ELEKTRİK TESİSLERİNDE HIZLI FOURİER DÖNÜŞÜMÜ İLE HARMONİK ANALİZİNİN YAPILMASI

Özer ŞENYURT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EYLÜL 2006
ANKARA

Özer ŞENYURT tarafından hazırlanan ELEKTRİK TESİSLERİNDE HIZLI FOURİER DÖNÜŞÜMÜ İLE HARMONİK ANALİZİNİN YAPILMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Çetin ELMAS
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oybirliği ile Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. Ömer Faruk BAY

Üye : Prof. Dr. Çetin ELMAS

Üye : Yrd. Doç. Dr. Şevki DEMİRBAŞ

Üye : _____

Üye : _____

Tarih : 25 / 09 / 2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Özer ŞENYURT

ELEKTRİK TESİSLERİNDE HIZLI FOURİER DÖNÜŞÜMÜ İLE HARMONİK ANALİZİNİN YAPILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)

Özer ŞENYURT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Eylül 2006

ÖZET

Harmonikler elektrik enerji sistemlerinde enerji kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Gerilim ve akım dalga şeklinin ideal olan sinüs şeklinden uzaklaşması olarak bilinen harmonikler, sinüssel bir kaynağın doğrusal olmayan bir elemana uygulanması veya sinüssel olmayan bir kaynaktan beslenen doğrusal ya da doğrusal olmayan bir eleman tarafından oluşmaktadır. Akımla gerilim arasındaki ilişkisi doğrusal olmayan elemanlar, bobinler, transformatörler, yarıiletken malzeme içeren gereçler, fotovoltaik sistemler, kaynak makineleri, konverterler vb.leridir. Harmonikler, elektrik şebekesinde, cihazların yüklenmesinde ve mevcut elektrik gücünde etkiler meydana getirmektedir. Bu etkiler akım ve gerilim dalga şeklinin bozulması yanında, ek kayıpların oluşmasına, verimin düşmesine, cihazların ömürlerinin kısalmasına, ölçü aletlerinin yanlış ölçüm yapmasına sebep olmaktadır. Enerji kalitesini ve harmoniklerin etkilerini azaltmak amacıyla harmonikler için çeşitli standartlar tanımlanır. Bu standart değerlere ulaşması, pasif ve aktif harmonik filtrelerin kullanılmasıyla harmoniklerin yok edilmesi veya etkilerinin azaltılması ile sağlanmaktadır.

Bu çalışmada özel olarak geliştirilen üç fazlı akım ve gerilim sensörleri kullanılmıştır. Bu sensörlerden alınan veriler veri toplama kartı ile bilgisayara

aktarılmış ve bir yazılım kullanılarak hızlı fourier dönüşümü analizi gerçekleştirmiştir. Analiz sonuçlarının uygunluğu standartlara yorumlanmıştır.

Bilim Kodu : 703.3.012
Anahtar Kelimeler : Hızlı fourier dönüşümü, harmonik analizi
Sayfa Adedi : 135
Tez Yöneticisi : Prof.Dr. Çetin ELMAS

HARMONIC ANALYSIS DETERMINED WITH FAST FOURIER TRANSFORM ON ELECTRIC NETWORKS

(M.Sc. Thesis)

Özer ŞENYURT

GAZİ UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

September 2006

ABSTRACT

Harmonics affect the energy quality substantially in energy systems. Harmonics known as the distortion of an ideal sinusoidal voltage or current waveform are resulted when a sinusoidal waveform is applied to a nonlinear load. Also they may be resulted from linear or nonlinear loads that are connected to a sinusoidal source. Nonlinear elements that have nonlinear current and voltage relationship are inductors, transformers, photovoltaic systems, converters and devices having semiconductor elements, e.t.c. Harmonics cause undesired effects on electric networks, the operation of electric devices and the current electric power. These effects cause additional losses, low efficiency short life time of the devices and the measurement instruments not to measure correctly besides the distortion of current and voltage waveforms. In order to determine harmonics harmonic analyzers and power quality instruments are used.

In this study, three phase current and voltage sensors that have been specially modified are used.

The data obtained from these sensors is transfered to PC via DAQ and Fast Fourier Transform analysis is realized by using a software. The compliance of analysis results to the standarts is interpreted.

Science Code : 703.3.012
Key Words : Fast fourier transform, harmonic analysis
Page Number: 135
Adviser : Prof.Dr. Çetin ELMAS

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Prof. Dr. Çetin ELMAS'a ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
$\mathbf{A_0}$	Fourier serisi doğru bileşen
$\mathbf{A_n}$	Harmonik katsayısı
$\mathbf{B_n}$	Harmonik katsayısı
C	Kondansatör
$\mathbf{C_n}$	Harmonik genliği
CF	Tepe faktörü
D	Bozunum gücü
$\boldsymbol{\varphi_n}$	Harmonik faz açısı
$\mathbf{f_1}$	Temel frekans
$\mathbf{f_n}$	n. harmonik frekansı
I	Akımın etkin değeri
L	Endüktans
n	Örnek sayısı
N	Frekans sayısı
$\boldsymbol{\omega}$	Açısal frekans
P	Aktif güç
PF	Güç faktörü
Q	Reaktif güç
S	Görünen güç
t	Zaman
V	Gerilim etkin değeri
$\mathbf{W_N}$	Faz faktörü

Kısaltmalar	Açıklama
AFD	Ayrık Fourier Dönüşümü
DFT	Discreete Fourier Transform
DAQ	Data Acquisition Systems
FFT	Fast Fourier Transform
HFD	Hızlı Fourier Dönüşümü
IEC	International Electrotechnic Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
PCI	Peripheral Component Interconnect
THD	Toplam Harmonik Bozunumu
TTD	Toplam Talep Bozunumu
VTS	Veri Toplama Sistemleri

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT vi

TEŞEKKÜR viii

SİMGELER ve KISALTMALAR ix

İÇİNDEKİLER xi

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xv

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xvi

RESİMLERİN LİSTESİ xix

1. GİRİŞ 1

2. HARMONİKLER, SEBEPLERİ, ETKİLERİ 3

2.1. Harmonikler 3

2.2. Harmoniklerin Sebepleri 6

2.2.1. Sinüssel olmayan elemanlar 6

2.2.2. Doğrusal olmayan elemanlar 6

2.3. Harmoniklerin Meydana Getirdiği Etkiler 12

2.3.1. Harmoniklerin kullanıcılarda etkileri 13

2.3.2. Harmoniklerin elemanlar üzerindeki etkileri 14

2.3.3. Harmoniklerin güç faktörüne etkisi 17

2.3.4. Harmoniklerin rezonans etkisi 18

3. HARMONİKLERİN MATEMATİKSEL ANALİZİ 21

3.1. Sinüssel Olmayan Dalgalarda Simetri ve İfadeleri 22

Sayfa

3.1.1. Çift fonksiyon simetrisi 22

3.1.2. Tek fonksiyon simetrisi 23

3.1.3. Yarım dalga simetrisi 24

3.2. Sinüssel Olmayan Dalgaların İncelenmesi 24

3.2.1. Simetrik sinüssel olmayan dalgalar 24

3.2.2. Simetrik olmayan sinüssel olmayan dalgalar 25

3.3. Fourier Katsayılarının Bulunması 25

3.3.1. Analitik yöntemle fourier katsayılarının bulunması 26

3.3.2. Grafiksel yöntemle fourier katsayılarının bulunması 26

3.3.3. Ölçme yöntemi ile fourier katsayılarının bulunması 28

3.4. Ayrık Fourier Dönüşümü ve Hızlı Fourier Dönüşümü 29

3.4.1. Ayrık zamanlı fourier dönüşümü 31

3.4.2. Ayrık fourier dönüşümü 31

3.4.3. Ayrık fourier dönüşümü öncesi pencereleme 32

3.4.4. Hızlı fourier dönüşümü 36

3.5. Harmonik Büyüklüklere Ait Temel Kavramlar 50

3.5.1. Sinüssel olmayan durumda elektrik büyüklükleri 50

3.5.2. Güç faktörü 52

3.5.3. Harmonik bozunum (HD) 52

3.5.4. Toplam harmonik bozunumu (THD) 52

3.5.5. Toplam talep bozunumu (TTD) 53

3.5.6. Tepe (Crest) faktörü 53

3.6. Harmoniklerin Sınırlandırılması ve Harmonik Standartları 54

Sayfa

3.6.1. Harmoniklerin sınırlandırılması 54
3.6.2. Harmonik standartları 54
3.7. Harmoniklerin Tespiti 57
4. HARMONİK ANALİZİ CİHAZI VE YAZILIMI 59
4.1. Üç Fazlı Tesise Harmonik Eklenmesi 59
4.1.1. Üç fazlı trafonun hazırlanması 60
4.1.2. Harmonik kirletme devresi 61
4.2. Harmonik Analizi Cihazı 63
4.2.1. Veri toplama sistemleri–VTS (data acquisition systems–DAQ) 63
4.2.2. Üç fazlı akım ve üç fazlı gerilim sensörü 65
4.2.3. Veri toplama kartı (DAQ) 66
4.3. Verilerin Elde Edilmesi 69
4.3.1. VI Logger yazılımı ile verilerin okunması 69
4.3.2. Verilerin yazılım aracılığı ile okunması 71
4.4. Harmonik Analiz Yazılımı 75
4.4.1. Harmonik analiz yazılımı tasarımı 77
5. ÜÇ FAZLI TESİSTE HARMONİK ANALİZİ YAPILMASI 81
5.1. Hava Kompresörü Harmonik Analizi 82
5.2. Üç Fazlı Aydınlatma Tesisi Harmonik Analizi 85
5.3. Bilgisayar Laboratuarı Harmonik Analizi 86
5.4. Alternatörle Beslenen Yük İçin Harmonik Analizi 88
5.5. Harmonik Eklenmiş Şebeke İle Beslenen Yük İçin Ölçüm ve Analizler 90
5.5.1. Harmonik eklenmiş şebekedeki omik yükün harmonik analizi 90

Sayfa

5.5.2. Harmonik eklenmiş şebekedeki motorun harmonik analizi 92

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME 94

KAYNAKLAR 95

EKLER 97
EK-1. Hava kompresörüne ait harmonik analizi ölçüm değerleri 98
EK-2. Aydınlatma tesisine ait harmonik analizi ölçüm değerleri 101
EK-3. Bilgisayar laboratuarına ait harmonik analizi ölçüm değerleri 104
EK-4. Alternatörle beslenen yüke ait harmonik analizi ölçüm değerleri 107
EK-5. Harmonik eklenmiş şebeke ile beslenen omik yüke ait harmonik analizi ölçüm değerleri 110
EK-6. Harmonik eklenmiş şebeke ile beslenen motora ait harmonik analizi ölçüm değerleri 113

ÖZGEÇMİŞ 116

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Kaynak ve yüke göre oluşan harmonikler 6

Çizelge 3.1. Fourier dönüşümü hesaplamasında çarpım sayısı.....39

Çizelge 3.2. Bit tersleme işlemi 40

Çizelge 3.3. Sekiz noktalı örneğin bit terslenmesi işlemi 41

Çizelge 3.4. Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC 61000–2–2 gerilim harmonik bozunum limitleri (k=0,2+12,5/n) 55

Çizelge 3.5. Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekeleri için EN 50160 harmonik bozunum limitleri.....56

Çizelge 3.6. D sınıfı donanım için IEC 61000–3–2 'e göre izin verilen maksimum harmonik akımları 57

Çizelge 3.7. IEC 1000–3–2 'ye göre çeşitli sınıflardaki gereçlerin harmonik sınırları 57

Çizelge 4.1. CB-68LP bağlantı kutusundaki analog giriş bağlantı uçları 68

Çizelge 5.1. Hava kompresörüne (B sınıfı yüke) ait ölçülen değerler.....83

Çizelge 5.2. Flouresant lambalara (C sınıfı yüke) ait ölçülen değerler.....85

Çizelge 5.3. Bilgisayar laboratuarına (D sınıfı yüke) ait ölçülen değerler.....87

Çizelge 5.4. Alternatör ile beslenen (A sınıfı) yüke ait ölçülen değerler.....88

Çizelge 5.5. Harmonik eklenmiş şebekedeki omik yük için ölçüm değerleri.....92

Çizelge 5.6. Harmonik eklenmiş şebekedeki motora ait ölçüm değerleri.....93

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Sinüssel dalga şekli ... 3

Şekil 2.2. Sinüssel olmayan dalga şekli ... 3

Şekil 2.3. Sinüs dalga şekilleri (50Hz, 150Hz, 250Hz, 350Hz) ... 5

Şekil 2.4. Harmonikli dalga şekli ... 5

Şekil 2.5. Seri rezonans devresi ... 18

Şekil 2.6. Paralel rezonans devresi ... 19

Şekil 3.1. Çift fonksiyon simetrisi ... 23

Şekil 3.2. Tek fonksiyon simetrisi ... 23

Şekil 3.3. Simetrik dalga şekilleri ... 25

Şekil 3.4. Simetrik olmayan dalgalar ... 25

Şekil 3.5. Sinüssel olmayan dalganın grafik analizi ... 27

Şekil 3.6. Fourier dönüşümlerinin türleri ... 30

Şekil 3.7. Pencerelenmiş işaretin elde edilmesi ... 33

Şekil 3.8. Üçgen pencere ... 34

Şekil 3.9. Blackman penceresi ... 34

Şekil 3.10. Hamming penceresi ... 35

Şekil 3.11. Hanning penceresi ... 35

Şekil 3.12. Ayrık ve hızlı fourier dönüşümlerinde işlem sayıları ... 39

Şekil 3.13. Basit kelebek gösterimi ... 40

Şekil 3.14. Zamanda seyreltilmiş 8 noktalı HFD algoritması ... 42

Şekil 3.15. Sekiz örnek alınmış işaret ... 48

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.16. Sekiz örnekli işaretin frekans spektrumu 49

Şekil 3.17. Frekansta seyreltilmiş 8 noktalı HFD algoritması 50

Şekil 4.1. Üç fazlı transformatörün uç işaretleri 60

Şekil 4.2. Opamp ile toplayıcı devre şeması 61

Şekil 4.3. Opamp ile toplayıcı devre dalga şekli 61

Şekil 4.4. Harmonik kirletme devresi bir faz eşdeğeri 62

Şekil 4.5. Harmonik kirletme devresi ile kirletilmiş 3 fazlı gerilim 63

Şekil 4.6. CY-IJ31 akım sensörü bağlantısı 66

Şekil 4.7. CY-VJ31 gerilim sensörü bağlantısı 66

Şekil 4.8. NI PCI-6220 veri toplama kartı pin çıkışları 67

Şekil 4.9. CB-68LP bağlantı kutusu 68

Şekil 4.10. VI Logger yazılımı ile analog gerilim giriş ayarları 70

Şekil 4.11. VI Logger yazılımı ile verilerin okunması 71

Şekil 4.12. Veri toplama yazılımı form tasarım görünümü 72

Şekil 4.13. Veri toplama yazılımı form görünümü 72

Şekil 4.14. National Instruments.DAQmx sınıfının kod dizisine eklemesi 73

Şekil 4.15. Ana form sınıf tanımlamaları 73

Şekil 4.16. Oku düğmesi altındaki görev tanımlamaları kod dizisi 73

Şekil 4.17. Oku düğmesi altındaki veri okuma kod dizisi 74

Şekil 4.18. Okunan verilerin text dosyasına kaydedilmesi 75

Şekil 4.19. Harmonik analiz yazılımı form tasarım görünümü 77

Şekil 4.20. Harmonik analiz yazılımı form görünümü 78

Şekil 4.21. Gerilim dalga şekli form görünümü 78

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.22. Akım dalga şekli form görünümü 79

Şekil 4.23. Gerilim harmonikleri form görünümü 79

Şekil 4.24. Akım harmonikleri form görünümü 80

Şekil 4.25. Harmonik analiz yazılımı rapor formu görünümü 80

Şekil 5.1. Harmonik analizi cihazının üç fazlı tesise bağlanması 81

Şekil 5.2. Farklı harmonik kaynaklı yüklerin karakteristikleri 82

Şekil 5.3. Hava kompresörüne ait dalga şekilleri ve harmonik spektrumları 84

Şekil 5.4. Flouresant lambalı aydınlatma tesisine ait dalga şekilleri ve harmonik spektrumları 86

Şekil 5.5. Bilgisayar laboratuarına ait dalga şekilleri ve harmonik spektrumları 87

Şekil 5.6. Alternatörle beslenen yüke ait dalga şekilleri ve harmonik spektrumları.. 89

Şekil 5.7. Harmonik ekleme devresi ile harmonik analiz cihazının bağlantısı 90

Şekil 5.8. Harmonik eklenmiş şebekedeki omik yüke ait harmonik analizi 91

Şekil 5.9. Harmonik eklenmiş şebekedeki motora ait harmonik analizi 93

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. Üç fazlı transformatör 60

Resim 4.2. Harmonik kirletme devresi 62

Resim 4.3. Üç fazlı akım ve gerilim sensörleri 65

Resim 4.4. National instruments PCI-6220 veri toplama kartı 67

Resim 4.5. CB68LP bağlantı kartı ile sensör bağlantıları 69

Resim 4.6. Harmonik analiz cihazı 69

Resim 5.1. Hava Kompresörü 83

Resim 5.2. Üç fazlı alternatör 89

Resim 5.3. Üç fazlı asenkron motor 92

1. GİRİŞ

Elektrik sistemlerinde enerjinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılması süresince gerilim ve akım dalga şeklinin sinüs eğrisi şeklinde olması istenir. Enerji kalitesini belirleyen etkenlerden biri olan bu durum, işletmeden kaynaklanan bazı nedenlerden dolayı sağlanamayıp, gerilim ve akım dalga şekilleri sinüs eğrisi şeklinden uzaklaşır. Sinüs biçiminden farklı olan gerilim ve akım dalga şekilleri, farklı frekanslı gerilimlerin veya akımların toplamından oluşmaktadır ve harmonik kirlenme olarak tanımlanır.

Güç sistemlerinde gerilimle aynı şekilde akım çeken motorlar, ısıtıcılar vb. doğrusal (lineer) yükler akım dalga şeklinde bir bozulmaya neden olmazlar. Ancak, şebeke geriliminden farklı (darbeli) akım çeken doğrultucular, motor sürücüleri, güç kaynakları, ark ocakları vb. gibi doğrusal olmayan (nonlineer) yükler, akım veya gerilim dalga şeklinde bozulmalara sebep olurlar. Bu durum sistem ve cihazlarda pek çok soruna neden olmaktadır.

Harmoniklerin bulunduğu bir elektrik sistemi çalışmasına devam ederken çalışmanın sürekliliği, güç iletim sisteminin sağlamlığına ve donanımın hassasiyetine bağlıdır. Bir fabrika yüksek harmoniklerin kaynağı olurken, diğer bir taraftan ise normal çalışmasına devam edebilir. Bu harmonik kirlenme çoğu kez şebeke elektrik dağıtım sistemi üzerinden taşınabilir ve aynı sistemde ondan daha duyarlı komşu tesisleri de etkileyebilir.

Güç sistemlerinde; ek kayıplar, ek gerilim düşümleri, rezonans olayları, güç faktörünün değişmesi, hatalı ölçmeler, koruma sistemlerinin hatalı çalışması gibi pek çok etkisi olan harmoniklerin etkilerinin bilinmesi ve işletmelerde analizlerinin yapılması hem enerji kalitesi, açısından hem de işletmenin sürekliliği açısından son derece önemlidir.

Elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen ana faktörlerden biri olan temel frekanslı sinüssel dalga şekli, devredeki elemanların özelliğine ve kaynağın durumuna göre

sinüssel özelliğinden uzaklaşır. Sinüssel olmayan dalga olarak isimlendirilen bu dalga biçimi temel frekanslı sinüssel dalga ile frekans ve genlikleri farklı diğer sinüssel dalgaların toplamından oluşmaktadır. Temel sinüssel dalga dışındaki dalga şekilleri harmonik olarak adlandırılmaktadır.

Sinüssel 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.

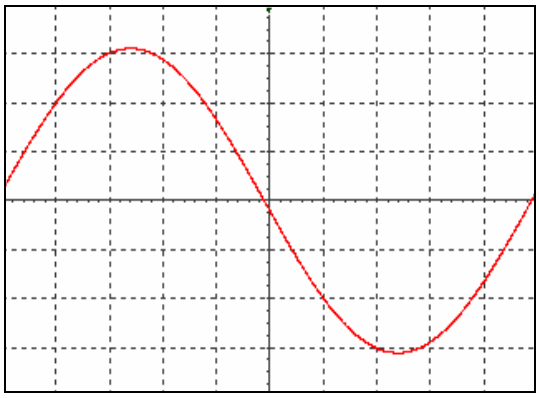
Harmonik analiz cihazları ile yapılan analizlerde sinyalin örneklenmiş verileri kullanılarak hızlı fourier dönüşümü yöntemi ile harmonik bileşenler hesaplanmaktadır. Hızlı fourier dönüşümü, ayrık fourier dönüşümünün faz faktörünün simetri ve periyodiklik özelliğini kullanarak analiz süresini önemli ölçüde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

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

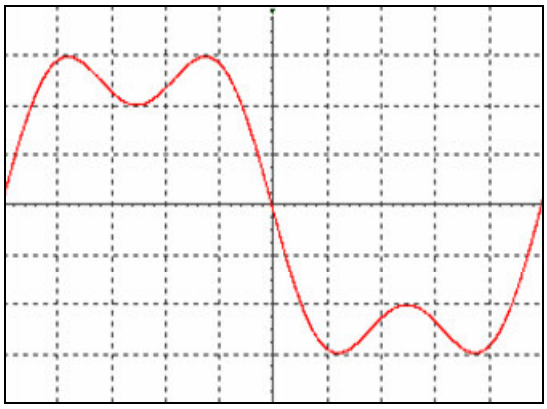
2. HARMONİKLER, SEBEPLERİ, ETKİLERİ

2.1. Harmonikler

Elektrik tesislerinde akım ve gerilimin dalga şeklinin sabit frekans ve genlikte olan sinüssel şekilde olması arzu edilir. Ancak sistemde bulunan doğrusal olmayan kaynak veya doğrusal olmayan yüklerin etkisiyle akım ve gerilim dalga şekli tam sinüssel olmamaktadır.



Şekil 2.1. Sinüssel dalga şekli



Şekil 2.2. Sinüssel olmayan dalga şekli

Belirli bir frekansa sahip ve periyodik sinüssel olmayan dalga şeklinin matematiksel olarak saf sinüssel dalga şekillerinin toplamı şeklinde yazılabilmektedir. Toplam şeklinde yazılan bu sinüssel dalgaların frekansları ana bileşenin frekansının tam katsayıları şeklindedir ve her bir bileşen ana bileşenin harmonikleri olarak

adlandırılmaktadır. Güç sistemlerinde, yüklerin büyük çoğunluğunun simetrik dalga şekillerine sahip olması sebebiyle, genellikle tek katsayılı harmonikler mevcuttur. Bunun yanında, ark ocakları gibi normalde simetrik olan bir kısım yükler bazı çalışma durumlarında hem tek, hem de çift katsayılı harmonik üretirler.

Harmonikler, genel olarak doğrusal olmayan elemanlar ile sinüssel olmayan kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasından meydana gelirler. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde bulunması sinüssel dalganın bozulması anlamına gelir. Bozulan dalgalar sinüssel olmayan dalga olarak adlandırılır. Joseph Fourier sinüssel olmayan bir dalganın değişik genlik ve frekansa sahip sinüssel dalgaların toplamı şeklinde ifade edilebileceğini açıklamıştır. Fourier serisi olarak isimlendirilen bu eşitlikte temel frekans ve diğer frekanslardaki bileşenlerin toplamı sinüssel olmayan dalganın fonksiyonunu vermektedir [1].

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n . \sin n.t + B_n . \cos n.t \right) \tag{2.1}$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n . \sin\left(n.t + \varphi_n \right) \tag{2.2}$$

$$C_n = \sqrt{\left(A_n^2 + B_n^2 \right)} \tag{2.3}$$

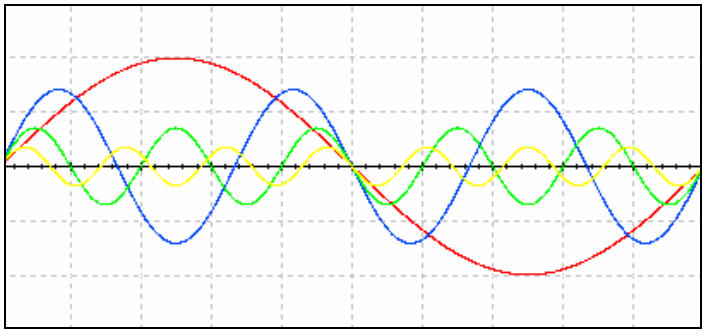
$$\varphi_n = \tan^{-1}\left(B_n / A_n \right) \tag{2.4}$$

$$c(t) = C_1 . \sin\left(\omega.t + \varphi_1 \right) + C_2 . \sin\left(2.\omega.t + \varphi_2 \right) + ... + C_n . \sin\left(n.\omega.t + \varphi_n \right) \tag{2.5}$$

Burada; A_0 doğru bileşeni veya ortalama değeri, $A_1, A_2, ... A_n$, $B_1, B_2, ... B_n$ ile harmonik katsayılarını, $n = 1,2,3,...$ harmonik mertebesini, C_1 birinci harmoniğin genliğini, $C_2, ... C_n$ harmonik bileşenlerin genliklerini, temel bileşen ve harmonik bileşenlerin faz açılarını $\varphi_1, \varphi_2, ... \varphi_n$ göstermektedir. $\omega = 2.\pi.f_1$ temel frekanstaki

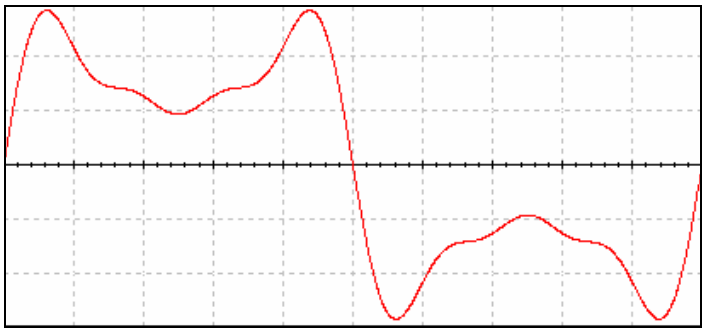
açısal hızı, temel bileşen frekansı ile n. harmonik frekansı arasında, $f_n = n.f_1$ bağıntısı vardır.

Harmonik, temel sinüssel dalga dışındaki dalga şekillerine denir. Avrupa ülkelerinde temel dalga frekansı 50Hz'dir. Buna göre 150Hz üçüncü harmonik, 250Hz beşinci harmonik, 350Hz yedinci harmonik bileşen olarak adlandırılır.



Şekil 2.3. Sinüs dalga şekilleri (50Hz, 150Hz, 250Hz, 350Hz)

Şekil 2.3'te verilen farklı genlik ve frekanslardaki sinüssel dalgaların toplamlarından oluşan sinüssel olmayan dalga Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Harmonikli dalga şekli

Sinüssel olmayan dalganın fourier serisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$f(t) = V_1.\sin(\omega.t) + V_3.\sin(3.\omega.t) + V_5.\sin(5.\omega.t) + V_7.\sin(7.\omega.t)$$

$$f(t) = V_1.\sin(2.\pi.50.t) + V_3.\sin(3.2.\pi.50.t) + V_5.\sin(5.2.\pi.50.t) + V_7.\sin(7.2.\pi.50.t)$$

2.2. Harmoniklerin Sebepleri

Akımda ve gerilimde bulunan harmonik bileşen, kaynak ve yükün durumuna bağlı olarak oluşmaktadır. Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi sistemde harmoniğin varlığı ya kaynağın sinüssel olmamasından, ya da yükün doğrusal olmamasından kaynaklanmaktadır [1].

Çizelge 2.1. Kaynak ve yüke göre oluşan harmonikler

İşletme Türü		Harmonik Bileşenler		
Kaynak	Yük	Gerilimde	Akımda	Açıklama
Sinüssel	Doğrusal	-	-	Harmonik yok
Sinüssel	Doğrusal olmayan	-	Var	Yük nedeniyle akımda harmonik
Sinüssel olmayan	Doğrusal	Var	Var	Gerilim ile aynı harmonik bileşen
Sinüssel olmayan	Doğrusal olmayan	Var	Var	Aynı ve farklı harmonik bileşenler bulunabilir

2.2.1. Sinüssel olmayan elemanlar

Elektrik enerjisinin elde edilmesinde kullanılan cihazlar yapısından dolayı harmonikleri üretirler. Bu cihazların başlıcaları; senkron jeneratörler, statik VAr kompanzatörleri, statik dönüştürücülerdir.

2.2.2. Doğrusal olmayan elemanlar

Doğrusal olmayan elemanlar bir sinüssel elektrik enerji sistemine bağlandığında harmonik akım ve gerilimlere neden olurlar.

Doğrusal olmayan bir yük akım çektiğinde, akım şebeke ile yük arasındaki empedans üzerinden akmaktadır. Bunun sonucunda, aradaki empedans üzerindeki gerilim düşümü, her bir akım harmoniğine karşılık bir gerilim harmoniğinin oluşmasına,

kısaca gerilim dalga formunda bozulmaya neden olur. Gerilimdeki bozulmanın miktarı şebeke empedansına ve çekilen harmonik akımın büyüklüğüne bağlıdır.

Manyetik devrede doyma nedeniyle akımla gerilim arasında doğrusal bir bağıntı olmaması harmoniğin oluşmasına neden olur. Bozulmanın en az olmasını sağlamak için doyma bölgesinden uzakta çalışmak gerekir.

Elektrik devresi doğrusalsızlığı da benzer şekilde devrenin akımıyla gerilimi arasındaki doğrusalsızlıktan kaynaklanmaktadır. Bu da aynı şekilde harmonik bileşenlerin oluşmasına neden olur.

Akımı ile gerilimi arasındaki ilişki doğrusal olmayan elemanlara doğrusal olmayan elemanlar denir. Bu elemanların oluşturduğu devreye doğrusal olmayan devre denmektedir. Doğrusal olmayan devre, elemanlarının en az biri ya da tamamı doğrusal olmayan devre olabilir.

Doğrusal olmayan elemanlara; transformatörler, elektrik makineleri, güç elektroniği elemanları, ark fırınları, gaz deşarj aydınlatma elemanları, bilgisayar gibi elemanlar örnek gösterilebilir.

Senkron jeneratörler

Senkron jeneratörler aynı zamanda harmonik üreticileridir. Senkron jeneratörlerde üretilen gerilimin sinüssel olması için hava aralığındaki manyetik akının düzgün olması ve mümkün oldukça sinüse yaklaştırılması gereklidir. Bu kutup yüzeyleri kavisli yapılarak, sargıları dağıtılarak, sargı adımını kesirli yapılarak sağlanabilir. Jeneratörlerin bağlantı şekilleri de harmoniklerin belirleyicisidirler [2].

Çıkıntılı kutuplu jeneratörlerde kutuplar kavisli yapıldığında kutup ile stator arasındaki hava aralığı kutbun her yerinde aynı olmayacağından kutup ekseninde hava aralığı, kutup kenarlarına göre daha çok olur. Manyetik akı kutup ekseninde en

fazla olup kutup kenarlarına doğru gidildikçe eğrisel şekilde azalır. Bu durumda akı dağılışı sinüssele yaklaştığından indüklenen elektro-motor-kuvvette (emk) daha düzgün bir sinüs dalgası verir.

Sargıların dağıtılmasıyla, her bir bobinde indüklenen emk'nın ani değerlerinin toplamı bileşke emk'yı meydana getirirken sinüssel dalga şekline yakın bir emk'nın elde edilmesini sağlar.

Sargı adımının kesirli yapılması jeneratörlerde sıklıkla kullanılır. Böylece elde edilen emk dalga şekli sinüssele yaklaştırılmış olur. Bobinde indüklenen emk'nın yok edilmek istenen harmoniğin oranında kısaltılmalıdır. Örneğin üçüncü harmoniğin yok edilmesi için 1/3 oranında kısaltma yapılmalıdır.

Sargısı yıldız bağlı jeneratörde üçüncü harmonikler faz gerilimlerinde varken, fazlar arası gerilimlerde bulunmazlar. Fazlar arasında 120 derece faz farkının olması üçüncü harmonik gerilimlerin fazlar arası gerilimlerde sıfır olmasına neden olur. Beşinci ve yedinci harmonikler ise sargı adımlarının uygun şekilde kısaltılması ile engellenmiş olur. Böylece daha düzgün sinüssel gerilim elde edilmiş olur. Jeneratör sargısı üçgen bağlı ise, üçüncü harmonik gerilimlerinin meydana getirdiği sirkülasyon akımları ısınmalara ve kayıplara neden olur.

Statik VAr kompanzatörleri

Güç sistemlerinde reaktif güç kontrolü amacıyla kullanılırlar. Yapılarında doğrusal olmayan karakteristiğe sahip yarıiletken tristör kullanıldığından çıkışlarında sinüssel olmayan büyüklüklere neden olurlar.

Güç frekansında geçici aşırı gerilimlerin kontrolü, iletim ve dağıtım sistemlerinde dengesiz yükleri besleyen üç fazlı sistemlerin dengelenmesi, gerilim salınımlarının önlenmesi amacıyla kullanılırlar [3].

Statik dönüştürücüler

Güç elektroniği elemanları kullanılarak elde edilen doğrultucular, eviriciler, frekans, gerilim kontrolörleri önemli harmonik kaynaklarıdır. Yapılarında bulunan doğrusal olmayan elemanlar harmonik üretmelerine neden olurlar.

Yüksek doğru gerilimle iletim, doğru akım motorlarının beslenmesi, akü ve foto voltaik sistemler, ulaşım sistemleri, farklı frekans ve gerilimlerle senkron ve indüksiyon motorlarının beslenmeleri vb. yerlerde kullanılan bu dönüştürücüler güç sistemlerinde harmoniklerin kaynaklarındandır [2].

Transformatörler

Elektrik güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan transformatörler manyetik devre doğrusalsızlığı nedeniyle doyuma gidildiğinde harmonik üretmektedirler. Normal işletme şartlarında sinüssel gerilim verecek şekilde tasarlanan transformatörler nominal değerlerin dışında çalıştırıldıklarında nüvenin doyuma ulaşması harmonik seviyelerinin daha fazla artmasına neden olur.

Transformatörün mıknatıslama eğrisinin doğrusal olmaması sinüssel gerilim uygulanmış olmasına rağmen sinüssel olmayan akı ve dolayısıyla sinüssel olmayan bir akım meydana gelmesine sebep olur. Yükün az olması mıknatıslama akımlarının büyük değerler alması neticesinde aşırı uyarmayla üçüncü, beşinci ve yedinci harmonikler etkili olurlar.

Mıknatıslama akımında meydana gelen harmoniklerin şebekeye geçip geçmemesi transformatörün bağlantı grubuna, yıldız noktasının şebekenin nötr noktasına bağlı olup olmamasına ve manyetik devrenin geometrik yapısına bağlıdır.

Transformatörde üç ve üçün katı harmonikler yıldız noktasının toprağa bağlanması durumunda nötr iletkeninden geçeceğinden nötr iletkeninin ısınmasına neden olur.

Diğer harmoniklerin toplamı sıfırdır. Yıldız noktası topraklanmamış ise, üç ve üçün katı harmonikler şebekeye geçemeyeceği için mıknatıslama akımı üçüncü harmoniksiz olacak ve bu da akı dalga şeklinin tepesini bastırır. Üçgen bağlantı durumunda ise üç ve üçün katı harmonikler şebekeden çekilmezler.

Transformatörlerde şebekenin üç ve üçün katı harmoniklerden etkilenmemesi için şebeke tarafının üçgen doğrusal olmayan yük tarafının yıldız bağlanması tavsiye edilir [1].

Primer sargısı yıldız bağlı transformatörlerin yıldız noktası şebekenin nötr noktasına bağlanmaz veya sargıların biri üçgen bağlanır veya büyük güçlü transformatörlerde olduğu gibi üçgen bağlı tersiyer sargı kullanılır [2].

Asenkron motorlar

Asenkron motorlarda statorun oluklarına sarılan sargının iletken dağılımı sinüs formunda yapılamadığından, amper-sarım dağılımı da sinüs formunda değildir. Sargılara sinüssel gerilim uygulandığında her bir faz sargısından geçen akım, akı ve Amper-sarım ifadesi sinüssel olmadığı için harmonikler içerir. Bu harmoniklere, “hava aralığı” harmonikleri adı verilir. Meydana gelen hava aralığı harmonikleri, temel dalga ile birlikte asenkron motoru etkiler. Çünkü frekansları farklı olan bu harmonikler devre parametrelerini değiştirmekte ve bunlara bağlı kayıpların farklı olmasına neden olmaktadır. Ayrıca hava aralığında stator sargısına bağlı olarak meydana gelen yüksek harmonikler zararlı döndürme momenti ve kuvvetlerin meydana gelmesine yol açarlar. Bu durum özellikle sincap kafesli asenkron motora yol vermede oldukça önemlidir [3].

Ark fırınları

Ark fırınları, büyük güçlü harmonik kaynaklarından biridir. Elektriksel ark oluşumu esasına dayanarak çalışan ark fırınları arkın akım-gerilim karakteristiğinin doğrusal olmamasından dolayı harmonik üretirler. Empedansları dengesiz olduğundan sistemde rasgele harmonik akımların oluşumuna neden olurlar.

Ark fırınlarında tipik olarak ikinci, üçüncü, dördüncü ve dokuzuncu akım harmonikleri bulunur. Maksimum harmonik bileşeninin temel bileşenin %30'u kadar olduğu tespit edilmiştir [1].

Gaz deşarjlı aydınlatma

Civa buharlı lambalar, fluoresant lambalar, sodyum lambalar gibi gaz deşarjı prensibiyle çalışan aydınlatma elemanları şebekeden harmonikli akımlar çekilmesine neden olurlar. Aydınlatmada yaygın olarak kullanılan doğrusal olmayan karakteristiğe sahip bu lambalar sistemde üç ve üçün katı harmonik bileşenleri oluştururlar. Ayrıca devrelerinde kullanılan balastların manyetik doğrusalsızlıkları sebebiyle de harmonikler üretilmektedir. Filtreli elektronik balastlar kullanıldığında balastlardan kaynaklanan harmonik etki önemli ölçüde azalmaktadır.

Bilgisayarlar

Hassas yüklerden biri olan bilgisayar sistemleri, yalnızca bozucu etkilerden etkilenmekle kalmayıp aynı zamanda birer etki kaynağıdırlar. Bilgisayarların doğrusal olmayan yük karakteristikleri, güç sistemlerinde anormal gerilim düşümleri, nötr iletkenlerinin aşırı yüklenmesi ve hat gerilim bozunumları gibi bozucu etkilere neden olurlar [1].

2.3. Harmoniklerin Meydana Getirdiği Etkiler

Akım veya gerilim harmoniklerinin varlığı sistemde birçok elemanı etkilemektedir. Harmonik etkilerinin görüldüğü tesislerde sıkça rastlanan sorunlar gerilim ve akım harmonikleri alt başlıkları altında sıralanabilir.

Akım harmoniklerinin etkileri:

- Kullanılabilir güçte azalma ve kayıplarda artma, düşük güç faktörü,
- Üç faz sistemlerde nötr hatta aşırı akımların oluşumu,
- Trafo ve jeneratörlerde aşırı ısınma,
- Akustik gürültüde artma,
- Telefon hatlarında artan girişim.

Gerilim harmoniklerinin etkileri:

- Trafo ve jeneratörlerde aşırı ısınma,
- Kondansatörlerde aşırı ısınma,
- Motorlarda ısınma,
- İzolasyon sistemlerinde yalıtkan stresinin artması,
- Rezonans oluşumu ve yüksek gerilim delinmesi,
- Endüksiyon motorlarda problemler, mekanik salınımlar.

Enerji sistemlerinde harmoniklerle gerilim ve akım dalga şekillerinin bozulması çok çeşitli problemlere yol açmaktadır. Bunlar maddeler halinde şöyle verilebilir [2]:

- Jeneratör ve şebeke geriliminin bozulması,
- Gerilim düşümünün artması,
- Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenme ve dielektrik zorlanma nedeniyle zarar görmesi,
- Enerji sistemindeki elemanlarda ve yüklerde kayıpların artması,
- Senkron ve asenkron motorlarda moment salınımlarının ve aşırı ısınmanın meydana gelmesi,
- Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler,

- Uzaktan kumanda, yük kontrolü vb. yerlerde çalışma bozuklukları,
- Şebekede rezonans olayları, rezonansın neden olduğu aşırı gerilimler ve akımlar,
- Koruma ve kontrol düzenlerinde sinyal hataları,
- İzolasyon malzemesinin delinmesi,
- Elektrikli cihazların ömrünün azalması,
- Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit ve anormal çalışma.

2.3.1. Harmoniklerin kullanıcılarda etkileri

Harmonikler, güç kullanıcılarında şebekeye, cihazların yüklenmesine ve mevcut elektrik gücüne etkileri vardır.

Elektrik şebekesine etki

Harmonikler alternatörlerde, kablolarda, transformatörlerde ve kondansatörlerde belirgin bir aşırı ısınmaya yol açarak şebekeyi olumsuz etkilerler. Bu tip cihazlarda oluşan bu gizli maliyet, çok yüksek olabilir.

Cihazların yüklenmesine etki

Harmonikler güç kaybına yol açar. Güç elemanlarının yıpranmasından dolayı cihazlar bozulabilir veya ömrü kısalabilir.

Mevcut elektrik gücüne etki

Harmonikler tarafından çekilen akım tamamen kayıptır ve %30'luk fazla tüketime yol açabilir. Kullandığımız güç daha az olmasına rağmen daha çok güç kullanılmış gibi ek faturalar ödenir.

Harmonikler güç sisteminde ve güç sistemine bağlanan elemanlar üzerinde olumsuz etkiler meydana getirirler. Harmonikler, motorlar, jeneratörler, 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 frekanslar bulunacağından rezonans meydana gelme olasılığı artacaktır. Rezonans sonucu oluşabilecek aşırı akım ve gerilimler işletmedeki elemanlara önemli zararlar verecektir.

2.3.2. Harmoniklerin elemanlar üzerindeki etkileri

Harmoniklerin iletkenler üzerindeki etkisi

Reaktif güç çeken harmonikli akımlar kabloların ısınmasına neden olur. Ayrıca bu akımlar yüksek frekanslı bileşenler içerdiklerinden (3. bileşen 150 Hz, 5. bileşen 250 Hz,....) kablolarda deri etkisinin oluşmasına neden olurlar. Deri etkisinden dolayı kablonun dış yüzeyi kullanıldığından kablo kesiti düşer ve kablolar ısınır.

Harmonikli akımların 3. bileşenleri ve katları nötrden akarak nötr iletkeni ile toprak iletkeni arasında bir gerilim farkı oluşmasına neden olacaktır. Bu da elektronik cihazlarda yanlış çalışma ve arızalara neden olacaktır.

Harmoniklerin kondansatörler üzerindeki etkisi

Bir kondansatörün kapasitif reaktansı, harmonik frekansına bağlı olarak değişir. Diğer bir deyişle, yüksek frekanslı harmoniklerde reaktans küçülür. Yüksek frekanslı harmoniklerin bulunduğu şebekelerde, kondansatörlerden geçen akım artar. Güç kondansatörleri ilgili standartlar gereği, nominal çalışma akımının 1,3 katında sürekli

olarak çalışabilecek şekilde imal edilirler. Eğer sürekli çalışma akımı harmonikler nedeni ile bu sınırın üzerine çıkarsa kondansatörün ömrü kısalacaktır.

Kondansatörler harmonik üretmezler, ancak harmonik seviyelerinin etkin bir biçimde artmasına neden olurlar. Harmoniklerin kondansatörlerde hem aşırı gerilim, hem de aşırı akımlara neden olması reaktif gücün artmasına sebep olur.

Harmonikler içeren bir gerilim, bobin ve kondansatörlerin bulunduğu bir devreye uygulanırsa harmonik frekanslarından birinde rezonans meydana gelebilir. Devrenin yapısına bağlı olarak seri rezonans meydana gelirse, rezonans frekansında devredeki toplam omik direncin değerine bağlı olarak büyük akımlar dolaşabilir. Bu akımlar bobin ve kondansatör uçlarında aşırı gerilimler oluşmasına neden olurlar. Eğer paralel rezonans meydana gelirse, devrenin şebekeden çekeceği akım azalır. Ancak böyle bir durumda, bobin ve kondansatörlerde dolaşan akım büyük değerlere ulaşabilir. Rezonansların oluşması, sistemde arıza ve hasarlar meydana getirebilir. Bu anlatılan olumsuz sonuçlar, sistem yükünün az olduğu zamanlarda daha sık meydana gelmektedir.

Harmoniklerin motorlar ve jeneratörler üzerindeki etkisi

Harmonik frekansındaki demir ve bakır kayıplarının artması döner makinelerin daha fazla ısınmalarına, makinelerin verimi ve momentinin düşmesine ve daha gürültülü çalışmalarına neden olur. Harmoniklerin, hava aralığında bir bileşke akı üretmesi nedeni ile asenkron motor kalkış yapamayabilir.

Harmoniklerin transformatörler üzerindeki etkisi

Akım harmonikleri bakır kayıplarında artışa, gerilim harmonikleri ise demir kayıplarında artışa neden olurlar. Her iki durumda, manyetik çekirdekteki manyetik alanın yön değiştirmesi, yüksek frekanslarda daha hızlı olduğundan, çekirdekteki

histerezis kayıpları artar. Ayrıca zamanla değişen manyetik akı, iletkenleri kestikçe değişen manyetik alan çelik dilimlerde girdap akımlarını oluşturur. Bu akımlar da ek kayıplara neden olurlar. Kısaca frekans arttıkça transformatör kayıplarda artar. Bu yüzden transformatörün ısınmasında yüksek frekanslı harmonik bileşenler düşük frekanslı harmonik bileşenlerden daha önemlidir [2].

Harmoniklerin iletim hatlarındaki etkisi

Harmonikler iletim sistemlerinde ek gerilim düşümlerine, ek bakır kayıplarına sebep olmaktadır. İletim hatlarında harmonik gerilimler, tepe gerilim değeri ile orantılı olarak dielektrik zorlanmayı arttırırlar. Bu da kablonun kullanım ömrünü kısaltır. Aynı zamanda hata sayısını ve bu nedenle de onarım masraflarını arttırır. Aşırı harmonik gerilimler nedeni ile yeraltı iletim kablolarında delinme meydana gelebilir. Harmoniklerin korona başlangıcı ve sönme seviyeleri üzerinde de tepe gerilimlerinden dolayı etkileri vardır [3].

Harmoniklerin devre kesiciler ve sigortalar üzerinde etkisi

Harmoniklerin varlığı kesicilerin elektromanyetik indüksiyon bobininin doğru çalışmamasından dolayı, açma sırasında meydana gelen arkın yeniden çalışmasına ve kesicinin kapanmasına yol açar. Sigortalarda ise, zamansız kesmelere neden olur. Ayrıca harmonik akımlar, anahtarlama elemanlarında ısınma ve kayıpları arttırır [1].

Harmoniklerin güç elektroniği elemanları üzerinde etkisi

Güç elektroniği elemanları harmonik bozulmaya karşı çok duyarlıdırlar. Bu elemanların doğru çalışması gerilimin sıfır geçişlerinin doğru belirlenmesine bağlıdır. Harmonik salınım gerilim sıfır geçişlerini kaydırabilir. Örneğin tristör kontrollü devrelerde harmonik salınımlar tristörlerin ateşleme anlarının değişmesine neden olabilir [1].

Harmoniklerin ölçü aletleri üzerindeki etkileri

Çoğunlukla kullanılan birçok ölçü cihazı harmonikler tarafından bozunuma uğratılmış akımları ve gerilimleri ölçmek için uygun değildir. Ölçü aletlerinin hemen hemen hepsi saf sinüs dalga şekline göre tasarlanırlar. Harmonik bileşenlerin ölçülen sistemde bulunması ölçü aletlerinin yanlış ölçme yapmalarına neden olur.

Harmoniklerin koruma elemanları üzerindeki etkisi

Koruma elemanları temel bileşen akım ve gerilim için imal edilirler. Aşırı akım koruması gibi elektromanyetik röle uygulamalarında yüksek harmonikler çok fazla etkin değildir. Ancak özellikle ana frekansa karşılık gelen empedans değerinin ölçülmesi ilkesine göre çalışan mesafe koruma rölelerinde, harmonik akımlar büyük ölçme ve değerlendirme hatalarına neden olurlar [2].

Harmoniklerin aydınlatma elemanları üzerindeki etkisi

Akkor telli lambaların ömrü harmonikli gerilimlerde kısalmaktadır. Flouresant lambalar harmonikli gerilimler gürültü ve titreşime neden olurlar.

2.3.3. Harmoniklerin güç faktörüne etkisi

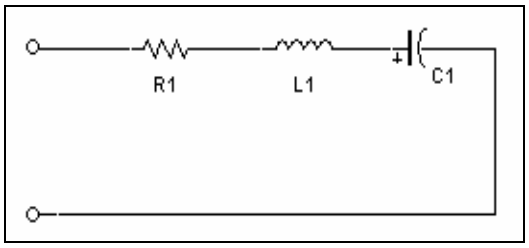
Güç faktörü devredeki aktif gücün reaktif güce oranıdır. Reaktif güç bedelini belirleyen, akımla gerilim arasındaki faz farkını işaret eden cosφ değerinden farklı olarak; güç faktörü (power factor) harmonikli akım ve gerilimler arasındaki faz farkıdır. Harmonikli bir sistemde güç faktörü, cosφ değerinden daha düşük çıkacağından, tüketici sisteminde kompanzasyon yapmış olsa dahi daha önce ödemek zorunda olmadığı reaktif güç bedelini, güç faktörünün yasal sınırın (0,96) altına düşmesinden dolayı ödemek zorunda kalabilmektedir.

2.3.4. Harmoniklerin rezonans etkisi

Bir elektrik devresinde endüktif reaktans ile kapasitif reaktans değerlerinin eşitliği sonucu rezonans, enerji sisteminde aşırı akım, aşırı gerilim gibi problemlere ve enerji akışının kesilmesine neden olabilmektedir. Elektrik devrelerinde seri ve paralel rezonans durumları ile karşılaşılmaktadır.

Seri rezonans

Seri bir RLC devresinde rezonansın meydana gelmesi devreye düşük genlikli bir gerilim uygulansa bile devreden yüksek genlikli rezonans akımlarının akmasına neden olmaktadır. Kondansatör uçlarındaki gerilim de büyük değerlere ulaşmaktadır. Sistemde nadir oluşan seri rezonans, devreden geçen büyük akımlar, anahtarların ve kontaktörlerin kontaklarında aşırı ısınmaya yol açar. Ayrıca devre bağlantı iletkenlerinde, özellikle kondansatör bağlanmalarında aşırı ısınmalara ve kısa devrelere neden olur [1].

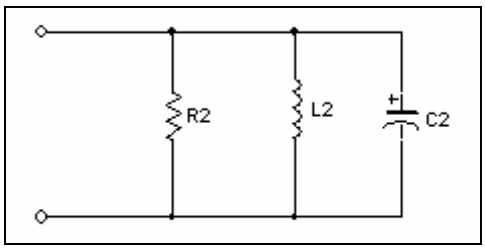


Şekil 2.5. Seri rezonans devresi

Paralel rezonans

Paralel RLC devresinde meydana gelen rezonansta empedans maksimum değer alır. Harmoniklerin mevcut olması durumunda devreden düşük genlikli bir akım geçse bile devre elemanları uçlarında yüksek genlikli, tehlikeli rezonans gerilimleri oluşur. Rezonans frekansında çok büyük değerler alan empedans, harmonik akımları, gerilim

harmoniklerine neden olurlar. Gerilim harmonikleri hem kondansatör ünitesinde, hem de sistem reaktansında yüksek harmonik akımlarına neden olur. Böylece paralel rezonans, doğrusal olmayan yükün oluşturduğu harmonik akımlarını büyütmüş olur [1].



Şekil 2.6. Paralel rezonans devresi

Harmonik bileşenlerle rezonans oluşumu

Enerji sistemlerinde harmonik üreten elemanlar ürettikleri harmonik frekansları sistemi etkileyebilir. Temel bileşen frekansı dışında harmonik rezonansı oluşur ve sistem herhangi bir frekansta rezonansa girebilir. Sistem rezonansı harmonik frekanslarından birine yakın değerde oluşursa, aşırı seviyede harmonik gerilimleri ve akımları ortaya çıkacaktır. Sistem endüktif ve kapasitif reaktansının rezonans frekansı genellikle beşinci ve yedinci harmonik civarında meydana gelir [1].

Elektrik şebekelerinde gerek reaktif güç kompanzasyonu ve gerekse gerilim regülasyonu için kullanılan kondansatörler, harmonik üretmemelerine rağmen harmoniklerin etkilerini büyütürler. Sistemin rezonans frekansını düşürerek harmonik üreten elemanların rezonansa yol açmasını kolaylaştırabilir.

Rezonansın etkileri

Rezonansın oluşması, sistemde arıza ve hasarlar meydana getirebilir. Genel olarak rezonans durumunda; L ve C elemanlarına ait gerilimler yükselir, aşırı akım geçer, devre elemanlarında izolasyon zorlanmaları, kondansatörlerin dielektrik

malzemelerinde delinmeler, aşırı ısınmadan dolayı kalıcı hasarlar meydana gelebilir, harmonik gerilimler yükselir, toplam harmonik bozunum (THD) değerinin artmasıyla tüketicilere uygulanan gerilimin dalga şekli bozulur, dolayısıyla enerji kalitesi olumsuz olarak etkilenir.

3. HARMONİKLERİN MATEMATİKSEL ANALİZİ

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. Sinüssel olmayan bir periyodik işaretin fourier analizi sonrasında zaman domeninde eşitliği aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$f(t) = A_0 + A_1.\sin t + ... + A_n.\sin n.t + B_1.\cos t + ... + B_n.\cos n.t \tag{3.1}$$

Burada,

$$A_0 = \frac{1}{2.\pi}\int_0^{2.\pi} f(t).dt \tag{3.2}$$

$$A_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2.\pi} f(t).\sin(n.t).dt \tag{3.3}$$

$$B_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2.\pi} f(t).\cos(n.t).dt \tag{3.4}$$

eşitlikleri ile belirlenmektedir. Sinüssel olmayan dalganın özelliğine göre bu katsayılardan bazıları bulunacak bazıları ise sıfır olacaktır.

Sinüssel olmayan dalga şekli yalnız sinüslü terimleri ile ifade edilmek istenirse Eş.2.5'teki gibi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$c(t) = C_1.\sin(\omega.t + \varphi_1) + C_2.\sin(2.\omega.t + \varphi_2) + ... + C_n.\sin(n.\omega.t + \varphi_n)$$

3.1. Sinüssel Olmayan Dalgalarda Simetri ve İfadeleri

Sinüssel olmayan dalgaların simetrisine göre fourier serileri farklılıklar gösterebilir. Bu özelliklerden faydalanarak analizler daha kısa sürede gerçekleştirilebilir [1].

Analizi yapılması istenen periyodik bir fonksiyonun fourier serisine açılımında terimlerin hepsi bulunmayabilir. Bu periyodik fonksiyonun değişimini gösteren eğriye bakılarak serinin hangi terimlerden oluştuğunu tespit etmek mümkündür. Böylece serinin elde edilmesi için gereksiz işlemlerin yapılmaması sağlanabilir [3].

Simetri, genellikle dalganın şekline bakmakla görülebilir. Bunun için bazı matematiksel yöntemler de vardır. Başlıca simetri türlerini aşağıdaki gibi sınıflandırabiliriz;

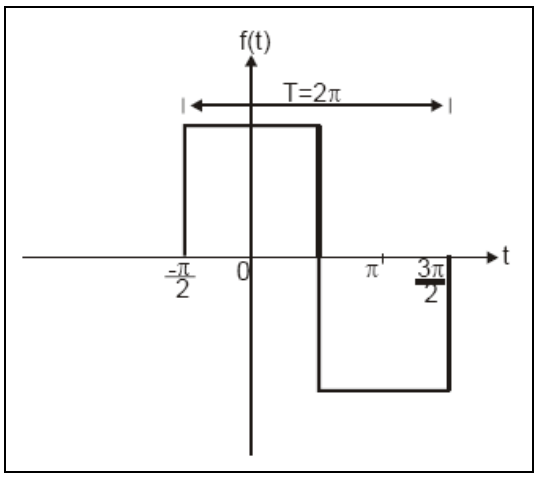
- Çift fonksiyon simetrisi,
- Tek fonksiyon simetrisi,
- Yarım dalga simetrisi.

3.1.1. Çift fonksiyon simetrisi

Bu tip simetri (f - t) = f (t) özelliği ile tanımlanır. Bu simetriye örnek Şekil 3.1'de verilmiştir. Periyodik dalganın, düşey eksenin sağ tarafındaki eğrisi bu eksen etrafında sola katlandığı zaman, dalganın sol tarafındaki eğrisi ile tam tamına üst üste gelirse bu fonksiyon çift fonksiyon simetrisine sahiptir denir. Bu çift fonksiyonun fourier serisinde yalnız kosinüslü terimler vardır. Bu durumda fonksiyon,

$$f(t) = A_0 + B_1.\cos \omega.t + B_2.\cos 2.\omega.t ... + B_n.\cos n.\omega.t \qquad (3.5)$$

şeklinde ifade edilebilir [1].

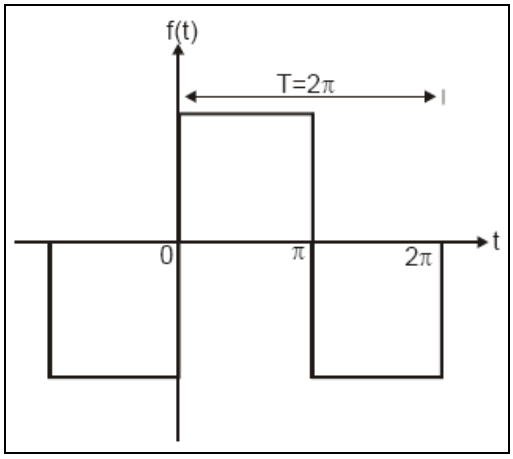


Şekil 3.1. Çift fonksiyon simetrisi

3.1.2. Tek fonksiyon simetrisi

Bu tip simetri $f(-t) = -f(t)$ özelliği ile tanımlanır. Bu simetriye örnek Şekil 3.2'de verilmiştir. Periyodik dalganın düşey ekseninin sağ tarafındaki eğrisi bu eksen etrafında önce sola, sonra soldaki eğrinin üstüne gelecek biçimde yatay eksen etrafında (aşağı ya da yukarı) katlandığı zaman, bu iki eğri parçası üst üste gelirse, bu fonksiyon tek fonksiyon simetrisine sahiptir denir. Bu tek fonksiyonun fourier serisinde yalnızca sinüslü terimler vardır.

$$f(t) = A_0 + A_1.\sin \omega.t + A_2.\sin 2.\omega.t ... + A_n.\sin n.\omega.t \qquad (3.6)$$



Şekil 3.2. Tek fonksiyon simetrisi

3.1.3. Yarım dalga simetrisi

Bu tip simetri $f(t+p) = -f(t)$ özelliği ile tanımlanır. Periyodik bir fonksiyonun yarım periyot parçası, yatay eksen boyunca sağa yada sola doğru p kadar kaydırılır, ve bu eksen etrafında katlamakla iki eğri parçası üst üste gelirse bu fonksiyonda yarım dalga simetrisi vardır. Böyle bir fonksiyonun yatay eksen üzerindeki eğrisi içindeki alan ile yatay eksen altındaki eğrisi içindeki alan birbirine eşit olup böyle bir fonksiyonun fourier serisinde sabit terim yoktur ve seri yalnız tek harmonikli bileşenlerden oluşur.

Fourier serisine açılabilen bir $f(wt)$ fonksiyonu yalnızca yarım dalga simetrili ve tek fonksiyon ise,

$$f(t) = A_1.\sin \omega.t + A_3.\sin 3.\omega.t + A_5.\sin 5.\omega.t + ... + A_n.\sin n.\omega.t \tag{3.7}$$

Çift fonksiyon ise,

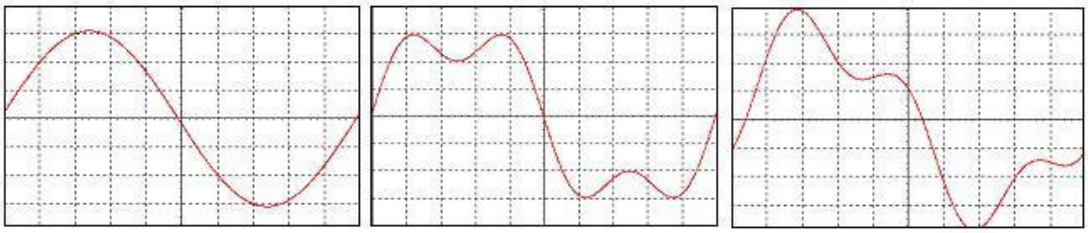
$$f(t) = B_1.\cos \omega.t + B_3.\cos 3.\omega.t + B_5.\cos 5.\omega.t + ... + B_n.\cos n.\omega.t \tag{3.8}$$

şeklindedir.

3.2. Sinüssel Olmayan Dalgaların İncelenmesi

3.2.1. Simetrik sinüssel olmayan dalgalar

Bir sinüssel olmayan dalganın her periyodundaki pozitif ve negatif yarı dalgalar birbirinin aynısı ise bu dalga simetrik bir sinüssel olmayan dalgadır. Elektrik enerji sisteminde sinüssel olmayan ve tek harmonikli bileşenlerden meydana gelen bir dalga simetriktir.

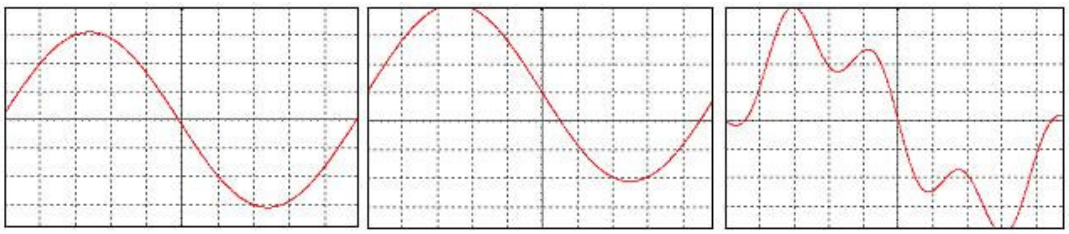


Şekil 3.3. Simetrik dalga şekilleri

Şekil 3.3'te verilen simetrik dalga şekillerinin fonksiyonları sırasıyla $V=V_1.\sin\omega t$, $V=V_1.\sin\omega t + V_3.\sin 3\omega t$ ve $V=V_1.\sin\omega t + V_3.\sin(3\omega t - 90°)$ şeklinde yazılabilir.

3.2.2. Simetrik olmayan sinüssel olmayan dalgalar

Bir sinüssel olmayan dalganın simetrik olmaması pozitif yarı dalga ile negatif yarı dalganın birbirine benzememesidir. Böyle bir sinüssel olmayan dalga bir veya daha fazla çift harmonik veya DC bileşen içermektedir.



Şekil 3.4. Simetrik olmayan dalgalar

Şekil 3.4'te sinüssel dalga şeklinin fonksiyonu $I=I_1.\sin\omega t$ iken, diğer dalga şekilleri simetrik olmayıp fonksiyonları sırasıyla $I=I_{DC}+I_1.\sin\omega t$, $I=I_1.\sin\omega t+I_4.\sin(4\omega t - 180°)$ şeklinde yazılabilir.

3.3. Fourier Katsayılarının Bulunması

Sinüssel olmayan bir periyodik fonksiyonun fourier serisine göre sonsuz sayıda harmonikli bileşeni vardır. Ancak uygulamada bütün bu harmonikli bileşenlerin

katsayıları bulunması olanaksızdır. Bu sebepten uygulamada sadece dikkate değer genliği olan katsayılı terimler hesaplanır ve bu harmonikli bileşenler işleme katılır. Fourier serisinin katsayılarının bulunmasında şu yöntemler kullanılır [3];

- Analitik yöntem,
- Grafik yöntemi,
- Ölçme yöntemi.

3.3.1. Analitik yöntemle fourier katsayılarının bulunması

T periyot süresince sinüssel olmayan bir fonksiyonun fourier katsayıları daha önce verilen Eş. 3.2, Eş. 3.3 ve Eş. 3.4 ile bulunabilir.

$$A_0 = \frac{1}{2.\pi}\int_0^{2.\pi} f(t).dt \qquad A_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2.\pi} f(t).\sin(n.t).dt \qquad B_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2.\pi} f(t).\cos(n.t).dt$$

Bulunan katsayılar ile fourier serisi benzer şekilde Eş. 3.1'deki gibi yazılabilir.

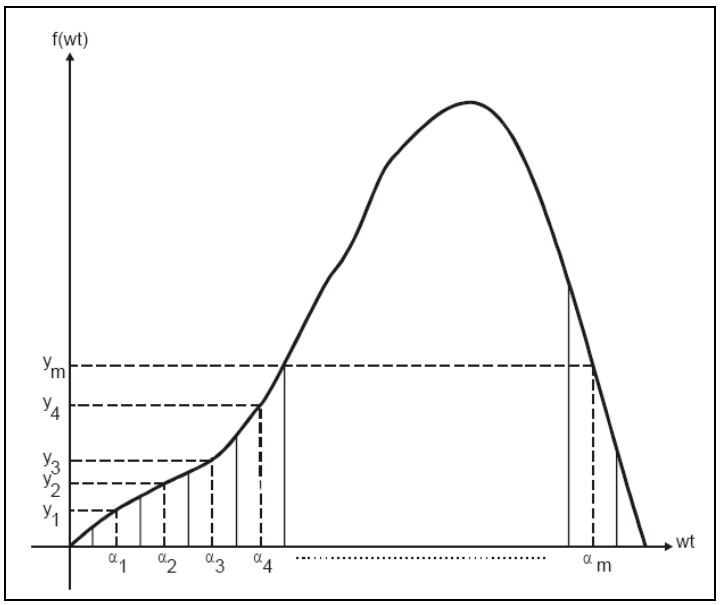
$$f(t) = A_0 + A_1.\sin t + ... + A_n.\sin n.t + B_1.\cos t + ... + B_n.\cos n.t$$

3.3.2. Grafiksel yöntemle fourier katsayılarının bulunması

T periyot boyunca sinüsten farklı bir biçimde değişen *f* (*wt*) fonksiyonunun fourier katsayılarının diğer bir bulunma yöntemi grafik yöntemidir. Bu yöntem çoğunlukla analiz uygulanacak fonksiyonun sayısal değerinin bilinmeyip grafiğinin bilindiği durumlarda kullanılır [3].

Sistemin akım ya da gerilimine ait osiloskoptan alınan grafiklerinin kâğıt üzerine aktarılmasıyla elde edilen akım veya gerilim fonksiyonuna bu yöntem uygulanarak sistemin akım ya da gerilimindeki harmonikler hesaplanabilir [3].

Bu yöntemde, osiloskop çıktısı alınan fonksiyonun yarım periyodu parçalara ayrılır ve her parçanın orta noktası için alınan *a* ve *y* değerleri, ilgili sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının toplamını içeren denklemler kullanılarak fonksiyonun fourier açılımı bulunur. Bu yöntemden iyi bir sonuç elde edebilmek için fonksiyonun şekli mümkün olduğunca çok parçaya ayrılmalı ve bu parçalara ait *a* ve *y* değerleri büyük bir doğrulukla tespit edilmelidir [3].



Şekil 3.5. Sinüssel olmayan dalganın grafik analizi

Grafiksel yöntemle dalganın fourier katsayılarını bulmak için; simetrik bir dalganın pozitif veya negatif yarı dalgalarından biri dikkate alınarak dalga eşit aralıklı dikey parçalara bölünür. Her bir açıya karşılık gelen y değerleri ölçülür. Bulunmak istenen harmonik bileşenleri için bu değerler açının sinüs ve kosinüs değerleri ile çarpılarak her bir açıdaki fourier katsayıları bulunur. Bunların cebirsel toplamları alındığında her bir harmoniğe karşılık gelen fourier katsayıları bulunmuş olur. Son olarak ise bulunan fourier katsayıları ile fourier serisi oluşturulur. Bu hesaplamada temel bileşen için,

$$A_1 = \frac{2}{m}.\left(y_1.\sin\alpha_1 + y_2.\sin\alpha_2 + ... + y_m.\sin\alpha_m\right) \tag{3.9}$$

$$B_1 = \frac{2}{m}.(y_1.\cos\alpha_1 + y_2.\cos\alpha_2 + ... + y_m.\cos\alpha_m) \quad (3.10)$$

n. harmonik değerleri için,

$$A_n = \frac{2}{m}.\sum_{k=1}^{m}(y_k.\sin(n.\alpha_k)) \qquad B_n = \frac{2}{m}.\sum_{k=1}^{m}(y_k.\cos(n.\alpha_k)) \quad (3.11)$$

eşitlikleri kullanılır. Fourier katsayıları bulunduktan sonra fourier serisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$f(\alpha) = A_1.\sin\alpha + ... + A_n.\sin n.\alpha + B_1.\cos\alpha + ... + B_n.\cos n.\alpha \quad (3.12)$$

3.3.3. Ölçme yöntemi ile fourier katsayılarının bulunması

Harmoniklerin ölçülmesi için kullanılan dijital harmonik analizörleridir. Bu analizör ile ölçümde incelenecek işaretin bir periyodunun alınması yeterli olmaktadır.

Yalnız bir periyotta alınan örneklerin diğer periyotlardakilerle aynı olup olmadığı ya da örnek alma sırasında geçici bir bozulma olup olmadığının dikkate alınması gerekir. Bu problemi gidermek için bir periyot yerine birkaç periyot incelenmesi uygundur.

Bu analizörler ile ölçüm yapılan sistemde akım ve gerilim harmonik değerleri, gerilim ve akımın etkin değerleri, güç faktörü, aktif ve reaktif güçleri harmonikleri faz açılarını göstermektedirler.

Sinyallerin incelenmesinde, yatay eksende frekans düşey eksende bu frekansa ait genliği gösteren grafikler kullanılır. Spektrum sinyalin barındırdığı frekansları göstermesi bir bakışta göstermesi açısından tercih edilir.

Herhangi bir periyodik sinüssel olmayan sinyalin frekans spektrumunun saptanmasında, frekans domeni analizi algoritması, en çok ayrık fourier dönüşümü veya hızlı fourier dönüşümüne dayandırılmaktadır.

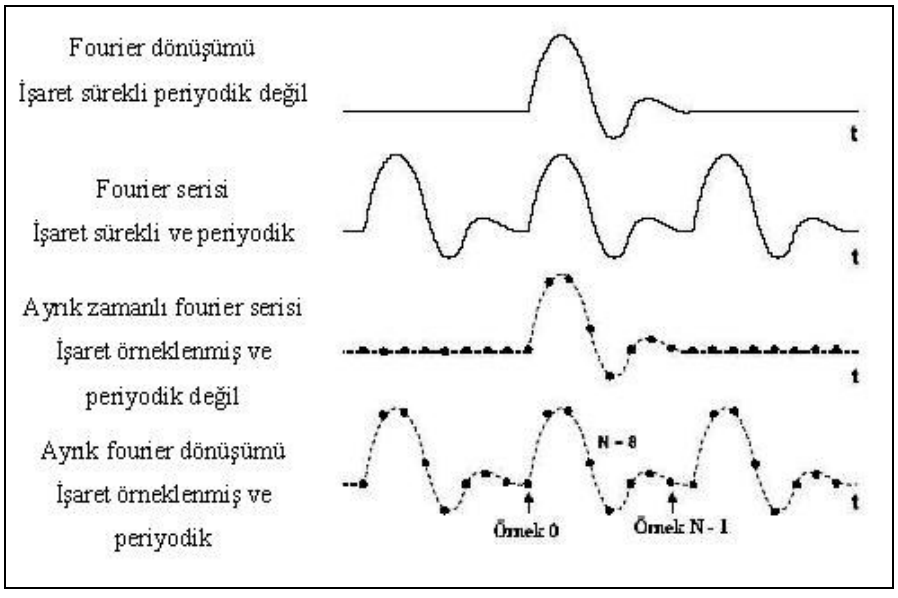
3.4. Ayrık Fourier Dönüşümü ve Hızlı Fourier Dönüşümü

Periyodik bir sinyal, çeşitli genlik ve frekanstaki birçok sinüs sinyalinin toplamı şeklinde ifade edilebilir. Bu işlem fourier analizi olarak bilinmektedir. En düşük frekanslı sinüs sinyali birinci harmonik (temel dalga), diğerleri ise harmonik bileşenler adını almaktadır. Analiz sonunda A_0 katsayısı ve A_n, B_n seri katsayıları hesaplanarak harmonik genlikleri bulunmuş olur. n indisi harmonik mertebesini göstermekte olup, A_n ve B_n n. harmoniğin bileşenleridir. Fourier analizinde integral alma işleminin kullanılması, analiz süresini oldukça uzatmaktadır [4].

Periyodik olmayan sinyallerin de harmonik analizinin yapılabilmesi amacıyla, sayısal işlemci tabanlı Ayrık Fourier Dönüşüm (AFD) yöntemi tanımlanmıştır. Algoritması gereği, AFD yöntemi de fourier analizi gibi uzun bir zaman almaktadır. Daha sonraki yıllarda dönüşüm süresini kısaltmak için AFD'nin özel bir durumu olan Hızlı Fourier Dönüşüm (HFD) yöntemi geliştirilmiştir. HFD algoritmasının hızlı olması, uygun veri sayısının (2^n, n = + tamsayı) işlenmesi ile sağlanmıştır. Fourier analizi periyodik olan sinyalin fonksiyonunu kullanırken, AFD ve HFD yöntemleri periyodik olan veya olmayan sinyalin örneklenmiş verilerini kullanmaktadır.

Sürekli zaman işaretleri devamlı değer almakta, ayrık zaman işaretleri ise sadece belirli anlar için değer almaktadır. Sürekli zaman işaretleri ile ayrık zaman işaretlerinin gösterim aşamasında ayırt edilebilmesi için yaygın olarak sürekli zaman işaretleri için t değişkeni kullanılırken ayrık zaman işaret değişkeni olarak n kullanılmaktadır. Sürekli zaman işaretlerinde bağımsız değişken parantez içerisinde gösterilirken ayrık zaman işaretlerinin bağımsız değişkeni köşeli parantez içerisinde gösterilmektedir. Bu bağlamda $x(t)$ şeklindeki gösterim bir sürekli zaman işaretini,

x[n] şeklindeki gösterim ise ayrık zaman işaretini göstermektedir. Ayrık zamanlı işaretlerin gösterilmesinde değişkenler bir niteliği temsil etmeyip sadece dizin olarak kullanılırlar. Bu nedenle ayrık zaman işaret değişkenleri tam sayılarla sınırlandırılmıştır. Bir sürekli zaman işaretinin alabileceği değerler sınırlandırılmamış ise bu işaret analog işaret olarak adlandırılır. Analog işaretler hem zaman ekseninde, hem de değer bakımından süreklidir. Bir ayrık zaman işaretinin alabileceği değer sayısı sınırlı ise bu işaret sayısal işaret olarak adlandırılır. Örneğin bilgisayar işaretleri tipik olarak sayısaldır. Analog işaretlerin sayısal şekle, sayısal işaretlerin analog şekle çevrilmesi mümkündür. Analog/sayısal çeviriciler önce sürekli zamanda tanımlı analog işareti bir ayrık zamanlı işarete çevirmekte daha (örnekleme) sonra ise ayrık zaman işaretin alabileceği değerleri sınırlandırarak sayısal bir işaret elde etmektedir. Bir işaretin alabileceği değerlerin sınırlı olması işaretin bilgisayarla işlenmesi için şarttır. Fakat teorik olarak analiz ve sentez aşamalarında çoğunlukla sayısal sistemin özelliklerini, yapısını ve çalışmasını belirleyen faktör işaret değerlerinin sınırlı olması değil, işaretin ayrık zamanlı olarak tanımlı olmasıdır. Bu bağlamda, sayısal işaret işleme prensipleri ayrık zamanlı işaretlere genişletilebilmektedir. Bu nedenle, sayısal yöntemlerle işaret ve sistemlerin incelenmesinde ayrık zamanlı işaret ve ayrık zamanlı sistemler temel alınmaktadır [4].



Şekil 3.6. Fourier dönüşümlerinin türleri

3.4.1. Ayrık zamanlı fourier dönüşümü

Bir ayrık zaman işaretinin ayrık zamanlı fourier dönüşümü,

$$X\left(e^{j.\omega}\right)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}x[n].e^{-j.\omega.n} \tag{3.13}$$

olarak tanımlanır. Ayrık zamanlı fourier dönüşümü, bir ayrık zaman işaretinin farklı frekanslardaki karmaşık üstel işaret bileşenlerini vermektedir. Ayrık zamanlı fourier dönüşümü bir ayrık zaman işaretini, sürekli frekans bileşenlerine ayrıştırmaktadır. Bu nedenle bir ayrık zamanlı işaretin ayrık zamanlı fourier dönüşümü frekansa bağlı sürekli bir fonksiyondur. Ayrık zamanlı fourier dönüşümü 2π periyodu ile periyodiktir, bu nedenle sadece 2π temel aralıkta incelenmesi yeterli olmaktadır. Ters ayrık zamanlı fourier dönüşümü,

$$x[n]=\frac{1}{2}\int_{-\pi}^{\pi}X\left(e^{j.\omega}\right).e^{-j.\omega.n}.d\omega \tag{3.14}$$

olarak tanımlanmaktadır. Ters ayrık zamanlı fourier dönüşümü bir ayrık zaman işaretini farklı frekanslardaki karmaşık üstel işaret bileşenlerinin toplamı olarak oluşturulmaktadır. Bir işaretin fourier dönüşümünün, genlik spektrumu ve faz spektrumu,

$$\left|X\left(e^{j.\omega}\right)\right| \qquad \angle X\left(e^{j.\omega}\right) \tag{3.15}$$

şeklindedir.

3.4.2. Ayrık fourier dönüşümü

Bir işaretin frekans spektrumu hesaplanırken 2π ile periyodik olan ayrık zamanlı frekansın bir periyodunun dikkate alınması yeterlidir. Frekans spektrumu hesabı

sırasında N adet frekans değeri için hesaplama yapılacaksa eğer bu frekans değerlerinin 2π lik temel frekans bölgesinde N adet eşit aralıklı frekans değeri,

$$\omega = \frac{2.\pi}{N}.k \qquad k = 0,1,...N-1 \tag{3.16}$$

olarak bulunmaktadır. Ayrık frekans dönüşümünün N adet ayrık frekans değeri için hesaplanması,

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n].e^{-j.\omega.n} \qquad k = 0,1,...N-1 \tag{3.17}$$

şeklindedir. Ters ayrık fourier dönüşümü,

$$x[n] = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} X[k].e^{j.\omega.n} \qquad n = 0,1,...N-1 \tag{3.18}$$

olarak tanımlanmaktadır.

3.4.3. Ayrık fourier dönüşümü öncesi pencereleme

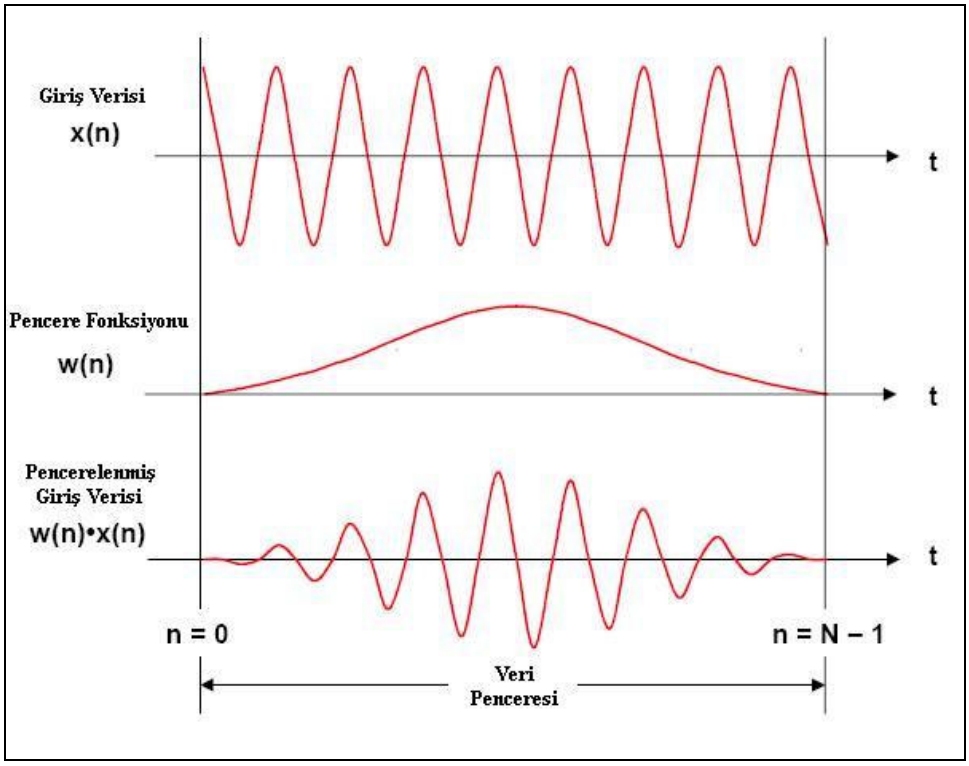
Ayrık fourier dönüşümü ile bir işaretin spektrumu hesaplanırken, işaret son örneğinin arkasından tekrar ilk örneği geliyormuş gibi işlem görmektedir. İşaretin periyodik olarak tekrar ettiği düşünüldüğünde, işaretin son örneğinin arkasından bir sonraki periyot için tekrar işaretin ilk örneği gelmektedir. Ayrık fourier dönüşümü hesabında işaretin son örnekleri ile ilk örnekleri birbirini takip ediyormuş gibi ele alındığı için aralarındaki frekans ilişkisi frekans bileşenlerinin değerlerine yansımaktadır [5].

Periyodunu tamamlamış bir sinüs işaretinin ayrık fourier dönüşümü hesaplanırken işarette bir süreksizlik olmadığı için ayrık fourier dönüşümü de beklendiği gibi sinüs

işaretinin frekansına karşılık gelen pozitif ve negatif frekansta tek bir örnek olarak oluşmaktadır [4].

Periyodunu tamamlamamış bir sinüs işaretinde yapılan hesaplamada ise, işarette bir süreksizlik meydana geldiğinden ayrık fourier dönüşümünde, esasında işaretin yapısında olmayan frekans bileşenleri görülür.

Ayrık fourier dönüşümü hesabı sırasında işaretin son değerleri ile ilk değerleri arasında meydana gelen devamsızlık, enerjinin diğer frekanslara sızmasına neden olur ve spektral sızma olarak adlandırılmaktadır. Spektral sızmayı azaltmanın yolu, işaretin son değerler ile ilk değerleri arasındaki devamsızlığın giderilmesidir. Bu amaçla işaret, ayrık fourier dönüşümü öncesi pencereleme işleminden geçirilmektedir [5].



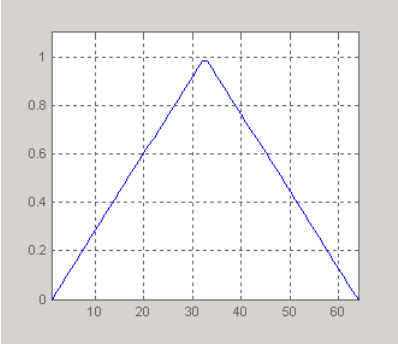
Şekil 3.7. Pencerelenmiş işaretin elde edilmesi

Pencereleme yaklaşımı işaretin, ayrık fourier dönüşümü hesabı öncesinde genliği kenarlara doğru yavaşça sıfıra yaklaşan bir pencere fonksiyonu ile çarpılmasını

öngörmektedir. Bu sayede işaretin son değerleri ile ilk değerleri asındaki devamsızlık giderilmektedir. Değişik pencere fonksiyonlarının kullanımı mümkündür. Yaygın olarak kullanılan pencere fonksiyonları üçgen pencere, Blackman penceresi, Hamming penceresi, Hanning penceresidir [4].

Üçgen pencere fonksiyonu,

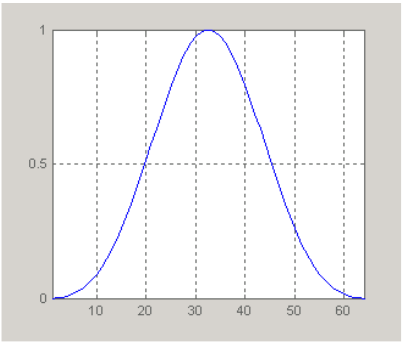
$$w[n] = 1 - \left| \frac{2.n - N}{N} \right| \quad ,0 \le n \le N \tag{3.19}$$



Şekil 3.8. Üçgen pencere

Blackman pencere fonksiyonu,

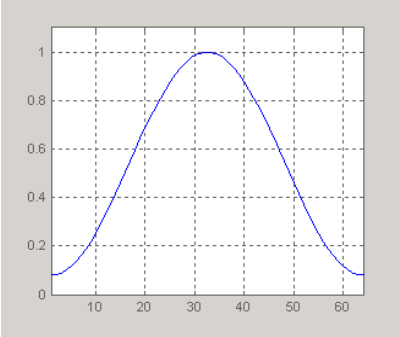
$$w[n] = 0{,}42 - 0{,}5.\left(\frac{2.\pi.n}{N} \right) + 0{,}08.\cos\left(\frac{4.\pi.n}{N} \right) \quad ,0 \le n \le N \tag{3.20}$$



Şekil 3.9. Blackman penceresi

Hamming pencere fonksiyonu,

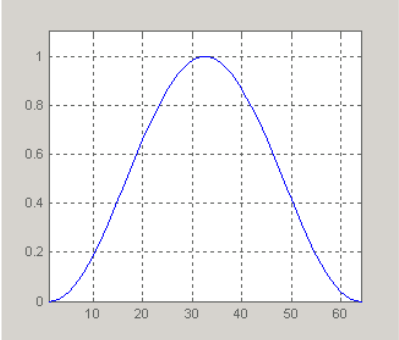
$$w[n] = 0{,}54 - 0{,}46.\cos\left(\frac{2.\pi.n}{N}\right) \quad ,0 \le n \le N \tag{3.21}$$



Şekil 3.10. Hamming penceresi

Hanning pencere fonksiyonu,

$$w[n] = 0{,}5 - 0{,}5.\cos\left(\frac{2.\pi.n}{N}\right) \quad ,0 \le n \le N \tag{3.22}$$



Şekil 3.11. Hanning penceresi

Pencereleme sayesinde spektral sızma azaltılmaktadır. Bu nedenle, bir işaretin ayrık fourier dönüşümü hesaplanmadan önce işaret çoğunlukla pencerelenir. Kullanılan pencere çeşidi uygulamaya göre değişmektedir. Genel amaçlı uygulamalarda çoğu zaman Hannig penceresi kullanılmaktadır.

3.4.4. Hızlı fourier dönüşümü

Ayrık fourier dönüşümünün hızlı bir biçimde hesaplanmasına olanak tanıyan yöntemler hızlı fourier dönüşümü olarak adlandırılmaktadır. Hızlı fourier dönüşümü, ayrık fourier dönüşümünün işaret işleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılabilmesini sağlamaktadır. Bir işaretin ayrık fourier dönüşümü Eş. 3.17'deki gibi doğrudan,

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n].e^{-j.\omega.n} \qquad k = 0,1,...N-1$$

eşitliği ile hesaplanabilmektedir. Bu durumda, dönüşümün her *k* değeri için *N* adet karmaşık çarpma ve *N-1* adet karmaşık toplama işlemi yapılması gerekmektedir. *N* noktalı bir ayrık fourier dönüşümü için N^2 ile orantılı bir hesap yükü anlamına gelmektedir. Ayrık fourier dönüşümündeki faz faktörü,

$$W_N = e^{-j.(2.\pi/N)} \tag{3.23}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Faz faktörünün simetri ve periyodiklik özellikleri kullanılarak, ayrık fourier dönüşümünün daha verimli hesaplanabilmesi mümkündür. Faz faktörünün simetri özelliği,

$$W_N^{k+N/2} = -W_N^k \tag{3.24}$$

Faz faktörünün periyodiklik özelliği de,

$$W_N^{k+N} = W_N^k \tag{3.25}$$

ilişkisini vermektedir.

Hızlı fourier dönüşümü, ayrık fourier hesabı için faz faktörünün simetri ve periyodiklik özelliğinden faydalanılarak hızlı bir hesaplama sağlamaktadır.

Hızlı fourier dönüşümü yöntemleri zamanda örnek seyreltme ve frekansta örnek seyreltme yöntemleri olarak iki grupta sınıflandırılabilir [4].

Zamanda örnek seyreltme

N noktalı bir ayrık fourier dönüşümü,

$$X[k]=\sum_{n=0}^{N-1} x[n].W_N^{kn} \qquad k=0,1,...N-1 \qquad (W_N=e^{-j.(2.\pi/N)}) \tag{3.26}$$

olarak tanımlanmaktadır. İşaretin çift sayılı ve tek sayılı örneklerine ayrıştırılmasıyla ayrık fourier dönüşümü,

$$X[k]=\sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[2.n].W_N^{k(2.n)}+\sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[2.n+1].W_N^{k(2.n+1)} \tag{3.27}$$

şeklinde yazılabilmektedir. W_N^k faz faktörü n'ye bağlı olmadığı için toplamın dışarısına çıkarıldığında eşitlik,

$$X[k]=\sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[2.n].W_N^{k(2.n)}+W_N^k\sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[2.n+1].W_N^{k(2.n)} \tag{3.28}$$

şeklini alır. $W_N^{k(2.n)}=W_{N/2}^{k.n}$ ilişkisinden dolayı faz faktörleri *N/2* noktalı ayrık fourier dönüşümüne göre şekillendirildiğinde,

$$X[k]=\sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[2.n].W_{N/2}^{k.n}+W_N^k\sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[2.n+1].W_{N/2}^{k.n} \tag{3.29}$$

elde edilmektedir. $x_1[n] = x[2.n]$ ve $x_2[n] = x[2.n+1]$ gösterimi kullanıldığında,

$$X[k] = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x_1[n].W_{N/2}^{k.n} + W_N^k \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x_2[n].W_{N/2}^{k.n} \tag{3.30}$$

$$X[k] = X_1[k] + W_N^k.X_2[k] \qquad k = 0,1,2,...N-1 \tag{3.31}$$

elde edilmektedir. Faz faktörünün simetri özelliği $W_N^{k+N/2} = -W_N^k$ dikkate alınarak $X[k]$ nın ilk *N/2* değeri,

$$X[k] = X_1[k] + W_N^k.X_2[k] \qquad k = 0,1,2,...(N/2)-1 \tag{3.32}$$

Sonraki *N/2* değeri ise,

$$X[k] = X_1[k] - W_N^k.X_2[k] \qquad k = 0,1,2,...(N/2)-1 \tag{3.33}$$

şeklinde elde edilmektedir.

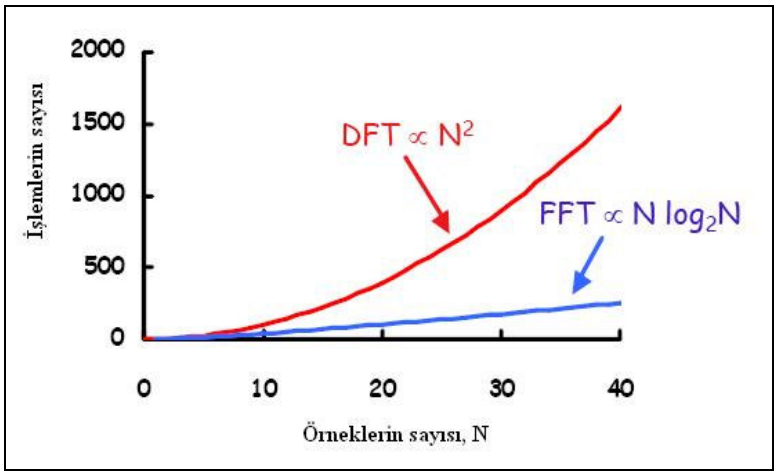
Örnek seyreltme ile hızlı fourier dönüşümü hesabında, en alt seviyede sadece iki örnekten oluşan diziler elde edilinceye kadar ilk *x[n]* işareti sürekli çift ve tek sayılı örneklerine ayrılmaktadır. En alt seviyede iki noktalı ayrık fourier dönüşümleri hesaplanmaktadır. Bu dönüşümler Eş. 3.32 ve Eş. 3.33 doğrultusunda birleştirilerek bir üst seviyenin ayrık fourier dönüşümü elde edilmektedir. Aynı işlem tekrarlanarak bir üst seviyeye çıkılmaktadır. Sürekli olarak fourier dönüşümleri benzer şekilde birleştirilerek üst seviyeye çıkılması sonucunda en üst seviyede *x[n]* işaretinin fourier dönüşümü elde edilmektedir.

Ayrık fourier dönüşümünün doğrudan hesaplanmasında N^2 ile orantılı hesap yükü, zamanda örnek seyreltme işlemi ile hızlı fourier dönüşümünün kullanımı sayesinde $N \log N$ ile orantılı seviyede düşmektedir. Çizelge 3.1'de örnek sayısına bağlı olarak

ayrık fourier dönüşümü ve hızlı fourier dönüşümünde yapılacak işlem sayısını gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Fourier dönüşümü hesaplamasında çarpım sayısı

N	AFD Çarpımları	HFD Çarpımları
256	65536	1024
512	262144	2304
1024	1048576	5120
2048	4194304	11264
4096	16777216	24576



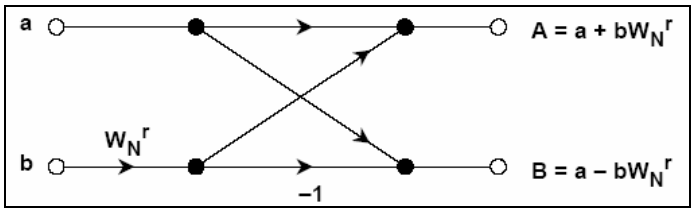
Şekil 3.12. Ayrık ve hızlı fourier dönüşümlerinde işlem sayıları

Zamanda örnek seyreltme işlemi giriş örneklerinin yeniden düzenlenmesini gerektirmektedir. İşlem hızını arttırmak için örneklere birlikte erişim sağlanmalıdır. Bit tersleme olarak isimlendirilen bu işlemde her bir örneğin sıra numarası ikili sayı biçiminde yazıldıktan sonra tersleme işlemi gerçekleştirilir. Hızlı fourier dönüşümü hesabına başlamadan önce giriş örneklerinin bit terslemesi gerekmektedir. Bu sayede işaret örnekleri, zamanda seyreltme işlemi kullanan hızlı fourier hesabına uygun düzene getirilmektedir [4].

Çizelge 3.2. Bit tersleme işlemi

0	1	2	3	4	5	6	7
000	001	010	011	100	101	110	111
000	100	010	110	001	101	011	111
0	4	2	6	1	5	3	7

Alt seviyelerde hesaplanan ayrık fourier dönüşümlerinin birleştirilmesi gösteriminde, çoğunlukla kelebek olarak adlandırılan akış grafikleri kullanılmaktadır. Kelebek grafiklerinde daireler toplama, oklar ise yönlendirme ve yanlarında bir katsayı olması durumunda da çarpma işlemini göstermektedir. Basit kelebek düzeneğinde bir adet karmaşık çarpma yapıldığından hesap yükü azalmaktadır.



Şekil 3.13. Basit kelebek gösterimi

Sekiz örnekli bir işaretin HFD hesabının yapılması [4]

Sekiz örneği bulunan bir işaret $x[n]=[1 \quad 3 \quad 0 \quad 2 \quad 4 \quad 1 \quad 0 \quad 2]$ şeklinde verilmiştir. Verilen 8 örnekli bir işaretin hızlı fourier dönüşümünü hesaplamak için önce *x[n]* tek ve çift numaralı örneklerine ayrılır. Bunlar,

$x_t[n]=[1 \quad 0 \quad 4 \quad 0]$ ve $x_ç[n]=[3 \quad 2 \quad 1 \quad 2]$ şeklindedir.

Her bir tek ve çift numaralı örnekler yine kendi içinde tek ve çift numaralı örneklerine ayrılarak, bu ayırma işlemi en son iki örnek kalana kadar ayrılır.

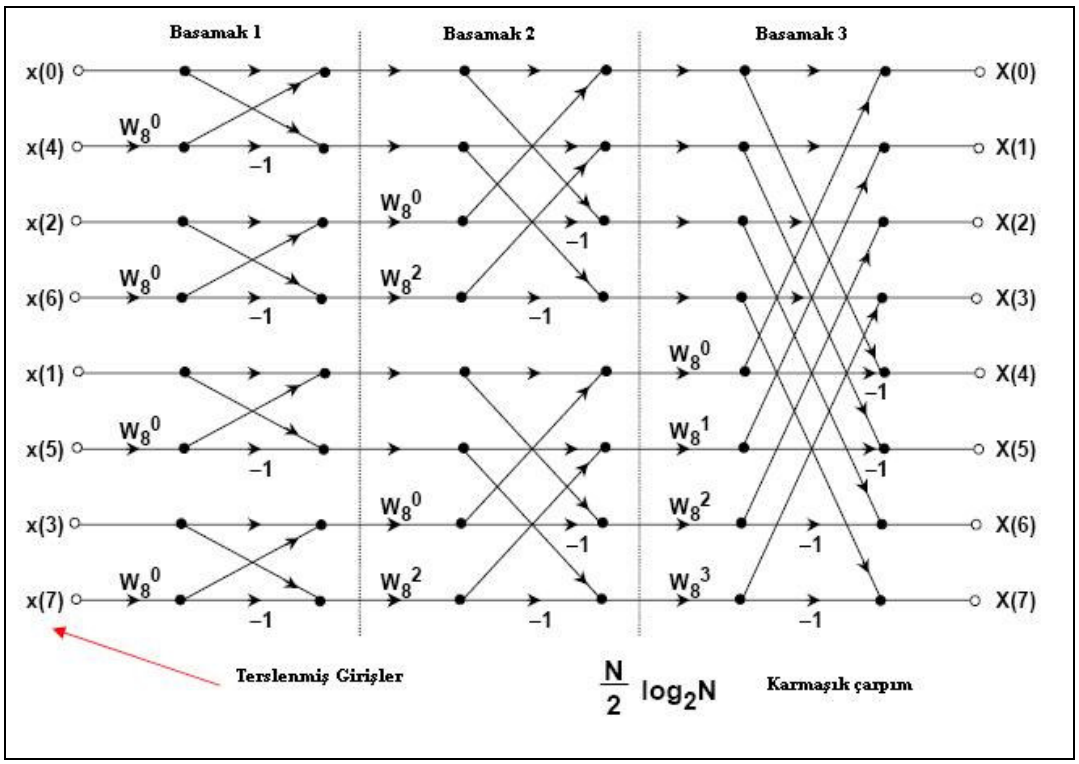
$$x_{tt}[n]=[1,4] \quad x_{tç}[n]=[0,0] \quad x_{çt}[n]=[3,1] \quad x_{çç}[n]=[2,2]$$

Böylece iki örneği bulunan diziler elde edilmiştir. Verilen 8 örnekli dizinin yeniden sıralanması ile yeni bir dizi oluşturulur. Bu verilen dizinin yeni sıralaması ikili örneklerin sıralanması gibidir. Yani yeni dizi, $x[n]=[1 \quad 4 \quad 0 \quad 0 \quad 3 \quad 1 \quad 2 \quad 2]$ gibidir. Bu işlem bit dönüştürme olarak ta adlandırılır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

Çizelge 3.3. Sekiz noktalı örneğin bit terslenmesi işlemi

n0	1	000 → 000	n0	1
n1	3	001 → 100	n4	4
n2	0	010 → 010	n2	0
n3	2	011 → 110	n6	0
n4	4	100 → 001	n1	3
n5	1	101 → 101	n5	1
n6	0	110 → 011	n3	2
n7	2	111 → 111	n7	2
Alınan Örnekler	Örnek değeri		Yeni Sıralama	Örnek değeri

Bit dönüştürme işleminden sonra iki noktalı diziler için ayrık fourier dönüşümü hesaplanır. Hızlı fourier dönüşümü hesabı için aşağıda karmaşık çarpımlar ve toplamlar gösterilmiştir [6].



Şekil 3.14. Zamanda seyreltilmiş 8 noktalı HFD algoritması

Bunun için önce en son elde ettiğimiz iki örnekli dizileri yeniden yazılırsa,

$$x_{tt}[n]=[1,4] \quad x_{tç}[n]=[0,0] \quad x_{çt}[n]=[3,1] \quad x_{çç}[n]=[2,2]$$

Her bir ikili diziye ayrık fourier dönüşümü hesabı yapılır. Kullanılacak eşitlik aşağıdaki gibidir.

$$x[k]=\sum_{n=0}^{N-1} x[n]W_N^{k.n} \qquad k=0,1,2,....N-1 \qquad W_N=e^{-j\left(2\pi/N\right)}$$

$x_{tt}[n]$ için ayrık fourier dönüşümü hesabı;

$$X_{tt}[k]=\sum_{n=0}^{N-1} x[n]W_N^{k.n}=\sum_{n=0}^{N-1} x[n].e^{-j\left(2\pi/N\right)k.n}$$

k=0 olduğunda,

$$X_{tt}[0]=\sum_{n=0}^{2-1}x[n].e^{-j(2\pi/2).0.n}=x[0].e^{-j(2\pi/2).0.0}+x[1].e^{-j(2\pi/2).0.1}=1.e^{-j.0}+4.e^{-j.0}=1.1+4.1=5$$

k=1 olduğunda,

$$X_{tt}[1]=\sum_{n=0}^{2-1}x[n].e^{-j(2\pi/2).1.n}=x[0].e^{-j(2\pi/2).1.0}+x[1].e^{-j(2\pi/2).1.1}=1.e^{-j.0}+4.e^{-j.\pi}$$

$$X_{tt}[1]=1.1+4.(\cos\pi-j\sin\pi)=1.1+4.[(-1)-j.0]=1-4=-3$$

Böylece $X_{tt}[k]=[5 \quad -3]$ bulunur.

$x_{tç}[n]$ için ayrık fourier dönüşümü hesabı;

$$X_{tç}[k]=\sum_{n=0}^{N-1}x[n]W_N^{k.n}=\sum_{n=0}^{N-1}x[n].e^{-j(2\pi/N).k.n}$$

k=0 olduğunda,

$$X_{tç}[0]=\sum_{n=0}^{2-1}x[n].e^{-j(2\pi/2).0.n}=x[0].e^{-j(2\pi/2).0.0}+x[1].e^{-j(2\pi/2).0.1}=0.e^{-j.0}+0.e^{-j.0}=0.1+0.1=0$$

k=1 olduğunda,

$$X_{tç}[1]=\sum_{n=0}^{2-1}x[n].e^{-j(2\pi/2).1.n}=x[0].e^{-j(2\pi/2).1.0}+x[1].e^{-j(2\pi/2).1.1}=0.e^{-j.0}+0.e^{-j.\pi}=0-0=0$$

Böylece $X_{tç}[k]=[0 \quad 0]$ bulunur.

$x_{çt}[n]$ için ayrık fourier dönüşümü hesabı;

$$X_{çt}[k]=\sum_{n=0}^{N-1}x[n].W_N^{k.n}=\sum_{n=0}^{N-1}x[n].e^{-j(2\pi/N).k.n}$$

k=0 olduğunda,

$$X_{çt}[0]=\sum_{n=0}^{2-1}x[n].e^{-j(2\pi/2).0.n}=x[0].e^{-j(2\pi/2).0.0}+x[1].e^{-j(2\pi/2).0.1}=3.e^{-j.0}+1.e^{-j.0}=3.1+1.1=4$$

k=1 olduğunda,

$$X_{çt}[1]=\sum_{n=0}^{2-1}x[n].e^{-j(2\pi/2).1.n}=x[0].e^{-j(2\pi/2).1.0}+x[1].e^{-j(2\pi/2).1.1}=3.e^{-j.0}+1.e^{-j.\pi}$$

$$X_{çt}[1]=3.1+1.(\cos\pi-j\sin\pi)=3.1+1.[(-1)-j.0]=3-1=2$$

Böylece $X_{çt}[k]=[4 \quad 2]$ bulunur.

$x_{çç}[n]$ için ayrık fourier dönüşümü hesabı;

$$X_{çç}[k]=\sum_{n=0}^{N-1}x[n].W_N^{k.n}=\sum_{n=0}^{N-1}x[n].e^{-j(2\pi/N).k.n}$$

k=0 olduğunda,

$$X_{çç}[0]=\sum_{n=0}^{2-1}x[n].e^{-j(2\pi/2).0.n}=x[0].e^{-j(2\pi/2).0.0}+x[1].e^{-j(2\pi/2).0.1}=2.e^{-j.0}+2.e^{-j.0}=2.1+2.1=4$$

k=1 olduğunda,

$$X_{çç}[1]=\sum_{n=0}^{2-1}x[n].e^{-j(2\pi/2).1.n}=x[0].e^{-j(2\pi/2).1.0}+x[1].e^{-j(2\pi/2).1.1}=2.e^{-j.0}+2.e^{-j.\pi}$$

$$X_{çt}[1] = 2.1 + 2.(\cos\pi - j\sin\pi) = 2.1 + 2.[(-1) - j.0] = 2 - 2 = 0$$

Böylece $X_{çç}[k] = [4 \quad 0]$ bulunur.

İkili örnekli dizilerin ayrık fourier dönüşümü yapıldıktan sonra dörtlü ayrık fourier dönüşümü hesabı yapılır. Bu sebeple faz faktörünün periyodiklik ve simetriklik özelliklerinden faydalanılarak aşağıdaki şekilde elde edilen formül kullanılır.

Faz faktörünün simetri özelliği $W_N^{k+N/2} = -W_N^k$, faz faktörünün periyodiklik özelliği de $W_N^{k+N} = W_N^k$ şeklindedir.

$$X_t[k] = x_{tt}[k] + W_N^k . x_{tç}[k] \qquad k = 0,1$$

$$X_t[k + \tfrac{N}{2}] = x_{tt}[k] - W_N^k . x_{tç}[k] \qquad k = 0,1$$

$$X_ç[k] = x_{çt}[k] + W_N^k . x_{çç}[k] \qquad k = 0,1$$

$$X_ç[k + \tfrac{N}{2}] = x_{çt}[k] - W_N^k . x_{çç}[k] \qquad k = 0,1$$

k=0 için;

$$X_t[0] = x_{tt}[0] + W_4^0 . x_{tç}[0] = 5 + e^{-j(2.\pi/4).0}.0 = 5 + e^{-j(2.\pi/4).0}.0 = 5$$

k=1 için;

$$X_t[1] = x_{tt}[1] + W_4^1 . x_{tç}[1] = -3 + e^{-j(2.\pi/4).1}.0 = -3 + e^{-j(2.\pi/4).1}.0 = -3$$

k=0 için;

$$X_t\left[0+\tfrac{4}{2}\right]=x_{tt}[0]-W_4^0.x_{tç}[0]=5-e^{-j(2.\pi/4).0}.0=5-e^{-j(2.\pi/4).0}.0=5$$

k=1 için;

$$X_t\left[1+\tfrac{4}{2}\right]=x_{tt}[1]-W_4^1.x_{tç}[1]=-3-e^{-j(2.\pi/4).1}.0=-3-e^{-j(\pi/2)}.0=-3$$

$X_t[k]=[5 \quad -3 \quad 5 \quad -3]$ şeklinde bulunur.

k=0 için;

$$X_ç[0]=x_{çt}[0]+W_4^0.x_{çç}[0]=4+e^{-j(2.\pi/4).0}.4=4+e^{-j(2.\pi/4).0}.4=8$$

k=1 için;

$$X_ç[1]=x_{çt}[1]+W_4^1.x_{çç}[1]=2+e^{-j(2.\pi/4).1}.0=2+e^{-j(2.\pi/4).1}.0=2$$

k=0 için;

$$X_ç\left[0+\tfrac{4}{2}\right]=x_{çt}[0]-W_4^0.x_{çç}[0]=4-e^{-j(2.\pi/4).0}.2=4-e^{-j(2.\pi/4).0}.4=0$$

k=1 için;

$$X_ç\left[1+\tfrac{4}{2}\right]=x_{çt}[1]-W_4^1.x_{çç}[1]=2-e^{-j(2.\pi/4).1}.0=2-e^{-j(\pi/2)}.0=2$$

$X_ç[k]=[8 \quad 2 \quad 0 \quad 2]$ şeklinde bulunur.

Bir önceki hesaplamada kullanılan simetriklik ve periyodiklik benzer şekilde kullanılarak sekizli ayrık fourier dönüşümü olarak elde edilir.

$$X[k] = x_t[k] + W_N^k . x_ç[k] \qquad k = 0,1,2,3$$

$$X[k + \tfrac{N}{2}] = x_t[k] - W_N^k . x_ç[k] \qquad k = 0,1,2,3$$

k=0 için;

$$X[0] = x_t[0] + W_8^0 . x_ç[0] = 5 + e^{-j(2.\pi/8).0}.8 = 5 + e^{-j0}.8 = 5 + 1.8 = 13$$

k=1 için;

$$X[1] = x_t[1] + W_8^1 . x_ç[1] = -3 + e^{-j(2.\pi/8).1}.2 = -3 + 2.(\cos 45° - j \sin 45°)$$
$$X[1] = -3 + 2.(0,707 - j0,707) = -1,586 - j1,414$$

k=2 için;

$$X[2] = x_t[2] + W_8^2 . x_ç[2] = 5 + e^{-j(2.\pi/8).2}.0 = 5 + 0.e^{-j(2.\pi/8).2} = 5 + 0 = 5$$

k=3 için;

$$X[3] = x_t[3] + W_8^3 . x_ç[3] = -3 + e^{-j(2.\pi/8).3}.2 = -3 + 2.(\cos 135° - j \sin 135°)$$
$$X[3] = -3 + 2.(-0,707 - j0,707) = -4,414 - j1,414$$

k=0 için;

$$X[0 + \tfrac{8}{2}] = x_t[0] - W_8^0 . x_ç[0] = 5 - e^{-j(2.\pi/8).0}.8 = 5 - 8 = 3$$

k=1 için;

$$X\left[1+\tfrac{8}{2}\right]=x_t[1]-W_8^1.x_{ç}[1]=-3-e^{-j(2.\pi/8).1}.2=-3-2(\cos 45-j\sin 45)$$

$$X\left[1+\tfrac{8}{2}\right]=-3-2.(0{,}707-j0{,}707)=-4{,}414-j1{,}414$$

k=2 için;

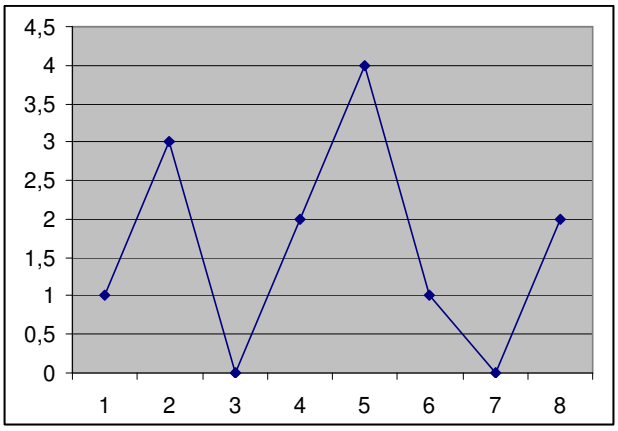
$$X\left[2+\tfrac{8}{2}\right]=x_t[2]-W_8^2.x_{ç}[2]=5-e^{-j(2.\pi/8).2}.0=5-0.(\cos 90-j\sin 90)=5$$

k=3 için;

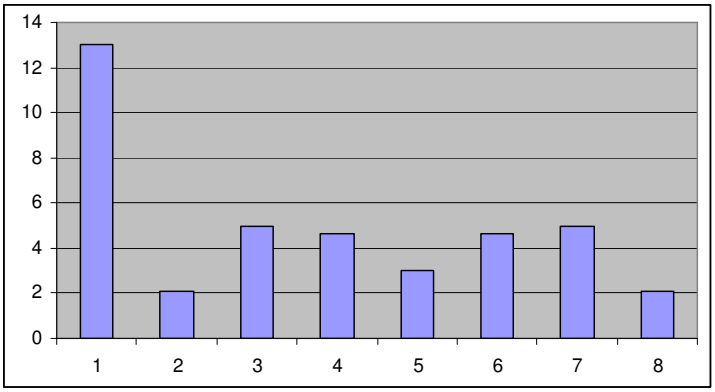
$$X\left[3+\tfrac{8}{2}\right]=x_t[3]-W_8^3.x_{ç}[3]=-3-e^{-j(2.\pi/8).3}.2=-3-2.(\cos 135-j\sin 135)$$

$$X\left[3+\tfrac{8}{2}\right]=-3-2.(-0{,}707-j0{,}707)=-1{,}586+j1{,}414$$

Böylece verilen işaretin hızlı fourier dönüşümü hesaplanmış olur. Hesaplama sonucunda elde edilen frekans değerlerinin genlik ve fazları hesaplanarak frekans spektrumu çizilir.



Şekil 3.15. Sekiz örnek alınmış işaret

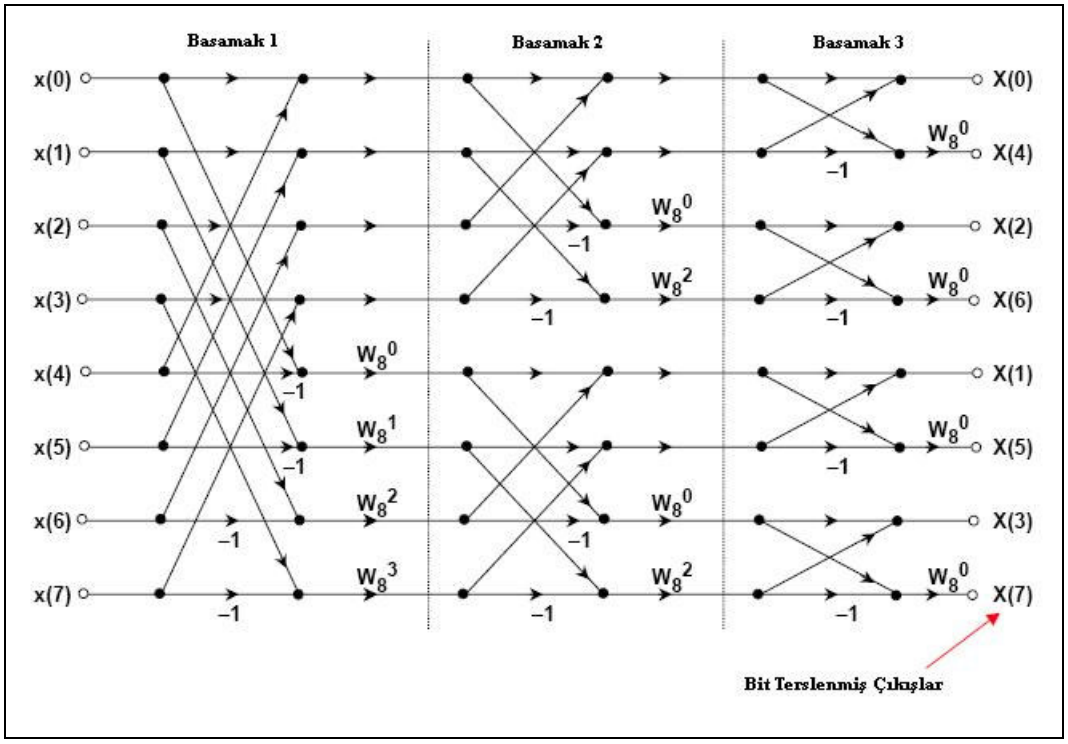


Şekil 3.16. Sekiz örnekli işaretin frekans spektrumu

Frekansta örnek seyreltme

Hesap yükünün azaltılması için giriş işaret örneklerinin seyreltilmesi yerine ayrık fourier dönüşümü çıkışı *X[k]*, çift ve tek sayılı frekans örneklerine ayrıştırılabilmektedir [4].

Zamanda örnek seyreltme algoritmasında olduğu gibi çift ve tek frekans örneklerini kapsayan dizilerin tekrar kendi aralarında tek ve çift frekanslarına ayrılmasına devam edilir. Bunun için, işaret sürekli olarak ikiye bölünerek işaretin birinci yarısı ile ikinci yarısı ile toplamı ve farkı hesaplanıp fark işareti gerekli faz faktörü ile çarpılmaktadır. En alt seviyede sadece iki noktalı bir ayrık fourier dönüşümü hesabı ile işaretin hızlı fourier dönüşümü elde edilmektedir.



Şekil 3.17. Frekansta seyreltilmiş 8 noktalı HFD algoritması

3.5. Harmonik Büyüklüklere Ait Temel Kavramlar

Sinüssel olmayan büyüklüklerin güç sistemine olumsuz etkilerinin giderilmesi ve güç kalitesinin iyileştirilmesi bakımından harmoniklerin analizi ve büyüklüklerin seviyesinin bilinmesi gereklidir. Elektrik büyüklükleri sinüssel sürekli durum için tanımlanmıştır. Sistemde harmoniklerin var olması elektrik büyüklüklerinin yeniden tanımlanmasını gerektirir [1].

3.5.1. Sinüssel olmayan durumda elektrik büyüklükleri

Güç sistemlerinde harmonik bileşenleri bulunan gerilim ve akımın ani değerleri fourier serileri ile aşağıdaki biçimde ifade edilebilir.

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}.V_n.\sin(n\omega_1 t + \theta_n) \qquad (3.34)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}.I_n.\sin(n\omega_1 t + \delta_n) \tag{3.35}$$

Yukarıdaki eşitliklerden aktif güç;

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n.I_n.\cos(\theta_n - \delta_n) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \tag{3.36}$$

Harmonikli gerilim ve harmonikli akımın efektif değerleri sırasıyla,

$$V = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v^2(t)dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} {V_n}^2} \tag{3.37}$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} {I_n}^2} \tag{3.38}$$

olarak bulunur. Harmonikli gerilim ve akımın tepe değerleri kullanılarak gerilim ve akımın etkin değerleri şöyle ifade edilir.

$$V = \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_{m.n}^2}{2}\right]^{1/2} \tag{3.39}$$

$$I = \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_{m.n}^2}{2}\right]^{1/2} \tag{3.40}$$

Görünen güç;

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \tag{3.41}$$

Burada D bozunum gücüdür. Bozunum gücü aktif olmayan bir güç olup sinüssel işaretli doğrusal devrelerde sıfırdır.

Reaktif Güç;

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n . I_n . \sin(\theta_n - \delta_n) \tag{3.42}$$

3.5.2. Güç faktörü

Güç faktörü kavramı, alternatif akım güç sisteminden çekilen akımın bir yük tarafından ne kadar verimlilikle kullanıldığını ölçmek için gerekir. sinüssel veya sinüssel olmayan durumlarda toplam güç faktörü [3];

$$PF = \frac{P}{S} \tag{3.43}$$

3.5.3. Harmonik bozunum (HD)

Gerilim ve akımın n. harmonik mertebesi için tekil harmonik bozunum,

$$HD_V = \frac{V_n}{V_1} \tag{3.44}$$

$$HD_I = \frac{I_n}{I_1} \tag{3.45}$$

3.5.4. Toplam harmonik bozunumu (THD)

Harmonik büyüklüklerin sınırlamasını amaçlayan standartlarda çok yaygın olarak kullanılan toplam harmonik bozunumu gerilim ve akım için sırasıyla [3],

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^{\,2}}}{V_1} \tag{3.46}$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^{\,2}}}{I_1} \tag{3.47}$$

3.5.5. Toplam talep bozunumu (TTD)

Bir yüke ait değer olup toplam harmonik akım bozunumu olarak aşağıdaki gibi tanımlanır. Burada I_L yük tarafından besleme sisteminin ortak bağlantı noktasından çekilen, temel frekanslı maksimum akımdır. Bir yıllık süre içerisinde yük tarafından talep edilen maksimum akımların ortalaması olarak hesaplanır.

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^{\,2}}}{I_L} \tag{3.48}$$

3.5.6. Tepe (Crest) faktörü

Sinüssel olmayan bir dalga şekli için gerilim veya akımın tepe değerinin temel bileşenin etkin değerine oranıdır.

CF = Dalganın Tepe Değeri / Temel Bileşenin Etkin Değeri (3.49)

3.6. Harmoniklerin Sınırlandırılması ve Harmonik Standartları

Sistemdeki harmonik kirliliğin olumsuz etkilerinin giderilmesi ile enerji kalitesinin artacağı şüphesizdir. Bu nedenle harmonik bileşenler için sınırlandırmalar getirilmektedir [1]. Standart harmonik bozulmanın değeri için en çok kullanılan tanımlar toplam harmonik bozunumu (THD), tekil harmonik bozunum (HD) ve toplam talep bozunumudur (TTD).

Yüzde olarak ifade edilen THD, harmonikleri içeren periyodik dalga formunun mükemmel bir sinüs dalga formundan sapmasını tespit etmek için kullanılır. HD'da akım ve gerilim bileşenlerinin temel bileşene oranı yüzde olarak ifade edilir. TTD ise çekilen yük akımları için tanımlanmıştır [7].

3.6.1. Harmoniklerin sınırlandırılması

Elektrik enerji sistemlerinde bulunan harmoniklerin miktarını sınırlamak maksadıyla IEC ve IEEE komisyonları tarafından standartlar belirlenmiştir. Bu standartlar ile gerilim ve akım için tekil harmonik bozunum sınırları, toplam harmonik bozunum değerleri belirtilmiştir. Standartlarda ölçümün sürekliliği, en küçük ölçüm süresinin ne kadar olması gerektiği belirlenmiştir.

3.6.2. Harmonik standartları

Normal veya kabul edilebilir harmonik seviyesini tespit etmek için çeşitli uluslararası organizasyonlar tarafından geliştirilmiş pek çok sayıda standart mevcuttur. Harmonik kirlenmenin azaltılmasına ilişkin üç tip standart mevcuttur. Bu standartlar:

- Cihazlar için standartlar;

16 Amperden az akım çeken alçak gerilim cihazları için IEC-1000-3-2 veya EN-61000-3-2,

16 Amperden fazla akım çeken uygulamalar veya alçak gerilim cihazları için IEC1000-3-4 veya EN61000-3-4,

- Ana besleme kalitesi için standartlar;

Alçak gerilim şebekesi tarafından sağlanan gerilimleri belirleyen EN 50160,
IEEE 519 (Elektrik güç sistemlerindeki harmonik kontrolü için tavsiye edilen uygulamalar),

- Elektrik şebekesi ve ürünleri arasında uyumluluk standartları;

Evlerde kullanılan alçak gerilim şebekesi için IEC 1000-2-2 ve CIGRE normları (Conference Internationale des Grands Reseaux Electriques),
Alçak ve orta gerilim kullanılan endüstri alanları için IEC 100-2-4 standartı [8].

IEEE tarafından 1992 yılında getirilen IEEE 519–1992 nolu standart ve IEC tarafından 1995 yılında IEC 1000–3–2 gibi standartlar, elektrik şirketleri için şebeke bara gerilim bozunumunu ve müşteriler için doğrusal olmayan yükler tarafından üretilen harmonik akımları ile ilgili sınırlamaları vurgulamaktadır [1].

IEEE–519 standartında, şebeke gücünün bir fonksiyonu olarak akım ve gerilim harmonik bileşenlerinin, temel bileşene oranları verilmiştir.

Çizelge 3.4. Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC 61000–2–2 gerilim harmonik bozunum limitleri (k=0,2+12,5/n)

Tek harmonikler		Çift harmonikler		3 ve 3'ün katı harmonikler	
N	%Vn	n	%Vn	n	%Vn
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6	0,5	15	0,3
13	3	8	0,5	≥21	0,2
17	2	10	0,5		
19	1,5	≥12	0,2		
23	1,5				
25	1,5				
≥29	k				

IEC harmonik sınırlamasını çeşitli yükler için sınıflandırmış ve bunlara ait tablolarda sınır değerleri vermiştir. IEC 61000–2–2 konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerine ait gerilim harmonik sınırlamalarını içermektedir.

Avrupa standartları EN 50160'da alçak gerilim ve orta gerilime ait gerilim harmoniklerinin sınır değerleri verilmiştir.

IEC tarafından cihaz giriş akımı faz başına 16A ve altında olan alçak gerilim dağıtım sistemine bağlanan özel bir dalga şekline sahip donanımlar için belirtilen D sınıfı cihazlar için kabul edilen en büyük harmonik akım değerleri IEC 61000–3–2'de verilmiştir. Bu değerler 220V'un altındaki gerilimli sistemler için henüz uygulanmamaktadır.

IEC 1000–2.2 ise alçak gerilim şebekeleri ile ilgilidir. Gerilimde bulunan harmonik bileşenlerinin temel bileşene oranları için sınır değerler oluşturulmuştur.

Çizelge 3.5. Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekeleri için EN 50160 harmonik bozunum limitleri

Alçak gerilim şebekesi (≤ 1kV)					
Tek harmonikler		Çift harmonikler		3 ve 3'ün katı harmonikler	
n	%Vn	n	%Vn	n	%Vn
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6...24	0,5	15	0,5
13	3			21	0,5
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Harmonik akımları için sınır değerler dört farklı sınıf cihaz için tanımlanmıştır.

- A sınıfı cihazlar; dengeli üç fazlı cihazlar, D sınıfı dışında tanımlanmış ev cihazları, taşınabilir araçlar dışındaki araçlar, akkor lamba dimmerleri, B, C ve D sınıfları dışındaki diğer tüm cihazlar ile ses cihazlarıdır.

- B sınıfı cihazlar; taşınabilir araçlar, profesyonel olmayan ark kaynak cihazlarıdır.

- C sınıfı cihazlar; aydınlatma cihazlarıdır.

- D sınıfı cihazlar; 75W'tan büyük 600W'ı aşmayan güce sahip cihazlar, bilgisayarlar, bilgisayar monitörleri, televizyonlardır.

Çizelge 3.6. D sınıfı donanım için IEC 61000–3–2 'e göre izin verilen maksimum harmonik akımları

n	3	5	7	9	11	13	15...39
Max I_n	2,3	1,14	0,77	0,40	0,33	0,21	0,15...15/n
Faz başına donanım giriş akımı ≤ 16 A							

Çizelge 3.7. IEC 1000–3–2 'ye göre çeşitli sınıflardaki gereçlerin harmonik sınırları

HARMONİK SIRASI (n)	A SINIFI	B SINIFI	C SINIFI	D SINIFI
Tek harmonikler	İzin verilebilir harmonik akımı (A)	İzin verilebilir harmonik akımı (A)	Temel frekanstaki giriş akımının yüzdesi (%)	Her watt başına izin verilebilir en büyük harmonik akımı (mA/W)
3	2,30	3,45	30*PF	3,4
5	1,14	1,71	10	1,9
7	0,77	1,16	7	1,0
9	0,40	0,60	5	0,5
11	0,33	0,50	3	0,35
13	0,21	0,32	3	3,85/n
15≤n≤49	0,15.15/n	0,23.15/n	3	3,85/n
Çift harmonikler	A SINIFI	B SINIFI	C SINIFI	D SINIFI
2	1,08	1,62	2	-
4	0,43	0,65	-	-
6	0,30	0,45	-	-
8≤n≤50	0,23.8/n	0,35.8/n	-	-
PF = P / S P: Güç Faktörü S: Görünür Güç				

3.7. Harmoniklerin Tespiti

Harmoniklerin tespitinde en iyi metot arızalara ihtimal vermeden sistemde harmonik ölçümü yapılmasıdır. Sistemde harmoniklerin varlığı aşağıdaki gibi durumlarla karşılaşıldığında anlaşılabilir [7].

- Çok sık kondansatör ve ilgili donanımlar değiştirilmek zorunda kalınıyor ise,

- Besleme şalterleri rezonans olayları ile belirsiz zamanda açma yaparak işletmeyi durduruyor ise,

- Ölçüm cihazları hatalı ölçüm yapıyorlarsa,

- Nötr kablosu çok yükleniyor ve ısınıyorsa.

Mümkün olduğu yerde, faz gerilimi ve akımlarının yanı sıra nötr-toprak gerilimi ve nötr akımı da izlenmelidir. Nötr gerilim ve nötr akımını izleme yüksek üçüncü harmonik değerini gösterecektir ki, bu da işletmede doğrusal olmayan bir yüke işaret etmektedir.

Gerek cihazlar için gerekse de kurulu bir tesiste harmoniklerin tespiti ve harmonik analizi için harmonik analizörleri ile ölçüm yapılır. Standartlarda en fazla kırkıncı harmoniğe kadar test ve ölçümler istenir. Eğer 19. harmonikten yukarısı monoton olarak azalıyorsa standartlarda ölçülen en büyük harmonik 19 olarak alınabilir. Cihaz ile yapılan ölçümlerde giriş akımının %6'sından ya da 5mA'den küçük harmonikler dikkate alınmayabilir. Ölçüm sonrası yorumlar cihazdan cihaza ve tesisten tesise değişir.

Endüstriyel tesisler için şu yorumlar yapılabilir. Gerilim için THDv %2,5'ten küçük ve akım için THDı %10'dan küçükse tesiste harmonik kirlenmenin olmadığı, THDv %2,5-3 ve THDı %10'dan büyükse harmonik kirlenme söz konusu olabilir, filtre kullanmak gerekebilir, THDv %3'ten büyükse ekonomik ve teknik açıdan harmonik filtre gerekmektedir [9]. IEEE 519'a göre gerilim için %THDv %3, %THDı %8'den az olmalıdır [3].

IEC6100-4-7'ye göre ölçme süresi 50Hz frekans için 10 periyot uzunluğunda, yani 200ms kadar olmalıdır.

4. HARMONİK ANALİZİ CİHAZI VE YAZILIMI

Elektrik tesislerinde harmoniklerin varlığı sinüssel olmayan bir kaynak veya doğrusal olmayan bir yükün ayrı ayrı ya da her ikisinin de bir arada bulunması sonucu meydana geldiği bilinmektedir.

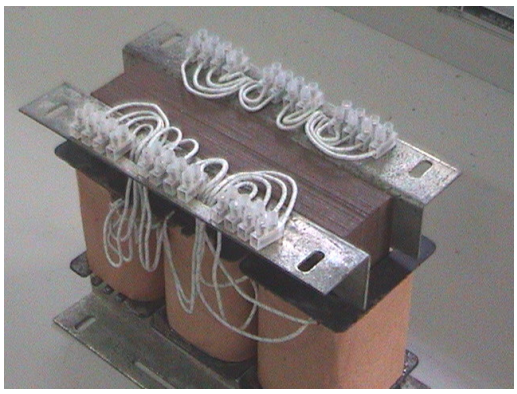
İlk olarak bir üç fazlı elektrik tesisi bilinen harmonik değerleri ile şebeke kirletilerek ölçümler yapılmıştır. İkinci olarak ise mevcut bir sistem üzerinde harmonik ölçümleri yapılmıştır. Gerilim ve akım harmoniklerinin ölçülmesi için özel olarak yaptırılan ve analog çıkış sağlayan üç fazlı akım ve gerilim sensörleri kullanılarak sensörden alınan analog işaret çıkışları veri toplama kartı ile birlikte bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Visual C#.Net yazılımı ile Borland C++ Builder5 yazılım programı kullanılarak geliştirilen yazılımlar aracılığı ile bilgisayara aktarılan üç fazlı gerilim ve akım örnekleri kullanılarak örnek elektrik tesisindeki harmonikler incelenmiştir. Ayrıca şebeke harmonik standartlarına uygunluğu tespit edilmeye çalışılmıştır.

4.1. Üç Fazlı Tesise Harmonik Eklenmesi

Elektrik tesislerinde kaynağın sinüssel ya da sinüssel olmayan olmasına veya yükün doğrusal ya da doğrusal olmayan olmasına bağlı olarak gerilim ve akım harmonikleri sistemde bulunmaktadır. Kaynağın ve yükün durumlarına bağlı olarak tesiste gerilim ve akım harmonikleri bulunmaktadır (Bkz. Çizelge 2.1). Sinüssel olmayan bir kaynak ile beslenen çeşitli yüklerin tesis ve cihazlar üzerindeki etkilerini tespit etmek amacıyla üç fazlı tesiste harmonik kirlenme yapılmıştır. Bu amaç için öncelikle üç fazlı bir trafo yapılmıştır. Tasarlanan bir elektronik devre ile sinyal jeneratörlerinden alınan farklı genlik ve frekanslardaki gerilimler bu devre aracılığı ile trafo üzerinden şebekeye eklenmiştir.

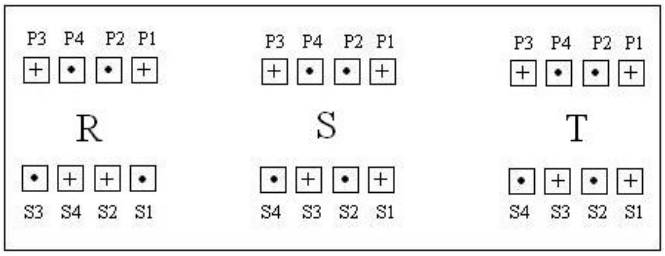
4.1.1. Üç fazlı trafonun hazırlanması

Transformatör nüvesi hazır nüve olarak alınmıştır. Bir faz sargısı ayağı ölçüleri 40mm'ye 50mm şeklindedir. Buna göre transformatör görünür gücü yaklaşık olarak 740VA civarındadır. Transformatör sarım hesabında manyetik akı yoğunluğu 15000 Gauss, akım yoğunluğu 2,5A/mm^2, verim %95 olarak esas alınmıştır. Transformatör bir faz için dört adet sargıdan meydana gelmektedir. Daha sonra deney aşamasında bu sargılardan üç tanesi polarite tespiti yapıldıktan sonra seri bağlanıp ve yüke seri olarak devreye alınmıştır. Transformatörün tek kalan sargısı harmonik kirlenmeyi ekleyecek devreye bağlanmıştır.



Resim 4.1. Üç fazlı transformatör

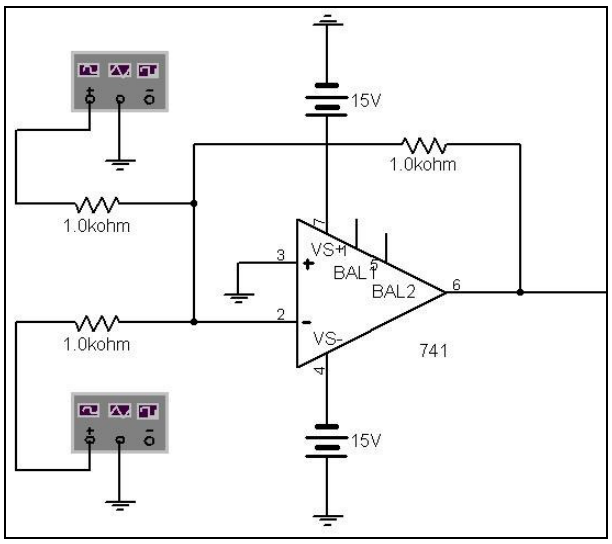
Transformatör sargılarının uçları alternatif gerilimin frekansına bağlı olarak işaret değiştirir. Sargının hangi ucunun hangi işareti taşıdığının bilinmesi sargıların birbirlerine bağlanmaları işleminde gereklidir. Bu amaçla transformatör polarite tespiti yapılır. Sarılan transformatörün polarite tespiti yapıldığında Şekil 4.1'de gösterildiği biçimde polariteye sahip olduğu tespit edilmiştir.



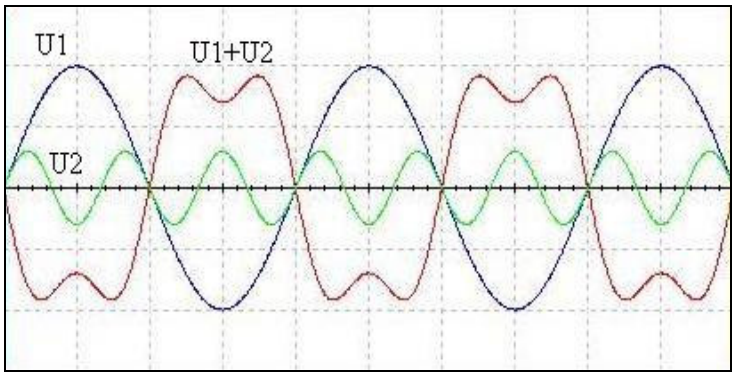
Şekil 4.1. Üç fazlı transformatörün uç işaretleri

4.1.2. Harmonik kirletme devresi

Devrede operasyonel amplifikatörler kullanılarak toplayıcı devre yapılmıştır. Böylece iki adet sinyal jeneratörü ile farklı genlik ve frekanslara sahip iki işaret opampın (–) girişine uygulanarak çıkışta bu gerilimlerin toplamı elde edilmiştir. Giriş dirençleri ve geri besleme dirençleri eşit büyüklükte seçilmiştir. Bu sinyal jeneratörlerinden gelen işaretin genliklerinin toplanmasını sağlamıştır. İşaretin frekanslarının farklı olması işaretin harmonikli dalga şeklinde elde edilmesini sağlar.

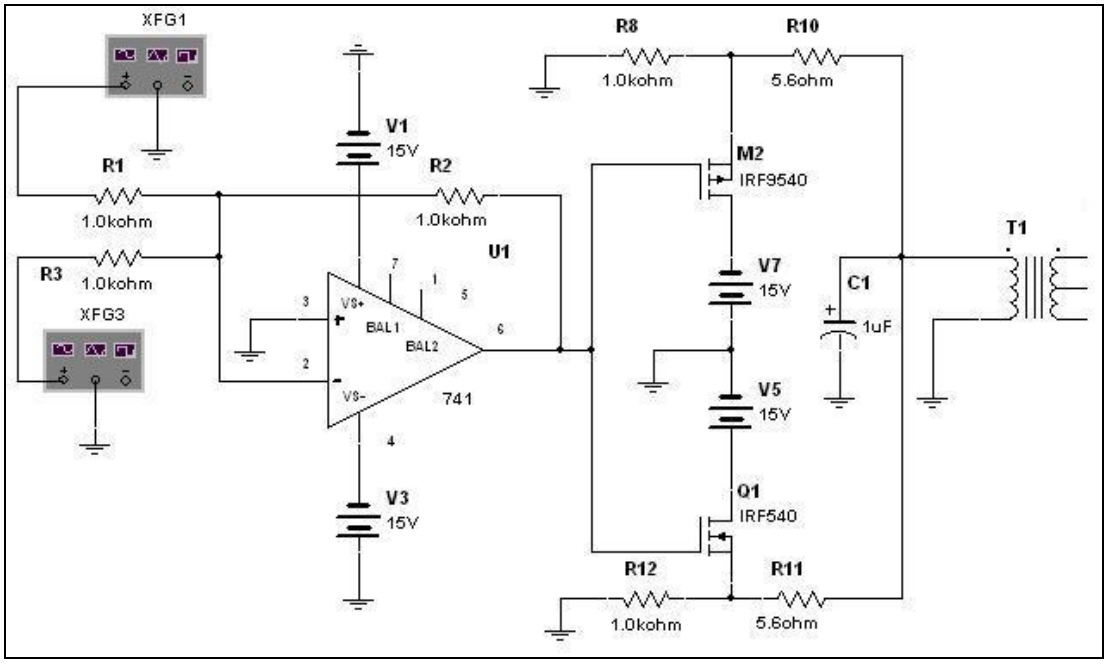


Şekil 4.2. Opamp ile toplayıcı devre şeması

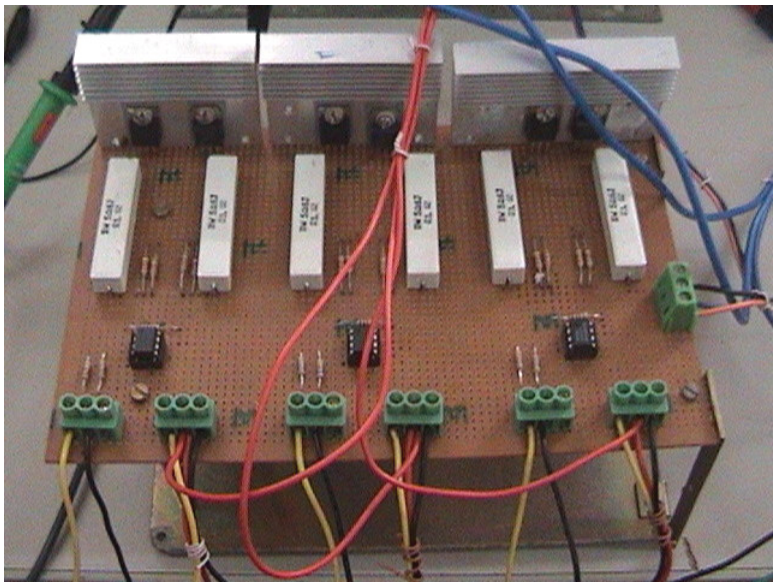


Şekil 4.3. Opamp ile toplayıcı devre dalga şekli

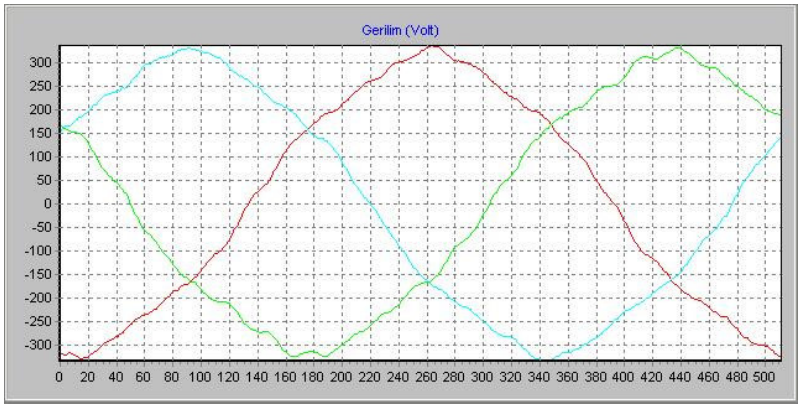
Daha sonraki aşamada opamp çıkışında elde edilen harmonikli işaret P ve N kanallı mosfetler üzerinden üç fazlı transformatör sargı uçlarına uygulanmıştır. Bunun ile ilgili devre şeması Şekil 4.4'de gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Harmonik kirletme devresi bir faz eşdeğeri



Resim 4.2. Harmonik kirletme devresi



Şekil 4.5. Harmonik kirletme devresi ile kirletilmiş 3 fazlı gerilim

4.2. Harmonik Analizi Cihazı

Harmonik analiz cihazının yapımında veri toplama kartı ile üç fazlı akım ve üç fazlı gerilim sensörleri kullanılmıştır. Akım ve gerilim sensörleri ile bilgisayara aktarılabilecek değerlere getirilen gerilim ve akım değerleri veri toplama kartı ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Burada sensörler ve veri toplama kartı ile bir harmonik analizörü oluşturulması amaçlanmıştır.

4.2.1. Veri toplama sistemleri–VTS (data acquisition systems–DAQ)

Veri toplama sistemleri ölçülen her türlü fiziksel büyüklüğe ilişkin verileri toplayan ve yararlı bilgiye dönüştüren sistemlerdir. Bilgisayar veri yoluna takılarak kullanılan DAQ kartları ve büyük ölçüde yazılıma dayanan bilgisayar temelli sistemler, veri toplama sistemlerinin en hızlı gelişen dalı olmuştur.

Bilgisayar temelli tipik bir veri toplama sistemi şu elemanlardan oluşmaktadır:

- Duyar Elemanlar (Sensor): Sıcaklık, basınç, hız gibi fiziksel büyüklükleri elektriksel işaretlere çeviren sistemin uç elemanlarıdır.

- İşaret Düzenleme (Signal Conditioning): Duyar elemanların ürettiği işaretleri DAQ kartlara uygulanabilecek standart işaret seviyelerine göre düzenleyen çeviricilerdir.

- DAQ Kartları: Düzenlenmiş işaretleri alan ve bilgisayar veri yoluna aktarılacak biçimde dijital bilgiye çeviren kartlardır. Çeşitli yapılandırmalarda analog ve dijital giriş ve çıkışlar içeren bu kartlar, test düzeneğinin amacına uygun olarak, farklı hassasiyet ve hızlarda seçilebilir.

- Bilgisayar ve Yazılım: DAQ kartlarının topladığı verileri görselleştirir, işler, analiz eder ve depolar. VTS yazılımları büyük miktarda veriyi işleyebilecek ve analiz edebilecek yetenektedir [22].

Algılayıcılar, sinyal şartlandırıcılar, veri toplama sistemleri, analiz yazılımları bir test ve ölçüm sisteminin başlıca bileşenleridir. Bilgisayarın içindeki PCI/ISA yuvalara takılan kartlar ya da Ethernet portuna takılan bağımsız veri toplama üniteleri yazılım geliştirme ortamları tarafından tekrar tekrar programlanmakta ve farklı ölçüm ve analiz görevlerini yerine getirmektedirler. Geliştirilmekte olan diğer pek çok form faktörüne rağmen PCI ve ISA yolları hala bilgisayar tabanlı veri toplama da en çok kullanılan standartlardır.

Algılayıcılar ve Dönüştürücüler (Sensör ve Transdüser), veri toplamanın başlangıç noktasıdır. Bu cihazlar sıcaklık, basınç, kuvvet, ivme gibi fiziksel büyüklükleri doğrusal olarak elektriksel sinyallerine çevirir. Bu çevirme işlemi sırasında genellikle bir güç kaynağı tarafından beslenirler. Çıkan sinyaller ya veri toplama sistemlerine giderek sayısallaştırılır, ya da direkt olarak göstergelerden izlenir.

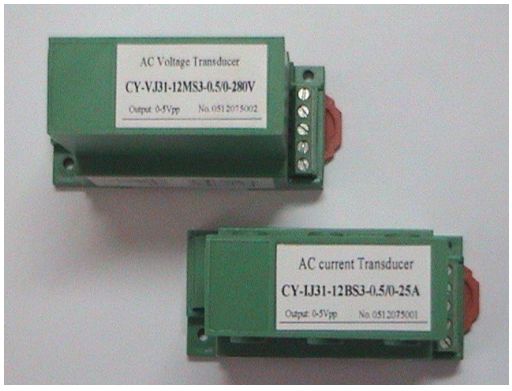
Veri toplama (Data Acquisition) işlemi, test ve ölçümün ilk aşamasıdır. Sıcaklık, basınç, kuvvet, ivme, gerilme gibi gerçek hayattan fiziksel büyüklüklerin ölçülmesi ve incelenmesi için öncelikle bu analog işaretlerin sayısallaştırılması (ADC) gerekir.

Bu işlem günümüzde en kolay, etkin ve esnek şekilde bilgisayar ortamında yapılmaktadır.

Veri toplama (Data Acquisition) işlemi çok basit olarak şu aşamalardan oluşur. Algılayıcılar ve Dönüştürücüler fiziksel bir büyüklüğü elektrik sinyaline çevirir. Bu elektrik işareti ya doğrudan ya da çeşitli sinyal koşullama ünitelerinden geçtikten sonra veri toplama sistemine gelir. Analog sinyaller burada dinamik yapılarına uygun bir hızda (sampling rate) ve çözünürlükte (resolution bit rate) örneklendikten sonra bilgisayar ortamında gerçek zamanda işlenir ya da saklanır. Veri toplama donanımları, birlikte çalıştıkları bilgisayarın işletim sistemine ve veri toplamanın yönetildiği uygulama yazılımına sürücü yazılımları ile tanıtılırlar.

4.2.2. Üç fazlı akım ve üç fazlı gerilim sensörü

Üç fazlı alternatif akımda sinüssel olmayan olmayan dalga şeklerinin görüntülenmesi uygulamalarıyla periyodik olmayan akımların etkin değerlerinin ölçülmesi için tasarlanmış olan üç fazlı akım ve gerilim sensörleri sinüssel olmayan akımların etkin değerlerini göstermektedir. Bu sensörler anlık değerleri gösterecek, ölçülmek istenen işaretle aynı spektruma sahip olacak şekilde yeniden tasarlanmıştır. İşaret ölçülmek istenen çıkış seviyesine uygun olacak şekilde düşürülüp çıkışa aktarılmıştır. Bunun sebebi ölçüm için kullanılacak veri toplama kartının analog işaret girişinin sınırlı değere sahip olmasıdır.

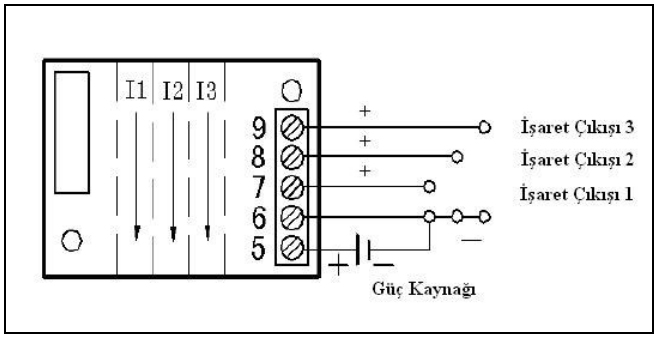


Resim 4.3. Üç fazlı akım ve gerilim sensörleri

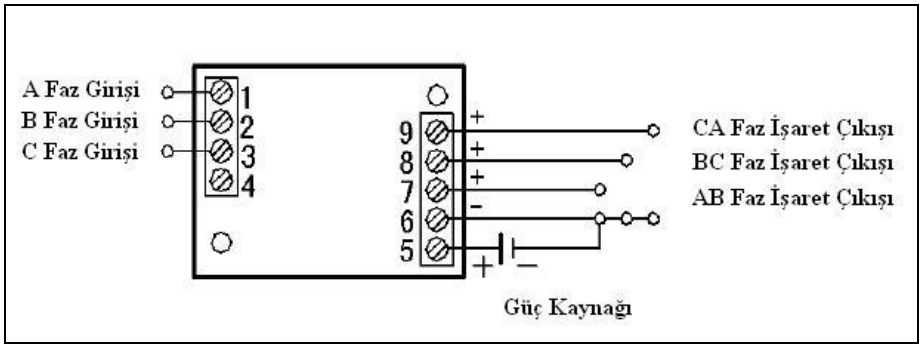
Akım sensörü ile ölçülebilecek en büyük akım değeri 0-25Amper olarak tespit edilmiştir. En büyük akım değerinde sensör 5Volt çıkış değeri verecek şekilde tasarlanmıştır.

Gerilim sensörü ise ölçülebilecek en büyük gerilim değeri 0-280Volt olarak tespit edilmiştir. En büyük gerilim değerinde sensör çıkışı 5Volt çıkış vermektedir.

Sensörler 12Volt doğru gerilimle gerilimle beslenmektedir. Ölçüm hassasiyetleri %0,5 değerindedir. Her iki sensör 0 ile 5 kHz frekans aralığında çalışmaktadır.



Şekil 4.6. CY-IJ31 akım sensörü bağlantısı

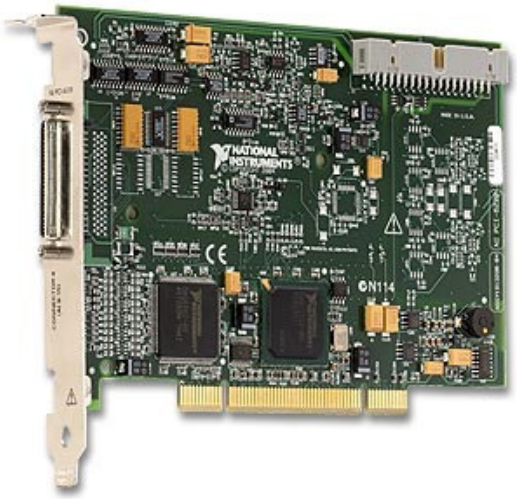


Şekil 4.7. CY-VJ31 gerilim sensörü bağlantısı

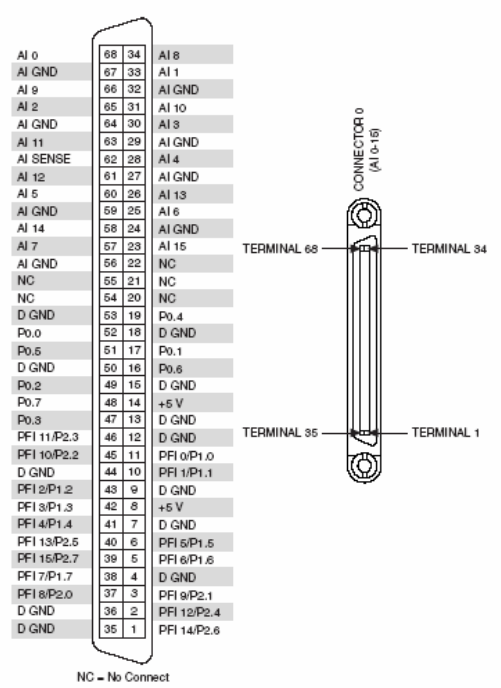
4.2.3. Veri toplama kartı (DAQ)

Analog giriş kararlılığı 16 bit olan National İnstruments M serisi PCI-6220 veri toplama kartı kullanılmıştır. Kart 16 Analog girişe, 24 sayısal giriş/çıkışa sahiptir.

Örnekleme oranı en büyük saniyede 250 000'dir. Windows XP işletim sisteminde kullanılabilmekte olup Labview, LabWindows/CVI ve Measurement Studio Signal Express, VI Logger, Visual Studio Net, C/C++/C# yazılımları ile kontrol edilebilmektedir. Test, kontrol ve tasarım uygulamalarında kullanılabilmektedir. Analog giriş gerilimleri ±0,2V, ±1V, ±5V ve ±10V olarak ayarlanabilmektedir.

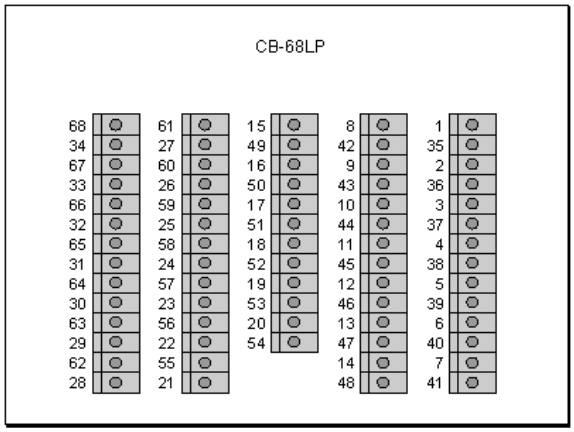


Resim 4.4. National instruments PCI-6220 veri toplama kartı



Şekil 4.8. NI PCI-6220 veri toplama kartı pin çıkışları

Sensörlerle veri toplama kartı arasındaki bağlantı için CB-68LP bağlantı kutusu kullanılarak bağlantı kutusu ile veri toplama kartı arasında SHC68-68EPM kablo kullanılmıştır.

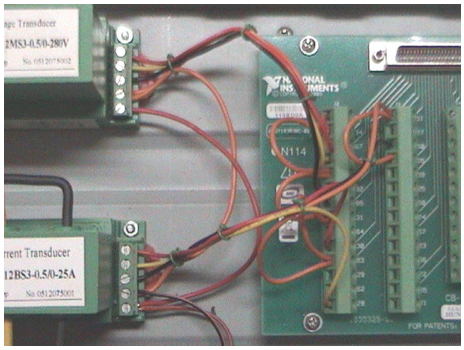


Şekil 4.9. CB-68LP bağlantı kutusu

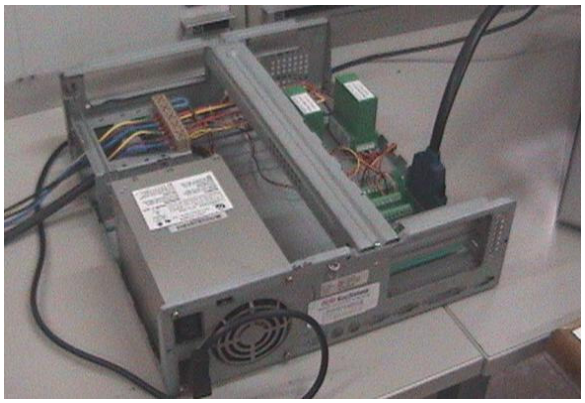
Veri toplama kartının 16 analog girişinin ilk 6 kanalı kullanılarak bağlantı kutusunun aşağıdaki çizelgede belirtilen uç numaralarına sensörlerin uçları bağlanmıştır.

Çizelge 4.1. CB-68LP bağlantı kutusundaki analog giriş bağlantı uçları

Kanal ismi	Fiziksel Kanal	Ölçüm tipi	Sensör bağlantı ucu	Bağlantı kutusu uç no	Giriş değeri
VR	Dev1/ai0	Gerilim	Voltage/CH+	CB-68LP/68	±10V
			Voltage/CH-	CB-68LP/34	
VS	Dev1/ai1	Gerilim	Voltage/CH+	CB-68LP/33	±10V
			Voltage/CH-	CB-68LP/66	
VT	Dev1/ai2	Gerilim	Voltage/CH+	CB-68LP/65	±10V
			Voltage/CH-	CB-68LP/31	
IR	Dev1/ai3	Gerilim	Voltage/CH+	CB-68LP/30	±10V
			Voltage/CH-	CB-68LP/63	
IS	Dev1/ai4	Gerilim	Voltage/CH+	CB-68LP/28	±10V
			Voltage/CH-	CB-68LP/61	
IT	Dev1/ai5	Gerilim	Voltage/CH+	CB-68LP/60	±10V
			Voltage/CH-	CB-68LP/26	



Resim 4.5. CB68LP bağlantı kartı ile sensör bağlantıları



Resim 4.6. Harmonik analiz cihazı

4.3. Verilerin Elde Edilmesi

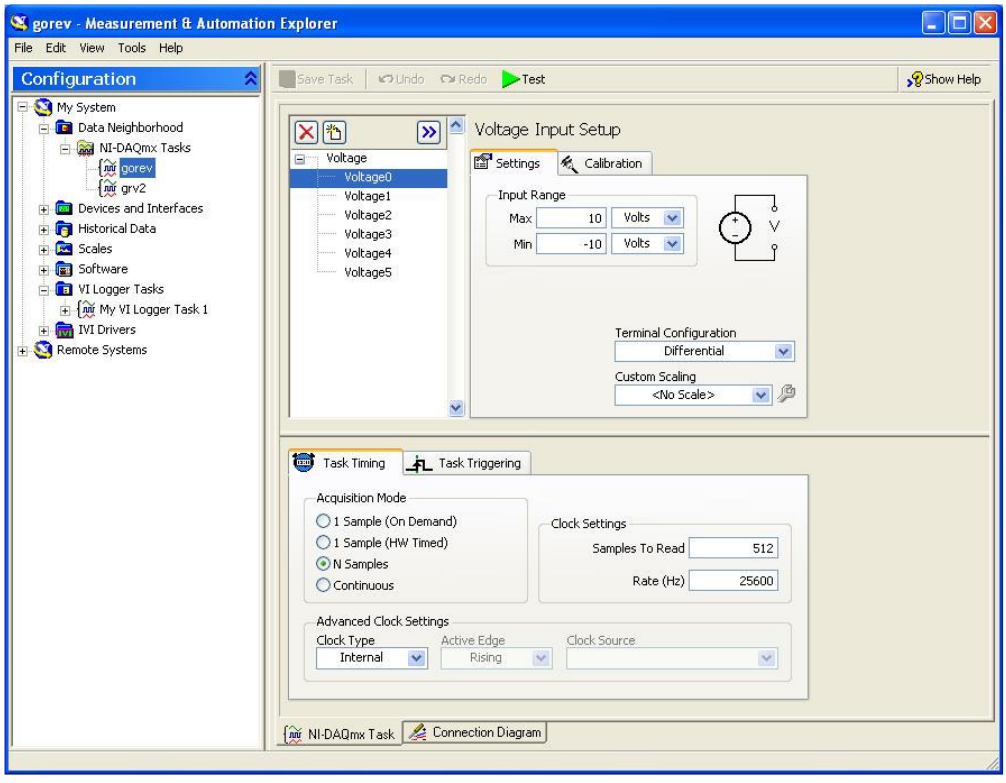
Veri toplama kartı (DAQ) bilgisayar PCI yuvasına bağlandıktan sonra kart yazılımı yüklenmiştir. Verilerin elde edilebilmesi için iki farklı yol kullanılmıştır. Bunlar; kart yazılımı ile birlikte gelen VI Logger yazılımının kullanılması ve Visual Studio 2003.Net yazılımı aracığı ile yazılım programdan oluşmaktadır. Geliştirilen harmonik analiz yazılımında bu iki yol ile verilerin okunması yapılabilmektedir.

4.3.1. VI Logger yazılımı ile verilerin okunması

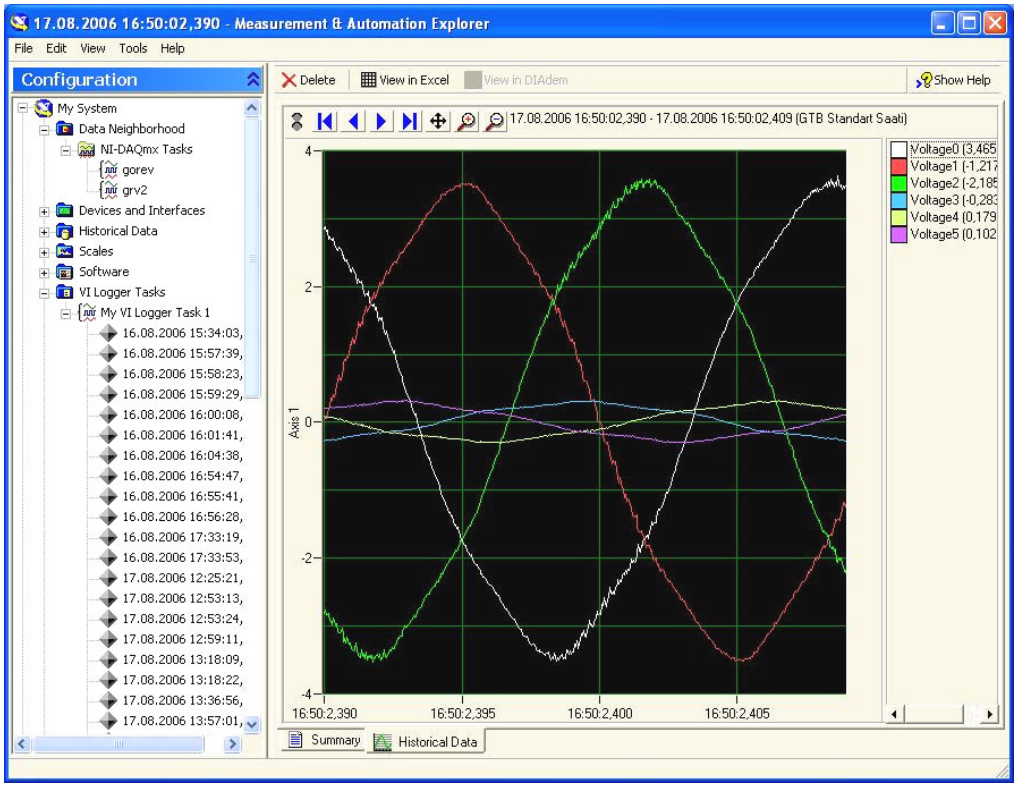
Veri toplama kartı bilgisayara tanıtıldığında National Instruments yazılımı kurulmaktadır. Bu yazılımın içinde VI Logger yazılımına erişim Measurement & Automation programıyla gerçekleştirilmektedir.

Programın ara yüzünde verilerin okunması için NI-DAQmx görevler seçeneğinden yeni bir görev oluşturulması gerekmektedir. Sensörlerden alınan veriler 0-5V analog işaret şeklinde olduğundan analog giriş gerilim okuma adımları sırasıyla seçildikten sonra kullanılacak fiziksel kanalar seçilmektedir. Okuma yapılacak kanalların hepsi seçildikten sonra oluşturulan göreve bir isim verilerek kaydedilmektedir. Daha sonra kanalların gerilim giriş minimum ve maksimum değerleri, okunacak örnek sayısı ve örnekleme aralığı ayarlanır (Şekil 4.10).

Verilerin elde edilmesi için VI Logger Task seçeneğinden görev seçilerek okuma yapılır (Şekil 4.11).



Şekil 4.10. VI Logger yazılımı ile analog gerilim giriş ayarları

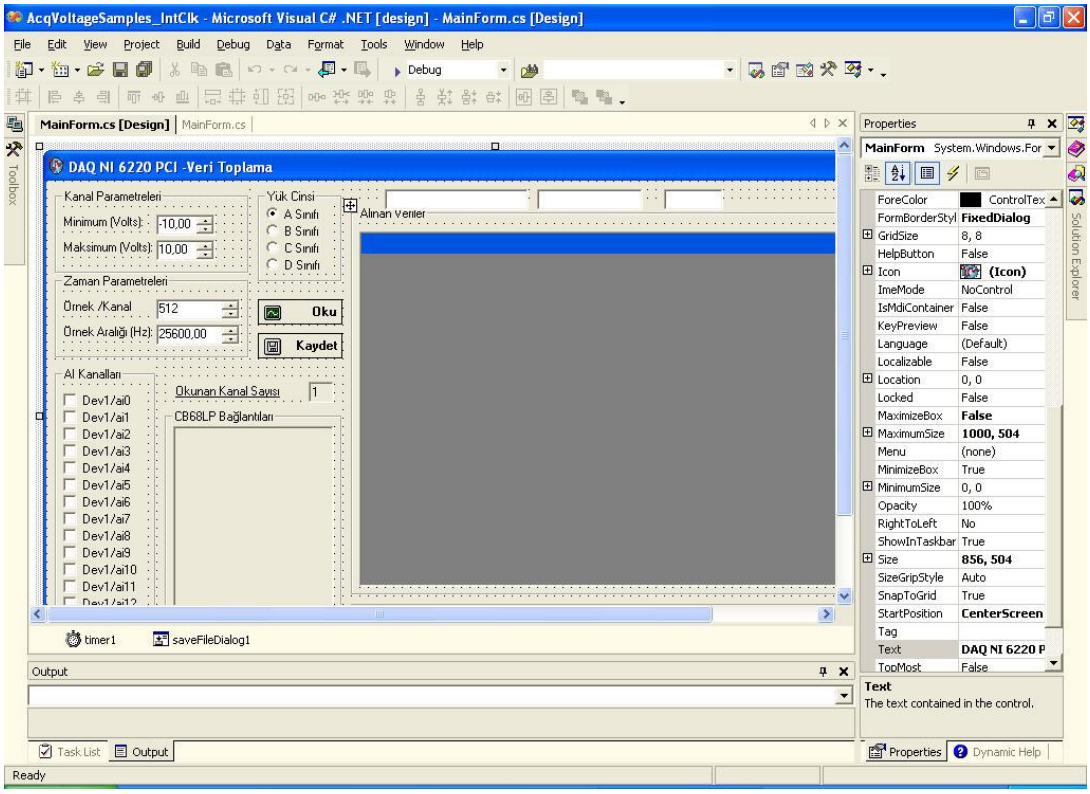


Şekil 4.11. VI Logger yazılımı ile verilerin okunması

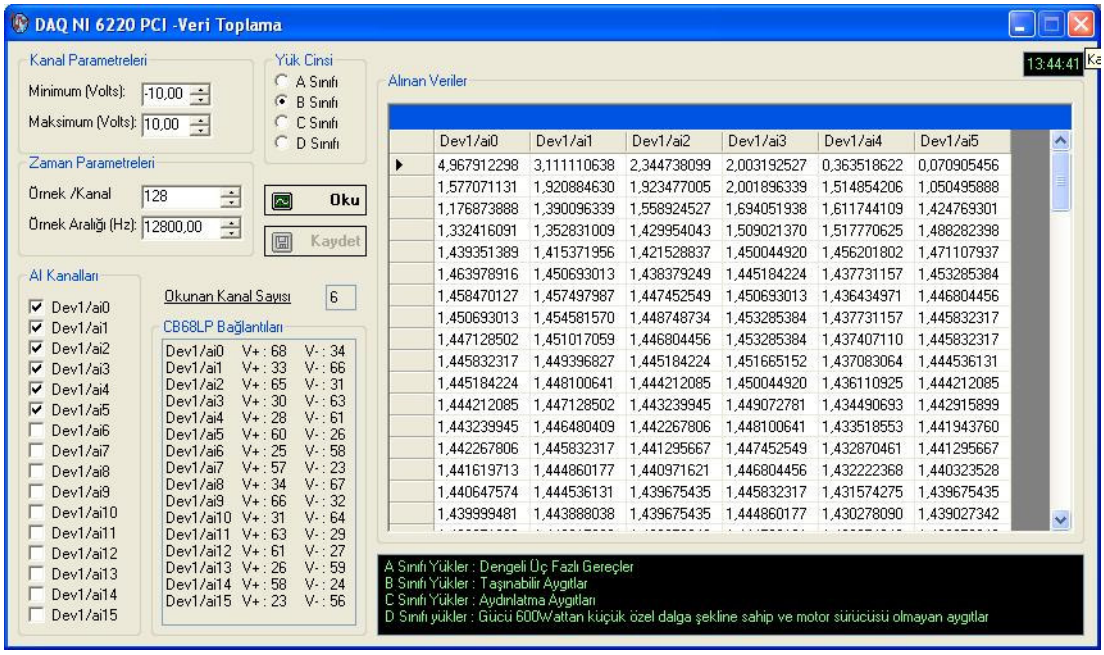
Elde edilen veriler bir txt dosyasına veya Excel yazılımına aktarılabilmektedir. Harmonik analiz yazılımında elde edilen verilerin analizi için txt dosyalarına aktarılan veriler okunmuştur.

4.3.2. Verilerin yazılım aracılığı ile okunması

Veri toplama kartı ile verilerin okunması için Visual Studio 2003.NET yazılımı kullanılmıştır. Form tasarımında analog giriş kanalları checkbox kontrolleri ile seçilecek şekilde tasarlanmıştır. Verinin okunması için gerekli ayarlar minimum ve maksimum gerilim değerleri, örnek sayısı, örnekleme aralığı numericupdown kontrolleri ile ve yük cinsi seçiminde groupbox kontrolü kullanılmıştır. Okunan veri datatable kontrolü ile gösterilmiştir (Şekil 4.12).



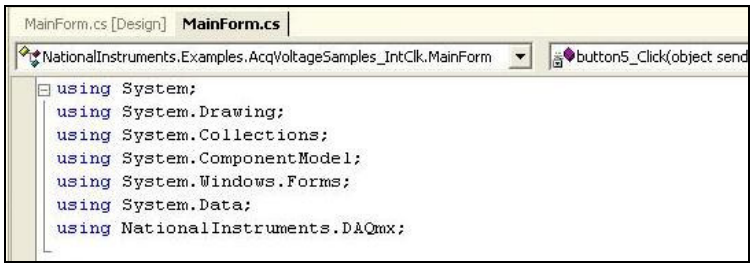
Şekil 4.12. Veri toplama yazılımı form tasarım görünümü



Dev1/ai0	Dev1/ai1	Dev1/ai2	Dev1/ai3	Dev1/ai4	Dev1/ai5
4,967912298	3,111110638	2,344738099	2,003192527	0,363518622	0,070905456
1,577071131	1,920884630	1,923477005	2,001896339	1,514854206	1,050495888
1,176873888	1,390096339	1,558924527	1,694051938	1,611744109	1,424769301
1,332416091	1,352831009	1,429954043	1,509021370	1,517770625	1,488282398
1,439351389	1,415371956	1,421528837	1,450044920	1,456201802	1,471107937
1,463978916	1,450693013	1,438379249	1,445184224	1,437731157	1,453285384
1,458470127	1,457497987	1,447452549	1,450693013	1,436434971	1,446804456
1,450693013	1,454581570	1,448748734	1,453285384	1,437731157	1,445832317
1,447128502	1,451017059	1,446804456	1,453285384	1,437407110	1,445832317
1,445832317	1,449396827	1,445184224	1,451665152	1,437083064	1,444536131
1,445184224	1,448100641	1,444212085	1,450044920	1,436110925	1,444212085
1,444212085	1,447128502	1,443239945	1,449072781	1,434490693	1,442915899
1,443239945	1,446480409	1,442267806	1,448100641	1,433518553	1,441943760
1,442267806	1,445832317	1,441295667	1,447452549	1,432870461	1,441295667
1,441619713	1,444860177	1,440971621	1,446804456	1,432222368	1,440323528
1,440647574	1,444536131	1,439675435	1,445832317	1,431574275	1,439675435
1,439999481	1,443888038	1,439675435	1,444860177	1,430278090	1,439027342

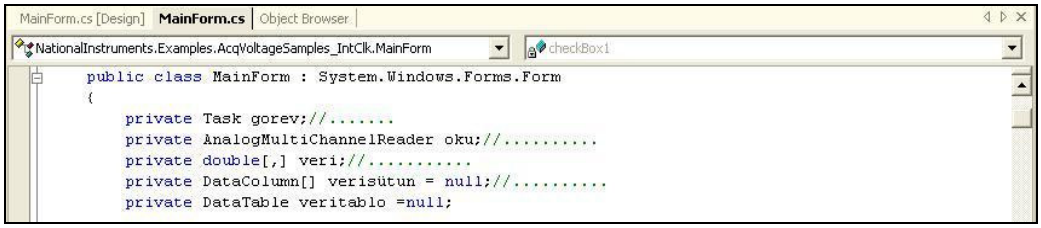
Şekil 4.13. Veri toplama yazılımı form görünümü

Yazılım için National Instruments.DAQmx sınıf kütüphanesi kullanılarak kartın kontrolünü sağlayacak olan komutlar dizisi yüklenmiştir. Sınıfın kullanılabilmesi için yazılım kod penceresinin en başına eklenmesi gerekmektedir (Şekil 4.14).

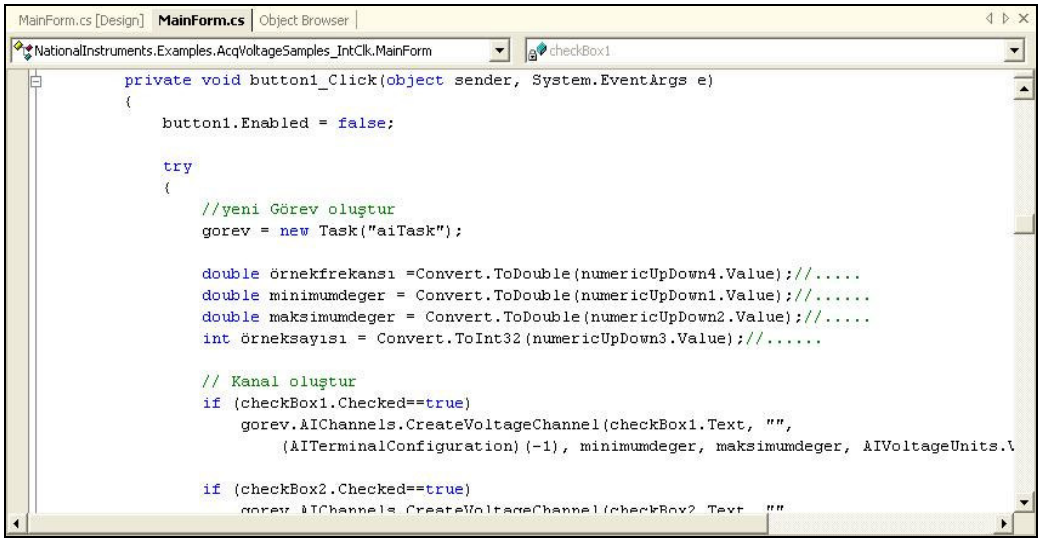


Şekil 4.14. National Instruments.DAQmx sınıfının kod dizisine eklemesi

Veri toplama kartının sınıf kütüphanesinin eklenmesi aşamasından sonra ana form sınıfı içinde görev tanımlaması, analog çoklu kanal okuma tanımlaması, veri tablosu tanımlamaları yapılmaktadır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. Ana form sınıf tanımlamaları

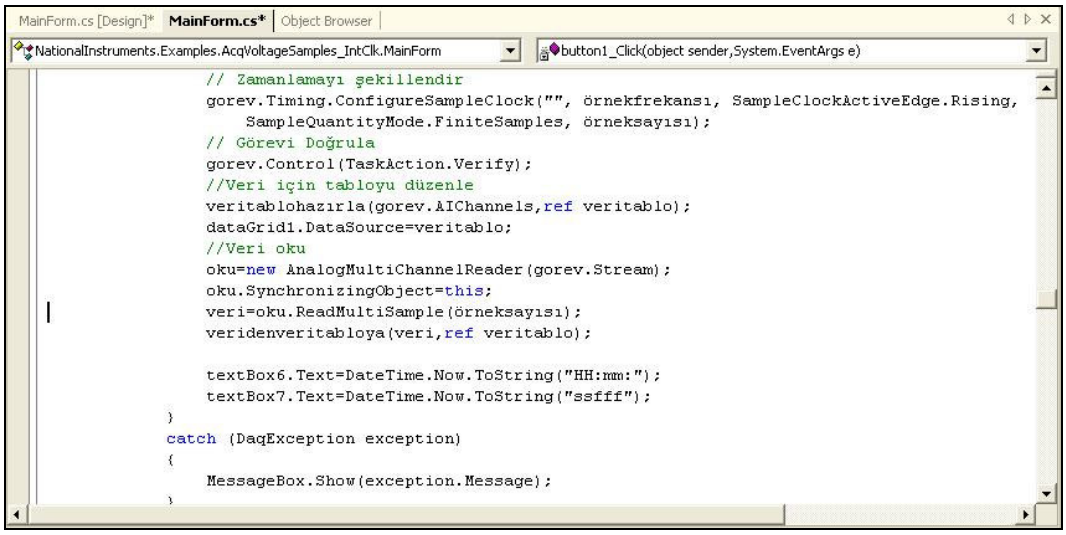


Şekil 4.16. Oku düğmesi altındaki görev tanımlamaları kod dizisi

Oku düğmesi altındaki kod dizisinde; yeni bir görev oluşturulmakta, bu görev analog gerilim okuma görevi olarak tanımlanmakta, kontrollerden elde edilecek veri tipleri, okuma yapılacak kanalların seçimi tanımlanmaktadır (Şekil 4.16).

Görev zamanlama parametreleri için kontrollerden örnek sayısı, örnek aralığı alınmaktadır. Görev doğrulama kod dizisi girildikten sonra, okunacak verinin gösterileceği veri tablosu hazırlanmakta, veri okunarak hazırlanan tabloya aktarılmaktadır (Şekil 4.17).

Veri tablosunun hazırlanmasında checkbox kontrollerinden elde edilen okunacak kanal sayısı, örnek sayısı, örnek aralığına kullanılarak tablonun satır ve sütun miktarları belirlenmektedir.

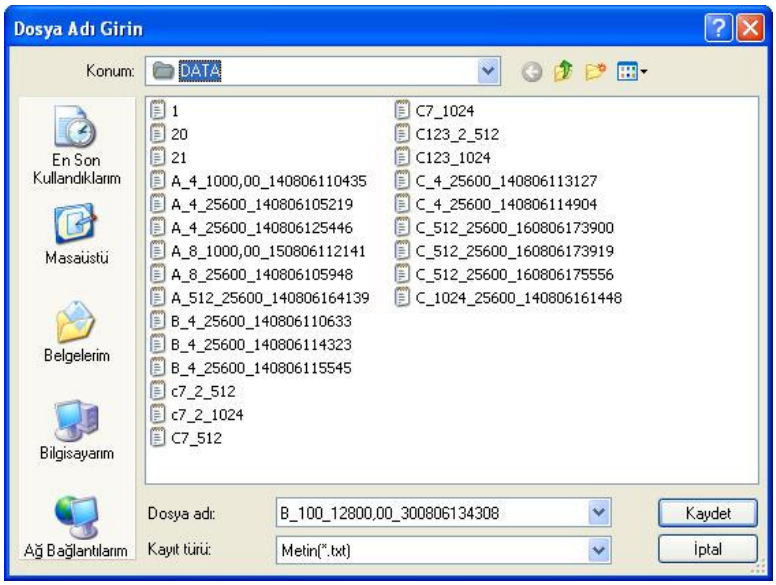


Şekil 4.17. Oku düğmesi altındaki veri okuma kod dizisi

Verinin okunması için okuma yapılacak kanallar seçilmesi, örnek sayısı, örnek aralığının belirlenmesi ve yük cinsinin seçilmesi yeterlidir. Bundan sonra oku düğmesine tıklandığında veri okunarak datatable kontrolüne aktarılmaktadır.

Okunan verinin kaydedilmek istendiğinde text dosyası olarak kaydedilip harmonik analiz yazılımında açıldığında dosya ismi olarak verilen isim kullanılarak, okumayla ilgili temel bilgiler elde edilmektedir. Dosya ismi kaydet penceresi açıldığında dosya

ismi varsayılan olarak sırasıyla yük cinsi, örnek sayısı, örnekleme aralığı, okuma gün, ay, yıl, saat, dakika ve saniye eklenmektedir. Böylece her bir kaydedilen dosyanın aynı zamanda tek bir sefer oluşturulması sağlanmıştır.



Şekil 4.18. Okunan verilerin text dosyasına kaydedilmesi

4.4. Harmonik Analiz Yazılımı

Harmonik analiz yazılımının geliştirilmesi Borland C++ Builder5 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Verilerin elde edilmesi işleminden sonra txt biçimindeki dosyalardan verilerin okunması sağlanmıştır.

Harmonik analiz yazılımı ile elde edilen bilgiler aşağıdaki gibidir:

- Gerilim ve akım dalga şekilleri,
- Gerilim ve akım değerlerinin etkin değerleri,
- Görünür, aktif, reaktif güç değerleri,

- Güç faktörü değerleri,
- Fazör diyagramı,
- Gerilim ve akım için toplam harmonik bozunum değerleri,
- Hızlı fourier dönüşümü ile elde edilen gerilim ve akım için frekans spektrumları,
- Gerilim ve akım için harmonik değerleri ile bunların faz açıları,
- Yük cinsine göre harmonik standart değerleri.

Harmonik analiz yazılımı ile elde edilen bütün değerler bir rapor şeklinde hazırlanabilmekte olup, yazıcıdan çıktı alınabilecek şekildedir. Gerilim ve akım dalga şekilleri istenilen oranda yakınlaştırılarak grafik daha ayrıntılı olarak görülebilecek şekildedir. Gerilim ve akım dalga şekilleri örnek sayısına bağlı olarak çizdirilmiştir. Veri toplama yazılımı ile alınan verilerden temel frekans elde edilebildiğinden gerilim ve akım dalga şeklinin zamana bağlı grafiğinin çizilmesine gerek görülmemiştir. Grafik üzerinde örnek sayısı ve örnekleme frekansına bağlı olarak elde edilen periyotların sayısı (toplam okuma uzunluğu) açıkça görülmektedir. Her üç faz gerilim dalga şekilleri ve akım dalga şekilleri ayrı grafiklerde çizdirilmiştir.

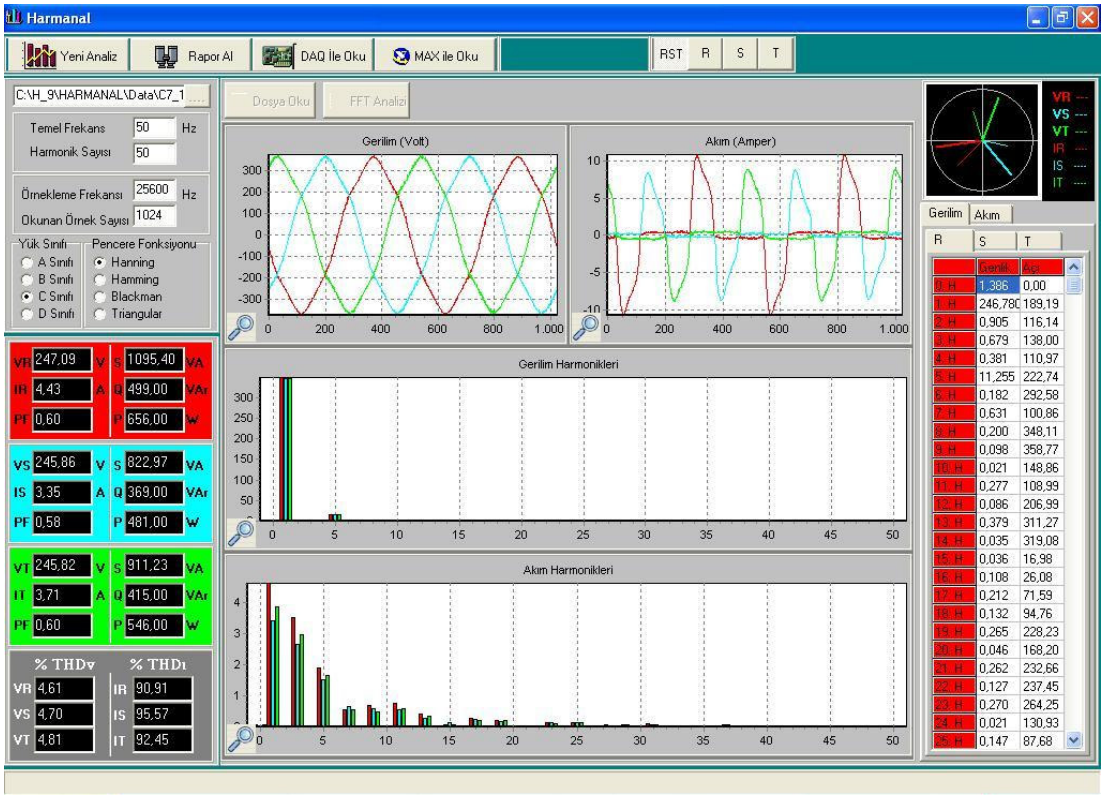
Harmonik analizi sonucunda her üç fazın gerilim ve akım harmonik değerlerini gösteren frekans spektrumlarını gösteren grafik ve tablolar bulunmaktadır. Frekans spektrumlarını gösteren grafikler 25. harmoniğe kadar harmonik genlikleri ve derecelerini gösterirken, tablolar ile 50. harmoniğe kadar her bir fazın harmonik derecelerinin gerilim ve akım için genlik ve faz açıları elde edilebilmektedir.

4.4.1. Harmonik analiz yazılımı tasarımı

Yazılım form tasarımında txt dosyasından elde edilen verilerin tamamı ile analiz sonrasında hesaplanan değerler tek bir form üzerinde açıkça görülebilmektedir. Dosyanın açılmasından sonra okunan verilere ilişkin gerilim ve akım dalga şekilleri grafikleri chart kontrolleri ile gösterilmektedir. Dosya okunduğu anda dosya isminden alınan örnek aralığı, örnek sayısı textbox kontrolleriyle, yük cinsi de group konrolleri ile gösterilmektedir. Bu bilgiler analiz yapılması sırasında kullanılmaktadır. FFT analizi düğmesine tıklandığı zaman her bir fazın gerilim ve akım harmonik değerleri chart kontrolleri ile, gerilim ve akım için her bir faza ait güçler, güç faktörleri ve toplam harmonik bozunum değerleri textbox kontrolleri ile, her bir faza ait gerilim ve akımların harmonik derecelerinin genlik ve açıları stringgrid kontrolleri ile, fazör diyagramı image kontrolü ile gösterilmektedir (Şekil 4.19).

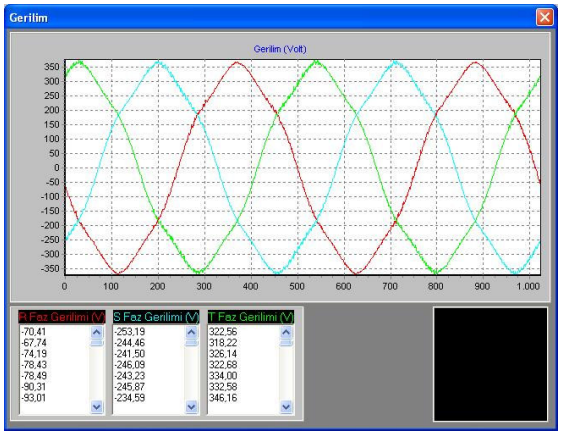


Şekil 4.19. Harmonik analiz yazılımı form tasarım görünümü

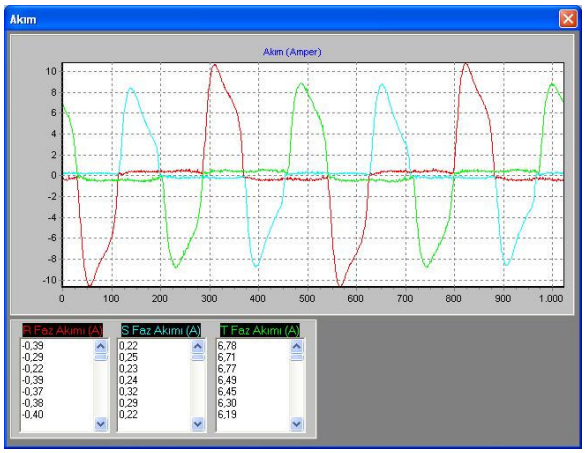


Şekil 4.20. Harmonik analiz yazılımı form görünümü

Grafiklerin sol alt köşesinde bulunan mercek resimli yakınlaştırma düğmelerine tıklandığında o grafiğe ait olan görüntü yeni bir form üzerinde daha büyük olarak elde edilmektedir. Bu yeni form üzerinde gerilim dalga şekli veya akım dalga şekli grafikle ve her bir örneklemede aldıkları değerler bir listbox kontrolleri içinde gösterilmiştir (Şekil 4.21 ve Şekil 4.22).

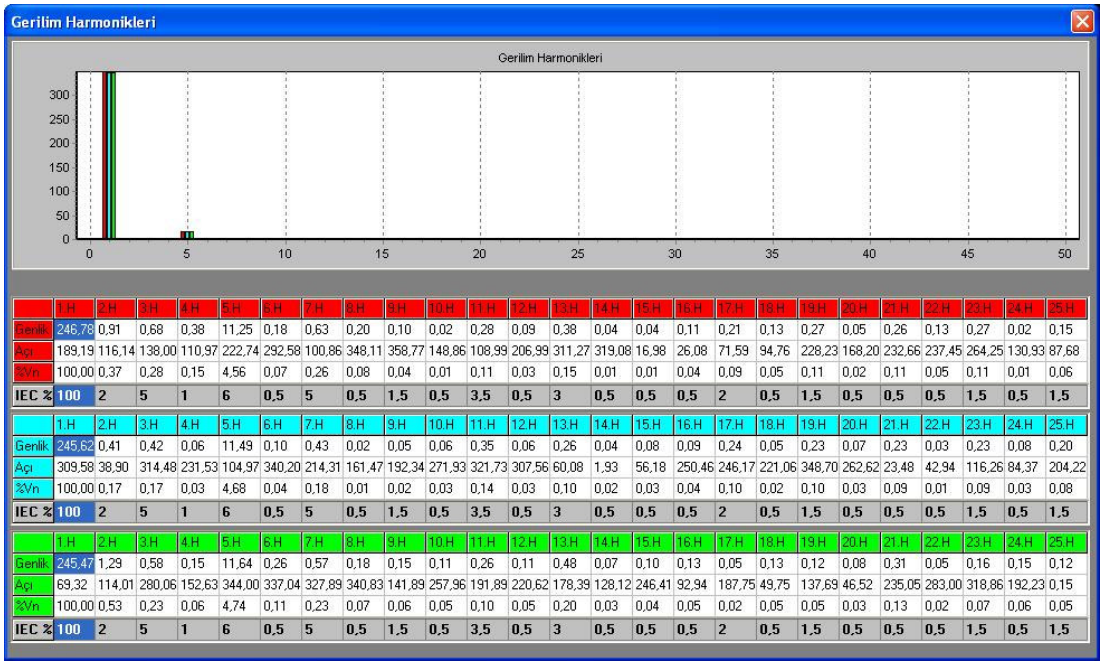


Şekil 4.21. Gerilim dalga şekli form görünümü



Şekil 4.22. Akım dalga şekli form görünümü

Gerilim ve akım için harmonik spektrumunu gösteren grafiklerin sol alt köşesindeki düğmeye tıklandığında, o grafiğe ait gerilim veya akım harmoniklerine ait grafikler yeni bir form üzerinde daha büyük boyutlarda elde edilmektedir. Bu yeni formda grafiğin alt tarafında ise ilgili ölçmenin harmonik değerlerinin genlik, açı ve standartlarla belirlenen sınırlarını gösteren stringgrid kontrolü bulunmaktadır (Şekil 4.23 ve Şekil 4.24).

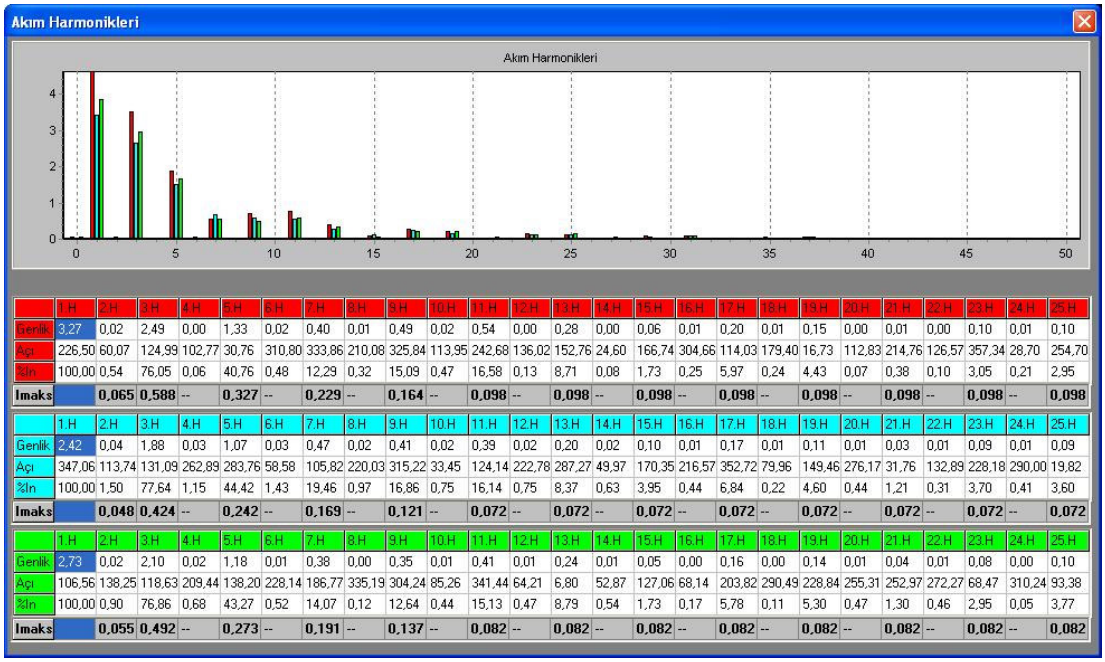


	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H	6.H	7.H	8.H	9.H	10.H	11.H	12.H	13.H	14.H	15.H	16.H	17.H	18.H	19.H	20.H	21.H	22.H	23.H	24.H	25.H
Genlik	246,78	0,91	0,68	0,38	11,25	0,18	0,63	0,20	0,10	0,02	0,28	0,09	0,38	0,04	0,04	0,11	0,21	0,13	0,27	0,05	0,26	0,13	0,27	0,02	0,15
Açı	189,19	116,14	138,00	110,97	222,74	292,58	100,86	348,11	358,77	148,86	108,99	206,99	311,27	319,08	16,98	26,08	71,59	94,76	228,23	168,20	232,66	237,45	264,25	130,93	87,68
%Vn	100,00	0,37	0,28	0,15	4,56	0,07	0,26	0,08	0,04	0,01	0,11	0,03	0,15	0,01	0,01	0,04	0,09	0,05	0,11	0,02	0,11	0,05	0,11	0,01	0,06
IEC %	100	2	5	1	6	0,5	5	0,5	1,5	0,5	3,5	0,5	3	0,5	0,5	0,5	2	0,5	1,5	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	1,5

	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H	6.H	7.H	8.H	9.H	10.H	11.H	12.H	13.H	14.H	15.H	16.H	17.H	18.H	19.H	20.H	21.H	22.H	23.H	24.H	25.H
Genlik	245,62	0,41	0,42	0,06	11,49	0,10	0,43	0,02	0,05	0,06	0,35	0,06	0,26	0,04	0,08	0,09	0,24	0,05	0,23	0,07	0,23	0,03	0,23	0,08	0,20
Açı	309,58	38,90	314,48	231,53	104,97	340,20	214,31	161,47	192,34	271,93	321,73	307,56	60,08	1,93	56,18	250,46	246,17	221,06	348,70	262,62	23,48	42,94	116,26	84,37	204,22
%Vn	100,00	0,17	0,17	0,03	4,68	0,04	0,18	0,01	0,02	0,03	0,14	0,03	0,10	0,02	0,03	0,04	0,10	0,02	0,10	0,03	0,09	0,01	0,09	0,03	0,08
IEC %	100	2	5	1	6	0,5	5	0,5	1,5	0,5	3,5	0,5	3	0,5	0,5	0,5	2	0,5	1,5	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	1,5

	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H	6.H	7.H	8.H	9.H	10.H	11.H	12.H	13.H	14.H	15.H	16.H	17.H	18.H	19.H	20.H	21.H	22.H	23.H	24.H	25.H
Genlik	245,47	1,29	0,58	0,15	11,64	0,26	0,57	0,18	0,15	0,11	0,26	0,11	0,48	0,07	0,10	0,13	0,05	0,13	0,12	0,08	0,31	0,05	0,16	0,15	0,12
Açı	69,32	114,01	280,06	152,63	344,00	337,04	327,89	340,83	141,89	257,96	191,89	220,62	178,39	128,12	246,41	92,94	187,75	49,75	137,69	46,52	235,05	283,00	318,86	192,23	0,15
%Vn	100,00	0,53	0,23	0,06	4,74	0,11	0,23	0,07	0,06	0,05	0,10	0,05	0,20	0,03	0,04	0,05	0,02	0,05	0,05	0,03	0,13	0,02	0,07	0,06	0,05
IEC %	100	2	5	1	6	0,5	5	0,5	1,5	0,5	3,5	0,5	3	0,5	0,5	0,5	2	0,5	1,5	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	1,5

Şekil 4.23. Gerilim harmonikleri form görünümü



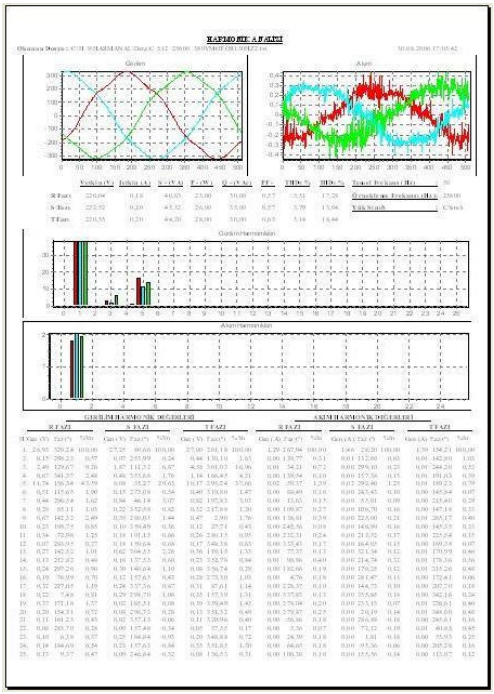
	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H	6.H	7.H	8.H	9.H	10.H	11.H	12.H	13.H	14.H	15.H	16.H	17.H	18.H	19.H	20.H	21.H	22.H	23.H	24.H	25.H
Genlik	3,27	0,02	2,49	0,00	1,33	0,02	0,40	0,01	0,49	0,02	0,54	0,00	0,28	0,00	0,06	0,01	0,20	0,01	0,15	0,00	0,01	0,00	0,10	0,01	0,10
Açı	226,50	60,07	124,99	102,77	30,76	310,80	333,86	210,08	325,84	113,95	242,68	136,02	152,76	24,60	166,74	304,66	114,03	179,40	16,73	112,83	214,76	126,57	357,34	28,70	254,70
%In	100,00	0,54	76,05	0,06	40,76	0,48	12,29	0,32	15,09	0,47	16,58	0,13	8,71	0,08	1,73	0,25	5,97	0,24	4,43	0,07	0,38	0,10	3,05	0,21	2,95
Imaks		**0,065**	**0,588**	--	**0,327**	--	**0,229**	--	**0,164**	--	**0,098**	--	**0,098**	--	**0,098**	--	**0,098**	--	**0,098**	--	**0,098**	--	**0,098**	--	**0,098**

	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H	6.H	7.H	8.H	9.H	10.H	11.H	12.H	13.H	14.H	15.H	16.H	17.H	18.H	19.H	20.H	21.H	22.H	23.H	24.H	25.H
Genlik	2,42	0,04	1,88	0,03	1,07	0,03	0,47	0,02	0,41	0,02	0,39	0,02	0,20	0,02	0,10	0,01	0,17	0,01	0,11	0,01	0,03	0,01	0,09	0,01	0,09
Açı	347,06	113,74	131,09	262,89	283,76	58,58	105,82	220,03	315,22	33,45	124,14	222,78	287,27	49,97	170,35	216,57	352,72	79,96	149,46	276,17	31,76	132,89	228,18	290,00	19,82
%In	100,00	1,50	77,64	1,15	44,42	1,43	19,46	0,97	16,86	0,75	16,14	0,75	8,37	0,63	3,95	0,44	6,84	0,22	4,60	0,44	1,21	0,31	3,70	0,41	3,60
Imaks		**0,048**	**0,424**	--	**0,242**	--	**0,169**	--	**0,121**	--	**0,072**	--	**0,072**	--	**0,072**	--	**0,072**	--	**0,072**	--	**0,072**	--	**0,072**	--	**0,072**

	1.H	2.H	3.H	4.H	5.H	6.H	7.H	8.H	9.H	10.H	11.H	12.H	13.H	14.H	15.H	16.H	17.H	18.H	19.H	20.H	21.H	22.H	23.H	24.H	25.H
Genlik	2,73	0,02	2,10	0,02	1,18	0,01	0,38	0,00	0,35	0,01	0,41	0,01	0,24	0,01	0,05	0,00	0,16	0,00	0,14	0,01	0,04	0,01	0,08	0,00	0,10
Açı	106,56	138,25	118,63	209,44	138,20	228,14	186,77	335,19	304,24	85,26	341,44	64,21	6,80	52,87	127,06	68,14	203,82	290,49	228,84	255,31	252,97	272,27	68,47	310,24	93,38
%In	100,00	0,90	76,86	0,68	43,27	0,52	14,07	0,12	12,64	0,44	15,13	0,47	8,79	0,54	1,73	0,17	5,78	0,11	5,30	0,47	1,30	0,46	2,95	0,05	3,77
Imaks		**0,055**	**0,492**	--	**0,273**	--	**0,191**	--	**0,137**	--	**0,082**	--	**0,082**	--	**0,082**	--	**0,082**	--	**0,082**	--	**0,082**	--	**0,082**	--	**0,082**

Şekil 4.24. Akım harmonikleri form görünümü

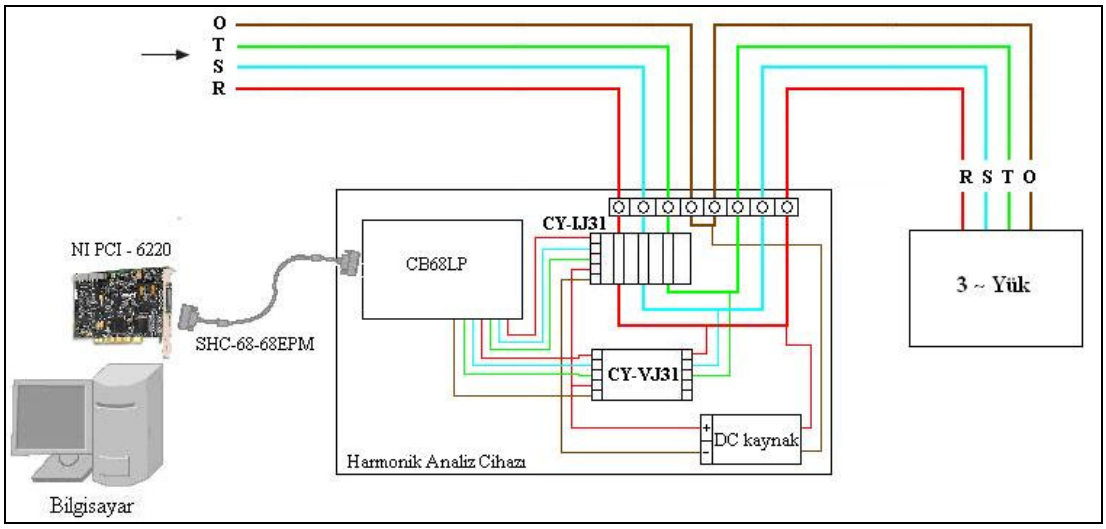
Yapılacak harmonik analizi sonrasında ölçüm sonuçları yazıcıdan rapor alınabilecek şekilde hazırlanmıştır (Şekil 4.25).



Şekil 4.25. Harmonik analiz yazılımı rapor formu görünümü

5. ÜÇ FAZLI TESİSTE HARMONİK ANALİZİ YAPILMASI

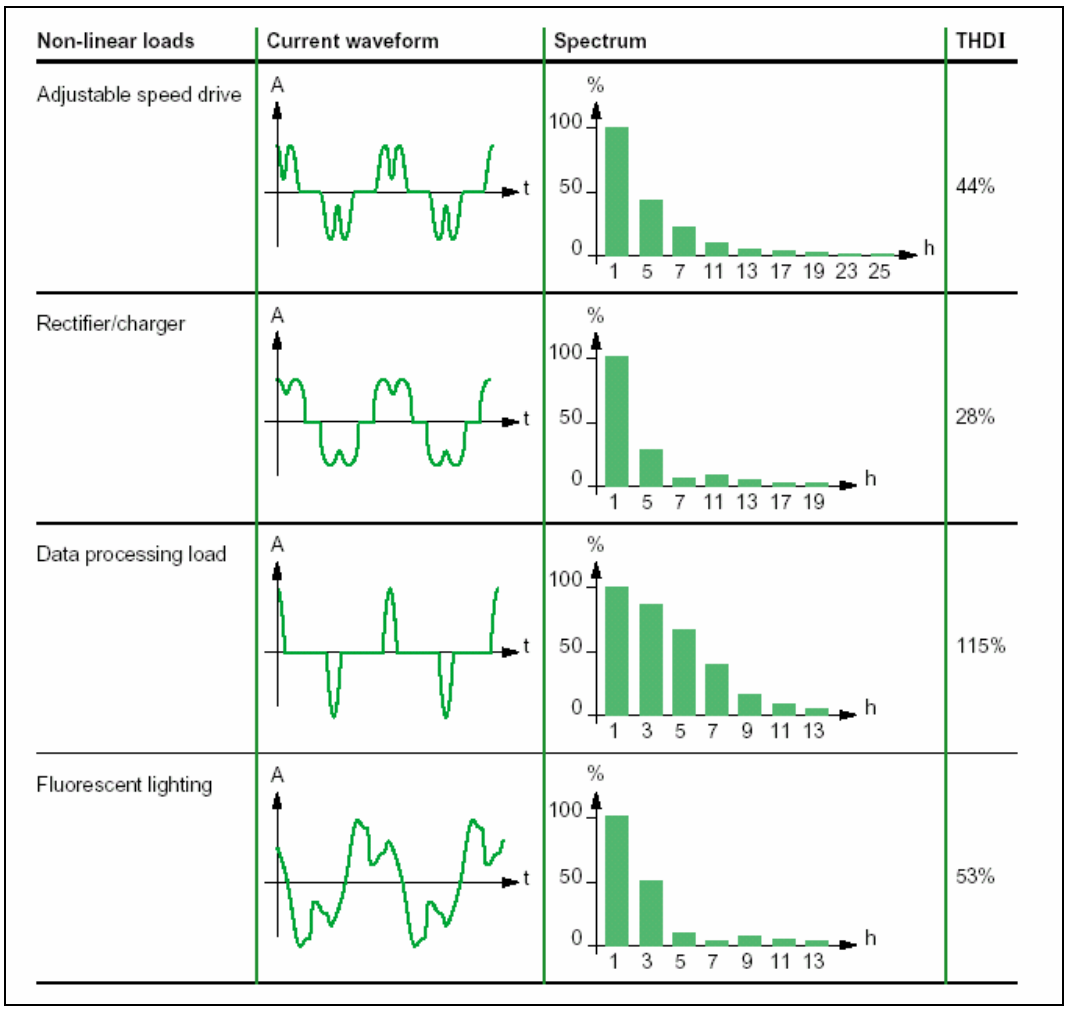
Üç fazlı elektrik tesisinde ölçme yapabilen harmonik analiz cihazının bağlantı şeması Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Harmonik analizi cihazının üç fazlı tesise bağlanması

Harmonik standartları ile yükler dört farklı sınıfa ayrılmaktadır. A sınıfı cihazlar; dengeli üç fazlı cihazlar, D sınıfı dışında tanımlanmış ev cihazları, taşınabilir araçlar dışındaki araçlar, akkor lamba dimmerleri, B, C ve D sınıfları dışındaki diğer tüm cihazlar ile ses cihazlarıdır. B sınıfı cihazlar; taşınabilir araçlar, profesyonel olmayan ark kaynak gibi cihazlardır. C sınıfı cihazlar; aydınlatma cihazlarıdır. D sınıfı cihazlar; 75W'tan büyük 600W'ı aşmayan güce sahip cihazlar, bilgisayarlar, bilgisayar monitörleri, televizyonlardır.

Farklı doğrusal olmayan yüklere ait akım dalga şekilleri, frekans spektrumları toplam harmonik bozunum miktarları Şekil 5.2'de verilmiştir.

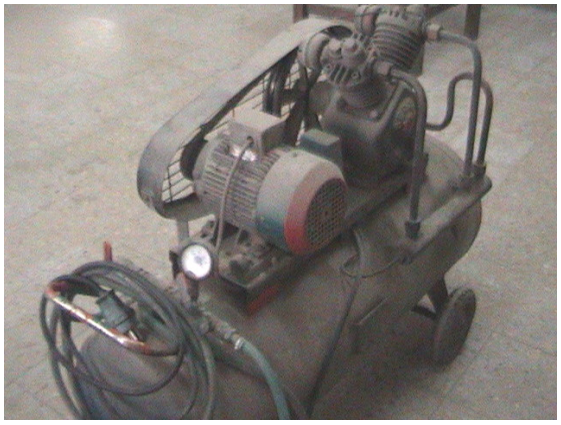


Şekil 5.2. Farklı harmonik kaynaklı yüklerin karakteristikleri

Harmonik analiz cihazı ile B sınıfı, C sınıfı, D sınıfı, alternatörle üretilen gerilimle beslenen bir yük ve mevcut şebeke harmonik kirletme devresi ile kirletildikten sonra beslenen yük için şu ölçüm ve analizler yapılmıştır.

5.1. Hava Kompresörü Harmonik Analizi

B sınıfı yükler ark kaynak makineları gibi taşınabilir cihazlardır. Bu sınıf için yapılan ölçümde bir hava kompresörü kullanılmıştır. Kompresöre ait etiket değerleri 220/380V Δ/Y, 5,9/3,4A Δ/Y, 1,5kW şeklindedir.



Resim 5.1. Hava Kompresörü

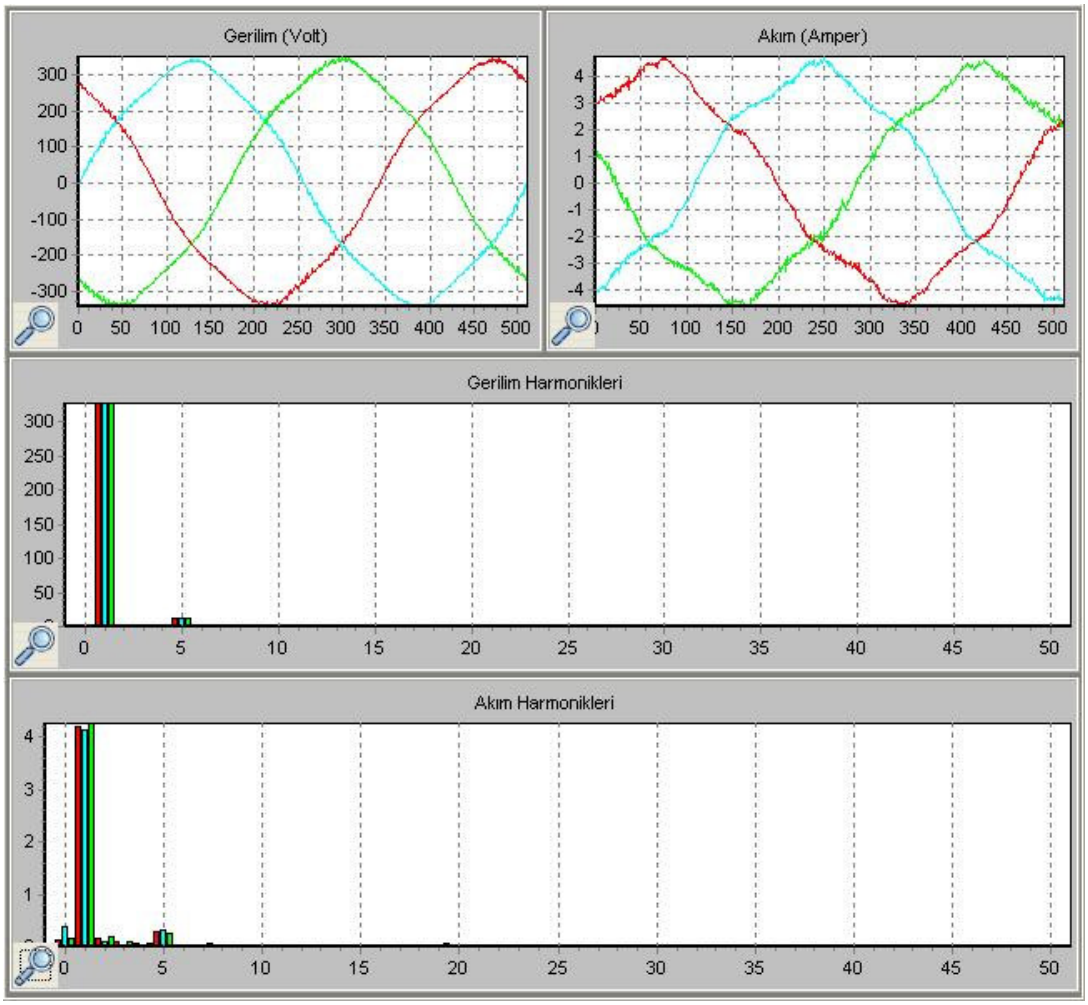
Kompresöre ait yapılan ölçüm ve analiz sonucunda Çizelge 5.1'de belirtildiği gibi toplam harmonik bozunum değerleri gerilim ve akım için harmonik standartlarının üzerinde çıkmıştır. IEEE 519 standartlarına göre toplam harmonik bozunum sınırları gerilim için (%THDv) %3, akım için (%THDı) %8'in altında olmalıdır [3].

Çizelge 5.1. Hava kompresörüne (B sınıfı yüke) ait ölçülen değerler

	R Fazı	S Fazı	T Fazı
V (Volt)	231,27	231,79	232,07
I (Amper)	2,97	2,93	3,02
S (VA)	688,00	678,92	701,97
Q (VAr)	675,00	663,00	685,00
P (W)	122,00	133,00	140,00
PF	0,18	0,20	0,20
% THDv	3,66	3,55	3,59
% THDı	8,69	8,63	8,99

Temel frekanstaki gerilim değerleri R fazı için 231,09 Volt, S fazı için 231,62 Volt, T fazı için 231,90 Volt olarak tespit edilmiştir. B sınıfı yükler için harmonik standartlarına göre %Vn sınırını aşan bir harmonik genliği tespit edilmemiştir. En büyük harmonik genliği beşinci harmonikte gözlenmiştir. Yüzde olarak ifade edildiğinde beşinci harmonikteki genlik miktarları R fazı %3,58, S fazı %3,49, T fazı %3,49'dur.

Temel frekanstaki akım değerleri R fazı için 2,96 Amper, S fazı için 2,91 Amper ve T fazı için 3,01 Amper olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.3. Hava kompresörüne ait dalga şekilleri ve harmonik spektrumları

Şekil 5.3'te de görüleceği gibi akım harmonikleri düşük seviyedeki frekanslarda görülmektedir. Gerilim harmonik spektrumunda da olduğu gibi akım harmonik spektrumu da beşinci harmonikleri etkin bir şekilde bulundurmaktadır. Ancak harmonik standartlarına göre B sınıfı için tespit edilen maksimum akım değerleri aşılmamıştır. En büyük harmonik akımının temel frekanstaki akıma oranı yüzde olarak R, S ve T fazları için sırasıyla %6,66 , %8,09 ve %6,23 seviyesindedir.

Toplam harmonik bozunum değerleri harmonik standartlarının belirlenen değerlerinin üstünde olduğundan harmonik filtreleme gerekmektedir.

5.2. Üç Fazlı Aydınlatma Tesisi Harmonik Analizi

Bu ölçümde her biri ayrı fazlarla beslenen üç dersliğe ait aydınlatma tesisatına ait ölçümler yapılmıştır. Aydınlatmada flouresant lambalar kullanılmaktadır. Her bir flouresant lamba tesisatlarında paralel kompanzasyon kondansatörleri bağlıdır.

Çizelge 5.2. Flouresant lambalara (C sınıfı yüke) ait ölçülen değerler

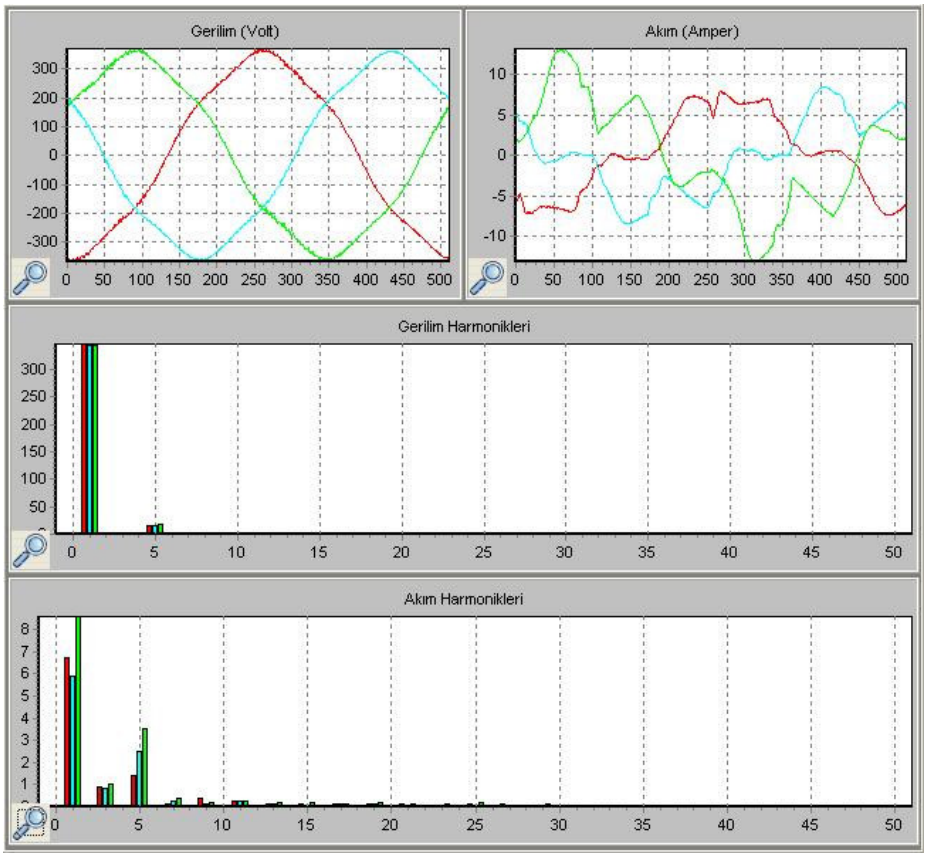
	R Fazı	S Fazı	T Fazı
V (Volt)	245,44	244,23	243,80
I (Amper)	4,92	4,59	6,62
S (VA)	1207,53	1121,72	1615,15
Q (VAr)	231,00	107,00	255,00
P (W)	1154,00	1035,00	1487,00
PF	0,96	0,92	0,92
% THDv	4,64	4,83	4,93
% THDı	26,68	45,54	43,68

Flouresant lambalar doğrusal olmayan akım ve gerilim karakteristiğine sahiptir. Demir nüveli manyetik balastların kullanıldığı flouresant lamba tesisatlarında balastların endüktansları harmonik akımları sınırlandırır. Aynı zamanda doğrusal olmayan manyetik karakteristikleri nedeniyle harmonik üretirler [10].

Yüksek kaliteli manyetik balastların toplam harmonik bozunum seviyeleri %12–15 civarındadır [10].

Şekil 5.4'te flouresant lamba ile aydınlatma yapılmış üç adet dersliğe ait harmonik analizinde akım harmoniklerinin tekil seviyelerde olduğu görülmüştür. Gerek akım şekli ve gerekse de akım harmonik spektrumu Resim 5.2'de verilen grafiklere benzerdir. Gerilim ve akım için toplam harmonik bozunum değerleri standartlarda verilen üst sınır değerlerini aşmaktadır. Sistemde harmonik filtreleme gerekmektedir.

Gerilim harmonik spektrumu B sınıfı analizdeki gibi beşinci seviyede etkin olacak şekilde harmonik genliklerini içermektedir. Bu akım harmonik spektrumunda da açıkça görülmektedir.



Şekil 5.4. Flouresant lambalı aydınlatma tesisine ait dalga şekilleri ve harmonik spektrumları

Beşinci harmonik akım genlikleri standartların üzerinde gerçekleşmektedir. Beşinci harmonik genlikleri temel frekanslı akım genliğinin %40'ına kadar ulaşmaktadır. Filtreleme beşinci harmonik için yapılmalıdır. R ve S fazında dokuzuncu ve onbirinci harmonik akım genlikleri standartın üzerinde görülmektedir. T fazında ise onbirinci harmonik standart değerlerini aşmıştır.

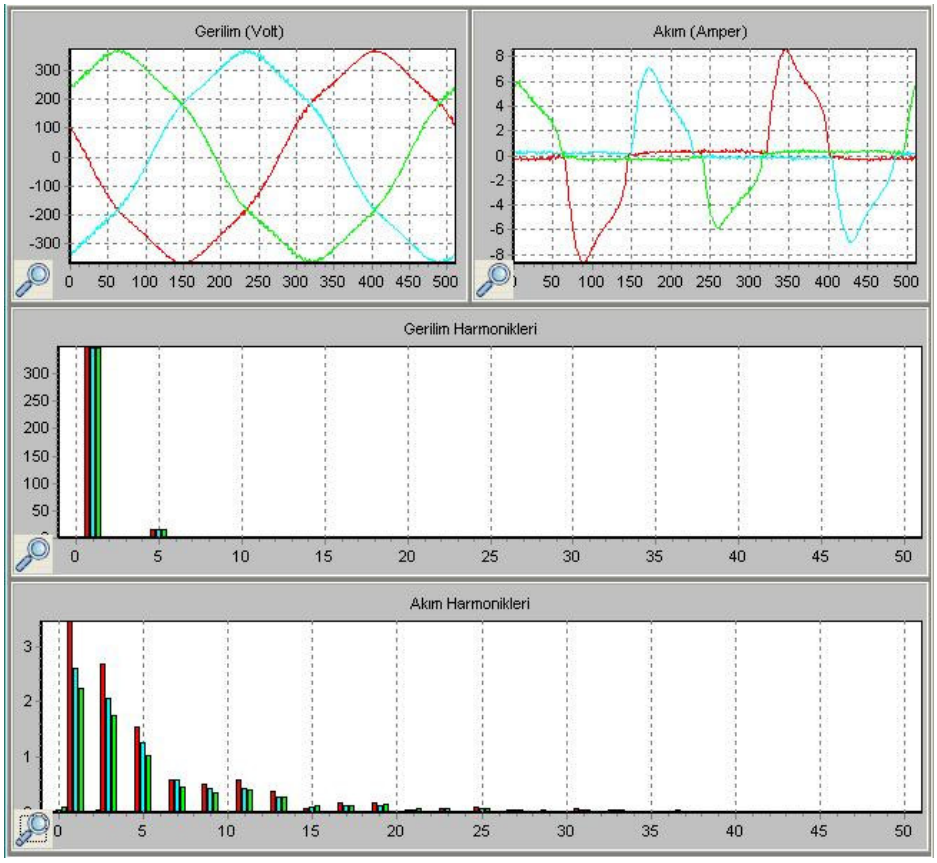
5.3. Bilgisayar Laboratuarı Harmonik Analizi

Bilgisayar ve televizyon gibi cihazlar tekil harmonik akımlar üretirler. D sınıfı yüke ait ölçümler üç fazla beslenen ve her bir fazda farklı sayıda bilgisayar beslenen bir bilgisayar laboratuarında yapılmıştır.

Bilgisayarlar, kompakt flouresant lambalar %50–100 arasında üçüncü, beşinci, yedinci ve dokuzuncu harmonik üretirler [11].

Çizelge 5.3. Bilgisayar laboratuarına (D sınıfı yüke) ait ölçülen değerler

	R Fazı	S Fazı	T Fazı
V (Volt)	247,74	246,59	246,43
I (Amper)	3,37	2,59	2,23
S (VA)	835,94	639,38	548,41
Q (VAr)	383,00	299,00	261,00
P (W)	484,00	353,00	304,00
PF	0,58	0,55	0,55
% THDv	4,42	4,62	4,71
% THDı	95,26	99,70	97,86



Şekil 5.5. Bilgisayar laboratuarına ait dalga şekilleri ve harmonik spektrumları

Ölçüm ve analiz toplam harmonik bozunum değerlerinin standartları aştığını ve harmonik filtreleme yapılması gerektiğini göstermiştir. Bilgisayar laboratuarında

mevcut sistemde zamansız sigortaların açması gibi sorunlarla karşılaşıldığı gözlenmiştir.

R fazı için akım harmoniklerinin üçüncü, beşinci, dokuzuncu, onbirinci ve onüçüncü harmonik genliklerinin sınırların üstünde olduğu tespit edilmiştir. S fazında dokuzuncu ve onbirinci harmonikte ve T fazında beşinci, onbirinci ve onüçüncü harmonik genlikler sınırları aşmaktadır.

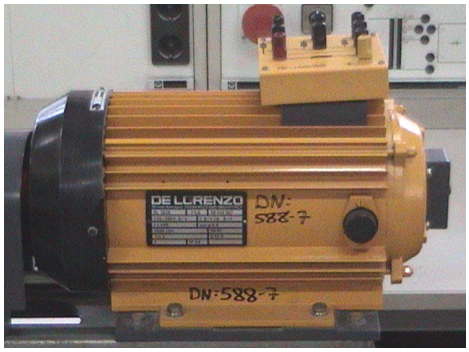
5.4. Alternatörle Beslenen Yük İçin Harmonik Analizi

Bir alternatörden elde edilen gerilimin ne kadar harmonikli olduğunu tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen bu uygulamada gerilim değerleri 220/380V Δ/Y, akımları 2,9/1,7A, gücü 1,1kVA, güç katsayısı 0,8, 50Hz frekanslı 3000d/dak. üç fazlı senkron jeneratör bir doğru akım şönt motoru ile tahrik edilmiştir. Kademeli omik ve endüktif yük grubu ile beslenen alternatörde elde edilen gerilim ikinci, üçüncü, onyedinci, ondokuzuncu, yirmiüçüncü ve kırkbirinci harmonik değerlerini içerdiği tespit edilmiştir. Alternatör uç gerilimi dalga şeklinde harmoniklerin varlığı açıkça görülmektedir (Şekil 5.6).

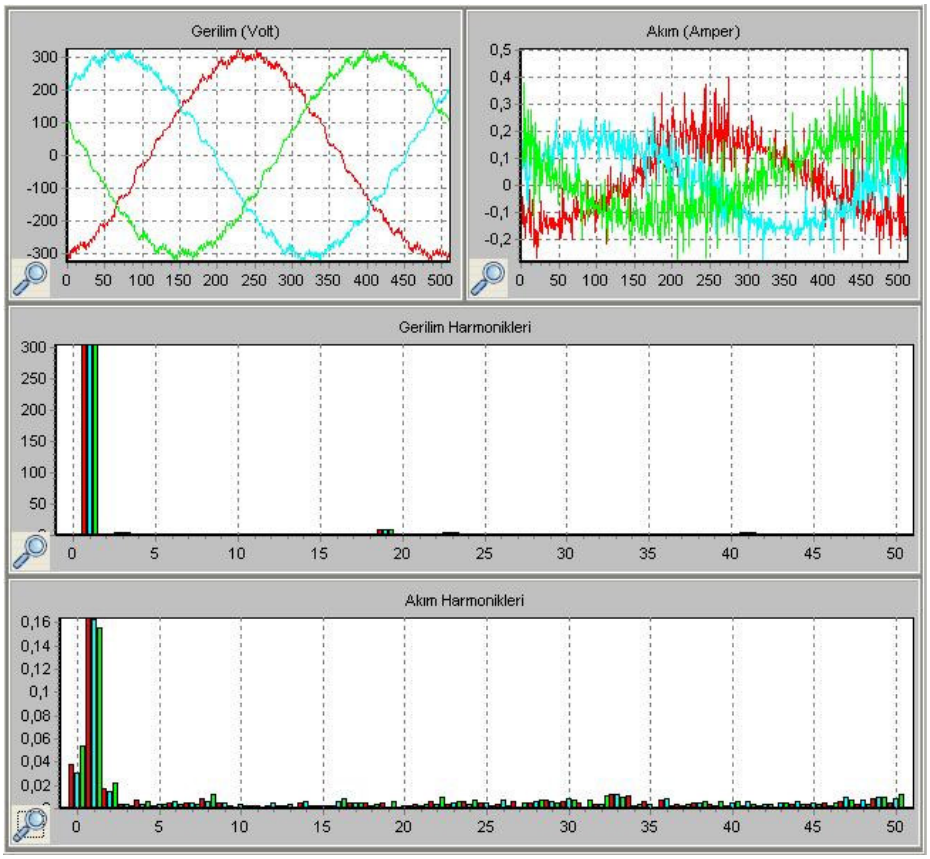
Çizelge 5.4. Alternatör ile beslenen (A sınıfı) yüke ait ölçülen değerler

	R Fazı	S Fazı	T Fazı
V (Volt)	214,84	214,59	215,38
I (Amper)	0,13	0,13	0,13
S (VA)	28,46	27,38	28,92
Q (VAr)	9,00	9,00	8,00
P (W)	23,00	22,00	22,00
PF	0,81	0,80	0,76
% THDv	4,07	4,01	3,95
% THDı	24,32	24,60	29,62

Analiz ile gerilim ve akımların toplam harmonik bozunum değerlerinin harmonik standartlarının sınır değerlerinden yüksek çıktığı Çizelge 5.4'de görülmektedir.



Resim 5.2. Üç fazlı alternatör

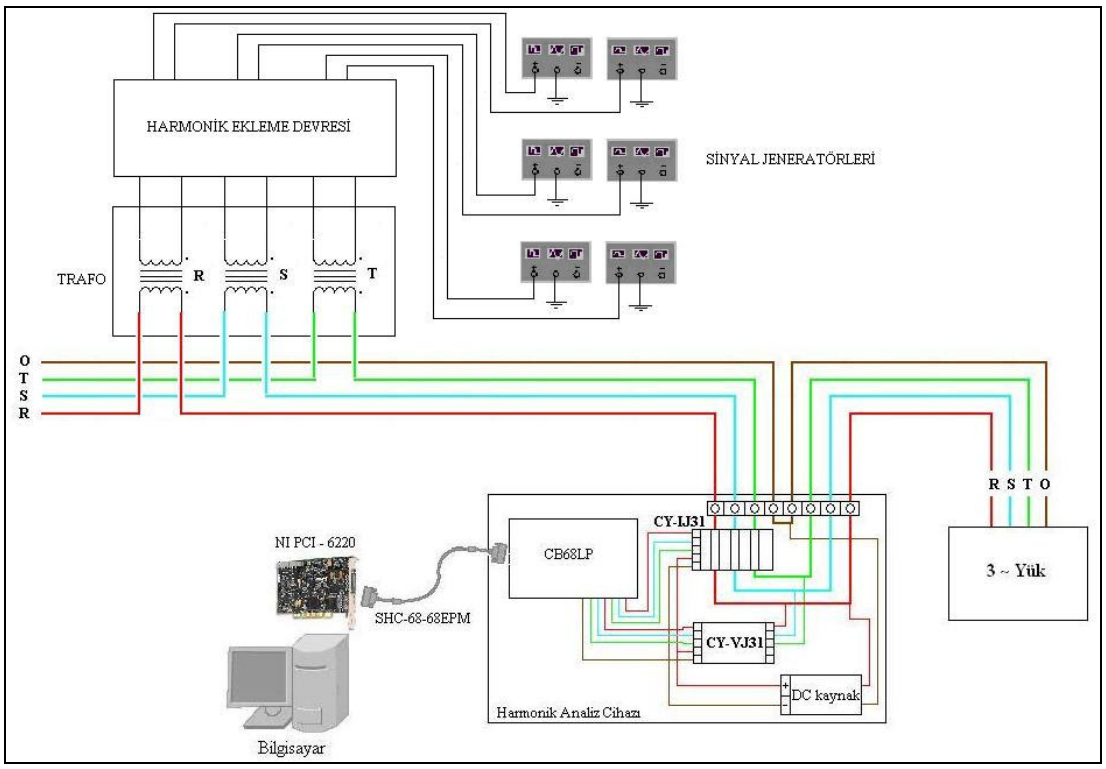


Şekil 5.6. Alternatörle beslenen yüke ait dalga şekilleri ve harmonik spektrumları

Alternatörlerde üç ve üçün katı harmoniklerin etkisinin kaldırılması için yıldız bağlantılı olarak çalıştırılmalıdır. Yıldız bağlantıda faz gerilimlerinde üçüncü harmonik bulunsa bile fazlar arası gerilimlerde bulunmazlar. Beşinci ve yedinci harmoniklerin etkisi adım kısaltma ile mümkün olabilmektedir [12].

5.5. Harmonik Eklenmiş Şebeke İle Beslenen Yük İçin Ölçüm ve Analizler

Üç fazlı elektrik şebekesine harmonik ekleme devresi ile sinyal jeneratörlerinden elde edilmiş karıştırılmış dalga şekilleri uygulanmıştır. Sinyal jeneratörlerinden elde edilen işaretin genliği en büyük tepe değeri 10 Volt olarak alınmaktadır. Farklı genlik ve frekanslardaki işaretler harmonik ekleme devresindeki opamplar aracılığı ile toplanmıştır. Kullanılan mosfetler opamp devresinden elde edilen karıştırılmış dalga şekillerini şebeke tarafına aktarmaktadır.

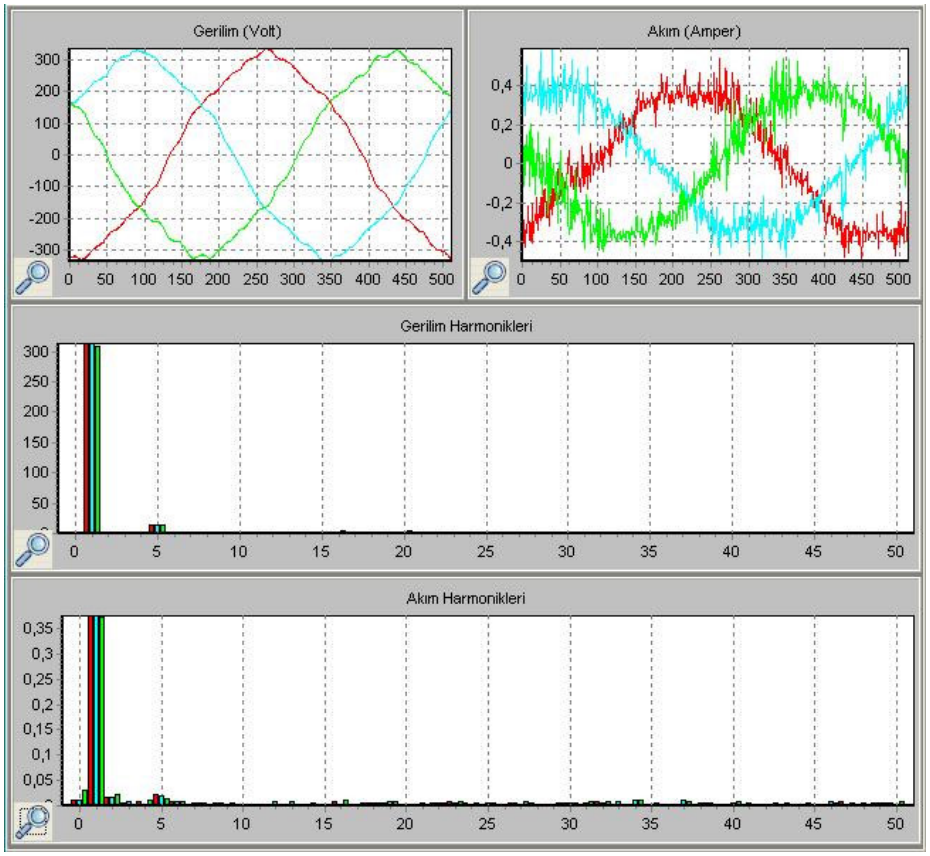


Şekil 5.7. Harmonik ekleme devresi ile harmonik analiz cihazının bağlantısı

5.5.1. Harmonik eklenmiş şebekedeki omik yükün harmonik analizi

Harmonik eklenmiş şebekede yük olarak üç faza yıldız bağlanmış 60Watt değerindeki akkor flamanlı ampuller kullanılmıştır.

Sinyal jeneratörlerinden farklı frekans ve genlikteki sinüssel dalgalar R, S ve T fazlarına uygulandığında yapılan ölçümlerde farklı harmonik seviyeleri gerilim dalga şeklinde görülmüştür.



Şekil 5.8. Harmonik eklenmiş şebekedeki omik yüke ait harmonik analizi

Toplam harmonik bozunum değerleri gerilim için R fazında %4,69, S fazında %4,76 ve T fazında %5,05 kadardır (Çizelge 5.5).

Sinyal jeneratörleri ile eklenmiş harmonikler R fazında 12. harmonikte 2,23Volt %1,01, 16.harmonikte 1,14Volt %0,52, 19.harmonikte 1,82Volt %0,82, 20.harmonikte 1,91Volt %0,87 olarak tespit edilmiştir. S fazında 12.harmonikte 2,18Volt %0,98, 16.harmonikte 1,90volt %0,86, 19.harmonikte 1,50Volt %0,68 olarak tespit edilmiştir. T fazında 15.harmonikte 1,45Volt %0,66, 16.harmonikte 2,55Volt %1,17, 18.harmonikte 1,10Volt %0,50, 19. harmonikte 2,46Volt %1,13, 20.harmonikte 2,51volt %1,15 olarak tespit edilmiştir. R ve S fazlarında 12. ve 16.

harmonikler standardın üzerindedir. T fazında 16. ve 20. harmonik standardın üzerinde olduğu belirlenmiştir. Genlikler harmonik standart değerlerinin altında kalmıştır. Diğer ölçümlerde de olduğu gibi şebekede var olan beşinci harmonik bu ölçümde de gözlenmiştir. Beşinci harmonik genlikleri bu ölçümde R, S, T fazları için sırasıyla %4,28, %4,41 ve %4,42 kadardır.

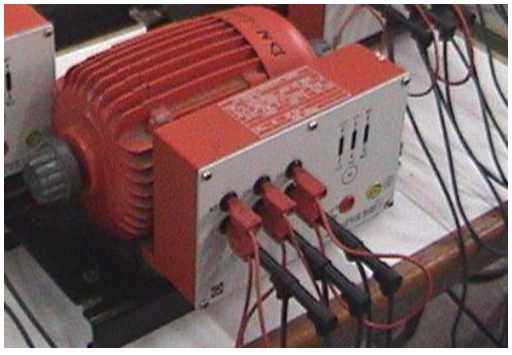
Çizelge 5.5. Harmonik eklenmiş şebekedeki omik yük için ölçüm değerleri

	R Fazı	S Fazı	T Fazı
V (Volt)	221,19	221,48	218,58
I (Amper)	0,27	0,27	0,27
S (VA)	59,97	59,96	59,73
Q (VAr)	30,00	27,00	28,00
P (W)	50,00	51,00	50,00
PF	0,83	0,85	0,84
% THDv	4,69	4,76	5,05
% THDı	11,56	11,80	13,21

Akım için toplam harmonik bozunum değerleri R fazında %11,56, S fazında %11,80 ve T fazında %13,21 değerlerindedir. Toplam harmonik bozunum değerleri harmonik standartlarının üzerinde çıkmıştır.

5.5.2. Harmonik eklenmiş şebekedeki motorun harmonik analizi

Harmonik analizi için kullanılan motor üç fazlı yıldız bağlıdır. 0,37kW değerindeki motor boşta çalıştırılmıştır. Güç katsayısı 0,73'dür. Sinyal jeneratörleri ile şebekenin her bir fazına 950Hz frekanslı sinüssel gerilimler eklenmiştir.



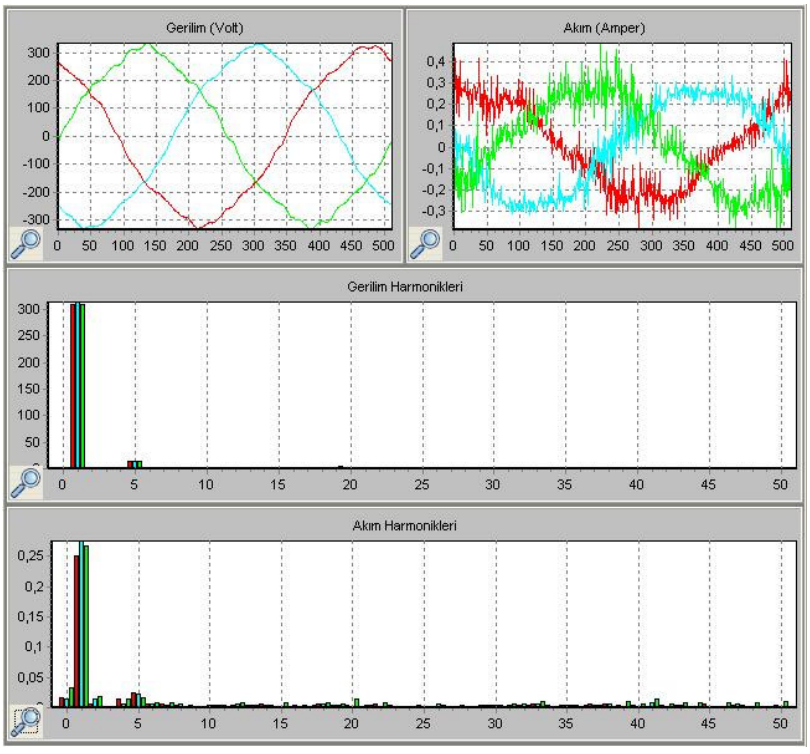
Resim 5.3. Üç fazlı asenkron motor

Yapılan ölçümlerde gerilim dalga şeklinde 15., 16., 19. ve 20.harmonik seviyelerinde harmonik genlikler tespit edilmiştir. Şekil 5.9'daki gerilim dalga şeklinde bu harmoniklerin varlığı görülmektedir.

Çizelge 5.6. Harmonik eklenmiş şebekedeki motora ait ölçüm değerleri

	R Fazı	S Fazı	T Fazı
V (Volt)	218,99	222,31	219,77
I (Amper)	0,19	0,20	0,20
S (VA)	40,52	44,63	43,92
Q (VAr)	30,00	33,00	30,00
P (W)	23,00	27,00	27,00
PF	0,57	0,60	0,61
% THDv	4,92	4,47	4,89
% THDı	15,85	13,95	19,08

Toplam harmonik bozunum değerlerinin standartların üzerinde çıktığı tespit edilmiştir. Diğer ölçümlerde de olduğu gibi beşinci harmonik seviyesi bu ölçümde de gözlenmektedir. 12., 16. ve 20. harmonik genlikleri standart değerlerinin üzerindedir. Akım harmoniklerinin standart değerlerin altında olduğu gözlenmiştir.



Şekil 5.9. Harmonik eklenmiş şebekedeki motora ait harmonik analizi

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Elektrik tesislerindeki harmonikler, sinüssel bir kaynağa doğrusal olmayan bir yükün bağlanmasıyla veya sinüssel olmayan bir kaynağa doğrusal ya da doğrusal olmayan bir yükün bağlanmasıyla oluşmaktadır. Enerjinin kalitesini önemli ölçüde etkileyen ve sistemde bulunan birçok olumsuz etkiye neden olan harmoniklerin etkilerinin giderilmesi için öncelikle tespit edilmesi gerekmektedir.

Tesisteki harmoniklerin varlığı cihazlar üzerindeki etkilerinden anlaşılmakla beraber esas olarak bu tespit için harmonik analizörleri ya da güç kalite cihazları kullanılması ile kirlenme düzeyinin tam olarak tespiti mümkün olabilmektedir.

Bu çalışmada şebeke gerilimine harmonik eklemesi yapabilecek harmonik kirletme devresi, üç fazlı tesiste harmonik ölçüm ve analizi yapacak harmonik analizörü ve yazılımı gerçekleştirilmiştir.

Geliştirilen harmonik kirletme devresi ile mevcut şebeke gerilimine harmonikler eklenmiş ve buna ilişkin ölçüm ve analizler yapılmıştır.

Bu çalışma ile geliştirilen harmonik ölçümü düzeneğinde; özel olarak geliştirilmiş üç fazlı akım ve gerilim sensörleri, veri toplama kartı kullanılmıştır. Üç fazlı tesiste gerilim ve akım değerleri ölçülerek bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Gerçekleştirilen yazılım ile hızlı fourier dönüşümü kullanılarak harmonik büyüklükler tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Kocatepe C., Uzunoğlu M., Yumurtacı R., Karakaş A., Arıkan O., "Elektrik Tesislerinde Harmonikler", ***Birsen Yayınevi Ltd. Şti.*** , İstanbul, 15-21, 40-42, 124-132, 140-185 (2003).

2. Adak S., "Enerji sistemlerinde harmonik distorsiyonun azaltılması", Doktora Tezi, ***Yıldız Teknik Üniversitesi FenBilimleri Enstitüsü***, İstanbul, 1-8, 10-18, 22-24, 44-48 (2003).

3. Sucu M., "Elektrik enerji sistemlerinde oluşan harmoniklerin filtrelenmesinin bilgisayar destekli modellenmesi ve simülasyonu", Yüksek Lisans Tezi, ***Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, İstanbul, 8-17 (2003).

4. Ertürk S., "Sayısal İşaret İşleme", ***Birsen Yayınevi Ltd. Şti.*** , İstanbul, 85-97, 111-133, 145-153 (2005).

5. Press W.H., Teukolsky S.A.,Wetterling W.T., "Numerical Recipes in C", ***Cambridge University*** , New York, 500-521, 538-545, 550-564 (1992).

6. Harris F. J., "On the Use of Windows for Harmonic Analysis with Discrete Fourier Transform", ***IEEE***, 51-83 (1978).

7. Ergun D., "Neden Harmonik Filtreli Kompanzasyon Tesisi Kullanmalıyız?" , ***3E Dergisi***, Sayı 116: 90-94 (2004).

8. Albayrak S., "Aktif Harmonik Düzenleyiciler", ***3E Dergisi***, Sayı 125: 58-62 (2004).

9. Sevgi L., "EMC, Güç Kalitesi ve Harmonik Analizi", ***Endüstriyel Otomasyon Dergisi***, Sayı 100: 19-21 (2005).

10. Gökmen G., Kocabey S., "Kompakt Flouresant Lambaların Güç katsayısına ve Harmonik Bozunumlara Etkileri", ***3E Dergisi***, Sayı 126: 88-90 (2004).

11. Çorapsız M.H., " Pasif Harmonik Filtrelemede Pratik Yaklaşımlar", ***3E Dergisi***, Sayı116: 104-106 (2004).

12. Peşint A., "Senkron Makinalar", ***Yüksek Teknik Öğretmen Okulu Matbaası***, Ankara, 55-65, 75-77 (1975).

13. Hasırcı E., Çalışkan Ö., "Harmonikler İçin Neden Kaygı Duyulmalı?", ***3 E Dergisi***, Sayı 116: 110-112 (2004).

14. Gönen M., Hocaoğlu M.H., "Gerçek Bir Dağıtım Şebekesinde Harmoniklerin Ölçüm Ve Modellenmesi", ***Elektrik-Elektronik- Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi***, İstanbul, 56-59 (2003).

15. Yalçın B., "Kompanzasyon ve Harmonik Filtre Sistemleri", ***3E Dergisi***, Sayı 116: 98-101 (2004).

16. Heath M.H. "Parallel Numerical Algorithms -Fast Fourier Transform", ***İllinois University***, 16-18 (2004).

17. Ranade S.J., Xu W., "an overview of harmonics modeling and sımulation", ***IEEE***, 542-465 (1996).

18. Onur A., Kasım E., "Üçüncü Harmonik ve Üçüncü Harmonik Filtresi", Elektra Elektronik San.ve Tic.Ltd Şti., ***Win'05 Endüstriyel Etkinlikleri***, İstanbul, 3-5, 7-10 (2005).

19. Angelotta M.E., "Fourier Analysis", ***DISP***, 4-6, 12-14 (2003).

EKLER

EK-1. Hava kompresörüne ait harmonik analizi ölçüm değerleri

Çizelge 1.1. Hava kompresörü R fazına ait harmonik gerilim ve akım değerleri

	R Fazı							
	Gerilim				Akım			
H	Genlik (V)	Faz Açısı (°)	% Vn	% IEC	Genlik (A)	Faz Açısı (°)	% In	IEC Imaks
DC	1,157	0			0,087	0		
1	231,090	119,37	100,00		2,96	39,68	100,00	
2	0,911	95,11	0,39	2,0	0,12	31,15	4,17	1,62
3	0,269	53,09	0,12	5,0	0,07	336,04	2,26	3,45
4	0,284	66,47	0,12	1,0	0,05	1,67	1,66	0,65
5	8,278	231,73	3,58	6,0	0,20	176,35	6,66	1,71
6	0,270	229,43	0,12	0,5	0,01	9,82	0,42	0,45
7	0,795	253,03	0,34	5,0	0,03	25,88	0,87	1,16
8	0,132	221,36	0,06	0,5	0,02	342,58	0,68	0,35
9	0,040	239,68	0,02	1,5	0,02	21,12	0,61	0,60
10	0,047	96,73	0,02	0,5	0,01	13,38	0,33	0,28
11	0,563	301,33	0,24	3,5	0,01	314,67	0,35	0,50
12	0,161	11,76	0,07	0,5	0,01	34,81	0,33	0,35
13	0,454	349,01	0,20	3,0	0,02	330,53	0,70	0,32
14	0,251	337,36	0,11	0,5	0,01	349,24	0,34	0,20
15	0,127	152,64	0,05	0,5	0,01	0,13	0,42	0,23
16	0,022	18,46	0,01	0,5	0,01	357,69	0,30	0,17
17	0,487	104,36	0,21	2,0	0,02	357,30	0,59	0,20
18	0,029	139,18	0,01	0,5	0,00	302,65	0,16	0,16
19	0,281	107,85	0,12	1,5	0,02	49,32	0,69	0,18
20	0,053	213,45	0,02	0,5	0,01	29,44	0,51	0,14
21	0,181	266,91	0,08	0,5	0,01	34,27	0,49	0,16
22	0,047	227,44	0,02	0,5	0,02	23,54	0,72	0,13
23	0,135	126,52	0,06	1,5	0,02	253,13	0,54	0,15
24	0,056	145,54	0,02	0,5	0,01	306,99	0,45	0,12
25	0,346	94,49	0,15	1,5	0,01	104,90	0,32	0,14

EK-1. (Devam) Hava kompresörüne ait harmonik analizi ölçüm değerleri

Çizelge 1.2. Hava kompresörü S fazına ait harmonik gerilim ve akım değerleri

	S Fazı							
	Gerilim				Akım			
H	Genlik (V)	Faz Açısı (°)	% Vn	% IEC	Genlik (A)	Faz Açısı (°)	% In	IEC Imaks
DC	0,369	0			0,269	0		
1	231,62	359,69	100,00		2,91	281,10	100,00	
2	0,52	66,37	0,23	2,0	0,06	291,64	2,10	1,62
3	0,43	94,82	0,18	5,0	0,03	65,40	0,87	3,45
4	0,16	103,77	0,07	1,0	0,02	93,69	0,56	0,65
5	8,09	353,57	3,49	6,0	0,24	304,64	8,09	1,71
6	0,19	17,67	0,08	0,5	0,01	308,97	0,44	0,45
7	0,90	137,64	0,39	5,0	0,02	322,21	0,69	1,16
8	0,07	330,23	0,03	0,5	0,00	262,38	0,16	0,35
9	0,07	101,33	0,03	1,5	0,01	311,53	0,25	0,60
10	0,09	283,85	0,04	0,5	0,00	316,97	0,04	0,28
11	0,55	81,70	0,24	3,5	0,02	358,89	0,64	0,50
12	0,08	184,15	0,03	0,5	0,00	275,32	0,15	0,35
13	0,38	232,57	0,16	3,0	0,01	124,27	0,31	0,32
14	0,22	147,44	0,09	0,5	0,00	156,80	0,17	0,20
15	0,05	104,28	0,02	0,5	0,00	20,77	0,12	0,23
16	0,13	111,85	0,06	0,5	0,01	117,54	0,17	0,17
17	0,20	230,19	0,08	2,0	0,01	152,32	0,44	0,20
18	0,11	119,16	0,05	0,5	0,01	94,66	0,35	0,16
19	0,31	354,57	0,13	1,5	0,02	285,36	0,75	0,18
20	0,02	12,13	0,01	0,5	0,01	256,35	0,17	0,14
21	0,12	220,67	0,05	0,5	0,01	185,77	0,20	0,16
22	0,03	359,90	0,01	0,5	0,01	172,11	0,41	0,13
23	0,15	272,10	0,06	1,5	0,02	339,60	0,53	0,15
24	0,03	71,78	0,01	0,5	0,00	160,14	0,07	0,12
25	0,32	344,11	0,14	1,5	0,01	347,20	0,45	0,14

EK-1. (Devam) Hava kompresörüne ait harmonik analizi ölçüm değerleri

Çizelge 1.3. Hava kompresörü T fazına ait harmonik gerilim ve akım değerleri

	T Fazı							
	Gerilim				Akım			
H	Genlik (V)	Faz Açısı (°)	% Vn	% IEC	Genlik (A)	Faz Açısı (°)	% In	IEC Imaks
DC	2,375	0			0,102	0		
1	231,90	239,71	100,00		3,01	161,29	100,00	
2	1,25	92,40	0,54	2,0	0,14	163,10	4,79	1,62
3	0,45	292,29	0,20	5,0	0,08	182,98	2,52	3,45
4	0,35	100,59	0,15	1,0	0,05	184,81	1,68	0,65
5	8,08	111,94	3,49	6,0	0,19	71,89	6,23	1,71
6	0,13	234,60	0,06	0,5	0,02	171,45	0,64	0,45
7	0,88	17,89	0,38	5,0	0,04	177,90	1,30	1,16
8	0,28	269,17	0,12	0,5	0,02	188,41	0,51	0,35
9	0,06	26,93	0,03	1,5	0,02	170,30	0,76	0,60
10	0,10	337,72	0,04	0,5	0,02	179,43	0,65	0,28
11	0,36	200,07	0,15	3,5	0,02	145,13	0,71	0,50
12	0,19	38,72	0,08	0,5	0,01	172,06	0,44	0,35
13	0,43	114,06	0,18	3,0	0,01	144,73	0,41	0,32
14	0,27	357,65	0,12	0,5	0,01	160,63	0,44	0,20
15	0,14	316,90	0,06	0,5	0,01	180,16	0,33	0,23
16	0,04	290,91	0,02	0,5	0,00	175,24	0,07	0,17
17	0,35	312,39	0,15	2,0	0,00	265,44	0,15	0,20
18	0,05	274,34	0,02	0,5	0,01	301,31	0,31	0,16
19	0,45	216,78	0,20	1,5	0,03	172,86	1,14	0,18
20	0,05	10,33	0,02	0,5	0,01	192,17	0,31	0,14
21	0,26	101,65	0,11	0,5	0,02	206,14	0,50	0,16
22	0,05	32,71	0,02	0,5	0,02	236,09	0,60	0,13
23	0,09	43,50	0,04	1,5	0,03	125,21	0,87	0,15
24	0,06	332,03	0,03	0,5	0,02	147,63	0,54	0,12
25	0,32	235,65	0,14	1,5	0,02	209,64	0,66	0,14

EK-2. Aydınlatma tesisine ait harmonik analizi ölçüm değerleri

Çizelge 2.1. Aydınlatma tesisi R fazına ait harmonik gerilim ve akım değerleri

	R Fazı							
	Gerilim				Akım			
H	Genlik (V)	Faz Açısı (°)	% Vn	% IEC	Genlik (A)	Faz Açısı (°)	% In	IEC Imaks
DC	0,333	0			0,061	0		
1	245,17	266,18	100,00	100,0	4,75	254,82	100,00	
2	0,47	50,34	0,19	2,0	0,04	69,91	0,92	0,095
3	0,64	312,37	0,26	5,0	0,65	240,21	13,76	1,360
4	0,03	168,07	0,01	1,0	0,05	49,96	1,02	
5	11,29	243,95	4,60	6,0	0,98	22,29	20,63	0,475
6	0,26	177,31	0,11	0,5	0,04	27,79	0,74	
7	0,40	252,23	0,16	5,0	0,10	140,49	2,16	0,333
8	0,28	126,07	0,12	0,5	0,03	9,25	0,65	
9	0,18	310,31	0,07	1,5	0,29	127,94	6,01	0,238
10	0,25	79,13	0,10	0,5	0,03	358,03	0,64	
11	0,23	196,13	0,09	3,5	0,19	106,20	3,95	0,143
12	0,13	249,21	0,05	0,5	0,02	338,26	0,47	
13	0,40	182,49	0,16	3,0	0,10	65,71	2,09	0,143
14	0,19	133,86	0,08	0,5	0,03	322,26	0,73	
15	0,16	42,05	0,06	0,5	0,07	104,45	1,45	0,143
16	0,14	24,90	0,06	0,5	0,01	339,72	0,27	
17	0,27	355,11	0,11	2,0	0,11	63,32	2,38	0,143
18	0,17	198,82	0,07	0,5	0,03	282,53	0,72	
19	0,27	289,56	0,11	1,5	0,10	50,06	2,20	0,143
20	0,48	115,56	0,20	0,5	0,03	294,14	0,60	
21	0,18	192,63	0,07	0,5	0,09	2,51	1,98	0,143
22	0,23	12,69	0,09	0,5	0,02	272,67	0,45	
23	0,10	183,73	0,04	1,5	0,05	97,99	1,13	0,143
24	0,10	259,20	0,04	0,5	0,03	291,61	0,60	
25	0,13	158,56	0,05	1,5	0,09	43,93	1,84	0,143

EK-2. (Devam) Aydınlatma tesisine ait harmonik analizi ölçüm değerleri

Çizelge 2.2. Aydınlatma tesisi S fazına ait harmonik gerilim ve akım değerleri

	S Fazı							
	Gerilim				Akım			
H	Genlik (V)	Faz Açısı (°)	% Vn	% IEC	Genlik (A)	Faz Açısı (°)	% In	IEC Imaks
DC	0,130	0			0,022	0		
1	243,94	146,06	100,00	100,0	4,18	140,10	100,00	
2	0,15	18,58	0,06	2,0	0,01	69,49	0,20	0,084
3	0,44	103,54	0,18	5,0	0,57	308,96	13,57	1,160
4	0,20	63,30	0,08	1,0	0,01	102,08	0,15	
5	11,75	3,48	4,82	6,0	1,78	119,76	42,64	0,418
6	0,04	45,90	0,02	0,5	0,01	357,30	0,21	
7	0,43	137,88	0,18	5,0	0,18	166,82	4,38	0,293
8	0,02	74,29	0,01	0,5	0,01	317,03	0,26	
9	0,19	75,60	0,08	1,5	0,08	90,94	2,02	0,209
10	0,08	342,67	0,03	0,5	0,01	291,48	0,15	
11	0,26	285,42	0,11	3,5	0,18	21,62	4,38	0,125
12	0,19	296,97	0,08	0,5	0,01	313,76	0,30	
13	0,15	43,79	0,06	3,0	0,08	139,59	1,84	0,125
14	0,00	218,07	0,00	0,5	0,02	247,50	0,55	
15	0,04	214,21	0,02	0,5	0,05	212,78	1,25	0,125
16	0,13	57,62	0,05	0,5	0,03	186,91	0,75	
17	0,13	169,71	0,06	2,0	0,09	290,23	2,26	0,125
18	0,15	37,84	0,06	0,5	0,01	91,86	0,22	
19	0,17	219,32	0,07	1,5	0,10	205,51	2,30	0,125
20	0,18	312,41	0,08	0,5	0,00	27,90	0,09	
21	0,17	182,53	0,07	0,5	0,01	54,32	0,33	0,125
22	0,08	232,59	0,03	0,5	0,01	205,86	0,34	
23	0,18	78,13	0,07	1,5	0,05	200,02	1,28	0,125
24	0,04	145,18	0,02	0,5	0,01	163,59	0,29	
25	0,05	78,62	0,02	1,5	0,07	202,60	1,60	0,125

EK-2. (Devam) Aydınlatma tesisine ait harmonik analizi ölçüm değerleri

Çizelge 2.3. Aydınlatma tesisi T fazına ait harmonik gerilim ve akım değerleri

	T Fazı							
	Gerilim				Akım			
H	Genlik (V)	Faz Açısı (°)	% Vn	% IEC	Genlik (A)	Faz Açısı (°)	% In	IEC Imaks
DC	1,209	0			0,033	0		
1	243,49	26,61	100,00	100,0	6,07	36,36	100,00	
2	0,73	30,11	0,30	2,0	0,01	337,91	0,12	0,121
3	0,70	187,91	0,29	5,0	0,72	310,71	11,79	1,680
4	0,21	322,33	0,08	1,0	0,02	304,94	0,36	
5	11,92	128,70	4,89	6,0	2,50	238,71	41,24	0,607
6	0,20	9,00	0,08	0,5	0,01	32,40	0,20	
7	0,30	92,71	0,12	5,0	0,25	72,02	4,17	0,425
8	0,26	1,79	0,11	0,5	0,00	158,63	0,01	
9	0,13	114,09	0,06	1,5	0,13	71,97	2,21	0,304
10	0,17	341,46	0,07	0,5	0,02	227,94	0,38	
11	0,39	37,22	0,16	3,5	0,20	100,58	3,24	0,182
12	0,17	334,64	0,07	0,5	0,04	228,27	0,65	
13	0,23	294,71	0,09	3,0	0,16	334,65	2,58	0,182
14	0,11	348,75	0,05	0,5	0,03	225,44	0,42	
15	0,32	157,93	0,13	0,5	0,16	222,75	2,59	0,182
16	0,09	327,47	0,04	0,5	0,02	301,91	0,30	
17	0,24	169,24	0,10	2,0	0,08	1,68	1,34	0,182
18	0,10	140,11	0,04	0,5	0,01	206,06	0,09	
19	0,33	115,47	0,14	1,5	0,11	202,87	1,89	0,182
20	0,08	90,39	0,03	0,5	0,02	118,79	0,32	
21	0,24	44,93	0,10	0,5	0,11	110,75	1,86	0,182
22	0,15	210,24	0,06	0,5	0,02	102,41	0,30	
23	0,06	32,70	0,03	1,5	0,10	341,34	1,71	0,182
24	0,07	158,77	0,03	0,5	0,02	105,54	0,32	
25	0,21	90,52	0,09	1,5	0,12	178,54	1,93	0,182

EK-3. Bilgisayar laboratuarına ait harmonik analizi ölçüm değerleri

Çizelge 3.1. Bilgisayar laboratuarı R fazına ait harmonik gerilim ve akım değerleri

	R Fazı							
	Gerilim				Akım			
H	Genlik (V)	Faz Açısı (°)	% Vn	% IEC	Genlik (A)	Faz Açısı (°)	% In	IEC Imaks
DC	1,114	0			0,024	0		
1	247,48	165,26	100,00	100,0	2,44	203,62	100,00	
2	0,75	55,33	0,30	2,0	0,02	113,62	0,62	
3	0,51	45,53	0,20	5,0	1,90	56,13	77,93	1,65
4	0,17	45,63	0,07	1,0	0,02	67,24	0,90	
5	10,83	100,25	4,38	6,0	1,09	276,68	44,62	0,92
6	0,19	201,56	0,08	0,5	0,02	278,96	0,95	
7	0,83	288,44	0,34	5,0	0,41	164,82	16,87	0,48
8	0,24	199,97	0,10	0,5	0,02	181,27	0,71	
9	0,16	153,22	0,07	1,5	0,36	102,10	14,62	0,24
10	0,12	224,55	0,05	0,5	0,01	75,67	0,53	
11	0,23	203,47	0,09	3,5	0,42	341,05	17,32	0,17
12	0,17	270,23	0,07	0,5	0,01	341,28	0,58	
13	0,25	345,93	0,10	3,0	0,27	205,55	10,86	0,14
14	0,25	280,26	0,10	0,5	0,01	231,32	0,50	
15	0,30	207,16	0,12	0,5	0,05	104,33	2,22	0,12
16	0,25	249,34	0,10	0,5	0,01	137,81	0,54	
17	0,01	193,52	0,01	2,0	0,12	69,26	5,09	0,11
18	0,21	210,79	0,09	0,5	0,01	24,94	0,32	
19	0,16	144,62	0,06	1,5	0,12	292,66	4,96	0,10
20	0,16	132,02	0,07	0,5	0,01	291,99	0,39	
21	0,09	26,66	0,04	0,5	0,03	130,40	1,35	0,09
22	0,10	103,99	0,04	0,5	0,00	258,60	0,14	
23	0,05	328,04	0,02	1,5	0,06	186,51	2,50	0,08
24	0,08	336,65	0,03	0,5	0,00	59,91	0,11	
25	0,12	257,88	0,05	1,5	0,08	37,72	3,07	0,07

EK-3. (Devam) Bilgisayar laboratuarına ait harmonik analizi ölçüm değerleri

Çizelge 3.2. Bilgisayar laboratuarı S fazına ait harmonik gerilim ve akım değerleri

	S Fazı							
	Gerilim				Akım			
H	Genlik (V)	Faz Açısı (°)	% Vn	% IEC	Genlik (A)	Faz Açısı (°)	% In	IEC Imaks
DC	0,473	0			0,038	0		
1	246,31	285,63	100,00	100,0	1,84	325,88	100,00	
2	0,27	38,10	0,1	2,0	0,01	69,54	0,54	
3	0,28	231,59	0,11	5,0	1,45	64,26	79,20	1,20
4	0,07	114,81	0,03	1,0	0,01	19,06	0,43	
5	11,32	344,46	4,60	6,0	0,89	171,22	48,31	0,67
6	0,13	166,09	0,05	0,5	0,01	137,02	0,42	
7	0,59	47,98	0,24	5,0	0,43	299,57	23,33	0,35
8	0,06	147,61	0,02	0,5	0,01	202,77	0,35	
9	0,14	209,60	0,06	1,5	0,30	100,37	16,59	0,18
10	0,09	236,88	0,04	0,5	0,01	10,27	0,39	
11	0,30	63,21	0,12	3,5	0,31	231,10	16,94	0,12
12	0,07	19,42	0,03	0,5	0,01	119,96	0,40	
13	0,10	135,02	0,04	3,0	0,20	347,92	11,15	0,10
14	0,15	315,93	0,06	0,5	0,01	259,77	0,41	
15	0,18	310,17	0,07	0,5	0,0	130,09	4,08	0,09
16	0,08	26,30	0,03	0,5	0,00	35,24	0,23	
17	0,25	276,60	0,10	2,0	009	317,24	5,03	0,08
18	0,11	80,40	0,04	0,5	0,01	166,33	0,62	
19	0,11	292,66	0,05	1,5	0,09	78,18	4,72	0,07
20	0,06	191,55	0,02	0,5	0,00	14,04	0,14	
21	0,17	154,77	0,07	0,5	0,03	214,65	1,79	0,06
22	0,10	150,61	0,04	0,5	0,01	150,26	0,30	
23	0,10	26,02	0,04	1,5	0,05	66,45	2,54	0,06
24	0,08	76,43	0,03	0,5	0,00	159,68	0,04	
25	0,18	29,22	0,07	1,5	0,06	178,53	3,24	0,05

EK-3. (Devam) Bilgisayar laboratuarına ait harmonik analizi ölçüm değerleri

Çizelge 3.3. Bilgisayar laboratuarı T fazına ait harmonik gerilim ve akım değerleri

	T Fazı							
	Gerilim				Akım			
H	Genlik (V)	Faz Açısı (°)	% Vn	% IEC	Genlik (A)	Faz Açısı (°)	% In	IEC Imaks
DC	1,928	0			0,068	0		
1	246,14	45,39	100,00	100,0	1,59	86,03	100,00	
2	1,15	58,76	0,7	2,0	0,04	41,09	2,49	
3	0,65	184,54	0,26	5,0	1,24	53,46	78,23	1,03
4	0,24	31,23	0,10	1,0	0,02	334,88	1,08	
5	11,46	222,04	4,65	6,0	0,74	30,94	46,30	0,58
6	0,12	144,17	0,05	0,5	0,02	268,69	1,14	
7	0,62	172,74	0,25	5,0	0,33	35,20	20,56	0,30
8	0,11	118,39	0,04	0,5	0,01	208,63	0,37	
9	0,20	10,61	0,08	1,5	0,25	80,19	15,52	0,15
10	0,11	181,83	0,04	0,5	0,00	341,08	0,13	
11	0,24	350,11	0,10	3,5	0,29	83,17	18,06	0,11
12	0,03	207,72	0,01	0,5	0,01	300,86	0,49	
13	0,17	229,07	0,07	3,0	0,20	72,21	12,82	0,09
14	0,12	319,19	0,05	0,5	0,00	286,52	0,26	
15	0,09	136,37	0,04	0,5	0,08	84,58	5,22	0,08
16	0,28	284,33	0,11	0,5	0,01	262,45	0,32	
17	0,11	139,67	0,04	2,0	0,09	147,00	5,59	0,07
18	0,45	253,56	0,18	0,5	0,00	34,80	0,25	
19	0,14	218,71	0,06	1,5	0,10	138,38	6,48	0,06
20	0,26	250,67	0,11	0,5	0,01	343,38	0,47	
21	0,28	231,16	0,11	0,5	0,06	121,68	3,65	0,06
22	0,07	42,52	0,03	0,5	0,00	163,95	0,26	
23	0,02	227,34	0,01	1,5	0,02	213,05	1,30	0,05
24	0,17	47,39	0,07	0,5	0,01	210,22	0,41	
25	0,10	70,34	0,04	1,5	0,05	220,71	2,99	0,05

EK-4. Alternatörle beslenen yüke ait harmonik analizi ölçüm değerleri

Çizelge 4.1. R fazına ait harmonik gerilim ve akım değerleri

	R Fazı							
	Gerilim				Akım			
H	Genlik (V)	Faz Açısı (°)	% Vn	% IEC	Genlik (A)	Faz Açısı (°)	% In	IEC Imaks
DC	1,508	0			0,027	0		
1	214,61	282,75	100,00	100,0	0,12	261,34	100,00	
2	1,12	135,13	0,52	2,0	0,01	137,70	10,74	1,08
3	3,60	231,05	1,68	5,0	0,00	341,74	2,51	2,30
4	0,23	125,97	0,11	1,0	0,01	218,11	4,63	0,43
5	0,96	98,00	0,45	6,0	0,00	64,92	1,23	1,14
6	0,09	114,54	0,04	0,5	0,00	57,84	2,74	0,30
7	0,13	65,13	0,06	5,0	0,00	84,34	2,65	0,77
8	0,08	114,78	0,04	0,5	0,01	118,65	4,98	0,23
9	0,10	171,85	0,05	1,5	0,00	165,28	2,91	0,40
10	0,09	262,20	0,04	0,5	0,00	171,67	0,98	0,18
11	0,01	72,65	0,01	3,5	0,00	228,29	1,47	0,33
12	0,11	295,86	0,05	0,5	0,00	354,71	1,30	0,15
13	0,12	260,87	0,07	3,0	0,00	131,88	1,86	0,21
14	0,09	280,33	0,04	0,5	0,00	27,03	2,62	0,13
15	0,15	252,04	0,07	0,5	0,00	223,11	1,55	0,15
16	0,10	307,70	0,05	0,5	0,00	186,58	1,86	0,12
17	1,15	341,32	0,54	2,0	0,00	349,44	2,87	0,13
18	0,55	248,56	0,25	0,5	0,00	343,59	3,20	0,10
19	6,42	261,55	2,99	1,5	0,00	333,64	3,00	0,12
20	0,74	86,75	0,35	0,5	0,00	38,09	1,12	0,09
21	0,60	149,46	0,28	0,5	0,00	50,42	2,32	0,11
22	0,58	57,01	0,27	0,5	0,00	271,91	3,57	0,08
23	2,69	44,02	1,25	1,5	0,00	230,83	2,49	0,10
24	0,28	227,80	0,13	0,5	0,00	294,16	3,55	0,08
25	0,59	215,05	0,27	1,5	0,00	281,81	2,69	0,09

EK-4. (Devam) Alternatörle beslenen yüke ait harmonik analizi ölçüm değerleri

Çizelge 4.2. S fazına ait harmonik gerilim ve akım değerleri

	S Fazı							
	Gerilim				Akım			
H	Genlik (V)	Faz Açısı (°)	% Vn	% IEC	Genlik (A)	Faz Açısı (°)	% In	IEC Imaks
DC	1,761	0			0,022	0		
1	214,36	42,80	100,00	100,0	0,12	19,27	100,00	
2	1,19	213,20	0,56	2,0	0,01	137,54	9,16	1,08
3	2,46	353,93	1,15	5,0	0,00	277,33	2,44	2,30
4	0,52	195,32	0,24	1,0	0,00	201,31	2,58	0,43
5	0,98	234,88	0,46	6,0	0,00	234,06	2,13	1,14
6	0,20	192,95	0,09	0,5	0,00	32,58	3,8	0,30
7	0,28	201,27	0,13	5,0	0,00	318,85	3,27	0,77
8	0,23	198,86	0,11	0,5	0,00	97,42	4,09	0,23
9	0,21	214,70	0,10	1,5	0,00	47,31	3,35	0,40
10	0,14	216,47	0,07	0,5	0,00	162,69	1,93	0,18
11	0,13	208,50	0,06	3,5	0,00	42,27	1,42	0,33
12	0,04	226,54	0,02	0,5	0,00	186,74	2,65	0,15
13	0,05	221,68	0,02	3,0	0,00	250,11	2,39	0,21
14	0,06	226,20	0,03	0,5	0,00	255,09	3,44	0,13
15	0,08	292,06	0,04	0,5	0,00	32,23	1,31	0,15
16	0,14	273,42	0,07	0,5	0,00	253,26	3,58	0,12
17	1,10	249,24	0,51	2,0	0,00	158,93	2,80	0,13
18	0,52	26,09	0,24	0,5	0,00	5,40	1,78	0,10
19	6,35	28,30	2,96	1,5	0,00	221,76	0,90	0,12
20	0,73	213,32	0,34	0,5	0,00	187,33	1,69	0,09
21	0,19	216,79	0,09	0,5	0,00	342,26	1,26	0,11
22	0,53	252,02	0,25	0,5	0,00	23,45	2,18	0,08
23	3,33	285,46	1,56	1,5	0,00	152,65	3,12	0,10
24	0,60	147,75	0,28	0,5	0,00	93,54	2,32	0,08
25	0,17	194,24	0,08	1,5	0,00	181,46	2,82	0,09

EK-4. (Devam) Alternatörle beslenen yüke ait harmonik analizi ölçüm değerleri

Çizelge 4.3. T fazına ait harmonik gerilim ve akım değerleri

	T Fazı							
	Gerilim				Akım			
H	Genlik (V)	Faz Açısı (°)	% Vn	% IEC	Genlik (A)	Faz Açısı (°)	% In	IEC Imaks
DC	1,538	0			0,038	0		
1	215,05	162,83	100,00	100,0	0,11	140,80	100,00	
2	1,04	23,10	0,48	2,0	0,02	142,30	14,25	1,08
3	3,19	97,48	1,48	5,0	0,00	12,41	1,29	2,30
4	0,45	358,17	0,21	1,0	0,00	234,82	3,75	0,43
5	0,60	351,81	0,28	6,0	0,00	48,27	2,50	1,14
6	0,35	14,79	0,16	0,5	0,00	73,25	2,70	0,30
7	0,22	353,63	0,10	5,0	0,00	322,67	2,53	0,77
8	0,25	27,24	0,12	0,5	0,01	68,41	7,64	0,23
9	0,31	15,04	0,14	1,5	0,00	80,67	1,85	0,40
10	0,18	25,39	0,08	0,5	0,00	49,51	1,36	0,18
11	0,11	28,51	0,05	3,5	0,00	164,74	1,15	0,33
12	0,16	51,41	0,08	0,5	0,00	164,43	1,58	0,15
13	0,14	78,95	0,06	3,0	0,00	263,42	0,66	0,21
14	0,14	71,58	0,06	0,5	0,00	313,33	1,83	0,13
15	0,19	82,34	0,09	0,5	0,00	255,70	1,32	0,15
16	0,26	92,59	0,12	0,5	0,01	25,78	5,72	0,12
17	1,48	119,53	0,69	2,0	0,00	182,15	3,33	0,13
18	0,41	131,39	0,19	0,5	0,00	253,97	2,45	0,10
19	6,05	147,95	2,81	1,5	0,00	292,32	4,09	0,12
20	0,62	337,10	0,29	0,5	0,00	220,50	1,59	0,09
21	0,66	347,30	0,31	0,5	0,00	304,65	2,07	0,11
22	0,18	183,31	0,08	0,5	0,01	302,54	6,59	0,08
23	2,97	159,22	1,38	1,5	0,00	187,57	3,99	0,10
24	0,68	353,69	0,31	0,5	0,00	304,15	4,35	0,08
25	0,71	36,27	0,33	1,5	0,00	202,25	1,20	0,09

EK-5. Harmonik eklenmiş şebeke ile beslenen omik yüke ait harmonik analizi ölçüm değerleri

Çizelge 5.1. R fazına ait harmonik gerilim ve akım değerleri

	R Fazı							
	Gerilim				Akım			
H	Genlik (V)	Faz Açısı (°)	% Vn	% IEC	Genlik (A)	Faz Açısı (°)	% In	IEC Imaks
DC	0,299	0			0,009	0		
1	220,94	264,93	100,00	100,0	0,27	295,90	100,00	
2	0,06	264,93	0,03	2,0	0,01	30,51	4,53	1,08
3	0,55	88,14	0,25	5,0	0,00	62,61	1,29	2,30
4	0,18	275,69	0,08	1,0	0,01	340,20	2,49	0,43
5	9,45	241,74	4,28	6,0	0,02	226,66	6,10	1,14
6	0,23	136,19	0,10	0,5	0,01	266,22	2,06	0,30
7	0,06	253,32	0,03	5,0	0,00	215,94	1,03	0,77
8	0,23	45,10	0,10	0,5	0,00	33,15	1,22	0,23
9	0,36	141,56	0,16	1,5	0,00	131,01	1,27	0,40
10	0,16	63,74	0,07	0,5	0,00	358,26	0,69	0,18
11	0,33	154,38	0,15	3,5	0,00	312,51	0,17	0,33
12	2,23	76,45	1,01	0,5	0,00	301,76	0,77	0,15
13	0,72	210,48	0,33	3,0	0,00	306,87	0,05	0,21
14	0,30	182,45	0,14	0,5	0,00	253,07	0,75	0,13
15	0,90	158,13	0,41	0,5	0,00	188,13	0,81	0,15
16	1,14	335,67	0,52	0,5	0,01	153,12	2,51	0,12
17	0,20	1,34	0,09	2,0	0,00	218,66	0,33	0,13
18	0,56	152,40	0,26	0,5	0,00	243,08	1,49	0,10
19	1,82	140,12	0,82	1,5	0,00	119,97	1,34	0,12
20	1,91	325,65	0,87	0,5	0,00	6,25	0,76	0,09
21	0,85	315,14	0,38	0,5	0,00	247,09	1,10	0,11
22	0,44	339,53	0,20	0,5	0,00	99,62	1,25	0,08
23	0,46	287,40	0,21	1,5	0,01	225,00	2,15	0,10
24	0,54	320,48	0,25	0,5	0,00	308,46	1,42	0,08
25	0,22	296,97	0,10	1,5	0,00	38,78	0,75	0,09

EK-5. (Devam) Harmonik eklenmiş şebeke ile beslenen omik yüke ait harmonik analizi ölçüm değerleri

Çizelge 5.2. S fazına ait harmonik gerilim ve akım değerleri

	S Fazı							
	Gerilim				Akım			
H	Genlik (V)	Faz Açısı (°)	% Vn	% IEC	Genlik (A)	Faz Açısı (°)	% In	IEC Imaks
DC	0,043	0			0,007	0		
1	221,23	25,97	100,00	100,0	0,26	54,37	100,00	
2	0,27	266,92	0,12	2,0	0,01	25,35	4,83	1,08
3	0,83	330,98	0,38	5,0	0,01	101,19	1,93	2,30
4	0,20	284,85	0,09	1,0	0,00	282,75	0,90	0,43
5	9,75	123,11	4,41	6,0	0,01	119,94	5,00	1,14
6	0,28	234,28	0,12	0,5	0,01	220,28	2,59	0,30
7	0,76	21,69	0,34	5,0	0,00	36,33	1,32	0,77
8	0,16	90,47	0,07	0,5	0,00	73,67	1,07	0,23
9	0,07	283,53	0,03	1,5	0,00	62,18	0,42	0,40
10	0,15	176,55	0,07	0,5	0,00	165,96	0,60	0,18
11	0,30	121,98	0,13	3,5	0,00	306,87	0,16	0,33
12	2,18	258,74	0,98	0,5	0,01	256,03	2,11	0,15
13	0,40	57,29	0,18	3,0	0,01	322,88	2,37	0,21
14	0,29	220,98	0,13	0,5	0,00	58,84	1,05	0,13
15	0,70	221,04	0,31	0,5	0,00	164,95	1,01	0,15
16	1,90	45,25	0,86	0,5	0,00	143,56	0,85	0,12
17	0,59	63,31	0,27	2,0	0,00	138,95	0,43	0,13
18	0,89	74,02	0,40	0,5	0,00	329,50	1,77	0,10
19	1,50	59,31	0,68	1,5	0,00	345,89	1,89	0,12
20	0,98	264,82	0,44	0,5	0,00	348,29	0,88	0,09
21	0,14	222,15	0,06	0,5	0,00	131,81	1,73	0,11
22	0,07	290,68	0,03	0,5	0,00	206,35	1,22	0,08
23	0,22	62,17	0,10	1,5	0,00	127,18	1,14	0,10
24	0,09	179,80	0,04	0,5	0,00	109,98	0,24	0,08
25	0,12	331,37	0,05	1,5	0,00	339,10	1,23	0,09

EK-5. (Devam) Harmonik eklenmiş şebeke ile beslenen omik yüke ait harmonik analizi ölçüm değerleri

Çizelge 5.3. T fazına ait harmonik gerilim ve akım değerleri

	T Fazı							
	Gerilim				Akım			
H	Genlik (V)	Faz Açısı (°)	% Vn	% IEC	Genlik (A)	Faz Açısı (°)	% In	IEC Imaks
DC	0,488	0			0,022	0		
1	218,30	145,64	100,00	100,0	0,26	175,21	100,00	
2	0,60	61,98	0,27	2,0	0,02	23,88	5,91	1,08
3	0,81	170,55	0,37	5,0	0,00	42,51	0,68	2,30
4	0,32	87,80	0,15	1,0	0,01	322,20	3,37	0,43
5	9,65	1,79	4,42	6,0	0,01	306,34	3,65	1,14
6	0,42	24,92	0,19	0,5	0,01	305,35	1,91	0,30
7	0,76	193,67	0,35	5,0	0,00	337,33	1,79	0,77
8	0,35	259,90	0,16	0,5	0,00	7,30	1,73	0,23
9	0,31	336,65	0,14	1,5	0,00	69,08	1,15	0,40
10	0,15	290,70	0,07	0,5	0,00	90,00	0,48	0,18
11	0,59	322,52	0,27	3,5	0,00	209,36	0,38	0,33
12	0,04	104,96	0,02	0,5	0,00	18,43	0,40	0,15
13	0,41	14,50	0,19	3,0	0,00	324,46	0,90	0,21
14	0,58	26,86	0,27	0,5	0,00	12,60	1,83	0,13
15	1,45	7,83	0,66	0,5	0,00	316,92	1,11	0,15
16	2,55	200,85	1,17	0,5	0,01	232,41	3,17	0,12
17	0,71	232,20	0,32	2,0	0,00	327,06	1,56	0,13
18	1,10	288,68	0,50	0,5	0,00	279,71	1,18	0,10
19	2,46	288,49	1,13	1,5	0,01	319,86	2,10	0,12
20	2,51	131,06	1,15	0,5	0,00	45,59	0,72	0,09
21	0,89	134,08	0,41	0,5	0,00	69,70	0,81	0,11
22	0,48	157,45	0,22	0,5	0,00	121,29	1,60	0,08
23	0,29	140,88	0,13	1,5	0,01	298,55	2,30	0,10
24	0,47	140,18	0,22	0,5	0,00	349,20	1,41	0,08
25	0,30	134,81	0,14	1,5	0,00	342,63	1,79	0,09

EK-6. Harmonik eklenmiş şebeke ile beslenen motora ait harmonik analizi ölçüm değerleri

Çizelge 6.1. R fazına ait harmonik gerilim ve akım değerleri

	R Fazı							
	Gerilim				Akım			
H	Genlik (V)	Faz Açısı (°)	% Vn	% IEC	Genlik (A)	Faz Açısı (°)	% In	IEC Imaks
DC	0,134	0			0,012	0		
1	218,73	116,36	100,00	100,0	0,18	64,43	100,00	
2	0,29	338,06	0,13	2,0	0,00	132,33	2,14	1,08
3	0,25	30,27	0,11	5,0	0,00	339,23	0,48	2,30
4	0,28	230,30	0,13	1,0	0,01	101,46	5,99	0,43
5	9,93	215,10	4,54	6,0	0,02	111,14	10,07	1,14
6	0,24	222,06	0,11	0,5	0,00	322,51	2,63	0,30
7	0,52	289,83	0,24	5,0	0,00	82,25	2,67	0,77
8	0,32	242,85	0,15	0,5	0,00	263,66	1,56	0,23
9	0,18	284,15	0,08	1,5	0,00	197,10	1,28	0,40
10	0,22	283,37	0,10	0,5	0,00	144,32	0,75	0,18
11	0,30	259,20	0,14	3,5	0,00	207,39	1,46	0,33
12	2,13	212,17	0,98	0,5	0,00	114,29	1,42	0,15
13	0,24	238,05	0,11	3,0	0,00	199,32	1,28	0,21
14	0,61	293,36	0,28	0,5	0,00	86,13	2,09	0,13
15	0,80	240,11	0,37	0,5	0,00	170,96	0,70	0,15
16	1,59	45,23	0,73	0,5	0,00	115,02	0,52	0,12
17	0,57	347,14	0,26	2,0	0,00	356,15	1,63	0,13
18	0,65	334,42	0,30	0,5	0,00	245,39	2,25	0,10
19	1,96	312,41	0,90	1,5	0,00	233,13	1,33	0,12
20	1,54	114,15	0,70	0,5	0,00	315,00	1,80	0,09
21	0,59	154,26	0,27	0,5	0,00	358,15	0,48	0,11
22	0,36	125,19	0,17	0,5	0,00	304,55	2,32	0,08
23	0,21	63,96	0,09	1,5	0,00	227,01	1,26	0,10
24	0,17	179,06	0,08	0,5	0,00	230,39	1,17	0,08
25	0,13	276,14	0,06	1,5	0,00	110,77	1,46	0,09

EK-6. (Devam) Harmonik eklenmiş şebeke ile beslenen motora ait harmonik analizi ölçüm değerleri

Çizelge 6.2. S fazına ait harmonik gerilim ve akım değerleri

	S Fazı							
	Gerilim				Akım			
H	Genlik (V)	Faz Açısı (°)	% Vn	% IEC	Genlik (A)	Faz Açısı (°)	% In	IEC Imaks
DC	0,296	0			0,010	0		
1	222,09	236,83	100,00	100,0	0,19	185,55	100,00	
2	0,37	266,52	0,17	2,0	0,01	93,72	5,47	1,08
3	0,40	283,28	0,18	5,0	0,00	346,43	0,42	2,30
4	0,10	0,24	0,05	1,0	0,00	2,05	2,00	0,43
5	9,28	93,63	4,18	6,0	0,02	350,85	8,04	1,14
6	0,11	195,38	0,05	0,5	0,00	320,14	2,02	0,30
7	0,74	24,51	0,33	5,0	0,00	355,16	1,86	0,77
8	0,28	256,22	0,13	0,5	0,00	324,83	2,30	0,23
9	0,07	321,78	0,03	1,5	0,00	316,55	0,74	0,40
10	0,22	19,31	0,10	0,5	0,00	10,15	1,38	0,18
11	0,24	297,68	0,11	3,5	0,00	307,14	1,83	0,33
12	1,80	27,28	0,81	0,5	0,00	8,19	2,09	0,15
13	0,41	250,47	0,18	3,0	0,00	245,45	1,26	0,21
14	0,23	276,57	0,10	0,5	0,00	49,06	1,84	0,13
15	0,89	288,27	0,40	0,5	0,00	315,00	0,20	0,15
16	1,49	124,42	0,67	0,5	0,00	150,82	1,26	0,12
17	0,77	172,30	0,35	2,0	0,00	26,18	0,94	0,13
18	0,36	223,68	0,16	0,5	0,00	196,84	2,26	0,10
19	1,34	242,31	0,60	1,5	0,00	101,50	1,70	0,12
20	1,05	67,58	0,47	0,5	0,00	240,10	0,66	0,09
21	0,71	71,61	0,32	0,5	0,00	242,10	1,36	0,11
22	0,39	87,97	0,18	0,5	0,00	59,04	0,91	0,08
23	0,35	156,53	0,16	1,5	0,00	155,77	0,32	0,10
24	0,29	54,88	0,13	0,5	0,00	188,13	0,60	0,08
25	0,29	107,51	0,13	1,5	0,00	61,70	0,63	0,09

EK-6. (Devam) Harmonik eklenmiş şebeke ile beslenen motora ait harmonik analizi ölçüm değerleri

Çizelge 6.3. T fazına ait harmonik gerilim ve akım değerleri

	T Fazı							
	Gerilim				Akım			
H	Genlik (V)	Faz Açısı (°)	% Vn	% IEC	Genlik (A)	Faz Açısı (°)	% In	IEC Imaks
DC	0,869	0			0,023	0		
1	219,51	357,51	100,00	100,0	0,19	309,45	100,00	
2	0,78	115,70	0,36	2,0	0,01	71,94	7,05	1,08
3	0,41	104,86	0,19	5,0	0,00	0,84	0,99	2,30
4	0,29	74,88	0,13	1,0	0,01	138,18	5,24	0,43
5	9,32	339,04	4,24	6,0	0,01	238,68	6,49	1,14
6	0,24	25,45	0,11	0,5	0,01	173,92	2,91	0,30
7	0,86	166,76	0,39	5,0	0,01	31,44	2,70	0,77
8	0,50	71,59	0,23	0,5	0,00	95,44	0,63	0,23
9	0,27	119,89	0,12	1,5	0,00	55,12	0,58	0,40
10	0,28	142,42	0,13	0,5	0,00	101,86	1,78	0,18
11	0,50	104,56	0,23	3,5	0,00	339,78	0,60	0,33
12	0,42	65,90	0,19	0,5	0,01	121,92	3,31	0,15
13	0,62	70,36	0,28	3,0	0,00	121,88	1,41	0,21
14	0,80	113,14	0,37	0,5	0,00	51,77	1,85	0,13
15	1,61	87,89	0,74	0,5	0,01	94,40	3,25	0,15
16	2,46	265,07	1,12	0,5	0,00	186,34	0,27	0,12
17	0,17	13,36	0,08	2,0	0,00	17,65	1,35	0,13
18	0,61	128,73	0,28	0,5	0,01	191,36	3,06	0,10
19	2,72	110,29	1,24	1,5	0,00	353,02	2,18	0,12
20	2,31	280,85	1,05	0,5	0,01	191,24	5,04	0,09
21	0,97	292,04	0,44	0,5	0,00	122,37	1,24	0,11
22	0,71	294,45	0,32	0,5	0,01	249,23	3,18	0,08
23	0,39	309,85	0,18	1,5	0,00	39,61	1,10	0,10
24	0,23	279,28	0,10	0,5	0,00	320,86	0,82	0,08
25	0,15	283,74	0,07	1,5	0,00	88,67	0,63	0,09

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ŞENYURT, Özer

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 14.01.1970, Bergama

Medeni hali : Evli

Telefon : 0 (452) 233 35 76

e-mail : ozersenyurt@hotmail.com.

Eğitim

Derece	**Eğitim Birimi**	**Mezuniyet tarihi**
Lisans	Marmara Üniv./Tek.Eğt.Fak.Elektrik Öğrt.	1991
Lise	Samsun Teknik Lisesi	1987

İş Deneyimi

Yıl	**Yer**	**Görev**
1991–1994	Ordu Endüstri Meslek Lisesi	Öğretmen
1994–1996	Şanlıurfa End. Meslek Lisesi	Öğretmen
1996–1997	Taşova Çok Prog. Lisesi	Öğretmen
1997–1998	Taşova Çok Prog. Lisesi	Müdür Yrd.
1998–2002	Ordu Endüstri Meslek Lisesi	Öğretmen
2000–2002	Ordu Endüstri Meslek Lisesi	Laboratuar Şefi

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca

Hobiler

Fotoğrafçılık, Futbol, Otomobil sporları