

**T.C.  
HALIÇ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ELEKTRONİK ve HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**IGBT DOĞRULTUCULU ÜÇ FAZLI STATİK  
KESİNTİSİZ GÜÇ KAYNAKLARINDA  
HARMONİK ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Hazırlayan  
Hakan HIZARCIOĞLU**

**Danışman  
Prof. Dr. Muhammet KÖKSAL**

**İstanbul – 2012**

**T.C.**  
**HALIÇ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE**

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Programı Tezli Yüksek Lisans öğrencisi **Hakan HIZARCIOĞLU** tarafından hazırlanan “**IGBT Doğrultuculu Üç Fazlı Statik Kesintisiz Güç Kaynaklarında Harmonik Analizi**” adlı bu çalışma jürimizce Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Tarihi :26.01.2012

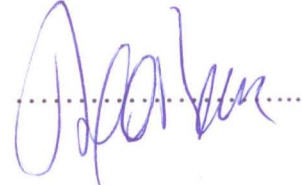
( Jüri Üyesinin Ünvanı , Adı , Soyadı ve Kurumu ) :

İmzası :

Jüri Üyesi: Prof.Dr.Muhammet KÖKSAL  
Dan.- HAL.Üniv. Elektrik-Elek. Müh.ABD Öğr.Üyesi

.....

Jüri Üyesi : Prof.Dr.Halit PASTACI  
HAL.Üniv. Elektrik-Elektronik Müh. ABD Öğr.Üyesi

.....

Jüri Üyesi : Yrd.Doç.Dr.Mehmet SAĞBAŞ  
Maltepe Üniv. Öğr.Üyesi

.....

Jüri Üyesi : Prof.Dr.Nariman ŞERİFOĞLU  
HAL.Üniv.Elektrik-Elek.Müh. ABD Öğr.Üyesi (Yedek)

.....

Jüri Üyesi : Yrd.Doç.Dr.Figen ÖZEN  
HAL.Üniv.Bilg.Müh. ABD Öğr.Üyesi (Yedek)

.....

## ÖNSÖZ

Bu çalışma Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik anabilim dalı Elektrik-Elektronik Mühendisliği programında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Kritik olarak nitelendirilen yüklerin şebeke enerjisinin kesilmesinden veya kısa süreli bozulmalarından zarar görmemesi için Kesintisiz Güç Kaynakları kullanılır. Kesintisiz Güç Kaynakları harmonik üreten cihazlardır. Enerji sistemlerinde güç kalitesi açısından en büyük problemlerden biri harmoniklerdir. Bu çalışmada, IGBT Doğrultuculu Kesintisiz Güç Kaynaklarında Harmonik Analizi yapılarak, deneysel ölçümlerde ve simulasyon devresinde yapılan ölçümlerde uygun sonuçlar elde edilmiştir.

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmamın tamamlanması sürecinde değerli yardımlarını esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Muhammet KÖKSAL'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca gösterdikleri anlayış ve moral desteklerinden dolayı sevgili eşime ve aileme teşekkür eder, değerli bilgilerini benimle paylaşan mesai arkadaşlarıma saygılarımı sunarım.

İstanbul, 2012

Hakan HIZARCIOĞLU

## İÇİNDEKİLER

Sayfa No.

<b>KISALTMALAR</b> .....	v
<b>SİMGELER</b> .....	vi
<b>ŞEKİLLER</b> .....	vii
<b>TABLolar</b> .....	x
<b>ÖZET</b> .....	xi
<b>SUMMARY</b> .....	xii
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. KESİNTİSİZ GÜÇ KAYNAKLARI</b> .....	3
2.1. Dinamik Kesintisiz Güç Kaynakları .....	3
2.1.1. Akülü Dinamik Kesintisiz Güç Kaynakları .....	5
2.1.2. Kinetik Enerji Depolu Dinamik Kesintisiz Güç Kaynakları.....	5
2.1.3. Dizel Destekli Dinamik Kesintisiz Güç Kaynakları .....	6
2.2. Statik Kesintisiz Güç Kaynakları .....	7
2.2.1. Off-Line Kesintisiz Güç Kaynakları .....	8
2.2.2. Line-Interactive Kesintisiz Güç Kaynakları.....	9
2.2.3. On-Line Kesintisiz Güç Kaynakları .....	9
2.3. Statik Kesintisiz Güç Kaynaklarının Temel Bölümleri .....	12
2.3.1. Doğrultucu .....	12
2.3.1.1. Altı Darbeli Doğrultucu .....	12
2.3.1.2. Oniki Darbeli Doğrultucu .....	13
2.3.1.3. IGBT Doğrultucu .....	14
2.3.2. Evirici .....	14
2.3.2.1. Üç Fazlı Gerilim Kaynaklı Evirici .....	15
2.3.2.2. Darbe Genişlik Modülasyonu .....	17
2.3.3. Akü .....	19
2.3.3.1. Kurşun Asit Akü .....	20
2.3.3.2. Nikel Kadmiyum Akü .....	21
2.3.4. Statik ve Manuel By-pass .....	22
<b>3. IGBT DOĞRULTUCULU STATİK KESİNTİSİZ GÜÇ KAYNAKLARI</b> ...	23
3.1. IGBT'nin Yapısı ve Özellikleri.....	23
3.2. IGBT Doğrultuculu SKGK'nin Çalışması .....	25
3.2.1. Çalışma Modları .....	32
3.2.2. IGBT Doğrultuculu SKGK'nin Giriş Çıkış Değerleri .....	35
<b>4. HARMONİKLER</b> .....	36
4.1. Fourier Serileri ve Analizi .....	37
4.2. Harmonikli Sistemlere ait Tanımlar .....	40
4.2.1. Toplam Harmonik Distorsiyon .....	40
4.2.2. Distorsiyon Güç Faktörü .....	41
4.2.3. Toplam Talep Distorsiyon .....	42
4.3. Harmonik Seviyeleri .....	42
4.4. Harmoniklerin Faz Sırası .....	43

4.5. Harmoniklerin Güç Sistemleri Üzerindeki Etkileri .....	44
4.5.1. Harmoniklerin Neden Olduğu Rezonans Olayları .....	45
4.5.2. Kondansatörlere Etkileri .....	45
4.5.3. Güç Elektroniği Devre Elemanlarına Etkileri .....	46
4.5.4. Harmoniklerin Güç Faktörüne Etkisi .....	46
4.6. Harmonik Standartları .....	48
4.6.1. TS EN 61000-3-2 Standartı .....	48
4.6.2. TS EN 61000-2-2 Standartı .....	51
4.7. Harmonik Üreten Devre Elemanları ve Cihazlar .....	52
4.7.1. Güç Elektroniği Elemanları .....	53
4.7.2. Doğrultucular .....	53
4.7.3. Eviriciler .....	54
4.7.4. Bilgisayarlar .....	54
4.7.5. Elektronik Balastlar .....	54
4.7.6. Jeneratörler .....	55
4.7.7. Transformatörler .....	55
<b>5. FABRİKA ORTAMINDAKİ IGBT DOĞRULTUCULU SKGK’de HARMONİK ÖLÇÜMÜ</b> .....	57
5.1. 80KVA Gücündeki IGBT Doğrultuculu SKGK’de Harmonik Ölçüm .....	57
5.2. 30KVA Gücündeki IGBT Doğrultuculu SKGK’de Harmonik Ölçüm .....	72
5.3. 250KVA Gücündeki IGBT Doğrultuculu SKGK’de Harmonik Ölçüm .....	76
<b>6. SIMULINK PROGRAMI İLE IGBT DOĞRULTUCULU SKGK BENZETİMİ ve HARMONİK ANALİZİ</b> .....	78
6.1. Simulink Programı .....	78
6.2. IGBT Doğrultuculu SKGK Benzetimi .....	79
6.3. IGBT Doğrultuculu SKGK’de Harmonik Analizi .....	87
<b>7. KESİNTİSİZ GÜÇ KAYNAKLARINDA HARMONİK AZALTIM YÖNTEMLERİ</b> .....	93
7.1. Akım Harmoniklerinin Azaltılması .....	93
7.1.1. Pasif Harmonik Filtre .....	93
7.1.1.1. Seri Pasif Filtre .....	94
7.1.1.2. Paralel Pasif Filtre .....	95
7.1.2. Aktif Harmonik Filtre .....	95
7.1.2.1. Aktif Harmonik Filtre Uygulaması .....	97
7.2. Gerilim Harmoniklerinin Azaltılması .....	103
<b>8. SONUÇLAR</b> .....	108
<b>9. KAYNAKLAR</b> .....	110
<b>10. EKLER</b> .....	113
<b>11. ÖZGEÇMİŞ</b> .....	118

## KISALTMALAR

<b>A</b>	: Amper
<b>AC</b>	: Alternating Current
<b>Ah</b>	: Ampersaat
<b>AHF</b>	: Aktif Harmonik Filtre
<b>BJT</b>	: Bipolar Transistor
<b>DC</b>	: Direct Current
<b>DKGK</b>	: Dinamik Kesintisiz Güç Kaynağı
<b>Hz</b>	: Hertz
<b>IGBT</b>	: Insulated Gate Bipolar Transistor
<b>KGK</b>	: Kesintisiz Güç Kaynağı
<b>KHz</b>	: Kilohertz
<b>KVA</b>	: Kilo Volt Amper
<b>Ni-Cd</b>	: Nikel Kadmiyum
<b>P</b>	: Gerçek Güç
<b>PFC</b>	: Power Factor Correction (Güç Faktörü Düzeltme)
<b>PHF</b>	: Pasif Harmonik Filtre
<b>PWM</b>	: Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
<b>S</b>	: Görünen Güç
<b>SKGK</b>	: Statik Kesintisiz Güç Kaynağı
<b>THD</b>	: Toplam Harmonik Distorsiyon
<b>THDI</b>	: Toplam Akım Harmonik Distorsiyon
<b>THDV</b>	: Toplam Gerilim Harmonik Distorsiyon
<b>TTD</b>	: Toplam Talep Distorsiyon
<b>Q</b>	: Reaktif Güç
<b>W</b>	: Watt
<b>V</b>	: Volt
<b>VRLA</b>	: Valve Regulated Lead Acid

## SİMGELER

<b><i>cf</i></b>	: Crest factor
<b><i>I<sub>e</sub></i></b>	: Eşdeğer akım
<b><i>I<sub>ş</sub></i></b>	: Şebeke akımı
<b><i>m</i></b>	: Modülasyon indeksi
<b><i>pf</i></b>	: Power factor (Güç faktörü)
<b><i>pf<sub>dist</sub></i></b>	: Distorsiyon güç faktörü
<b><i>pf<sub>toplam</sub></i></b>	: Toplam güç faktörü
<b><i>rms</i></b>	: Root mean square (Karasel ortalama değer)
<b><math>\varphi</math></b>	: Faz açısı
<b><i>X<sub>C</sub></i></b>	: Kapasitif reaktans
<b><i>V<sub>e</sub></i></b>	: Eşdeğer gerilim
<b><i>wt</i></b>	: Açısal frekans

## ŞEKİLLER

### Sayfa No.

Şekil 2.1. Dinamik kesintisiz güç kaynağı blok diyagramı .....	4
Şekil 2.2. Senkron makine ve bölümleri .....	4
Şekil 2.3. Akülü DKGK .....	5
Şekil 2.4. Kinetik enerji depolu DKGK .....	5
Şekil 2.5. Dizel destekli DKGK .....	6
Şekil 2.6. Dizel destekli DKGK'nin blok diyagramı .....	6
Şekil 2.7. Off-Line kesintisiz güç kaynağının blok diyagramı .....	8
Şekil 2.8. Line-Interactive kesintisiz güç kaynağının blok diyagramı .....	9
Şekil 2.9. On-Line kesintisiz güç kaynağının blok diyagramı .....	10
Şekil 2.10. On-Line kesintisiz güç kaynağının devre elemanlarıyla gösterimi .....	11
Şekil 2.11. Altı darbe tristör doğrultuculu topoloji ve tek faza ait giriş akım ve gerilim dalga şekilleri .....	13
Şekil 2.12. Oniki darbe tristör doğrultuculu topoloji ve tek faza ait giriş akım dalga şekli .....	13
Şekil 2.13. Üç faz IGBT doğrultuculu topoloji ve tek faza ait giriş akım ve gerilim dalga şekilleri .....	14
Şekil 2.14. Üç fazlı gerilim kaynaklı evirici .....	16
Şekil 2.15. Üç fazlı sinüsoidal PWM eviricinin dalga şekilleri .....	18
Şekil 2.16. VRLA akülerin deşarj eğrisi .....	21
Şekil 3.1. IGBT iç yapısı .....	23
Şekil 3.2. IGBT sürme sinyali .....	24
Şekil 3.3. IGBT modül .....	25
Şekil 3.4. IGBT doğrultuculu statik kesintisiz güç kaynağı kontrol elektroniği .....	25
Şekil 3.5. IGBT doğrultuculu üç fazlı statik kesintisiz güç kaynağı blok diyagramı .....	26
Şekil 3.6. IGBT doğrultuculu SKGK cihazının doğrultucu bölümü .....	27
Şekil 3.7. SKGK cihazının DC bara bölümü .....	28
Şekil 3.8. IGBT doğrultuculu SKGK cihazının evirici bölümü .....	29
Şekil 3.9. IGBT doğrultuculu SKGK cihazının çıkış filtre bölümü .....	29
Şekil 3.10. Doğrusal yükte SKGK giriş akım ve gerilimin dalga şekli .....	30
Şekil 3.11. Doğrusal olmayan yükte SKGK giriş akım ve gerilimin dalga şekli .....	30
Şekil 3.12. Doğrusal yükte evirici çıkışı akım ve gerilimin dalga şekli .....	31
Şekil 3.13. Doğrusal olmayan yükte evirici çıkışı akım ve gerilimin dalga şekli .....	31
Şekil 3.14. Doğrusal yükte SKGK çıkış akım ve gerilimin dalga şekli .....	32
Şekil 3.15. Doğrusal olmayan yükte SKGK çıkış akım ve gerilimin dalga şekli .....	32
Şekil 3.16. Şebekeden çalışma modu .....	33
Şekil 3.17. Aküden çalışma modu .....	34
Şekil 3.18. Statik by-passtan çalışma modu .....	34
Şekil 4.1. Harmonik içeren dalga biçimi ve harmonik bileşenler .....	37
Şekil 4.2. Aynı fazda gerilim ve akım dalga şekli .....	47
Şekil 4.3. Güç üçgeni .....	47
Şekil 4.4. Doğrusal olmayan yüklerin THDI değerleri ve akımın dalga şekilleri .....	53



<b>Şekil 5.1.</b> (a), (b), (c), (d) 80KVA gücündeki KGK'nin şebekeden çalışma esnasında yük %0 iken giriş THDI sonuçları .....	58
<b>Şekil 5.2.</b> (a), (b), (c), (d) 80KVA gücündeki KGK'nin şebekeden çalışma esnasında yük %25 iken giriş THDI sonuçları .....	59
<b>Şekil 5.3.</b> (a), (b), (c), (d) 80KVA gücündeki KGK'nin şebekeden çalışma esnasında yük %50 iken giriş THDI sonuçları .....	60
<b>Şekil 5.4.</b> (a), (b), (c), (d) 80KVA gücündeki KGK'nin şebekeden çalışma esnasında yük %75 iken giriş THDI sonuçları .....	61
<b>Şekil 5.5.</b> (a), (b), (c), (d) 80KVA gücündeki KGK'nin şebekeden çalışma esnasında yük %100 iken giriş THDI sonuçları .....	62
<b>Şekil 5.6.</b> (a), (b), (c), (d) 80KVA gücündeki KGK'nin şebekeden çalışma esnasında yük %0 iken çıkış THDV sonuçları .....	63
<b>Şekil 5.7.</b> (a), (b), (c), (d) 80KVA gücündeki KGK'nin şebekeden çalışma esnasında yük %25 iken çıkış THDV sonuçları .....	64
<b>Şekil 5.8.</b> (a), (b), (c), (d) 80KVA gücündeki KGK'nin şebekeden çalışma esnasında yük %50 iken çıkış THDV sonuçları .....	65
<b>Şekil 5.9.</b> (a), (b), (c), (d) 80KVA gücündeki KGK'nin şebekeden çalışma esnasında yük %75 iken çıkış THDV sonuçları .....	66
<b>Şekil 5.10.</b> (a), (b), (c), (d) 80KVA gücündeki KGK'nin şebekeden çalışma esnasında yük %100 iken çıkış THDV sonuçları.....	67
<b>Şekil 5.11.</b> (a), (b), (c), (d) 80KVA gücündeki KGK'nin aküden çalışma esnasında yük %0 iken çıkış THDV sonuçları .....	68
<b>Şekil 5.12.</b> (a), (b), (c), (d) 80KVA gücündeki KGK'nin aküden çalışma esnasında yük %50 iken çıkış THDV sonuçları .....	69
<b>Şekil 5.13.</b> (a), (b), (c), (d) 80KVA gücündeki KGK'nin aküden çalışma esnasında yük %100 iken çıkış THDV sonuçları .....	70
<b>Şekil 5.14.</b> Harmonik analizörü ölçüm seçenekleri ekranı .....	72
<b>Şekil 5.15.</b> Giriş THDI değerleri.....	73
<b>Şekil 5.16.</b> Çıkış THDV değerleri.....	73
<b>Şekil 5.17.</b> Giriş akım ve çıkış gerilimin 3. harmonik değerleri.....	74
<b>Şekil 5.18.</b> Giriş akım ve çıkış gerilimin 5. harmonik değerleri.....	74
<b>Şekil 5.19.</b> Giriş akım ve çıkış gerilimin 7. harmonik değerleri.....	75
<b>Şekil 5.20.</b> Giriş akım ve çıkış gerilimin 9. harmonik değerleri.....	75
<b>Şekil 6.1.</b> IGBT doğrultuculu SKGK'nin simülasyon devresinin genel görünümü ..	79
<b>Şekil 6.2.</b> IGBT doğrultuculu üç fazlı SKGK benzetimi simülasyon devresi .....	81
<b>Şekil 6.3.</b> (a), (b) Sinüsoidal işaret ile üçgen taşıyıcı sinyalinin karşılaştırılması .....	82
<b>Şekil 6.4.</b> SKGK'nin simülasyon ile elde edilen akım ve gerilim dalga şekilleri .....	83
<b>Şekil 6.5.</b> Aküden çalışma durumunda SKGK'nin akım ve dalga şekilleri.....	84
<b>Şekil 6.6.</b> Üç faz SKGK giriş akım ve gerilim dalga şekilleri.....	85
<b>Şekil 6.7.</b> Üç faz SKGK çıkış akım ve gerilim dalga şekilleri .....	85
<b>Şekil 6.8.</b> Çıkışı trafolu SKGK'nin simülasyon ile elde edilen akım ve gerilim dalga şekilleri.....	86
<b>Şekil 6.9.</b> Simülasyon ile harmonik analizinin yapıldığı FFT analiz bölümü .....	87
<b>Şekil 6.10.</b> SKGK'nin girişten çektiği akımın dalga şekli ve giriş THDI değerleri ..	88
<b>Şekil 6.11.</b> SKGK çıkış gerilimi dalga şekli ve çıkış THDV değerleri .....	89

<b>Şekil 6.12.</b> Çıkışı trafolu SKGK'nin girişten çektiği akımın dalga şekli ve giriş THDI değerleri.....	90
<b>Şekil 6.13.</b> Çıkışı trafolu SKGK'nin çıkış gerilimi dalga şekli ve çıkış THDV değerleri.....	91
<b>Şekil 7.1.</b> (a), (b) Q tipi pasif harmonik filtreler .....	94
<b>Şekil 7.2.</b> Seri pasif filtrenin devre içinde kullanımı .....	94
<b>Şekil 7.3.</b> Paralel pasif filtrenin devre içinde kullanımı.....	95
<b>Şekil 7.4.</b> Aktif harmonik filtrenin devre içinde kullanımı.....	96
<b>Şekil 7.5.</b> (a), (b) %50 yükte altı darbeli 20KVA SKGK'nin AHF devre olmadığı durumda giriş THDI ve giriş akımı rms değerleri.....	97
<b>Şekil 7.6.</b> (a), (b) %50 yükte altı darbeli 20KVA SKGK'nin AHF devre olduğu durumda giriş THDI ve giriş akımı rms değerleri.....	98
<b>Şekil 7.7.</b> (a), (b) %50 yükte IGBT doğrultuculu 30KVA SKGK'nin AHF devre iken ve devrede değilken giriş THDI değerleri.....	99
<b>Şekil 7.8.</b> Harmonik ölçüm sonuçlarının AHF cihazının ön panelde gösterilmesi....	99
<b>Şekil 7.9.</b> Akım kaynağı bağlanmış IGBT doğrultuculu SKGK'nin simülasyon devresi .....	101
<b>Şekil 7.10.</b> (a), (b) Akım kaynağının blok parametre değerleri ve gösterimi .....	102
<b>Şekil 7.11.</b> (a), (b) Simülasyonu yapılan IGBT doğrultuculu SKGK'nin akım kaynağı bağlanmadan önce ve bağlandıktan sonraki giriş harmonik analizi.....	102
<b>Şekil 7.12.</b> PWM yönteminde çıkış gerilimi.....	103
<b>Şekil 7.13.</b> PWM'li evirici çıkışında istenilen harmoniklerin yok edilmesi .....	105
<b>Şekil 7.14.</b> Yarı periyotta m darbe bulunan iki seviyeli PWM işareti .....	106

## TABLolar

### Sayfa No.

<b>Tablo 2.1.</b> Üç fazlı gerilim kaynaklı eviricinin anahtarlama durumları .....	16
<b>Tablo 3.1.</b> IGBT doğrultuculu SKGK'nin giriş çıkış değerleri.....	35
<b>Tablo 4.1.</b> Harmonik faz sırası .....	43
<b>Tablo 4.2.</b> A sınıfı donanımlar için harmonik sınır değerleri.....	49
<b>Tablo 4.3.</b> B sınıfı donanımlar için harmonik sınır değerleri .....	50
<b>Tablo 4.4.</b> C sınıfı donanımlar için harmonik sınır değerleri .....	50
<b>Tablo 4.5.</b> D sınıfı donanımlar için harmonik sınır değerleri.....	51
<b>Tablo 4.6.</b> Alçak gerilim şebekelerinde izin verilen harmonik gerilim distorsiyon sınırları .....	52
<b>Tablo 5.1.</b> Trafolu ve trafosuz SKGK'lerde giriş THDI değerleri.....	71
<b>Tablo 5.2.</b> Trafolu ve trafosuz SKGK'lerde çıkış THDV değerleri .....	71
<b>Tablo 5.3.</b> Şebekeden ve aküden besleme durumlarında çıkış THDV değerleri.....	71
<b>Tablo 5.4.</b> 250KVA SKGK'nin %50 yük altında giriş harmonik değerleri.....	76
<b>Tablo 5.5.</b> 250KVA SKGK'nin %100 yük altında giriş harmonik değerler .....	76
<b>Tablo 5.6.</b> 250KVA SKGK'nin %50 yük altında çıkış harmonik değerleri .....	77
<b>Tablo 5.7.</b> 250KVA SKGK'nin %100 yük altında çıkış harmonik değerleri .....	77
<b>Tablo 6.1.</b> Trafosuz SKGK ve trafolu SKGK'nin verimlerinin karşılaştırılması.....	86
<b>Tablo 6.2.</b> Deneysel ve simülasyon harmonik ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması	92
<b>Tablo 7.1.</b> Aktif ve pasif filtrelerin karşılaştırılması .....	103

## GENEL BİLGİLER

Adı ve Soyadı : Hakan HIZARCIOĞLU  
Anabilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği  
Programı : Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği  
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Muhammet KÖKSAL  
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Ocak 2012

### IGBT DOĞRULTUCULU ÜÇ FAZLI STATİK KESİNTİSİZ GÜÇ KAYNAKLARINDA HARMONİK ANALİZİ

#### ÖZET

Bu araştırmada IGBT Doğrultuculu Üç Fazlı Statik Kesintisiz Güç Kaynaklarının neden olduğu harmoniklerin analizi yapılmıştır.

Araştırmanın giriş bölümünde kesintisiz güç kaynakları ve harmonikler üzerine kısa bilgilendirme yapılmış ve harmoniklerin azaltılmasının önemi anlatılmıştır. İkinci bölümde, Kesintisiz Güç Kaynakları hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, IGBT Doğrultuculu Üç Fazlı Statik Kesintisiz Güç Kaynağının devre yapısı ve çalışma prensibi anlatılmıştır. Fabrika ortamında çalışmakta olan IGBT Doğrultuculu Kesintisiz Güç Kaynağı üzerinde incelemeler yapılmıştır. Dördüncü bölümde, harmonikler hakkında bilgiler verilmiş, Fourier analizinin harmonik ölçümlerde nasıl kullanıldığı açıklanmıştır. Beşinci bölümde, fabrika ortamında çalışmakta olan IGBT Doğrultuculu Üç Fazlı Kesintisiz Güç Kaynaklarının neden olduğu harmoniklerin ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Altıncı bölümde, Simulink programı ile IGBT Doğrultuculu Üç Fazlı Kesintisiz Güç Kaynağının benzetimi gerçekleştirilmiştir. Devrenin simülasyonu gerçekleştirilerek harmoniklerin analizi yapılmıştır. Yedinci bölümde, harmoniklerin nasıl azaltılacağına yönelik hem deneysel uygulama hem de simülasyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar bölümünde, yapılan araştırmanın sonuçları aktarılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kesintisiz Güç Kaynakları, KGK, Harmonik, IGBT Doğrultucu, Evirici.

## GENERAL KNOWLEDGE

Name and Surname : Hakan HIZARCIOĞLU  
Field : Electrical and Electronics Engineering  
Program : Electronics and Communication Engineering  
Supervisor : Prof. Dr. Muhammet KÖKSAL  
Degree Awarded and Date : Master – January 2012

## HARMONIC ANALYSIS IN THREE PHASE STATIC UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY WITH IGBT RECTIFIER

### SUMMARY

In that research, harmonics caused by three phase Uninterruptible Power Supply (UPS) with IGBT rectifier are analysed.

In the first section, the UPS and harmonics are described briefly and the importance of decreasing the harmonics are described. In the second section, the UPSs are described detailly. In the third section, three phase UPS with IGBT rectifier circuit structure and principle of operation are described and an UPS being tested in the factory is examined. In the fourth section, detailed information about harmonics and the usage of the Fourier analysis in the harmonic measurements are described. In the fifth section, the result of the harmonic measurements which are measured from a three phase UPS in the factory are mentioned. In the sixth section, a simulaion of three phase UPS is prepared by using Simulink and harmonics are measured from simulation, too. In the seventh section, both experimental and simulated application testings for decreasing the harmonics are described. In the result section, the results of the research are defined.

**Key Words:** Uninterruptible Power Supply, UPS, Harmonic, IGBT Rectifier, Inverter

## 1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesi temiz kaliteli enerjiye olan ihtiyacı artırmıştır. Özellikle tıbbi elektronik cihazlar, haberleşme sistemleri, bilgisayar sistemleri gibi kritik yüklerin kesintiye uğramaması gerekmektedir. Enerjinin kesintisiz olması, gerilim ve frekansının sabitliği, faz gerilimlerinin dengeli, harmoniklerin düşük seviyede, güç faktörünün 1'e yakın olması gibi kriterlerin önemi her geçen gün daha fazla artmaktadır.

Elektrik enerjisi üretim kaynaklarının sınırlı olmasına karşın, her geçen gün elektrik enerjisi kullanım miktarı artmaktadır. Ortaya çıkan elektrik enerjisi açığının kapatılmasına yönelik önlemlerden biri de yeni geliştirilen cihazların yüksek verim sağlayacak ve harmonik bileşenleri az olacak şekilde tasarlanmasıdır. Harmonikler, aynı güç hattına bağlı olan diğer cihazların olumsuz yönde etkilenmesine, elektrik dağıtım hatlarında daha büyük kesitli iletkenlerin kullanılmasına, şebekenin kullanılabilirliği ve veriminin düşmesine neden olmaktadır. Şebeke enerji kalitesinin düşmesi güç sistemindeki akım ve gerilimin ideal dalga şeklinin dışında olduğunu ortaya koymaktadır.

Enerji kalitesi sorunu, harmonik üreten güç elektroniği tabanlı cihazların yaygın olarak kullanılmasıyla birlikte artmıştır. Kesintisiz güç kaynaklarında harmonik üreten cihazlardır. Kesintisiz güç kaynağı kullanmanın genel olarak iki temel amacı vardır; birincisi, ana beslemenin kesildiği durumlarda sisteme enerji sağlamak, bir diğeri de, kritik veya hassas yükleri enerjinin düşmesi veya artması, frekans dalgalanmaları gibi bozucu giriş sayabileceğimiz durumlarda sistemi koruyabilmektir.

Kesintisiz güç kaynaklarının neden olduğu harmonikler, giriş akım harmonikleri ve çıkış gerilim harmonikleri olarak iki başlık altında incelenebilir.

Kesintisiz güç kaynakları, doğrultucu bölümündeki devre elemanlarının çalışma karakteristiğine bağlı olarak şebekeden çektikleri akımın şeklini bozarlar ve şebekede harmonik oluşmasına neden olurlar. Doğrultucu bölümünde kullanılan devre topolojisine göre giriş akım harmoniği azaltılabilmektedir. IGBT doğrultuculu

Kesintisiz Güç Kaynaklarının akım harmonikleri, tristör doğrultucu Kesintisiz Güç Kaynaklarına oranla daha düşüktür.

Harmoniklerin büyüklüğü, Toplam Harmonik Distorsiyon ile ifade edilmektedir. Giriş akım harmonikleri için THDI ve çıkış gerilim harmonikleri için THDV gösterimleri kullanılmaktadır.

Giriş akım harmoniklerinin azaltılması için pasif ve aktif harmonik sistemler kullanılmaktadır. Çıkış gerilim harmoniklerinin azaltılabilmesi içinde evirici de kullanılan topoloji önem taşımaktadır. Eviricide kullanılan Darbe Genişlik Modülasyonu yöntemi ve fourier analizi ile çıkış gerilim harmonikleri azaltılabilmektedir.

Kesintisiz Güç Kaynakları ile ilgili bugüne kadar yapılan çalışmalarda, küçük güçteki (1KVA'ya kadar Line-Interactive teknoloji) KGK'lerin tasarımı, üretilmesi ve performans analizleri üzerine yapılan çalışmalar ağırlıktadır. Harmonikler ile ilgili yapılan çalışmalarda ise genel olarak doğrultucu (Redresör) cihazlarında akım harmonikleri, evirici (Inverter) cihazlarında ise gerilim harmonikleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, IGBT Doğrultuculu Üç Fazlı Statik Kesintisiz Güç Kaynaklarının neden oldukları giriş akım harmonikleri ve çıkış gerilim harmoniklerinin analizi yapılarak azaltılmasına yönelik simulasyon ve deneysel uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

## 2. KESİNTİSİZ GÜÇ KAYNAKLARI

Kritik yüklerin, şebeke enerjisinin kesilmelerinden ve kısa süreli bozulmalarından zarar görmemesi için, bu tür yüklerin Kesintisiz Güç Kaynakları (KGK) ile beslenmeleri gerekmektedir.

KGK'ler tasarım özelliklerine bağlı olarak Dinamik Kesintisiz Güç Kaynakları (DKGK) ve Statik Kesintisiz Güç Kaynakları (SKGK) olmak üzere iki grupta incelenebilir.

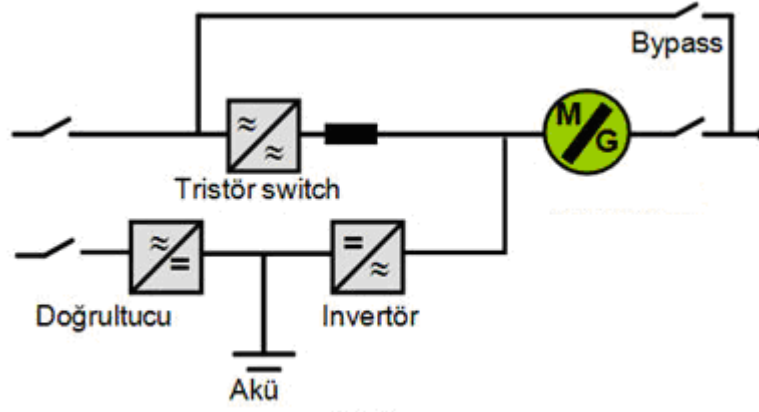
### 2.1 Dinamik Kesintisiz Güç Kaynakları

DKGK'ler uzun yıllardan beri kritik işletmelerin, hastanelerin, data merkezlerinin kaliteli ve kesintisiz enerji ihtiyaçlarını karşılamaktadır. DKGK'ler mekanik yapılarından dolayı mekanik bakıma ihtiyaçları vardır. Yüksek güçlü uygulamalarda DKGK'ler tercih edilirler. Çıkış empedanslarının düşük olması doğrusal olmayan yüklerdeki performanslarını artırır. DKGK'lerin giriş akım harmonikleri SKGK'lere göre daha düşüktür (Emadi, Nasiri and Bekiarov, 2005: 272).

DKGK'ler mekanik sistemlerdir. DKGK'nin SKGK'lerden en önemli farkı, gerilimi ve frekansı düzenlemek için güç elektroniği devreleri kullanılmayıp, senkron makineyle bu işi yapabilmesidir. DKGK blok diyagramı Şekil 2.1'de görülmektedir.

SKGK'lerde şebeke gerilimi, doğrultucu ve evirici gibi güç elektroniği devreleri yardımıyla istenilen seviyede sinyal elde edilir. Fakat elde edilen sinyal eviricideki yarı iletken malzemelerin anahtarlanmasıyla elde edilir.

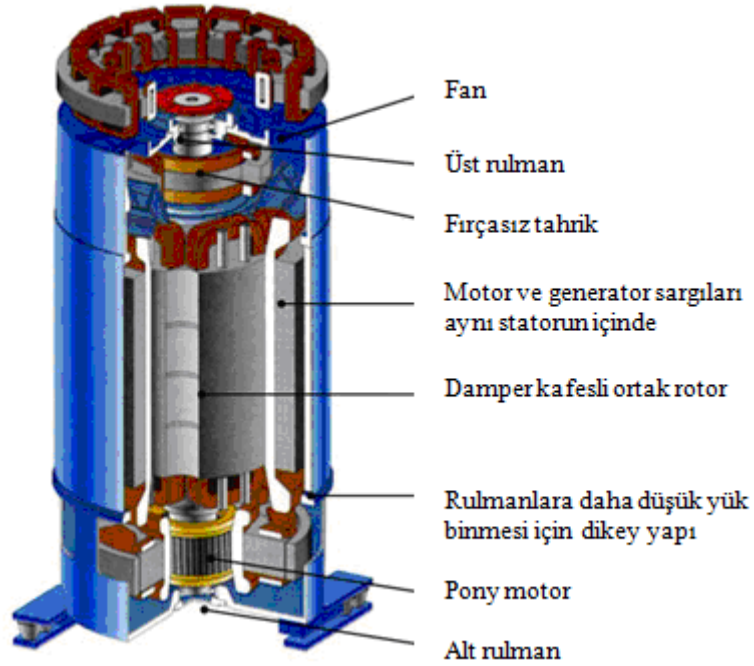




Şekil 2.1. Dinamik kesintisiz güç kaynağı blok diyagramı.

DKGK'de gerilimin stabil ve doğal sinüsoidal şeklinde oluşması için senkron makine kullanılmaktadır. Senkron makine ve bölümleri Şekil 2.2'de görülmektedir. Senkron makine elektriğin şebekeden bağımsız olarak üretildiği bölümdür. Senkron makineler, önceki yıllarda enerji santrallerinde elektriğin üretildiği ve kompanzasyonun yapıldığı cihazlardır.

Sistemin çalışma prensibi; motor sargılarına gelen enerji, manyetik alan yardımıyla alternatörde elektrik enerjisine çevrilir. Şebeke sinyali sadece motoru hareket ettirmek için kullanılır ve şebekeden bağımsız gerilim ve frekans üretilir.



Şekil 2.2. Senkron makine ve bölümleri.

DKGK'ler sınıflandırılırken, enerji depolama şekline göre; kinetik enerji depolu ya da akülü olarak sınıflandırılabilir. Kesintilerdeki besleme sürelerine göre ise; kısa süreli sistemler (kinetik enerji depolu, akülü) ya da uzun süreli sistemler (jeneratörlü) olarak sınıflandırılırlar.

### 2.1.1 Akülü Dinamik Kesintisiz Güç Kaynakları

Akülü DKGK'lerin diğer DKGK'lerden en büyük farkı, elektrik kesildiğinde yedekleme süresinin istenildiği gibi uzatılabilmesidir. Aküden besleme süresinin uzun tutulabilmesi bu tip DKGK'lerin hastanelerde ve data merkezlerinde tercih edilmesine neden olmaktadır. Akülü DKGK Şekil 2.3'de görülmektedir.



Şekil 2.3. Akülü DKGK.

### 2.1.2 Kinetik Enerji Depolu Dinamik Kesintisiz Güç Kaynakları

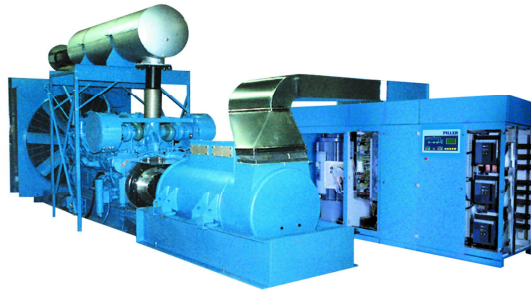
Aküsüz enerji depolamada mekanik pil, şebeke kesildiğinde yükü kinetik enerji depolama kaynağı ile beslemektedir. Mekanik pil, PowerBridge diye adlandırılan yaklaşık 3200rpm ile dönen ve gerektiğinde hareket enerjisini elektrik enerjisine çevirebilen bir sistemdir. Kısa süreli kesintilerde sorunsuz olarak yükü destekleyebilmektedir. Kinetik enerji depolu DKGK Şekil 2.4'te görülmektedir.



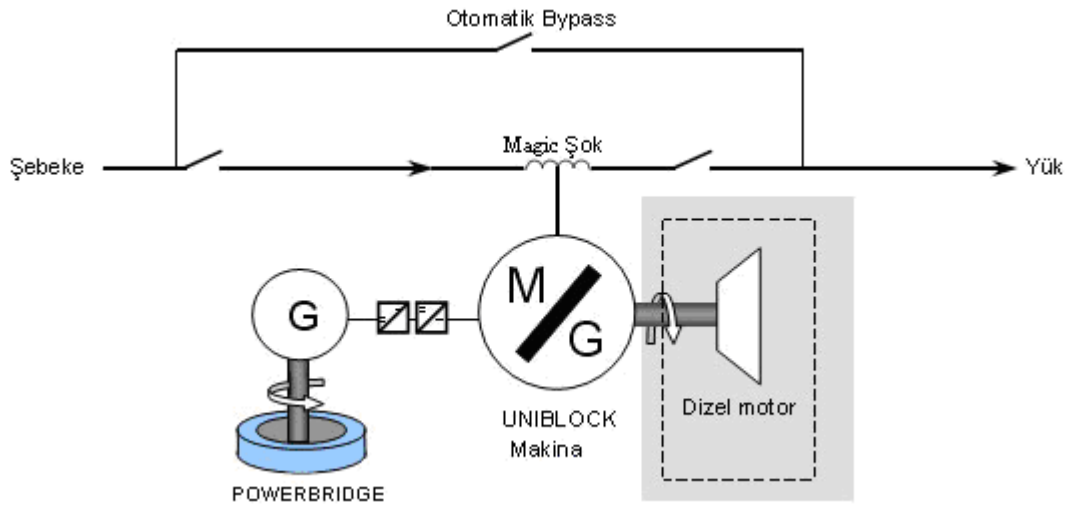
Şekil 2.4. Kinetik enerji depolu DKGK.

### 2.1.3 Dizel Destekli Dinamik Kesintisiz Güç Kaynakları

Dizel destekli DKGK'lerin çalışma prensibine göre, sistem şebeken aldığı enerjii şok bobininden geçirerek motora iletir. Motor sargılarının etkisiyle alternatör sargıları tetiklenir. Bu sayede, elektrik şebekeden bağımsız şekilde tekrar üretilir. Şebeke normal modunda Powerbridge (kinetik enerji deposu) 3200rpm ile dönmektedir. Burada kinetik enerji depolanmaktadır. Herhangi bir elektrik kesintisinde Powerbridge kinetik enerjisini elektrik enerjisine çevirerek senkron motoru destekler. Bu sayede frekans ve gerilimde bir sapma olmadan sistem yükleri kesintisiz bir şekilde beslenmektedir. Uzun süreli bir elektrik kesintisinde ise jeneratör devreye girer (Topaloğlu, 2009). Şekil 2.5'te dizel destekli DKGK'nin görünümü, Şekil 2.6'da ise blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.5. Dizel destekli DKGK.



Şekil 2.6. Dizel destekli DKGK'nin blok diyagramı.

## 2.2 Statik Kesintisiz Güç Kaynakları

Statik Kesintisiz Güç Kaynakları (SKGK), kesintisiz güç kaynağı sistemleri içerisinde en fazla kullanılan sistemdir. Kullanım alanı çok geniştir. Bilgisayar sistemleri, telekomünikasyon sistemleri, orta güçlü medikal sistemleri ve yüksek güçlerdeki sanayi sistemlerinde sıklıkla kullanılır. SKGK'lerin en önemli avantajları; yüksek verim, yüksek güvenilirlik ve düşük THD olarak sayılabilir. DKGK'lere göre dezavantajları ise, doğrusal olmayan ve dengesiz yüklerde zayıf bir performans göstermeleridir (Emadi, Nasiri and Bekiarov, 2005: 272).

SKGK tanımı içine giren farklı çalışma prensiplerinin tamamında, genel olarak üç ortak temel unsurdan söz etmek mümkündür. Bu bölümler; şebekeden sağlanan AC enerjiyi doğrultarak akü grubuna ve eviricilere aktaran doğrultucu bölümü, akü grubundan ve doğrultucudan alınan DC enerjiyi tekrar AC enerjiye çevirerek yüklerle aktaran evirici bölümü ve bu işlemler için gerekli DC enerjiyi depolamak için kullanılan akü bölümüdür.

SKGK'ler üç ayrı tipte üretilirler.

- Off-Line Kesintisiz Güç Kaynakları
- Line-Interaktive Kesintisiz Güç Kaynakları
- On-Line Kesintisiz Güç Kaynakları

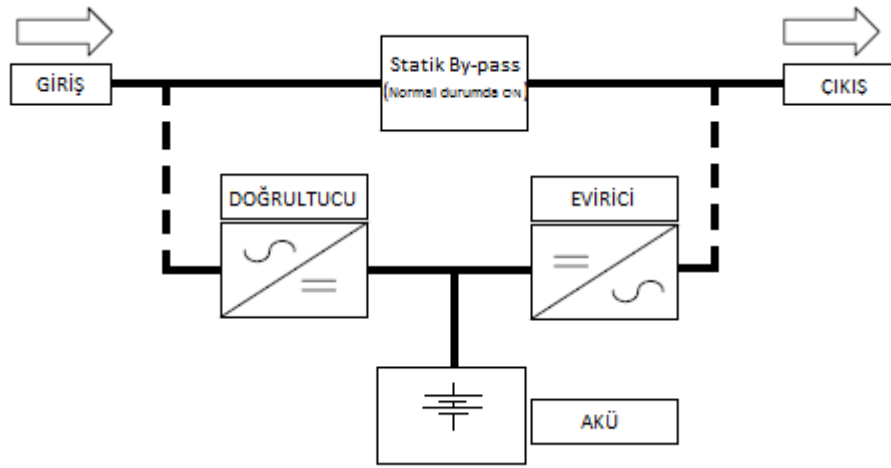
SKGK'lerde yapısal nedenlerle ortaya çıkan, şebekeye yönelik harmonik salınımlar ve giriş güç faktörüne yönelik olumsuz etkiler, yeni nesil KGK'lerde azaltılmıştır. Bu amaçla, yeni nesil KGK'lerde doğrultucu kısmında IGBT kullanılmaya başlanmış, giriş harmonik filtreleri ön plana çıkmış, ayrıca Güç Faktörü Düzeltmesi (PFC) devrelerinin kullanımı yaygınlaşmıştır. Günümüzde geliştirilen IGBT doğrultuculu sistemler ile toplam giriş akım harmonik bozulumu  $\leq \%5$  ve giriş güç faktörü  $\geq 0.99$  değerlerine ulaşılmıştır (Akgün, 2007: 136).

Akü grubunun şarj yönetiminde akülere zarar vermemek için akım sınırlama, yüksek gerilim koruması, ortam sıcaklığı ve akülerin özel çalışma karakteristiklerinden faydalanılarak akülerin kullanım ömürleri artırılabilir. SKGK'lerde, yükleri aküler üzerinden beslemek ve bu amaçla AC çıkış gerilimi üretmek için kullanılan evirici kısmı, DKGK'lerden farklı olarak, her zaman statik teknolojiye dayalıdır. Özellikle On-Line sistemlerde güncelliğini koruyan Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM), AC sinüsoidal çıkış elde etmek için en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. IGBT kontrol tekniklerindeki son gelişmeler sayesinde,

günümüzde %100 dengesiz yükler için çıkış faz kaymaları ve gerilim değişim oranları en aza indirgenmiş olan statik eviriciler kullanılmaya başlanmış ve bu tür özelliklerde avantajlı konumda olan dinamik eviricilerle rekabet edebilecek düzeyde yüksek güçlü SKGK'ler ortaya çıkmıştır.

### 2.2.1 Off-Line Kesintisiz Güç Kaynakları

Off-Line KGK'ler, şebekede herhangi bir kesinti yaşanmadığı sürece, beklemede kalan ve ancak kesinti olduğu zaman devreye girerek yüke enerji sağlayan sistemlerdir. Şekil 2.7'de Off-Line kesintisiz güç kaynağının blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.7. Off-Line kesintisiz güç kaynağının blok diyagramı.

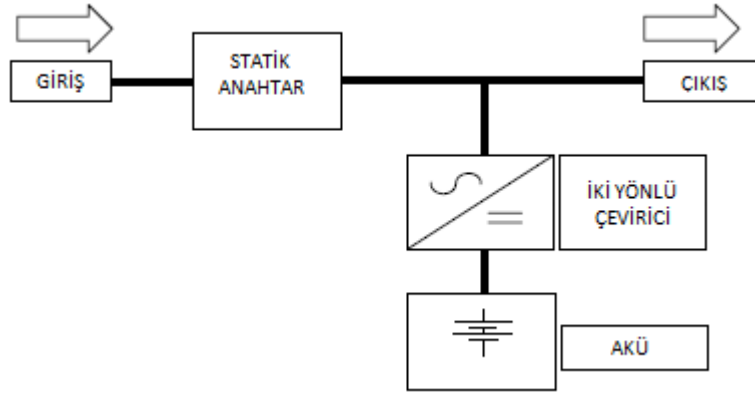
Off-line yapıya sahip bir kesintisiz güç kaynağı, doğrultucu, akü, evirici ve seçici bir anahtardan meydana gelir. Bazı durumlar için de izolasyon transformatörü kullanmak gerekebilir. Şebeke geriliminin normal olduğu durumlarda yük şebekeden direk beslenir ve akü grubu şarj edilerek hazır konumda bekler. Şebeke gerilimi kesildiği zaman bir seçici anahtar vasıtasıyla yük evirici grubu üzerinden beslenir. Hassas ve kritik yüklerin bu geçişten etkilenmemesi için maksimum transfer zamanı, periyodun  $\frac{1}{4}$ 'ü kadar olması gerekir. Off-Line yapıya sahip kesintisiz güç kaynakları, otomatik gerilim regülasyonu sağlamazlar ama aktif güç filtresi gibi davranırlar. Bu yapıya sahip kesintisiz güç kaynaklarının şebeke izolasyonu yoktur. Bu şekildeki çalışma prensibine göre, şebekedeki kısa süreli gerilim düşmesi veya yükselmeleri yükü etkileyerek arıza durumlarının ortaya çıkmasına neden olabilir.

Off-Line yapıya sahip bir kesintisiz güç kaynağı, küçük güç ve önemli derecede hassas olmayan yükleri beslemek için kullanılır. Bu yapının avantajları,

basitlik, küçük boyut ve maliyet olarak sıralanabilir. Günümüzde bu tip KGK cihazlarının kullanımı yok denecek kadar azdır.

### 2.2.2 Line-Interactive Kesintisiz Güç Kaynakları

Line-Interactive KGK'ler şebeke girişini sürekli kontrol ederek giriş değerleri, referans değerlerin dışında olduğu durumlarda otomatik gerilim regülasyonu sağlarlar. Şekil 2.8'de Line-Interactive kesintisiz güç kaynağının blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.8. Line-Interactive kesintisiz güç kaynağının blok diyagramı.

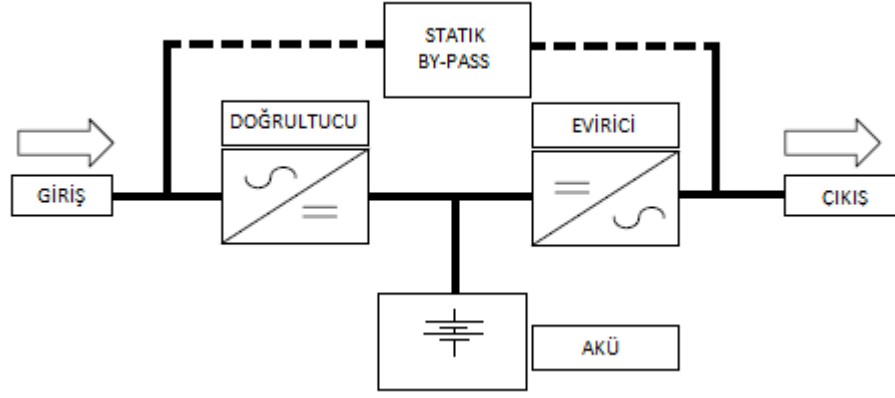
Normal çalışma durumunda yani yük şebeke geriliminden beslendiği zaman akü grubu şarj olur. Şebeke gerilimi kesildiği veya normal sınırların dışına çıktığı zaman, bir seçici anahtar vasıtasıyla yük evirici grubu üzerinden beslenir. Seçici anahtar, röle veya tristör olabilir. Burada önemli olan anahtarın hızıdır. Çünkü hassas yüklerin bu anahtarlama süresinden fazla etkilenmemesi istenir.

Line-Interactive KGK'ler akülerden çalışma anında, teknolojilerine göre modifiye sinüsoidal olarak tarif edilen kırpılmış kare dalga da verebilirler.

### 2.2.3 On-Line Kesintisiz Güç Kaynakları

On-Line KGK'ler temel olarak doğrultucu, akü grubu, evirici ve statik bypass anahtarından meydana gelmektedir. Şekil 2.9'da On-Line kesintisiz güç kaynağının genel gösterimi görülmektedir.

On-Line KGK, AC-DC-AC çift çevrime göre çalışır. AC gerilim doğrultularak DC bara gerilimi oluşturulur. Evirici kısımda ise DC baradaki gerilimden AC gerilim elde edilir.



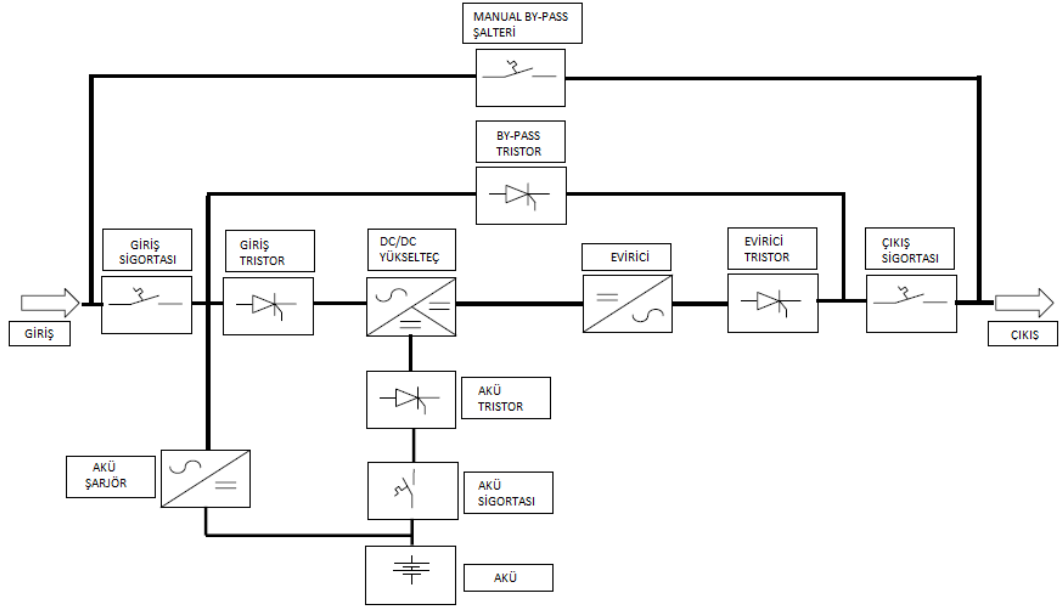
**Şekil 2.9.** On-Line kesintisiz güç kaynağının blok diyagramı.

Şebeke gerilimi sınırlar içerisinde iken AC-DC-AC çift çevrim neticesinde istenilen gerilim değeri çıkışa verilir. Bu çalışma esnasında çıkış geriliminin frekansı giriş gerilimin frekans değeriyle aynıdır. Şebeke gerilimi veya frekansı limitler dışına çıktığında sistem aküler tarafından beslenir. Aküden sağlanan DC gerilim ile çıkışta istenilen değerde gerilim ve frekans elde edilir.

On-Line kesintisiz güç kaynaklarında gerilim regülasyonunun sürekli yapılması bazı durumlarda bu sistemin frekans dönüştürücü olarak kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır.

Kesintisiz güç kaynaklarının statik by-pass kısmında hızlı bir anahtarlamann olabilmesi için genellikle tristör kullanılır. Statik by-passta kontaktör kullanılmasında yaygın bir uygulamadır.

On-Line KGK cihazının, devre elemanlarıyla birlikte gösterildiği blok diyagram Şekil 2.10'da görülmektedir.



**Şekil 2.10.** On-Line kesintisiz güç kaynağının blok diyagramı ve devre elemanları.

Şekil 2.10'da verilen sistemde, şebeke gerilimi giriş sigortası üzerinden doğrultucu bölümünde bulunan tristörlere gelir. AC gerilim tristör ile doğrultulduktan sonra DC/DC yükselteçde istenilen DC bara gerilim değerine yükseltilir. DC/DC yükselteçte gerilim yükseltilmesi IGBT ve şok bobini ile gerçekleştirilir. DC bara gerilimi eviricideki IGBT'ler ve kontrol sistemleriyle AC gerilime dönüştürülerek çıkışta istenilen gerilim ve frekans değerlerinde besleme sağlanır. DC baraya aküler bağlıdır. Aküler aynı zamanda akü şarjörü ile şarj edilir. Akü şarjörünün girişi AC çıkışı DC gerilimdir. Statik by-pass için tristör, KGK cihazının bakımlarının kolay ve sorunsuz yapılabilmesi için manuel by-pass şalteri kullanılmıştır (Bayram, 2007: 79).

Normal çalışma durumunda, yük için gerekli olan enerji, On-Line KGK'ler de sürekli olarak eviriciden sağlanır. Ayrıca sistemde, şebeke geriliminin normal olduğu zamanlarda şarj devresi vasıtasıyla sistem aküleri devamlı şarj ederek şebeke kesilmesi durumunda akülerin şarjlı olması sağlanır.

Aküden çalışma durumunda, şebekenin kesilmesiyle veya KGK'nin önceden ayarlanan limit değeri dışına çıkmasıyla evirici, akü grubu üzerinden yükü besler. Bu durum, akünün deşarj süresi ya da enerjinin geri gelmesi durumuna kadar devam eder. Enerji geri geldiğinde sistem normal çalışma durumuna geri döner.

Bypass çalışma durumunda, yük by-passtan beslenir. KGK içinde hata oluştuğunda veya aşırı yükleme olduğunda statik anahtar devreye girer. Yükün



eviriciden by-passa aktarılması durumunda giriş gerilim ve frekansının çıkış gerilim ve frekansıyla aynı olması gerekir.

On-line KGK'lerin dezavantajları, yüksek maliyetli olmaları ve verimlerinin diğer KGK sistemlerine göre daha düşük olmasıdır.

KGK seçiminde performans, maliyet ve güç belirleyici kriterlerdir. 3KVA'dan daha küçük uygulamalar için Line-Interactive topoloji uygundur. 5KVA ve daha üst güçlerde kritik yüklerin beslenmesi On-Line KGK'ler üzerinden yapılmalıdır.

## **2.3 Statik Kesintisiz Güç Kaynaklarının Temel Bölümleri**

### **2.3.1 Doğrultucu**

Günümüzde SKGK'ler de kullanılan doğrultucular farklı yapılarda üretilebilirler. Uygulamada yaygın olarak altı darbeli, oniki darbeli ve IGBT doğrultucular kullanılmaktadır.

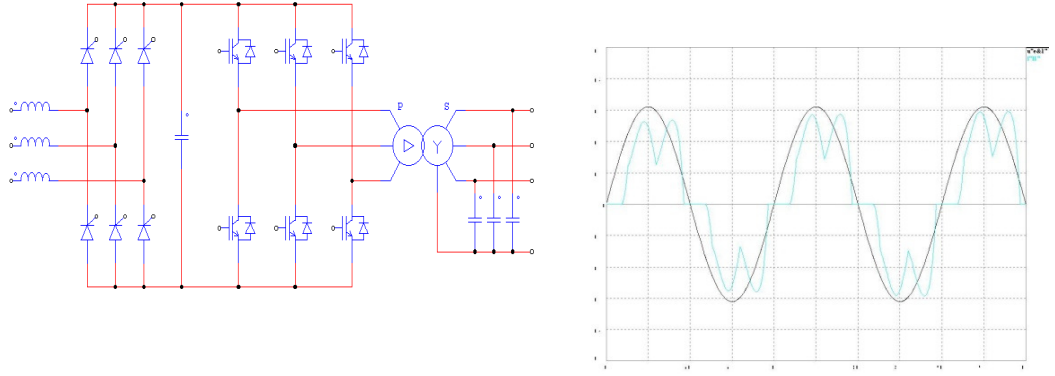
#### **2.3.1.1 Altı Darbeli Doğrultucu**

Altı darbe doğrultuculu KGK'lerin şebekede neden oldukları toplam harmonik akım bozulması (THDI), kaynak empedansının boyutuna ve DC hat endüktansına da bağlı olmakta ve yaklaşık olarak %30 mertebelerinde ölçülmektedir. Bu bozulma seviyesi, şebeke geriliminin ideal olması, yani faz gerilimleri eşit genlikte ve her biri arasında  $120^0$  faz farkı olması durumunda geçerlidir. Altı darbeli bir doğrultucu için normal akım iletim periyodu 120 derecedir. Bu açı, örnek olarak A faz akımı için  $V_c$ 'den  $V_a$ 'ya ve  $V_a$ 'dan  $V_b$ 'ye faz gerilimlerinin geçiş noktaları vasıtasıyla belirlenir. A faz gerilimi için geçiş noktaları genel olarak 30 ile 150 derecedir. Şekil 2.11'de altı darbe tristör doğrultucuya ait blok diyagram ve tek faza ait giriş akım ve gerilim dalga şekilleri görülmektedir (Akgün, 2007: 136).

Altı darbeli doğrultucularda;

Giriş güç faktörü,  $p_f = 0,8$

Toplam giriş akım harmoniği,  $THDI = \%30$  seviyelerindedir.



Şekil 2.11. Altı darbe tristör doğrultuculu topoloji ve tek faza ait giriş akım ve gerilim dalga şekilleri.

### 2.3.1.2 Oniki Darbeli Doğrultucu

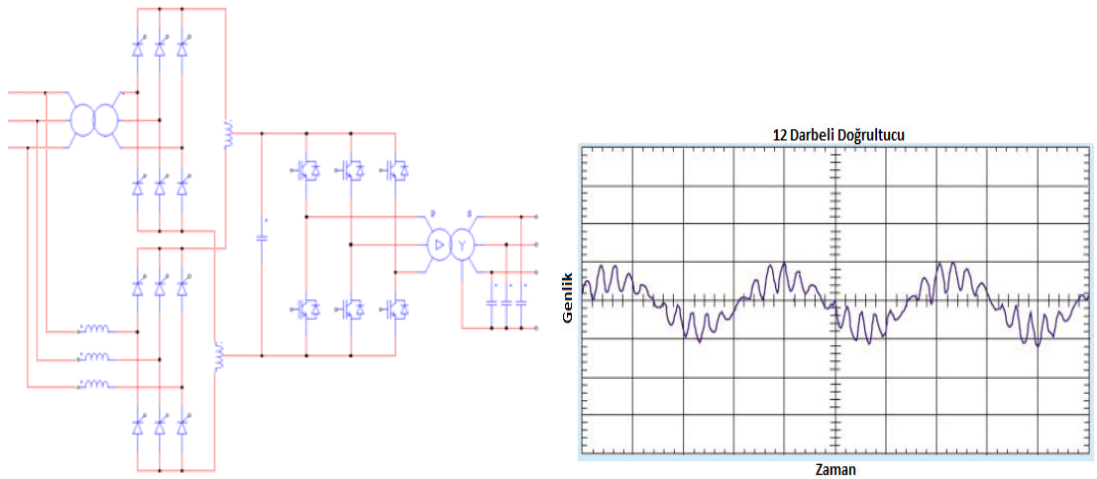
Oniki darbeli doğrultucular, faz kaydırma trafosu kullanılarak elde edilebilir. Şebeke gerilimi ve şebeke geriliminin faz kaydırma trafosundan geçirilmesi neticesinde açılırları farklı altı darbeli iki doğrultucu oluşturulur. Her iki doğrultucunun da çıkışları ortaktır ve aynı DC barayı besler.

Bir fazda dört tristör olmak kaydıyla üç fazda oniki tristör darbesiyle tam dalga doğrultma yapılır. Oniki darbeli doğrultucular genellikle harmonik akım distorsiyonlarının düşük olması istenen sistemlerde tercih edilirler. Oniki darbeli tristör doğrultucuya ait blok diyagram ve tek faza ait giriş akımı Şekil 2.12'de görülmektedir.

Oniki darbeli doğrultucularda;

Giriş güç faktörü,  $p_f = 0,85$

Toplam giriş akım harmoniği,  $THDI = \%12$  seviyelerindedir.



Şekil 2.12. Oniki darbe tristör doğrultuculu topoloji ve tek faza ait giriş akım dalga şekli.

### 2.3.1.3 IGBT Doğrultucu

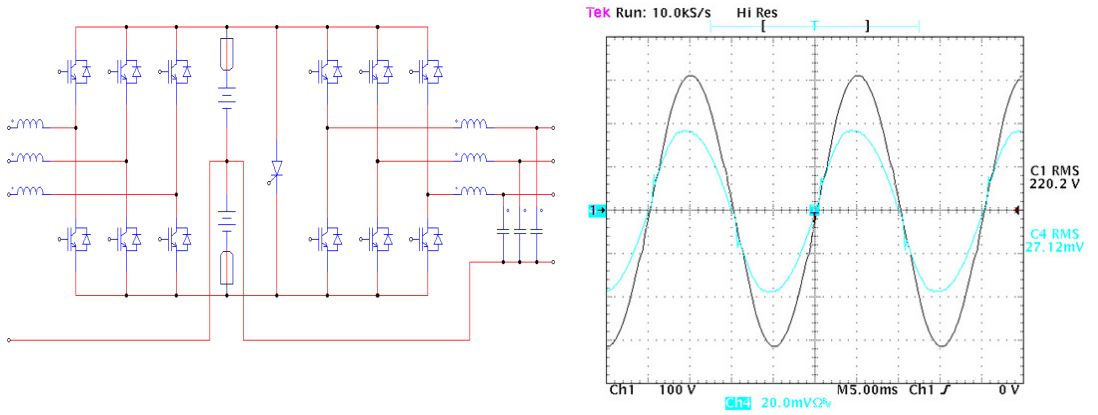
Doğrultucu kısmında IGBT'lerden yararlanılan KGK'lere IGBT doğrultuculu KGK'ler denilmektedir.

Şekil 2.13'te üç faz IGBT doğrultuculu KGK'ye ait blok diyagram ve tek faza ait giriş gerilim ve akım dalga şekilleri görülmektedir.

IGBT doğrultucularında;

Giriş güc faktörü,  $p_f \cong 1$

Toplam giriş akım harmoniği,  $THDI \leq \%5$  seviyelerindedir.



Şekil 2.13. Üç faz IGBT doğrultuculu topoloji ve tek faza ait giriş akım ve gerilim dalga şekilleri.

### 2.3.2 Evirici

Eviriciler, bir veya üç fazlı AC gerilim ile beslenecek yükler için doğru gerilim kaynağından yüke enerji transferi yapan, frekansı ve gerilimi birbirinden bağımsız olarak ayarlanabilen devrelerdir.

Son yıllardaki güç elektroniği yarı iletken elemanları teknolojisindeki gelişmeler sayesinde, güç elektroniği dönüştürücülerinde kullanılan anahtarlama elemanlarının anahtarlama frekansı yükselmiştir. Yüksek hızdaki anahtarlama elemanları sayesinde, çıkış gerilimindeki harmonikler anahtarlama tekniği değiştirilerek de azaltılabilir.

Eviricilerin üreteceği dalga şekilleri ve frekansları kullanılan yarı iletken elemanların (Tristör, IGBT, Mosfet v.b.) karakteristiklerine, iletim ve tıkama sürelerine bağlıdır (Küçük, 2007: 77).

Çıkış geriliminin frekansı ve genliği eviricideki elemanların anahtarlama durumu değiştirilerek ayarlandığından sistemin cevap verme süresi çok kısadır.

### 2.3.2.1 Üç Fazlı Gerilim Kaynaklı Evirici

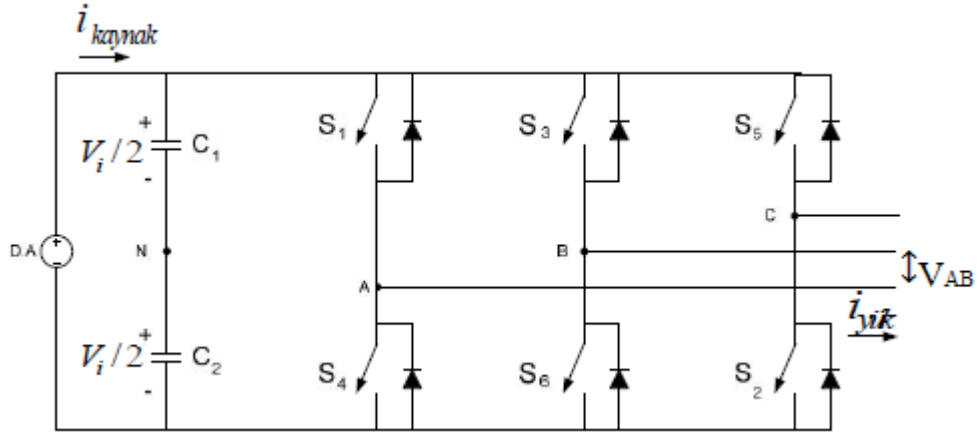
Üç fazlı gerilim kaynaklı eviriciler orta ve yüksek güç uygulamalarında kullanılırlar. Genel kullanım alanları olarak KGK'ler, aktif filtreler, ayarlanabilir hız sürücüleridir (Faiz ve diğ., 2009).

Gerilim kaynaklı eviriciler aşağıdaki gibi üç sınıfa ayrılır:

- PWM eviriciler: Bu tür eviricilerin girişindeki doğru gerilim hemen hemen sabittir. Evirici, çıkış geriliminin hem frekansını hem de genliğini ayarlar. Bu ayar, PWM ile sağlanmakta olup bu nedenle bu tür eviricilere PWM evirici ismi verilir. Çıkış geriliminin dalga şeklinin sinüsoidale yaklaştırılması için birçok PWM tekniği geliştirilmiştir.
- Kare dalga evirici: Bu tür eviricinin çıkış geriliminin genliği, girişteki doğru gerilimin genliğinin ayarlanmasıyla sağlanır. Bu nedenle eviricinin yalnızca çıkış geriliminin frekansını kontrol etmesi gerekmektedir. Çıkış geriliminin dalga şekli kare biçimindedir ve bu nedenle kare dalga evirici olarak isimlendirilir.
- Kısmi kare dalga bir fazlı evirici: Çıkışı bir fazlı olan eviricilerde, PWM ve giriş doğru gerilim ayarı gibi yöntemler uygulamaksızın, çıkış geriliminin frekans ve genlik olarak ayarlanması yapılabilir. Dalga şekli kare dalgaya benzemekle beraber, belirli aralıklarda gerilimin yok edilmesi ilkesi ile çalışmaktadır. Çıkış geriliminin belirli aralıklarında sıfır gerilim bölgeleri oluşturulmakta, böylece gerilim ayarı yapılmaktadır. Bu yöntem yalnızca tek fazlı eviricilere uygulanabilir (Yumurtacı, 2007: 99).

KGK'lerde çıkışı birbirinden  $120^\circ$  (temel frekansa göre) kaydırılmış üç adet bir fazlı evirici ile de üç fazlı yük beslenebilir. Üç fazlı eviricide altı anahtarla yapılacak sürme devresi üç adet tek fazlı eviriciyle yapılırsa oniki adet anahtara gereksinim duyulur.

Standart üç fazlı gerilim kaynaklı evirici topolojisi Şekil 2.14'te ve sekiz anahtarlama durumu Tablo 2.1'de verilmiştir. Tek fazlı eviricilerdeki anahtarlama koşulları üç fazlı gerilim kaynaklı evirici için de geçerlidir. Tablo 2.1'de verilen sekiz anahtarlama durumundan ikisi (durum 7 ve 0) sıfır alternatif hat gerilimi üretir. Diğer durumlar sıfır olmayan alternatif çıkış gerilimi üretir. İstenen dalga şeklini üretmek için anahtarlar belirli periyotlar halinde iletme geçer. Böylece çıkış gerilimlerinin değeri  $+V_i$ , 0 ve  $-V_i$  arasında değişir. İstenen çıkış gerilimi için hangi anahtarın iletme gireceğini modülasyon tekniği belirler (Demir, 2010: 63).



Şekil 2.14. Üç fazlı gerilim kaynaklı evirici.

Tablo 2.1. Üç fazlı gerilim kaynaklı eviricinin anahtarlama durumları

Anahtarlama Durumu	Durum	A Noktasındaki Gerilim	B Noktasındaki Gerilim	C Noktasındaki Gerilim	Çıkış Gerilimi ( $V_{AB}$ )
$S_1, S_2, S_6$ iletimde $S_3, S_4, S_5$ kesimde	1	$+V_i/2$	$-V_i/2$	$-V_i/2$	$+V_i$
$S_1, S_2, S_3$ iletimde $S_4, S_5, S_6$ kesimde	2	$+V_i/2$	$+V_i/2$	$-V_i/2$	0
$S_2, S_3, S_4$ iletimde $S_1, S_5, S_6$ kesimde	3	$-V_i/2$	$+V_i/2$	$-V_i/2$	$-V_i$
$S_3, S_4, S_5$ iletimde $S_1, S_2, S_6$ kesimde	4	$-V_i/2$	$+V_i/2$	$+V_i/2$	$-V_i$
$S_4, S_5, S_6$ iletimde $S_1, S_2, S_3$ kesimde	5	$-V_i/2$	$-V_i/2$	$+V_i/2$	0
$S_1, S_5, S_6$ iletimde $S_2, S_3, S_4$ kesimde	6	$+V_i/2$	$-V_i/2$	$+V_i/2$	$+V_i$
$S_1, S_3, S_5$ iletimde $S_4, S_6, S_2$ kesimde	7	$+V_i/2$	$+V_i/2$	$+V_i/2$	0
$S_4, S_6, S_2$ iletimde $S_1, S_3, S_5$ kesimde	8	$-V_i/2$	$-V_i/2$	$-V_i/2$	0

### 2.3.2.2 Darbe Genişlik Modülasyonu

Eviricilerde kullanılan darbe genişlik modülasyonunda (PWM), anahtarlama elemanları her bir periyot boyunca birden fazla darbe kullanır. PWM eviricilerde bir faza ait gerilim, üst ve alt kolun iletimde olmasına göre alternatif yarım periyot içinde doğru akım kaynağının geriliminin pozitif ve negatif değerlerini almaktadır. Bir periyottaki darbe sayısını artırmaktaki amaç, çıkış geriliminin genliğini kontrol etmek, THD'nin ve temel bileşene yakın harmoniklerin azaltılmasını sağlamaktır (Küçük, 2007: 77).

PWM eviricideki anahtarlar kare dalgaya göre daha yüksek frekanslarda anahtarlanır. Bu nedenle PWM eviricilerin filtreleri daha basit, ucuz, hafif ve küçüktürler. PWM eviricinin dezavantajı ise kontrol devrelerinin karmaşık olması ve sürekli anahtarlardan dolayı kayıplarının artmasıdır.

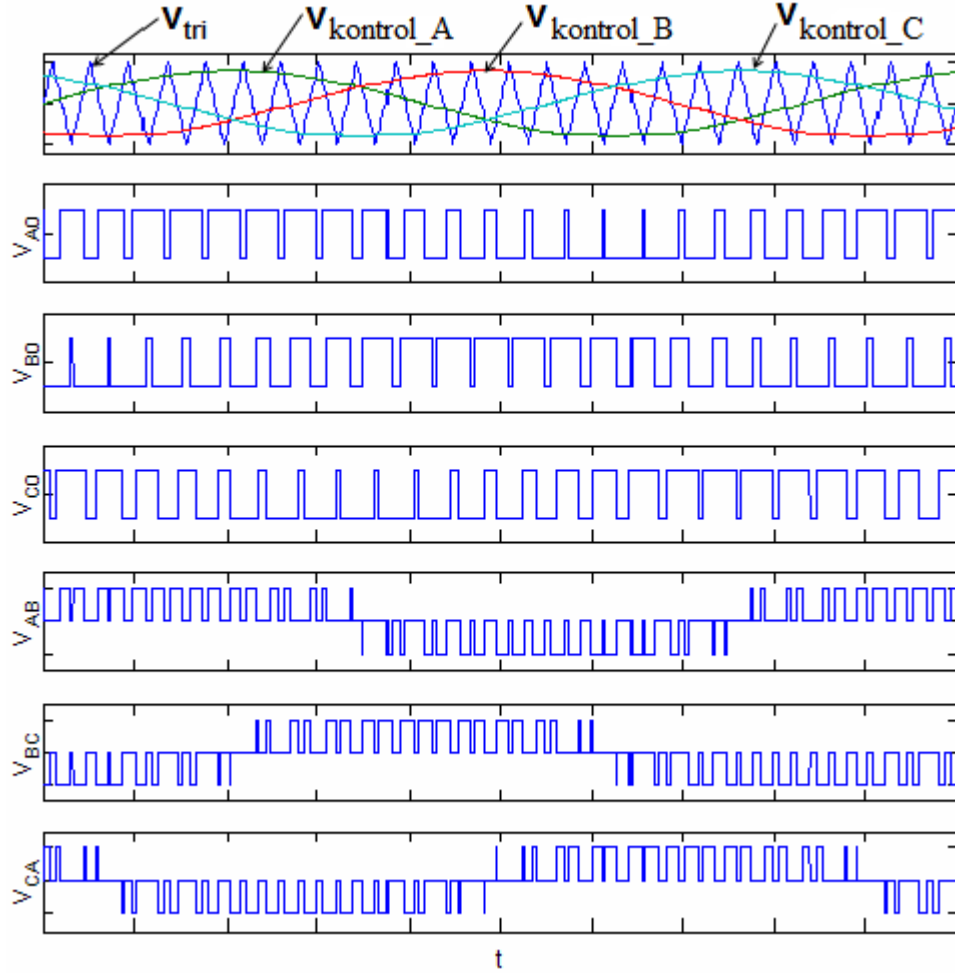
PWM eviricilerin çıkışında harmoniklerden kaynaklanan bozulma, çıkış filtresinden, ölü zamanlardan, anahtarlama elemanları üzerindeki gerilim düşümlerinden veya doğru akım kaynak gerilimindeki değişimlerden kaynaklanır.

PWM eviricilerde her bir periyottaki darbeler birbirine eşit olabileceği gibi birbirinden farklıda olabilirler.

PWM eviricilerde yüksek anahtarlama hızları gerektiğinden genellikle IGBT kullanılır. Anahtarlama elemanı olarak tristör tercih edilmemesinin nedeni, tristörler için sürme sinyalinden sonra tristörün kesime gitmesi içinde belirli bir süre beklenmesi gerektiğidir.

Çıkış geriliminin dalga şeklinin sinüsoidale yaklaştırılması için birçok PWM tekniği geliştirilmiştir. En çok kullanılan PWM tekniklerinden biri sinüsoidal PWM tekniğidir. Sinüsoidal PWM'de, aynı taşıyıcı üçgen dalganın referans alınan sinüsoidal sinyaller ile karşılaştırılması prensibine dayanır (Kazmierkowski, Krishnan and Blaabjerg, 2002: 92).

Şekil 2.15'te üç faz sinüsoidal PWM'in dalga şekilleri gösterilmiştir. Burada,  $V_{tri}$ , taşıyıcı dalga sinyalini,  $V_{kontrol}$ , kontrol sinyalini,  $V_{A0}$ ,  $V_{B0}$ ,  $V_{C0}$ , evirici çıkışı faz-nötr arası gerilimlerini,  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$ ,  $V_{CA}$ , evirici çıkışı faz-faz arası gerilimlerini gösterir.



Şekil 2.15. Üç fazlı sinüsoidal PWM eviricinin dalga şekilleri (Jung, 2005: 26).

Evirici çıkış gerilimi dalga şekli değiştirilerek gerilim kontrollü eviricinin kendi içinde yapılır. Evirici çıkışlarındaki gerilim dalgaları birbirinin aynı olmalı ve aralarında  $120^\circ$  faz farkı bulunmalıdır. Karşılaştırıcı çıkışlarında elde edilen sinyallerin birbirinin aynı olması gerekir. Her evirici fazının veya yarım köprüsünün birer karşılaştırıcısı vardır. Şekil 2.15'te görüldüğü üzere bu eleman, o faza ait referans dalgası ile bütün fazlar için aynı olan simetrik üçgen dalgayı karşılaştırır. Çıkış geriliminin kontrolü, sinüsoidal dalga genliğinin değiştirilmesi ile sağlanır. Böylece çıkış gerilimi dalga şeklindeki darbe genişlikleri ayarlanmış olur. Aynı zamanda sinüsoidal dalga örnekleri de aynen korunur.

Büyük taşıyıcı oranlarında, sinüsoidal PWM evirici en etkili harmonikleri yüksek dereceden olan, kaliteli bir çıkış gerilimi dalga şekli verir.

Taşıyıcı dalga ile referans dalganın karşılaştırılması sonucunda, iki kutuplu anahtarlama ya da tek kutuplu anahtarlama olmak üzere iki çeşit PWM elde edilir.  $f_s = V_{tri}$ 'nin frekansı (PWM frekansı) ,  $f_1 = V_{kontrol}$ 'un frekansı (temel frekans)

olmak üzere, iki kutuplu anahtarlama evirici çıkış gerilimi aşağıdaki şekilde belirlenir (Jung, 2005: 26);

$$V_{kontrol} > V_{tri} \Rightarrow V_{A0} = V_{dc}/2 \quad (2.1)$$

$$V_{kontrol} < V_{tri} \Rightarrow V_{A0} = -V_{dc}/2 \quad (2.2)$$

Faz faz arası gerilimleri;

$$V_{AB} = V_{A0} - V_{B0}, V_{BC} = V_{B0} - V_{C0}, V_{CA} = V_{C0} - V_{A0} \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilebilir. PWM darbeleri hem pozitif hem de negatif değerler aldığı için iki kutuplu anahtarlama denilmektedir.

Tek kutuplu anahtarlama ise üçgen taşıyıcı dalga pozitif ve negatif referans ile karşılaştırılır.

$$V_{kontrol} > V_{tri} \Rightarrow V_{A0} = V_{dc}/2 \quad (2.4)$$

$$V_{kontrol} < V_{tri} \Rightarrow V_{A0} = 0 \quad (2.5)$$

$$-V_{kontrol} > V_{tri} \Rightarrow V_{A0} = -V_{dc}/2 \quad (2.6)$$

$$-V_{kontrol} < V_{tri} \Rightarrow V_{A0} = 0 \quad (2.7)$$

### 2.3.3 Akü

Akü, doğru akım halindeki elektrik enerjisini kimyasal enerjiye çevirerek depo eden ve istenildiğinde bu kimyasal enerjiyi doğru akım halinde elektrik enerjisi olarak veren kaynaktır (Bayram, 2007: 79).

Akünün üzerinde depolayabileceği enerji miktarına kapasite denir. Birimi ampersaat'tir ve "Ah" ile gösterilir. Günümüzde aküler 6 V'lık veya 12 V'lık olarak değişik kapasitede yapılmaktadır.

Kesintisiz güç kaynaklarında kullanılan akülerin, küçük, hafif ve ucuz olması istenir. Çünkü aküler, kesintisiz güç kaynağının en ağır, en pahalı ve en fazla yer tutan elemanlarıdır.

Kesintisiz güç kaynaklarında genel olarak iki tip akü kullanılır.

- Kurşun asit aküler
- Nikel- kadmiyum aküler



### 2.3.3.1 Kurşun Asit Akü

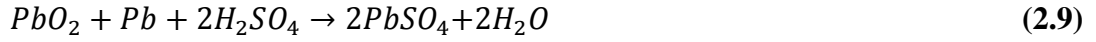
Kurşun asit aküler gerilimlerine göre çeşitli sayılarda hücrelerden oluşmakta her hücre kurşun elektrolitleri içermektedir. Kurşun asit aküler, sabit gerilim ve sabit akım metodu ile şarj edilir. Deşarj olmuş bir akünün şarjı esnasında sabit akım prensibi uygulanır. Bu sırada V terminal gerilimi yavaş yavaş artar. Belli bir süre şarjdan sonra terminal V gerilimi hızlıca artmaya başlar. Keskin artış, gazlanma konumunda oluşur. Bu gazlanma hali, elektrolitleri içeren suyun elektrolizinden kaynaklanır. Bu esnada sabit akım ile şarja son verilerek sabit gerilim ile şarj işlemi devam ettirilir.

Elektroliz, pozitif plakada  $O_2$  gazının, negatif plakada  $H_2$  gazının oluşmasına sebep olur.

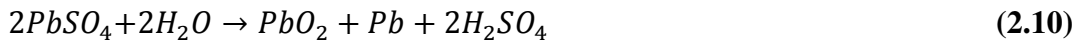


Bu süre içinde gaz basıncını azaltmak için kataliz işlemi uygulanır. Yüksek gazlanma koşulları altında akü şarj olurken akünün gaz basıncı ve sıcaklığı artmaya devam eder. Oluşan bu sıcaklık ve gaz, akülerin ömrünü azaltır ve patlama tehlikesine sebep olurlar. Gaz halindeki terminal gerilimi akü tipine bağlı olarak değişir. Bu değer, kurşun asit akü için (12 V - 6 hücreli) 13,6 V'dır.

Kurşun asitli akülerin deşarj anı kimyasal reaksiyonu aşağıdaki gibidir;

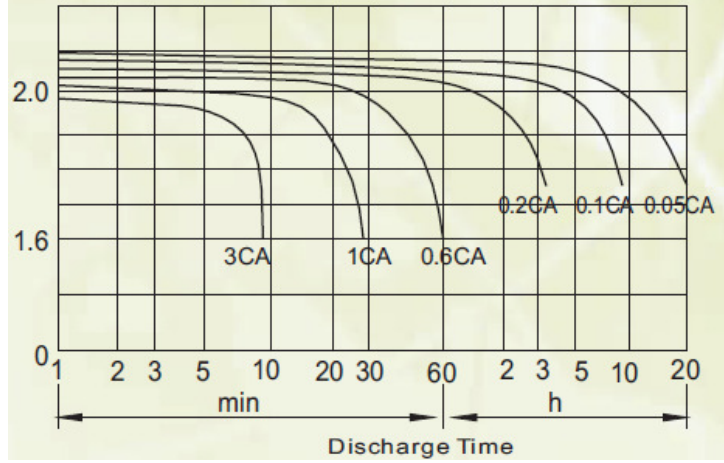


Şarj esnasındaki kimyasal reaksiyon ise deşarj denkleminin (2.9) tersidir.



Şekil 2.16'da örnek olarak kurşun asitli tam bakımsız kuru tip akünün  $25C^\circ$ 'de hücre gerilimine göre karakteristik deşarj eğrisi görülmektedir.

KGK'lerde genellikle 12V'luk aküler kullanılmaktadır. Akü grubundaki herbir akü 13,5V şarjda tutulur. Akü kesme gerilimi olarak 10,5V olarak ayarlanırlar.



Şekil 2.16. VRLA akülerin deşarj eğrisi.

VRLA (Valve Regulated Lead Acid) akülerin kapasitesi, kullanım ömürlerinin ilk %5'i boyunca artan bir özellik gösterir. Bu ömrün %70'lik basamağına kadar %100 kapasite devam eder. Kullanım ömrünün %80'inden sonra ise akü kapasitesi düşme eğilimi gösterir. Bundan sonra kalan süreçte akü kullanım ömrünü tamamlamış demektir.

VRLA teknolojisine göre üretilmiş akülerin belli başlı özellikleri aşağıdaki gibidir (Kiehne, 2003).

- Bakım gerektirmez
- Yatay veya dikey pozisyonda dahi asit sızdırmaz
- Yüksek güvenlidir, elektrolit sızdırması yoktur
- Uzun kullanım ömrüne sahiptir
- Boşta kapasite kaybı çok düşüktür
- Tamamen oksijen rekombinasyonu ile çalıştığından gaz sızdırmaz
- Starter akülere göre daha uzun ömürlüdür, ağırlık ve boyutları da daha küçüktür.

Akülerin ömrünü etkileyen en önemli parametre ise sıcaklıktır. Ayrıntılı testler göstermiştir ki çalışma ortam sıcaklığının arttığı her  $5^{\circ}C$  için akü ömrü %10 kısalmaktadır. Bu yüzden KGK akülerinin bulunacağı ortam sıcaklığının  $20 - 25^{\circ}C$  olması akülerin dizayn ömürlerine yakın kullanılmasını sağlayacaktır.

### 2.3.3.2 Nikel Kadmiyum Akü

Nikel Kadmiyum (Ni-Cd) aküler temelde iki tip olarak üretilirler. Birinci tip açık hücrelidir ve dik durumda çalıştırılabilir. Bunlar oldukça yüksek kapasitelidirler

ve sularının tamamlanması için kapakları vardır. İkinci tip kapalı hücreliler ise gaz sızdırmaz ve bakım gerektirmezler. Bu tip aküler sanayide kullanılmaktadır.

Nikel kadmiyum akülerin şarj edilmesi için birçok devre tasarımı yapılmıştır. Bu devrelerde, akülerin otomatik olarak şarj edilmesi amaçlanmıştır. Basit yapıda tasarlanan ve denetleme kontrolleri zayıf olan devrelerde yaşanacak problemler, akülerin kısa bir süre içinde zarar göreceği biçimde doldurulmasına sebep olurlar. Bu durum kesintisiz güç kaynaklarında sürekli tampon çalışmada kalan aküler için bir sorundur. Bu yüzden genelde otomatik Ni-Cd akü şarj edici devrelerinde hata oranının en aza indirildiği denetleme kontrollerinin en üst düzeyde yapıldığı sistemler kullanılmalıdır.

Nikel kadmiyum aküler kurşun asit akülere göre sıcaklığa daha dayanıklıdır. Yüksek sıcaklıklarda akülerin ömürleri, kurşun asitli akülerde hızlı bir şekilde azalırken nikel kadmiyum akülerde daha yavaş azalır. Kullanım ömrü ve fiyat açısından karşılaştırıldığında kurşun asitli aküler nikel kadmiyum akülere göre daha çok tercih edilmektedir (Akgün, 2007: 136).

#### **2.3.4 Statik ve Manuel By-pass**

Statik by-pass ünitesi, KGK çıkışının evirici üzerinden veya direk olarak şebekeden beslenmesini sağlayan birimdir. Statik by-pass kısmında hızlı anahtarlama ihtiyacından dolayı genellikle tristör kullanılır. Statik by-pass'ın birinci amacı yükte oluşabilecek kısa devrelerde veya aşırı yüklenme durumlarında evirici bölümünün zarar görmesini engellemektir. İkinci amacı ise eviricide oluşabilecek herhangi bir arızadan dolayı KGK çıkışındaki limit dışı gerilim ve frekans değişimlerini algılayarak yükü direk olarak şebekeden beslemektir.

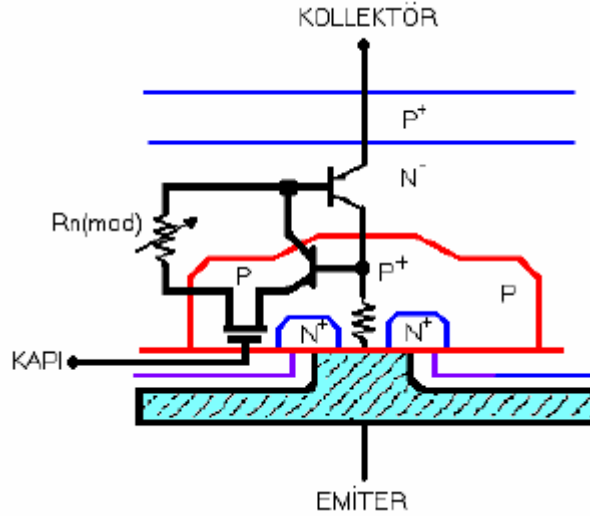
KGK'nin arıza yapması ya da bakım esnasında yükün şebekeye aktarılması için manuel by-pass şalteri kullanılır. Manuel by-pass anahtarı iki konumlu bir şalterdir. Bu şalter ile geçiş anında, şebeke ile KGK'nin gerilim ve faz olarak birbirinden çok farklı olmamasına dikkat edilmelidir.

### 3. IGBT DOĞRULTUCULU STATİK KESİNTİSİZ GÜÇ KAYNAKLARI

IGBT doğrultuculu SKGK'lerde doğrultucu bölümünde tristör yerine IGBT kullanılmaktadır. IGBT doğrultuculu SKGK'ler tristörlü doğrultucularla kıyaslandığında, özellikle güç faktörü ve harmonik değerleri açısından ön plana çıkmaktadır. IGBT doğrultuculu SKGK cihazı üzerinde yapılan ölçümlerde Tektronix DPO 2024 model osiloskop cihazı kullanılmıştır (EK 1).

#### 3.1 IGBT'nin Yapısı ve Özellikleri

Gerilim kontrollü bir eleman olan İzole Kapılı Bipolar Transistörün (Insulated Gate Bipolar Transistor-IGBT) yapısı Şekil 3.1'de görülmektedir.

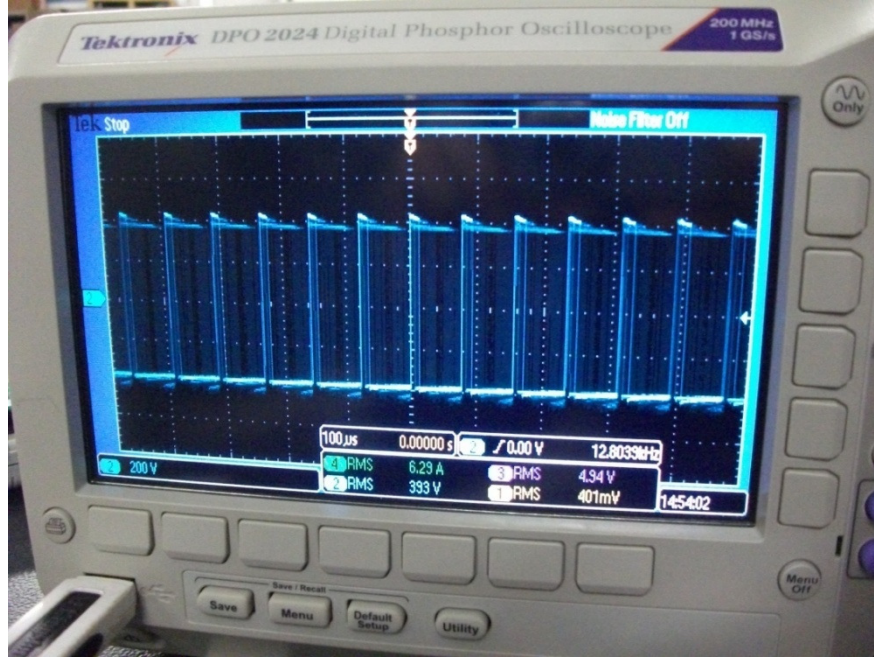


Şekil 3.1. IGBT iç yapısı.

Bipolar Transistör (BJT) ve MOSFET'in üstün taraflarının IGBT'de bir araya getirilmesi amaçlanmıştır. Yapısındaki MOSFET nedeniyle giriş empedansı yüksek, BJT yapısı nedeniyle de iletimdeki gerilim düşümü azdır. IGBT'nin anahtarlama hızları MOSFET'ten düşük BJT'den yüksektir.

IGBT'nin ilettime sokulup çıkarılması için kaçak kapasitelerinin şarj ve deşarj edilmesi gerekir. IGBT'de kaçak kapasiteler, aynı nominal değere sahip MOSFET'e göre oldukça düşüktür. 200V 500KHz'e kadar olan uygulamalarda IGBT'deki

kapasitif kayıplar ihmal edilebilir düzeydedir. IGBT'ler sürme açısından MOSFET gibi davranırken güç iletimi açısından BJT gibi davranır. IGBT'lerin sürmesi kolay, verimi yüksektir ("Megep", 2007). Şekil 3.2'de IGBT sürme sinyali görülmektedir.



Şekil 3.2. IGBT sürme sinyali.

Yarı iletken teknolojisindeki ilerlemeler, giderek artan hassas yapılar ve hızlı anahtarlama özellikleri IGBT'lerin gelişmesine olanak sağlamıştır. Uygulamalarda kısa devre korumasına duyulan ihtiyaç fiziksel limiti de belirlemektedir. Sıcaklıklar arttıkça açma-kapama durumu (off-state) akımları katlanarak artmaktadır. Silikon alanından yüksek verimli güç elde etmek için, IGBT ve ters diyodun azami jonksiyon sıcaklıkları arttırılmıştır (Grasshoff, 2010).

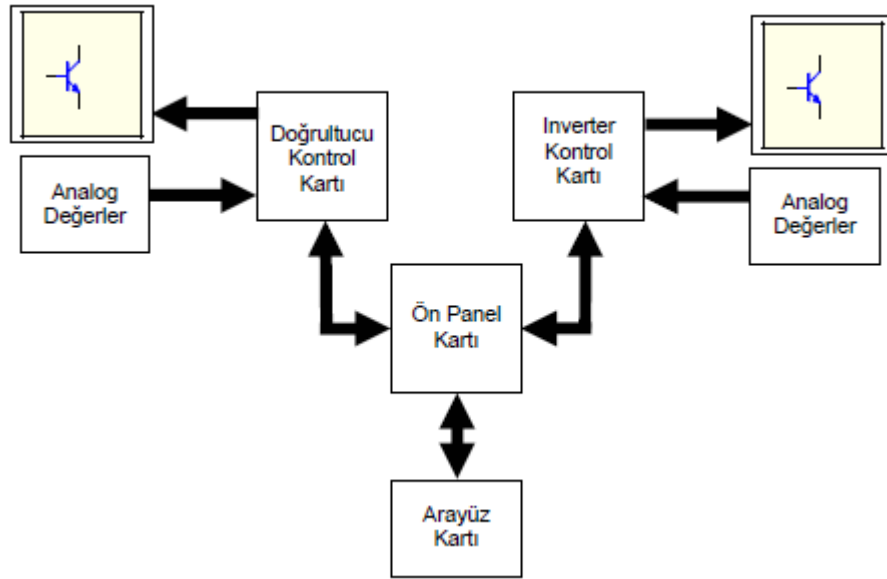
Altı adet IGBT'yi içinde barındıran kompakt modüller geliştirilmiştir. Şekil 3.3'te altı IGBT'li kompakt modül görülmektedir.



Şekil 3.3. IGBT modül.

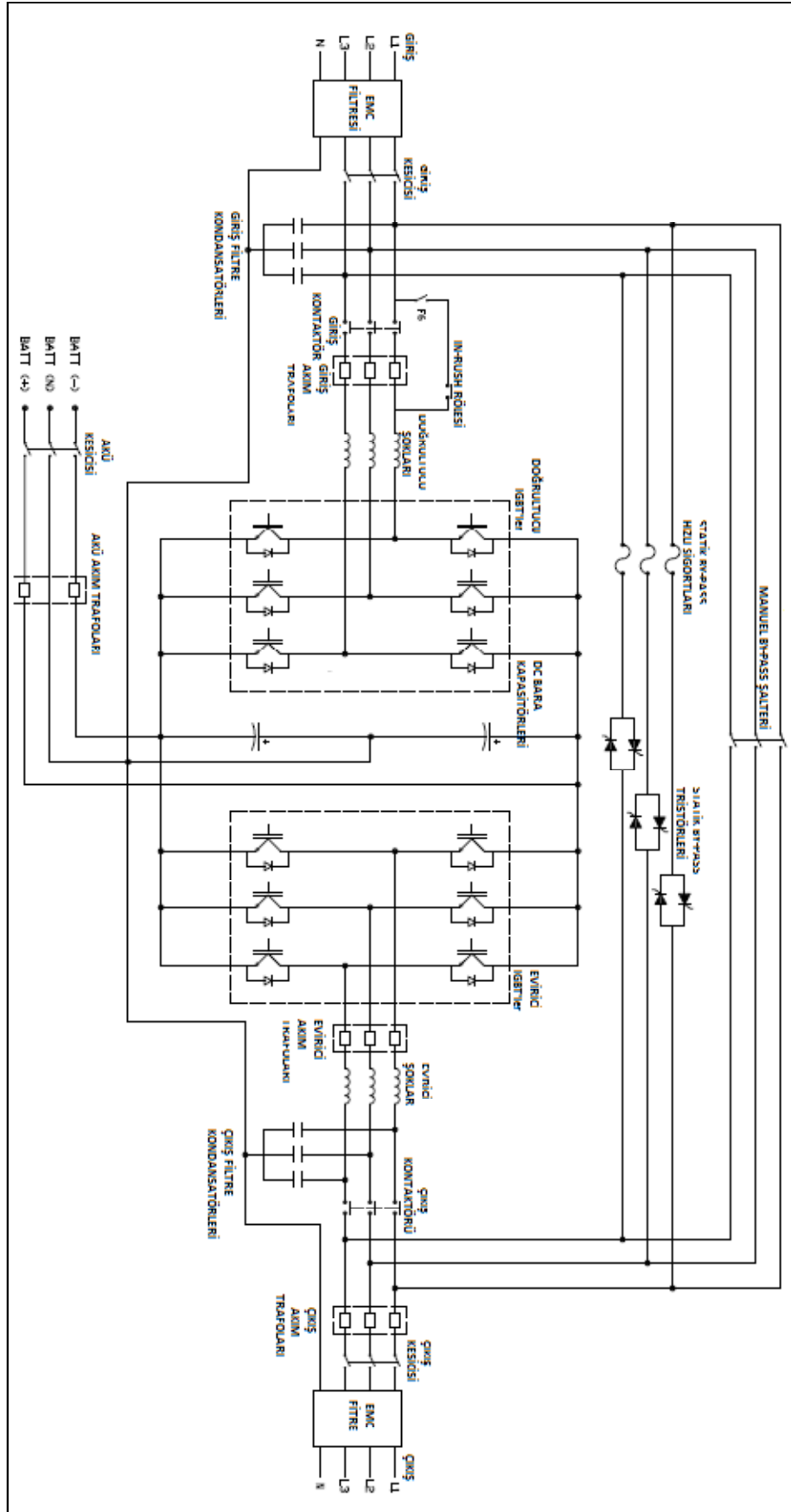
### 3.2 IGBT Doğrultuculu SKGK'nin Çalışması

İncelemelerin yapıldığı IGBT Doğrultuculu SKGK'nin kontrol elektroniği Şekil 3.4'de görülmektedir. KGK'nin kontrol düzeneğinde doğrultucu, evirici ve ön panel birbiriyle haberleşerek gerekli komutları üretmektedir.



Şekil 3.4. IGBT doğrultuculu statik kesintisiz güç kaynağı kontrol elektroniği.

IGBT doğrultuculu üç fazlı SKGK'nin blok diyagramı Şekil 3.5'te görülmektedir. SKGK cihazının girişinde ve çıkışında LC filtreleri kullanılmıştır. Doğrultucuda IGBT'lerden faydalanılmıştır. Statik by-pass da anahtarlama için tristör, manuel by-pass da ise iki konumlu şalter kullanılmıştır. DC bara nötr orta uçludur. Aküler DC baraya direkt bağlıdır, ek bir akü şarj ünitesi yoktur.

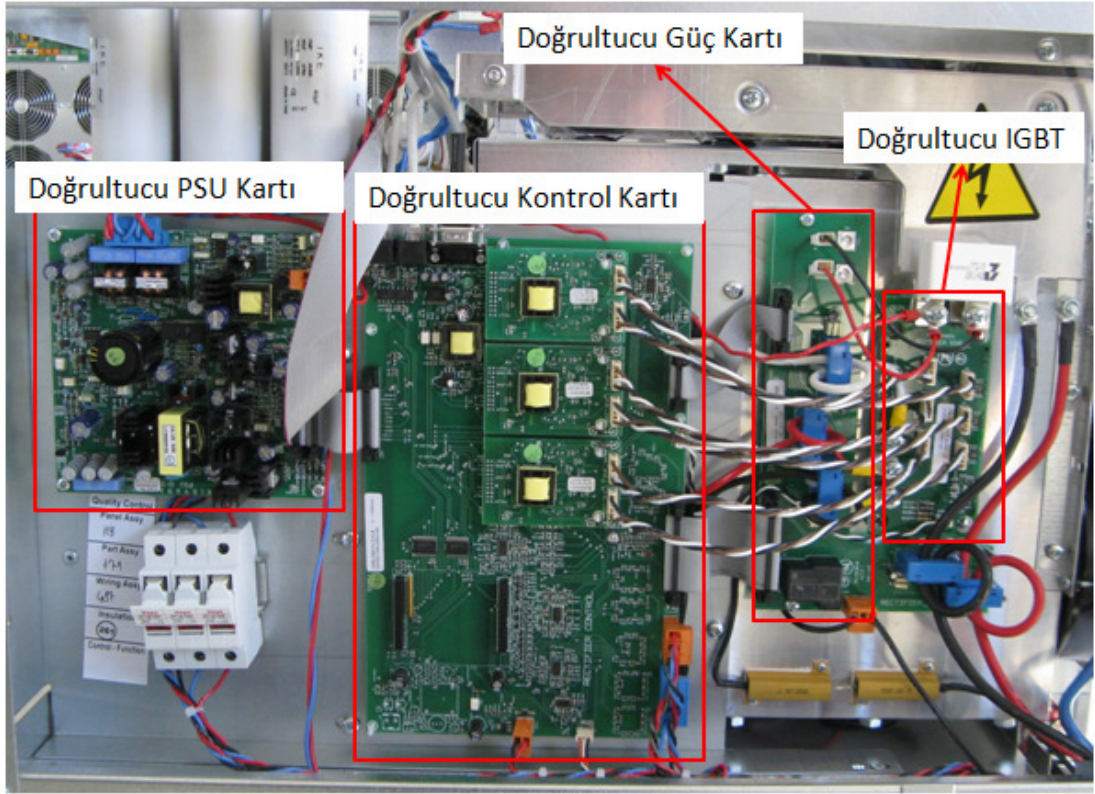


Şekil 3.5. IGBT doğrultuculu üç fazlı statik kesintisiz güç kaynağı blok diyagramı.



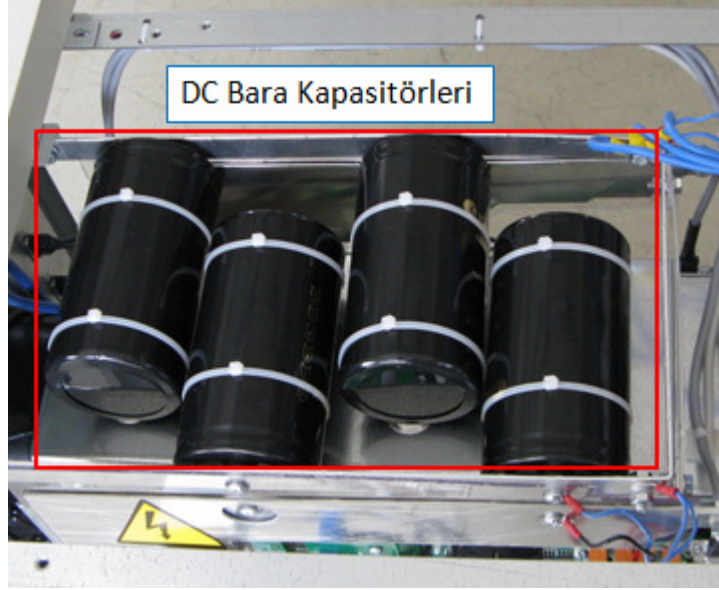
SKGK cihazında üç fazlı IGBT doğrultucu kullanılmıştır. Bu tip doğrultucular altı IGBT'li anahtar gerektirir. Doğrultucuda endüktans ve kapasitörler, yüksek frekans anahtarlama frekanslarını süzerler. SKGK çıkışında istenilen seviyede gerilim elde edilebilmesi için DC bara gerilimi, giriş faz-faz arası geriliminin tepe değerine eşit veya daha büyük olmalıdır. Uygulamada, doğrultucu çıkışındaki DC bara geriliminin bir miktar daha yükseltilmesi gerekebilir. Bu tip doğrultuculara üç faz AC'den DC'ye artıran doğrultuculara denilmektedir. Doğrultucuların kontrolü yüksek frekans PWM ile yapılır.

İncelemelerin yapıldığı SKGK cihazının doğrultucu bölümü Şekil 3.6'da, doğrultucu çıkışındaki DC bara kondansatörleri ise Şekil 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.6. IGBT doğrultuculu SKGK cihazının doğrultucu bölümü.

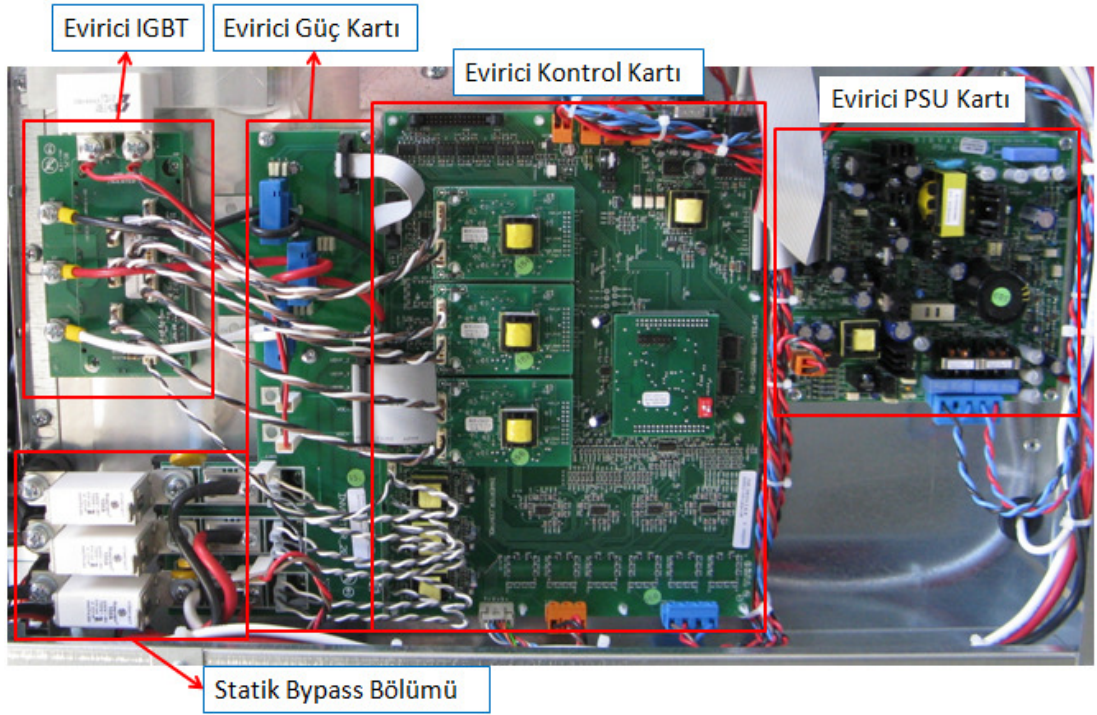




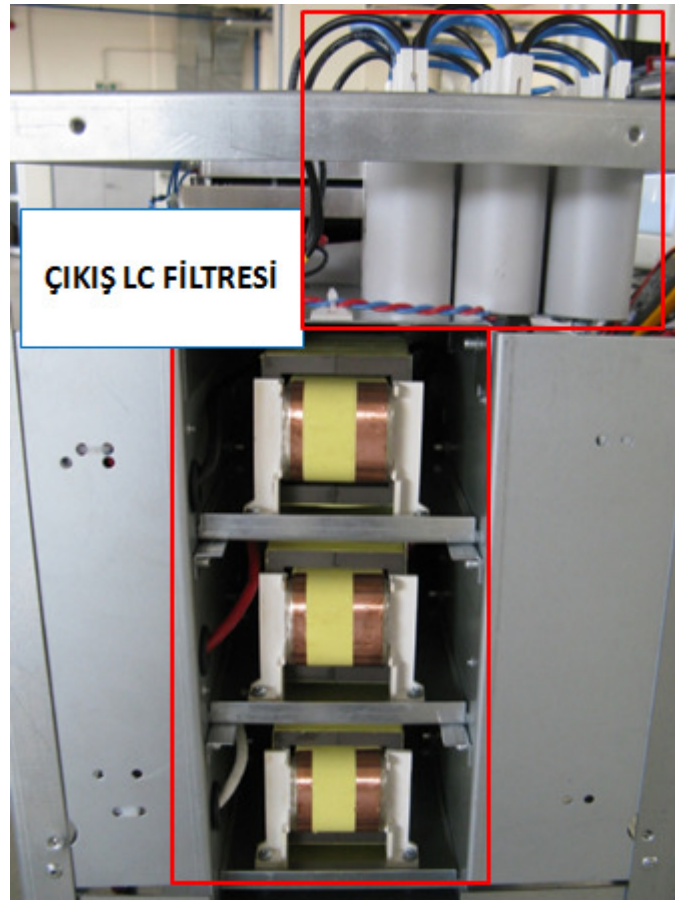
Şekil 3.7. SKGK cihazının DC bara bölümü.

Şekil 3.5'te gösterilen SKGK'nin evirici kısmında, trafosuz üç faz dört telli DC barası orta noktalı gerilim kaynaklı evirici kullanılmıştır. SKGK cihazının evirici kısmında PWM tekniğinden faydalanılmıştır. Eviricide kullanılan IGBT'lerin uygun bir biçimde anahtarlanması sonucunda istenilen seviyede AC gerilim elde edilir. Evirici çıkışındaki işaretin içinde bulunan yüksek frekanslı bileşenler LC filtresiyle azaltılır.

İncelemelerin yapıldığı SKGK cihazının evirici bölümü Şekil 3.8'de, evirici çıkışında kullanılan LC filtresi Şekil 3.9'da görülmektedir.



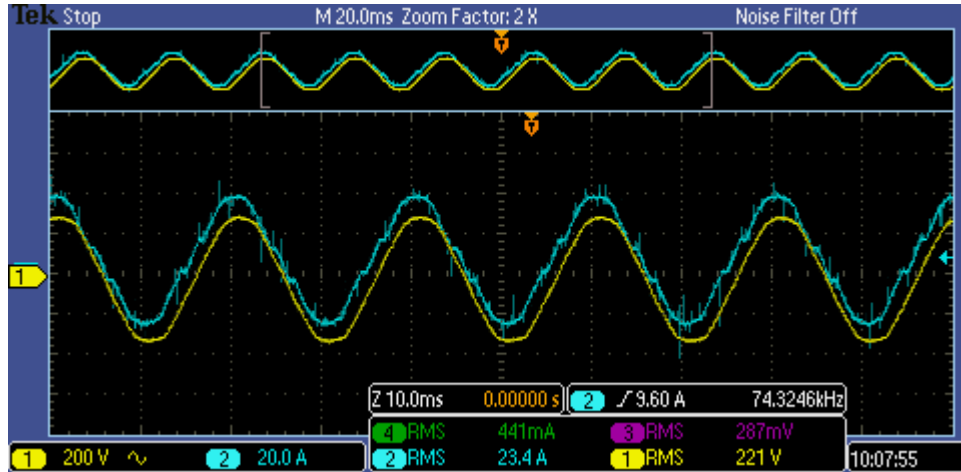
Şekil 3.8. IGBT doğrultuculu SKGK cihazının evirici bölümü.



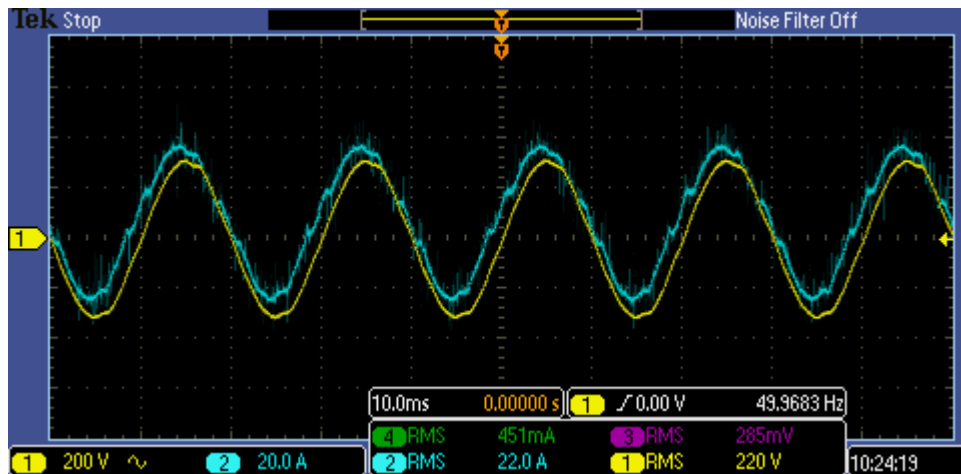
Şekil 3.9. IGBT doğrultuculu SKGK cihazının çıkış filtre bölümü (İnform, 2011)

30KVA gücünde IGBT doğrultuculu üç fazlı SKGK cihazının incelemesi yapılmıştır. SKGK cihazına %50 oranında yük verilmiştir.

Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de SKGK girişindeki akım ve gerilimin doğrusal yük ve doğrusal olmayan yük altındaki dalga şekilleri görülmektedir. SKGK’nin doğrusal yük altındaki akım ve gerilim dalga şekilleri sinüsoidale yakındır. Doğrusal olmayan yük altında dalga şekilleri bir miktar bozulmuştur ve özellikle gerilimin tepe değerlerinde çökmeler görülmektedir.



Şekil 3.10. Doğrusal yükte KGK giriş gerilim ve akımın dalga şekli



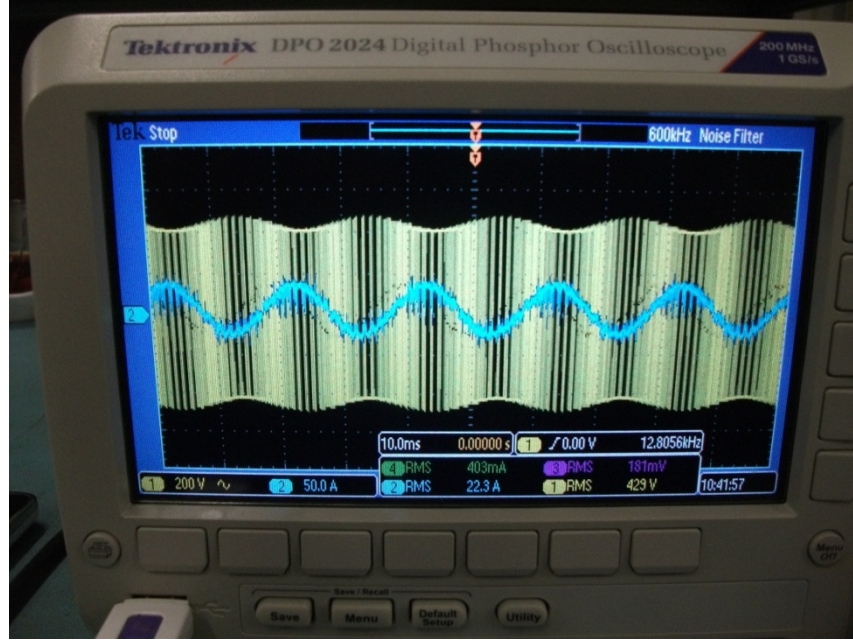
Şekil 3.11. Doğrusal olmayan yükte KGK giriş gerilim ve akımın dalga şekli.

Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’de SKGK’nin evirici çıkışındaki akım ve gerilimin doğrusal yük ve doğrusal olmayan yük altındaki dalga şekilleri görülmektedir. Evirici çıkışındaki gerilimlerin dalga şekli kare dalgaya benzemektedir

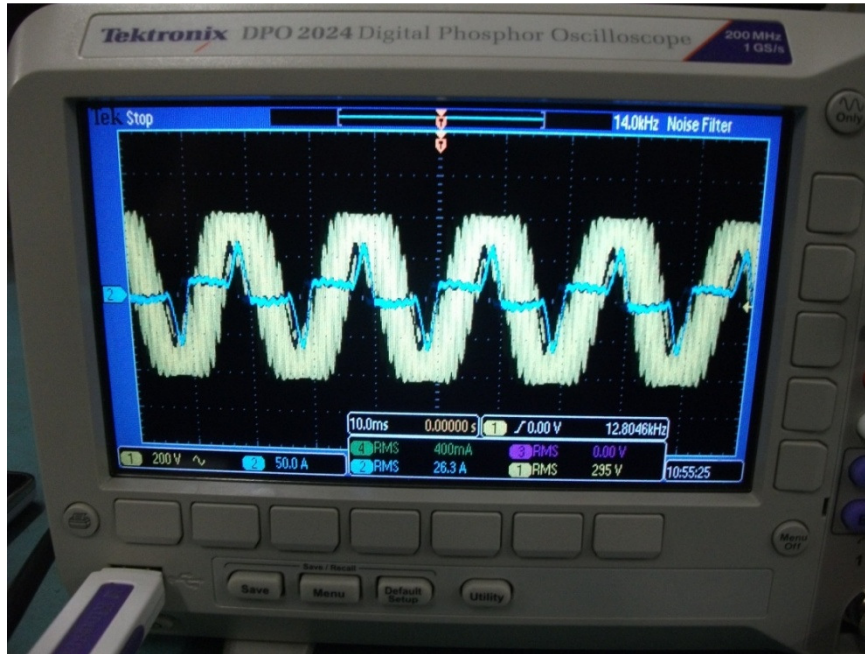
Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’te SKGK’nin akım ve gerilimin dalga şekilleri görülmektedir. Evirici çıkışındaki dalga şekilleri LC filtreden geçirilerek çıkışa



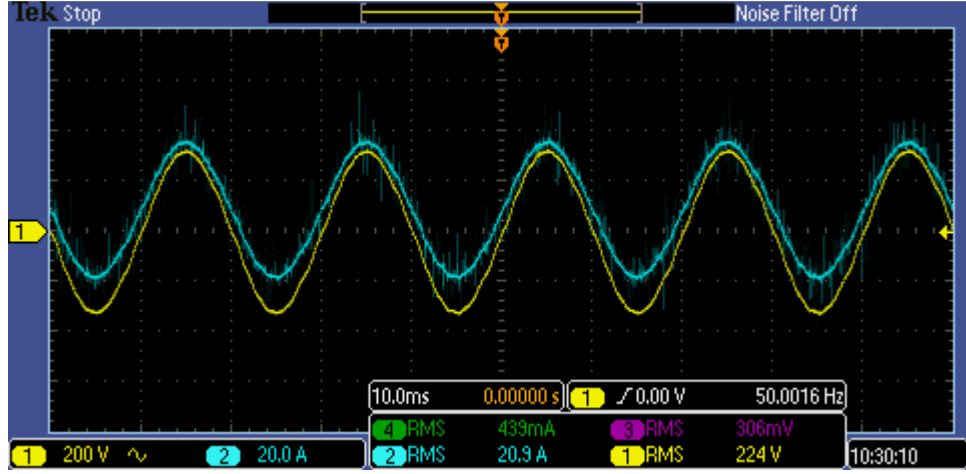
verilmektedir. Kare dalgaya benzeyen evirici gerilimi SKGK çıkışında sinüsoidal forma dönmüştür. Doğrusal olmayan yük altında akımın dalga şekli büyük oranda bozulmuştur. SKGK çıkışında akım ve gerilim arasında faz farkı yoktur.



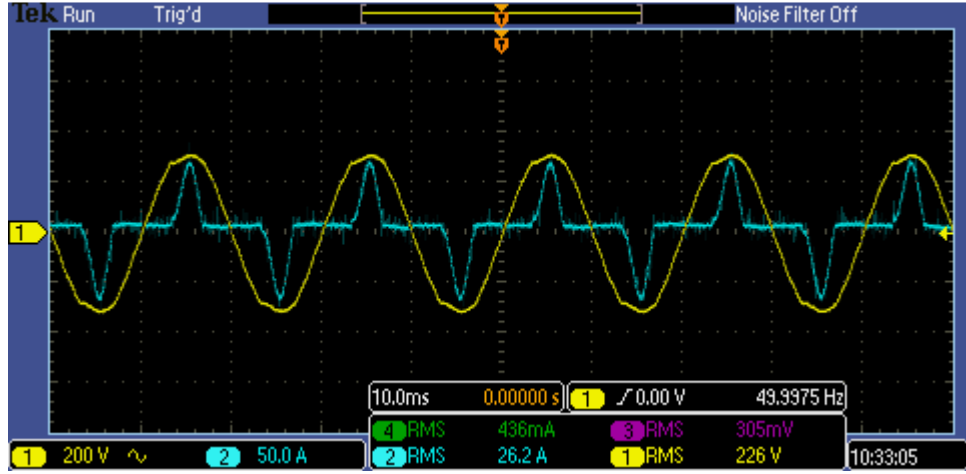
Şekil 3.12. Doğrusal yükte evirici çıkışı akım ve gerilim şekli.



Şekil 3.13. Doğrusal olmayan yükte evirici çıkışı akım ve gerilim şekli.



Şekil 3.14. Doğrusal yükte KGK çıkış akım ve gerilim şekli.



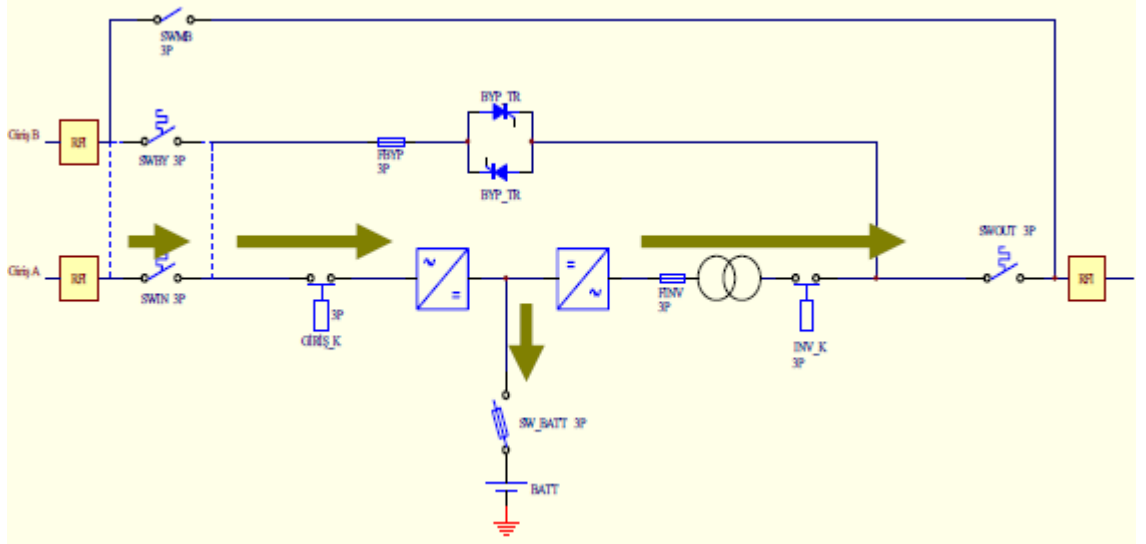
Şekil 3.15. Doğrusal olmayan yükte KGK çıkış akım ve gerilim şekli.

### 3.2.1 Çalışma Modları

SKGK'ler genel olarak şebekeden, aküden ve statik by-passtan olmak üzere üç çeşit modda çalışmaktadır.

Şebekeden çalışma modunda, doğrultucu bölümü şebekeden gelen AC gerilimi düzgün bir DC gerilime çevirir. Evirici bölümünde, DC gerilim AC gerilime dönüştürülür. IGBT doğrultuculu üç fazlı SKGK'nin şebekeden çalışma modu Şekil 3.16'da görülmektedir.

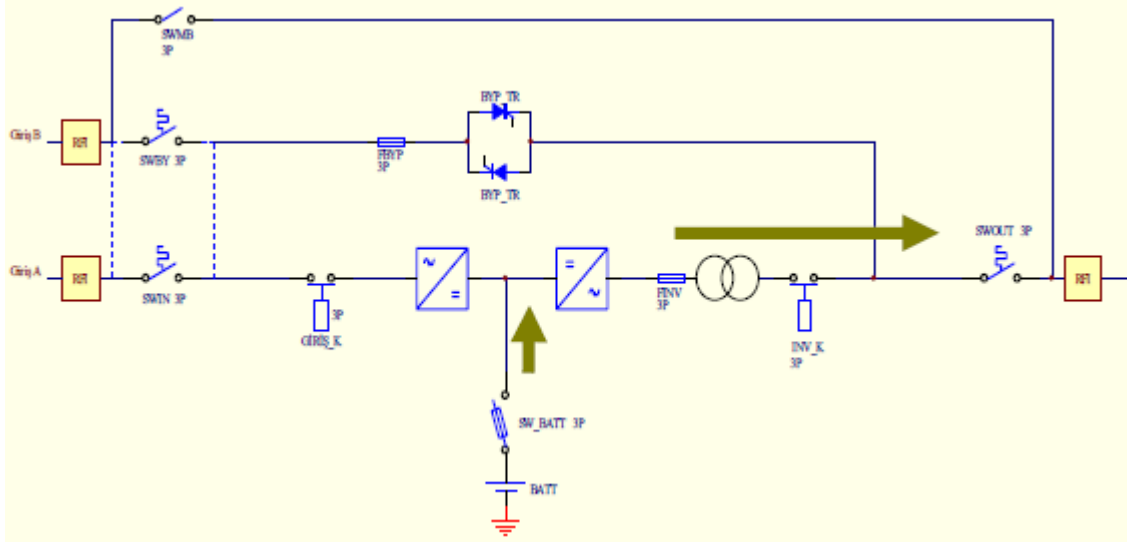
Bu çalışma modunda yüke evirici üzerinden elektriksel parazitleri olmayan kesintisiz temiz enerji verilir. Aküler, akü şarj üniteleri tarafından şarj edilir. Şebekeden çalışma modunda giriş frekans değeri çıkış frekans değeriyle aynıdır, frekansta bir çevrim söz konusu değildir.



Şekil 3.16. Şebekeden çalışma modu.

Aküden çalışma modunda, şebekenin gerilim veya frekans değerleri nominal değerlerin dışında ise evirici bölümü gerekli olan DC gerilimi akülerden sağlar. Şebeke modundan akü moduna geçildiğinde çıkışta kesinti yaşanmaz. IGBT doğrultuculu üç fazlı SKGK'nin aküden çalışma modu Şekil 3.17'de görülmektedir.

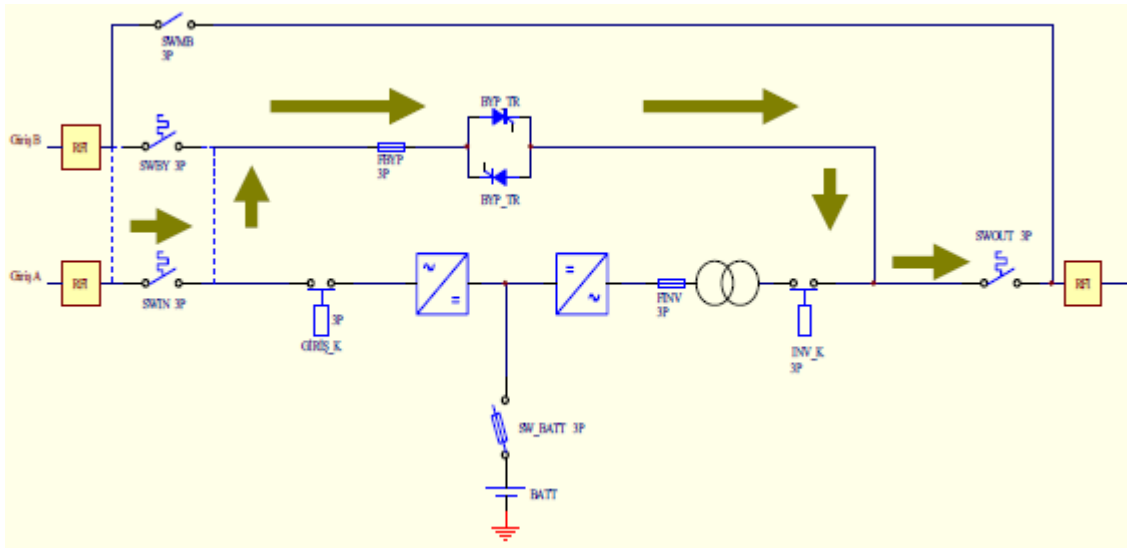
Aküden çalışma süresi akü amper değerleriyle belirlenir. Akü gerilimi, akü kesme gerilim değerine düştüğünde, SKGK çıkışını enerjisiz bırakır. Akü kesme değeri, akü üreticilerinin belirlediği akülerin bozulmadan deşarj olabilecekleri gerilim değeridir. 12V değerindeki aküler için akü kesme değeri genellikle 10.5V olarak ayarlanmaktadır. Şebeke tarafındaki gerilim ve frekans değerleri uygun seviyeye geldiğinde aküden çalışma modundan şebekeden çalışma moduna geçiş yapılır. Bu esnada yük tarafında herhangi bir kesinti yaşanmaz.



Şekil 3.17. Aküden çalışma modu.

Statik by-pass çalışma modunda, evirici arızalandığında veya çıkışta aşırı yük oluştuğunda, yük statik by-pass anahtarı vasıtasıyla şebeke tarafından beslenir. Bu esnada şebeke gerilim ve frekans değerinin nominal değerler içerisinde olması gereklidir. Statik by-pass hattı şebeke yerine bir başka kaynaktan da beslenebilir. IGBT doğrultuculu üç fazlı SKGK'nin statik by-passtan çalışma modu Şekil 3.18'de görülmektedir.

Şebekeden çalışma durumunda evirici sürekli olarak olarak şebekeye senkron olmaya çalışmaktadır. Bu şekilde yük kesintisiz olarak statik by-pass üzerinden şebekeden beslenebilecektir.



Şekil 3.18. Statik by-passtan çalışma modu.

### 3.2.2 IGBT Doğrultuculu SKGK'nin Giriş Çıkış Değerleri

Tipik bir IGBT doğrultuculu SKGK'nin giriş çıkış değerleri Tablo 3.1'de görülmektedir. Crest faktörü; yük tarafından çekilen anlık peak akımıyla, rms akımı arasındaki orandır. Çoğu elektriksel uygulamanın crest faktörü "1" ile "2" arasında değişmektedir. Tablo 3.1'de crest faktörü 3'tür. Bu değer anlamı, peak akımı değeri rms değerinin 3 katı olan yüklerde bile SKGK sorunsuz çalışmakta istenilen değerlerde çıkışa enerji verebilmektedir. Tabloda giriş güç faktörü 0.99'dır. Giriş güç faktörü değeri ne kadar 1'e yakın olursa o oranda şebekeden daha düşük rms akım çekilir. Akımın şekli sinüsoidaldir. Böylece tesisat ve yatırım maliyetleri azalır. THDI değerinin  $\leq 4$  olması sayesinde şebekeden beslenen diğer yüklerinde zarar görmesinin önüne geçilmiştir.

**Tablo 3.1.** IGBT doğrultuculu SKGK'nin giriş çıkış değerleri (İnform, 2011)

<b>GİRİŞ</b>	
Faz Sayısı	3F+N+PE
Nominal Gerilim	380V / 400V / 415V
Gerilim Toleransı (%100 yükte)	-%15 +%27
Gerilim Toleransı (%64 yükte)	-%45 +%27
Gerilim Toleransı (%42 yükte)	-%64 +%27
Nominal Frekans (Hz)	50 Hz / 60 Hz
Frekans Toleransı (Online çalışmada)	$\pm$ %10
Giriş Akım THD	$\leq$ %4
Giriş Güç Faktörü	0.99
<b>ÇIKIŞ</b>	
Faz Sayısı	3F+N+PE
Nominal Gerilim	380V / 400V / 415V
"%100 yükte Statik Gerilim Regülasyonu Lineer Yük (online&akü modu)"	$<$ %1
Gerilim THD (lineer yükte)	$<$ %3
Crest Faktörü	3:1
Frekans (Hz)	50 Hz / 60 Hz
Frekans Toleransı	$\pm$ %0.01
Aşırı Yük Verim	%125 yükte 10 dakika, %150 yükte 1 dakika $\geq$ %94



## 4. HARMONİKLER

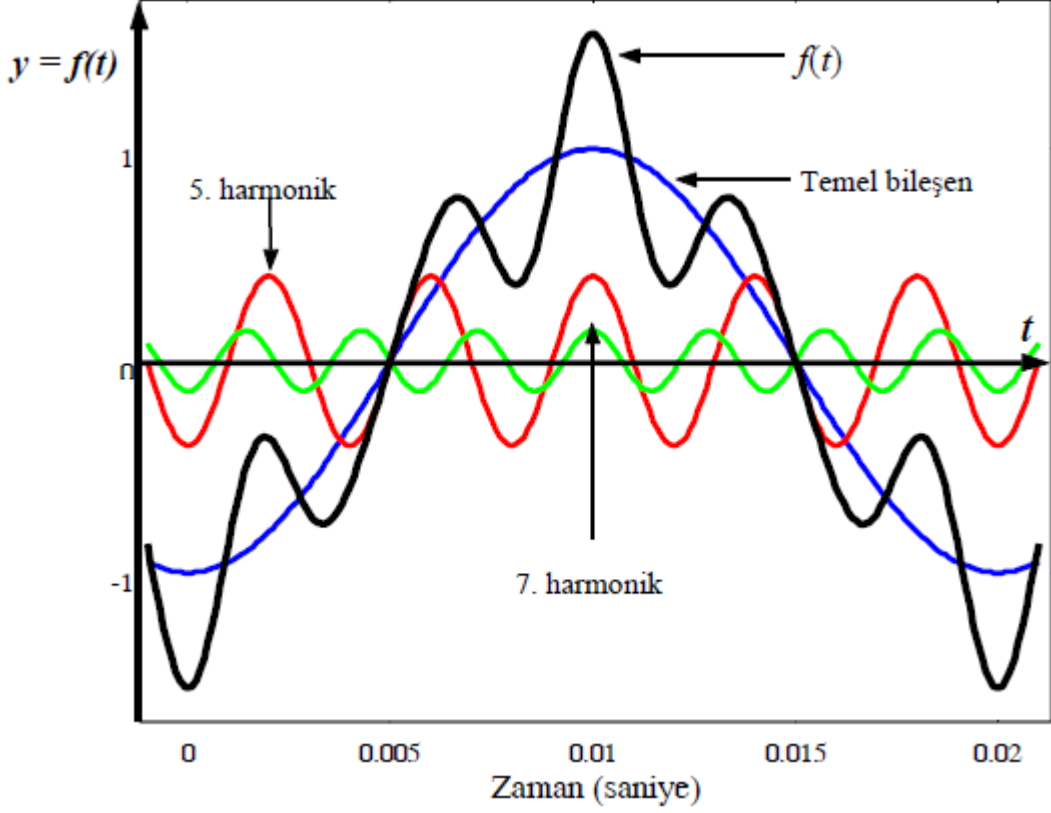
Doğrusal olmayan yüklerin çektikleri akımın dalga biçimleri, 50Hz frekansında sinüsoidal dalga şekli ile frekans ve genliği farklı diğer dalgaların toplamından meydana gelmektedir. Temel bileşen olarak adlandırılan dalga 50Hz frekansında olup bunun dışındaki frekanslarda olan diğer dalgalar “Harmonik” olarak adlandırılır (Akpınar, 2007)

Güç sistemlerinde uygulanan sinüs formundaki gerilime karşılık, sinüs formundan farklı şekillerde akım çeken ve doğrusal olmayan yük olarak adlandırılan tüketiciler harmonik kaynaklardır. Çekilen periyodik akım sinyalinin, farklı frekanstaki sinüs sinyallerinin toplamı şeklinde ifade edilmesi, yani Fourier analizi, harmonik bileşenlerin hesaplanmasında en yaygın ve basit yöntemdir.

Elektrik sistemlerinde güç kalitesi açısından en büyük problemlerden biri harmoniklerdir ve temelde harmonikler gerilim ve akım harmonikleri olarak ikiye ayrılır (Bouhali ve diğ., 2005).

Harmonikler genel olarak doğrusal olmayan elemanlar ile sinüsoidal olmayan kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasından meydana gelirler. Akım-gerilim karakteristiği doğrusal olmayan elemanlara doğrusal olmayan elemanlar denir. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde bulunması, sinüsoidal dalganın bozulması anlamına gelir. Bozulan dalgalar sinüsoidal olmayan dalga olarak adlandırılır. Bu dalgalar, fourier analizi yardımıyla temel frekans ve diğer frekanslardaki bileşenler cinsinden ifade edilebilir. Bu analiz ile sinüsoidal olmayan dalgalar, frekansları farklı sinüsoidal dalgaların toplamı şeklinde matematiksel olarak yazılabilir. Bu sayede harmoniklerin analizi kolaylıkla yapılabilir.

Harmonik bileşenlerin toplanmasıyla elde edilen orijinal dalga biçimi Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1. Harmonik içeren dalga biçimi ve harmonik bileşenler.

Harmonik oluşturan cihazların akım ve gerilimleri arasında doğrusal olmayan bir bağıntı olduğu düşüncesiyle aşağıdaki yorumlar yapılabilir;

- Periyodik bir kararlı hal oluşabilir ve bozulmuş dalga biçiminin Fourier serisinin temel frekansı şebeke frekansına eşittir.
- Periyodik bir kararlı hal oluşabilir ve bozulmuş dalga biçiminin Fourier serisinin temel frekansı şebeke frekansının katları halindedir.
- Dalga biçimi periyodik olmamasına rağmen bir trigonometrik seri halinde ifade edilebilir. Bu durumda şebeke frekansının tam katları şeklinde olmayan Fourier serisi bileşenlerine ara harmonik bileşenleri denir.
- Fourier Serisi, dalga biçimi periyodik olmadığında, dalga biçimini yaklaşık olarak ifade edebilir (Acarkan, 2006: 261).

#### 4.1 Fourier Serileri ve Analizi

Fransız matematikçi J. Fourier, sinüsoidal olmayan periyodik dalgaların genlik ve frekansları farklı birçok sinüsoidal dalganın toplamından oluştuğunu, başka bir deyişle, bütün dalgaların genlik ve frekansları farklı (temel dalga frekansının tam

katları) olan sinüsoidal dalgalara ayrılabilceğini göstermiştir. Bu şekilde elde edilen seriye “Fourier Serisi”, bu seri elemanlarına da “Fourier Bileşenleri” adı verilir.

Fourier serisinin elde edilme işlemi dalga analizi veya harmonik analizi olarak da tanımlanır. Periyodik fonksiyonlar fourier serisine açıldıklarında birinci terimi bir sabit, diğer terimleri ise bir değişkenin katlarının sinüs ve kosinüslerinden oluşan bir seri halinde yazılabilir. Bu tanımdan hareketle  $T$  periyot boyunca sinüsten farklı bir biçimde değişen  $f(t)$  dalgası fourier’e göre;

$$f(t) = a_0/2 + a_1 \cos t + a_2 \cos 2t + a_3 \cos 3t + \dots + a_n \cos nt + b_1 \sin t + b_2 \sin 2t + b_3 \sin 3t + \dots + b_n \sin nt \quad (4.1)$$

$$f(t) = a_0/2 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nt + b_n \sin nt) \quad (4.2)$$

şeklinde yazılabilir.

Bu denklemlerde;

$t$  : Bağımsız değişken (elektrik enerji sistemlerinde  $t = wt$  olmaktadır).

$a_0$  : “0” indisi ile gösterilen sabit terim (doğru veya ortalama değer).

“1” indisi ile gösterilen birinci terime, temel bileşen adı verilir. Temel bileşen aynı zamanda tam sinüsoidal dalgaya karşılık düşen dalgayı belirler. 2, 3, 4, ...,  $n$  indisi ile gösterilen bileşenlere harmonik adı verilmektedir.  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n, b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$  katsayıları  $f(t)$  fonksiyonunun fourier katsayılarıdır.

$n; 1, 2, 3, \dots, n$  pozitif tam sayı olmak üzere harmonik derecesini gösterir.

Elektrik sistemlerinde (4.1) ve (4.2) ifadeleri;

$$f(t) = a_0/2 + a_1 \cos wt + a_2 \cos 2wt + a_3 \cos 3wt + \dots + a_n \cos nwt + b_1 \sin wt + b_2 \sin 2wt + b_3 \sin 3wt + \dots + b_n \sin nwt \quad (4.3)$$

$$f(t) = a_0/2 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nwt + b_n \sin nwt) \quad (4.4)$$

şekline dönüşür.

Bu denklemde,  $wt$ : açısal frekanstır.

Genel olarak sinüsoidal olmayan periyodik bir fonksiyon, fourier serisine göre sonsuz sayıda harmoniklerin toplamından oluşmaktadır. Bununla beraber uygulamalarda sonsuz harmonik derecesi daima sonlu değer olarak işlem yapılır.

Fourier katsayıları  $(a_0, a_n, b_n)$  analitik yöntemle aşağıdaki formüllerle bulunabilir;

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt \quad (4.5)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(nwt) dt \quad (4.6)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(nwt) dt \quad (4.7)$$

Periyodik fonksiyonun değişimini gösteren eğrinin şekline göre açılımda bazı harmonikler bulunmayabileceği gibi bazen de yalnız kosinüslü veya sinüslü terimlerin sadece bir kısmı mevcut olabilir. Açılımda bir takım kısaltmalar yapılabilmesi mümkündür. Kısaltmaların yapılabileceği başlıca durumlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

a)  $y = f(t)$  fonksiyonun değişimini gösteren eğri birbirinin aynı fakat ters işaretli iki yarım periyottan oluşuyorsa bu durumda  $f(\pi + t) = -f(t)$  şartı sağlanır. Bu durumda  $a_0 = 0$  olmalı ve aynı zamanda  $t$ 'nin çift katlarının kosinüsleri ve sinüsleri bulunmamalı, bu katsayılar sıfır olmalıdır.

Bu durum  $a_0 = a_{2n} = b_{2n} = 0$  olarak ifade edilebilir. Böylece açılım daha basit olan

$$f(t) = a_1 \cos wt + a_3 \cos 3wt + \dots + b_1 \sin wt + b_3 \sin 3wt + \dots \quad (4.8)$$

şeklini alır.

b) Periyodik fonksiyonun değişimini gösteren eğri (a)'daki şartı gerçeklemekle beraber, ayrıca her yarım periyotluk kısım  $1/4$  periyoda karşılık gelen noktadan geçen bir düşey eksene göre simetriktir. Bu durumda  $f(\pi - t) = f(t)$  şartı sağlanır. Bu durumda  $a_1 = a_{2n+1} = b_{2n} = 0$  olarak ifade edilir. Burada (a) şikkında bulunan şartda dikkate alındığında  $t$ 'nin yalnız tek katlarının kosinüslerinin bulunacağı görülür. Bu şartlar altında açılım,

$$f(t) = b_1 \sin wt + b_3 \sin 3wt + \dots + b_{2n+1} \sin[(2n + 1)wt] \quad (4.9)$$

şeklinde olur ve açılımda sadece tek harmonikler mevcuttur.

c) Eğri, fonksiyonun sıfır değerine tekabül eden noktaya göre simetrikse  $f(-t) = -f(t)$  şartı sağlanır. Bu durumda  $a_0 = a_1 = a_2 = \dots = a_n = 0$  şartı altında açılım,

$$f(t) = b_1 \sin wt + b_2 \sin 2wt + b_3 \sin 3wt + \dots + b_n \sin nwt \quad (4.10)$$

şeklinde yazılır.

d) Eğrinin bir periyoda karşılık gelen düşey bir simetri eksenini bulunması durumunda  $f(-t) = f(t)$  şartı gerçekleşmiştir. Burada  $b_1 = b_2 = \dots = b_n = 0$  şartı bulunarak açılım,

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + a_3 \cos 3\omega t + \dots + a_n \cos n\omega t \quad (4.11)$$

şeklinde yazılır (Başman, 2006: 86).

## 4.2 Harmonikli Sistemlere ait Tanımlar

### 4.2.1 Toplam Harmonik Distorsiyon

$V_a, V_b, V_c$  dört iletkenli bir sistemdeki faz-nötr gerilimleridir. Üç iletkenli bir sistemde eşdeğer gerilim ( $V_e$ ) ve eşdeğer akım ( $I_e$ ) aşağıdaki bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir. Burada  $V_a, V_b, V_c$  yapay nötr noktasına (üç eşdeğer direncin yıldız noktası) göre ölçülen hat gerilimleri olacaktır.

$$V_e = \sqrt{\frac{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}{3}} \quad (4.12)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}} \quad (4.13)$$

Eşdeğer gerilim, fazlararası efektif gerilim değerlerinin bulunduğu aşağıdaki ifade ile de bulunabilir;

$$V_e = \sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{9}} \quad (4.14)$$

Eşdeğer akım  $I_e$ , hat akımlarının efektif değerlerinden ( $I_a, I_b, I_c$ ) hesaplanır.

Eşdeğer gerilim ve akım, iki bileşene ayrılabilir;

$$V_e^2 = V_1^2 + V_n^2 \quad (4.15)$$

$$I_e^2 = I_1^2 + I_n^2 \quad (4.16)$$

Buradaki “1” indisi temel bileşene ait efektif değerleri göstermektedir;

$$V_1 = \sqrt{\frac{V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2}{3}} \quad (4.17)$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2}{3}} \quad (4.18)$$

“ $n$ ” indisi ise temel bileşen dışındaki tüm bileşenlerin efektif değerlerini göstermektedir;

$$V_n = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{V_{an}^2 + V_{bn}^2 + V_{cn}^2}{3} \right)} \quad (4.19)$$

$$I_n = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{I_{an}^2 + I_{bn}^2 + I_{cn}^2}{3} \right)} \quad (4.20)$$

Harmonik büyüklüklerin sınırlanmasını amaçlayan standartlarda çok yaygın olarak kullanılan toplam harmonik distorsiyonu (THD) gerilim ve akım için sırasıyla;

$$THDV = \frac{V_n}{V_1} \quad (4.21)$$

$$THDI = \frac{I_n}{I_1} \quad (4.22)$$

ifadelerinden yararlanılarak bulunur. Görüldüğü üzere THD, harmonik bileşenlerin efektif değerlerinin, temel bileşenin efektif değerine oranıdır ve genellikle yüzde olarak ifade edilir. Bu değer, harmonikleri içeren periyodik dalga şeklinin, tam bir sinüs dalga şeklinden sapmasını tespit için kullanılır. Sadece temel frekanstan oluşan tam bir sinüs dalga şekli için THD sıfırdır.

#### 4.2.2 Distorsiyon Güç Faktörü

Gerilim ve akım, harmonikler içerdiğinde efektif değerleri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$V_e = V_1 \sqrt{1 + \left( \frac{THDV}{100} \right)^2} \quad (4.23)$$

$$I_e = I_1 \sqrt{1 + \left( \frac{THDI}{100} \right)^2} \quad (4.24)$$

Aynı biçimde toplam güç faktörü, gerilim ve akımın toplam harmonik distorsiyonu değeriyle;

$$pf_{toplam} = \frac{p}{V_1 I_1 \sqrt{1 + \left( \frac{THDV}{100} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{THDI}{100} \right)^2}} \quad (4.25)$$

olarak ifade edilir. Bu eşitlik aynı zamanda,

$$pf_{toplam} = \cos(\theta_1 - \delta_1) \cdot pf_{dist} \quad (4.26)$$

ile de verilir. Burada ilk terim ( $\cos(\theta_1 - \delta_1)$ ), kayma güç faktörü ve ikinci terim ( $pf_{dist}$ ), distorsiyon güç faktörü olarak bilinir. Kayma güç faktörü, 1'den büyük

olamayacağından her zaman  $pf_{toplama} \leq pf_{dist}$  olacaktır. Görüldüğü üzere, yüksek akım distorsiyonlu tek faz doğrusal olmayan yükler için, toplam güç faktörü daha da düşmektedir. Rezonansa neden olma ihtimalinden dolayı bu gibi yükler için güç faktörü düzeltici kondansatörler gereklidir. Distorsiyon güç faktörünü iyileştirmenin bir başka yolu ise, doğrusal olmayan yükler tarafından üretilen harmonikleri yok etmek için pasif ve aktif filtreler kullanmaktır.

### 4.2.3 Toplam Talep Distorsiyon

Toplam talep distorsiyonu (TTD) bir yüke ait değer olup toplam harmonik akım distorsiyonu türünden aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (4.27)$$

Burada,  $I_L$  yük tarafındaki sistemin ortak bağlantı noktasından elde edilen maksimum akımların ortalaması olarak hesaplanır (Akgeyik, 2005: 104)

### 4.3 Harmonik Seviyeleri

Harmonik akımların dereceleri ve değerleri darbe sayısına göre değişir. Üç fazlı KGK sistemlerinde doğrultucuda tristörler altı adet veya oniki adet kullanılarak altı darbeleri veya oniki darbeleri sistemler elde edilir. Örnek olarak altı ve oniki darbeleri sistemler için;

$$n = hq \pm 1 \quad (4.28)$$

$h$ : Darbe sayısı.

$q$ : Sıra ile ilerleyen tam sayı.

Altı darbeleri bir sistem için;

$$n = 6.1 \pm 1 = 5 \text{ ve } 7$$

$$n = 6.2 \pm 1 = 11 \text{ ve } 13$$

$$n = 6.3 \pm 1 = 17 \text{ ve } 19$$

$$n = 6.4 \pm 1 = 23 \text{ ve } 25 \text{ gibi harmonik akımlar üretilmektedir.}$$

Oniki darbeleri bir sistem için;

$$n = 12.1 \pm 1 = 11 \text{ ve } 13$$

$$n = 12.2 \pm 1 = 23 \text{ ve } 25 \text{ gibi harmonikler oluşacaktır. Görüleceği üzere altı darbelerdeki } 5., 7., 17., 19. \text{ gibi harmonikler oniki darbeleri doğrultucuda}$$

bulunmayacağından THDI değeri altı darbelye oranla daha düşük olacaktır (Demirkol, 2006: 66).

Üretilcek harmoniklerin temel şebeke frekansındaki akıma olan yüzdesel değerleri;

$$\% = 100/n \quad (4.29)$$

formülü ile hesaplanabilir.

Örnek olarak;

5. Harmonik yüzdesel değeri  $\% = 100 / 5 = \% 20$

7. Harmonik yüzdesel değeri  $\% = 100 / 7 = \% 15$

11. Harmonik yüzdesel değeri  $\% = 100 / 11 = \% 9$

#### 4.4 Harmoniklerin Faz Sırası

Üç fazlı dengeli bir sistemde sinüsoidal olmayan durumda her bir fazın  $n$ . derecedeki harmonik geriliminin fazları şu şekilde ifade edilebilir;

$$v_{an}(t) = \sqrt{2}V_n \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad (4.30)$$

$$v_{bn}(t) = \sqrt{2}V_n \sin(h\omega t - 2h\pi/3 + \alpha_h) \quad (4.31)$$

$$v_{cn}(t) = \sqrt{2}V_n \sin(h\omega t + 2h\pi/3 + \alpha_h) \quad (4.32)$$

Dengeli üç fazlı bir sistemde harmonik faz sırası Tablo 4.1'de görülmektedir.

**Tablo 4.1.** Harmonik faz sırası

Harmonik Derecesi	Faz Sırası
1	+
2	-
3	0
4	+
5	-
6	0

Tablo 4.1 incelendiğinde sistemde negatif ve sıfır bileşenlerin de bulunduğu, üç ve üçün katlarının sıfır diziyeye karşı geldiği görülmektedir (Acarkan, 2006: 261).



#### 4.5 Harmoniklerin Güç Sistemleri Üzerindeki Etkileri

Harmonik akımların frekansları 50Hz'in tam katları olduğundan, bu akımların jeneratörler, transformatörler ve hat reaktansları üzerinde meydana getirdiği gerilim düşümleri artar. Şebeke geriliminin frekansından farklı frekanstaki bu gerilim düşümleri, temel şebeke gerilimi üzerine eklenerek sinüsoidal gerilim biçimini bozarlar.

Bir tüketici tarafından üretilip şebekeye verilen harmonikler şebekede dağıtılarak başka bir tüketiciye ulaşırlar. Eğer harmonikler ulaştığı tüketicinin yükleri sadece doğrusal ise harmonik üreten diğer tüketicinin hesabı ikinci tüketicinin üstüne eklenir. Bu durum tüketici haklarına yeni bir kavram getirmiştir.

Harmoniklerin enerji sistemlerinde varlığı, sinüsoidal formdaki akım ve gerilim dalga şekillerindeki bozulmalar ile anlaşılır. Harmoniklerin enerji sistemlerinde yol açtığı problemler genel olarak aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Jeneratör ve şebeke geriliminin dalga şeklinin sinüs formundan sapması sebebiyle tüketicilerin çalışma koşullarının bozulması.
- Enerji sistemi elemanlarında ve yüklerde harmonikler nedeniyle ek kayıpların oluşması.
- Akımın harmonik bileşenleri nedeniyle gerilim düşümünün artması.
- Temel frekans için tasarlanmış kompanzasyon tesislerindeki kondansatörlerin harmonik frekanslarında düşük kapasitif reaktans göstermeleri sebebiyle aşırı yüklenmeleri ve dielektrik zorlanma nedeniyle hasar görmeleri.
- Senkron ve asenkron motorlarda salınımların meydana gelmesi ve bu nedenle aşırı ısınmalar.
- Koruma sistemlerinin harmonikler nedeniyle hatalı çalışmaları.
- Kontrol sistemlerinde hatalı çalışmalar.
- Endüksiyon tipi sayaçların yanlış ölçüm yapması.
- İzolasyon malzemesinin delinmesi.
- Yüksek harmoniklerin bulunduğu bir şebekede toprak kısa devre akımlarının daha büyük efektif değerlere yükselmesi.
- Temel frekansta rezonans olayı olmadığı halde harmonik frekanslarında şebekede rezonans olaylarının meydana gelmesi ve aşırı gerilim veya akımların oluşması.

Elektrik güç sistemlerinde harmonikler sebebiyle ortaya çıkan problemler arasında en etkili olanları kayıpların artması ile ölçü ve koruma sistemlerinin hatalı çalışmasıdır (Başman, 2006: 86).

#### 4.5.1 Harmoniklerin Neden Olduğu Rezonans Olayları

Büyük harmonik kaynağı olan makinelerin veya güç elektroniği devre elemanlarının bulunduğu tesislerde kompanzasyon gücünün seçiminde sistemdeki harmonik bileşenlerin etkisi göz önünde bulundurulmalıdır.

Elektrik tesislerinde en çok paralel rezonans durumu ile karşılaşılır. Devrede doğrusal olmayan elemanların bulunması durumunda bu elemanların ürettiği frekanslar sistem frekansını etkiler. Genellikle temel bileşen dışında 5. ve 7. harmonik bileşenlerde sistem rezonans oluşturur. Endüstride kullanılan yükler genellikle endüktif karakterlidir. Bu yükler güç faktörünü iyileştirmek amacı ile kullanılan kondansatör grupları ile rezonans oluşturabilir.

Rezonans, elektrik tesislerinde istenmeyen bir durumdur ve elektrik tesislerinde hasarlara neden olur. Sistemin yükünün az olduğu zamanlarda rezonans etkisi daha fazladır. Rezonansı önlemek için harmonik filtre devreleri tasarlanarak sisteme eklenmelidir (Adak, 2008).

#### 4.5.2 Kondansatörlere Etkileri

Gerilim bozulmasından en çok etkilenen eleman, güç faktörü düzeltiminde kullanılan kondansatör gruplarıdır. Kondansatörlerde en önemli problem aşırı etkin akımlardır. Diğer bir problem de tepe geriliminin oluşturduğu yalıtım zorlanmasıdır.

Kapasitif reaktans frekansla ters orantılı olarak değiştiğinden, temel bileşendeki değeri  $X_C$  olan kapasitif reaktans, harmonik derecesi  $n$  olan bir akımda;

$$X_{Cn} = \frac{X_C}{n} \quad (4.33)$$

değerini alır. Küçük bir harmonik gerilimin varlığı sonucunda kondansatörler büyük bir akım çekerek aşırı yüklenirler. Bunun sonucunda sistemde var olan harmoniklerin genlikleri artar. Kondansatörlerin reaktansı frekans ile ters orantılıdır. Yüksek harmonik frekanslarında kondansatör reaktansı çok küçülür (Adak, 2010).

Gerilim harmoniklerinden dolayı kondansatör gücü de artar. Şebeke işletmesinde sadece temel bileşene ait güç önem taşır. Buna karşılık, kondansatörün dielektrik kayıpları, yani ısıl zorlanma bakımından toplam kondansatör gücü geçerlidir.

Kondansatör keskin bir rezonans koşulunda bulunmadıkça gerilim bozulması arızaya neden olacak kadar büyük değildir. Endüstriyel güç sistemlerinde sık karşılaşılan harmonik problemlerinin ilk belirtilerinden biri kondansatör gruplarında oluşan arızadır.

Genelde tüm harmonik problemleri öncelikle paralel bağlı kondansatör gruplarında ortaya çıkar. Rezonans olayları sonucunda oluşan aşırı gerilim ve akımlar, kondansatörde ısınmayı ve gerilim zorlanmalarını artırarak ömürlerini kısaltırlar.

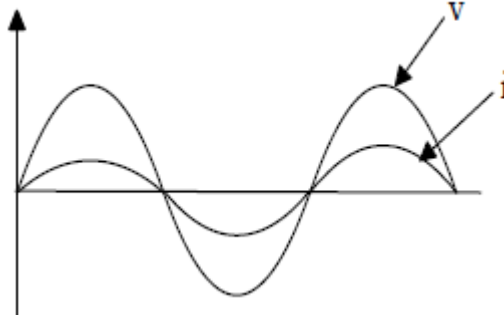
#### **4.5.3 Güç Elektroniği Devre Elemanlarına Etkileri**

Güç elektroniği elemanları birçok durumda önemli bir harmonik kaynağı olmalarının yanı sıra harmonik bozulmaya da çok duyarlıdır. Bu elemanların doğru çalışması gerilim sıfır geçişlerinin doğru saptanmasına bağlıdır. Harmonik bozulma, gerilim sıfır geçişlerini kaydırır. Bu durum birçok elektronik kontrol devresi için kritik noktalardır. Bu kayma nedeniyle oluşan komütasyon hataları elemanların çalışmasını olumsuz yönde etkiler. Yarı-iletken elemanlarda delinme etkileri ve ek ısınma etkileri görülür. Tristör kontrollü hız kontrol cihazlarında da harmoniklerin olumsuz etkileri bulunmaktadır. Örneğin, tristörlerin tetiklenmesinde kapı devrelerinde gecikmeler, ateşleme anlarının değişmesi örnek verilebilir.

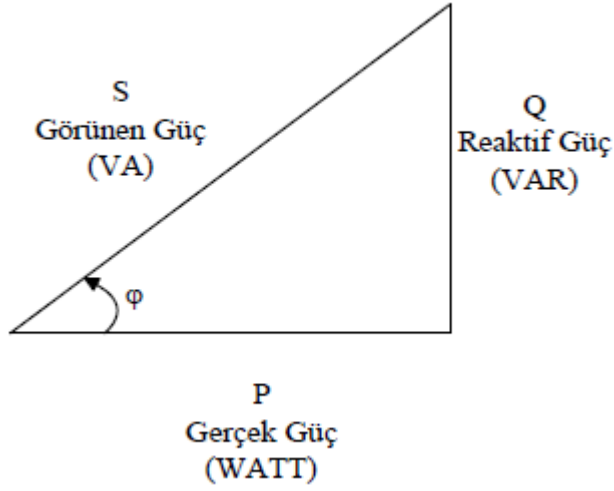
#### **4.5.4 Harmoniklerin Güç Faktörüne Etkisi**

Güç faktörü ( $pf$ ) gerçek gücün, görünen güce oranı olarak tanımlanmaktadır. Akım ve gerilim dalga formları arasındaki faz açısının kosinüsü olarak da ifade edilebilir.

Güç faktörü “0” ile “1” arasında değişir. İdealde güç faktörü “1” olmalıdır. Şekil 4.2’de gösterildiği gibi akım ve gerilim dalga formları aynı fazda olduğu zaman güç faktörü “1” ( $\cos \varphi$  veya  $pf = 1$ ) olmaktadır. Şekil 4.3’de güç üçgeni görülmektedir.



Şekil 4.2. Aynı fazda gerilim ve akım dalga şekilleri.



Şekil 4.3. Güç üçgeni.

Güç faktörü tanımı yapılırken gerçek güç ( $P$ ), reaktif güç ( $Q$ ), görünen güç ( $S$ ) ve faz açısı ( $\varphi$ ) gibi kavramların denklemleri ve açıklamaları aşağıda verilmiştir.

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad (4.34)$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi \quad (4.35)$$

$$pf = \frac{P}{S} \quad (4.36)$$

$$pf = \cos \varphi \quad (4.37)$$

Gerçek güç, işi üreten güçtür. Gerçek güce örnek olarak ısı harcayan cihazlardaki aktif gücün, termik güce dönüşmesi verilebilir.

Reaktif güç, elektromanyetik cihazlarda manyetik alanı oluşturur. Güç faktörü “1” olduğu zaman reaktif güç sıfır olur. Bu durum cihazların yükteki kayıplarını azaltır. Reaktif akımın meydana getirdiği reaktif güç, faydalı güce dönüştürülemediğinden şebekeden çekilen reaktif gücün sıfır olması istenir. Giriş akımı ve gerilimi arasında oluşan faz farkı reaktif akımın çekilmesine neden olur.

Güç faktörü düzeltilmesinde amaç, devreden çekilen aktif gücü görünür güç değerine yaklaştırmaktır. Güç kaynaklarının verimini artırmak için devrelere giriş güç üniteleri eklenerek akım denetlenebilir. İdeal olan, giriş akımı ve giriş geriliminin aynı şekilde ve fazda olmasıdır. Günümüzdeki güç kaynaklarında reaktif gücü en aza indirmek için güç faktörü düzeltme (PFC) özelliği kullanılır (Çatalbaş, 2008: 79).

Doğrusal olmayan yükleri içeren tesislerde kapasite değeri ne kadar büyük olursa olsun güç faktörü belli bir değere kadar yükselmekte daha sonra düşüş göstermektedir. Bu durum pratikte ne kadar gereksiz yere kapasite kullanımı olduğunu gösterir.

#### **4.6 Harmonik Standartları**

Güç elektroniği elemanlarının yaygın olarak kullanılmaya başlamasıyla birlikte enerji sistemlerinde harmonik kirlilik artmaya başlamıştır. Harmonik kirlilik veya harmonik distorsiyon olarakta anılan bu olumsuz etkinin giderilmesi bakımından harmonik sınırlamaların yapılması gereği ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla, harmoniklerin temel bileşene oranı her ülke tarafından sınırlandırılmaktadır.

Gelişmiş ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de sistemdeki elemanların tam kapasite ile kullanılması ve meydana getirdikleri zorlanma ve arızaların giderilmesi için gerek akımlar ve gerekse gerilimler için THD değerlerine ilişkin izin verilen maksimum değerlerin standartlaştırılması, harmonik bileşenlerin sınırlandırılması, sistemde harmoniklerin oluşturdukları ek kayıpların azaltılması gereklidir.

##### **4.6.1 TS EN 61000-3-2 Standartı**

Bu standart, alçak gerilimde faz başına 16A'den düşük akım çeken genel elektrik şebeke sistemi içine enjekte edilen harmonik akımların değerlerini kapsamaktadır ve belirlenmiş şartlar altında deneyden geçirilen donanımın giriş akımının harmonik bileşenlerinin sınır değerlerini belirlemektedir. Bu standart, alçak gerilim dağıtım sistemlerine bağlanması düşünülen ve faz başına giriş akımı 16A'e kadar olan elektrik ve elektronik donanımlara uygulanabilir. Anma gerilimleri 220V'tan (faz-nötr) daha düşük olan sistemler için sınırlamalar göz önüne alınmamıştır.

Harmonik akım sınırlama amacıyla ilgili donanım aşağıdaki biçimde sınıflandırılır:

A Sınıfı Donanımlar:

- Dengelenmiş üç fazlı donanım.
- D sınıfında belirlenmiş donanımlardan hariç tutulan ev aletleri.
- Taşınabilir aletler tanımı dışında kalan aletler.
- Akkor lambalar için ışık zayıflatıcıları.
- Ses donanımı.
- Diğer üç sınıfın herhangi birinde belirlenmeyen donanım A sınıfı donanım olarak düşünülmelidir.

A sınıfı donanımlar için, giriş akımının harmonikleri Tablo 4.2’de verilen değerleri geçmemelidir.

**Tablo 4.2.** A sınıfı donanımlar için harmonik sınır değerleri

Harmonik derecesi ( $n$ )	İzin verilen en büyük harmonik akım ( $A$ )
Tek harmonikler	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$2,25/n$
Çift harmonikler	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$1,84/n$

B Sınıfı Donanımlar:

- Taşınabilir aletler.
- Ark kaynak donanımı.

B sınıfı donanımlar için, giriş akımının harmonikleri Tablo 4.3’te verilen değerlerin 1,5 ile çarpılmış halini geçmemelidir.

**Tablo 4.3.** B sınıfı donanımlar için harmonik sınır değerleri

Harmonik derecesi ( <i>n</i> )	İzin verilen en büyük harmonik akım ( <i>A</i> )
Tek harmonikler	
3	3,45
5	1,71
7	1,155
9	0,6
11	0,495
13	0,315
$15 \leq n \leq 39$	$3,375/n$
Çift harmonikler	
2	1,62
4	0,645
6	0,45
$8 \leq n \leq 40$	$2,76/n$

C Sınıfı Donanımlar:

- Aydınlatma donanımı.

a) Aktif giriş gücü >25 W

25 W'tan daha büyük bir aktif giriş gücüne sahip aydınlatma donanımı için harmonik akımlar, Tablo 4.4'de verilen bağıl sınır değerlerini geçmemelidir.

**Tablo 4.4.** C sınıfı donanımlar için harmonik sınır değerleri

Harmonik derecesi ( <i>n</i> )	Temel frekanstaki giriş akımının yüzdesi olarak izin verilen en büyük harmonik akım (%)
2	2
3	30 x Devrenin güç faktörü
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$	3

b) Aktif giriş gücü  $\leq 25 W$

25 W'a eşit veya daha küçük bir aktif giriş gücüne sahip gaz deşarjlı aydınlatma donanımı aşağıdaki iki şarttan birine uymalıdır:

- 1- Harmonik akımlar, Tablo 4.5'de ki 2. sütunun güçle ilgili sınır değerlerini geçmemelidir.
- 2- Ana bileşen akımın bir yüzdesi olarak ifade edilen üçüncü harmonik akım %86'yı ve beşinci harmonik akım %61'i geçmemelidir. Deşarjlı aydınlatma donanımı ışık zayıflatıcı bir cihaza sahipse, ölçme yalnız tam yüklü durumda yapılmalıdır.

D Sınıfı Donanımlar:

D sınıfı donanım için harmonik akım ve güç değerleri standartta tanımlandığı gibi ölçülmelidir. Harmonik frekanslardaki giriş akımları, belirlenen şartlara uygun olarak Tablo 4.5'de ki değerleri geçmemelidir.

**Tablo 4.5.** D sınıfı donanımlar için harmonik sınır değerleri

Harmonik derecesi ( <i>n</i> )	$P < 600 W$ Watt başına izin verilen en büyük harmonik akım ( <i>mA/W</i> )	$P \geq 600 W$ İzin verilen en büyük harmonik akım ( <i>A</i> )
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
13	0,296	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$3,85/n$	$2,25/n$

**4.6.2 TS EN 61000-2-2 Standartı**

TS EN 61000-2-2 standardı kamuya ait alçak gerilim şebekelerine ait gerilim harmonik sınırlamalarını içermektedir. Tablo 4.6'da distorsiyon sınırları görülmektedir. Bu standart, kamuya ait düşük gerilimli dağıtım sistemleri için, tek fazlı 420V, üç fazlı 690V'a kadar olan anma geriliminde ve 50/60 Hz anma frekansındaki uyumluluk seviyelerine ait konuları kapsamaktadır (Acarkan, 2006: 261).



**Tablo 4.6.** Alçak gerilim şebekelerinde izin verilen harmonik gerilim distorsiyon sınırları

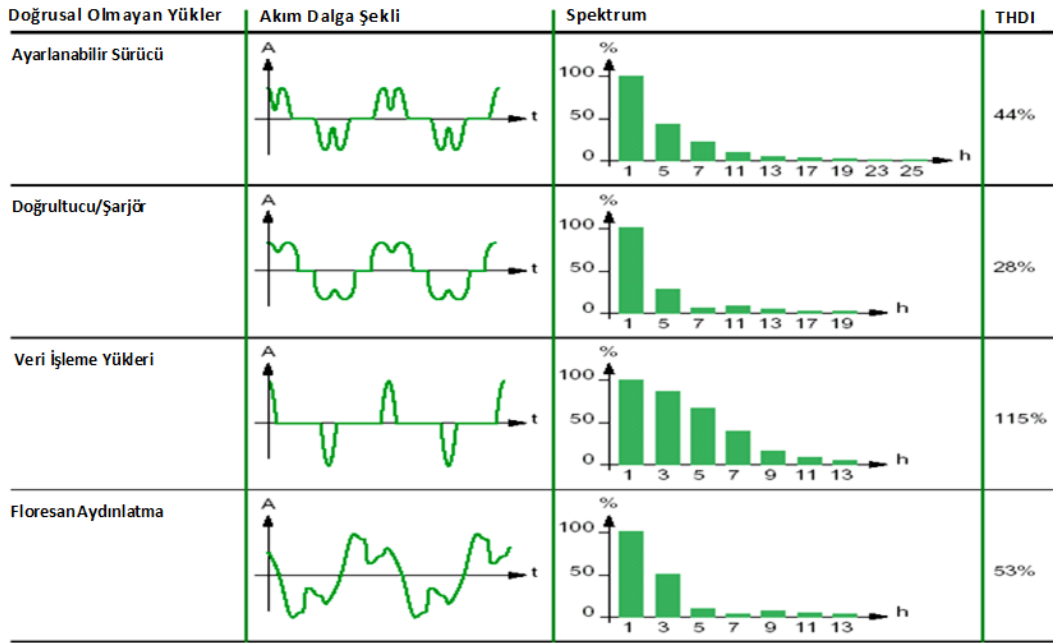
Üçün katı olmayan tek harmonikler		Üçün katı olan tek harmonikler*		Çift harmonikler	
Harmonik derecesi	Harmonik gerilim	Harmonik derecesi	Harmonik gerilim	Harmonik derecesi	Harmonik gerilim
$n$	$\%V_n$	$n$	$\%V_n$	$n$	$\%V_n$
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,4	6	0,5
13	3	21	0,3	8	0,5
$17 \leq n \leq 49$	$(38,59/n)-0,27$	$21 \leq n \leq 45$	0,2	$10 \leq n \leq 50$	$(2,5/n)+0,25$

\*) : Üçün katı olan tek harmonikler için verilen seviyeler, sıfır dizi bileşenli harmoniklere uygulanır. Nötr iletkeni olmayan ya da faz toprak arasında hiçbir yük bağlanmamış olan üç fazlı bir şebekede, 3. ve 9. harmoniklerin değerleri sistemin dengesizliğine bağlı olarak izin verilen sınırlardan çok daha düşük olabilir.

#### 4.7 Harmonik Üreten Devre Elemanları ve Cihazlar

Doğrusal olmayan elemanlar ile sinüsoidal olmayan kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin de sistemde bulunmasından dolayı harmonikler ortaya çıkmaktadır. Elektrik üreten ve dağıtan firmalar ile elektriği kullanan son kullanıcılar elektrik enerjisinin iyi kalitede olmasını isterler. Ancak bazı yükler yapıları gereği, bazı yükler ise tasarım ve kontrol özellikleri bakımından besleme gerilimini ve akımını bozarak harmonik üretirler. Bunun en belirgin nedeni uç gerilimi ve akımı arasındaki bağıntının doğrusal olmadığı yüklerdir. Sanayide ve evlerde kullanılan harmonik üreten cihazlara her geçen gün yenileri eklenmektedir. Elektrik makinelerinin ve cihazlarının tasarım ve kontrol ilkelerinde meydana gelen değişiklikler ve güç elektroniğinin hızla ilerlemesi, modern hayata birçok yararlar getirirken beraberinde birçok olumsuzlukları da getirmektedir. Örneğin jeneratör, transformatör, motor ve bobin gibi demir çekirdek içeren elemanlar harmonikli akım üretirler. Tristörler veya IGBT'ler periyodik akımı keserken harmoniklere neden olurlar.

Belli başlı doğrusal olmayan yüklerin çektikleri akımların dalga şekilleri ve THDI değerleri Şekil 4.4’de görülmektedir (Yılmaz, 2009).



Şekil 4.4. Doğrusal olmayan yüklerin THDI değerleri ve akımın dalga şekilleri.

#### 4.7.1 Güç Elektroniği Elemanları

Çesitli güç elektroniği elemanları küçük uygulamalardan büyük endüstriyel uygulamalara kadar bir çok alanda kullanılmaktadır. Yüksek çalışma verimine ve istenilen çalışma durumlarına sahip olmaları nedeni ile geniş kullanım alanı bulmuşlardır.

Yarı iletken elemanlar çalışma karakteristiğinin doğrusal olmamasından kaynaklanan harmonikler üretirler. Örnek olarak diyot veya tristör gibi güç elektroniği elemanlarında akım ve gerilim doğrusal olarak değişmediği için şebekede harmoniklerin oluşmasına neden olurlar (Filiz, 2006: 146).

#### 4.7.2 Doğrultucular

Harmonik kaynak olarak doğrultucular, şebeke gerilimini doğru gerilime çevirirler. Özellikle şebekede akım dalga şeklinin bozulmasına neden olurlar. Doğru akım iletim sistemleri, akü ve fotovoltaik sistemler şebeke denetimli çeviriciler üzerinden beslenirler. Harmonik akımın efektif değeri harmonik derecesi ile ters orantılıdır. Harmonik akımın derecesi doğrultucularda kullanılan darbe sayısı ile artırılarak harmonik akımın efektif değeri azaltılabilir.

### 4.7.3 Eviriciler

Eviriciler, doğrultucu çıkış gerilimini çeviriciler sayesinde istenilen genlik ve frekansta AC gerilime dönüştürür. Dönüşüm sırasında tam sinüs dalgası elde edilemediği için çıkış işaretinin fourier serisi açılımının belirlediği frekanslarda, belirli genliklerde harmonikler oluşturacaklardır. Bu durum gereksiz yüklenmelere, ek ısınmalara, verimlilik kaybına, motor uygulamalarında salınımlara istenmeyen durumlara neden olabilmektedir. Çıkış işaretindeki harmoniklerin belirli miktarlarda bastırılması özellikle zorunlu bir işlem olmaktadır.

### 4.7.4 Bilgisayarlar

Hassas yüklerden biri olan bilgisayar sistemleri, yalnızca bozucu etkilerden etkilenmekle kalmayıp aynı zamanda birer harmonik kaynağıdır. Bilgisayarların doğrusal olmayan yük karakteristikleri, güç sistemlerinde gerilim düşümleri, nötr iletkenlerin aşırı yüklenmesi ve hat gerilim distorsiyonları gibi bozucu etkilere neden olabilmektedirler.

### 4.7.5 Elektronik Balastlar

Gün geçtikçe hayatımızın her sınıfına daha belirgin bir şekilde giren elektronik sanayi, şebekede harmonik etkinliğinin de artmasına sebep olmaktadır. Aydınlatmada kullanılan elemanlardan olan elektronik balastlar da harmonik üretirler. Filtreli ve filtresiz olarak imal edilen bu balastlar eğer filtreli ise harmonik etkinliği yok sayılır. Filtresiz olarak kullanılan yüksek frekanslı elektronik balastlarda en etkin harmonik bileşenler 3., 5., 7. ve 9. bileşenleridir.

Bir tüketim barasına bağlı bulunan az sayıdaki filtresiz elektronik balastın harmonik etkinliği ihmal edilebilir. Ancak hipermarketlerde olduğu gibi çok sayıda elektronik balastın bulunduğu tesislerde harmonik seviyeleri sınır değerlerinin üzerine çıkabilmektedir.

Örneğin, manyetik balastlı floresan aydınlatma gerilim için  $THDV = \%3,6$  değerinde iken filtresiz elektronik balastlı aydınlatma yapıldığında bu değer artmakta ve gerilime ait  $THDV = \%7,41$  değerine ulaşmaktadır. Elektronik balastların filtreli olması halinde gerilim distorsiyonu azalmakta ve  $THDV = \%0,74$  değerine düşmektedir (Akgeyik, 2005: 104).

#### **4.7.6 Jeneratörler**

Döner makinelerde endüklenen elektromotor kuvveti, alan eğrilerinin içerdiği harmoniklere uygun olarak aynı harmonikleri içerir ve 3., 5., 7. ve 9. gibi tek bileşenleri vardır. Harmonik derecesi arttıkça genlikleri azalır, harmonik frekansı ise artar.

Statorun sargısı yıldız bağlanmışsa, üç ve üçün katı frekanslı harmonikler sadece faz-nötr gerilimlerinde bulunup fazlar arası gerilimlerde bulunmazlar.

Yıldız bağlı jeneratöre üç fazlı simetrik bir tüketici bağlanırsa ve yükün yıldız noktası jeneratörün yıldız noktasına bağlanmazsa, üç ve üçün katı harmonikli akımlar geçmez. Yıldız noktası nötre bağlı bir yük ise, faz iletkenlerinden üç ve üçün katı frekanslı akım, nötr üzerinden de bu üç fazın toplamı değerinde bir akım geçer. Bu akımlar, aynı şekilde üç ve üçün katlarında bir gerilim düşümü meydana getirirler. Eğer jeneratör sargıları üçgen bağlı ise, bu sargılarda üçün katı frekanslı bir sirkülasyon akımı geçer. Bu akım yüke bağlı olmayıp sargılarda büyük kayıplara neden olurlar.

#### **4.7.7 Transformatörler**

Elektrik güç sistemlerinde transformatörler gibi bir demir çekirdek üzerine yerleştirilmiş bobinlerden meydana gelen elemanlar, doyma özelliğine sahip demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin doğrusal olmaması nedeniyle harmonik üretirler.

Transformatörlerin mıknatıslanma akımının dalga şekli sinus formundan oldukça uzaktır. Bu nedenle mıknatıslanma akımı yüksek genlikli harmonik akım bileşenleri içerir. Ancak transformatörün mıknatıslanma akımı, anma akımının %1'i seviyesindedir. Elektronik güç dönüştürücüleri gibi nominal akımlarının %20'sine varan oranlarda harmonik akımları üreten diğer harmonik kaynakları ile güç transformatörleri karşılaştırılırsa, güç transformatörleri sistemde büyük harmonik kaynakları olarak dikkate alınmayabilir. Bu nedenle harmonik yük akış çalışmalarının bir kısmında transformatörlerin doğrusal devre elemanları olarak modellendiği de görülmektedir. Ancak bir dağıtım sisteminde yüzlerce transformatörün olduğu göz önüne alınırsa bir bütün olarak transformatörler harmonik kaynağı olarak ele alınabilir.

Güç transformatörleri mıknatıslanma eğrisinin doğrusal olduğu bölgede çalışmak üzere dizayn edilir. Ancak transformatör yükünün az olduğu zamanlarda

gerilimin yükselmesi sebebiyle manyetik çekirdek aşırı uyarılır ve çalışma mıknaatıslanma eğrisinin doğrusal olmayan bölgelerinde gerçekleşir. Bu durumda transformatör harmonik üretir ve özellikle üçüncü harmonik bileşenleri etkin olur.

Transformatörlerin doğrusal olmayan yükleri beslemesi sonucu transformatör üzerinden akan yük akımı harmonik bileşenler içerir. Doğrusal olmayan yük dengesiz ise transformatör bağlantısı ne olursa olsun üç ve üçün katı harmonik akımları dengesizlik sebebiyle şebekeye geçer (Başman, 2006: 86).

## **5. FABRİKA ORTAMINDAKİ IGBT DOĞRULTUCULU SKGK'de HARMONİK ÖLÇÜMÜ**

Harmonik analizi için fabrika ortamında çalışmakta olan 80KVA, 30KVA ve 250KVA güçlerindeki IGBT doğrultuculu SKGK cihazlarında THDI ve THDV harmonik ölçümleri yapılmıştır. Üzerinden ölçümler alınan SKGK cihazlarının çalışma prensibi Bölüm 3'te detaylı olarak açıklanmıştır.

### **5.1 80KVA Gücündeki IGBT Doğrultuculu SKGK'de Harmonik Ölçüm**

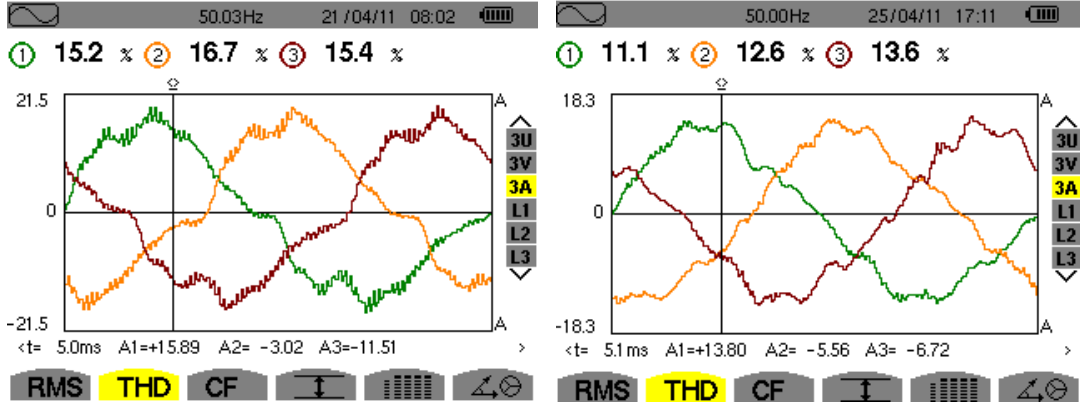
80KVA gücündeki SKGK cihazının doğrultucu kısmında IGBT kullanılmıştır. Üzerinden ölçümler alınan 80KVA gücündeki SKGK cihazlarından birinin çıkışına trafo konularak trafonun THD değerleri üzerindeki etkileride incelenmiştir. SKGK cihazlarına doğrusal yük verilmiştir. Ölçümlerde Chauvin Arnoux C.A 8335 model harmonik ölçüm cihazı kullanılmıştır (EK 1).

Ölçümler 3 aşamada gerçekleştirilmiştir.

Birinci aşamada; SKGK cihazının giriş akım harmoniklerinin ölçümü gerçekleştirilmiştir. Besleme kaynağı olarak şebekeden faydalanılmıştır. Trafolu ve trafosuz 80KVA cihazlarda ölçümler; %0 - %25 - %50 - %75 ve %100 yük altında yapılarak artan yük yüzdesine göre giriş THDI değerlerinin nasıl değiştiği incelenmiştir.

İkinci aşamada; SKGK cihazının çıkış gerilim harmonikleri, besleme kaynağı şebeke seçilerek trafolu ve trafosuz 80KVA cihazlarda ölçümler; %0 - %25 - %50 - %75 ve %100 yük altında gerçekleştirilmiştir.

Üçüncü aşamada; SKGK cihazının giriş beslemesi kesilerek eviricinin beslemesi aküler üzerinden sağlanmıştır. Trafolu ve trafosuz 80KVA cihazlarda THDV ölçümleri; %0 - %50 ve %100 yük altında gerçekleştirilmiştir. Şebekeden çalışma durumundaki çıkış THDV değerleriyle, aküden çalışma durumundaki çıkış THDV değerleri karşılaştırılmıştır. Ölçüm sonuçları Şekil 5.1 ile Şekil 5.13 arasında görülmektedir.



(a)

(b)

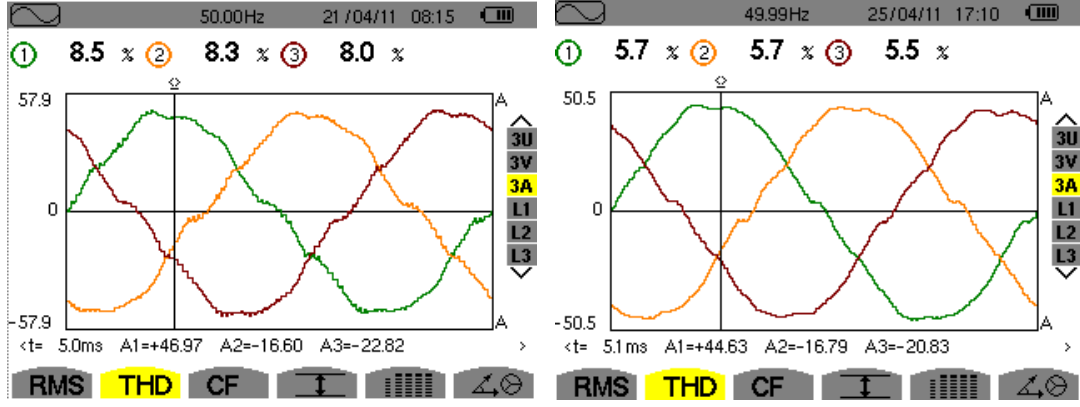
A1 DalgaFormu		
(%)	(%)	(%)
H01 100.0	H19 0.7	H37 0.2
H02 5.0	H20 0.7	H38 0.1
H03 5.3	H21 0.8	H39 0.4
H04 0.8	H22 0.4	H40 0.1
H05 9.6	H23 0.3	H41 0.0
H06 0.7	H24 0.1	H42 0.0
H07 7.4	H25 0.5	H43 0.2
H08 0.7	H26 0.3	H44 0.2
H09 2.7	H27 0.3	H45 0.1
H10 1.4	H28 0.1	H46 0.0
H11 4.5	H29 0.4	H47 0.1
H12 0.8	H30 0.1	H48 0.1
H13 3.0	H31 0.2	H49 0.1
H14 0.3	H32 0.3	H50 0.1
H15 1.3	H33 0.2	
H16 0.2	H34 0.1	
H17 0.9	H35 0.4	
H18 0.3	H36 0.1	

(c)

A1 DalgaFormu		
(%)	(%)	(%)
H01 100.0	H19 1.1	H37 0.1
H02 5.5	H20 0.9	H38 0.3
H03 6.6	H21 0.5	H39 0.1
H04 0.2	H22 0.1	H40 0.1
H05 2.5	H23 0.4	H41 0.3
H06 1.1	H24 0.5	H42 0.1
H07 3.1	H25 0.5	H43 0.1
H08 0.6	H26 0.2	H44 0.2
H09 7.0	H27 0.3	H45 0.1
H10 0.8	H28 0.2	H46 0.2
H11 1.4	H29 0.3	H47 0.0
H12 1.6	H30 0.1	H48 0.1
H13 1.5	H31 0.3	H49 0.3
H14 1.1	H32 0.4	H50 0.1
H15 0.5	H33 0.2	
H16 1.1	H34 0.3	
H17 1.1	H35 0.1	
H18 0.8	H36 0.2	

(d)

**Şekil 5.1.** 80KVA gücündeki KGK'nin şebekeden çalışma esnasında yük %0 iken giriş THDI sonuçları (a) İzolasyon trafosuz KGK'nin THDI şekli, (b) İzolasyon trafolu KGK'nin THDI şekli, (c) İzolasyon trafosuz KGK'nin R fazı giriş akım harmonik değerleri, (d) İzolasyon trafolu KGK'nin R fazı giriş akım harmonik değerleri.



(a)

(b)

A1 DalgaFormu		
(%)	(%)	(%)
H01 100.0	H19 0.8	H37 0.2
H02 2.1	H20 0.2	H38 0.1
H03 5.1	H21 0.5	H39 0.1
H04 0.2	H22 0.1	H40 0.1
H05 2.9	H23 0.1	H41 0.1
H06 0.1	H24 0.1	H42 0.0
H07 4.1	H25 0.1	H43 0.1
H08 0.3	H26 0.1	H44 0.1
H09 3.4	H27 0.1	H45 0.1
H10 0.3	H28 0.1	H46 0.0
H11 0.6	H29 0.2	H47 0.0
H12 0.5	H30 0.1	H48 0.1
H13 1.0	H31 0.1	H49 0.0
H14 0.3	H32 0.1	H50 0.0
H15 0.3	H33 0.1	
H16 0.1	H34 0.0	
H17 1.1	H35 0.2	
H18 0.1	H36 0.1	

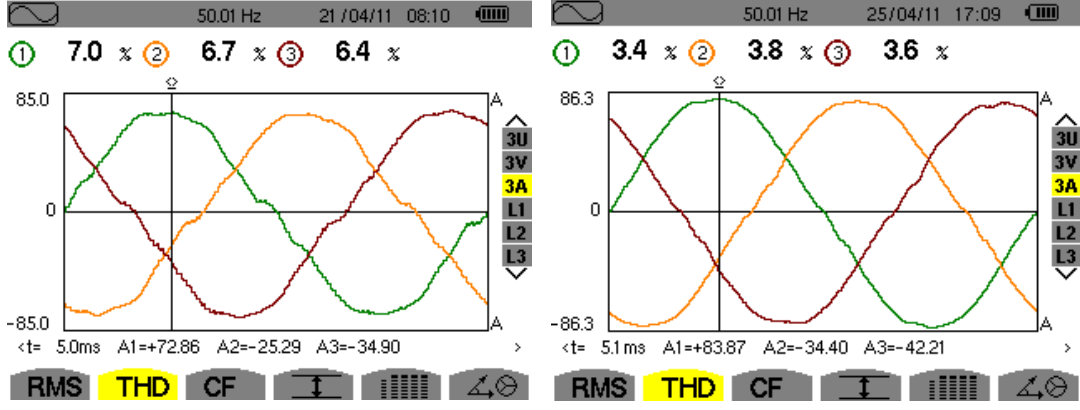
(c)

A1 DalgaFormu		
(%)	(%)	(%)
H01 100.0	H19 0.5	H37 0.1
H02 1.8	H20 0.1	H38 0.1
H03 3.0	H21 0.3	H39 0.2
H04 0.1	H22 0.2	H40 0.1
H05 3.2	H23 0.4	H41 0.1
H06 0.5	H24 0.1	H42 0.0
H07 1.7	H25 0.1	H43 0.1
H08 0.2	H26 0.0	H44 0.0
H09 1.6	H27 0.1	H45 0.0
H10 0.1	H28 0.1	H46 0.0
H11 1.1	H29 0.1	H47 0.1
H12 0.9	H30 0.0	H48 0.1
H13 1.1	H31 0.1	H49 0.0
H14 0.2	H32 0.0	H50 0.1
H15 0.5	H33 0.1	
H16 0.3	H34 0.0	
H17 0.4	H35 0.1	
H18 0.1	H36 0.0	

(d)

**Şekil 5.2.** 80KVA gücündeki KGK'nin şebekeden çalışma esnasında yük %25 iken giriş THDI sonuçları (a) İzolasyon trafosuz KGK'nin THDI şekli, (b) İzolasyon trafolu KGK'nin THDI şekli, (c) İzolasyon trafosuz KGK'nin R fazı giriş akım harmonik değerleri, (d) İzolasyon trafolu KGK'nin R fazı giriş akım harmonik değerleri.





(a)

(b)

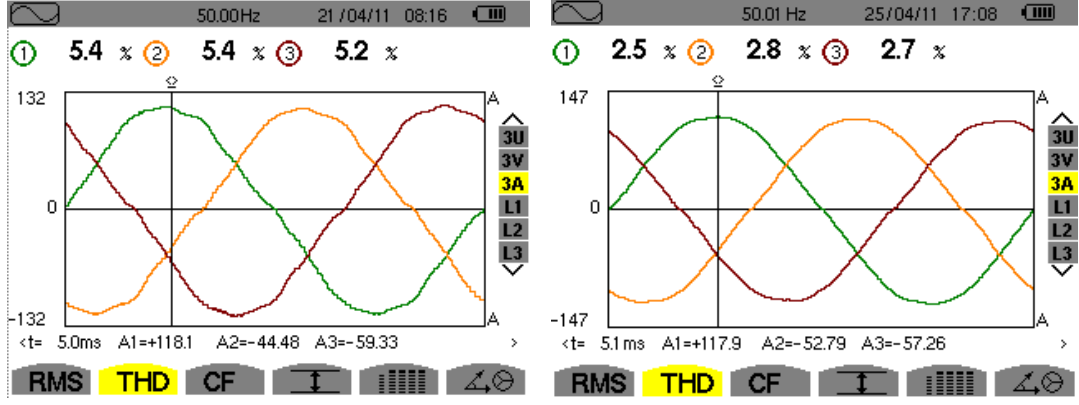
A1 DalgaFormu		
(%)	(%)	(%)
H01 100.0	H19 0.3	H37 0.1
H02 1.1	H20 0.1	H38 0.0
H03 5.3	H21 0.3	H39 0.1
H04 0.3	H22 0.1	H40 0.1
H05 3.3	H23 0.3	H41 0.0
H06 0.1	H24 0.0	H42 0.0
H07 1.9	H25 0.2	H43 0.0
H08 0.3	H26 0.1	H44 0.0
H09 1.4	H27 0.1	H45 0.0
H10 0.3	H28 0.0	H46 0.0
H11 0.7	H29 0.0	H47 0.1
H12 0.3	H30 0.0	H48 0.0
H13 1.6	H31 0.0	H49 0.1
H14 0.1	H32 0.0	H50 0.0
H15 0.5	H33 0.1	
H16 0.1	H34 0.0	
H17 0.3	H35 0.1	
H18 0.1	H36 0.0	

(c)

A1 DalgaFormu		
(%)	(%)	(%)
H01 100.0	H19 0.5	H37 0.0
H02 0.9	H20 0.1	H38 0.0
H03 2.2	H21 0.2	H39 0.1
H04 0.0	H22 0.1	H40 0.0
H05 2.4	H23 0.2	H41 0.0
H06 0.2	H24 0.0	H42 0.0
H07 0.3	H25 0.1	H43 0.0
H08 0.0	H26 0.0	H44 0.0
H09 0.3	H27 0.0	H45 0.0
H10 0.2	H28 0.0	H46 0.0
H11 0.6	H29 0.0	H47 0.0
H12 0.3	H30 0.0	H48 0.0
H13 0.8	H31 0.0	H49 0.0
H14 0.2	H32 0.1	H50 0.0
H15 0.3	H33 0.1	
H16 0.1	H34 0.0	
H17 0.4	H35 0.0	
H18 0.1	H36 0.0	

(d)

**Şekil 5.3.** 80KVA gücündeki KGK'nin şebekeden çalışma esnasında yük %50 iken giriş THDI sonuçları (a) İzolasyon trafosuz KGK'nin THDI şekli, (b) İzolasyon trafolu KGK'nin THDI şekli, (c) İzolasyon trafosuz KGK'nin R fazı giriş akım harmonik değerleri, (d) İzolasyon trafolu KGK'nin R fazı giriş akım harmonik değerleri.



(a)

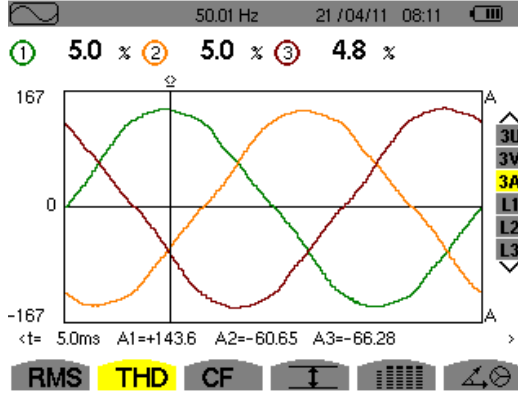
(b)

A1 DalgaFormu			A1 DalgaFormu		
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
H01 100.0	H19 0.5	H37 0.1	H01 100.0	H19 0.2	H37 0.0
H02 0.9	H20 0.0	H38 0.0	H02 0.5	H20 0.1	H38 0.0
H03 4.5	H21 0.1	H39 0.1	H03 1.8	H21 0.1	H39 0.0
H04 0.1	H22 0.0	H40 0.0	H04 0.0	H22 0.0	H40 0.0
H05 2.7	H23 0.2	H41 0.0	H05 1.7	H23 0.1	H41 0.0
H06 0.1	H24 0.0	H42 0.0	H06 0.1	H24 0.0	H42 0.0
H07 0.3	H25 0.1	H43 0.0	H07 0.2	H25 0.1	H43 0.0
H08 0.0	H26 0.0	H44 0.0	H08 0.1	H26 0.0	H44 0.0
H09 0.3	H27 0.1	H45 0.0	H09 0.5	H27 0.1	H45 0.0
H10 0.1	H28 0.0	H46 0.0	H10 0.1	H28 0.0	H46 0.0
H11 1.1	H29 0.0	H47 0.0	H11 0.5	H29 0.1	H47 0.0
H12 0.1	H30 0.0	H48 0.0	H12 0.1	H30 0.0	H48 0.0
H13 0.9	H31 0.0	H49 0.0	H13 0.1	H31 0.0	H49 0.0
H14 0.1	H32 0.0	H50 0.0	H14 0.2	H32 0.0	H50 0.0
H15 0.1	H33 0.1		H15 0.1	H33 0.1	
H16 0.0	H34 0.0		H16 0.1	H34 0.0	
H17 0.3	H35 0.1		H17 0.2	H35 0.0	
H18 0.0	H36 0.0		H18 0.0	H36 0.0	

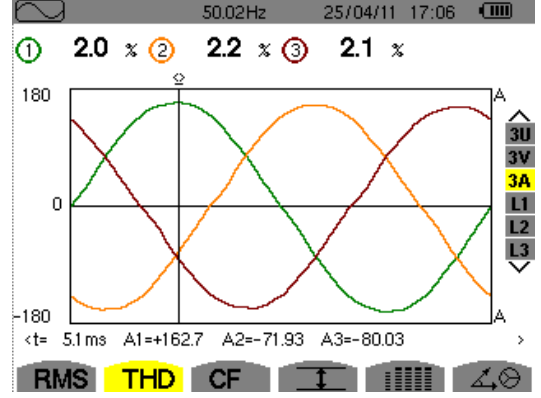
(c)

(d)

**Şekil 5.4.** 80KVA gücündeki KGK'nin şebekeden çalışma esnasında yük %75 iken giriş THDI sonuçları (a) İzolasyon trafosuz KGK'nin THDI şekli, (b) İzolasyon trafolu KGK'nin THDI şekli, (c) İzolasyon trafosuz KGK'nin R fazı giriş akım harmonik değerleri, (d) İzolasyon trafolu KGK'nin R fazı giriş akım harmonik değerleri.



(a)



(b)

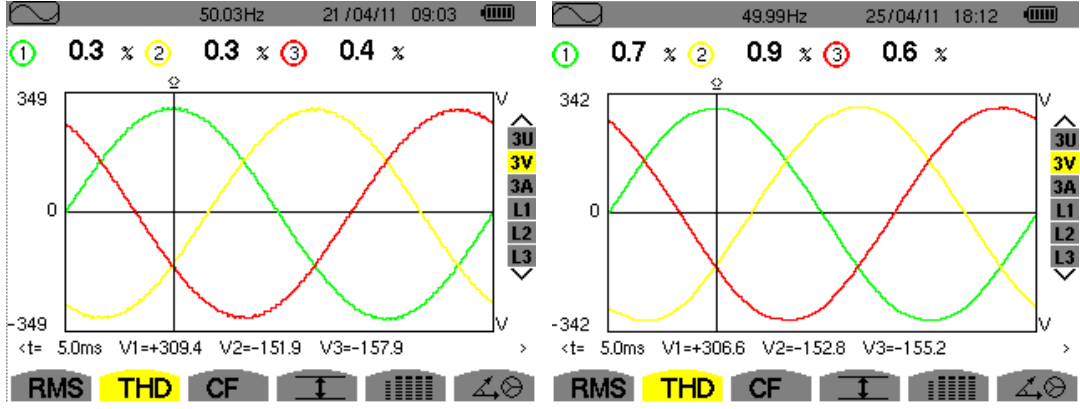
A1 DalgaFormu		
(%)	(%)	(%)
H01 100.0	H19 0.4	H37 0.0
H02 1.0	H20 0.1	H38 0.0
H03 4.1	H21 0.1	H39 0.0
H04 0.1	H22 0.0	H40 0.0
H05 2.4	H23 0.2	H41 0.0
H06 0.1	H24 0.0	H42 0.1
H07 0.3	H25 0.1	H43 0.0
H08 0.0	H26 0.0	H44 0.0
H09 0.6	H27 0.0	H45 0.1
H10 0.1	H28 0.0	H46 0.0
H11 0.8	H29 0.1	H47 0.0
H12 0.1	H30 0.0	H48 0.0
H13 0.4	H31 0.0	H49 0.0
H14 0.1	H32 0.0	H50 0.0
H15 0.3	H33 0.0	
H16 0.1	H34 0.0	
H17 0.1	H35 0.0	
H18 0.2	H36 0.0	

(c)

A1 DalgaFormu		
(%)	(%)	(%)
H01 100.0	H19 0.0	H37 0.0
H02 0.2	H20 0.0	H38 0.0
H03 1.5	H21 0.1	H39 0.1
H04 0.1	H22 0.0	H40 0.0
H05 1.3	H23 0.0	H41 0.0
H06 0.1	H24 0.0	H42 0.0
H07 0.4	H25 0.0	H43 0.0
H08 0.1	H26 0.0	H44 0.0
H09 0.4	H27 0.0	H45 0.0
H10 0.0	H28 0.0	H46 0.0
H11 0.5	H29 0.1	H47 0.0
H12 0.1	H30 0.0	H48 0.0
H13 0.1	H31 0.0	H49 0.0
H14 0.1	H32 0.0	H50 0.0
H15 0.2	H33 0.1	
H16 0.1	H34 0.0	
H17 0.1	H35 0.0	
H18 0.1	H36 0.0	

(d)

**Şekil 5.5.** 80KVA gücündeki KGK'nin şebekeden çalışma esnasında yük %100 iken giriş THDI sonuçları (a) İzolasyon trafosuz KGK'nin THDI şekli, (b) İzolasyon trafolu KGK'nin THDI şekli, (c) İzolasyon trafosuz KGK'nin R fazı giriş akım harmonik değerleri, (d) İzolasyon trafolu KGK'nin R fazı giriş akım harmonik değerleri.



(a)

(b)

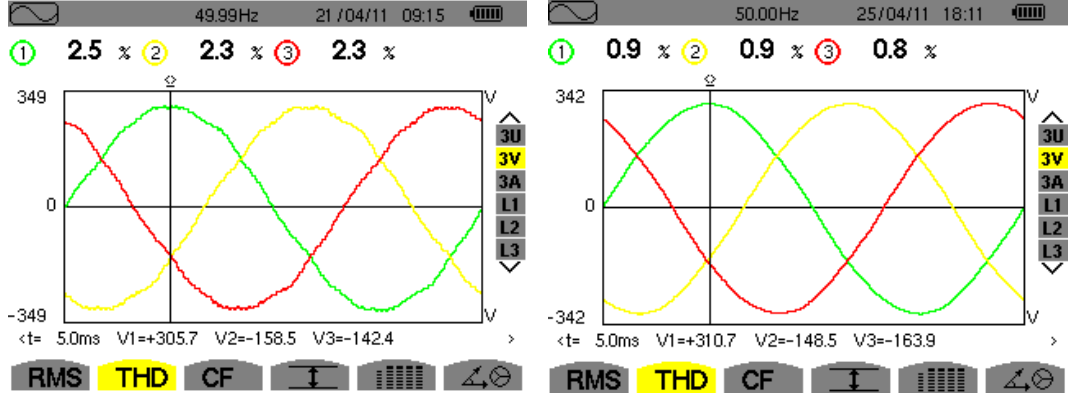
V1 DalgaFormu		
(%)	(%)	(%)
H01 100.0	H19 0.0	H37 0.0
H02 0.1	H20 0.0	H38 0.2
H03 0.3	H21 0.0	H39 0.2
H04 0.0	H22 0.0	H40 0.1
H05 0.1	H23 0.0	H41 0.1
H06 0.0	H24 0.0	H42 0.1
H07 0.0	H25 0.0	H43 0.1
H08 0.0	H26 0.0	H44 0.2
H09 0.0	H27 0.0	H45 0.1
H10 0.0	H28 0.0	H46 0.0
H11 0.0	H29 0.0	H47 0.0
H12 0.0	H30 0.0	H48 0.0
H13 0.0	H31 0.0	H49 0.0
H14 0.0	H32 0.0	H50 0.0
H15 0.0	H33 0.1	
H16 0.0	H34 0.0	
H17 0.0	H35 0.0	
H18 0.0	H36 0.0	

(c)

V1 DalgaFormu		
(%)	(%)	(%)
H01 100.0	H19 0.1	H37 0.0
H02 0.5	H20 0.1	H38 0.1
H03 0.1	H21 0.0	H39 0.0
H04 0.1	H22 0.1	H40 0.0
H05 0.5	H23 0.1	H41 0.0
H06 0.0	H24 0.0	H42 0.0
H07 0.3	H25 0.0	H43 0.0
H08 0.1	H26 0.0	H44 0.0
H09 0.1	H27 0.0	H45 0.0
H10 0.0	H28 0.0	H46 0.0
H11 0.1	H29 0.0	H47 0.0
H12 0.1	H30 0.0	H48 0.0
H13 0.2	H31 0.0	H49 0.0
H14 0.1	H32 0.0	H50 0.0
H15 0.1	H33 0.0	
H16 0.1	H34 0.0	
H17 0.2	H35 0.0	
H18 0.1	H36 0.0	

(d)

**Şekil 5.6.** 80KVA gücündeki KGK'nin şebekeden çalışma esnasında yük %0 iken çıkış THDV sonuçları (a) İzolasyon trafosuz KGK'nin THDV şekli, (b) İzolasyon trafolu KGK'nin THDV şekli, (c) İzolasyon trafosuz KGK'nin R fazı çıkış gerilim harmonik değerleri, (d) İzolasyon trafolu KGK'nin R fazı çıkış gerilim harmonik değerleri.



(a)

(b)

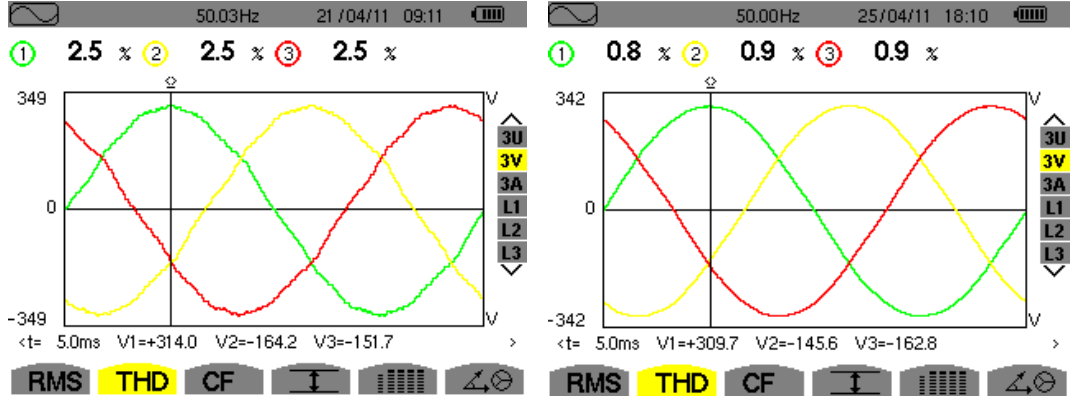
V1 DalgaFormu			V1 DalgaFormu		
	(%)	(%)		(%)	(%)
H01	100.0	H19	0.1	H37	0.1
H02	0.2	H20	0.0	H38	0.3
H03	0.7	H21	0.0	H39	0.1
H04	0.1	H22	0.0	H40	0.1
H05	1.5	H23	0.0	H41	0.1
H06	0.0	H24	0.0	H42	0.1
H07	0.3	H25	0.0	H43	0.1
H08	0.0	H26	0.0	H44	0.2
H09	1.0	H27	0.0	H45	0.0
H10	0.0	H28	0.0	H46	0.0
H11	1.4	H29	0.0	H47	0.0
H12	0.1	H30	0.0	H48	0.0
H13	0.5	H31	0.0	H49	0.0
H14	0.0	H32	0.0	H50	0.0
H15	0.4	H33	0.1		
H16	0.0	H34	0.1		
H17	0.0	H35	0.0		
H18	0.0	H36	0.0		

(c)

(d)

Şekil 5.7. 80KVA gücündeki KGK'nin şebekeden çalışma esnasında yük %25 iken çıkış THDV sonuçları (a) İzolasyon trafosuz KGK'nin THDV şekli, (b) İzolasyon trafolu KGK'nin THDV şekli,

(c) İzolasyon trafosuz KGK'nin R fazı çıkış gerilim harmonik değerleri, (d) İzolasyon trafolu KGK'nin R fazı çıkış gerilim harmonik değerleri.



(a)

(b)

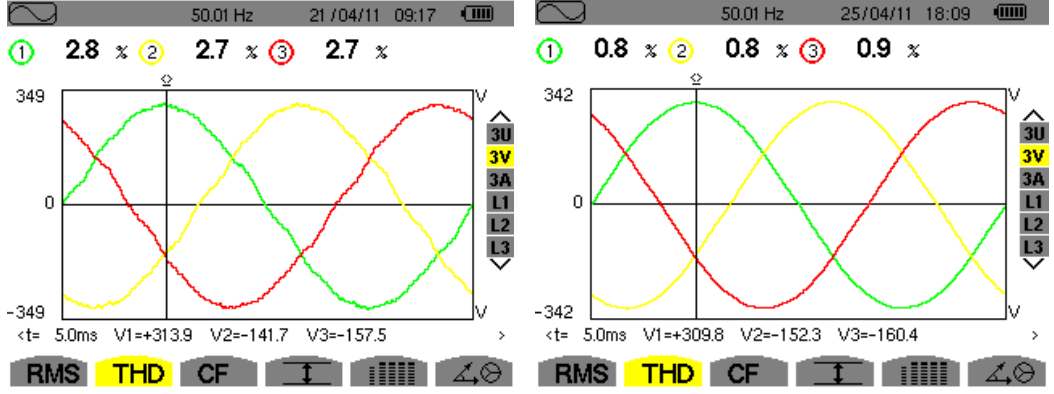
V1 DalgaFormu		
(%)	(%)	(%)
H01 100.0	H19 0.0	H37 0.1
H02 0.2	H20 0.0	H38 0.3
H03 1.1	H21 0.1	H39 0.0
H04 0.0	H22 0.0	H40 0.0
H05 0.6	H23 0.1	H41 0.0
H06 0.0	H24 0.0	H42 0.0
H07 1.2	H25 0.0	H43 0.0
H08 0.0	H26 0.0	H44 0.3
H09 1.2	H27 0.0	H45 0.0
H10 0.0	H28 0.0	H46 0.0
H11 0.8	H29 0.0	H47 0.0
H12 0.1	H30 0.0	H48 0.0
H13 0.8	H31 0.0	H49 0.0
H14 0.0	H32 0.0	H50 0.0
H15 0.6	H33 0.2	
H16 0.0	H34 0.0	
H17 0.3	H35 0.0	
H18 0.0	H36 0.0	

(c)

V1 DalgaFormu		
(%)	(%)	(%)
H01 100.0	H19 0.1	H37 0.0
H02 0.2	H20 0.0	H38 0.0
H03 0.1	H21 0.0	H39 0.0
H04 0.0	H22 0.0	H40 0.0
H05 0.8	H23 0.1	H41 0.0
H06 0.0	H24 0.0	H42 0.0
H07 0.5	H25 0.0	H43 0.0
H08 0.1	H26 0.0	H44 0.0
H09 0.0	H27 0.0	H45 0.0
H10 0.1	H28 0.0	H46 0.0
H11 0.2	H29 0.0	H47 0.0
H12 0.1	H30 0.0	H48 0.0
H13 0.2	H31 0.0	H49 0.0
H14 0.0	H32 0.0	H50 0.0
H15 0.1	H33 0.0	
H16 0.2	H34 0.0	
H17 0.1	H35 0.0	
H18 0.1	H36 0.0	

(d)

**Şekil 5.8.** 80KVA gücündeki KGK'nin şebekeden çalışma esnasında yük %50 iken çıkış THDV sonuçları (a) İzolasyon trafosuz KGK'nin THDV şekli, (b) İzolasyon trafolu KGK'nin THDV şekli, (c) İzolasyon trafosuz KGK'nin R fazı çıkış gerilim harmonik değerleri, (d) İzolasyon trafolu KGK'nin R fazı çıkış gerilim harmonik değerleri.



(a)

(b)

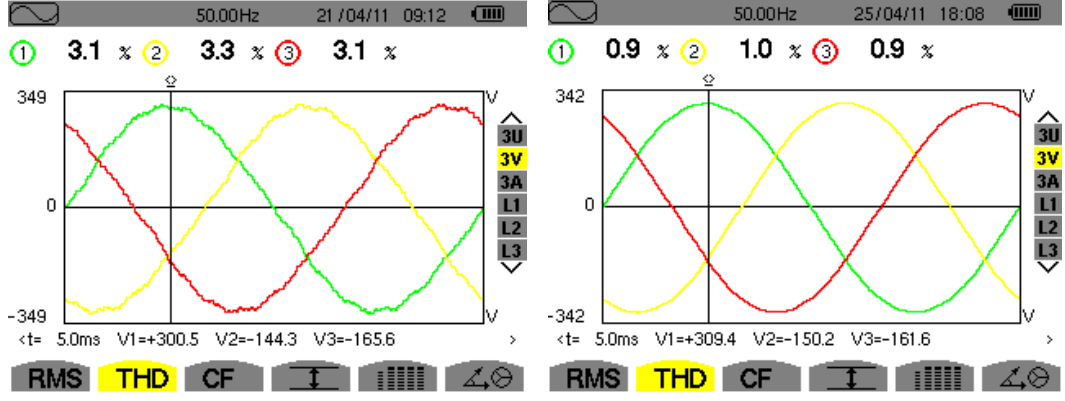
V1 DalgaFormu					
(%)	(%)	(%)			
H01	100.0	H19	0.2	H37	0.1
H02	0.2	H20	0.0	H38	0.3
H03	1.8	H21	0.1	H39	0.1
H04	0.1	H22	0.0	H40	0.1
H05	0.0	H23	0.0	H41	0.1
H06	0.0	H24	0.0	H42	0.1
H07	0.8	H25	0.0	H43	0.1
H08	0.0	H26	0.0	H44	0.3
H09	1.3	H27	0.1	H45	0.0
H10	0.1	H28	0.0	H46	0.0
H11	1.2	H29	0.1	H47	0.0
H12	0.1	H30	0.0	H48	0.0
H13	0.9	H31	0.1	H49	0.0
H14	0.1	H32	0.1	H50	0.0
H15	0.5	H33	0.2		
H16	0.1	H34	0.1		
H17	0.2	H35	0.0		
H18	0.0	H36	0.0		

(c)

V1 DalgaFormu					
(%)	(%)	(%)			
H01	100.0	H19	0.0	H37	0.0
H02	0.1	H20	0.0	H38	0.0
H03	0.1	H21	0.0	H39	0.0
H04	0.0	H22	0.0	H40	0.0
H05	0.8	H23	0.0	H41	0.0
H06	0.0	H24	0.0	H42	0.0
H07	0.4	H25	0.0	H43	0.0
H08	0.0	H26	0.0	H44	0.0
H09	0.0	H27	0.0	H45	0.0
H10	0.0	H28	0.0	H46	0.0
H11	0.1	H29	0.0	H47	0.0
H12	0.0	H30	0.0	H48	0.0
H13	0.1	H31	0.0	H49	0.0
H14	0.0	H32	0.0	H50	0.0
H15	0.1	H33	0.0		
H16	0.1	H34	0.0		
H17	0.2	H35	0.0		
H18	0.1	H36	0.0		

(d)

**Şekil 5.9.** 80KVA gücündeki KGK'nin şebekeden çalışma esnasında yük %75 iken çıkış THDV sonuçları (a) İzolasyon trafosuz KGK'nin THDV şekli, (b) İzolasyon trafolu KGK'nin THDV şekli, (c) İzolasyon trafosuz KGK'nin R fazı çıkış gerilim harmonik değerleri, (d) İzolasyon trafolu KGK'nin R fazı çıkış gerilim harmonik değerleri.



(a)

(b)

V1 DalgaFormu								
	(%)		(%)		(%)		(%)	
H01	100.0	H19	0.1	H37	0.2			
H02	0.2	H20	0.0	H38	0.2			
H03	2.5	H21	0.0	H39	0.1			
H04	0.0	H22	0.0	H40	0.1			
H05	0.9	H23	0.0	H41	0.1			
H06	0.0	H24	0.0	H42	0.1			
H07	0.1	H25	0.0	H43	0.3			
H08	0.0	H26	0.0	H44	0.2			
H09	0.5	H27	0.0	H45	0.1			
H10	0.0	H28	0.0	H46	0.0			
H11	1.0	H29	0.1	H47	0.0			
H12	0.1	H30	0.0	H48	0.0			
H13	0.9	H31	0.0	H49	0.0			
H14	0.3	H32	0.0	H50	0.0			
H15	1.4	H33	0.1					
H16	0.1	H34	0.2					
H17	0.3	H35	0.0					
H18	0.0	H36	0.1					

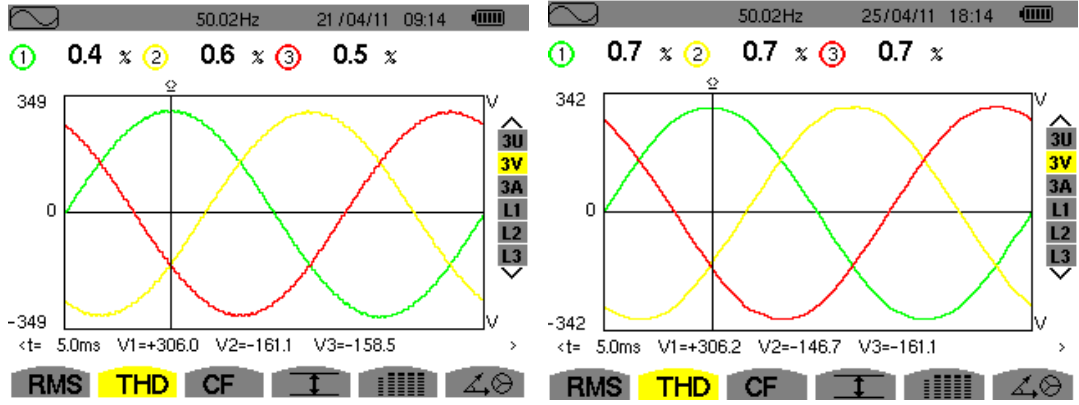
(c)

V1 DalgaFormu								
	(%)		(%)		(%)		(%)	
H01	100.0	H19	0.2	H37	0.0			
H02	0.2	H20	0.1	H38	0.0			
H03	0.1	H21	0.1	H39	0.0			
H04	0.0	H22	0.0	H40	0.0			
H05	0.7	H23	0.0	H41	0.1			
H06	0.0	H24	0.0	H42	0.0			
H07	0.4	H25	0.0	H43	0.0			
H08	0.0	H26	0.0	H44	0.0			
H09	0.0	H27	0.0	H45	0.0			
H10	0.0	H28	0.0	H46	0.0			
H11	0.1	H29	0.0	H47	0.0			
H12	0.0	H30	0.0	H48	0.0			
H13	0.1	H31	0.0	H49	0.0			
H14	0.1	H32	0.0	H50	0.0			
H15	0.1	H33	0.0					
H16	0.0	H34	0.0					
H17	0.2	H35	0.0					
H18	0.1	H36	0.0					

(d)

**Şekil 5.10.** 80KVA gücündeki KGK'nin şebekeden çalışma esnasında yük %100 iken çıkış THDV sonuçları (a) İzolasyon trafosuz KGK'nin THDV şekli, (b) İzolasyon trafolu KGK'nin THDV şekli, (c) İzolasyon trafosuz KGK'nin R fazı çıkış gerilim harmonik değerleri, (d) İzolasyon trafolu KGK'nin R fazı çıkış gerilim harmonik değerleri.





(a)

(b)

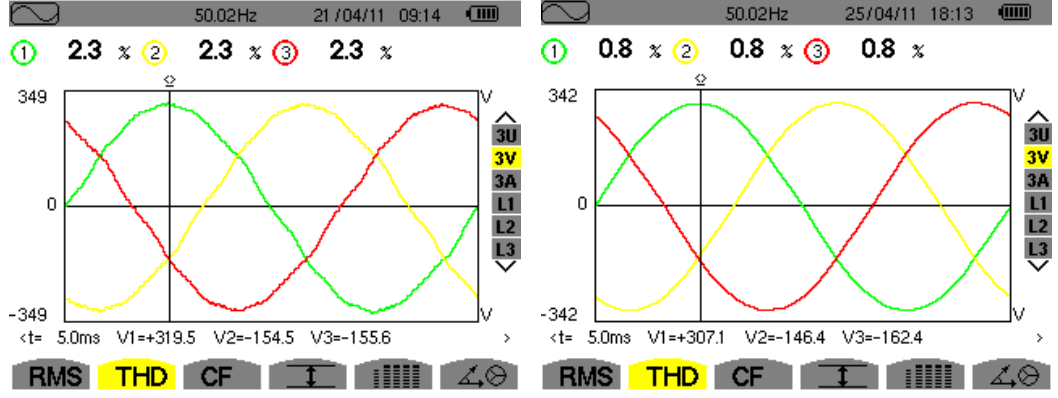
V1 DalgaFormu		
(%)	(%)	(%)
H01 100.0	H19 0.0	H37 0.0
H02 0.2	H20 0.0	H38 0.2
H03 0.4	H21 0.0	H39 0.0
H04 0.0	H22 0.0	H40 0.0
H05 0.1	H23 0.0	H41 0.0
H06 0.1	H24 0.0	H42 0.0
H07 0.0	H25 0.0	H43 0.0
H08 0.0	H26 0.0	H44 0.3
H09 0.1	H27 0.0	H45 0.0
H10 0.0	H28 0.0	H46 0.0
H11 0.0	H29 0.0	H47 0.0
H12 0.0	H30 0.0	H48 0.0
H13 0.0	H31 0.0	H49 0.0
H14 0.0	H32 0.0	H50 0.0
H15 0.0	H33 0.1	
H16 0.0	H34 0.0	
H17 0.0	H35 0.0	
H18 0.0	H36 0.0	

(c)

V1 DalgaFormu		
(%)	(%)	(%)
H01 100.0	H19 0.1	H37 0.0
H02 0.3	H20 0.0	H38 0.0
H03 0.1	H21 0.0	H39 0.0
H04 0.1	H22 0.0	H40 0.0
H05 0.6	H23 0.0	H41 0.0
H06 0.0	H24 0.0	H42 0.0
H07 0.3	H25 0.0	H43 0.0
H08 0.0	H26 0.0	H44 0.0
H09 0.1	H27 0.0	H45 0.0
H10 0.0	H28 0.0	H46 0.0
H11 0.1	H29 0.0	H47 0.0
H12 0.1	H30 0.0	H48 0.0
H13 0.2	H31 0.0	H49 0.0
H14 0.1	H32 0.0	H50 0.0
H15 0.3	H33 0.0	
H16 0.3	H34 0.0	
H17 0.2	H35 0.0	
H18 0.1	H36 0.0	

(d)

**Şekil 5.11.** 80KVA gücündeki KGK'nin aküden çalışma esnasında yük %0 iken çıkış THDV sonuçları (a) İzolasyon trafosuz KGK'nin THDV şekli, (b) İzolasyon trafolu KGK'nin THDV şekli, (c) İzolasyon trafosuz KGK'nin R fazı çıkış gerilim harmonik değerleri, (d) İzolasyon trafolu KGK'nin R fazı çıkış gerilim harmonik değerleri.



(a)

(b)

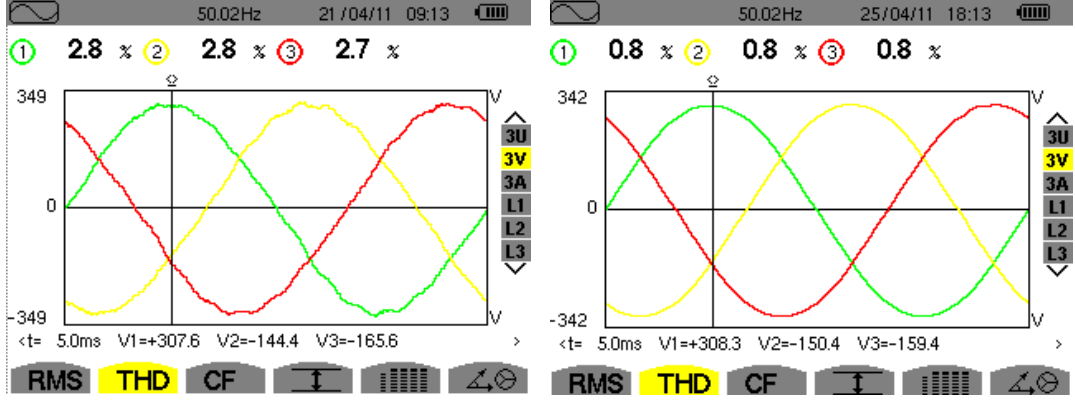
V1 DalgaFormu			
	(%)	(%)	
H01	100.0	H19	0.1
H02	0.2	H20	0.0
H03	1.2	H21	0.0
H04	0.0	H22	0.0
H05	0.3	H23	0.1
H06	0.0	H24	0.0
H07	1.0	H25	0.1
H08	0.0	H26	0.0
H09	1.2	H27	0.0
H10	0.0	H28	0.0
H11	0.9	H29	0.0
H12	0.1	H30	0.0
H13	0.6	H31	0.0
H14	0.0	H32	0.0
H15	0.5	H33	0.1
H16	0.0	H34	0.1
H17	0.3	H35	0.0
H18	0.0	H36	0.0
		H37	0.0
		H38	0.2
		H39	0.0
		H40	0.0
		H41	0.0
		H42	0.0
		H43	0.0
		H44	0.2
		H45	0.0
		H46	0.0
		H47	0.0
		H48	0.0
		H49	0.0
		H50	0.0

(c)

V1 DalgaFormu			
	(%)	(%)	
H01	100.0	H19	0.1
H02	0.2	H20	0.0
H03	0.1	H21	0.0
H04	0.0	H22	0.0
H05	0.7	H23	0.0
H06	0.0	H24	0.0
H07	0.4	H25	0.0
H08	0.0	H26	0.0
H09	0.0	H27	0.0
H10	0.0	H28	0.0
H11	0.2	H29	0.0
H12	0.0	H30	0.0
H13	0.2	H31	0.0
H14	0.1	H32	0.0
H15	0.0	H33	0.0
H16	0.1	H34	0.0
H17	0.1	H35	0.0
H18	0.0	H36	0.0
		H37	0.0
		H38	0.0
		H39	0.0
		H40	0.0
		H41	0.0
		H42	0.0
		H43	0.0
		H44	0.0
		H45	0.0
		H46	0.0
		H47	0.0
		H48	0.0
		H49	0.0
		H50	0.0

(d)

**Şekil 5.12.** 80KVA gücündeki KGK'nin aküden çalışma esnasında yük %50 iken çıkış THDV sonuçları (a) İzolasyon trafosuz KGK'nin THDV şekli, (b) İzolasyon trafolu KGK'nin THDV şekli, (c) İzolasyon trafosuz KGK'nin R fazı çıkış gerilim harmonik değerleri, (d) İzolasyon trafolu KGK'nin R fazı çıkış gerilim harmonik değerleri.



(a)

(b)

V1 DalgaFormu		
(%)	(%)	(%)
H01 100.0	H19 0.1	H37 0.0
H02 0.2	H20 0.0	H38 0.2
H03 2.2	H21 0.0	H39 0.0
H04 0.0	H22 0.0	H40 0.0
H05 0.9	H23 0.0	H41 0.0
H06 0.0	H24 0.0	H42 0.0
H07 0.3	H25 0.0	H43 0.0
H08 0.0	H26 0.0	H44 0.2
H09 0.2	H27 0.0	H45 0.0
H10 0.0	H28 0.0	H46 0.0
H11 0.6	H29 0.0	H47 0.0
H12 0.1	H30 0.0	H48 0.0
H13 0.6	H31 0.0	H49 0.0
H14 0.4	H32 0.0	H50 0.0
H15 1.1	H33 0.2	
H16 0.1	H34 0.1	
H17 0.2	H35 0.0	
H18 0.0	H36 0.0	

(c)

V1 DalgaFormu		
(%)	(%)	(%)
H01 100.0	H19 0.1	H37 0.0
H02 0.2	H20 0.0	H38 0.0
H03 0.1	H21 0.0	H39 0.0
H04 0.0	H22 0.0	H40 0.0
H05 0.8	H23 0.0	H41 0.0
H06 0.0	H24 0.0	H42 0.0
H07 0.2	H25 0.0	H43 0.0
H08 0.0	H26 0.0	H44 0.0
H09 0.0	H27 0.0	H45 0.0
H10 0.0	H28 0.0	H46 0.0
H11 0.2	H29 0.0	H47 0.0
H12 0.0	H30 0.0	H48 0.0
H13 0.2	H31 0.0	H49 0.0
H14 0.1	H32 0.0	H50 0.0
H15 0.1	H33 0.0	
H16 0.1	H34 0.0	
H17 0.1	H35 0.0	
H18 0.1	H36 0.0	

(d)

**Şekil 5.13.** 80KVA gücündeki KGK'nin aküden çalışma esnasında yük %100 iken çıkış THDV sonuçları (a) İzolasyon trafosuz KGK'nin THDV şekli, (b) İzolasyon trafolu KGK'nin THDV şekli, (c) İzolasyon trafosuz KGK'nin R fazı çıkış gerilim harmonik değerleri, (d) İzolasyon trafolu KGK'nin R fazı çıkış gerilim harmonik değerleri.

Yapılan ölçüm sonuçlarının karşılaştırmalı tabloları, Tablo 5.1 ile Tablo 5.3 arasında görülmektedir. Tablo 5.1'de giriş THDI ölçüm değerleri görülmektedir. SKGK cihazına verilen yük yüzdesi arttırıldıkça THDI değerleri düşmektedir. Tablo 5.2'de çıkış THDV ölçüm değerleri görülmektedir. Yük yüzdesi arttıkça çıkış THDV değerleri artmaktadır. Çıkıştaki harmonikler izole trafo ile düşürülmüştür. Tablo 5.3'de çıkış THDV ölçüm değerleri görülmektedir. Ölçümler, şebekeden çalışma ve

aküden çalışma durumlarında trafosuz SKGK'ler üzerinden alınmıştır. Her iki çalışma durumunda da ölçüm değerleri hemen hemen aynı değerlerdedir.

**Tablo 5.1.** Trafolu ve trafosuz SKGK'lerde giriş THDI değerleri

SİSTEM		Trafosuz SKGK	Trafolu SKGK
		Giriş THDI (%)	Giriş THDI (%)
Yük yüzdesi (%)	0	15,2	11,1
	25	8,5	5,7
	50	7,0	3,4
	75	5,4	2,5
	100	5,0	2,0

**Tablo 5.2.** Trafolu ve trafosuz SKGK'lerde çıkış THDV değerleri

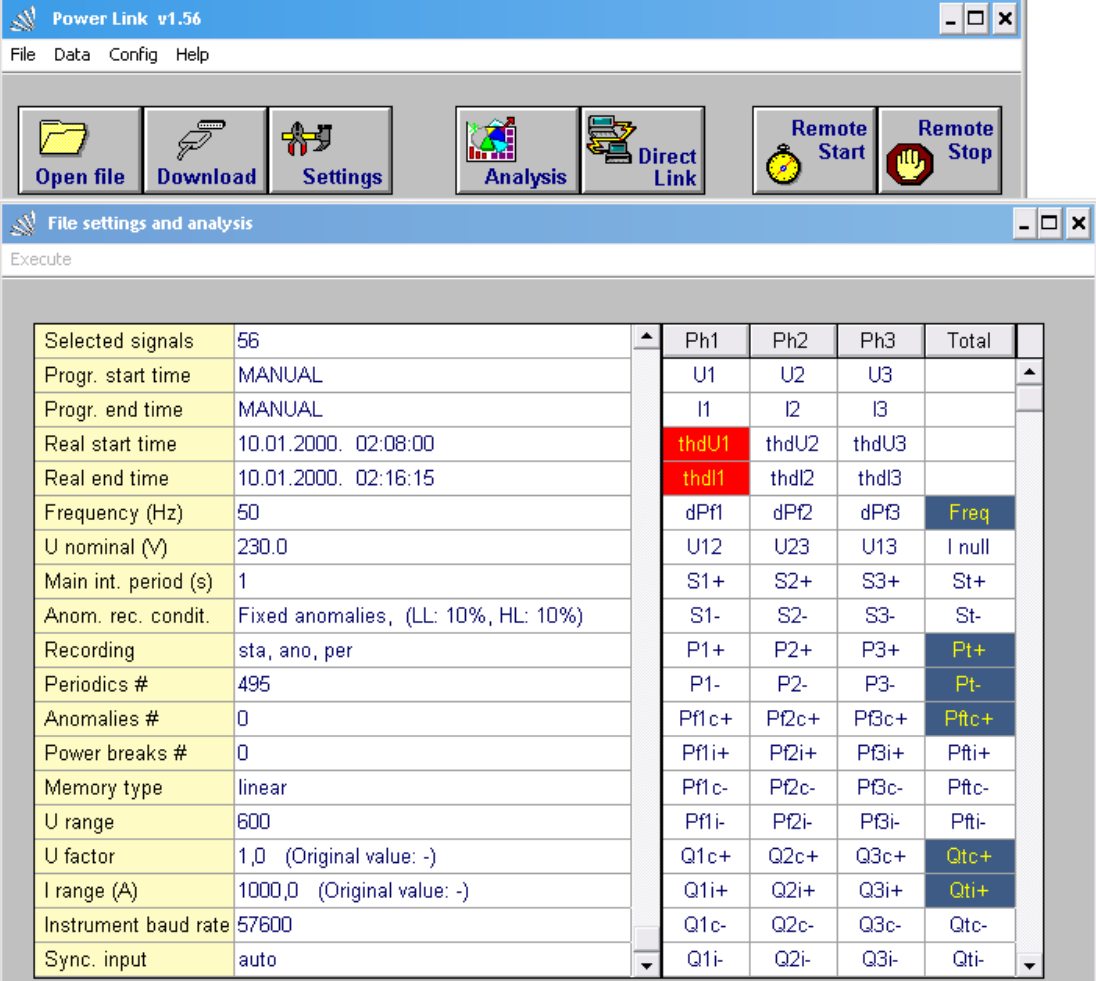
SİSTEM		Trafosuz SKGK	Trafolu SKGK
		Çıkış THDV (%)	Çıkış THDV (%)
Yük yüzdesi (%)	0	0,3	0,7
	25	2,5	0,9
	50	2,5	0,8
	75	2,8	0,8
	100	3,1	0,9

**Tablo 5.3.** Şebekeden ve aküden besleme durumlarında çıkış THDV değerleri

SİSTEM		Trafosuz SKGK	Trafosuz SKGK
		Şebekeden besleme	Aküden besleme
		Çıkış THDV (%)	Çıkış THDV (%)
Yük yüzdesi (%)	0	0,3	0,4
	50	2,5	2,3
	100	3,1	2,8

## 5.2 30KVA Gücündeki IGBT Doğrultuculu SKGK'de Harmonik Ölçüm

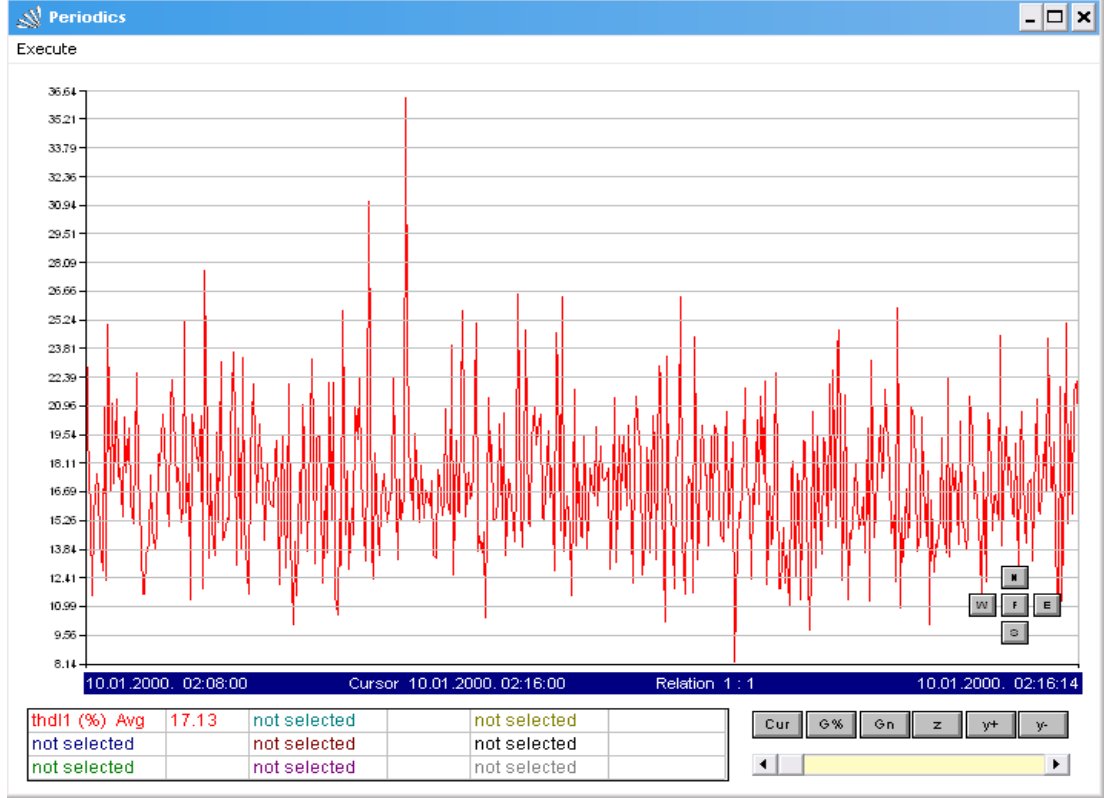
30KVA gücündeki SKGK cihazının doğrultucu kısmında IGBT kullanılmıştır. Ölçümler %50 doğrusal yük altında yapılmıştır. THDI ve THDV harmonik ölçümlerine ek olarak giriş akım ve çıkış gerilimindeki 3., 5., 7. ve 9. harmonik bileşenlerinin ölçümleride gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde Metrel 2292 model harmonik ölçüm analizörü kullanılmıştır (EK 1). Harmonik analiz cihazının ölçüm ekranı Şekil 5.14'de, ölçüm sonuçları Şekil 5.15 ile Şekil 5.20 arasında görülmektedir.



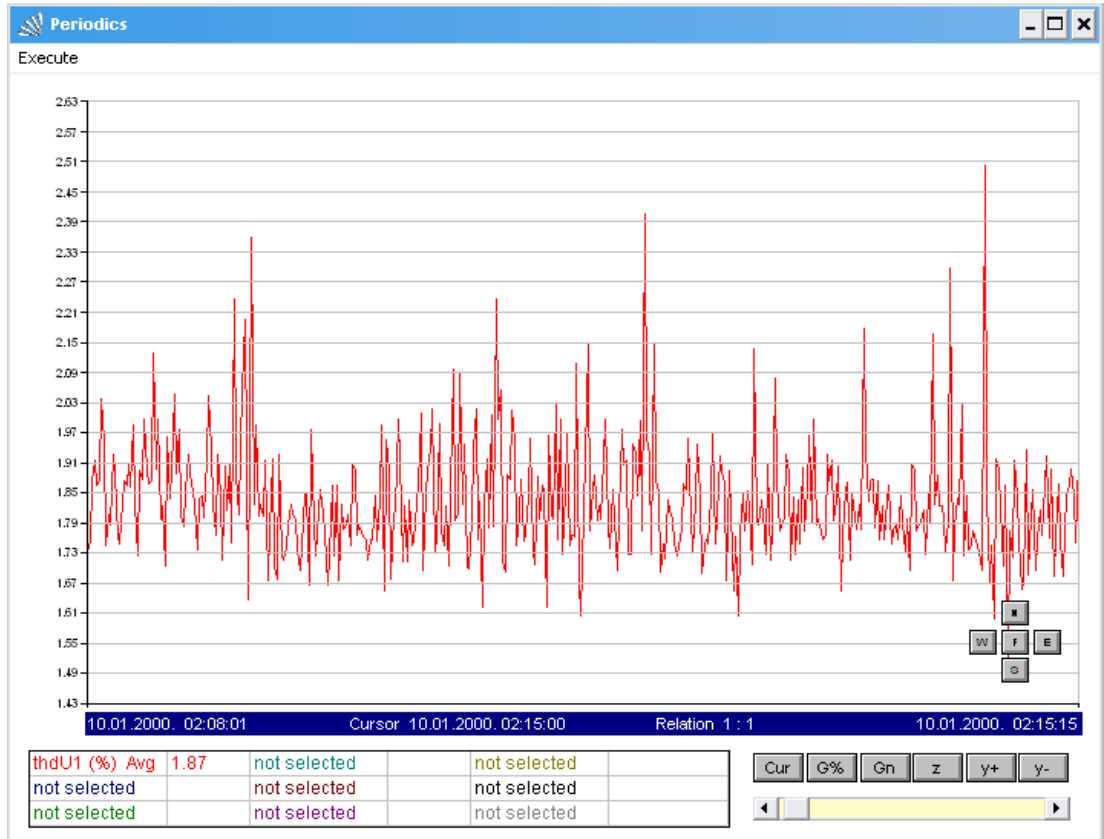
The screenshot shows the 'Power Link v1.56' software interface. The main window is titled 'File settings and analysis' and contains a table of measurement parameters and a table of selected signals.

Selected signals	56	Ph1	Ph2	Ph3	Total
Progr. start time	MANUAL	U1	U2	U3	
Progr. end time	MANUAL	I1	I2	I3	
Real start time	10.01.2000. 02:08:00	thdU1	thdU2	thdU3	
Real end time	10.01.2000. 02:16:15	thdI1	thdI2	thdI3	
Frequency (Hz)	50	dP1	dP2	dP3	Freq
U nominal (V)	230.0	U12	U23	U13	I null
Main int. period (s)	1	S1+	S2+	S3+	St+
Anom. rec. condit.	Fixed anomalies, (LL: 10%, HL: 10%)	S1-	S2-	S3-	St-
Recording	sta, ano, per	P1+	P2+	P3+	Pt+
Periodics #	495	P1-	P2-	P3-	Pt-
Anomalies #	0	Pf1c+	Pf2c+	Pf3c+	Pfc+
Power breaks #	0	Pf1i+	Pf2i+	Pf3i+	Pfi+
Memory type	linear	Pf1c-	Pf2c-	Pf3c-	Pfc-
U range	600	Pf1i-	Pf2i-	Pf3i-	Pfi-
U factor	1,0 (Original value: -)	Q1c+	Q2c+	Q3c+	Qtc+
I range (A)	1000,0 (Original value: -)	Q1i+	Q2i+	Q3i+	Qti+
Instrument baud rate	57600	Q1c-	Q2c-	Q3c-	Qtc-
Sync. input	auto	Q1i-	Q2i-	Q3i-	Qti-

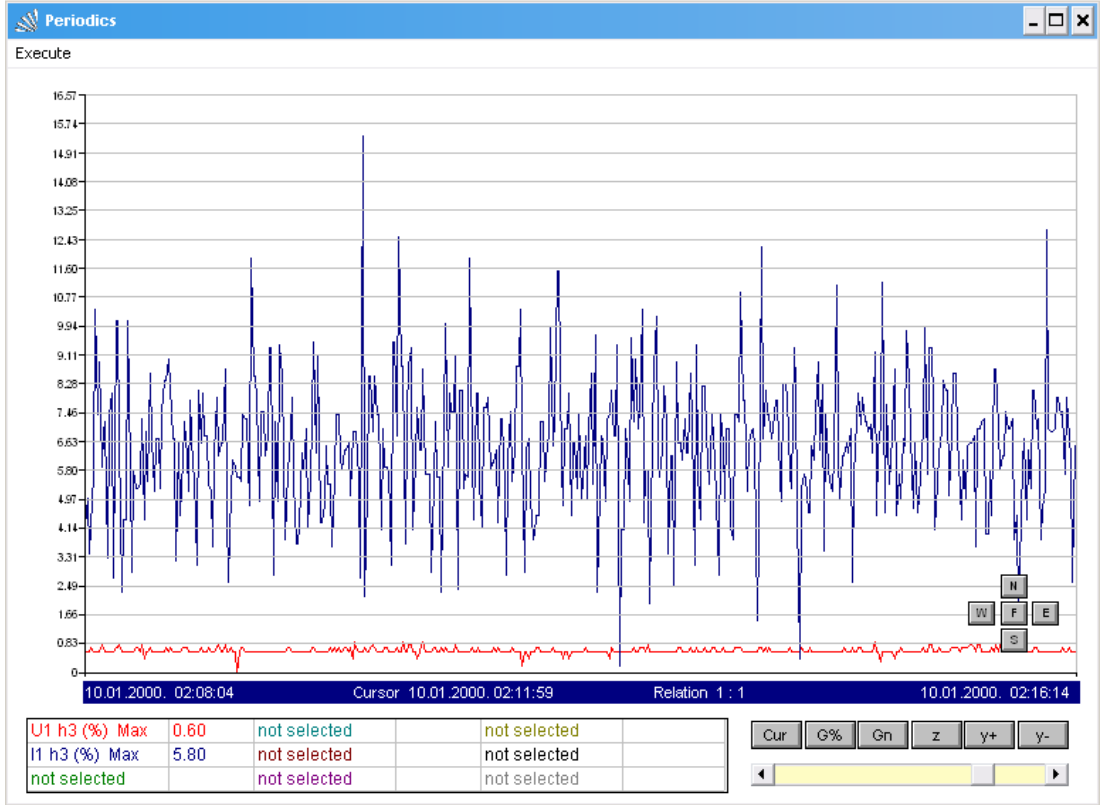
Şekil 5.14. Harmonik analizörü ölçüm seçenekleri ekranı.



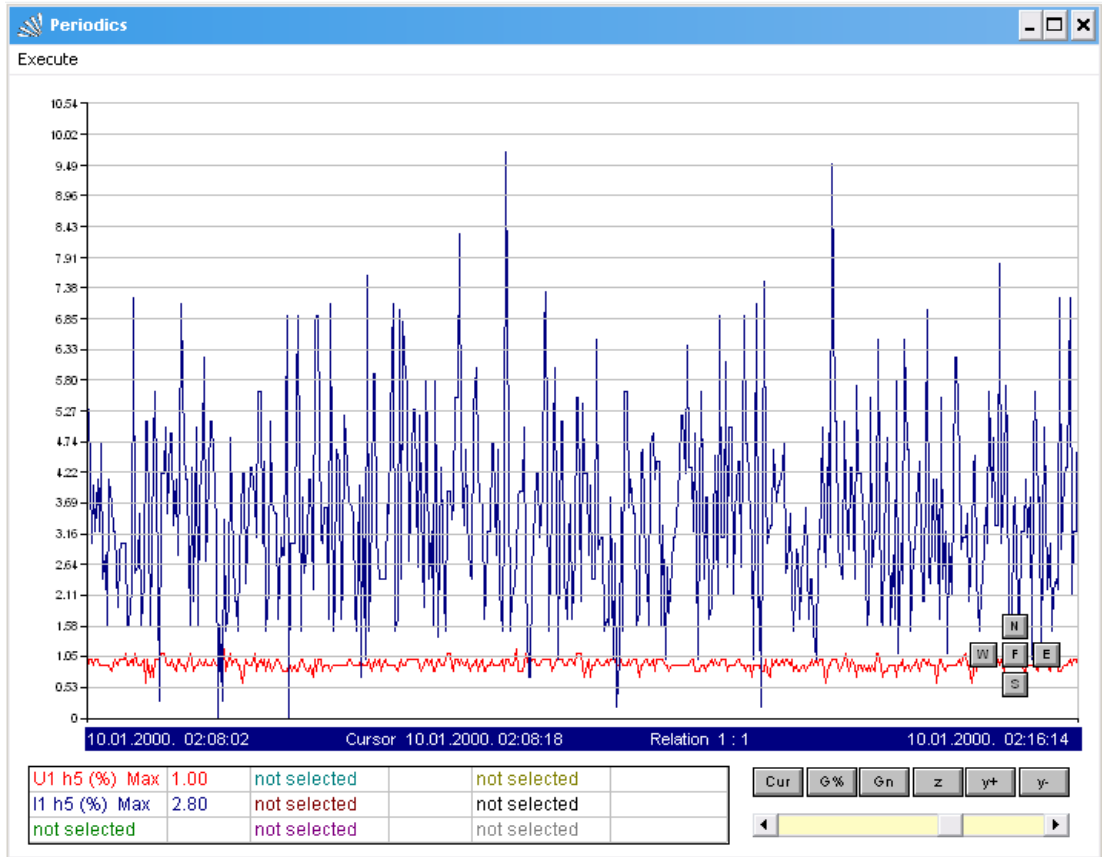
Şekil 5.15. Giriş THDI değerleri.



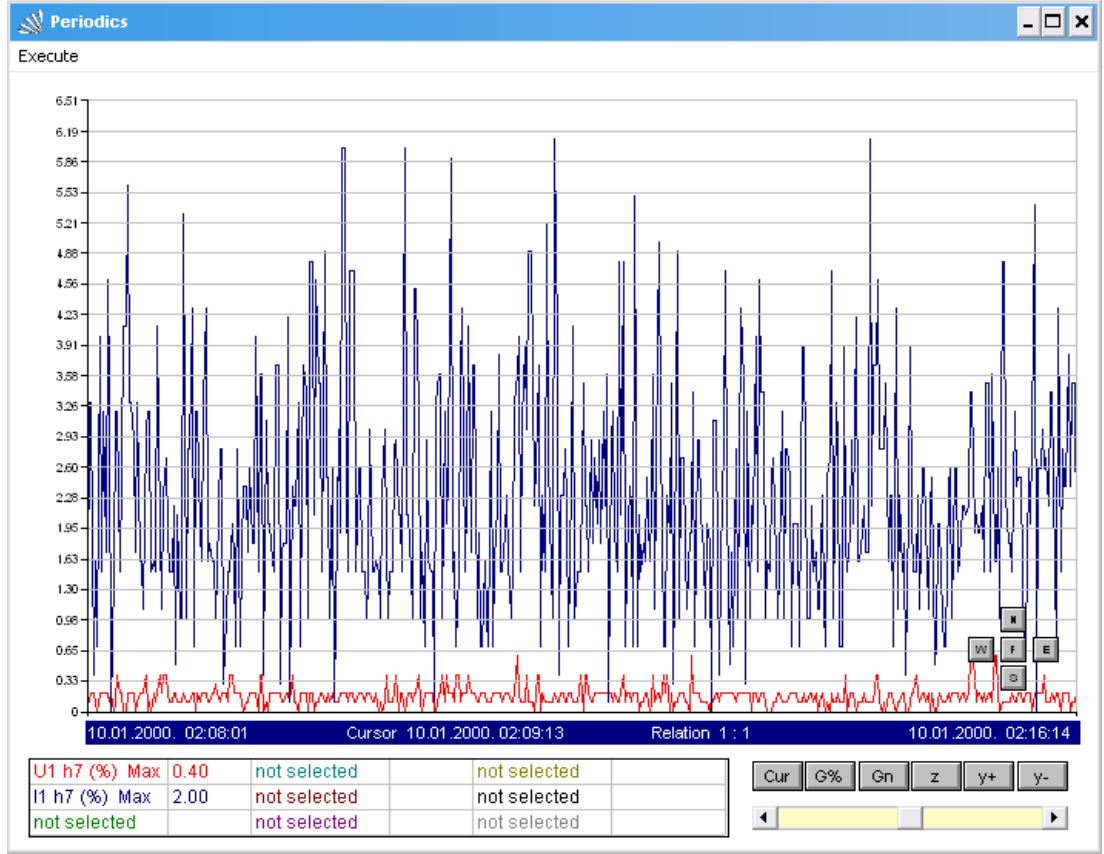
Şekil 5.16. Çıkış THDV değerleri.



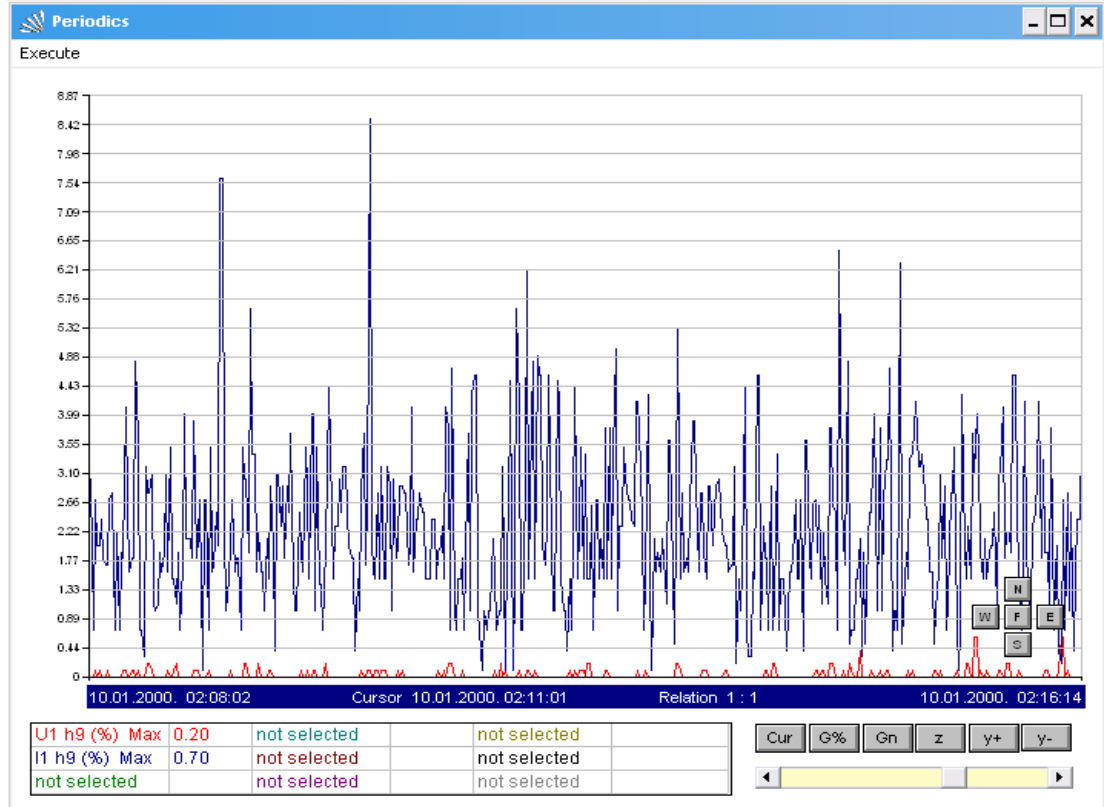
Şekil 5.17. Giriş akım ve çıkış gerilimin 3. harmonik değerleri.



Şekil 5.18. Giriş akım ve çıkış gerilimin 5. harmonik değerleri.



Şekil 5.19. Giriş akım ve çıkış gerilimin 7. harmonik değerleri.



Şekil 5.20. Giriş akım ve çıkış gerilimin 9. harmonik değerleri.



## 5.2 250KVA Gücündeki IGBT Doğrultuculu SKGK'de Harmonik Ölçüm

Ölçümler, 250KVA gücündeki SKGK cihazında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları Tablo 5.4 ile Tablo 5.7 arasında görülmektedir. Tablolarda harmonik ölçüm değerlerinin yanı sıra çekilen rms akımlar ve crest faktör gibi değerlerde gösterilmektedir. 250KVA SKGK ölçümlerinde giriş THDI ölçümüne ek olarak giriş THDV, çıkış THDV ölçümüne ek olarak çıkış THDI değerleri de ölçülmüştür. Ölçümler; %50 ve %100 doğrusal yük altında gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 5.4.** 250KVA SKGK'nin %50 yük altında giriş harmonik değerleri

Tarih	Zaman						
28.07.2011	10:56:10 +,794						
50,01 Hz	Vunb = 0,1%	Aunb = 0,4%					
Faz	RMS	THD	CF	Pst	DC(V)	DF	
V1	228,4	2,4	1,41	1,11	-1,1	2,4	
V2	230,5	2,3	1,42	0,92	0,2	2,3	
V3	230,4	2,3	1,43	0,77	0,1	2,3	
U1	398,3	1,5	1,43	-1,3	1,5		
U2	397,9	1,6	1,44	0,1	1,6		
U3	397,5	1,4	1,44	1,2	1,4		
Faz	RMS	THD	CF	KF	DC(A)	DF	
A1	143,8	10	1,56	1,27		10,0	
A2	146,6	9,9	1,57	1,28		9,8	
A3	145,3	10,8	1,6	1,35		10,7	

**Tablo 5.5.** 250KVA SKGK'nin %100 yük altında giriş harmonik değerleri

Tarih	Zaman						
28.07.2011	10:59:46 +,513						
50,02 Hz	Vunb = 0,2%	Aunb = 0,5%					
Faz	RMS	THD	CF	Pst	DC(V)	DF	
V1	225,6	3,6	1,41	0,71	-1,1	3,6	
V2	229,2	3,8	1,41	0,66	0,2	3,8	
V3	229,4	3,2	1,42	0,63	0,2	3,2	
U1	395,4	1,7	1,44	-1,3	1,7		
U2	395	1,9	1,44	0,1	1,9		
U3	394,1	1,7	1,45	1,2	1,7		
Faz	RMS	THD	CF	KF	DC(A)	DF	
A1	275,2	7,8	1,54	1,09		7,8	
A2	281,5	7,6	1,53	1,09		7,5	
A3	279,8	8	1,55	1,1		8,0	

**Tablo 5.6.** 250KVA SKGK'nin %50 yük altında çıkış harmonik değerleri

Tarih	Zaman						
28.07.2011	10:56:16 +,556						
49,99 Hz	Vunb = 0,0%	Aunb = 0,6%					
Faz	RMS	THD	CF	Pst	DC(V)	DF	
V1	221,6	1,8	1,45	3,96	-1,5	1,8	
V2	221,8	1,8	1,44	4,34	-0,3	1,8	
V3	221,8	1,6	1,45	4,14	-0,9	1,6	
U1	383,9	0,9	1,43	-1,2	0,9		
U2	384,1	0,9	1,43	0,6	0,9		
U3	383,9	0,9	1,43	0,6	0,9		
Faz	RMS	THD	CF	KF	DC(A)	DF	
A1	134,5	1,9	1,48	1,02		1,9	
A2	136,8	1,6	1,44	1,02		1,6	
A3	138,8	1,7	1,46	1,02		1,7	

**Tablo 5.7.** 250KVA SKGK'nin %100 yük altında çıkış harmonik değerleri

Tarih	Zaman						
28.07.2011	10:59:40 +,012						
50,00 Hz	Vunb = 0,0%	Aunb = 0,8%					
Faz	RMS	THD	CF	Pst	DC(V)	DF	
V1	220,2	2,4	1,48	2,82	-1,7	2,4	
V2	220,5	2,4	1,47	2,53	-0,4	2,4	
V3	220,4	2,4	1,47	2,27	-1,1	2,4	
U1	381,5	1,1	1,43	-1,4	1,1		
U2	381,8	1,1	1,43	0,7	1,1		
U3	381,5	1,1	1,43	0,7	1,1		
Faz	RMS	THD	CF	KF	DC(A)	DF	
A1	261,7	2,4	1,47	1,03		2,4	
A2	264,7	2,3	1,46	1,02		2,3	
A3	268	2,3	1,48	1,03		2,3	

## **6. SIMULINK PROGRAMI ile IGBT DOĞRULTUCULU SKGK BENZETİMİ ve HARMONİK ANALİZİ**

IGBT Doğrultuculu SKGK'nin Matlab Simulink programı yardımıyla benzetimi gerçekleştirilmiştir. Benzetimin simule edilmesiyle SKGK'de harmonik analizi gerçekleştirilmiştir.

### **6.1 Simulink Programı**

Simulink, dinamik sistem modellerinin kurulması, benzetimi ve çözümlemesinde kullanılan Matlab'ın eklentisi bir paket programdır. Sürekli zaman, kesikli zaman veya her ikisinin melez biçiminde modeli kurulmuş doğrusal olmayan sistemleri destekler. Ayrıca bu sistemler, örneklenmiş veya farklı oranlarda güncellenmiş farklı kısımlara sahip olabilirler.

Simulink, kaynaklar, doğrusal ve doğrusal olmayan elemanlar ve bunların bağlantılarını içere geniş bir blok kütüphanesine sahiptir. Ayrıca kullanıcı da kendi bloklarını oluşturabilir.

Modeller sıra düzenli olup, hem yukarıdan aşağıya hem de aşağıdan yukarıya yaklaşımlar kullanılarak modeller kurmak mümkündür. Sistem, yüksek seviyeden incelenebilir. Ayrıca bloklar üzerine çift tıklamak suretiyle de model ayrıntılarının artan seviyelerini görebilmek mümkündür. Bu yaklaşım, bir modelin nasıl düzenlendiğini ve bölümlerin ne şekilde birbirleri ile etkileşimli olduğunu görme imkânı sağlar.

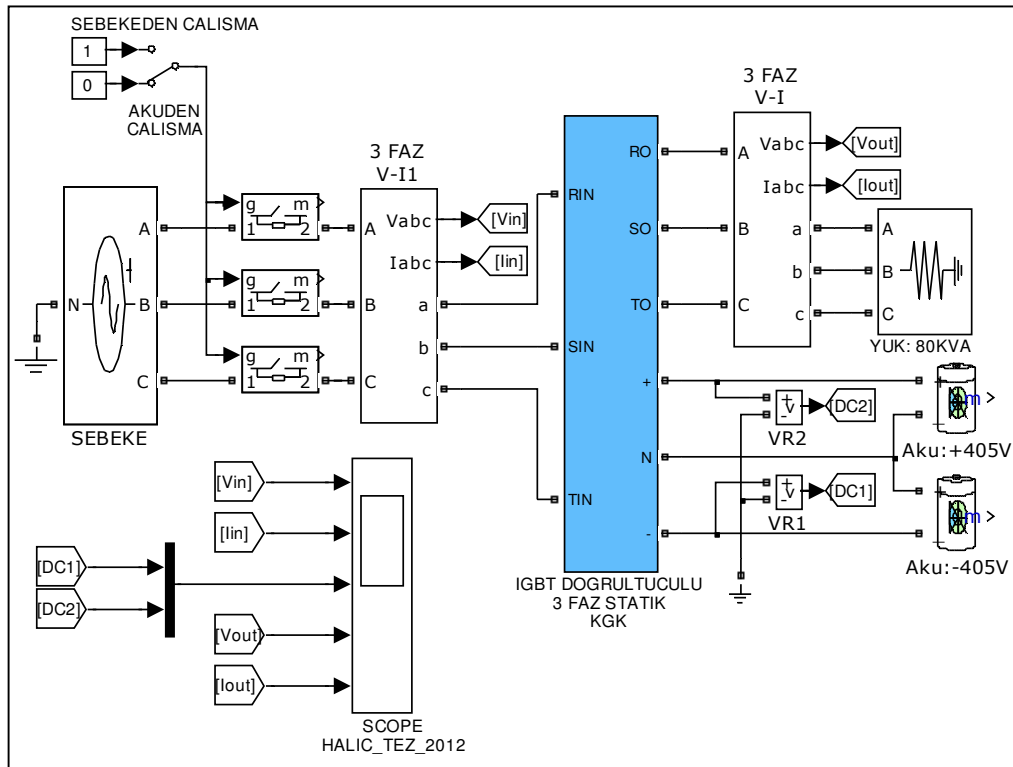
Bir model tanımlandıktan sonra, ya Simulink'ten ya da Matlab komut penceresinden bir integral hesap yöntemi seçmek suretiyle, modelin benzetimi yapılabilir.

Menüler, özellikle etkileşimli çalışmalarda uygun olurken, komut hattı yaklaşımı bir benzetim grubunun çalıştırılmasında çok daha kullanışlı olmaktadır. Osiloskop ve diğer görüntü blokları kullanmak suretiyle, benzetim programı çalışırken benzetim sonuçlarını görmek mümkündür. Benzetim sonuçları, daha sonraki çalışmalarda kullanılmak üzere, Matlab çalışma ortamına da aktarılabilir.

Model çözümlene sonuçları aynı zamanda doğrusallaştırma ve düzeltme araçlarını da kapsar. Bu araçlara Matlab komut hattından olduğu kadar uygulama araç kutularından da ulaşmak mümkündür. Matlab ve Simulink birbirleriyle tümleşik çalıştıklarından, kurulan modellerin her hangi bir noktada her iki ortamdan benzetimi, çözümlenmesi ve incelemesini yapmak mümkündür (Doğruer, 2007: 96).

## 6.2 IGBT Doğrultuculu SKGK Benzetimi

Şekil 6.1’de IGBT doğrultuculu üç fazlı SKGK benzetiminin genel görünümü görülmektedir. Benzetimi gerçekleştirilen SKGK’nin çalışma prensibi Bölüm 3’te anlatılmış, Bölüm 5’te de deneysel harmonik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. SKGK’ye 80KVA doğrusal yük verilmiştir. SKGK’nin DC barasına ortak uçlu akü bağlantısı yapılmıştır. Şebeke geriliminin kesilip SKGK’nin aküler üzerinden çalıştırılabilmesi amacıyla şebeke tarafında “1” ve “0” anahtarlama yapılmıştır.



Şekil 6.1. IGBT doğrultuculu SKGK’nin simülasyon devresinin genel görünümü.

Şekil 6.2’de IGBT doğrultuculu üç fazlı SKGK benzetiminin simülasyon devresi görülmektedir. SKGK’nin benzetiminde, şebeke girişine ve çıkışına LC filtreleri yerleştirilmiştir. Doğrultucuda ve eviricide bulunan IGBT’lerin

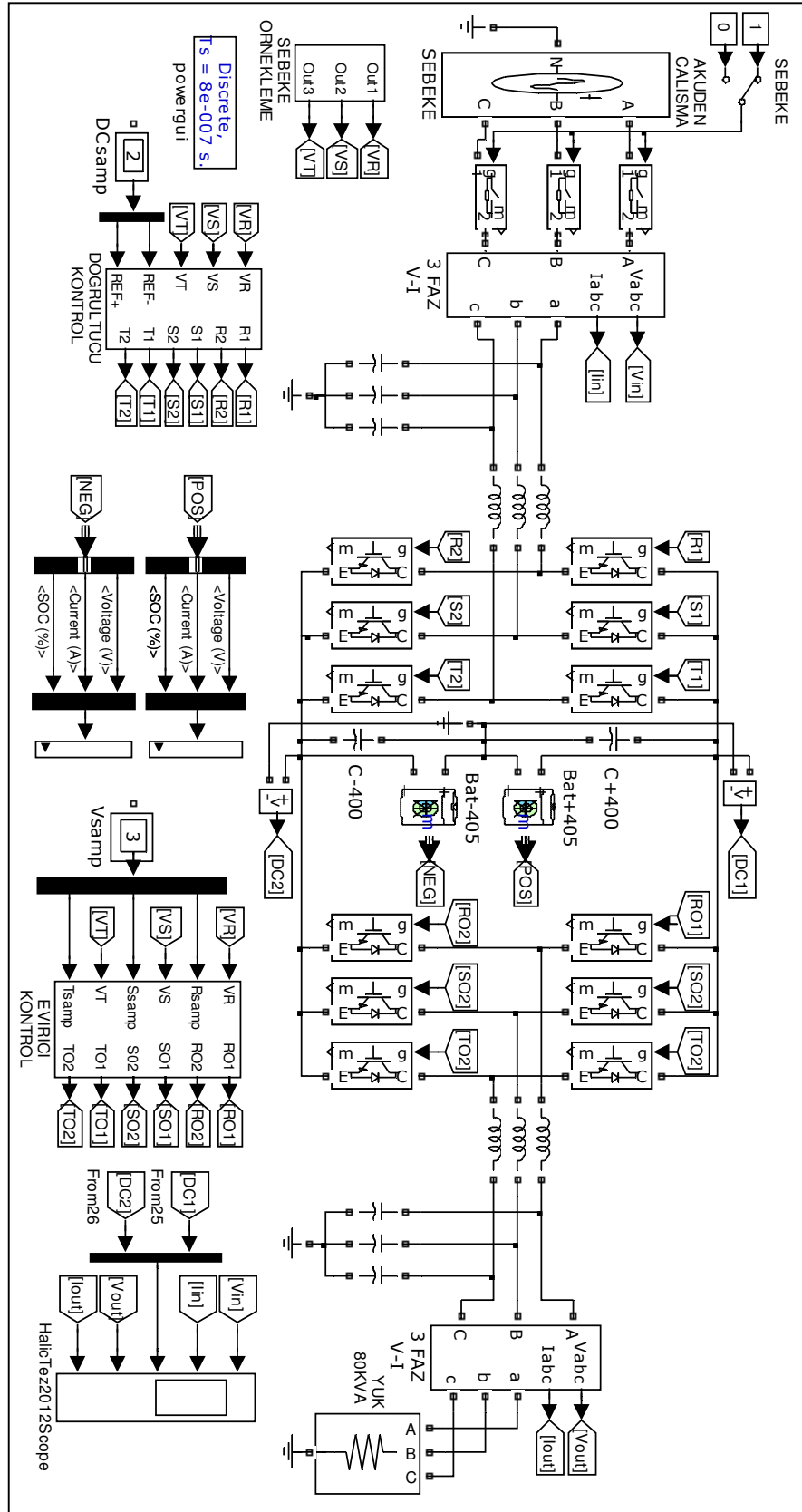
sürülebilmesi için doğrultucu kontrol ünitesi ve evirici kontrol üniteleri bulunmaktadır.

Doğrultucu kontrol ünitesinde, DC barada oluşan DC gerilimin örnekleme yapılarak doğrultucu kısmındaki IGBT'lerin iletimde ve kesimde kalmalarını sağlayacak PWM işaretleri oluşturulur. Doğrultucu PWM sinyali 12800 Hz'dir. DC bara gerilimi 400V DC olarak belirlenmiştir. Akü tipi olarak kurşun asit akümülatör seçilmiştir ve bir kolun (P-Nötr ve N-Nötr arası) akü toplam gerilimi 405V'a ayarlanmıştır.

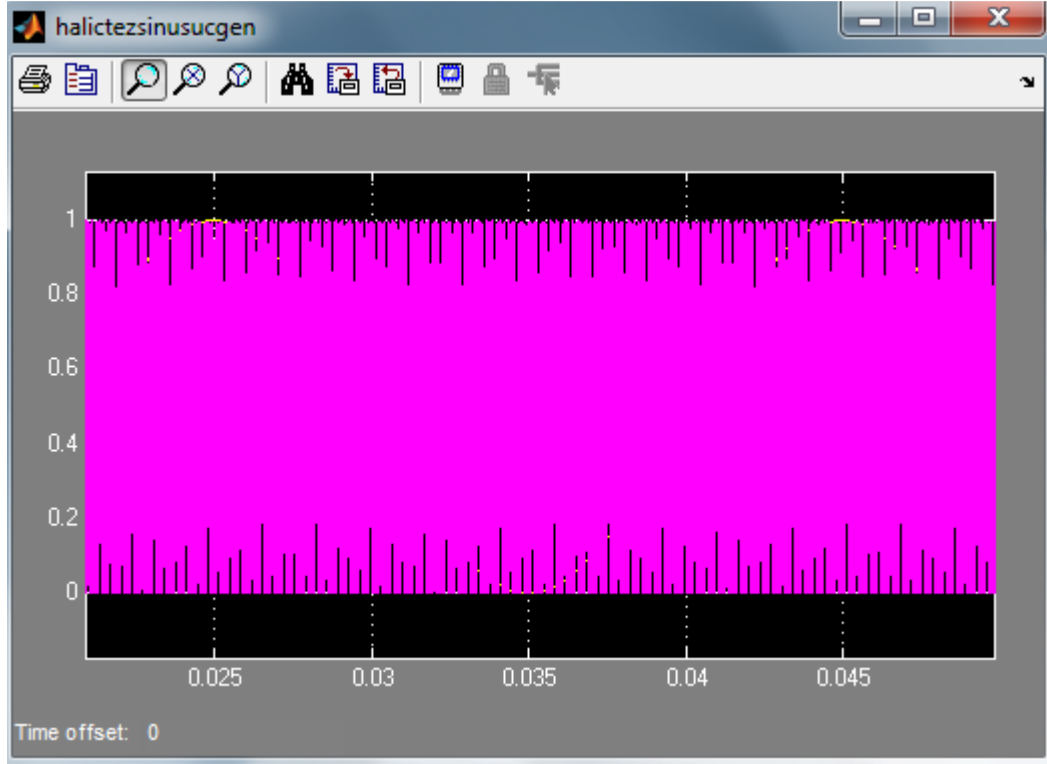
Evirici kontrol ünitesinde, SKGK çıkış geriliminin referans alınan sinüsoidal gerilime benzetilebilmesi için gerekli olan PWM elde edilir. Evirici PWM sinyali 12800 Hz'dir.

PWM tekniği olarak sinüsoidal PWM tekniğinden faydalanılmıştır. Sinüsoidal PWM tekniğinde referans sinüsoidal dalga yüksek frekanslı bir taşıyıcı üçgen dalgayı modüle etmek için kullanılmaktadır. Referans sinüsoidal dalga ile taşıyıcı üçgen dalga karşılaştırılarak IGBT'ler için anahtarlama süreleri belirlenir. Üç fazlı eviricilerde her bir faz için aynı taşıyıcı üçgen dalga kullanılır. Referans sinüsoidal dalga, taşıyıcı üçgen dalgadan büyük olduğu durumda eviricinin bir kolundaki üst IGBT iletime geçer, taşıyıcı üçgen dalganın daha büyük olduğu durumda ise alt IGBT iletime geçmektedir.

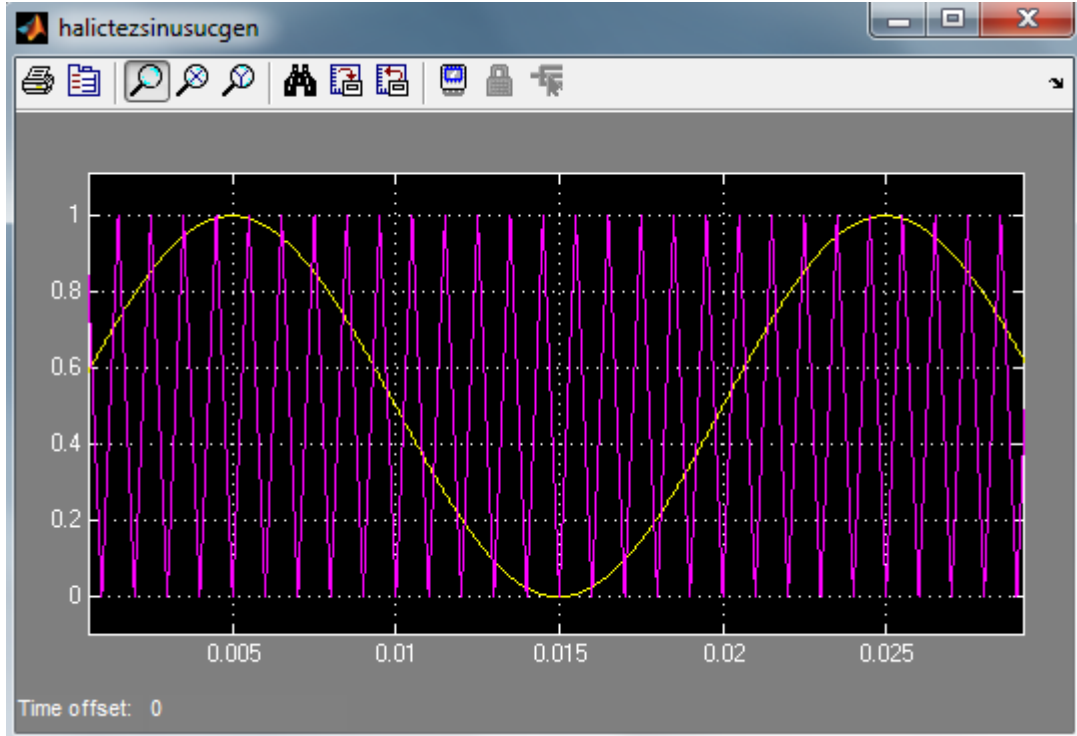
Referans sinüsoidal işaret ile üçgen taşıyıcı sinyalinin karşılaştırılması Şekil 6.3'te görülmektedir. Şekil 6.3a'da üçgen taşıyıcı sinyali 12800 Hz, Şekil 6.3b'de üçgen taşıyıcı sinyali 1000 Hz'dir.



Şekil 6.2. IGBT doğrultuculu üç fazlı SKGK benzetimi simülasyon devresi.



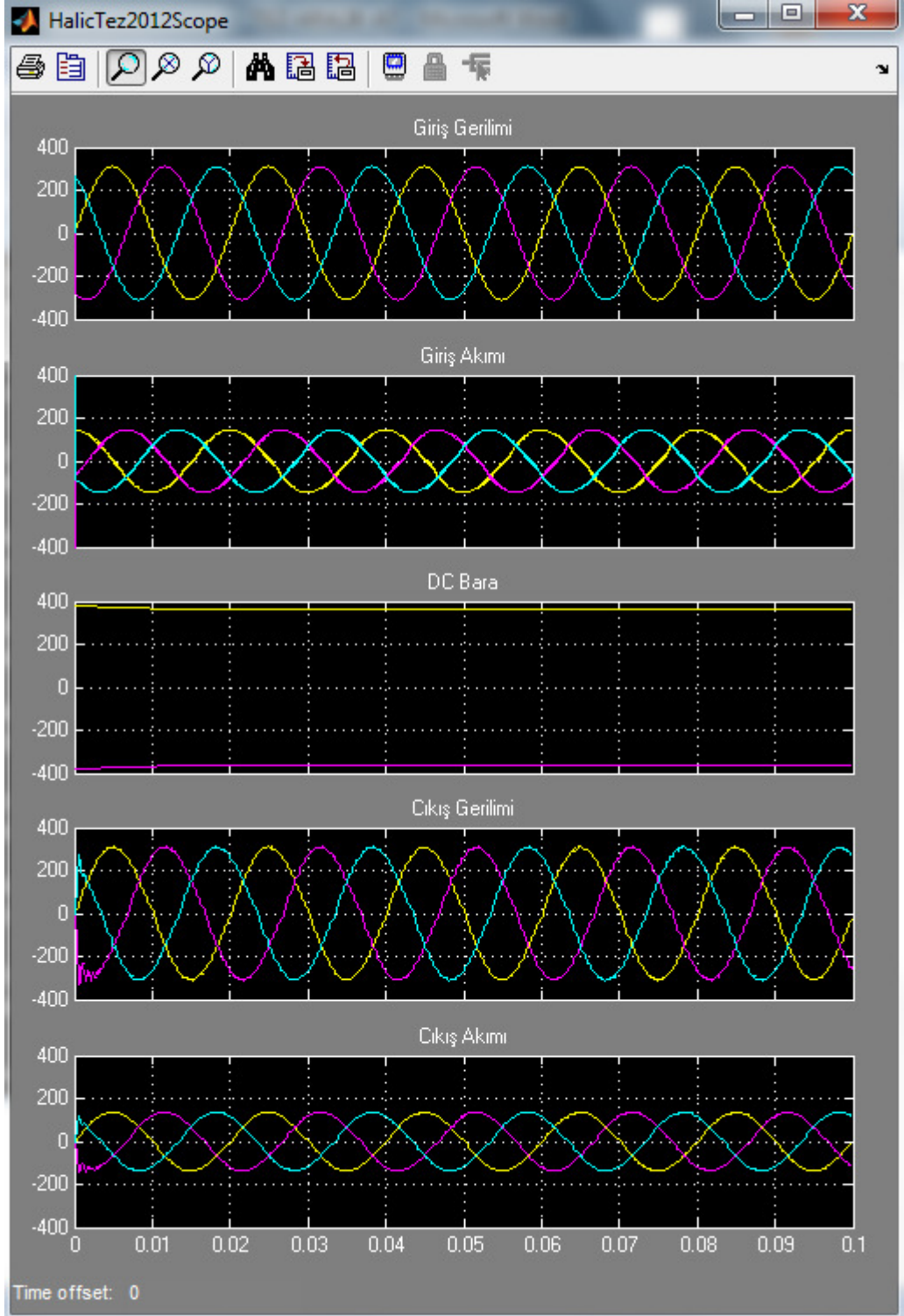
(a)



(b)

**Şekil 6.3.** Sinüsoidal işaret ile üçgen taşıyıcı sinyalinin karşılaştırılması a) Taşıyıcı sinyali 12800 Hz,  
b) Taşıyıcı sinyali 1000 Hz.

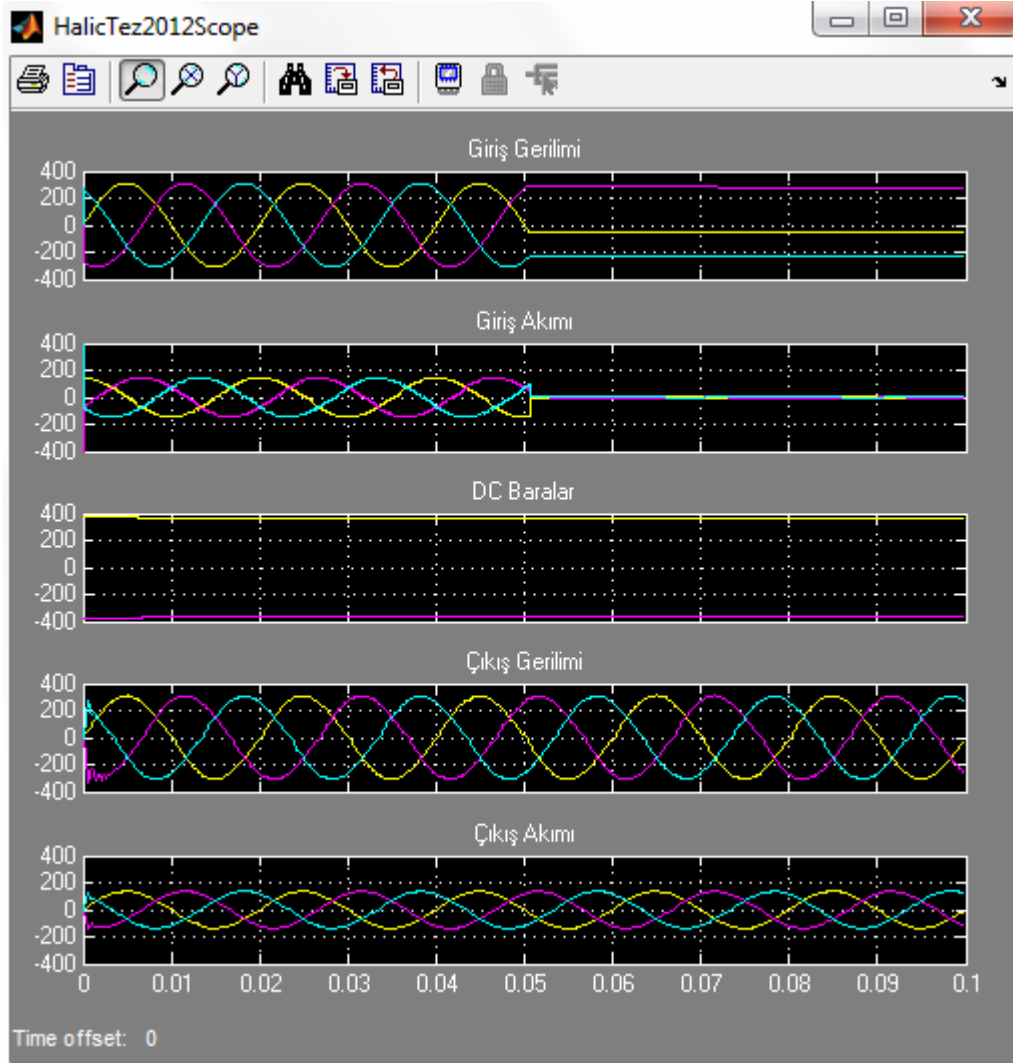
Şekil 6.4'te benzetimi gerçekleştirilen IGBT doğrultuculu SKGK'nin simüle edilmesiyle elde edilen, "Giriş Gerilimi, Giriş Akımı, DC Bara Gerilimi, Çıkış Gerilimi, Çıkış Akımı" dalga şekilleri görülmektedir.



Şekil 6.4. SKGK'nin simülasyon ile elde edilen akım ve gerilim dalga şekilleri.

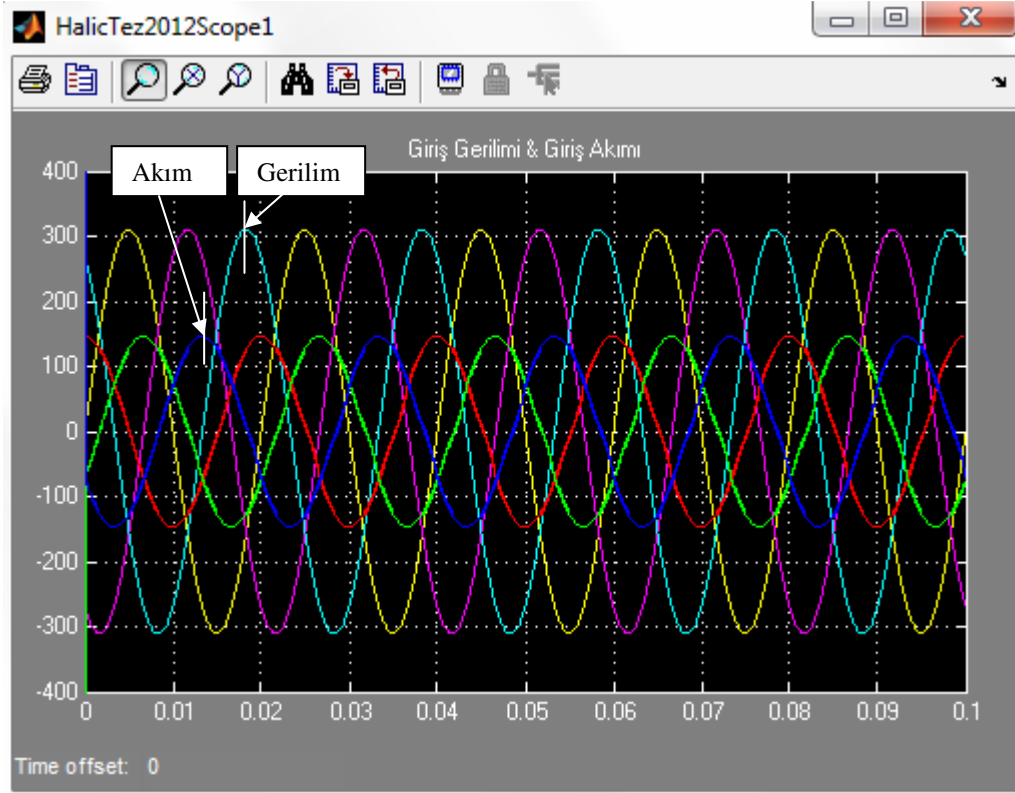


Benzetimi yapılan SKGK'nin giriş beslemesi kesilmiştir. Evricinin beslemesi sisteme bağlanan aküler tarafından sağlanmaktadır. Şebekeden çalışma modundan aküden çalışma moduna geçildiği anda SKGK çıkışında herhangi bir kesinti yaşanmadan sistem evirici üzerinden beslenmeye devam etmiştir. Kesintisiz geçişi ve aküden çalışma modunu gösteren durum Şekil 6.5'te görülmektedir.

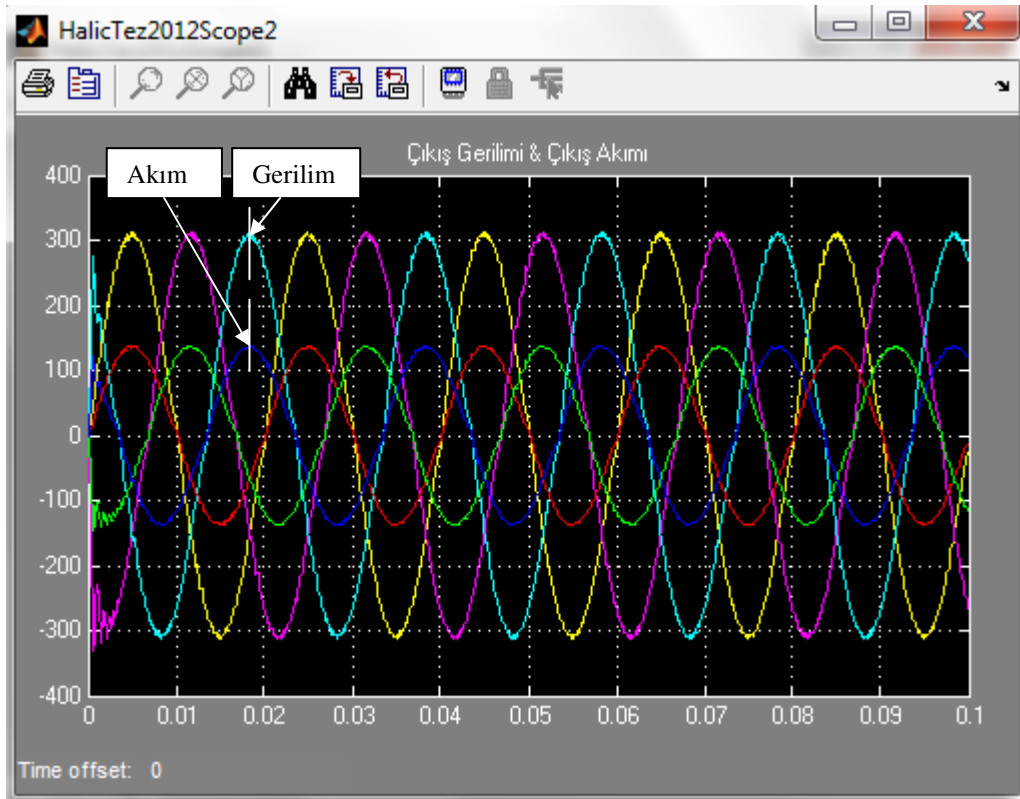


Şekil 6.5. Aküden çalışma durumunda SKGK'nin akım ve gerilim dalga şekilleri.

Şekil 6.6'da SKGK'nin 80KVA doğrusal yük altında üç faz giriş akım ve gerilim dalga şekilleri görülmektedir. Girişten çekilen akım ve gerilim dalga şekilleri arasında faz farkı oluşmaktadır. Şekil 6.7'de SKGK çıkış akım ve gerilimin dalga şekilleri görülmektedir. SKGK çıkışında akım ve gerilim arasında faz farkı kalmamıştır.

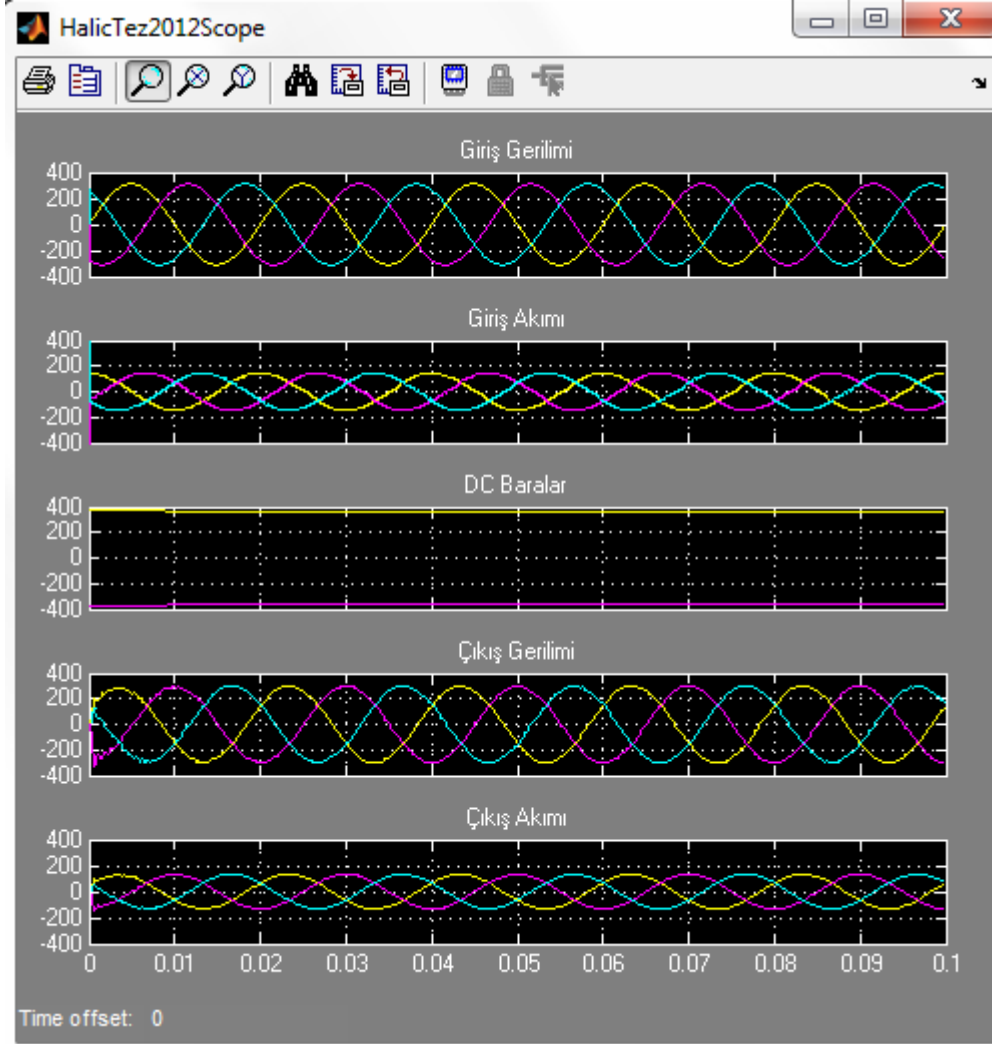


Şekil 6.6. Üç faz SKGK giriş akım ve gerilim dalga şekilleri.



Şekil 6.7. Üç faz SKGK çıkış akım ve gerilim dalga şekilleri.

Simulasyonu gerçekleştirilen SKGK cihazının çıkışına 80KVA gücünde izolasyon trafosu konulmuştur. Şekil 6.8’de Trafolu SKGK’nin akım ve gerilim dalga şekilleri görülmektedir.



Şekil 6.8. Çıkışı trafolu SKGK’nin simülasyon ile elde edilen akım ve gerilim dalga şekilleri.

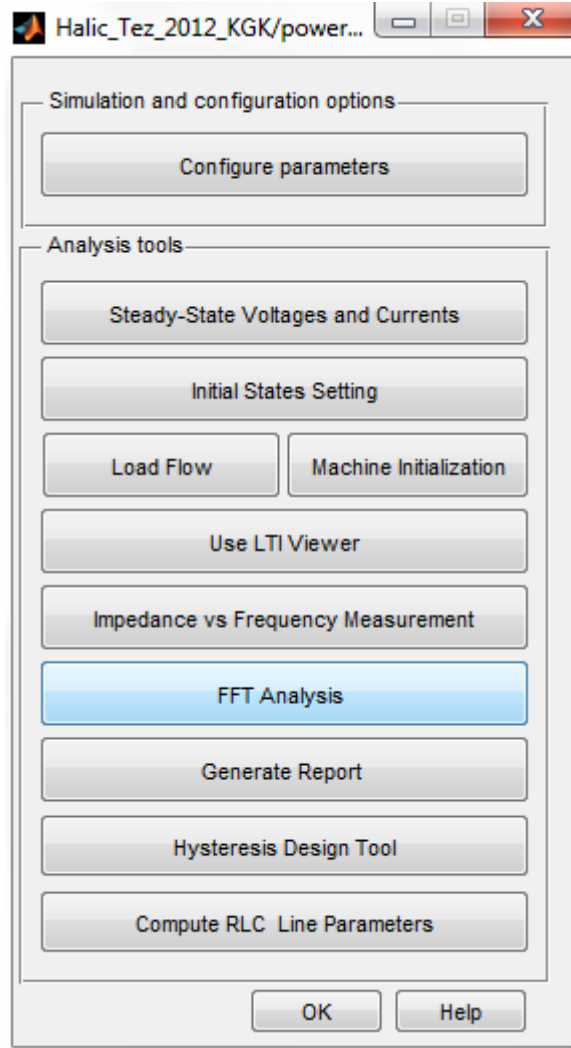
Simülasyonları yapılan trafosuz ve trafolu 80KVA gücündeki SKGK’lerin verimleri Tablo 6.1’de görülmektedir. Verim; çıkıştan çekilen gücün girişten çekilen güce bölünmesiyle hesaplanır. Trafosuz SKGK’nin verimi %92 iken trafolu SKGK’nin verimi %88 hesaplanmıştır.

Tablo 6.1. Trafosuz SKGK ve trafolu SKGK’nin verimlerinin karşılaştırılması

Trafosuz SKGK			Trafolu SKGK		
Çıkış Gücü	Giriş Gücü	Verim	Çıkış Gücü	Giriş Gücü	Verim
41609 W	45179 W	%92	39900 W	45210 W	%88

### 6.3 IGBT Doğrultuculu SKGK'de Harmonik Analizi

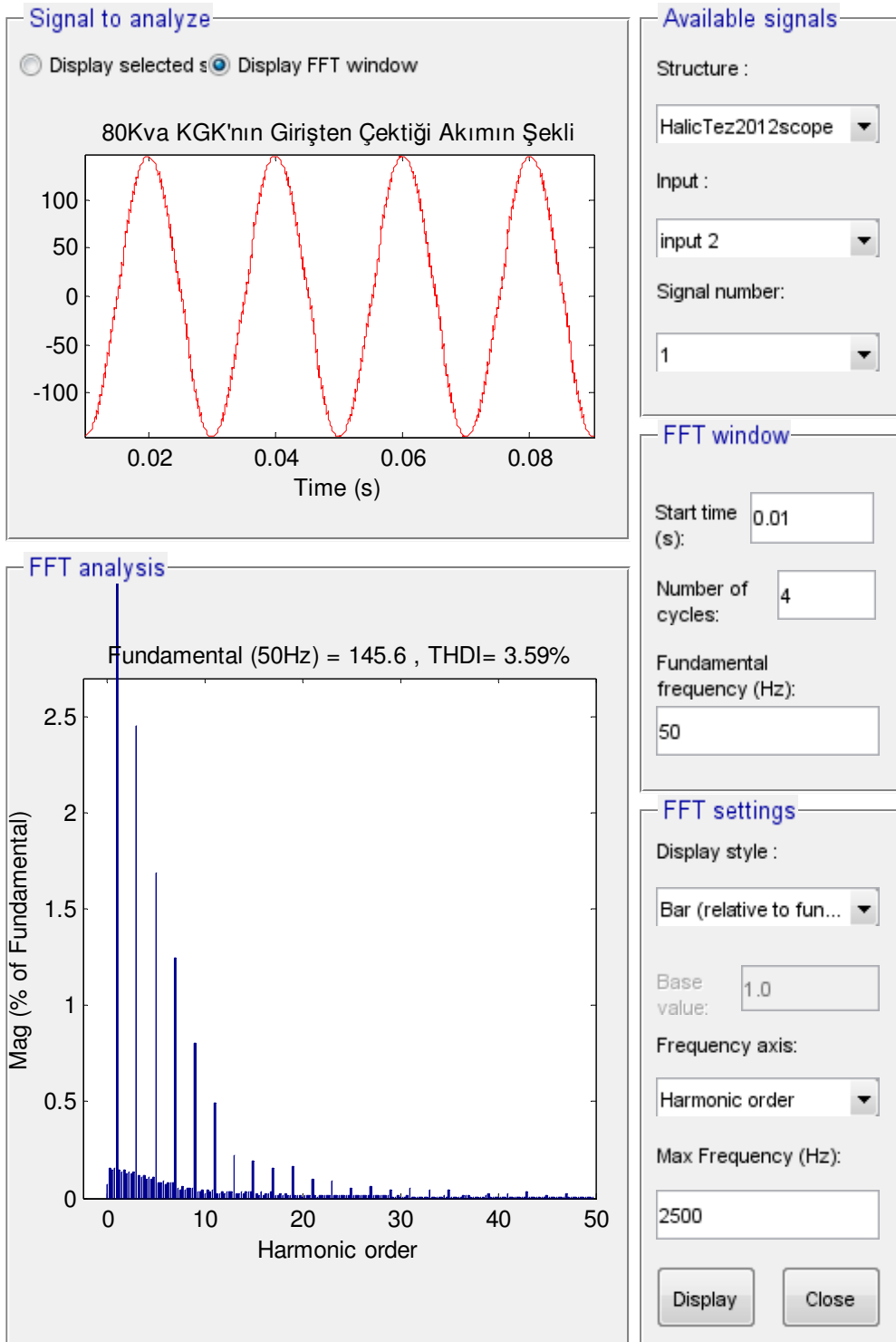
Benzetimi yapılan IGBT doğrultuculu üç fazlı SKGK'de harmonik analizi, Şekil 6.9'da gösterilen simulink powergui modülündeki FFT analizi bölümünden gerçekleştirilmiştir.



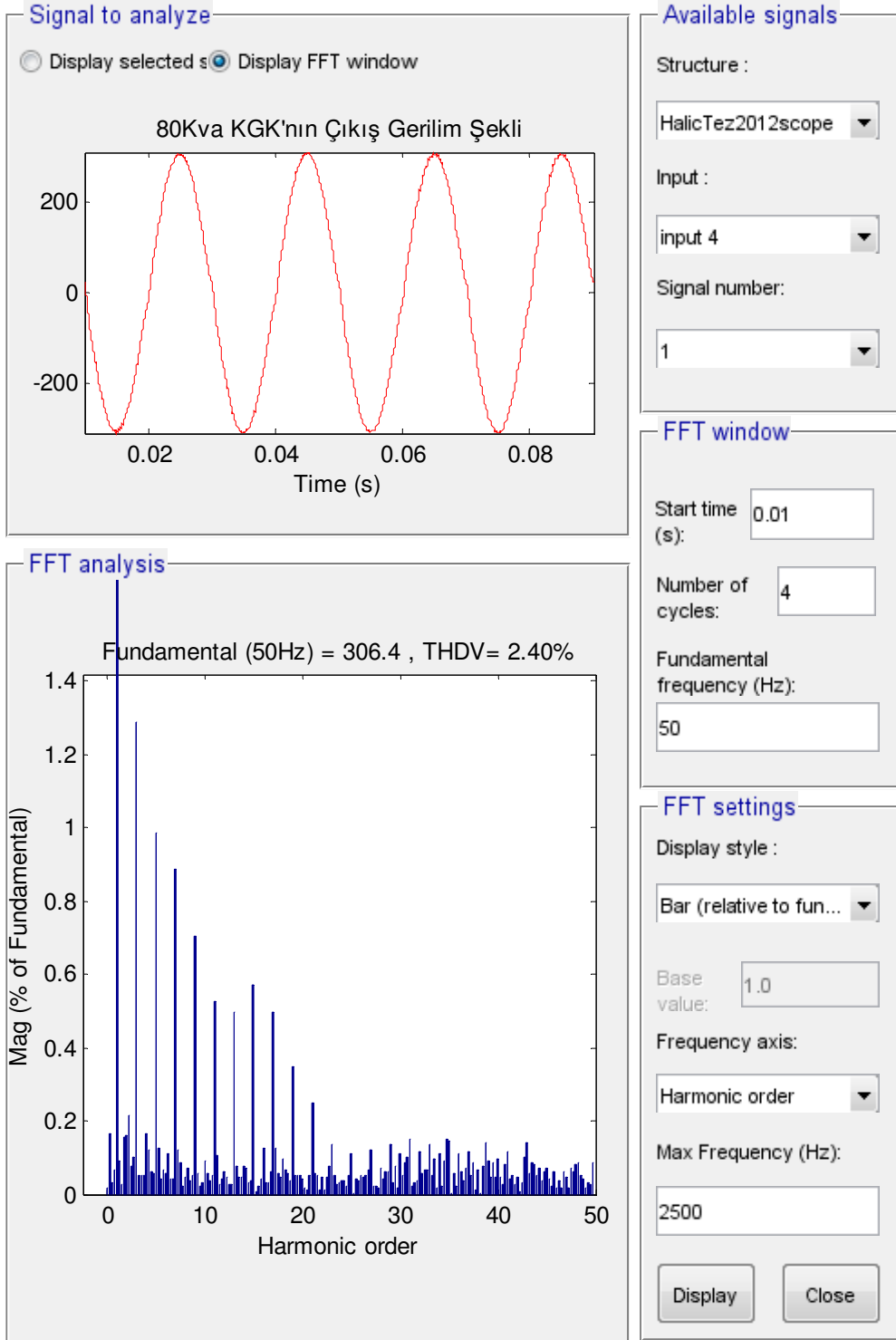
Şekil 6.9. Simulasyon ile harmonik analizinin yapıldığı FFT analiz bölümü.

Simulasyonu yapılan SKGK'nin girişten çektiği akımın dalga şekli ve giriş THDI değerleri Şekil 6.10'da, SKGK'nin çıkış geriliminin dalga şekli ve çıkış THDV değerleri Şekil 6.11'de görülmektedir.

Şekil 6.10'da, temel frekansta (50 Hz) SKGK'nin girişten çektiği akımın tepe değeri 145.6 A'dır. Harmonik ölçümler ilk 50 harmonik (2500 Hz'e kadar) için gerçekleştirilmiştir. THDI, 3.59 olarak ölçülmüştür. Harmoniklerin derecesi arttıkça değerleri azalmıştır. Şekil 6.11'de, temel frekansta (50 Hz) SKGK'nin çıkış geriliminin tepe değeri 306.4 V'dır. THDV, 2.40 olarak ölçülmüştür.

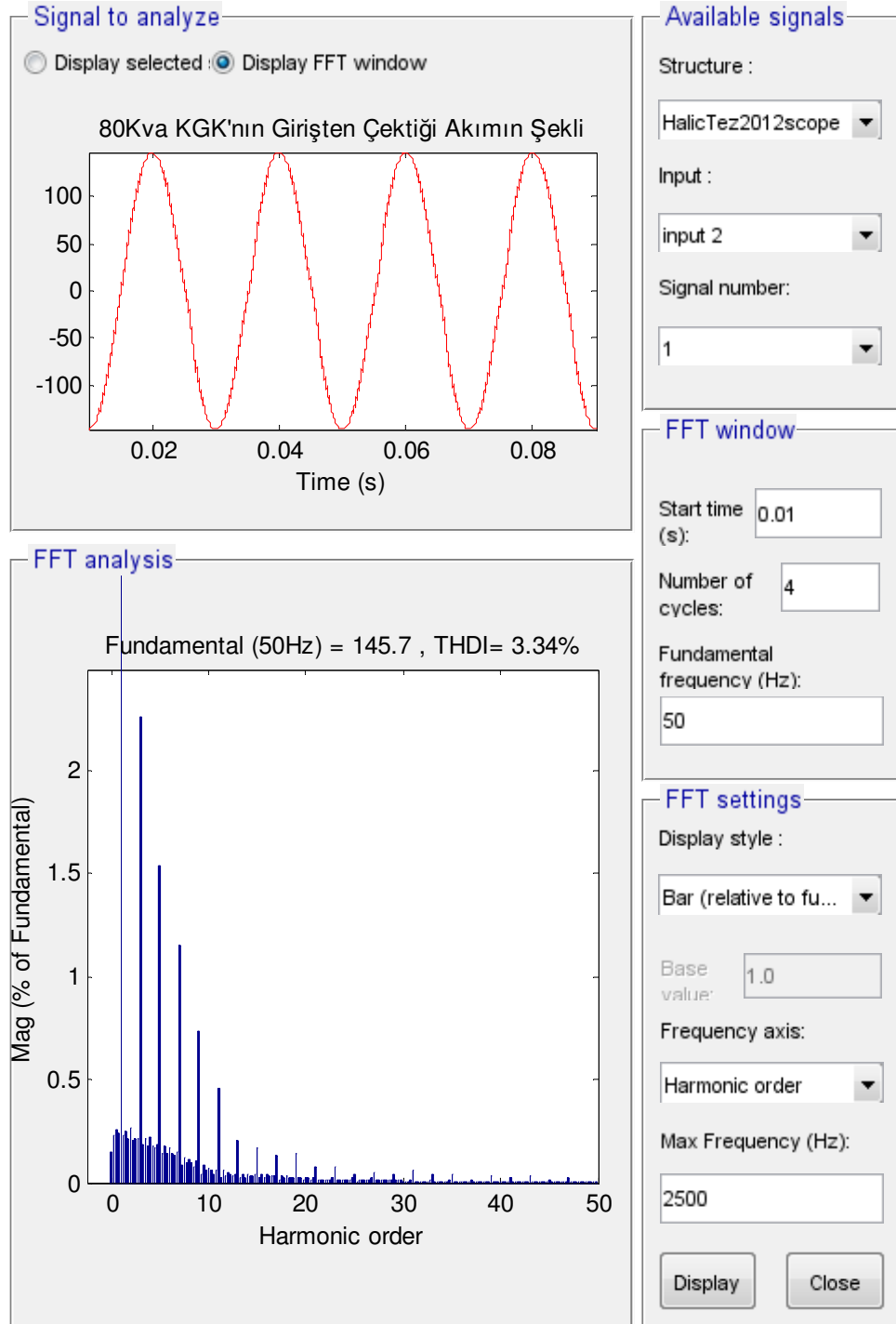


**Şekil 6.10.** SKGK'nın girişten çektiği akımın dalga şekli ve giriş THDI değerleri.

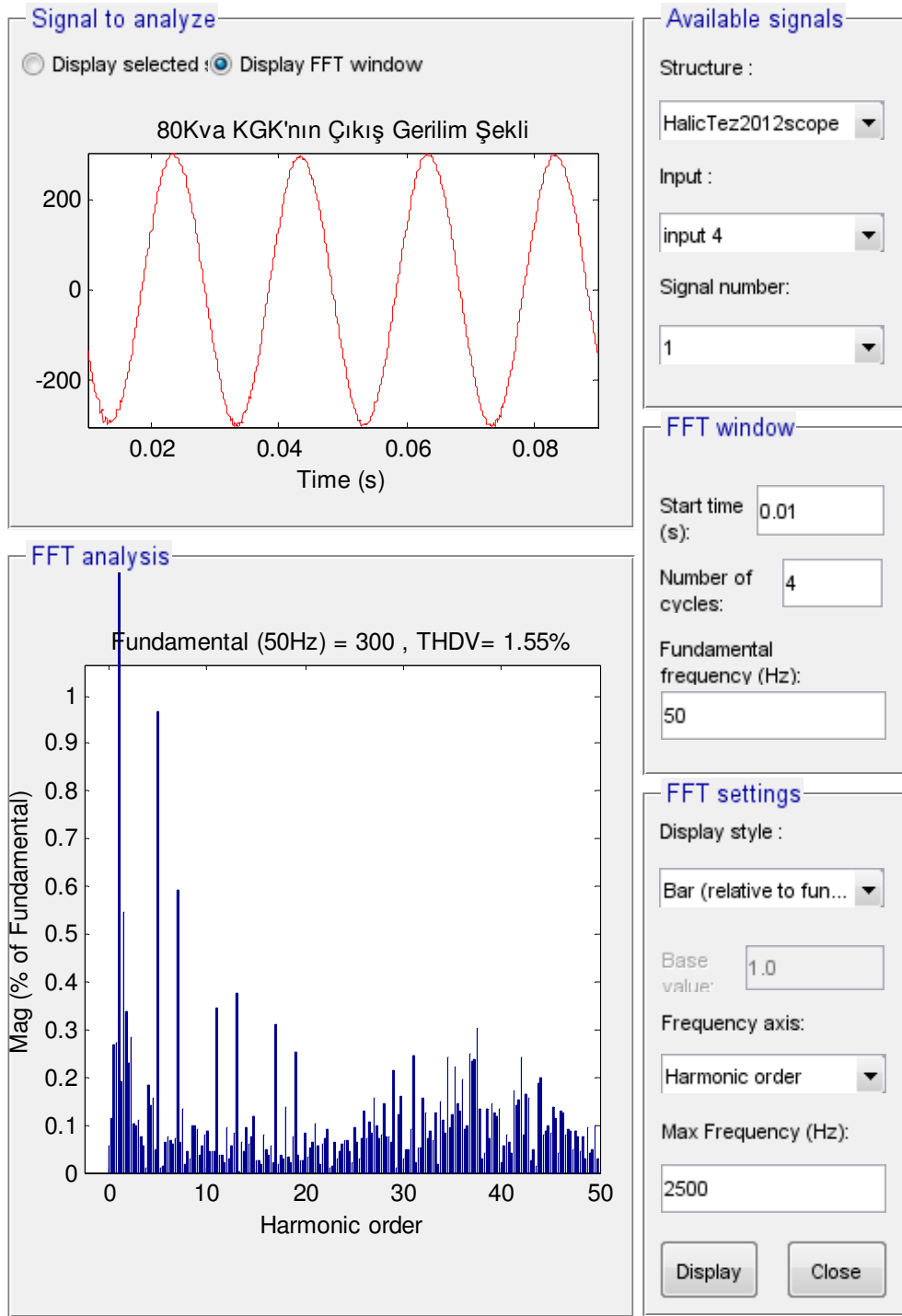


**Şekil 6.11.** SKGK çıkış gerilimi dalga şekli ve çıkış THDV değerleri.

SKGK'nin çıkışına 80KVA gücünde izolasyon trafosu konulmuştur. Sistemin simüle edilmesiyle, Şekil 6.12'de giriş THDI, Şekil 6.13'de çıkış THDV değerleri elde edilmiştir.



Şekil 6.12. Çıkışı trafolu SKGK'nın girişten çektiği akımın dalga şekli ve giriş THDI değerleri.



**Şekil 6.13.** Çıkışı trafolu SKGK'nın çıkış gerilimi dalga şekli ve çıkış THDV değerleri.

PWM ile evirici çıkışında düşük dereceli gerilim harmonikleri küçük, yüksek dereceli gerilim harmonikleri büyük olan bir çıkış elde edilir. Yüksek dereceli harmonikleri filtrelemek daha kolaydır.

Tablo 6.2'de simulasyondan elde edilen harmonik ölçüm değerleriyle fabrika ortamında çalışmakta olan SKGK'den alınan harmonik ölçüm sonuçlarının değerleri görülmektedir.



**Tablo 6.2.** Deneysel ve simulasyon harmonik ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

SİSTEM	SKGK Çıkışında İzolasyon Trafosu Yok		SKGK Çıkışında İzolasyon Trafosu Var	
	Giriş THDI (%)	Çıkış THDV (%)	Giriş THDI (%)	Çıkış THDV (%)
Deneysel Ölçüm	5.0	3.1	2.0	0.9
Simulasyon	3.59	2.40	3.34	1.55

Tablo 6.2’de ki sonuçlar incelendiğinde, SKGK’nin çıkışında izolasyon trafosu kullanıldığında hem deneysel ölçümlerde hemde simulasyon sonuçlarında THDI ve THDV değerlerinde azalmalar olduğu görülmektedir.

Simulasyon ölçüm sonuçları deneysel ölçüm sonuçlarından daha düşük çıkmıştır. Deneysel ölçümlerde, harmonik ölçüm cihazlarının hassasiyetinden, kablolama alt yapısındaki kayıplardan, şebeke gerilim değerlerinin ve yük tarafındaki değerlerin %100 doğrulukla ölçülerek hesaba katılamamasından dolayı harmonik değerler simulasyon değerlerinden yüksek ölçülmüştür.

## 7. KESİNTİSİZ GÜÇ KAYNAKLARINDA HARMONİK AZALTIM YÖNTEMLERİ

SKGK'lerin şebeke tarafında neden olduğu akım harmoniklerinin ve çıkışında neden olduğu gerilim harmoniklerinin daha önceki bölümlerde anlatılan sebeplerden dolayı azaltılması gerekmektedir.

### 7.1 Akım Harmoniklerinin Azaltılması

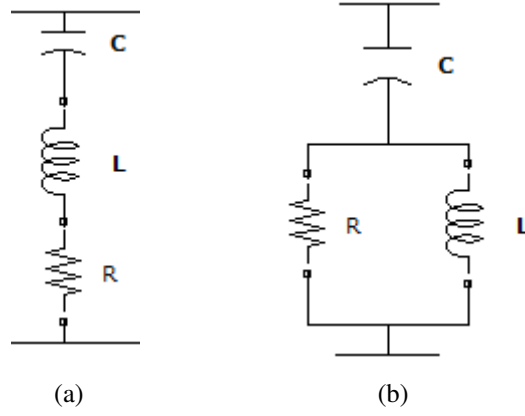
Doğrusal olmayan yüklerin çektikleri harmonikli akımlar, bağlı oldukları şebekenin gücü ve sisteme bağlı elemanların (transformatör, kondansatör, endüktif yükler v.b.) empedanslarına bağlı olarak bağlantı noktalarında gerilim harmonikleri ve dolayısıyla arızaların oluşmasına yol açarlar. Bu nedenle harmonik akımlarının filtrelenmesi gereklidir (Gencer ve diğ., 2009).

#### 7.1.1 Pasif Harmonik Filtre

Pasif harmonik filtreleme (PHF), akım harmonik bileşenlerinin pasif elemanlar (kondansatör ve endüktans) kullanarak filtrelenmesidir. PHF yöntemi, güç sistemlerinde çoğunlukla kompanzasyon sistemlerine eklenen seri reaktörler yardımıyla yapılır. Ancak bu yöntem, her bir filtrelenecek harmonik için ayrı filtre devreleri ve kurulumunda büyük yer gerektirmesi, filtrelemenin düşük olması, anahtarlama sırasında sistemde diğer güç kalitesi problemlerine sebep olmasından dolayı çok fazla tercih edilmemektedir.

Pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik bileşen frekansında rezonansa gelecek  $L$  ve  $C$  değerlerini belirlemektir. Her bir harmonik bileşen için onu rezonansa getirecek ayrı bir filtre gereklidir. “ $q$ ” kalite faktörüne göre filtreler yüksek geçiren veya düşük geçiren filtreler olarak ayrılırlar.

Yüksek  $q$  filtresi, düşük harmonik frekanslarından birine ayarlanır. Düşük  $q$  filtresi ise geniş bir frekans aralığında düşük bir empedansa sahiptir ve yüksek seviyeli harmonikleri süzmek için kullanıldığından yüksek geçiren filtre olarak da düşünülür. Şekil 7.1a'da düşük  $q$  tipi filtre, Şekil 7.1b'de ise yüksek  $q$  tipi filtre görülmektedir.



**Şekil 7.1.**  $q$  tipi pasif harmonik filtreler (a) Düşük  $q$  tipi filtre (b) Yüksek  $q$  tipi filtre.

$q$  kalite faktörü;

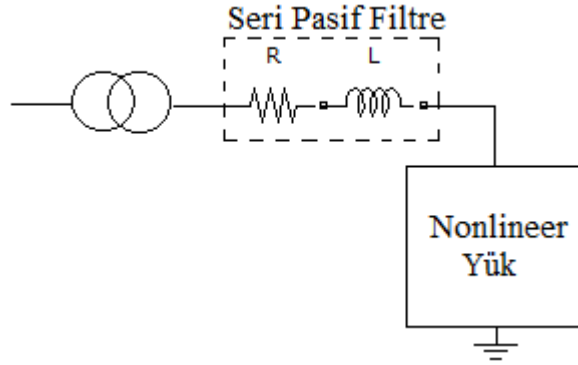
$$q = \frac{X_r}{R} \quad (7.1)$$

ile ifade edilir. Bu ifadede  $X_r$  kondansatör veya endüktansın rezonans frekansındaki reaktansını,  $R$  ise filtrenin direncini gösterir.

Harmoniklerin engellenmesi için pasif filtreler olarak seri filtreler ve paralel filtreler kullanılmaktadır.

#### 7.1.1.1 Seri Pasif Filtre

Şekil 7.2’de bir devrede seri filtrenin kullanımı görülmektedir.



**Şekil 7.2.** Seri pasif filtrenin devre içinde kullanımı.

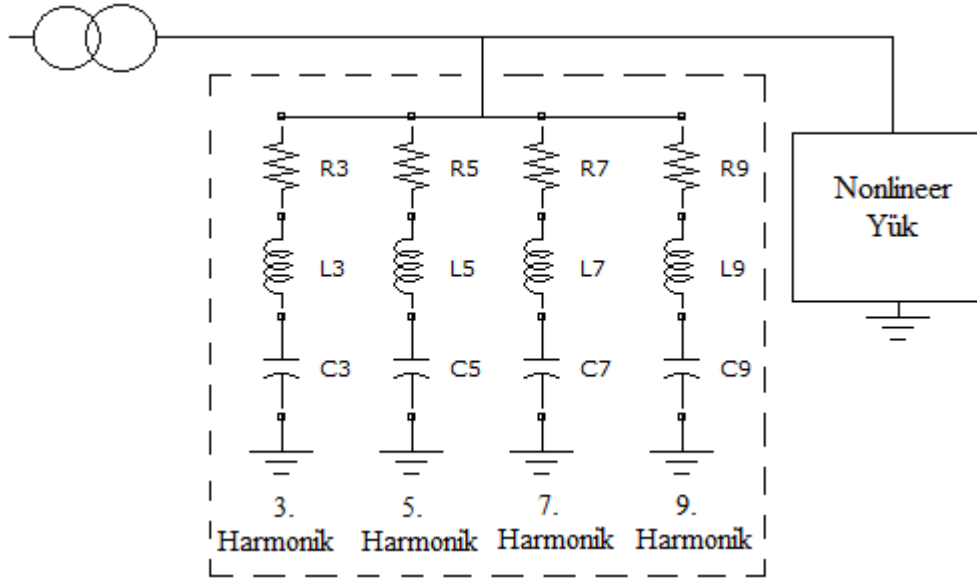
Seri filtreler, harmonik kaynağıyla şebeke arasında seri olarak bağlanır ve harmonik akışına yüksek empedans gösterirler. Bu yüzden seri filtrelerin ayarlanmış olduğu frekansta yüksek empedans vardır.

Seri filtre belirli bir frekansa ayarlandığı için, sadece o frekans bileşenine yüksek empedans, temel frekansta düşük empedans gösterirler. Seri filtrelerin en büyük dezavantajları devreye seri olarak bağlandıklarından dolayı yük akımını

taşımak ve hat gerilimine göre yalıtılmak durumunda olmalarıdır. Bununla birlikte rezonansa yol açmamaları en büyük avantajlarıdır (Efe, 2006: 61).

### 7.1.1.2 Paralel Pasif Filtre

Paralel filtrenin bir devreye bağlantısı Şekil 7.3’de görülmektedir.



Şekil 7.3. Paralel pasif filtrenin devre içinde kullanımı.

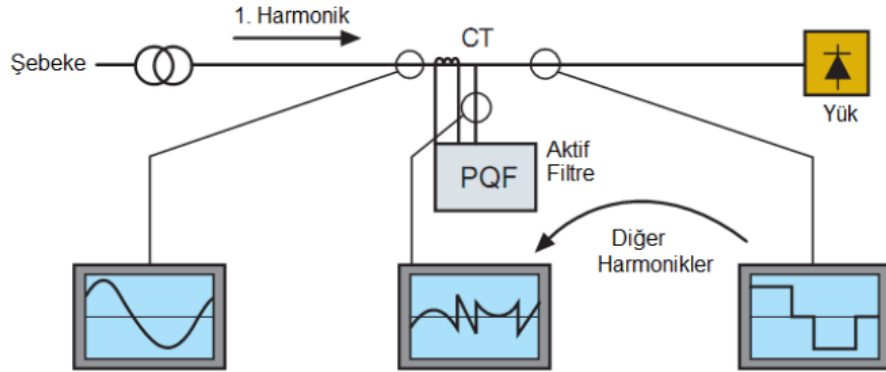
İstenmeyen harmonik bileşen akımları düşük empedanslı bir paralel yol yardımıyla toprağa aktarılarak sistemde dolaşmaları engellenebilir. Harmonik kaynağıyla şebeke arasına paralel olarak bağlanırlar. Bu tip filtrelerde amaç, düşük bir şönt empedans yoluyla istenmeyen harmonik akımlarının filtre üzerinden geçmesinin sağlanmasıdır. Ayrıca temel frekansta reaktif güç sağlayarak güç faktörü düzeltiminde de kullanılırlar. Tasarımları kolaydır. Ancak paralel filtre bileşenleri mevcut şebeke empedanslarıyla birbirini etkileyerek rezonansa neden olurlar.

Kompanzasyon ihtiyacı olmayan sistemlerde kondansatör ve reaktörlerin seri bağlanmasıyla oluşturulan pasif filtre sistemleri kullanılamayacağından bu gibi durumlarda aktif filtreler çözüm olmaktadır (Basumlu, 2009).

### 7.1.2 Aktif Harmonik Filtre

Doğrusal olmayan yüklerin çektikleri akım harmoniklerini karşılayarak, şebekeden sinüsoidal formunda akım çekilmesini sağlayan güç elektroniği tabanlı sistemler, aktif harmonik filtre (AHF) olarak adlandırılmaktadır. Şekil 7.4’de şebekeye paralel bağlanan bir aktif harmonik filtre görülmektedir. AHF kapalı

çevrim çalışarak, akım sinyalinin istenen noktada tamamen sinüs formuna dönmesini sağlamaktadır.



Şekil 7.4. Aktif harmonik filtrenin devre içinde kullanımı.

AHF'lerin kapasitesi akım değeri ile ölçülür. Temel kullanım amacı harmonik bileşenli akımların yok edilmesi olduğu için bir güç analizörü yardımı ile sistemin bir çalışma periyodu boyunca akım bileşenlerinin yanında tüm elektriksel büyüklüklerinin ölçülmesi gereklidir.

AHF'nin çalışma prensibi, doğrusal olmayan yükün çekeceği temel bileşen dışındaki akımı karşılamaktır. Buna göre AHF'ler yük tarafından çekilen harmonikleri analiz ederek harmonik bileşenleri uygun bir fazda yüke uygularlar. Doğrusal olmayan bir yük şebekeye bağlandığında  $I_{\zeta}$  şebeke akımını çeker. Bu akım temel bileşen yanında harmonik bileşenleri de içermektedir.

$$I_{\zeta} = I_1 + \sum_{n=2}^N I_n = I_1 + I_H \quad (7.2)$$

şeklinde harmonik bileşen akımlarını sağlayan bir eleman olması durumunda şebekeden sadece temel bileşen akımını çekilir.

Aktif filtre akımı için de;

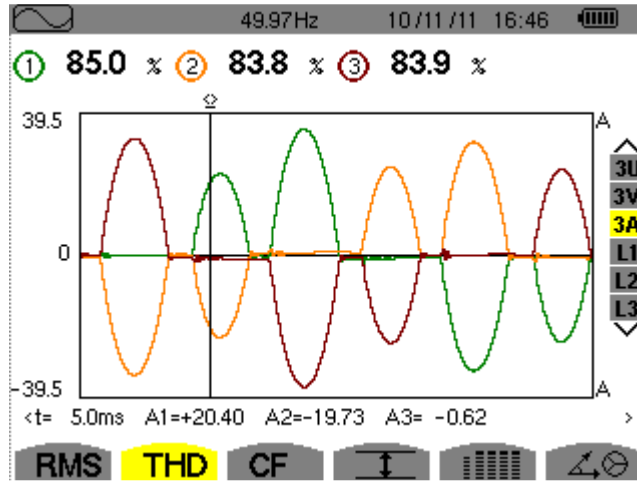
$$I_f = I_H \quad (7.3)$$

yazılabilir. Buna göre aktif filtrelerin şebekeden harmonik akımların çekilmemesine neden oldukları sonucuna varılabilir.

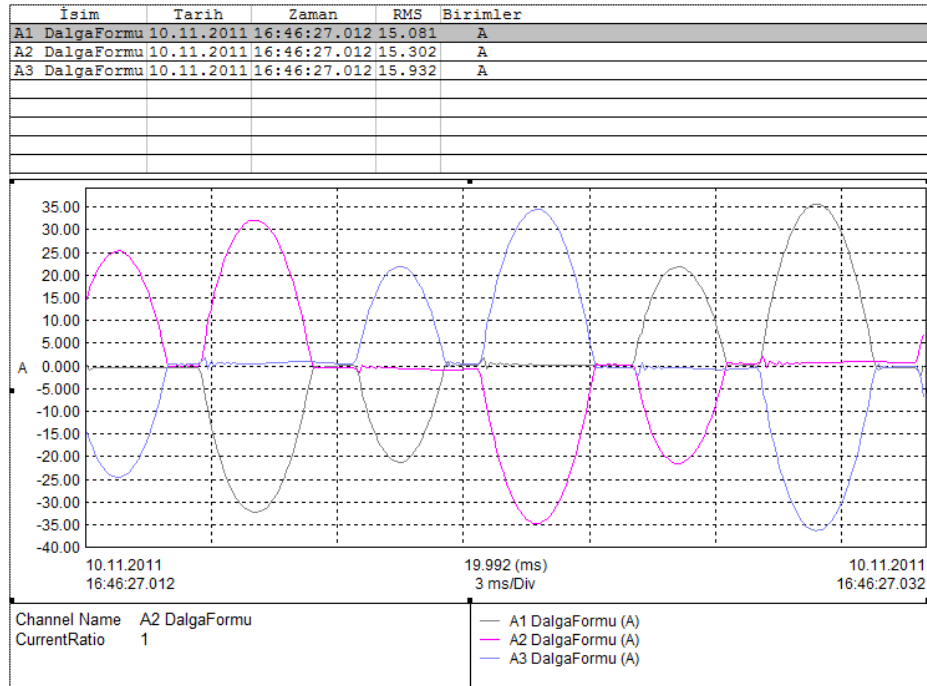
AHF'ler devreye seri ve paralel olmak üzere iki şekilde bağlanabilirler. Paralel filtre, tesiste var olan pasif filtre ile kombine olarak çalışabildiğinden daha çok kullanılır.

### 7.1.2.1 Aktif Harmonik Filtre Uygulaması

Doğrultucu bölümünde tristör kullanılan altı darbeli 20KVA gücündeki SKGK'de AHF uygulaması yapılmıştır. Şekil 7.5a'da AHF'nin sisteme eklenmediği durumdaki giriş akım dalga şekilleri görülmektedir. %50 oranında doğrusal olmayan yük verilmiştir. Dalga şekillerinden de anlaşılacağı üzere girişten çekilen akımın dalga şekli sinüsoidal şekilden çok uzaktır ve THDI değerleri %85'ler seviyesindedir. Girişten çekilen akımın rms değerleri Şekil 7.5b'de görülmektedir.



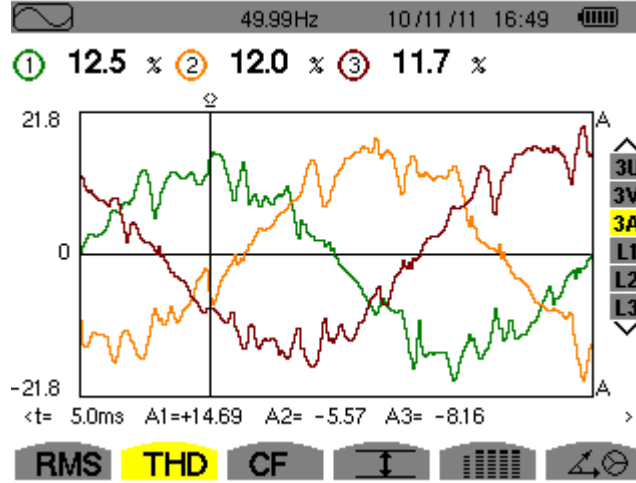
(a)



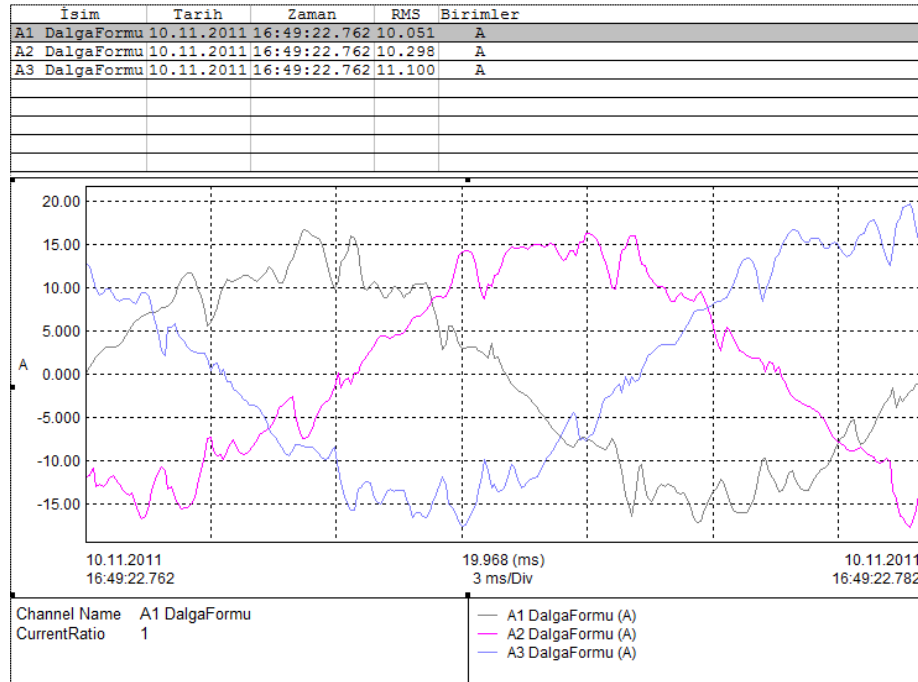
(b)

Şekil 7.5. %50 yükte altı darbeli 20KVA SKGK'nin AHF devrede olmadığı durumda (a) Giriş THDI değerleri, (b) Giriş akımı rms değerleri.

Şekil 7.6a'da AHF'nin sisteme eklenmesi sonucunda ölçülen giriş akım dalga şekilleri görülmektedir. Giriş THDI değerleri %85 seviyelerinden %12.5 seviyelerine düşmüştür. Girişten çekilen akımın rms değerleri Şekil 7.6b'de görülmektedir. AHF devrede değilken çekilen akımın rms değeri 15A iken AHF devreye girdiğinde rms akımı 10A seviyelerine düşmüştür.



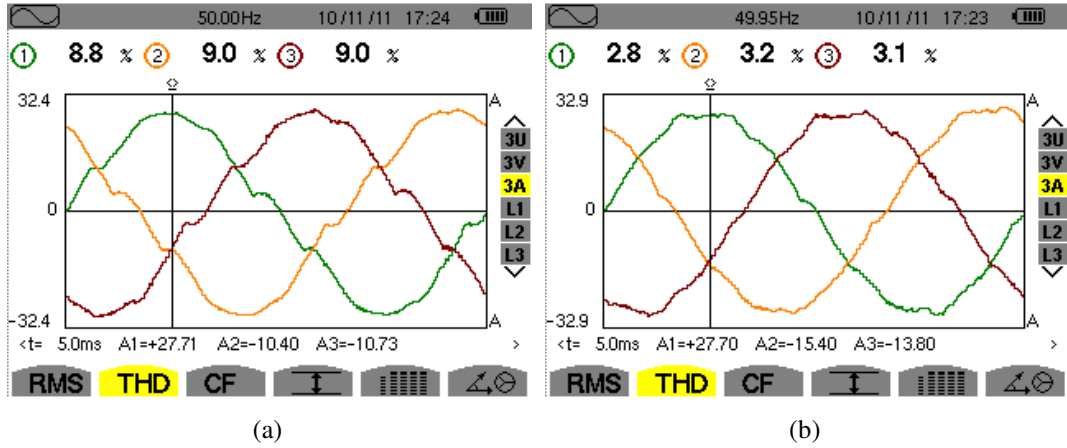
(a)



(b)

Şekil 7.6. %50 yükte altı darbeli 20KVA SKGK'nin AHF devrede olduğu durumda (a) Giriş THDI değerleri, (b) Giriş akımı rms değerleri.

AHF uygulaması, IGBT doğrultuculu 30KVA gücündeki SKGK cihazında da gerçekleştirilmiştir. %50 oranında doğrusal olmayan yük verilmiştir. Şekil 7.7a'da AHF'nin sisteme eklenmediği durumdaki giriş akım dalga şekli, Şekil 7.7b'de AHF'nin eklendiği durumdaki dalga şekli görülmektedir. Dalga şekillerinden görüleceği üzere, giriş THDI değerleri %8.8 seviyelerinden %2.8 seviyelerine düşmüştür.



Şekil 7.7. %50 yükte IGBT doğrultuculu 30KVA SKGK'nin giriş THDI değerleri (a) AHF devrede değil, (b) AHF devrede.

AHF'nin devrede olduğu durumda AHF cihazının ön panelindeki değerler Şekil 7.8'de görülmektedir.

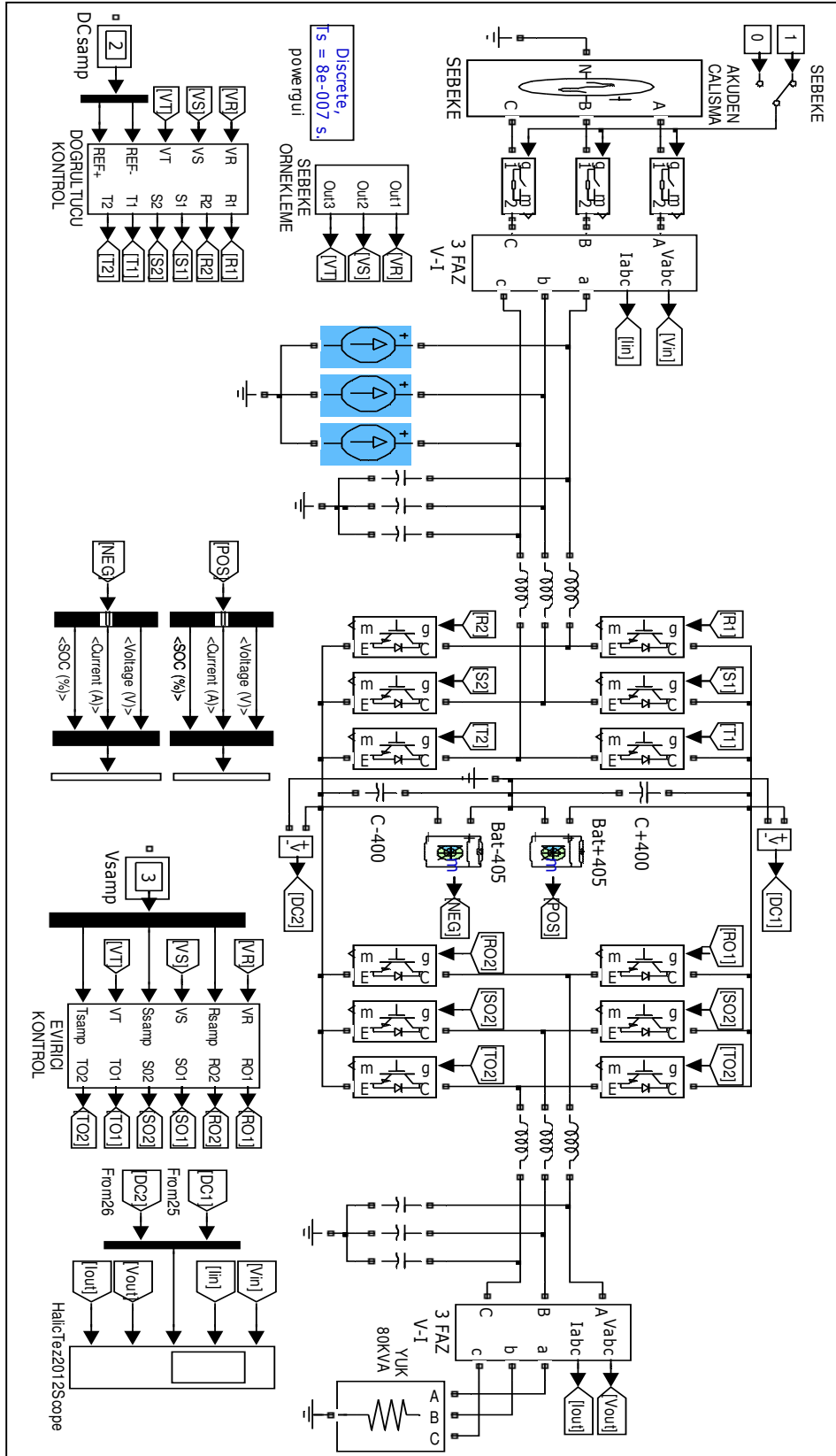


Şekil 7.8. Harmonik ölçüm sonuçlarının AHF cihazının ön panelinde gösterilmesi.

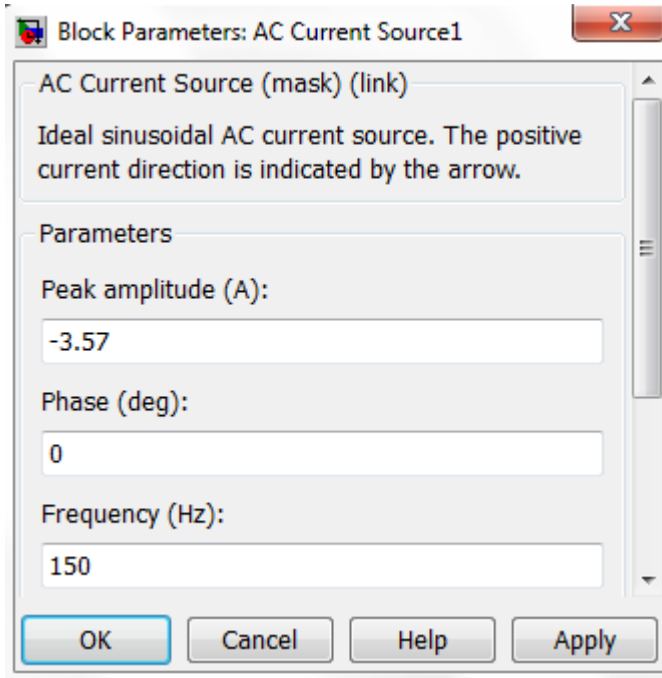


Akım harmoniğinin azaltılması için AHF cihazıyla yapılan uygulamaya ek olarak, benzetimi yapılan SKGK devresine akım kaynağı eklenerek simülasyon yöntemiyle de akım harmoniğinin azaltılmasına yönelik çalışma yapılmıştır.

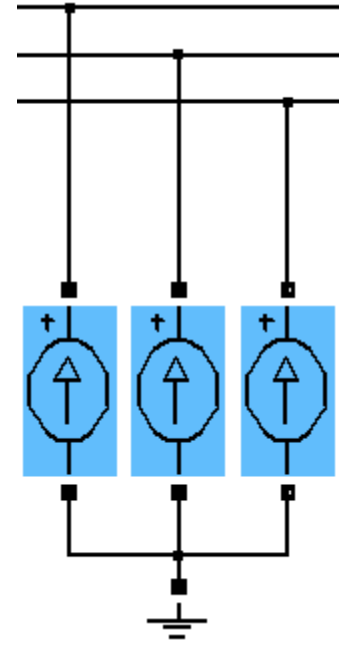
Bölüm 6'da 80KVA gücündeki IGBT Doğrultucu SKGK'nin benzetimi ile elde edilen devrenin simülasyon sonuçlarında Şekil 6.10'da gösterildiği üzere giriş THDI %3.59 ölçülmüştür. Simülasyon uygulamasında amaç 3. harmoniğin azaltılmasıdır. 3. harmoniğin azaltılmasına yönelik Şekil 7.9'da gösterildiği şekilde devreye akım kaynağı eklenmiştir. Şekil 7.10a'da R fazına ait akım kaynağının değerleri görülmektedir. Akım kaynağının tepe değeri, Bölüm 6'da analizi yapılan ve Şekil 7.11a'da gösterilen ölçümler üzerinden belirlenmiştir. 3. harmoniğin azaltılması istenildiğinden dolayı frekans 150 Hz olarak alınmıştır. Şekil 7.11a incelendiğinde 3. harmoniğin değeri temel frekansdaki değer %2.46 büyüklüğündedir. Akım kaynağının bağlanmasıyla elde edilen Şekil 7.9'da ki devre simüle edilmiştir. Simülasyon sonucunda 3. harmoniğin değeri %1.22 ölçülmüştür. 3. harmonik, akım kaynağı sayesinde %2.46 değerinden %1.22 değerine gerilemiştir. Toplam akım harmoniği (THDI) değeri de %3.59 seviyesinden %2.88 seviyesine düşmüştür.



Şekil 7.9. Akım kaynağı bağlanmış IGBT Doğrultuculu SKGK'nin simülasyon devresi.

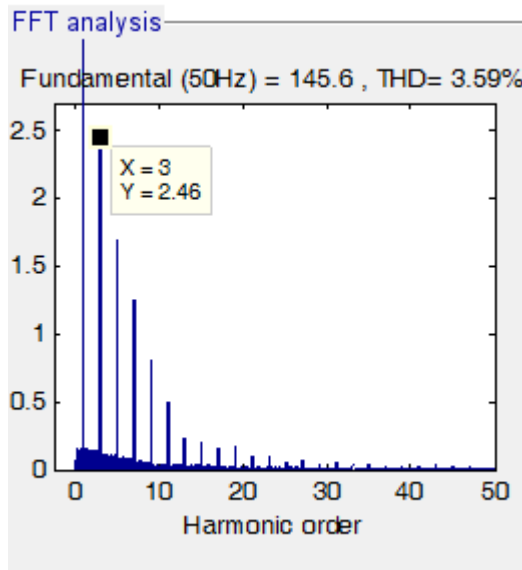


(a)

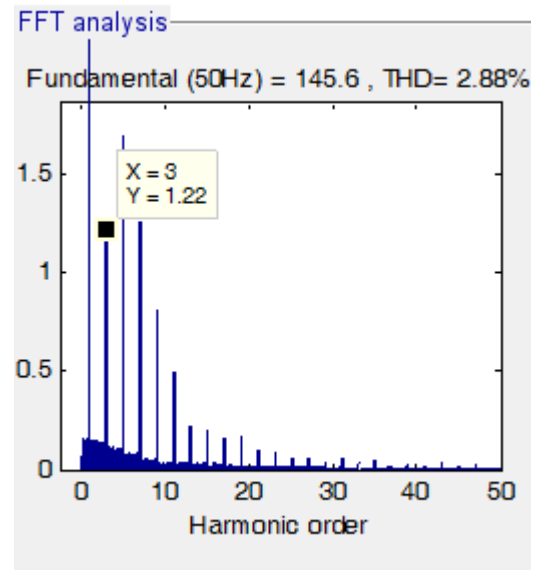


(b)

Şekil 7.10. (a) Akım kaynağının blok parametre değerleri, (b) Devreye eklenen akım kaynağının gösterimi.



(a)



(b)

Şekil 7.11. Simulasyonu yapılan IGBT doğrultuculu SKGK'nin giriş harmonik analizi (a) Akım kaynağı bağlanmadan önce, (b) Akım kaynağı bağlandıktan sonra.

SKGK cihazının ürettiği giriş akım harmonikleri engellenmeden şebekeye geçtiğinde, şebekeye bağlı diğer sistemler bu harmoniklerden dolayı olarak etkilenecek ve arızalar oluşacaktır.

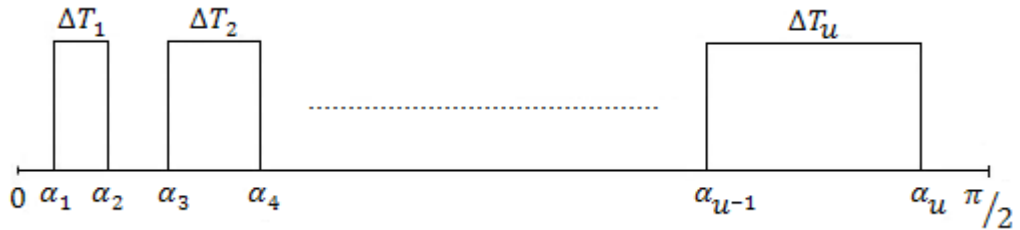
Aktif ve pasif filtrelerin karşılaştırılması Tablo 7.1’de görülmektedir (Yılmaz, 2009).

**Tablo 7.1.** Aktif ve pasif filtrelerin karşılaştırılması

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

## 7.2 Gerilim Harmoniklerinin Azaltılması

Güç elektroniği devrelerini tasarlarken amaçlardan biride çıkış gerilimindeki harmonikleri azaltmaktır. Fourier analizi ile PWM’in de özelliklerinden olan çıkış gerilimindeki istenilen harmoniklerin yok edilmesi üzerine inceleme yapılmıştır. Kesintisiz güç kaynaklarında kullanılan PWM’e göre çalışan bir eviricide, çıkıştaki harmonik oranının, darbe sayısına ve açılara ne kadar bağımlı olduğu harmonik analizi ile anlaşılabilir. Bu bölümde tek faz için hesaplamalar incelenmiştir.



**Şekil 7.12.** PWM yönteminde çıkış gerilimi.

Şekil 7.12’de ki darbe şekillerinin Fourier Analizi, çıkış gerilimi hakkında bazı bilgiler verir. Burada inceleme  $\pi/2$  için yapılmış ve darbe süreleri, taşıyıcı işaretlerin ortasına yerleştirilmiştir. Böylece çeyrek dalga simetrisi sağlanmış olur.

Çıkış gerilimi;

$$V_0 = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nwt + b_n \sin nwt) \quad (7.4)$$

Çeyrek durum simetrisinden dolayı  $a_0 = 0$ ,  $a_n = 0$  olur. Ayrıca  $n$ 'nin çift değerleri de toplamda bulunmaz. Böylece (7.4) ifadesi değiştirilerek (7.5) ifadesi şeklini alır.

$$V_0 = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin nwt \quad n = 1,3,5, \dots \quad (7.5)$$

$U$ , çeyrek periyotta ki darbe sayısını göstermek üzere;

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(wt) \sin(nwt) dw$$

$$b_n = \frac{2}{\pi/2} \int_0^{\pi/2} V_{dc} \sin(nwt) dw$$

$$b_n = \frac{4V_{dc}}{\pi} \left[ \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin(nwt) dw + \int_{\alpha_3}^{\alpha_4} \sin(nwt) dw + \dots + \int_{\alpha_{u-1}}^{\alpha_u} \sin(nwt) dw \right]$$

$$b_n = \frac{4V_{dc}}{\pi n} \sum_{i=1}^{u-1} (\cos n\alpha_i - \cos n\alpha_{i+1}) \quad i = 1,2,3, \dots, u-1 \quad (7.6)$$

darbe süresi açısı olarak alınırsa,

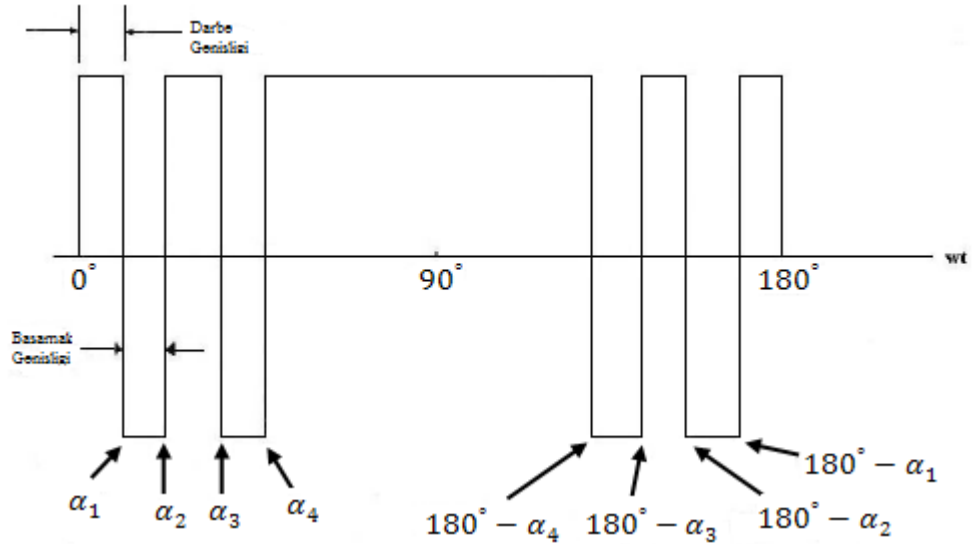
$$\delta_i = w \cdot \Delta t \quad (7.7)$$

$$b_n = \frac{4V_{dc}}{\pi n} \sum_{i=1}^{u-1} [\cos n\alpha_i - \cos n(\alpha_i + \delta_i)] \quad (7.8)$$

elde edilir. Buradan çıkış gerilimi;

$$V_0 = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{4V_{dc}}{\pi n} \sum_{i=1}^{u-1} (\cos n\alpha_i - \cos n(\alpha_i + \delta_i)) \right] \sin(nwt) \quad (7.9)$$

ifadesi bulunur. Bu ifade, çıkış geriliminde temel bileşenin tek katları olan harmoniklerin bulunduğunu göstermektedir.



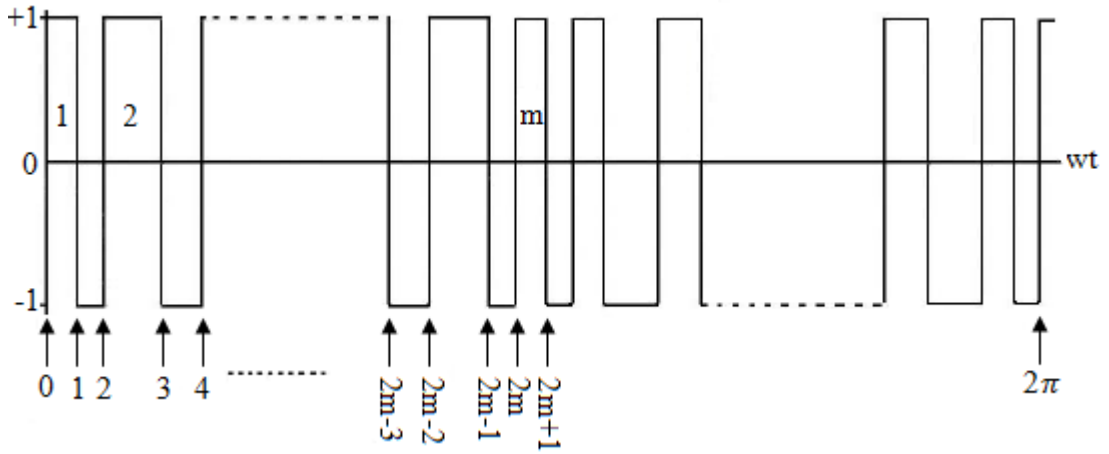
Şekil 7.13. PWM'li evirici çıkışında istenilen harmoniklerin yok edilmesi.

SKGK'nin evirici çıkışındaki istenmeyen harmonikler, harmonik eliminasyon yöntemi olarak bilinen bir yöntemle ortadan kaldırılabılır ve aynı zamanda da denetlenebilir. Yöntemin genel ilkesi bir yarım çevrim için Şekil 7.13'de görülmektedir.

Gösterilen  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 'un denetlenmesi ile çıkış geriliminin denetlenebileceği ve aynı zamanda ilk üç harmoniğin elimine edilebileceği gösterilmiştir. Dolayısıyla da üç fazlı bir eviricide var olacak 5., 7. ve 11. harmonikler ortadan kaldırılabilir. Elimine edilecek harmonik sayısı hesaplanması gereken  $\alpha$  sayısından bir eksiktir. Örneğin sadece 5. ve 7. harmonikler ortadan kaldırılmak istenirse  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  hesaplanır ve bir yarım çevrimde altı aktarım gerçekleştirilir. Bu yöntem mikroişlemci uygulamaları için özellikle uygundur. Bir yarım çevrimde gerçekleştirilebilecek aktarım sayısına, yani elimine edilecek harmoniklere karar verdikten sonra çeşitli çıkış gerilimi değerleri için tetikleme açıları önceden hesaplanır ve bir başvuru tablosunda saklanır. Çevirim için çalışma sırasında istenilen çıkış gerilimine karşılık gelen  $\alpha$  değerleri bu tablodan kolaylıkla elde edilir.

Analog olarak üçgen sinüs karşılaştırması ile elde edilen PWM işaretlerinde küçük dereceli harmonik bileşenler her ne kadar darbe sayısı artırılarak küçültülebilirse de Fourier Spektrumu, modülasyon indeksi  $m$ 'e göre sürekli değişmektedir. Burada matematik modeli incelenecek Fourier Spektrumu ise sabit bir darbe dizisine sahip olmaktadır. Genel olarak yok edilmesi istenilen harmonik sayısı

kadar denklem yazılır ve bu denklem takımı çözülerek gerekli açı değerleri bulunur (Akgün, 2007: 136).



Şekil 7.14. Yarı periyotta  $m$  darbe bulunan iki seviyeli PWM işareti.

Şekil 7.14 incelendiğinde,  $f(wt)$  fonksiyonunun her yarı periyodunda  $m$  darbe olduğu ve darbe açılarının  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{2m}$  şeklinde değiştiği görülür. Fonksiyonun fourier ifadesi;

$$f(wt) = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nwt + b_n \sin nwt)$$

şeklinde dir. Harmonik analizinden anlaşılacağı gibi  $a_0 = 0$ ,  $a_n = 0$  olur. Harmonikleri  $b_n$  terimi belirler.

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(wt) \sin(nwt) dwt$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(wt) \sin(nwt) dwt$$

yazılabilir.  $f(wt) = \pm 1$  birim veya yarı dalga simetrisi söz konusu olduğundan,

$$b_n = \frac{2}{\pi} \left[ \int_0^1 \sin(nwt) dwt - \int_1^2 \sin(nwt) dwt + \dots + \int_{2m}^{2m+1} \sin(nwt) dwt \right]$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \sum_{k=0}^{2m} (-1)^k \int_k^{k+1} \sin(nwt) dwt \quad (7.10)$$

$\alpha_0 = 0$ ,  $\alpha_{2m+1} = \pi$  ve  $\alpha_0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_{2m+1}$  olduğu bilindiğinden (7.10) ifadesi,

$$b_n = \frac{2}{n\pi} \sum_{k=0}^{2m} (-1)^k [\cos n\alpha_k - \cos n\alpha_{k+1}]$$

$$b_n = \frac{2}{n\pi} \left[ \cos n\alpha_0 - \cos n\alpha_{2m+1} + 2 \sum_{k=1}^{2m} (-1)^k \cos n\alpha_k \right]$$

$$b_n = \frac{2}{n\pi} [2 + 2 \sum_{k=1}^{2m} (-1)^k \cos n\alpha_k] \quad (7.11)$$

şekline gelir.

$$\alpha_k = \pi - \alpha_{2m-k+1} \quad k = 1, 2, \dots, m$$

$$\cos \alpha_k = -\cos \alpha_{2m-k+1}$$

eşitlikleri (7.11)'de yerine koyulursa;

$$b_n = \frac{4}{n\pi} [1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos n\alpha_k] \quad (7.12)$$

elde edilir.

Son ifade (7.12), yok edilmek istenen harmonik denklemlerini belirlerken kullanılır. Örneğin,  $n_1, n_2, \dots, n_m$  yok edilmek istenen harmonikler ise yukarıdaki ifade yardımıyla  $m$  denklem yazılır. Bu denklem sisteminin çözümü aranan açı değerini verir. İki seviyeli PWM'de, 5. ve 7. harmonikleri elde etmek için (7.12) ifadesini kullanarak 2 denklem ( $m = 2$ ) yazılır (Akgün, 2007: 136).

$$f_n(\alpha) = 1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos n\alpha_k$$

$$f_5(\alpha) = 1 + 2 \sum_{k=1}^2 (-1)^k \cos 5\alpha_k = 0$$

$$f_7(\alpha) = 1 + 2 \sum_{k=1}^2 (-1)^k \cos 7\alpha_k = 0$$

ifadeleri daha açık yazılırsa,

$$f_5(\alpha) = 1 + 2[-\cos 5\alpha_1 + \cos 5\alpha_2] = 0$$

$$f_7(\alpha) = 1 + 2[-\cos 7\alpha_1 + \cos 7\alpha_2] = 0$$

Denklemler çözüldüğünde,  $\alpha_1 = 16.2448^\circ$  ve  $\alpha_2 = 22.0630^\circ$  değerleri bulunur. Bu  $\alpha$  değerleri 5. ve 7. harmonikleri yok eder.



## 8. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, IGBT Doğrultucu Üç Fazlı Statik Kesintisiz Güç Kaynaklarında Harmonik Analizi detaylı olarak anlatılmıştır.

Doğrusal olmayan yüklerin çektikleri akımın dalga biçimleri, 50 Hz frekansında sinüsoidal dalga şekli ile frekans ve genliği farklı diğer dalgaların toplamından meydana gelmektedir. Temel bileşen olarak adlandırılan dalga 50 Hz frekansında olup bunun dışındaki frekanslarda olan diğer dalgalar “Harmonik” olarak adlandırılır. Enerji sistemlerinde güç kalitesi açısından en büyük problemlerden biri harmoniklerdir. Harmonikler, enerji sistemi elemanlarında ve yüklerde ek kayıpların oluşmasına, akımın harmonik bileşenleri nedeniyle gerilim düşümünün artmasına, koruma sistemlerinin hatalı çalışmasına, izolasyon malzemelerinin delinmesine, rezonans olaylarının meydana gelmesine ve aşırı gerilim veya akımların oluşmasına v.b. problemlere neden olmaktadır. Gelişmiş ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de sistemdeki elemanların tam kapasite ile kullanılması ve meydana getirdikleri zorlanma ve arızaların giderilmesi için gerek akımlar ve gerekse gerilimler için THD değerlerine ilişkin izin verilen maksimum değerlerin standartlaştırılması yapılmıştır.

Statik Kesintisiz Güç Kaynakları, kritik olarak nitelendirilen yüklerin şebeke enerjisinin kesilmesinden ve kısa süreli bozulmalarından zarar görmemesi için kullanılır. SKGK cihazları harmonik üreten cihazlardır. SKGK’lerin tasarımı, harmonik değerleri düşük olacak şekilde gerçekleştirilmelidir.

Tristör doğrultucu SKGK’lerde darbe sayısı mümkün olduğu kadar yüksek tutulmalıdır. SKGK’lerde altı darbeli doğrultucu kullanıldığında giriş THDI, %30, oniki darbeli doğrultucularda giriş THDI, %12 seviyelerindedir. IGBT doğrultucu SKGK’lerde bu değer %5’lere düşmektedir.

Eviriciler, doğrultucu çıkış gerilimini istenilen genlik ve frekansta AC gerilime dönüştürür. Dönüşüm sırasında tam sinüs dalgası elde edilemediği için çıkış işaretinin fourier serisinin açılımının belirttiği frekanslarda, belirli genliklerde THDV oluşturacaklardır. Bu durum gereksiz yüklenmelere, ek ısınmalara, verimlilik kaybına, motor uygulamalarında salınımlara v.b. istenmeyen durumlara neden

olabilmektedir. Çıkış işaretindeki gerilim harmoniklerinin belirli oranlarda bastırılması gerekmektedir.

Harmonik analiz ölçümleri, deneysel ve simülasyon ölçümleriyle gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçümler, fabrika ortamında çalışmakta olan IGBT doğrultuculu 30KVA, 80KVA, 250KVA gücündeki cihazlar üzerinden alınmıştır. IGBT doğrultuculu 80KVA cihazın çıkışına izolasyon trafosu konularak trafonun harmonik değerlere etkisi incelenmiştir. Ölçümlerde izolasyon trafosunun çıkış THDV değerlerini hemen hemen yok ettiği 80KVA cihazda %100 doğrusal yük altında THDV değeri, %3,1 değerinden %0,9 değerine düştüğü gözlemlenmiştir.

Simülasyon ile harmonik analizi yapabilmek için 80KVA yükü olan IGBT doğrultuculu üç fazlı SKGK benzetimi Simulink programıyla gerçekleştirilmiştir. Benzetimi yapılan SKGK'de harmonik analizi Simulink/FFT bölümünden yapılmıştır. Harmonik ölçüm sonuçları deneysel ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, beklenildiği üzere simülasyon sonuçları hem THDI değerlerinde hemde THDV değerlerinde daha düşük çıkmıştır.

Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD) değerlerinin belirlenmesi ve harmoniklerin olumsuz etkilerinin giderilmesi için filtre devrelerinin tasarımı açısından harmonik analizi önem taşımaktadır.

SKGK'lerde harmoniklerin azaltılması üzerine inceleme yapılmıştır. SKGK'nin girişinde neden olduğu akım harmoniklerinin azaltılmasına yönelik uygulamalar gerçekleştirilmiştir. AHF cihazı kullanımı ile giriş akım harmoniklerinin düşürülmesi sağlanmıştır. Uygulama neticesinde AHF'nin devrede olmadığı durumda, THDI değeri %85 ve girişten çekilen akımın rms değeri 15A ölçülmüştür. Sisteme AHF'nin eklenmesi sonucu THDI değeri %12.5 ölçülmüştür. Girişten çekilen akımın rms değeri de 15A'den 10A'e düşmüştür. Diğer uygulama ise simülasyon ile gerçekleştirilmiştir. Uygulamada, benzetimi yapılan SKGK'nin girişine akım kaynağı eklenmiştir. Devrenin simüle edilmesiyle THDI değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Çıkış gerilim harmoniklerinin azaltılmasına yönelik fourier analizi yardımıyla seçilen harmoniklerin elimine edilebilmesi için matematiksel ifade çıkarılmıştır. 5. ve 7. harmoniklerin giderilmesi için gerekli  $\alpha$  açıları hesaplanmıştır.

## 9. KAYNAKLAR

Acarkan B. (2006). *Ofis Donanımının Harmonik Etkinliğinin Kestirimi ve Harmonik Analizi*. Doktora Tezi. YTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Adak S (2008). Güç sistemlerinde harmonik bileşen içeren devrelerde rezonans analizi. *ETMD Dergisi*. 38: 30-44

Adak S (2010). Harmonikli devrede kondansatör kayıpları. *ETMD Dergisi*. 45: 72-82

Akgeyik O. (2005). *Kesintisiz Güç Kaynaklarında Kullanılan Doğrultucuların Oluşturduğu Akım Harmoniklerinin Analizi*. Yüksek Lisans Tezi. YTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Akgün S. (2007). *Kesintisiz Güç Kaynaklarının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. YTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Başman F. (2006). *Elektrik Enerji Sistemlerinde Harmonik ve Filtreleme*. Yüksek Lisans Tezi. SAÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Bayram Y. (2007). *PIC Kontrollü Kesintisiz Güç Kaynağı Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi. SDÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Basumlu AM (2009). Harmonikler. *Sektörel Tanıtım Elektrik-Enerji dergisi*. 6: 22-23

Bouhali O, Berkouk M, Francois B, Saudemont C, Labiod S (2005). Solving harmonics elimination problem in Three-Phase Voltage-controlled inverter using artificial neural networks. *J. Electrical Systems*. 1-1: 39-51.

Çatalbaş D. (2008). *Doğrusal Olmayan Yükleri Beslemek için Birim Güç Faktörlü Aktif Doğrultuculu Devrelerin Modellenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Demir F. (2010). *Üç Fazlı Eviriciyle Beslenen Doğrusal Olmayan Yüklerde Harmonik Eliminasyonu*. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Demirkol Ö. (2006). *Harmonik İçeren ve Dengesiz Şebekelerde Ölçme ve Kompanzasyon*. Yüksek Lisans Tezi. SAÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Doğruer V. (2007). *Elektrik Güç Sistemlerinde Matlab Simülink ile Kısa Devre Arıza Analizi ve Bir Örnek Olarak Van Enerji Nakil Hattının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. YYÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.

Efe SB. (2006). *Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Harmoniklerin Analizi*. Yüksek Lisans Tezi. İnönü Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.

Emadi A, Nasiri A and Bekiarov S B (2005). *Uninterruptible Power Supplies and Active Filters*. CRC Press.

Faiz J, Shahgholian G, Mahdavian M (2009). Analysis and simulation of a Three-Phase UPS Inverter with output Multiple-Filter. *Armenian Journal of Physics*. Vol. 2, issue 4, pp. 317-325

Filiz C. (2006). *Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Filtrelemelerin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. KKÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırkkale.

Grasshoff T (2010). Sürücü sistemleri için aynı platformda, farklı ebatlarda güç elektroniği modülleri ile giderlerin azaltılması ve hacmin küçültülmesi. *Kaynak-Elektrik Dergisi*. 254: 86-88

İnform Elektronik Teknik Servis Departmanı Eğitim Notları (2011).

Jung JW (2005). *Sine PWM Inverter*. Doktora Projesi. The Ohio State University. Mechatronic Systems Laboratory Department of Electrical and Computer Engineering, Ohio.

Kazmierkowski MP, Krishnan R and Blaabjerg F (2002). *Control in power electronics selected problems*. Academic Press, California.

Kiehne, HA (Ed.) (2003). *Battery Technology Handbook*. Expert Verlag, Germany.

Küçük N. (2007). *Eviricilerin Harmonik Eliminasyonunda Optimum Anahtarlama Açılarının Genetik Algoritmalar ile Elde Edilmesi*. Yüksek Lisans Tezi. İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

MEGEP (2007). Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi Biyomedikal Sistemlerde Özel Yarı İletkenli Anahtarlama, Ankara. 96, 77-78

Topaloğlu SY (2009). Dinamik Kesintisiz Güç Kaynakları. *Sektörel Tanıtım Elektrik-Enerji dergisi*. 3:58-59

Yılmaz E (2009). Aktif harmonik filtreler. *Sektörel Tanıtım Elektrik-Enerji dergisi*. 6: 26-27

Yumurtacı M. (2007). *Çeşitli Modülasyon Tekniklerinin Harmonik Bozulma Üzerindeki Etkileri*. Yüksek Lisans Tezi. AKÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

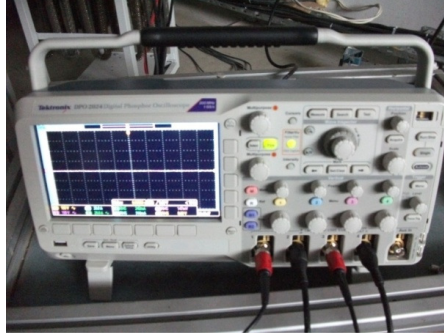
### **İnternet Kaynakları:**

Akpınar E (2007). Kompanzasyon ve harmonik filtreleme-2. *Elektrik Mühendisleri Odası Yayın Dergisi*. Erişim Tarihi: 18 Aralık 2011, [http://www.emo.org.tr/ekler/4af620dcf393e73\\_ek.pdf?dergi=](http://www.emo.org.tr/ekler/4af620dcf393e73_ek.pdf?dergi=)

Gencer Ö, Öztürk S, Erfidan T (2009). Endüstriyel bir tesiste aktif filtre uygulaması. *Elektrik Mühendisleri Odası Yayın Dergisi*. Erişim Tarihi: 09 Kasım 2011, [http://www.emo.org.tr/ekler/c9111a58b7d5302\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/c9111a58b7d5302_ek.pdf)

## 10. EKLER

### EK 1: Ölçüm cihazları



Digital Phosphor Oscilloscopes  
MSO2000 Series • DPO2000 Series

#### Characteristics

##### Vertical System - Analog Channels

Vertical System Analog Channels	MSO2012 DPO2012	MSO2014 DPO2014	MSO2024 DPO2024
Input Channels	2	4	4
Analog Bandwidth <sup>1)</sup> (-3 dB)	100 MHz	100 MHz	200 MHz
Calculated Rise Time	3.5 ns	3.5 ns	2.1 ns
Hardware Bandwidth Limits		20 MHz	
Input Couplings		AC, DC, GND	
Input Impedance		1 MΩ ±2%, 11.5 pF ±2 pF	
Input Sensitivity Range		2 mV/div to 5 V/div	
Vertical Resolution		8 bits	
Max Input Voltage		300 V <sub>pk</sub> with peaks ≤450 V	
DC Gain Accuracy (with offset set to 0 V)		±3% for 10 mV/div to 5 V/div, ±4% for 2 mV/div to 5 mV/div	
Offset Range			
-7 mV/div to 200 mV/div		±1 V	
>200 mV/div to 5 V/div		±25 V	
Channel-to-Channel Isolation (Key Two Channels at Equal Vertical Scale)		±100:1 at ≤100 MHz	100:1 at ≤200 MHz

<sup>1)</sup> Bandwidth is 20 MHz at 2 mV/div, all models

##### Vertical System - Digital Channels

	MSO2012	MSO2014	MSO2024
Input Channels		16 Digital (D15 to D0)	
Thresholds		Threshold per set of 8 channels	
Threshold Selections		TTL, CMOS, ECL, PECL, User Defined	
User Defined Threshold Range		±20 V	
Maximum Input Voltage		±40 V	
Threshold Accuracy		±(100 mV + 3% of threshold setting)	
Maximum Input Dynamic Range		80 V <sub>pp</sub> (threshold setting dependant)	
Minimum Voltage Swing		500 mV <sub>pp</sub>	
Input Impedance		101 kΩ	
Probe Loading		8 pF	
Vertical Resolution		1 bit	

##### Horizontal System - Analog Channels

	MSO2012 DPO2012	MSO2014 DPO2014	MSO2024 DPO2024
Maximum Sample Rate (all channels)		1 GS/s	
Minimum Peak Detect Pulse Width	7.0 ns		3.5 ns
Maximum Record Length (all channels)		1 M points	
Maximum Duration of Time Captured at Highest Sample Rate (all channels)		1 ms	
Timebase Range	4 ns to 100 s		2 ns to 100 s
Timebase Delay Time Range		-10 div to 5000 s	
Channel-to-Channel Delay Range		±100 ns	
Timebase Accuracy		±25 ppm	

##### Horizontal System - Digital Channels

	MSO2012	MSO2014	MSO2024
Maximum Sample Rate (when using any of channels D7-D0)		1 GS/s (1 ns resolution)	
Maximum Sample Rate (when using any of channels D15-D8)		500 MS/s (2 ns resolution)	
Maximum Record Length		1 M points	
Minimum Detectable Pulse Width		5 ns	
Channel-to-Channel Skew		2 ns typical	



## Technical specifications C.A 8332B - C.A 8334B - C.A 8335

		C.A 8332B	C.A 8334B	Qualistar+ C.A 8335
<b>MEASUREMENTS</b>				
Number of channels		3U / 4I		4U / 4I
Voltage (RMS AC+DC)	Phase-phase	6 V to 960 V		10 V to 1,000 V
	Phase-neutral	6 V to 480 V		10 V to 1,000 V
Current (RMS AC+DC)		100 mA to 6,500 A		
	MN clamp	MN93: 2 to 240 A; MN93A: 0.005 A to 5 A / 0.1 A to 120 A		
	C clamp	3 A to 1,200 A		
	AmpFLEX or MA clamps	30 A to 6,500 A		
Frequency	PAC clamp	10 A to 1,000 AAC / 10 A to 1,400 ADC		
		40 Hz to 60 Hz		
Power values		W, VA, var, PF, DPF, cos φ, tan φ		
Energy values		Wh, varh, VAh		
Harmonics		yes		
	THD	Yes, orders 0 to 50, phase		
Transients	Expert mode	-	50	300
			yes	
Filter			yes	
Inrush mode		-	Yes, on 4 periods	Yes, > 1 minute
Unbalance			yes	
Recording (all parameters at max. sampling rate)		21 minutes	42 minutes	1 month
Min/Max recording		no		yes
Alarms		4,000 of 10 different types		10,000 of 40 different types
Recognition of current sensors		8		8+
Peak			yes	
Vectorial representation			automatic	
Display		Colour 1/2 VGA LCD screen, 320 x 240, diagonal 148 mm		
Capture of screens and curves		8	12	50
Electrical safety		EC 61010 1,000 V CAT III / 600 V CAT IV		
Languages		6		20+
Communication interface		Optical RS232 / USB		
Power supply		9.6V NiMH rechargeable battery		External mains charger 600V CAT IV
Dimensions		240 x 180 x 55 mm		
Weight		2.1 kg		1.9 kg

### STATE AT DELIVERY

C.A 8332B delivered with 1 carrying bag No. 22, an optical RS232 lead, a mains power cable, 4x 3 m voltage leads with 4 mm banana connectors, 4 crocodile clips, 1 safety plug, 1 operating manual, PC software for data recovery. Plus the set of current sensors chosen.  
 C.A 8334B delivered with 1 carrying bag No. 22, an optical RS232 lead, a mains power cable, 4x 3 m voltage leads with 4 mm banana connectors, 4 crocodile clips, 1 safety plug, 1 operating manual, PC software for data recovery. Plus the set of current sensors chosen.  
 C.A 8335 delivered with 1 carrying bag No. 22, 1 USB lead, 1 power supply charger, 1 mains power cable, 5 x 3 m voltage leads with Ø4 mm banana connectors, 5 crocodile clips, 1 x 12-colour identification set for leads and inputs, 1 protective film for screen, 1 safety plug, 1 multilingual operating manual, PC software for data recovery.

### REFERENCES FOR ORDERING

C.A 8335 alone P01160577  
 C.A 8332B-F MN93A clamp P01160522  
 C.A 8334B-F MN93A clamp P01160522  
 C.A 8332B-F AmpFLEX™ 450mm P01160523  
 C.A 8334B-F AmpFLEX™ 450mm P01160523  
 C.A 8332B-INT MN93A clamp P01160525  
 C.A 8334B-INT MN93A clamp P01160525  
 C.A 8332B-INT AmpFLEX™ 450mm P01160526  
 C.A 8334B-INT AmpFLEX™ 450mm P01160526

### ACCESSORIES

MN clamp..... P011204258  
 MN93A clamp..... P011205348  
 C clamp..... P011203238  
 PAC clamp..... P011200798  
 AMP450 clamp..... P011205268  
 AMP800 clamp..... P011205318  
 S.A. box..... P01101959  
 DataView..... P01102058

C.A.8335 mains power pack ... P01102057  
 USB-A/USB-B lead ..... P01295291  
 Qualistar screen film ..... P01102059  
 Set of id. rings/inserts ..... P01102060  
 Carrying bag no. 21..... P01298055  
 Carrying bag no. 22..... P01298056  
 RS232 optical lead ..... P01295190A

Other models: please contact us



**FRANCE**  
 Chauvin Arnoux  
 190, rue Championnet  
 75276 PARIS Cedex 18  
 Tel: +33 1 44 85 44 86  
 Fax: +33 1 46 27 95 59  
 export@chauvin-arnoux.fr  
 www.chauvin-arnoux.fr

**UNITED KINGDOM**  
 Chauvin Arnoux Ltd  
 Waldeck House - Waldeck Road  
 MAIDENHEAD SL6 8BR  
 Tel: +44 1628 768 888  
 Fax: +44 1628 628 099  
 info@chauvin-arnoux.co.uk  
 www.chauvin-arnoux.co.uk

**MIDDLE EAST**  
 Chauvin Arnoux Middle East  
 P.O. BOX 60-154  
 1241 2020 JAL EL DIB (Beirut) - LEBANON  
 Tel: +961 1 890 425  
 Fax: +961 1 890 424  
 camie@chauvin-arnoux.com  
 www.chauvin-arnoux.com

For assistance and ordering



0128 - 0028 1171 - 841 - 8496





## Technical specification

### AC Voltages

Three-phase AC voltage input (3 differential inputs L1 - N, L2 - N, L3 - N)  
 Input voltage range: 10 + 500 V<sub>AC</sub> L<sub>1</sub>, 900 V<sub>AC</sub> L<sub>1</sub>, 600 V<sub>AC</sub> L<sub>1</sub> (overload 10 s)  
 Optional on request: 10 + 750 V<sub>AC</sub> L<sub>1</sub>, 1000 V<sub>AC</sub> L<sub>1</sub>, 800 V<sub>AC</sub> L<sub>1</sub> (overload 10 s)  
 Resolution: 0.1 V  
 Accuracy: ± 0.5 % of reading ± 2 digits  
 Crest factor max.: 1 + 1.4 @ 500 V<sub>AC</sub> L<sub>1</sub>  
 Frequency range: 43 + 60 Hz mains voltage

### AC Currents

Three-phase AC input for connect on to current transformers with voltage output  
 Input current (voltage output): 0.02 + 1 V<sub>AC</sub> (from 0.02 x In + In)  
 Resolution: 0.3 mV (0.3 A with 1000 A / 1 V)  
 Accuracy: (± 0.5 % of reading ± 6 dig.) + current transformer accuracy  
 Crest factor: 1 + 2.5 @ 1 V<sub>AC</sub>  
 Maximum permissible overload: 100 % In (sinusoidal current)  
 Maximum input voltage: 1 V<sub>AC</sub>

### Phase angle

Consider phase angle data of used current transformer

### Scope

Display options: Waveform of pairs (L1: U1 and I1, L2: U2 and I2, L3: U3 and I3), U<sub>1</sub>, U<sub>2</sub> and U<sub>3</sub>, I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub> and I<sub>3</sub>  
 Auto/manual

### Ranging

METER - Power measurement

Phase values for selected measuring parameters:

Measured: voltage (U), current (I), cos φ  
 Calculated: active power (P), apparent power (S), reactive power (Q), power factor (PF) with its characteristics (C, L, nonL), interphase voltage

### 3-phase values:

Calculated: active power (P), apparent power (S), reactive power (Q), power factor (PF), neutral current (In);

### Basic accuracy for P, Q, S:

Resolution for P, Q, S: ± 0.01 of displayed value

SPECTRUM - Harmonic measurement

The instrument computes harmonics on signals sampled with an A/D converter

Recording interval: 100 ms (8 cycles)

Spectrum calculation angle: DC - 60°

Spectrum display range: DC - 25°

Displayed items for selected harmonic: Order, relative and absolute value

### Energy

#### Displayed results:

- cumulative values (TOTAL)

- partial cumulative value (SUBTOTAL)

- values for last integration period (LAST IP)

Quantifies Active energy (E<sub>P</sub>), reactive energy (E<sub>Q</sub>), inductive energy (E<sub>GI</sub>)

Basic accuracy: ± 1 % of reading

Resolution: 0.1 of displayed value

### Flicker measurement

The instrument computes flickers according to IEC 61000-4-15

### Waveforms

Sampling rate: 128 scans / period

Trigger: level, manual, timer

Buffer: min. 10 periods of pre/post size, up to 7012 periods can be recorded

Channels: Single or multi channel mode

Harmonic distortion: magnitudes generated by load, generated by utility

### Fast logging

Sampling rate: 128 scans / period, min, max, avg recorded each half period

Trigger: level, manual, timer

Buffer: pre/post size, up to 160 minutes of recording

Channels: 3 x U, 3 x I, Single or multi channel mode

### Transients

Capturing: > 20 μs transient detectability

Trigger: Level, slope, manual

Buffer: min. 10 periods of pre/post size, up to 1000 periods can be recorded

Channels: 3 x U, 3 x I, single or multi channel mode

## Ordering information

### Standard set

Part No. MI 2292



- Instrument Power Quality Analyser Plus
- Current clamp 1000 A/1 V, 3 pcs
- Test 1 ps, 3 pcs
- Alligator clips, 4 pcs
- Voltage measurement cables, 4 pcs
- Mains cable
- PowerLink PC SW package with RS232 cable
- Power supply adapter
- Rechargeable batteries, 4 pcs
- Soft carrying bag
- Small soft carrying bag for current clamps
- User manual
- Handbook "Modern Power Quality Measurement Techniques" on CD
- Product verification data

### Standard set

Part No. MI 2292F



- Similar content as MI 2292:
- Current clamp 1000 A/1 V, 3 pcs replaced by
- 3-phase flexible current clamps 3000/3000 A, 1 pc

## Optional accessories:

Photo	Order No.	Acc. description
	A 1033	Current clamp 1000 A/1 V
	A 1037	Current transformer 5A/1 V
	A 1039	Clamp adapter (for A 1039 and A 1125)
	A 1069	Mini clamp 100 A/1 V to be used with (A 1039)
	A 1122	Mini clamp 5 A/1 V to be used with (A 1039)
	A 1100	Modem ST
	A 1101	Modem GSM
	A 1171	USB/RS232 converter with 1 m fixed cable
	A 1179	3-phase flexible current clamps 3000/3000 A
	A 1257	3-phase flexible current clamps 3000/3000 A
	A 1287	1-phase flexible current clamps 3000/3000 A
	S 2014	Safety fuse adapter
	S 2015	Safety flat clamps

Note! Photographs in this catalogue may slightly differ from the instruments due to the time of delivery. Subject to technical change without notice.



Measuring and Regulation Equipment Manufacturer

METREL d.d.

Ljubljana 77

SI-1254 Horjul

Tel: +386 (0)1 75 59 200

Fax: +386 (0)1 75 49 226

E-mail: metrel@metrel.si

http://www.metrel.si



## EK 2: Kurşun Asit Akülerin Şarj-Deşarj Eğrileri

### Battery Charging

Correct battery charging ensures the maximum possible working life for the battery. There are four major methods of charging:

- Constant Voltage Charging.
- Constant Current Charging.
- Two Stage Constant Voltage Charging.
- Taper Current Charging.

#### Constant Voltage Charging

This is the recommended method of charging for VRLA batteries. It is necessary to closely control the actual voltage to ensure that it is within the limits advised.

Float Service: 2.27-2.30 Vpc at 25°C.

Cycle Service: 2.40-2.45 Vpc at 25°C.

SZCPT suggests that the initial current be set within 0.4 C<sub>20</sub> Amps. The attached indicates the time taken to fully recharge the battery. It should be noted that the graph illustrated is for a fully discharged battery, i.e; a battery that has reached the minimum cell voltage recommended for its discharge time. As shown on the graph, it is necessary to charge a greater amount of energy into the battery than was taken out of the battery on discharge. The actual current indicating that the battery is fully charged is approx 5mA/Ah under charging voltage is 2.30 Vpc.

#### Constant Current Charging

This method of charging is generally not recommended for VRLA batteries. It is necessary to understand that if the batteries are not removed from the charger after reaching a state of full charge, considerable damage will occur to the batteries due to overcharging.

#### Two Stage Constant Voltage Charging

This method should not be used when the battery and load are connected in parallel. If this method is to be used, it is suggested that the VISION technical department should be contacted.

#### Taper Current Charging

This method is not recommended for VRLA batteries. However, if this method is to be used, it is suggested that the VISION technical department should be contacted.

#### Effect of Temperature on Charging Voltage

As temperature rises, electrochemical activity in a battery increases. Similarly, as temperature falls, electrochemical activity decreases. Therefore, conversely, as temperature rises, charging voltage should be reduced to prevent overcharge, will increased as temperature falls to avoid undercharge. In general, to assure optimum service life, use of a temperature compensated charger is recommended. The recommended compensation factor for CP batteries is -3mV/°C/Cell (standby use) and -5mV/°C/Cell (cyclic use). The standard center point for temperature compensation is 25°C. Figure 1 shows the relationship between temperatures and charging voltages in both cyclic and standby applications.

Relationship between charging voltage and temperature

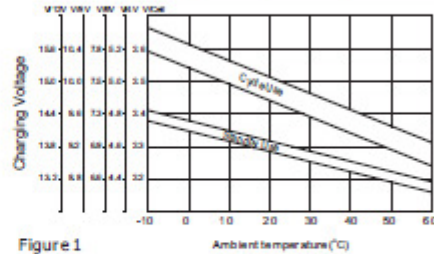


Figure 1

#### Effect of Voltage on Battery Gassing

Although the batteries are of the recombination type and the amount of gassing at normal operating voltages and temperature are negligible, if the charging voltage is increased, gassing will occur despite the recombination design of the product. Gassing does not normally occur while the battery is operating under float conditions and normal constant voltage recharge of 2.27-2.30 Vpc at 25°C. Very little gassing occurs when the battery is recharged under normal cycling recharge procedures. However, it can be seen on the accompanying graph the higher voltages that this especially under conditions of constant current charging will substantially increase the volume of gas.



# Discharge characteristic

The discharge capacity of a lead acid battery varies and is dependant on the discharge current. VISION CP VRLA batteries use a rate at the 20 hour rate. i.e.the capacity of the battery at 20 hours discharges to an end voltage of 1.75 Vpc at a temperature of 25°C.

### General Comments

The discharge curves (Figure 2) show the minimum design parameters for each fully charged VISION battery after installation. Full capacity is reached after some initial service.

- Float Service.
- One month after installation and recharging.
- Cycle Service.

Within three to five cycles after initial charge and service entry.

### Technical Terms

1. Battery capacity for small VRLA batteries by accepted convention worldwide is described in "AMPERE HOUR" at the 20-hour rate  $C_{20}$  when discharged at 25°C. i.e. a CP1245 is 4.5 Ah at  $C_{20}$  that means the battery will deliver 0.225 amps current for 20 hours to a cut off voltage of 1.75 volts per cell (10.5 volts per battery).

2. Battery cut-off voltage is the volts per cell to which a battery may be discharged safely to maximize battery life. This data is specified according to the actual discharge load and run time. As a rule of thumb, high amp loads and short run times will tolerate a lower cut off voltage (eg. 3C at 1.3V/C), whereas a low amps long run time discharge will require a higher cut-off voltage (eg. 0.05C at 1.75V/C).

### Battery Selection

The battery discharge graph(Figure 2) may be utilized in battery selection. However, it is suggested that a review be made of the data sheet for each battery type or the chart showing the actual capacity of each battery type at various discharge times.

### Effect of Temperature on Battery Capacity

The nominal battery capacity is based on the temperature of 25°C. Above this temperature, the capacity increases marginally but it must be noted that the working battery should be kept within the temperature design limitations of the product.

Below 25°C, the capacity decreases. This decrease in capacity becomes more prominent at temperatures below 0°C and in heavy discharge rates(Chart 1). illustrates the situation and the decrease in capacity with the decrease in operating temperature. Temperature must be taken into capacity design calculations in applications where the operating temperature of the system is below 20°C.

## Characteristic Discharge Curves

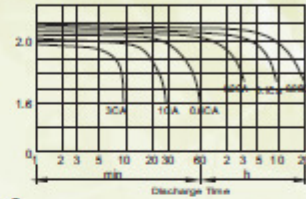


Figure 2

## Self-discharge characteristic

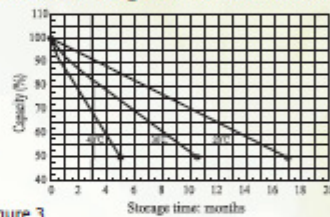


Figure 3

## Relationship of OCV and state of charge (25°C)

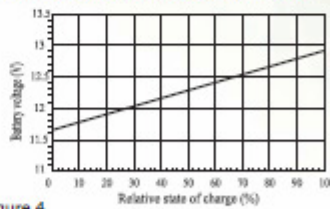


Figure 4

Discharge time	Battery temperature											
	-15°C	-10°C	-5°C	0°C	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C
10min	0.46	0.52	0.58	0.65	0.71	0.78	0.85	0.93	1	1.07	1.15	1.22
1 hour	0.59	0.64	0.69	0.74	0.80	0.85	0.90	0.95	1	1.05	1.09	1.14
20hour	0.71	0.75	0.79	0.82	0.86	0.90	0.93	0.97	1	1.03	1.06	1.08

## 11. ÖZGEÇMİŞ

Hakan HIZARCIOĞLU, 11.03.1978 tarihinde İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul'un Pendik ilçesinde tamamladı. 1997 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğrenimine başladı ve 2001 yılında mezun oldu. 2010 yılında Haliç Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans öğrenimine başladı. 2004 yılından beri İnform Elektronik A.Ş. firmasında Teknik Servis Mühendisi olarak çalışmaktadır.

İstanbul, 2012

Hakan HIZARCIOĞLU