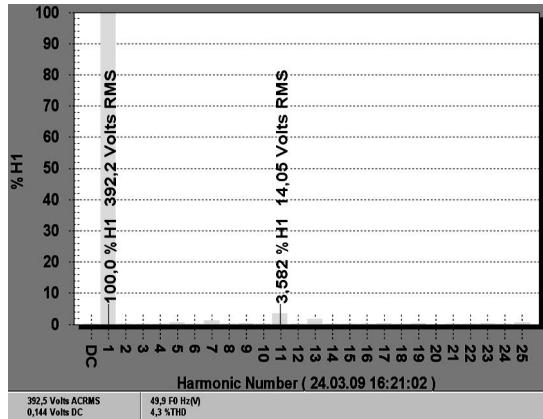
Şekil 7.57. Döküm fabrikası 2 R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım dalga şekilleri.



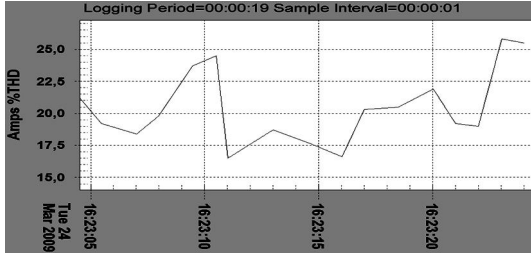
Şekil 7.58. Döküm fabrikası 2 R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım harmonik spektrumları.



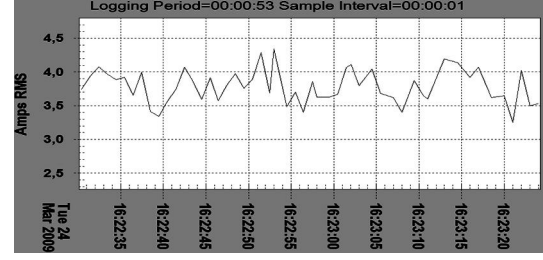
Şekil 7.59. Döküm fabrikası 2 tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki gerilim dalga şekli.



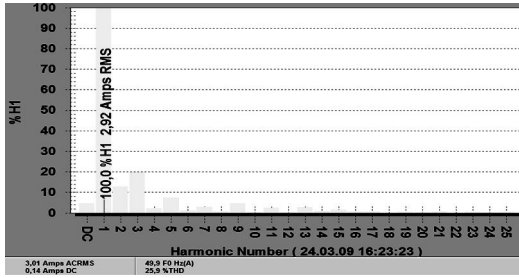
Şekil 7.60. Döküm fabrikası 2 tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki gerilim harmonik spektrumu.



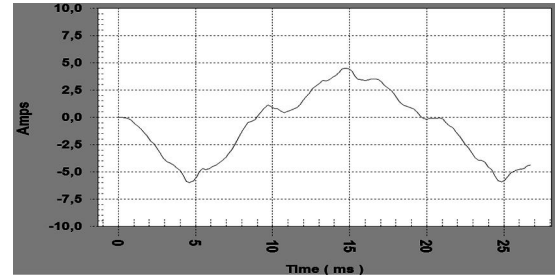
Şekil 7.61. Döküm fabrikası 2 nötr hattı için THD değişim grafiği.



Şekil 7.62. Döküm fabrikası 2 nötr hattı için akımın RMS değeri değişim grafiği.



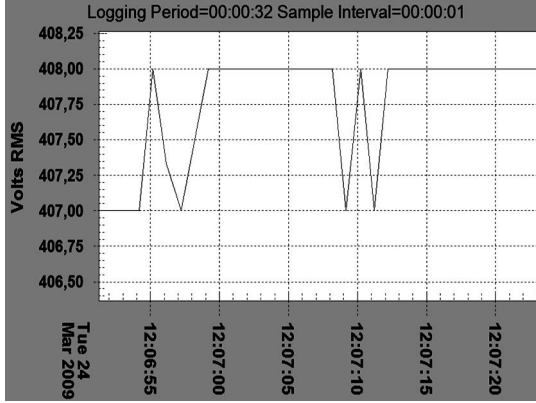
Şekil 7.63. Döküm fabrikası 2 nötr hattı için THD'nin en yüksek olduğu değerdeki akım harmonik spektrumu.



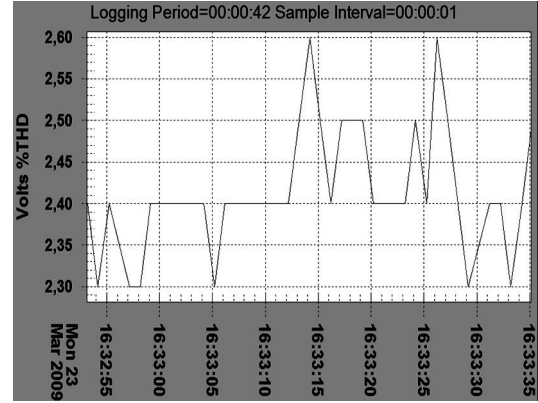
Şekil 7.64. Döküm fabrikası 2 nötr hattı için THD'nin en yüksek olduğu değerdeki akım dalga şekli.

Bu fabrikadan alınan değerlere göre Şekil 7.56'da gösterildiği gibi bazı durumlarda akımdaki THD değeri % 28,5 seviyelerine ulaşmaktadır. gerilim THD'si de % 4,3 seviyesine ulaşmaktadır. Bu değer %5'lik gerilim standart limitini aşmamakla beraber oldukça yakın bir değerdir. Akımdaki %28'lik distorsiyon oldukça yüksek seviyededir. Diğer döküm fabrikalarında olduğu gibi bu fabrikada da 5, 7, 11. harmonikler baskındır. Şekil 7.57'deki grafikte R fazında 585 amperlik temel bileşen akımı geçerken % 22,66 seviyelerindeki 5. harmonik akımı 132,6 A, % 10, 73 seviyesinde olan 7. harmonik 62,8 A ve %7,06 seviyesindeki 11.harmonik ise 41,3 A olmaktadır. Diğer harmonikli bileşenler de hesaba katılırsa toplam harmonikli akımın RMS değeri (temel bileşen ve harmonikli bileşenlerin kareleri toplamının karekökü) 606 A olmaktadır. Böyle bir sistemde 132 amper değerindeki 5. harmonik ve diğer yüksek genlikli baskın harmonikler akımın geçtiği sistem elemanlarında aşırı ısınma, gürültü ve ömür kayıplarına neden olacaktır. Zaten ölçüm yapılan baralarda ve trafoda titreşimle beraber gürültü işitilmekteydi. Bu titreşimler ve ısınmalar zamanla transformatörlerin ömürlerinin azalmasına neden olmaktadır. Normal şartlarda 40 yıla kadar çalışması beklenen transformatörlerin 8-10 yılda izolasyon ya da diğer nedenlerle kullanım dışı kalmalarının sebebi budur.

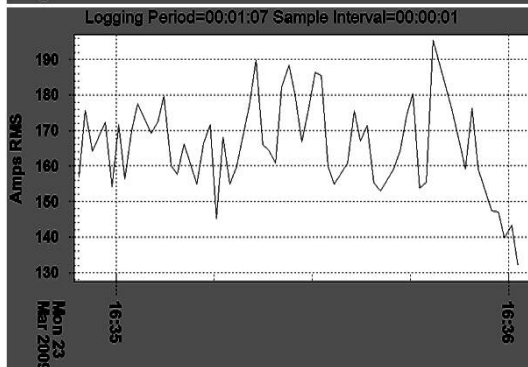
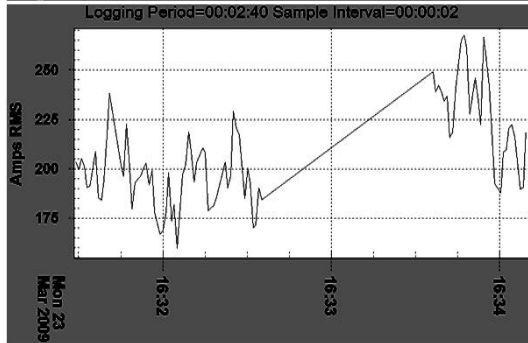
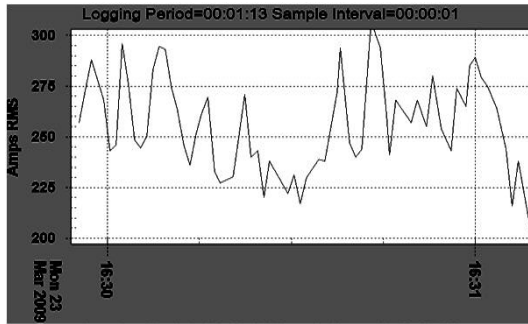
7.1.9. Döküm fabrikası 3



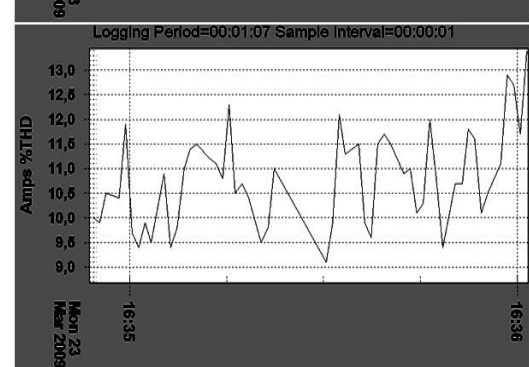
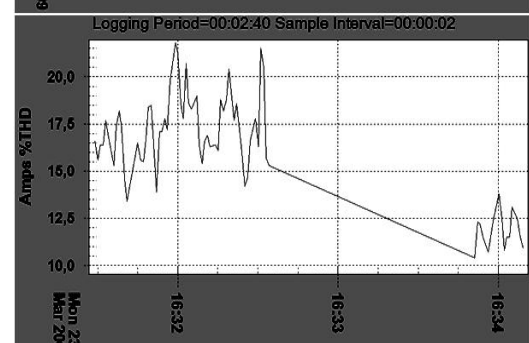
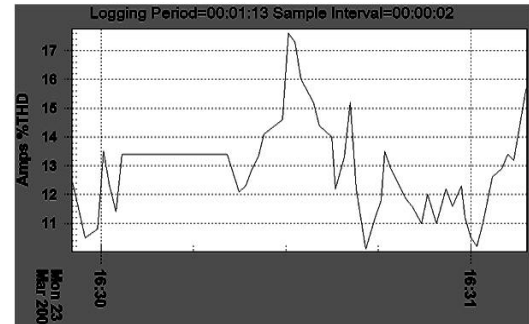
Şekil 7.65. Döküm fabrikası 3 gerilim grafiği.



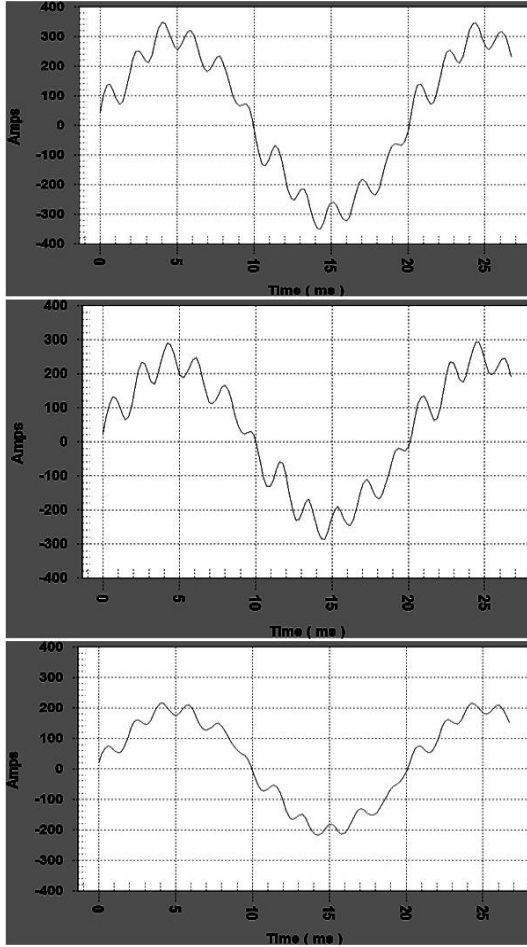
Şekil 7.66. Döküm fabrikası 3 tek faz için gerilim THD değişim grafiği.



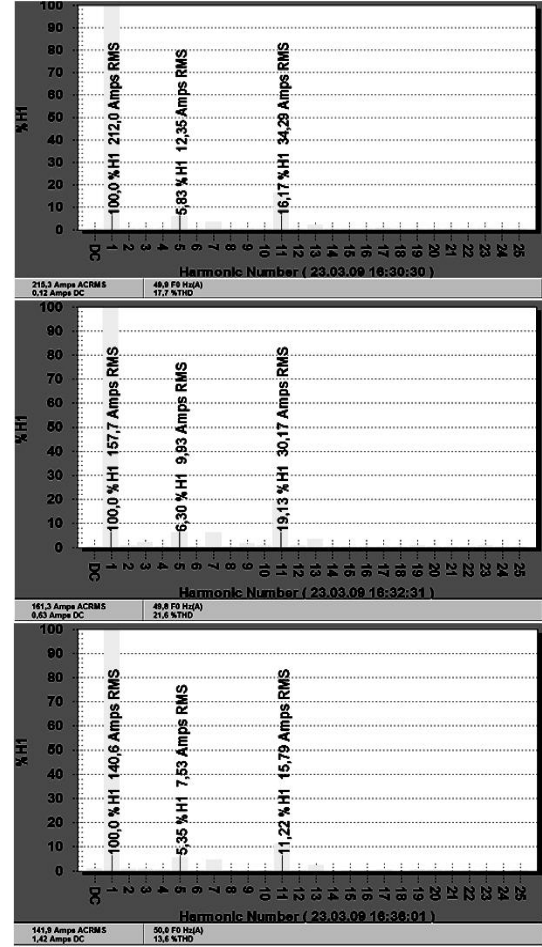
Şekil 7.67. Döküm fabrikası 3 R,S,T fazları akım grafikleri.



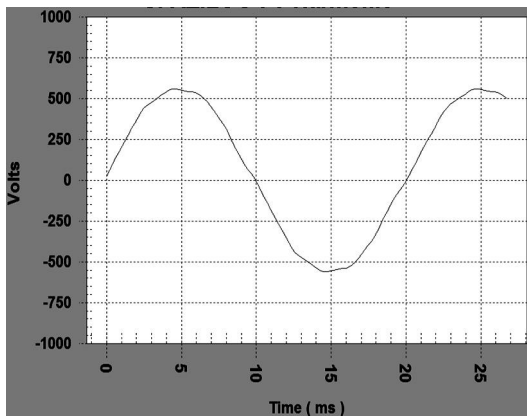
Şekil 7.68. Döküm fabrikası 3 R,S,T fazları akım THD değişim grafikleri.



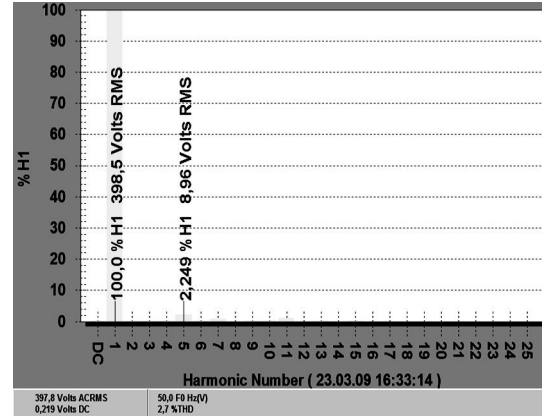
Şekil 7.69. Döküm fabrikası 3 R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım dalga şekilleri.



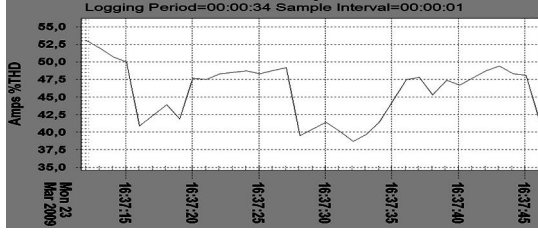
Şekil 7.70. Döküm fabrikası 3 R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım harmonik spektrumları.



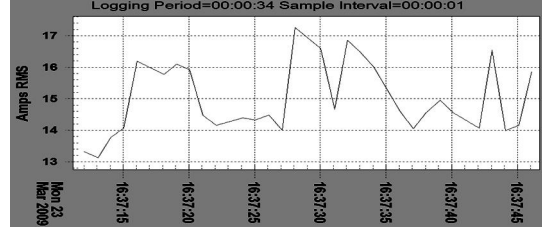
Şekil 7.71. Döküm fabrikası 3 tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki gerilim dalga şekli.



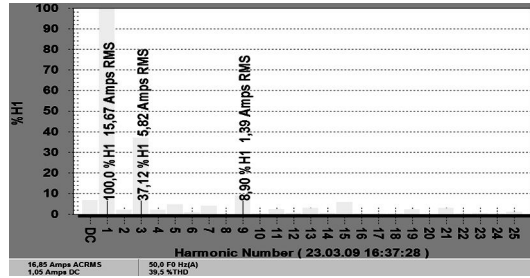
Şekil 7.72. Döküm fabrikası 3 tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerdeki gerilim harmonik spektrumu.



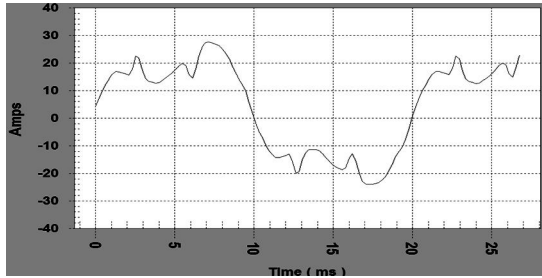
Şekil 7.73. Döküm fabrikası 3 nötr hattı için THD değişim grafiği.



Şekil 7.74. Döküm fabrikası 3 nötr hattı için akımın RMS değeri değişim grafiği.



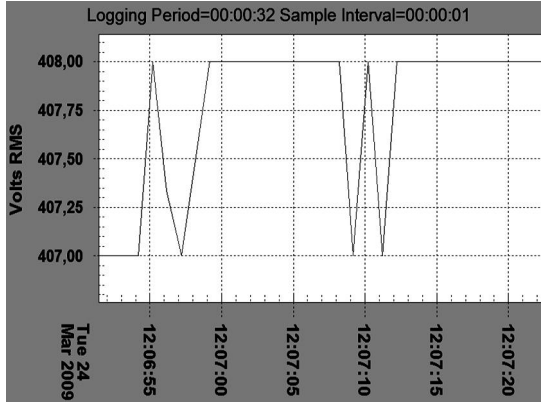
Şekil 7.75. Döküm fabrikası 3 nötr hattı için THD'nin en yüksek olduğu değerdeki akım harmonik spektrumu.



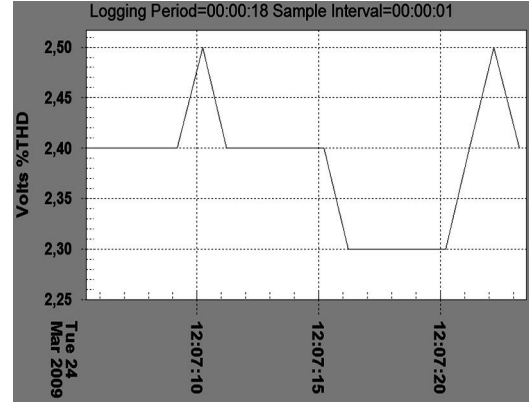
Şekil 7.76. Döküm fabrikası 3 nötr hattı için THD'nin en yüksek olduğu değerdeki akım dalga şekli.

Döküm fabrikası 3 akımdaki THD değeri ölçüm yapılan zaman aralığında % 22,5 değerine ulaşmaktadır. Bu değer IEEE 519-1992 standartlarının üzerinde bir değerdir. Gerilimde ise maksimum %2,6 değerine yükselmektedir. Genlik değeri büyük harmonikli bileşenler 5 ve 11. harmonikli bileşenlerdir. 11. harmonik seviyesi 5. Harmonik seviyesine göre daha yüksek seviyelerdedir. 7. harmonik bileşeni diğerlerine göre biraz daha düşük seviyelerdedir. Şekil 7.66 ve 7.67 grafikleri karşılaştırılırsa akımın RMS değeri attığında akımdaki THD değerinin düştüğü görülmektedir. Bu da sistemde kullanılan temel harmonik bileşenin değeri artarken diğer harmonik bileşenlerin temel bileşene kıyasla daha az arttığını göstermektedir. R,S,T fazlarında 3 ve 3'ün katları harmonik bileşenler yokken nötr hattında bulunmasının nedeni pozitif ve negatif sequense bileşenlerin nötr hattında birbirlerini sönmelerken sıfır sequense bileşenlerin (3 ve 3'ün katı) nötr hattında toplanmasıdır. Dolayısıyla nötr hattında THD değeri yüksektir. Bu durum sanayide pozitif sequense bileşenlerin fazla bulunmamasıyla büyük bir tehlike teşkil etmez. Fakat özellikle tek fazlı yüklerin kullanıldığı diğer ticari ve konutların bulunduğu sistemlerde nötr hattının aşırı yüklenmesine, aşırı ısınmalara ve dolayısıyla arızalara neden olmaktadır. Böyle sistemlerde nötr hattının kesiti faz kesitinin iki katına kadar çıkarılabilir.

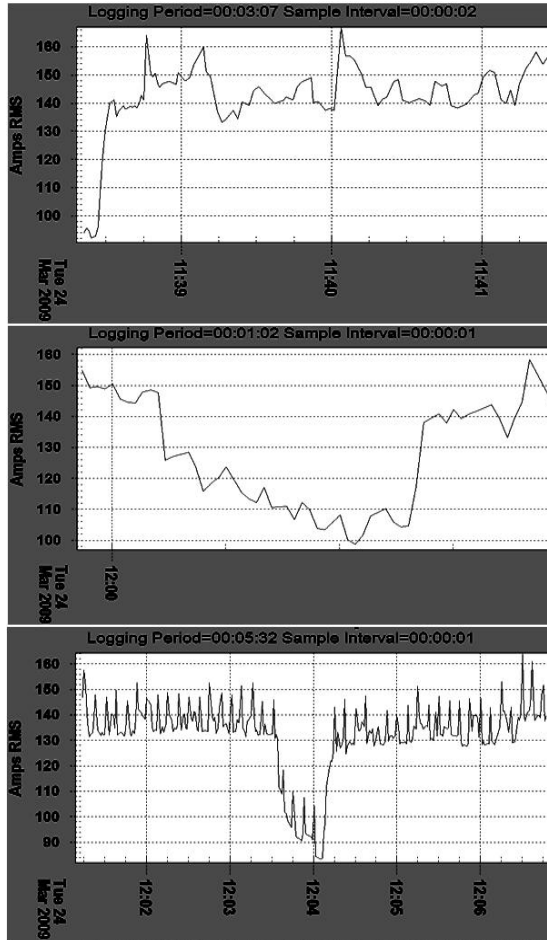
7.1.10. Gıda fabrikası



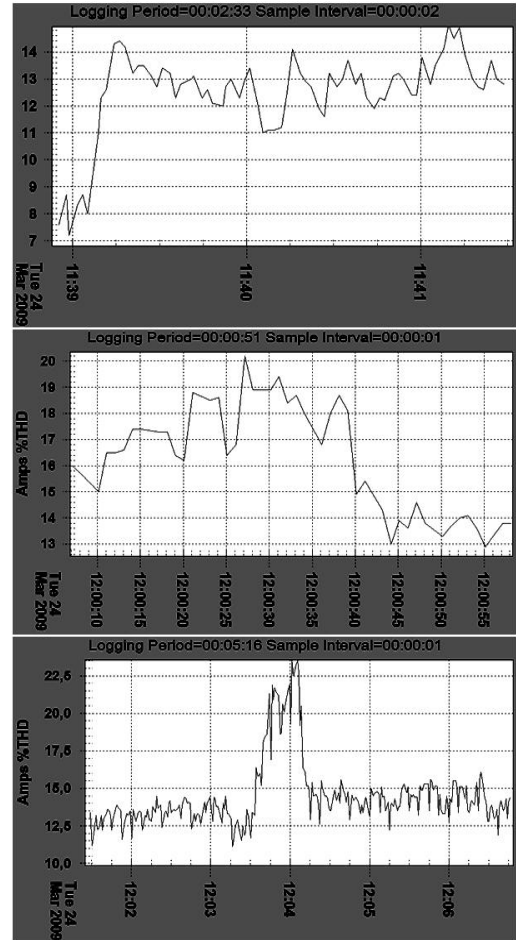
Şekil 7.77. Gıda fabrikası gerilim grafiği.



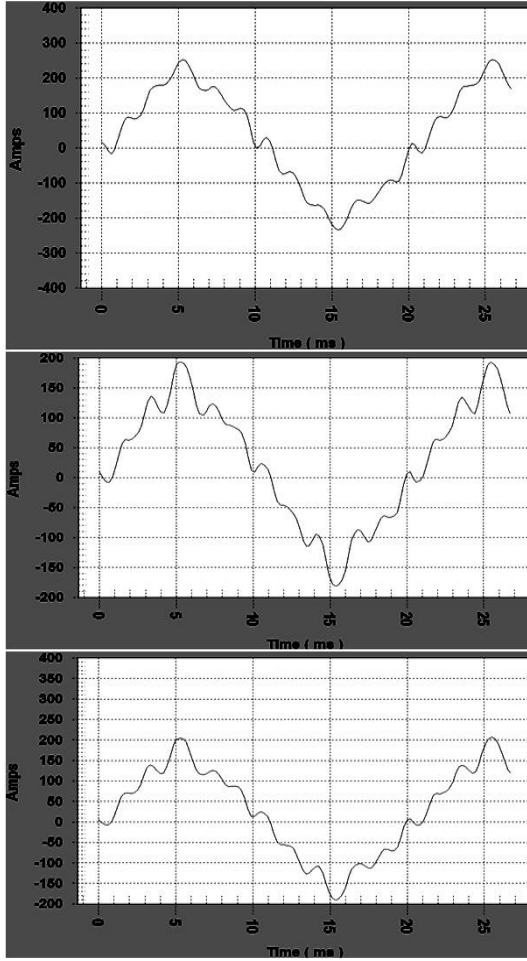
Şekil 7.78. Gıda fabrikası tek faz için gerilim THD değişim grafiği.



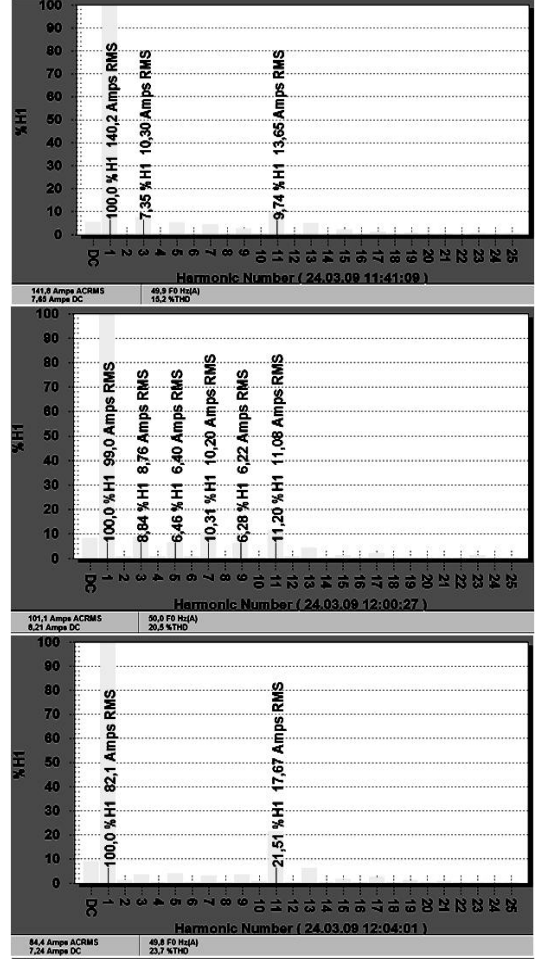
Şekil 7.79. Gıda fabrikası R,S,T fazları akım grafikleri.



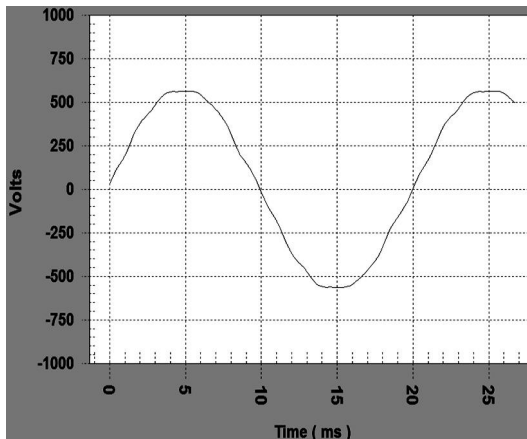
Şekil 7.80. Gıda fabrikası R,S,T fazları akım THD değişim grafikleri.



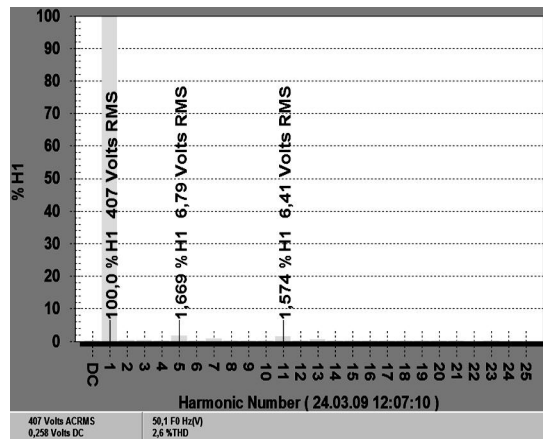
Şekil 7.81. Gıda fabrikası R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım dalga şekilleri.



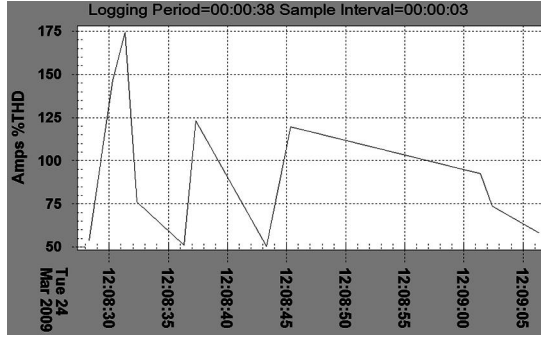
Şekil 7.82. Gıda fabrikası R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım harmonik spektrumları.



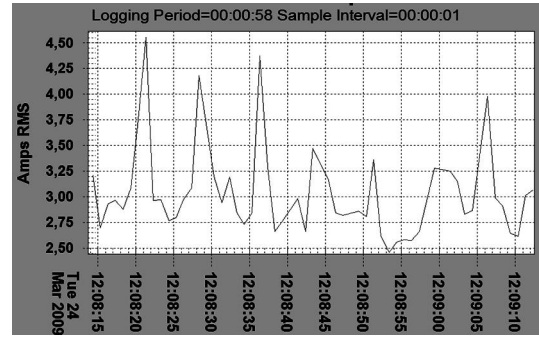
Şekil 7.83. Gıda fabrikası tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki gerilim dalga şekli.



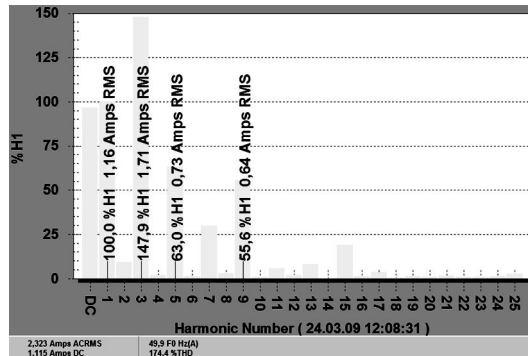
Şekil 7.84. Gıda fabrikası tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki gerilim harmonik spektrumu.



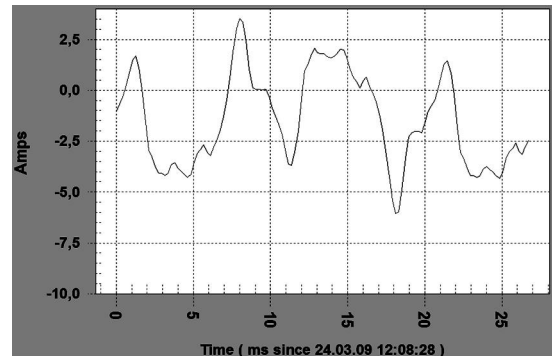
Şekil 7.85. Gıda fabrikası nötr hattı için THD değişim grafiği.



Şekil 7.86. Gıda fabrikası nötr hattı için akımın RMS değeri değişim grafiği.



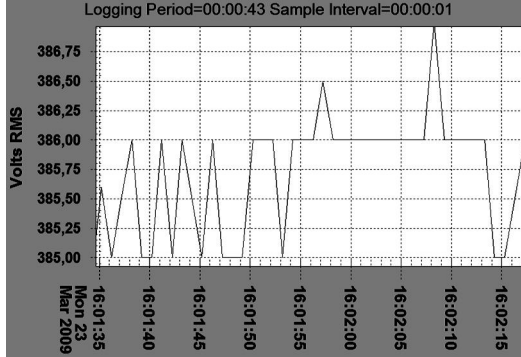
Şekil 7.87. Gıda fabrikası nötr hattı için THD'nin en yüksek olduğu değerdeki akım harmonik spektrumu.



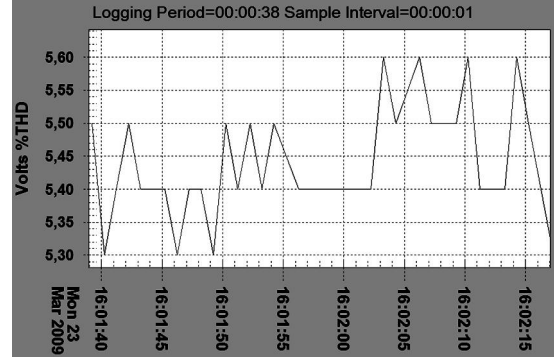
Şekil 7.88. Gıda fabrikası nötr hattı için THD'nin en yüksek olduğu değerdeki akım dalga şekli.

Akımın RMS değeri ile akımdaki THD değerinin değişimi döküm fabrikası 3'deki gibi ters orantılı olarak değişim göstermektedir. Akımın RMS değerinin yükseldiği yerlerde THD değeri azalmaktadır. Bu durum daha önce izah edildiği gibi akımın içindeki temel bileşenin artması ya da azalmasından kaynaklanmaktadır. Akımdaki THD değeri maksimum % 22,5 değerine ulaşmaktadır. Gerilimdeki THD değeri ise % 2,6 değerine ulaşmaktadır. Döküm fabrikası 3'ün değerleri de bu değerlere yakındır. Bunun nedeni ölçüm yapılan bu iki fabrika OG tarafından aynı trafodan beslenmektedir. Bu sebepten bu fabrikaların THD'leri neredeyse birbirlerinin aynıdır. Ölçüm noktası fabrikaların kendi AG trafolarıdır. Bu fabrikaların beslendiği ana trafoda arızalar meydana gelmektedir. Bu nedenle bu iki fabrikanın da elektrikleri kesilmektedir. Standartlara göre bu iki fabrikanın da harmonik filtre kullanması gerekmektedir. Üç ve üçün katı harmoniklerinin yanında 11. harmoniğin yüksek olması önemlidir. Daha önce bahsedildiği gibi yüksek harmonik frekansı daha fazla ısı ve arızaları beraberinde getirmektedir.

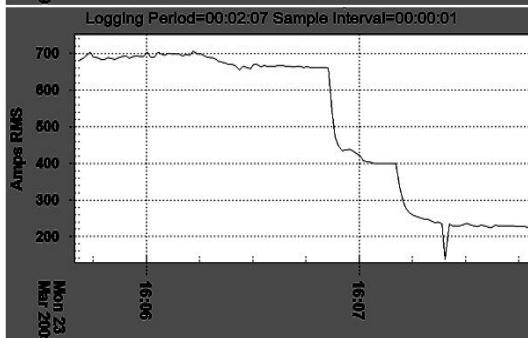
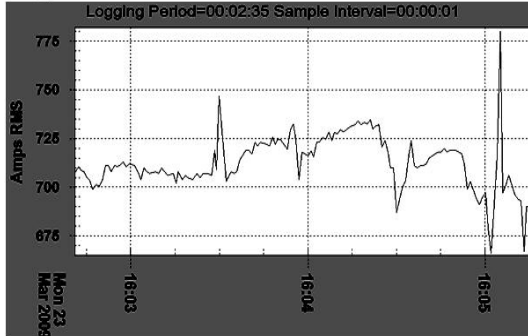
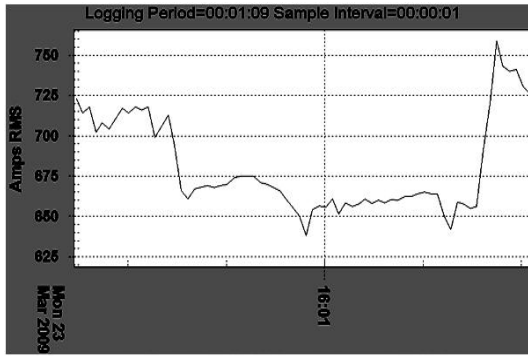
7.1.11. Döküm fabrikası 4



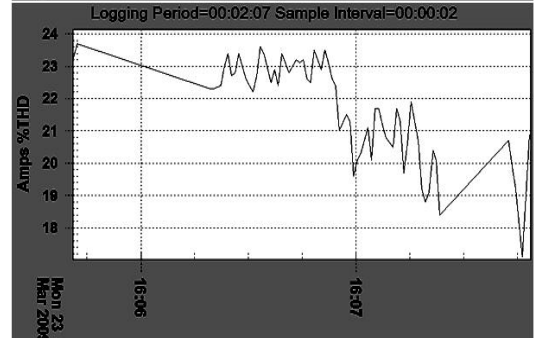
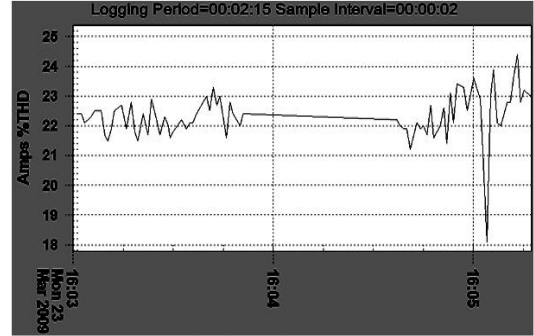
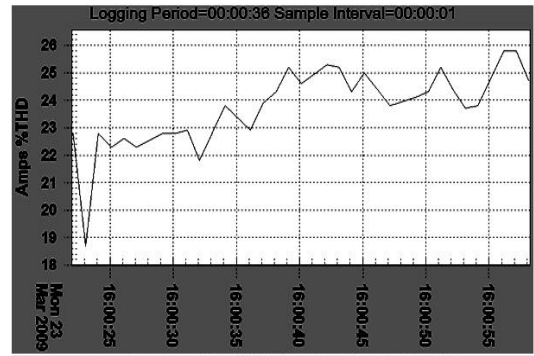
Şekil 7.89. Döküm fabrikası 4 gerilim grafiği.



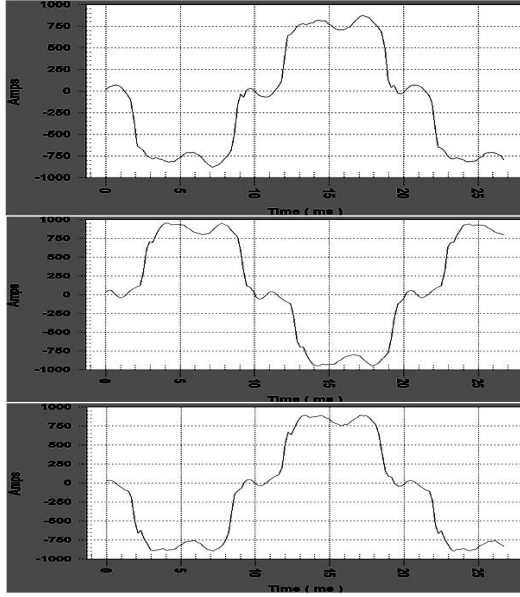
Şekil 7.90. Döküm fabrikası 4 tek faz için gerilim THD değişim grafiği.



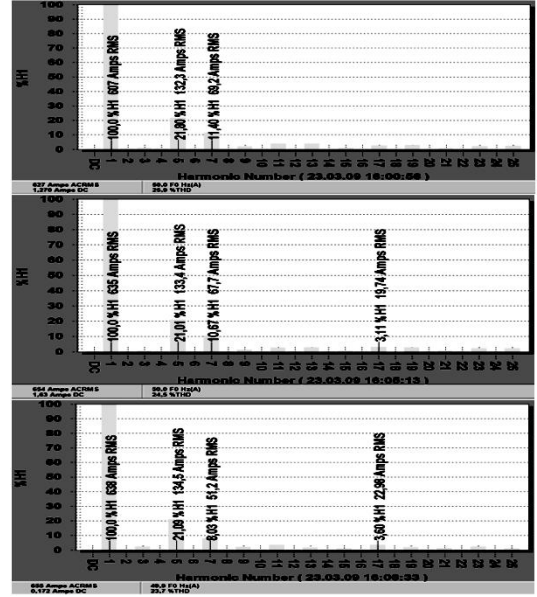
Şekil 7.91. Döküm fabrikası 4 R,S,T fazları akım grafikleri.



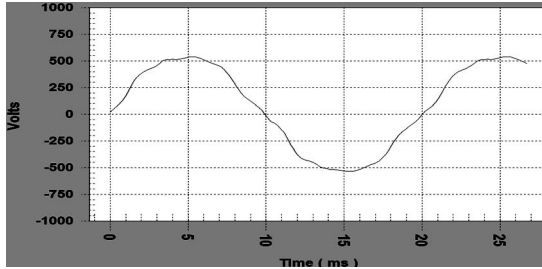
Şekil 7.92. Döküm fabrikası 4 R,S,T fazları akım THD değişim grafikleri.



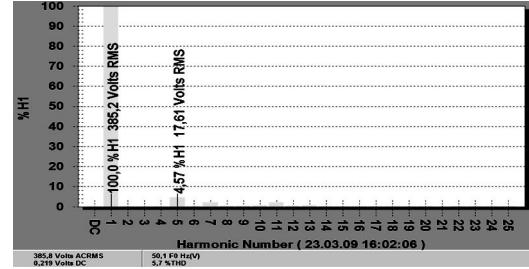
Şekil 7.93. Döküm fabrikası 4 R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım dalga şekilleri.



Şekil 7.94. Döküm fabrikası 4 R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım harmonik spektrumları



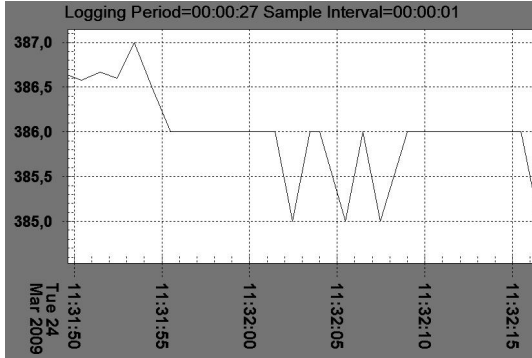
Şekil 7.95. Döküm fabrikası 4 tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki gerilim dalga şekli.



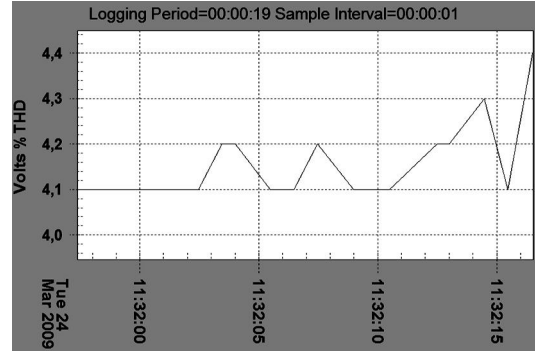
Şekil 7.96. Döküm fabrikası 4 tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerdeki gerilim harmonik spektrumu.

Normal çalışmasında çekilen akımı 760 amper seviyesine kadar çıkabilen döküm fabrikası 4'ün akım THD'si % 26 seviyelerine ve gerilim THD'si ise % 5,7 seviyesine yükselmektedir. Bu iki değer de harmonik standartlarının üzerindedir. Baskın harmonikleri 5 ve 7. harmoniklerdir. Bununla beraber diğer tek harmonikli bileşenler de vardır. 5. ve 7. harmonikli bileşenlerin toplam değeri yaklaşık 200 amper değerindedir. Bu değer gerçekten sistem için tehlikeli bir değerdir. Ve sistemde harmonikli gerilim düşümlerine neden olacaktır. Gerilim distorsiyonundaki yükseklik bu harmonikli akımların sistem empedansı üzerinde yaptığı gerilim düşümünden kaynaklanmaktadır.

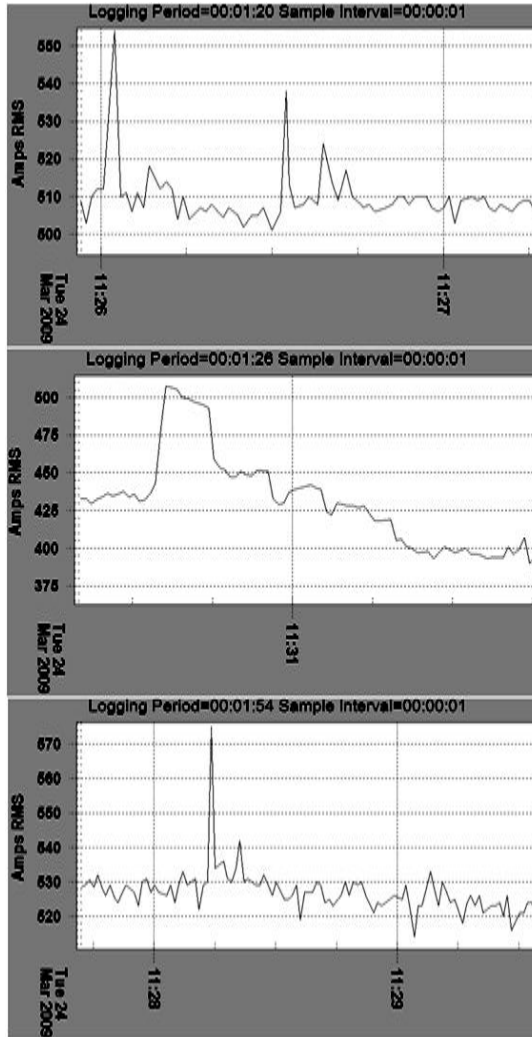
7.1.12. Tekstil fabrikası



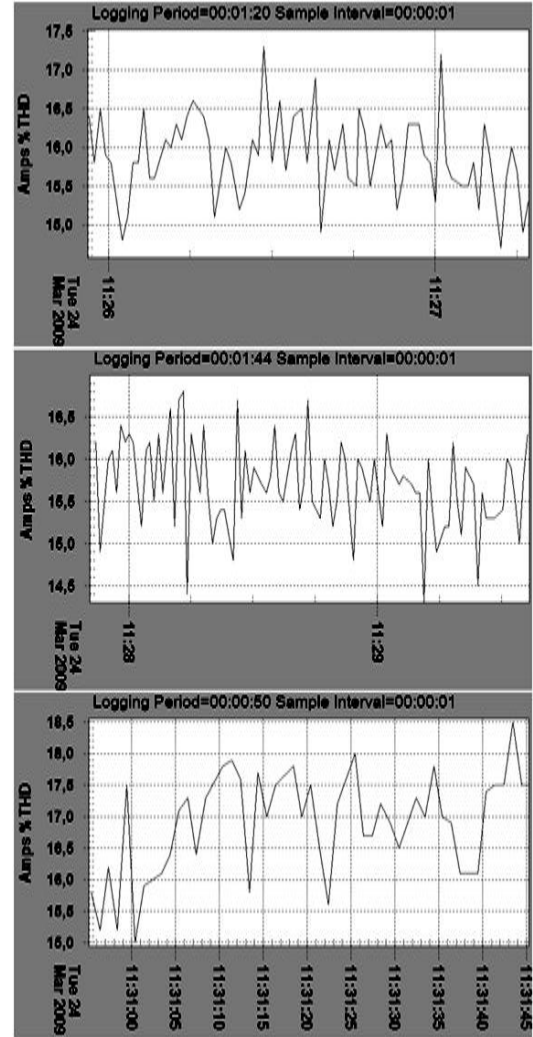
Şekil 7.97. Tekstil fabrikası gerilim grafiği.



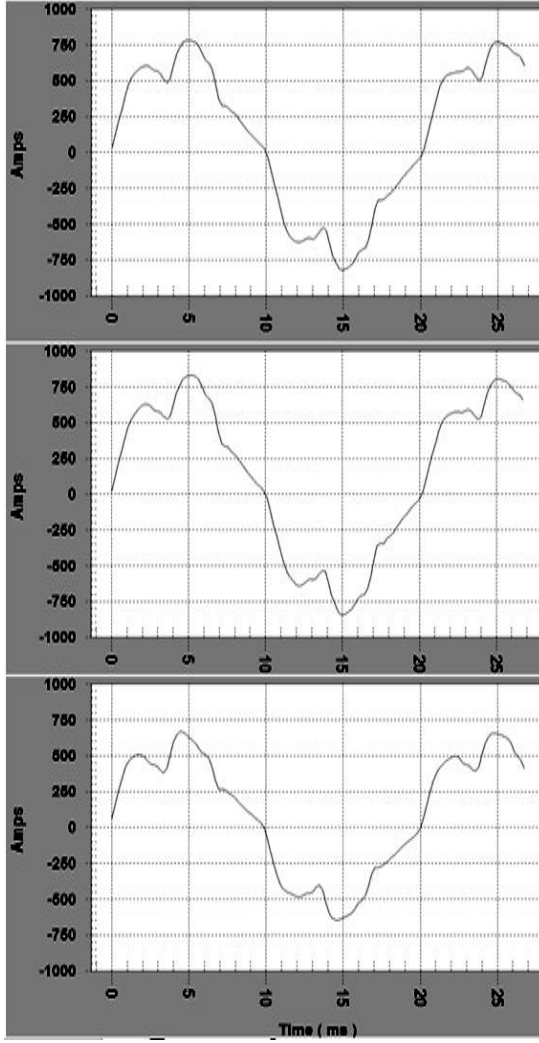
Şekil 7.98. Tekstil fabrikası tek faz için gerilim THD değişim grafiği.



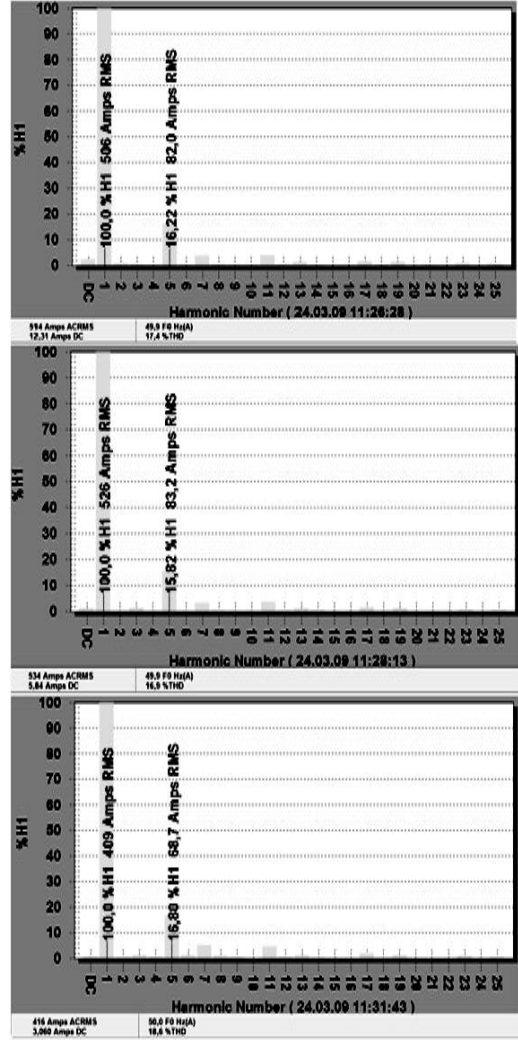
Şekil 7.99. Tekstil fabrikası R,S,T fazları akım grafikleri.



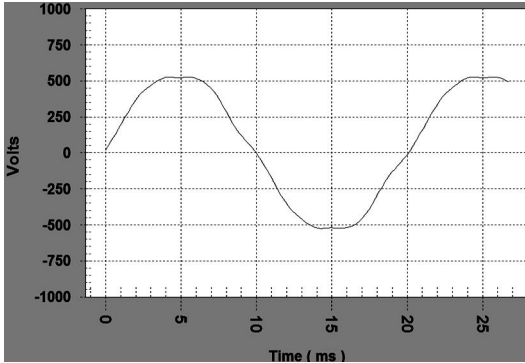
Şekil 7.100. Tekstil fabrikası R,S,T fazları akım THD değişim grafikleri.



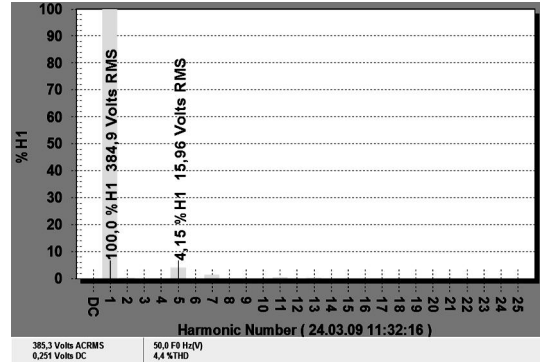
Şekil 7.101. Tekstil fabrikası R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım dalga şekilleri.



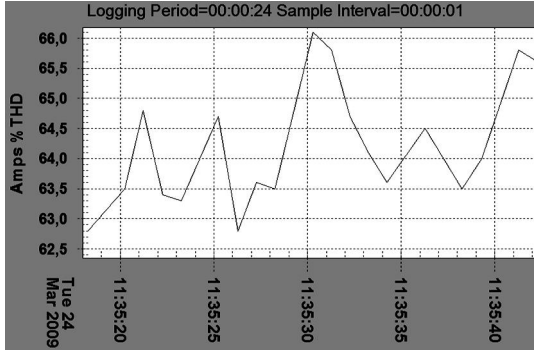
Şekil 7.102. Tekstil fabrikası R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım harmonik spektrumları.



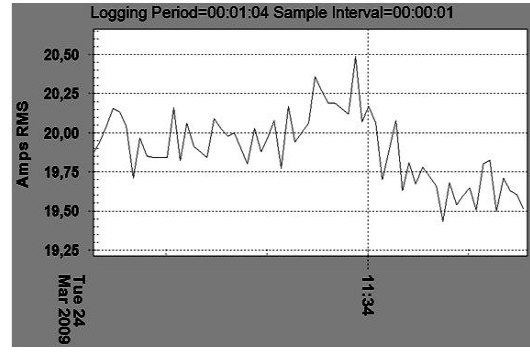
Şekil 7.103. Tekstil fabrikası tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki gerilim dalga şekli.



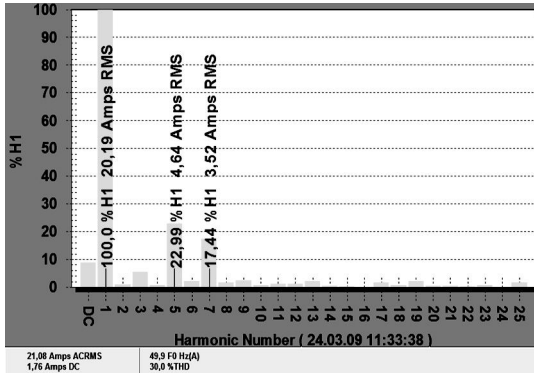
Şekil 7.104. Tekstil fabrikası tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki gerilim harmonik spektrumu.



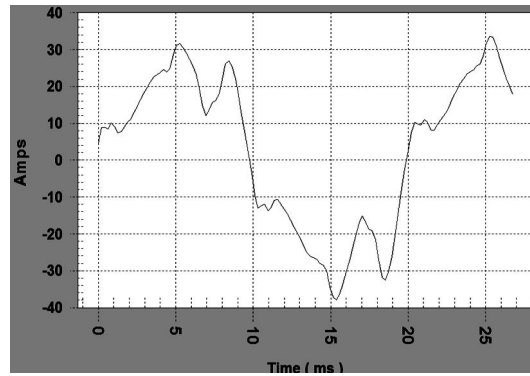
Şekil 7.105. Tekstil fabrikası 3 nötr hattı için THD değişim grafiği.



Şekil 7.106. Tekstil fabrikası fabrikası nötr hattı için akımın RMS değeri değişim grafiği.



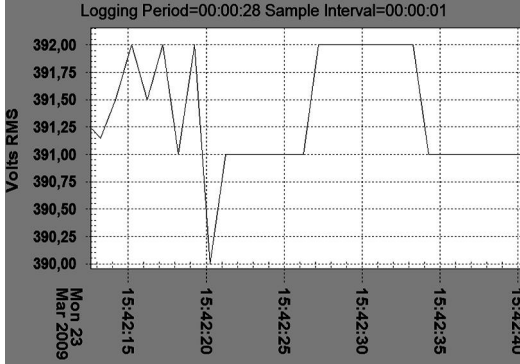
Şekil 7.107. Tekstil fabrikası nötr hattı için THD'nin en yüksek olduğu değerdeki akım harmonik spektrumu.



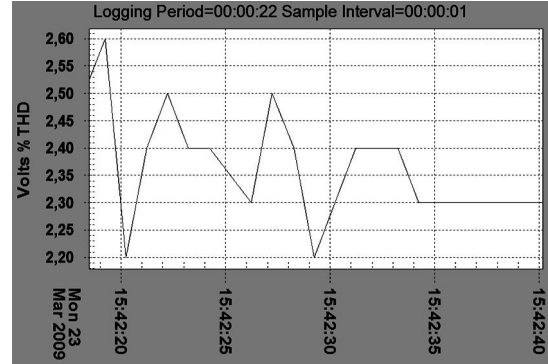
Şekil 7.108. Tekstil fabrikası nötr hattı için THD'nin en yüksek olduğu değerdeki akım dalga şekli.

Akım THD'si % 28,5 seviyelerine ulaşan tekstil fabrikasında kullanılan cihazlar son teknolojiye uyumlu ve oldukça fazla sürücü ve inverterlere sahiptir. Gerilim THD'si ölçüm yapılan aralıkta maksimum % 4.4 seviyelerine ulaşmaktadır. Nötr hattı akımı 20 amper seviyesinde ve % 60 nötr akım THD'sine sahiptir. Çoğunlukla üç fazlı yükler bulunduğundan 5, 7 ve 11. harmonikler mevcuttur. Nötr hattındaki yaklaşık 20 amper seviyesindeki 50 Hz'lik temel bileşen sistemde kullanılan üç fazlı yüklerin dağılımının dengesiz yapıldığını göstermektedir. Ölçüm yapılan bu fabrikada yükler iki guruba ayrılmıştır. Bir tarafta inverterlerin bulunduğu bara diğer tarafta fabrikadaki diğer invertisiz yüklerin akımlarının aktığı bara bulunmaktadır. Yukarıdaki değerler inverterlerin bulunduğu baradan alınmıştır. Diğer barada ise akım THD'si maksimum % 12,5 seviyelerine ulaşmaktadır. Bu fabrikada genellikle kart arızaları oluşmaktadır. Bilindiği gibi harmonikler elektronik elemanlara zara vermekte ya da hatalı çalışmalarına neden olmaktadır.

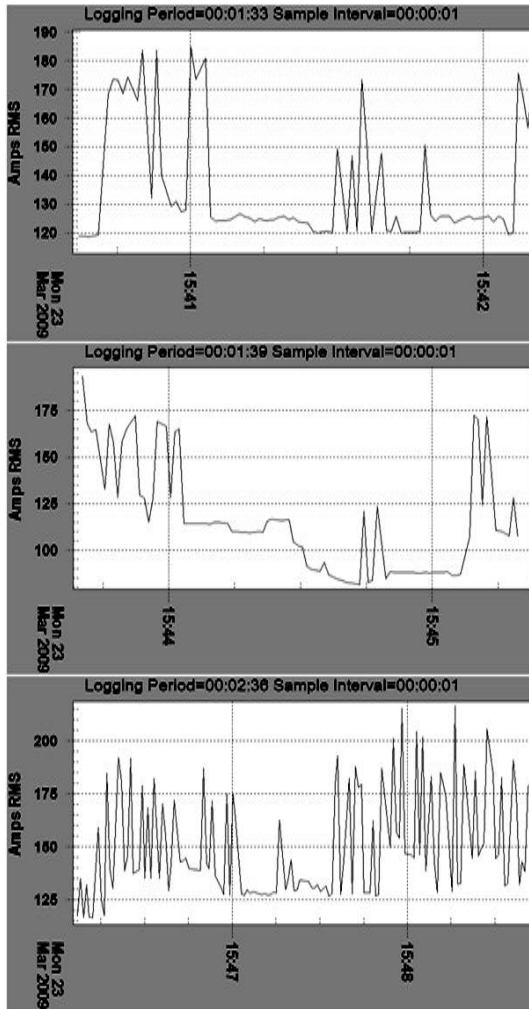
7.1.13. Döküm fabrikası 5



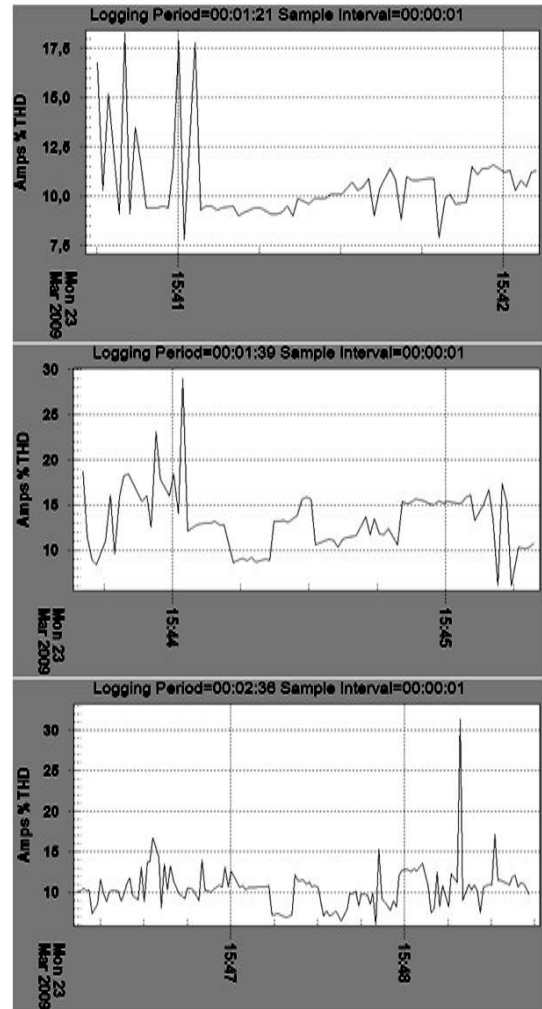
Şekil 7.109. Döküm fabrikası 5 gerilim grafiği.



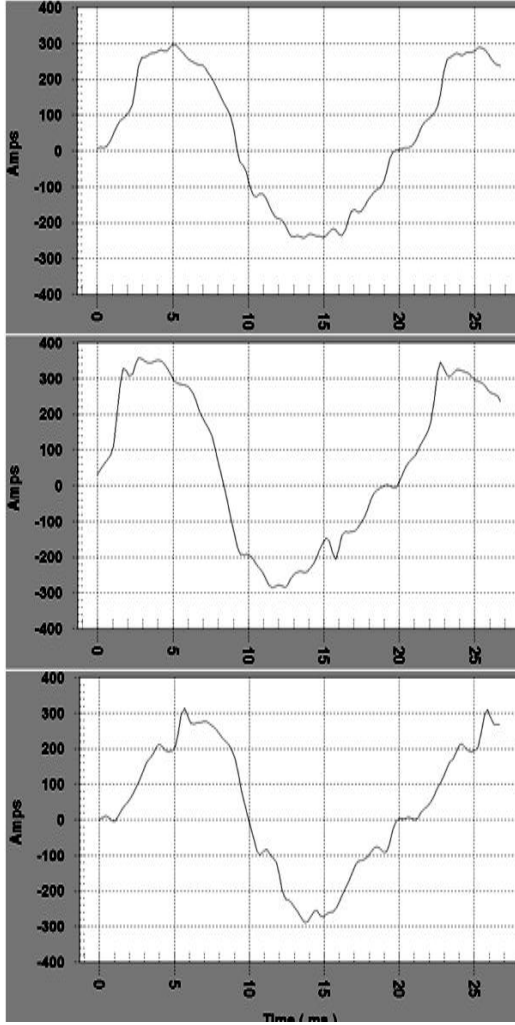
Şekil 7.110. Döküm fabrikası 5 tek faz için gerilim THD değişim grafiği.



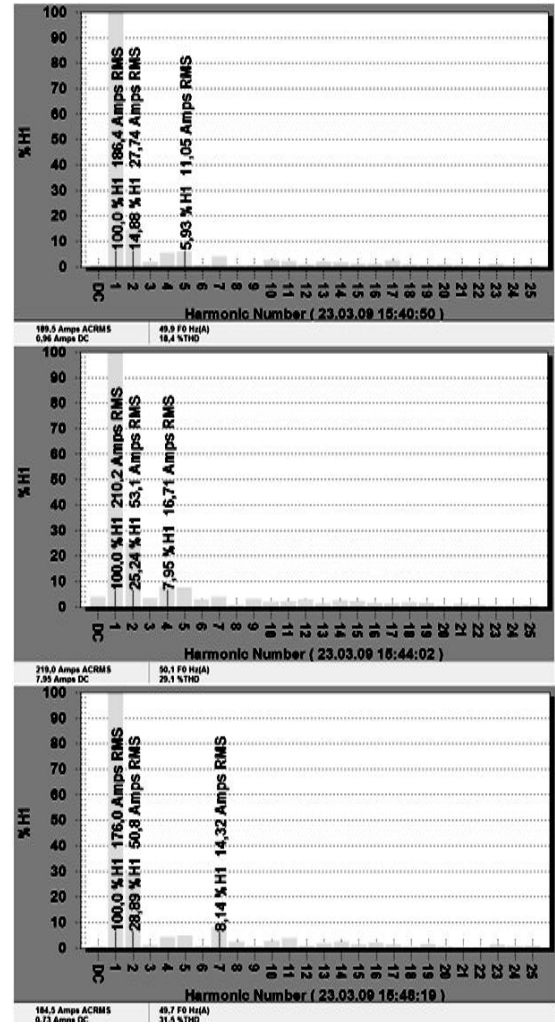
Şekil 7.111. Döküm fabrikası 5 R,S,T fazları akım grafikleri.



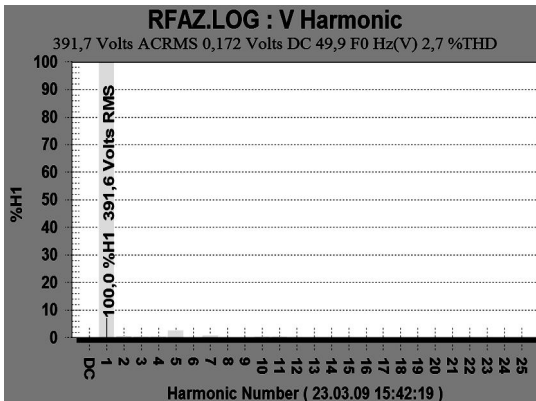
Şekil 7.112. Döküm fabrikası 5 R,S,T fazları akım THD değişim grafikleri.



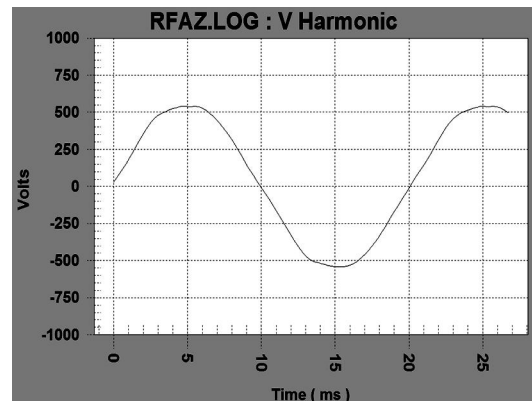
Şekil 7.113. Döküm fabrikası 5 R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım dalga şekilleri.



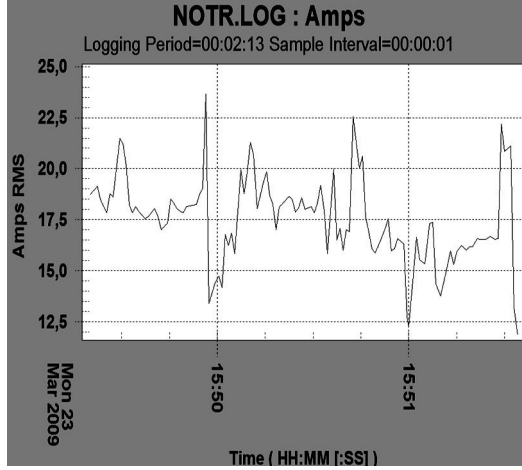
Şekil 7.114. Döküm fabrikası 5 R,S,T fazları için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki akım harmonik spektrumları.



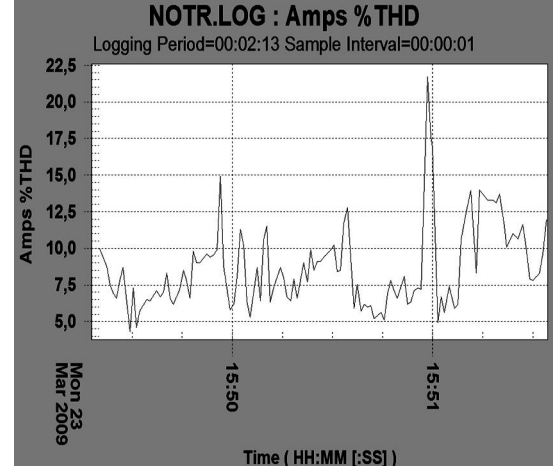
Şekil 7.115. Döküm fabrikası 3 tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki gerilim dalga şekli.



Şekil 7.116. Döküm fabrikası 3 tek faz için THD'nin en yüksek olduğu değerlerdeki gerilim harmonik spektrumu.



Şekil 7.117. Döküm fabrikası 3 nötr hattı için THD değişim grafiği.



Şekil 7.118. Döküm fabrikası 3 fabrikası nötr hattı için akımın RMS değeri değişim grafiği.

Daha önceki bölümlerde verilen bilgilere göre elektrik sistemlerinde genel olarak çift harmonikler bulunmamakta olduğu söylenmişti. Fakat döküm fabrikası 5'te çift harmonik bileşenlerin seviyelerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu da döküm fabrikalarında kullanılan ark fırınlarının nonlineer karakteristiklerinden kaynaklanmaktadır. Bazı ark fırınlarının kullanıldığı sistemlerde tek harmoniklerin yanı sıra çift harmonikler de bulunmaktadır. Bu tip sistemlerin analizi iyi yapılması ve gerekli filtre uygulamalarının gerçekleştirilmesi gerekir.

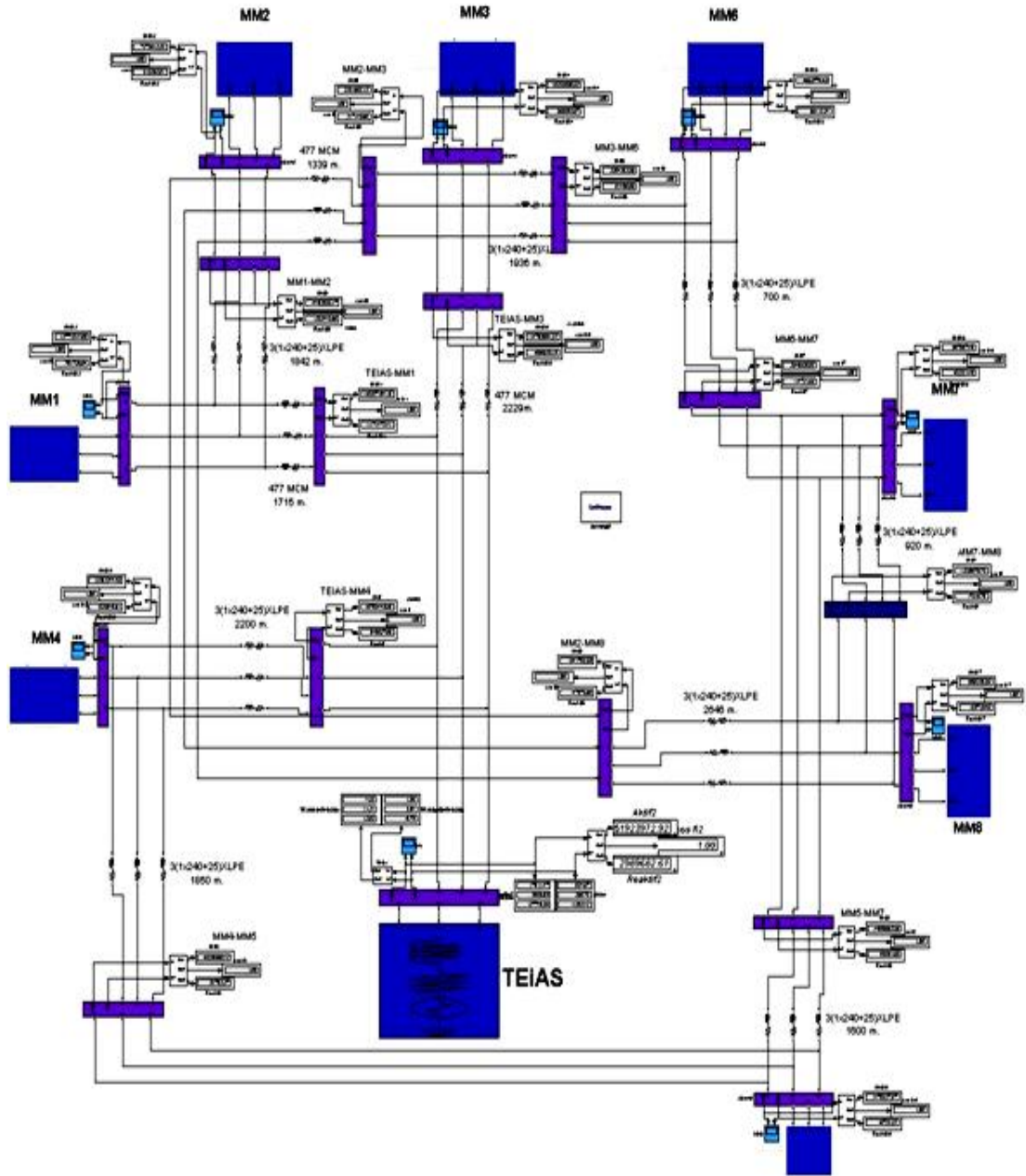
Döküm fabrikası 5'in Akım THD'si % 30 seviyelerine ulaşmaktadır. Gerilimde ise % 2,6 seviyesine ulaşmaktadır. Baskın harmonikler 2, 4, 5 ve 7. harmoniklerdir.

7.2. Simülasyon Çalışmaları

Günümüzde elektrik sistemlerinde enerji kalitesi araştırmalarının yapılabilmesi için birçok yöntem vardır. Simülasyon çalışmaları bunlardan biridir. Sistem parametreleri simülasyona girildikten sonra veriler üzerinde değişiklikler yapılarak sistem hakkında yorum yapılabilmektedir.

Konya 2. ve 3. organize sanayisinden alınan yukarıdaki veriler Matlab&Simulink programının Simpowersystems toolbox'ı kullanılarak sistemin elektriksel modeli Şekil 7.119'daki gibi oluşturulmuştur.

Simülasyonda kullanılan elemanlarla ilgili olarak Tablo 7.2'de TEİAŞ ana besleme kaynağına ait değerleri ve Tablo 7.3'te ise kullanılan transformatörlere ait değerler bulunmaktadır.



Şekil 7.119. Sistemin elektriksel modeli.

Tablo 7.2. TEİAŞ ana besleme kaynağına ait değerler.

| Fazlar | Gerilimin RMS Değeri | Faz Açısı | Frekans (Hz) | Üç Faz Kısa Devre Gücü | X/R Oranı | Kapasitans |
|--------|-------------------------|-----------|-----------------|---------------------------|-----------|------------|
| Va | 34500 V | 0 | 50 | 680 MVA | 323.461 | inf |
| Vb | 34500 V | -120 | 50 | | | inf |
| Vc | 34500 V | 120 | 50 | | | inf |

Tablo 7.3. Dyn1,Dyn11 ve Yyn bağlantı gruplu dağıtım transformatörlerinin değerleri.

| | |
|--|---------------------------|
| Nominal Güç, Frekans Pn[VA], fn[Hz] | [1250e3 , 50] |
| Primer 1 Sargı Bağlantısı | Delta(D1), Delta(D11), Y |
| Sargı Parametreleri [V1 Ph-Ph(Vrms), R1(pu), L1(pu)] | [34500 12.85 0.177] |
| Sekonder 2 Sargı Bağlantısı | Yn, Yn, Yn |
| Sargı Parametreleri [V1 Ph-Ph(Vrms), R1(pu), L1(pu)] | [400 0.001727 2.832e-005] |

Tablo 7.2’de değerleri verilen besleme kaynağının (Konya 3 TM trafosunun) kısa devre gücü ve X/R oranı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Konya 3 TM 154 kV 100 MVA baza göre üç faz kısa devre akımı 21,2355 p.u. (TEİAŞ 2004 puant (kış) üç faz kısa devre etüdü kitapçığından alınmıştır.)

154 kV tarafı için baz akımı;

$$I_{Baz} = \frac{S_{baz}(MVA)}{\sqrt{3} \cdot U_{baz}(KVA)} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 154} = 375,34 \text{ A} \quad (7.1)$$

7.1 eşitliğinden primer tarafının kısa devre gücü;

$$S_k'' = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_k'' = \sqrt{3} \cdot 154 \cdot 21,2355 \cdot 375,35 = 2123 \text{ MVA} \quad (7.2)$$

olarak hesaplanır. Buradan şebekenin empedansı;

$$X_{\text{Şebeke}} = 1,1 \cdot \frac{U_n^2}{S_k''} = 1,1 \cdot \frac{34,5^2}{2123} = 0,616 \text{ ohm} \quad (7.3)$$

Tablo 7.4. Anma üst gerilim seviyelerine göre % u_k değerleri.

| | | | | | |
|------------------------|-------|-----|-----|------|-------|
| Anma Üst gerilimi (kV) | 6-20 | 30 | 60 | 110 | 220 |
| $U_{k=(\%)}$ | 3,5-8 | 5-8 | 7-9 | 9-11 | 11-13 |

$$\%u_k = \% 11$$

Güçleri $S_n > 30$ MVA olan trafolarla $u_r < \% 1$ olduğundan r_{tr} ihmal edilir.

$$\%u_x \cong \%u_k$$

olur. Trafonun pirimer empedansı;

$$X_{tr} = \frac{u_x}{100} \cdot \frac{34,5^2}{100} = 1,309 \text{ ohm} \quad (7.4)$$

olur. Toplam empedans;

$$X_{Toplam} = X_{Şebeke} + X_{tr} = 0,616 + 1,309 = 1,925 \text{ ohm} \quad (7.5)$$

olarak bulunur. Toplam empedanstan kısa devre akımı;

$$I_k'' = 1,1 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot X} = 1,1 \cdot \frac{34,5}{\sqrt{3} \cdot 1,925} = 11,393 \text{ kA} \quad (7.6)$$

Kısa devre gücü ise;

$$S_k'' = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_k'' = S_k'' = \sqrt{3} \cdot 34,5 \cdot 11,393 = 680 \text{ MVA} \quad (7.7)$$

olarak hesaplanır.

$S_n > 30$ MVA olan trafolarla $u_r < \% 1$ olduğundan u_r değeri $\%0.05$ olarak kabul edilirse, 34,5 kV tarafındaki omik direnç değeri;

Tablo 7.5. Anma güçlerine göre % u_r değerleri.

| | | | | | | |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|
| Anma Gücü (MVA) | 0,1 | 0,32 | 1 | 3,2 | 10 | 32 |
| u_r (%) | 2,1-2,3 | 1,7-1,8 | 1,3-1,4 | 1,0-1,1 | 0,7-0,85 | 0,50-0,75 |

Tablo 7.6. Anma güçlerine göre % u_k değerleri.

| | | | |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------|---------------------|
| Anma Gücü (KVA) | 400, 500, 630, 800, | 6300, 8000 | 12500, 16000 |
| | 1000, 1250, 6600, 2000 | 10000 | 20000 |
| % u_k | 6% | 7% | 8% |

$$R_{tr} = \frac{0,05}{100} \cdot \frac{34,5^2}{100} = 5,951 \cdot 10^{-3} \text{ ohm} \quad (7.8)$$

olur. X/R oranı ise;

$$\frac{X}{R} = 323,461 \quad (7.9)$$

olarak bulunur.

Kullanılan 34,5-0,4 kVA, 1250 kVA'lık trafoların primer ve sekonder parametreleri Tablo 6.5 ve 6.6'dan alınan değerlere göre aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Trafonun primer direnci;

$$R_{Primer} = \frac{u_r}{100} \cdot \frac{U_n^2}{100} = \frac{1,35}{100} \cdot \frac{34,5^2}{100} = 12,85 \text{ ohm} \quad (7.10)$$

sekonder omik direnci ise;

$$R_{Sekonder} = 12,85 \cdot \left(\frac{0,4}{34,5}\right)^2 = 1,727 \cdot 10^{-3} \text{ ohm} \quad (7.11)$$

olarak hesaplanır. Trafonun empedans değeri;

$$\%u_k = \sqrt{(\%)u_x^2 + (\%)u_r^2} \quad (7.12)$$

$$u_r = 1,35$$

olduğundan;

$$u_x^2 = u_k^2 - u_r^2 = 6^2 - (1,35)^2 \quad (7.13)$$

$$u_x = 5,846 \quad (7.14)$$

olarak bulunur.

$$X_{\text{Primer}} = \frac{u_x}{100} \cdot \frac{34,5^2}{S_n} = \frac{5,846}{100} \cdot \frac{34,5^2}{1,25} = 55,66 \text{ ohm} \quad (7.15)$$

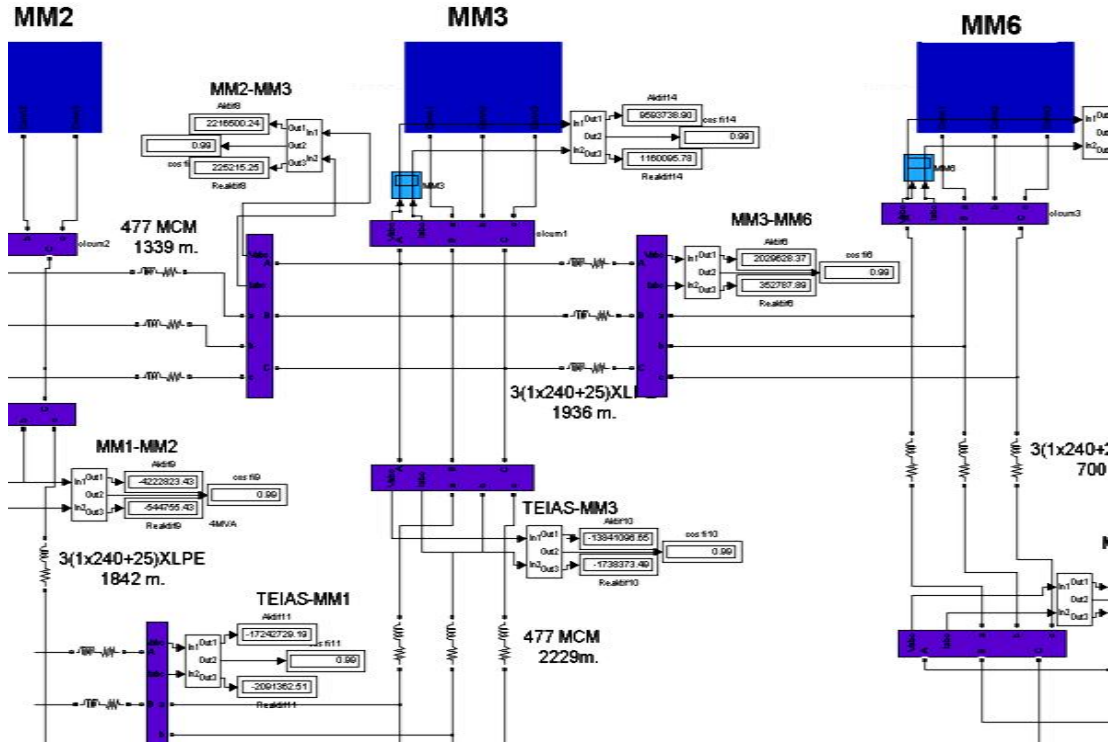
$$X_{\text{Sekonder}} = 55,66 \cdot \left(\frac{0,4}{34,5}\right)^2 = 7,48 \cdot 10^{-3} \text{ ohm} \quad (7.16)$$

$$L_{\text{Primer}} = \frac{55,66}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,177 \text{ H} \quad (7.17)$$

$$L_{\text{Sekonder}} = \frac{7,48 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 2,832 \cdot 10^{-5} \text{ H} \quad (7.18)$$

şeklinde hesaplanır.

Her bir manevra merkezinin aktif ve reaktif güçleri ile birlikte güç faktörleri Şekil 7.120'de gösterildiği gibi giriş ve çıkışlarından ölçülmektedir. Aktif ve reaktif gücün akış yönleri 3 fazlı akım-gerilim ölçüm blokları yardımıyla ölçülebilmektedir.



Şekil 7.120. Manevra merkezinin aktif ve reaktif güçleri ile birlikte güç faktörlerinin ölçümü.

Tablo 7.7. Manevra merkezleri arasında kullanılan kablolar için direnç ve endüktans değerleri.

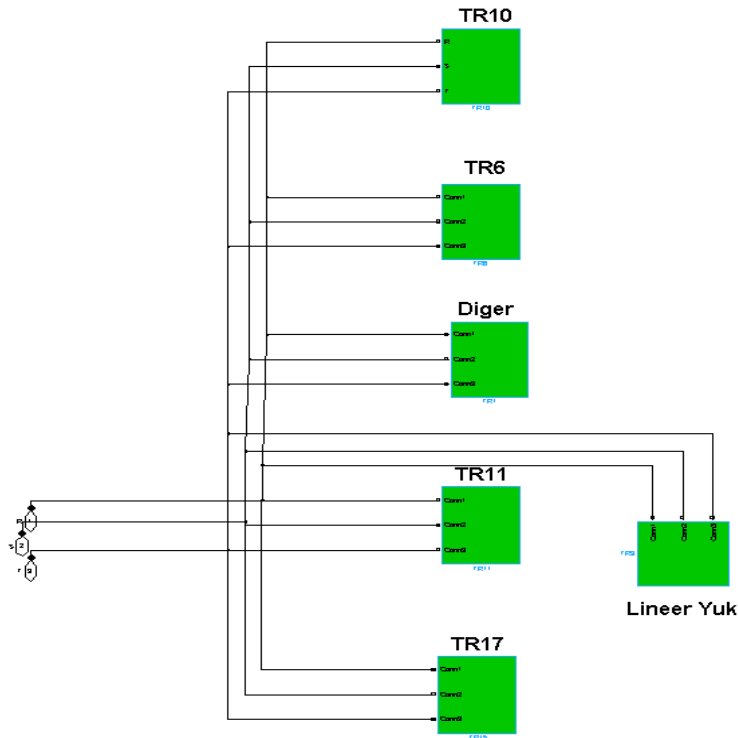
| | 20 °C'de İletken DC direnci (ohm/km) | Çalışma indüktansı (mh/km) |
|--------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| 477 MCM (Hawk) | 0.12 | 0.95 |
| 240 mm ² XLPE | 0.0754 | 0.531 |

Manevra merkezleri arasında havai hat ve yer altı kabloları kullanılmaktadır. Yeraltı kablosu olarak 3(1x240+25) XLPE, havai hat iletkeni olarak da 477 MCM (Hawk) iletkenleri kullanılmaktadır. Dağıtım şebekesinden alınan harmonikli akım bileşenlerinin simülasyon sisteminde gerçek değerlere yakın gerilim distorsiyonu oluşturabilmesi için hatların mesafelerine göre hat empedansları da hesaplanması gerekmektedir. Kullanılan kablo çeşidine göre ve hatların uzunluklarına göre hat empedansları Tablo 7.7'deki kablo parametrelerine göre hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 7.8'de gösterilmektedir.

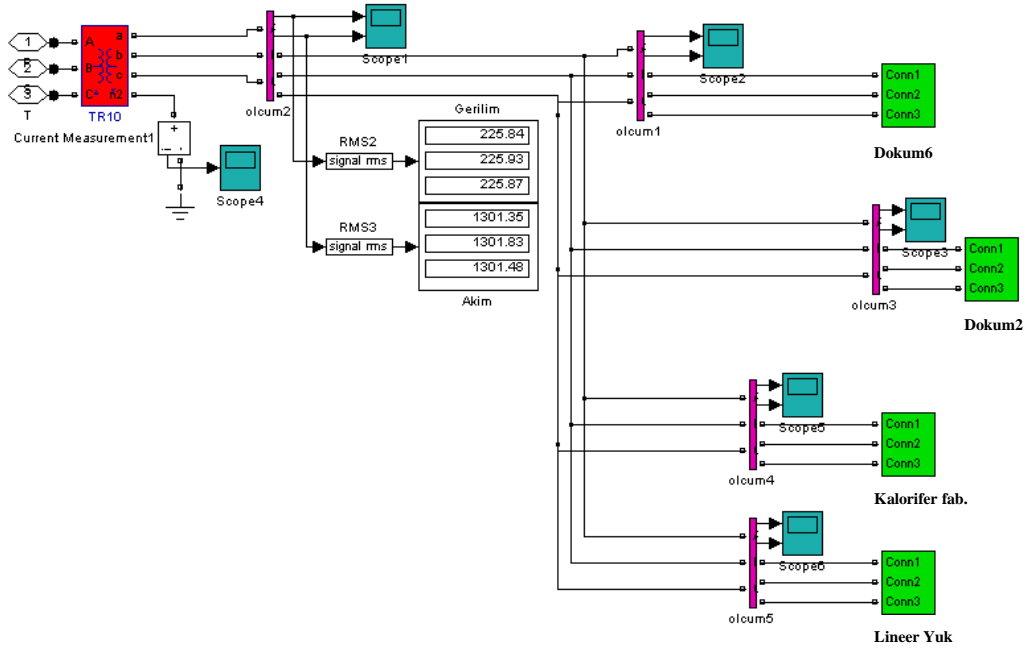
Tablo 7.8. Hat mesafelerine göre omik direnç ve endüktans değerleri.

| Hat | Kullanılan Kablo Cinsi | Uzunluğu | Hat uzunluklarına göre omik direnç ve endüktans değerleri | |
|-----------|------------------------|----------|---|-------------|
| TEİAŞ-MM1 | 477 MCM | 1715mt | 0.2058 ohm | 0.5145 mH |
| MM1-MM2 | 3(1x240+25)XLPE | 1842mt | 0.1388 ohm | 0.9781 mH |
| MM2-MM3 | 477 MCM | 1339mt | 0.1606 ohm | 0.4017 mH |
| MM2-MM8 | 3(1x240+25)XLPE | 2646mt | 0.1995 ohm | 1.407 mH |
| TEİAŞ-MM4 | 3(1x240+25)XLPE | 2200mt | 0.1658 ohm | 1.168 mH |
| MM4-MM5 | 3(1x240+25)XLPE | 1850mt | 0.13949 ohm | 0.9842 mH |
| MM5-MM7 | 3(1x240+25)XLPE | 1600mt | 0.1206 ohm | 0.8512 mH |
| MM3-MM6 | 3(1x240+25)XLPE | 1936mt | 0.145977 ohm | 1.029952 mH |
| MM6-MM7 | 3(1x240+25)XLPE | 700mt | 0.05278 ohm | 0.3724 mH |
| TEİAŞ-MM3 | 477 MCM | 2229mt | 0.2676 ohm | 0.669 mH |
| MM7-MM8 | 3(1x240+25)XLPE | 920mt | 0.06936 ohm | 0.489 mH |

Her bir manevra merkezinin içinde o manevra merkezinden beslenen fabrikaları temsil eden yükler bulunmaktadır. Manevra merkezlerinin güçleri Konya Organize Sanayi Bölgesi Müdürlüğünden alınmıştır. Dağıtım şebekesinde yapılan ölçümlerden elde edilen değerler ilgili trafoların değerleri olarak simülasyona girilmiş, dağıtım şebekesinde ölçümü yapılmayan diğer trafoların değerleri ise Konya Organize Sanayi Bölgesi Müdürlüğünden alınan değerlere göre “Diğer trafolar” adında simülasyona girilmiştir. Şekil 7.121’de MM1’den beslenen trafolar gösterilmiştir. Simülasyonda harmonikli fabrikaların harmoniksiz fabrikalara etkilerinin incelenmesi için her manevra merkezlerine lineer yükler eklenmiştir.

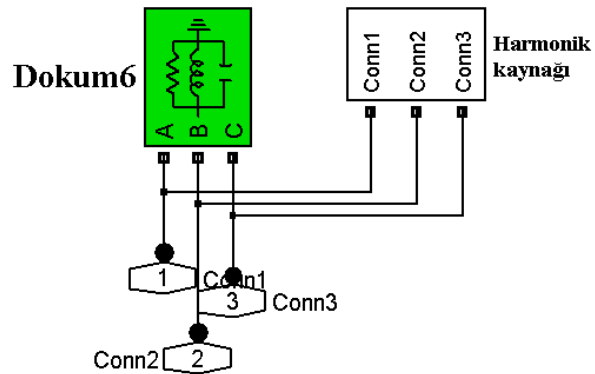


Şekil 7.121. MM1'den beslenen trafolar.

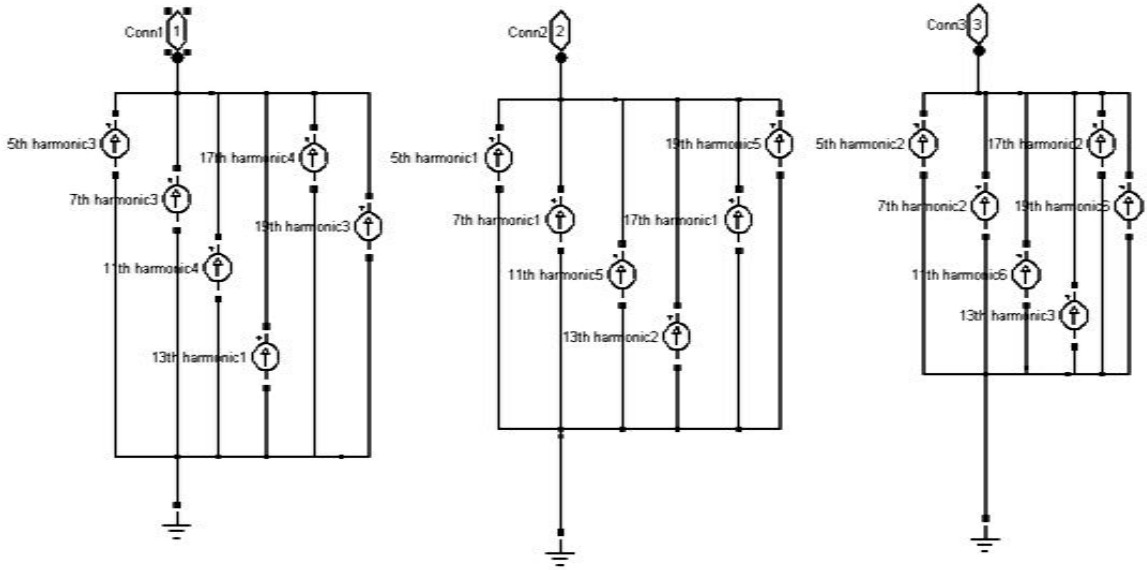


Şekil 7.122. TR10 trafosundan beslenen fabrikalar.

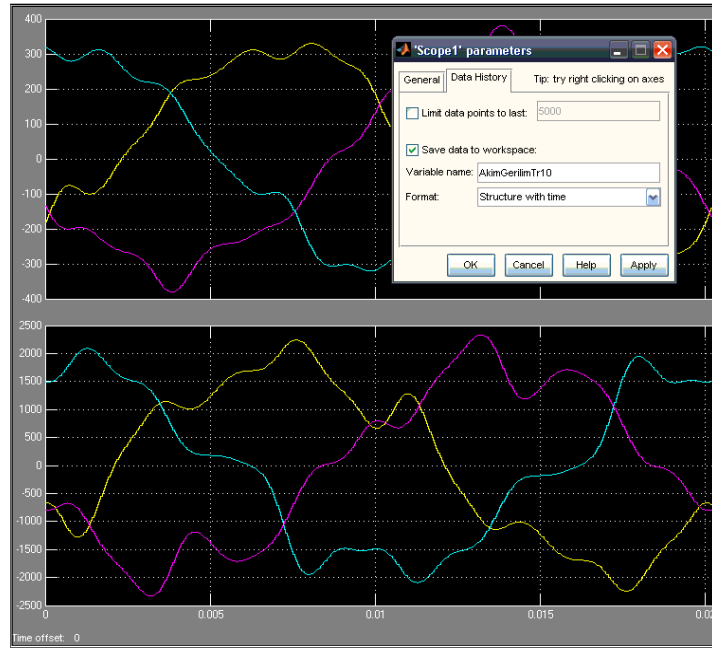
Simülasyonda trafo merkezlerini temsil eden kutuların içinde (subsystems), dağıtım şebekesinde yapılan ölçümlerden alınan değerler doğrultusunda o trafo merkezinden beslenen bazı fabrikalar vardır. TR10 trafosundan beslenen fabrikalar Şekil 7.122’de gösterilmiştir. Fabrikaları temsil eden kutucukların içinde fabrikaların aktif, endüktif reaktif, kapasitif reaktif yükleri vardır. Şekil 7.123 Dokum6 fabrikasının içindeki yükü göstermektedir. Nonlineer yüklerde harmonikli bileşenlerin ifade edilebilmesi için harmonik frekanslarında yüklerle paralel akım kaynakları eklenmiştir. Şekil 7.124 fabrikalardaki harmoniklerin simülasyondaki eşdeğer devresini göstermektedir.



Şekil 7.123. Dokum6 fabrikasının içindeki yük ve harmonik kaynağı.

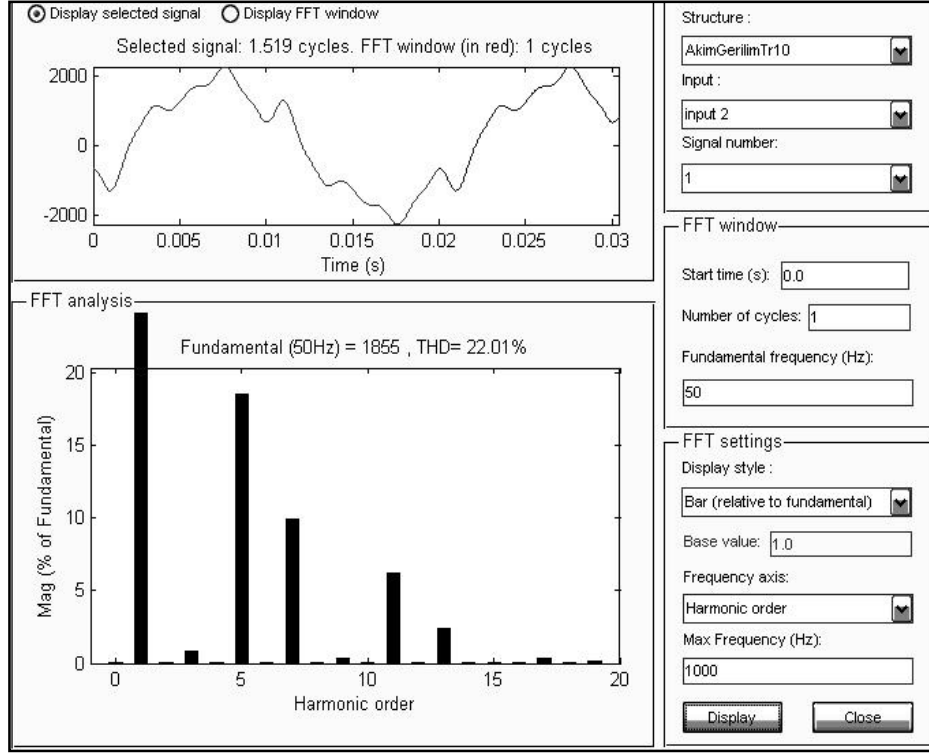


Şekil 7.125. Fabrikalardaki harmoniklerin simülasyondaki eşdeğer devresi.



Şekil 7.124. Akım ve gerilim dalga şekilleri ve verilerin workspace'e gönderilmesi.

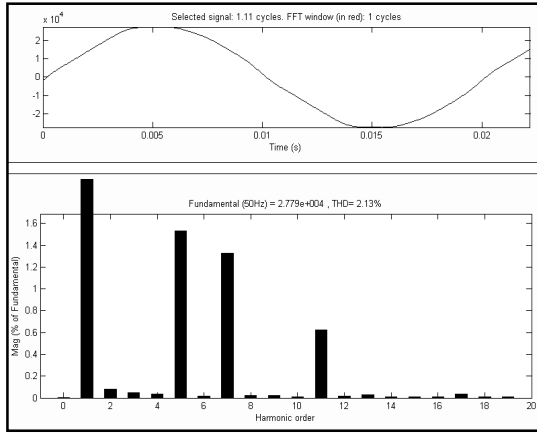
Şekil 7.122'deki ölçüm bloklarında fabrikaların üç faz akım ve gerilimleri izlenebilmektedir. Bu bloklar yardımıyla Şekil 7.125'te görüldüğü gibi workspace'e gönderilen verilerin fourier analizi yapılmaktadır. Gönderilen verilerin fourier analizi Şekil 7.126'da gösterilmektedir.



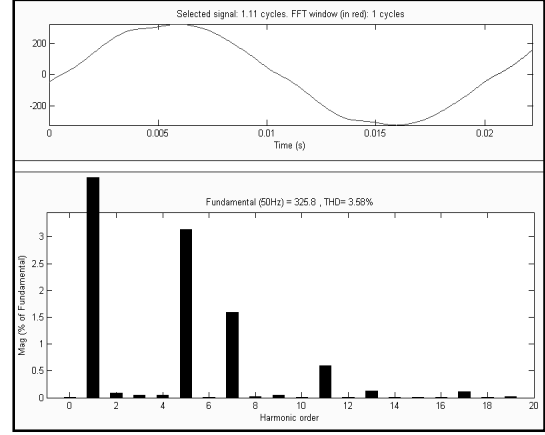
Şekil 7.126. Workspace'e gönderilen verilerin fourier analizinin yapıışı (TR10 AG akım dalga şekli).

7.2.1. Dyn11 bağlantı grubu için devrenin modellenmesi ve referans simülasyonu

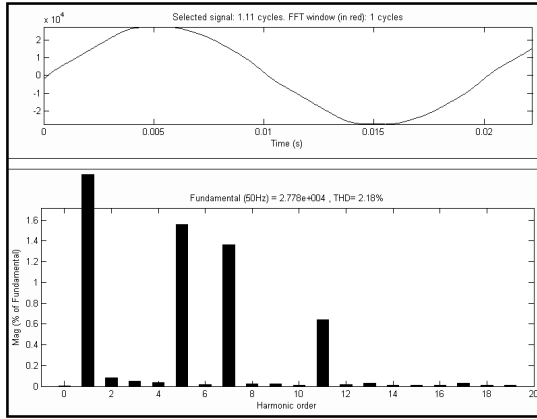
Dağıtım şebekesinin elektriksel analizinin ve parametrelerde yapılan değişikliklere sistemin vereceği elektriksel cevabının bulunabilmesi için sistemin referans simülasyonu belirlenmelidir. Bu simülasyonda dağıtım şebekesinde ölçümleri yapılan fabrikaların hepsinin devrede olduğu varsayılarak referans simülasyon yapılmıştır. Dolayısıyla simülasyondaki fabrikaların bazılarının gerilim distorsiyon değerleri, dağıtım şebekesinden alınan ölçümlerdeki verilerden daha yüksek çıkabilmektedir. Referans simülasyondan elde edilen veriler aşağıdaki Şekil 7.127 ve 7.134 arasındaki şekillerde gösterilmektedir. Referans simülasyonda manevra merkezleri içinde büyük güçlü ve dağıtım şebekesinde yapılan ölçümlerde harmonik değerleri alınan MM1, MM2, MM3 ve MM6'nın değerlerine bakılmıştır.



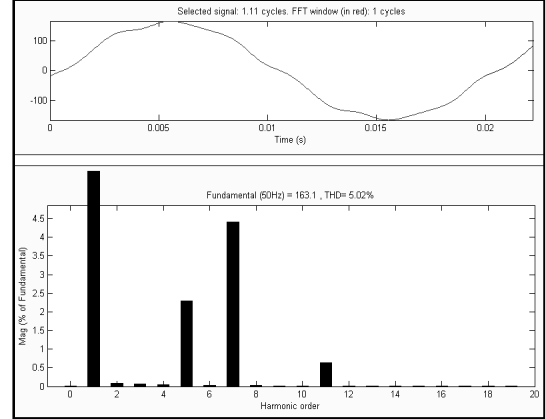
Şekil 7.127. MM1 Gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



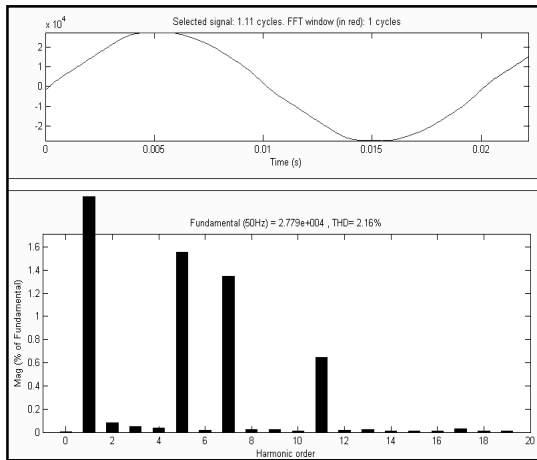
Şekil 7.128. MM1 Akım grafiği ve harmonik spektrumu.



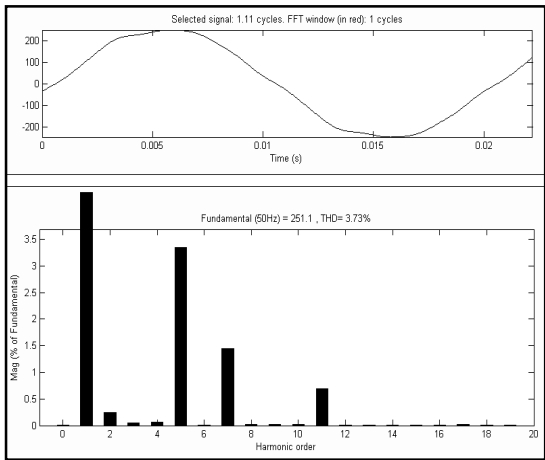
Şekil 7.129. MM2 Gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



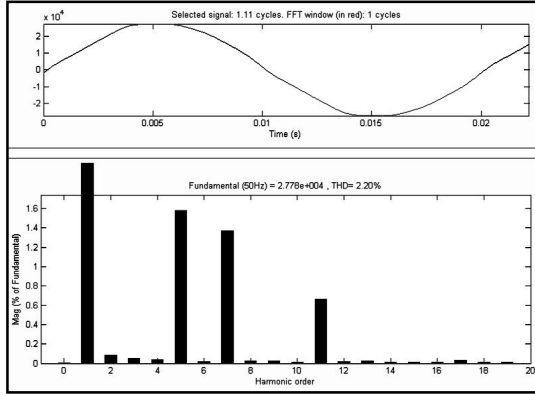
Şekil 7.130. MM2 Akım grafiği ve harmonik spektrumu.



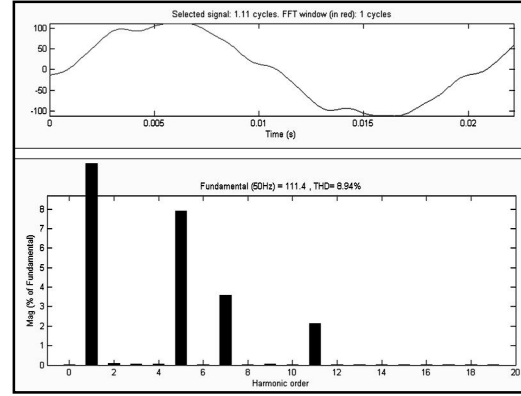
Şekil 7.131. MM3 Gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



Şekil 7.132. MM3 Akım grafiği ve harmonik spektrumu.



Şekil 7.133. MM6 Gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.

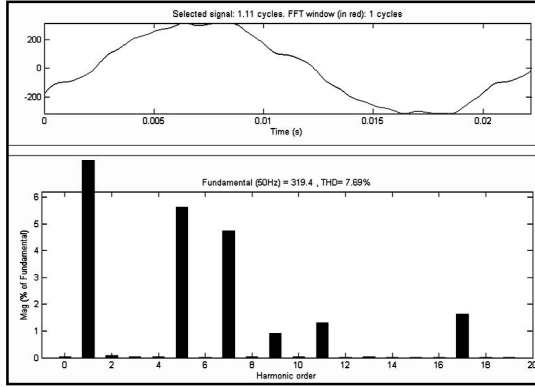


Şekil 7.134. MM6 Akım grafiği ve harmonik spektrumu.

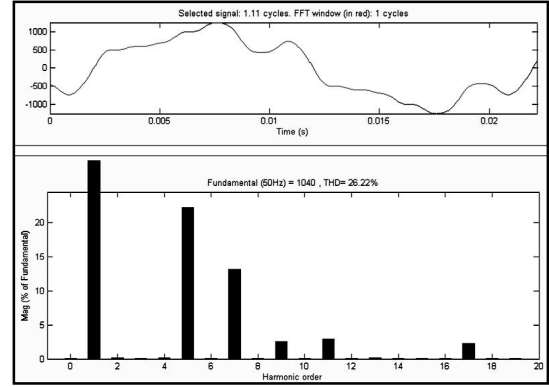
Simülasyondan elde edilen değerler dağıtım şebekesinden alınan değerlere yakındır. Ancak ölçüm değerleri, zamanla değişken yüklere bağlı olduğundan değişkendir. Simülasyonda ise yükler sabit olarak düşünülmüştür. Bu nedenle simülasyondan alınan THD değerleri sabittir.

7.2.2. Nonlinear yüklerin diğer şebeke yükleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi

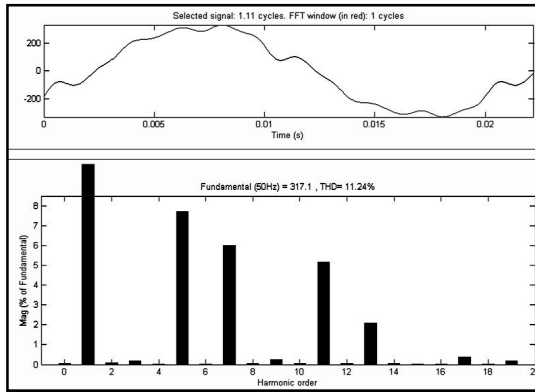
Nonlinear yüklerin birbirleri üzerinde ya da bir nonlinear yükün nonlinear olmayan bir yük üzerindeki etkilerinin analiz edilebilmesi için ilk olarak yukarıdaki referans simülasyondan Dokum2 fabrikasının çalışmadığı varsayılmıştır. Dokum2 fabrikasının sistemde çalışmadığı durumda yukarıdaki referans manevra merkezlerinin değerleri üzerinde, Dokum2 fabrikasıyla aynı trafo barasından beslenen Dokum6 fabrikası değerleri üzerinde, Dokum2 ile aynı manevra merkezinde TR11 trafosundan beslenen Dokum4 fabrikasının değerleri üzerinde ve TR10 trafosundan beslenen herhangi bir harmoniksiz fabrikanın değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Daha sonra Dokum2 fabrikasıyla birlikte Dokum6 fabrikası da devreden çıkarılarak simülasyon üzerindeki değişiklikler incelenmiştir. Fabrikaların ikisi de devredeyken manevra merkezlerinin yukarıdaki referans şekillerine ek olarak Dokum6, Dokum4 ve harmoniksiz lineer yükün grafikleri aşağıda verilmiştir.



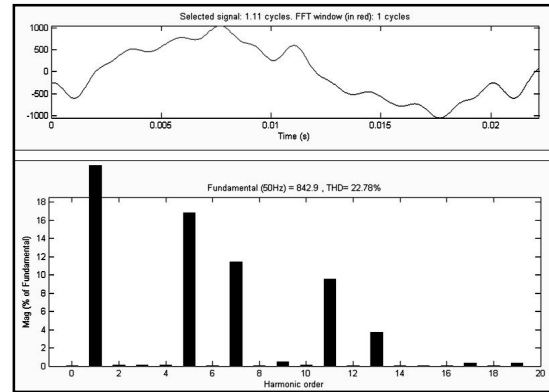
Şekil 7.135. Dokum2 ve Dokum6 devredeyken Dokum4'ün gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



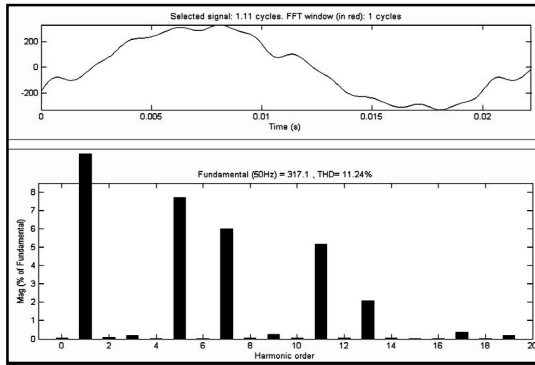
Şekil 7.136. Dokum2 ve Dokum6 devredeyken Dokum4'ün akım grafiği ve harmonik spektrumu.



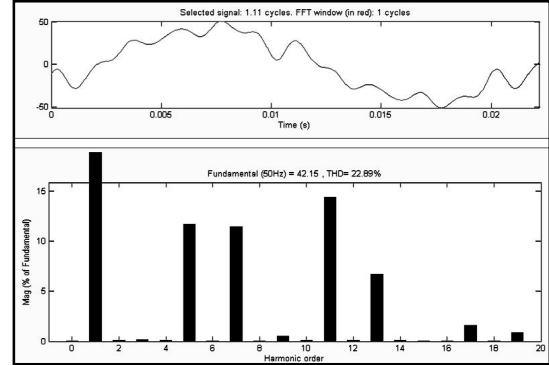
Şekil 7.137. Dokum2 ve Dokum6 devredeyken Dokum6'nın gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



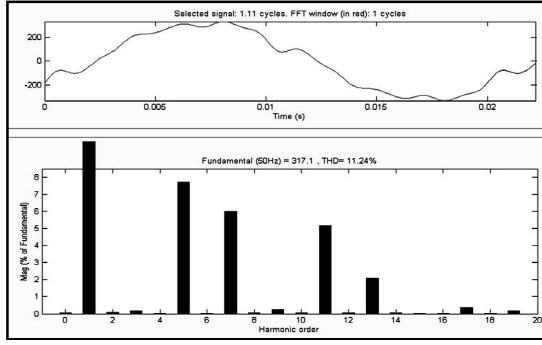
Şekil 7.138. Dokum2 ve Dokum6 devredeyken Dokum6'nın akım grafiği ve harmonik spektrumu.



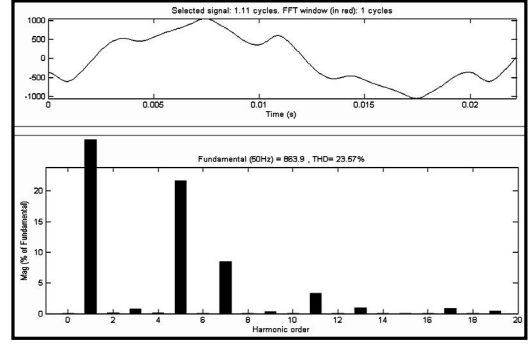
Şekil 7.139. Dokum2 ve Dokum6 devredeyken lineer yükün gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



Şekil 7.140. Dokum2 ve Dokum6 devredeyken lineer yükün akım grafiği ve harmonik spektrumu.

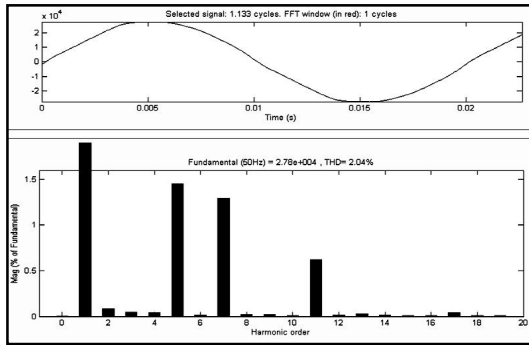


Şekil 7.141. Dokum2 ve Dokum6 devredeyken Dokum2'nin gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.

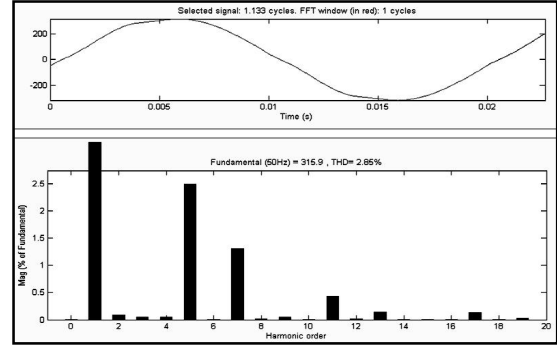


Şekil 7.142. Dokum2 ve Dokum6 devredeyken Dokum2'nin akım grafiği ve harmonik spektrumu.

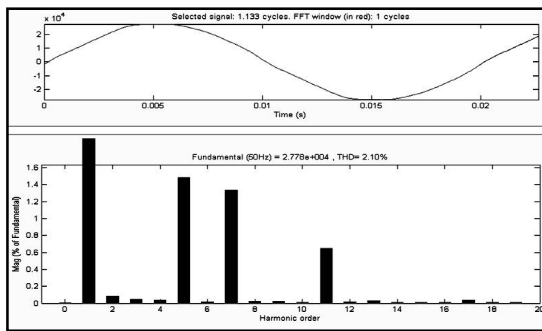
Dokum2 fabrikasının devreden çıkarılmasıyla diğer fabrikaların dalga şekilleri ve harmonik spektrumlarındaki değişimler aşağıda gösterilmiştir.



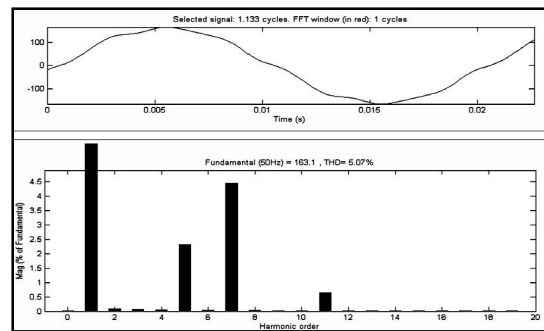
Şekil 7.143. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla MM1'in gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



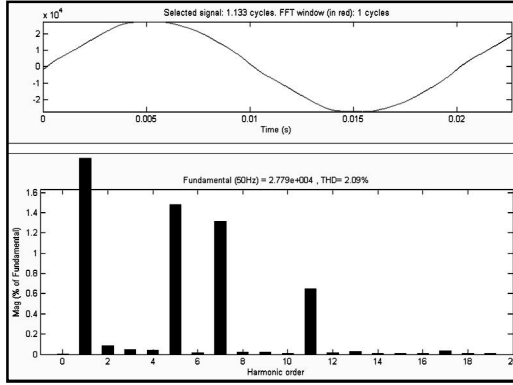
Şekil 7.144. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla MM1'in akım grafiği ve harmonik spektrumu.



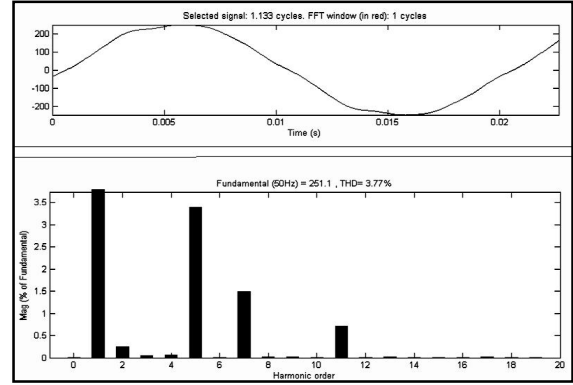
Şekil 7.145. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla MM2'nin gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



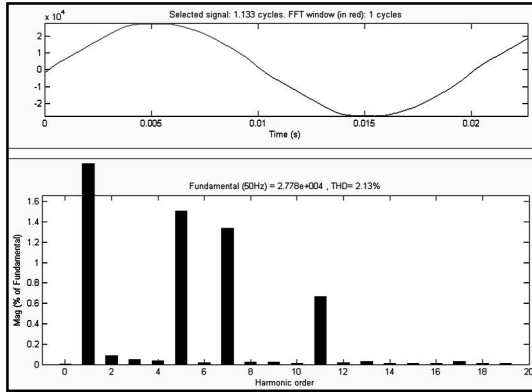
Şekil 7.146. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla MM2'nin akım grafiği ve harmonik spektrumu.



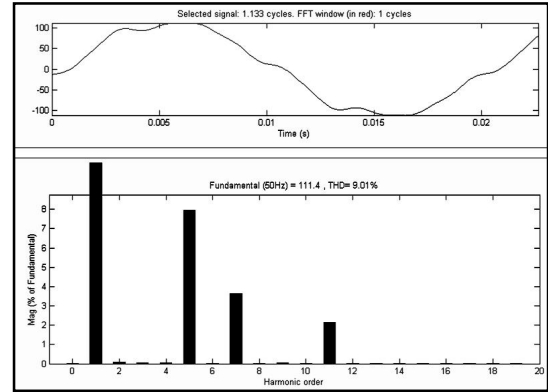
Şekil 7.147. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla MM3'ün gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



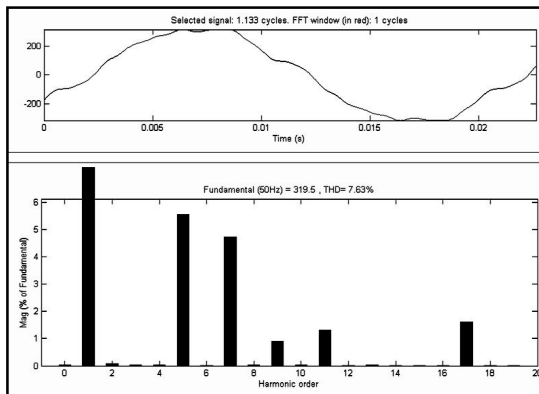
Şekil 7.148. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla MM3'ün akım grafiği ve harmonik spektrumu.



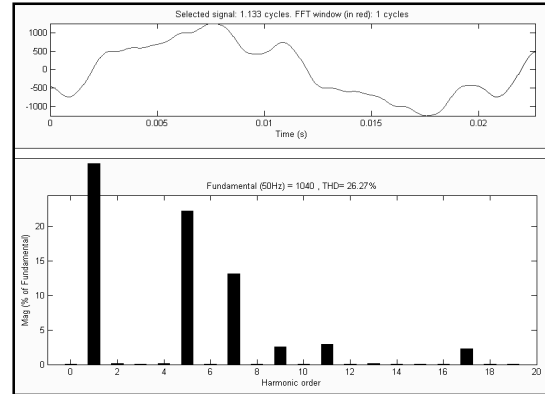
Şekil 7.149. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla MM6'nın gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



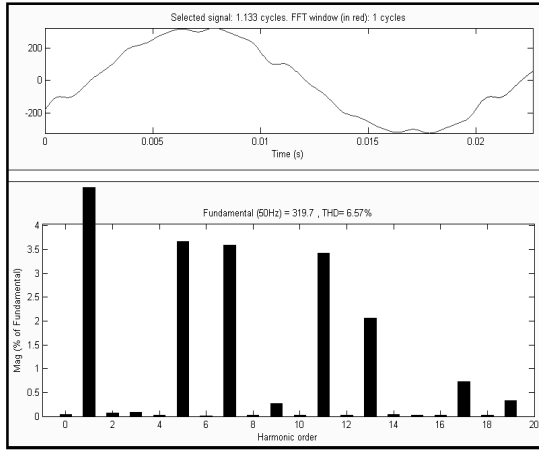
Şekil 7.150. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla MM6'nın akım grafiği ve harmonik spektrumu.



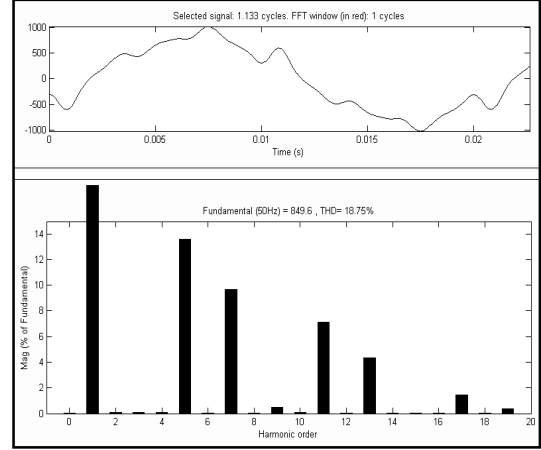
Şekil 7.151. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla Dokum4'ün gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



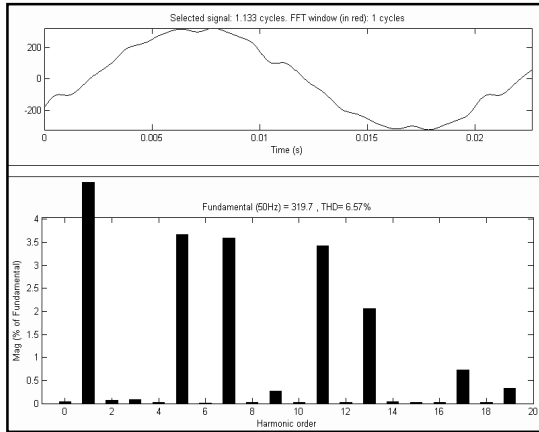
Şekil 7.152. Dokum2'nin devreden çıkarılmasıyla Dokum4'ün akım grafiği ve harmonik spektrumu.



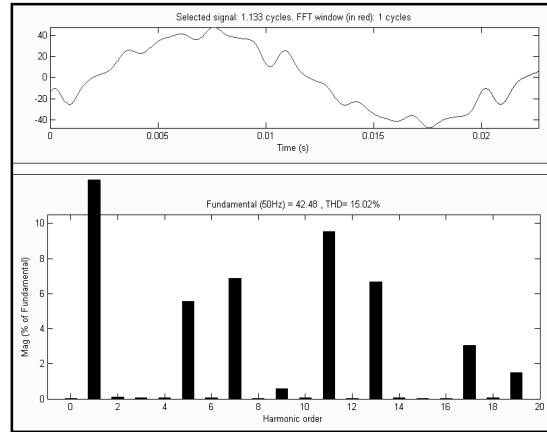
Şekil 7.153. Dokum2'nin devreden çıkartılmasıyla Dokum6'nın gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



Şekil 7.154. Dokum2'nin devreden çıkartılmasıyla Dokum6'nın akım grafiği ve harmonik spektrumu.

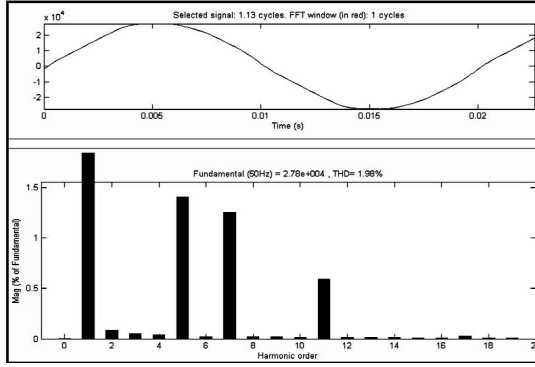


Şekil 7.155. Dokum2'nin devreden çıkartılmasıyla Lineer Yükün gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.

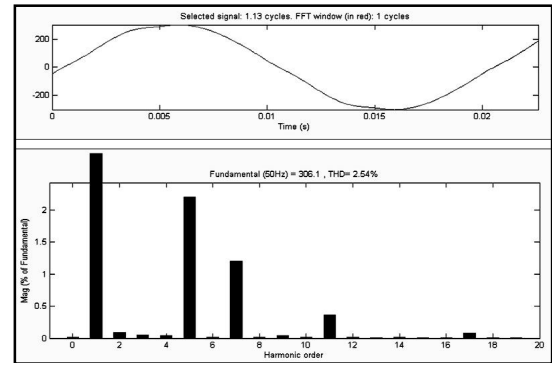


Şekil 7.156. Dokum2'nin devreden çıkartılmasıyla Lineer Yükün akım grafiği ve harmonik spektrumu.

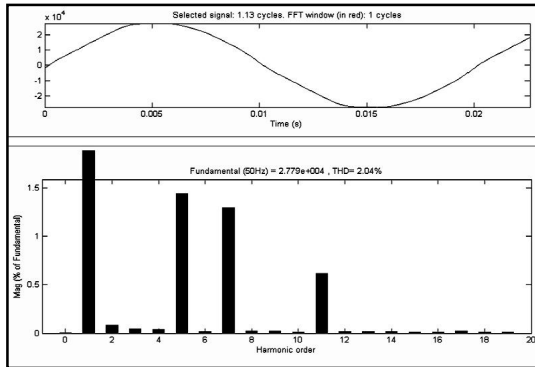
Dokum2 fabrikasının yanında Dokum6 fabrikasının da devreden çıkartılmasıyla diğer fabrikaların dalga şekilleri ve harmonik spektrumlarındaki değişimler aşağıdaki şekillerle gösterilmiştir.



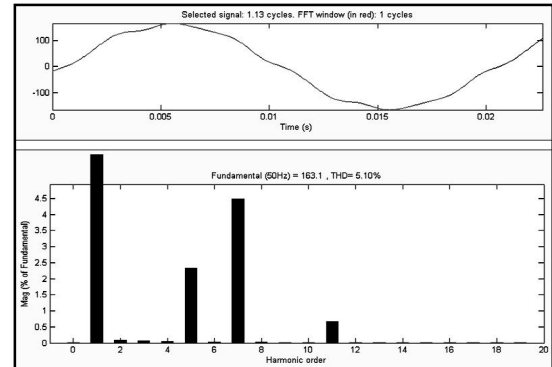
Şekil 7.157. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla MM1'in gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



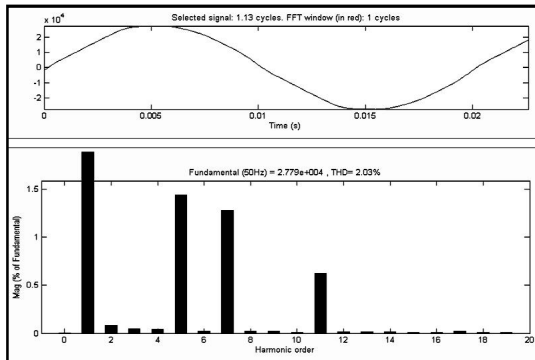
Şekil 7.158. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla MM1'in akım grafiği ve harmonik spektrumu.



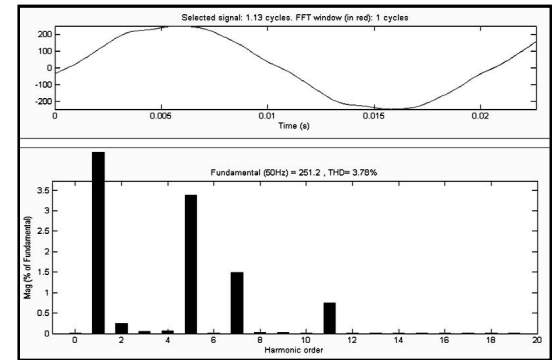
Şekil 7.159. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla MM2'nin gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



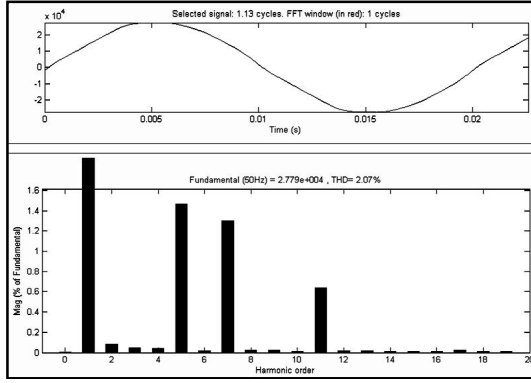
Şekil 7.160. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla MM2'nin akım grafiği ve harmonik spektrumu.



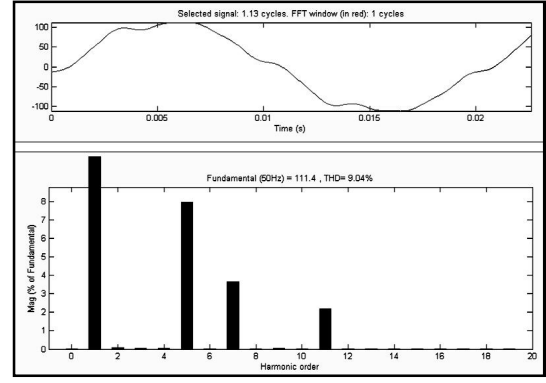
Şekil 7.161. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla MM3'ün gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



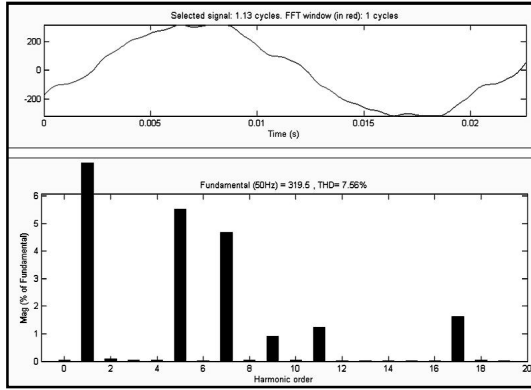
Şekil 7.162. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla MM3'ün akım grafiği ve harmonik spektrumu.



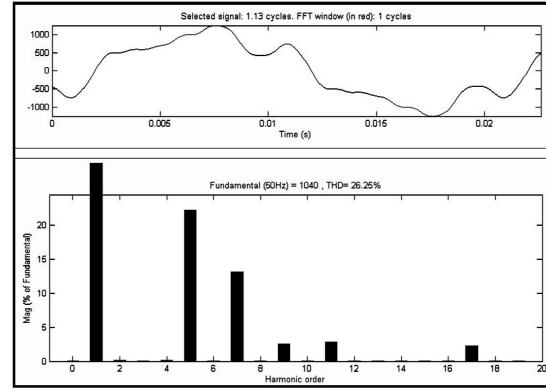
Şekil 7.163. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla MM6'nın gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



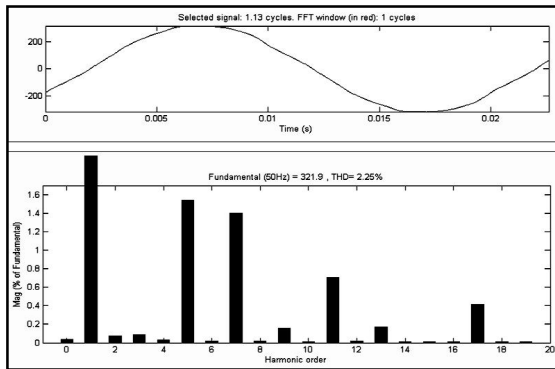
Şekil 7.164. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla MM6'nın akım grafiği ve harmonik spektrumu.



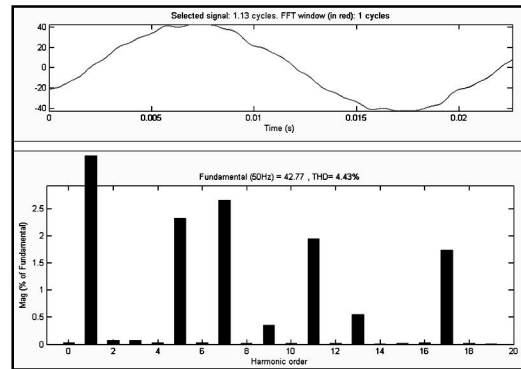
Şekil 7.165. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla Dokum4'ün gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



Şekil 7.166. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla Dokum4'ün akım grafiği ve harmonik spektrumu.



Şekil 7.167. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla Lineer Yükün gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



Şekil 7.168. Dokum2 ve Dokum6'nın devreden çıkarılmasıyla Lineer Yükün akım grafiği ve harmonik spektrumu.

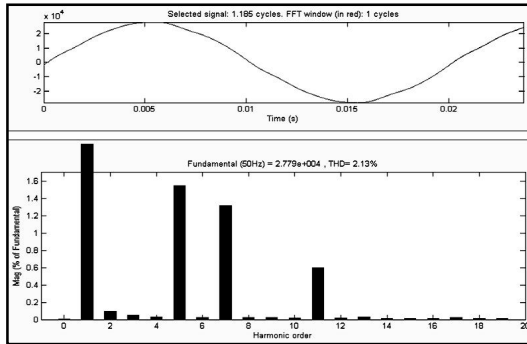
Tablo 7.9. Dokum2 ve Dokum6 fabrikalarının devreden çıkarılmasıyla dağıtım şebekesindeki diğer fabrikalara ve manevra merkezlerinin THD değerlerine etkisi.

| | % THD | | % THD | | % THD | | % THD | | % THD | | % THD | | % THD | |
|---------------------------|---------|-------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|-------|------------|--------|---------|-------|
| | MM1 | | MM2 | | MM3 | | MM6 | | Dokum4 | | Lineer Yük | | Dokum6 | |
| | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım |
| Dokum2 Devrede | 2.13 | 3.58 | 2.18 | 5.02 | 2.16 | 3.73 | 2.20 | 8.94 | 7.69 | 26.22 | 11.24 | 22.78 | 11.24 | 22.89 |
| Dokum2 Devre Dışı | 2.04 | 2.85 | 2.10 | 5.07 | 2.09 | 3.77 | 2.13 | 9.01 | 7.63 | 26.27 | 6.57 | 15.02 | 6.57 | 18.75 |
| Fark | -0.09 | -0.73 | -0.08 | 0.05 | -0.07 | 0.04 | -0.07 | 0.07 | -0.06 | 0.05 | -4.67 | -7.76 | -4.67 | -4.14 |
| Dokum2, Dokum6 Devre Dışı | 1.98 | 2.54 | 2.04 | 5.10 | 2.03 | 3.78 | 2.07 | 9.04 | 7.56 | 26.25 | 2.25 | 4.33 | | |
| Fark | -0.15 | -1.04 | -0.14 | 0.08 | -0.13 | 0.05 | -0.13 | 0.10 | -0.13 | 0.03 | -8.99 | -18.45 | | |

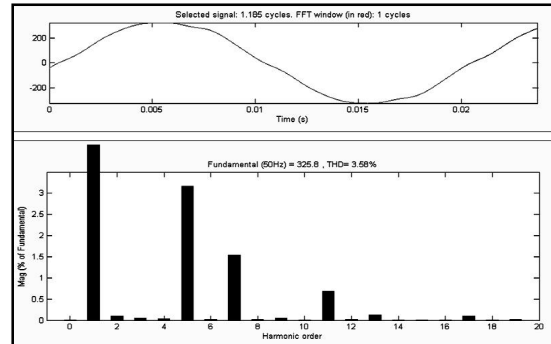
7.2.3. Transformatör bağlantı grubunun dağıtım şebekesindeki harmoniklere etkilerinin incelenmesi

Transformatörlerin bağlantı grubunun şebeke harmoniklerine etkisinin incelenmesi için Şekil 7.119'daki organize sanayi bölgesinin simülasyonunda, transformatörler Dyn11, Dyn1 ve Yyn bağlantı gruplarında bağlanmış ve simülasyon grafikleri incelenmiştir. Bu simülasyonun Dyn11 bağlantı grubu için referans simülasyon şekilleri Şekil 7.127 ve Şekil 7.134 arasındaki şekillerdir. Dyn1 ve Yyn bağlantı grubu için elde edilen değerler aşağıdaki Şekil 7.169 ile Şekil 7.170 arasındaki şekillerle gösterilmektedir.

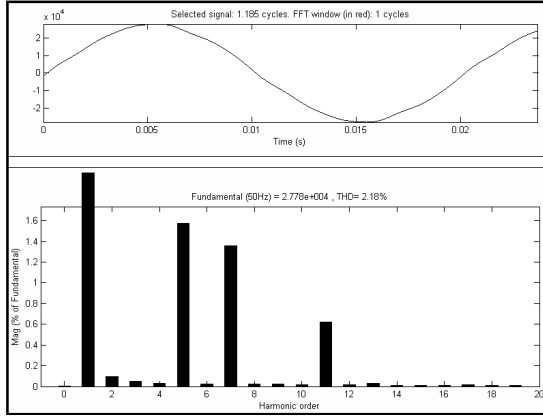
7.2.3.1. Dyn1 bağlantı grubu transformatörlerin şebeke harmoniklerine etkileri



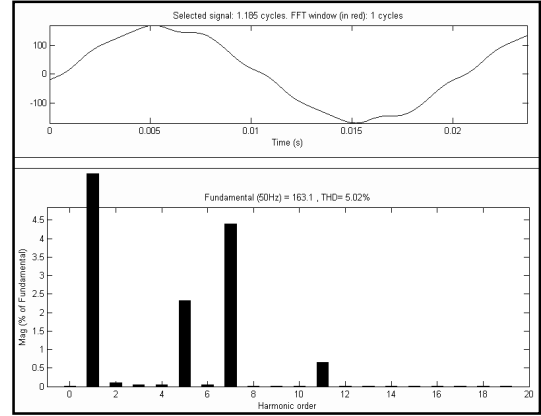
Şekil 7.169. Dyn1 bağlantı grubu için MM1 gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



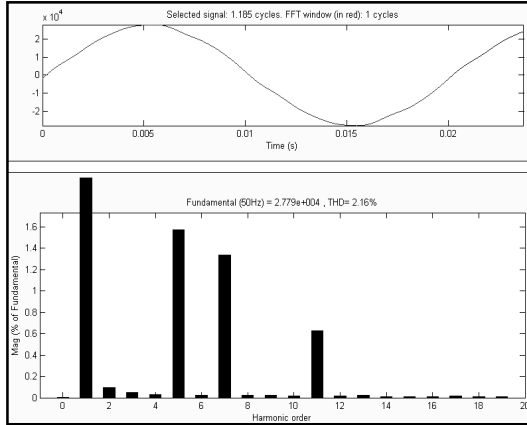
Şekil 7.170. Dyn1 bağlantı grubu için MM1 akım grafiği ve harmonik spektrumu.



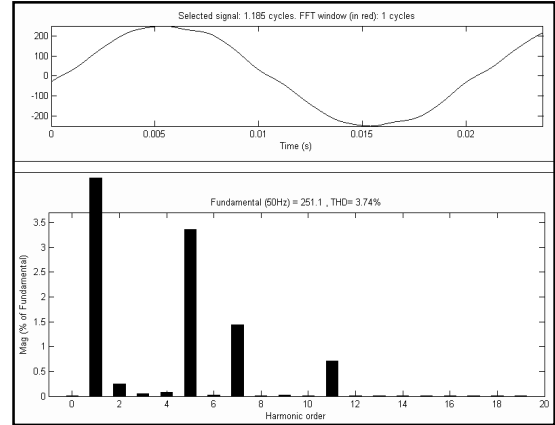
Şekil 7.171. Dyn1 bağlantı grubu için MM2 gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



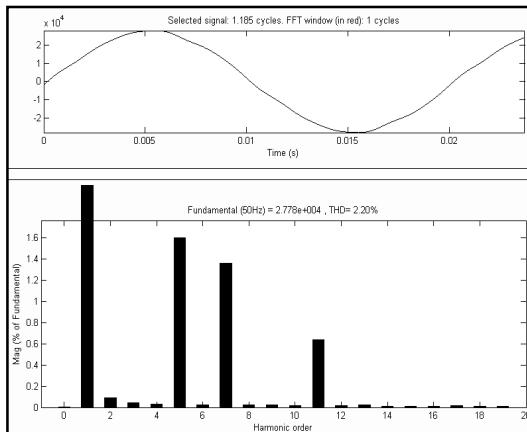
Şekil 7.172. Dyn1 bağlantı grubu için MM2 akım grafiği ve harmonik spektrumu.



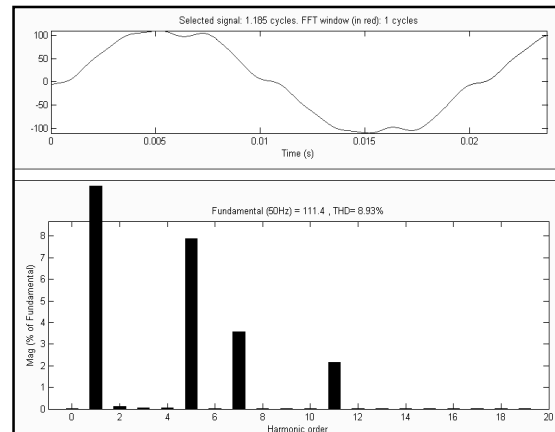
Şekil 7.173. Dyn1 bağlantı grubu için MM3 gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



Şekil 7.174. Dyn1 bağlantı grubu için MM3 akım grafiği ve harmonik spektrumu.

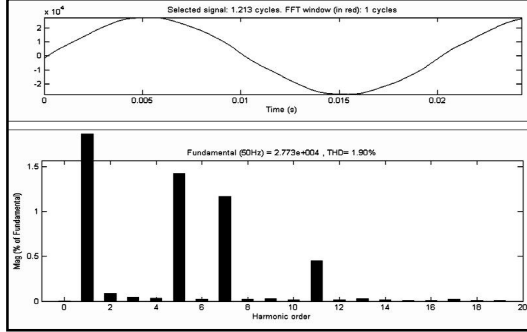


Şekil 7.175. Dyn1 bağlantı grubu için MM6 gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.

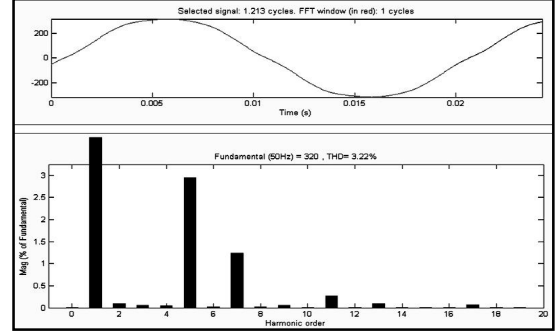


Şekil 7.176. Dyn1 bağlantı grubu için MM6 akım grafiği ve harmonik spektrumu.

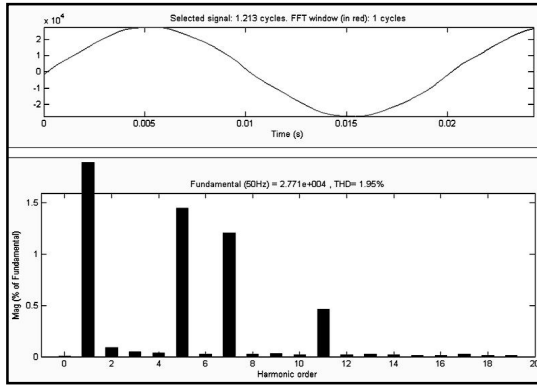
7.2.3.2. Yyn bağlantı grubu transformatörlerin şebeke harmoniklerine etkileri



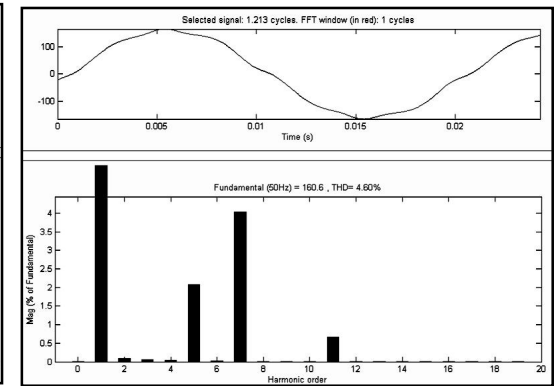
Şekil 7.177. Yyn bağlantı grubu için MM1 gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



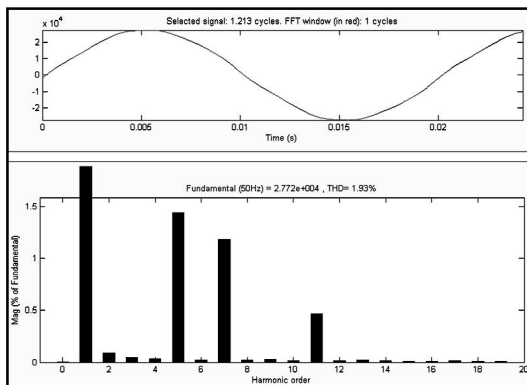
Şekil 7.178. Yyn bağlantı grubu için MM1 akım grafiği ve harmonik spektrumu.



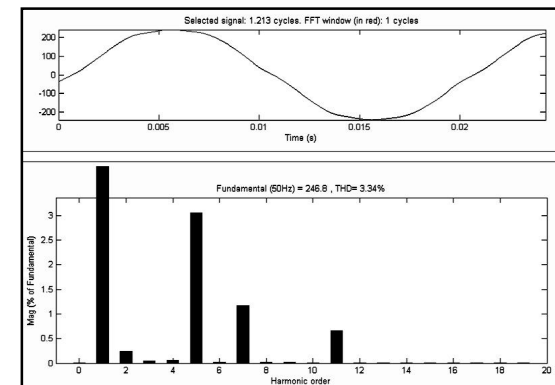
Şekil 7.179. Yyn bağlantı grubu için MM2 gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



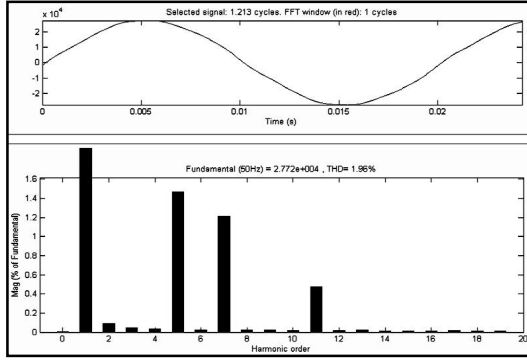
Şekil 7.180. Yyn bağlantı grubu için MM2 akım grafiği ve harmonik spektrumu.



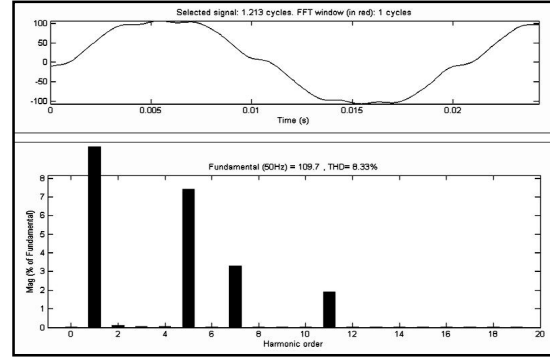
Şekil 7.181. Yyn bağlantı grubu için MM3 gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



Şekil 7.182. Yyn bağlantı grubu için MM3 akım grafiği ve harmonik spektrumu.



Şekil 7.183. Yyn bağlantı grubu için MM6 gerilim grafiği ve harmonik spektrumu.



Şekil 7.184. Yyn bağlantı grubu için MM6 akım grafiği ve harmonik spektrumu.

Tablo 7.10. Transformatörler bağlantı gruplarının değiştirilmesiyle manevra merkezlerinden elde edilen THD değerleri.

| | % THD | | % THD | | % THD | | % THD | |
|-----------------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|
| | MM1 | | MM2 | | MM3 | | MM6 | |
| Bağlantı gurubu | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım |
| Dyn11 | 2.13 | 3.58 | 2.18 | 5.02 | 2.16 | 3.73 | 2.20 | 8.94 |
| Dyn1 | 2.13 | 3.58 | 2.18 | 5.02 | 2.16 | 3.74 | 2.20 | 8.93 |
| Yyn | 1.90 | 3.22 | 1.95 | 4.60 | 1.93 | 3.24 | 1.96 | 8.33 |

7.2.4. Transformatörlerin empedanslarının şebeke harmoniklerine etkilerinin incelenmesi

Daha önceki yapılan hesaplamalarda kullanılan transformatörlerin empedansları 7.10, 7.11, 7.17 ve 7.18 formüllerinde hesaplanmıştır. Bu değerler Tablo76.11'de gösterilmektedir.

Tablo 7.11. Simülasyonda kullanılan transformatörlerin referans empedansları ve artırılmış değerleri.

| | Referans Değerler | | Artırılmış Değerler (%50) | |
|---------|-------------------|----------|---------------------------|----------|
| | Pirimer | Sekonder | Pirimer | Sekonder |
| R (ohm) | 12.85 | 1.73E-03 | 19.275 | 2.59E-03 |
| L (H) | 0.177 | 2.83E-05 | 0.2655 | 4.25E-05 |

Tablo 7.12. Trafo empedanslarının artırılmasıyla elde edilen değerler.

| | % THD | | % THD | | % THD | | % THD | | % THD | | % THD | | % THD | |
|--|---------|--------|---------|-------|---------|--------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|------------|-------|
| | MM1 | | MM2 | | MM3 | | MM6 | | Dokum2 | | Dokum6 | | Lineer Yük | |
| | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım |
| Referans Değerler | 2.13 | 3.58 | 2.18 | 5.02 | 2.16 | 3.73 | 2.20 | 8.94 | 11.24 | 23.57 | 11.24 | 22.78 | 11.24 | 22.89 |
| Transformatör Empedansları % 50 Artırılmış değerler | 1.89 | 3.20 | 1.93 | 4.55 | 1.92 | 3.30 | 1.95 | 8.26 | 13.78 | 22.04 | 13.78 | 22.46 | 13.78 | 25.37 |
| % Karşılaştırma | -11.27 | -10.61 | -11.47 | -9.36 | -11.11 | -11.53 | -11.36 | -7.61 | 22.60 | -6.49 | 22.60 | -1.40 | 22.60 | 10.83 |

Tablo 7.13. Hat empedansındaki % 50'lik bir artışın şebeke harmoniklerine etkisi.

| | % THD | | % THD | | % THD | | % THD | | % THD | | % THD | | % THD | |
|--|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|-------|---------|-------|------------|-------|
| | MM1 | | MM2 | | MM3 | | MM6 | | Dokum2 | | Dokum6 | | Lineer Yük | |
| | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım |
| Referans Değerler | 2.13 | 3.58 | 2.18 | 5.02 | 2.16 | 3.73 | 2.20 | 8.94 | 11.24 | 23.57 | 11.24 | 22.78 | 11.24 | 22.89 |
| Hat Empedansları % 50 Artırılmış değerler | 2.04 | 3.58 | 2.12 | 5.06 | 2.10 | 3.75 | 2.18 | 8.98 | 11.20 | 23.65 | 11.20 | 22.82 | 11.20 | 22.84 |
| % Karşılaştırma | -4.23 | 0.00 | -2.75 | 0.80 | -2.78 | 0.54 | -0.91 | 0.45 | -0.36 | 0.34 | -0.36 | 0.18 | -0.36 | -0.22 |

Dyn11 bağlantı gruplu transformatörlerin empedanslarının % 50 artırılmasıyla dağıtım şebekesindeki manevra merkezlerinin ve bazı fabrikaların THD değerlerindeki değişim Tablo 7.12'de gösterilmektedir.

7.2.5. Manevra merkezleri arasındaki hat empedanslarının şebeke harmoniklerine etkilerinin incelenmesi

Manevra merkezleri arasındaki hatların omik dirençleri ve endüktif reaktansları hat uzunluklarıyla beraber Tablo 7.8'de gösterilmiştir. Bu hatların değerlerindeki % 50'lik bir artışın şebeke harmoniklerine etkisini gösteren simülasyon sonuçları Tablo 7.13'te verilmiştir.

7.2.6. Manevra merkezlerindeki harmoniklerinin diğer manevra merkezleri üzerinde ve TEİAŞ 3 TM üzerindeki etkilerinin incelenmesi

Dağıtım şebekesindeki manevra merkezlerinin bütün sistem üzerindeki etkilerinin incelenmesi için yalnızca değerleri incelenen manevra merkezinin harmonikleri devrede bırakılmış, diğer manevra merkezlerinin harmonikleri devre

Tablo 7.14. Manevra merkezlerinin birbirleri üzerindeki % THD değerleri.

| | % THD | | % THD | | % THD | | % THD | | % THD | |
|----------------------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|
| | MM1 | | MM2 | | MM3 | | MM6 | | TEİAŞ | |
| | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım | Gerilim | Akım |
| Referans Değerler | 2.13 | 3.58 | 2.18 | 5.02 | 2.16 | 3.73 | 2.20 | 8.94 | 1.91 | 4.39 |
| Yalnızca MM1 devrede | 0.50 | 3.73 | 0.47 | 0.45 | 0.45 | 0.46 | 0.45 | 0.44 | 0.42 | 0.90 |
| Yalnızca MM2 devrede | 0.41 | 0.53 | 0.44 | 5.29 | 0.41 | 0.43 | 0.41 | 0.40 | 0.37 | 0.66 |
| Yalnızca MM3 devrede | 0.40 | 0.48 | 0.42 | 0.40 | 0.44 | 4.24 | 0.42 | 0.41 | 0.37 | 0.77 |
| Yalnızca MM6 devrede | 0.40 | 0.48 | 0.41 | 0.39 | 0.42 | 0.44 | 0.45 | 9.88 | 0.37 | 0.77 |

dışı bırakılarak lineer olarak kabul edilmiştir. Böylece her bir manevra merkezinin TEİAŞ 3 TM üzerindeki toplam akım ve gerilim THD yüzde oranları belirlenmiştir. Bunun yanı sıra manevra merkezlerinin diğer manevra merkezleri üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Yukarıdaki değişiklikler MM1, MM2, MM3 ve MM6 için yapıldığında elde edilen değerler Tablo 7.14'te verilmiştir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elektrik sistemlerinde her geçen gün sayıları artan nonlineer yüklerin diğer şebeke elemanlarına etkisi, günümüzde göz ardı edilemeyecek kadar büyük bir problem haline gelmiştir. Harmonikler sistem elemanlarında ömür kayıplarına bazı durumlarda ise tahribatlarına neden olmaktadır. Sistemdeki kondansatörlerin sık arızalanması, nedeni tespit edilemeyen arızaların oluşması, sistem makinelerinin, baraların ve transformatörlerin aşırı ısınması ve gürültülü çalışması, fabrikalardaki ölçü aletleri aşırı değerler göstermezken şalterlerin beklenmedik durumlarda açmaları, sistemdeki elektronik cihazların hatalı çalışmaları, sürekli elektronik kart arızaları, nötr kablosu çok yüklenip, aşırı ısınması ve izolasyon malzemelerinde delinmelerin olması sistemdeki harmoniklerin göstergesidir.

Dağıtım şebekelerinde özellikle aynı trafonun AG tarafından beslenen kullanıcılarda büyük güçlü kullanıcıların şebekeden çekmiş olduğu harmonikli akımların neden olduğu gerilim düşümleri, diğer kullanıcıların çalışmalarını olumsuz etkilemektedir. Harmonikli gerilim düşümleri, diğer kullanıcılar tamamen harmoniksiz lineer yük olmaları durumunda bile harmonikli akımların çekilmesine neden olacaktır.

Bu çalışmada harmoniklerin dağıtım şebekelerindeki karakteristiklerinin anlaşılabilmesi için sistemdeki değişikliklerin harmoniklere etkileri incelenmiştir. Yapılan analizlerin günlük hayattaki gerçek değerlere uygun olması için, 8 manevra merkezi bulunan ve yüzlerce farklı karakteristiğe sahip fabrikaların bulunduğu Konya 2. ve 3. Organize Sanayisinde ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçümler incelenmiş ve bu değerlere yakın değerlerde sistemin elektriksel modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Özellikle elektrik kullanıcılarının harmonik yönünden birbirlerine etkileri incelenmiştir. Fabrikalardan çekilen harmonikli akımların manevra merkezlerinde ve ana besleme trafosunda oluşturdukları harmonikli gerilim düşümleri incelenmiştir.

Ayrıca dağıtım şebekesinde kullanılan transformatörlerin bağlantı gruplarının Dyn1, Dyn11 ve Yyn şeklinde bağlı olması durumunda sistemdeki harmonik seviyelerinin değişimi incelenmiştir.

Yapılan bu simülasyonlara göre ortaya çıkan sonuçlar aşağıdaki gibidir.

Nonlinear yüklerin diğer şebeke yükleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi için yapılan simülasyon sonuçları:

Tablo 7.9 incelenecek olursa, yaklaşık 610 A akım çeken ve % 23.57'lik akım THD'sine sahip Dokum2 fabrikasının sistemden çıkarılmasıyla %2.13 olan MM1'in gerilim THD'si %2.04'e düşmüştür. Dokum2 fabrikası MM1'de olması nedeniyle gerilim THD'sindeki en büyük fark MM1'de oluşmuştur. MM2'de % 0.08, MM3'de % 0.07 ve MM6'nın gerilim THD'sinde ise % 0.07'lik düşüş olmuştur. Akım THD'sinde ise referans simülasyonda % 3.58 olan MM1'in akım distorsiyonu % 2.85'e düşmüştür. MM2, MM3 ve MM6'nın akım distorsiyonunda çok az bir artış olmuştur. Buradan MM1'deki bir fabrikanın harmonikleri diğer fabrikaların akım distorsiyonlarını pek etkilemediği görülmektedir. Dokum2 fabrikasının devreden çıkmasının etkisi, aynı trafodan beslenen diğer fabrikalarda en fazla görülmektedir ve değişen değerler manevra merkezlerindeki nazaran daha da büyüktür. Dokum2 fabrikasıyla yan yana olan Dokum6 fabrikasının gerilimindeki THD değeri %11.24'ten % 6.57'ye düşmüş, akım THD'si ise gerilime nispeten daha az düşmüştür. Gerilimdeki düşüşün etkisinin AG tarafında daha çok olmasının nedeni, kullanılan 34.5-0.4 kV'luk transformatörlerin empedanslarıdır. Bu sebepten Dokum2 fabrikasının sistem üzerinde en fazla etkilediği fabrikalar Dokum2 ile aynı trafodan beslenen fabrikalardır. Dokum2 ile aynı trafodan beslenen lineer yükte herhangi bir harmonik bileşenli akım olmamasına rağmen, yüksek akım çeken ve yüksek akım THD'sine sahip Dokum2 ve Dokum6 ile aynı trafodan beslendiğinden dolayı Dokum2 ve Dokum6 ile aynı gerilim distorsiyonuna maruzdur. Referans simülasyonda % 11.24' değerinde gerilim THD'si olmasına rağmen % 22.78' değerinde akım THD'sine sahip olmasının nedeni lineer yükün yüksek değerlerde gerilim distorsiyonunda düşük akım çekmesidir (42.15 A). Akım değerlerinin düşük olması, harmonikli gerilimin daha büyük yüzdeli akım distorsiyonunun oluşmasına neden olur. Bu değerler Dokum6 fabrikasının da devreden çıkmasıyla gerilim THD'si % 8.99 farkla %2.25'e, akım THD'si ise % 18.45 farkla % 4.33'e düşmüştür. Bu değerler yüksek akım çeken ve yüksek değerlerde THD'ye sahip iki döküm fabrikasının, aynı transformatörden beslenen diğer fabrikalara etkisini göstermektedir. Dokum4 fabrikası da Dokum2 ve Dokum6 gibi yüksek distorsiyonlu

ve yüksek değerde akım çekmektedir. Fakat Dokum2 ve Dokum6 ile aynı trafodan beslenmediği için değişimlerden fazla etkilenmemektedir.

Transformatör bağlantı grubunun dağıtım şebekesindeki harmoniklere etkilerinin incelenmesi için yapılan simülasyon sonuçları:

Tablo 7.10. incelendiğinde, fabrikaların beslendiği transformatörlerin bağlantı grupları değiştirildiğinde manevra merkezlerindeki akım ve gerilim harmonik distorsiyonlarının değişim gösterdiği görülmektedir. Transformatörlerin Dyn11 ve Dyn1 bağlı olması akım ve gerilim THD'sini neredeyse hiç değiştirmediği görülmektedir. Yyn bağlantı grubunda ise akım ve gerilim distorsiyonunun referans simülasyondaki değerlere göre (Dyn11 bağlı) yaklaşık % 10 azaldığı görülmektedir. Fakat bu değerler üç ve üçün katı harmoniklerinin mevcut olduğu sistemlerde farklılık gösterebilir. Simülasyonu yapılan dağıtım şebekesi sanayi bölgesi olduğundan üç fazlı yüklerin yoğun olması nedeniyle alınan ölçüm değerlerinden de görüldüğü gibi üç ve üçün katı harmoniklerini içermemektedir. Teorik olarak primeri üçgen bağlı transformatörlerde sekonder tarafındaki üç ve üçün katı harmonikleri (triplen harmonikler) pirimer tarafta sirkülasyon akımlarından dolayı şebeke tarafına geçememektedir. Bu özelliğinden dolayı pirimeri üçgen bağlı transformatörler primeri yıldız bağlı transformatörlere göre daha avantajlıdır.

Transformatörlerin empedanslarının şebeke harmoniklerine etkilerinin incelenmesi için yapılan simülasyon sonuçları:

Tablo 7.12. transformatör empedanslarının % 50 arttırılmasıyla manevra merkezleri ve referans değerleri alınan Dokum2, Dokum6 ve lineer yükün THD değerleri üzerindeki değişimi göstermektedir. Trafo empedanslarının arttırılması MM1, MM2, MM3 ve MM6'nın akım ve gerilim THD değerlerini düşürmektedir. Değerleri değişen transformatörlerin AG tarafındaki Dokum2 ve Dokum4'te ise gerilim distorsiyonu % 11.24'ten % 13.78'e yükselmektedir. Akım distorsiyonları ise azalmaktadır. Şebekedeki kullanıcılar için önemli olan şebekeden beslendikleri noktalardan aldıkları gerilimin daha az harmonik bileşenler içermesi olduğundan manevra merkezlerindeki gerilim THD'sindeki düşüş AG tarafında fabrikaların beslendikleri noktalardaki gerilim THD'sindeki artıştan daha az zararlıdır. Diğer bir ifadeyle transformatörlerin empedanslarındaki artış fabrikaların gerilim THD'sini arttırdığından şebeke için istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle fabrikaların

beslendikleri transformatörlerin kısa devre güçlerinin büyük olması istenir. Kısa devre gücünün büyük olması trafo empedanslarının daha küçük olması anlamına gelir. Trafo empedanslarının daha küçük olması da daha az gerilim THD'si anlamına gelir. Trafoların aşırı yüklenmesi ve aşırı ısınması da trafo empedanslarını negatif yönde etkileyen bir durumdur. Bilindiği gibi iletkenlerde ısının artması direncin artmasına neden olur. Transformatörlerin aşırı yüklenip ısınması transformatör empedansını arttıracığından daha fazla gerilim THD'sine neden olacaktır.

Manevra merkezleri arasındaki hat empedanslarının şebeke harmoniklerine etkilerinin incelenmesi için yapılan simülasyon sonuçları:

Tablo 7.13. incelendiğinde MM1, MM2, MM3 ve MM6'nın gerilim THD'sinin %4 ile % 0.91 arasında azalış gösterdiği, akım THD'leri ise % 0 ile % 0.8 arasında artış gösterdiği görülmektedir. Dokum 2 ve Dokum6'da ise gerilim THD'leri % 0.36 azalmış, akım THD'leri ise Dokum2'nin % 0.34, Dokum6'nın ise % 0.18 arttığı görülmektedir.

Manevra merkezlerindeki harmoniklerinin diğer manevra merkezleri üzerinde ve TEİAŞ 3 TM üzerindeki etkilerinin incelenmesi için yapılan simülasyon sonuçları:

Tablo 7.14. incelendiğinde manevra merkezleri içinde diğer manevra merkezleri üzerinde en fazla etkiye sahip manevra merkezinin MM1 olduğu görülmektedir. Yalnızca MM1'in harmonikleri devrede iken TEİAŞ trafosundaki gerilim THD'si % 0.42 iken akım THD'si % 0.90 olmaktadır. Manevra merkezlerinin anlık simülasyonda aktif güçleri (yaklaşık olarak) büyükten küçüğe doğru sırasıyla MM1(13.6 MW), MM3 (10 MW), MM2 (6.8 MW) ve MM6 (4.4 MW) şeklindedir. Diğer manevra merkezleri üzerinde MM1'in en fazla etkiye sahip olması en fazla yükün MM1'de olmasıdır. Çektiği harmonikli akımlar diğerlerine göre yüksek değerlerde olduğundan diğer manevra merkezleri üzerinde oluşturduğu gerilim THD değerleri daha yüksek olmaktadır.

“Bir Dağıtım Şebekesinin Güç Kalitesi Ve Harmonikler Yönünden İncelenmesi” adlı bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre yapılabilecek öneriler aşağıdaki gibidir:

- Elektrik tesisleri yapılandırılırken yüksek harmonik distorsiyonlu yüksek akım çeken fabrikaların transformatörleri diğer fabrikalardan ayrı olmalıdır. Eğer farklı transformatörden beslenmeleri mümkün değilse yüksek distorsiyonlu

fabrikanın diğere fabrikaları etkilememesi için harmonik ölçümlerinin yapılp gerekli filtreler takılmalıdır.

- Sanayi bölgeleri gibi birçok tüketicinin ortak beslendiği dağıtım şebekelerinde güç kalitesi analizlerinin sürekli olarak izlenilmelidir. SCADA sistemleri kurulurken güç kalitesinin de izlenebileceği sistemler kurularak fabrikaların harmonik yönünden incelenerek yüksek harmonikli fabrikalara enerji fiyatı farklı tarifeden uygulanmalıdır.

- Fabrikalar ileride tekrar bir yatırım ve masraf yapılmaması için ilk olarak yapılandırılırken harmonikler göz önünde bulundurulup sistem elemanları ve filtre sistemleri kurulmalıdır.

- Besleme transformatörlerinin ölçümleri iyi yapılp aşırı yüklenme ve ısınma nedeniyle daha yüksek harmoniklere maruz kalmamak için daha büyük değerde transformatörler seçilmelidir.

- Fabrikalarda kullanılan ölçüm cihazları seçilirken harmonikli akımları ölçebilecek (True RMS) cihazları seçilmelidir.

- Bir elektrik sisteminde değişiklik yapılması söz konusu ise, sistemin simülasyonunun yapılabilmesi için elektriksel modeli oluşturulmalı ve değişik varyasyonlarla sistemin cevabı belirlenmelidir.

- Ülkemizde dağıtım şebekelerinde kullanıcıların elektriksel olarak birbirlerini ve şebekeyi kirletmemesi için reaktif güçlere sınırlamalar getirildiği gibi, harmoniklere de gerekli sınırlandırmalar getirilmelidir.

- Kullanıcılar her geçen gün önemi artan harmonikler hakkında bilgilendirilmelidir.

- Dağıtım şebekelerinde döküm fabrikaları gibi yüksek harmonik distorsiyonlu yüksek seviyelerde akım çekerek sistemi elektriksel olarak kirleten fabrikalarda incelemeler yapılmalı yüksek harmonik distorsiyona neden olan eski döküm ocaklarının değişimi için teşvikler yapılmalıdır.

- Harmoniklerin elimine edilebilmesi için, daha önceki konularda değinildiği gibi elektriksel olarak bazı zararlı etkileri olan pasif filtrelerin yerine aktif filtrelerin kullanımının artırılması ve bu filtrelerin kullanıcıların tercih edebilmesi fiyatlarının düşmesi için ülkemizdeki yerli üretimleri arttırılmalıdır.

9. KAYNAKLAR

- ABB Filtre Kataloğu, Harmonik Filtre Sistemleri, www.abb.com, Ziyaret tarihi 15.01.2009.
- ABB Technical Guide No.6, 2000. Guide to Harmonics with AC Drives, ABB Industry, Helsinki.
- Acarkan B., 2006. Ofis Donanımının Harmonik Etkinliğinin Kestirimi Ve Harmonik Analizi, Doktora Tezi, FenBilimleri Enstitüsü, istanbul.
- Adak S., 2003. Enerji Sistemlerinde Harmonik Distorsiyonun Azaltılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, FenBilimleri Enstitüsü, istanbul.
- Akgeyik O., 2005. Kesintisiz Güç Kaynaklarında Kullanılan Doğrultucuların Oluşturduğu Akım Harmoniklerinin Analizi, Yüksek lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Almeida A. T., 2003. Power Quality Problems and New Solutions, International Conference on Renewable Power and Power Quality, April 9 – 11, Vigo.
- Arrillaga, J, Smith, B.C, Watson, N.R and Wood, A.R, 1997. Power System Harmonic Analysis, John Wiley&Sons, New York.
- Baggini, A., Desmet, j., 2003. Neutral Sizing in Harmonic Rich Installations, Power Quality Application Guide 3.5.1.
- Baioni, 2006. Protection And Control Devices, Electrical Installation Handbook, Fourth edition, Bergamo.
- Bilge M., 2008. Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Pasif Filtrelerle Eliminasyonu, Yüksek lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Cesur A., 2006. Kayseri Ve Civarı Elektrik T.A.Ş. Görev Bölgesinde Enerji Kalitesi İzleme Sistemi Ve Enerji Kalitesizliğinin Kayseri Sanayiine Etkileri, Kayseri.
- Chapman D., 2001. The Cost of Poor Power Quality, Power Quality Application Guide, Section 2.1.
- Çakıroğlu A. O., 2007. Kompakt Flüoresan Lambaların Oluşturdukları Harmoniklerin Şebeke Üzerine Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.

- Demirkol Ö. 2006. Harmonik İçeren ve Dengesiz Şebekelerde Ölçme Ve Kompanzasyon, Yüksek lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Dugan R.C., McGranaghan F.M., Beaty H.W, 1996. Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill.
- Engin B., 2008. Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Kompanzasyon Ve Enerji Kalitesi Sorunları, Yüksek lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Faltis D., 2008. For most facilities - Huge cost savings available through Reducing harmonic distortion, www.mtecorp.com, Ziyaret tarihi 09.01.2009.
- Fassbinder S., 2003. Passive Filters, Power Quality Application Guide, Section 3.3.1.
- Ferracci P., 2001. Power Quality, Schneider Electric , Cahier Technique no199.
- Ferracci P., 1999. Harmonic disturbances in Networks and their treatment, Schneider Electric , Cahier Technique no199.
- Filiz C., 2006. Güç Sistemlerinde Harmonikler Ve Filtrelemelerin İncelenmesi. Yüksek lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- Gosbell, V., Perera, S., Smith V., 2002. Voltage Unbalance, Integral energy, Power Quality Centre, University of Wollongong, Technical Note No.6.
- Harlow J. H., 2004. Electric Power Transformer Engineering, CRC Press LLC. U.S.
- Hemetsberger F. A., 2003. An Investigation Of Power Quality Problems In A Remote Mine Site, M.S. Thesis, The University of Queensland.
- İlaslaner İ, 2006. Güç Kalitesinde Harmonikler ve Filtrelenmesi. Yüksek lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- IEEE P519A/D5, 1996. Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems, Harmonics Working Group (IEEE PES T&D Committee) and SCC22, New York.
- IEEE Std 141-1993 (Revision of IEEE Std 141-1986), 2 December (1993), IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, USA.
- IEEE Std 18-2002 (Revision of IEEE Std 18-1992), IEEE Standard for Shunt Power Capacitors, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York.
- IEEE Std 1531-2003, IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York.
- Jose T.L., R.E.C Calciut, 2000. Power Quality-An Overview. Professor Dept. of Elect. Eng. R.E.C Calciut.

- Keulenaer H. D., 2004. The hidden cost of poor power quality, European Copper Institute, Power Quality Application Guide.
- Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A. ve Arıkan, O., 2003. Elektrik Tesislerinde Harmonikler , Birsen Yayınevi Ltd. Sti. , İstanbul.
- Larsson M. 2000, Coordinated Voltage Control in Electric Power Systems, Doctoral Dissertation, Lund University.
- Marshall, G., Heathcote, M., 1997. Electrical Design, A Good Practice Guide CDA Publication 123, Copper Development Association.
- Özcan İ. C., 2006. Endüstriyel Tesislerde Harmonik Sorunları ve Çözümleri. Yüksek lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Özkaya H., 2007. Parallel Active Filter Design, Control, And Implementation, M.S. Thesis, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University, Ankara.
- Power Quality Service Center, 2005. Customer Financial Impact/Risk Assessment Tool, USA.
- Robert D. Henderson, Patrick J. Rose, 1994. Harmonics:The Effects on Power Quality and Transformers.IEEE Transactions On Industry Applications,Vol.30,No. 3.
- Sağlam H., 2005. Dağıtım Transformatörlerinin Bağlantı Gruplarına Göre Harmonik Simülasyonu.Yüksek lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Schonek J., 2001. The Singularities Of The Third Harmonic, Schneider Electric , Cahier Technique no202.
- Sevgi L. 2005. EMC, Güç Kalitesi Ve Harmonik Analizi, Endüstriyel & Otomasyon Dergisi, Haziran 2005.
- Sucu M., 2003. Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi Ve Simülasyonu, Yüksek lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Şahin Y. G., 2006. Harmoniklerin Yeraltı Güç Kablolarına Etkisinin Belirlenmesi, Yüksek lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Şenyurt Ö. 2006. Elektrik Tesislerinde Hızlı Fourier Dönüşümü ile Harmonik Analizinin Yapılması. Yüksek lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Tanaskovic, M., Nabi, A., Misur, S., Diamanti, P., McTaggart, R., 2005. Coupling Capacitor Voltage Transformers as Harmonics Distortion Monitoring Devices in

Transmission Systems, International Conference on Power Systems Transients (IPST'05), Canada on June 19-23, Paper No. IPST05 – 031.

- Wagner V. E., 1993. Effects of Harmonics on Equipment, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 8, No. 2.
- Wiechowski, W., Lykkegaard, J., Bak-Jensen, B., Bak, C. L., Wasilewski, J. 2007. GPS-synchronized harmonic measurements performed on a 400kV transmission network, 9th international conference, Electric Power quality and utilization, Barcelona 9-11 october.