

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

NİĞDE İLİ MERKEZİNDE BULUNAN DAĞITIM TRAFOLARININ
ENERJİ KALİTESİNİN ARAŞTIRILMASI

METİN BİTİM

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç. Dr. Saffet AYASUN

Aralık 2012

ÖZET

NİĞDE İLİ MERKEZİNDE BULUNAN DAĞITIM TRAFOLARININ ENERJİ KALİTESİNİN ARAŞTIRILMASI

BİTİM, Metin

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Saffet AYASUN

Aralık 2012, 115 sayfa

Elektrik dağıtım şirketleri, dağıtım lisansında belirlenen bölgede bulunan kullanıcılara sunduğu hizmetin kalitesinden sorumludurlar. Dağıtım sisteminde sunulan hizmetin kalitesi; a) Tedarik sürekliliği kalitesi, b) Ticari kalite, c) Teknik kalite olmak üzere üç ana başlık altında sınıflandırılmıştır. Bu çalışmada teknik kalite incelenmiştir. Teknik kalite, dağıtım sisteminin, kullanıcıların elektrik enerjisi talebini; gerilimin frekansı, genliği, dalga şekli ve üç faz simetrisi açısından kabul edilebilir değişim sınırları içerisinde kesintisiz ve kaliteli bir şekilde karşılayabilme kapasitesidir. Bu doğrultuda öncelikle teknik kaliteyi etkileyen faktörler incelenmiştir. Elektrik dağıtım sistemlerinin modellendirilmesi incelenmiştir. Niğde İlinin elektrik dağıtım sistemi incelenmiştir. Son olarak ta elektrik dağıtım şebekesinde ölçümler yapılarak Teknik Kaliteyi bozacak müşterilerin sisteme ne derecede zarar verdiği konusu incelenmiştir. Harmonik analizleri yapılarak, yapılan ölçüm sonuçlarına göre sistemin; yönetmelik ve standartlara ne kadar uyduğu incelenmiştir. Bu inceleme sonucuna göre harmonik problemini ortadan kaldırabilmek için çözüm önerileri getirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Elektrik dağıtım şebekelerinde harmonikler, Niğde ili merkez elektrik dağıtım şebekesi, harmonik filtreler, harmonik standartlar

SUMMARY

INVESTIGATION OF POWER QUALITY OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS IN NIGDE CENTER CITY

BİTİM, Metin

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Adviser : Assoc. Prof. Dr. Saffet AYASUN

DECEMBER 2012, 115 pages

Electricity distribution companies are responsible for the quality of services they provide their customers in the region determined by their distribution license. The service quality in a distribution system is classified into three main groups: a) the continuity of supply quality, b) the commercial quality, c) the technical quality. The technical quality has been investigated in this thesis study. Technical quality of the distribution system is the ability and capacity of the system so as to meet customer energy demands without having any interruption and with acceptable changes in voltage frequency, amplitude, waveform and symmetry of three-phase system. In this thesis study, the factors affecting the technical quality are first studied. Then, Niğde province electricity distribution system is investigated. Finally, measurements are made in electrical distribution network to determine the amount of damage caused by some customers. Harmonic analysis are performed to determine the total harmonic distortion in the system. The harmonic content of the system are compared with the existing regulations and standards. To overcome harmonic distortion, static compensators with filters are designed.

Keywords: Harmonics in electrical distribution network, Niğde in the electricity distribution network, harmonic filters, harmonic standarts.

ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans çalışmasında, elektrik dağıtım şebekelerinde oluşan harmoniklerin kaynakları, harmoniklerin sisteme olan etkileri, harmoniklerin giderilme yöntemleri, Niğde ili merkez elektrik dağıtım şebekesinin genel hatları incelenmiştir. Dağıtım şebekesinde bulunan iki adet dağıtım trafosunda harmonik ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçümlere göre harmonik probleminin bu trafolar için nasıl çözebileceği ile ilgili araştırma ve hesaplamalar yapılmıştır.

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, Sayın Doç. Dr. Saffet AYASUN' a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezi, maddi ve manevi olarak tüm desteklerini üstümden esirgemeyen babam Kamil BİTİM' e, annem Döne BİTİM' e, kardeşlerime, eşim Semiha ve kızım Çiğdem BİTİM' e ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY.....	v
ÖN SÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
BÖLÜM I GİRİŞ.....	1
BÖLÜM II HARMONİK ÜRETEN ELEMANLAR, HARMONİKLERE AİT TEMEL KAVRAMLAR VE HARMONİKLERİN ETKİLERİ.....	3
2.1 Harmonik Üreten Elemanlar.....	3
2.1.1 Transformatörler	3
2.1.2 Generatörler.....	5
2.1.3 Güç elektroniği elemanları.....	5
2.1.4 Doğru akım ile enerji nakli	9
2.1.5 Gaz deşarjlı aydınlatma.....	10
2.1.6 Elektronik balastlar.....	11
2.1.7 Statik VAr kompanzatörler	13
2.1.8 Ark fırınları	13
2.1.9 Kesintisiz güç kaynakları	15
2.1.10 Fotovoltaik Sistemler.....	17
2.2 Harmoniklerin Etkileri	18
2.2.1 Transformatörler üzerine etkileri.....	19
2.2.2 Döner makineler üzerine etkileri	20
2.2.3 İletim sistemi üzerine etkileri	21
2.2.4 Nötr iletkenine etkileri	21
2.2.5 Kondansatör grupları üzerine etkileri.....	22
2.2.6 Güç elektroniği elemanları üzerine etkileri.....	25
2.2.7 Koruyucu sistemler (röleler) üzerine etkileri	26
2.2.8 Küçük güçlü elektrik tüketicileri üzerine etkileri	26
2.2.9 Ölçme aygıtları üzerine etkileri.....	27
2.3 Harmonik Büyüklüklere Ait Tanımlar.....	27

2.3.1 Sinüsoidal olmayan durumda elektrik büyüklükleri	28
2.3.2 Toplam harmonik distorsiyonu (THD)	29
2.3.3 Toplam talep distorsiyonu (TTD).....	30
2.3.4 Tepe (Crest) faktörü	31
2.3.5 Transformatör K – faktörü	31
2.3.6 Distorsiyon güç faktörü	32
2.3.7 Telefon etkileşim faktörü (TEF).....	33
BÖLÜM III ELEKTRİK DAĞITIM ŞEBEKELERİ	34
3.1 Dağıtım Şebekelerindeki Temel Yapılanmalar	34
3.1.1 İndirici trafo merkezleri (TM).....	34
3.1.2 Dağıtım merkezleri (DM).....	34
3.1.3 Dağıtım hatları.....	35
3.1.4 Dağıtım trafo merkezleri (TR).....	35
3.2 Elektrik Dağıtım Şebeke Çeşitleri.....	35
3.2.1 Düz şebeke.....	35
3.2.2 Radyal şebeke.....	36
3.2.3 Gözlü şebeke	36
3.2.4 Ağ şebeke.....	37
3.3 Niğde İli Elektrik Dağıtım Şebekesinin Genel Karakteristikleri.....	38
3.3.1 Gerilim seviyeleri	38
3.3.2 Trafo merkezleri	38
BÖLÜM IV NİĞDE İL MERKEZİ ELEKTRİK DAĞITIM ŞEBEKESİNDE YAPILAN HARMONİK ÖLÇÜMLER.....	42
4.1 Ölçüm Yapılan Trafo Merkezleri Tek Hat Şemaları.....	43
4.1.1 TR-2/9 trafosu tek hat şeması.....	43
4.1.2 TR-2/10 trafosu tek hat şeması.....	44
4.2 Ölçüm Yapılan Trafo Merkezlerinin Genel Karakteristiği.....	44
4.2.1 TR-2/9 trafosu genel karakteristiği.....	44
4.2.2 TR-2/10 trafosu genel karakteristiği.....	45
4.3 Ölçüm Sonuçları.....	45
4.3.1 TR-2/9 Trafosu ölçüm sonucu	45
4.3.1.1 1 nolu çıkış ölçüm sonuçları.....	45

4.3.1.2 2 nolu çıkış ölçüm sonuçları.....	49
4.3.2 TR-2/10 Trafosu ölçüm sonuçları.....	52
4.3.2.1 TR-2/10 Trafosu ana giriş ölçüm sonuçları.....	52
4.3.2.2 TR-2/10 Trafosu 1 nolu çıkış ölçüm sonuçları.....	55
4.3.2.3 TR-2/10 Trafosu 2 nolu çıkış ölçüm sonuçları.....	58
4.3.2.4 TR-2/10 Trafosu 3 nolu çıkış ölçüm sonuçları.....	61
4.3.2.5 TR-2/10 Trafosu 4 nolu çıkış ölçüm sonuçları.....	64
BÖLÜM V HARMONİK STANDARTLARI	68
BÖLÜM VI HARMONİKLERİN GİDERİLMESİ VE YAPILAN ÖLÇÜMLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	76
6.1 Harmonik Filtreler.....	76
6.1.1 Aktif filtreler.....	76
6.1.1.1 Aktif filtre konfigürasyonları.....	78
6.1.2 Pasif filtreler.....	82
6.1.2.1 Pasif filtre çeşitleri.....	83
6.1.3 Filtre seçiminde kriterler.....	84
6.1.4 Harmonik filtreli kompanzasyon.....	87
6.1.5 Rezonans	89
6.2 Yapılan Ölçümlerin Değerlendirilmesi.....	93
BÖLÜM VII SONUÇ.....	97
KAYNAKLAR	98
Özgeçmiş.....	101

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	Ark fırınının ortalama harmonik değerleri.....	14
Çizelge 3.1	İlçe bazında aydınlatma amaçlı toplam trafo sayıları.....	39
Çizelge 3.2	Diğer abone grupları bazında toplam trafo sayıları.....	40
Çizelge 4.1	TR-2/9 trafosu 1 nolu çıkış ölçüm verileri.....	45
Çizelge 4.2	TR-2/9 trafosu 2 nolu çıkış ölçüm verileri.....	49
Çizelge 4.3	TR-2/10 trafosu ana giriş ölçüm verileri.....	53
Çizelge 4.4	TR-2/10 trafosu 1 nolu çıkış ölçüm verileri.....	56
Çizelge 4.5	TR-2/10 trafosu 2 nolu çıkış ölçüm verileri.....	59
Çizelge 4.6	TR-2/10 trafosu 3 nolu çıkış ölçüm verileri.....	61
Çizelge 4.7	TR-2/10 trafosu 4 nolu çıkış ölçüm verileri.....	64
Çizelge 5.1	Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC 61000-2-2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri ($k=0,2+12,5/n$).....	68
Çizelge 5.2	Endüstriyel santraller için IEC 61000 – 2 – 4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (2. sınıf elemanlar için) - ($k=0,2+12,5/n$)...	69
Çizelge 5.3	Endüstriyel santraller için IEC 6100-2-4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (3. Sınıf elemanlar) ($m = 5\sqrt{11/n}$).....	69
Çizelge 5.4	Konutlar ile ilgili alçak gerilim şebekeleri için EN 50160 harmonik distorsiyon limitleri.....	70
Çizelge 5.5	Konutlar ile ilgili orta gerilim şebekeleri için EN 50160 harmonik distorsiyon limitleri.....	70
Çizelge 5.6	D sınıfı donanım için IEC 61000-3-2' ye göre izin verilen harmonik akımları.....	71
Çizelge 5.7	IEEE' nin gerilim için harmonik distorsiyon sınırları.....	71
Çizelge 5.8	IEEE' nin genel dağıtım sistemlerine ait akım için harmonik distorsiyon sınırları.....	72
Çizelge 5.9	TS EN 61000-3-2 yük sınıfları.....	73
Çizelge 5.10	A sınıfı donanım için harmonik sınır değerleri.....	74
Çizelge 5.11	B sınıfı donanım için harmonik sınır değerleri.....	74
Çizelge 5.12	C sınıfı donanım için harmonik sınır değerleri.....	74
Çizelge 5.13	D sınıfı donanım için harmonik sınır değerleri.....	75

Çizelge 6.1	Reaktörlerin seri rezonans frekans tablosu.....	93
Çizelge 6.2	Hilkar harmonik filtre reaktörleri kataloğu.....	95

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	Bir periyottaki harmonik bileşenler ve temel dalga şekli.....	2
Şekil 2.1	Transformatör mıknatıslanma akımı.....	4
Şekil 2.2	Demir çekirdeğin mıknatıslanma eğrisi ($B = f(H)$ eğrisi).....	4
Şekil 2.3	Sabit akım kaynaklı ayarlı hız kontrol ünitesi akımı ve harmonik spektrumu.....	6
Şekil 2.4	Üç fazlı orta uçlu doğrultucu prensip şeması, b) Gerilim dalga şekli.....	7
Şekil 2.5	Diyot ve tristöre ait çalışma karakteristikleri.....	7
Şekil 2.6	Yarım dalga kontrollü doğrultucu devresi için dalga şekli ve oluşan harmonikler.....	8
Şekil 2.7	Bir doğru akım enerji iletim hattının prensip bağlantı şeması.....	9
Şekil 2.8	HDVC sistemi harmonik spektrumu.....	10
Şekil 2.9	Flüoresan lamba a)Manyetik balast akım dalga şekli b)Harmonik spektrumu.....	11
Şekil 2.10	Elektronik balast akım dalga şekli b)Harmonik spektrumu.....	12
Şekil 2.11	Tristör Kontrollü Reaktör'ün temel yapısı ve gerilim ve akımın dalga şekli.....	13
Şekil 2.12	Akım dalga şeklinin izgel içeriği.....	15
Şekil 2.13	Bir kesintisiz güç kaynağının prensip şeması.....	16
Şekil 2.14	Anahtarlama güç kaynağı akım ve harmonik spektrumu.....	17
Şekil 2.15	Fotovoltaik enerji üretimi blok şeması.....	17
Şekil 2.16	FV güç sisteminin şebeke tarafından alınan akım ve gerilim dalga şekilleri.....	18
Şekil 2.17	Nötrde birleşen üçlü N akımları.....	22
Şekil 2.18	Kondansatörsüz bir tesisin harmonik akışı.....	24
Şekil 2.19	Kondansatörlü bir tesisin harmonik akışı.....	25
Şekil 3.1	3 Kollu düz şebeke.....	35
Şekil 3.2	Radyal şebeke.....	36
Şekil 3.3	Gözlü şebeke.....	37
Şekil 3.4	Ağ şebeke.....	37
Şekil 3.5	Niğde merkez elektrik dağıtım şebekesi tek hat şeması.....	41

Şekil 4.1	Ölçüm yapılan Enerji Analizörü fotoğrafı.....	42
Şekil 4.2	TR-2/9 Trafosu tek hat şeması.....	43
Şekil 4.3	TR-2/10 Trafosu tek hat şeması.....	44
Şekil 4.4	TR-2/9 trafosu 1 nolu çıkış genel tablo görünümü.....	46
Şekil 4.5	TR-2/9 trafosu 1 nolu çıkış THD I ölçüm sonucu.....	47
Şekil 4.6	TR-2/9 trafosu 1 nolu çıkış THD V ölçüm sonucu.....	47
Şekil 4.7	TR-2/9 trafosu 1 nolu çıkış akım dalga şekli.....	49
Şekil 4.8	TR-2/9 trafosu 1 nolu çıkış gerilim dalga şekli.....	49
Şekil 4.9	TR-2/9 trafosu 2 nolu çıkış genel tablo görünümü.....	50
Şekil 4.10	TR-2/9 trafosu 2 nolu çıkış THD I ölçüm sonucu.....	50
Şekil 4.11	TR-2/9 trafosu 2 nolu çıkış THD V ölçüm sonucu.....	51
Şekil 4.12	TR-2/9 trafosu 2 nolu çıkış akım dalga şekli.....	51
Şekil 4.13	TR-2/9 trafosu 2 nolu çıkış gerilim dalga şekli.....	52
Şekil 4.14	TR-2/10 trafosu ana giriş genel tablo görünümü.....	53
Şekil 4.15	TR-2/10 trafosu ana giriş THD I ölçüm sonucu.....	54
Şekil 4.16	TR-2/10 trafosu ana giriş THD V ölçüm sonucu.....	54
Şekil 4.17	TR-2/10 trafosu ana giriş akım dalga şekli.....	55
Şekil 4.18	TR-2/10 trafosu ana giriş gerilim dalga şekli.....	55
Şekil 4.19	TR-2/10 trafosu 1 nolu çıkış genel tablo görünümü.....	56
Şekil 4.20	TR-2/10 trafosu 1 nolu çıkış THD I ölçüm sonucu.....	57
Şekil 4.21	TR-2/10 trafosu 1 nolu çıkış THD V ölçüm sonucu.....	57
Şekil 4.22	TR-2/10 trafosu 1 nolu çıkış akım dalga şekli.....	58
Şekil 4.23	TR-2/10 trafosu 1 nolu çıkış gerilim dalga şekli.....	58
Şekil 4.24	TR-2/10 trafosu 2 nolu çıkış genel tablo görünümü.....	59
Şekil 4.25	TR-2/10 trafosu 2 nolu çıkış THD I ölçüm sonucu.....	60
Şekil 4.26	TR-2/10 trafosu 2 nolu çıkış THD V ölçüm sonucu.....	60
Şekil 4.27	TR-2/10 trafosu 3 nolu çıkış genel tablo görünümü.....	62
Şekil 4.28	TR-2/10 trafosu 3 nolu çıkış THD I ölçüm sonucu.....	62
Şekil 4.29	TR-2/10 trafosu 3 nolu çıkış THD V ölçüm sonucu.....	63
Şekil 4.30	TR-2/10 trafosu 3 nolu çıkış akım dalga şekli.....	63
Şekil 4.31	TR-2/10 trafosu 3 nolu çıkış gerilim dalga şekli.....	63
Şekil 4.32	TR-2/10 trafosu 4 nolu çıkış THD I ölçüm sonucu.....	65
Şekil 4.33	TR-2/10 trafosu 4 nolu çıkış THD V ölçüm sonucu.....	65

Şekil 4.34	TR-2/10 trafosu 4 nolu çıkış akım dalga şekli.....	66
Şekil 4.35	TR-2/10 trafosu 4 nolu çıkış gerilim dalga şekli.....	66
Şekil 6.1	Harmonikli yük işaretinin aktif filtre ile düzeltilmesi.....	77
Şekil 6.2	Akım kaynaklı aktif filtre.....	78
Şekil 6.3	Gerilim kaynaklı aktif filtre.....	79
Şekil 6.4	Aktif seri filtre blok diyagramı.....	80
Şekil 6.5	Birleşik güç kalite düzenleyicisi.....	80
Şekil 6.6	Aktif seri pasif şönt filtrenin kombinasyonu olan aktif filtre.....	81
Şekil 6.7	Seri ve paralel şönt filtre şemaları.....	82
Şekil 6.8	Pasif, aktif ve karma filtrelerin prensipleri ve basit şemaları.....	86
Şekil 6.9	Harmonik filtreli bir tesis.....	89
Şekil 6.10	Kondansatör ile şebekenin rezonans oluşturması.....	91
Şekil 6.11	Şok bobini eklenmiş kompensasyon sistemi.....	91

BÖLÜM I

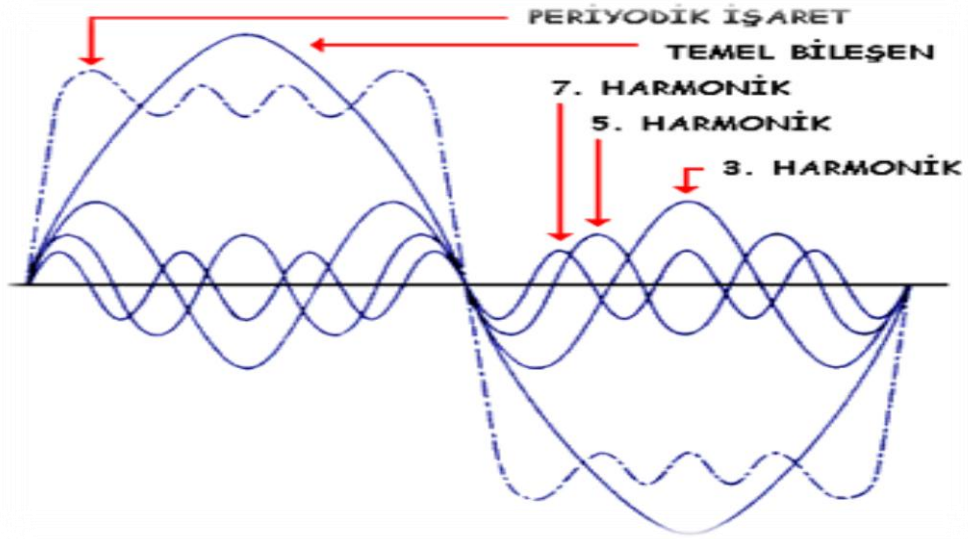
GİRİŞ

Elektrik dağıtım sistemlerinde; akım, gerilim gibi büyüklüklerin, dalga şekli temel frekanslı sinüzoidal bir değişime sahip olması gerekir. Dağıtım sistemine bağlanan ve lineer olmayan yükler, sinüzoidal dalga şekillerinin bozulmasına yani harmonik bozulmalara neden olur.

Yarı iletken elemanların tabiatı gereği ve sanayide kullanılan bazı lineer olmayan yüklerin (transformatör, ark fırınları, v.b.) etkisiyle; akım ve gerilim dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte sinüsoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüsoidal dalgaların toplamından meydana gelmektedir. Bu şekilde çeşitli elemanlar veya olaylar sonucunda enerji sistemindeki sinüsoidal dalga biçimi bozulur. Temel dalga dışındaki sinüsoidal dalgalara "HARMONİK" adı verilir. Bu bozuk dalgalar "sinüsoidal olmayan dalga" olarak adlandırılır. Şekil 1.1' de bir periyottaki temel bileşen ve harmonik bileşenler gösterilmiştir.

Elektrik enerjisi kirliliğine sebep olan harmonikler, elektrik güç sistemlerinde özellikle motorlar, jeneratörler, kondansatörler, transformatörler ve enerji iletim-dağıtım hatlarında kayıplara sebep olurlar. Bazı durumlarda da harmonikler, güç sistemindeki elemanların zarar görmelerine veya devre dışı kalmalarına neden olmaktadır. Ayrıca, harmonikler nedeniyle sistemde değişik frekanslarda akım ve gerilim bileşenleri bulunacağından, rezonans olayının meydana gelme olasılığı artacaktır ve oluşabilecek aşırı akım ve gerilimler, sistemdeki elemanlara büyük zararlar verecektir.

Kalitesiz enerjinin (harmonikli elektrik enerjisi) kullanılması, şehir şebekelerinde gereksiz elektrik kesilmelerine, son kullanıcıların elektrikli ev aletlerinin düzensiz çalışmalarına ve bozulmalarına, fabrikalar ve işletmelerde elektrik makinelerinin kararsız çalışmalarına, dolayısıyla her türlü elektrik sisteminin ve sistem elemanlarının zarar görmesine sebep olur. Sonuç olarak harmonikler, işletmelerde ve son kullanıcılarda, maddi hasarlara, üretim kayıplarına ve iş verimliliğinin azalmasına, dolayısıyla ilave maddi kayıplara sebep olur.



Şekil 1.1 Bir periyottaki harmonik bileşenler ve temel dalga şekli [1]

Bu çalışmada; Harmonikler ili ilgili temel kavramlar, harmonik üreten cihazlar, harmoniklerin etkileri, harmonik büyüklüklere ait tanımlar, elektrik dağıtım şebekeleri ile ilgili tanımlar, harmonik standartları, harmoniklerin giderilmesinde kullanılan filtreler ile ilgili bilgiler verilmiştir. Niğde İl Merkezi Elektrik Dağıtım Şebekesindeki 2 adet dağıtım trafo bölgesinde enerji kalitesi ile ilgili ölçümler yapılmıştır. Bu bilgiler ışığında ölçüm yapılan trafo merkezlerindeki harmonik kirlenmenin kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalıp kalmadığı analiz edilmiş ve bu trafolarla harmonik probleminin olduğu sonucuna varılmıştır. Son olarak ta bu harmonik kirlenmenin yok edilebilmesi için gerekli hesaplamalar yapılarak çözüm önerisi getirilmiştir.

BÖLÜM II

HARMONİK ÜRETEN ELEMANLAR, HARMONİKLERE AİT TEMEL KAVRAMLAR VE HARMONİKLERİN ETKİLERİ

2.1 Harmonik Üreten Elemanlar

Harmoniklerin oluşmasının başlıca sebebi, elektrik devrelerinde kullanılan lineer olmayan devre elemanlarıdır. Bu devre elemanlarının, gerilimi ile akımı arasındaki bağıntının lineer olmayışından harmonikler oluşmaktadır. Harmoniklerin oluşmasına neden olan kaynakların başlıcaları şunlardır [2]:

2.1.1 Transformatörler

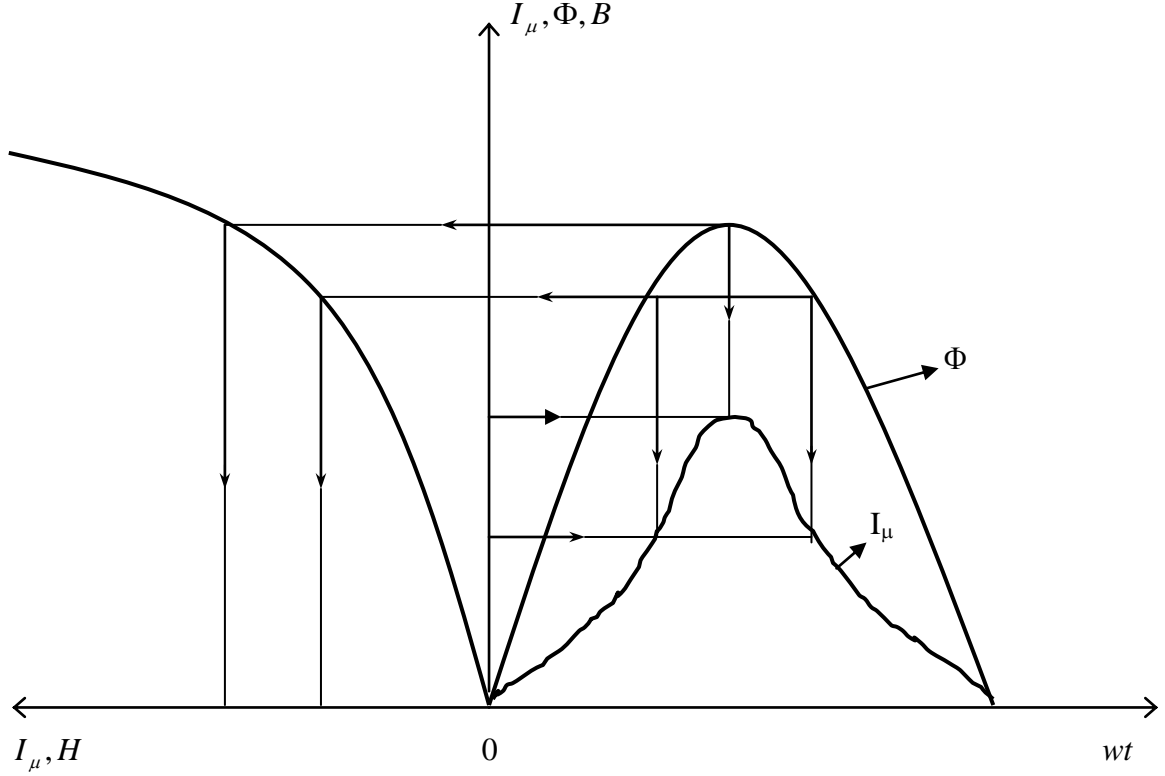
Elektrik şebekelerinde, transformatör, bobin gibi demir çekirdekli sargılar önemli harmonik üreticisidir. Transformatörler sinüzoidal gerilimle beslendiğinde şebekeden mıknatıslanma akımı (Şekil 2.1' de verilmiştir) çeker. Ancak demir çekirdeğin manyetik karakteristiği lineer olmadığı için bu akım sinüzoidal değildir. Demir çekirdeğin $B = f(H)$ eğrisine mıknatıslanma eğrisi denir. Mıknatıslanma eğrisi, Şekil 2.2' de verilmiştir. B-H eğrisi yorumlanacak olursa; doyma arttıkça harmoniklerin genlikleri büyür. Harmonik akımlar, transformatörlerin birincil sargı reaktansı, hattın reaktansı ve jeneratörlerin kaçak reaktansı üzerinden geçtiği için, bunlar üzerinde harmonikli gerilim düşümü meydana gelir. Bu reaktanslar frekansla orantılı olarak arttıklarından, özellikle düşük yüklenmelerde, yüksek harmonik akımlarının bunlar üzerindeki gerilim düşümü büyür [3].

Esas olarak harmoniklerin şebekeye geçip geçmemesi şu faktörlere bağlıdır [4].

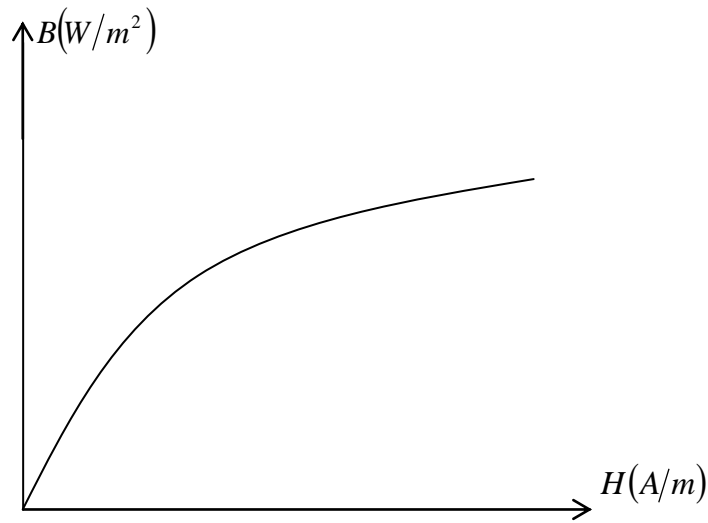
- i. Transformatörün bağlantı grubu,
- ii. Birincil sargısı yıldız bağlı transformatörlerde yıldız noktasının şebekenin nötr hattına bağlı olup olmaması,
- iii. Mıknatıslanma akımının serbest ya da zorunlu olması,

Transformatörlerin bağlama tarzı, harmoniklerin şebekede bulunup bulunmamasına bağlıdır. Örneğin birincil tarafı üçgen bağlı transformatörde; 3., 9., 15. harmonikler her

faz sargı akımında bulunur. Bunlar her sargıda eşit fazlı oldukları için, üçgen sargının içinde kalır ve dışarı çıkamazlar. Bunun yanı sıra şebekeden 1., 5., 7., 11., ... gibi harmonikli akımlar çekilir. Kısaca söylemek gerekirse, transformatörün birincil ve ikincil sargıları nasıl bağlanırsa bağlansın, şebekeden daima 1., 5., 7., 11., ... gibi harmonikli akımları çekilir.



Şekil 2.1 Transformatör mıknatıslanma akımı



Şekil 2.2 Demir çekirdeğin mıknatıslanma eğrisi ($B = f(H)$ eğrisi)

Güç sistemlerindeki en önemli eleman olan transformatörler, demir çekirdeği bulunan bobinden oluşmaktadır. Demir çekirdeğinin mıknatıslama karakteristiği lineer olmadığından, transformatör doyuma gitmekte ve harmonikler üretmektedir. Transformatörler sinüzoidal gerilimle çalışma altında lineer mıknatıslama karakteristiği bölgesinde sinüzoidal çıkış büyüklüğü verecek şekilde tasarlanırlar. Transformatörlerin nominal değerlerinin dışında çalışması nüvede daha çok doymaya ve harmonik akımları seviyesinde hızla artmaya sebep olabilir [5].

2.1.2 Generatörler

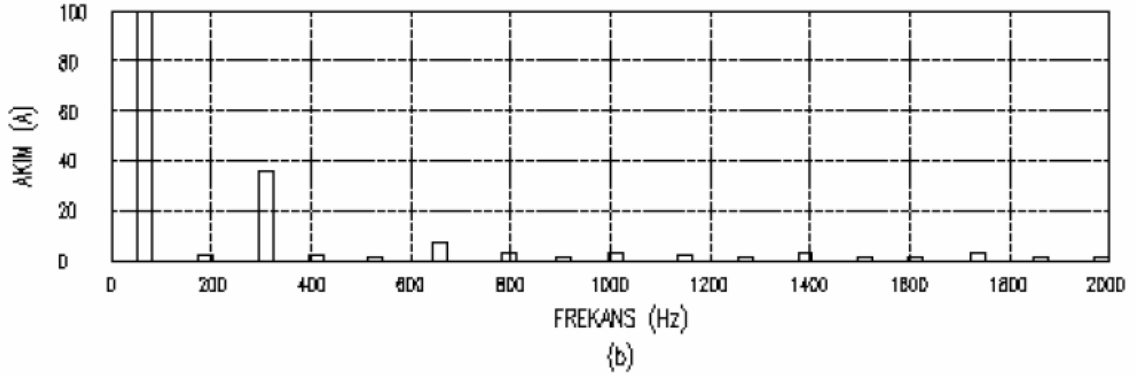
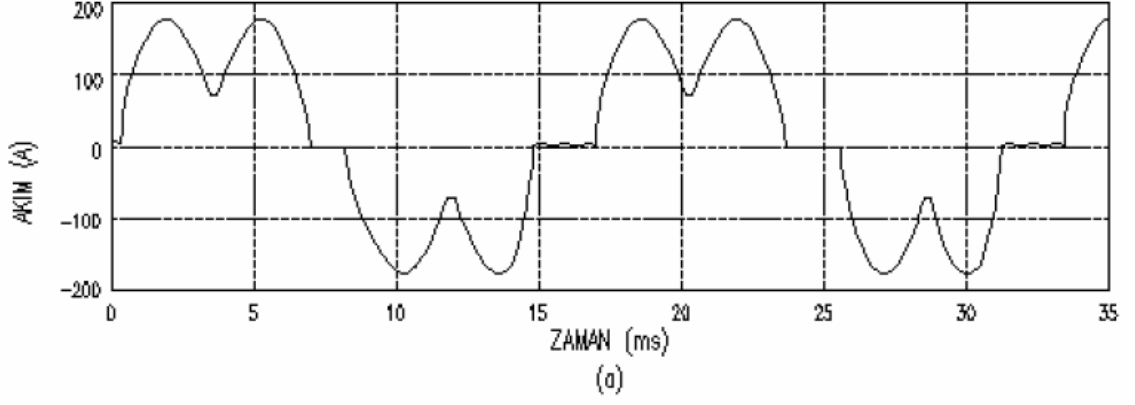
En doğal harmonik üreticileri generatörlerdir. Senkron generatörlerin harmonik üretme özelliği çıkık kutbun alan şeklinden, manyetik direncin oluklara bağlı olmasından, ana devrenin doyuma ulaşması ve kaçak akımlar ile sık aralıklarla ve simetrik olmayan boşluklara yerleştirilen sönüm sargılarından kaynaklanmaktadır. Dönen makineler, makine hızının ve endüvi oluk sayısının fonksiyonu olan harmonikleri üretirler [6].

2.1.3 Güç elektroniği elemanları

Çeşitli güç elektroniği elemanları küçük uygulamalardan büyük endüstriyel uygulamalara kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Yüksek çalışma verimine ve istenilen çalışma durumlarına sahip olmaları nedeni ile geniş kullanım alanı bulmuşlardır. Televizyon alıcıları, bilgisayarlar ve diğer elektronik uygulamaları kapsayan küçük güçlü tek fazlı elektronik güç dönüştürücülerin sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Üç fazlı güç elektroniği elemanları ise geniş bir kullanım ve tasarım alanına sahiptirler. Başlıca güç dönüşüm grupları şunlardır:

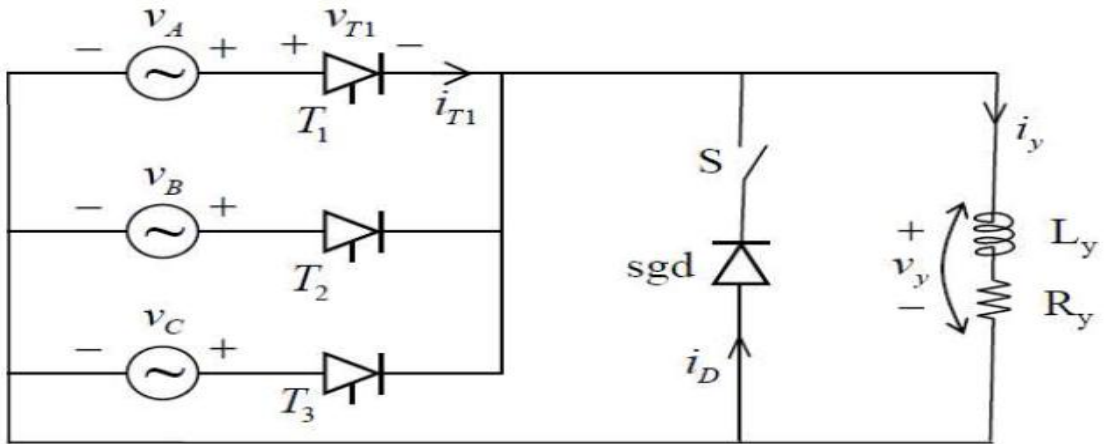
- i. Doğrultma
- ii. Frekans kontrolü
- iii. Gerilim kontrolü
- iv. Evirme
- v. Hız Kontrolü

Şekil 2.3' de sabit akım kaynaklı ayarlı hız kontrol ünitesinin akımı ve harmonik spektrumu görülmektedir.

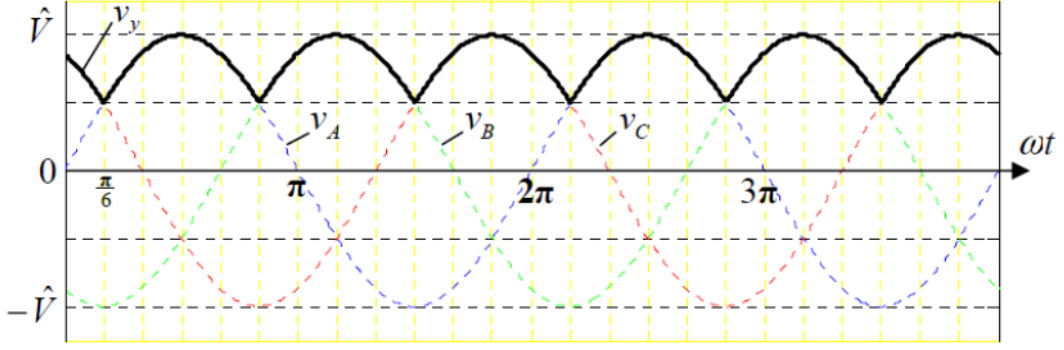


Şekil 2.3 a) Sabit akım kaynaklı ayarlı hız kontrol ünitesi akımı b) harmonik spektrumu

Her alanda yaygın olarak kullanılan çeviriciler, alternatif akımı doğru akıma dönüştüren (doğrultucular=redresör) veya doğru akımı alternatif akıma dönüştüren (eviriciler=inverterler) elemanlar olarak tanımlanır. Bunların içinde güç sisteminde en çok kullanılan grup, doğrultucu grubudur. Doğrultucuların güç sisteminde başlıca kullanım alanları; yüksek doğru gerilimle iletim (HVDC), doğru akım motorlarının beslenmesi ve kimyasal süreçlerdir. Şekil 2.4' de örnek bir üç fazlı orta uçlu doğrultucunun prensip şeması ve gerilim dalga şekli görülmektedir [7].



(a)



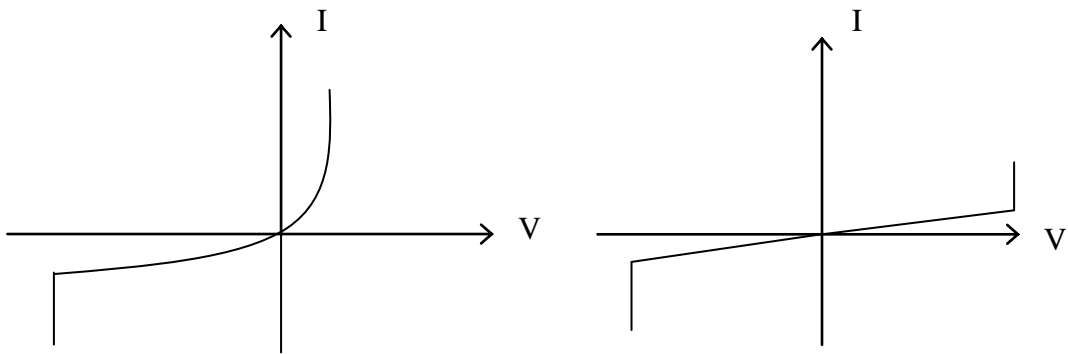
(b)

Şekil 2.4 a) Üç fazlı orta uçlu doğrultucu prensip şeması, b) Gerilim dalga şekli

Çeşitli darbe sayılarına sahip doğrultucular bulunmaktadır. 6 ve 12 darbeleri doğrultucular en yaygın olanlarıdır. Küçük güçlü uygulamalarda 3 darbeleri, daha güçlü uygulamalarda ise 18 ve daha büyük darbeleri doğrultucular kullanım alanı bulmaktadır. Darbe sayısının seçimi ekonomik koşullara da bağlıdır.

Frekans ve gerilim kontrolü grubu, senkron ve asenkron motorların ve benzeri yüklerin farklı frekans ve gerilimlerde beslenmesi amacıyla kullanılır. Böylece motorların tüm yük seviyelerinde daha verimli çalışması sağlanır.

Güç elektroniği elemanlarındaki toplam harmonik distorsiyonu tipik olarak yük akımının %10 – %30' u arasındadır.



a) diyot

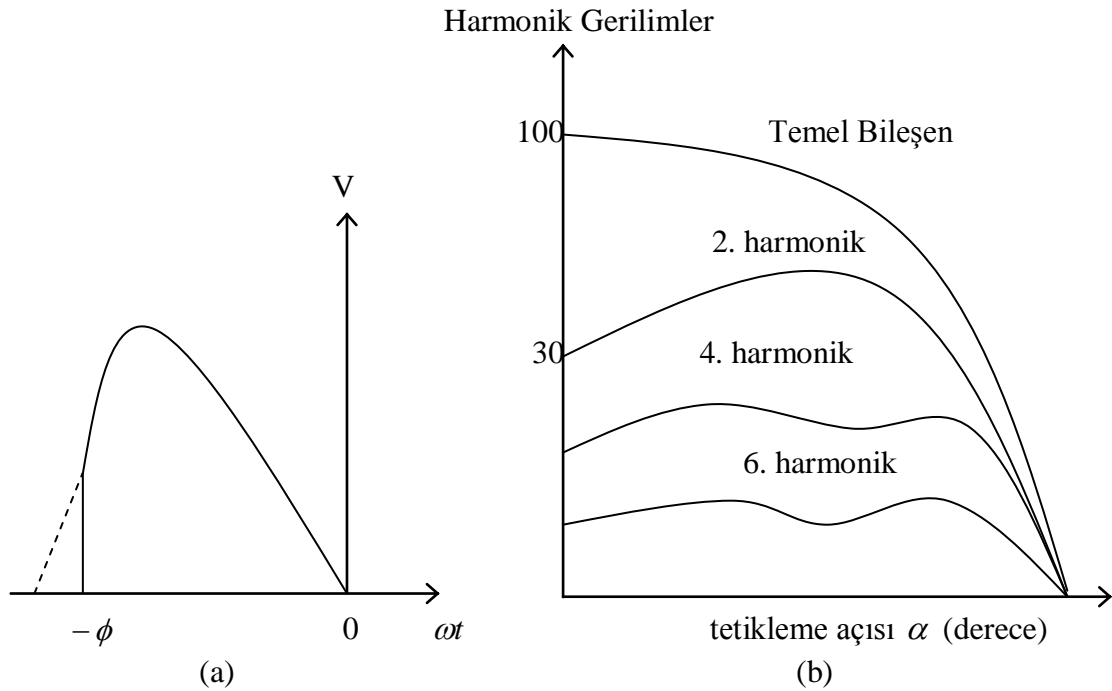
b) tristör

Şekil 2.5 Diyot ve tristöre ait çalışma karakteristikleri

Yarı iletken elemanlar çalışma karakteristiğinin lineer olmamasından kaynaklanan harmonikler üretirler. Şekil 2.5’ te örnek olarak bir diyot ve tristöre ait çalışma karakteristiğinden de görüldüğü gibi akım ve gerilim lineer olarak değişmediği için şebekede harmoniklerin oluşmasına neden olurlar.

Transformatörlerden sonra ana harmonik kaynağı günümüzde hat komütasyonlu konverterlerdir. Belirli şartlarda, alternatif akım ile enerji iletimine göre daha ekonomik iletim sağlayan doğru akım enerji iletim sistemleri (HVDC) ile akü, fotovoltaik sistemler ve bazı endüstriyel donanımlar hat komütasyonlu konverterler üzerinden beslenirler. Örneğin yarım dalga kontrollü bir doğrultucu devresinde sinüzoidal dalga tristörlerin tetikleme açısına (α) bağlı olarak belirli bir ϕ açısından kesildiğinde devrede sinüzoidal olmayan dalga meydana gelmektedir. Şekil 2.6.a’ da sinüzoidal olmayan dalga, Şekil 2.6.b’ de ise bu dalga ile oluşan harmonikler gösterilmiştir. Bir konverterin meydana getirdiği harmonikler, konvertörlerin tristör sayısına (darbe sayısına) bağlı olarak ifade edilebilir. Örneğin; 6 darbeleri bir konverterin akımı aşağıdaki gibidir;

$$I_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_d \cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \dots \quad (2.1)$$



Şekil 2.6 Yarım dalga kontrollü doğrultucu devresi için

(a) dalga şekli, (b) oluşan harmonikler

Burada görüldüğü gibi harmonik akımların genliği harmonik frekansı ile ters orantılıdır. Harmonik derecesi ne kadar yüksekse harmonik akımların genliği o kadar düşmektedir. Konverterlerde darbe sayısı $P = 6, 12, 18$ ve 36 ' dır. Buna bağlı olarak meydana gelen harmonik bileşenlerin frekansları şu şekilde ifade edilebilir;

$$n = kp \mp 1$$

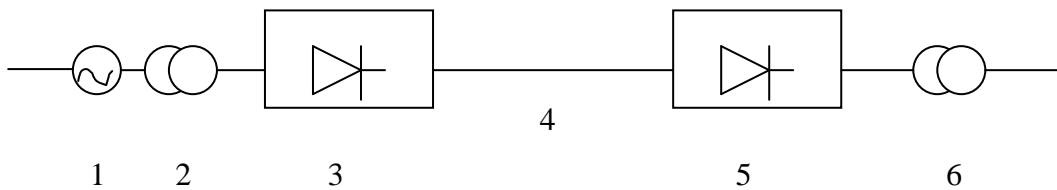
n : harmonik mertebesi

p : çeviricinin darbe sayısı

k : pozitif bir tamsayı (1, 2, 3,.....)' dir.

2.1.4 Doğru akım ile enerji nakli

1960' lı yıllardan başlayarak, yarı iletken teknolojisinin de gelişmesiyle, doğru akım ile enerji nakli (HVDC-High Voltage Direct Current) gündemdedir. Kararsızlık probleminin olmaması ve farklı frekanslı iki noktanın birleştirme olanağının olması, doğru akımla enerji iletimini tercih edilir yapmaktadır. Bu teknikte alternatif-doğru ve doğru-alternatif çeviricileri kullanılmaktadır. Alternatif olarak üretilen gerilim doğrultulmakta ve enerji nakil hattını beslemekte, hattın ucunda tekrar alternatifte çevrilerek tüketiciye iletilmektedir. Şekil 2.7' de bir doğru akımla enerji iletim hattının basit bağlantı şekli verilmiştir.

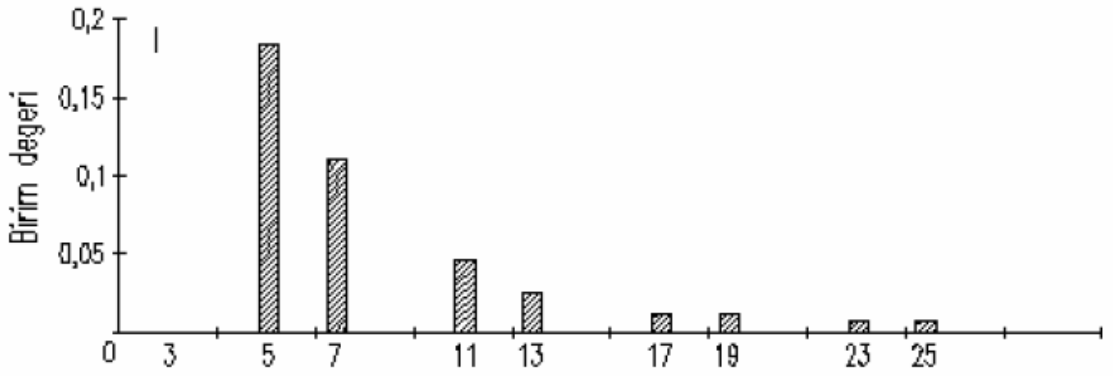


Şekil 2.7 Bir doğru akım enerji iletim hattının prensip bağlantı şeması, (1: Jeneratör, 2: Yükseltici transformatör, 3: Doğrultucu, 4: İletim hattı, 5: Evirici, 6: Alçaltıcı transformatör)

Doğru akım ile enerji iletim hatlarında hat başında ve sonunda yer alan büyük güçlü çeviriciler (doğrultucu ve evirici bloklar) yarı iletken elemanlardan oluştuğundan, birer harmonik kaynağı olmaktadır. Örneğin, altı yollu çeviricilerin kullanıldığı bir doğru akımla enerji iletim hattında faz akımının efektif değeri;

$$I = I_1 \left[1 + \left(\frac{1}{5} \right)^2 + \left(\frac{1}{7} \right)^2 + \left(\frac{1}{11} \right)^2 + \dots \right]^{1/2} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada I_1 , temel bileşenin efektif değeridir. Uygulamada harmoniklerin olabildiğince az olduğu çevirici düzenlerden yararlanır. Yapılan incelemelerden, Şekil 2.8' den de görüleceği üzere tek kutuplu iletim modelinde 5., 7., 11,13 17. ve 19. harmoniklerin ortaya çıktığı, buna karşılık iki kutuplu iletim modelinde bu mertebeden harmoniklerin oluşmadığı gözlenmiştir.



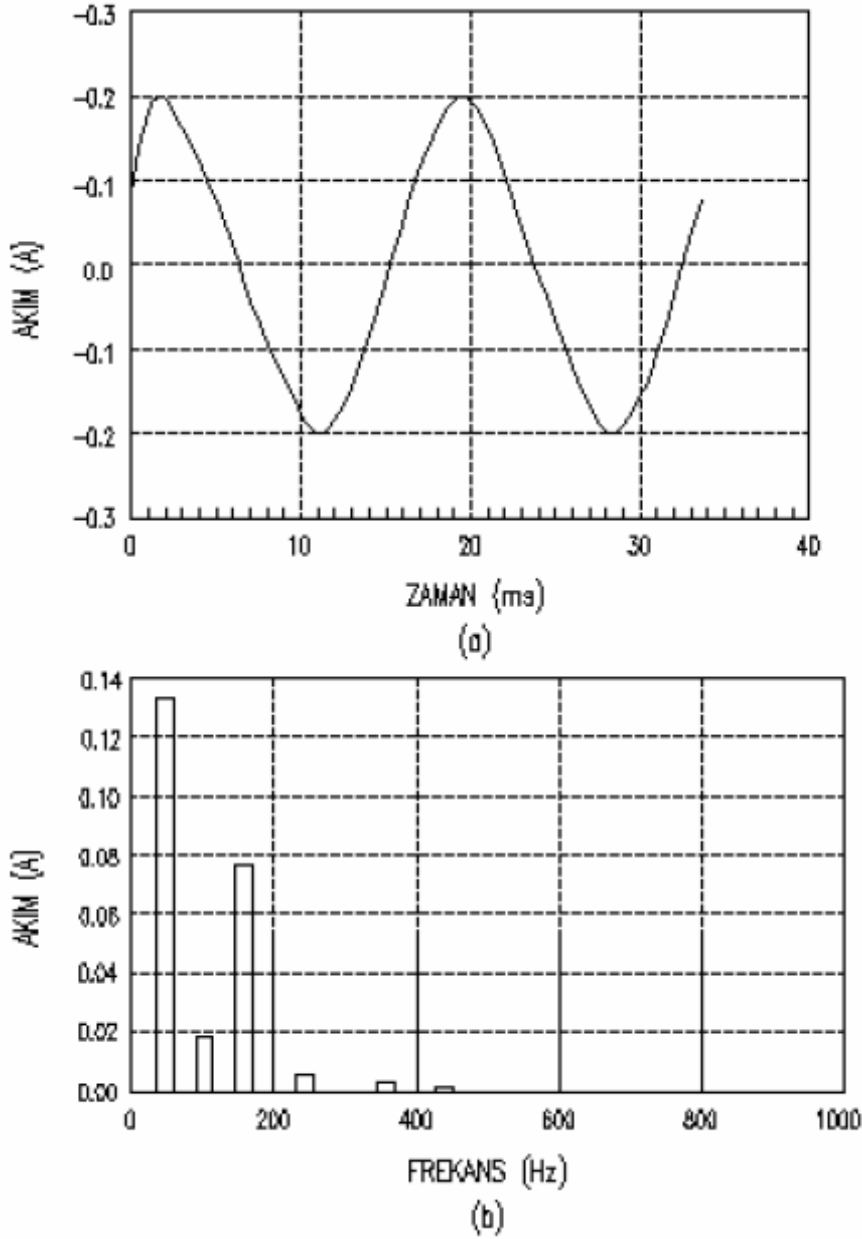
Şekil 2.8 HDVC sistemi harmonik spektrumu

2.1.5 Gaz deşarjlı aydınlatma

Gaz deşarjlı aydınlatma elemanları, örneğin flüoresan, cıva, ark, neon v.b. ve yüksek basınçlı sodyum lambalar şebekeden harmonikler içeren akımların çekilmesine neden olurlar. Bu tür aydınlatma elemanları özellikle büyük şehir alanlarında daha çok hissedilen harmonikler meydana getirirler. Bu tip lambaların elektriksel karakteristiği nonlineer olup akım geçişi esnasında negatif direnç karakteristiği gösterirler. Ev ve işyerlerinde yaygın olarak kullanılan flüoresan lambalar balastlarından ve gaz deşarjlarından kaynaklanan harmonik bileşenlerin meydana gelmesine sebep olmaktadır.

Üç fazlı sistemde, faz nötr gerilimle beslenen aydınlatmada (üç fazlı dört telli montajda) 3. harmonik akımı nötr iletkeninden toprağa geçer. Harmonik etkinliği açısından bakıldığında, flüoresan aydınlatmada tek mertebeli harmoniklerin büyüklüğü önemli

oranda devreyi etkiler. Şekil 2.9’ da manyetik balastlı flüoresan lamba akım dalga şekli ve harmonik spektrumu görülmektedir.

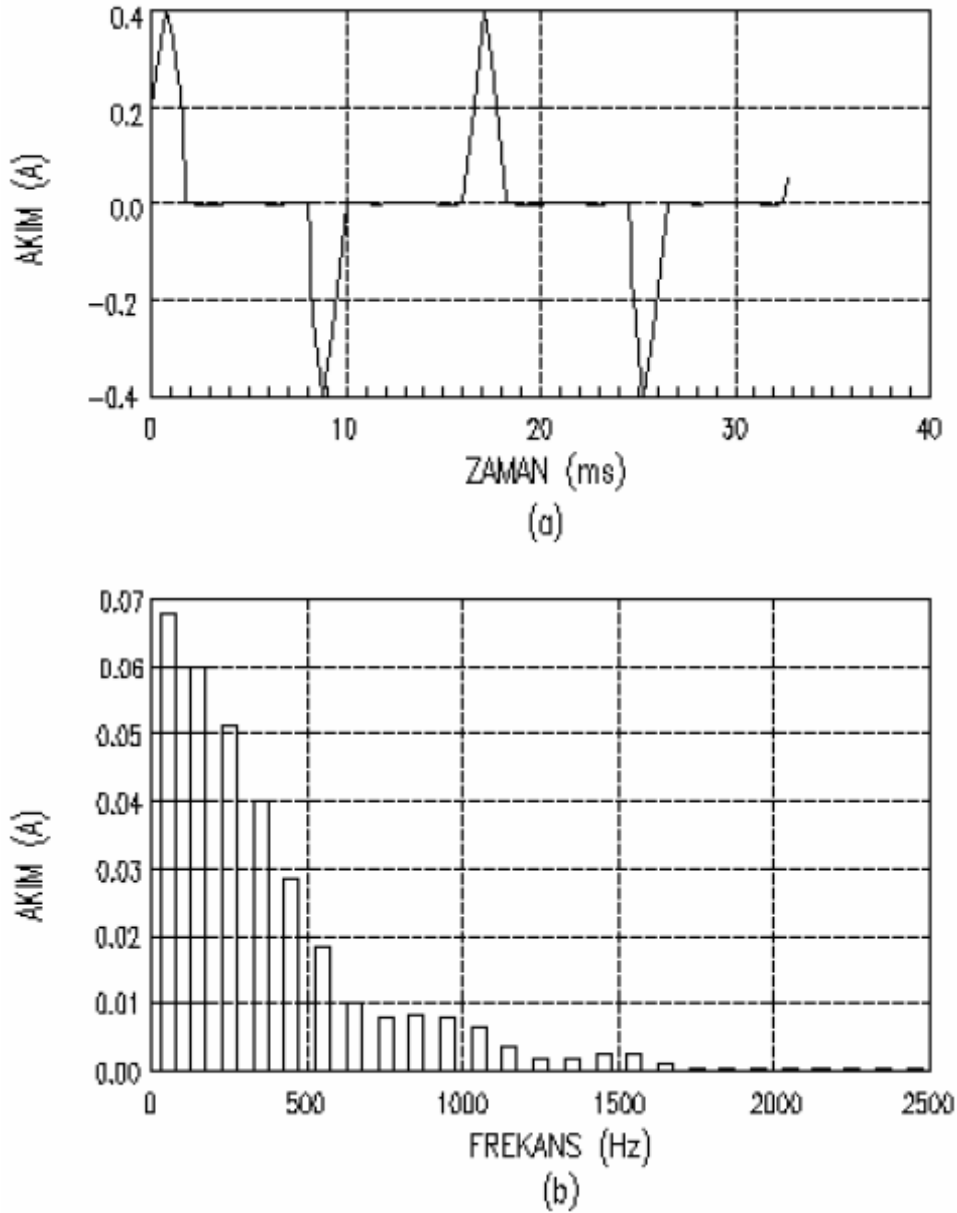


Şekil 2.9 Flüoresan lamba a)Manyetik balast akım dalga şekli b)Harmonik spektrumu

2.1.6 Elektronik balastlar

Gün geçtikçe hayatımızın her safhasına daha belirgin bir biçimde giren elektronik sanayi, şebekede harmonik etkinliğinin de artmasına sebep olmaktadır. Aydınlatmada kullanılan elemanlardan elektronik balastlarda harmonik üreticisidirler. Filtreli ve filtersiz 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. bileşenlerdir, 13. harmonikten sonra temel bileşenin 1/3' ünden daha küçük değerlerde harmonik bileşenlere sahiptirler.

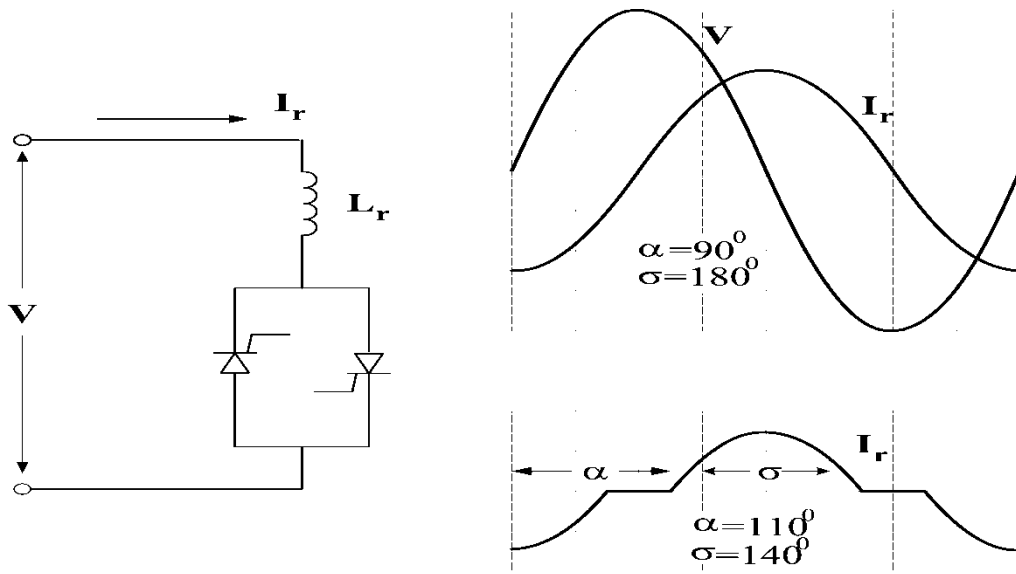


Şekil 2.10 a)Elektronik balast akım dalga şekli b)Harmonik spektrumu

Şekil 2.10' daki akımın THD'u, %144 mertebesinde olup genelde bu tip balastlarda THD %10-32 arasındadır. ANSI C82.11-1993 e göre %32 üzeri THD yüksek kabul edilir. Uygulamada akım THD düşürmek için elektronik balast çıkışına pasif filtre kullanılır [8].

2.1.7 Statik VAR kompanzatörler

Güç sistemlerinde reaktif güç kontrolü maksadıyla kullanılan tristör kontrollü reaktör içeren statik VAR kompanzatörleri, içerdikleri lineer olmayan elemanlar sebebiyle lineer olmayan güç karakteristiğine sahiptirler. Statik VAR kompanzatörleri bu sebeple bağlı oldukları güç sisteminde sinüzoidal olmayan büyüklüklere neden olurlar. Tristör kontrollü reaktörün eşdeğer devresi, tetikleme açısı ile iletim açısı ve akım, gerilim değişimi Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11 Tristör Kontrollü Reaktör'ün temel yapısı , gerilim ve akımın dalga şekli

2.1.8 Ark fırınları

Ark fırınları, geniş spektrumlu harmonikler içeren yüklerin önemli bir örneğidir. Ark fırını bulunan işletmeler için harmonik oluşum nedeni olarak ark fırınlarındaki ateşleyici elektrotların özellikleri ve ark akım-gerilim karakteristikleri verilir. Ark fırınının aktif direnci sabit değildir. Bir yarı periyodun başlangıcında direnç büyüktür, bundan sonra bir minimum değere düşer ve yarı periyodun sonuna doğru tekrar yükselir. Bu yüzden akım tam bir sinüs şeklinde değildir ve birçok harmonikler ihtiva eder. Ergitme aşamasının başında akım harmonikleri çok fazladır ve hurda eridikten sonra yani ark sakinleşince harmonik azalır. Çizelge 1.3’ de ark fırınının ortalama

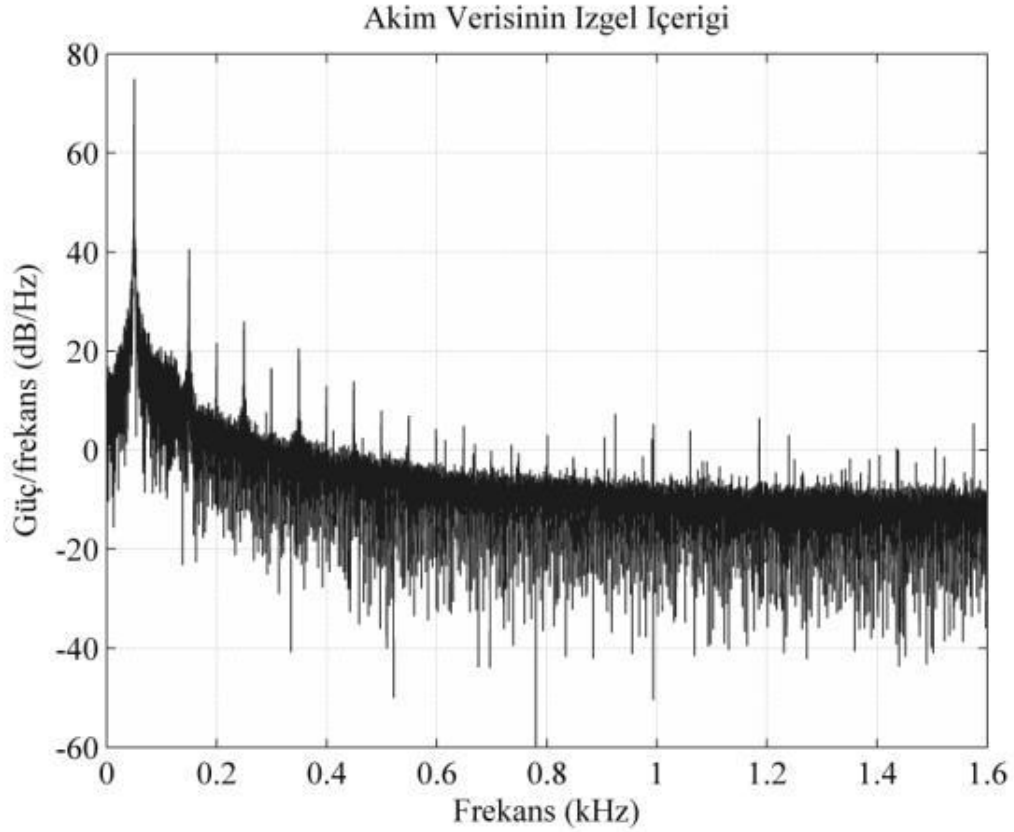
harmonik değerleri verilmiştir. En büyük harmonik bileşenini temel bileşeninin %30' u kadardır [9].

Çizelge 2.1 Ark fırınının ortalama harmonik değerleri

Harmonikler	Genlik (%)		Harmonikler	Genlik (%)	
	Ortalama	En Büyük		Ortalama	En Büyük
2	4-9	30	6	2-3	10
3	6-10	20	7	3-6	8
4	2-6	15	9	2-5	7
5	2-10	12			

Ark fırınlarının çalışma şartlarında ki bu değişmelerden dolayı g sisteminden çektikleri akımlarda gelişigüzel olur. Bunun sonucu olarak, şebeke gerilimi de akıma bağlı olarak sinüs formundan uzaklaşır. Akım ve gerilimdeki bu bozulmalar, şebekeye harmonikli bileşenlerin verilmesi anlamına gelir. Ark fırınlarında harmonik dağılımının kuramsal olarak saptanması için g sistemi modelinin tam olarak kurulması gerekir. Bu modele, harmonik meydana getiren elemanların modellerinin eklenmesi gerekir. Daha sonra sistem çözülerek harmoniklerin baralara göre dağılışı elde edilir.

şekil 2.12' de akım dalga şeklinin izgel içeriği gösterilmiştir. şekilden de görüleceği gibi, alt harmonik ve ara-harmonik bileşenler temel frekansa yakındır. Bu değerler akım dalga şeklinin 300 çevrimi için Hızlı Fourier Dönüşümü kullanılarak bulunmuştur [10].



Şekil 2.12 Akım dalga şeklinin izgel içeriği

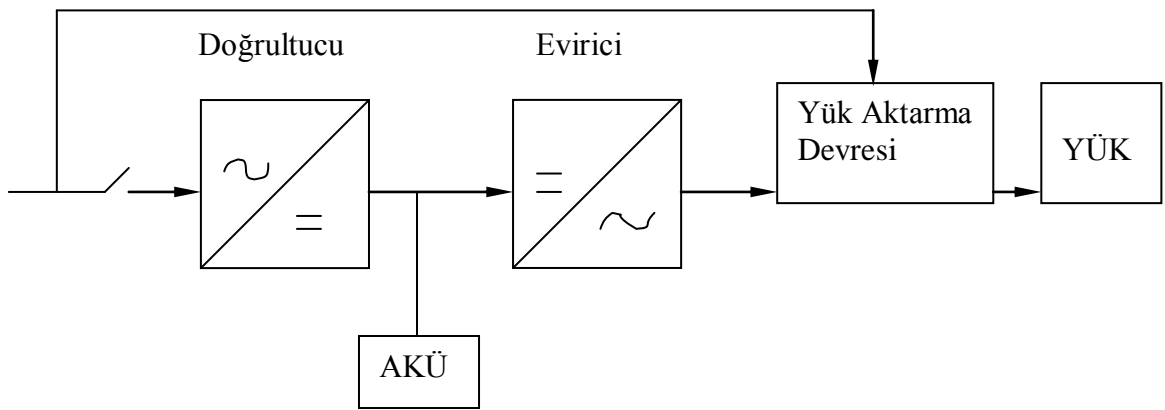
Bu açıklamalardan da anlaşıldığı gibi, ark fırını sisteme bir harmonik generatörü gibi etki eder. Ark fırınına paralel bağlı devrelerde, şartların gerçekleşmesi halinde rezonans olayları baş gösterebilir. Bugün ark fırınlarının düşük güç katsayısı ile çalıştırılması tercih edilir. Bu yüzden fırın daha büyük bir reaktif güç çeker. Bunu kompanze etmek için büyük güçlü kondansatör bataryası kullanılır. Böylece şebekenin rezonans frekansı düşer.

2.1.9 Kesintisiz güç kaynakları

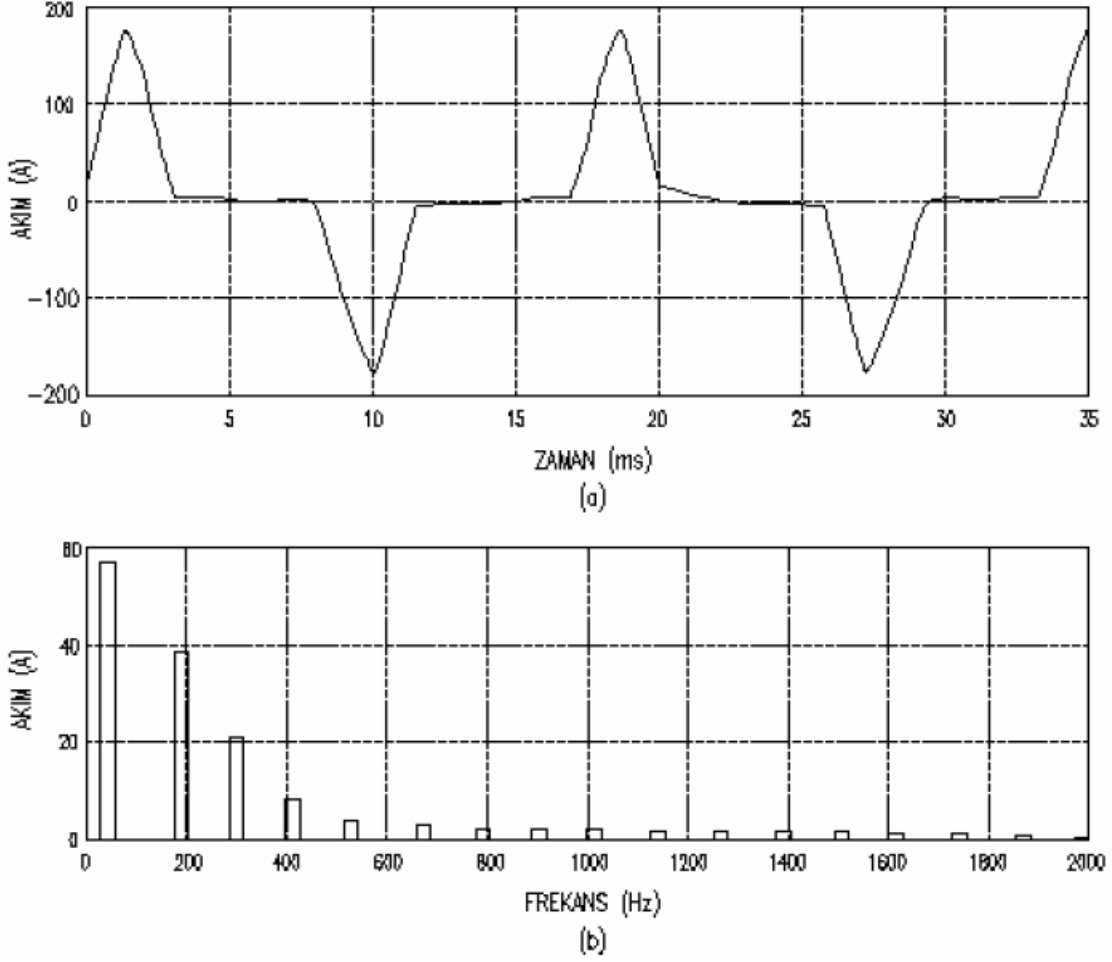
Gerilim dalgalanmasının ve kesintisinin yol açtığı zararlardan kurtulmak için bilgisayarlar, hastaneler, hava alanları v.b. diğer önemli yerlerde kullanılan kesintisiz güç kaynakları alternatif gerilimin doğru gerilime çevrilerek depolanması ve sonra evirici yardımı ile alternatif akıma çevrilerek tüketiciye iletilmesi esasına göre çalışır. Kesintisiz güç kaynaklarında evirici, ara devre gerilimi olan doğrultucu çıkış gerilimini, evirmek suretiyle istenen genlik ve frekansta dalgalı gerilime dönüştürür. Dönüşüm sırasında tam sinüs dalgası elde edilemediği için çıkış işaretinin fourier serisinin

açılımının belirttiği frekanslarda, belirli genliklerde harmonikler oluşturacaklardır. Bu durum gerek yükte gerekse kaynakta gereksiz yüklenmelere, ek ısınmalara, verimlilik kaybına, motor uygulamalarında salınımlara v.b. istenmeyen durumlara neden olabilmektedir. Ortaya çıkan bu harmonikler işletme cihazlarında çoğu kez istenen performansın alınabilmesini engellediği için istenmez. Sonuçta çıkış işaretindeki harmoniklerin belirli miktarlarda bastırılması çoğu kez gerekli bir işlem olmaktadır. Kesintisiz güç kaynaklarında harmonikler evirici tipine, evirici çıkışını elde etmek için kullanılan modülasyon tipine, mikroişlemci kontrollü olup olmadığına v.b. etkenler bağlı olarak değişmektedir.

Bir güç elektroniği düzeni olan kesintisiz güç kaynakları, esas olarak şebeke geriliminin uygulandığı bir doğrultucu, doğrultucu çıkışında paralel olarak uygulanmış olan akü düzeni ile, doğrultulmuş gerilimi dalgalı gerilime dönüştürerek, yüke veren evirici düzenini içerir. Bu temel elemanlar yanında, elde edilip yüke verilecek sinüzoidal gerilimin istenilen özelliklerde olmasını sağlamak, güvenilir bir çalışma elde etmek üzere yardımcı düzenlerde vardır. Kesintisiz güç kaynaklarında doğrultucu ve evirici devreleri, uygun geri beslemelerle kapalı çevrim kontrollü çalıştırılırlar. Bundan dolayı çıkış gerilimleri çok kararlıdır, yükten etkilenmez. Şekil 2.13’ de bir kesintisiz güç kaynağının prensip şeması görülmektedir. Şekil 2.14’ de ise akım dalga şekli ve harmonik spektrumu verilmiştir [11].



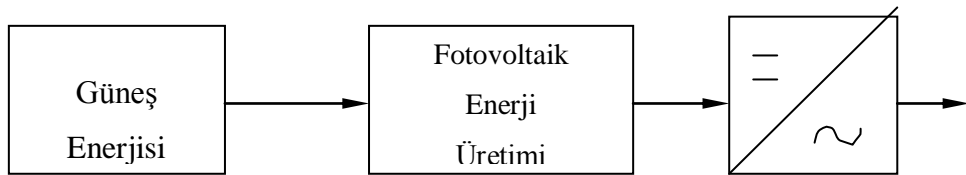
Şekil 2.13 Bir kesintisiz güç kaynağının prensip şeması



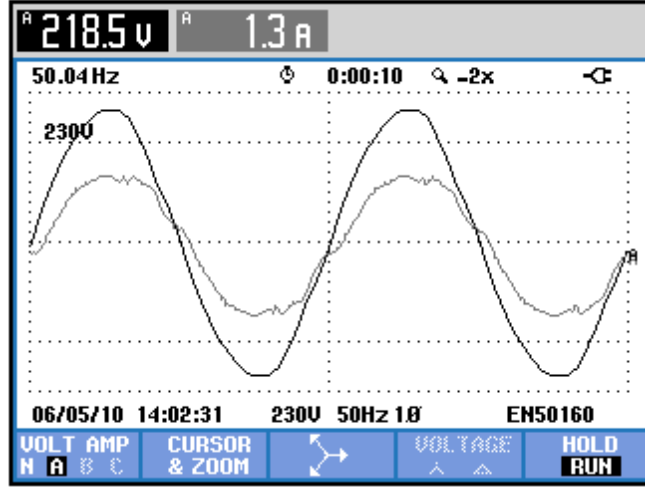
Şekil 2.14 Anahtarlamalı güç kaynağı akım ve harmonik spektrumu

2.1.10 Fotovoltaik sistemler

Fotovoltaik sistemler harmonik üretme bakımından genel olarak konverterlerden kaynaklanan harmonik etkinliğine sahiptirler. Bu sistemler elektrik enerjisini fotovoltaik yoldan elde eden sistemler olup, ürettikleri doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek için konverterleri kullanırlar. Dolayısıyla dönüşüm esnasında yarı iletken elemanların sebep olduğu harmonikler söz konusu olmaktadır. Şekil 2.15’ de fotovoltaik enerji üretiminin blok şeması ve Şekil 2.16 de örnek bir fotovoltaik sistemin ürettiği akım ve gerilim dalga şekilleri verilmiştir.



Şekil 2.15 Fotovoltaik enerji üretimi blok şeması



Şekil 2.16 FV güç sisteminin şebeke tarafından alınan akım ve gerilim dalga şekilleri

2.2 Harmoniklerin Etkileri

Harmonikler güç sistemlerindeki tüm elemanları etkilerler. Dolayısı ile güç sistemleri bundan olumsuz yönde etkilenir. Harmoniklerin, gerilim ve akımın dalga şeklini bozmaları sonucu güç sistemleri üzerinde yol açtığı problemler şu şekilde özetlenebilir [2];

- Generatör ve şebeke geriliminin dalga şeklinin bozulması,
- Elektrik güç sistemi elemanlarında ve yüklerde ek kayıpların oluşması,
- Güç üretiminde, iletiminde ve dağıtımında verimin düşmesi,
- Gerilim düşümünün artması,
- Toprak kısa devre akımlarının daha büyük değerlere ulaşması,
- Temel frekans için tasarlanmış kompanzasyon tesislerindeki kondansatörlerin harmonik frekanslarında düşük kapasitif reaktans göstermeleri sebebi ile aşırı yüklenmeleri ve yalıtım zorlanması nedeni ile hasar görmeleri,
- Senkron ve asenkron motorlarda salınımların oluşması nedeni ile aşırı ısınmalar,
- Koruma sistemlerinin hatalı çalışmaları,
- Kesintisiz güç kaynaklarının veriminin düşmesi,
- Aydınlatma elemanlarında ve monitörlerde görüntü titreşimi meydana getirmesi,
- Endüksiyon tipi sayaçların yanlış ölçüm yapması,
- Yalıtım malzemesinin zorlanması ve delinmesi,

- Temel frekansta rezonans olayı olmadığı halde harmonik frekanslarında şebekede rezonans olaylarının meydana gelmesi ve aşırı gerilim veya akımların oluşması,
- Elektrik cihazlarının ömrünün kısılması,
- Sesli ve görüntülü iletişim araçlarının parazitli ve anormal çalışması,
- Mikroşlemcilerin hatalı çalışması,
- Harmoniklerden kaynaklanan gürültü nedeni ile kontrol sistemlerinin hatalı işletimi,
- Başta motor olmak üzere diğer cihazlarda ek gürültülere neden olması

2.2.1 Transformatörler üzerine etkileri

Transformatörlerde meydana gelen akım ve gerilim harmoniklerinin neden olduğu problemler şöyle sıralanabilir: Akım harmonikleri sargı bakır kayıplarında (I^2R) ve kaçak akı kayıplarında artışa, çekirdek kaybının artmasına ve haberleşme sistemlerinde olumsuz etkiye neden olur. Gerilim harmonikleri ise fuko ve histerezis akımlarından dolayı demir kayıplarında artışa ve yalıtımın zorlanmasına neden olur.

Transformatör endüktansı ve transformatörlere bağlı bir tüketicinin kapasitansı arasında rezonans meydana gelebilir. Akım ve gerilim harmonikleri transformatörlerde ek ısınmalar oluşturur.

Harmonik akım ve gerilimlerinin oluşturduğu transformatör kayıpları frekansa bağlıdır. Manyetik çekirdekdeki alternatif manyetik alanın yön değiştirmesi, yüksek frekanslarda daha hızlı olduğundan manyetik çekirdekdeki histerezis kayıpları artar. Ayrıca zamanla değişen manyetik akı, iletkenleri kestikçe değişken manyetik alan çekirdek dilimlerinde fuko akımları oluşturur. Buda ek kayıplara neden olur. Yani frekans arttıkça transformatör kayıpları artar. Bu yüzden transformatörün ısınmasında yüksek frekanslı harmonikli bileşenler, düşük frekanslı harmonikli bileşenlerden daha önemlidir.

IEEE, transformatörün yük akımındaki harmonikler için bir limit saptamıştır. Buna göre akım için THD limiti %5' tir. Gerilim için ise yük durumuna göre bazı limitler saptanmıştır [12],

Yüksüz durumda %10
Anma yükünde %5' tir.

2.2.2 Döner makineler üzerine etkileri

Gerek gerilim gerekse akım harmonikleri döner makineler üzerinde olumsuz etkiler yapar. Bu etkilerden birincisi, ek (harmonik) kayıplardır. Harmoniklerin varlığı diğer elemanlarda olduğu gibi stator sargılarında, rotor devresinde, stator ve rotor saclarında ek kayıplara yol açar. Stator ve rotor uç sargılarında harmonik akımlarının oluşturduğu kaçak alanlarda ek kayıplar meydana getirir. Örneğin 16 kW' lık bir asenkron motoru 60 Hz temel frekanslı sinüzoidal gerilimle beslenirken oluşan toplam kayıp 1303 W iken, kare dalga ile bir besleme yapıldığında toplam kayıpların 1600 W' a çıktığı gözlenmektedir.

Harmoniklerin yol açtığı diğer bir olayda, harmonik momentleridir. Sinüzoidal olmayan gerilim uygulandığında motor veriminde ve momentinde bir düşüş olur. Harmoniklerin ortalama moment üzerindeki etkisi çoğu zaman ihmal edilebilir ancak önemli sayılabilecek moment salınımlarına yol açabilir.

Sinüs biçimli olmayan bir beslemeye sahip üç fazlı bir asenkron motorundaki harmonik akımlarının oluşturduğu akı yoğunluğu dalgaları arasındaki etkileşim gürültüye neden olabilir. Ayrıca harmoniklerin, hava aralığında bir bileşke akı üretmesi nedeni ile asenkron motoru kalkış yapamayabilir veya senkron altı hızlarda çalışabilir.

Çeşitli harmonik çiftleri (5. ve 7. gibi) motor-yük sisteminde veya türbin-generatör gruplarında mekanik salınımlara neden olurlar. Harmonik akımları ve temel frekans manyetik alanı arasındaki etkileşimin neden olduğu salınım momentleri bir mekanik rezonans frekansına uyduğu zaman mekanik salınımlar oluşur. Örneğin; 5. ve 7. harmonikler generatör rotorunda 6. harmonik frekansında sürekli bir bükülmeye neden olurlar. Eğer mekanik titreşimin frekansı elektriksel frekansa yakın olursa yüksek mekanik cevaplar oluşabilir.

2.2.3 İletim sistemleri üzerine etkileri

İletim sistemi (hava hattı veya yer altı kablosu) üzerindeki etkileri, iki bölüm altında incelemek mümkündür. Bunlardan birincisi akım bileşenlerinin oluşturduğu ek I^2R kayıplarıdır. Bu kayıplar;

$$P_K = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (2.3)$$

şeklinde verilebilir. Deri etkisi ihmal edilir ise $R_n \rightarrow R$ (hattın omik direnci) yazılabilir. Diğer taraftan harmonik akımların hat boyunca çeşitli devre elemanları üzerinde oluşturduğu gerilim düşümleri de ayrı bir etkidir. n. akım harmoniğinin oluşturduğu gerilim düşümü;

$$(\Delta V)_n = I_n Z_n \quad (2.4)$$

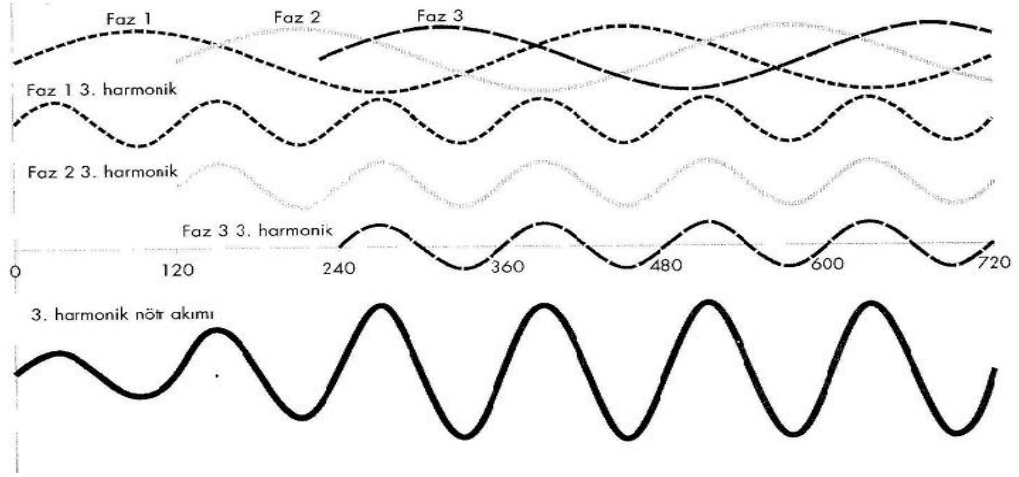
olarak yazılabilir.

Kablolu iletim durumunda harmonik gerilimler, tepe gerilim değeri ile orantılı olarak dielektrik zorlanmayı arttırmaları. Buda kablonun kullanım ömrünü kısaltır. Aynı zamanda arıza sayısını ve bu nedenle de onarım masraflarını arttırır. Aşırı gerilimler nedeni ile yalıtkan kablolarda delinme meydana gelebilir. Harmoniklerin korona başlangıç koruma ve sönme seviyeleri üzerindeki etkileri, gerilimin tepeden tepeye değerinin bir fonksiyonudur. Tepe gerilimi ise, temel ve harmonik gerilim arasındaki faz ilişkisine bağlıdır.

2.2.4 Nötr iletkenine etkileri

3 fazlı bir sistemde gerilim dalga şekli her bir fazdan nötr-yıldız noktasına 120 derecelik açı değişimi yapar ve her faz eşit olarak yüklendiğinde nötrdeki akım bileşkesi 0 olur. Fazlar dengeli olarak yüklenmediği takdirde nötrden sadece denge dışı kadar net akım geçer. Ancak şebeke akımlarının birbirini dengelemesine rağmen harmonik akımlar birbirini dengelememekte ve hatta temel harmoniğin 3 katının tek sayılı çarpanları olan harmonik akımlar ‘üçlü-N’ harmonikleri halinde nötrde birleşmektedir. Bu etki Şekil-2.17’ de görülmektedir. Diyagramın üst kısmındaki faz akımlarının aralıkları 120

derecedir. Her fazın 3. harmoniği, frekansın 3 katı ve bir periyodun üçte biri olacak şekilde birbirinin benzeridir. Etkin olan 3. harmonik, nötr akımı diyagramının en altında gösterilmiştir. Bu durumda, her fazdaki %70 3. harmonik akım nötrde %210 şeklinde bir akım olarak sonuçlanmaktadır.



Şekil 2.17 Nötrde birleşen üçlü N akımları

2.2.5 Kondansatör grupları üzerine etkileri

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

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

$$X_{Cn} = \frac{X_C}{n} \quad (2.5)$$

değerini alır, yani akımın frekansı büyüdükçe kapasitif reaktans küçülür. Bu nedenle, kondansatörler harmonik frekanslarında daha büyük akımlar çekerler ve aşırı yüklenirler. n . harmonik için U_n harmonik gerilimi altında kondansatörün çektiği akım;

$$I_n = n\omega CU_n \quad (2.6)$$

değerini alır. Burada, $\omega = \omega_1$ temel bileşen açısal frekansıdır. Kondansatör uçlarındaki gerilimin etkin değeri;

$$U_C = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \quad (2.7)$$

olur. Kondansatör akımının etkin değeri, aynı şekilde harmonik akımlarının karesel ortalamasına eşittir.

$$I_C = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (2.8)$$

Görüldüğü gibi bu akım, harmonikli gerilimin etkin değerine eşit bir sinüs biçimli gerilim altında kondansatörün çektiği akımdan büyüktür. Kompanzasyon tesislerinin tasarımında bu durumların göz önüne alınması gereklidir.

Gerilim bozulması durumunda kondansatörlerde oluşacak ek kayıplar;

$$\text{Ek kayıplar} = \sum_{n=2}^n C(\tan \delta)_n \omega_n V_n^2 \quad (2.9)$$

Olarak ifade edilir. Burada;

$(\tan \delta)_n$: kayıp faktörü

$\omega_n = 2\pi f_n$

V_n : n. harmoniğin etkin genliği

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

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad (2.10)$$

olarak verilir. Toplam reaktif güç ifadesi, reaktif gücün anma değerini aşmamalıdır. TS EN 60931-1' e göre sinüs biçimli gerilim altında anma etkin gerilimi için %110, anma etkin akımı için ise %130 olarak sınır değer konmuştur [13].

Kondansatör karakteristikleriyle ilgili standartlar, sinüs biçimli olmayan bir dalga uygulandığında, güvenilir bir işletme amacıyla aşılmaması gereken sınırlamaları içerir. IEEE standartlarına göre, kondansatör için gerilim, akım ve reaktif güç sınırlamaları şöyledir [13]:

Anma etkin gerilimi : %10

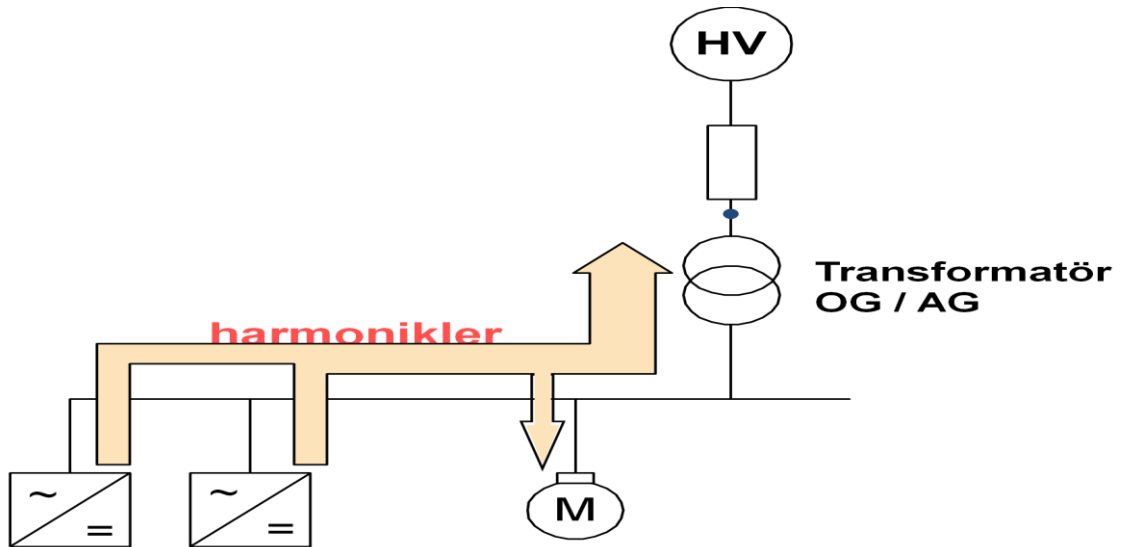
Anma etkin akımı : %180

Anma reaktif gücü : %135

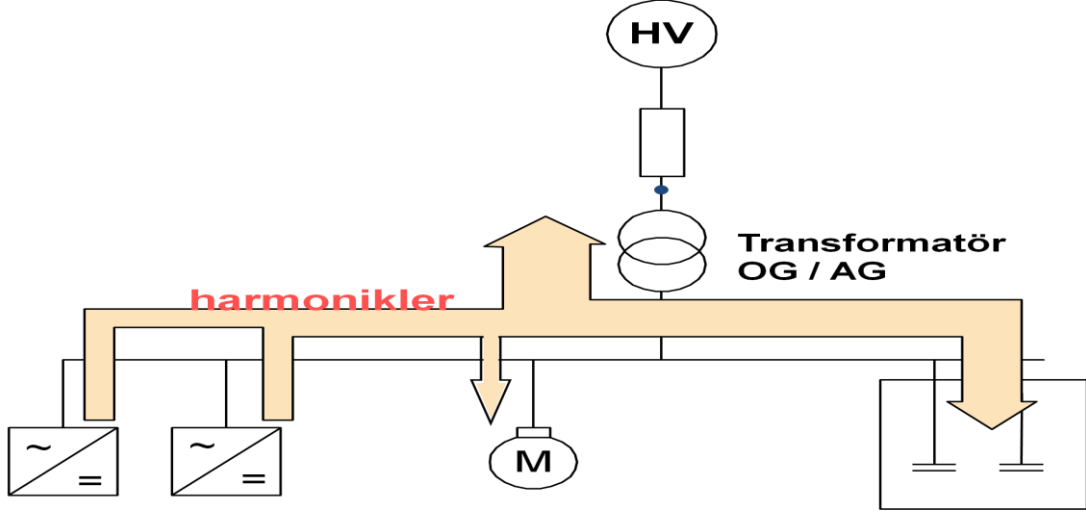
Tepe gerilimi : %120

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

Daha önce açıklandığı gibi, genelde tüm harmonik problemleri öncelikle paralel bağlı kondansatör gruplarında ortaya çıkar. Rezonans olayları sonucunda oluşan aşırı gerilim ve akımlar, kondansatörde ısınmayı ve gerilim zorlanmalarını arttırarak ömürlerini kısaltırlar.



Şekil 2.18 Kondansatörsüz bir tesisin harmonik akışı



Şekil 2.19 Kondansatörlü bir tesisin harmonik akışı

Yukarıdaki Şekil 2.18 ve 2.19' larda da görüleceği üzere tesislerdeki kondansatörler harmonikleri arttırıcı yönde hareket etmektedir.

2.2.6 Güç elektroniği elemanları üzerine etkileri

Güç elektroniği elemanları birçok durumda çok önemli bir harmonik kaynağı olmalarının yanı sıra, harmonik bozulmaya karşı çok duyarlıdır. Bu elemanların düzenli çalışmaları gerilimin sıfır geçişlerinin doğru belirlenmesine bağlıdır. Sıfır geçiş noktası birçok elektronik kontrol devresi için kritik noktalar. Harmonik bozulmasının bu noktaları kaydırması sonucu oluşan komütasyon hataları, elemanın çalışmasını olumsuz yönde etkiler.

Ayrıca, gerilimin tepe değerine göre cevap vererek çalışan elemanlarda da sorunlar çıkabilir. Buna en güzel örnek diyottur. Eleman, dalga şeklinin etkin değerine tam olarak karşılık gelmeyen tepe değerine karşı duyarlı olduğundan, harmoniklerin varlığında düzenli çalışmayabilir. Güç elektroniği cihazlarına ait diğer arızaları şöyle sıralayabiliriz;

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

2.2.7 Koruyucu sistemler (röleler) üzerine etkileri

Bilindiği gibi koruyucu sistemler çoğunlukla temel gerilim ve akımlara göre tasarlanırlar. Tepe gerilimine, akım veya gerilimin sıfır geçişlerine göre çalışan röleler, harmonik distorsiyonundan çeşitli biçimlerde etkilenirler. Olabilecek harmoniklerin süzüldüğü veya ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilirse, elektromanyetik röle uygulamalarında (aşırı akım koruması gibi) yüksek harmoniklerin çok fazla etkinliğinin olmadığı söylenebilir. Ancak özellikle mesafe korumalarında, harmonik akımları (özellikle 3. harmonik bileşeni) büyük oranda ölçme değerlendirme hatalarına ve toprak rölelerinin hata yapmasına neden olabilmektedir. Dijital mesafe koruma sistemlerinde, akım ve gerilim harmoniklerinin mutlaka filtre edilmesi gerekmektedir [5]. Rölelerin harmoniklerden başlıca etkileniş biçimleri şunlardır;

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

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

2.2.8 Küçük güçlü elektrik tüketicileri üzerindeki etkileri

Bu etkiler şu şekilde özetlenebilir;

- i. Gerilim harmonikleri, TV cihazlarının görüntü kalitesinin bozabilir.
- ii. Flüoresan ve cıva buharlı lambalarla yapılan aydınlatmada, balastın yanı sıra kondansatörlerde kullanılır. Devrenin endüktansı ile kondansatörler bir rezonans devresi oluşturabilir. Eğer harmonik frekansı bu devrenin rezonans frekansına eşit olur ise ısınma ve arızalar oluşur. Flüoresan lambaların kullanıldığı aydınlatma tertibatında yaşlanma etkileri görülür.
- iii. Bilgisayarlar, elektrikli cihazlar içinde harmonikle en duyarlı cihazlardır. Ayrıca kendileri de harmonik üretirler.

2.2.9 Ölçme aygıtları üzerine etkileri

Ölçü aletleri, başlangıçta tam sinüzoidal işaretlere göre kalibre edilirler. Gerilimin karesi ile orantılı döndürme momentine göre ölçüm yapan sayaçlarda, gerilim harmoniklerinin oluşması bazı kayıt hatalarına yol açacaktır. Şebeke frekansından başka frekanslardaki enerjileri okumak için tasarlanmayan konvansiyonel sayaçların harmoniklerin varlığında daha yüksek değerler okuyabildikleri görülmüştür. Ancak gelişmiş elektronik sayaçlar bozulmuş dalga şekillerini hassasiyetle okuyabilmektedirler.

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

2.3 Harmonik Büyüklüklere Ait Tanımlar

Sinüzoidal olmayan büyüklüklerin güç sistemine olumsuz etkilerinin giderilmesi ve güç kalitesinin iyileştirilmesi bakımından harmoniklerin analizi ve harmonik büyüklüklerin seviyesinin belirlenmesine gerek vardır.

Genellikle, güç sistem çalışmaları için tanımlanan elektrik büyüklükleri, Sinüzoidal sürekli hal işletim sistemleri için tanımlanmıştır. Ancak, lineer olmayan elemanlardan dolayı harmonikler söz konusu olduğunda, bu elektrik büyüklüklerinin yeniden tanımlanmasına ihtiyaç vardır [2, 3].

2.3.1 Sinüzoidal olmayan durumda elektrik büyüklükleri

Güç sisteminde harmonik bileşenleri bulunan, gerilim ve akımın zamana bağlı ifadeleri Fourier serileri ile aşağıdaki biçimde ifade edilebilir:

$$V_{(t)} = \sum_{n=1}^{\infty} V_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n) \quad (2.11)$$

$$i_{(t)} = \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} i_n \sin(n\omega_1 t + \delta_n) \quad (2.12)$$

Burada $V_n(t)$ ve $i_n(t)$, n. harmonik geriliminin ve akımının ani değerleri olup, DC terimler basitleştirme amacıyla ihmal edilmiştir. V_n ve I_n sırasıyla, n. harmonik mertebesi için gerilim ve akımın efektif değerleridir. ω_1 ise temel frekansa (f_1) ait açısal frekanstır. θ_n ile δ_n ise sırasıyla n. harmonik için gerilim ve akıma ait faz açılarıdır.

Ani güç;

$$P(t) = V(t)i(t) \quad (2.13)$$

olarak ifade edilir ve $p(t)$ 'nin bir periyot boyunca ortalama değeri;

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t).dt \quad (2.14)$$

olarak verilir. Yukarıdaki eşitliklerden aktif güç,

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\theta_n - \delta_n) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \quad (2.15)$$

olarak elde edilir. Harmonikler tarafından üretilen aktif güç genellikle, temel aktif güce oranla çok küçüktür. Ortogonal özellikler uygulandığında, 2.11 ve 2.12 eşitliklerinde verilen harmonikli gerilim ve harmonikli akımın efektif değerleri sırasıyla,

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (2.16)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (2.17)$$

olarak bulunur. Harmonikli ortamda görünür gücün genliği,

$$S = V.I \quad (2.18)$$

şeklindedir ve yaygın bir şekilde kabul edilen tanımı ise,

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (2.19)$$

biçimindedir. Burada D, distorsiyon gücüdür. Distorsiyon gücü aktif olmayan bir güç olup Sinüzoidal işaretli lineer devrelerde sıfırdır.

2.3.2 Toplam harmonik distorsiyonu (THD)

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

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (2.20)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.21)$$

ifadelerinden yararlanılarak bulunur. Görüldüğü gibi THD, harmonik bileşenlerin efektif değerlerinin, temel bileşen efektif değerine oranıdır ve genellikle yüzde olarak ifade edilir. Bu değer, harmonik içeren periyodik dalga şeklinin, tam bir sinüs dalga şeklinden sapmasının tespitinde kullanılır. Sadece temel frekanstan oluşan tam bir sinüs dalga şekli için THD sıfırdır [5].

Toplam harmonik distorsiyonunun diğer ifadeleri şöyledir.

$$THD = \frac{\sqrt{V^2 - V_1^2}}{V_1} \quad (2.22)$$

Benzer şekilde n. harmonik mertebesindeki gerilim ve akım için tekil harmonik distorsiyonları sırası ile,

$$HD_V = \frac{V_n}{V_1} \quad \text{ve} \quad HD_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (2.23)$$

olarak tanımlanır.

2.3.3 Toplam talep distorsiyonu (TTD)

Toplam talep distorsiyonu, bir yüke ait değer olup toplam harmonik akım bileşenleri cinsinden aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (2.24)$$

Burada, I_L yük tarafından, besleme sisteminin ortak bağlantı noktasından çekilen, temel frekanslı maksimum akımdır. Bir yıl öncesinden başlanarak hesaplamanın yapılacağı ana kadar olan süre zarfında yük tarafından talep edilen maksimum akımların ortalaması olarak hesaplanır.

2.3.4 Tepe (crest) faktörü

Bu faktör, sinüzoidal olmayan akım veya gerilimin tepe değeri ile temel bileşenin efektif değeri arasında tanımlanır. Harmonik bileşenlerin en basit bir biçimde ortaya konmasını sağlayan bu faktör,

$$\text{Tepe Faktörü} = \text{Tepe Değer} / \text{Temel Bileşenin Efektif Değeri} \quad (2.25)$$

eşitliği ile hesaplanır. Sinüzoidal bir dalga için bu değer $\sqrt{2}$ 'dir.

2.3.5 Transformatör K – faktörü

Transformatör K-faktörü, harmonik akımlar mevcut olduğu zaman standart transformatörlerin yüklenme kapasitesindeki azalma miktarlarını hesaplamak için kullanılan bir kavramdır. Transformatörlerin lineer olmayan yükleri beslemesi sonucu transformatör üzerinden akan yük akımı, harmonik bileşenleri içerir. K-Faktörü, anma gerilimi veya anma gücü gibi transformatörler için imalatçısı tarafından belirlenmiş bir anma büyüklüğü olup anma gücü 500kVA'nın altındaki transformatörler için tanımlanmıştır [5].

Lineer olmayan yükleri besleyen bir transformatör için K-Faktörü,

$$K = \sum_{n=1} (n \frac{I_n}{I_1})^2 \quad (2.26)$$

olarak tanımlanır. Transformatörün efektif akımına göre normlaştırıldığında, K-Faktör değeri,

$$K = \frac{\sum_{n=1} (nI_n)^2}{\sum_{n=1} I_n^2} = \frac{\sum_{n=1} (nI_n)^2}{I^2} = \frac{\sum_{n=1} (n \frac{I_n}{I_1})^2}{(\frac{I}{I_1})^2} = \frac{\sum_{n=1} (n \frac{I_n}{I_1})^2}{1 + THD_i^2} \quad (2.27)$$

şeklini alır. Burada, I, efektif akımı, I_n , n. harmonik bileşen akımını belirtmektedir.

Standart transformatörün anma değerindeki düşümünün hesaplanmasında,

IEEE C57.110-1986'da [14]

$$D = \frac{1,15}{1+0,15K} \quad (2.28)$$

eşitliği verilmiştir. Burada D, transformatör gücündeki azalmayı belirtmektedir. Yani, harmonikli akımla yüklenen transformatörün verebileceği en büyük güç değeri,

$$S_H = DS_N \quad (2.29)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada S_N, transformatörün nominal gücüdür.

2.3.6 Distorsiyon güç faktörü

Gerilim ve akım, harmonikler içerdiğinde efektif değerleri şu şekilde de ifade edilebilir:

$$V = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100} \right)^2} \quad (2.30)$$

$$I = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100} \right)^2} \quad (2.31)$$

Aynı biçimde toplam güç faktörü, gerilim ve akımın toplam harmonik distorsiyonu değerleriyle,

$$Pf_{toplam} = \frac{P}{V_1 I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100} \right)^2}} \quad (2.32)$$

olarak ifade edilir. Bu eşitlik aynı zamanda,

$$Pf_{toplam} = \cos(\theta_1 - \delta_1) Pf_{dist} \quad (2.33)$$

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 şu şekilde olacaktır.

$$Pf_{toplam} \leq Pf_{dist} \quad (2.34)$$

Görüldüğü gibi, yüksek akım distorsiyonlu tek faz lineer 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, lineer olmayan yükler tarafından üretilen harmonikleri yok etmek için pasif ve aktif filtreler kullanmaktır.

2.3.7 Telefon etkileşim faktörü (TEF)

Telefon etkileşim faktörü, elektrik enerji sistemindeki harmonik akım ve gerilimlerden kaynaklanan telefon gürültü değerinin tayin edilmesine yarayan bir büyüklüktür. TEF değeri telefon sisteminin ve insan kulağının değişik frekanslardaki gürültüye olan duyarlılığına dayalı olarak ayarlanır. Söz konusu bu büyüklük gerilim ve akım için matematiksel olarak;

$$TEF_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (W_n V_n)^2}}{V_{ef}}, \quad TEF_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (W_n I_n)^2}}{I_{ef}} \quad (2.35)$$

bağıntıları ile hesaplanır. Burada W_n , n' inci mertebeden harmonik frekansı için işitsel ve endükif kuplaj etkisini hesaplara dahil eden bir katsayıdır.

BÖLÜM III

ELEKTRİK DAĞITIM ŞEBEKELERİ

Bu bölümde; dağıtım sistemlerinin temel yapılanmalarını ve organize oluş şekillerinden, aynı zamanda Niğde Merkez Elektrik Dağıtım Şebekesinin temel özelliklerden bahsedilecektir.

3.1 Dağıtım Şebekelerindeki Temel Yapılanmalar

3.1.1 İndirici trafo merkezleri (TM)

Elektrik iletim hatlarının son noktası olarak çalışırlar. İndirici trafo merkezleri basit olarak; enerji iletim hatları ile iletilen 154 ve 380 kV' luk gerilimlerin 6,3-15,8-31,5-36 kV a indirildiği yerlerdir. Genelde şehir girişlerine kurulmuş olan ve diğer adı şalt sahası olarak adlandırılan indirici merkezler, Dağıtım Şirketlerinin talebi doğrultusunda 10-12,5-25-50-100 MVA gibi güçleri olan transformatörler ile TEİAŞ tarafından tesis edilirler. Bu indirici merkezlerdeki fider çıkışları kesicili hücrelerle yapılır. Fiderlerde oluşabilecek arızalara karşı teçhizatı korumak amacıyla röleler vasıtasıyla kesiciler açtırılarak koruma yapılır. Enerji; kesicili fider çıkış hücrelerinden havai hatlı veya yer altı kablolu olarak; ring sistemlerinde Dağıtım Merkezlerine veya radyal olarak Dağıtım Trafolarına aktarılır.

3.1.2 Dağıtım merkezleri (DM)

Ring sistemli dağıtım sistemlerinde, indirici trafo merkezlerinden gelen orta gerilimi (genelde 6,3-15,8-31,5-36 kV) dağıtım trafolarına aktarırlar. Dağıtım Trafolarında veya dağıtım hatlarında meydana gelebilecek arızaları en kısa sürede kesebilmek ve enerji kesintisini ve bundan etkilenecek olan teçhizat sayısını minimize etmek maksadıyla kurulurlar. Genelde 40 kadar dağıtım trafosunu beslerler.

3.1.3 Dağıtım hatları

TM-DM, TM-TR, DM-DM, DM-TR irtibatlarını sağlayan orta gerilim hatlarıdır. Ring sistemlerinde genelde TM-DM bağlantıları ve DM-DM bağlantıları çelik özlü alüminyum iletkenlerden 477 MCM (Hawk) iletkeni ile havai hatlı veya 240 mm² kesitli XLPE kablolar ile yer altı kablolu olarak yapılmaktadır. Beslediği DM sayısına göre devre sayısı belirlenir. TM-TR ve DM-TR bağlantıları ise genelde çelik özlü alüminyum iletkenlerden 3AWG (swallow), 1/0 AWG (Raven), 3/0 AWG (Pigeon) iletkenleri ile havai hatlı veya 35, 50, 95 mm² kesitli XLPE kablolar ile yer altı kablolu olarak yapılmaktadır.

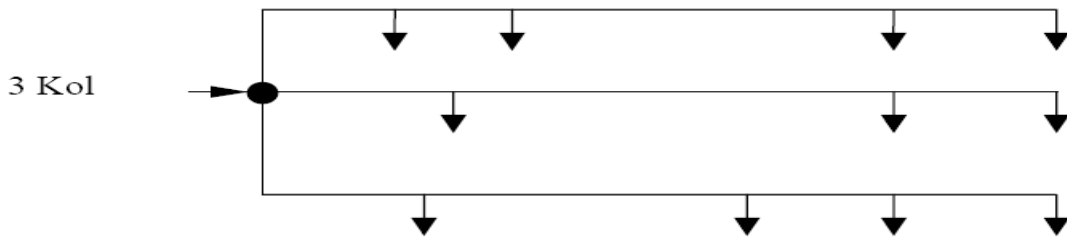
3.1.4 Dağıtım trafo merkezleri (TR)

Dağıtım Hatları ile DM'lerden veya TM'lerden gelen orta gerilim, Dağıtım Trafoları vasıtası ile alçak gerilime dönüştürülerek abonelerin kullanabileceği voltaj seviyesine düşürülür. Enerji, dağıtım trafolarından abonelere; havai hatlı olarak tam alüminyum iletkenli (rose, lily, pansy, popy, aster, phlox, oxlip) veya yer altı kablolu NYY kablolar (3x95+50 mm², 3x120+70 mm², 3x150+70 mm² vb.) vasıtası ile taşınır.

3.2 Elektrik Dağıtım Şebeke Çeşitleri

3.2.1 Düz şebeke

Bir elektrik hattının, başlangıç noktasından hat sonuna kadar ayırım alınmaksızın devam ettiği ve yüklerin yalnız hat sonu veya doğrudan hat üzerinde bulunduğu şebeke tipi, düz şebeke olarak tanımlanabilir.

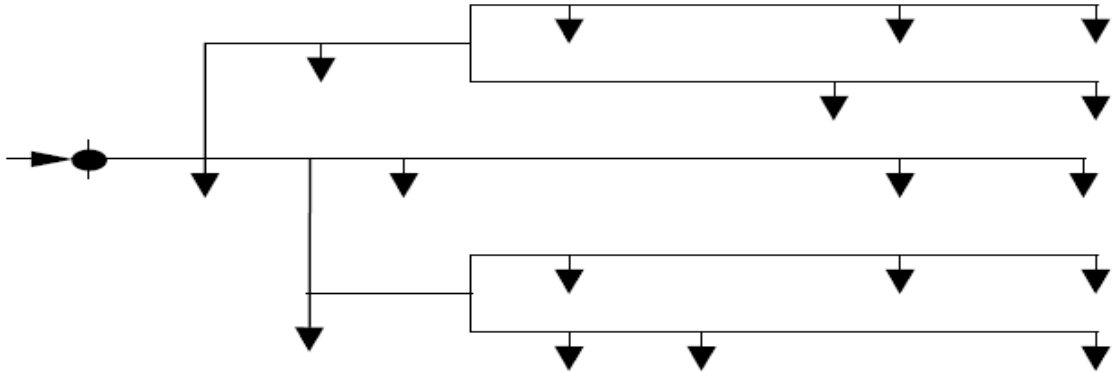


Şekil 3.1 3 Kollu düz şebeke

Düz şebekede, yükler hat üzerinde birçok noktada eşit aralıklarla bağlıysa bu tip şebeke, düzgün yayılı yüklü düz şebeke olarak tanımlanır. Besleme noktasından her biri düz şebeke olan birçok kol çıkarsa bu kolların oluşturduğu şebeke kol şebeke olarak isimlendirilir. Şekil 3.1' de 3 kollu örnek bir düz şebeke modeli görülmektedir.

3.2.2 Radyal şebeke

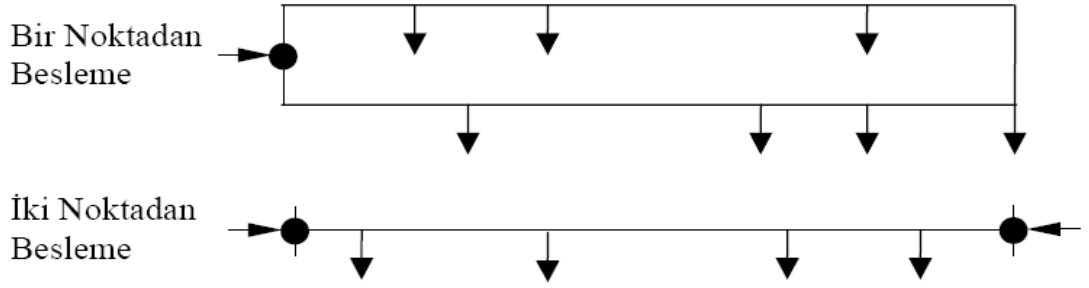
Genişçe ağlanmış iletim sistemlerinin aksine, dağıtım sistemleri daha çok radyaldır. Radyal bir sistemde yük akışı tek bir yöne doğrudur. Bundan anlaşılan çok yüklü fiderler tek bir güç kaynağıyla çalışır. Herhangi bir yerde çıkacak hata arızası dağıtımın olduğu tüm müşterilerde bir kesinti oluşturur. Bu konfigürasyon birçok bileşenden oluştuğundan dolayı güvenilir olmamasına rağmen, ekonomik olduğundan tercih edilmektedir. Koruma koordinasyonu bu tür sistemlerde daha basittir. Şekil 3.2' de örnek bir radyal şebeke modeli görülmektedir.



Şekil 3.2 Radyal şebeke

3.2.3 Gözlü şebeke

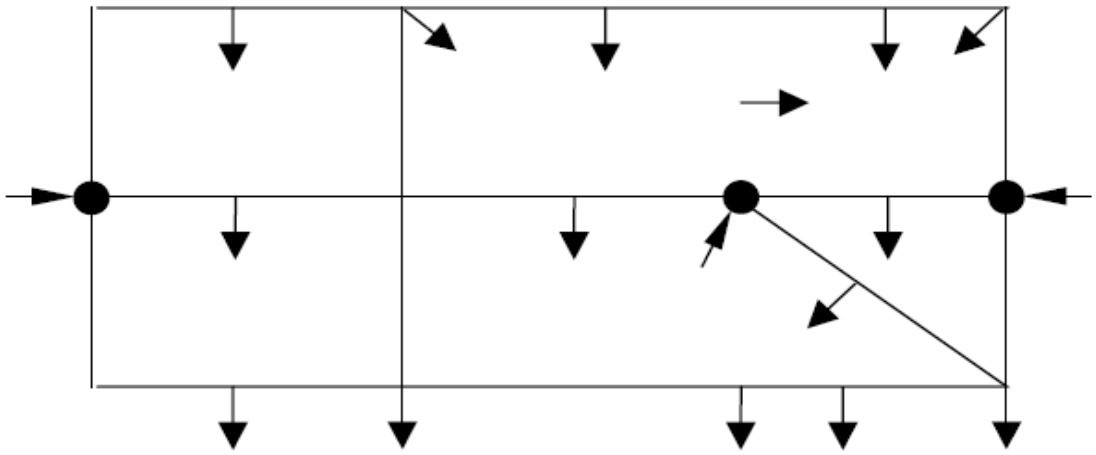
İki kol şebekenin hat sonunda birbirine bağlanarak göz oluşturduğu şebeke tipi göz şebekedir. Bu tip şebekelerde paralel kollar son noktalarında birbirlerine bağlanarak birçok göz oluşturabilirler. Gözlü şebekede tek taraflı besleme yapılabildiği gibi iki taraftan da besleme yapılabilir. Şekil 3.3' de örnek bir gözlü şebeke modeli görülmektedir.



Şekil 3.3 Gözlü şebeke

3.2.4 Ağ şebeke

Hastaneler ve fabrikalar gibi organizasyonlar, daha yüksek seviyede güvenilirlik gerektirirler. Uygulamadaki herhangi bir hata çok büyük risk taşır. Daha yüksek seviyede güvenilirlik için sistem içinde yedek sistem kurulur. Bahsettiğimiz bu fazlalık ağ olarak tanımlanır ve düğüm şeklindedir. Bu sistemlerde yük noktaları birçok kaynak noktasına bağlıdır fakat herhangi bir anda; sadece tek bir kaynak tüm yükü besler. Herhangi bir arıza esnasında kesiciler vasıtası ile arıza giderilir. Bu ağlar diğerlerine göre daha karmaşıktır ve büyük yoğunluktadır. Aşırı kritik yükler için, bu tip çok kaynaklı ve fiderli sistem kombinasyonu kullanılır. Şekil 3.4' de 2 ayrı kaynaktan beslenebilen örnek bir ağ şebeke modeli görülmektedir.



Şekil 3.4 Ağ şebeke

3.3 Niğde Merkez Elektrik Dağıtım Şebekesinin Genel Karakteristikleri

3.3.1 Gerilim seviyeleri

Niğde ili elektrik dağıtım sisteminde 15,8 kV ve 31,5 kV Orta Gerilim kullanılmaktadır.

3.3.2 Trafo Merkezleri

Niğde genelinde 4 adet 154/36 kV indirici trafo merkezi olup, bunlar Niğde Merkez TM, Bor TM, Misliova TM ve Organize Sanayi Bölgesi (OSB) TM dir. Ayrıca Ulukışla ilçesine; Ereğli TM ve Pozantı TM den enerji alınmaktadır. Niğde Merkez TM : 25+50 MVA, Bor TM: 25+50 MVA , Misliova TM: 50+100 MVA, OSB TM: 50+50 MVA gücündedir. İl genelinde tarımsal sulama amaçlı trafolu tesisler yoğun olduğundan, kış mevsiminde Niğde Merkez TM nin 25 MVA trafosu ve Misliova TM nin 100 MVA trafoları devre dışı bırakılmaktadır. Niğde OSB Bölgesi şüana kadar BOR TM den beslenmekte iken, OSB TM nin yeni devreye alınmış olması ile yük bu TM ye aktarılacak ve BOR TM nin gücü 50 MVA ya düşecektir. OSB TM’ de ilk etapta 50 MVA lık trafo devreye alınmış olup ileride olabilecek yük taleplerinin karşılanması amacıyla 100 MVA ya göre tasarlanmıştır.

Niğde Merkezde, 3 adet hem Dağıtım Merkezi olarak hem de 36 kV u 15,8 kV gerilime indiren indirici trafo merkezleri vardır. Bu trafo merkezlerinin güçleri DM1: 10 MVA, DM2: 10+10 MVA, DM3: 5+5 MVA gücündedir. Şekil 3.5 de Niğde Merkez TM ve bu DM’ lere ait tek hat şeması görülmektedir.

Çizelge 3.1’ den görüldüğü üzere, dağıtım şirketinin kendine ait genel aydınlatma amaçlı (sulama aboneleri hariç AG abonelerine enerji sağlamak amacı ile kurulmuş olan) kullanılmak üzere tesis edilmiş toplam 1014 adet trafosu olup, 121 MVA kurulu gücündedir.

Çizelge 3.1 İlçe bazında aydınlatma amaçlı toplam trafo sayıları

GÜÇ (KVA)	GERİLİM 15,8 kV		GERİLİM 31,5 kV						TOPLAM
	MERKEZ	BOR	MERKEZ	BOR	ÇİFTLİK	ÇAMARDI	ULUKIŞLA	A.HİSAR	
40			1				2	1	4
50	5	3	6	6	5	11	26	2	64
63	4		1	3	1	3	5		17
80									0
100	26	17	66	48	31	33	45	18	284
125	3		1						4
160	45	12	56	22	17	11	25	17	205
250	55	13	69	38	15	6	16	13	225
315									0
400	37	25	18	19	2	1	4		106
630	11	3	7	1				1	23
800			1						1
1000	6		1	5					12
1250	1								1
1600			1						1
BOŞ	1	3	12	28	5	3	15		67
TOPLAM TRAFO SAYISI	194	76	240	170	76	68	138	52	1014
TOPLAM GÜÇ (KVA)	53407	18910	46748	31539	10683	7699	15795	8540	121004

Çizelge 3.2 görüldüğü üzere aydınlatma amaçlı trafolar haricinde, sulama ağırlıklı toplam trafo sayısı 3388 adet olup toplam kurulu gücü 482 MVA gücündedir.

İl genelindeki İndirici Trafo Merkezlerinde, toplam $75+75+150+50=350$ MVA lık kurulu güç olduğu hatırlanırsa, Dağıtım Trafolarının toplam $121+482=600$ MVA lık bir kurulu gücü olduğu ve İndirici Trafoların, Dağıtım Trafolarına oranı (talep oranı) %58,33 hatta OSB deki 50 MVA lık Trafonun 2010 yılı başlarında devreye alındığı da göz önünde tutulursa bu oran %50 ye kadar düşmektedir. Ayrıca TEİAŞ tan 2009 yılı itibarıyla 748.488.346 kWh enerji satın alınmıştır.

Çizelge 3.2 Diğer abone grupları bazında toplam trafo sayıları

TRAFO GÜCÜ (KVA)	İÇME SUYU	SANAYİİ VE TİCARETHANE	3. ŞAHİS SULAMA TRAFOSU	KURUM SULAMA TRAFOSU	TOPRAK SU	TOPLAM TRAFO SAYISI
25		22	6			28
40	3	8	4	4	59	78
50	73	74	463	4	53	667
63	3		17	2	67	89
80		1	1	2	50	54
100	17	49	1266	31	59	1422
160	6	40	343	172	16	577
250	2	61	140	109	1	313
400		74	8	13		95
630		11				11
800		8				8
1000		15				15
1250		3				3
1600		12				12
2000		13				13
2500		3				3
TOPLAM TRAFO SAYISI	104	394	2248	337	305	3388
TOPLAM GÜÇ(KVA)	7119	145580	244291	63716	21941	482647

BÖLÜM IV

NİĞDE İL MERKEZİ ELEKTRİK DAĞITIM ŞEBEKESİNDE YAPILAN ÖLÇÜMLER

Bu bölümde, Niğde Merkez Elektrik Dağıtım Sisteminde bulunan TR-2/9 ve TR-2/10 trafolarının tek hat şemaları ve yük cinsleri hakkında kısaca bilgi verilerek, yapılan harmonik ölçümlerinin sonuçlarına yer verilmiştir.

Ölçümler Şekil 4.1' de görülen ENTES marka MPR63 Enerji Analizörü ile yapılmıştır.



Şekil 4.1 Ölçüm yapılan Enerji Analizörü fotoğrafı

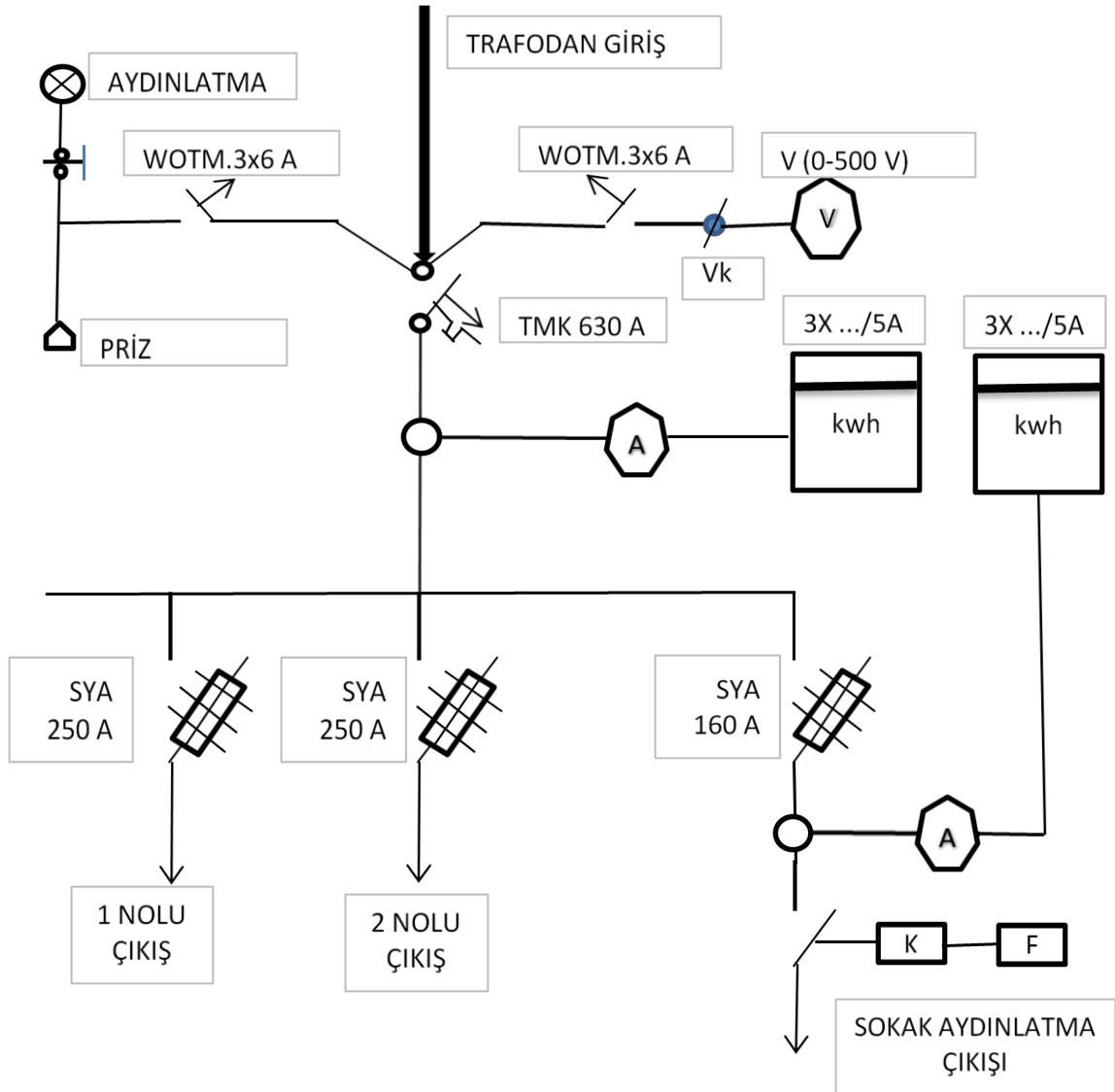
Cihazın Teknik Özellikleri [15]:

- Faz gerilimleri ölçümü
- Frekans ölçümü
- Faz akımları ölçümü
- Aktif, reaktif, görünür güç ölçümü
- Güç katsayısı $\cos\phi$ ölçümü

- Güç faktörü ölçümü
- Akım ve gerilim harmonikleri ölçümü

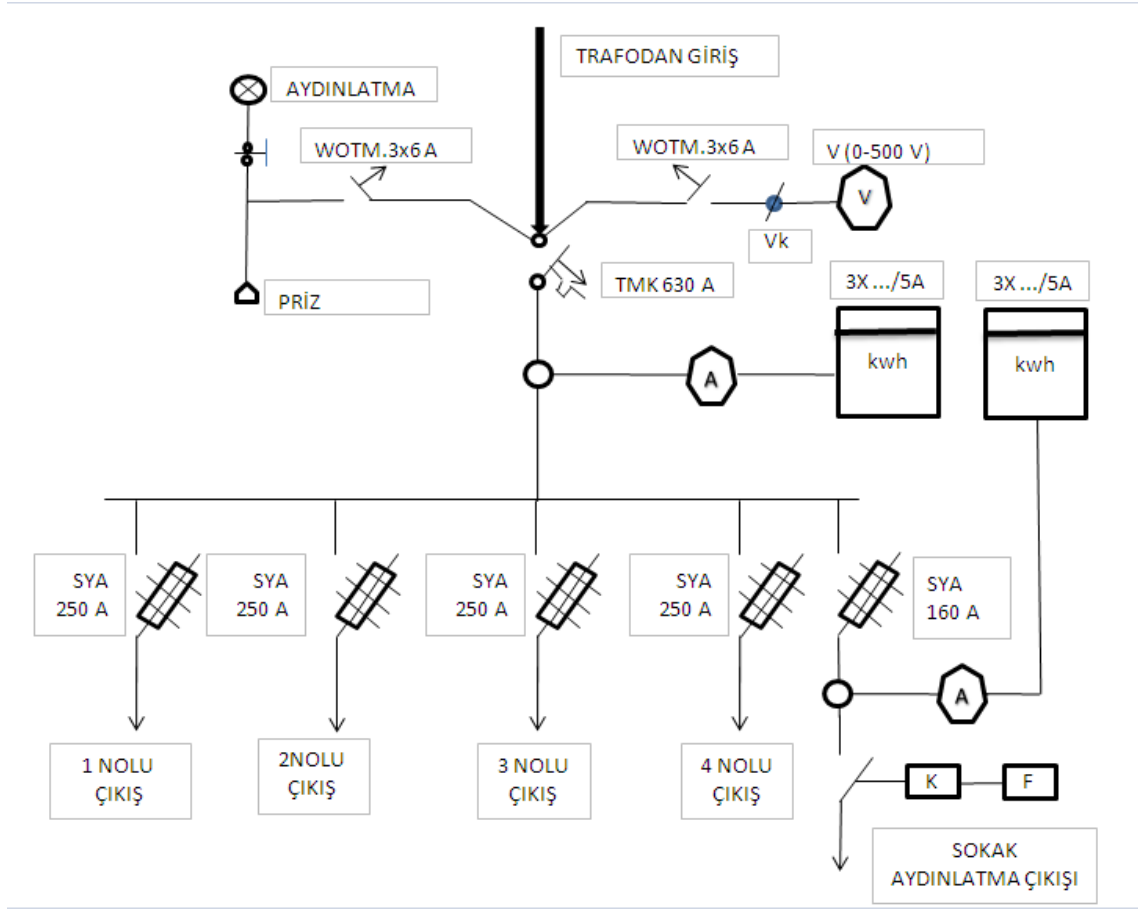
4.1 Ölçüm Yapılan Trafo Merkezlerinin Tek Hat Şemaları

4.1.1 TR-2/9 (eski sanayi bölgesi) trafosu tek hat şeması



Şekil 4.2 TR-2/9 Trafosu tek hat şeması

4.1.2 TR-2/10 (Çıraklık okulu bölgesi) Trafosu tek hat şeması



Şekil 4.3 TR-2/10 Trafosu tek hat şeması

4.2 Ölçüm Yapılan Trafo Merkezlerinin Genel Karakteristiği

4.2.1 TR-2/9 Trafosu genel karakteristiği

Bu trafo merkezi Şekil 3.5' ten de görüldüğü üzere Niğde TM çıkışlı 2x(3x477MCM) Çevre Ringine bağlı DM 2 Dağıtım Merkezinden (36/15,8 kV İndirici Merkez olarak ta kullanılmaktadır) çıkan 15,8 kV luk 3x95+16 mm² XLPE kablolu fiderden beslenmektedir. Trafonun gücü 400 KVA (%U_k=4,68) olup, Genleşme Depolu Dahili Tip trafodur. Trafo ile AG Dağıtım Panosu arası 40x5 bakır bara ile irtibatlandırılmıştır. Şekil 4.2' de de görüldüğü üzere dağıtım panosunda 4 adet besleme ve 1 adet sokak aydınlatma çıkışı olup bunlardan 2 adet besleme ve sokak aydınlatma çıkışı kullanılmaktadır. Bu trafonun beslediği bölgede yoğun olarak oto tamircileri bulunmaktadır.

4.2.2 TR-2/10 Trafosu genel karakteristiği

Bu trafo merkezi Şekil 3.5' ten de görüldüğü üzere Niğde TM çıkışlı 2x(3x477MCM) Çevre Ringine bağlı DM 2 Dağıtım Merkezinden (36/15,8 kV İndirici Merkez olarak ta kullanılmaktadır) çıkan 15,8 kV luk 3x95+16 mm² XLPE kablolu fiderden beslenmektedir. Trafonun gücü 400 KVA (%U_k=4,85) olup, Genleşme Depolu Dahili Tip trafodur. Trafo ile AG Dağıtım Panosu arası 2x(3x150+70 mm²) NYY kablo ile irtibatlandırılmıştır. Şekil 4.3' de de görüldüğü üzere dağıtım panosunda 4 adet besleme ve 1 adet sokak aydınlatma çıkışı olup tamamı kullanılmaktadır. Bu trafonun beslediği bölgede; demir atölyeleri ve oto tamircileri yoğun olarak, 1 adet camii, 1 adet okul, 2 adet petrol istasyonu ve 10 kadar mesken bulunmaktadır.

4.3 Ölçüm Sonuçları

4.3.1 TR-2/9 Trafosu ölçüm sonucu

Bu Trafo Bölgesinde 2 Adet AG Çıkışı mevcut olup bu çıkışlar ayrı ayrı ölçülmüştür.

4.3.1.1 1 nolu çıkış ölçüm sonuçları

Çizelge 4.1' den görüldüğü üzere ortalama 48 kW civarında aktif yük olduğu, yine ortalama 17,5 kVAR kadar reaktif güç çekildiği, ancak fazların dengesiz olarak yüklendiği, akımda ortalama %13,5 gibi bir harmonik bozulmanın olduğu, gerilimde önemli bir harmonik bozulmanın olmadığı ve gerilim seviyesinin “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkındaki Yönetmelik” [16]' te izin verilen değerler arasında kalmış olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1 TR-2/9 trafosu 1 nolu çıkış ölçüm verileri

Tarih	Saat	VLN1 (V)	VLN2 (V)	VLN3 (V)	ILN1 (A)	ILN2 (A)	ILN3 (A)	TOTALI (A)	W1 (W)	W2 (W)	W3 (W)
21.01.2010	15:17:17	242.7	243	242.5	77	58	76	73	17000	13000	17000
21.01.2010	15:17:18	242.7	243	242.5	77	59	77	73	17000	14000	17000

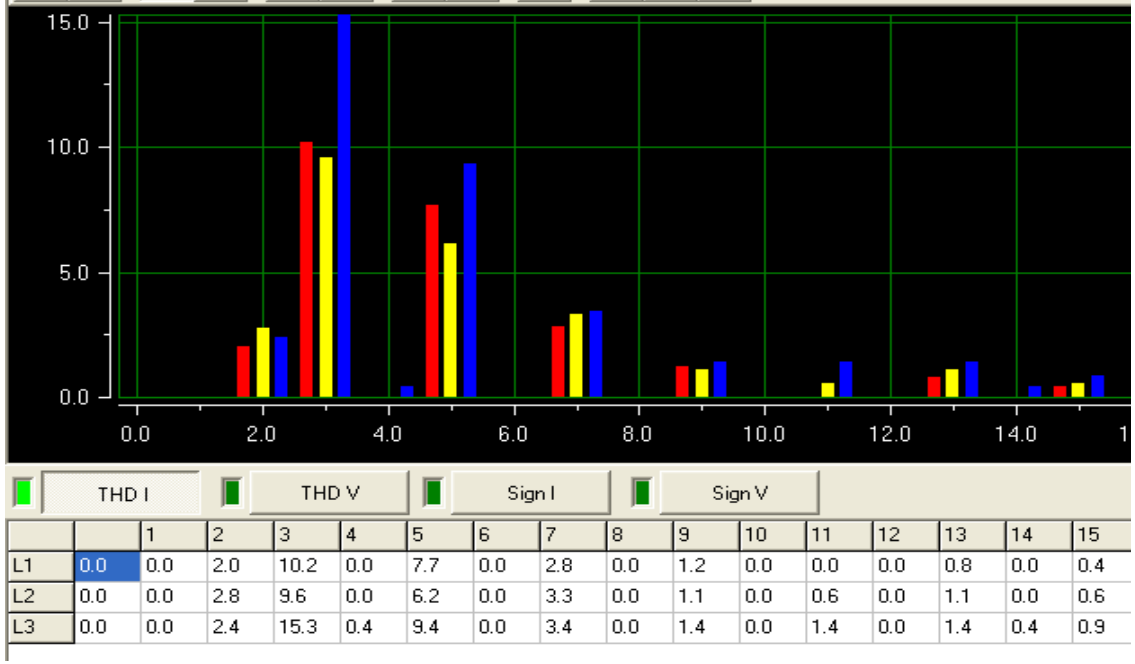
21.01.2010	15:17:19	242.7	242.9	242.4	77	58	77	74	17000	13000	17000
21.01.2010	15:17:20	242.8	243.1	242.6	77	58	76	73	17000	13000	17000
21.01.2010	15:17:21	242.7	243.1	242.6	77	58	76	73	17000	13000	17000
21.01.2010	15:17:22	242.8	243.1	242.7	77	58	76	73	17000	13000	17000
21.01.2010	15:17:23	242.9	243.3	242.7	77	58	84	75	17000	13000	19000
21.01.2010	15:17:24	242.7	243.2	242.6	77	58	83	76	17000	13000	19000
VAr1 (VAr)	VAr2 (VAr)	VAr3 (VAr)	THD- V 1 (%)	THD- V 2 (%)	THD- V 3 (%)	THD-I 1 (%)	THD-I 2 (%)	THD-I 3 (%)	THD-I Total (%)	THD-V Total (%)	
7000	4000	6000	3	3	3	13.2	13.2	14.8	13,67	3	
7000	4000	6000	3	3	3	13.2	12.7	14.3	13,40	3	
7000	4000	6000	3	3	3	13.1	12.8	14.7	13,53	3	
7000	4000	6000	3	3	3	13.2	12.8	14.6	13,53	3	
7000	4000	6000	3	3	3	13.2	12.9	14.7	13,60	3	
7000	4000	6000	3	3	3	13.1	13	14.8	13,67	3	
8000	4000	7000	3	3	3	13	13.2	13.5	13,27	3	
8000	4000	7000	3	3	3	13	13.3	13.4	13,27	3	

Ölçüm için kullanılmış olan Entes marka MPR63 Enerji Analizörünün bilgisayar arayüz programında anlık olarak faz-nötr, faz-faz arası gerilimler, her faza ait akım, aktif, reaktif güçler, frekans, toplam THDV ve THDI, ölçüm tarih ve saati gibi bilgiler vermektedir. Şekil 4.4’ de TR-2/9 trafosu 1 nolu çıkışa ait genel bilgiler anlık olarak verilmiştir.



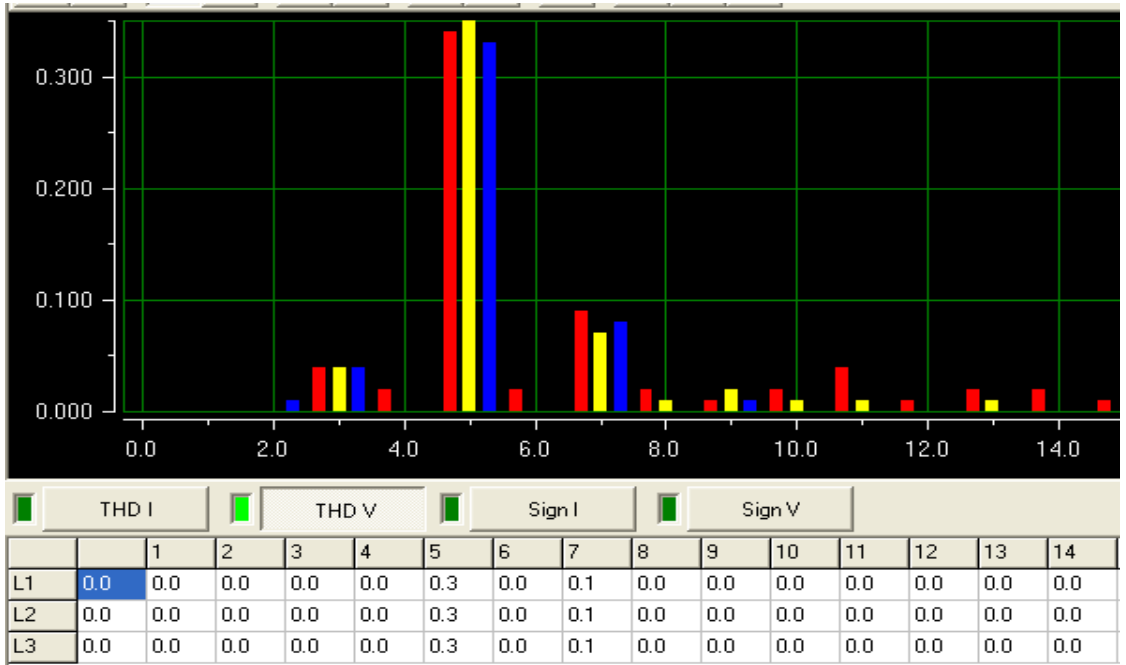
Şekil 4.4 TR-2/9 trafosu 1 nolu çıkış genel tablo görünümü

Şekil 4.5’ de TR-2/9 trafosu 1 nolu çıkış THD I ölçüm sonucu verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere özellikle 3. harmonik en belirgin harmoniktir.



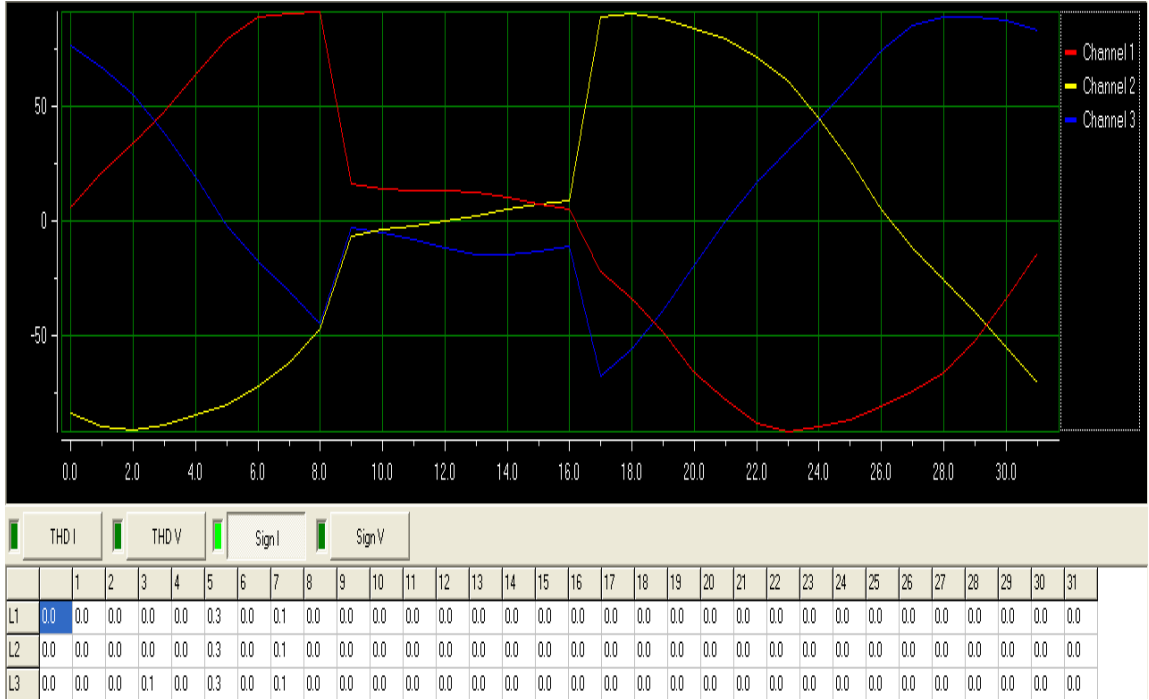
Şekil 4.5 TR-2/9 trafosu 1 nolu çıkış THD I ölçüm sonucu

Şekil 4.6' da TR-2/9 trafosu 1 nolu çıkış THD V ölçüm sonucu verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere, gerilimde dikkate alınacak herhangi bir harmonik bozulmanın olmadığı görülmektedir.



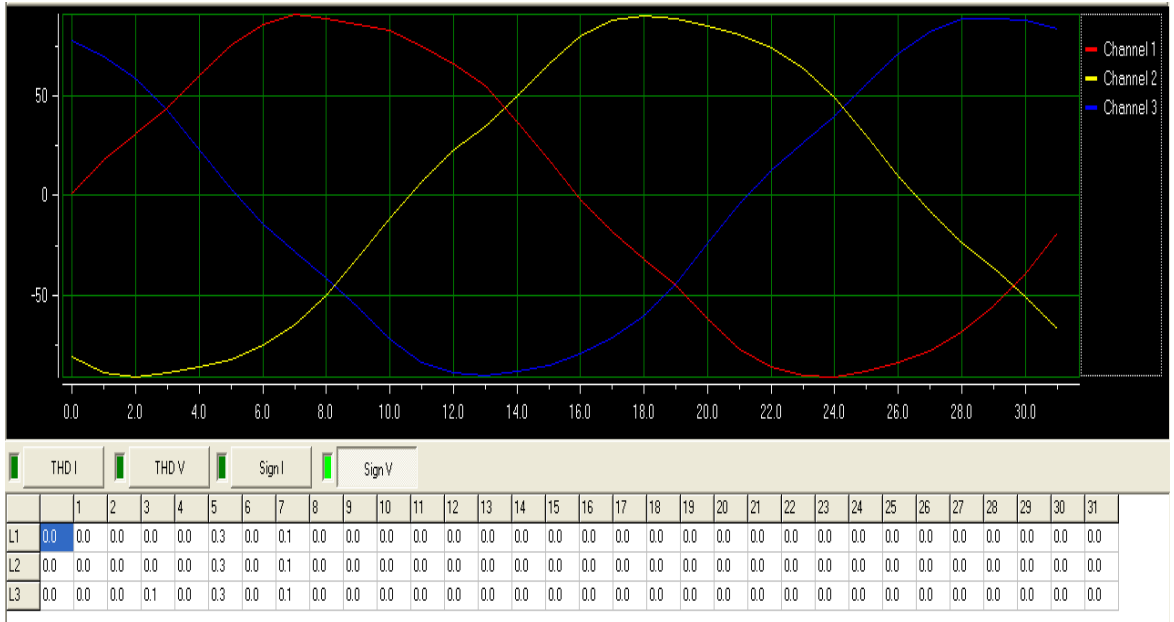
Şekil 4.6 TR-2/9 trafosu 1 nolu çıkış THD V ölçüm sonucu

Şekil 4.7' de TR-2/9 trafosu 1 nolu çıkışa ait akım dalga şekilleri her faz için ayrı ayrı görülmektedir.



Şekil 4.7 TR-2/9 trafosu 1 nolu çıkış akım dalga şekli

Şekil 4.8' de TR-2/9 trafosu 1 nolu çıkışa ait gerilim dalga şekilleri her faz için ayrı ayrı görülmektedir.



Şekil 4.8 TR-2/9 trafosu 1 nolu çıkış gerilim dalga şekli

4.3.1.2 2 nolu çıkış ölçüm sonuçları

Çizelge 4.2’ den görüldüğü üzere ortalama 20 kW aktif yük olduğu, yine ortalama 3 kVAR kadar reaktif güç çekildiği ancak fazların dengesiz olarak yüklendiği, akımda ortalama %5,2 gibi bir harmonik bozulmanın olduğu, gerilimde önemli bir harmonik bozulmanın olmadığı ve gerilim seviyesinin “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkındaki Yönetmelik” te izin verilen değerler arasında kalmış olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.2 TR-2/9 trafosu 2 nolu çıkış ölçüm verileri

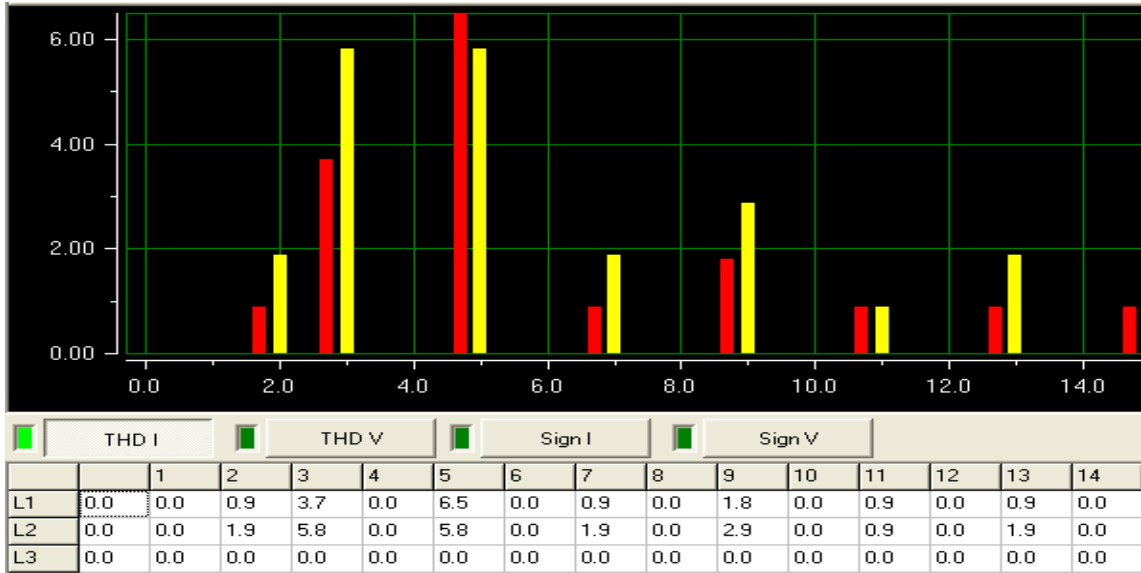
Tarih	Saat	VLN1 (V)	VLN 2 (V)	VLN3 (V)	ILN1 (A)	ILN2 (A)	ILN3 (A)	TOTAL. I (A)	W1 (W)	W2 (W)	W3 (W)
21.01.2010	15:25:40	241.5	242.4	241.9	39	34	13	30	9000	8000	3000
21.01.2010	15:25:41	241.4	242.4	241.7	39	33	13	29	9000	8000	3000
21.01.2010	15:25:42	241.6	242.4	241.9	39	34	13	29	9000	8000	3000
21.01.2010	15:25:43	241.6	242.4	242	39	34	13	29	9000	8000	3000
21.01.2010	15:25:44	241.7	242.5	242.1	39	33	13	29	9000	8000	3000
21.01.2010	15:25:45	241.7	242.5	242	39	34	13	29	9000	8000	3000
21.01.2010	15:25:46	241.6	242.4	242	39	34	13	29	9000	8000	3000
VAr1 (VAr)	VAr2 (VAr)	VAr3 (VAr)	THD -V 1 (%)	THD- V 2 (%)	THD-V 3 (%)	THD-I 1 (%)	THD-I 2 (%)	THD-I 3 (%)	THD-I Total (%)	THD-V Total (%)	
1000	1000	1000	3	3	3	7.2	8.1	0	5,10	3	
1000	1000	1000	3	3	3	7.5	8	0	5,17	3	
1000	1000	1000	3	3	3	7.5	7.9	0	5,13	3	
1000	1000	1000	3	3	3	7.4	8.2	0	5,20	3	
1000	1000	1000	3	3	3	7.5	8.2	0	5,23	3	
1000	1000	1000	3	3	3	7.8	8.1	0	5,30	3	
1000	1000	1000	3	3	3	7.6	8.4	0	5,33	3	

Şekil 4.9’ de TR-2/9 trafosu 2 nolu çıkışa ait genel bilgiler anlık olarak verilmiştir.



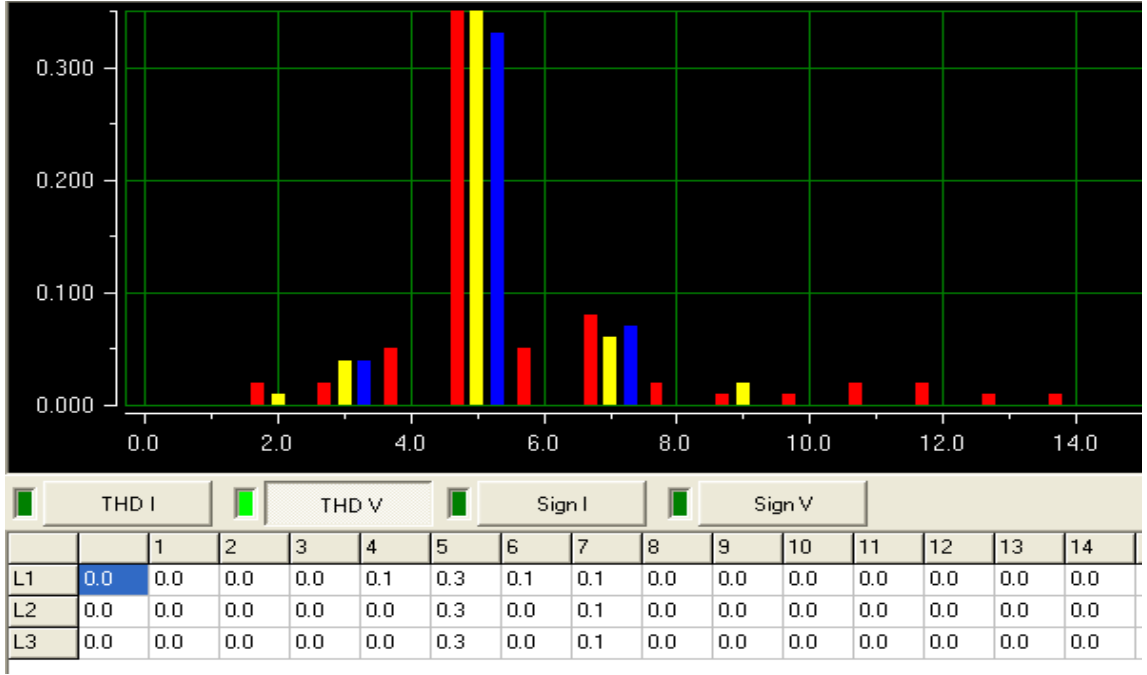
Şekil 4.9 TR-2/9 trafosu 2 nolu çıkış genel tablo görünümü

Şekil 4.10’ de TR-2/9 trafosu 2 nolu çıkış THD I ölçüm sonucu verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere özellikle 5. harmonik en belirgin harmoniktir. L3 fazında harmonik olmadığı görülmektedir.



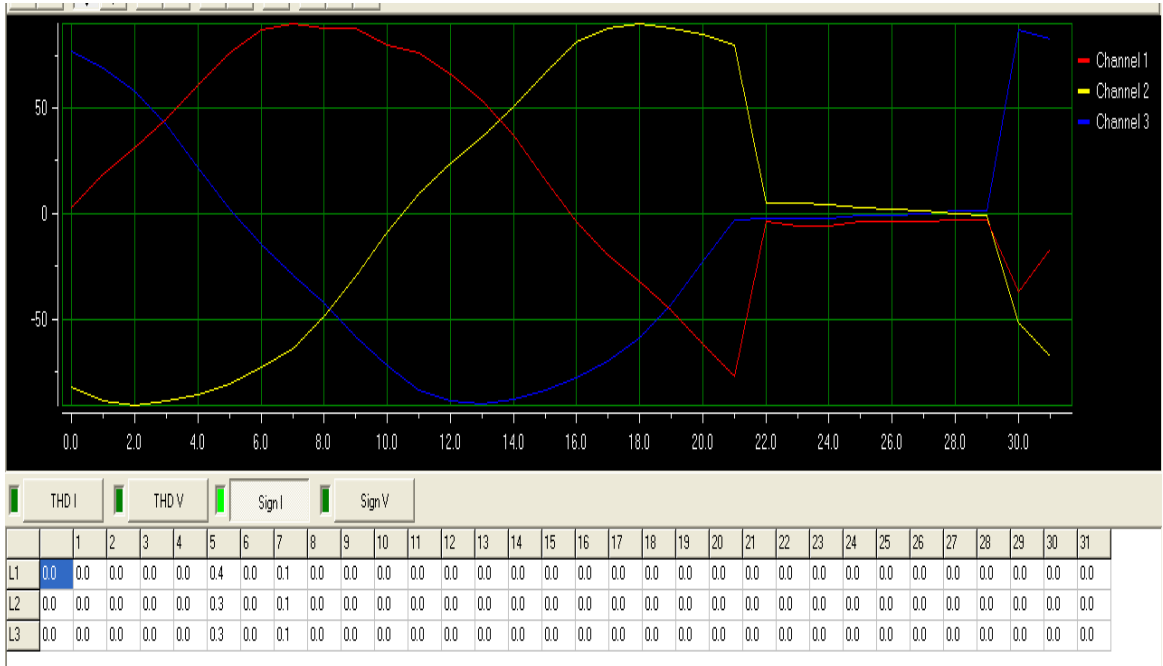
Şekil 4.10 TR-2/9 trafosu 2 nolu çıkış THD I ölçüm sonucu

Şekil 4.11’ de TR-2/9 trafosu 2 nolu çıkış THD V ölçüm sonucu verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere, gerilimde dikkate alınacak herhangi bir harmonik bozulmanın olmadığı görülmektedir.



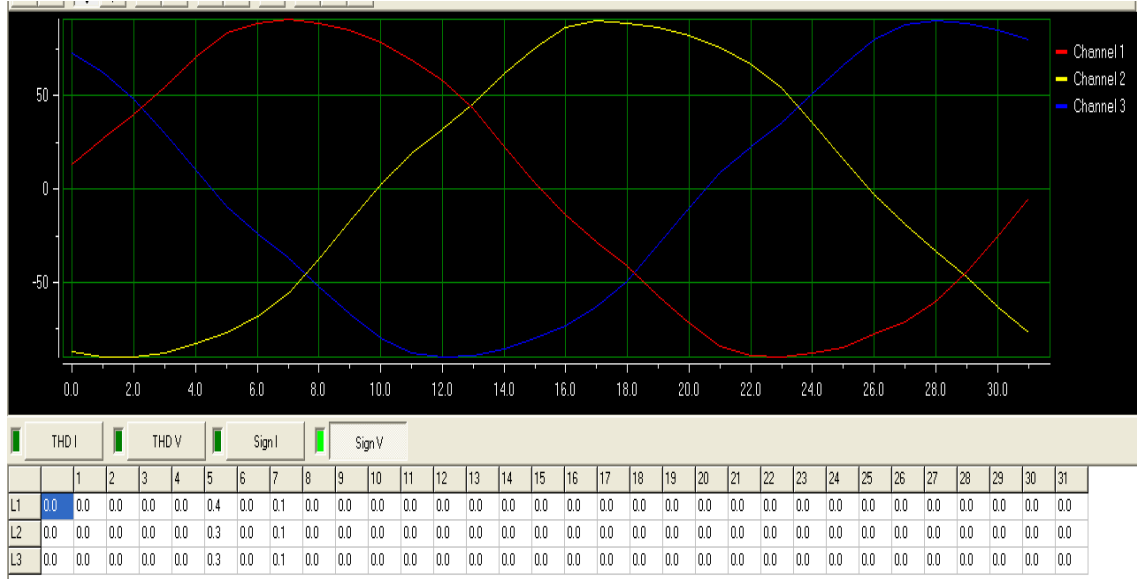
Şekil 4.11 TR-2/9 trafosu 2 nolu çıkış THD V ölçüm sonucu

Şekil 4.12' de TR-2/9 trafosu 2 nolu çıkışa ait akım dalga şekilleri her faz için ayrı ayrı görülmektedir.



Şekil 4.12 TR-2/9 trafosu 2 nolu çıkış akım dalga şekli

Şekil 4.13’ de TR-2/9 trafosu 2 nolu çıkışa ait gerilim dalga şekilleri her faz için ayrı ayrı görülmektedir.



Şekil 4.13 TR-2/9 trafosu 2 nolu çıkış gerilim dalga şekli

TR-2/9 trafosundaki iki çıkışında yük cinsleri aynı olmasına karşın, 1 nolu çıkışındaki harmoniklerin 2 nolu çıkıştaki harmoniklere göre daha fazla olduğu görülmektedir. 2 nolu çıkışın L3 fazındaki yük, harmonik üretmediği için bu çıkıştaki toplam THDI’ yı düşürmüştür.

4.3.2 TR-2/10 Trafosu ölçüm sonuçları

Bu Trafoda 4 adet çıkış ve trafo AG Panosu ana girişi kablo ile geçilmiş olduğundan ölçülebilmıştır.

4.3.2.1 TR-2/10 Trafosu ana giriş ölçüm sonuçları

Çizelge 4.3’ den görüldüğü üzere ortalama 91,6 kW aktif yük olduğu, ortalama 42,87 kVAR kadar reaktif güç çekildiği ancak fazların dengesiz olarak yüklendiği, akımda ortalama %11,12 gibi bir harmonik bozulmanın olduğu, gerilimde önemli bir harmonik bozulmanın olmadığı ve gerilim seviyesinin “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkındaki Yönetmelik” te izin verilen değerler arasında kalmış olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.3 TR-2/10 trafosu ana giriş ölçüm verileri

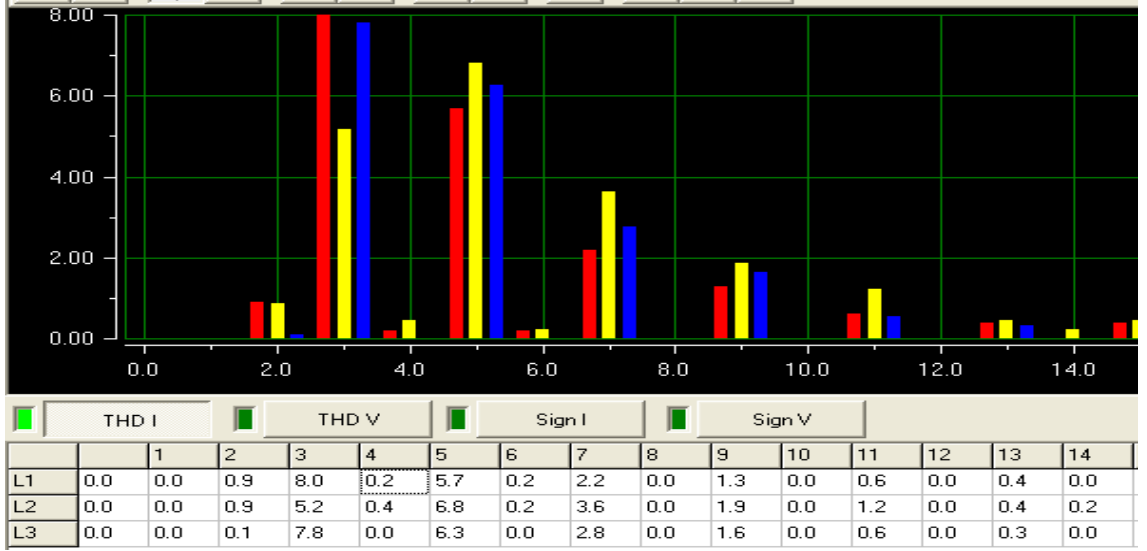
Tarih	Saat	VLN1 (V)	VLN2 (V)	VLN3 (V)	ILN1 (A)	2 (A)	3 (A)	TOT AL.I (A)	W1 (W)	W2 (W)	W3 (W)
21.01.2010	14:10:09	240	240.1	239.5	137	126	143	135	29000	27000	31000
21.01.2010	14:10:10	239.9	239.9	239.5	141	128	145	138	30000	28000	32000
21.01.2010	14:10:11	240	240	239.4	139	128	145	137	30000	28000	32000
21.01.2010	14:10:12	239.9	239.8	239.4	142	132	150	141	31000	29000	33000
21.01.2010	14:10:13	239.8	239.7	239.2	146	140	152	146	31000	31000	33000
21.01.2010	14:10:14	239.7	239.6	239.2	143	131	149	141	31000	28000	32000
21.01.2010	14:10:15	239.6	239.4	239	142	135	148	142	30000	29000	32000
21.01.2010	14:10:16	239.2	239.2	238.6	152	143	155	150	32000	31000	33000
VAr1 (VAr)	VAr2 (VAr)	VAr3 (VAr)	THD-V 1 (%)	THD-V 2 (%)	THD-V 3 (%)	THD- I 1 (%)	THD-I 2 (%)	THD-I 3 (%)	THD-I Total (%)	THD-V Total (%)	
14000	12000	13000	2.3	2	2.2	11	9.9	13.9	11,60	2,17	
15000	13000	13000	2.2	2	2.3	10.8	9.9	13.9	11,53	2,17	
15000	13000	14000	2.2	2	2.1	10.6	9.8	13.6	11,33	2,1	
15000	13000	14000	2.3	2	2.2	10.1	9.6	12.8	10,83	2,17	
16000	14000	15000	2.3	2	2.1	10.3	9.4	12.7	10,80	2,2	
15000	13000	15000	2.3	2	2	10.2	10.4	12.9	11,17	2,1	
15000	13000	15000	2.2	2	2.1	10	10.1	13	11,03	2,1	
18000	14000	16000	2.1	2	2	9.6	9.7	12.7	10,67	2,03	

Şekil 4.14' de TR-2/10 trafosu ana girişine ait genel bilgiler anlık olarak verilmiştir.



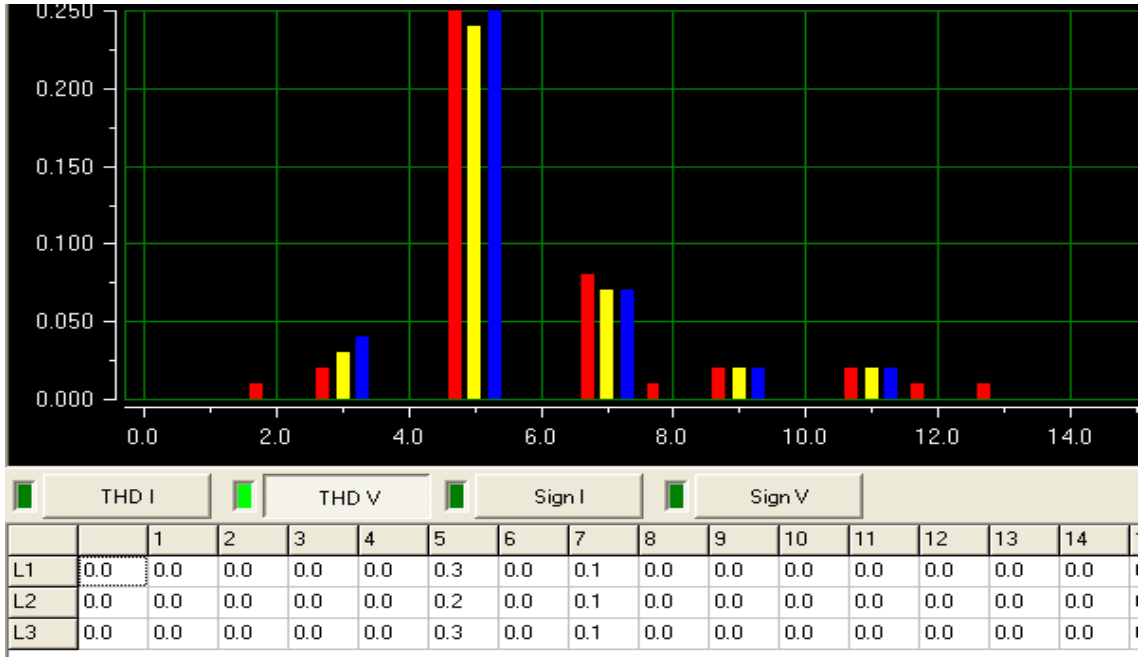
Şekil 4.14 TR-2/10 trafosu ana giriş genel tablo görünümü

Şekil 4.15' de TR-2/10 trafosu ana girişindeki THD I ölçüm sonucu verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere özellikle 3. harmonik en belirgin harmoniktir.



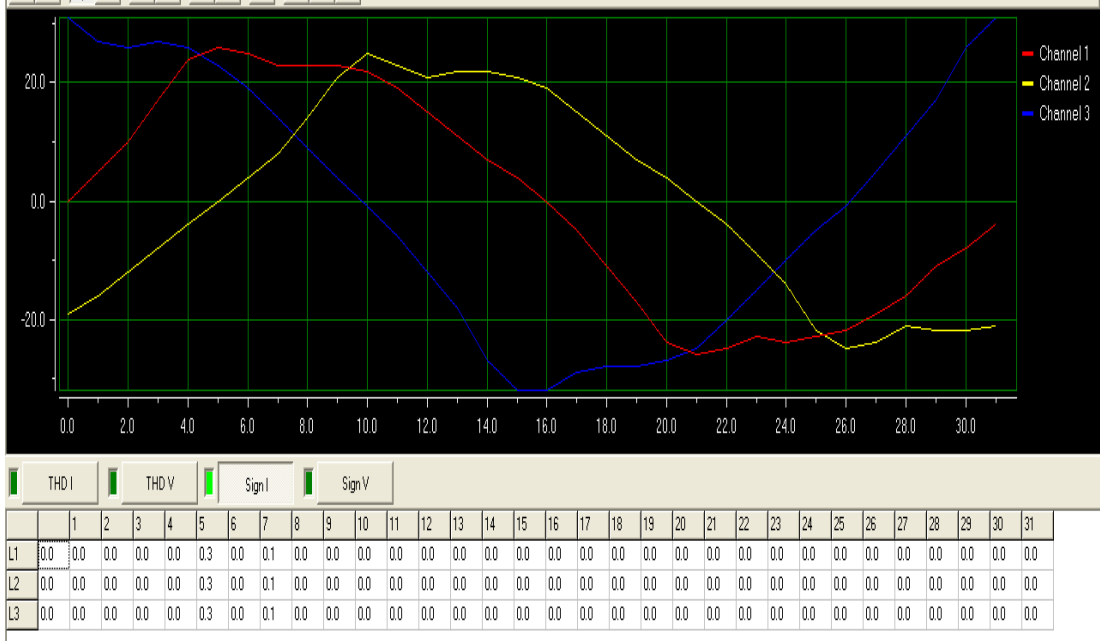
Şekil 4.15 TR-2/10 trafosu ana giriş THD I ölçüm sonucu

Şekil 4.16' da TR-2/10 trafosu ana girişe ait THD V ölçüm sonucu verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere, gerilimde dikkate alınacak herhangi bir harmonik bozulmanın olmadığı görülmektedir.



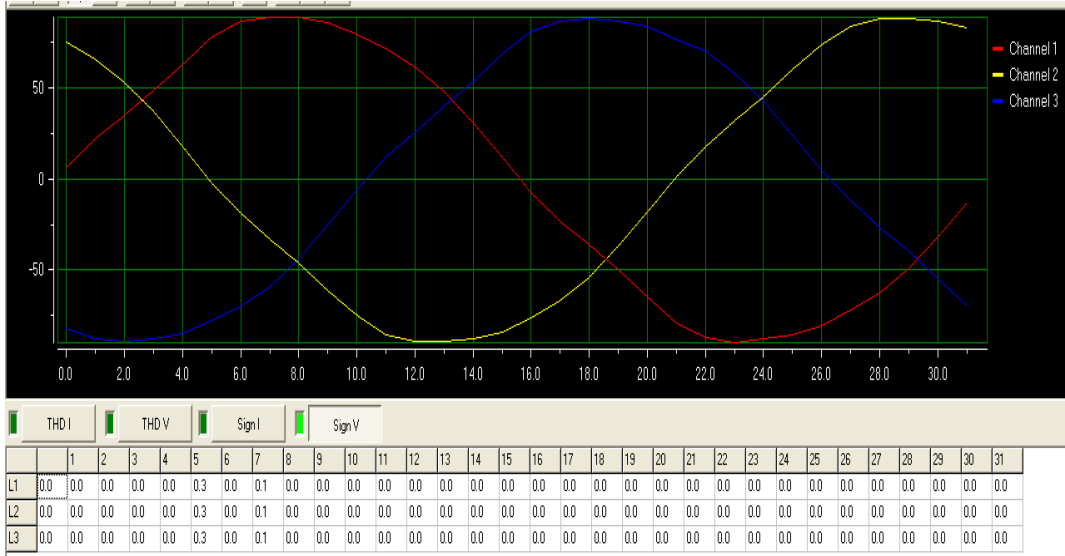
Şekil 4.16 TR-2/10 trafosu ana giriş THD V ölçüm sonucu

Şekil 4.17' de TR-2/10 trafosu ana girişe ait akım dalga şekilleri her faz için ayrı ayrı görülmektedir.



Şekil 4.17 TR-2/10 trafosu ana giriş akım dalga şekli

Şekil 4.18’ de TR-2/10 trafosu ana girişe ait gerilim dalga şekilleri her faz için ayrı ayrı görülmektedir.



Şekil 4.18 TR-2/10 trafosu ana giriş gerilim dalga şekli

4.3.2.2 TR-2/10 Trafosu 1 nolu çıkış ölçüm sonuçları

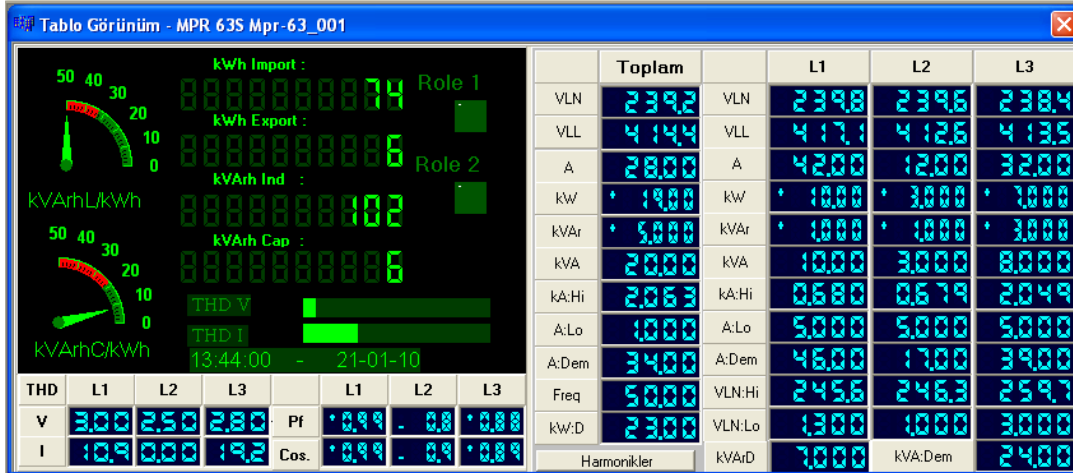
Çizelge 4.4’ den görüldüğü üzere ortalama 28,37 kW civarında aktif yük olduğu, ortalama 10,37 kVAR kadar reaktif güç çekildiği ancak fazların dengesiz olarak yüklendiği, akımda ortalama %11,27 gibi bir harmonik bozulmanın olduğu, gerilimde

önemli bir harmonik bozulmanın olmadığı ve gerilim seviyesinin “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkındaki Yönetmelik” te izin verilen değerler arasında kalmış olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.4 TR-2/10 trafosu 1 nolu çıkış ölçüm verileri

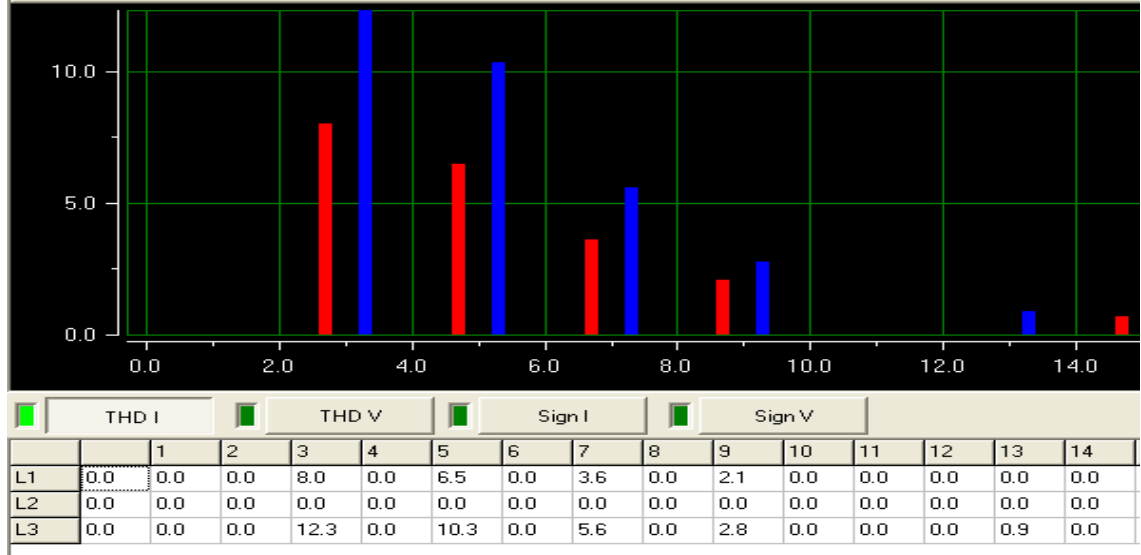
Tarih	Saat	VLN1 (V)	VLN2 (V)	VLN3 (V)	ILN1 (A)	ILN2 (A)	ILN3 (A)	TOTA L.I (A)	W1 (W)	W2 (W)	W3 (W)
21.01.2010	13:32:08	240.7	240.2	239.2	21	39	48	37	5000	9000	11000
21.01.2010	13:32:09	240.6	240.2	239.1	21	39	49	37	5000	9000	11000
21.01.2010	13:32:10	240.1	239.7	238.7	45	60	68	52	9000	13000	14000
21.01.2010	13:32:11	240.7	240.3	239.2	27	42	54	50	6000	10000	12000
21.01.2010	13:32:12	240.6	240.1	239.2	28	42	56	44	7000	10000	12000
21.01.2010	13:32:13	240.6	240.2	239.2	28	42	53	42	7000	10000	12000
21.01.2010	13:32:14	240.6	240.2	239.2	29	45	54	43	6000	10000	12000
21.01.2010	13:32:15	240.5	240.3	239.1	28	45	51	43	6000	10000	11000
VAR1 (VAr)	VAR2 (VAr)	VAR3 (VAr)	THD-V 1 (%)	THD-V 2 (%)	THD-V 3 (%)	THD-I 1 (%)	THD-I 2 (%)	THD-I 3 (%)	THD-I Total (%)	THD-V Total (%)	
1000	2000	4000	2.7	2.5	2.1	10.1	15.1	11.2	12,13	2,43	
1000	2000	4000	2.9	2.8	2.5	9.7	15.1	12.3	12,37	2,73	
6000	7000	9000	2.8	2.8	2.8	5.3	10.1	5.6	7,00	2,80	
2000	3000	5000	2.9	2.9	2.5	7.5	13.4	11.9	10,93	2,77	
2000	3000	4000	2.8	2.9	2.1	6.9	13.9	17.1	12,63	2,60	
2000	3000	4000	2.8	2.7	2.5	7.2	14.1	12.9	11,40	2,67	
2000	3000	4000	2.9	2.9	2.3	11.6	14.8	14.4	13,60	2,70	
2000	3000	5000	2.9	2.8	2.3	7.2	11.9	11.2	10,10	2,67	

Şekil 4.19’ da TR-2/10 trafosu 1 nolu çıkışa ait genel bilgiler anlık olarak verilmiştir.



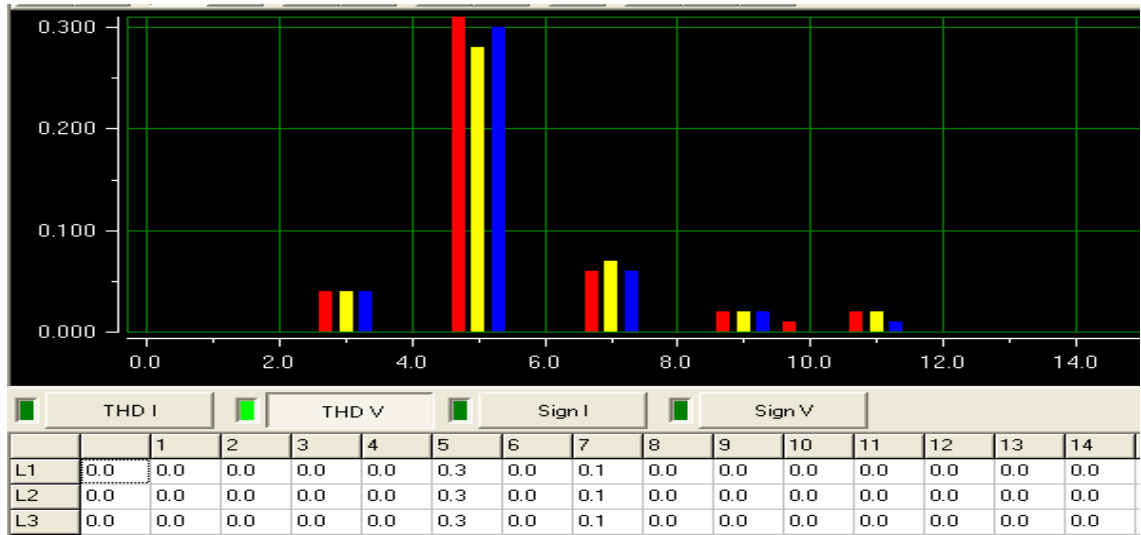
Şekil 4.19 TR-2/10 trafosu 1 nolu çıkış genel tablo görünümü

Şekil 4.15’ de TR-2/10 trafosu 1 nolu çıkışındaki THD I ölçüm sonucu verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere özellikle 3. harmonik en belirgin harmoniktir. L2 fazında harmonik olmadığı görülmektedir.



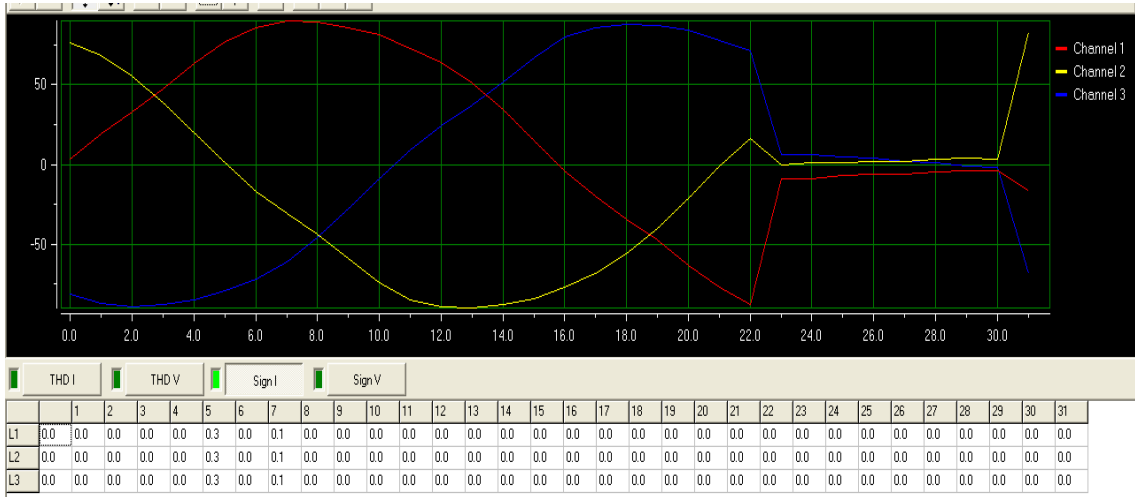
Şekil 4.20 TR-2/10 trafosu 1 nolu çıkış THD I ölçüm sonucu

Şekil 4.21’ de TR-2/10 trafosu 1 nolu çıkış THD V ölçüm sonucu verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere, gerilimde dikkate alınacak herhangi bir harmonik bozulmanın olmadığı görülmektedir.



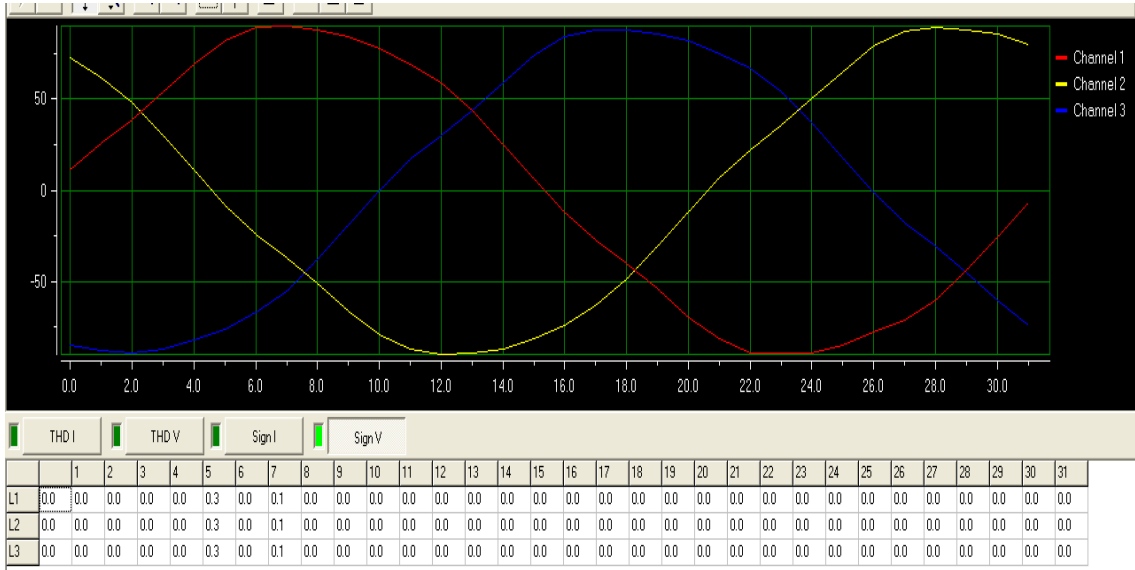
Şekil 4.21 TR-2/10 trafosu 1 nolu çıkış THD V ölçüm sonucu

Şekil 4.22’ de TR-2/10 trafosu 1 nolu çıkışa ait akım dalga şekilleri her faz için ayrı ayrı görülmektedir.



Şekil 4.22 TR-2/10 trafosu 1 nolu çıkış akım dalga şekli

Şekil 4.23’ de TR-2/10 trafosu 1 nolu çıkışa ait gerilim dalga şekilleri her faz için ayrı ayrı görülmektedir.



Şekil 4.23 TR-2/10 trafosu 1 nolu çıkış gerilim dalga şekli

4.3.2.3 TR-2/10 Trafosu 2 nolu çıkış ölçüm sonuçları

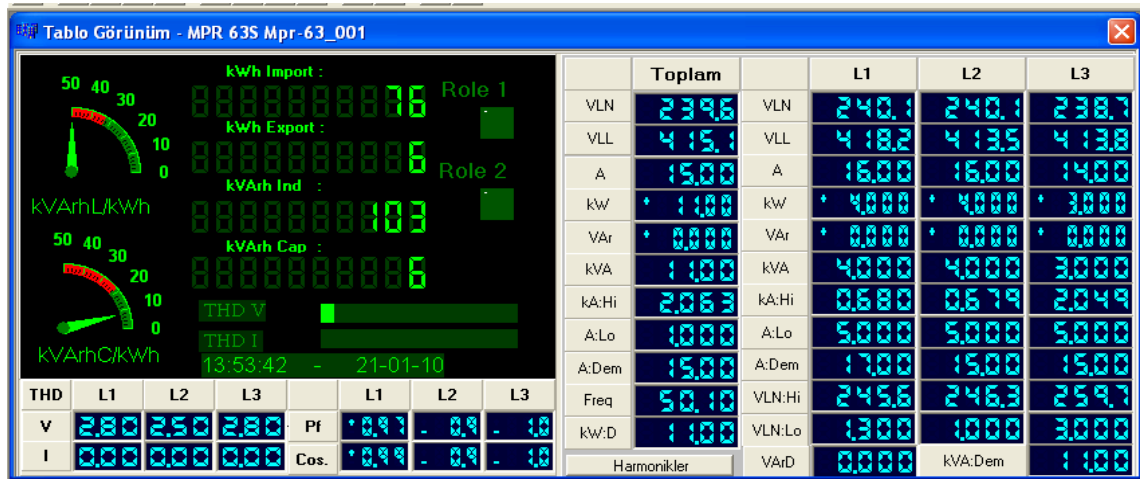
Çizelge 4.5’ den görüldüğü üzere ortalama 23 kW aktif yük olduğu, yine ortalama 7,16 kVAR kadar reaktif güç çekildiği ancak fazların dengesiz olarak yüklendiği, akımda ortalama %9,83 gibi bir harmonik bozulmanın olduğu, gerilimde önemli bir harmonik bozulmanın olmadığı ve gerilim seviyesinin “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde

Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkındaki Yönetmelik” te izin verilen değerler arasında kalmış olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.5 TR-2/10 trafosu 2 nolu çıkış ölçüm verileri

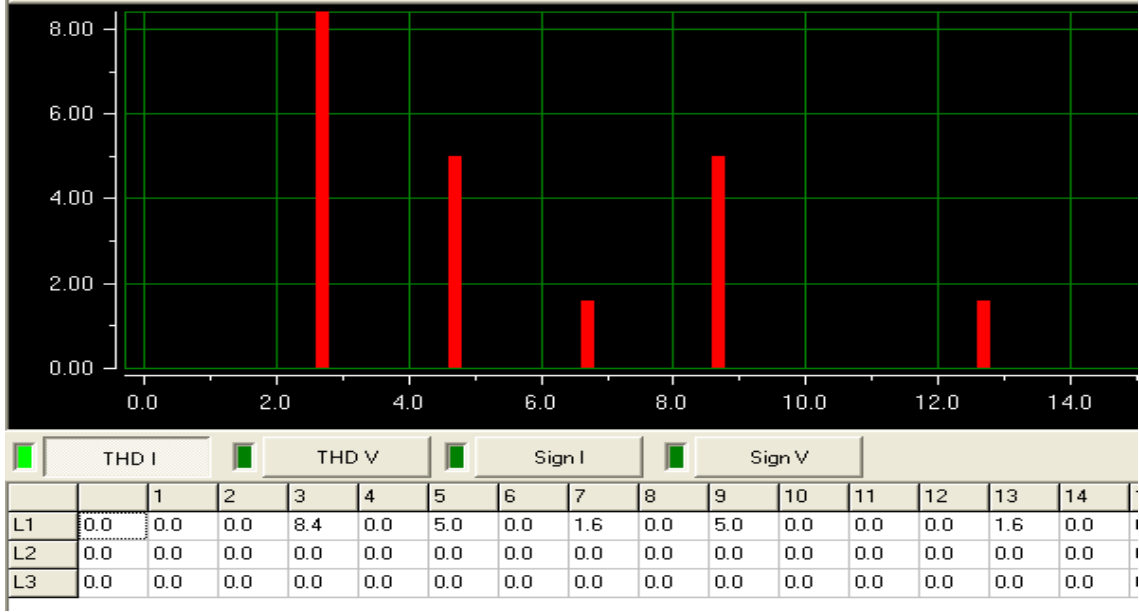
Tarih	Saat	VLN 1 (V)	VLN 2 (V)	VLN3 (V)	ILN1 (A)	ILN2 (A)	ILN3 (A)	TOTA L.I (A)	W1 (W)	W2 (W)	W3 (W)
21.01.2010	13:42:39	239.8	239.2	238.7	46	17	45	33	11000	4000	8000
21.01.2010	13:42:40	239.8	239.2	238.7	46	17	38	33	11000	4000	8000
21.01.2010	13:42:41	240	239.3	238.7	47	17	38	35	11000	4000	8000
21.01.2010	13:42:42	239.9	239.4	238.7	47	17	38	35	11000	4000	8000
21.01.2010	13:42:43	239.9	239.5	238.7	48	17	38	35	11000	4000	8000
21.01.2010	13:42:44	239.6	239.1	238.4	47	17	38	35	11000	4000	8000
VAr1 (VAr)	VAr2 (VAr)	VAr 3 (VAr)	THD -V 1 (%)	THD-V 2 (%)	THD -V 3 (%)	THD-I 1 (%)	THD-I 2 (%)	THD-I 3 (%)	THD-I Total (%)	THD-V Total (%)	
2000	0	3000	2,9	2,7	2,9	10	0	17,2	9,07	2,83	
2000	1000	4000	2,9	2,6	2,9	19,8	0	18,9	12,90	2,80	
2000	1000	4000	2,9	2,5	3	10,3	0	17,7	9,33	2,80	
3000	1000	4000	3	2,7	2,9	9,8	0	18	9,27	2,87	
3000	1000	4000	2,9	2,6	2,9	9,3	0	18,4	9,23	2,80	
3000	1000	4000	2,9	2,2	2,8	9,6	0	18	9,20	2,63	

Şekil 4.24’ de TR-2/10 trafosu 2 nolu çıkışa ait genel bilgiler anlık olarak verilmiştir.



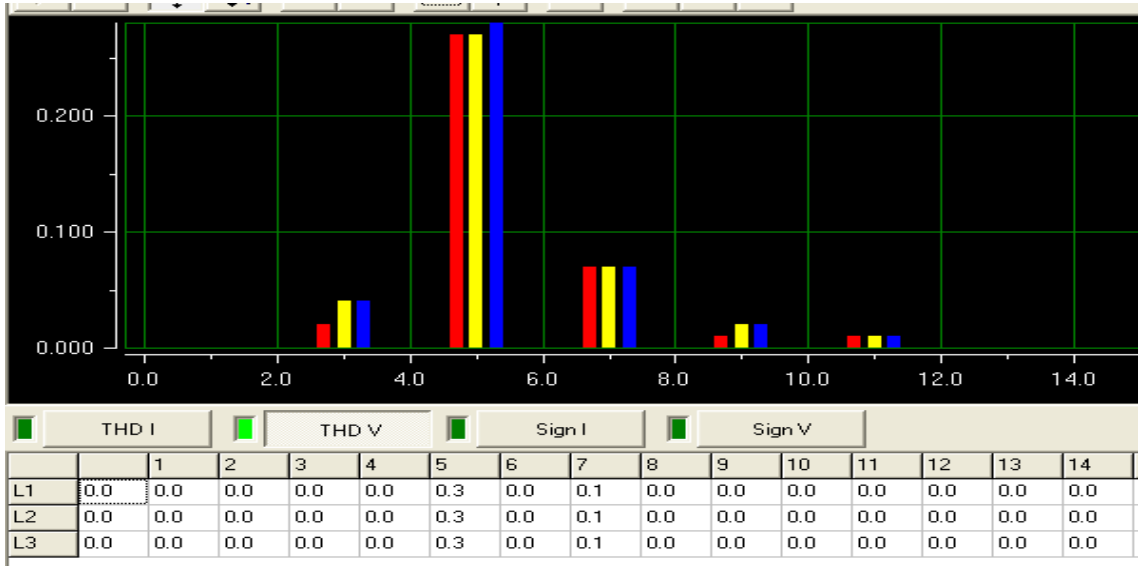
Şekil 4.24 TR-2/10 trafosu 2 nolu çıkış genel tablo görünümü

Şekil 4.25’ de TR-2/10 trafosu 2 nolu çıkışındaki THD I ölçüm sonucu verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere özellikle 3. harmonik en belirgin harmoniktir. L2 ve L3 fazlarında harmonik olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.25 TR-2/10 trafosu 2 nolu çıkış THD I ölçüm sonucu

Şekil 4.26' da TR-2/10 trafosu 2 nolu çıkış THD V ölçüm sonucu verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere, gerilimde dikkate alınacak herhangi bir harmonik bozulmanın olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.26 TR-2/10 trafosu 2 nolu çıkış THD V ölçüm sonucu

4.3.2.4 TR-2/10 Trafosu 3 nolu çıkış ölçüm sonuçları

Çizelge 4.6’ dan görüldüğü üzere ortalama 10,12 kW civarında aktif yük olduğu, yine ortalama 3,25 kVAR kadar reaktif güç çekildiği ancak fazların dengesiz olarak yüklendiği, akımda ortalama %11,76 gibi bir harmonik bozulmanın olduğu, gerilimde önemli bir harmonik bozulmanın olmadığı ve gerilim seviyesinin “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkındaki Yönetmelik” te izin verilen değerler arasında kalmış olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.6 TR-2/10 trafosu 3 nolu çıkış ölçüm verileri

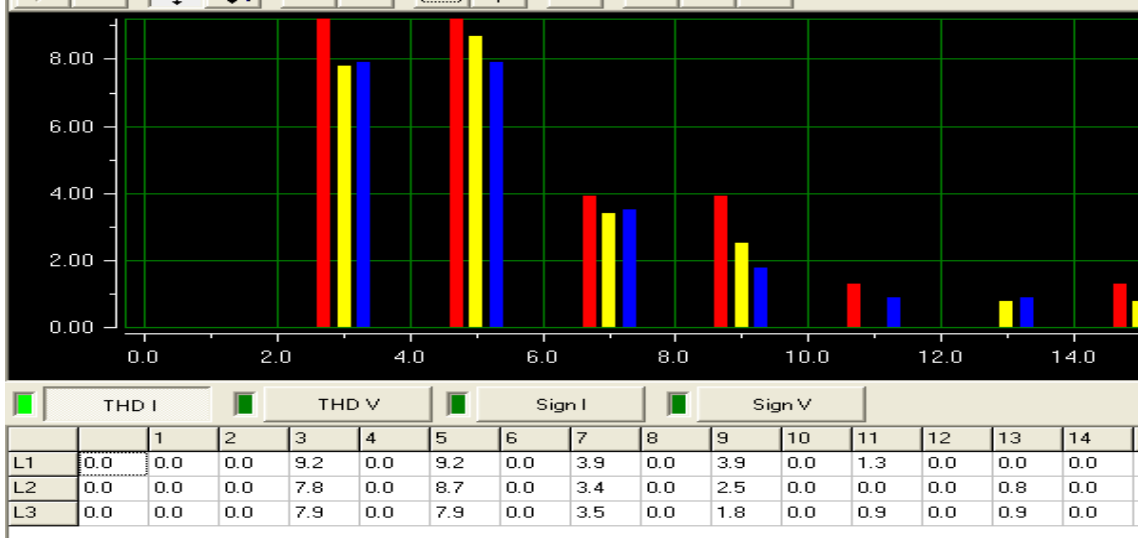
Tarih	Saat	VLN1 (V)	VLN2 (V)	VLN3 (V)	ILN1 (A)	ILN2 (A)	ILN3 (A)	TOTAL I (A)	W1 (W)	W2 (W)	W3 (W)
21.01.2010	13:52:29	240,1	239,5	238,2	15	15	27	13	2000	4000	3000
21.01.2010	13:52:30	240,1	239,5	238,3	10	15	15	13	2000	4000	3000
21.01.2010	13:52:31	240,8	240,3	239,1	10	16	15	13	2000	4000	4000
21.01.2010	13:52:32	240,7	240,4	239,1	10	16	15	13	2000	4000	4000
21.01.2010	13:52:33	240,6	240,3	239,1	10	16	15	13	2000	4000	4000
21.01.2010	13:52:34	240,5	240,4	239,2	10	16	15	13	2000	4000	4000
21.01.2010	13:52:35	240,7	240,5	239,2	13	16	15	15	3000	4000	4000
21.01.2010	13:52:36	240,8	240,4	239,2	17	16	15	16	4000	4000	4000
VAr1 (VAr)	VAr2 (VAr)	VAr3 (VAr)	THD-V1 (%)	THD-V2 (%)	THD-V3 (%)	THD-I1 (%)	THD-I2 (%)	THD-I3 (%)	THD-I Total (%)	THD-V Total (%)	
0	1000	1000	2,8	2,4	2,9	13,5	10,9	11	11,8	2,70	
1000	1000	1000	2,9	2,3	2,6	13,2	11	11	11,73	2,60	
1000	1000	1000	2,8	2,2	2,6	13	10,9	11,2	11,70	2,53	
0	1000	1000	2,8	2,5	2,9	13,2	10,8	11,2	11,73	2,73	
1000	1000	2000	2,9	2,5	2,9	13,2	10,8	11,1	11,70	2,77	
1000	1000	1000	2,9	2	2,9	13,2	10,9	11,1	11,73	2,60	
1000	1000	2000	2,9	2,4	2,9	13,5	11	11,1	11,87	2,73	
1000	2000	2000	2,9	2,7	2,9	13,5	10,9	11,1	11,83	2,83	

Şekil 4.27’ de TR-2/10 trafosu 3 nolu çıkışa ait genel bilgiler anlık olarak verilmiştir.



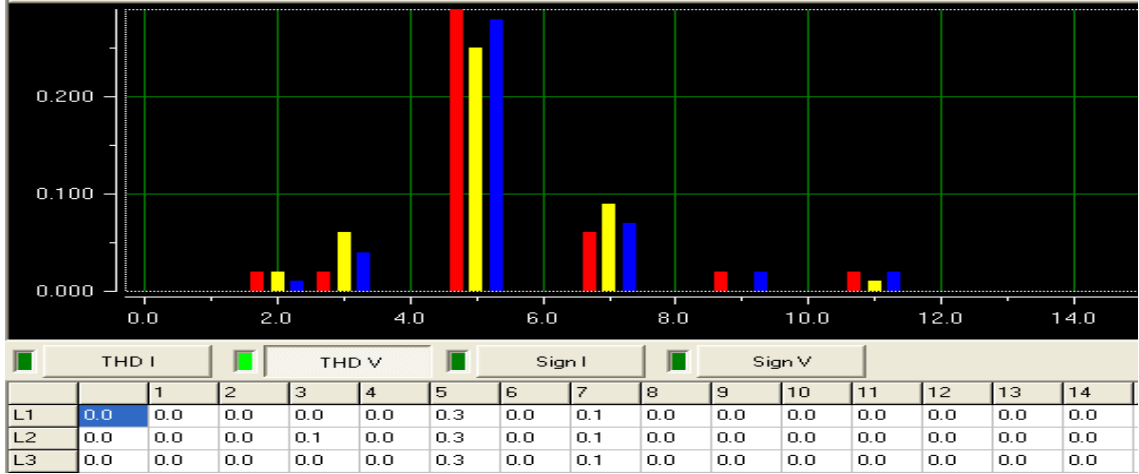
Şekil 4.27 TR-2/10 trafosu 3 nolu çıkış genel tablo görünümü

Şekil 4.28' de TR-2/10 trafosu 3 nolu çıkışındaki THD I ölçüm sonucu verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere özellikle 3.ve 5. harmonikler en belirgin harmoniklerdir.

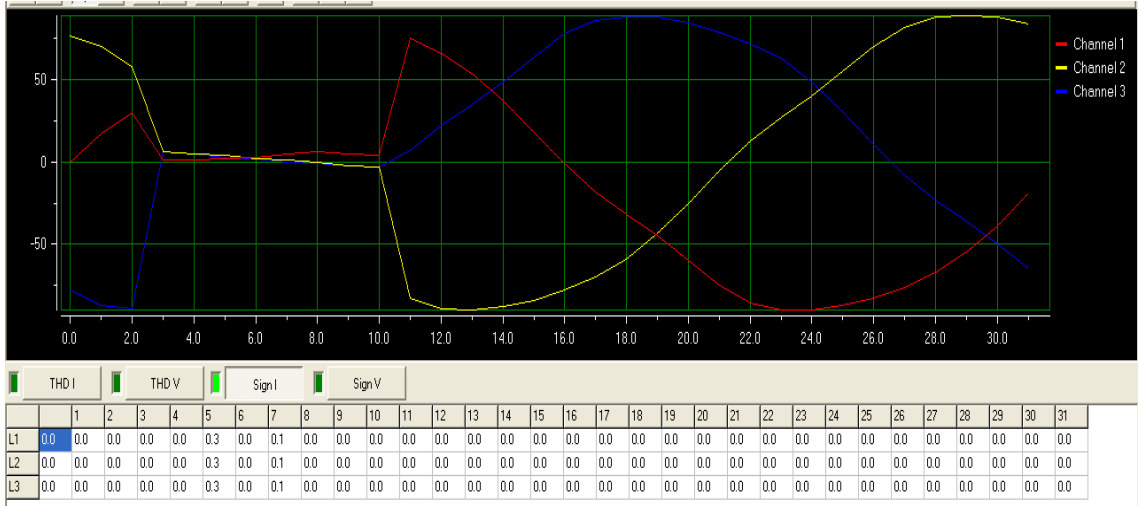


Şekil 4.28 TR-2/10 trafosu 3 nolu çıkış THD I ölçüm sonucu

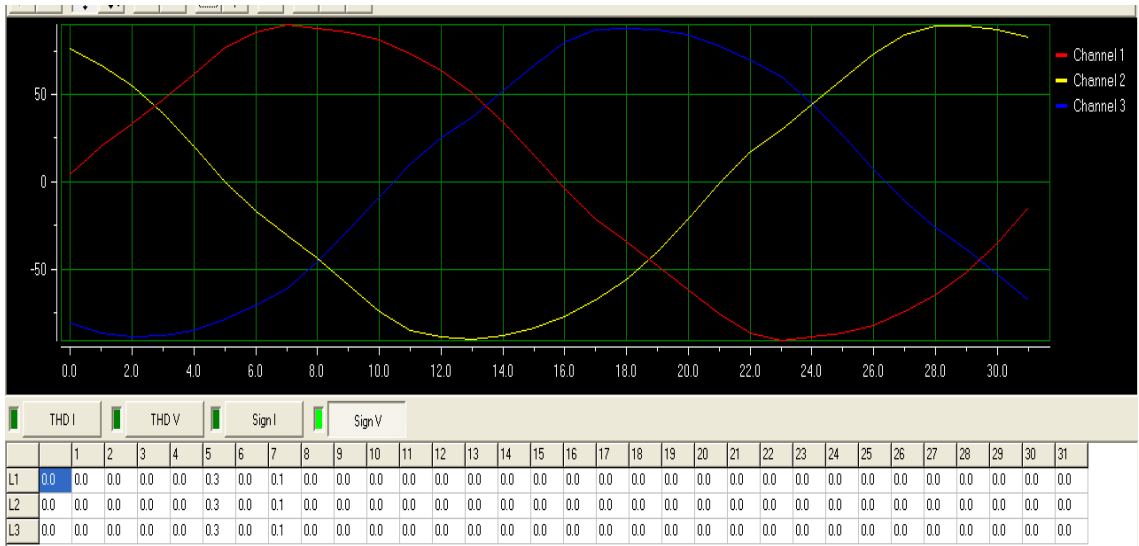
Şekil 4.29' da TR-2/10 trafosu 3 nolu çıkış THD V ölçüm sonucu verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere, gerilimde dikkate alınacak herhangi bir harmonik bozulmanın olmadığı görülmektedir. Şekil 4.30' da TR-2/10 trafosu 3 nolu çıkışa ait akım dalga şekilleri her faz için ayrı ayrı görülmektedir. Şekil 4.31' de TR-2/10 trafosu 3 nolu çıkışa ait gerilim dalga şekilleri her faz için ayrı ayrı görülmektedir.



Şekil 4.29 TR-2/10 trafosu 3 nolu çıkış THD V ölçüm sonucu



Şekil 4.30 TR-2/10 trafosu 3 nolu çıkış akım dalga şekli



Şekil 4.31 TR-2/10 trafosu 3 nolu çıkış gerilim dalga şekli

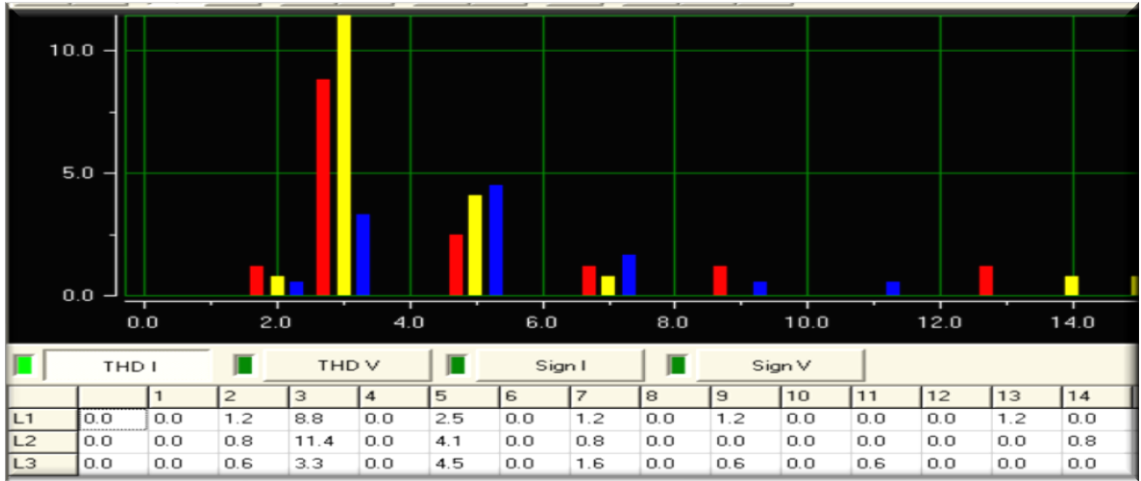
4.3.2.5 TR-2/10 Trafosu 4 nolu çıkış ölçüm sonuçları

Çizelge 4.7’ den görüldüğü üzere ortalama 22,87 kW civarında aktif yük olduğu, yine ortalama 12,62 kVAR kadar reaktif güç çekildiği ancak fazların dengesiz olarak yüklendiği, akımda %12,88 gibi bir harmonik bozulmanın olduğu, gerilimde önemli bir harmonik bozulmanın olmadığı ve gerilim seviyesinin “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkındaki Yönetmelik” te izin verilen değerler arasında kalmış olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.7 TR-2/10 trafosu 4 nolu çıkış ölçüm verileri

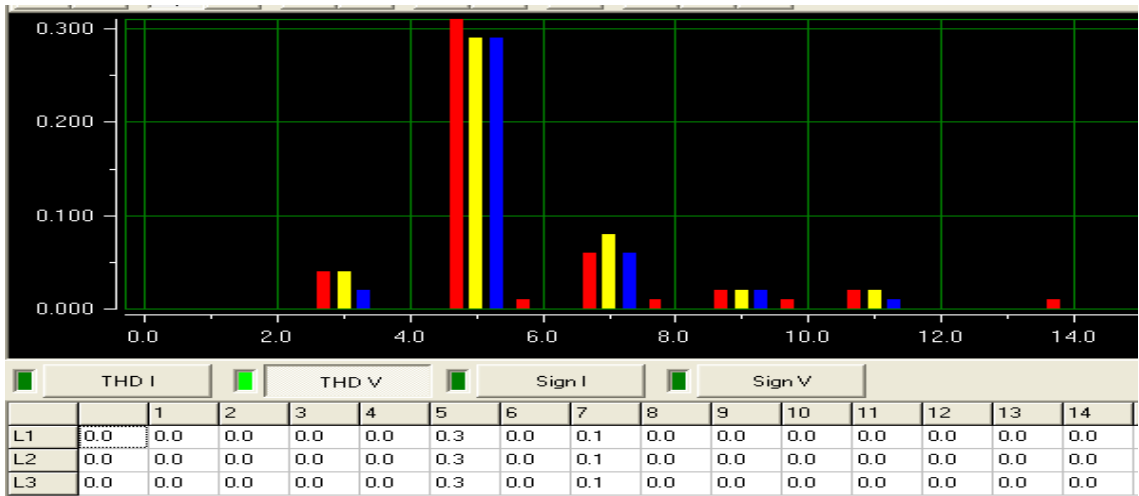
Tarih	Saat	VLN 1 (V)	VLN 2 (V)	VLN3 (V)	ILN1 (A)	ILN2 (A)	ILN3 (A)	TOTAL.I (A)	W1 (W)	W2 (W)	W3 (W)
21.01.2010	14:01:31	239,5	239,3	237,9	26	39	47	37	5000	9000	8000
21.01.2010	14:01:32	239,6	239,3	238,2	26	41	41	36	6000	9000	8000
21.01.2010	14:01:33	239,4	239,1	238,2	26	42	42	37	6000	9000	8000
21.01.2010	14:01:34	239,4	239,2	238,2	26	42	42	37	6000	9000	8000
21.01.2010	14:01:35	239,2	239	238,1	26	42	42	37	6000	9000	8000
21.01.2010	14:01:36	239,2	238,9	238,1	26	42	42	37	6000	9000	8000
21.01.2010	14:01:37	239,2	239,1	238,1	26	42	42	37	6000	9000	8000
21.01.2010	14:01:38	239,3	239,1	238,1	25	42	42	36	6000	9000	8000
VAr1 (VAr)	VAr2 (VAr)	VAr3 (VAr)	THD -V 1 (%)	THD-V 2 (%)	THD-V 3 (%)	THD-I 1 (%)	THD-I 2 (%)	THD-I 3 (%)	THD-I Total (%)	THD-V Total (%)	
2000	4000	5000	2,7	2,6	2,9	23,2	11,6	12,9	15,90	2,73	
3000	5000	5000	2,9	2,6	3	15,6	11,4	12,4	13,13	2,83	
3000	5000	5000	2,9	2,7	3	14,8	11	11,2	12,33	2,87	
3000	5000	5000	2,9	2,6	2,9	14,7	11,1	11,2	12,33	2,80	
3000	5000	5000	2,8	2,5	2,8	15	11,1	11,3	12,47	2,70	
3000	5000	5000	2,8	2,9	3	14,7	11	11,1	12,27	2,90	
3000	5000	5000	2,8	2,6	3	14,6	11	11,2	12,27	2,80	
2000	5000	5000	2,8	2,3	3	15,6	10,8	10,8	12,40	2,70	

Şekil 4.32’ de TR-2/10 trafosu 4 nolu çıkışındaki THD I ölçüm sonucu verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere özellikle 3. harmonik en belirgin harmoniktir.



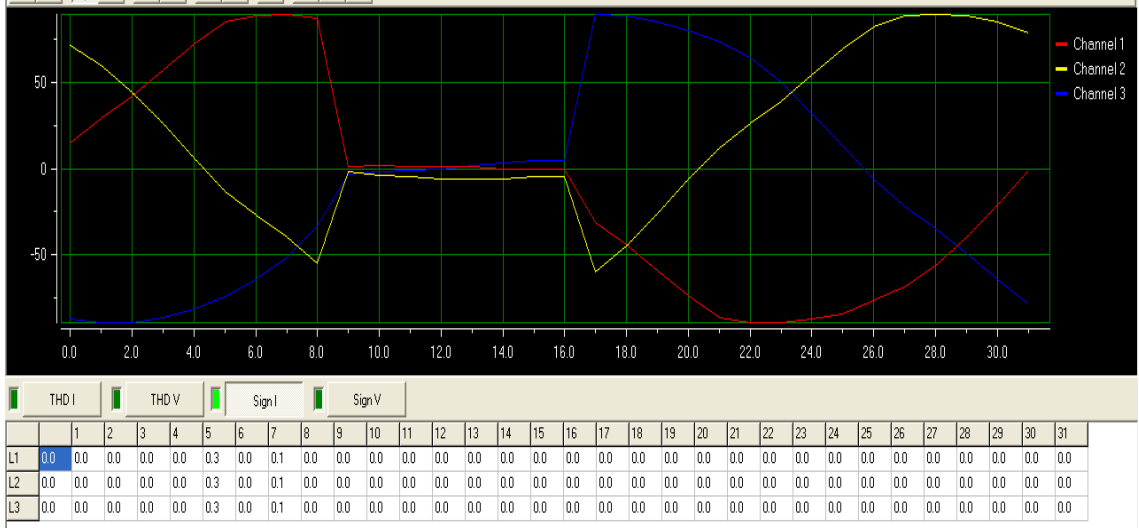
Şekil 4.32 TR-2/10 trafosu 4 nolu çıkış THD I ölçüm sonucu

Şekil 4.33' de TR-2/10 trafosu 4 nolu çıkış THD V ölçüm sonucu verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere, gerilimde dikkate alınacak herhangi bir harmonik bozulmanın olmadığı görülmektedir.



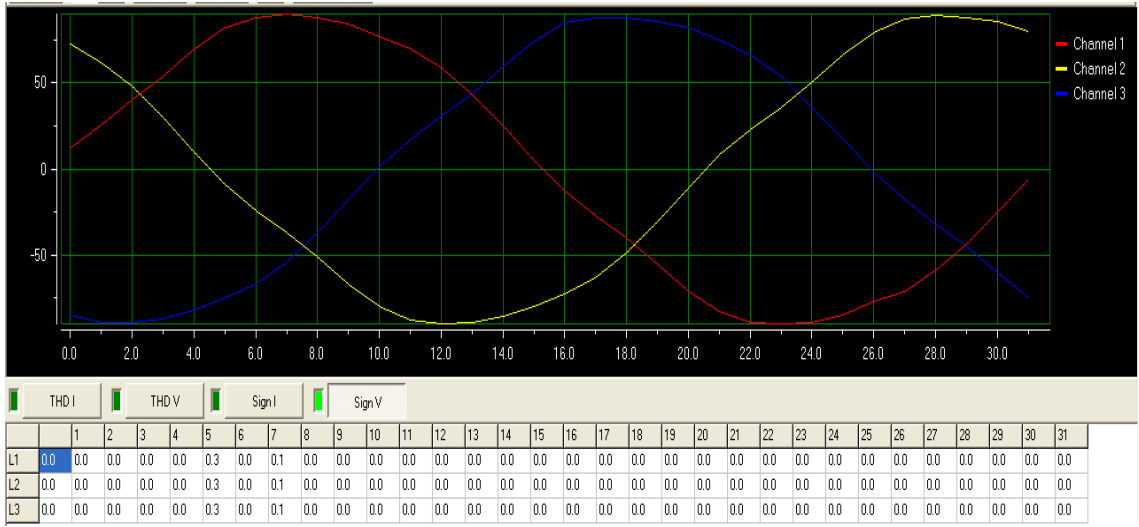
Şekil 4.33 TR-2/10 trafosu 4 nolu çıkış THD V ölçüm sonucu

Şekil 4.34' de TR-2/10 trafosu 4 nolu çıkışa ait akım dalga şekilleri her faz için ayrı ayrı görülmektedir.



Şekil 4.34 TR-2/10 trafosu 4 nolu çıkış akım dalga şekli

Şekil 4.35’ de TR-2/10 trafosu 4 nolu çıkışa ait gerilim dalga şekilleri her faz için ayrı ayrı görülmektedir.



Şekil 4.35 TR-2/10 trafosu 4 nolu çıkış gerilim dalga şekli

TR-2/10 trafosundaki ölçümler yorumlanacak olursa

- i. 1 nolu çıkışta demir atölyeleri ve oto tamircileri gibi yük çeşitleri vardır. Dolayısıyla ortalama %11,27 gibi bir harmoniğe rastlanmıştır.
- ii. 2 nolu çıkışın b fazında harmoniğin olmadığı, diğer fazlarında ise harmoniklerin %14 seviyesinde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni 2 nolu çıkıştaki fazlar arası dengesiz yüklenmedir.

- iii. 3 ve 4 nolu çıkışların yükleri, 1 nolu çıkışın yk eşitisiyle aynı olduğundan görülen harmonik karakteristiği benzerdir.

BÖLÜM V

HORMONİK STANDARTLARI

Normal veya kabul edilebilir harmonik seviyesini tespit etmek için çeşitli uluslar arası organizasyonlar tarafından geliştirilmiş pek çok sayıda standart mevcuttur. IEEE tarafından 1992 yılında getirilen IEEE 519 – 1992 nolu standart [17] ve IEC tarafından 1995 yılında IEC 1000 – 3 – 2 [18] gibi standartlar, elektrik şirketleri için şebeke bara gerilim distorsiyonunu ve müşteriler için lineer olmayan yükler tarafından üretilen harmonik akımları ile ilgili sınırlamaları vurgulamaktadır. IEEE 519 – 1992 standartında, şebeke gücünün bir fonksiyonu olarak akım ve gerilim harmonik bileşenlerinin, temel bileşene oranları verilmiştir. IEC – 555 [19], elektronik ev aletleri donanımı ile ilgili harmonik standartları içerir. Bu standartta, cihazların sınıflandırılmasına göre akım harmoniklerinin kabul edilebilir seviyesi verilmiştir. IEC harmonik sınırlamasını çeşitli yükler için sınıflandırmış ve bunlara ait tablolarda sınır değerleri vermiştir. IEC 61000 – 2 – 2 [20] konutlarla ilgili alçak gerilim sebekelerine ait gerilim harmonik sınırlamalarını içermektedir (Çizelge 5.1). Yine IEC tarafından endüstri için ikinci sınıf olarak verilen IEC 61000 – 2 – 4' te [21] gerilim harmonik distorsiyon limitleri verilmiştir (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.1 Konutlarla ilgili alçak gerilim sebekelerinde IEC 61000–2–2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri ($k=0,2+12,5/n$)

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

Çizelge 5.2 Endüstriyel santraller için IEC 61000 – 2 – 4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (2. sınıf elemanlar için) - ($k=0,2+12,5/n$)

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

IEC 61000-2-4, 3. Sınıf olarak endüstriyel tesislere ait iç alan bağlantı noktalarındaki harmonik gerilim yüzdelerinin sınır değerleri Çizelge 5.3' de verilmiştir.

Çizelge 5.3 Endüstriyel santraller için IEC 6100-2-4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (3. Sınıf elemanlar) ($m = 5\sqrt{11/n}$)

Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3' ün katı harmonikler	
n	%Vn	n	%Vn	n	%Vn
5	8	2	3	3	6
7	7	4	1,5	9	2,5
11	5	≥6	1	15	2
13	4,5			21	1,75
17	4			≥27	1
19	4				
23	3,5				
25	3,5				
≥29	m				

Avrupa standartları EN 50160' da [22] alçak gerilim ve orta gerilime ait gerilim harmoniklerinin sınır değerleri verilmiştir. Bu değerler alçak gerilim şebekesi için Çizelge 5.4' de, orta gerilim şebekesi için Çizelge 5.5' de görülmektedir.

IEC tarafından cihaz giriş akımı 16 A ve altında olan alçak gerilim dağıtım sistemine bağlanan özel bir dalga şekline sahip donanımlar için belirtilen D sınıfı cihazlar için kabul edilebilen en büyük harmonik akım değerleri IEC 61000-3-2 (1905-03) [23] de verilmiştir (Çizelge 5.6). Bu değerler 220 V un altındaki gerilimler için henüz uygulanmamaktadır. Ayrıca IEC/TS 61000-3-4 (1998-10)' da [24] ki teknik rapor 16 A' in üstündeki akım değerlerine sahip alçak gerilim dağıtım sistemine bağlanacak şu donanımlarla ilgilidir.

- Nominal gerilim 240 V' a kadar, tek fazlı, iki veya üç telli
- Nominal gerilimi 600 V' a kadar, üç fazlı, üç veya dört telli
- Nominal frekansı 50 Hz veya 60 Hz olan sistemler.

Çizelge 5.4 Konutlar ile ilgili alçak gerilim şebekeleri için EN 50160 harmonik distorsiyon limitleri

n	%Vn	n	%Vn	n	%Vn
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	≥6	0,5	15	0,5
13	3			≥21	0,5
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Çizelge 5.5 Konutlar ile ilgili orta gerilim şebekeleri için EN 50160 harmonik distorsiyon limitleri

n	%Vn	n	%Vn	n	%Vn
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	≥6	0,5	15	0,5
13	3			≥21	0,5
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Çizelge 5.6 D sınıfı donanım için IEC 61000-3-2' ye göre izin verilen harmonik akımları

n	3	5	7	9	11	13	15...39
Max I_n	2,3	1,14	0,77	0,4	0,33	0,21	0,15...15/n
Faz başına donanım giriş akımı $\leq 16 A$							

IEC-1000-2.2 ise alçak gerilim şebekeleri ile ilgilidir [25]. Gerilimde bulunan harmonik bileşenlerinin temel bileşene oranları için sınır değerler oluşturulmuştur. IEEE nin harmonik sınır standartları Çizelge 5.7 ve 5.8' de verilmiştir. Bu çizelgelerde; I_k sisteminin kısa devre akımını I_L yüke ait maksimum talep akımını ortalama (15 veya 30 dakikalık), TTD ise toplam talep distorsiyonunu göstermektedir. (TTD değeri, temel bileşen akımının yerine I_L akımının kullanılmış olması hali dışında THD değeri ile aynıdır.

Çizelge 5.7 IEEE' nin Gerilim için harmonik distorsiyon sınırları

Bara gerilimi V_n	Tekil Harmonik büyüklüğü (%)	(Toplam Harmonik Distorsiyonu) THD_{V_n} (%)
$V_n \leq 69 kV$	3,0	5
$69 < V_n \leq 161 kV$	1,5	2,5
$V_n 161 kV$	1	1,5

Transformatör akımındaki harmonikler IEEE C 57.12.00-1987 tarafından %5 olarak sınırlandırılmıştır [12].

Çizelge 5.8 IEEE' nin genel dağıtım sistemlerine ait akım için harmonik distorsiyon sınırları

$V_n \leq 69 \text{ kV}$						
I_k'' / I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$n \geq 35$	TTD (%)
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50-100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100-1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20
$69 < V_n \leq 161 \text{ kV}$						
<20	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20-50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50-100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
100-1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10
$V_n > 161 \text{ kV}$						
<50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3	1,5	1,15	0,5	0,22	4

Günümüzde tek fazlı yüklerin (bilgisayar, akü şarjlı ev ve ofis cihazları, taşınabilir el aletleri, deşarjlı ve elektronik balastlı lambalar, ışık zayıflatıcılar, televizyonlar vb) yaygınlaşması, harmoniklerin azaltılmasını ve standartlarda belirtilen sınırlara çekilmesini gerektirmiştir. Harmoniklerin yukarıda sayılan olumsuz etkilerini azaltmak için en genel olarak aşağıdaki çözümler uygulanmaktadır:

- Daha büyük nötr iletken kesiti ve kondansatör amperajı seçilmesi
- K-faktörlü transformatörler kullanmak
- Pasif ve aktif filtre uygulamak

Harmonik sorunlarını azaltmak için en uygun seçenek yüklerin tasarımını değiştirerek harmonik akım üretimini sınırlandırmaktır. Bu yaklaşımda, yüklerin temel frekans dışındaki diğer frekanslardaki harmonik üretimleri sınırlandırılmalıdır. Sınırlama yaklaşımı, en fazla bilgisayarları ve elektronik kontrollü donanımları etkilemektedir. Bu nedenle birçok üretici, ek yatırım gerektirmesi nedeniyle bu sınırlamalara karşı çıkmaktadır. Yürürlüğe giren standartlar ile elektriksel cihazlara üretim aşamasında harmonik sınırlar getirilmiştir:

- TS EN 61000-3-2 standardında faz başına 16A'den küçük, tek fazlı veya üç fazlı yüklerin harmonik akım sınırlarını düzenlemektedir [26].
- EN 61000-3-4 standardı ise faz başına 16A'den büyük yükler için harmonik akım sınırlarını düzenlemektedir.
- IEEE'nin tek fazlı yükler için harmonikleri inceleyen çalışma grubu, akımı 40A'den küçük tek fazlı yükler için benzer bir taslak standart (P1495) geliştirmektedir [27]. Bununla beraber sınırların ne olması konusunda hala bir uzlaşma yoktur.

Avrupa Birliği'nde geçerli olan TS EN 61000-3-2 standardı, üreticilerin ürünlerindeki harmonik akım tüketimine sınırlama getiren yaklaşımı benimsemiştir. Bu standart, faz başına akımı 16A'den küçük tek fazlı veya üç fazlı bütün yükleri kapsamaktadır. Standart, elektriksel yükleri Çizelge 5.9' da gösterildiği gibi sınıflandırmaktadır. Her bir sınıftaki donanım için geçerli olan harmonik akım sınırları, Çizelge 5.10, 5.11, 5.12, ve 5.13' te gösterilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, bu sınırların her bir harmonik derecesi için ayrı ayrı verilmiş olmasıdır.

Çizelge 5.9 TS EN 61000-3-2 yük sınıfları

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

Çizelge 5.10 A sınıfı donanım için harmonik sınır değerleri

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

Çizelge 5.11 B sınıfı donanım için harmonik sınır değerleri

Harmonik Derecesi (n)	İzin verilen maksimum harmonik akımı (A)
Tek Harmonikler	
3	3,45
5	1,71
7	1,155
9	0,60
11	0,495
13	0,315
$15 \leq n \leq 39$	$3,375/n$
Çift harmonikler	
2	1,62
4	0,645
6	0,45
$15 \leq n \leq 39$	$2,76/n$

Çizelge 5.12 C sınıfı donanım için harmonik sınır değerleri

Harmonik Derecesi (n)	Tek frekanstaki giriş akımının yüzdesi olarak ifade edilen izin verilen maksimum harmonik akımı (A)
Yalnız Tek Harmonikler	
2	2
3	30xDevrenin güç faktörü
5	10
7	7

9	5
$11 \leq n \leq 39$	3

Çizelge 5.13 D sınıfı donanım için harmonik sınır değerleri

Harmonik Derecesi (n)	Watt başına izin verilen en büyük harmonik akım (mA/W)	İzin verilen maksimum harmonik akımı (A)
Yalnız tek Harmonikler		
3	3,4	2,3
5	1,9	1,14
7	1	0,77
9	0,5	0,4
11	0,37	0,33
$13 \leq n \leq 39$	$3,85/n$	$2,25/n$

BÖLÜM VI

HARMONİKLERİN GİDERİLMESİ VE YAPILAN ÖLÇÜMLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde genel olarak harmonik probleminin çözümü için kullanılan yöntemler ile özel olarak dağıtım şebekesinde alınan ölçümlere göre ne yapılması gerektiği konusu üzerinde durulacaktır.

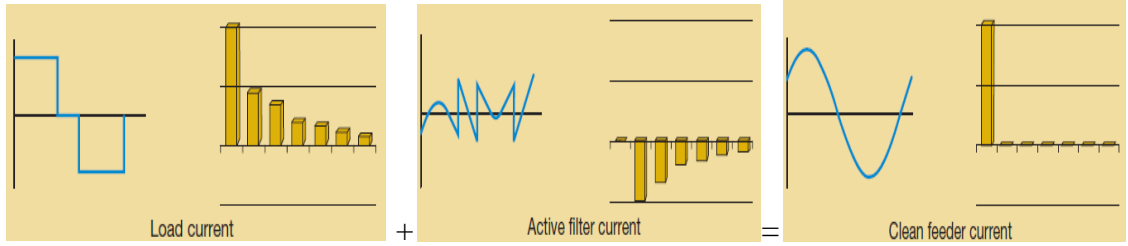
6.1 Harmonik Filtreler

Harmonik filtreler, geleneksel olarak aktif ve pasif filtre olarak iki ayrı başlık altında incelenebilir. Pasif LC filtreler, hat akımı harmoniklerini yok etmek ve yükün güç faktörünü iyileştirmek amacıyla kullanılır. Bununla birlikte uygulamada, bu pasif filtrelerin seri ve paralel rezonans gibi bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bu problemleri yok etmek için ise aktif güç filtreleri geliştirilmiştir. Tristör ve diğer yarıiletken elemanlar kullanılarak alternatif gücün yarı iletkenlerle denetimi; ayarlanabilir hız sürücüleri, fırınlar ve güç kaynakları gibi elektriksel yüklerle kontrollü elektrik gücü verebilmek için oldukça geniş bir biçimde uygulanmaktadır. Ayrıca bu tür denetleyiciler, HVDC (yüksek gerilimle DA enerji iletimi) sistemlerinde ve yenilenebilir elektrik güç üretiminde de kullanılmaktadır. Yarı iletkenler kullanılarak yapılan dönüştürücüler, doğrusal olmayan yüklerde şebekeden harmonik ve akımın reaktif bileşenini çekmektedir [28].

6.1.1 Aktif Filtreler

Harmonikleri azaltmak için LC filtreler, AA yüklerin güç katsayısını arttırmak için ise kondansatörler kullanılır. Bununla birlikte pasif filtrelerin boyutları oldukça büyüktür. Ve bu filtrelerde rezonans problemi vardır. Güç şebekelerinde harmonik kirliliğin artması, araştırmacıları güç kalitesini esnek ve dinamik çözümler üretmeye yöneltmiştir. Aktif filtre olarak bilinen bu sistemler; aktif güç hat düzenleyicileri (APLC: Active Power Line Conditioner), ani reaktif güç kompanzatorleri (IRPC: Instantaneous Reactive Power Compensator), aktif güç filtreleri (APF: Active Power Filter) ve aktif güç kalite düzenleyici (APQC: Active Power Quality Conditioner) olarak da adlandırılmaktadırlar. Ayrıca harmonikler, reaktif güç, yük dengesi, doğrusal ve

doğrusal olmayan yüklerde nötr akım kompanzasyonu üzerine de bir çok çalışma yapılmaktadır. Aktif filtre ile harmonikli yük akımlarının sönümlenmesi amaçlanmaktadır. (Şekil 6.1) Bu çalışmada aktif filtre teknolojisi, günümüzde kullanılan farklı konfigürasyonlar, kontrol yöntemleri, ekonomik ve teknik özellikler, özel uygulamalar için aktif filtrelerin seçimi gibi konular açıklanmaktadır [29].



Şekil 6.1 Harmonikli yük işaretinin aktif filtre ile düzeltilmesi

Şebekede aktif filtre teknolojisi, harmonik, reaktif güç ve nötr akım kompanzasyonu için kullanılmaktadır. Ayrıca üç fazlı sistemlerde; gerilim harmoniklerini yok etmek, uç gerilimini düzenlemek, gerilim fliklerini önlemek ve gerilimi dengelemek amacıyla kullanılmaktadır. Bu özellikler, ihtiyaçlara ve kontrol stratejilerine bağlı olarak tek veya kombinasyon şeklindeki düzenlemeler ile elde edilir. Bu faydaların yanında aktif güç filtrelerinin pratik uygulamalarda şu dezavantajları da bulunmaktadır;

- İyi frekans cevabına sahip, düşük kayıplı ve büyük VA kapasiteli statik güç dönüştürücülerin gerçekleştirilmesi oldukça zordur.
- Aktif güç filtrelerinin ilk yatırım ve işletme maliyetleri, pasif filtreler ile karşılaştırıldığında oldukça yüksektir.

AA gücün yarı iletkenler ile kontrolünün geniş bir biçimde kullanımından sonra, güç kalitesi konusunda daha fazla önem kazanmaktadır. Aktif filtreler temelde, tek fazlı, üç fazlı (nötrsüz) ve üç fazlı nötrlü olmak üzere 3 sınıfa ayrılmaktadır.

Aktif güç filtrelerinin, reaktif güç kompanzasyonu ve gerilim regülasyonu sağladığı için güç düzenleyicisi olarak yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. AA gücün büyük bir bölümü ayarlanabilir motor hız sürücülerini gibi üç fazlı yükler tarafından tüketilmektedir. Aktif şönt, aktif seri ve ikisinin birleşimi olan aktif güç kalite düzenleyicileri, ayrıca bunlarla birleştirilen pasif filtreler ile farklı konfigürasyonlar kullanılmaktadır. Bilgisayar, fülöran lambalar gibi doğrusal olmayan yükler nedeni ile oluşan nötr akımı probleminin yok edilmesi, harmonik kompanzasyonu, yük dengesi,

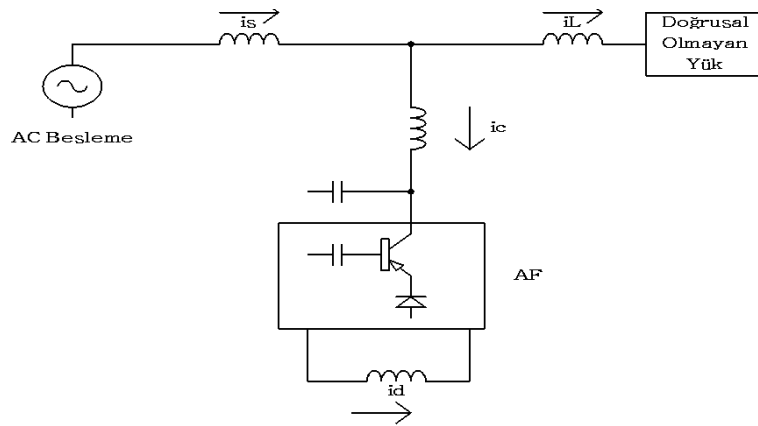
reaktif güç kompanzasyonu uygulanmaktadır. Ark fırını ve tahrik fırını gibi doğrusal olmayan reaktif yüklerin, reaktif güç dengesini sağlamak ve gerilim fliklerini önlemek için statik var kompanzatörler (SVC) kullanılmaktadır.

Aktif filtrelerde analog ve dijital elemanlar ile birlikte dijital sinyal işlemcilerin (DSP) de kullanılmaya başlaması ile filtrelerin dinamik ve kararlı durum performansını arttırmak için, bulanık mantık, yapay sinir ağları, Adaptif denetim gibi farklı denetim algoritmalarının uygulanması sağlanmıştır. Böylece aktif filtreler dinamik olarak değişen doğrusal olmayan yüklerle bile, hızlı ve düzgün çalışma yeteneğine sahiptir.

6.1.1.1 Aktif Filtre Konfigürasyonları

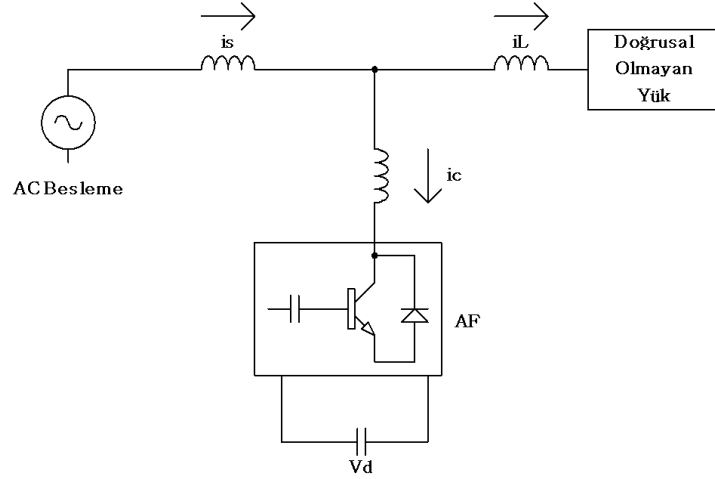
Aktif Filtreler, dönüştürücü tipine, şekline ve faz sayısına göre sınıflandırılabilirler. Dönüştürücü tipleri, akım kaynaklı veya gerilim kaynaklı evirici tipindedir. Bağlantı şekline göre, şönt, seri veya her ikisinin birleşimi olarak sınıflandırılabilir. Faz sayısına göre sınıflandırma ise iki kablolu (tek fazlı) veya 4 kablolu (üç fazlı nötrlü veya nötrsüz) olarak sistemlenir.

Dönüştürücü tipine göre sınıflandırma: Aktif Filtrelerde iki tip dönüştürücü kullanılmaktadır. Şekil 6.2' de akım kaynaklı PWM yapısı görülmektedir. Devrede ters gerilimin önlenmesi için, kendisinden komütasyonlu anahtarlama elemanına (IGBT) bir diyot seri bağlıdır. GTO- tabanlı düzenlemelerde ise, bu diyoda gerek yoktur, fakat anahtarlama frekansı sınırlıdır. Bu düzenleme oldukça güvenilir olmasına rağmen, kayıpları yüksektir ve paralel bağlı AA güç kondansatörünün büyük olmasına gereksinim gösterir. Ayrıca yüksek güçlerde performansı arttırmak için çok seviyeli olarak kullanılamazlar.



Şekil 6.2 Akım kaynaklı aktif filtre

Aktif Filtrelerde kullanılan diğer bir dönüştürücü ise Şekil 6.3’ de görüldüğü üzere gerilim kaynaklı PWM evirici yapısıdır. Büyük bir DA kondansatör ile düşük anahtarlama frekansında performansı arttırmak için çok seviyeli olarak genişletilebilmesi, daha ucuz ve daha hafif olması nedeniyle bu yapı daha çok kullanılmaktadır. Özellikle UPS tabanlı uygulamalarda, şebeke ile birlikte aynı köprü evirici devresi kritik doğrusal olmayan yüklerin harmoniklerini yok etmek için bir aktif filtre olarak kullanılabilirdiğinden daha fazla tercih edilmektedir.

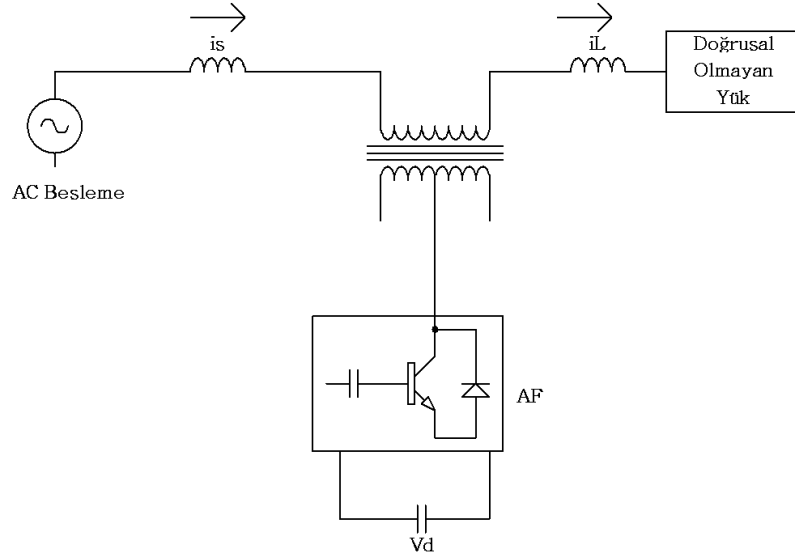


Şekil 6.3 Gerilim kaynaklı aktif filtre

Bağlantı şekline göre sınıflandırma: Aktif filtreler, seri ve şönt filtreler veya her ikisinin birleşimi olan birleşik güç kalite düzenleyicileri (UPFC: unified power quality conditioner) olarak sınıflandırılabilir. Aktif seri ve pasif şönt filtrelerin birleşimi hibrit filtre olarak tanımlanır. Şekil 6.3’ de akım harmoniklerini azaltmakta, reaktif güç kompanzasyonunda ve dengesiz akımları dengelemekte kullanılan aktif şönt filtre örneği görülmektedir. Akım harmonikleri doğrusal olmayan yükler tarafından sisteme verildiği için, aktif şönt filtrede yük tarafından kullanılır. Şönt filtre, bağlantı noktasında doğrusal olmayan yük akımı harmonik ve reaktif bileşenlerini yok etmek için karşı faza, eşit kompanze akımlar üretir.

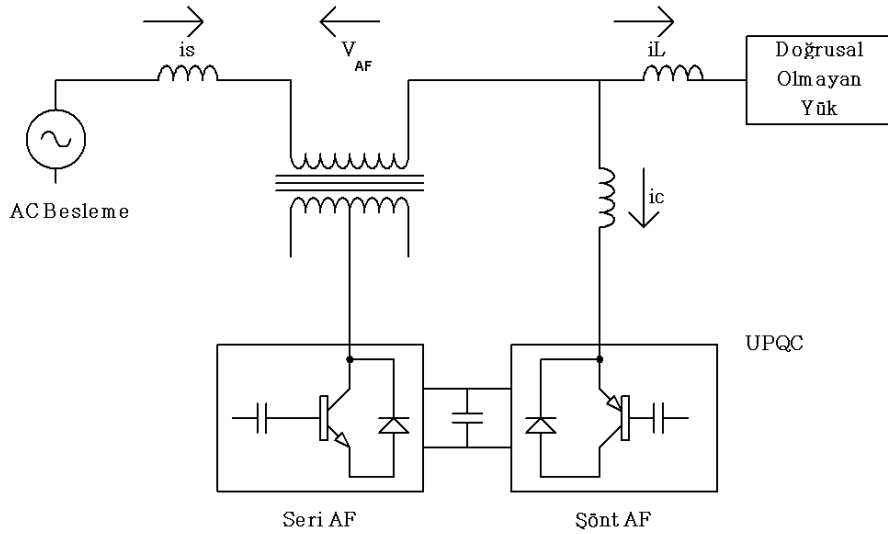
Şekil 6.4’ de aktif seri filtrenin temel blok diyagramı görülmektedir. Bu aktif filtre, gerilim harmoniklerini yok etmek, yük ve hattın uç gerilimlerini dengelemek için, hatta yükten önce bir transformatör yardımı ile seri bir şekilde bağlanır. Üç fazlı sistemlerde negatif dizi gerilimini azaltmak ve gerilimi regüle etmek amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca gerilim harmoniklerini kompanze etmek ve hat empedansları ile

kondansatörlerin oluşturduğu rezonansların etkilerini azaltmak için de kullanılmaktadırlar.



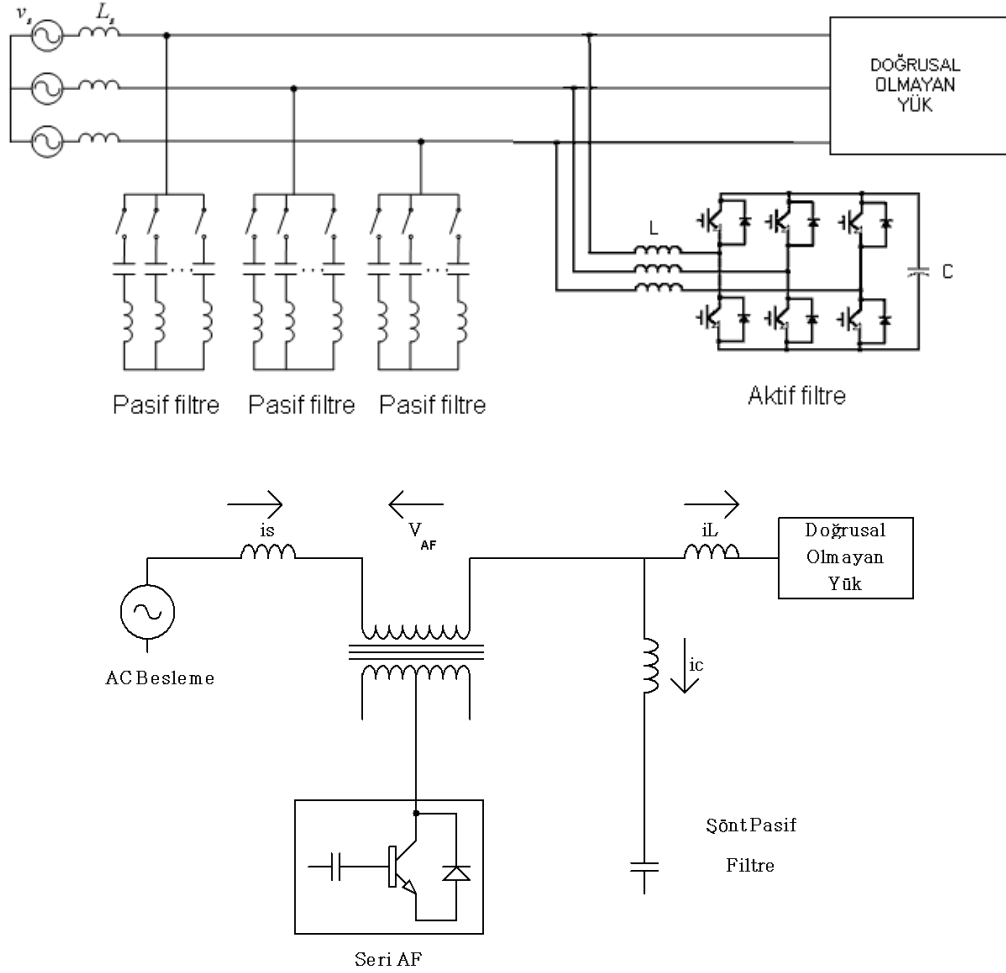
Şekil 6.4 Aktif seri filtre blok diyagramı

Şekil 6.5’ de aktif şönt ve aktif seri filtrelerin birleşimi olan birleşik güç kalite düzenleyicisi olarak adlandırılan aktif filtre görülmektedir. DA hat elemanı (bobin yada DA bara kondansatörü), aktif seri ve aktif şönt kompanzator olarak çalışan iki akım-kaynaklı yada gerilim kaynaklı köprü arasında paylaşılır. Bu filtreler, hem tek fazlı hemde üç fazlı sistemlerde gerilim ve akım harmoniklerini yok etmek amacıyla kullanılmaktadırlar. Diğer özellikleri ise, sistemin uç gerilimini dengelemesi ve negatif dizili akımları yok etmesidir.



Şekil 6.5 Birleşik güç kalite düzenleyicisi

Şekil 6.6’ da aktif filtre ile pasif şönt filtrenin kombinasyonu olan hibrit filtre görülmektedir. Aktif seri bölümünde kullanılan katı-hal elemanlarının, filtrenin boyutunu ve dolayısıyla maliyetini düşürmeleri nedeni ile bu filtreler daha fazla tercih edilmektedir. Hibrit filtrenin pasif şönt LC bölümü, düşük dereceli harmonikleri yok etmektedir.



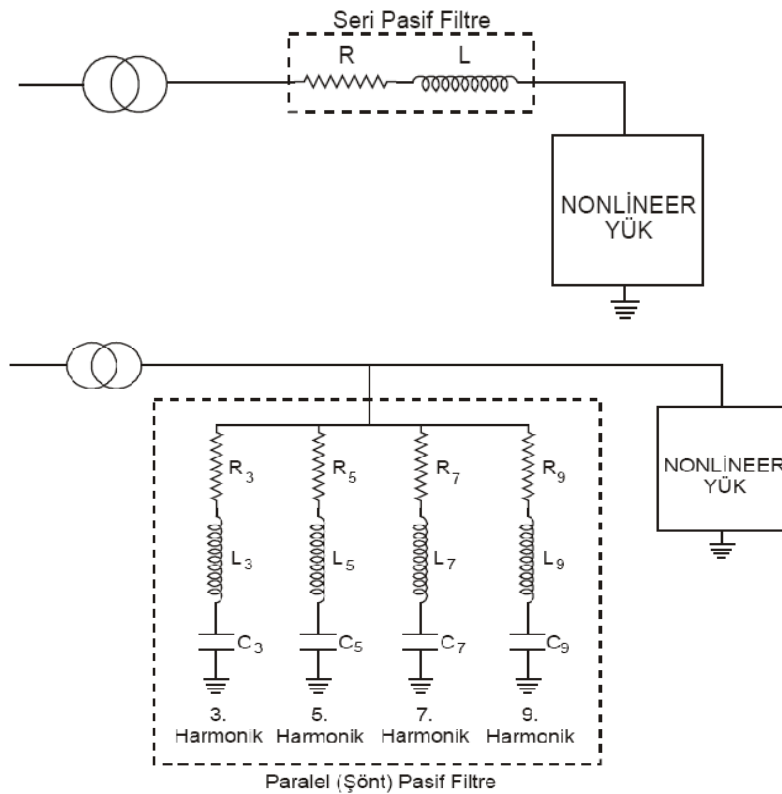
Şekil 6.6 Aktif seri pasif şönt filtrenin kombinasyonu olan aktif filtre

Kaynak-yük tabanlı sınıflandırma: Aktif filtreleri bu şekilde sınıflandırma, kaynağa ve yüke (tek fazlı, üç fazlı) bağlı olarak yapılır. Ayarlı hız sürücüler (ASD) gibi nötrsüz üç fazlı yükler, üç kablolu kaynaklardan beslenmektedirler. Ayrıca dört kablolu üç fazlı sistemlerden beslenen, doğrusal olmayan tek fazlı yüklerde vardır. Böylece aktif filtreler iki, üç, dört kablolu olmak üzere üçe ayrılırlar. İki kablolu aktif filtreler; aktif seri, aktif şönt ve ikisinin birleşimi olan birleşik hat düzenleyicilerinde kullanılır. Hem akım kaynaklı PWM eviricide, hem de gerilim kaynaklı PWM eviriciler bu aktif filtre

yapısında yer almaktadır. Seri aktif filtreler genellikle gerilim harmoniklerini yok etmek, şönt aktif filtreler ise reaktif güç kompanzasyonu ve akım harmoniklerini yok etmek amacıyla kullanılmaktadır. Şekil 6.6' daki konfigürasyonlar üç kablolu olarak genişletilebilmektedir. Aktif şönt filtreler, izolasyon transformatörlü üç adet tek fazlı aktif filtre ile tasarlanabilir. Böylece bağımsız faz kontrolü ve dengesiz sistemlerde güvenli kompanzasyon yapılmış olur.

6.1.2 Pasif Filtreler

Pasif filtre, bir güç kondansatörü ile uygun değerde bir indüktansın (reaktörün) seri bağlanması ile elde edilen rezonans devresidir. Bazı durumlarda dirençte ilave edilebilir. Böylece tesisin reaktif güç ihtiyacını karşılayan kompanzator, harmoniklerinde süzülme işini yerine getirir ve böylece ucuz bir yatırım ile filtreleme gerçekleşir. Bunun sonucunda tesisteki harmonik akımlar, başıboş olarak cihazlardan devre tamamlamak yerine, kendisine düşük direnç gösteren filtrelere doğru gidecektir. 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 kolu konulması gereklidir.



Şekil 6.7 Seri ve paralel şönt filtre şemaları

Pasif filtreler yapılarına göre; düşük ayarlı ve tam ayarlı olarak ikiye, amaçlarına göre ise; tıkama amaçlı (anti rezonans, de tuned), kısmi tıkamalı (partially) ve rezonans (tuned) filtreler olarak üç grupta incelenebilirler.

6.1.2.1 Pasif Filtre Çeşitleri:

Düşük ayarlı pasif filtreler: Düşük ayarlı pasif filtre sisteminde amaç kondansatörlerin sisteme olan paralel rezonans etkisini tamamen ortadan kaldırmak ve bu noktada empedansı, belirlenen rezonans frekansında sifıra eşitleyerek harmonik gerilimlerini minimuma indirmektir. Düşük ayarlı pasif filtreli kompanzasyon sistemlerinde, işletmedeki harmonikler yok edilmemekte, kondansatörlerin sistemde oluşturabileceği paralel rezonansın önüne geçilerek harmonik akım ve gerilim seviyelerinin yükselmesini önlemektir. Sonuç olarak, işletmedeki harmonik akım seviyesi, kompanzasyonun devre dışı bırakıldığı anlardaki seviyelere inmekte, buna bağlı olarak harmonik gerilimler azalmaktadır. Fakat sistem aynı zamanda mükemmel olarak kompanzasyonu da sağlamaya devam etmektedir.

Tam ayarlı pasif filtre: Ayarlı pasif filtreler de, filtreli kompanzasyon mantığı ile aynı olmakla beraber endüktans bobini, tesiste etkin harmonik frekansı veya frekanslarına eşit olacak şekilde tasarlanır. Ayarlı pasif filtreler, harmonik filtreli kompanzasyona kıyasla daha etkili, güç kayıpları ve kurulum maliyetleri daha yüksek bir sistemdir. Örneğin tesiste 5., 7. ve 11. Harmonikler baskın ise 250 Hz, 350Hz, ve 550 Hz' de seri rezonans devresi meydana getirilir. Fakat tesiste 5., 7., 11. Ve 13. Harmonikler baskın ise 250 Hz, 350Hz' de seri rezonans meydana getirilirken, 500 Hz' in üzerinde bir değerde geniş bantlı bir filtre devresi tasarlanarak seri rezonans devresi meydana getirilir.

Tıkama amaçlı (anti-rezonans, de-tunned) filtre: Sadece kompanzasyon gerektiren ve harmonik miktarı yok veya az olan endüstri tesisleri için uygundur. Besleme şebekesinde meydana gelebilecek geçici harmonik akımlardan (paralel rezonans) kapasitörleri koruduğu gibi, kapasitörlerin servise girdiği esnada çektikleri 200-300 kat akımları da tehlikesiz seviyelere indirmeye yararlar. De-tuned filtrelerde yaygın olarak 189 Hz. tercih edilir. Özet olarak harmonik olmayan şebekelerde bile, kondansatörler önüne filtre bağlanarak kondansatörler ile şebekenin rezonansı önlenmiş olur.

Kısmi tıkamalı (partally) filtre: 210-240 Hz arasında seçilebilir. Yaygın kullanımını 210 Hz' dir. Hem kompanzasyonu hem filtrelemeyi birlikte yapmak için en ucuz ve etkili filtreleme yöntemidir. Rezonans filtresine göre daha az risklidir. Şebekeden çekilen harmonik akımlar %90' lardan %10' a kadar inebilir. Kalan %90' ı filtreye gider.

Rezonans (tuned) filtre: Bazı durumlarda kısa devre gücü düşük, zayıf şebekelerde harmonik seviyeleri yönünden daha düşük durumlar istenmektedir. Böyle durumlarda standart de-tuned sistemlerin yapabileceğinden daha fazla harmonik eliminasyonu gerekmektedir. 240-250 Hz arası seçilebilir. Yüksek miktardaki harmoniklerin süzülmesi gereken yerler için uygunsu da, büyük riskleri beraberinde taşır. 210 Hz' de ayarlı filtreler 5. harmoniğe karşı (250 Hz) küçük empedans gösterip, üzerine alırken aynı filtre 7. Harmonik (350 Hz) ve daha üst harmonikleride kısmen yutarlar. Ama tercih edilmesi gereken kompanzatorlerin kademelerini ayrı ayrı frekanslara ayarlamaktır. Örneğin 3., 5., 7., 9. Harmonikler için sırasıyla 134 Hz, 210 Hz, 300 Hz, 380 Hz' e ayarlanmış filtrelerle daha iyi süzme gerçekleşir.

6.1.3 Filtre Seçiminde Kriterler

400 V şebekelerde kullanılan reaktif güç kompanzatorleri, filtre ile birlikte kullanılırsa daha yüksek gerilimlere maruz kalacağından, kapasitörlerin uzun ömürlü olması için gerilim yükselmesi göz önüne alınmalıdır [28]. Örneğin $U_{cn} = 400 V$ olan bir kapasitör 210 Hz, $p = \%5,67$

$$\text{Reaktif Faktörü} = p = \frac{X_l}{X_c} = \left(\frac{f}{f_r} \right)^2 \quad (6.1)$$

bir filtre ile birlikte kullanılırsa $U_n = 385 V$ olan bir şebeke voltajı, kapasitör terminallerinde

$$U_c = \frac{U_n}{1-p} \quad (6.2)$$

$U_c = \frac{385}{1-0,0567} = 409V'$ a ulaşır. 400 V kapasitörler 440 V a kadar dayanabilecek

şekilde imal edilirler. Bu nedenle böyle bir tesiste 400 V kapasitör kullanılabilir.

Diğer bir önemli konu ise, kapasitörlerin etkin gücü, uygulamada işletme geriliminin karesiyle artıp veya azalması söz konusudur.

Örnek olarak, $L_n = 0,61mH$ ($p = \%6$) olan bir filtre reaktörü, $Q_{cn} = 60kVAR$, $U_{cn} = 440V$ bir kapasitöre seri bağlanırsa, 385 V şebekeye filtreden geçen miktar,

$$Q_c = \frac{Q_{cn} U_n^2}{(U_{cn}^2 (1-p))} \quad (6.3)$$

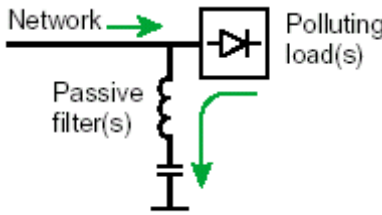
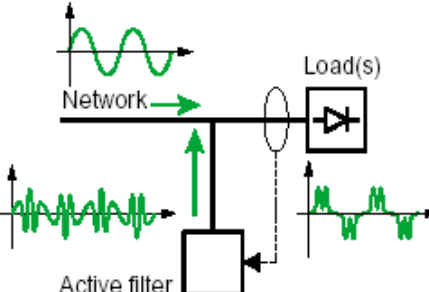
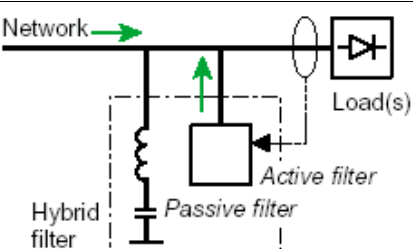
$Q_c = 60 \times 385^2 \div 440^2 \times (1 - 0,06) = 49 kVAR$ çıkmaktadır. Ayrıca, bu kapasitör, $L_n = 0,61 mH$ ile seri bağlanırsa, seri rezonans frekansı

$$f_r = U_{cn} \sqrt{\frac{f}{2\pi Q_{cn} L_n}} \quad (6.4)$$

$f_r = 440 \sqrt{\frac{50}{2 \times 3,14 \times 60 \times 0,61}} = 205Hz'$ dir. Böylece 385 V 490 kVAR'lık bir filtreli kompanzasyon için 10 ad. 400 V luk 46 kVAR veya 10 ad. 440 V 60 kVAR'lık kondansatör gereklidir.

Standart kompanzatorler, nominal akımın %30 fazlasına kadar sürekli yüklenebilirler. Bu, kapasitör akımını taşıyacak olan reaktörler de temel dalgaya ilave %30 harmonik akımlarını da taşıyacak şekilde toleranslı imal edilmelidir. Hatta harmonik akımlar kısa sürede aşırı seviyelere yükselebileceğinden, reaktörlerin nominal akımının yüzde 70-80' i kadar aşırı akımlarda dahi mağnetik devresinin doymaması istenir.

Dikkat edilmesi gereken bir diğer hususta, kapasitörlerin yıllar itibarıyla değer kaybetmemesidir. Kapasitansı düşmüş kapasitörler, filtrenin rezonans frekansının da kaymasına sebep olurlar. Bunun sonucu filtreleme yetersiz olacağı gibi, rezonans riskleride ortaya çıkarır. Kısacası filtrelere bağlı kondansatörlerin çektiği akım zaman zaman ölçülerek değer kaybı izlenmelidir.

Filtre	Prencip	Özellikler
Pasif	<p>Ortadan kaldırılacak her bir harmonik frekansı için ayarlanan by-pass seri AG devresi</p> 	<p>Harmonik akımında limit yok. Reaktif gücün dengelenmesi Bir veya daha fazla harmonik sırasının ortadan kaldırılması (genellikle 5, 7, 11). Dengelenecek bir veya iki sıra için bir filtre. Tesisat değişiminde harmoniklerin artma riski. Dış kirlenmeden kaynaklanan aşırı yük riski. “Tesisat” filtresi (global) Mühendislik durum çalışması.</p>
Aktif	<p>Yükün oluşturduğu tüm harmonikleri iptal eden akımın üretilmesi.</p> 	<p>Özellikle “makinelî” filtrelemeye uygun (lokal) çözüm. Geniş bir frekans bandı üzerinde filtreleme (harmonik sırası 2 ila 25’in ortadan kaldırılması) Kendi kendine ayarlama: Tesisat değişikliğinin hiçbir etkisi yoktur. Yük ve harmonik spektrumunda tüm ayarlamalara uyum sağlar. Her tür yük için sınırsız, esnek çözüm. Basit mühendislik çalışması.</p>
Karma		<p>Pasif ve aktif filtreleme çözümlerinin avantajlarını sunmaktadır ve geniş bir güç ve performans yelpazesini içermektedir: Geniş bir frekans bandı üzerinde filtreleme (2 ila 25 numaralı harmoniklerin ortadan kaldırılması), Reaktif gücün dengelenmesi, Akım filtreleme için yüksek kapasite, “tesisat” filtreleme için iyi teknik-ekonomik çözüm</p>

Şekil 6.8 Pasif, aktif ve karma filtrelerin prensipleri ve basit şemaları

6.1.4 Harmonik Filtreli Kompanzasyon

Harmonik filtreli kompanzasyon tesisinin tasarım ve yapısal özellikleri:

Bir harmonik filtreli kompanzasyon tesisinin asgari özellikleri şu şekilde olmalıdır.

- Sistemin toplam reaktif güç ihtiyacını karşılama süresi 5-60 sn arasında ayarlanabilmelidir.
- Otomatik kompanzasyon sistemlerinde reaktörler, kademelerin devreye alınması esnasında oluşabilecek geçici ani deşarj akımlarını sınırlandırmalıdır.
- İyi bir harmonik filtre yapılabilmesi için, sistemin rezonans frekansı en uygun değerde dizayn edilmelidir.
- Her reaktör üzerinde bulunan termistörler ile sıcaklık kontrol edilmeli ve aşırı ısınma durumunda ve/veya sistemin rezonansa gitmesi durumunda sistem ilgili kademeyi devre dışı bırakarak korumaya almalı, sıcaklık normale döndüğünde tekrar devreye almalıdır.
- Her bir kademe izoleli sigorta grupları veya sigortalı yük ayırıcı tertibatı ile korunacaktır.
- Sistem, fazlardan birine ait herhangi bir NH sigortanın atması durumunda (faz kontrol rölesi) ilgili kademeyi devre dışı bırakarak korumaya alacak ve pano kapağında sinyal lambası ile sigorta attı alarmı verilecektir.
- Kompanzasyon sisteminde kullanılacak olan reaktif güç kontrol rölesi; düşük gerilim, aşırı gerilim, ölçü akımı düşük, ölçü akımı yüksek, harmonik akım ve gerilim bozulma, aşırı sıcaklık, yetersiz kompanzasyon, aşırı kompanzasyon alarmları için röle çıkışına sahip olmalı ve scada sistemine bilgi aktarabilmelidir.

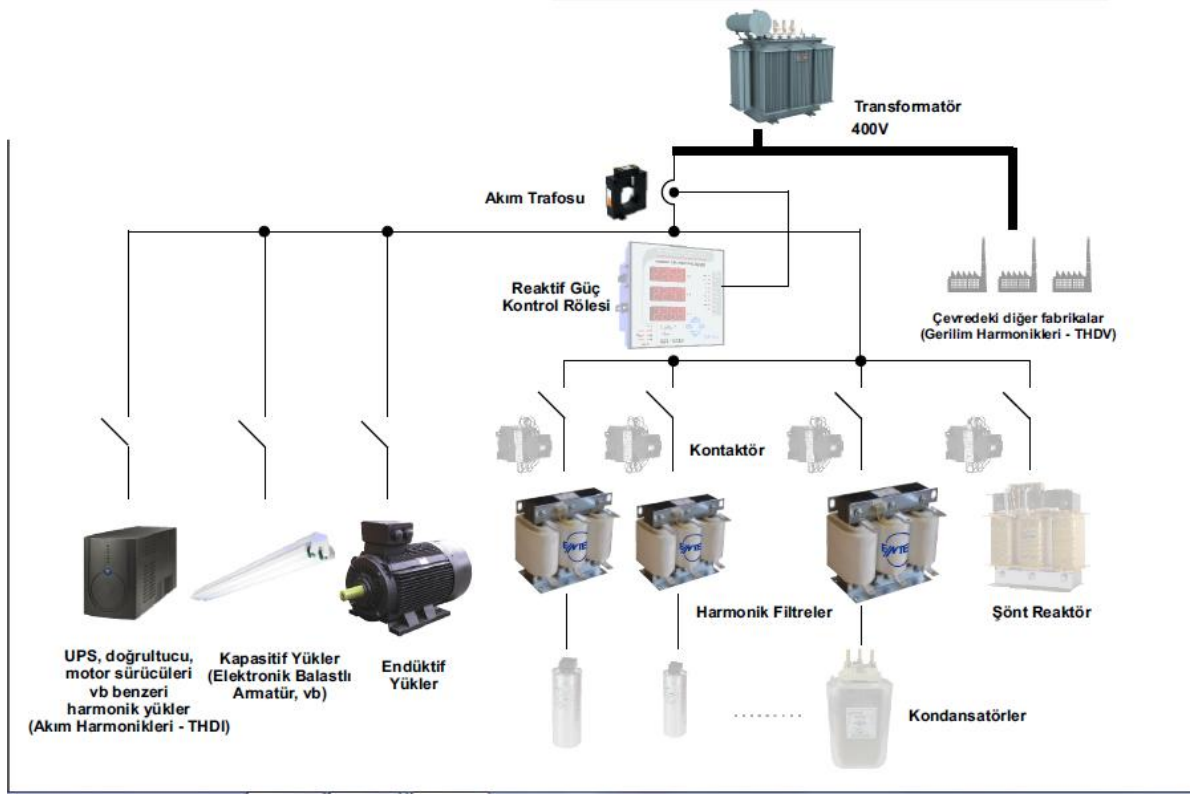
Kondansatörlerin özellikleri:

- Kondansatörler TS EN 60831-1 ve TS EN 60831-2 standartlarına uygun olmalıdır [30, 31].
- Kendini onarabilen metalize polipropilen filminden imal edilmiş, tamamen kuru tip ve 3 fazlı olmalıdır.
- Güç kayıpları deşarj direnci dahil 0,5 W/kVAR' a eşit veya daha az olmalıdır.

- Kondansatörlerin deşarj edilmesi deşarj bobini veya deşaj direnci ile sağlanacaktır.
- Deşaj gerilim süresi IEC 60831-1,2 standartlarını sağlamalıdır [32].
- Çalışma sıcaklığı -25 ile +55 °C arasında olmalıdır.
- Kondansatörlerin aşırı basınç valf korumasına sahip olmalıdır.
- Otomatik kompanzasyon sisteminde 520 V gerilim altında sürekli çalışmaya uygun olmalıdır.
- Kondansatörler 1 dakika süre ile 3 kV gerilime karşı izolasyon gösterebilmelidir.
- Yıldırım darbe dayanım gerilim 1,2/50 µs : 15 kV olmalıdır.
- Tek gövdede kondansatör etiket gücü 20-30 kVAR arasında olmalıdır.
- Kapasite toleransı -%5 ile +%10 arasında olmalıdır.

Harmonik Filtre Reaktörlerinin Özellikleri:

- Harmonik filtre reaktörleri TS EN 60076-6 standartına uygun olacaktır [33].
- Reaktörler 3 fazlı, düşük kayıplı silisli sac nüveli ve hava aralıklı olmalıdır.
- Reaktörler enaz F sınıfı izolasyon seviyesine sahip olmalıdır. Ancak termistör ile maksimum ısınma 120 °C' da sınırlansırılmalıdır.
- Reaktörlerin giriş ve çıkış uçları sarım malzemesi ile ayrı olması durumunda birleştirme işlemi basınç altında presleme yöntemi ile yapılacaktır.
- Endüktivite toleransı en fazla \pm %3 olmalıdır.
- Reaktörlerin asgari doyma akımı, akord frekansı 165 Hz ve altında olanlar için en az 1,6 In akord frekansı 165 Hz' den büyük 195 Hz den küçük olan sistemler için en az 1.8 In ve akord frejansı 195 Hz' den büyük olan sistemler için en az 2 In olmalıdır.
- Reaktörlerin endüktans değerindeki sapma linearite akımında %5' i geçmemelidir.



Şekil 6.9 Harmonik filtreli bir tesis

6.1.5 Rezonans:

Harmonik akımlar şebeke empedansı üzerinde Ohm yasasına göre harmonik gerilim endüklerler. Bu oluşan gerilimin değeri üretilen harmonik akımın değerine bağlı olduğu kadar, ilgili şebekenin empedansına da bağlıdır. İlgili şebekede toplam empedansı oluşturan iki temel ve birbirine paralel empedans göz önüne alınmalıdır. Bunlardan birincisi, trafo empedansı olan;

$$Z_{tr} = \omega L \quad (5.5)$$

ve kompanzasyon sisteminin empedansı olan;

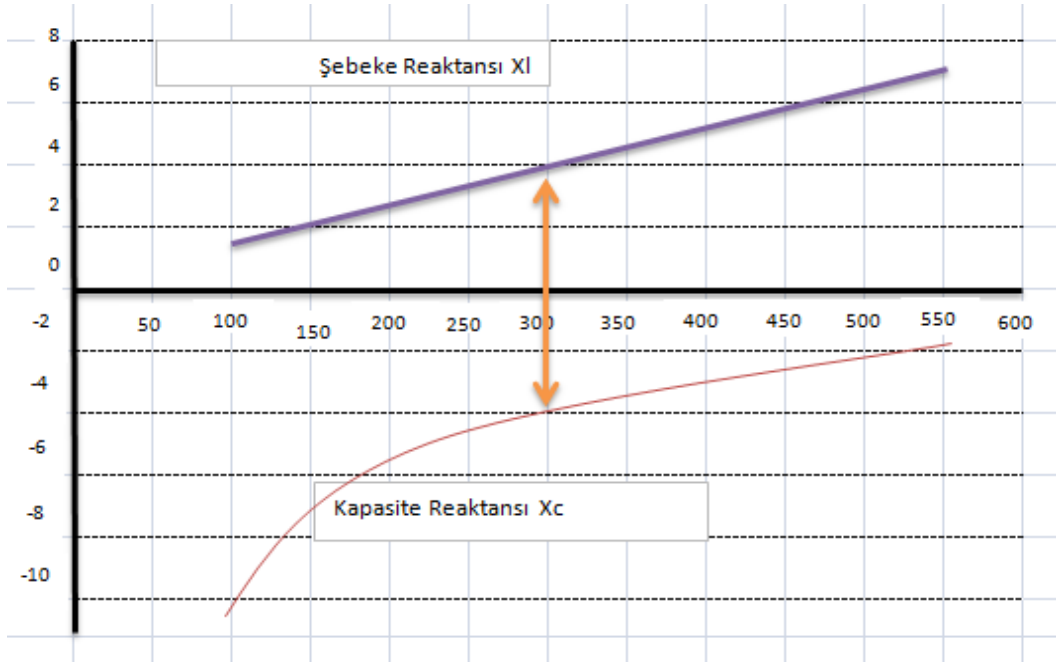
$$Z_k = \frac{1}{\omega C} \quad (6.6)$$

dir. Bu iki empedansın paralel devresinin toplam empedansı;

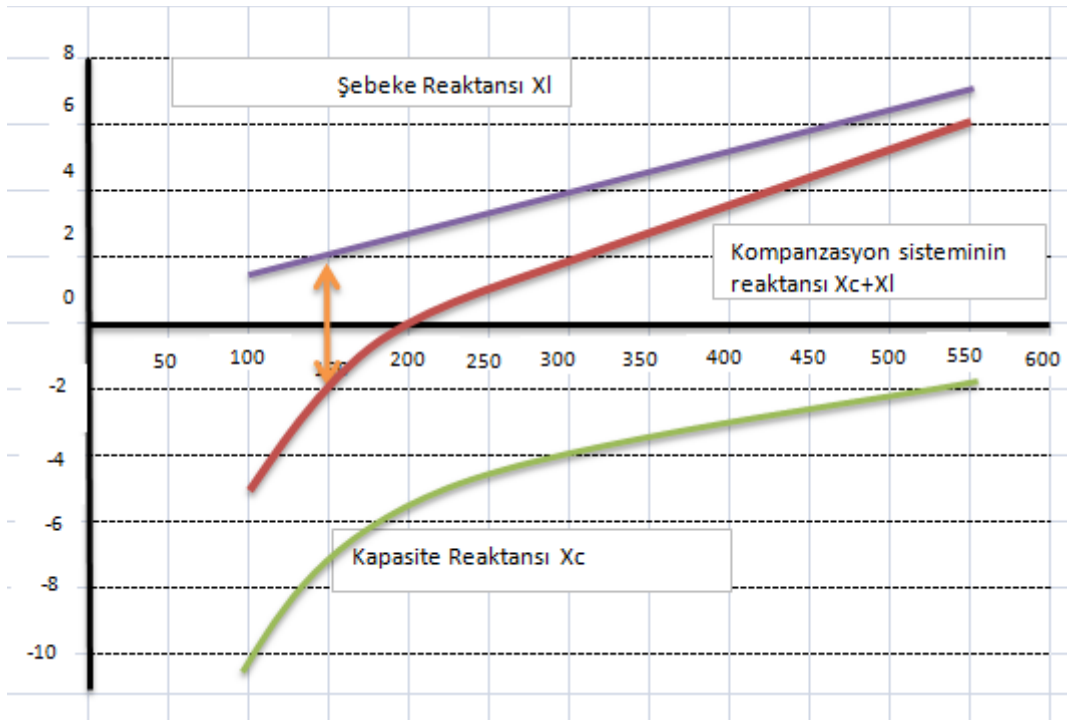
$$Z_{toplam} = \frac{\omega L}{(1 - \omega^2 LC)} \quad (6.7)$$

olarak hesaplanır. Bu eşitlik ile ifade edilen paralel empedansın paydasındaki $1 - \omega^2 LC$ değeri sıfır olursa sistem ilgili frekans için teorik olarak sonsuz empedans seviyesine ulaşır. Bu duruma paralel rezonans denir. Diğer bir ifadeyle; şebeke ve kondansatör reaktansları frekansa göre değişirler. Şekil 6.10' da görüldüğü üzere kondansatör reaktansı X_C ile şebeke reaktansı X_L 'nin mutlak değeri belirli bir frekansta birbirine eşit olurlar. Bu durumda şebeke reaktansı ile kompanzasyon sistemindeki kondansatörün reaktansı sönümsüz bir salınım (rezonans) durumunun ortaya çıkmasına neden olurlar. Şebeke reaktansının değeri sabit olmayıp şebekenin o anki değerine bağlı olarak değiştiğinden sönümsüz salınımın gerçekleştiği frekans değeri tam olarak hesaplanamaz, ancak bu değerler genelde 250 Hz ile 350 Hz arasındadır. Şebeke reaktansındaki değişimler sonucu rezonansın gerçekleştiği değer 5. Harmonik frekansı olan 250 Hz' e veya 7. Harmonik değeri olan 350 Hz' e gelirse, gerilimin 5. Veya 7. Harmonik değerleri toprağa kısa devre olur. Bu durum kondansatörlerin zarar görmesine yol açar. Bu duruma engel olabilmek için kondansatör reaktansı ile şebeke reaktansının mutlak değerinin eşit olduğu frekans değerinin güvenli bölgeye çekilmesi gerekmektedir.

Bu nedenle kompanzasyon sistemlerindeki kondansatör gruplarının önüne uygun değerli şok bobini yerleştirilmesi gerekmektedir. Şekil 6.11' den görüleceği üzere kondansatör grubu ve şok bobinden oluşan kompanzasyon sisteminin frekansının 210 Hz' e çekilmesiyle tüm sistemin rezonans frekansı 130 Hz' e getirilmiştir. En yakın kritik rezonans noktası 50 Hz olup erişilmekten çok uzaktadır. Ayrıca sistem 250 Hz' de rezonansa girmez çünkü en düşük şebeke reaktansında bile 210 Hz' den sonra rezonans oluşması, sisteme eklenen reaktör ile engellenmiştir.



Şekil 6.10 Kondansatör ile şebekenin rezonans oluşturması



Şekil 6.11 Şok bobini eklenmiş kompanzasyon sistemi

Bu sistemin uygulanmasında dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri; kullanılan kondansatörlerin gerilim dayanım değerleridir. Oluşan rezonans sistemdeki yüklemeler, kondansatörlerin üzerindeki gerilimlerin artmasına yol açar. Bu durumda

kondansatörlerin zarar görmemesi için şebekenin nominal geriliminin üzerindeki gerilimlere dayanabilecek şekilde seçilmesi gerekir.

Kondansatörlere seri olarak bağlanan harmonik filtre reaktörleri, sistemin kompanzasyon gücünü de etkilemektedir. Dolayısıyla kondansatörler seçilirken dikkat edilmesi gerekir.

Teorik olarak sonsuz büyüklükteki empedans demek olan bu değer pratik uygulamalarda üretilen harmonik akımların 3 ila 6 katı arasında amplifiye olmasına neden olur. Bu durumda trafo hattı için ve kompanzasyon sistemi için en tehlikeli boyutlara yükselir. Artık standart üretimler (5. Harmonik için %20 vb.) söz konusu değildir. Bu değerler devreye giren kompanzasyon miktarına bağlı olarak %100 değerine kadar yükselebilir.

Sistemin ne zaman ve hangi frekans değeri için paralel rezonansa gireceği şu şekilde hesaplanır.

$$n = \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}} \quad (6.8)$$

$$S_k = \text{İlgili trafonun kısa devre gücü} = \frac{S_n}{U_k} \quad (6.9)$$

$$Q_c = \text{Devreye paralel bağlı olan kondansatör gücü (kVAR)} \quad (6.10)$$

Sistemin rezonans frekansı trafonun kısa devre gücü ile doğru, hat üzerine paralel olarak bağlı kondansatör gücü ile ters orantılıdır. Devreye giren kondansatör gücü arttıkça rezonans frekansı 5. Ve 7. gibi düşük frekanslı harmonik noktalarına doğru ilerler. Ancak rezonans frekansı hangi harmonik bileşenine gelirse o harmonik sistem için tehlikeli harmonik haline gelir. Bu nedenle sistemde üretilen hiçbir harmonik frekansı için rezonansa izin verilmemelidir.

Çizelge 6.1 Reaktörlerin seri rezonans frekans tablosu

$f_r = p$ faktörü	50 Hz için rezonans rekansı	C Min. Gerilim Değeri
% 5,67	210 Hz	424 V
% 7	189 Hz	430 V
% 14	134 Hz	465 V

Çizelge 6.1' e göre %5,67 ve %7 P faktörü için minimum 440 V kondansatör, P faktörü % 14 için tercih edilecek kondansatör 525 V olmalıdır.

Rezonansa engel olmak, harmonik filtrasyonun ön koşuludur. Bunu yapabilmek için kondansatör grupları reaktör ile desteklenmeli ve bu iki devre elemanı ile bir odaklanma frekansı elde edilmelidir. Bu frekans şebekede var olan en düşük frekanslı harmonik akımın bir geri noktası olmalıdır. Tipik üç fazlı sistemlerde oluşan harmonik seviyesinin 5. Harmonikten (250 Hz) başlayacak olması bu odaklanma frekansının 189 ie 223 Hz aralığında olması gerekir.

6.2 Yapılan Ölçümlerin Değerlendirilmesi

TR-2/9 trafo bölgesine yapılmış olan ölçümler incelendiğinde:

- Çizelge 4.1' e göre TR-2/9 un 1 nolu çıkışında toplam 48 kW' lık yük vardır. Buna karşın 17,5 kVAR' lık endüktif yük bulunmaktadır. Çizelge 4.1 ve Şekil 4.6' ya bakıldığında, bu çıkıştaki; THD V= %3 tür, transformatör için anma yükünde %5 sınır olduğu kabul edilirse gerilim için belirlenen standart değerlerin altında kaldığı görülmektedir. Bu nedenle gerilim de problem yaratacak bir bozulmanın söz konusu olmadığı ifade edilebilir. Ancak ortalama THD I= %13,50 olduğu görülmüştür, Bölüm 4' te bahsedildiği üzere Transformatör akımındaki harmoniklerin IEEE C 57.12.00-1987 tarafından % 5 olarak sınırlandırılmış olduğu için kabul edilebilir değerlerin üzerindedir.
- Çizelge 4.2' ye göre TR-2/9 un 2 nolu çıkışında toplam 20 kW' lık yük vardır. Buna karşın 3 kVAR' lık endüktif yük bulunmaktadır. Çizelge 4.2 ve Şekil 4.11' e bakıldığında, bu çıkıştaki; THD V= %3 tür, transformatör için anma yükünde

%5 sınır olduğu kabul edilirse gerilim için belirlenen standart değerlerin altında kaldığı görülmektedir. Bu nedenle gerilim de problem yaratacak bir bozulmanın söz konusu olmadığı ifade edilebilir. Ancak ortalama THD I= %5,2 olduğu görülmüştür, bölüm 4' te bahsedildiği üzere Transformatör akımındaki harmoniklerin IEEE C 57.12.00-1987 tarafından % 5 olarak sınırlandırılmış olduğu için kabul edilebilir değerlerin üzerindedir.

TR-2/10 trafo merkezinin ana girişinde yapılmış olan ölçümler incelendiğinde;

- Çizelge 4.3' e göre TR-2/10 un ana girişinde toplam 91,6 kW' lık yük vardır. Buna karşın 42,87 kVAR' lık endüktif yük bulunmaktadır. Çizelge 4.3 ve Şekil 4.16' ya bakıldığında, buradaki THD V= %2,17 dir, transformatör için anma yükünde %5 sınır olduğu kabul edilirse gerilim için belirlenen standart değerlerin altında kaldığı görülmektedir. Bu nedenle gerilim de problem yaratacak bir bozulmanın söz konusu olmadığı ifade edilebilir. Ancak THD I= %11,12 olduğu görülmüştür, bölüm 4' te bahsedildiği üzere Transformatör akımındaki harmoniklerin IEEE C 57.12.00-1987 tarafından % 5 olarak sınırlandırılmış olduğu için kabul edilebilir değerlerin üzerindedir. Bu nedenle bu trafo merkezine harmonik filtreli kompanzasyon tesisi kurulması gerekmektedir. Bu tesiste kullanılacak olan harmonik filtreli kompanzasyon tesisinin özellikleri aşağıda yapılmış olan hesaplamalara göre:

Formül 6.3' den $Q_c = 42,87 \text{ kVAR}$ olması gerekir (ölçüm sonucuna göre), $U_n = 415 \text{ V}$ şebekede olan gerilim, kullanılacak olan kondansatörün normal işletme gerilimi $U_{cn} = 440 \text{ V}$ (filtre nedeni ile kondansatörler üzerinde gerilim yükseleceği için 440 V luk seçilmesi yapılacak olan tesisin uzun ömürlü olmasını sağlayacaktır). Rezonans riskinden kaçınmak için genellikle rezonans frekansının %20 kadar ötelelerde endüktans seçilir, en yaygın kullanılan filtreler 189, 210 Hz' dir [34]. Yapılan ölçüm incelendiğinde 3. Harmoniğin etkin olduğu bu nedenle bu harmoniğin yok edilmesi için rezonans frekansın 3. Harmoniğe ($n=3$) ayarlanması gerekir. $TemelFrekans = f = 50\text{Hz}$, $f_r = nf$ 'den; $f_r = 3 \times 50 = 150\text{Hz}$, ancak yukarıda bahsedildiği gibi rezonans riskinden kaçabilmek için %20 fazla alınırsa $f_r = 180\text{Hz}$ çıkar ancak uygulamada bu değere en

yakın 189 Hz' lik filtreler kullanıldığı için, hesaplamalarda kullanılacak olan $f_r = 189\text{Hz}$ olacaktır. Formül 6.1' den

$$\text{ReaktörFaktörü} = p = \left(\frac{f}{f_r}\right)^2 = \left(\frac{50}{189}\right)^2 = \%7$$

çıkmaktadır, bulunan bu değerler kullanılarak Formül 6.3' ü kullanarak sistemde kullanılacak olan Kondansatör gücünü;

$$Q_c = \frac{Q_{cn} U_n^2}{(U_{cn}^2 (1-p))} \rightarrow 42,87 = \frac{Q_{cn} \times 415^2}{440^2 \times (1-0,07)} \rightarrow Q_{cn} = 44,817\text{kVAR}$$

çıkmaktadır. Ölçüm anında devrede olmayan yükler ve kondansatör kayıpları da dikkate alınarak toplam 45 kVAR gücünde kondansatör kullanılacaktır. Sabit bir yük olmadığından ve sistemin gereksinim duyabileceği ara değerler için 8 kademeli kondansatör grubu kullanılarak reaktif güç kontrol rölesi ile birlikte otomatik kompanzasyon yapılması uygun olacaktır. Bu nedenle her bir kademede kullanılacak olan kondansatör gücü = $\frac{45}{8} = 5,625\text{kVAR}$ dir. Çizelge 6.2' den 5,6 kVAR, 440 V luk, $p = \%7$, için $L_n = 7,66\text{ mH}$ bulunur.

Tip	Q_{cn} (kVA) 50 Hz			C_v (μF)	L_n (mH)		I_n (A)	Kayıp (W)	Ağırlık (kg)	(mm)					
	400 V	440 V	525 V		$p=\%5,67$ ($f_r=210\text{ Hz}$)	$p=\%7$ ($f_r=189\text{ Hz}$)				L	I	B	H	b	
HFR5/4/5	K6	4.7	5.7	8.1	3x32	6.12	-	7.65	50	10,5	180	120	95	160	85
HFR5/4/7	K6	4.7	5.6	8	3x31	-	7.66	7.65	50	11	180	120	95	160	85
HFR10/4/5	K6	9.4	11.4	16.2	3x63	3.06	-	15.3	65	12	180	120	95	160	85
HFR10/4/7	K6	9.3	11.2	16	3x62	-	3.84	15.3	65	12	180	120	95	160	85
HFR15/4/5	P8	14.1	17.1	24.3	3x93	2.04	-	23	76	23	240	160	160	210	112
HFR15/4/7	P8	13.9	16.8	23.9	3x93	-	2.56	23	76	24	240	160	160	210	112
HFR20/4/5	P8	18.8	22.8	32.4	3x125	1.53	-	30.6	100	25	240	160	160	210	112
HFR20/4/7	P8	18.5	22.4	31.8	3x125	-	1.92	30.6	100	25	240	160	160	210	112
HFR25/4/5	P8	23.6	28.5	40.6	3x156	1.22	-	38	130	25	240	160	160	210	112
HFR25/4/7	P8	23.2	28.1	40	3x154	-	1.53	38	130	26	240	160	160	210	112
HFR30/4/5	P8	28.2	34.1	46.6	3x188	1.02	-	46	140	25	240	160	160	210	112
HFR30/4/7	P8	27.8	33.6	47.8	3x185	-	1.28	46	140	26	240	160	160	210	112
HFR40/4/5	P10	37.9	45.8	65.2	3x252	0.76	-	61	150	33	300	200	170	260	120
HFR40/4/7	P10	37	44.8	63.8	3x247	-	0.96	61	150	36	300	200	170	260	120
HFR50/4/5	P10	47.2	57.1	81.3	3x314	0.61	-	76.5	160	36	300	200	170	260	120
HFR50/4/7	P10	46.2	55.8	79.5	3x308	-	0.77	76.5	160	36	300	200	170	260	120

Çizelge 6.2 Hilkar harmonik filtre reaktörleri kataloğu

Trafo AG panosundaki kısa devre gücü trafonun kısa devre gücüne eşittir, bu nedenle trafo kısa devre gücünden; Formül [6.8] ve [6.9] e göre sistemin ne zaman ve hangi frekans değeri için paralel rezonansa gireceği şu şekilde hesaplanır.

TR-2/10' un etiket değerleri; $S_n = 400 \text{ kVA}$ (Trafo Gücü), $\%U_k = 4,85$ (Kısa Devre Gerilimi) dir. Sistemde kullanılacak olan kondansatör gücü $Q_c = 45 \text{ kVAR}$ olduğu için,

$$S_k = \frac{S_n}{U_k} (kKA) = \frac{400 \times 100}{4,85} = 8247,42 \text{ kVA bulunur.}$$

$$n = \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}} = \sqrt{\frac{8247,42}{45}} = 13,54 \approx 13. \text{ harmonik}$$

Sistemin rezonans frekansı olan 189 Hz ile karşılaştırıldığında sistem rezonansa girmeyecektir.

Sonuç olarak reaktif güç kontrol rölesi+kontaktör grubu ve 8 adet 5,6 kVAR, 440V luk kondansatör ile birlikte 8 adet $L_n = 7,66 \text{ mH}$ olan reaktör grubu paralel bağlanarak TR-2\10 trafo merkezindeki reaktif sorunu ve harmonik problemi giderilmiş olacaktır.

BÖLÜM VII

SONUÇ

Harmonikler, güç sistemlerindeki elektriksel kirliliktir. Güç elektroniği elemanlarının ve çeşitli lineer olmayan elemanların kullanımlarının her geçen gün artması, enerji sistemlerindeki sinüsoidal olmayan büyüklüklerin artmasına neden olmaktadır. Bunun bir sonucu olarakta, akım ya da gerilim için harmonik distorsiyonu da artmaktadır. Böylece tüketicilerin kullandığı enerjinin kalitesi düşmektedir. Bu yüzden harmonik seviyesinin ölçülmesi ve daha büyük problemler oluşmadan harmoniklerin giderilmesi gerekir.

Bu çalışmada; Niğde Merkez Elektrik Dağıtım Şebekesindeki 2 adet dağıtım trafo bölgesinde meydana gelen harmonikler ölçülmüştür. Bu trafolar, özellikle küçük sanayi bölgesini besleyen ve beslediği bölgede harmonik kaynaklarının olabileceği muhtemel trafo bölgeleridir. Bölüm 3' te yapılmış olan harmonik ölçümleri ile Bölüm 4' teki harmonik standartları karşılaştırılarak Bölüm 5' te ölçüm yapılan trafo merkezlerindeki harmonik kirlenmenin kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalıp kalmadığı tespit edilerek çözüm önerileri getirilmiştir.

Sonuç olarak reaktif güç kontrol rölesi+kontaktör grubu ve 8 adet 5,6 kVAR, 440V luk kondansatör ile birlikte 8 adet $L_n = 7,66 \text{ mH}$ olan reaktör grubu paralel bağlanarak TR-2\10 trafo merkezindeki reaktif sorunu ve harmonik problemi giderilmiş olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Filiz C, Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Filtrelemenin İncelenmesi, İç Anadolu Enerji Formu EMO Ankara Şubesi, 2007
- [2] Kocatepe, C., Uzunoglu, M., Yumurtacı, M., Karakaş, A., Arıkan, O., Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen yayınevi, İstanbul, Kasım 2003.
- [3] Dommel, H.V., Yan, A. ve Wei, S., “Harmonics from Transformer Saturation”, IEEE Trans. on Power Systems, 1986
- [4] Boduroğlu, T., Elektrik Makinaları Dersleri, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş. İstanbul ,1988
- [5] Adak, S., Enerji Sistemlerinde Harmonik Distorsiyonun Azaltılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, pp. 21-25, İstanbul, 2003.
- [6] Arrillaga, J., Bradley, D.A. ve Bodger, P.S., Power System Harmonics, John Wiley&Sons , Norwich, New York, 1985
- [7] Sevinç Ata, Doğrultucular ile ilgili ders notları, <http://atasevinç.net>
- [8] Korovesis, P.N. and others, 2004. Influence of Large Scale Installation of Energy Saving Lamps on the Line Voltage Distortion of a Weak Network Supplied by Photovoltaic Station, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 19, No 4 , 1787-1793.
- [9] Sundberg, Y., “The Arc Furnace as a Load on the Network”, ASEA Journal, 1980
- [10] Köktürk G. Gülден, Öztura H. Şekerci, Dalgacık dönüşümü ile ark ocağı akım ve gerilim harmonik analizi
- [11] Yılmaz Murat, Elektrik sistem tasarımında harmoniklerin giderilmesi için bir analiz. Yüksek lisans tezi Kasım 2006
- [12] ANSI/IEEE Std C57.12.00-1987 General requirement for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers, 1987
- [13] TS EN 60931-1 Beyan gerilimi 1 kV'a kadar (dahil) olan alternatif akım sistemlerinde kullanılan, kendini onarmayan tip şönt güç kondansatörleri Bölüm 1 : Genel - Performans, deneyler ve Beyan değerleri - Güvenlik kuralları - Tesis ve işletme kılavuzu. Kabul tarihi: 22.04.2004
- [14] IEEE C57.110-1986, IEEE Recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents, New York 1986

- [15] ENTES MPR63 Kullanma Talimatı
- [16] Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik. Resmi Gazete yayım tarih ve sayısı:12.09.2006-26287
- [17] IEEE 519 – 1992: IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. published by the institute of Electrical and Electronics engineers. New York 12.03.1993
- [18] IEC Publication 1000-3-2: Limitation of harmonics in low-voltage supply systems for equipment with rated current less than 16A. , 1995
- [19] IEC 555 Disturbances in supply systems caused by household appliances and similar electrical equipment
- [20] IEC 61000-2-2 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment -Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems. 28.03.2002
- [21] IEC 61000-2-4 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: Environment - Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances. 26.02.2002
- [22] EN 50160 Voltage Characteristics in. Public Distribution Systems. July 1995
- [23] IEC 61000-3-2 Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase. 1995
- [24] IEC/TS 61000-3-4 (1998-10) Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A, 1998
- [25] IEC-1000-2.2 Compatibility levels for LF power disturbances, 1996
- [26] TS EN 61000-3-2 Elektromanyetik uyumluluk (EMU) - Bölüm 3-2: Sınır değerler - Harmonik akım emisyonları için sınır değerler (Cihazın faz başına giriş akımı ≤ 16 A) Kabul Tarihi: 04.02.2010
- [27] IEEE P1495/D1, Draft Guide for Harmonic Limits for Single-Phase Equipment, IEEE PES/Transmission and Distribution Committee
- [28] Özdemir Ş., Aktif filtrelerin güç kalite düzenleyici olarak kullanımı 3e Elektrotech aylık dergisi
- [29] Çorapsız, M.H., Pasif Filtrelemede pratik yaklaşımlar
- [30] TS EN 60831-1 Beyan Gerilimi 1000 V'ye Kadar Olan (Dahil) a.a. Sistemleri

İçin Kendi Kendini Onaran Tipte Sönt Güç kondansatörleri Bölüm 1: Genel Hususlar, Çalışma Niteliği, Deneyler ve Sınır Değerleri, Güvenlik Kuralları, tesis ve İşletme İçin Kılavuz. Kabul tarihi:27.11.2001

- [31] TS EN 60831-2 Beyan Gerilimi 1 kV'ye Kadar Olan (Dahil) a.a. Sistemleri İçin Kendi Kendini Onaran Tipte Sönt Güç Kondansatörleri Bölüm 2: Yaşlandırma Deneyi, Kendi Kendini Onarma Deneyi ve Tahrip Deneyi. Kabul tarihi:27.11.2001
- [32] Shunt power capacitors of the self-healing type for a.c. systems having a rated voltage up to and including 1000 V - Part 1: General - Performance, testing and rating - Safety requirements - Guide for installation and operation. 22.11.2012
- [33] TS EN 60076-6 Güç transformatörleri – Bölüm 6: Reaktörler. Kabul tarihi: 21.02.2012
- [34] Hilkar Elektroteknik Ltd. web sitesi, <http://www.hilkar.com/tr>

ÖZ GEÇMİŞ

Metin BİTİM 15.11.2012 tarihinde Niğde’de doğdu. İlk orta ve lise öğretimini Niğde’de tamamladı. 1997 yılında girdiği Niğde Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nden Şubat 2002’ de mezun oldu. 2004 de askerliğini tamamlayarak Meram Elektrik Dağıtım A. Ş. Niğde İl Müdürlüğünde kontrol mühendisi olarak işe başladı, çeşitli birimlerde başmühendislik, şube müdürlüğü yaptı. Ekim 2012 de iş değişikliği yaparak; Niğde Bilim, Sanayi ve Teknoloji Müdürlüğünde Mühendis olarak göreve başladı. Halen bu görevde çalışmaya devam etmektedir.