

154212

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

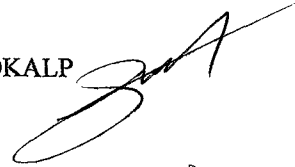
**HARMONİKLİ DEVRELERDE
GÜÇ KOMPAZASYONUNUN
OPTİMAL OLARAK GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Elektrik Müh. Yeliz İLZE

**F.B.E Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Mühendisliği Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç.Dr. Erdin GÖKALP



Doç.Dr. Herman SEDEF

İSTANBUL, 2004

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ŞEKİL LİSTESİ	v
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vii
ÖNSÖZ.....	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1 GİRİŞ.....	1
2. NONSİNÜSOİDAL BÜYÜKLÜKLERİN İNCELENMESİ.....	3
2.1 Harmoniklerin Tanımı.....	3
2.2 Harmoniklerin Analizi.....	4
2.3 Harmonik Standartları.....	6
2.3.1 Gerilim Harmonik Distorsiyon Standartları.....	7
2.3.2 Akım Harmonik Distorsiyon Standartları.....	10
3. NONLİNEER ELEMANLAR ve NONSİNÜSOİDAL BÜYÜKLÜKLERİN ELEKTRİK DEVRELERİNDEKİ TANIMLARI.....	13
3.1 Nonlinear Elemanlar.....	13
3.2 Nonsinüsoidal Büyüklüklerin Elektrik Devrelerindeki Tanımları.....	15
3.2.1 Akım ve Gerilim İfadeleri.....	15
3.2.2 Akım ve Gerilim Distorsiyon Faktörleri.....	15
3.2.3 Güç İfadeleri.....	16
3.2.4 Distorsiyon Gücü.....	17
3.2.5 Güç Faktörü.....	17
3.2.6 Tepe Faktörü.....	18
3.2.7 Telefon Etkileşim Faktörü.....	18
3.2.8 Toplam Talep Distorsiyonu	19
4. HARMONİKLERİN KAYNAKLARI ve ETKİLERİ	20
4.1 Harmoniklerin Kaynakları.....	20
4.1.1 Generatörler.....	21
4.1.2 Transformatörler.....	22
4.1.3 Frekans Dönüştürücüleri.....	23
4.1.4 Redresörler.....	24
4.1.5 Statik VAR Kompanzatörleri.....	25
4.1.6 Floresan Lambalar.....	25
4.1.7 Ark Fırınları.....	26
4.2 Harmoniklerin Etkileri.....	26
4.2.1 Harmoniklerin Neden Olduğu Kayıplar.....	27
4.2.1.1 Bakır Kayıpları.....	27

4.2.1.2	Demir Kayıpları.....	27
4.2.1.3	Dielektrik Kayıpları.....	29
4.2.2	Harmoniklerin Devre Elemanları Üzerindeki Etkileri.....	30
4.2.2.1	Direnç ve Reaktans Üzerindeki Etkileri.....	30
4.2.2.2	Kondansatörler Üzerindeki Etkileri.....	31
4.2.2.3	Döner Makineler Üzerindeki Etkileri.....	31
4.2.2.4	Transformatörler Üzerindeki Etkileri.....	32
4.2.2.5	Kesiciler ve Sigortalar Üzerindeki Etkileri.....	32
4.2.2.6	Röleler Üzerindeki Etkiler.....	33
4.2.2.7	Aydınlatma Elemanları Üzerindeki Etkileri.....	33
4.2.2.8	Ölçme Aletleri Üzerindeki Etkileri.....	34
4.2.2.9	Enerji İletim Sistemi ve İletişim Hatları Üzerindeki Etkileri.....	34
4.2.2.10	Elektronik Elemanlar Üzerindeki Etkileri.....	34
4.2.2.11	Harmoniklerin Yol Açtığı Rezonans Olayları.....	34
4.2.2.11.1	Seri Rezonans.....	35
4.2.2.11.2	Paralel Rezonans.....	37
5.	HARMONİKLERİN TEORİK OLARAK HESAPLANMASI	39
5.1	Harmoniklerin Teorik Olarak Hesaplanması.....	39
5.2	Ek Enerji Kaybının Hesaplanması.....	44
6.	HARMONİKLERİN YOK EDİLMESİ.....	45
6.1	Harmonik Filtreleri.....	45
6.1.1	Pasif Filtreler.....	45
6.1.1.1	Seri Filtreler.....	46
6.1.1.2	Paralel Filtreler.....	47
6.1.1.2.1	Band Geçiren Filtreler.....	47
6.1.1.2.2	Sönümlü Filtreler.....	48
6.1.2	Aktif Filtreler.....	49
6.1.2.1	Paralel Aktif Filtreler.....	52
6.1.2.2	Hibrid Aktif Filtreler.....	53
6.1.2.2.1	Hibrid Seri Aktif Filtreler.....	54
6.1.2.2.2	Hibrid Paralel Aktif Filtreler.....	55
7.	HARMONİKLİ DEVRELERDE GÜÇ FAKTÖRÜNÜN DÜZELTİLMESİ.....	57
7.1	Harmoniklerin Güç Faktörü Üzerindeki Etkileri.....	57
7.2	W.Shepherd ve P.Zand 'ın Nonlinear Devrelerde Güç Faktörünün Düzeltilmesi Yaklaşımı.....	60
7.2.1	Sinüsoidal Kaynak ve Nonlinear Yükün Bulunduğu Devrelerde Güç Faktörünün Düzeltilmesi.....	60
7.2.2	Nonsinüsoidal Kaynak ve Linear Yükün Bulunduğu Devrelerde Güç Faktörünün Düzeltilmesi.....	62
7.2.3	Nonsinüsoidal Kaynak ve Nonlinear Yükün Bulunduğu Devrelerde Güç Faktörünün Düzeltilmesi.....	63
7.3	Harmonik Filtreleri ile Güç Faktörü Düzeltimi.....	65
7.3.1	Şönt Aktif Filtre- Pasif Filtre Kombinasyonu ile Güç Faktörü Düzeltimi..	67
7.3.1.1	Filtrenin Analizi.....	70
7.3.1.2	DeneySEL Sonuçlar.....	73
7.3.2	Şönt Pasif Filtre ile Güç Faktörü Düzeltimi.....	77
7.3.2.1	Tek Ayarlı Filtrelerde Kondansatörün Değeri.....	78

7.3.2.2	Harmonik Akım Bastırılması.....	78
7.3.2.3	Harmonik Gerilim Distorsiyonunun İndirgenmesi.....	81
7.3.2.4	Güç Faktörünün Düzeltimi.....	82
7.3.2.5	Güvenlik	82
7.3.2.5.1	İzin Verilen Aşırı Gerilim ve Aşırı Akımı Tarafından Sınırlandırılmış Kondansatör Değeri.....	82
7.3.2.5.2	Filtrelerdeki Kondansatör Değerinin Dengelenmesi.....	83
7.3.2.6	Tek Ayarlı Filtrelerin Dizaynı.....	83
7.4	Güç Faktör Düzeltimi ve Yükün Dengelenmesini Sağlayan Yaklaşım.....	89
7.4.1	Yıldız Bağlı Yüklerin Kompanzasyonu.....	89
7.4.1.1	Ani Simetrik Bileşenlerin İfade Edilmesi.....	90
7.4.1.2	Referans Akım Üretimi.....	90
7.4.2	Üçgen Bağlı Yüklerin Kompanzasyonu.....	95
7.4.3	Kompanzatorün Yapısı.....	97
8.	SAYISAL UYGULAMA	101
9.	SONUÇLAR.....	113
	KAYNAKLAR.....	116
	ÖZGEÇMİŞ.....	118

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Bozulmuş bir dalganın şekli..... 3
Şekil 2.2	Ana bileşenle aynı fazdaki 3.ve 5. mertebeden harmoniklerin bulunması durumunda bileşke akımın veya gerilimin dalga şekilleri.....4
Şekil 2.3	Bozulmuş bir dalganın fourier serileri ile ifade edilmesi..... 5
Şekil 3.1	Lineer bir elemanın akım- gerilim ilişkisi..... 13
Şekil 3.2	Nonlinear bir elemanın akım- gerilim ilişkisi..... 13
Şekil 3.3	Lineer bir elemanın akım –gerilim dalga şekilleri..... 14
Şekil 3.4	Nonlinear bir elemanın akım- gerilim dalga şekilleri 14
Şekil 4.1	Sincap kafesli indüksiyon motorunu besleyen üç adet üç fazlı frekans dönüştürücüleri 24
Şekil 4.2	Statik VAR kompanzatörün bir faz diyagramı 25
Şekil 4.3	Dielektrik kaybı 29
Şekil 4.4	Harmoniklerin direnç üzerindeki etkisi (a) Sinüsoidal akımlı durumda, (b) Nonsinüsoidal durumda..... 30
Şekil 4.5	Seri rezonans devresi 35
Şekil 4.6	Paralel rezonans devresi..... 37
Şekil 5.1	İki adet nonlinear yüke sahip güç şebekesi..... 40
Şekil 5.2	$M = P + N$ kadar nonlinear yüke sahip güç şebekesi 42
Şekil 5.3	$M = P + N$ nonlinear yüklerin fazör diyagramı 42
Şekil 6.1	(a) Seri filtre ve (b) Seri filtrenin bağlantı şeması 47
Şekil 6.2	Paralel filtrenin bağlantı şeması..... 47
Şekil 6.3	(a)Çift band geçiren filtre ve (b) empedans değişimi 48
Şekil 6.4	(a) Tek band geçiren filtre ve (b) empedans değişimi 48
Şekil 6.5	Sönümlü filtreler: (i) Birinci mertebeden (ii) İkinci mertebeden (iii) Üçüncü mertebeden 49
Şekil 6.6	Sönümlü filtrenin frekans- empedans değişimi 49
Şekil 6.7	Aktif filtrenin çalışma prensibi 49
Şekil 6.8	Aktif filtrenin toplu bilgisayar yüküne göre çalışma şekli..... 50
Şekil 6.9	Aktif filtrenin ; (a) açık çevrim kontrol sistemi ve (b) kapalı çevrim kontrol sistemi 51
Şekil 6.10	Paralel aktif filtre sistemi 52
Şekil 6.11	Hibrid seri aktif filtre sistemi 55
Şekil 6.12	Hibrid paralel aktif filtre sistemi..... 56
Şekil 7.1	Saf Sinüs kaynağı ile beslenen lineer yük..... 57
Şekil 7.2	Güç faktörüne bağlı olarak dirençteki kayıpların değişimi..... 58
Şekil 7.3	Toplam güç faktörünün akımdaki bozulmaya bağlı olarak değişimi..... 59
Şekil 7.4	Sinüsoidal kaynak ve nonlinear yüke sahip bir devrenin şönt kompanzasyonu..... 60
Şekil 7.5	Nonsinüsoidal kaynak ve lineer yüke sahip bir devrenin şönt kompanzasyonu.....62
Şekil 7.6	Nonsinüsoidal kaynak ve nonlinear yüke sahip bir devrenin şönt kompanasyonu 63
Şekil 7.7	Elektronik balastlı flouresan lamba deneyinin montaj şeması..... 65
Şekil 7.8	Harmonikli akımın dalga şekli..... 65
Şekil 7.9	Güç bileşenleri 66
Şekil 7.10	Pasif filtre devre empedansının frekansla değişimi 67
Şekil 7.11	Filtrenin devreye alınması durumundaki akımın dalga şekli 67

Şekil 7.12	Şönt aktif güç filtreleri ve pasif filtre için tam blok diyagram	69
Şekil 7.13	Önerilen sistemin tam kontrol diyagramı	69
Şekil 7.14	Bir faz tam köprü inverter filtre şeması	70
Şekil 7.15	Şönt aktif filtre konfigürasyonu	71
Şekil 7.16	PWM –histerisiz anahtarlama tekniği	71
Şekil 7.17	Kompanzasyondan önceki ve sonraki gerilim ve akım spektrumu	74
Şekil 7.18	Kompanzasyondan önceki akım harmonik spektrumu	74
Şekil 7.19	Kompanzasyondan sonraki akım harmonik spektrumu	75
Şekil 7.20	Yük akımının dalga şekli	75
Şekil 7.21	Yüklenme durumu	76
Şekil 7.22	Harmonik kaynağının uçlarındaki harmonik gerilimler ve harmonik akımlarının hesaplanması amacıyla yönelik bir devre	79
Şekil 7.23	$f(K_{sh}, X_{ch})$ fonksiyonunun eğrisi	80
Şekil 7.24	Harmonik akım ve gerilim bastırılması ve güç faktör düzeltimi için önerilen metodun akış diyagramı	84
Şekil 7.25	Farklı olaylar ve kalite faktörlerine göre güç faktörü değerleri	85
Şekil 7.26	Harmonik akım (A) ve karşılaştırması	86
Şekil 7.27	Harmonik gerilim distorsiyonunu (%) ve karşılaştırması	86
Şekil 7.28	Farklı olaylar ve kalite faktörleri için toplam harmonik gerilim distorsiyonu (%)	88
Şekil 7.29	Üç iletkin beslemeli yıldız bağlı bir yükün kompanzasyon şeması	89
Şekil 7.30	Ani güçler ve nötr gerilimi	93
Şekil 7.31	(a,b,c) (1:25) ölçekli kaynak gerilimleri ve akımları ve (d) üç kompanzatör akımı	93
Şekil 7.32	Ani güçler ve nötr akımları	94
Şekil 7.33	(a,b) (1:25) oranında ölçekli kaynak gerilimleri ve akımları	95
Şekil 7.34	Üçgen bağlı bir yükün kompanzasyon şeması	96
Şekil 7.35	(a) Yük akımları, (b) ani güçler	97
Şekil 7.36	(a,b) (1:5) oranında ölçeklendirilmiş kaynak gerilimleri ve akımları	97
Şekil 7.37	Gerilim kaynağı inverterler ve dc kondansatör kullanılarak gerçekleştirilen kompanzasyon	98
Şekil 7.38	(a) Kontrolör çıkışı , (b) Kondansatör gerilimi	99
Şekil 7.39	(a,b) (1:20) oranında ölçeklendirilmiş kaynak gerilimleri ve akımları	100
Şekil 8.1	Sistemin tek hat şeması	106
Şekil 8.2	Ölçüm: Yük akımı >1,1 kA iken gerilim ve akımın dalga şekli	107
Şekil 8.3	Ölçüm: Yük akımı >1,1 kA iken gerilim harmonik spektrumu	108
Şekil 8.4	Ölçüm: Yük akımı >1,1 kA iken akım harmonik spektrumu	109
Şekil 8.5	Sistemin filtresiz durumunun Matlab programında modellenmiş hali	110
Şekil 8.6	Kompanzasyonlu harmonik filtrelerinin kullanılması durumunda sistemin Matlab programında modellenmiş hali ($f_r=210\text{Hz}$ için)	111
Şekil 8.7	Kompanzasyonlu harmonik filtrelerinin kullanılması durumunda sistemin Matlab programında modellenmiş hali ($f_r=240\text{Hz}$ için)	112

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC 61000-2-2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri.....	7
Çizelge 2.2	Endüstriyel santraller için IEC 61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (2. sınıf için).....	8
Çizelge 2.3	Endüstriyel santraller için IEC-61000-204 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (3.sınıf için).....	8
Çizelge 2.4	Konutlarla ilgili (a) alçak gerilim şebekesi ve (b) orta gerilim şebekesi için EN 50160 harmonik distorsiyon limitleri	9
Çizelge 2.5	IEEE 519 Gerilim distorsiyon limitleri.....	10
Çizelge 2.6	NORSOK E- 001 / 2 harmonik distorsiyon limitleri	10
Çizelge 2.7	IEEE 519 akım distorsiyon limitleri	11
Çizelge 2.8	D sınıfı donanım için IEC 61000-3-2 'e göre izin verilebilen maksimum harmonik akımları.....	12
Çizelge 2.9	İzin verilebilir konverter yükü	12
Çizelge 5.1	A ve B yükleri için ortak ve toplam etki sonuçları	41
Çizelge 6.1	Aktif ve pasif filtrenin karşılaştırılması	51
Çizelge 7.1	Bazı tek fazlı yüklerde kayma, distorsiyon, toplam güç faktörleri ve akım için toplam harmonik distorsiyonu	59
Çizelge 7.2	İnverterlerin tarama metodu.....	72
Çizelge 7.3	Çeşitli kalite faktörlerine göre tek ayarlı filtrelerdeki kondansatörün nominal gerilimi (kV).....	85
Çizelge 7.4	Farklı olaylar ve kalite faktörlerine göre tek ayarlı filtrelerdeki kondansatörün nominal değeri (kVAR)	87
Çizelge 7.5	Farklı olaylar için çeşitli kalite faktörleri altında güç faktör değerleri	87

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında harmonikli devrelerde güç kompanzasyonun optimal olarak gerçekleştirilmesi incelenmiştir.

Bu tez konusunu seçmemde beni yönlendiren, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Y.Doç.Dr. Erdin Gökalp'e,

Tezimin uygulama bölümünde bana yardımcı olan değerli hocam Y.Doç.Dr. Mehmed Uzunoğlu'na ve Y.Doç.Dr.Recep Yumurtacı'ya ,

Hayatımın her aşamasında hep yanımda olan ve beni her konuda destekleyen sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.



ÖZET

Nonlineer elemanlar tarafından üretilen harmonikler, güç sistem elemanlarında ek kayıplara ve aşırı ısınmalara neden olup bazı durumlarda bu elemanların zarar görmelerine veya devre dışı kalmalarına da yol açabilmektedir.

Harmoniklerin güç faktörü üzerinde de olumsuz etkileri vardır. Harmoniklerin bulunmadığı sistemlerde devreye kondansatör elemanlarının bağlanması ile güç faktörünün düzeltilmesi kolaylıkla sağlanmasına karşın harmonikli sistemlerde devreye eklenecek kondansatörlerin kapasitelerinin artırılması ile güç faktörü belli bir yere kadar artarken daha sonra azalma gösterir.

Bu çalışmada harmonikli devrelerde güç kompanzasyonunu optimal olarak gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Harmonikli devrelerde güç faktörünün iyileştirilmesine yönelik çeşitli teorik yaklaşımlardan bahsedilmiş ve bugün kompanzasyonlu harmonik filtrelerinin pratik hayatta tek alternatif olarak yer aldığı ortaya konulmuştur. Bu nedenle bir firmadan alınan kompanzasyonlu harmonik filtrelerin kullanıldığı bir devrenin Matlab programında bir uygulaması verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Harmonik, güç kompanzasyonu, filtre.



ABSTRACT

Harmonics produced by nonlinear equipment cause to additional losses and excessive heating in power system equipments and sometimes they cause that this equipments are damaged or don't working.

Harmonics have negative impact on power factor too. Power factor can be corrected easily by connecting capacitors equipment in the systems with no harmonics whereas power factor can be corrected until somewhere by increasing capacities of capacitors in the systems with harmonics but later it decreases.

In this study, It is aimed that power compensation is done perfectly in systems with harmonics. Theoretical approaches about power factor correction in the systems with harmonics are mentioned and it brings up that harmonic filters with compensation is only alternative in practice today. For this purpose, circuit taken from a firm and consists of harmonic filters is given in Matlab programme.

Keywords: Harmonic, power compensation, filter.



1. GİRİŞ

Alternatif akım güç sistemlerinde elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtımı ideal olarak belirli gerilim seviyelerinde tek ve sabit frekansta yapılmalıdır. Bu durumda sistemdeki gerilimin ve akımın dalga şekli saf sinüs şeklinde olacaktır. Bu ideal durumun sağlanabilmesi için sistemin sinüsoidal kaynakla beslenmesi ve lineer yüklerle yüklenmesi gerekir. Ancak güç sistemine bağlanan bazı elemanlar oluşturdukları harmonikli akımlar devrelerini şebekedeki diğer elemanlar üzerinde tamamlayarak harmonikli gerilim oluştururlar. Bu gerilim ise başlangıçta sinüs olarak kabul edilen gerilimin dalga şeklini bozmaktadır. Akım ve gerilim karakteristiği lineer olmayan bu elemanlara nonlinear elemanlar denir. Nonlinear elemanlar sistemde ciddi harmonik kirlenmelere neden olarak tüketiciye iletilen enerjinin kalitesinde olumsuz etkilerler.

Harmonikler temel besleme frekansının katları olan sinüsodal akım dalga şekillidir. Nonlinear elemanlar tarafından üretilip enerji sistemine karıştıkları zaman akım ve gerilimin dalga şeklini bozarlar. Harmonikler enerji sisteminde arzu edilen bir durum değildir. İşletme araçlarını yükleyerek ek kayıplara, bu araçların zarar görmesine neden olurlar. Ayrıca rezonansa da sebep olabilirler. Son zamanlarda yarı iletken elemanların ve nonlinear elemanların kullanımının yaygınlaşması ile harmonik bileşenlerin hem sayısı hem de büyüklüğü artmıştır.

Harmonik bozulma, Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD) olarak verilir. Bu değer temel frekansın akım veya gerilimin % 'si olarak ifade edilmektedir. THD_I , akım için toplam harmonik distorsiyonu, THD_V ise gerilim için toplam harmonik distorsiyonunu ifade etmektedir. THD_I , harmonik akımlarının akım yolundaki elemanlar üzerindeki etkisinin göstergesidir. THD_V ise paralel bağlı elemanlar üzerindeki etkisinin göstergesidir. Güç sistemindeki sınırlamalar genellikle THD_V 'ye göre verilir.

Uygulamada en çok 3.,5.,7.,11. harmoniklerle karşılaşılır. Ancak 11. ve 13. harmonikler özel durumlarda dikkate alınırken en çok 5. ve 7. harmoniklere ilişkin önlemler alınmaktadır.

Bu çalışmada harmonikli devrelerde reaktif güç kompanzasyonun optimal olarak sağlanması için yapılmış çalışmalar incelemiştir. Bu amaçla tez altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde harmoniklerin tanımı, fourier serileri yardımı ile matematiksel analizi ve çeşitli ülkelerdeki kuruluşlar tarafından ortaya konulan standartlar verilmiştir. İkinci bölümde, nonlinear elemanlar ile nonsinüsoidal büyüklüklerin elektrik devrelerindeki tanımları açıklanmaya çalışılmıştır. Üçüncü bölümde, harmonik üreten elemanlar ile bunların devre

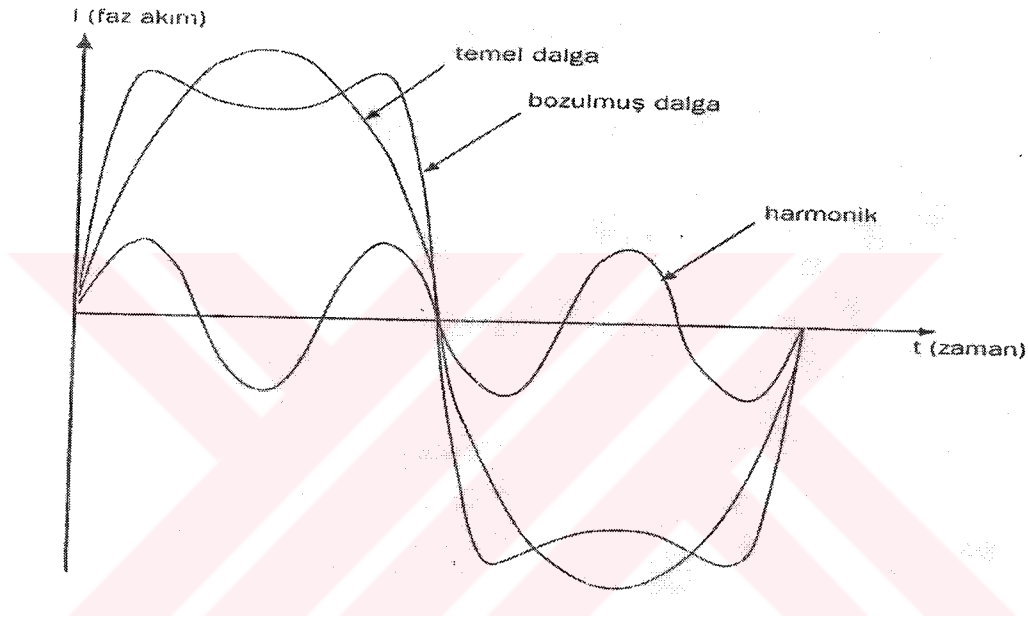
elemanları ve sistem üzerindeki etkilerine değinilmiştir. Dördüncü bölümde, harmonik kirlenmenin ölçümü teorik olarak incelemiş, ek enerji kaybının hesabı verilmiştir. Beşinci bölümde, harmoniklerin ortadan kaldırılması için kullanılan filtre devreleri anlatılmıştır. Altıncı bölümde, güç faktör düzeltimi ile ilgili çeşitli araştırmacılar tarafından ortaya konulan yaklaşımlar incelemiştir.



2. NONSİNÜSOİDAL BÜYÜKLÜKLERİN İNCELENMESİ

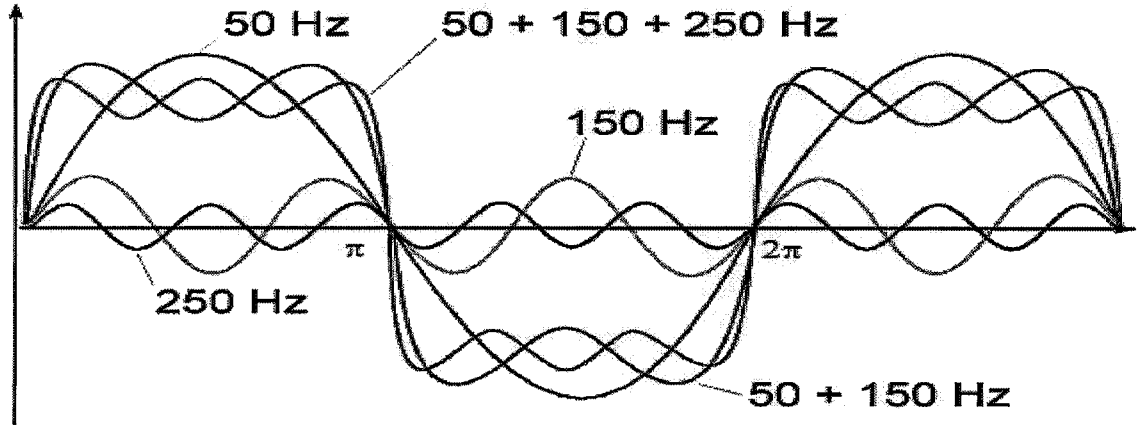
2.1 Harmoniklerin Tanımı

Elektrik enerji sisteminde, enerjinin üretimi, dağıtımı ve iletimi sırasında akım ve gerilimin 50 Hz frekansta ve sinüs şeklinde olması, elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen ana faktörlerden biridir. Ancak pratikte bu şartlar tam olarak sağlanamaz. Sistemde bulunan nonlineer elemanlar tarafından üretilen harmonikler, akım ve gerilimin dalga şekillerini sinüsoidal olmaktan çıkarmakta ve oldukça karmaşık hale getirmektedir.



Şekil 2.1 Bozulmuş bir dalganın şekli

Harmonikler, sinüsoidal olmayan periyodik bir dalganın temel frekansının tam katı olan bir frekansa sahip sinüs eğrisi şeklindeki bileşeni olarak tanımlanabilir. IEEE 519 'da harmonikler 'Temel frekansın tam katı frekansa sahip periyodik bir dalganın veya büyüklüğün sinüsoidal bileşeni' olarak tanımlanmaktadır. Şu halde f_1 temel frekanslı bir güç sistemi için h . harmonik mertebesinin frekansı $h \cdot f_1$ değerini almaktadır. Ayrıca harmonik akım ve gerilimin genlikleri, harmonik mertebesi ile ters orantılıdır. Yani, harmonik mertebesi arttıkça harmoniklerin genlikleri azalmaktadır. Değişik frekanslı harmoniklerin bulunduğu bir şebekede, bileşke akım veya gerilimin dalga şekli, temel frekansa ilişkin bileşenin ani değeri ile tüm harmoniklerin akım veya gerilimlerinin ani değerlerinin toplamından oluşmaktadır.



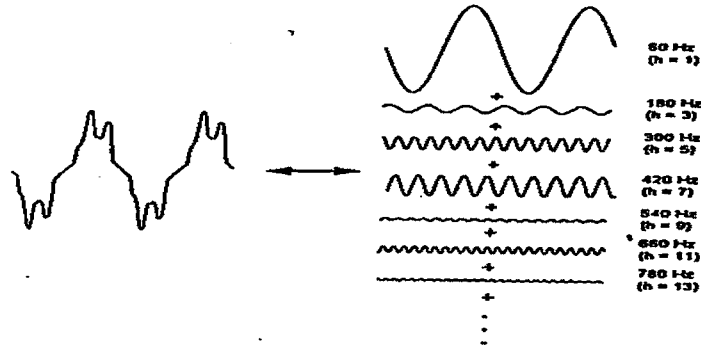
Şekil 2.2 Ana bileşenle aynı fazdaki 3.ve 5. mertebeden harmoniklerin bulunması durumunda bileşke akımın veya gerilimin dalga şekilleri

Magnetik devrelerde doyma, güç kontrol elemanları ve elektrik devrelerindeki lineer olmayan elemanlar, harmoniklerin oluşmasının en önemli nedenleridir. Örneğin, generatör, transformatör ve motor gibi demir çekirdekli elemanlar doymanın baş göstermesi ile harmonikli akımlar üretirken, ark fırınları gibi normal işletmeleri gereği bir arkın oluşması sonucunda da harmonikler üretilir. Harmonik üreten elemanlara transformatör, motor, generatör ve ark fırınları dışında konverterler, yarı iletken elemanların kullanıldığı cihazlar, kesintisiz güç kaynakları, statik VAR kompanzatörleri gibi bir çok elemanlar örnek verilebilir.

Harmonikler, güç sistem elemanları üzerinde pek çok olumsuz etki meydana getirebilmektedir. Transformatörlerde, generatörlerde ve enerji iletim hatlarında kayıpların artmasına neden olurken güç sistem elemanlarının zarar görmelerine veya devre dışı kalmalarında yol açabilmektedir. Ayrıca harmonikler nedeni ile rezonans meydana gelme olasılığı artmaktadır. Rezonans sonucu ortaya çıkan aşırı akım ve gerilimler, sistemde bulunan elemanlara zarar verebilmektedir.

2.2 Harmoniklerin Analizi

Fourier serileri teorisi ilk defa Fransız matematikçi Joseph Fourier tarafından ortaya atılmıştır. Bu teori ile temel frekans bileşeni ve bu temel frekansın tam katlarından oluşan harmonik bileşenlerinin toplamı, bir zaman aralığında herhangi bir periyodik fonksiyon olarak ifade edebilmek mümkün olmaktadır. J. Fourier, nonsinüsoidal periyodik dalgaların genlik ve frekansları farklı birçok sinüsoidal dalgaların toplamından oluştuğunu yani bütün dalgaların, genlik ve frekansları farklı olan sinüsoidal dalgalara ayrılabilirliğini göstermiştir. Bu şekilde elde edilen seriye 'Fourier Serisi, bu serinin elemanlarına da 'Fourier Bileşenleri' denir.



Şekil 2.3 Bozulmuş bir dalganın fourier serileri ile ifade edilmesi

Bir periyodik dalganın fourier serisine açılabilmesi için aşağıdaki koşulları sağlaması gerekir:

- Fonksiyon süreksiz ise, periyodu içersinde sonlu sayıda süreksizlik noktası bulunmalıdır.
- Fonksiyonun periyodu için sonlu ortalama değeri bulunmalıdır.
- Fonksiyonun sonlu sayıda pozitif ve negatif maksimum değeri olmalıdır.

Dirichlet şartları olarak adlandırılan bu şartlar, elektrik enerji sistemlerindeki dalga şekilleri tarafından her zaman sağlandığından fourier bileşenlerinin elde edilmesi mümkündür. Fourier serileri, harmonik distorsiyonun analiz edilmesinde etkin bir yoldur.

Genellikle, herhangi bir periyodik dalga şekli fourier serileri ile şöyle ifade edilebilir:

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega_1 t) + B_h \sin(h\omega_1 t)] \quad (2.1)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sin(h\omega_1 t + \psi_h) \quad (2.2)$$

Bu denklemlerde ;

h : 1, 2, 3,... gibi değerler alıp, harmonik mertebesini ifade eder.

A_0 : Doğru bileşen veya ortalama değeri olup, literatürde A_0 yerine $A_0/2$ 'de kullanılmaktadır.

$A_1, A_2, \dots, A_h, \dots$, ve $B_1, B_2, \dots, B_h, \dots$ katsayıları ise $f(t)$ fonksiyonun 'harmonik katsayıları' dır.

$C_1 \sin(\omega_1 t + \psi_1)$ ise $f(t)$ fonksiyonunun birinci harmoniği ya da temel dalga denir.

$C_h \sin(\omega_1 t + \psi_h)$ ise $f(t)$ fonksiyonun h . harmoniği olup, frekans $h.f_1$ ve faz ψ_h değerini alır.

Fourier serisindeki katsayılar şöyle hesaplanabilir :

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.3)$$

$$A_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega_1 t) dt \quad (2.4)$$

$$B_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega_1 t) dt \quad (2.5)$$

$$C_h = \sqrt{A_h^2 + B_h^2} \quad (2.6)$$

$$\psi_h = \tan^{-1} \left(\frac{A_h}{B_h} \right) \quad (2.7)$$

Sinüsoidal olmayan periyodik bir dalganın şekline göre fonksiyon bazı özellikler gösterir. Bu özellikleri şu şekilde sıralayabiliriz (Bayram, 2000):

- $f(t) = f(-t)$ ise fonksiyona ‘çift simetrik fonksiyon’ denir. Bu durumda B_h katsayısı sıfır olur ve fonksiyonda sadece cos`lü terimler yer alır.
- $f(t) = -f(-t)$ ise fonksiyona ‘tek simetrik fonksiyon’ denir. Bu durumda A_h katsayısı sıfır olur ve fonksiyonda sadece sin`lü terimler yer alır.
- $f(t) = -f(t + \pi)$ ise yani fonksiyon ‘O’ noktasına göre simetrik ise, bu durumda fonksiyonda A_h ve B_h `nin yalnız tek sayılı terimleri yer alır. Eğer aynı zamanda $f(t) = -f(\pi - t)$ ise, yani eğrinin bir yarı periyodundaki bölümü π kadar kaydırıldığında ikinci yarı periyoddaki bölümüne t eksenine göre simetrik ve eşit ise, bu durumda fonksiyonda tek mertebeli sinüs fonksiyonları yer alır.

Nonsinüsoidal olan endüksiyon akım ve gerilim gibi elektrik büyüklüklerde en çok rastlanan dalga şekli dikdörtgen, eşkenar üçgen ve trapez veya bunların benzerleridir. Bu eğrilere ait fourier serilerinde tek mertebeli sinüslü terimler yer alır.

2.3 Harmonik Standartları

Harmoniklerin, şebekeye ve sistemdeki diğer yüklere daha az zarar vermesi ve tüketiciye daha kaliteli enerji sağlamak için harmonikler belirli limitleri aşmamalıdır. Bu amaçla harmonik çalışmalarında, bara harmonik gerilimleri, hat harmonik akımları ve akım ve gerilim distorsiyon faktörleri hesaplanıp, bulunan değerler standart değerlerle karşılaştırılır. Eğer bu

standart değerler aşılmışsa, çeşitli filtreleme yöntemlerinin kullanılmasının yanı sıra sistem tekrar gözden geçirilebilir. Böylece sistem bilinen standart değerlere getirilir.

IEEE, IEC, EN ve NORSOK tarafından ortaya konulan akım ve gerilim harmonik distorsiyon standartları aşağıda verilmiştir.

2.3.1 Gerilim Harmonik Distorsiyon Standartları

IEC Standartları

IEC (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu), IEC 61000-2-2 `de konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerine ait gerilim harmonik sınırlamalarını verirken, IEC 61000-2-4 `de endüstri için 2. ve 3. sınıf olarak sınır değerler verilmiştir. IEC 61000-2-4 `e göre (Arrillaga vd.,2001):

- 2. sınıf için $THD_v \leq \%8$, 3. sınıf için $THD_v \leq \%10$ `dur.
- 2. sınıf genellikle endüstriyel tesislerde ortaklaşma noktalarına ve iç alan bağlantı noktalarına uygulanır.
- 3. sınıf ise endüstriyel tesislerde sadece iç alan bağlantı noktalarına uygulanır.
- Genellikle birbirinden ayrı baralardan beslenen konverter, ark fırınları gibi yüksek parazitli yüklerin beslemesi, 3. sınıftan daha fazla oranda parazitlik seviyesine sahiptir. Bu gibi özel durumlarda, kabul edilebilir uygun seviyeler, 3. sınıf limitlerle uyuşmalıdır.

Çizelge 2.1 Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC 61000-2-2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri

Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3 `ün katı harmonikler	
h	% V_h	h	% V_h	h	% V_h
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	0,5		
23	1,5				
25	1,5				
≥ 29	x				

*40. harmonik mertebesinde kadar ki tüm harmonikler için $THD_v \leq \%8$

* $x = 0.2 + 12.5 / h$ ve $h = 29, 31, 35, 37$ için $V_h = \% 0.63, \%0.60, \%0.56, \%0.54$

Çizelge 2.2 Endüstriyel santraller için IEC 61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (2. sınıf için)

Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün katı harmonikler	
h	% V _h	h	% V _h	h	% V _h
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	x				

$$* x = 0.2 + 12.5 / h$$

$$h = 29, 31, 35, 37 \text{ için } V_h = \% 0.63, \%0.60, \%0.56, \%0.54$$

Çizelge 2.3 Endüstriyel santraller için IEC-61000-204 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (3.sınıf için)

Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün katı harmonikler	
h	% V _h	h	% V _h	h	% V _h
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	y				

$$* y = 5 / h$$

$$h = 29, 31, 35 \text{ ve } 37 \text{ için } V_h = \% 3.1, \%3.0, \%2.8 \text{ ve } \% 2.7$$

EN Standartları

EN (Avrupa Standartları)'nın gerilim distorsiyonu ile ilgili limitleri Çizelge 2.4 'te verilmiştir.

Çizelge 2.4 Konutlarla ilgili (a) alçak gerilim şebekesi ve (b) orta gerilim şebekesi için EN 50160 harmonik distorsiyon limitleri

(a)

Alçak Gerilim Şebekesi (<1 kV)					
Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3`ün katı Harmonikler	
h	% V _h	h	% V _h	h	% V _h
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6...24	0,5	15	0,5
13	3			21	0,5
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

(b)

Alçak Gerilim Şebekesi (<1 kV<V<35kV)					
Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3`ün katı Harmonikler	
h	% V _h	h	% V _h	h	% V _h
5	6	2	2	3	5*
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6...24	0,5	15	0,5
13	3			21	0,5
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

* Şebekenin yapısına bağlı olarak 3. harmonik mertebesinin değeri düşük olabilir.

* 40. harmonik mertebesine kadar ki tüm harmonikler için $THD_v \leq \%8$ `dir.

*25 `ten büyük harmonik mertebeleri için değer yoktur. Çünkü çoğunlukla küçük değerlerdir. Ancak rezonanstan dolayı beklenmedik büyük değerler ortaya çıkabilir.

IEEE Standartları

IEEE `nin ( Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü ) gerilim distorsiyonu ile ilgili limitleri Çizelge 2.5`de verilmiştir.

Çizelge 2.5 IEEE 519 Gerilim distorsiyon limitleri

Ortaklaşma noktasındaki bara gerilimi	Tekil V_h (%)	Gerilim için Toplam Harmonik Distorsiyonu (%)
$V < 69 \text{ Kv}$	3.0	5.0
$69 \leq V < 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$V \geq 161 \text{ kV}$	1.0	1.5

NORSOK Standartları

NORSOK Standartları, Norveç petrol endüstrisi tarafından geliştirilmekte ve NTS (Norveç Standartları Birliği) tarafından basılmaktadır.

NORSOK `un gerilim distorsiyon limitleri Çizelge 2.6`da verilmiştir. Bu standart OLT (Norveç Yağ Endüstrisi Derneği) ve TBL (Norveç Mühendislik Endüstrisi Federasyonu) tarafından geliştirilmiştir.

Çizelge 2.6 NORSOK E- 001 / 2 harmonik distorsiyon limitleri

	$\% V_h$	$\% THD_v$	IEC 61000-2-4
Yüksek Gerilim ($>1 \text{ kV}$) Anabarı	6	8	2.sınıf
Düşük Gerilim ($<1 \text{ kV}$) Anabarı	8	10	3.sınıf

Eğer anabara üzerindeki hassas cihazlar yoksa, diğer harmonik bozunum seviyeleri, lokal baralar düzeyinde kabul edilir. Alçak güç tüketim yüklerin, filtre yerine kesintisiz güç kaynaklarından beslemesi daha makuldür.

2.3.2 Akım Harmonik Distorsiyon Standartları**IEEE Standartları**

IEEE 519`da harmonik akım distorsiyon limitleri, yük ve sistemin kısa devre kapasitesine, dağıtım, tali iletim ve iletim sistemlerinde aldığı değerler Çizelge 2.7 `de gösterilmiştir.

Çizelge 2.7 IEEE 519 akım distorsiyon limitleri

I_h/I_L – Genel Dağıtım Sistemleri (120 V- 69 kV)						
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$h > 35$	TDD (%)
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8
50-100	10	4.5	4.0	1.5	0.7	12
100-1000	12	5.5	5.0	2.0	1.0	15
> 1000	15	7.0	6.0	2.5	1.4	20

I_h/I_L – Genel Dağıtım Sistemleri (69 kV-161 kV)						
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$h > 35$	TDD (%)
< 20	2	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	12.5	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	12.5	0.7	10.0

I_h/I_L – Genel Dağıtım Sistemleri (> 161 kV)						
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$h > 35$	TDD (%)
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
> 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

*Yukarıdaki akım distorsiyon limitleri tek mertebeli harmonikler içindir.

*Çift mertebeli harmonikler, tek mertebeli harmonik limitlerinin %25'i ile sınırlandırılır.

* Tüm güç üretim cihazları için distorsiyon limitleri, $I_{sc}/h < 20$ 'ye karşılık gelen değerlerdir.

* I_{sc} : Ortaklaşma noktasındaki maksimum kısa devre akımı

* I_L : Ortaklaşma noktasındaki maksimum talep akımı (ortalama veya 30 dakikalık)

* TDD : Toplam talep distorsiyonu (THD 'da temel bileşen akımının yerine I_L akımı kullanılarak elde edilir.)

IEC Standartları

IEC tarafından D sınıfı cihazlar için kabul edilen maksimum harmonik akımları Tablo 2.8 'de verilmiştir. D sınıfı cihazları ise cihaz giriş akımı faz başına 16 A ve bunun altında olan, alçak gerilim dağıtım sistemine bağlanan özel bir dalga şekline sahip donanımlardır.

Çizelge 2.8 D sınıfı donanım için IEC 61000-3-2`e göre izin verilebilen maksimum harmonik akımları

H	3	5	7	9	11	13	15...39
Max I_h (A)	2.3	1.14	0.77	0.40	0.33	0.21	0.15...15/h
Faz başına donanım giriş akımı							

NORSOK Standartları

NORSOK, ortaklaşma noktasında, toplam görünür yük ve kısa devre kapasitesi işlevi gören kabul edilebilir konverter yükünü Çizelge 2.9`da verilmiştir. Bu tabloya göre maksimum konverter yapısı NORSOK`un Çizelge 2.6`daki gerilim distorsiyon limitlerini sağlayacak şekildedir.

Çizelge 2.9 İzin verilebilir konverter yük

$S_{conv} / S_L (\%)$		
I_{SC}/I_L	6 Darbeli	12 Darbeli
<20	17	36
20-50	27	57
50-100	40	86
100-1000	50	100
>1000	67	100

I_{SC} : Ortaklaşma noktasındaki kısa devre akımı

I_L : Ortaklaşma noktasındaki yük akımı

S_{conv} : Sistemin konverter yükü

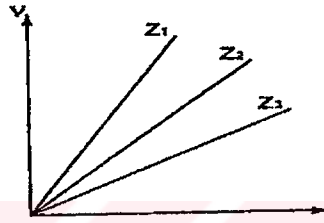
S_L : Ortaklaşma noktasındaki toplam görünür yük

Ülkemizde ise, pişirme ve ısıtma cihazları, motorla çalıştırılan veya manyetik olarak tahrik edilen cihazlar, taşınabilir aletler, ışık dimmerleri ile radyo ve televizyon için geliştirilmiş, TS 9882 nolu ‘Ev tipi cihazlar ve benzeri elektrik donanımının elektrik besleme sistemlerinde yol açtığı bozulmalar ’ adlı harmonik standardı vardır. TS 9882 standardı, kapsamına giren elektrik donanımlarının yol açtığı bozulmalara karşı öngörülen şartların belirlenmesi ve bu şartların pratik olarak uygulanma kuralları ve bozulmalarla ilgili deneylerin uygulanma metotları ile ilgilidir.(Kocatepe vd., 2003)

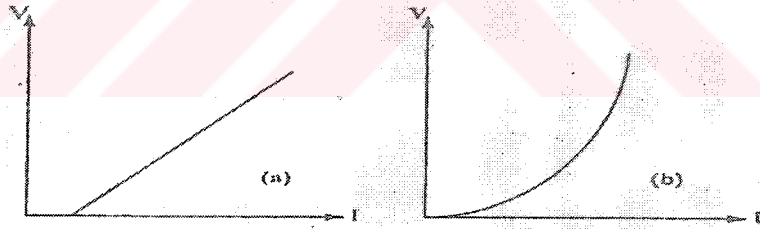
3. NONLİNEER ELEMANLAR ve NONSİNÜSOİDAL BÜYÜKLÜKLERİN ELEKTRİK DEVRELERİNDEKİ TANIMLARI

3.1 Nonlinear Elemanlar

Akım ile gerilim arasındaki ilişkisi doğrusal olmayan elemanlara ya da yüklere nonlinear elemanlar ya da yükler denir. Lineer elemanların ya da yüklerin akım- gerilim ilişkisi doğrusal olup orijinden geçen doğru şeklindedir. Ancak nonlinear yüklerin akım-gerilim ilişkisi ya orijinden geçen bir eğri ya da orijinden geçmeyen doğru şeklindedir.



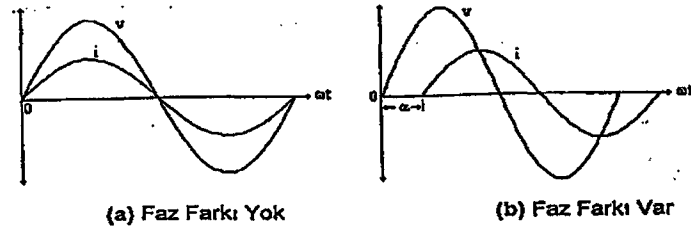
Şekil 3.1 Lineer bir elemanın akım- gerilim ilişkisi



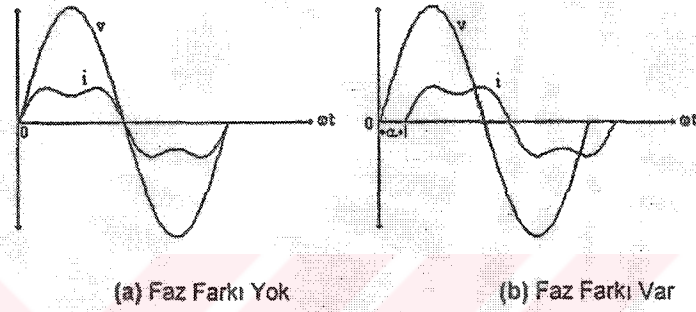
Şekil 3.2 Nonlinear bir elemanın akım- gerilim ilişkisi

Ohm kanununa göre gerilimin akıma oranı sabit bir değer vermelidir. Lineer elemanlar bu kanunu sağlarken, nonlinear elemanlarda bu kanun sabit değildir. Dolayısıyla nonlinear eleman, uç karakteristiği ohm kanununu sağlamayan elemanlar olarak da tanımlanabilir.

Nonlinear elemanlar, gerilim ve akım dalga şekilleri aynı olmayan elemanlar şeklinde de tanımlanabilir. Lineer elemanlarda akım ve gerilim arasında faz farkı olsa dahi yine de dalga şekilleri aynıdır.



Şekil 3.3 Lineer bir elemanın akım –gerilim dalga şekilleri



Şekil 3.4 Nonlineer bir elemanın akım- gerilim dalga şekilleri

i , nonlinear elemanın akımı, u ise gerilimi olmak üzere, nonlinear bir elemanın akım ve gerilimi arasındaki ilişki;

$$i = a + b.U + c.U^2 + d.U^3 + \dots \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Nonlinear elemanlar, sinüsoidal bir şebekeye bağlandıkları zaman harmonikli akım ve gerilimlere neden olurlar. Bu elemanlarda elektrik ve magnetik devre lineersizlikleri vardır.

Magnetik devredeki doymadan dolayı, akım ile akı arasında lineer bir bağıntı yoktur. Yani akımı ne kadar artırırsanız aktırın akı artmayacaktır. Bu şekilde magnetik devredeki lineersizlik devrede nonsinüsoidal büyüklüklere neden olurlar. Elektrik devre lineersizliği ise akım ve gerilimin aynı oranda değişmemesidir. Bu da magnetik devre lineersizliği gibi harmoniklere neden olurlar.

Nonlinear özelliğe sahip elemanlara, transformatörler, statik VAR kompanzatörleri, ark fırınları, gaz deşarjı ile çalışan lambalar, balastlar vb. örnek verilebilir.

3.2 Nonsinüsoidal Büyüklüklerin Elektrik Devrelerindeki Tanımları

3.2.1 Akım ve Gerilim İfadeleri

Harmonikli akım ve gerilimin dalga şekillerini Fourier serileri ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} i_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \cos(h\omega_1 t + \varphi_h) \quad (3.2)$$

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} v_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} V_h \cos(h\omega_1 t + \theta_h) \quad (3.3)$$

Yukarıdaki ifadelerde i_h ve v_h h. harmonik akım ve gerilimin ani değerleridir. V_h ve I_h sırasıyla, h. harmonik mertebesi için gerilim ve akımın efektif değerleridir. φ_h ve θ_h ise sırasıyla h. harmonik mertebesi için akım ve gerilimine ait faz açılarıdır. DC terimler ise ihmal edilmiştir.

Harmonikli akım ve gerilimin efektif değerleri şöyledir:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (3.4)$$

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad (3.5)$$

3.2.2 Akım ve Gerilim Distorsiyon Faktörleri

Toplam harmonik distorsiyonu (THD), harmonikleri içeren periyodik bir dalga şeklinin, tam sinüs dalga şeklinden sapmasını belirlemek için kullanılır. Harmonik bileşenlerin efektif değerlerinin, temel bileşen efektif değerine oranı olarak hesaplanmakta ve yüzde olarak ifade edilmektedir. Temel frekanstaki tam sinüs dalga şekli için THD sıfır değerini alır.

Gerilim distorsiyon faktörü (VDF), aynı zamanda toplam harmonik distorsiyonu (THD_v) olarakta bilinip şöyle ifade edilir:

$$THD_v = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} = \sqrt{\left(\frac{V}{V_1}\right)^2 - 1} \quad (3.6)$$

Akım distorsiyon faktörü (CDF), aynı zamanda toplam harmonik distorsiyonu (THD_I) olarak da bilinip şöyle ifade edilir:

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (3.7)$$

Akım ve gerilim THD ile tanımlarsak ;

$$V = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} = V_1 \sqrt{1 + THD_h^2} \quad (3.8)$$

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} = I_1 \sqrt{1 + THD_I^2} \quad (3.9)$$

değerini alırlar.

3.2.3 Güç İfadeleri

Aktif, reaktif ve görünür güce ait eşitlikler aşağıda verilmiştir.

Aktif güç ;

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h - \phi_h) \quad (3.10)$$

Reaktif güç;

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(\theta_h - \phi_h) \quad (3.11)$$

Görünür güç;

$$S = V.I \quad (3.12)$$

$$S = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2 \cdot I_h^2} \quad (3.13)$$

$$S = V_1 I_1 \sqrt{1 + THD_V^2} \sqrt{1 + THD_I^2} \quad (3.14)$$

$$S = S_1 \sqrt{1 + THD_V^2} \sqrt{1 + THD_I^2} \quad (3.15)$$

3.2.4 Distorsiyon Gücü

Harmonikler söz konusu olduğu zaman, görünür güç (S) sadece aktif güç (P) ve reaktif güç (Q)'dan oluşmaz. Distorsiyon gücü (volt- amper) 'D' ile ifade edilip, görünür güç ile aktif ve reaktif güç arasındaki farka eşittir.

$$D^2 = S^2 - (P^2 + Q^2) \quad (3.16)$$

Distorsiyon gücü, aktif olamayan bir güç olup, sinüsoidal işaretli lineer devrelerde sıfırdır.

3.2.5 Güç Faktörü

IEEE 519 'da güç faktörü ile ilgili verilen tanımlar şunlardır (Cividino ve Telecom, 1992):

Kayma Güç Faktörü : Güç faktörünün kayma bileşeni, temel dalganın aktif gücünün (Watt), temel dalgaya (VA) oranıdır. Bu durumda güç faktörü çoğunlukla akım ve gerilim dalga şekilleri arasındaki faz açısı ile ifade edilir. Yük lineerse, güç faktörünün bu bileşeni uygundur. Ancak, yük lineer değilse, bu bileşenin bir anlamı olmayıp, Toplam / doğru güç faktörü uygun olmaktadır.

Distorsiyon Güç Faktörü :Distorsiyon bileşen, harmonik gerilimler ve akımlarla ilgilidir. AC hat akımının temel bileşenin efektif değerinin, toplam hat akımının efektif değerine oranı (I_1/I_T) ile ifade edilmektedir.

Toplam / Doğru Güç Faktörü : Toplam güç girişinin (Watt), toplam volt –amper girişine oranıdır.

Güç faktörü, aktif gücün reaktif güce oranıdır. Yani;

$$pf = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1} \frac{1}{\sqrt{1 + THD_v^2} \sqrt{1 + THD_I^2}} = pf_{disp} \cdot pf_{dist} \quad (3.17)$$

$$pf_{disp} = \frac{P}{S_1} \quad (3.18)$$

$$pf_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_v^2} \sqrt{1 + THD_I^2}} \quad (3.19)$$

şeklinde ifade edilir. Burada pf toplam güç faktörü iken pf_{disp} kayma güç faktörünü, pf_{dist} ise distorsiyon güç faktörünü ifade etmektedir. Sistemde herhangi bir harmonik bozulma yoksa $pf_{dist} = 1$ değerini alacak ve

$$pf = pf_{disp} \quad (3.20)$$

olacaktır. Ancak pf_{dist} 1`den küçük bir değer alacağından

$$pf < pf_{disp} \quad (3.21)$$

olur.

3.2.6 Tepe Faktörü

Tepe faktörü, nonsinüsoidal akım veya gerilimin tepe değeri ile temel bileşenin değeri temel bileşenin değerleri arasında tanımlanır. Akım tepe faktörü (CCF) ve gerilim tepe faktörü (VCF) şu şekilde ifade edilebilir;

$$CCF = \frac{\sum_{h=2} I_h}{I_1} \quad (3.22)$$

$$VCF = \frac{\sum_{h=2} V_h}{V_1} \quad (3.23)$$

3.2.7 Telefon Etkileşim Faktörü

Telefon etkileşim faktörü, harmoniklerin neden olduğu telefon gürültü değerini belirlemek için kullanılır. Akım ve gerilim için telefon etkileşim faktörleri :

$$TEF_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (\omega_h V_h)^2}}{V_{ef}} \quad (3.24)$$

$$TEF_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (\omega_h I_h)^2}}{I_{ef}} \quad (3.25)$$

ile hesaplanabilir. ω_h , h. harmonik için telefon etkileşim ağırlık faktörüdür.

3.2.8 Toplam Talep Distorsiyonu

Toplam talep distorsiyonu aşağıdaki gibi hesaplanabilir ;

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (3.26)$$

Burada, I_L akımı yük tarafından besleme sisteminin ortaklaşma noktasından çekilen temel frekanslı maksimum akımdır.

4. HARMONİKLERİN KAYNAKLARI ve ETKİLERİ

4.1 Harmoniklerin Kaynakları

Elektrik enerjisinin alternatif akım ile iletiminin kabulünden beri harmoniklerin güç sistemlerindeki varlıkları bilinmektedir. Günümüzde de halen harmonikler, lineer olmayan cihazların kullanımının artmasından dolayı önemini korumaktadır. Harmonik kaynakları olarak kabul edilen lineer olmayan cihazları şu şekilde sınıflandırılabilir (Arrillaga vd.,2001):

- Geleneksek (Klasik) Tipler:
 - Transformatörler
 - Döner makinalar
 - Ark fırınları
- Modern (Güç – Elektronik) Tipler:
 - Floresan Lambalar
 - Günümüzde endüstride ve modern ofis elektronik cihazlarda geniş kullanım alanı bulan elektronik kontroller ve anahtarlı- mod güç kaynakları
 - Tristör kontrollü cihazlar:
 - Redresörler
 - İnverterler (Eviriciler)
 - Statik VAR kompanzatörleri
 - Frekans dönüştürücüleri
 - Yüksek gerilim ile enerji iletimi (HVDC) sistemleri

Tristör grubu şunları kapsamaktadır (Arrillaga vd.,2001):

- Ters bloklü triod tristörleri veya silisyum kontrollü redresörler (SCR)
- Triaklar olarak bilinen çift yönlü triod tristörleri
- Çift yönlü tristör diyodu veya diyaklar
- Ters geçişli tristör triodu
- Ters bloklü tristör diyodu
- Işıklı çalışan silisyum kontrollü redresörler
- Asimetrik silisyum kontrollü redresörler
- Statik indüktif tristörler
- Kapı tetik açma tristörleri (GTO)

AC / DC redresörlerin kullanıldığı yerler (Arrillaga vd.,2001):

- DC motor sürücüleri
- Ayarlanmış dc güç kaynakları
- Batarya şarjı
- Yüksek gerilim ile enerji iletimi (HVDC) sistemleri

Yukarıda sayılan harmonik kaynaklarından bazılarını inceleyelim.

4.1.1. Generatörler

Generatörler en doğal harmonik üreticileridir. Döner makinalarda harmonik üretimini etkileyen faktörler, alan eğrisinin şekli, magnetik direncin oluklara bağlı olması, ana devrenin doyuma ulaşması, kaçak akımlar ve simetrik olmayan oluklara yerleştirilen sargılar şeklinde sayılabilir. Stator sargısında endüklenen EMK, endüksiyon kanununa göre ϕ endüksiyon akısı ile orantılıdır. Şu halde EMK'nın sinüs şeklinde olması ϕ 'nin sinüs şeklinde olmasına bağlıdır. Çıkık kutuplu senkron makinalarda alan eğrisi yaklaşık dikdörtgen şeklinde olup, yuvarlak kutuplu makinalarda ise trapez şeklindedir. Alan eğrisinde hangi mertebeden harmonikler varsa prensip itibari ile endüklenen EMK'da da aynı mertebeden harmonikler bulunur. Ancak alan eğrisinde belirli harmonik değerlerinin bulunmasına rağmen endüklenen gerilimde harmoniklerin etkisi çok düşük olup, gerilim eğrisi sinüs şekline çok yakın olmaktadır. Bu nedenle generatörler önemli harmonik kaynağı sayılmazlar. Generatörlerin oluk şekli, sargı yapısı, uyarma sargısı ve kutuplar vb. hususlarda uygun düzenlemeler yapılarak ve generatörler kuvvetli amortisman sargıları ile donatılarak gerilim eğrisinin tam sinüsoidal olması ve harmoniklerin büyük ölçüde ortadan kaldırılması sağlanabilir.

Üç fazlı makinalarda bobin aralığı 5. ve 7. harmonikleri azaltmak için kullanılmaktadır. Ayrıca, büyük generatörler çoğunlukla üçgen bağlı transformatörler üzerinden sisteme bağlanılarak 3 ve 3'ün katı harmonikler yok edilir.

Generatörlerin bağlantı şekilleri harmonik frekanslarını şöyle etkiler (Bayram, 2000):

- Statorun her üç faz sargısı aralarında yıldız bağlanmışsa, üç ve üç'ün katı frekanslı harmonikler sadece faz gerilimlerinde bulunurlar. Fazlararası gerilimler, iki faz gerilimin farkına eşit olduğundan, eşit fazlı harmonikler olan üç ve üç'ün katı harmonikler birbirini götürürler. Bu nedenle üç ve üç'ün katı frekanslı harmonikler fazlar arası gerilimlerde bulunmazlar.
- Yıldız bağlı bir generatöre, yıldız bağlı dengeli üç fazlı bir tüketici bağlanırsa ve bu yükün

yıldız noktası generatörün yıldız noktasına yıldız noktasına bağlanmazsa, tüketicinin gerilimlerinde eşit fazlı harmonikler bulunmaz ve üç ve üç'ün katı harmonikli akımlar geçmez. Eğer tüketicinin yıldız noktası bir nötr iletkeni üzerinden generatörün yıldız noktasına bağlanırsa, nötr iletkeninden, faz iletkenlerinden geçen üç ve üç'ün katı frekanslı I_0 akımlarının toplamı olan $3I_0$ akımı geçer. Bu akımı tüketicide üç ve üç'ün katlarına eşit frekanslı bir gerilim düşümüne neden olur. I_0 akımı sınırlandırmak için generatörün yıldız noktasına reaktans bağlanır.

- Generatör sargıları üçgen bağlanmışsa, sargılardan üç'ün katı frekanslı bir sirkülasyon akımı geçer. Ancak bu akım sargı içinde kalıp, dışardaki faz iletkenlerine geçmez. Sirkülasyon akımı makinanın yüküne bağlı olmayıp, sargılarda büyük kayıplara neden olur. Bu nedenle elektrik makinalarında üçgen sargı pek uygulanmaz. Generatörde sargıların yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılmış olması tercih edilir.

4.1.2 Transformatörler

Transformatörlerdeki magnetik malzemelerin, ekonomik nedenlerden dolayı lineer olmayan bölgede yer almaları ve birbirlerine yakın olmaları güç transformatörlerinin harmonik üretmelerine neden olmaktadır. Dolayısıyla uygulanan gerilim sinüsoidal olsa bile, transformatör mıknatıslanma akımı sinüsoidal olmaz ve harmonik (özellikle de 3. mertebeden) içerir. Mıknatıslanma akımındaki harmoniklerin şebekeye geçmesi, transformatör sargılarının bağlanma grubuna, primerin yıldız bağlı olması halinde yıldız noktasının şebekenin nötrüne bağlı olup olmasına ve transformatördeki magnetik devrenin geometrik yapısına bağlıdır.

Transformatörlerin nominal değerlerinin dışında çalışması, demir çekirdekte daha çok doymaya ve harmonik akımları seviyesinde hızla bir artışa sebep olabilir. Geceleyin veya günün erken saatlerinde sistem daha az yüklü olduğundan, şebekedeki gerilim düşümü azalacağından, transformatör gerilimi yükselir. Bu durumda mıknatıslanma akımı 1., 3., 5., 7.,... gibi tek mertebeli harmonikleri içerir. Bunlar içersinde 5. ve 7. harmonikler daha şiddetli olarak kendilerini hissettirirler. Akım şiddeti bakımından en önemli harmonik ise 3. harmoniktir.

Transformatörlerin bağlantı şekilleri harmonik frekanslarını şöyle etkiler (Bayram, 2000):

- Transformatör yıldız / yıldız bağlı ve primer yıldız noktası nötr hattına bağlanmış ise, nötr hattından, her bir faz sargısından gelen üç ve üç'ün katı frekanslı harmonik akımının üç katı bir akım geçer. Ancak 5., 7., 11., ...gibi harmoniklerin toplamı yıldız noktasında sıfır

olduğundan bunlar nötr hattından geçemezler. Eğer yıldız noktası nötr bağlı değilse, mıknatıslanma akımının üç ve üçün katı harmonikleri, yıldız noktasından dışarı çıkamazlar ve mıknatıslanma akımı 3. harmoniksiz olur.

- Transformatör yıldız / üçgen bağlanmışsa ve primer yıldız noktası nötr hattına bağlanmış ise, nötr hattından her bir faz sargısından gelen üç ve üçün katı frekanslı harmonik akımının üç katı bir akım geçer. Eğer yıldız noktası nötre bağlanmamış ise; üç ve üçün katı akı harmonikleri üçgen sargıda üç ve üçün katı frekanslı sirkülasyon akımlarının geçmesine sebep olur. Bu akımlar kendilerini endükleyen akılara ters yönde etki ederek onları söndürürler.
- Primeri üçgen bağlı transformatörlerde, mıknatıslanma akımında 3., 9., 15.,... harmonikler bulunmaz. Çünkü bunlar eşit fazda olduklarından üçgen bağlı sargı içinde kalırlar. 1., 5., 7.,... harmonikler mıknatıslanma akımında bulunurlar.

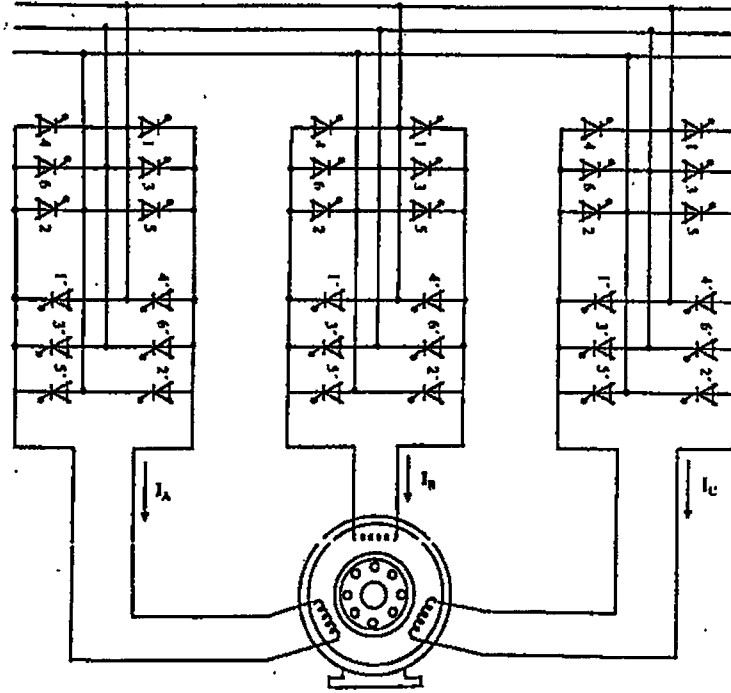
Transformatörlerin primer ve sekonder sargıları nasıl olursa olsun, primer yıldız noktası şebekenin nötr hattına bağlansın veya bağlanmasın ve çekirdek tipi nasıl olursa olsun, şebekeden daima 1., 5., 7., 11., 13., ... gibi harmonikli mıknatıslanma akımı çekilir.

Üç fazlı transformatörlerde, yıldız noktası nötr hattına bağlanmazsa ya da sargılardan biri üçgen bağlanırsa veya transformatör üçgen bağlı bir tersiyer sargı ile donatılırsa üç ve üçün katı harmoniklerin şebekeye geçmesi önlenir. Modern transformatörlerde, mıknatıslanma akımını düşürmek için soğuk haddelenmiş ve kristalleri yönlendirilmiş sac kullanılır. Böylece şebekede harmonik tehlikesi geniş çapta önlenmiş olur.

4.1.3 Frekans Dönüştürücüleri

Bir frekans dönüştürücüsü, bir fazlı bir çıktıyı sağlayan iki tane üç fazlı köprüden oluşan değişken frekanslı bir ac motor sürücüsüdür. Frekans dönüştürücü, yüksek frekanstaki ac gücü, düşük frekanstaki bir değere dönüştürür. 50 Hz'lik hat frekansında, frekans dönüştürücünün çıkış frekansı 0 ile 10 arasında değişmektedir (Arrillaga vd., 2001).

Şekil 4.1 `de sincap kafesli endüksiyon motorunu besleyen üç tane üç fazlı frekans dönüştürücü gösterilmiştir. Her frekans dönüştürücü iki tane üç fazlı köprü içerir.



Şekil 4.1 Sincap kafesli indüksiyon motorunu besleyen üç adet üç fazlı frekans dönüştürücüleri

4.1.4 Redresörler

Enerji tesislerinde güç elektroniğinin önem kazanması ile redresörler oldukça geniş bir uygulama alanı bulmuşlardır. Transformatörlerden sonra en çok harmonik üreten elemanlar bunlar olup, harmoniklerin üretimi, akımın periyodik olarak kesilmesi esasına dayanır. Sinüs şeklinde bir alternatif gerilime bağlı olan redresörler, I_1 temel harmonik akımı ile birlikte I_h gibi harmonikli akımları da çekerler (Bayram, 2000).

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (4.1)$$

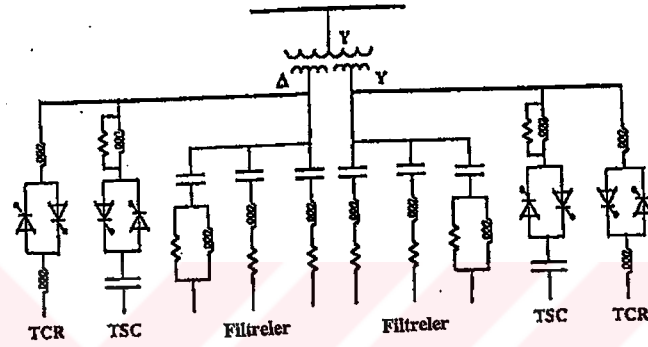
(4.1) 'de görüldüğü gibi, harmonikli akımın efektif değeri, harmonik mertebesi ile ters orantılıdır. Harmonik mertebesi ise, p darbe sayısı olmak üzere;

$$h = np \pm 1 \quad (4.2)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. $n = 1, 2, 3, \dots$ gibi değerler almaktadır. Darbe sayısı ise 6, 12, 24 ve 36 'dır. Redresörlerde darbe sayısı ne kadar büyük olursa, harmonik akımlarının değeri o kadar küçülür. Böylece redresörlerin zararlı etkileri azaltılabilir (Bayram, 2000).

4.1.5 Statik VAR Kompanzatörleri

Statik VAR kompanzatörler, üç fazlı cihazları dengelemektedirler. Üç fazlı cihazlarda, istenen uç gerilimini korumak amacıyla, her yarım periyot boyunca, şönt kondansatör veya indüktörlerin iletim zamanını kontrol etmek için, silisyum kontrollü redresörler (SCR) kullanılır. Bundan dolayı, sinüsoidal olmayan kırpılmış akımlar ortaya çıkar (Arrillaga vd., 2001). Şekil 4.2`de tristör kontrollü reaktörlerden (TCR), tristör anahtarlı kapasitörlerden (TSC) ve filtrelerden oluşan bir statik VAR kompanzatörünün bir faz diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Statik VAR kompanzatörünün bir faz diyagramı

Statik VAR kompanzatörleri içerdikleri nonlineer elemanlar nedeniyle lineer olmayan uç karakteristikleri vardır. Bu nedenle bunlar sistemde sinüsoidal olmayan büyüklüklere neden olup, sistemde bir takım olumsuz etkileri meydana getirirler.

Tristör kontrollü reaktörlerin (TCR), sürekli ve hızlı bir reaktif güç ve gerilim kontrolü sağlama kabiliyetleri vardır. Bunlar, güç frekansında geçici aşırı gerilimlerin kontrolü, gerilim çökmesinin önlenmesi, geçici kararlılığın artırılması, iletim ve dağıtım sistemlerinde dengesiz yükleri besleyen üç fazlı sistemlerin dengelenmesi gibi güç sistemin performansını artırılmasını sağlayan pek çok özellikleri vardır. Dengelenme koşulu altında tristör kontrollü reaktörler üçgen bağlanırsa üç ve üçün katı harmonikler yok edilir (Kocatepe vd., 2003).

4.1.6 Floresan Lambalar

Floresan lambalarda gerilim, ateşleme meydana gelinceye kadar her yarım periyotta bir artmaktadır. Ateşleme meydana gelince lamba negatif direnç karakteristiği gösterir ve akım nonlineer reaktif balast tarafından sınırlandırılır. Bu nedenle akımın dalga şekli bozunuma uğrar. Floresan lamba tesislerindeki tek harmoniklerin seviyesi, sistemi önemli oranda etkilemektedir. Bu lambalara bağlanan balastlarında harmonik üretme özelliği olduğundan

son yıllarda elektronik balastlar kullanılmaktadır. Çünkü elektronik balastın içindeki filtre ile bu balastın ürettiği harmoniklerin elimine edilmesi mümkündür.

4.1.7 Ark Fırınları

Normal çalışmalarını ark ile sürdüren ark fırınları, kaynak makinaları gibi cihazlar ve tesisler deşarj prensibine göre çalıştıklarından, şebekeden sinüsoidal olmayan akım çekerler ve önemli harmonikler oluştururlar. Arkın boyundaki değişime bağlı olarak frekansın geniş bir aralıkta değişmesi, harmoniklerin oluşmasının en önemli nedenidir. Geniş spektrumlu harmoniklere en önemli örnek ark fırınlarıdır. Bu işletmelerde harmonik oluşmasının nedeni, ark fırınlarındaki ateşleyici elektrodların özelliklerine ve ark akım- gerilim karakteristiğine bağlıdır.

Ark fırınlarının ürettikleri akımların harmonikleri ne mertebe, ne de değer olarak hesap yolu ile belirlenemez. Ark akımında, değeri zamana bağlı olarak değişen her mertebeden harmonik bulunmaktadır. Harmonikler ark ocağının gücüne bağlı olup, ergime safhasında en üst düzeyde ulaşırlar.

Ark fırınlarında paralel bağlı devrelerde gerekli şartlar ortaya çıkarsa rezonans baş gösterebilir. Ayrıca şebekeye geçen harmonik akımları, şebeke empedansı üzerinde gerilim düşümüne ve kayıplara neden olmaktadır. Böylece başka tüketicilerde bağlı bulunduğu barada harmonik gerilimleri oluşur.

4.2 Harmoniklerin Etkileri

Güç sistemlerinde nonlineer cihaz ve yüklerin kullanımının artması harmonik distorsiyon problemlerinin artmasına neden olmaktadır. Harmonikler sadece yüklerin dalga şekillerinde bozucu etkilerde bulunmayıp aynı zamanda güç sisteminde ve güç sistemine bağlı bulunan elemanlar üzerinde de olumsuz etkiler oluştururlar.

Harmonik distorsiyonun etkilerini üç kategoride toplayabiliriz (Arrillaga vd., 2001):

- Termik zorlanma
- İzolasyon zorlanması
- Yükün zorlanması

Harmonikler demir, bakır ve dielektrik kayıplarını artırarak, termik zorlanmaya neden olurlar. Ayrıca gerilimdeki artış, izolasyon zorlanmasına neden olurlar. İzolasyon zorlanması, iletkenlerde izolasyonun delinmesine kadar gidebilir. Harmonikler ayrıca cihazın çalışmaması ya da normal olarak çalışmaması gibi yükte çeşitli arızalar da meydana getirebilir.

Bu bölümde harmoniklerin etkilerini harmoniklerin neden olduğu kayıplar ve harmoniklerin sistem üzerindeki etkileri olmak üzere iki grupta inceleyebiliriz.

4.2.1 Harmoniklerin Neden Olduğu Kayıplar

Harmoniklerin neden olduğu kayıplar şunlardır;

- Bakır kayıpları
- Demir (çekirdek) kayıpları
- Dielektrik (izolasyon) kayıpları

Şimdi bu kayıpları teker teker analiz edelim.

4.2.1.1 Bakır Kayıpları

Deri etkisi ihmal edilmek üzere, harmoniklerden dolayı bakır kayıplarındaki artış per-unit olarak akım distorsiyon faktörü veya gerilim distorsiyon faktörü ile belirlenebilir. Her iki faktör saf direnç durumunda birbirine eşittir.

$$\Delta P_{R_{pu}} = \frac{\Delta P_R}{P_{R_1}} = \frac{P_R - P_{R_1}}{P_{R_1}} = P_{R_{pu}} - 1 = THD_I^2 = THD_V^2 \quad (4.3)$$

4.2.1.2 Demir Kayıpları

Demir kayıpları, demir çekirdeğin uyarmadan dolayı mıknatıslanması veya magnetik alanda dönmesi ile meydana gelir. Histerisiz ve fuko kayıplarından oluşan demir kayıpları, verimliliği azaltmakta ve çekirdekteki ısınmayı artırmaktadır (Arrillaga vd., 2001).

Histerisiz kayıpları, demir çekirdekteki ters mıknatıslanmadan dolayı meydana gelip, kullanılan magnetik malzemenin kalitesine, hacmine, akı yoğunluğunun maksimum değerine ve elektrik akımının frekansına bağlıdır (Arrillaga vd., 2001). Normal akı yoğunluğunun maksimum değeri 1,5 Wb / m² için temel frekanstaki histerisiz kayıpları şöyle ifade edilir;

$$P_{h1} = \xi f_1 B_{m1}^v \quad (4.4)$$

Burada;

ξ : Çekirdek malzemenin ve hacmine bağlı bir sabit

f_1 : Elektrik akımının temel frekansı ($f_1 = 50 / 60$ Hz)

B_{m1} : Nominal akı yoğunluğunun maksimum değeri

v : Yoğunlukla 1,6 değerini alan çekirdek malzemesine bağlı üstel bir ifadedir.

(4.4)`den yola çıkarak, harmonikler dikkate alındığında histerisiz kaybı şöyle bulunur;

$$P_{h_{pu}} = \frac{P_{h_h}}{P_{h1}} = h \left(\frac{B_{m_h}}{B_{m_1}} \right)^v = h \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^v = h I_{h_{pu}}^v \quad (4.5)$$

$$P_h = \sum_{h=1} P_{h_h} = P_{h1} \sum_{h=1} h \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^v \quad (4.6)$$

$$P_{h_{pu}} = \frac{P_h}{P_{h1}} = \sum_{h=1} h \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^v = \sum_{h=1} h I_{h_{pu}}^v \quad (4.7)$$

$P_{h_{pu}}$: h. harmonik mertebesindeki pu olarak histerisiz kaybıdır. ($P_{h_{pu}} = P_{h_h} / P_{h1}$)

P_{h_h} : h. harmonik mertebesindeki histerisiz kaybı

I_h : h.harmonikteki tepe mıknatıslanma akımı

B_{m_h} : h. harmonikteki maksimum akı yoğunluğu

P_h : Toplam histerisiz kaybı

$P_{h_{pu}}$: pu olarak toplam histerisiz kaybı ($P_{h_{pu}} = P_h / P_{h1}$)

$I_{h_{pu}}$: h. harmonikteki pu olarak harmonik akımı ($I_{h1} = I_h / I_1$)

Fuko kayıpları, ac uyarma ile transformatörün çekirdeğinde veya magnetik alanda döner makinanın dönmesi ile rotor çekirdeğine endüklenen indüksiyon akımlarının akışı ile ilgili bir güç kaybıdır (Arrillaga vd., 2001). Temel frekanstaki fuko kayıpları şöyle gösterilebilir;

$$P_{e_1} = \kappa f_1^2 B_{m_1}^2 \quad (4.8)$$

κ , çekirdek malzemesine, hacmine ve göbek sacının kalınlığına bağlı bir sabittir.

(4.8)`den yola çıkarak, harmonikler dikkate alındığında fuko kayıpları şöyle bulunur;

$$P_{e_{hpu}} = \frac{P_{e_h}}{P_{e1}} = h^2 \left(\frac{B_{m_h}}{B_{m_1}} \right)^2 = h^2 \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 = h^2 I_{h_{pu}}^2 \quad (4.9)$$

$$P_e = \sum_{h=1} P_{e_h} = P_{e1} \sum_{h=1} h^2 \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \quad (4.10)$$

$$P_{e_{pu}} = \frac{P_e}{P_{e_1}} = \sum_{h=1} h^2 \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 = \sum_{h=1} h^2 I_{h_{pu}}^2 \quad (4.11)$$

(4.11) 'den harmoniklerden dolayı fuko kayıplarındaki artış, histerisiz kayıplarındaki artışın artışı görülmektedir.

Toplam demir kayıpları ;

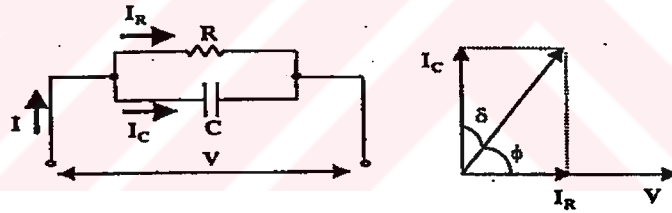
$$P_i = P_h + P_e \quad (4.12)$$

olur.

Burada ifade edilen histerisiz ve fuko kayıpları, lineer magnetik devre olarak kabul edilip, magnetik doyma ihmal edilerek yaklaşık olarak bulunmuştur.

4.2.1.3 Dielektirk Kayıpları

Kondansatörlerdeki dielektrik kayıpları veya iletkenlerdeki izolasyon kayıplarının nedeni, akımı gerilimden 90° ileri fazda olan ideal kondansatörlerin olmamasından ileri gelmektedir.



Şekil 4.3 : Dielektrik kaybı

Temel frekanstaki dielektrik kaybı ;

$$P_{d_1} = \frac{1}{2} V_1 I_1 \cos \phi_1 = \frac{1}{2} \omega_1 C V_1^2 \tan \delta_1 \quad (4.13)$$

değerini alırken, harmonikler dikkate alındığında ;

$$P_{d_{h_{pu}}} = \frac{P_{d_h}}{P_{d_1}} = h \left(\frac{V_h}{V_1} \right)^2 = h V_{h_{pu}}^2 \quad (4.14)$$

$$P_d = \sum_{h=1} P_{d_h} = P_{d_1} \sum_{h=1} h \left(\frac{V_h}{V_1} \right)^2 \quad (4.15)$$

$$P_{d_{pu}} = \frac{P_d}{P_{d_1}} = \sum_{h=1} h \left(\frac{V_h}{V_1} \right)^2 = \sum_{h=1} h V_{h_{pu}}^2 \quad (4.16)$$

olarak hesaplanabilir. Burada ;

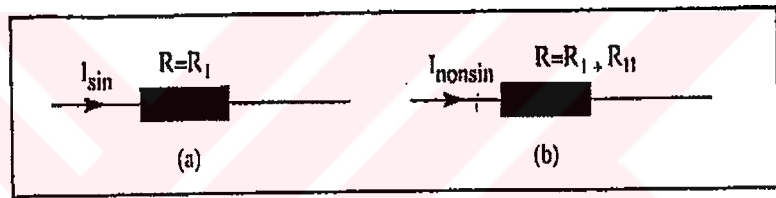
P_d : Toplam dielektrik kaybı

V_h : h. harmonikteki tepe gerilimi

4.2.2 Harmoniklerin Devre Elemanları Üzerindeki Etkileri

4.2.2.1 Direnç ve Reaktanslar Üzerindeki Etkileri

Harmoniklerin mertebeleri arttıkça frekansları da aynı oranda artmaktadır. Harmonik frekanslarındaki artış sonucu ortaya çıkan deri etkisi, iletkenin etkin kullanılan kesitini azaltmaktadır. Dolayısıyla direnç değeri, harmoniklerle artış gösterir.



Şekil 4.4 Harmoniklerin direnç üzerindeki etkisi(a) Sinüsoidal akımlı durumda (b) Nonsinüsoidal akımlı durumda

R_0 , doğru akım direnci, R ise deri etkisi dahil edilmiş direnç olmak üzere, deri etkisi ile oluşan direnç değeri şu şekilde hesap edilebilir;

$$x = 1.585 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{f}{R_0}} \quad (4.17)$$

olmak üzere,

$$0 \leq x \leq 3 \quad \text{için} \quad R = R_0 \cdot K_1$$

$$x > 3 \quad \text{için} \quad R = R_0 K_2$$

olur. Buradaki K_1 ve K_2 katsayıları

$$K_1 = \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{x^4}{48} \right) \right] + 1 \quad (4.18)$$

$$K_2 = \left[\frac{x}{2,828} + 0,26 \right] \quad (4.19)$$

şeklinde hesaplanabilir.

harmonikerin endüktif reaktans üzerindeki etkisini şöyle ifade edebiliriz;

$$X_{L_h} = h.X_{L_1} \quad (4.20)$$

Burada X_{L_h} , h. harmonik için endüktif reaktans, X_{L_1} ise temel frekanstaki endüktif reaktanstır. (4.20) 'den görüldüğü üzere, harmonikli durumdaki endüktif reaktans, harmoniksiz durumdaki endüktif reaktansın h. katıdır. Empedans arttığı için devreden çekilen akım azalır. Dolayısıyla gerilim düşümü artar.

Harmoniklerin kapasitif reaktans üzerindeki etkisini ise;

$$X_{c_h} = \frac{X_{c_1}}{h} \quad (4.21)$$

şeklinde ifade edebiliriz. X_{c_h} , h. harmonik için kapasitif reaktans, X_{c_1} ise temel frekanstaki kapasitif reaktanstır. (4.21) 'den görüldüğü üzere kondansatörün kapasitif reaktansı, harmonik mertebesine göre azalmaktadır. Empedans azaldığı için, devreden çekilen akım artar.

4.2.2.2 Kondansatörler Üzerindeki Etkileri

Güç faktörünün düzeltiminde kullanılan kondansatörler, harmoniklerden en çok etkilenen elemanlardır. Harmoniklerin neden olduğu problemlerin ilk belirtilerinden biri konsatörlerde oluşan arızalardır (İnan ve Attar,1997). Kondansatörlerin kapasitif reaktansı frekans arttıkça azaldığından, küçük bir harmonik gerilim, büyük bir kondansatör akımının geçmesine neden olur. Ayrıca harmonikler bu elemanda, tepe gerilimlerinden dolayı yalıtım zorlanmasına ve dielektrik kayıplarına da neden olmaktadır. Dolayısıyla ortaya çıkan ısı artışı ve aşırı yüklenme kondansatörlerin ömrünü kısaltır. Bu elemanlar nominal çalışma akımının 1,3 katında sürekli çalışacak şekilde imal edilirler. Harmonikler, kondansatörlerin ve bobinlerin birlikte kullanıldığı sistemlerde rezonansa da sebep olabilirler.

4.2.2.3 Döner Makinalar Üzerindeki Etkileri

Harmonikler döner makinalarda ek kayıplara neden olurlar. Elektrik makinelerinde kayıplar, uygulanan gerilimin frekans içeriğine bağlıdır. Ek kayıplar ile döner makinelerin ısısı artar. Dolayısıyla motorlardaki sıcaklık artışı, motorun ömrünün azalmasına neden olmaktadır.

Bundan en çok bir fazlı motorlar etkilenir. Sıcaklık artışı üniform şekilde dağılmadığından, çekirdek ve iletkenlerde sıcak noktalar görünür. Motor harmonik ısınmaları ile ilgili bir limit olmamasına rağmen motor uçlarındaki negatif sequence gerilimi için % 1-5 arasında bir sınırlama getirilebilir. Isınmayla birlikte döner makinelerin verimi ve momentinde düşme gözlenirken, sinüsoidal beslemeli bir motorla karşılaştırıldığında daha gürültülü çalıştığı gözlenebilir. Harmonik bileşenler motorun performansını % 5 –10 arasında azaltmaktadır. Harmonikler döner makinelerde ısınmanın dışında moment salınımlarına ve aşırı titreşime de neden olurlar. Endüksiyon motorlarındaki hava aralığında harmoniklerin bir bileşke akı üretmesinden dolayı motor kalkış yapamayabilir ve senkronlama sağlanamayabilir.

4.2.2.4 Transformatörler Üzerindeki Etkileri

Transformatörlerde akım harmonikleri bakır ve kaçak akı kayıplarında, gerilim harmonikleri ise fuko ve histerisiz akımlarından dolayı demir kayıplarında artışa neden olurlar. Bunun yanı sıra harmonikler ısınmanın artmasına, izolasyonun zorlanmasına, gürültü artışına ve demir çekirdekte titreşimlere neden olmaktadır. Harmonik frekansında, transformatör sargıları ile hat kondansatörü arasında rezonansa meydana gelebilir. Sarımlardaki kaçak akı kayıpları ve fuko kayıpları, iletkenin ısınmasından ve deri etkisinden dolayı ortaya çıkarlar. Fuko kayıplarındaki artış histerisiz kayıplarının artmasına neden olur. Harmonik akım ve gerilimlerinin neden olduğu kayıplar frekansa bağlıdır. Kayıplardaki artış, frekansla birlikte artar. Bu yüzden transformatörün ısınmasında, yüksek frekanslı harmonik bileşenler, düşük frekanslı harmonik bileşenlerden daha önemlidir. Kayıplar ısınmaya neden olup transformatörün ömrünü azaltırlar. ANSI / IEEE C.57.1200-1978 standardı transformatörler için şu limit değerleri getirmiştir (Arrillaga vd., 2001);

- Akım toplam harmonik distorsiyonu % 5 'i aşmamalıdır.
- Kararlı haldeki gerilim (rms olarak), yüksüz durumda, nominal değerin % 110 'nu, nominal yük durumunda ise nominal değerin % 105 'ini aşmamalıdır.

4.2.2.5 Kesiciler ve Sigortalar Üzerindeki Etkileri

Harmonik akımlarının neden olduğu aşırı ısınma ile sigortaların akım- zaman karakteristiklerinde değişimler meydana gelir. Bu da sigortalarda istenmeyen çalışma şekillerine neden olur. Ayrıca harmonikler sigortaların minimum erime zamanlarını da azaltabilirler.

Harmonikler kesicilerin akım kesme yeteneklerini etkilerler. Ayrıca, bu elemanlarda, akım sıfır geçişinde temel frekanstaki normal sinüs dalgasına göre daha yüksek bir değişim hızına

neden olmaktadır. Bu durum kesicilerde akım kesmeyi zorlaştırır. Kesicilerde arızaların ortaya çıkmasında, söndürme bobininin harmonikli ortamda kesmeyi gerçekleştirememesinin de etkisi vardır. Bu yüzden ark devam etmekte ve arızalar ortaya çıkmaktadır. Vakumlu kesiciler, havalı magnetik kesicilere göre daha az duyarlıdır. Bazı kesicilerdeki sarmal bobinlerin, harmoniklerin neden olduğu ısıyı dağıtma gibi özellikleri vardır.

Harmonik akımları, anahtarlama elemanlarında kayıp ve ısıyı artırdığından, sürekli hal taşıma kapasiteleri bazı izolasyon malzemelerinin ömrü kısalmaktadır.

4.2.2.6 Röleler Üzerindeki Etkileri

Akım ve gerilim dalga şekillerinin bozulması, rölelerin performansını etkilemektedir. Harmonikler, rölelerin arıza durumlarında çalışmasını engellediği gibi arızanın olmadığı durumlarda gereksiz yere çalışmasına da neden olabilmektedir. Röleler daha büyük tepe değerleri ile yavaş çalışma yerine, daha küçük tepe değerleri ile daha hızlı çalışma eğilimine girerler. Diğer elemanlar için kabul edilebilir maksimum harmonik mertebesinden daha büyük harmonik mertebeleri, rölelerin çalışmasını etkiler. Yapılan testlerde harmonik distorsiyonun % 20 seviyelerine kadar rölelerde bir problem yaratmadığı ortaya konulmuştur (İnan ve Attar, 1997).

Her röle harmonikler karşısında farklı davranışlar sergiler. Hatta aynı tipteki rölelerin farklı modelleri bile farklı davranışlar sergiler. Harmonik bileşenine bağlı olarak, statik röleler, çalışma noktası, çalışma momenti ve zamanı değişebilir. Diferansiyel röleler yüksek hızla çalışmayabilir. Dengeli empedans röleleri hem ayar ötesi hem de ayar gerisi çalışabilir. Rölelerde çalışma zamanları, ölçülen büyüklükteki frekansın bir fonksiyonu olarak, oldukça büyük farklılıklar gösterebilirler.

4.2.2.7 Aydınlatma Elemanları Üzerindeki Etkileri

Harmonikli gerilimler, floresan lambalarda, kulağın duyabileceği gürültülerin yanında demir kayıplarında artışa neden olurlar. Akkor telli lambalar, sinüsoidal olamayan bir gerilimle çalıştıklarında lambanın içersindeki flama aşırı ısınır. Bundan dolayı bu lambaların ömürleri kısalmaktadır. Harmoniklerin neden olduğu gerilim artışı çok küçük değerde olsa bile, akkor flamlı lambanın ömrü büyük değerde azalır. Örneğin ; normal gerilimin % 5 `nin üstündeki bir gerilimle çalıştırıldığında, lambanın ömrü yarı yarıya azalır.

4.2.2.8 Ölçme Aletleri Üzerindeki Etkileri

Harmonik distorsiyonun neden olduğu faz dengesizliği, ölçme aletlerinin hatalı çalışmasına neden olmaktadır. % 20 `den büyük distorsiyon seviyeleri genellikle önemli hatalara neden olur. Yine rezonansın meydana gelmesi ölçü aletlerini olumsuz yönde etkilemektedir.

Konvensiyonel sayaçlar, harmoniklerin varlığında daha yüksek değerler okurlar. Endüksiyon diskli elektrik sayaçları, frekans karakteristiklerinden ve doğrusal olmayan davranışlardan hatalar üretirler. Akım ve gerilimin dalga şeklinin değişmiş olduğu bir testte, bu sayaçlar, %20 `lere varan hatalara neden olmuşlardır. Modern wattmetreler mükemmel bir performans gösterip, ölçüm hataları % 0,1 `den azdır. Ampermetrelerde ise aşırı yüklenmiş bir iletkenin fark edilmemesi gibi bir takım sakıncalar ortaya çıkabilir (Kocatepe ve Uzunoğlu, 2001).

4.2.2.9 Enerji İletim Sistemi ve İletişim Hatları Üzerindeki Etkileri

Harmoniklerin, enerji iletim sistemi ve iletişim hatlarındaki etkilerini şöyle özetleyebiliriz:

- Harmonik akımları iletim hatlarında, ek kayıplara ve bu hat üzerindeki devre elemanlarında ise gerilim düşümüne neden olurlar. Harmonik gerilimleri ise kablolu iletimde dielektrik zorlanmayı artırarak, kablonun ömrünü kısaltmaktadır.
- Güç sistem harmonikleri iletişim hatlarında büyük problemlere neden olurlar. Telefon etkileşim faktörü (TEF) harmoniklerin iletişim hatlarına olan etkilerini göstermektedir. Harmonikler bu hatlarda parazit ve gürültüye neden olurlar. İletilen bilgide kayıplar meydana gelirken, iletim kalitesi azalabilir. Güç iletkenlerin çaprazlanması, telefon hatlarında koruyucu kılıfın kullanılması parazit etkisini azaltabilir.

4.2.2.10 Elektronik Elemanlar Üzerindeki Etkileri

Elektronik elemanların doğru çalışması, gerilimin sıfır geçişlerinin doğru belirlenmesine bağlıdır. Harmonik distorsiyonu gerilimin sıfır geçişlerini kaydırabilir veya bir noktadaki fazlar arası gerilim, diğer noktadaki fazlar arası gerilimden daha büyük olmasına neden olabilir. Bu kayma nedeniyle oluşan komutasyon hatalarıyla yanlış işletimlere yol açarlar.

4.2.2.11 Harmoniklerin Yol Açtığı Rezonans Olayları

Harmoniklerin neden olduğu en önemli etkilerden biri de rezonans olayıdır. Harmonikli bir gerilim, endüktans ve kapasitanstan oluşan bir devreye uygulandığında rezonans meydana gelebilir. Rezonans olayında, kapasitif ve endüktif reaktans, harmonik frekansların birinde birbirine eşit olurlar. Bu harmonik frekansına rezonans frekansı denir. Bu durumda, şebeke frekansı ω_s artık sabit olmayıp $\omega_n = h\omega_s$ değerini alır.

Rezonans olayları sonucunda aşırı akım ve gerilimler meydana gelmektedir. Bunlar sadece kondansatörlerin değil diğer tesis elemanlarının da zarar görmesine neden olurlar. Rezonans, tatil günleri veya gecenin geç saatleri gibi sistem yükünün az olduğu zamanlarda sistemi daha çok etkiler. Ancak yük seviyesi arttıkça, akım daha küçük empedans yollarından akacağından rezonanstan dolayı oluşan harmonik artışı zayıflar.

Rezonans, paralel ve seri rezonans olmak üzere iki şekilde meydana gelir. Seri rezonans, seri bağlı RLC devresinde meydana gelip, devrenin empedansı düşük bir değer alır ve uyarma gerilimleri büyük akımlara neden olurlar. Benzer şekilde paralel rezonans, paralel bağlı RLC devresinden meydana gelip, devrenin admitansı düşük bir değer alır ve küçük uyarma akımları büyük gerilimlere neden olurlar.

Rezonans durumunda frekans ;

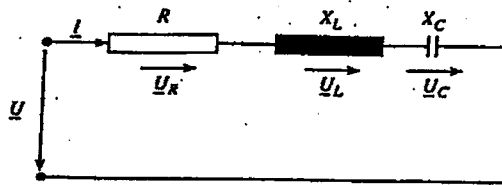
$$\omega_h = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ rad / s} \quad (4.22)$$

ve

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{f_1}{\omega_1\sqrt{LC}} = f_1 \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (4.23)$$

olur.

4.2.2.11.1 Seri Rezonans



Şekil 4.5 Seri rezonans devresi

Yukarıdaki şekilde yer alan ifadeler şunlardır;

R : Ohmik direnç

X_L : Endüktif direnç

X_C : Kapasitif direnç

I_R : Ohmik gerilim bileşeni

$\underline{I}_L$: Endüktif gerilim bileşeni

$\underline{I}_c$: Kapasitif gerilim bileşeni

$\underline{I}$: Devreden geçen akım

$\underline{U}$: Şebeke gerilimi

Seri RLC devresinin eşdeğer empedansı ;

$$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) \quad (4.24)$$

olup, herhangi bir h. harmonik için

$$\underline{Z}_h = R + j\left(hX_L - \frac{X_C}{h}\right) \quad (4.25)$$

değerini alır. Bunun mutlak değeri ise;

$$Z_h = \sqrt{R^2 + \left(hX_L - \frac{X_C}{h}\right)^2} \quad (4.26)$$

şeklinde hesaplanabilir. $h = h_r$ harmonik mertebesinde rezonans meydana gelirse;

$$h_r X_L = \frac{X_C}{h_r} \quad (4.27)$$

olup, rezonansın meydana geldiği harmonik mertebesi

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (4.28)$$

olduğu görülebilir. Rezonans durumunda devrenin empedansı saf direnç olur.

$$Z_{h_r} = R \quad (4.29)$$

Devreden geçen akım ise ;

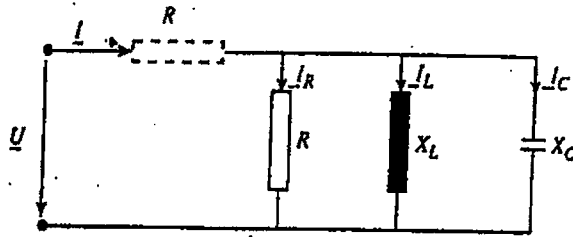
$$I_r = I_{\max} = \frac{U}{R} \quad (4.30)$$

değerini alır. Genel olarak direnç çok küçük olduğundan, rezonans halinde akımlar çok büyük değerler alırlar. Bu akımlar, endüktans ve kapasitansın uçlarında aşırı gerilimlere neden olurlar. Kondansatörün uçlarındaki gerilim, şebeke geriliminin X_C/R katına ulaşır. Oluşan

aşırı gerilimler, bobin sargılarının izolasyonuna ve özellikle de kondansatörlerin zorlanması nedeniyle olabilir.

Genellikle kuvvetli akım tesislerinde rastlanan seri rezonansın frekansı 150- 700 Hz arasında değer almaktadır. Harmonik akımları, şebekenin istenmeyen kısımlarına akarsa, rezonans devresi ile hat boyunca seri bağlantılı devrelerin olması durumunda önemli ölçüde parazit meydana gelebilir.

4.2.2.11.2 Paralel Rezonans



Şekil 4.6 Paralel rezonans devresi

Yukarıdaki şekilde yer alan ifadeler şunlardır;

R : Ohmik direnç

X_L : Endüktif direnç

X_C : Kapasitif direnç

I_R : Ohmik akım bileşeni

I_L : Endüktif akım bileşeni

I_C : Kapasitif akım bileşeni

I : Toplam akım

U : Şebeke gerilimi

Paralel rezonans devresinin empedansı ;

$$\underline{Z} = \frac{-j \frac{RX_L X_C}{X_L - X_C}}{R - j \frac{X_L X_C}{X_L - X_C}} = \frac{-jRX_L X_C}{R(X_L - X_C) - jX_L X_C} \quad (4.31)$$

olup, herhangi bir h . harmonik için,

$$\underline{Z}_h = \frac{-jRX_LX_C}{R\left(hX_L - \frac{X_C}{h}\right) - jX_LX_C} \quad (4.32)$$

değerini alır. Bunun mutlak değeri ise ;

$$Z_h = \frac{RX_LX_C}{\sqrt{\left[R\left(hX_L - \frac{X_C}{h}\right)\right]^2 - (X_LX_C)^2}} \quad (4.33)$$

şeklinde hesaplanabilir. $h = h_r$ harmonik mertebesinde rezonans meydana gelirse;

$$h_r X_L = \frac{X_C}{h_r} \quad (4.36)$$

olur. Rezonans durumunda devrenin empedansı saf direnç olur.

$$Z_{h_r} = R \quad (4.35)$$

Devrenin şebekeden çektiği akım ise ;

$$I_r = I_R = \frac{U}{R} \quad (4.36)$$

olup, aktif akımdır. Direnç genellikle büyük olduğundan şebekeden çekilen akım küçüktür. Ancak endüktans ve kapasitansta dolaşan akımlar büyük değerler alırlar. Bu durum kondansatörün aşırı yüklenmesine neden olur.

Paralel rezonans en çok karşılaşılan durumdur. Rezonansın hangi koşulda oluşacağını belirleyebilmek için, baradaki harmonik gerilimin ve baraya bağlı tüketici yük ve kaynaklarının harmonik akımlarının ölçülmesi gerekir. Baradan enerji sistemine akan akım küçük ama harmonik gerilim değerleri yüksek ise, rezonans enerji tarafında oluşabilir. Ayrıca baraya bağlı yükler harmonik akımları çekerek, harmonik gerilimlerin oluşmasına neden olursa, rezonansın sistemin endüktansı ve yük kondansatörü arasında oluşacağı da söylenebilir.

Rezonansın zararlı etkileri, aşırı kompanzasyondan kaçarak ve gerekirse devreye seri endüktans ilave edilerek azaltılabilir.

5 HARMONİKLERİN TEORİK OLARAK HESAPLANMASI

5.1 Harmoniklerin Teorik Olarak Hesaplanması

Alternatif nonsinüsoidal akım, sistemdeki elemanlardan geçerek, istenmeyen etkilere neden olurlar. Bu etkilerin zararları, elemanların karakteristiklerine ve elektromagnetik bozunum şekline bağlıdır. Harmonik akımlarının neden olduğu etkilerin maliyetini (ξ), ağırlıklı harmoniklerin karelerinin toplamı olarak ifade edebiliriz.

$$\xi = F \left[\sum_{h,h \neq 1} (\omega_h I_h)^2 \right] = F \left(\sum_{h,h \neq 1} \psi_h \right) ; \quad \psi_h = (\omega_h I_h)^2 \quad (5.1)$$

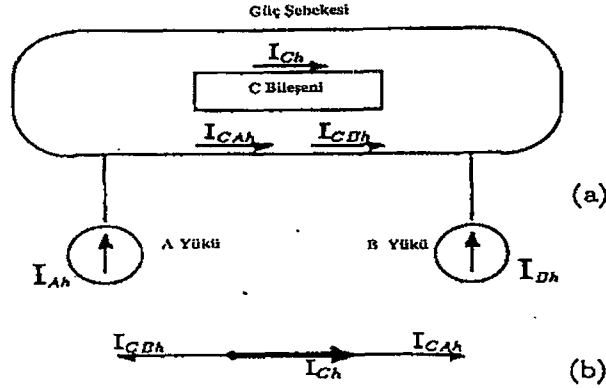
ω_h ağırlık faktörü olup, harmonik mertebesine (h) ve harmoniklerden etkilenen cihazların tipine, geometrisine ve fiziksel karakteristiğine bağlıdır. Genellikle gerilim harmoniklerinden dolayı meydana gelen bozulma % 10`dan küçük olduğu için, gerilim harmoniklerinin neden olduğu ek kayıplar ihmal edilebilir. Bu yüzden (5.1) kabul edilebilir doğruluktadır.

Genel olarak güç şebekelerinde M tane nonlinear yükün olduğu kabul edilebilir. I_{Ch} harmonik akım fazörü olup, h harmonik mertebesini C ise bu akımın üzerinden aktığı elemanı göstermektedir. M tane olan nonlinear yüklerin her birinin C elemanı üzerinden akıttıkları harmonik akım fazörleri I_{Cih} şeklinde ifade edilip, $i = 1, \dots, M$ değerini almaktadır. Her bir C elemanı için M fazörleri, P ve N grubu olmak üzere iki gruba ayrılabilir. P grubundakiler I_{Ch} akımının artmasına, N grubundakiler ise azalmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak şunu söyleyebiliriz; $M = P + N$ ve güç sistemindeki her bir eleman için I_{Ch}^+ ve I_{Ch}^- fazörleri arasında 180° `lik faz farkı olup, bunlar  $I_{Ch}$  `ye ($I_{Ch} = I_{Ch}^+ - I_{Ch}^-$) paraleldir. Burada I_{Ch}^+ fazörü P grubu tarafından üretilen sonuç harmonik akım fazörü iken I_{Ch}^- ise N grubu tarafından üretilen sonuç harmonik akım fazörüdür (Davis vd., 2000).

Şekil 5.1`de A ve B gibi iki tane nonlinear yükü bulunan bir şebeke gösterilmiştir. A ve B yükleri sırasıyla P ve N yük gruplarının sırasıyla eşdeğeridir. I_{CAh} ve I_{CBh} fazör akımları ise, I_{Ah} ve I_{Bh} harmonik akım kaynakları tarafından beslenmektedir. I_{CAh} ve I_{CBh} akımları arasında 180° faz farkı olduğu için ;

$$I_{Ch} = I_{CAh} - I_{CBh} \quad (5.2)$$

şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 5.1 İki adet nonlinear yüke sahip güç şebekesi

(5.1) `den yola çıkarak, A ve B nonlinear yükler tarafından oluşturulan I_{Ch} harmonik akımının C elemanı üzerindeki etkisi;

$$\psi_h = (\omega_h I_{Ch})^2 = \omega_h^2 (I_{CAh}^2 + I_{CBh}^2 - 2I_{CAh} I_{CBh}) \quad (5.3)$$

olur. (5.3)`de A ve B yüklerinin her birinin ayrı ayrı ve ortak etkileri gösterilmiştir. A yükünün tek başına yaptığı etki $\omega_h^2 I_{CAh}^2$ olup, B yükünün tek başına yaptığı etki ise $\omega_h^2 I_{CBh}^2$ şeklindedir. Ancak her iki yük tarafından yapılan ortak etkinin $-2\omega_h^2 I_{CAh} I_{CBh}$ olup, bunun A ve B yükleri arasında nasıl paylaştırılacağı konusunda belirsizlik vardır. Bunu bir örnek üzerinde gösterirsek, $\omega_h = 1$, $I_{CAh} = 10$ A ve $I_{CBh} = 1$ A olduğunu kabul edersek ;

$$\psi_h = (\omega_h I_h)^2 = (10 - 1)^2 = 100 + 1 - 20 = 81 \quad (5.4)$$

bulunur. Buradaki 100 birimlik kısım A yüküne, 1 birimlik kısım B`ye it olup, 20 birimlik kısım iki yüke aittir. Bu ortak olan kısmın iki yük arasında nasıl paylaştırılacağına dair çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemlerden üçü şudur (Davis vd., 2000) :

- 50 /50 Metodu : Ortak olan kısım yükler arasında eşit olarak paylaştırılır. Bu durum -10 birimlik kısım A yüküne, -10 birimlik kısım ise B yüküne ait olur.
- I_{CAh} ve I_{CBh} akımları ile orantılı olarak paylaştırılabilir. Bu durumda;

$$\text{A yükü için; } -20 \frac{10}{10+1} = -18.18$$

$$\text{B yükü için ; } -20 \frac{1}{10+1} = -1.82$$

- Harmonik akımlarının karesi (I_{CAh}^2 , I_{CBh}^2) ile orantılı olarak paylaştırılabilir. Bu durumda;

$$\text{A yükü için; } -20 \frac{100}{100+1} = -19.80$$

$$\text{B yükü için ; } -20 \frac{1}{100+1} = -0.20$$

Tüm bu sonuçlar Çizelge 5.1 `de verilmiştir. 50 / 50 metodunda ortak etki olan  $-20$  `lık kısım iki yük arasında eşit olarak paylaştırılmaktadır. Ancak bu yöntem kabul edilemez. Çünkü, B yükünün toplam etkisi hem negatif hem de B yükünün tek başına yaptığı katkıdan küçüktür. Ayrıca harmonik gücünün akış yönü, harmonik akım fazörünün artacağı ya da azalacağı konusunda karar verirken kriter olamayacağından, bu yöntem yine kabul edilemez.

İkinci yöntemde de ortak etkinin paylaşımı konusunda, benzer problemler vardır. A yükün toplam katkısı birinci metoda göre azalırken, B yükünün toplam katkısı artmaktadır.

Üçüncü yöntem ortak etkinin ve maliyetin paylaşımında daha adil bir yoldur. Her iki yükte harmonik kirleticidir. Ancak biri daha fazla iken diğeri daha az kirleticidir.

Çizelge 5.1 A ve B yükleri için ortakve toplam etki sonuçları

Ortak Etkinin Paylaşımı			Toplam Etki	
Metod	A	B	A	B
50/50	-10	-10	90	-9
I_{ih} Oranı	-18.18	-1.82	81.82	-0.82
I_{ih}^2 Oranı	-19.80	0.20	80.20	0.80

Şekil 5.2 `de gösterilen güç sisteminde yer alan  $M = P + N$  nonlinear yükleri ve C elemanına akan  $I_{Ch}$  sonuç harmonik akım fazörü genel olarak inceleyelim. Kompleks düzlem, Şekil 5.3 `de gösterildiği gibi, I_{Ch} sonuç fazöre bir dik çizilerek ikiye bölünür. Böylece M fazörleri ikiye ayrılır. Pozitif grup I_{Ch}^+ ($i = 1, \dots, P$), I_{Ch} ile aynı yarı düzlemde yer alırken, negatif grup I_{Ch}^- ($i = 1, \dots, N$) ise diğer yarı düzlemde kalır. Her bir $I_{Ch}^\pm$ fazörleri şöyle ifade edilebilir;

$$I_{Ch}^+ = \alpha_{Ch}^+ I_{ih}^+ ; I_{Ch}^- = \alpha_{Ch}^- I_{ih}^- \quad (5.5)$$

I_{ih}^+ , i `nin ($i \in P$) nonlinear yük tarafından sisteme enjekte edilen harmonik akım fazörleri

olup, I_{ih}^- ise i 'inci ($i \in N$) nonlinear yük tarafından sisteme enjekte edilen harmonik akımıdır. $\alpha_{Cih}^\pm$ katsayısı, kompleks bir sayı olup, güç şebekesinin topolojisine, temel frekansa ve harmonik mertebesine (h) bağlıdır.

Toplam harmonik akımının efektif değeri ;

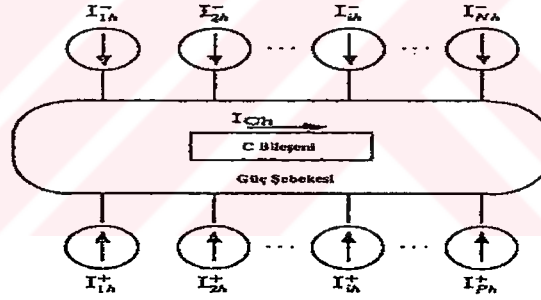
$$I_{Ch} = I_{Ph} - I_{Nh} \quad (5.6)$$

Olup,

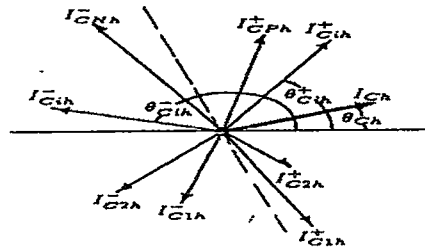
$$I_{Ph} = \sum_{i=1}^P I_{pih}, I_{pih} = I_{Cih}^+ \cos(\theta_{Cih}^+ - \theta_{Ch}) > 0 \quad (5.7)$$

$$I_{Nh} = \sum_{i=1}^N I_{nih}; I_{nih} = I_{Cih}^- \cos(\theta_{Cih}^- - \theta_{Ch}) < 0 \quad (5.8)$$

şeklinde olur.



Şekil 5.2 $M = P + N$ kadar nonlinear yüke sahip güç şebekesi



Şekil 5.3 $M = P + N$ nonlinear yüklerin fazör diyagramı

$$I_{Ch}^2 = I_{Ph}^2 + I_{Nh}^2 - 2I_{Ph}I_{Nh} = A_h I_{Ph}^2 + B_h I_{Nh}^2 \quad (5.9)$$

olur. Burada $A_h I_{Ph}^2$, P nonlinear yüklerin, $B_h I_{Nh}^2$ ise N yüklerinin C elemanına etkisini göstermektedir. Ortak etki olan $-2I_{Ph}I_{Nh}$ 'ın $I_{Ph}^2 / (I_{Ph}^2 + I_{Nh}^2)$ kısmı A yüküne, $I_{Nh}^2 / (I_{Ph}^2 + I_{Nh}^2)$ kısmı ise B yüküne aittir. Burada ortak etkinin paylaşımında daha önce bahsettiğimiz üçüncü metot kullanılmıştır.

$$A_h = B_h = 1 - \frac{2I_{Ph}I_{Nh}}{I_{Ph}^2 + I_{Nh}^2} \quad (5.10)$$

$A_h I_{Ph}^2$ kısmın P yükleri arasında, $B_h I_{Nh}^2$ 'lik kısım ise N yükleri arasında paylaşımı ise;

$$I_{Ph}^2 = \left(\sum_{i=1}^P I_{pih} \right)^2 = \sum_{i=1}^P \left(I_{pih}^2 + 2I_{pih} \sum_{j=i+1}^P I_{pjh} \right) \quad (5.11)$$

olup, buradan pozitif gruptaki (P) her bir yükün etkisi şöyle hesaplanır ;

$$I_{pih}^2 = I_{pih}^2 + 2I_{pih} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^P a_{pijh} I_{pjh} \quad (5.12)$$

$$a_{pijh} = \frac{I_{pih}^2}{I_{pih}^2 + I_{pjh}^2} \quad (5.13)$$

a_{pijh} katsayısı üçüncü metot kullanılarak hesaplanmaktadır. I_{pih}^2 ise, i. yükün tek başına olan etkisinin karesi (I_{pih}^2) ile I_{pih} ve I_{pjh} 'nin etkileşiminden oluşan ortak etkiyle oluşmaktadır.

$B_h I_{Nh}^2$ 'lik kısım N yükleri arasındaki paylaşımı da şöyledir ;

$$I_{Nh}^2 = \sum_{i=1}^N I_{nih}^2 \quad (5.14)$$

$$I_{nih}^2 = I_{nih}^2 + 2I_{nih} \sum_{i=1}^N b_{nijh} I_{njh} \quad (5.15)$$

$$b_{nijh} = \frac{I_{nih}^2}{I_{nih}^2 + I_{njh}^2} \quad (5.16)$$

(5.1)'den C elemanındaki h. harmonik akımının etkisi şöyle hesaplanabilir;

$$\begin{aligned}
\sum_{h,h \neq 1} \omega_h^2 I_{Ch}^2 &= \sum_{h,h \neq 1} \omega_h^2 \left[A_h \sum_{i=1}^P I_{\underline{pih}}^2 + B_h \sum_{i=1}^N I_{\underline{nih}}^2 \right] \\
&= \sum_{i=1}^P \sum_{h,h \neq 1} \omega_h^2 A_h I_{\underline{pih}}^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{h,h \neq 1} \omega_h^2 B_h I_{\underline{nih}}^2
\end{aligned} \tag{4.17}$$

5.2 Ek Enerji Kaybının Hesaplanması

τ (saat) zaman aralığı için, C ve R_{dc} üzerinden geçen harmonik akımının neden olduğu enerji kaybının maliyeti şöyle hesaplanabilir (Davis vd., 2000).

$$\xi_C = \sum_{i=1}^P \xi_{Pi} + \sum_{i=1}^N \xi_{Ni} \tag{5.18}$$

P ve N grubundaki i tane nonlinear yükün enjekte ettiği harmoniklerin neden olduğu elektrik enerji maliyeti aşağıda verilen ifadelerle hesaplanabilir;

$$\xi_{Pi} = ER_{dc} \int_0^T \left(\sum_{h,h \neq 1} K_h A_h I_{\underline{pih}}^2 \right) dt \tag{5.19}$$

$$\xi_{Ni} = ER_{dc} \int_0^T \left(\sum_{h,h \neq 1} K_h B_h I_{\underline{nih}}^2 \right) dt \tag{5.20}$$

Burada E, \$ / kwh olarak enerji maliyetindeki artışı göstermektedir.

6. HARMONİKLERİN YOK EDİLMESİ

6.1 Harmonik Filtreleri

Harmonik, enerji sisteminde bir çok probleme neden olurlar. Harmonik problemlerinin çözümü için geliştirilen yöntemleri iki kategoride toplayabiliriz (Arrillaga vd., 2001);

- *Önlem niteliğindeki çözümler:* Buradaki teknikler, harmoniklerin ve onların sonuçlarından kaçınmak için önleyici tedbirler amaçlamaktadır. Aşağıdaki çözüm yöntemlerini içerir;
 - Güç konverterlerinde harmonik kontrolü
 - Güç sistem elemanlarında özellikle de kapasitörler, transformatörler ve generatörlerde, harmoniklerin kontrolü, azaltılması ve ortadan kaldırılması için proses ve metotlar geliştirmek.

Harmonikleri zararsız seviyede tutmak amacıyla, her bir frekans harmoniklerine ve / veya harmonik distorsiyon faktörlerine belirli limitler getirilerek standartlar oluşturulur.

- *İyileştirici çözümler:* Var olan harmonik problemlerinin ortadan kaldırılması ile ilgili teknikler, bu kategoride yer alır. Aşağıdaki çözüm yöntemlerini içerir;
 - Filtrelerin kullanılması
 - Rezonans problemini çözmek için kondansatör gruplarının yerlerinin değiştirilmesi veya besleyicilerin yeniden düzenlenmesi şeklinde devrenin yeniden biçimlendirilmesi

Bir veya daha fazla frekanstaki akım veya gerilimlerin etkisini azaltmak veya yok etmek için, sisteme ilave edilen devrelere ‘ harmonik filtresi’ denir. Genellikle en etkin harmonik bileşenler için tasarım yapılırken, etkisi az olanlar için zayıflatıcı filtre devreleri tasarlanabilir. Filtreleri, işlevleri bakımından, aktif ve pasif filtreler, devreye bağlantısı bakımından ise paralel ve seri filtreler diye ikiye ayırabiliriz (Kocatepe vd., 2001).

Harmonik filtrelerin çeşitli tipleri aşağıda detaylı olarak incelenmiştir.

6.1.1 Pasif Filtreler

Belirli bir harmonik frekansına ayarlanmış, seri bağlı kondansatör ve endüktanstan oluşan pasif filtreler, harmoniklerin etkin şekilde azaltılmasını sağlarlar. Bazı durumlarda pasif filtre devresine dirençte ilave edilebilir. Ayrıca filtre devresinde kullanılacak kondansatörlerin, normal güç kondansatörlerine göre daha yüksek gerilimde çalışacak şekilde olması gerekir.

Bu filtre devrelerinde amaç, istenmeyen harmonik bileşen frekansında rezonansa gelecek L ve C değerlerini belirlemektir. Filtre, ayarlandığı harmonik değerinde düşük bir empedans sağlar.

Teorik olarak, filtre ayarlandığı frekansta sıfır empedans gösterir.

Pasif filtreler, çok uzun zamandan beri hem ucuz oldukları hem de verimliliklerinin yüksek olmasından dolayı, endüstriyel yükler tarafından üretilen harmoniklerin yok edilmesi için kullanılmaktadır. Ancak yapılarındaki bazı zayıflıklar nedeniyle, sistemde bazı sorunlara neden olurlar. Bu nedenle, bu filtrelere alternatif olarak, aktif filtreler geliştirilmiştir. Pasif filtrelerin dezavantajlarını şöyle sıralayabilir (Yalçın, 2000 ; Bhattachary vd.)

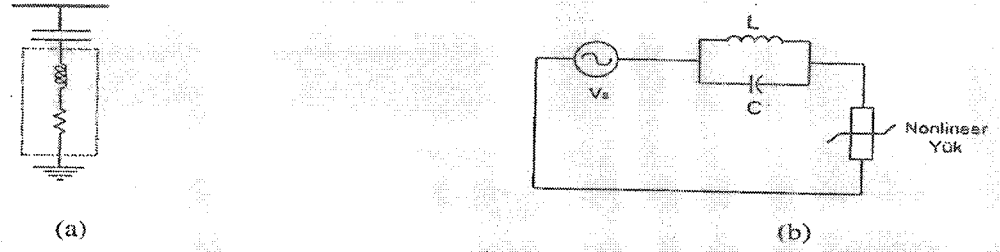
- Her bir harmonik akımı için ayrı ayrı pasif filtrelerin dizayn edilmesi gerekir. Genelde en etkin olan harmonik bileşen için tasarım yapılır.
- Pasif filtreler reaktif güç ürettiklerinden sistemde aşırı kompanzasyon meydana gelebilir.
- Şebeke empedansı, pasif filtrelerin kompanzasyon karakteristikleri üzerinde önemli etkisi vardır. Şebeke empedans ise besleme şebekesine bağlı olup, çoğunlukla da değeri bilinmez.
- Pasif filtreler şebeke ile paralel ve seri rezonansa neden olabilirler.
- Pasif filtreler üzerine gelecek harmonik akımlar kontrol edilemez.
- Bu filtrelerin tasarımı için büyük bir mühendislik çabası gerekmektedir. Kapsamlı şebeke bilgisine ihtiyaç vardır.

Yukarda belirtilen sakıncalar, aynı zamanda filtrelerin aşırı yüklenmesine neden olmaktadır. Bu nedenle filtreler daima yükün tam harmonik frekansının biraz altına ayarlanır (mesela, 5. harmonik frekansı yerine 4.7. harmonik frekansına ayarlanması). Bu durum, hem pasif filtrelerin etkinliğini azaltmakta hem de yük harmonik akımlarının şebekeye akmasına neden olmaktadır. Ayrıca bu filtrelerin performansını, güç besleme sistemlerinde azalmaktadır. Şebekelerde yapılacak değişiklikler filtrelerin performansını etkilediği gibi onların aşırı yüklenmesine ve tahrip olmasına da neden olabilir.

6.1.1.1 Seri Filtreler

Kondansatör ve reaktörün seri bağlanmasıyla oluşan seri filtreler, düşük harmonik frekanslarına ayarlanırlar. Ayarlandığı harmonik değerinde, kapasitör ve reaktörün reaktansları eşit olur ve filtre saf dirençli empedansa sahip olur. Bu yüzden seri filtreler, ayarlandığı frekans bileşenine yüksek empedans gösterirler. Filtrenin empedansı, düşük harmonikler için kapasitif, yüksek harmonik için endüktif özellik gösterir(Arrillaga vd.,2001).

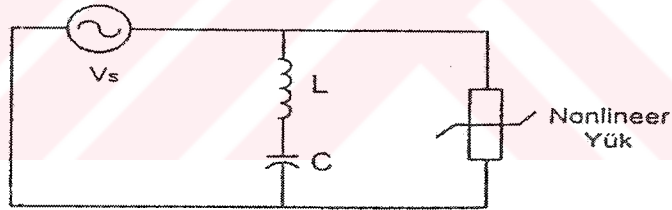
Harmonik kaynağı ile şebeke arasına seri olarak bağlanan bu filtrelerin en büyük dezavantajı, yük akımı taşıma ve hat gerilimine göre yalıtılmak durumunda olmalarıdır. Ancak rezonans problemleri yoktur.



Şekil 6.1 (a) Seri filtre ve (b) seri filtrenin bağlantı şeması

6.1.1.2 Paralel Filtreler

Harmonik kaynağı ile şebeke arasına paralel bağlanan paralel filtreler, düşük bir şönt empedans yolu ile istenmeyen harmonik akımlarının filtre edilmesini sağlarlar. Paralel filtreler, temel frekansta reaktif güç sağlayarak güç faktörünün düzeltiminde kullanılırlar. Hem tasarımları kolay hem de uygulamaları ucuzdur. Bu nedenle güç sistemlerinde genellikle paralel filtreler tercih edilir. Bu filtreler istenen anma değerine göre tasarlanabilirler. En büyük dezavantajları ise rezonansa neden olmalarıdır.



Şekil 6.2 Paralel filtrenin bağlantı şeması

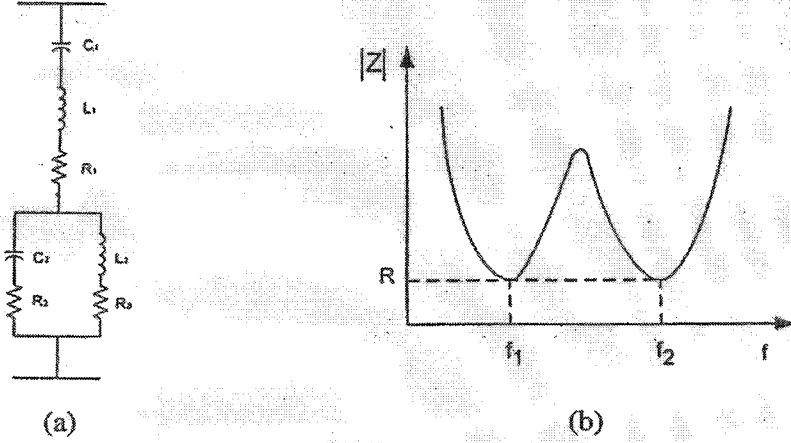
Paralel filtreleri iki grupta toplayabiliriz;

- Bant geçiren filtreler
- Sönümlü filtreler

6.1.1.2.1 Band Geçiren Filtreler

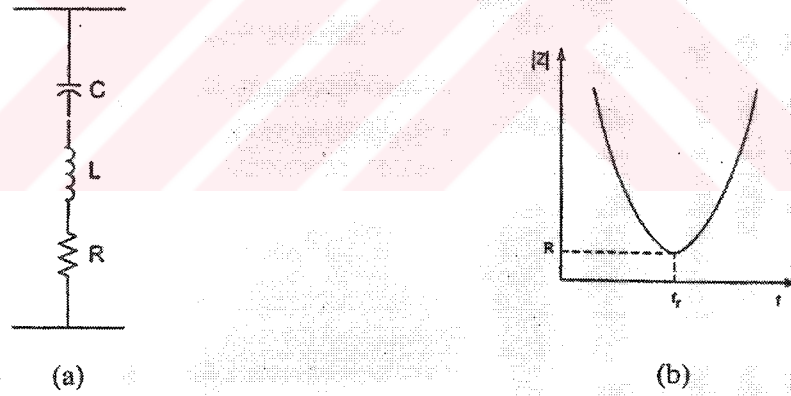
Band geçiren filtreler, çift band geçiren filtreler ve tek band geçiren filtreler olarak iki gruba ayırabiliriz. Çift band geçiren filtreler, ana kondansatör, ana reaktör ve ayar elemanının seri bağlanmasından oluşur. Ayar elemanı ise, paralel bağlı ayar kondansatörü ve ayar reaktöründen oluşur. İki ayrı frekansa ayarlı olan bu filtreler, bu frekanslarda düşük empedans göstererek istenmeyen harmonik akımlarının süzülmesini sağlarlar. Bu filtrelerin temel frekansındaki güç kaybı tek band geçiren filtrelere göre daha azdır. Ayrıca, endüktansların

sayısı ayarlanması ile yüksek gerilimdeki tüm darbe gerilimlerini denetim altına alırlar.



Şekil 6.3 (a)Çift band geçiren filtre ve (b) empedans değişimi

Tek band geçiren filtreler ise ayarlanan frekansta düşük empedans göstererek, harmoniklerin süzülmesini sağlarlar. Genellikle bu işlemi, tek bir frekans değeri için yaparlar.

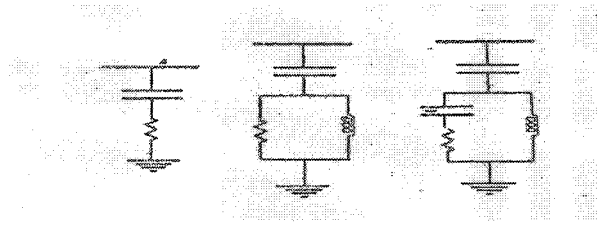


Şekil 6.4 (a) Tek band geçiren filtre ve (b) empedans değişimi

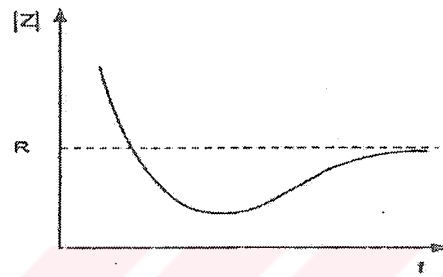
6.1.1.2.2 Sönümlü Filtreler

Sönümlü filtreler, yüksek mertebeli harmonikleri (17. ve üstündeki harmonik mertebeleri) filtrelerken, yüksek geçiren filtreler gibi davranarak, düşük empedans sağlarlar. Sönümlü filtreler, birinci, ikinci ve üçüncü mertebeden olabilirler. Birinci mertebeden sönümlü filtreler, temel frekansta aşırı kayıplara sahip olup, büyük bir kapasite gerektirdiğinden pek kullanılmazlar. En çok kullanılan sönümlü filtreler, ikinci mertebeden sönümlü filtrelerdir. Bu filtreler oldukça geniş bir frekans aralığında düşük bir empedans sağlarlar. Ancak bu filtreler iyi bir performans göstermelerine rağmen, üçüncü mertebeden sönümlü filtrelere göre temel

frekansta yüksek kayıplara sahiptirler (Kocatepe vd., 2003).



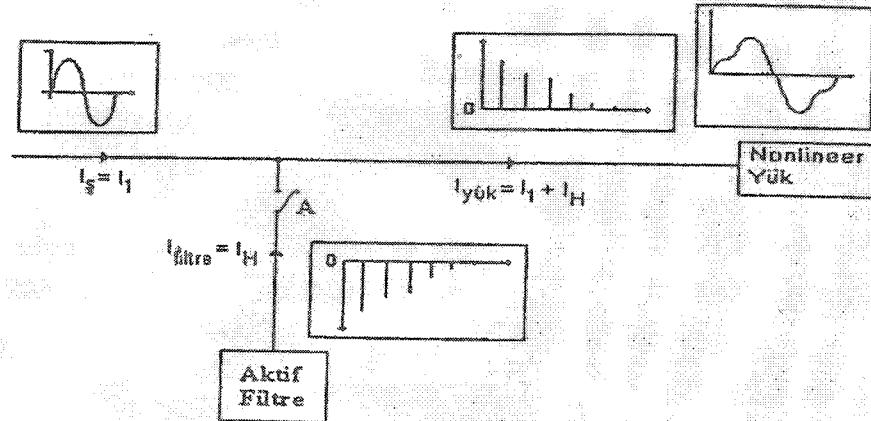
Şekil 6.5 Sönümlü filtreler: (i) Birinci mertebeden (ii) İkinci mertebeden (iii) Üçüncü mertebeden



Şekil 6.6 Sönümlü filtrenin frekans- empedans değişimi

6.1.2 Aktif Filtreler

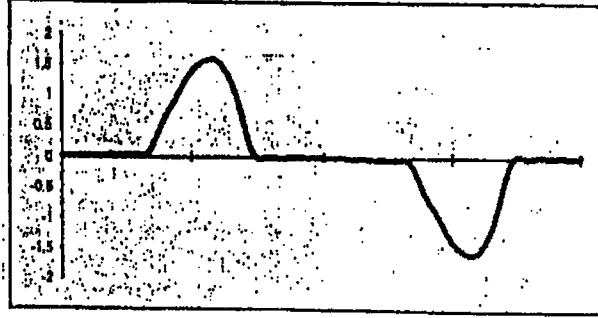
Aktif filtreler, pasif filtrelerin dezavantajlarını ortadan kaldırmak amacı ile geliştirilmiş olup, saf aktif filtre ve hibrid aktif filtre yöntemlerinden oluşmaktadır. Aktif filtreler şebekedeki harmonikleri ölçüp, bu harmoniklere ters fazda harmonikler üreterek, onları yok ederler.



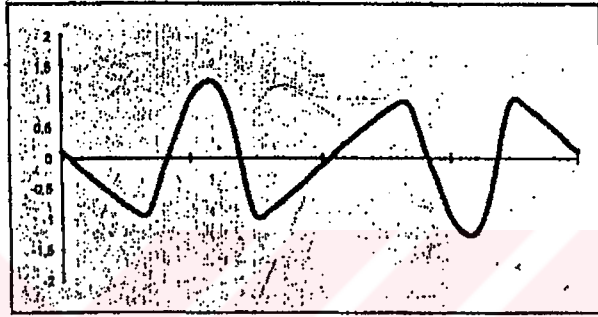
Şekil 6.7 Aktif filtrenin çalışma prensibi

Şekil 6.8`de aktif filtrenin toplu bilgisayar yüküne (RCD) göre çalışma şekli gösterilmiştir.

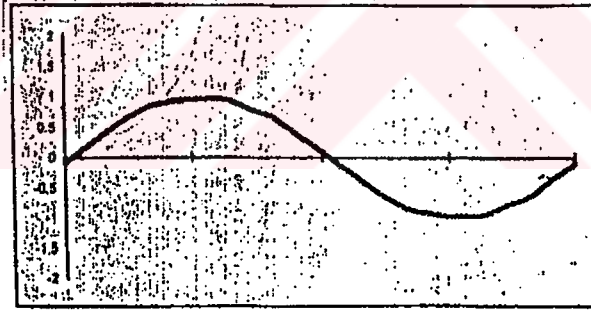
Yük akımı: ($I_{rms} = 42 \text{ A}$, $THD_1 = \%81$)



Aktif Filtre akımı ($I_{rms} = 31,1 \text{ A}$)

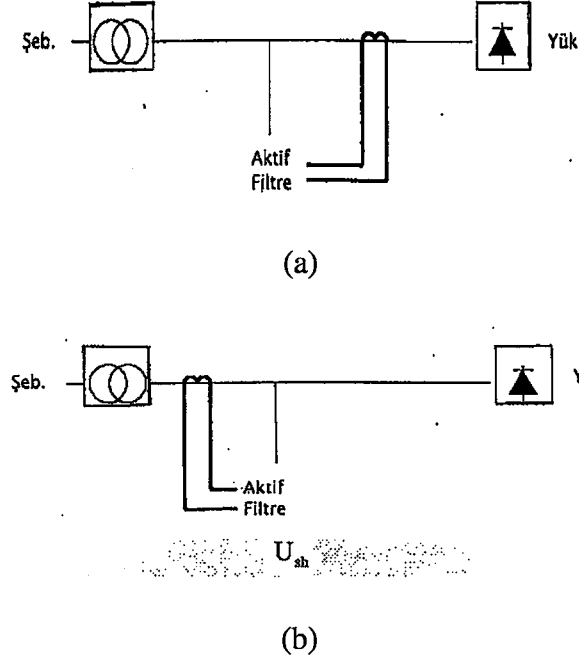


Şebeke akımı ($I_{rms} = 38 \text{ A}$, $THD_1 = \%3,5$)



Şekil 6.8 Aktif filtrenin toplu bilgisayar yüküne göre çalışma şekli

Aktif filtrelerin kontrol sistemi, açık ve kapalı akım çevrimi yoluyla yapılır. Açık çevrim kontrol sisteminde, aktif filtrenin yük tarafından harmonik akımları ölçülür. Daha sonra gerekli ters fazdaki harmonikler şebekeye verilir. Kapalı çevrim kontrol sisteminde ise, şebeke akımının son durumu ölçülür. Bu akımın en az düzeyde harmonik içermesini sağlayacak şekilde harmonikler üretilir (Yalçın, 2000).



Şekil 6.9 Aktif filtrenin ; (a) açık çevrim kontrol sistemi ve (b) kapalı çevrim kontrol sistemi

Aktif filtrenin pasif filtreye göre üstünlüklerini şöyle sıralayabiliriz (Yalçın, 2000) ;

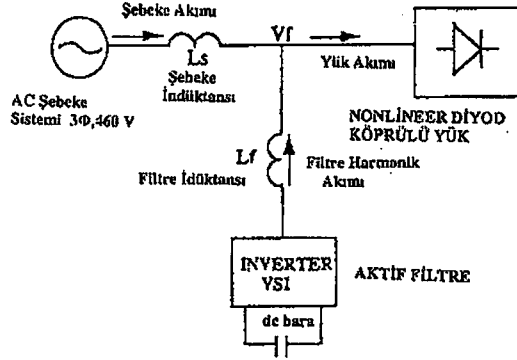
- Aşırı yüklenme ihtimalleri yoktur.
- Sistemdeki genişlemelere ve değişikliklere duyarlı değildir.
- Tüm ya da seçilen harmoniklerin kompanze edilmesini sağlarlar.
- Detaylı şebeke bilgisine ihtiyaç yoktur.
- Reaktif güç üretimi ile filtreleme arasında bir ilişki yoktur.

Çizelge 6.1 Aktif ve pasif filtrenin karşılaştırılması

Konu	Pasif Filtre	Aktif Filtre
Filtrenin ayarlandığı frekans	Bir veya iki frekansa ayarlanır.	Birden fazla frekansa ayarlanabilir.
Frekans değişim etkisi	Etkiliği azaltır.	Etkilemez.
Empedans modifikasyon etkisi	Rezonans etkisi vardır.	Etkisi yoktur.
Harmonik sıranın kontrolü	Oldukça zordur.	Ayar ile mümkün.
Akım yükselme etkisi	Aşırı yük ve bozulma etkisi	Aşırı yüklenme riski yoktur.
Yeni yük eklenmesi	Filtrenin değiştirilmesi gerekebilir.	Herhangi bir probleme yol açmaz.

6.1.2.1 Paralel Aktif Filtreler

Paralel aktif filtre sistemi Şekil 6.10 'da gösterilmiştir. Paralel aktif filtrelerin çalışma prensibi, yük harmonik akımlarına eşit büyüklükte ve ters fazda harmonik akımlarının ac sisteme enjekte edilmesine dayanmaktadır.



Şekil 6.10 Paralel aktif filtre sistemi

Harmonik kompanzasyonu için, paralel aktif filtrelerin ekonomik bir çözüm yolu olabilmeleri aşağıdaki şartlara bağlıdır (Bhattachary vd.):

- Tepe harmonik akımları % 30- 40 ile sınırlandırılır.
- Kayma güç faktörü, küçük yükler altında sınırlandırılır.
- Şebeke ile pasif filtre bileşenleri arasındaki etkileşim önemli bir sorundur.

Paralel aktif filtrelerin bazı avantajları şunlardır (Bhattachary vd.) :

- Sistemin dizaynında minimum masraf sağlayan bu filtreler, küçük ve orta güçlü (kVA) endüstriyel yükler için uygundur.
- Kayma güç faktörü problemlerine ve şebeke yüklenmesine neden olmazlar.
- Bu filtreler pahalı koruma şalterine ihtiyaç göstermezler.
- Bazı paralel üniteler yük kapasitelerini artırmak için kullanılabilir. Eğer inverter çıkışlarında anahtarlama frekans filtre kondansatörlerine gerek yoksa, paralel üniteler potansiyel etkileşim problemlerine ve şebeke tarafında etkileşim problemlerine neden olmazlar.

Paralel aktif filtrelerin bazı dezavantajları da şunlardır (Bhattachary vd.) ;

- Paralel aktif filtreler, yüksek güç seviyelerinde harmonik kompanzasyonu sınırlayabilir.
- Büyük nominal güç, yüksek tepe harmonik akım yüklerini gerektirir. Paralel aktif filtre inverterinin gücü (kVA) tepe harmonik akımı tarafından zorlanır.

PWM inverterlerinin oluşturduğu harmonikler, ac sistemde bulunan diğer pasif filtrelerle akabilir.

6.1.2.2 Hibrid Aktif Filtreler

Hibrid aktif filtreler, hem aktif hem de pasif filtrelerin farklı konfigürasyonlarını içerirler. L-C devresinin, aktif filtreye seri bağlanması ile hibrid aktif filtreler elde edilebilir. Bu filtreler, hem pasif filtre hem de saf aktif filtrenin problemlerini ortadan kaldırmakta, aynı zamanda da özellikle yüksek güçlü nonlinear güç elektronik yükleri için, pratik harmonik kompanzasyonu ve ekonomiklik sağlamaktadır. Ayrıca bu filtreler pasif filtrenin kompanzasyon karakteristiğini de iyileştirmektedir.

Hibrid aktif filtrelerin sahip oldukları bazı özellikleri şunlardır (Bhattachary vd.);

- Saf pasif filtrelerle göre daha az mühendislik çabası ve maliyet gerektirirler. Bu nedenle yüksek güçlü harmonik yüklerinin kompanzasyonunda (birkaç 100 kVA `den birkaç MW `lı yüklere kadar), bu filtrelerle çokça başvurulmaktadır.
- Paralel aktif filtrelerle göre daha küçük nominal güçlü aktif filtreler (tipik olarak yükün nominal gücünün (kVA) % 5-8 arasında), kullanılır.
- Diyod / tristör redresörleri ve frekans dönüştürücüleri gibi yüksek güçlü (MW seviyelerde) güç elektronik yüklerinin harmonik kompanzasyonu için uygundur.
- Yüksek tepe harmonik akımlı yüklerin kompanzasyonunda etkinlik sağlarlar. Pasif filtreler, tepe harmonik bileşenlerine ayarlanabilir. Böylece aktif filtrenin nominal gücü, tepe harmonik akımları tarafından zorlanması önlenir.

Aktif filtrelerin kompanzasyon karakteristiği bir çok faktöre bağlı olup, bunların içinde en önemli olanı dc kondansatör gerilimidir. Hibrid aktif filtrelerin kompanzasyon karakteristiği de aktif filtrelerin kompanzasyon karakteristiğine benzer. Hibrid aktif filtrenin dc kondansatörünün gerilimi, temel frekans gerilimine ve pasif filtredeki harmonik gerilimine bağlıdır. Temel frekans gerilimi, hassas kontrollerde ihmal edilebilir. Sonuç olarak dc kondansatörün gerilimi, pasif filtredeki harmonik gerilimi tarafından belirlenir. Pasif filtredeki harmonik gerilim ise pasif filtrenin harmonik empedansına ve kompanze edilmiş akımın etkilerine bağlıdır. Küçük dc kondansatör gerilimi ile yüksek anahtarlama frekans konverterinde düşük kayıp ve düşük nominal güç (VA) sağlanır. Bu yüzden hibrid aktif filtrelerde L-C pasif devrenin seçimi önemlidir. Hem basit yapısı hem de harmonik karakteristiği bakımından, tek ayarlı seri L-C devreleri en avantajlı olanıdır (Hao vd., 2002).

6.1.2.2.1 Hibrid Seri Aktif Filtreler

Hibrid aktif filtre çeşitleri içinde hibrid seri aktif filtre en cazip olanıdır. Bu filtreler, Şekil 6.11 'de gösterildiği gibi küçük nominal güçlü seri aktif filtre ve paralel bağlı L-C pasif filtreden oluşmaktadır. Aktif filtre, yükün nominal gücünün (kVA) % 5-8 'i arasında bir değere sahip olup, şebeke ve yük arasında ' harmonik izolatörü ' gibi davranmaktadır. Böylece şebeke –yük etkileşimi ve rezonans problemleri önlenir. Harmonik izolatörü özelliği ile pasif filtrenin devreye kesin bağlanması gibi bir zorunluluk bir miktar azalır ve filtre dizaynının şebeke empedansından etkilenmemesi de sağlanır. Ayrıca nonlineer yük civarındaki veya çevre gerilim harmoniklerinden dolayı filtrenin aşırı yüklenmesi olasılığı da yok edilmiş olunur.

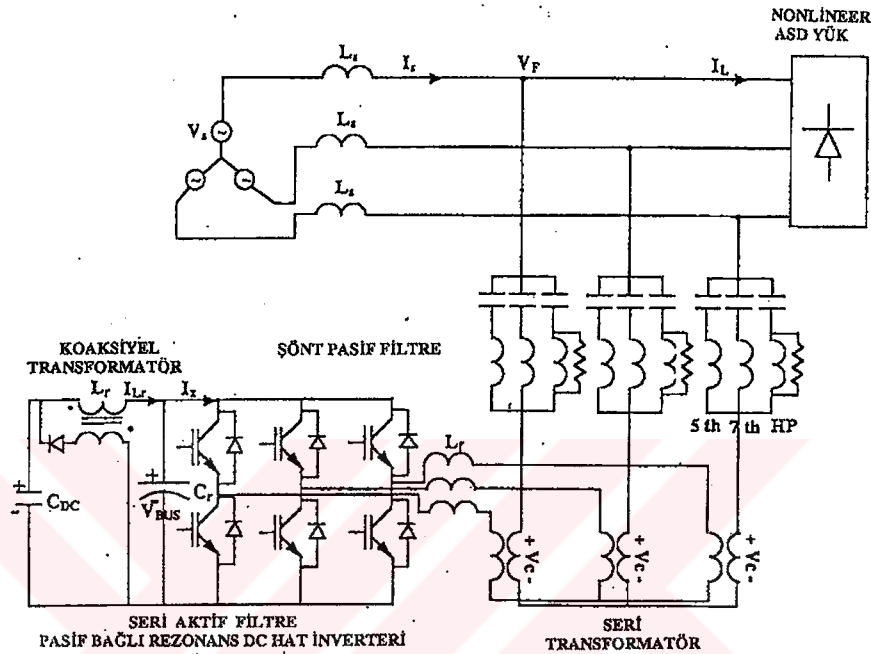
Yukarda belirtilen özelliklere ilave olarak hibrid seri aktif filtreler aşağıdaki özelliklerde sahiptir (Bhattachary vd.);

- Şebeke ve yük arasında 'harmonik izolatörü ' gibi davrandığı kontrol edilebilir. Seri aktif filtreler için gerekli nominal güç (kVA), harmonik izolatör özelliğine ve pasif filtrelerin dizaynına bağlıdır.
- AC güç sisteminin şebeke empedansı, harmonik kompanzasyonunu etkilemez.
- Seri aktif filtre, şebeke ve yük arasında harmonik izolatörü gibi davrandığı için, şebeke empedansı ile paralel pasif LC filtreleri arasında rezonans önleyici bir şey bulunmaz.
- AC kaynağın harmonikleri de dahil olmak üzere, ac sistemde üretilen çevre harmonikleri, L-C pasif filtreler tarafından çekilmez.
- Seri aktif filtre, sınır olarak, hat gerilim düzenleyici olarak görev yapabilir.
- Seri bağlı transformatör vasıtası ile, seri aktif filtre hatta bağlanır. Böylece seri aktif filtreler için yeterli korunma sağlanmış olunur.

Düzenleyici filtreleme algoritması, hibrid seri aktif filtrenin 'harmonik izolatörü 'özelliğini önemli derecede etkilemektedir. Seri aktif filtre için, düzenleyiciden oluşan Senkron Referans Alan (SCR) Şekil 6.12 'de gösterilmiş olup, tüm sistem koşulları için ' harmonik izolatörü ' özelliği sağlar. Senkron referans alan düzenleyicileri geçmişte motor sürücülerinde çok kullanılmıştır. Günümüzde ise sadece saf güç elektronik uygulamalarında kullanılmaktadır.

Hibrid seri aktif filtrelerde, SRF tüm yük harmonik akımını pasif filtreye yollar. Bu durumda, özellikle pasif filtre empedansları çok yüksekse ve hat, gerilim harmoniğine duyarlı yüklere bağlıysa, saf filtredeki harmonik gerilim kabul edilemeyecek kadar yüksek bir değer alır. SRF'nin yapısı değiştirilerek, yüksek harmonik yük akımlarının belirli bir yüzdesi şebekeye enjekte edilebilir. Böylece IEEE 519 'un harmonikle ilgili standardı sağlanıp, pasif filtrenin

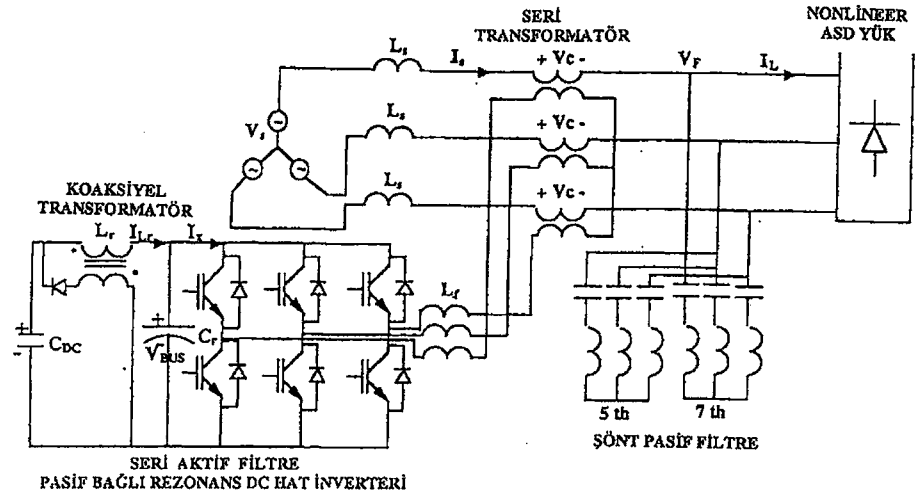
uç geriliminin toplam harmonik distorsiyonu indirgenir. SRF, pasif filtrenin hacmini ve nominal gücünü azaltırken, aynı zamanda daha basit bir filtre yapısının kullanılmasına da olanak sağlar. Aynı zamanda gerilim toplam harmonik distorsiyonunu azaltmak için, pasif filtrenin yeniden dizaynı ihtiyacını da ortadan kaldırır. Bu özellikler, zaten cazip, pratik ve ekonomik olan hibrid seri aktif filtrenin daha da çekici ve ekonomik olmasını sağlar.



Şekil 6.11 Hibrid seri aktif filtre sistemi

6.1.2.2.2 Hibrid Paralel Aktif Filtreler

Hibrid seri aktif filtrenin ikinci, pratik uygulaması hibrid paralel aktif filtre sistemidir. Bu sistem Şekil 6.12`de gösterildiği gibi paralel pasif filtre ve pasif filtreye seri bağlı olan aktif filtreden oluşmaktadır. Pasif filtre, ya L-C bağlı filtre ya da güç faktörü düzeltme kondansatörü olarak görev yapmaktadır. Aktif filtre ise, etkin bir şekilde, pasif filtrenin kalite faktörü, baskın yük akım harmoniklerine kadar artırarak, pasif filtrenin kompanzasyon karakteristiğini geliştirmektedir. Pasif filtre kondansatörü, temel sistem gerilimlerini depolayarak aktif filtrenin nominal gücünü azaltır. Aktif filtrenin nominal gücü, harmonik akım ve gerilim etkileri ile belirlenir. Ancak aktif filtre harmonik izolatörü veya aktif sönüm için gerekliyse, aktif filtrenin nominal gücü artar. Aktif filtrenin korunmasının kolay olması ve bağlantı transformatörüne ihtiyaç olmaması, hibrid paralel aktif filtrelerin avantajları olarak sayılabilir(Bhattachary vd.).



Şekil 6.12 Hibrid paralel aktif filtre sistemi

7. HARMONİKLİ DEVRELERDE GÜÇ FAKTÖRÜNÜN DÜZELTİLMESİ

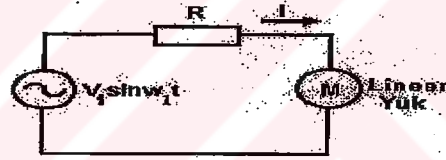
7.1 Harmoniklerin Güç Faktörü Üzerindeki Etkileri

Nonlineer yüklerin güç faktörünü nasıl etkilediğini anlayabilmek için öncelikle harmoniklerin bulunmadığı bir sistemin incelenmesinde fayda vardır. Bu amaçla Şekil 7.1 'de gösterilen devreyi ele alalım. Bu devrede kayıpları belirlemek için bir ön direnç, lineer yükü temsil eden bir motor ve tam sinüs kaynağı vardır. Böyle bir devrede şebeke akım ve gerilim denklemlerini şöyle ifade edebiliriz (Gencer vd.);

$$v(t) = V_{1m} \sin(\omega_1 t + \theta_1) \quad (7.1)$$

$$i(t) = I_{1m} \sin(\omega_1 t + \phi_1) \quad (7.2)$$

Bu denklemlerdeki V_{1m} ve I_{1m} ifadeleri, gerilim ve akımın tepe değerlerini, θ_1 ve ϕ_1 ise faz açılarını göstermektedir.



Şekil 7.1 Saf Sinüs kaynağı ile beslenen lineer yük

Böyle bir devre için güç faktörünü şöyle olur;

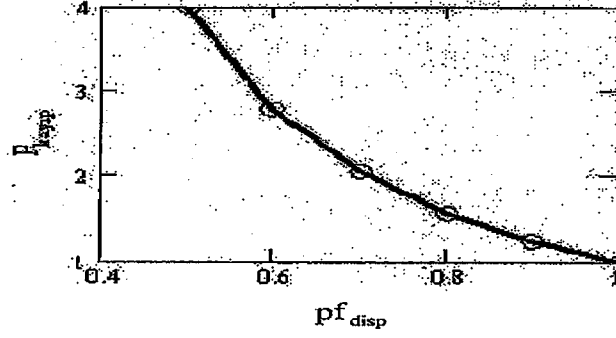
$$pf_{disp} = \frac{P}{S} \quad (7.3)$$

$$pf_{disp} = \frac{V_1 I_1 \cos(\theta_1 - \phi_1)}{V_1 I_1} = \cos(\theta_1 - \phi_1) = pf \quad (7.4)$$

(7.4) 'deki pf_{disp} kayma güç faktörü olarak adlandırılıp, saf sinüs sinyali ile çalışan sistemin güç faktörü olduğunu, pf 'nin ise toplam güç faktörünü ifade ettiğini daha önce belirtmiştik. $(\theta_1 - \phi_1)$ ise güç faktörünün açısıdır. Saf sinüs sinyali olan bir kaynak için kayma güç faktörü ile toplam güç faktörü birbirine eşittir.

Motorun çektiği aktif güç ve V_1 gerilimi sabit olarak kabul edildiğinde, güç faktöründeki

değişime bağlı olarak, ön dirençteki I^2R kaybının değişimi Şekil 7.2 'de verilmiştir.



Şekil 7.2 Güç faktörüne bağlı olarak dirençteki kayıpların değişimi

Nonlineer yükler ise, giriş akımının darbe karakteristiğinin neden olduğu yüksek RMS akımlarından dolayı güç faktörünü azaltırlar. Yani, kaynaktan çekilen güç sadece kısa zaman aralıklarında gerilim dalgasının tepe değerine yaklaşmaktadır. Toplam güç faktörü, aktif güç olarak ifade edilmekte, aktif güç ise RMS hat gerilim ve akımının etkisiyle bölünmektedir. Bundan dolayı yüksek hat akımları güç faktörünü azaltır. Düşük güç faktörü, idealden daha fazla akımın şebekeye akması demektir. Fazla akımlar ise transformatörlerde ve sargılardaki iletken kayıplarının izin verilen değerleri aşmasına neden olur (Cividino ve Telecom, 1992).

Toplam güç faktörü, harmonik distorsiyonu ile ilgili olup, (7.5) kullanılarak hesaplanabilir.

$$pf = \frac{P}{S_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD_v^2} \sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (7.5)$$

Burada ;

- Temel harmonik frekansı dışında diğer harmonik frekanslarının oluşturdukları güçler küçük olduğundan ihmal edilerek, $P \cong P_1$
- Gerilimde harmoniklerden dolayı meydana gelen bozulma genellikle % 10 'dan düşük olduğundan $V \cong V_1$ olarak kabul edebiliriz.

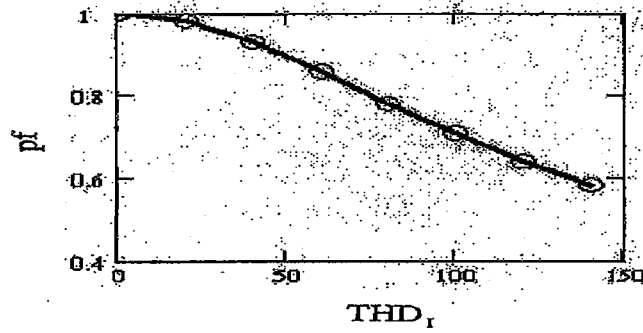
Bu kabullere göre toplam güç faktörü şu değeri alır;

$$pf = \frac{P_1}{V_1 I_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} = pf_{disp} \cdot pf_{dist} \quad (7.6)$$

Kayma güç faktörünün (pf_{disp}) alacağı en büyük değer 1 'dir. Akım harmoniklerinin güç

katsayısındaki bozulmaya etkisini gösteren distorsiyon güç faktörü (pf_{dist}) 1 'den küçük bir değer alacağından $pf < pf_{disp}$ olur. Sistemde harmonik bozulma yoksa $pf_{dist} = 1$ olur ve $pf = pf_{disp}$ değerini alır.

(7.6)'dan görüldüğü üzere, yük akımlarının distorsiyonu düşük güç faktörüne neden olmaktadır. Bu durum Şekil 7.3 'te gösterilmiştir.



Şekil 7.3 Toplam güç faktörünün akımdaki bozulmaya bağlı olarak değişimi

Toplam ve kayma güç faktörleri ile toplam harmonik distorsiyon değerleri bazı tek fazlı tüketiciler için Çizelge 7.1 'de verilmiştir. Buna göre harmonik distorsiyonu göz önüne alındığında % 20 'nin altındakiler düşük, $20 < THD_I < 50$ arasındakiler orta, % 50 'nin üstündekiler ise yüksek harmonik distorsiyonuna sahiptirler(Gencer vd.).

Çizelge7.1 Bazı tek fazlı yüklerde kayma, distorsiyon, toplam güç faktörleri ve akım için toplam harmonik distorsiyonu

Yük	pf_{disp}	THD_I	pf_{dist}	pf
ACS600 Motor Sürücü Devresi	0.93	138.24	0.586	0.54
Elektronik Balastlı Floresan Lamba	0.9743	123.1	0.63	0.6143
Klima	0.97	37	0.938	0.9
Bilgisayar	0.88	101.7	0.701	0.61
Mikrodalga Fırın	1	30.3	0.957	0.95
Fotokopi Makinası	0.58	69.1	0.823	0.48
Redresör	0.44	54	0.88	0.38
Monitör	0.89	86.7	0.756	0.66

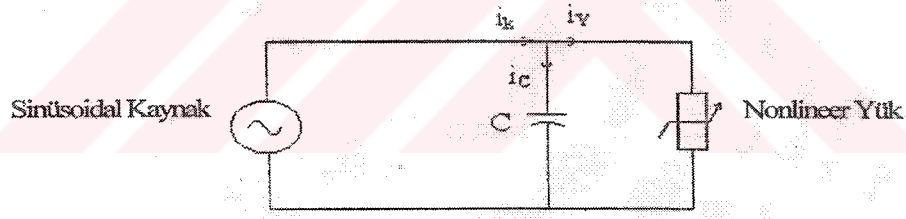
Üç fazlı tüketicilerde ise tek fazlı tüketicilere göre daha düşük akım distorsiyonunda dolayısıyla daha yüksek distorsiyon güç faktöründe çalışırlar.

7.2 W. Sherpherd ve P. Zand `ın Nonlinear Devrelerde Güç Faktörünün Düzeltilmesi Yaklaşımı

Bu yaklaşım, güç faktörünü maksimum yapacak minimum optimal kondansatör değerini bulmayı amaçlamaktadır. Harmonik bileşenlerin bulunduğu devrelerin, sinüsoidal beslemeli nonlinear devreler, nonsinüsoidal beslemeli lineer devreler ve nonsinüsoidal beslemeli nonlinear devreler olmak üzere üç tipi vardır. Bu tip devreler için W.Shepherd ve P. Zand tarafından yapılan güç faktörü düzeltme işlemleri aşağıda verilmiştir.

7.2.1 Sinüsoidal Kaynak ve Nonlinear Yükün Bulunduğu Devrelerde Güç Faktörünün Düzeltilmesi

Sinüsoidal besleme kaynağına sahip devrelerde, bu kaynaktan beslenen endüktif karakterli nonlinear bir yükün bulunması durumunda güç faktörünün düzeltimi Şekil 7.4`de gösterilmiştir. Yükümüz endüktif karakterli olduğundan şekilde de görüldüğü üzere sisteme kapasite ilave edilerek güç faktörünün düzeltimi sağlanır.



Şekil 7.4 Sinüsoidal kaynak ve nonlinear yüke sahip bir devrenin şönt kompanzasyonu

Yukarıdaki şekilde yer alan ifadeler şunlardır;

I_K = Kaynak akımı

i_Y = Yük akımı

i_C = Kondansatör akımı

Kaynaktan, nonlinear yüke yapılan güç transferi akım ve gerilimin temel bileşenleri tarafından iletilmektedir. İletimin kayıpsız olduğu kabul edilirse yüke verilen aktif güç şöyle olur ;

$$P_K = P_Y = VI_{Y1}\cos\Psi_{Y1} = VI_{K1}\cos\Psi_{K1} \quad (7.7)$$

I_{Y1} ve I_{K1} yük ve kaynak akımlarının temel bileşenleri olup, kompanzasyon kondansatörünün

akımı (I_{C1}) ile yük akımının (I_{Y1}) toplamı, kaynak akımını verir.

$$I_{K1} = I_{Y1} + I_{C1} \quad (7.8)$$

Devrenin Güç faktörü ;

$$GF_K = GF = \frac{P_K}{S_K} = \frac{P_K}{VI_K} \quad (7.9)$$

şeklinde tanımlanabilir. W. Sherpherd ve P. Zand tarafından devrenin güç faktörü (GF) ;

$$GF = \frac{I_{Y1} \cos \Psi_{Y1}}{\sqrt{V^2 \omega^2 C^2 + I_{Y1}^2 - 2VI_{Y1} \omega C \sin \Psi_{Y1} + \sum_2^h I_{Yh}^2}} \quad (7.10)$$

ve güç faktörünü maksimum yapmak için kompanzasyonda kullanılacak C `nin değerini

$\frac{dP}{dC} = 0$ ifadesi kullanılarak

$$C_K = \frac{I_{Y1} \sin \Psi_{Y1}}{\omega V} \quad (7.11)$$

bulunur. Bu ifadeyi (7.10) `da yazıldığında, güç faktörünün en büyük değeri ;

$$GF_{max} = \frac{I_{Y1} \cos \Psi_{Y1}}{\sqrt{I_{Y1}^2 \cos^2 \Psi_{Y1} + \sum_2^h I_{Yh}^2}} = \frac{P_K}{\sqrt{P_Y^2 + D_Y^2}} \quad (7.12)$$

şeklinde bulunur. Eşitlikte yer alan D_Y yüke ait distorsiyon gücüdür. Denklemden de görüldüğü üzere, harmonikli bileşenler güç faktörünü düşürmektedir. Güç faktörü ilave kondansatörlerle belli bir yere kadar artırılabilir. Bundan sonraki artış ise ancak harmoniklerin ortadan kaldırılması ile sağlanabilir.

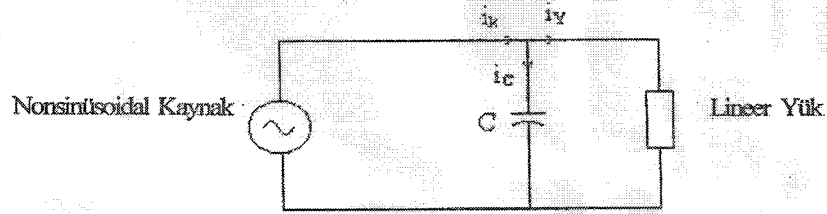
Kondansatör elemanı bağlanmadan önceki ve sonraki devrenin akımı için toplam harmonik distorsiyon değerleri sırayla şöyledir ;

$$THD = \frac{\left[\sum_{h=2}^N I_{Kh}^2 \right]^{1/2}}{I_{K1}} \quad (7.13)$$

$$\text{THD} = \frac{\left[\sum_{h=2}^H I_{Yh}^2 \right]^{1/2}}{I_{Y1}} = \frac{\left[\sum_{h=2}^H I_{Kh}^2 \right]^{1/2}}{I_{K1}} \quad (7.14)$$

7.2.2 Nonsinüsoidal Kaynak ve Lineer Yükün Bulunduğu Devrelerde Güç Faktörünün Düzeltilmesi

Nonsinüsoidal besleme kaynağına sahip bir devrede, bu kaynaktan beslenen direnç ve endüktanstan oluşan lineer bir yükün bulunması durumunda güç faktörünün düzeltimi için C kondansatörünü besleme kaynağına paralele bağlanır. Bu durum Şekil 7.5 'te gösterilmiştir.



Şekil 7.5 Nonsinüsoidal kaynak ve lineer yüke sahip bir devrenin şönt kompanzasyonu

Kaynak akımının ani değeri ;

$$i_k = i_Y + i_C \quad (7.15)$$

$$i_k = \sqrt{2} \sum_1^h \left[I_{Yh} \sin(h\omega t + \alpha_h - \Psi_{Yh}) + V_h h\omega C \sin\left(h\omega t + \alpha_h + \frac{\pi}{2}\right) \right] \quad (7.16)$$

şeklinde ifade edilebilir. Devredeki görünür güç ve güç faktörü ;

$$S_K^2 = V^2 I_K^2 = \left(\sum_1^h V_h^2 \right) \left(\sum_1^h I_{Kh}^2 \right) \quad (7.17)$$

$$\text{GF} = \frac{P}{S} = \frac{\sum_1^h V_h I_{Yh} \cos \Psi_{Yh}}{\sqrt{\left(\sum_1^h V_h^2 \right) \left(\sum_1^h I_{Kh}^2 \right)}} \quad (7.18)$$

şeklinde tanımlanabilir. Güç faktörünün en büyük değeri alması için kaynak akımının minimum olması gerekir. W. Sherpherd ve P. Zand güç faktörünün maksimum olabilmesi için

gereken kondansatör değerini $\frac{dI_k}{dI_C} = 0$ ifadesini kullanarak

$$C_K = \frac{\sum_1^h V_h I_h h \sin \Psi_{Yh}}{\omega \sum_1^h V_h^2 h^2} \quad (7.19)$$

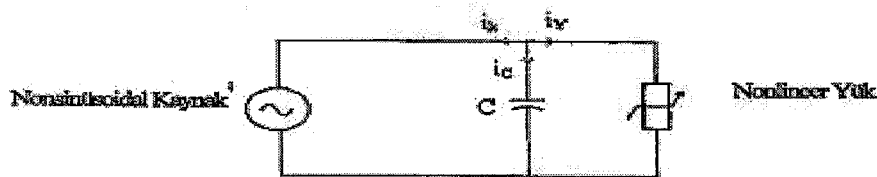
olarak belirlenmiştir. Bu ifadeyi (7.16) ve (7.18) 'de yazarsak efektif kaynak akımının minimum değeri ve güç faktörünün maksimum değeri şöyle olur;

$$I_{kmin}^2 = \sum_1^h \left[\left[\frac{V_h h \sum_1^h V_h I_{Yh} \sin \Psi_{Yh}}{\sum_1^h V_h^2 h^2} - I_{Yh} \sin \Psi_{Yh} \right]^2 + I_{Yh}^2 \cos^2 \Psi_{Yh} \right] \quad (7.20)$$

$$GF_{max} = \frac{\sum_1^h V_h I_{Yh} \cos \Psi_{Yh}}{\sqrt{\sum_1^h V_h^2 \left(\sum_1^h \left[\frac{V_h h \sum_1^h V_h I_{Yh} \sin \Psi_{Yh}}{\sum_1^h V_h^2 h^2} \right]^2 + I_{Yh}^2 \cos^2 \Psi_{Yh} \right)}} \quad (7.21)$$

7.2.3 Nonsinüsoidal Kaynak ve Nonlinear Yükün Bulunduğu Devrelerde Güç Faktörünün Düzeltmesi

Nonsinüsoidal besleme kaynağının bulunduğu bir devrede, bu devreden beslenen endüktif karakterli nonlinear bir yükün bulunması durumunda güç faktörü düzeltimi için C kondansatörü gerilim kaynağına paralel bağlanır. Bu durum Şekil 7.6 'da gösterilmiştir.



Şekil 7.6 Nonsinüsoidal kaynak ve nonlinear yüke sahip bir devrenin şönt kompanasyonu

$$P_k = \sum_1^{hl} V_{h1} I_{Yh1} \cos \Psi_{Yh1} \quad (7.22)$$

$$Q_K = \sum_1^{hl} V_{h1} I_{h1} \sin \Psi_{Yh1} \quad (7.23)$$

$$S_K^2 = V^2 I_K^2 = \sum_1^{h1} V_{h1}^2 \sum_1^{h1} I_{h1}^2 + \sum_1^{h2} V_{h2}^2 \sum_1^{h2} (V_{h2} h_2 \omega C)^2 + \sum_1^{h1} V_{h1}^2 \sum_1^{h2} (V_{h2} h_2 \omega C)^2 + \sum_1^{h1} V_{h1}^2 \sum_1^{h3} I_{Yh3}^2 + \sum_1^{h2} V_{h2}^2 \sum_1^{h1} I_{h1}^2 + \sum_1^{h2} V_{h2}^2 \sum_1^{h3} I_{h3}^2 \quad (7.24)$$

şeklinde yazılabilir. Burada h_1 hem akım hem de gerilimde bulunan harmonik bileşenleri, h_2 sadece gerilimde bulunan harmonik bileşenler, h_3 ise sadece akımda bulunan harmonik bileşenleri ifade etmektedir.

Devreye ait güç faktörü;

$$GF = \frac{P_K}{VI_K} \quad (7.25)$$

olup, maksimum olabilmesi için W.Sherpherd ve P.Zand tarafından birinci türevinin sıfıra eşitlenmesiyle;

$$\frac{d(GF)}{dC} = \frac{d(S_K)}{dC} = \frac{dI_K}{dC} = 0 \quad (7.26)$$

güç faktörü maksimum yapan kondansatör değeri

$$C_K = \frac{\sum_1^{h1} V_{h1} I_{Yh1} h_1 \sin \Psi_{Yh1}}{\omega \left(\sum_1^{h1} V_{h1}^2 h_1^2 + \sum_1^{h2} V_{h2}^2 h_2^2 \right)} \quad (7.27)$$

şeklinde bulunmuştur. Böylece kaynak akımının minimum değeri ve görünür gücün minimum değeri şöyle olur ;

$$I_{kmin}^2 = \sum_1^{h1} (V_{h1}^2 h_1^2 \omega^2 C_s^2 + I_{Yh1}^2 - 2V_{h1} I_{Yh1} h_1 \omega C_s \sin \Psi_{Yh1}) + \sum_1^{h2} (V_{h2} h_2 \omega C_s)^2 + \sum_1^{H3} I_{Yh3}^2 \quad (7.28)$$

$$S_{kmin}^2 = V^2 I_{kmin}^2 = \left(\sum_1^{h1} V_{h1}^2 + \sum_1^{h2} V_{h2}^2 \right) \left(\sum_1^{h1} (V_{h1}^2 h_1^2 \omega^2 C_s^2 + I_{Yh1}^2 - 2V_{h1} I_{Yh1} h_1 \omega C_s \sin \Psi_{Yh1}) \right) + \sum_1^{h2} (V_{h2} h_2 \omega C_s)^2 + \sum_1^{H3} I_{Yh3}^2 \quad (7.29)$$

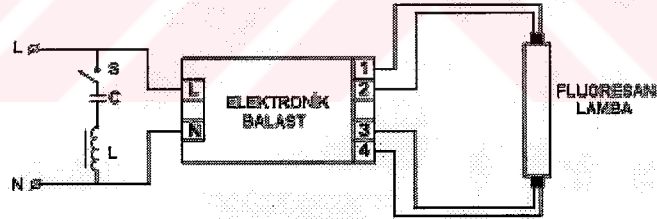
Güç faktörünün en büyük değeri ise şu şekilde hesaplanabilir ;

$$GF_{\max} = \frac{\sum_{h1} V_{h1} I_{Yh1} \cos \Psi_{Yh1}}{\sqrt{\left(\sum_{h1} V_{h1}^2 + \sum_{h2} V_{h2}^2 \right) I_{kmin}^2}} \quad (7.30)$$

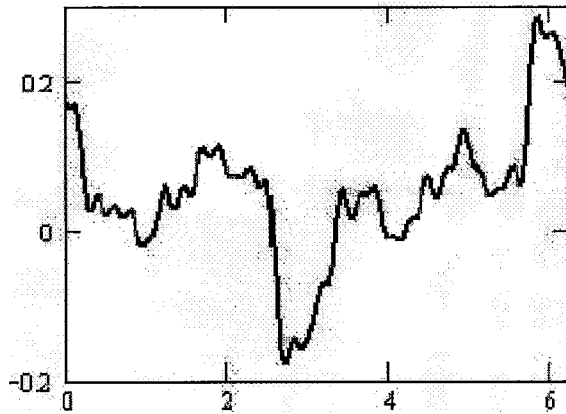
3.3 7.3 Harmonik Filtreleri İle Güç Faktörü Düzeltimi

Güç faktörü düzeltimi, kondansatörlerin, harmonik distorsiyonunu azaltmak için kullanılması genellikle tavsiye edilmez. Sadece kayma güç faktörü kondansatörlerle kompanze edilebilir. Harmonik distorsiyonunu azaltmak için kullanılan kondansatörlerle, sistem özellikle korunmuş olsa dahi, güç sistem rezonanslarına ve harmoniklerin genliklerinde yükselmelere neden olacaktır. Bunun yerine harmonik filtreler güç faktörünü düzeltmek için kullanılmalıdır. Harmonik filtreler dağıtım sisteminde enerji kayıplarını azaltırken, harmonik distorsiyonun olumsuz etkilerini de ortadan kaldırmaktadır.

Bir fazlı sistemlerde filtreli ve filtersiz durumdaki güç faktörünü incelemek için Şekil 7.7'deki devreyi ele alalım. Burada 20 W'lık elektronik balastlı bir floresan lamba tesisatı gösterilmiştir. Böyle bir devredeki harmonikli akımın dalga şekli ise Şekil 7.8 'de gösterilmiştir (Gencer vd..).



Şekil 7.7 Elektronik balastlı floresan lamba deneyinin montaj şeması



Şekil 7.8 Harmonikli akımın dalga şekli

Bu devrenin 1 . harmonikteki faz açısı 13 olup, kayma güç faktörü;

$$pf_{disp} = \cos(13^\circ) = 0,9743 \quad (7.31)$$

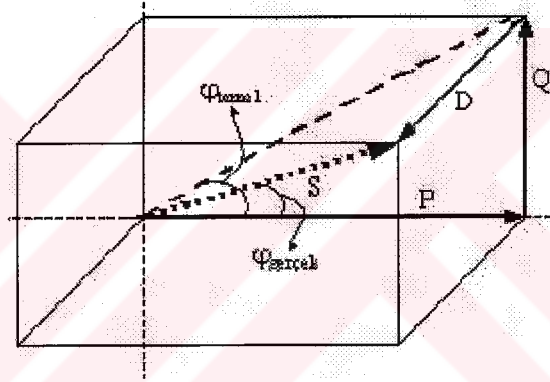
olur. Akım için toplam harmonik distorsiyonu % 123., olup, distorsiyon güç faktörü ;

$$pf_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_1^2}} = 0,63 \quad (7.32)$$

olarak hesaplanır.Buradan sistemin toplam güç faktörü;

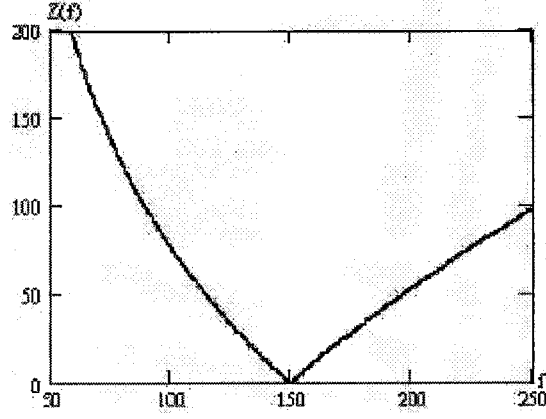
$$pf = pf_{disp} \times pf_{dist} = 0,9743 \times 0,63 = 0,6143 \quad (7.33)$$

şeklinde elde edilir. Şekil 7.9 `da harmonikli bir sistemde çekilen gücün bileşenleri gösterilmiştir.



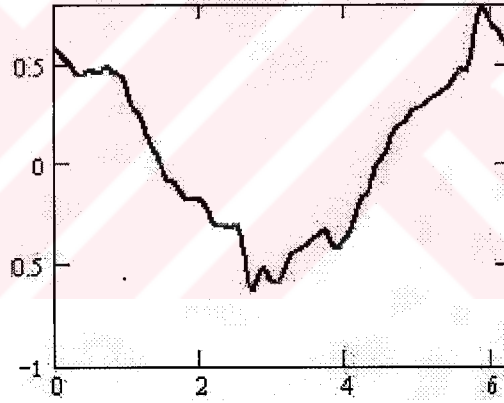
Şekil 7.9 Güç bileşenleri

Güç açısı ölçüm cihazlarının bazıları toplam güç faktörünü, bazıları ise kayma güç faktörünü referans alarak kompanzasyon gerçekleştirilir. Bu tür sistemlerde harmonikleri yok etmek amacıyla kullanılacak filtreler, temel harmonik frekansındaki güç faktörü düşükse bunu yükseltecek, yüksekse değerini düşürmeyecek şekilde seçilmelidir. Örnekteki flouresan lambaya ait tesisatta en baskın olan 3. harmoniği yok etmek için $L = 98 \text{ mH}$, $C = 11,4 \mu \text{ F}$ alınabilir (Gencer vd.).



Şekil 7.10 Pasif filtre devre empedansının frekansla değişimi

Şekil 7.7'deki devrede filtre devreye alınırsa akımın dalga şekli sinüs formuna yaklaşır. Bu durum Şekil 7.11'de gösterilmiştir. Toplam harmonik distorsiyonu% 16,28'e düşerken, kayma güç faktörü 0,99'a, toplam güç faktörü ise 0,98'e yükselmiştir.



Şekil 7.11 Filtrenin devreye alınması durumundaki akımın dalga şekli

7.3.1 Şönt Aktif Filtre- Pasif Filtre Kombinasyonu ile Güç Faktörü Düzeltimi

Anahtarlamalı-kondansatör aktif filtre esasında inverter konfigürasyonundan farklı olup, ilk olarak 1982 yılında C.C.M Arouchos tarafından ortaya konulmuştur. Anahtarlamalı-kondansatör konfigürasyonu, büyük akım veya gerilim ihtiyacını ortadan kaldırarak, hem daha az yer kaplamakta hem de maliyeti azaltmaktadır. Bu devrenin en büyük sakıncası ise kontrol algoritmasının çok karmaşık olması ve rezonansa neden olmasıdır.

Bu devrede, bir örnekleyici kontrol devresi kullanılıp, yük güç faktör düzeltimi için sadece temel akımın kontrolünü gerektiren invertere uygulanmaktadır. Geçen yıllarda nonlineer yüklerdeki hızlı çoğalma güç sisteminde akım harmoniklerini yok etmek için aktif filtre

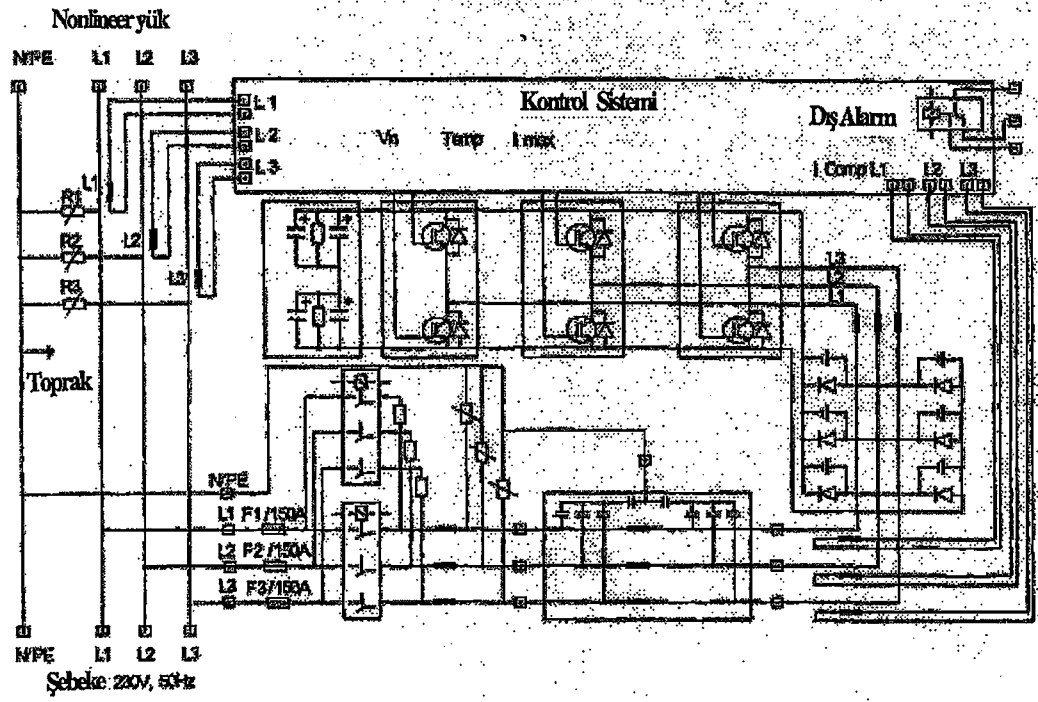
dizaynında gelişmelere neden olmuştur. Böylece, bu devrenin güç faktörü düzeltmenin yanında harmonikleri ortadan kaldırılması ve çok kolay kontrol edilmesi de sağlanmıştır (Kaşıkçı, 2000).

Bu bölümde, pasif filtre ile kombine edilmiş şönt aktif güç filtre kombinasyonu incelenecektir. Bu kombinasyonda, reaktif güç ve değişen yüklerin kompanzasyonu için uygun olan pasif filtre, IGBT'ler kullanılarak harmoniklerin azaltılması ve güç faktörünün düzeltimi sağlanır.

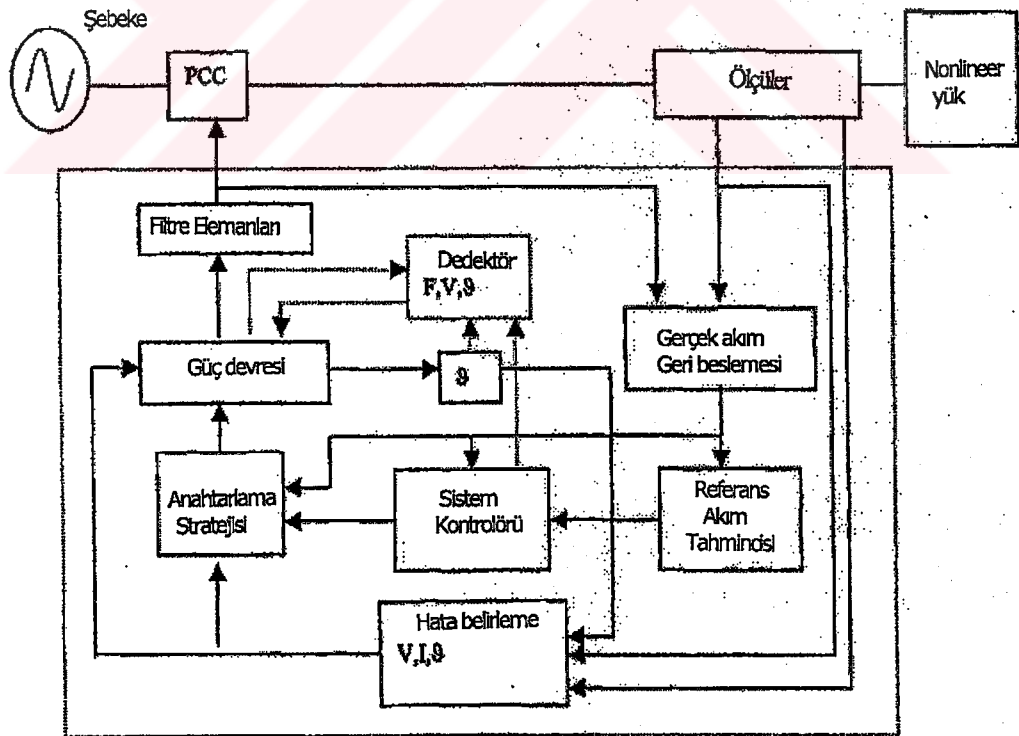
Bu tekniğin temel avantajı, çok karmaşık bilgisayar algoritmasına ve mikroişlemcilere ihtiyaç göstermemesidir. Yeni kontrol ünitesi, çok karmaşık tekniklerle kontrol edilen bilgisayara alternatif bir gelişme sağlayacak şekilde geliştirilmiştir. Burada, kontrol tekniği ile ilgili hesaplama ihtiyacının azaltılmasını sağlayacak ve böylece önerilen kombinasyonun uygulanabilirliğini artıracak iki farklı yaklaşım incelenecektir (Kaşıkçı, 2000).

Şekil 7.12'de önerilen aktif güç filtre konfigürasyonu gösterilmiştir. Şekil 7.13'te ise önerilen yeni kontrol blok diyagramındaki güç aktif filtre yapısını oluşturan dokuz ana bölüm gösterilmiştir. Nonlineer yük tarafından üretilen harmonik akımları bulunarak, referans akım tahmincisine ve diğer sistem değişkenlerine geri bildirilir. Sonuç referans işareti tüm sistem kontrolörlerine sürülür.

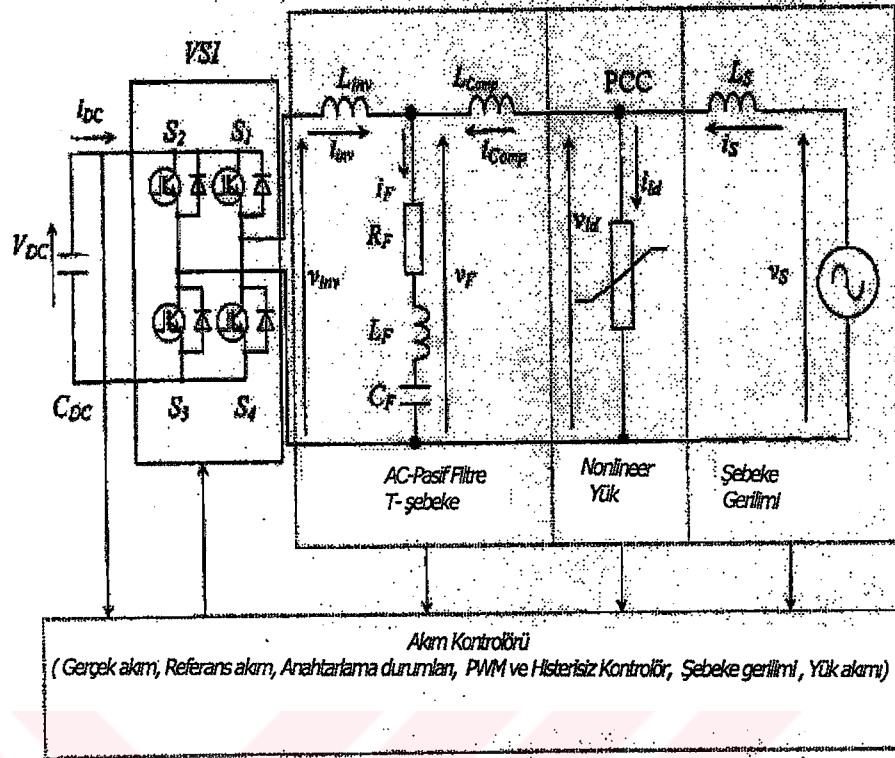
Sonuç filtre akımı da beklenir ve kontrolörlere geri bildirilir. Bu durumda, güç ve filtre devresi ortaklaşma noktasına bağlanır. Şekil 7.14'teki bir faz diyagramında gösterildiği gibi şönt aktif filtre ana güç devresine bağlanır. Akımın devreye akış miktarını kontrol etme yeteneği olan şönt filtrenin temel amacı yük akım harmoniklerini ortadan kaldırmaktır. Bununla beraber, fliker ve üç fazlı akımların dengelenmesi ve reaktif güç kompanzasyonunu da sağlar.



Şekil 7.12 Şönt aktif güç filtreleri ve pasif filtre için tam blok diyagram



Şekil 7.13 Önerilen sistemin tam kontrol diyagramı

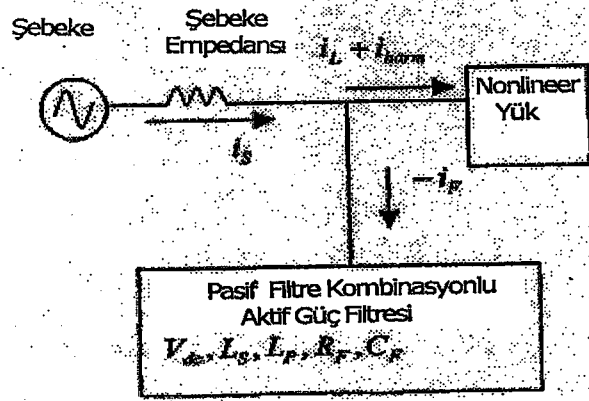


Şekil 7.14 Bir faz tam köprü inverter filtre şeması

7.3.1.1 Filtrenin Analizi

Düşük ve orta güç uygulamalarında akım harmonikleri ile ilgili problemler oldukça önemlidir. Bu problemler akımın değeri ve güç sistem dizayn kriterlerinin (Şekil 7.15) çoğunu belirleyen akımın dalga şeklidir. Yükün nonlinear karakteristiğinden dolayı yük akımı i_L , temel bileşen i_1 ve harmonikli bileşen i_{harm} oluşmaktadır. Aktif filtre kullanılmazsa i_{harm} akımı, şebeke akımı i_s 'de yer alır ve güç sistemini kirletir. Eğer $i_F = i_{\text{harm}}$ olursa o zaman $i_s = i_1$ olur ve i_1 sadece temel bileşeni içerir. (Kaşıkçı, 2000).

Bu sebeple dizayn edilen bir çok aktif filtreler, kompanzasyon işaretini kontrol etmek için çeşitli anahtarlama teknikleri kullanılarak gerilim veya akım beslemeli inverter konfigürasyonu haline dönüştürler. İnverter konfigürasyonunun gerekli kompanzasyon işaretini üretilmesi sabit dc gerilim veya akım kaynağının elde edilebilmesine bağlıdır. Bu ise pahalı olmayan ancak geniş bir yer kaplayan büyük süzme kondansatörlerinin veya indüktörlerinin kullanımı ile başılır (Kaşıkçı, 2000).



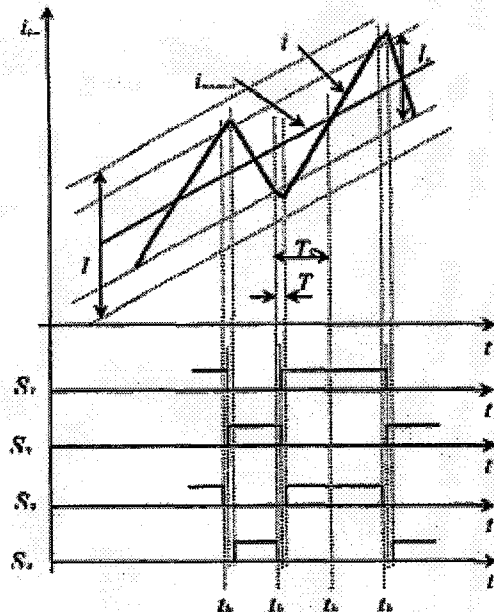
Şekil 7.15 Şönt aktif filtre konfigürasyonu

Paralel bağlı aktif filtre, yükün çektiği harmonik bileşenleri besleyen i_F kompanzasyon işaretini üretir.

$$i_s = i_L - i_F = i_1 + i_H - i_F \quad (7.34)$$

Sabit dc seviyesini korumak için gerekli enerji inverter üzerinden şebekeden sağlanır ve bu filtrenin performansı ile sınırlanır.

Şekil 7.16 örnek olarak ele alınırsa, L_p inverter indüktöründeki akımın değişim oranı şöyle kontrol edilebilir ;



Şekil 7.16 PWM –histerisiz anahtarlama tekniği

Üst sınır ;

$$I_{dv} + I_{\delta} = \frac{T_s}{2(T_s + T_D)} \quad (7.35)$$

Alt sınır ;

$$I_{dv} - I_{\delta} = \frac{T_s}{2(T_s + T_D)} \quad (7.36)$$

Histerisiz kontrol band genişliği I için, kontrol edilen akım şöyle hesaplanabilir ;

$$I_{tol} = I_{\delta} \frac{T_s}{2(T_s + T_D)} \quad (7.37)$$

Çizelge 7.2 `de inverterlerin anahtarlama modları ve örnekleme metodu verilmiştir. Durum I `den durum III `e direkt anahtarlamaadan kaçınılmalıdır. IGBT `ler için anahtarlama durumları Sap, Sbn, Sbp ve San `dir.

Çizelge 7.2 İnverterlerin tarama metodu

i_p	S_{ap}	S_{bn}	S_{bp}	S_{an}	$U_A(t) = U_{dc}$
I	1	1	0	0	+
II	1	0	1	0	0
III	0	0	1	1	-

Ana güç akım ve kaynak gerilimindeki harmoniklerden kaçınmak için filtre dizayn edilir ve tek VST'ya (gerilim kaynak inverteri) uygulanır. Filtre direnci R_F , inverter indüktansı ve şebeke kondansatör dalgalanmalarını önlemek için devreye ilave edilir. R_F `nin düşük değeri, kaynak gerilimin ve şebeke akımın düzeltilmesinde en iyi sonucu verir.

Diğer taraftan, filtre kondansatörü C_F akım ve gerilimdeki ufak dalgalanmaları depo edebilecek kadar büyük olmalıdır. Hata akımını sınırlamak için şu eşitlik verilebilir;

$$\frac{I_{\delta}(L_s + L_F)}{2V_d} \geq (T_s + T_D) \quad (7.38)$$

Rezonans frekansı ;

$$f_r \leq \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_s + L_p}{L_s L_p C_F}} \quad (7.39)$$

şeklindedir. Rezonans frekansından kaçınmak için, örnekleme frekansı f_s olmak üzere şöyle bir tahmin yapılabilir;

$$f_s \geq 20f_r \quad (7.40)$$

Filtre kondansatörü (CF) şöyle olmalıdır;

$$C_F \geq 10 \frac{L_s + L_p}{L_s L_p} T_s^2 \quad (7.41)$$

O halde filtre direnci şöyle açıklanabilir;

$$R_F = 0,15 \sqrt{\frac{L_s L_p}{C_F (L_s + L_p)}} \quad (7.42)$$

Aşağıdaki eşitlikte verilen sabit uzunluklu zaman aralıklarında istenen değer oluşur;

$$T_s \leq \frac{2\pi}{20} \sqrt{\frac{L_s L_p C_F}{(L_s + L_p)}} \quad (7.43)$$

Anahtarlama devresinin kontrol gecikme zamanı T_D şöyle açıklanabilir;

$$T_D \leq \frac{I_s (L_s + L_p)}{2V_{dc}} - T_s \quad (7.44)$$

Güç dağıtım sistemlerinde toplam güç tüketimi (aktif ve reaktif güç) ve harmonik ölçümü yapılmaktadır. Uzun süreli yapılan analizler kaydedilir. Gerilimle eş zamanlı olarak transformatör akımları ve tüm tüketici akımları ölçülür. En güçlü harmonik gerilim ve akım seviyesi 5. harmoniktir.

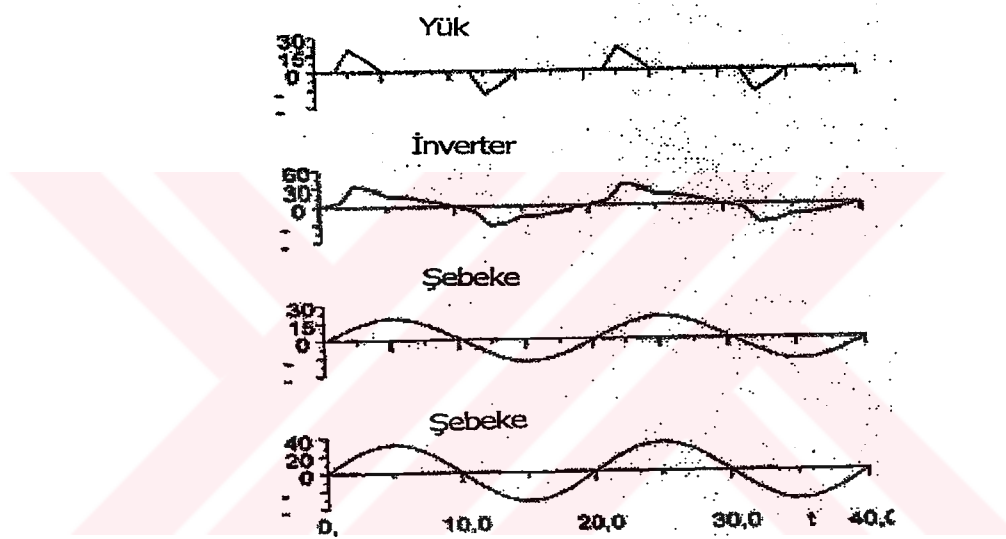
7.3.1.2 Deneysel Sonuçlar

Bu teoriyi doğrulamak için Şekil 7.13 `teki tüm bileşenler laboratuarda dizayn edilir. Akımlar, gerilimler ve anahtarlama frekanslarının gösterimi için kapı kontrollü bileşenler Çift Kutuplu Transistör, güç MOSFET,GTO ve IGBT tercihen kullanılır. Çift transistörlerin ve MOSFET `lerin avantajları izole edilmiş Kapı Çift Kutuplu Transistörlerde toplanmıştır. Çift Kutuplu Transistörler çalışırken özellikle de yüksek kapılı tiplerinin güç kaybı düşüktür.

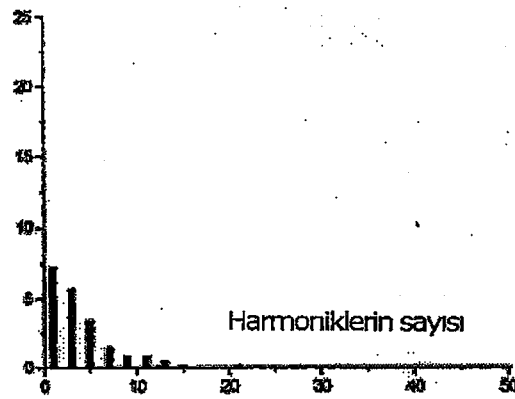
Güç MOSFET 'leri çabuk olup, özellikle yüksek anahtarlama frekanslarında açılıp kapatılabilirken, yüksek kapılı tiplerde güç kayıpları belirgin olmaktadır.

Ana şebekenin harmonik akımının ölçülen değeri şebeke modeline verilir ve simülasyon yapılır. Şekil 7.17 , 7.18 , 7.19 'da kompanzasyon önceki ve sonraki gerilim ve akım spektrumları verilmiştir.

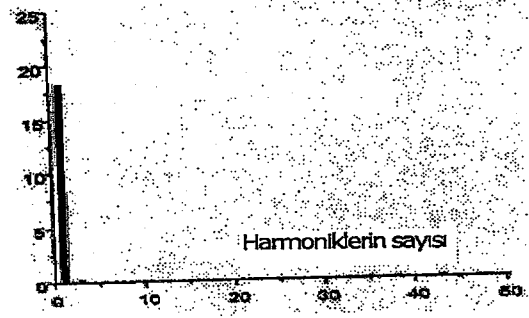
Güç konverterlerinin kontrol metodu incelenirken, yarı iletkenler için izin verilebilir anahtarlama frekansı önemlidir. Bu anahtarlama frekansı, ideal dizayn değerine göre, konverterin gerilim ve akım eğrilerinin tahminini büyük miktarda etkiler .



Şekil 7.17 Kompanzasyondan önceki ve sonraki gerilim ve akımın spektrumları



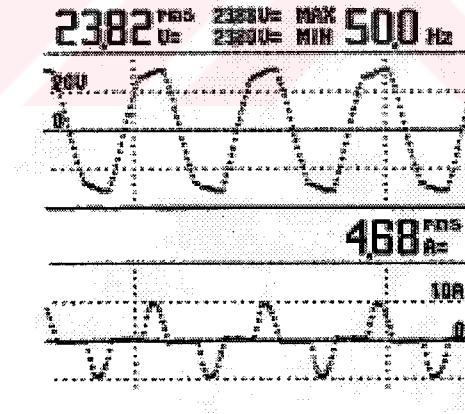
Şekil 7.18 Kompanzasyondan önceki akım harmonik spektrumu



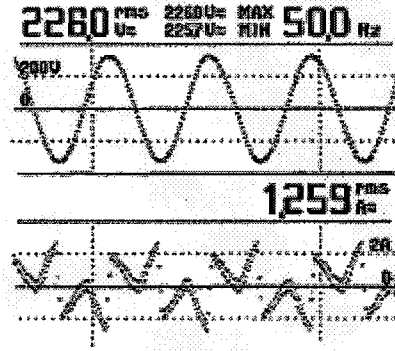
Şekil 7.19 Kompanzasyondan sonraki akım harmonik spektrumu

Bir fazlı prototip aktif güç pasif filtreye paralel olarak dizayn edilir. Kontrol ünitesi, PWM ve histerisiz kontrolörü operasyonel amplifikatörler gibi elektronik bileşenler kullanılarak geliştirilir.

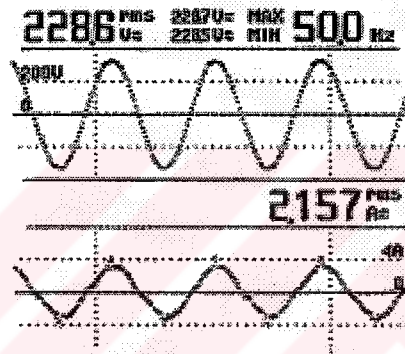
Pasif filtre bileşenleri hesaplanır ve tüm blok sistemi simülasyon etmek için dizayn edilir. Şekil 7.20 ve 7.21 `de yük akımının dalga şekli ve kompanzasyondan önce ve sonraki kaynak gerilim ve akımlarının ölçülen dalga şekilleri gösterilmiştir.



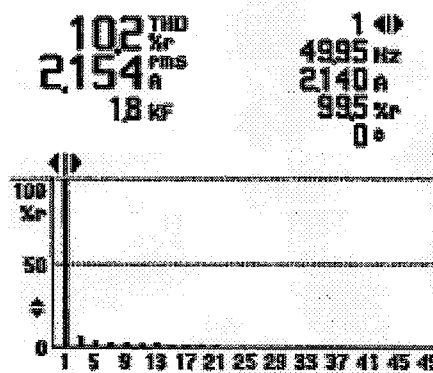
Şekil 7.20 Yük akımının dalga şekli



(a)İnverter akımı,



(b)Kompanze edilmiş akımı



(c)Harmonik spektrumu

Şekil 7.21 Yükleme durumu

7.3.2 Şönt Pasif Filtre İle Güç Faktörü Düzeltimi

Daha düşük karakteristik harmonikler büyük akım genliğine sahiptirler. Bu nedenle bu harmonik frekanslarına yakın düşük empedansa sahip filtreler kullanılır. Yeterli derecede düşük empedanslı geniş bandlı filtre yerine bu harmoniklerin her biri için ayrı ayarlı dalların kullanılması daha ekonomiktir. Eğer harmonik akımının bastırılması gerekli ise, endüstriyel güç sistemlerinde bir veya daha fazla seri rezonans şönt filtrelerin kullanılması daha uygundur. Endüstriyel ve ticari güç sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılan genel şönt filtre tipi tek ayarlı filtrelerdir. Çünkü şönt pasif filtre, seri pasif filtreden hem daha ucuz hem de temel frekansta reaktif güç sağlar. Şönt filtrelerin endüstriyel ve ticari bara banklarındaki harmonikleri bastırması yanında güç faktör iyileştirme karakteristiği de vardır.

Burada, güç faktör düzeltimi, harmonik akım enjeksiyonunu bastırılması ve harmonik gerilim distorsiyonunun azaltılması için tek ayarlı filtre grubu dizaynı anlatılacaktır. Önerilen bu metodun üç özelliği vardır; (1) Kaynak uçlarındaki harmonik distorsiyon gerilimini kabul edilebilir bir seviyeye indirmek, (2) Kaynak uçlarındaki harmonik akım enjeksiyonunu kabul edilebilir bir seviyeye bastırmak ve (3) Kaynak uçlarındaki güç faktörünü iyileştirmek. Tek ayarlı filtre grubundaki kondansatör değerine karar vermek için, üç yeni NLP matematiksel formül sunulacaktır. Birincisi; harmonik akım enjeksiyonunu kabul edilebilir bir seviyeye bastırmak. İkincisi; harmonik gerilim distorsiyonunu kabul edilebilir bir seviyeye indirirken, temel reaktif güç çıktısını minimum yapmaktır. Üçüncüsü ise; güç faktör düzeltimi ve harmonik gerilim indirgenmesi sonuçlarına bağlı olarak reaktif güç çıktısının optimal olmasına karar vermektir (Cheng vd., 1995).

Şönt filtreler yukarıda belirtilen üç özelliği yerine getirdiklerinden bunların dizaynı kolay olmamaktadır. Filtreler dizayn edilmeden önce, yükler için güç faktör düzeltimi veya sistem için reaktif güç kompanzasyonu ile ilgili ek ihtiyaçların olup olmadığına karar vermek için güç faktör çalışması yapılmalıdır. Böylece filtre uygun reaktif güç miktarı sağlayacak şekilde dizayn edilir. Eğer güç faktör düzeltimi gerekli değilse, minimum filtre kullanılmalıdır. Çünkü bu durumda, reaktif güç çıktısı düşünülmeden filtre dizayn edilir.

Bir filtre tesisinin etkisi aslında harmonik bastırmanın seviyesine bağlıdır. Dizayn yapacak kişinin değiştirebileceği faktörler, kalite faktörü ve filtrenin büyüklüğüdür. Varsayılan şebeke koşulları için harmonik gerilimini minimum yapacak optimum bir kalite faktörü vardır. Kalite faktörü, filtrelerdeki kondansatörlerin değerlerinden bağımsızdır. O halde kondansatörün değeri, güç faktörünü iyileştirecek aynı zamanda da harmonik akım enjeksiyonunu ve harmonik gerilim distorsiyonunu kabul edilebilir bir seviyeye indirecek

şekilde seçilebilir. AC filtreler, harmoniklerin zararlı etkilerini ortadan kaldırmalıdır. Buna rağmen, pratik kriterlerde harmonik akımı, harmonik gerilimleri ve güç faktörü açısından kaynak uçlarında belirli bir seviyede harmoniklerin varlığı kabul edilebilir. Eskiden, harmonik akım enjeksiyonunun bastırılması ile ilgili hiçbir kriter önerilmezdi ve filtreler sadece harmonik gerilim distorsiyonunu indirgeyecek şekilde dizayn edilirler. Filtreyi dizayn edenler kaynak uçlarındaki harmonik gerilimine dayalı kriterleri tercih ederler. Çünkü kaynak uçlarından görünen şebeke empedansındaki değişmelerden dolayı, dizaynı yapan kişi harmonik akım limitleri yerine harmonik gerilim limitlerini daha garantili bulmaktadır. Malesef şu ana kadar, harmonik akım ve harmonik gerilim kabul edilebilir limitleri üzerinde genel bir anlaşma yoktur. Ayrıca güç faktör düzeltimi ve harmoniklerin ortadan kaldırılması konuları ayrı ayrı ele alınmaktadır. Burada ise endüstriyel güç sistemlerinde harmonik akım ve gerilim bastırılması ve güç faktörünün düzeltimi konularının ortak olarak ele alındığı bir metod sunulacaktır. Bu metotta, tek ayarlı filtre grubunun dizaynı ile 35 kV endüstriyel güç sistemlerinde sayısal simülasyon metodu ile bu dizaynın mantığının başarılı bir şekilde doğrulandığı gösterilecektir. Harmonik akım enjeksiyonun bastırılması, harmonik gerilim distorsiyonun indirgenmesi ve güç faktörünün düzeltilmesi ile ilgili olarak tek ayarlı filtre grubunda optimal koordinasyonun verimli bir şekilde sağlanabilir (Cheng vd., 1995).

7.3.2.1 Tek Ayarlı Filtrelerde Kondansatörün Değeri

Filtrelerdeki kondansatörün maliyetinin, kondansatörün nominal değeri ile doğru orantılı olduğu varsayılmaktadır. Filtrelerdeki kondansatörün nominal değeri, filtrenin dizayn edildiği harmonik reaktif güç ve temel frekans reaktif gücün en büyük toplamı olmalıdır. Ayarlı filtredeki diğer harmonikler ihmal edilmelidir (Cheng vd., 1995).

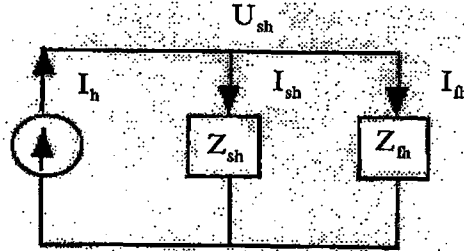
Kondansatörün değeri, tek ayarlı filtrelerdeki en önemli değişkendir. Filtrenin büyüklüğü aslında sadece temel frekanstaki kondansatörün reaktif gücüdür. Temel frekans kaynağı aslında sabit bir gerilim kaynağı iken harmonik kaynağı ise sabit bir akım kaynağıdır. Bu yüzden kondansatörün temel frekans reaktif gücü, kondansatörün değeri ile doğru orantılı iken harmonik reaktif güç ters orantılıdır. Kondansatörün değeri filtrelere içindeki diğer parametrelerin (direnç, reaktans vb.) seçimini etkilemektedir.

7.3.2.2 Harmonik Akım Bastırılması

Filtre ve şebeke empedanslarının, harmonik kaynak uçundaki harmonik gerilim (U_{sh}) ve şebekeye giren harmonik akımı (I_{sh}) üzerindeki etkisi dikkate alınmalıdır. Şekil 6.22`de harmonik akım ve gerilimini analiz etmek için bir eşdeğer devre gösterilmiştir. Harmonik

kaynağında üretilen harmonik akımının (I_h) bilindiği varsayılmaktadır.

Bu akım şönt filtre ve şebeke olmak üzere iki kola ayrılır. Şekildeki paralel devrenin uçlarındaki harmonik gerilim, paralel bağlı olan iki kolun empedansına bağlıdır.



Şekil 7.22 Harmonik kaynağının uçlarındaki harmonik gerilimler ve harmonik akımlarının hesaplanması amacıyla yönelik bir devre

Burada;

Z_{fh} : h. harmonik mertebesi için filtre empedansı

Z_{sh} : h.harmonik mertebesi için şebeke empedansı

I_{sh} : h. harmonik mertebesi için şebekenin harmonik akımı

I_{fh} : h. harmonik mertebesi için filtrenin harmonik akımı

I_h : h. harmonik mertebesi için harmonik akımı

U_{sh} : h. harmonik mertebesi için harmonik gerilimdir.

K_{sh} filtreleme etkinlik katsayısı olup şöyle ifade edilebilir;

$$K_{sh} = \left| \frac{I_{sh}}{I_h} \right| = \left| \frac{Z_{fh}}{Z_{fh} + Z_{sh}} \right| \quad (7.45)$$

h. harmonik mertebesi için filtrenin kalite faktörü ise ;

$$q_h = \frac{X_{ch}}{R_{fh}} = \frac{X_{cl}}{hR_{fh}} \quad (7.46)$$

şeklindedir. Burada ;

R_{fh} : h. harmonik mertebesi için filtrenin direnci

X_{cl} : Filtredeki temel kapasitif empedans

X_{ch} : h. harmonik mertebesi için h. tek yarlı filtrenin kapasitif reaktansı

Eşdeğer frekans sapma (δ) varken ve h. harmonik mertebesi için filtrede rezonans meydana geldiğinde, K_{sh} 'nin karesi şöyle ifade edilebilir;

$$K_{sh}^2 = \frac{R_{fh}^2 + (2\delta\delta_h R_{fh})^2}{(R_{sh} + R_{fh})^2 + (X_{sh} + 2\delta\delta_h R_{fh})^2} \quad (7.47)$$

Burada;

R_{sh} : h. harmonik mertebesi için şebekenin direnci

X_{sh} : h. harmonik mertebesi için şebekenin reaktansı

δ : eşdeğer frekans sapma sınıfı

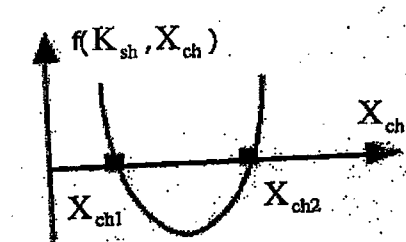
(7.47) şu şekilde değiştirilebilir;

$$\left(\frac{1}{qh^2} + 4\delta^2\right)(1 - K_{sh})X_{ch}^2 - 2K_{sh}^2\left(\frac{R_{sh}}{q_h} + 2\delta\delta_{sh}\right)X_{ch} - K_{sh}^2(R_{sh}^2 + X_{sh}^2) = 0 \quad (7.48)$$

K_{sh} ve X_{ch} 'nin fonksiyonu olup, $f(K_{sh}, X_{ch})$ kullanılarak (7.48) açıklanabilir ;

$$f(K_{sh}, X_{ch}) = \left(\frac{1}{qh^2} + 4\delta^2\right)(1 - K_{sh})X_{ch}^2 - 2K_{sh}^2\left(\frac{R_{sh}}{q_h} + 2\delta\delta_{sh}\right)X_{ch} - K_{sh}^2(R_{sh}^2 + X_{sh}^2) \quad (7.49)$$

$f(K_{sh}, X_{ch})$, X_{ch} 'in ikinci dereceden bir fonksiyonu olduğundan, Şekil 7.23 'teki gibi bir eğriye sahip olur.



Şekil 7.23 $f(K_{sh}, X_{ch})$ fonksiyonun eğrisi

I_h filtre dizayn problemlerinde bilindiği için ve I_{sh} , harmonik akım standardı kadar harmonik akım bastırılması şartını sağlaması gerektiği için, I_{sh} , ve K_{sh} 'nin uygun değerleri (7.49)'dan kolaylıkla hesaplanabilir. Aynı zamanda, h. harmonik mertebesine göre tek ayarlı filtrelerde

gerekli kondansatörün değeri ($Q_c = \frac{U^2}{X_c}$) ve X_{ch} değeri de (7.49) 'dan elde edilir.

7.3.2.3 Harmonik Gerilim Distorsiyonunun İndirgenmesi

Verilen toplam harmonik gerilim distorsiyonun (THD) karşılandığı bir durumda, tek ayarlı filtre grubu için gerekli olan temel reaktif güç çıktısının minimum miktarı belirlenmelidir (Cheng vd., 1995). h. tek ayarlı filtre ile ilgili seri rezonans meydana geldiğinde, Şekil 7.22 'ye göre, h. harmonik gerilim distorsiyonun şöyle ifade edilebilir;

$$DF_h = \frac{U_h}{U_1} = \frac{I_{fh} R_1}{U_1} \quad (7.50)$$

Burada;

U_1 : Filtre bara grubundaki temel gerilim

U_h : h. harmonik mertebesi için harmonik gerilim 'dir.

Her bir fazda h. tek ayarlı filtrenin temel reaktif güç çıktısı Q_h yaklaşık olarak şuna eşittir;

$$Q_h = \frac{U_1^2}{X_{c1} - X_{L1}} = \frac{h^2}{h^2 - 1} \frac{U_1^2}{X_{c1}} = \frac{h^2}{h^2 - 1} \frac{U_1}{X_{c1}} \frac{I_{fh} R}{DF_h} \quad (7.51)$$

h.harmonik gerilim distorsiyonun $DF_h = x(i)$, ($i = 1...m$) olduğu ve tüm kalite faktörlerinde q'ye eşit olduğu kabul edilip;

$$A(i) \equiv \frac{h}{h^2 - 1} \frac{U_1 I_{fh}}{q} \quad (7.52)$$

ifadesi de kullanılarak ;

$$Q_h = \frac{h}{h^2 - 1} \frac{U_1 I_{fh}}{DF_h} = \frac{A(i)}{X(i)} \quad (i = 1 \approx m) \quad (7.53)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada;

Q_h : Her bir fazda tek ayarlı filtrenin temel reaktif güç çıktısı

q: Kalite faktörü

(7.53)'den minimum temel reaktif güç çıktı problemi, nonlinear optimizasyon problemi olarak yazılabilir;

$$\left. \begin{array}{l} \text{Min}F(x) = \sum_1^m \frac{A(i)}{X(i)} \\ \text{S.T.} \sum_1^m X^2(i) \leq \text{THD}^2 \end{array} \right\} \quad (7.54)$$

(7.54) çözülerek, her fazda minimum reaktif güç çıktısının toplamının optimal değeri şöyle bulunur;

$$F(x) = \sum_1^m \frac{A(i)}{X(i)} = \left(\sum_1^m A(i)^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{3}{2}} / \text{THD} \quad (7.55)$$

Burada THD, verilen toplam harmonik gerilim distorsiyonudur .

7.3.2.4 Güç Faktörünün Düzeltimi

Uygun bir reaktif güç kompanzasyonu, filtre grubunun diğer işlevidir. Farklı ayarlı filtrelerde güç faktör düzeltimi sentetik bir yaklaşımdır. Burada, tek ayarlı filtre grubundaki reaktif güç çıktısı optimaldir. Tek ayarlı filtre grubundaki reaktif güç çıktısının optimallik problemi aşağıda açıklanmıştır. Reaktif güç kompanzasyonu (Q_s) veya güç faktör düzeltimi verilirse ve (7.53) 'de $y(i) = Q_h$ olarak kabul edilirse, minimum toplam harmonik gerilim distorsiyon (THD) problemi şöyle ifade edilebilir;

$$\left. \begin{array}{l} \text{Min}F(y) = \sqrt{\sum_1^m DF_h^2} = \sqrt{\sum_1^m \left(\frac{A(i)}{y(i)} \right)^2} \\ \text{S.T.} \sum_1^m y(i) = Q_s \end{array} \right\} \quad (7.56)$$

Yukarıdaki problem çözülerek, $y(i)$ şöyle bulunur;

$$y(i) = A(i)^{\frac{2}{3}} Q_s / \sum_{j=1}^m A(j)^{\frac{2}{3}} \quad (i = 1 \approx m) \quad (7.57)$$

7.3.2.5 Güvenlik

7.3.2.5.1 İzin Verilen Aşırı Gerilim ve Aşırı Akımı Tarafından Sınırlandırılmış Kondansatör Değeri

İzin verilen aşırı gerilim ve aşırı akım altında tek ayarlı filtredeki kondansatörün nominal gerilimin kararlaştırılmasına yönelik metod burada tanıtıldı. Bu çalışmadan yola çıkarak, kondansatörün nominal değeri şöyle olur ;

$$Q_H = \frac{U_H^2}{X_{Cl}} \geq \frac{\sqrt{2} h I U_H}{\sqrt{K_I^2 - \left(\frac{h^2}{h^2 - 1} \right)^2 K_u^2}} \quad (7.58)$$

Burada $K_u = \frac{U_1}{U_H}$ olup;

K_I : Kondansatör aşırı gerilim oranı

U_H : Kondansatör nominal gerilimi

Q_H : Kondansatörün nominal değeri

7.3.2.5.2 Filtrelerdeki Kondansatör Değerinin Dengelenmesi

Aşağıda verilen kondansatörün nominal değerinin (Q_H) kararlaştırılması için harmoniklerin 1sı etkisi araştırılmalıdır.

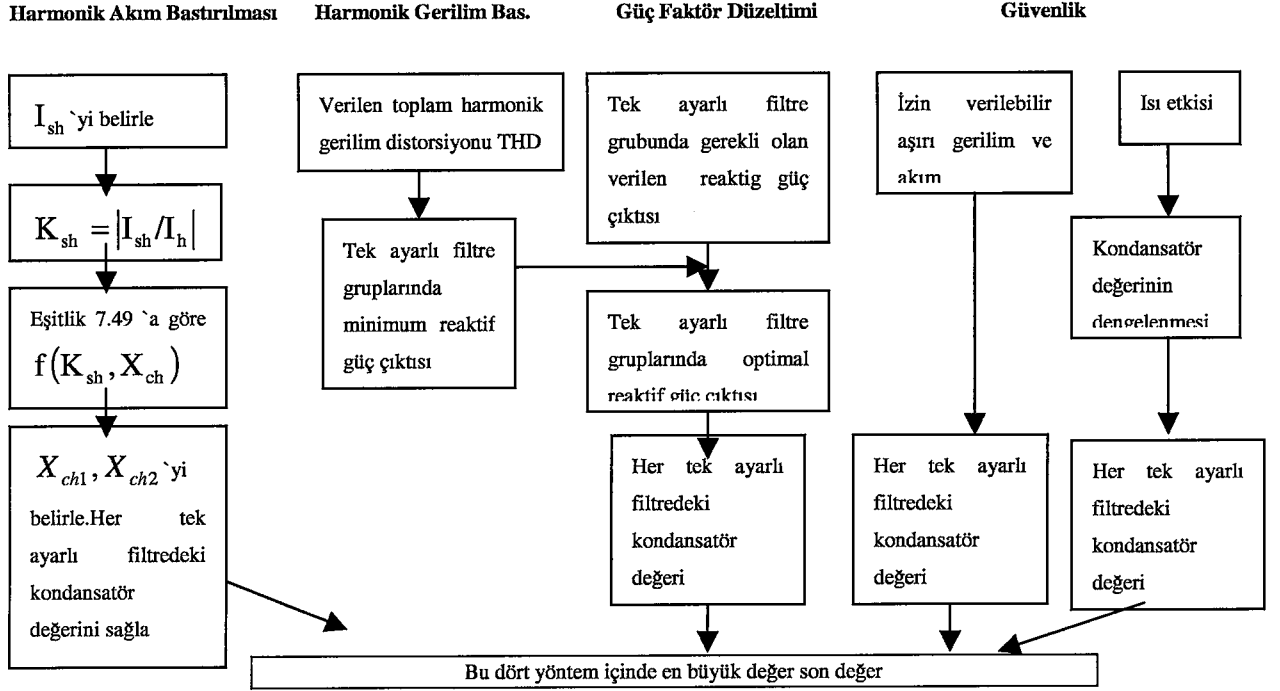
$$Q_H = \frac{U_H^2}{X_{cl}} = \frac{U_H^2 \sqrt{\sum I_n^2}}{\sqrt{(U_H^2 - U_{cl}^2)}} \quad (7.59)$$

U_{cl} , filtredeki kondansatörün temel gerilimidir.

7.3.2.6 Tek Ayarlı Filtrelerin Dizaynı

Güvenlik, harmonik akım bastırılması, harmonik gerilim distorsiyonunun indirgenmesi ve güç faktör düzeltimi açısından tek ayarlı filtrelerde kondansatörün dört farklı değeri vardır. Bu dört değerden en büyük olanı, tek ayarlı filtredeki gerekli olan kondansatör değeri olup bu değer seçilir (Cheng vd., 1995).

Bu durum Şekil 7.24 `te daha ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

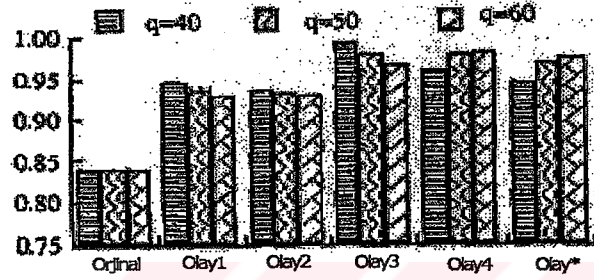


Şekil 7.24 Harmonik akım ve gerilim bastırılması ve güç faktör düzeltimi için önerilen metodun akış diyagramı

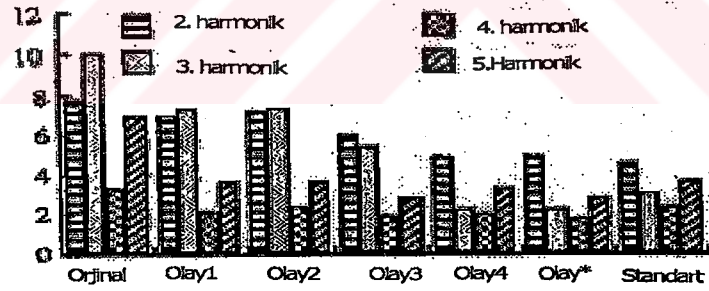
Örnek : Burada önerilen metod, güç faktör düzeltimi, harmonik gerilim distorsiyonunun indirgenmesi ve harmonik akım enjeksiyonunun bastırılması için tek ayarlı filtre grubuna uygulanır. 2., 3., 4. ve 5. Tek ayarlı filtrelerden oluşan pasif filtre grubu 35 kV 'luk baraya paralel bağlanır. Bu örnekte gerçek güç yükü 20.000 kW ve orijinal güç faktörü ise 0,8393'tür. 2., 3., 4., ve 5. Tek ayarlı filtrelerdeki kondansatörün nominal gerilimi farklı kalite faktörü (q) için Çizelge 6.3 'te verilmiştir. Çizelge 7.4 'de ise, farklı kalite faktörü (q) için ve olaylar için 2., 3., 4. ve 5. Tek ayarlı filtrelerdeki kondansatörün nominal değeri verilmiştir. Farklı olaylar için çeşitli kalite faktörü altında güç faktörü değerleri Çizelge 7.5 ve Şekil 7.25 'te verilmiştir. Filtrelemeden önce, filtrelemeden sonra (q= 40.0 için) harmonik akım karşılaştırması ve standart değer Şekil 7.26 'da gösterilmiştir. Şekil 7.26 'da eşdeğer frekans sapması sırayla % -2.0 ve % +2.0 iken harmonik akımları verilmiştir. Şekil 7.27 'de filtrelemeden önceki ve sonraki harmonik gerilim karşılaştırması, ve standart değeri kalite faktörü 40.0 ve eşdeğer frekans sapması sıra ile % -2.0, % 0.0 ve % + 20.0 için verilmiştir. Şekil 7.28 'de ikinci mertebeden onuncu mertebeye kadar ki harmoniklerin dikkate alındığı, eşdeğer frekans sapması sıra ile % -2.0, % 0.0 ve % +2.0 olduğu farklı kalite faktörü ve olaylar için toplam harmonik gerilim distorsiyonu % olarak verilmiştir (Cheng vd., 1995).

Çizelge7.3 Çeşitli kalite faktörlerine göre tek ayarlı filtrelerdeki kondansatörün nominal gerilimi (kV)

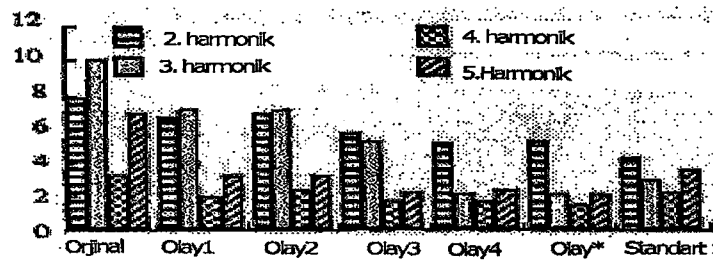
Tek ayarlı filtre	2	3	4	5
q=40.0	53.75	45.61	41.84	41.40
q=50.0	54.91	46.65	42.47	42.15
q=60.0	56.07	47.69	43.11	42.91



Şekil 7.25 Farklı olaylar ve kalite faktörlerine göre güç faktörü değerleri

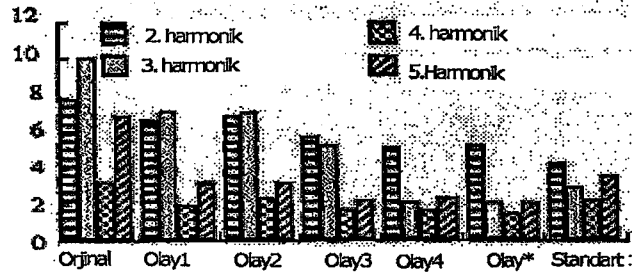


(a)q = 40.0 ve $\delta = \% -2.0$ için



(c)q = 40.0 ve $\delta = \% +2.0$ için

(b)q = 40.0 ve $\delta =$ için %0.0



(c) $q = 40.0$ ve $\delta = \% +2.0$ için

Şekil 7.26 Harmonik akım (A) ve karşılaştırması



(a) $q = 40.0$ ve $\delta = \% -2.0$ için



(b) $q = 40.0$ ve $\delta = \% 0.0$ için



(c) $q = 40.0$ ve $\delta = \% +2.0$ için

Şekil 7.27 Harmonik gerilim distorsiyonu (%) ve karşılaştırması

Çizelge 7.4 Farklı olaylar ve kalite faktörlerine göre tek ayarlı filtrelerdeki kondansatörün nominal değeri (kVAR)

Tek ayarlı filtre		2	3	4	5
Olay1	q=40.0	1800	1500	900	900
Olay1	q=50.0	1500	1500	600	900
Olay1	q=60.0	1500	1200	600	900
Olay 2	q=40.0	1200	1500	600	900
Olay 2	q=50.0	1200	1500	600	900
Olay 2	q=60.0	1200	1500	600	900
Olay 3	q=40.0	4200	3000	1200	1500
Olay 3	q=50.0	3600	2400	900	1200
Olay 3	q=60.0	3000	2100	900	1200
Olay 4	q=40.0	6900	9600	600	1200
Olay 4	q=50.0	6600	9300	600	900
Olay 4	q=60.0	6600	9600	600	900
Olay*	q=40.0	6900	9600	1200	1500
Olay*	q=50.0	6600	9300	900	1200
Olay*	q=60.0	6600	9600	900	1200

Burada ;Olay 1: Isı etkisi ile ilgilidir.

Olay 2: İzin verilebilir aşırı gerilim ve aşırı akım ile ilgilidir.

Olay 3: Güç faktör düzeltimi ve optimal reaktif güç çıktısı ile ilgilidir.

Olay 4: K_{sh} (harmonik akım enjeksiyonun bastırma) ile ilgilidir.

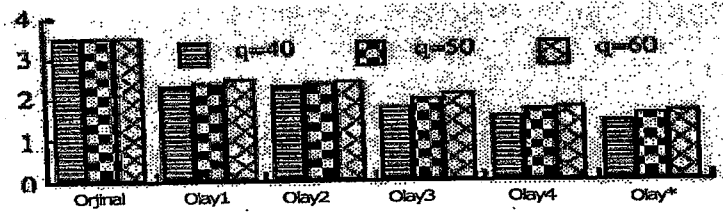
Olay*: Şekil 6.24 'te gösterilen son değer ile ilgilidir.

Çizelge 7.5 Farklı olaylar için çeşitli kalite faktörleri altında güç faktör değerleri

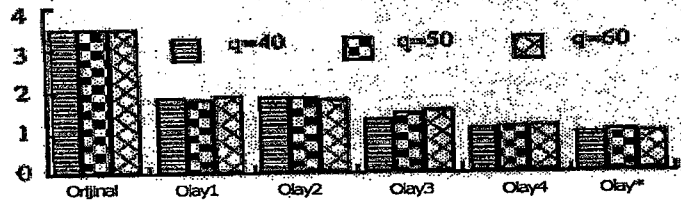
Kalite faktörü	40.0	50.0	60.0
Orjinal	0.8393	0.8393	0.8393
Olay 1	0.9474	0.9357	0.9287
Olay 2	0.9340	0.9318	0.9293
Olay 3	0.9944	0.9781	0.9665
Olay 4	-0.9598	-0.9784	-0.9821
Olay*	-0.9458	-0.9714	-0.9758

Burada negatif güç faktörü, filtreler tarafından sağlanan reaktif gücün, harmonik kaynağı

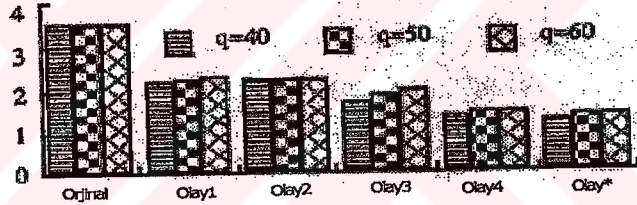
tarafından tüketilen değerinden fazla olduğunu gösterir.



(a) $\delta = -2.0$ için



(b) $\delta = 0.0$ için



(c) $\delta = +2.0$ için

Şekil 7.28 Farklı olaylar ve kalite faktörleri için toplam harmonik gerilim distorsiyonu (%)

Örnek dizayn olaylarında, tek ayarlı filtre grubunu dizayn etmek için uygun kriterler çok önemlidir. Isı etkisi, izin verilebilir aşırı gerilim ve aşırı akım olarak tanımlanan güvenlik kriteri, güvenlik ve güç faktör düzeltimi için faydalanırken, harmonik akım enjeksiyonun bastırılması ve harmonik gerilim distorsiyonunun indirgenmesi için pek uygun değildir. Güç faktör düzeltimi ve optimal reaktif güç çıktısı ile ilgili kriter, güç faktör düzeltimi ve harmonik gerilim distorsiyonunun indirgenmesi için faydalanırken, harmonik akım enjeksiyonun bastırılması için pek istenmez. Harmonik akım enjeksiyonun bastırılması ile ilgili kriter, harmonik akım enjeksiyonun bastırılması, harmonik gerilim distorsiyonunun indirgenmesi ve güç faktör düzeltimi için yararlıdır. Tüm çalışan olaylarda, harmonikler bastırıldığı kadar güç faktör de iyileştirilmektedir (Cheng vd., 1995).

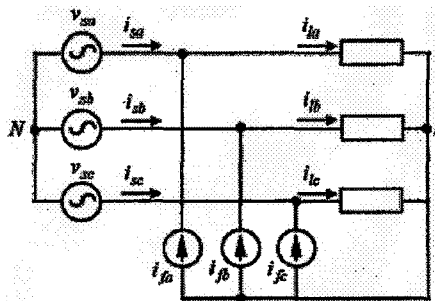
7.4 Yüünün Dengelenmesi Yoluyla Güç Faktörünün Düzeltmesini Sağlayan Yeni Bir Yaklaşım

Güç dağıtım sistemlerinde hem güç faktör düzeltimini hem de dengesiz bir yükün dengelenmesini sağlayan reaktif güç üretimi ile ilgili yeni bir yaklaşım burada anlatılmaktadır. Kompanzatörün yıldız veya üçgen bağlı bir yüke bağlandığı varsayılmaktadır. Yüük, dengesiz olabileceği gibi harmonik akımlarda çekebilir. Burada anlatılan kompanzasyon şemasının amacı şebeke tarafındaki güç faktörünü istenen değere ulaştırmanın yanında yükü dengelemektir. Bu şema, çok amaçlı olup, çeşitli yükler ve sistemler için uygulanabilir. En büyük avantajı ise istenen kaynak güç faktör açısının açıkça belirlenebilmesidir. Ayrıca istenen kompanzatör akımları direkt olarak hesaplandığından uygulanması kolaydır.

Aktif filtre ve / veya statik kompanzatör için referans akımlarının üretiminin anlatıldığı bu yeni yaklaşımda, bu üç fazlı referans akımların hesaplanmasını sağlayan logaritma için ani simetrik bileşenler teorisi kullanılmaktadır. Histerisiz band kontrol şemasındaki referans akımlarını sağlayacak uygun bir kompanzatör yapısı da burada tanıtılmaktadır. Kompanzasyon sisteminin yapısı yükün bağlantı şekline bağlı olduğundan hem yıldız bağlı hem de üçgen bağlı yükler için kompanzasyon sisteminin yapısı aşağıda tanıtılmıştır.

7.4.1 Yıldız Bağlı Yüklerin Kompanzasyonu

Üç iletken beslemeli yıldız bağlı bir yükün kompanzasyon şeması Şekil 7.29 'da gösterilmiştir. Burada kompanzatör, akım kaynakları ile sembolize edilmiştir. Bu şemanın amacı, kaynak gerilimleri ve yük akımlarının ölçüm değerlerine göre $i_{fa}^*, i_{fb}^*, i_{fc}^*$ ile ifade edilen i_{fa}, i_{fb}, i_{fc} referans akım dalga şekillerini üretmektir. Böylece şebekenin, yükü dengeli olarak algılaması sağlanır. Burada yükün karakteristiğinin bir önemi de yoktur. Kompanzatörün band genişliği yükteki dalgalanmaları takip edecek kadar yeterli ise, kompanzatör istenen sonuçları üretir. Ani simetrik bileşenler teorisi kullanılarak referans akımlar elde edilir (Gosh ve Joshi, 2000).



Şekil 7.29 Üç iletken beslemeli yıldız bağlı bir yükün kompanzasyon şeması

7.4.1.1 Ani Simetrlili Bileşenlerin İfade Edilmesi

Üç fazlı ani akımlar $i_a, i_b, ve i_c$ ile ifade edilmiş olsun. Güç sabit ani simetrlili bileşenler şu şekilde gösterilebilir;

$$\begin{bmatrix} i_{a0} \\ i_{a1} \\ i_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (7.60)$$

Burada $a = e^{j120^\circ}$ 'dir. i_{a1} ve i_{a2} ani vektörler birbirlerinin kompleks eşleniği iken i_{a0} ise gerçek bir değer olup, eğer hat akımları dengeli ise sıfır değerini almaktadır.

Şekil 7.29 'daki, şebeke geriliminin dengeli olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca, i_{sa1} ve v_{sa1} vektörleri arasındaki açı, dengeli şebeke gerilimleri ve şebeke akımları arasındaki güç faktör açısını göstermektedir. Buradaki logaritmada, bu açı istenen herhangi bir değere açıkça konulabilir. Buna ek olarak, kompanzatörün, ortalama gücü beslemesi ya da azaltması gibi bir zorunluluğu olmadığı da şart koşulmaktadır.

7.4.1.2 Referans Akım Üretmi

Burada sunulan kompanzasyon şeması ya üç fazlı iletkenli sisteme ya da üç fazlı dört iletkenli sisteme uygulanabilir. Her iki olayda da amaç dengeli şebeke akımı üretmektir. Böylece şebeke akımlarının sıfır sequence bileşenleri sıfır olur. O halde

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (7.61)$$

eşitliği yazılabilir. Güç faktör açısından düşünüldüğünde, i_{sa1} vektörünün fazı, ϕ açısı kadar v_{sa1} vektörünün fazından geri olduğu varsayılmaktadır. Yani ;

$$\angle \{v_{sa} + av_{sb} + a^2 v_{sc}\} = \angle \{i_{sa} + ai_{sb} + a^2 i_{sc}\} + \phi \quad (7.62)$$

Burada $a = e^{j120^\circ}$ değerini almaktadır. a değeri yerine yazılır ve şebeke gerilimi de dengeli olduğunda, (7.62) şöyle yazılabilir;

$$\tan^{-1} = (K_1/K_2) = \tan^{-1}(K_3/K_4) + \phi \quad (7.63)$$

Burada

$$K_1 = \sqrt{3/2}(v_{sb} - v_{sc}), K_2 = (3/2)v_{sa}$$

$$K_3 = \sqrt{3/2}(i_{sb} - i_{sc}) \text{ ve } K_4 = i_{sa} - \frac{i_{sb}}{2} - \frac{i_{sc}}{2}$$

dir. $\beta \equiv \tan \varphi / \sqrt{3}$ ile ifade edilip, (7.63) çözülürse;

$$(v_{sb} - v_{sc} - \beta v_{sa})i_{sa} + (v_{sc} - v_{sa} - \beta v_{sb})i_{sb} + (v_{sa} - v_{sb} - \beta v_{sc})i_{sc} = 0 \quad (7.64)$$

elde edilir. Güç faktör açısının sıfır olduğu varsayıldığında, (7.64) 'den kaynaktan beslenen ani reaktif gücün sıfır olacağı görülebilir. Diğer taraftan bu açı sıfır olmazsa, ani gücün katına eşit bir reaktif güç, kaynak tarafından beslenir.

Dengeli üç fazlı devrelerde ani güç sabitken, dengesiz devrelerde bu güç dc değere ek olarak çift frekanslı bir bileşen sahiptir. Kompanzatörün amacı bu çift frekanslı bileşeni beslemektir. Böylece kaynak, yük gücünün dc değeri besler. O halde şu eşitlik sağlanabilir;

$$v_{sa}i_{sa} + v_{sb}i_{sb} + v_{sc}i_{sc} = P_{lav} \quad (7.65)$$

Ortalama yük gücü (P_{lav}), yarım periyodun ortalama zamanına sahip hareketli ortalama (MA) filtre kullanılarak hesaplanabilir. Şunu belirtmekte fayda vardır ki; yükteki hiçbir harmonik bileşen, kaynaktan sağlanacak herhangi bir gerçek güce ihtiyaç göstermez. Bu nedenle, yük akımı harmonikler içerse veya periyodik olmasa bile (7.65) geçerlidir.

Üretilen referans akımlar, kompanzatör tarafından tam olarak sağlandığı varsayılırsa yani $i_{fa} = i_{fa}^* \dots v_b$ olursa, Şekil 7.29 'dan şu eşitlik sağlanabilir;

$$i_{sa} = i_{la} - i_{fa}^* \quad i_{sb} = i_{lb} - i_{fb}^* \quad \text{ve} \quad i_{sc} = i_{lc} - i_{fc}^* \quad (7.66)$$

(7.61), (7.64), (7.65), (7.66) 'dan aşağıdaki vektör-matris formu yazılabilir;

$$A i_f^* = A i_l - P_l \quad (7.67)$$

$i_f^{*T} = [i_{fa}^* \ i_{fb}^* \ i_{fc}^*]^T = [i_{la} \ i_{lb} \ i_{lc}] P_l^T = [0 \ 0 \ P_{lav}]$ olup, A matrisi şöyle gösterilebilir;

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \begin{pmatrix} v_{sb} - v_{sc} \\ -\beta v_{sa} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} v_{sc} - v_{sa} \\ -\beta v_{sb} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} v_{sa} - v_{sb} \\ -\beta v_{sc} \end{pmatrix} \\ v_{sa} & v_{sb} & v_{sc} \end{pmatrix}$$

$|A| = \sum_{i=a,b,c} v_{si}^2 = 3(\text{rms faz gerilimi})^2$ olduğu kabul edilip, ölçülen devre değişkenlerinden referans akımları elde etmek için aşağıdaki eşitlik yazılabilir;

$$\begin{aligned} i_{fa}^* &= i_{la} - \frac{v_{sa} + (v_{sb} - v_{sc})\beta}{|A|} P_{lav} \\ i_{fb}^* &= i_{lb} - \frac{v_{sb} + (v_{sc} - v_{sa})\beta}{|A|} P_{lav} \\ i_{fc}^* &= i_{lc} - \frac{v_{sc} + (v_{sa} - v_{sb})\beta}{|A|} P_{lav} \end{aligned} \quad (7.68)$$

Eşitlik (7.68) basitleştirilerek, yük denge ve ϕ , yük akımlarının fazı ile aynı ise, kompanzatör akımlarının sıfır olduğu gösterilebilir.

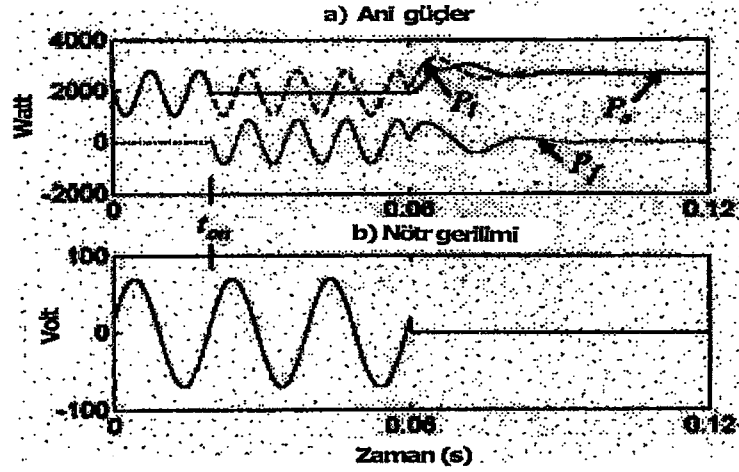
Kompanzatörün ideal bir üç akım kaynağı olarak kabul edildiği, yani $i_{fa} = i_{fa}^* \dots v_b$ olduğu üç fazlı üç iletkenli ve üç fazlı dört iletkenli sistemler için sayısal örnekler aşağıda verilmiştir (Gosh ve Joshi, 2000):

Örnek 1 : Ani gerilim 50 Hz temel frekansta olduğu üç fazlı üç iletkenli bir sistemi ele alalım. A faz gerilimi şöyledir;

$$v_{sa} = (\sqrt{2/3})440\sin(100\pi t)V$$

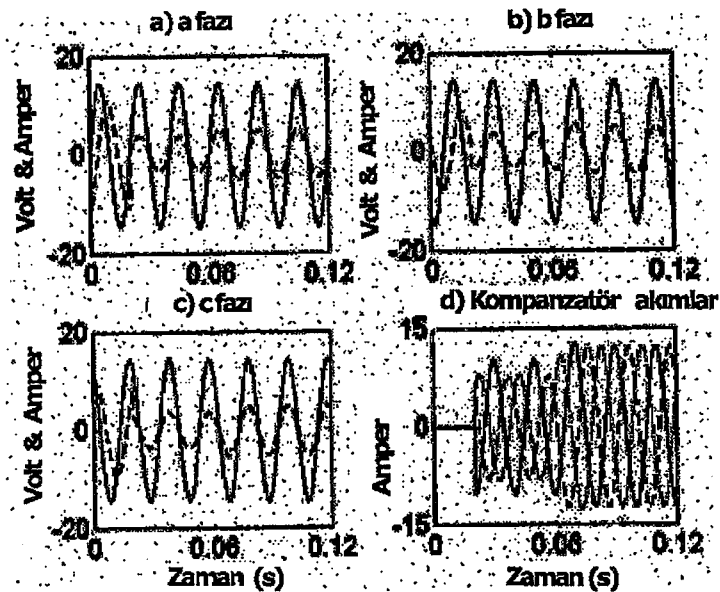
Kararlı halde kaynak dengesiz R-L yükünü beslemektedir. R-L yükünde, $R_b = 20 \Omega$, $R_c = 15 \Omega$, $L_a = 80\text{mH}$, $L_b = 150\text{mH}$ ve $L_c = 120 \text{mH}$ dir. Kompanzatör bir periyodun sonunda (20 ms) devreye alınır. Ayrıca, üç periyodun sonunda, her üç faza ait direnç ve indüktanslar a fazı için verilen değerlere eşit olunca, yük aniden dengeli hale gelir.(6.68)'de $\beta = 0$ olduğu birim güç faktör işlemi burada gösterilecektir.

Şekil 7.29 'daki üç ani güç ve nötr gerilimi V_{nN} Şekil 7.30 'da gösterilmiştir. Kompanzatör bağlanmadan önce, hem yük gücü (P_l) hem de kaynak gücü (P_s) aynı büyüklükte ve aynı salınımdadırlar. Ayrıca nötr gerilimi de sinüsoidaldir. Kompanzatör bağlandıktan sonra yük gücü ve nötr gerilimi değişmemiştir. Yük gücü, kaynak gerilim ve nötr gerilimi arasındaki gerilim farkına bağlıdır. (7.65) 'de kompanzatör tarafından yük gücünün ortalama değeri sabit tutulduğunda nötr gerilimi değişmemiştir. t_{on} 'da kompanzatör devreye alınınca kaynak gücü düzleşir ve kompanzatör dalgalanan P_f bileşenini besler. Kompanzatör ideal akım kaynakları olarak kabul edildiğinden, kompanzatörün davranışı ani olmaktadır.



Şekil 7.30 Ani güçler ve nötr gerilimi

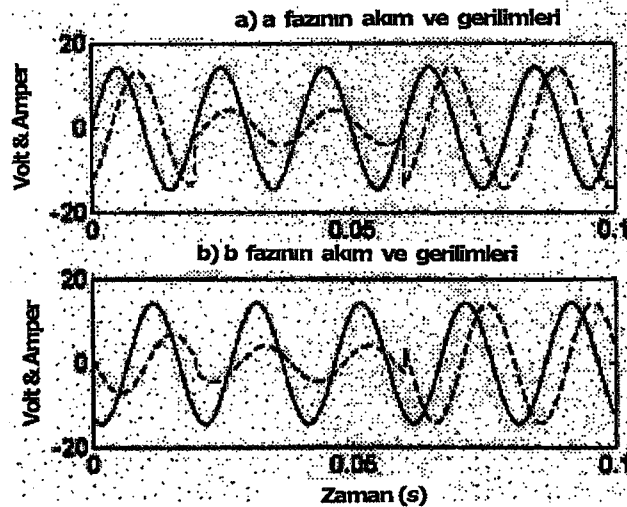
0.06 s`de yük dengeli değeri ne ulaştınca, kaynak ve yük güçleri düzleşirken, kompanzatörün gücü ve nötr gerilim sıfır olur. Ancak bu kompanzatör akımının sıfır olacağı anlamına gelmez. Bu durum a, b, c fazları için kaynak gerilim ve akımları ile kompanzatör akımlarının gösterildiği Şekil 7.31`de açıkça bellidir. Şekil 7.31 (a,b,c) `de kaynak gerilimleri 1:25 oranında ölçeklendirilmiş olup, öylece kaynak gerilimlerinin genlikleri ile akımların genliklerinin karşılaştırılması sağlanmıştır. Kaynağın birim güç faktör işlemi ve kaynak akımlarının dengelenmesi bu şekilden açıkça görülmektedir. Şekil 7.31 (c) `de yük dengelendiğinde kompanzatör akımlarının dengelendiği görülmektedir.



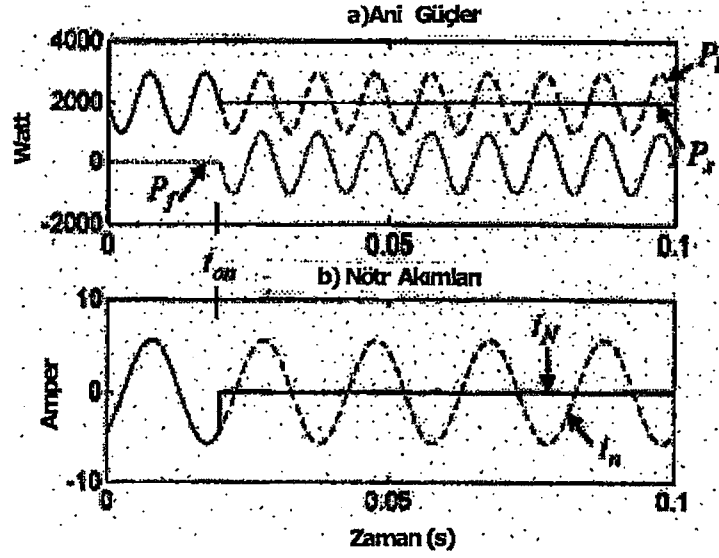
Şekil 7.31 (a,b,c) (1:25) ölçekli kaynak gerilimleri ve akımları ve (d) üç kompanzatör akımı

Kompanzatör ideal akım kaynaklarından oluştuğu için t_{on} 'da 20ms`de devreye alınırken davranışı ani olmaktadır. Ancak bu pratikte yapılamamaktadır. Ayrıca, yük değişimleri olunca, yük indüktanslarından dolayı geçici halin azalması yaklaşık iki periyot sürmektedir. Kompanzatör ayrıca yük için gerekli olan kurulum zamanını da etkileyemez.

Örnek 2: Burada üç fazlı dört iletkenli bir sistem ele alınacaktır. Bu durumda Şekil 7.29`da gösterilen N ve n noktaları birleştirilir, yani  $V_{nN} = 0$  olur. Kaynak gerilimleri ve dengesiz yükler örnek 1`de verildiği gibidir. Bir periyodun sonunda kompanzatör devreye alınır. Böylece kaynak 30 (geri) güç faktörü açısından bir akımı besler. İstenen kaynak güç faktör açısı üçüncü periyodun sonunda (0.06 s) aniden değişerek 75° olur. Ani yük, kaynak ve kompanzatör güçleri Şekil7.32(a)`da gösterilirken nötr akımları Şekil 7.32 (b)`de gösterilmiştir. Şekil7.32`de i_n yük nötründen (n) akan akımiken i_N ise kaynak nötrüne (N) akan akımdır. Üç gücünde güç faktör açısının değişiminden etkilenmediği de yine bu şekilden görülebilir. Ayrıca, kaynak nötr akımları kompanzatör devreye alınınca kaynak akımlarını dengelediği için hemen sıfır olur. Aynı zamanda, ani kompanzatör akımlarının toplamı, yük nötr akımına eşit olur. Şekil 7.33`de kaynak akımları ile 1:25 oranında ölçeklendirilmiş gerilimler iki faz için verilmiştir. Bu şekilden, güç faktör açısının artışıyla, kaynak akımlarının genliğinin de, kaynağın aynı miktarda gerçek güç ile beslendiğini ifade etmektedir.



Şekil 7.32 Ani güçler ve nötr akımları



Şekil 7.33 (a,b) (1:25) oranında ölçekli kaynak gerilimleri ve akımları

7.4.2 Üçgen Bağlı Yüklerin Kompanzasyonu

Basit şeması Şekil 7.34'de gösterilen bu kompanzasyon tipinin Şekil 7.29'dan farkı, kompanzatörün fazlar arasına bağlanmış olmasıdır. Nötr nokta burada geçersizdir. Bu şemanın amacı, kaynak gerilimleri ve yük akımlarının ölçüm değerlerine göre $i_{fab}^*, i_{fbc}^*, i_{fca}^*$ ile ifade edilen $i_{fab}, i_{fbc}, i_{fca}$ referans akım dalga şekillerini üretmektir. Böylece şebekenin, yükü dengeli olarak algılaması sağlanır (Gosh ve Joshi, 2000).

Burada kompanzasyon akımı için gerekli olanlar, yıldız bağlı yük ile aynıdır. Bu yüzden (7.61)'den (7.65)'e kadar ki eşitlikler burada da geçerlidir. Kompanzatörün, referans akımları mükemmel bir şekilde sağladığı varsayılırsa, (7.65)'den aşağıdaki ifade yazılabilir;

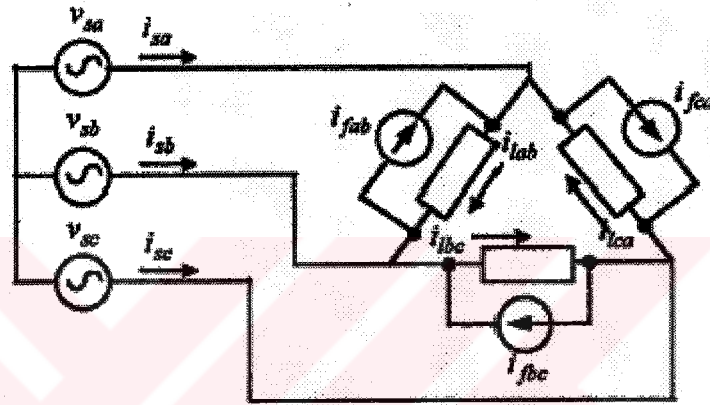
$$\begin{aligned} i_{sa} &= i_{lab} - i_{fab} - i_{lca} + i_{fca} \\ i_{sb} &= i_{lbc} - i_{fbc} - i_{lab} + i_{fab} \\ i_{sc} &= i_{lca} - i_{fca} - i_{lbc} + i_{fbc} \end{aligned} \quad (7.69)$$

(7.61), (7.64) ve (7.65) birleştirilerek ve (7.69) kullanılarak, referans akımlar için aşağıdaki eşitlik elde edilebilir;

$$\begin{aligned}
i_{fab}^* &= i_{lab} - \frac{v_{sab} - 3\beta v_{sc}}{\Delta} P_{lav} \\
i_{fbc}^* &= i_{lbc} - \frac{v_{sbc} - 3\beta v_{sa}}{\Delta} P_{lav} \\
i_{fca}^* &= i_{lca} - \frac{v_{sca} - 3\beta v_{sb}}{\Delta} P_{lav}
\end{aligned} \tag{7.70}$$

Burada $v_{sab} = v_{sa} - v_{sb}$, $v_{sbc} = v_{sb} - v_{sc}$, $v_{sca} = v_{sc} - v_{sa}$ olup, determinant şöyle ifade edilebilir;

$$\Delta = v_{sab}^2 + v_{sbc}^2 + v_{sca}^2 = 3(\text{rms faz-faz gerilimi})^2 \text{ şeklinde ifade edilir.}$$

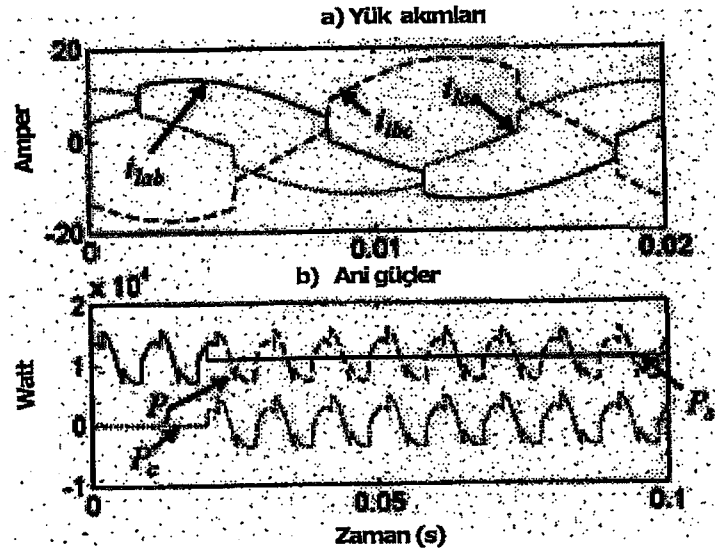


Şekil 7.34 Üçgen bağlı bir yükün kompanzasyon şeması

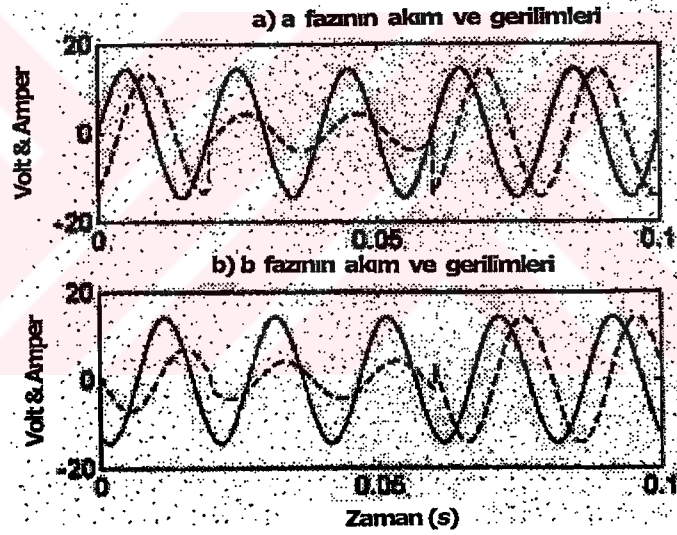
Örnek 3: Kompanzatorün ideal bir akım kaynağı olarak kabul edildiği bu örnekte, dengesiz R-L üçgen bağlı yük kaynağa bağlanır.

$$R_{ab} = 75\Omega \quad R_{bc} = 35\Omega \quad R_{ca} = 50\Omega \quad L_{ab} = 0\text{mH} \quad L_{bc} = 130\text{mH} \quad \text{ve} \quad L_{ca} = 190\text{mH}$$

Dengesiz üçgen bağlı yük dışında, üç tane bir fazlı tam dalgalı kontrolsüz redresörler de bağlanır. Redresörler, ab, bc ve ca fazları için sırasıyla 5, 6 ve 4 A genlikli düzgün olmayan kare dalga şekilli akımları çekerler. Kompanze edilmemiş yük akımları Şekil 7.35 (a) 'da gösterilmiştir. Ayrıca iki faz için 1:5 oranında ölçeklendirilmiş kaynak gerilimi ve akımı Şekil 7.36 'da gösterilmiştir. Bu şekilden açıkça görüldüğü gibi kaynak akımının genliği, birim güç faktör değerinde 60 açı ile yarı değerine düşmektedir. Şekil 7.36'da ayrıca redresör anahtarlanmasından dolayı yük akımlarının devam etmediği de görülmektedir. Kompanzator devreye alındıktan sonra yük akımları kaynak akımlarına transfer edilemez. Çünkü kompanzator ideal akım kaynakları olarak gerçekleştirilmektedir (Gosh ve Joshi, 2000).



Şekil 7.35 (a) Yık akımları, (b) ani güçler

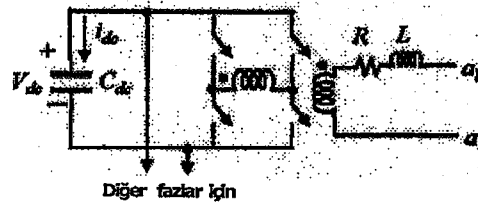


Şekil 7.36 (a,b) (1:5) oranında ölçeklendirilmiş kaynak gerilimleri ve akımları

7.4.3 Kompanzatörün Yapısı

Önceki bölümlerdeki örneklerde kompanzatör ideal akım kaynakları olarak düşünülmüştü. Bu bölümde, akım kaynağının üç gerilim kaynağı inverteri (VSI) olarak düşünüldüğü kompanzatör yapısı ele alınacaktır. Kompanzatör yapısının bir fazı Şekil 7.37`de gösterilmiş ve üç VSI gibi genel dc depolama kondansatörüne bağlanır. Şekil 7.37`de her bir anahtar, bir güç yarı iletken anahtarı ve ters paralel kombinasyonu olarak gösterilmiştir. Her bir VSI, transformatöre rağmen şebekeye bağlanır ve altı çıkış ucu da ($a_1, a_2 \dots v_b$) yıldız veya üçgen bağlanabilir. Transformatörün eklenmesinin nedeni, inverterler arasında izolasyon

sağlamaktır. Bu durum dc depolama kondansatörünün, farklı inverterler içindeki anahtarlamalardan dolayı kısa devre olmasını önler. Şekildeki L indüktansı her bir transformatöre ait kaçak indüktansı ve ek dış indüktansı temsil etmektedir. İnverterlerin anahtarlama kayıpları ve transformatörlerdeki bakır kayıpları bir R direnci ile ifade edilmektedir. Transformatörün demir kayıpları ihmal edilmiştir. Yıldız bağlı yükler için de, her bir transformatör ilgili yüke paralel bağlanır. Gerilim kaynağı inverterler ise üretilen referans akımlarını sağlamak için histerisiz band akım kontrolünde çalışırlar (Gosh ve Joshi, 2000)



Şekil 7.37 Gerilim kaynağı inverterler ve dc kondansatör kullanılarak gerçekleştirilen kompanzasyon

İnverter ve transformatördeki kayıpları R ile modellenip, kaynaktan ekstra gerçek güç çekilerek bu kayıplar karşılanmalıdır. Böylece (7.68) şöyle değiştirilebilir.

$$\left. \begin{aligned} i_{fa}^* &= i_{lab} - \frac{v_{sa} + (v_{sb} - v_{sc})\beta}{\Delta} (P_{lav} + P_{loss}) \\ i_{fb}^* &= i_{lbc} - \frac{v_{sb} + (v_{sc} - v_{sa})\beta}{\Delta} (P_{lav} + P_{loss}) \\ i_{fc}^* &= i_{lca} - \frac{v_{sc} + (v_{sa} - v_{sb})\beta}{\Delta} (P_{lav} + P_{loss}) \end{aligned} \right\} \quad (7.71)$$

$P_{kayıp}$, kompanzatördeki kayıpları göstermektedir. Uygun bir geri besleme kontrolü vasıtası ile $P_{kayıp}$ 'ın elde edilmesi aşağıda açıklanmıştır.

Dc kondansatör akımının ortalama değeri bir periyot boyunca sıfırken, ortalama kondansatör gerilimi sabit tutulur. $V_{dc} = (1/C_{dc}) \int i_{dc} dt$ olduğu için, her periyodun sonunda V_{dc} 'nin referans değeri V_{ref} 'den sapması, kondansatör akımının (i_{dc}) ortalama değerinin sıfırdan sapması ile ilgili bir belirtidir. Bu yüzden basit bir orantılı- artı - integral (PI) kontrolör seçilir;

$$P_{kayia} = \kappa_{pe} + \kappa_I \int e dt \quad (7.72)$$

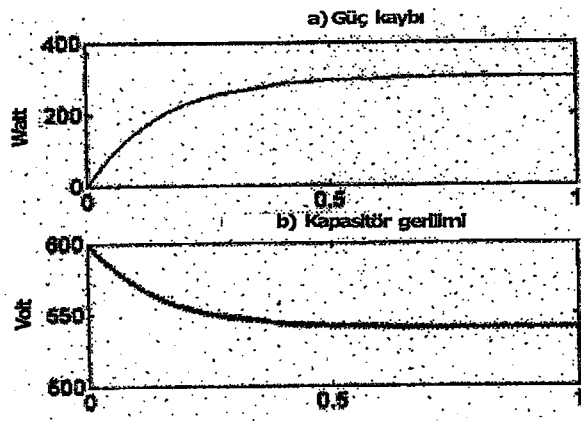
$e = V_{ref} - V_{dc}^{cyl}$ olup, V_{dc}^{cyl} bir periyot sonundaki kondansatör gerilimidir. O halde eşitlik 7.72'denki $P_{kayıp}$ ifadesi, (7.71)'de referans akımları hesaplamak için kullanılır.

Örnek 4 : Gerilim kaynağı ve frekans örnek 1 ve örnek 2'deki gibidir. Simülasyon için kullanılan kompanzatör sistem datası Şekil 7.37'e göre aşağıdaki değerlere sahiptir.

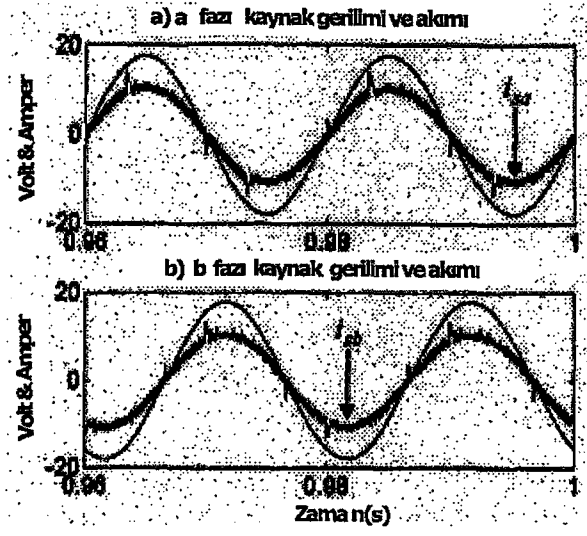
$$C_{dc} = 2000 \mu F \quad L = 20mH \quad R = 2\Omega$$

Transformatörün dönüştürme oranı 1:1 olarak kabul edilmektedir. Üç fazlı dirençli yük, üç fazlı dört iletkenli kaynağın uçlarına bağlanır. Yük dirençleri $R_a=50\Omega$ $R_b=75\Omega$ $R_c=100\Omega$ 'dur. Yukarıda bahsedilen yüke ilave olarak, üç faz kontrolü redresör de yük barasına bağlanır. Redresör, her bir fazdan 5A büyüklüğünde kare dalga şekilli akımı çeker. Dc kondansatör, kompanzatör $t=0$ anında şebekeye bağlanmadan önce 600 V ile önceden şarj edilir. Ayrıca şunu belirtmekte fayda vardır ki; kondansatör aynı güç devresi kullanılarak şarj edilebilir. Histerisiz band 0,5 A olarak seçilir. Kontrolör parametreleri $\kappa_p=5$ ve $\kappa_i=0.0025$ 'dir. Burada istenen şey sistemin güç faktör modunda çalışmalıdır (Goshi ve Joshi, 2000).

Kompanzatör $t=0$ zamanında devreye alınınca, hem kontrolör çıkışı hem de kondansatör geriliminin sakinleşmesi Şekil 7.38'de görüldüğü gibi zaman almaktadır. İki fazın çıkış akımları ile 1:20 oranında ölçeklendirilmiş faz gerilimleri Şekil 7.39'da gösterilmiştir. Hem birim güç faktörü hem de dengeleme işlemi bu şekilden açıkça görülebilir. Redresör akımlarındaki ani değişimlerden dolayı kaynak akımlarındaki seviye görülebilir (Goshi ve Joshi, 2000).



Şekil 7.38 (a) Kontrolör çıkışı , (b) Kondansatör gerilimi



Şekil 7.39 (a.b) (1:20) oranında ölçeklendirilmiş kaynak gerilimleri ve akımları

8. SAYISAL UYGULAMA

Bu bölümde bir firmadan alınan kompanzasyonlu harmonik filtrelerin kullanıldığı gerçek bir sistem incelenmiştir. Bu sistemin dengeli olduğu kabul edilip sistem bir fazlı olarak ele alınmıştır. Firma tarafından tek hat şeması verilen sistemin Matlab programında bir fazlı olarak modellenebilmesi için bazı hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Bu hesaplamalar aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

Şekil 8.1`de sistemin tek hat şeması gösterilmiştir. Firma tarafından yapılan ölçümler ise Şekil 8.2, 8.3, 8.4`de verilmiştir. Şekil 8.2`de harmonikli akım ve gerilimin dalga şekli, Şekil 8.3`de gerilim harmonik spektrumu, Şekil 8.4`de ise akım harmonik spektrumu verilmiştir.

Sistemde Verilen Yüklere Ait Güçlerin Bir Fazlı Değerleri :

1.Yük : İdari Bina Ana Dağıtım Panosu

Yükün aktif gücün üç fazlı değeri 386,81 kw olarak verilmiştir.

Bir fazlı olarak aktif güç değeri : $P = (386,81 \text{ kw}) / 3 = 128,936 \text{ kw}$ olarak bulunur.

$\cos\phi = 0.8$ olarak kabul edilip,

Bir fazlı olarak reaktif güç değeri: $Q = P \times \tan\phi = 128,936 \times 0,75 = 96,702 \text{ kVAr}$ olarak hesaplanabilir.

2.Yük : İşletme Bodrum Katı Aydınlatma Priz Panosu

Yükün aktif gücün üç fazlı değeri 28,41 kw olarak verilmiştir.

Bir fazlı olarak aktif güç değeri : $P = (28,41 \text{ kw}) / 3 = 9,47 \text{ kw}$ olarak bulunur.

$\cos\phi = 0.8$ olarak kabul edilip,

Bir fazlı olarak endüktif reaktif güç değeri: $Q = P \times \tan\phi = 9,47 \times 0,75 = 7,1025 \text{ kVAr}$ olarak hesaplanabilir.

3.Yük : Bodrum Kat Asansör Makina Panosu

Yükün aktif gücün üç fazlı değeri 25 kw olarak verilmiştir.

Bir fazlı olarak aktif güç değeri : $P = (25 \text{ kw}) / 3 = 8,333 \text{ kw}$ olarak bulunur.

$\cos\phi = 0.8$ olarak kabul edilip,

Bir fazlı olarak endüktif reaktif güç değeri: $Q = P \times \tan\phi = 8,333 \times 0,75 = 6,24975$ kVAr olarak hesaplanabilir.

4.Yük : Kompresör

Yükün aktif gücün üç fazlı değeri 60 kw olarak verilmiştir.

Bir fazlı olarak aktif güç değeri : $P = (60 \text{ kw}) / 3 = 20 \text{ kw}$ olarak bulunur.

$\cos\phi = 0.8$ olarak kabul edilip,

Bir fazlı olarak endüktif reaktif güç değeri: $Q = P \times \tan\phi = 20 \times 0,75 = 15$ kVAr olarak hesaplanabilir.

5.Yük : İşletme Bodrum Motor Kontrol Panosu

Yükün aktif gücün üç fazlı değeri 31,70 kw olarak verilmiştir.

Bir fazlı olarak aktif güç değeri : $P = (31,70 \text{ kw}) / 3 = 10,566 \text{ kw}$ olarak bulunur.

$\cos\phi = 0.8$ olarak kabul edilip,

Bir fazlı olarak endüktif reaktif güç değeri: $Q = P \times \tan\phi = 10,566 \times 0,75 = 7,9245$ kVAr olarak hesaplanabilir.

6.Yük : Giriş Kontrol Binası

Aktif gücün üç fazlı değeri 15 kw olarak verilmiştir.

Bir fazlı olarak aktif güç değeri : $P = (15 \text{ kw}) / 3 = 5 \text{ kw}$ olarak bulunur.

$\cos\phi = 0.8$ olarak kabul edilip,

Bir fazlı olarak endüktif reaktif güç değeri: $Q = P \times \tan\phi = 5 \times 0,75 = 3,75$ kVAr olarak hesaplanabilir.

7.Yük : Çevre Aydınlatma Panosu

Yükün aktif gücün üç fazlı değeri 25 kw olarak verilmiştir.

Bir fazlı olarak aktif güç değeri : $P = (25 \text{ kw}) / 3 = 8,333 \text{ kw}$ olarak bulunur.

$\cos\phi = 0.8$ olarak kabul edilip,

Bir fazlı olarak endüktif reaktif güç değeri: $Q = P \times \tan\phi = 8,333 \times 0,75 = 6,24975$ kVAr olarak hesaplanabilir.

Filtre Devrelerindeki Lve C 'lerin Hesaplanması

Sistemde kullanılan filtrelerle ilgili verilen bilgiler şunlardır;

Kondansatörlerin nominal gücü (Q_c) = 100 kVAr ve 50 kVAr

Kondansatörlerin çalışma gerilimi (U) = 525 V olup ,

Sistemin temel frekans $f_1 = 50$ Hz dir.

Üçgen bağlı kondansatörler için Q_c değeri şöyledir;

$$Q_c = 3.U^2 . \omega C_{\text{üçgen}}$$

Yıldız bağlı kondansatörler için Q_c değeri şöyledir;

$$Q_c = 3.V^2 . \omega . C_{\text{yıldız}} = 3 \frac{U^2}{3} \omega . C_{\text{yıldız}} = U^2 . \omega . C_{\text{yıldız}}$$

Burada kondansatörler üçgen bağlıdır. Üçgen-yıldız dönüşümü yapılır.

1) $Q_c = 100$ kVAr için kondansatörün değeri;

$$C_{\text{yıldız}} = \frac{Q_c}{U^2 . \omega} = \frac{100.10^3}{525^2 . 2.3,14.50} = 0,00115486309964 \text{ F}$$

2) $Q_c = 50$ kVAr için kondansatörün değeri;

$$C_{\text{yıldız}} = \frac{Q_c}{U^2 . \omega} = \frac{50.10^3}{525^2 . 2.3,14.50} = 0,00057743154982 \text{ F}$$

Gerçek sistemde rezonans frekansı (f_r) 210 Hz dir. Ancak bu çalışma sırasında, rezonans frekansının 240 Hz olması halinde kompanzasyonlu harmonik filtrelerin akım ve gerilim için toplam harmonik distorsiyonlarını daha çok düşürdüğü fark edilmiştir. Bu nedenle bu iki rezonans frekansı için sistem Matlab programında ayrı ayrı modellenmiştir. Rezonans frekansının 210 Hz olması durumunda filtrenin endüktansı 497 μ H dir. Rezonans frekansının 240 Hz olması durumunda filtre endüktansı şöyle hesaplanır;

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L.C}} \text{ eşitliğinden } L \text{ değeri çekilip değerler yerine yazılırsa ;}$$

$$L = \frac{1}{C.(2\pi f_r)^2} = \frac{1}{0,00115486309964(2.3,14.240)^2} = 3,8079.10^{-4} \text{ H}$$

Sistem L ve R Değerlerinin Hesaplanması

1.Trafonun alçak gerilim tarafına ait R ve L değerlerinin hesabı:

Trafonun nominal gücü (S_N) = 1250 kVA

Trafonun bağlı kısa devre gerilimi (u_k) = %6

Trafonun bakır kayıpları = %3-%5 (Hesaplamalarda % 4 alındı)

Trafonun 400V `luk alçak gerilim tarafına ait R ve L değerlerinin hesabı şöyledir.

$$I_{N0,4} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_{N0,4}} = \frac{1250 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 1804 \text{ A}$$

$$P_k = 1250 \cdot 0,04 = 50 \text{ kw}$$

$$R_{k0,4} = \frac{P_k}{3 \cdot I_{N0,4}^2} = \frac{50 \cdot 10^3}{3 \cdot 1804^2} = 0,0051 \Omega$$

$$Z_{k0,4} = \frac{u_k \cdot U_{N0,4}^2}{S_N} = \frac{0,06 \cdot 400^2}{1250 \cdot 10^3} = 0,0077 \Omega$$

$$X_{k0,4} = \sqrt{Z_{k0,4}^2 - R_{k0,4}^2} = \sqrt{0,0077^2 - 0,0051^2} = 0,0057 \Omega$$

$$L_{trf} = \frac{0,0057}{2\pi f} = \frac{0,0057}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 1,82 \cdot 10^{-5} \text{ H}$$

2.Şebekenin L Değerinin Hesabı

34,5 kV `luk şebekenin yüksek gerilim kısmına ait kısa devre akımı 16 kA olup, bunun 400V`luk alçak gerilim tarafındaki değeri şöyle bulunur :

$$34,5 \text{ kV} \cdot 16 \text{ A} = 0,4 \text{ kV} \cdot I_{k0,4}''$$

$$I_{k0,4}'' = 1380 \text{ kA}$$

$$I_{k0,4}'' = \frac{1,1 \cdot U_{N0,4}}{\sqrt{3} X_s} \text{ eşitliğinden } X_s \text{ çekilerek,}$$

$$X_s = \frac{1,1 \cdot U_{N0,4}}{\sqrt{3} I_{k0,4}''}$$

$X_s = \frac{1,1.400}{\sqrt{3.1380.10^3}} = 1,84.10^{-4} \Omega$ bulunur. Buradan şebekenin L değeri,

$$L_s = \frac{1,84.10^{-4}}{2\pi.f} = \frac{1,84.10^{-4}}{2.3,14.50} = 5,8598.10^{-7} \text{ şeklinde elde edilir.}$$

Buradan ;

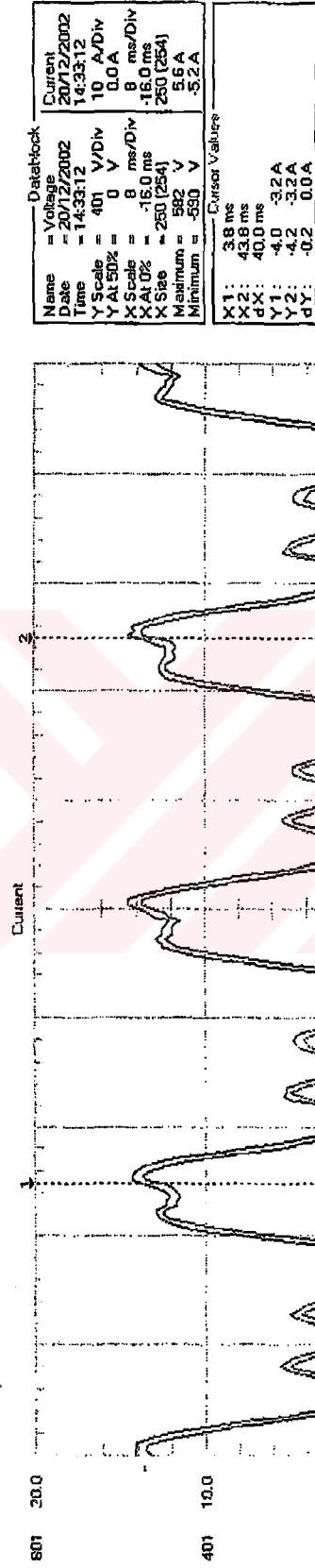
Sistemin toplam L değeri : $L_{trf} + L_s = 1,82.10^{-5} + 5,8598.10^{-7} = 1,878980.10^{-5} H$

Sistemin toplam R değeri : $R_{trf} = 0,0051 \Omega$ olur.

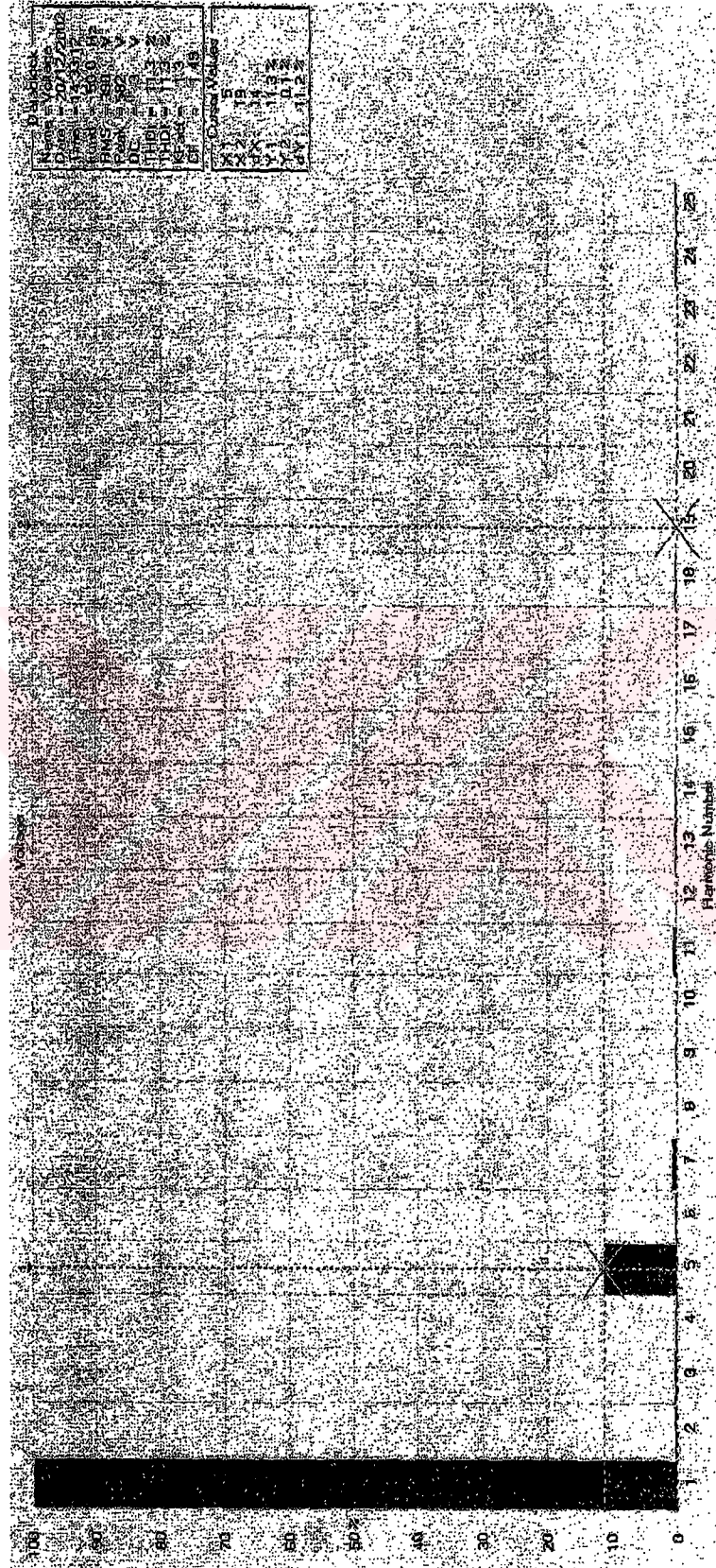
Tüm bu hesaplanan değerler Matlab programında ilgili yerlere yazıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Sistemde filtrenin bulunmaması durumunda ;
 - Güç faktörü:0,8258
 - THD_v :0,09686
 - THD_I :0,6661
- Rezonans frekansı 210 Hz için bulunan sonuçlar;
 - Güç Faktörü :0,9989
 - THD_v :0,05026
 - THD_I :0,4388
- Rezonans frekansı 240 Hz için bulunan sonuçlar;
 - Güç Faktörü :0,9973
 - THD_v :0,01483
 - THD_I :0,1555

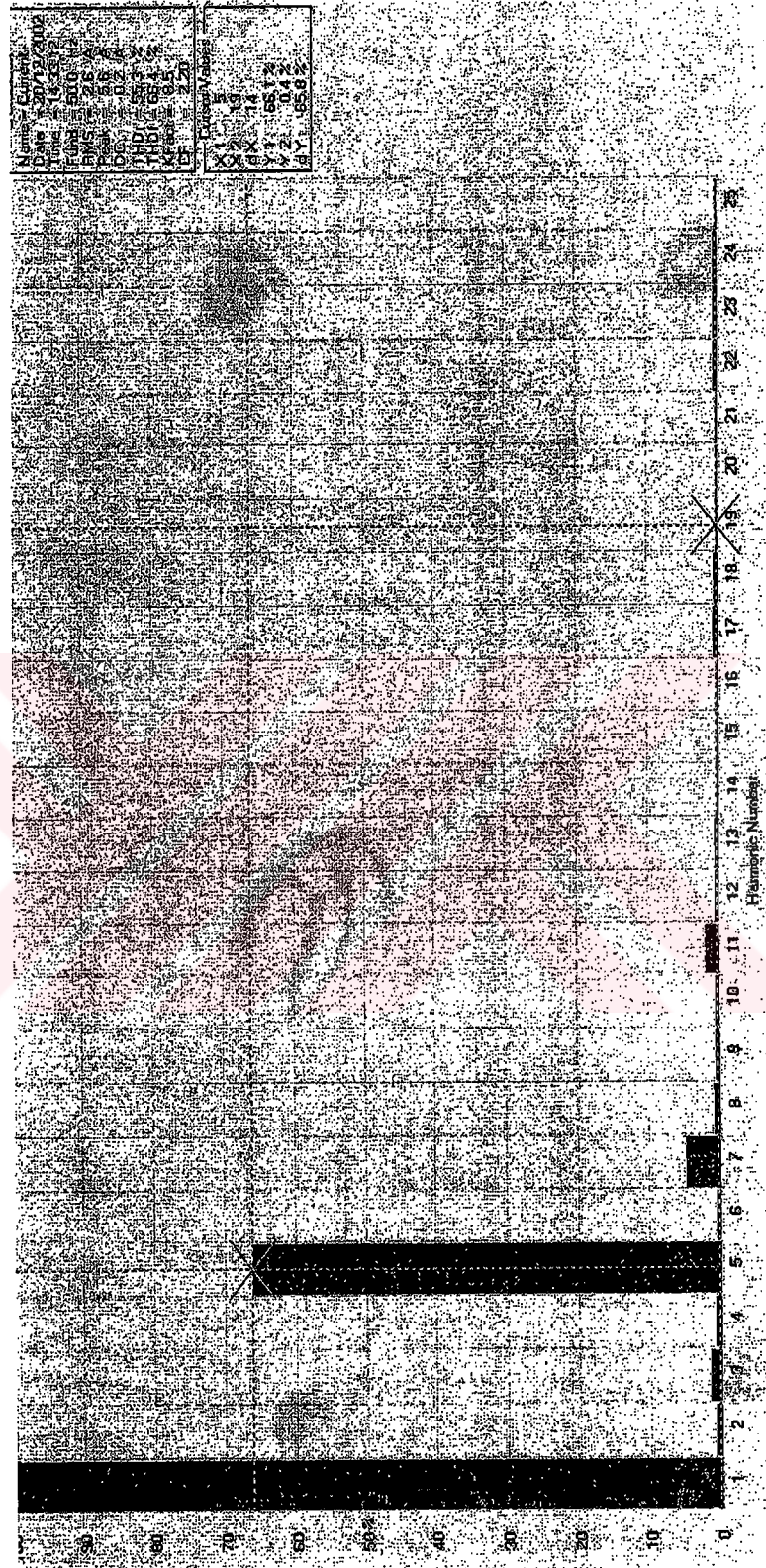
Şekil 8.5`de sistemin filtresiz durumu, Şekil 8.6 ve 8.7`de kompanzasyonlu harmonik filtrelerinin kullanıldığı durumlar Matlab programında modellenmiştir. Şekil 8.6 `da rezonans frekansının 210 Hz iken Şekil 8.7`de rezonan frekansı 240 Hz olduğu kabul edilmiştir.



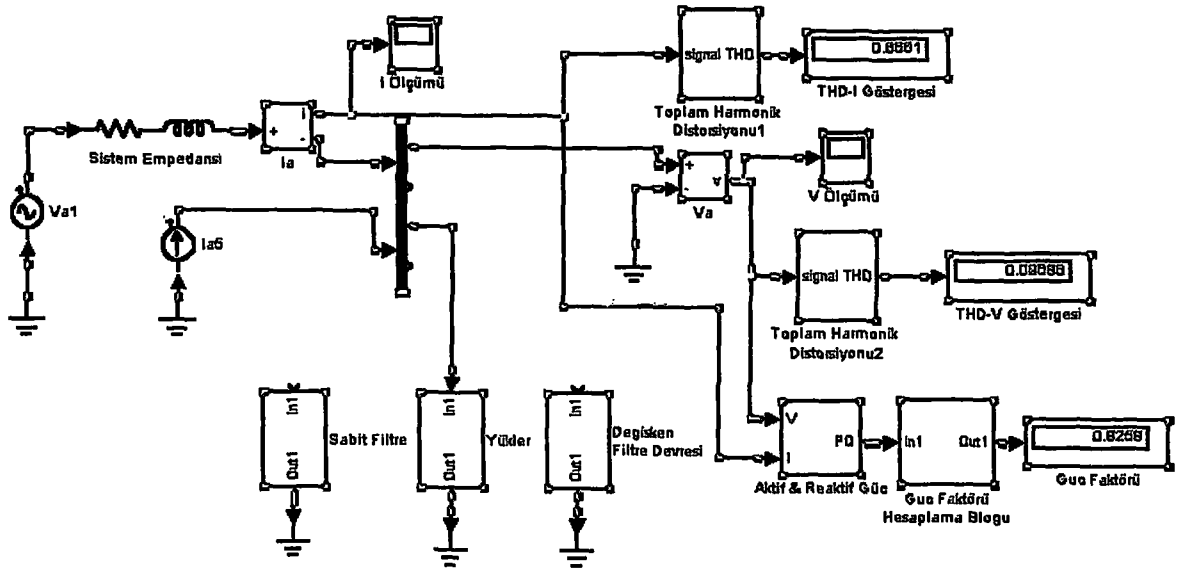
Şekil 8.2 Ölçüm: Yük akımı >1,1 kA iken gerilim ve akımın dalga şekli



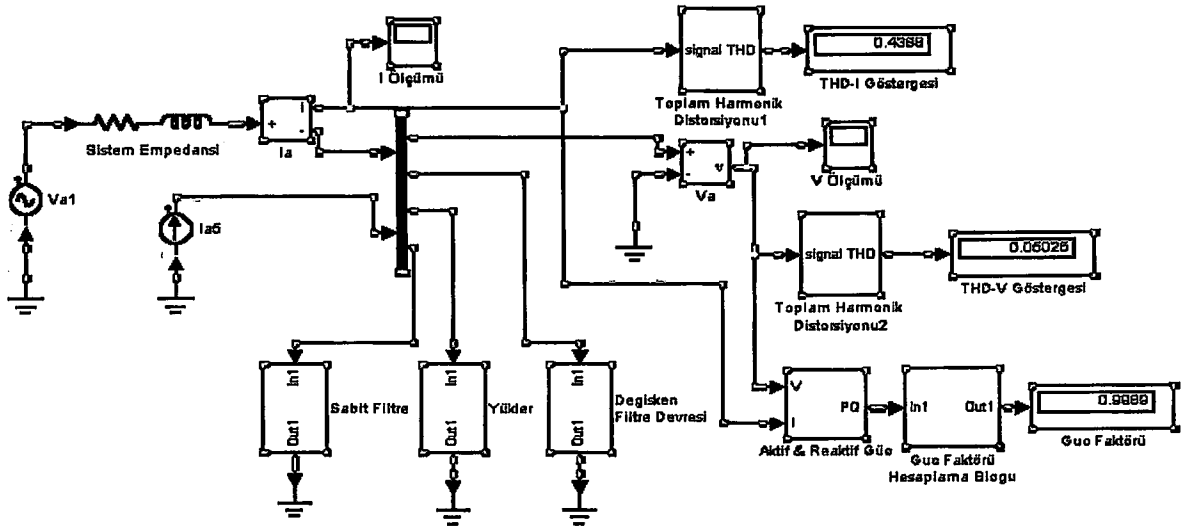
Şekil 8.3 Ölçüm: Yük akımı >1,1 kA iken gerilim harmonik spektrumu $THD_v = \%11,3$



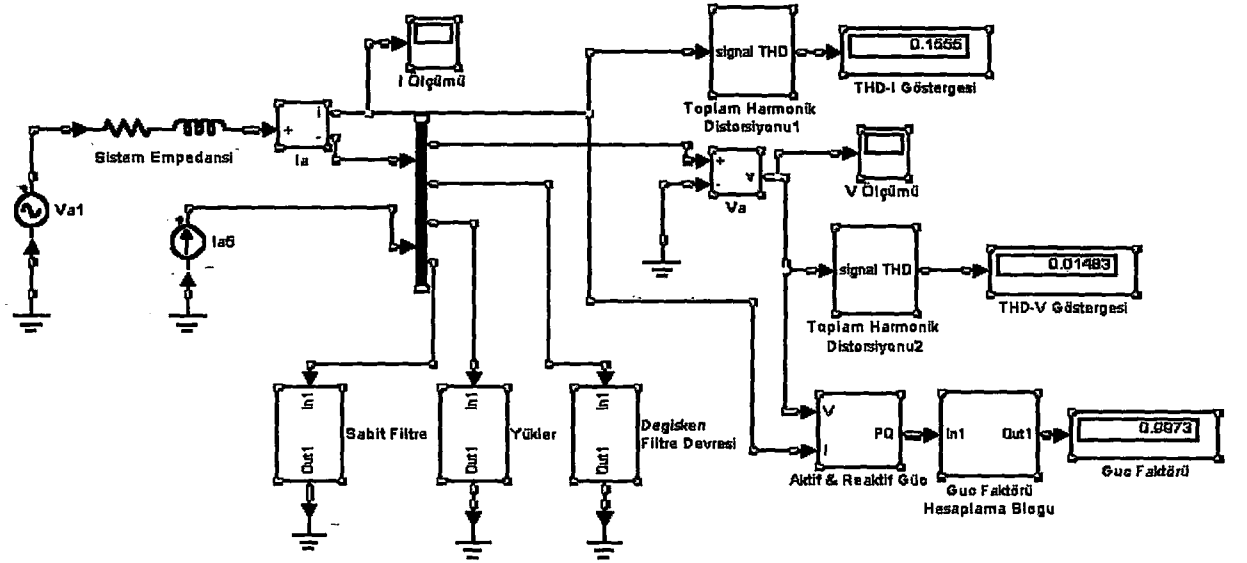
Şekil 8.4 Ölçüm: Yük akımı >1,1 kA iken akım harmonik spektrumu $THD_I = \%66,1$



Şekil 8.5 Sistemin filtresiz durumunun Matlab programında modellenmiş hali



Şekil 8.6 Kompanzasyonlu harmonik filtrelerinin kullanılması durumunda sistemin Matlab programında modellenmiş hali ($f_r = 210\text{Hz}$ için)



Şekil 8.7 Kompanzasyonlu harmonik filtrelerinin kullanılması durumunda sistemin Matlab programında modellenmiş hali ($f_r = 240\text{Hz}$ için)

9. SONUÇLAR

Lineer olmayan elemanlar tarafından üretilen harmonikler, gerilim ve akımın dalga şekillerini bozarak tesis ve işletme araçlarının yüklenmesine, ek kayıplara, ısınmaya ve rezonans neden olurlar. İşletme araçlarının zarar görmesine ve hatta sistem dışı kalmalarına da sebep olabilirler.

Lineer elemanlar ve sinüsoidal kaynaktan oluşan enerji sistemlerinde güç faktörünün düzeltimi basit bir şekilde yapılmaktadır. Güç faktörünü düzeltme işlemi reaktif gücün sıfıra veya sıfıra yakın bir değere getirilerek sağlanır. Bunun için endüktif karakterli sistemler için kapasite elemanı kullanılır. Ancak nonsinüsoidal büyüklükleri içeren devrelerde güç faktör düzeltimi işlemi daha zor olup, harmonikli bileşnelerin göz önüne alınması gerekir.

Harmoniklerin bulunduğu devrelerde güç faktörünün düzeltilmesi ile ilgili bir çok çalışmalar yapılmıştır. Bunları şöyle sıralayabiliriz; minimum optimal kapasiteli kondansatör kullanılarak güç faktörünü iyileştirme, şönt aktif filtre – pasif filtre kombinasyonu ile güç faktör düzeltimi, şönt pasif filtre ile güç faktör düzeltimi ve yükün dengelenmesi yolu ile güç faktör düzeltimi.

Güç faktörünün düzeltimi ile yapılan çalışmalardan çıkartılacak sonuçlar şunlardır :

- 1) Güç kompanzasyonu yapılacak devrenin harmonik içerip içermediği mutlaka belirlenmelidir. Aksi takdirde tam anlamıyla optimal bir güç kompanzasyonu yapılamaz.
- 2) Harmonik içeren devrelerde güç faktörü, kondansatör değerinin artmasıyla artacak, ancak belli bir değerden sonra azalmaya başlayacaktır. Bu nedenle optimal kapasite değeri mutlaka belirlenmelidir. Böylece gereksiz yere kapasite kullanılmayacak ve ekonomiklik sağlanacaktır.
- 3) Güç faktörünün iyileştirilmesi sırasında toplam harmonik distorsiyonunda incelenmesi fayda vardır. Güç faktörü ile THD değeri arasında optimal çalışma şartlarının bulunması gerekmektedir.
- 4) Sinüsoidal beslemeli lineer olmayan devrelerde akım harmoniklerinin meydana getirdiği distorsiyon gücünün büyük bir değer almasından dolayı güç faktörünü bir değerine çıkarma sadece kompanzasyon yapılması ile gerçekleşmemektedir. Bunun için harmoniklerin filtre edilmesi gerekmektedir.
- 5) Nonsinüsoidal beslemeli lineer devrelerde, besleme gerilimdeki harmonik

mertebelerinden dolayı güç faktörü tam olarak 1 değerine çıkarılamamaktadır. Harmonik bileşenler temel bileşene yakın değerler alırsa güç faktörünün değişim aralığı sınırlı olmaktadır.

- 6) Nonsinüsoidal beslemeli nonlinear devrelerde akım ve gerilimdeki harmoniklerden dolayı yalnızca kapasite bağlanarak güç faktörünün 1 değerine çıkarılması zordur.
- 7) Güç faktör düzeltim kondansatörlerin, harmonik distorsiyonunu azaltmak için kullanılması genellikle tavsiye edilmez. Harmonik distorsiyonunu azaltmak için kullanılan kapasitörler, sistem özellikle korunmuş olsa dahi, güç sistem rezonanslarına ve harmoniklerin genliklerinde yükselmelere neden olacaktır. Bunun yerine harmonik filtreler güç faktörünü düzeltmek için kullanılmalıdır. Harmonik filtreler dağıtım sisteminde enerji kayıplarını azaltırken, harmonik distorsiyonun olumsuz etkilerini de ortadan kaldırmaktadır.

Bu tez çalışmasında kompanzasyonlu harmonik filtrelerinin, harmoniklerin bulunduğu sistemlerde kullanılmasıyla güç faktörü ile akım ve gerilim toplam harmonik distorsiyonu üzerindeki etkisini görebilmek için sayısal bir uygulamaya yer verilmiştir. Bu amaçla bir firmadan alınan kompanzasyonlu harmonik filtrelerin kullanıldığı gerçek bir sistem üzerinde çalışma yapılmıştır. Bu gerçek sistem Matlab programında modellenerek sistemde filtrelerin bulunmadığı ve kompanzasyonlu harmonik filtrelerin bulunduğu durumlardaki güç faktörü, akım ve gerilim için toplam harmonik distorsiyonu ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları ise şöyledir;

	Güç Faktörü	THD _v	THD _i
Sistemde filtrenin bulunmaması durumunda	0.8258	0.09686	0.6661
Sistemde filtrenin bulunması durumunda (fr = 210 Hz)	0.9989	0.05026	0.4388
Sistemde filtrenin bulunması durumunda (fr = 240 Hz)	0.9973	0.01483	0.1555

Sonuçta kompanzasyonlu harmonik filtrelerin g faktörünü yükseltici, akım ve gerili toplam harmonik distorsiyonunu düşürücü etkisi açıkça görülmüştür. Bugün kompanzasyonlu harmonik filtrelerin pratik hayatta en geçerli çözüm olduğu ortaya çıkmıştır.



KAYNAKLAR

Arrillaga, J., Watson, N.R. ve Chen, S., (2001), Power System Quality Assesment, JohnWiley& Sons.

Attar, F. ve İnan, A.,(1997), “Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Etkileri ve Bir Harmonik Kontrol Kartı Modeli ”, Kaynak Dergisi, Nisan 1997, 98 :103-143.

Attar, F., İnan, A. ve Sarıkayalar, O., (1998),“Güç Sistemi Harmoniklerinin Eliminasyonu İçin Aktif Filtre Kullanımı ve Pasif Filtre İle Karşılaştırılması”, Kaynak Dergisi, Temmuz 1998, 112:103-111.

Bayram, M., (2000), Kuvvetli Akım Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Bhattachary,S.,Divan,D.M. ve Banerjee, B.,“Active Filter Solutions for Utulity İnterface”, IEEE, 53-63.

Cheng, H., Sasaki, H. ve Yorino,N., (1995), “A New Method for Both Harmonic Voltage and Harmonic Current Suppression and Power Factor Correction in İndustrial Power Systems”,IEEE, 27-34.

Cividino,L.ve Telecom,N., (1992),“Power Factor, Harmonic Distortion;Causes, Effects and Considerations”, IEEE, 506-513.

Dugan, R.C., McGranaghan, M.F. ve Beaty, H.W., (1996), Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill, New York.

Ertan, U., (1994), “Elektrik Şebekelerinde Harmonikler”,Kaynak Dergisi , Temmuz- Ağustos, 81: 100-115.

Gencer, Ö.Ö., Alboyacı, B., Öztürk, S. ve Çetinkaya, H.B.,“Harmoniklerin Güç Faktörü Üzerine Etkileri”, Elektrik –Elektronik – Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, 9-12.

Ghosh, A. ve Joshi, A., (2000), “A New Approach te Load Balancing and Power Factor Correction in Power Distribution System”,IEEE Transactions on Power Delivery, 15(1) : 417-422.

Hao,L., Yonghai,X. Ve Xiangning, X.,(2002),”Synopsis: A hybrid Active Filtering Power System Harmonics”, September 2002,Beijing.

Karakaş, A., Kocatepe, C. ve Uzunoğlu, M., (2001),“Nonlinear Yük İçeren Güç Sistemleinde

Optimal Güç Faktörü Hesabı” , 23-25 Mayıs 2001, Lefkoşa, 80-83.

Kaşıkcı, I., (2000), “A New Method for Power Factor Correction and Harmonic Elimination in Power Systems” ,IEEE, 810-815.

Kaşıkcı, I., Darwin, M. ve Mehta, P., (2000), “A New Contribution into The Improvement of Power Factor Correction”, IEEE, 102-107.

Kaya, E., (1994), “Harmoniklerin Zararını Ödeme”, Kaynak Dergisi, Temmuz-Ağustos 1994, 81: 91-93.

Kocatepe, C. ve Uzunoğlu, M., (2001), “Elektrik Enerji Sistemlerinde Harmoniklerin Meydana Getirdiği Etkiler”, Kaynak Dergisi, Temmuz-Ağustos 2001, 148:126-132.

Kocatepe,C. ve Karakaş, A., (2002),“Nonlinear Elemanlar ve Harmonikli Devreler”, Kaynak Dergisi, Nisan 2002,156:109-116.

Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Karakaş, A. ve Arıkan, O., (2003), Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Schneider, (1999), “Alçak Gerilim Reaktif Güç Kompanzasyonu”, Kaynak Dergisi, Mayıs 1999, 122 : 91-93.

Terbobri, G.G. ve Saidon, M.F., (2000) ,“Trends of Real Time Controlled Active Filters”, IEE, No.475:410-415.

Wagner, V.E.,(1992), “Effects of Harmonics on Equipment”, IEEE Transactions on Power Delivery, 8(2):672-680.

Yalçın, B., (2000), “Aktif Harmonik Filtreler”, Kaynak Dergisi,Mayıs 2000, 134:93-96.

www.ieee.org/portal/index.jsp.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	09.07.1978	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1992-1995	Kadıköy Mehmed Bayazıd Lisesi
Lisans	1997-2001	Yıldız Üniversitesi Elektrik - Elektronik Fak. Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2002-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Müh. Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı

