

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİNÜZOİDAL OLMAYAN ŞEBEKELERDEN
BESLENEN LİNEER OLMAYAN YÜKLERDE,
HARMONİK AKIM VE GERİLİMLERİN GÜÇ
FAKTÖRÜ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Elek. Müh. Burak AKIN

106267

**F.B.E Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

106267

**Tez Savunma Tarihi : 25.06.2001
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Gülderen Yıldırımaz
Jüri Üyeleri : Prof. Remzi GÜLGÜN
: Prof. Metin YÜCEL**

Metin Yücel
R. Yıldırımaz
hpe

İSTANBUL, 2001

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	v
KISALTMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Harmonik Analiz Yöntemi.....	2
1.2 Harmoniklerle İlgili Bazı Tanımlar	3
2. HARMONİKLERİ ÜRETEN ELEMANLAR.....	5
2.1 Harmonik Kaynaklar.....	5
2.1.1 Generatörler	5
2.1.2 Transformatörler	6
2.1.3 Doğrultucular	6
2.1.4 Ark fırınları	7
2.1.5 Gaz deşarjı ile aydınlatma.....	7
3. HARMONİKLERİN ETKİLERİ.....	9
3.1 Harmoniklerin Yol Açtığı Rezonans Olayları	9
3.2 Rezonans olaylarının güç sistemine bağlı elemanlar üzerindeki etkileri.....	11
3.2.1 Kondansatörler.....	11
3.2.2 Devre Kesiciler ve Sigortalar.....	12
3.2.3 İletkenler	12
3.2.4 Elektronik Donanım.....	13
3.2.5 Aydınlatma Donanımı.....	13
3.2.6 Ölçme Aletleri.....	13
3.2.7 Koruyucu Röleler.....	14
3.2.8 Döner Makinalar	14
3.2.9 Telefonlar.....	14
3.2.10 Transformatörler	15
3.3 Harmonik Standartları.....	15
4. GÜÇ FAKTÖRÜNÜN İYİLEŞTİRİLMESİ.....	17
4.1 Sinüzoidal olmayan şebeke geriliminden beslenen lineer olmayan devrelerde güç faktörünün iyileştirilmesi.....	17
4.1.1 Kondansatör kullanarak maksimum güç faktörünün elde edilmesi.....	18
4.2 Sinüzoidal şebeke geriliminden beslenen lineer olmayan yükler	18
4.3 Sinüzoidal şebeke geriliminden beslenen lineer yükler.....	19

4.4	Sinüzoidal olmayan şebeke geriliminden beslenen lineer yükler.....	19
4.5	Sinüzoidal olmayan şebeke geriliminden beslenen lineer olmayan devrelerde kompanzasyon	20
4.5.1	Kompanzasyon problemine genel bir yaklaşım.....	20
4.5.2	Devre kompanzasyon metotları	20
4.5.2.1	Paralel bağlı kompanzasyon devreleri	21
4.5.2.2	Rezonans devreleri kullanarak kompanzasyon	21
4.6	Güç faktörünü düzeltmenin yararları	21
4.6.1	Şebekeye yararları:.....	22
4.6.1.1	Şebeke güç taşıma yeteneğinin artırılması.....	22
4.6.1.2	Şebekede ısı kaybının azalması	22
4.6.1.3	Gerilim düşümünün azalması	23
4.6.2	Alıcıya yararları:.....	23
4.7	Aşırı kompanzasyon.....	23
4.8	Kompanzasyon tesislerindeki rezonans olayları ve bunların önlenmesi	24
4.8.1	Seri rezonans devresi	25
4.8.2	Paralel rezonans devresi.....	27
4.9	3 fazlı diyot doğrultucu için güç faktörünün düzeltilmesi.....	28
4.9.1	Sistem analizi	30
4.9.2	Doğrultucu çıkış akımı ve filtre dizaynı	31
4.9.3	Giriş filtre dizaynı.....	31
5.	HARMONİKLERİN GİDERİLMESİ.....	33
5.1	Tasarım Sırasında Alınabilecek Önlemler	33
5.1.1	Generatörlerde alınabilecek önlemler	33
5.1.2	Dönüştürücülerde alınabilecek önlemler	33
5.1.3	Transformatörlerde alınabilecek önlemler	34
5.1.4	Yüksek harmoniklerin oluşturduğu rezonansa ilişkin önlemler	34
5.2	3 Faz Hat Reaktörleri	35
5.2.1	DC hat tıkaçı	37
5.3	Harmoniklerin Filtrelenmesi	37
5.3.1	Pasif filtreler.....	38
5.3.1.1	Pasif harmonik filtreleriyle ilgili genel tanımlar.....	39
5.3.1.2	Seri filtreler	40
5.3.1.3	Şönt filtreler ve çeşitleri.....	40
5.3.1.4	Alçak geçiren geniş bantlı harmonik filtresi.....	45
5.3.1.5	Elham B. Makram'ın filtre tasarım yaklaşımı	47
5.3.1.6	Temel frekans reaktif güç kompanzasyonu	48
5.3.1.7	Filtre tasarımında ekonomik bakış açıları.....	49
5.3.1.8	Minimum filtre.....	51
5.3.1.9	Filtre çeşidinin seçimi	52
5.3.1.10	Damian A. Gonzales'in filtre tasarım yaklaşımı.....	52
5.3.1.11	Tek ayarlı filtre	53
5.3.1.12	Tek ayarlı filtrenin tasarım eşitlikleri	53
5.3.1.13	Kalite faktörü	54
5.3.1.14	Tek ayarlı filtrenin tasarım düşünceleri	54
5.3.1.15	Yüksek geçiren filtre tasarımı	55
5.3.1.16	Yüksek geçiren filtre tasarım eşitlikleri	55
5.4	Aktif Filtre	56
5.4.1	Aktif filtre dizaynı.....	58
5.4.1.1	Aktif filtre ayarları	58

5.4.1.2	EMTP aktif filtre modeli.....	60
5.4.1.3	IGBT gerilim beslemeli inverter	60
5.4.1.4	Kontrol referansı ve örnekleme	60
5.4.1.5	PWM tetikleme darbe jeneratörü	61
5.4.1.6	Sistem ara yüz modülü.....	62
5.4.1.7	Aktif filtre performansının değerlendirilmesi için örnek sistem.....	62
5.4.1.8	Lineer olmayan yük çeşitleri için aktif filtrenin değerlerinin seçilmesi.....	63
5.4.1.9	Yük dalga şekillerinin filtre hassasiyetine etkisi	63
5.4.1.10	Kararlı hal gereksinimleri ve aktif filtre hassasiyeti.....	64
5.4.1.11	Geçici güç sistemi etkilerinin aktif filtre üzerine etkisi	66
5.4.1.12	Aktif filtre sonuçları.....	67
5.4.2	Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması	68
6.	UYGULAMA DEVRESİ	71
6.1	3 fazlı tam dalga kontrollü doğrultu.....	71
6.2	Motor, R-L yükü	81
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	84
KAYNAKLAR.....		86
EKLER.....		89
EK 1 Harmoniklerin etkileri.....		89
EK 2 Alçak geçiren geniş bantlı pasif filtre harmonikleri.....		90
ÖZGEÇMİŞ.....		91

SİMGE LİSTESİ

A_0	Sabit terim
C	Kondansatör
C_L	Yük kapasitesi
C_s	Sistem kapasitesi
f_1	Temel harmonik frekansı
f_p	Paralel rezonans frekansı
f_s	Seri rezonans frekansı
$I_{act(fnd)}$	Gerçek yük akımının temel bileşeni
K_n	n. harmoniğin sargı faktörü
L	Endüktans
L_s	Sistem endüktansı
n	Harmonik mertebesi
N_s	Bir faz sargı sarım sayısı
P	Aktif güç
Q	Reaktif güç
Q	Kalite faktörü
R	Direnç, empedans
S	Görünür güç
S_c	Kapasite anma gücü
S_k	Şebekenin kısa devre gücü
S_L	Omik yükün gücü
S_t	Transformatör nominal gücü
V_{L-L}	Fazlar arası gerilim
Z_f	Filtre empedansı
Z_t	Transformatör per unit empedansı
π	3.14
Φ_n	n. harmoniğin akısı
δ	Sapma faktörü
Δf	Şebeke frekansında sapma
ΔL	L değerinde sapma
ΔC	C değerinde sapma

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternative Current (Alternatif akım)
ADC	Analog Dijital Converter (Analog dijital çevirici)
ASD	Adjustable Speed Drives (Ayarlanabilir hızdaki sürücüler)
DC	Direct Current (Direk Akım)
EMTP	Elektro Magnetic Transient Programme (Elektromanyetik geçiş programı)
FFT	Fast Fourier Transfer (Hızlı furiyer transferi)
HP	Horse Power (Beygir gücü)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
IGBT	Integrated Gate Bipolar Transistor
MVA	Mega Volt Amper
MVA _r	Mega Volt Amper Reaktif
MW	Mega Watt
PCC	Point of Common Coupling (Ortak dağıtıcı nokta)
PF	Power Factor (Güç faktörü)
PWM	Pulse Width Modulation (Darbe genişlik modülasyonu)
THD	Total Harmonic Distortion (Toplam harmonik distorsiyonu)
THID	Total Harmonic Current Distortion (Toplam akım harmonik distorsiyonu)



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Harmonik geçişleri.....	2
Şekil 4.1	Lineer olmayan yüke bağlı kondansatör.....	17
Şekil 4.2	Seri rezonans devresi	25
Şekil 4.3	Seri rezonans anı	27
Şekil 4.4	Paralel rezonans devresi.....	27
Şekil 4.5	Paralel rezonans anı	29
Şekil 4.6	Tasarlanan 3 fazlı AC-DC çevirici	31
Şekil 4.7	Tek faz eşdeğer giriş filtre dizaynı.....	32
Şekil 5.1	6-Darbeli doğrultucunun, filtresiz ve %3 hat reaktörlü giriş akım dalga şekli.....	37
Şekil 5.2	Tek ayarlı filtre devresi.....	39
Şekil 5.3	İkinci merteben zayıflatan sönümlü filtre devresi	39
Şekil 5.4	Devrede seri filtrenin kullanımı	40
Şekil 5.5	Şönt filtrenin devrede kullanımı	41
Şekil 5.6	Tek ayarlı filtre devresi.....	42
Şekil 5.7	Çift ayarlı filtre	43
Şekil 5.8.	Yüksek geçiren sönümlü filtreler.....	44
Şekil 5.9	Alçak geçiren geniş bantlı harmonik filtresi.....	46
Şekil 5.10	Tek ayarlı filtre	50
Şekil 5.12	Aktif filtre blok devresi.....	57
Şekil 5.13	İnverter bağlantısı	59
Şekil 5.14	PWM tetikleme darbe jeneratörü	61
Şekil 5.15	Örnek devre.....	63
Şekil 5.16	Yüklerine göre regülatörlerin karşılaştırılması	64
Şekil 5.17	Filtrelerin çeşitli yüklere göre karşılaştırılması	65
Şekil 5.18	Sistemdeki dalga şekilleri	67
Şekil 5.19	Sistem aşırı yüklenmesi	67
Şekil 6.1	3 fazlı kontrollü doğrultucu	71
Şekil 6.2	6-Darbeli kontrollü doğrultucu	72
Şekil 6.3	Anahtarlama güç kaynağı	72
Şekil 6.4	R-S sıfır geçişi algılama devresi	72
Şekil 6.5	Tristör tetikleme sırası	73
Şekil 6.6	Mikroişlemci için algoritma.....	74
Şekil 6.7	Tristör sürme devresi	79
Şekil 6.8	Tetikleme darbeleri (T1-T4) (5 msn-0.5V, 2msn-0.5V).....	80
Şekil 6.9	Tristör uçlarındaki gerilim	80
Şekil 6.10	6-Darbeli doğrultucu çıkış gerilimleri $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ için (5msn-100V(-3 kare))80	
Şekil 6.11	Doğrultucunun şebekeden çektiği akım $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ için (5msn-0,5V).....	81
Şekil 6.12	Motor, R-L yükü varken 5. harmonik normal ve kompanzasyonlu hali.....	81
Şekil 6.13	Motor, R-L yükü, doğrultucu varken 5. harmonik normal,p kompanzasyonlu hali82	

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1	Dağıtım sistemleri için gerilim bozulma limitleri.....	15
Çizelge 5.1	Değişik giriş reaktanslarına karşın tahmin edilen giriş akım harmonikleri	36
Çizelge 5.2	Pasif filtrelerin karşılaştırılması	47
Çizelge 5.3	Seri ve şönt aktif filtrelerin karşılaştırılması	59
Çizelge 5.4	Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması	69
Çizelge 5.5	Hat reaktörlü, pasif ve aktif filtrenin karşılaştırılması	69
Çizelge 6.1	Deney devresinden alınan değerler	82



ÖNSÖZ

Harmoniklerin güç faktörü üzerine etkilerinin incelendiği bu tezde, önce teorik çalışmalar yapılmış, daha sonra da pratik uygulama devresinden sonuçlar alınmıştır. Alınan sonuçlar sayesinde teorik çalışmalar doğrulanmış olup tutarlılık sağlanmıştır. Bu çalışmalar sırasında bana yardımlarını ve sevgilerini esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca pratik uygulamalar sırasında gerek teorik gerekse maddi desteğini esirgemeyen Tunçmatik firması ve Enel elektronik'e teşekkür ederim. Uygulama devresinin çalıştırılması sırasında bana yardımları dokunan, Arş. Gör. İsmail Aksoy ve Arş Gör A. Faruk Bakan'a, Doç Dr. Hacı Bodur'a, tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Gülderen Yıldırım'a ve emeği geçen tüm asistanlara ve arkadaşlarıma teşekkür eder, bundan sonraki çalışmalarında başarılar dilerim.



ÖZET

Güç sistemine bağlanan elemanların akım ve gerilim şeklinin sinüzoidal olması istenir. Bu durum sisteme lineer elemanların bağlanması sonucu elde edilebilir. Halbuki, günümüzde gittikçe artan sayıdaki lineer olmayan elemanlar güç sistemine bağlanması ile sinüzoidal olmayan büyüklüklere ortaya çıkmakta ve bunlar da harmonikleri doğurmaktadır. Bu çalışmada, harmonikler genel olarak incelenmiş ve bunların etkilerinin giderilmesine yönelik kullanılan filtreler araştırılmıştır. Filtreleme işleminde kullanılacak elemanların hem bozulmayı azaltacak hem de güç faktörünü düzelterek ekonomik bir çözüm olacağı düşünülmüştür.

Bu çalışmanın birinci bölümünde, harmoniklerle ilgili tanımlar ve matematiksel bağıntılar verilmiştir. İkinci bölümde harmoniklere sebep olan elemanlar genel olarak incelenmiştir. Tezin üçüncü bölümünde harmoniklerin güç sistemine etkileri verilmiş ayrıca bu etkiler maddeler halinde sıralanmıştır. Çalışmanın ana konusu olan güç faktörünün incelenmesi ve düzeltilme yolları dördüncü bölümde irdelenmiştir. Bu bölümde, ortaya çıkan harmonik etkiler ise filtre çeşitleri ve bunlara ait genel tanımlar ile beşinci bölümde verilmiştir. Altıncı bölümde sunulan uygulama devresi ile sonuçlar alınarak teorik çalışmalar doğrulanmış ve elde edilen sonuçlar yedinci bölümde anlatılmıştır.

Anahtar kelimeler: Ekonomik filtreler, Filtreler, Güç faktörü, Harmonikler, lineer olmayan, sinüzoidal olmayan akım, sinüzoidal olmayan gerilim.

ABSTRACT

Current and voltage waveform of the elements which are connected to power system is desired to be sinusoidal. This condition can be obtain by connecting linear elements to the system. Consequentlu, increasing number of nonlinear elements cause nonsinusoidal quantities in power system. Existence of nonsinusoidal quantities mean the existence of harmonics in power system. In this study, it is examined the harmonics in general and the filters which are used to eliminate effects of harmonics are studied. Filters are examined in two ways: One of them is decreasing of distortion and the other one is to provide the most economic filter with high power factor.

In the first chapter of this study, general mathematical expressions and concepts for harmonics are given. In the second chapter, elements which are caused to harmonics are examined in general. In the third chapter effects of harmonics are given and also the effects are listed in order. Examined and improved power factor correction which are main topic of this study is explained in the fourth chapter. In fifth chapter some kinds of harmonic filters and their general definitions are given. The experimental circuit is discussed in chapter six to verify the teorical researchs. As a result of chapter six, conclusions are revealed in chapter seven.

Keywords: Economical filters, Harmonics, Nonlinear loads, Nonsinusoidal current, Power factor

1. GİRİŞ

Alternatif akım güç sisteminde ideal koşullar altında elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılması sinüzoidal olup belirli gerilim seviyesinde ve sabit frekansta yapıldığı için böyle bir sistemde gerilim ve akım dalga şekli tam sinüs şeklinde olmalıdır. Bununla beraber pratikte bu tür enerjinin elde edilmesinde birtakım zorluklarla karşılaşılabilir. Bunların başında da senkron generatörlerin yapısı ve güç sistemine bağlanan lineer olmayan elemanlar ile bunların yol açtığı olaylar sebebiyle tam sinüzoidal dalga şeklinde sapmalar olabilmektedir. Sinüzoidal dalga şeklinden sapma, genellikle harmonik bileşenlerin ortaya çıkması ile ifade edilir. Şebekenin manyetik ve elektrik devrelerindeki lineer olmayan durumlar bunun en önemli etkenleridir. Bu lineersizliklere sebep, bobin, transformatör, generatör gibi elemanların doymaya giderek manyetik bakımdan lineer olmayan bir olayın meydana gelmesi ve yarıiletken elemanlar kullanılarak sinüzoidal dalganın bazı kısımlarının kırılmasıdır. Bu lineersizlikler şebekenin akım ve gerilim dalga şeklinin bozulmasına sebep olur.

Lineer olmayan elemanlar ve lineer olmayan yükler AC güç sisteminin başlangıcından beri varolmuştur. Önceleri lineer olmayan yükler olarak sadece doğrultucular biliniyordu. Daha sonra transformatörler gibi diğer manyetik elemanlar da doyma sınırını aştığında lineer olmayan şebeke elemanı olarak davrandığı anlaşılmıştır. Bu gibi elemanların güç sistemine bağlanmasıyla sistemdeki lineer olmayan etki ve lineer olmayan eleman sayısı hızlı bir şekilde artmıştır. Bu artmanın temel sebebi yüksek güçlü yarıiletken elemanların talep edilen yüksek güçleri karşılamak için sıkça kullanılması ve onların DC çevirici, DC evirici ve çeşitli elektronik devrelerde ayar için uygulanmasıdır (örneğin; DC çeviriciler, motor kontrol devreleri, statik VAR generatörleri, anahtarlama güç kaynakları vb...). Ayrıca gaz deşarj aydınlatmanın (örneğin; flüoresan, cıva arkı, cıva buharı, neon, ksenon ve yüksek basınçlı sodyum lambalar) yaygınlaşması, akü ve fotovoltaiik sistemlerin ve elektrikli vasıtaların kullanımının artması gibi tüm bu sayılan lineer olmayan yükler sisteme eklendiğinde şebekenin akım ve gerilim dalga şeklinde bozulmalara yol açarlar. Bu tür bozulmalara kısaca harmonik adı verilir.

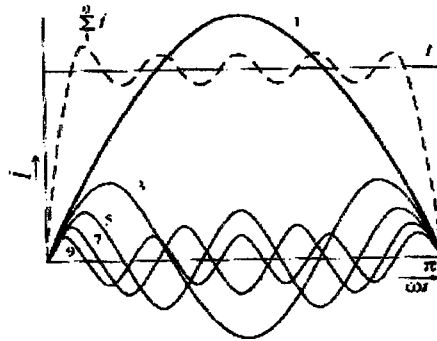
Harmoniklerin meydana çıkması enerji sistemleri için istenen bir durum değildir, fakat çoğu işletmelerde harmoniklerin ortaya çıkması (örneğin; ark fırınları) kaçınılmazdır. Lineer olmayan elemanlar veya yükler tarafından üretilen harmonikler şebeke ve alıcılar için ciddi problemlere sebep olurlar. Bu problemlere örnek olarak; cihaz veya sistem ölçümlerinde hatalar, anahtarlama elemanları ve motorlarda aşırı ısınmalar, elektronik cihazların

kontrollerinde bozulmalar sayılabilir. Bununla birlikte şebeke ağında oluşabilecek rezonanstan dolayı aşırı gerilim ve akım yükselmeleri olup güç faktörü düzeltici kondansatörler zarar görebilir. Bu yüzden elektrik işletmelerinde harmoniklerin meydana gelmemesi için, ilk aşama olarak cihaz veya sistemler için koruma tedbirleri düşünülüp ona göre tasarım veya tesis yapılır; ancak işletmede meydana gelen harmonikleri etkisiz hale getirme ve güç faktörünü iyileştirme işlemi ikinci aşamada yapılmaktadır ki bu da filtrelemedir. Ancak filtrelere geçmeden önce harmoniklerin nasıl analiz edildiğini bilmek gerekir.

1.1 Harmonik Analiz Yöntemi

Alternatif akım enerji sistemlerinde daha önceden de anlatıldığı gibi sinüzoidal olmayan dalgalar ortaya çıkmaktadır. Bu dalgalar genellikle lineer olsun ya da olmasın herhangi bir devreye sinüzoidal olmayan besleme gerilimi uygulamasıyla oluşur. Sinüzoidal olmayan bu büyüklüklerin analizi için Fourier Analiz yöntemi kullanılmaktadır.

Fransız matematikçisi J. Fourier sinüzoidal olmayan periyodik dalgaların genlik ve frekansları farklı birçok sinüzoidal dalgaların toplamından oluştuğunu ve bu tür dalgaların genlik ve frekansları farklı (temel dalga frekansının tam katları) olan sinüzoidal dalgalara ayrılabilceğini göstermiştir. Bu şekilde elde edilen seriye 'Fourier Serisi', bu serinin elemanlarına da 'Fourier Bileşenleri' adı verilir. Bununla ilgili şekil 1.1 aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Harmonik geçişleri.

Herhangi periyodik bir dalgaının Fourier serisine açılabilmesi için Dirichlet koşulları olarak bilinen koşulların sağlanması gerekir. Bu koşullar, bir periyot içinde sonlu sayıda süreksizlik bulunması, maksimum ve minimum değerleri ile ortalamasının sonlu değer olmasıdır. Elektrik enerji sistemlerindeki dalga şekilleri her zaman bu koşulları sağladığından Fourier bileşenlerinin elde edilmesi mümkündür. Fourier serisinin elde edilme işlemi dalga analizi veya harmonik analizi olarak da tanımlanır. Sinüzoidal olmayan periyodik bir işaretin Fourier

analizi sonrasında zaman domenini denklemin 1.1 formülüyle gösterilebilir.

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin nt + B_n \cos nt) \quad (1.1)$$

Bu formülde;

$n = 1, 2, 3, \dots$ (pozitif tamsayı) harmonik mertebesi

t = Bağımsız değişken (elektrik enerji sistemlerinde $t = \omega t$ olmaktadır)

A_0 = Sabit terim (doğru bileşen veya ortalama değer) olup literatürde A_0 yerine $A_0/2$ de kullanılmaktadır. Diğer katsayılar ($A_1, A_2, \dots, A_n, \dots, B_1, B_2, \dots, B_n, \dots$) $f(t)$ fonksiyonunun 'harmonik katsayıları' denir.

Uygulamalarda serinin genellikle ilk üç ya da dört terimi ele alınır. Elde edilecek efektif değerler ile ideale çok az hata ile yaklaşılmış olur ve hesaplar kolaylaşır. Diğer taraftan, Fourier katsayılarının bulunmasında başka yöntemler de vardır, bunlar: Fourier katsayılarının analitik yöntemle, grafik yöntemle, ölçme yöntemiyle ve bilgisayar destekli analiz yöntemiyle bulunmasıdır.

1.2 Harmoniklerle İlgili Bazı Tanımlar

Harmonik analizi sırasında ve sonrasında bazı kolaylıklar sağlamak için harmonik içeren veya Fourier bileşenleri olarak bilinen akım ve gerilim için aşağıdaki tanımlamalar yapılabilir. Örneğin maksimum harmonik mertebesi M olan ve

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^M I_n \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (1.2)$$

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^M V_n \sin(n\omega t + \delta_n) \quad (1.3)$$

şeklinde verilen akım ve gerilim dalgası göz önüne alındığı takdirde, efektif akım ve gerilim sırasıyla şu değerleri alacaktır:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = (I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2)^{1/2} \quad (1.4)$$

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = (V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2)^{1/2} \quad (1.5)$$

Toplam harmonik bozulma (THD) ve bozulma faktörü (DF) akım için şu şekilde verilebilir.

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (1.6)$$

$$DF_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I} \quad (1.7)$$

Gerilim için de aynı eşitlikler geçerlidir.

Aktif Güç,

$$P = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^M V_n I_n \cos(\delta_n - \alpha_n) \quad (1.8)$$

olup burada; V_n ve δ_n gerilimin genliği ile açısı, I_n ve α_n akımın genliği ile açısıdır.

Reaktif Güç

$$Q = \sum_{n=1}^M V_n I_n \sin(\delta_n - \alpha_n) \quad (1.9)$$

Görünen Güç,

$$S = VI = \left(\sum_{n=0}^M V_n^2 \right)^{1/2} \left(\sum_{n=0}^M I_n^2 \right)^{1/2} \quad (1.10)$$

ve bozulma gücü

$$D = (S^2 - P^2 - Q^2)^{1/2} \quad (1.11)$$

olarak verilebilir.

2. HARMONİKLERİ ÜRETEN ELEMANLAR

Alternatif akım güç sistemlerinde en çok karşımıza çıkan harmonikler lineer olmayan yüklerin meydana getirdiği harmoniklerdir. Aşağıda bu kaynakların bazıları ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2.1 Harmonik Kaynaklar

Yük tarafından üretilen harmonikleri K faktörü ile tanımlayabilir ve aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

K1 Rezistanslar, motorlar, kontrol trafoları, dağıtım trafoları

K4 Kaynak makinaları, endüksiyonla ısıtma, flouresan aydınlatma

K13 Haberleşme cihazları

K20 Bilgisayarlar, ayarlanabilir hız sürücüler (ASD).

2.1.1 Generatörler

Makina hızına ve endüvi oluk sayısına bağlı olarak döner makinalar akım harmonikleri üretir. Endüklenen elektromotor kuvveti alan eğrilerinin içerdiği harmoniklere uygun olarak aynı harmonikleri içerir; yani 1., 3., 5., 7., 9. vb gibi tek bileşenleri vardır. Harmonik mertebesi arttıkça genlikleri azalır harmonik frekansı ise artar ($h.f_1$), h . harmonik gerilimi

$$U_h = 4,44.h.f_1.N_s.k_n.\Phi_n \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir. Eğer statorun sargısı yıldız bağlanmışsa, 3 ve 3'ün katı frekanslı harmonikler sadece faz-nötr gerilimlerinde bulunup fazlar arası gerilimlerde bulunmazlar.

Eğer yıldız bağlı generatöre üç fazlı simetrik bir tüketici bağlanırsa ve yükün yıldız noktası generatörün yıldız noktasına bağlanmazsa, 3 ve 3'ün katı harmonikli akımlar geçmez. Yıldız noktası nötre bağlı bir yükte ise, faz iletkenlerinden 3 ve 3'ün katı frekanslı I_0 akımı, nötr üzerinden de bunların toplamı olan $3.I_0$ değerinde bir akım geçer. Bu akımlar, aynı şekilde 3 ve 3'ün katlarında bir gerilim düşümü meydana getirirler.

Eğer generatör sargıları üçgen bağlı ise, bu sargılarda 3'ün katı frekanslı bir sirkülasyon akımı geçer. Bu akım yüke bağlı olmayıp sargılarda büyük kayıplara neden olurlar (Arrillaga et al.,1985).

2.1.2 Transformatörler

Güç sistemlerindeki en önemli eleman olan transformatörler, demir çekirdeği bulunan bobinden oluştuğu için harmoniklere yol açmaktadır (Dommel et al., 1986). Demir çekirdeğinin mıknatıslama karakteristiği lineer olmadığından, transformatör doyuma gitmekte ve harmonikleri üretmektedir.

Transformatörler sinüzoidal gerilimle çalışma altında lineer mıknatıslama karakteristiği bölgesinde sinüzoidal çıkış büyüklüğü verecek şekilde tasarlanırlar. Transformatörlerin nominal değerlerinin dışında çalışması nütvede daha çok doymaya ve harmonik akımları seviyesinde hızla artmaya sebep olabilir (Szabados and Lee, 1981). Mıknatıslama akımı harmonikleri günün erken saatlerinde en yüksek seviyeye ulaşır. Çünkü sistem yükü az olup, gerilim yükselerek aşırı uyarma meydana gelir, aşırı uyardırmayla oluşan akım harmoniklerinde 3., 5. ve 7. harmonikler etkili olur (Arrillaga et al., 1985). Akım şiddeti bakımından en önemli harmonik 3. harmonikdir. 3 ve 3'ün katı harmonikler arasında 360 derecenin tam katları kadar faz farkı olduğundan hepsi aynı fazdadır.

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

2.1.3 Doğrultucular

Günümüzdeki ana harmonik kaynaklarından birisi de şebeke denetimli çeviricilerdir. DC iletim sistemleri, akü ve fotovoltaik sistemler şebeke denetimli çeviriciler üzerinden beslenirler. P darbeli bir çeviricinin meydana getireceği akım harmoniklerinin mertebesi

$$h=k.p\pm 1 \quad (2.2)$$

$$k=1,2,3,...\text{olmaktadır. Çeviricilerde darbe sayısı } p= 6, 12, 18 \text{ veya } 36 \text{ olabilir. Harmonik akımı } I_h=I_1.(\bar{u}_h/h) \quad (2.3)$$

olup $\bar{u}_h=1$ 'den küçük bir katsayıdır. Çeşitli harmonik değerlerinde çeviricilerin kumandasına bağlı olarak farklı değerler almaktadır. Komütasyon süresi ihmal edildiği hallerde $\bar{u}_h=1$ alınabilir. Bu durumda $I_h=I_1/h$ elde edilir. Harmonik akımın efektif değeri harmonik mertebesi

ile ters orantılıdır. Harmonik akımın mertebesi p darbe sayısı ile arttırılarak harmonik akımın efektif değeri azaltılabilir.

2.1.4 Ark fırınları

Kaliteli çelik üretiminde kullanılan ark fırınları, yüzlerce MVA kapasitesinde tesis edilmektedir. Ark fırınında ergitme ve tasfiye olmak üzere iki aşama vardır. Harmoniklerin oluşmasının en büyük sebebi arkın boyuna bağlı olarak frekansın oldukça geniş bir aralıkta değişmesidir ve buna bağlı olarak da ark gerilimi ile akımı arasında lineer bir bağıntı bulunmamaktadır. Ark fırınları, geniş spektrumlu harmoniklerin önemli bir örneğidir. Bu işletmelerde harmonik oluşumların nedeni ark fırınlarındaki ateşleyici elektrotların özellikleri ve ark akım-gerilim karakteristikleridir. Ark akımında her mertebeden harmonik bulunmakta ve bunların değeri zamana bağlı olarak sabit kalmamaktadır. Ark olayında akım ile gerilim ark ocağının gücüne ve çalışma safhasına bağlı olarak da değişir.

Ark boyundaki ani değişimin oluşturacağı şebeke dalgalanmaları, frekansın 0.1'den 30 Hz'e kadar geniş bir aralıkta dolaşmasına neden olur. Tipik bir ark fırınında 2, 3,..., 9 mertebesinde akım harmonikleri bulunur; maksimum harmonik temel bileşenin % 30'u kadardır (Sundberg, 1976).

2.1.5 Gaz deşarjı ile aydınlatma

Gaz deşarjı aydınlatması örneğin flüoresan, cıva arki, neon ve yüksek basınçlı sodyum lambalar, özellikle büyük şehir alanlarında daha çok hissedilen harmonikler meydana getirirler. Bu tip lambaların elektriksel karakteristiği lineer olmayıp iletim esnasında negatif direnç karakteristiği gösterir. flüoresan aydınlatmada tek dereceli harmoniklerin seviyesi önemli oranda devreyi etkiler. Üç fazlı dört telli montajda 3. harmonik akımı nötr iletkeninden geçer (Arrillaga et al. 1985 ; Grady and Heydt, 1985).

Belli başlı bu harmonik kaynaklarına ilaveten kısaca maddeler halinde diğer harmonik kaynaklarından da bahsedilebilir.

- Alternatif enerji kaynaklarından rüzgar ve güneş enerjisi gibi kaynaklarda DC/AC eviricilerde kullanılan yarı iletken teknolojisi
- Elektrikli taşıtlardaki akü-şarj devresi
- Güç üretim tesislerinde ateşleyici, fan ve pompayı sürmede kullanılan kontrol düzenleri

- Kaynak makinaları
- Kesintisiz güç kaynakları
- Elektro kimya teknolojisinde plakalara şekil verme ve elektro kaplama işlemlerinde kullanılan statik dönüştürücüler
- Fuzzy kontrollü bulaşık ve çamaşır makinaları, çok ekranlı televizyonlar, mikrodalga fırınlar ve klimalar
- Anahtarlama güç kaynakları
- Kompakt flüoresanlar ve beraberindeki elektronik balastlar ile ışık ayarlı halojen lambalar
- Bilgisayarlar ve bunların kullanıldığı otomasyon tesisleri
- Dönüştürücü istasyonlar
- Doğru akımla enerji iletimi kontrolü
- Statik VAR kompanzatörler

3. HARMONİKLERİN ETKİLERİ

Normal sistem hatlarında oluşan akım bozulmaları Ohm kanununa göre gerilim bozulmaları yaratır. Akım bozulması bu güç hattında lineer olmayan yüklerden geçerken, gerilim bozulması da bu hatta veya faza bağlı tüm yükleri etkiler. Harmonikler gerilim ve akımın dalga şeklini bozmaları sonucu enerji sistemlerinde problemleri genel olarak maddeler halinde şu şekilde sıralayabiliriz:

- Generatör ve şebeke geriliminin bozulması
- Gerilim düşümünün artması
- Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenme ve di elektrik zorlanma nedeniyle zarar görmesi
- Enerji sistemindeki elemanlarda ve yüklerde kayıpların artması
- Senkron ve asenkron motorlarda moment salınımlarının ve aşırı ısınmaların meydana gelmesi
- Transformatörlerde aşırı ısınmalar
- Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler
- Uzaktan kumanda, yük kontrolü vb. cihazlarda çalışma bozuklukları
- Şebekede rezonans olaylarının neden olduğu aşırı gerilimler ve akımlar
- Koruma ve kontrol düzenlerinde sinyal hataları
- İzolasyon malzemesinin delinmesi
- Elektrik aygıtlarının ömrünün azalması
- Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit ve anormal çalışma
- Mikroişlemciler üzerinde hatalı çalışma

3.1 Harmoniklerin Yol Açtığı Rezonans Olayları

Güç sistemlerinde endüktif reaktans, frekans ile doğru orantılı olarak artarken, kapasitif reaktans frekans ile ters orantılı olarak azalmaktadır. Endüktif reaktansın kapasitif reaktansa eşit olduğu frekansa rezonans frekansı denmektedir. Sistem rezonansı, harmonik

frekanslardan birine yakın bir değerde oluşursa, aşırı seviyede harmonik akım ve gerilimleri ortaya çıkacaktır. Harmonik seviyelerini etkileyen en önemli etkenlerden birisi rezonans durumudur (Bu konuyla ilgili geniş açıklamalar 4. bölümde açıklanmıştır). Seri rezonans harmonik akım akışına düşük bir empedans gösterirken, paralel rezonans yüksek empedans göstermektedir. Sistemde herhangi bir rezonans durumu yoksa sistem önemli seviyelerdeki harmonik akımlarını taşıyabilir. Bundan dolayı sistemin cevap karakteristikleri analiz edilerek sistemin rezonans problemlerinin giderilmesi çok önemlidir (Shipp, 1979).

Seri rezonans ve paralel rezonans olmak üzere iki grup rezonans durumu söz konusudur.

Karşımıza en çok çıkan problemlerden birisi paralel rezonans durumudur. Lineer olmayan yüklerin ürettiği harmonik frekanslarından birinin yakınında, kondansatör grupları ile sistem endüktansı arasında paralel rezonans oluşabilir. Paralel rezonans olayı kondansatör uçlarındaki gerilimin aşırı yükselmesine sebep olmakta ve kondansatöre zarar verebilmektedir. Bu durum endüstriyel yüklerde ve sistemlerde yaygın olarak görülen bir olaydır. Rezonans frekansı şebeke empedansının tamamen endüktif olduğu kabul edilerek

$$f_p = f \cdot \sqrt{\frac{S_k}{S_c}} \quad (3.1)$$

şeklinde yazılabilir. Hangi durumda rezonans koşulu oluşacağını belirleyebilmek için, baradaki harmonik gerilim ile birlikte, baraya bağlı her tüketici yük ve kaynakların harmonik akımlarını ölçmek gerekir. Genellikle, baradan enerji sistemine akan akım değerinin küçük, harmonik gerilim değerinin yüksek olduğu durumda, rezonansın enerji sistemi tarafında oluşacağı söylenebilir. Baraya bağlı yükler harmonik akımlar çekerek, barada harmonik gerilimler meydana getiriyorsa rezonansın sistemin endüktansı ile yük kondansatörü arasında oluşacağı söylenebilir. (Arrillaga, 1985)

Güç sistemindeki harmoniklerin etkisini gidermek için yapılan filtre tasarımında ve güç faktörü düzeltimin de kullanılacak olan kondansatörlerden dolayı, paralel rezonans meydana gelebilmektedir.

Paralel rezonans durumu kondansatör grubunun kapasitif reaktansının sistemin endüktif reaktansına eşit olduğu yerde meydana gelir. Eğer bu rezonans frekansı yük tarafında üretilen harmoniklerin birinde veya bu harmoniklerin yanında meydana gelirse, harmonik gerilim ve akımında yükselmeler olacağı malumdur. Eğer paralel rezonans frekansı biraz değiştirilirse veya yükün en düşük dereceli harmonik teriminden daha düşük bir değerde meydana

getirilirse, harmonik yük akımlarının yükselmesi minimize veya elimine edilebilir. Paralel rezonans frekansının biraz değiştirilmesi kondansatör grubuyla seri bir endüktansın yerleştirilmesiyle yapılır. Bu gruba filtre denilmektedir. Bu harmonik filtre grubunda yıldız bağlı veya üçgen bağlı kondansatörler kullanılır.

Filtrenin seri rezonans frekansı veya ayarlı frekansı genellikle yaklaşık olarak yük tarafından üretilen en düşük dereceli harmonikten % 3 ile % 10 daha düşük seçilir. Tipik bir 6 darbeli güç çeviricisi için en düşük dereceli harmonik terimi 5. harmonikdir. 60 Hz'lik sistemde 300 Hz frekansa karşılık gelir. Bu sisteme uygulanan filtre 270 ile 290 Hz arasında ayarlı frekansa sahip olacaktır. Bu durumdaki bir filtrenin ayarlı frekansı 282 Hz'dir, yani 4,7. harmoniğe karşılık gelir.

İkinci rezonans türü olan seri rezonans koşulu;

$$f_s = f \cdot \sqrt{\frac{S_t}{S_c \cdot Z_t} - \frac{S_L^2}{S_C^2}} \quad (3.2)$$

şeklinde dir. Seri rezonans, rezonans frekansıyla uyuşan, harmonik akımlarına düşük bir empedans yolu sağladığı için harmonik akımlarda bir büyüme meydana gelmez. Fakat harmonik akımlar şebekenin istenmeyen kısımlarına akabilirler. Bu durumda da iki tür sorunla karşı karşıya kalınabilir:

- (a) Rezonans devresi ile hat boyunca seri bağlantılı devreler varsa, önemli ölçüde parazitler oluşabilir (Gonzales. 1987),
- (b) Rezonans kolundaki harmonik akımlar nedeniyle kondansatör grubunda aşırı gerilim harmonikleri oluşabilir ve bobin sargılarının izolasyonu zorlanır. Kondansatör uçlarındaki gerilim şebeke geriliminin X_c/R katına çıkar (Van,1993).

Rezonans durumu sistemde arıza ve hasarlar meydana getirebilir. Sistem yükünün az olduğu zamanlarda, örneğin gecenin geç saatleri veya tatil günlerinde harmonik rezonansın etkisi daha fazladır. Yük seviyesi arttıkça akımın akabileceği daha küçük empedans yollarından dolayı rezonans nedeniyle oluşan harmonik artışı zayıflar. Birçok endüstriyel tesiste olduğu gibi, devreler daha az yüklendiklerinde ve yüklerin tümü motor olduğunda, rezonans nedeniyle oluşan harmoniklere karşı daha duyarlı olurlar (Arrillaga, 1985)

3.2 Rezonans olaylarının güç sistemine bağlı elemanlar üzerindeki etkileri

3.2.1 Kondansatörler

Güç faktörünün düzeltilmesi için kullanılan kondansatörlerin, sistemdeki harmonik seviyesi üzerinde önemli etkileri vardır. Kondansatörlerin kendileri harmonik üretmezler, ancak sistemde rezonans koşulları için uygun çevrimleri oluştururlar. Kondansatörler, sistemi her zaman belli bir frekansta rezonansa getirir, ancak bu frekans yük akımının veya sistem geriliminin harmoniklerinden birine yakın olursa, büyük akımlar ve gerilimler meydana gelecektir. Bir alçak gerilim güç sisteminin rezonans frekansı

$$n = \sqrt{Q_S / Q_C} \quad (3.3)$$

ifadesinden hesaplanabilir. Kapasitif empedans, frekans arttıkça azalır. Bu da, herhangi bir harmoniğin, akımdaki oranının gerilimdeki oranından büyük olmasına böylece kondansatör akımının artmasına ve ilave ısınmalara yol açmaktadır.

3.2.2 Devre Kesiciler ve Sigortalar

Akımdaki harmonik bozulma, devre kesicilerin akımı kesme yeteneğini etkilemektedir. Bozulma, akımın sıfır geçişinde, temel frekanstaki normal sinüs dalgasına göre daha yüksek bir değişim hızında (daha yüksek bir di/dt oranına) açabilmekte, bu da sonuç olarak kesmeyi zorlaştırmaktadır. Devre kesicilerin çalışmasındaki aksaklık, elektromanyetik endüksiyon bobininin harmoniklerin varlığında doğru çalışmamasından kaynaklanmaktadır. Bobin, arkı, söndürüldüğü yer olan ark hücrelerine süren manyetik alanı oluşturmak için kullanıldığından, bunun çalışmasındaki anormallikler arkın yeniden tutuşmasına ve kesicinin yeniden kapanmasına yol açmaktadır. Harmonik akımlar ilave ısınmalara neden olduklarından, sigortaların çalışma karakteristiklerinin değişmesine ve akımı zamansız kesmelerine yol açar. Şekil 1.1'de harmoniklerin sıfır geçişleri gösterilmiştir.

3.2.3 İletkenler

Harmonik akımların iletkenlerde ısınmaya neden olduğu iki etki söz konusudur. Birincisinde deri etkisi (skin effect) ve yakınlık etkisi (proximity effect) olarak adlandırılan etkiler akımın iletken içinde yeniden dağılımına neden olur. Akım iletkenin dışına doğru yoğunlaştığında, iletkenin etkin direnci büyür ve deri etkisi frekansla birlikte artar. Yakınlık etkisi ise iletkenin içindeki akım dağılımının, komşu iletkenlerde akan akımın oluşturduğu manyetik alanlar tarafından etkilenmesi olayıdır. İkinci mekanizma ise, tek fazlı yükleri besleyen 3-fazlı-4-telli

sistemlerin nötr iletkenlerinde büyük değerli akımlara sebep olur. Bazı güç kaynakları önemli oranda harmonik üretir. Temel frekanstaki dengeli 3 fazlı akımlar nötr iletkeninde akım oluşturmazlar. Ancak, 3 fazlı sistemlerde 3. harmonikler nötr iletkeninde birbirlerini zayıflatmaz tam tersine güçlendirir. Hatta, nötr akımı faz akımının 1.7 katına kadar çıkabilir. Nötr iletkenleri faz iletkenleriyle aynı boyutlarda olduğundan bu durumda nötr iletkeni aşırı yüklenebilir. Bu soruna en çok 3 fazlı dağıtım sisteminin tek fazlı büyük yükleri beslediği ticari binalarda rastlanmaktadır. Söz konusu soruna karşı alınan en yaygın önlem nötr iletkeninin, faz iletkenlerinin iki katı büyüklüğünde boyutlandırılmasıdır.

3.2.4 Elektronik Donanım

Elektronik devrelerde temel güç frekansının sıfır geçişleri, zamanlama işlevlerini gerçekleştirmek için yaygın kullanılmaktadır. Bununla birlikte daha çok sıfır geçişlere yol açan harmonik bozulmalar donanımın çalışmasını olumsuz olarak etkiler. Evlerde kullanılan dijital saatlerin ileri gitmesi bu etkiden kaynaklanır. Elektronik güç kaynakları, filtre kondansatörlerini tam yükte tutmak için gerilimin tepe değerini kullanır. Harmoniğin frekansına ve fazına bağlı olarak gerilim bozulması tepe değerini arttırabilir veya dalga tepesini düzleştirebilir. Böylece giriş gerilimi normal efektif değerinde olsa bile güç kaynağı giriş geriliminin altında veya üstünde bir gerilimde çalışacaktır. Gerilim bozulması şiddetli olursa güç kaynağı olağan dışı bir çalışma gösterebilir. Temel frekansın tam katları olmayan harmonikler ve temel frekanstan daha düşük frekanslı harmonikler ise video cihazlarını ve televizyonları etkilemekte, görüntüyü bozmaktadır.

3.2.5 Aydınlatma Donanımı

Akkor lambaların ömrü, harmonikli gerilimde çalıştırıldıklarında kısalmaktadır. Bu durum, lambanın içindeki flamanın aşırı ısınmasından kaynaklanmaktadır. Normal gerilimin % 5 üstündeki bir gerilimde kullanıldıklarında, akkor lambanın ömrünün % 47 oranında azaldığı görülmüştür. Harmonik kaynaklı gerilim bozulmasının flüoresan lambalar üzerinde ise işitilir bir gürültüye yol açmak dışında bilinen bir etkisi yoktur.

3.2.6 Ölçme Aletleri

Modern efektif (rms) değer ölçen voltmetreler ve ampermetreler dalga şeklindeki bozulmalara karşı hassastır. Bu aletlerde, giriş gerilimi veya akımı elektronik bir devre yardımıyla işlenir. Test sonuçları göstermektedir ki, modern voltmetre ve ampermetrelerin sinüs biçimli olmayan akım ve gerilimlerden kaynaklanan hataları % 0.2' den az olmaktadır. Efektif değer ölçümü

için kalibre edilmiş olan voltmetre ve ampermetreler, harmoniklerin varlığında hatalı sonuçlar verir. Örneğin 45 derecelik bir tetikleme açısıyla doğrultulmuş bir sinüs işaretinin etkin değerini, böyle bir alet % 13 oranında düşük ölçmektedir. Eğer bu alet bir ampermetre ise, aşırı yüklenmiş bir iletkenin fark edilmemesine neden olacaktır.

Akım ve gerilimin elektronik olarak çarpıldığı modern wattmetreler mükemmel bir performans göstermektedir. Test sonuçlarından, bu aletlerin, sinüs biçimli olmayan akım ve gerilimlerden kaynaklanan hatalarının % 0.1'den az olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte elektrik sayaçlarında, frekans karakteristiklerinden ve doğrusal olmayan davranışlarından ötürü hatalar oluşturur. Akım ve gerilimin her ikisinin de değişmiş olduğu bir test de, bu sayaçlar, % 20'lere varan hatalar yapmıştır. Sinüzoidal olmayan akım ve gerilimlerin yoğun olarak bulunduğu ortamlarda endüksiyon diskli elektronik sayaçlarının kullanımından kaçınmak gerekir. Çünkü, hatalı ölçümler yapmak dışında 400-1000 Hz aralığındaki mekanik rezonanstan kaynaklanan arızalara yol açmaktadır.

3.2.7 Koruyucu Röleler

Dalga şeklinin bozulması koruyucu rölelerin performansını etkilemektedir. Her röle harmoniklerin varlığı karşısında farklı davranmaktadır. Aynı tip ve modeldeki röleler bile değişik cevaplar verebilmektedir. Harmonikler, rölelerin arıza koşullarında çalışmamasına sebep olduğu gibi, olağan çalışma koşullarında bile sistemin gereksiz yere açılmasına neden olabilirler. Bir rölenin performansını onu test etmeden tahmin etmek güçtür.

3.2.8 Döner Makinalar

Elektrik makinalarına uygulanan sinüzoidal olmayan gerilimler aşırı ısınmaya, motor momentinin salınım yapmasına ve gürültüye neden olabilir. Rotorun aşırı ısınması gerilim bozulmasının yol açtığı başlıca sorundur. Elektrik makinalarındaki kayıplar uygulanan gerilimin ve frekans içeriğine bağlıdır. Motor sıcaklığındaki artış motorun ömrünü kısaltmaktadır. Bundan en fazla tek fazlı motorlar etkilenmektedir.

3.2.9 Telefonlar

Telefon ve enerji hatlarının yan yana geçmesi güç sistemi frekanslarında girişimin oluşmasına sebep olmaktadır. Telefon frekans aralığının 300-400 Hz olması nedeniyle, harmonik frekansları temel frekanstan daha büyük bir sorun oluşturur. Girişimin dört yolu vardır. İlki, güç hattının, iki telefon iletkeninin oluşturduğu çevrimde bir gerilim endüklemesidir.

İkincisinde, iki telefon iletkeni değil, bir telefon iletkeniyle toprak oluşturur. Bu en yaygın görülen geçişme tipidir. Üçüncü yol, güç ve telefon iletkenleri arasında kapasitif kuplaj söz konusudur. Dördüncü ve sonuncu yol ise, güç nötr iletkeninin iyi bağlanmamasından kaynaklanır. Bir noktadaki toprak potansiyelinin güç nötr hattından dolayı artması, telefon devresi üzerinde bulunan diğer bir toprak noktasını etkiler. Bu da girişime yol açar.

3.2.10 Transformatörler

Güç sistem harmoniklerinin transformatörler üzerindeki başlıca etkisi ek ısınmalardır. Bu da donanımın ömrünü kısaltmaktadır. Harmonikler sistem kapasitesi ile transformatörün endüktansının belirlediği frekansta salınma neden olabilir. Ayrıca demir çekirdeğin titreşimlerinden ve transformatör sıcaklığının değişimlerinden kaynaklanan mekanik zorlanmalarda söz konusudur.

3.3 Harmonik Standartları

Harmoniklerin sınırlandırılması için THD kriterine göre çeşitli standartlar mevcuttur. Müsaade edilen maksimum gerilim ve akım bozulması IEEE (standart 519-1992)'de belirtilmiştir. Bununla birlikte bu doküman endüstriyel alanlarda PCC noktalarının lineer olmayan yüklerle diğer yüklerin arasında yer aldığını belirtir. Güç sistemine bağlı cihazların zarar görmemesi için harmoniklerin önemi anlaşılmalı ve bu problemler çözülerek elektriksel cihazın ömrü uzatılmalıdır. Harmonikli yük akımlarından bir tanesinin bile değerinin azaltılması toplam harmonik değerinin sınırların altında tutmayı sağlar. Buna göre birçok endüstriyel tesis için maksimum müsaade edilen gerilim THD'u %5'i, herhangi bir harmonik bileşen içinse %3'ü geçmemelidir (Bosela R.T.). IEEE(519-1992)'nin dağıtım sistemleri için gerilim ve akım bozulması limitleri ise çizelge 3.1 ve 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Dağıtım sistemleri için gerilim bozulma limitleri.

GERİLİM BOZULMA LİMİTLERİ		
Bara gerilimi	% Gerilim Bozulması	% THD
69 kV <	3,0	5,0
69 < kV < 161	1,5	2,5
161 kV >	1,0	1,5

Çizelge 3.2 Dağıtım sistemleri için akım bozulma limitleri.

GENEL DAĞITIM SİSTEMİNDE AKIM BOZULMA SINIRLARI (120 V - 69,000 V)						
I_{sc} / I_L	<11	11≤h≤17	17≤h≤23	23≤h≤35	35≤h	THD
< 20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Burada çift harmonikler tek dereceli harmoniklerin %25 kadardır. * işaretli yerdeki THD tüm üretilen elektrikli cihazlar için geçerlidir. Bununla ilgili örnek aşağıdaki gibidir:

100HP lık ASD motoru 480 V'luk 1500kVA'lık 3 fazlı %4 empedanslı bir trafodan IEEE 519-1992 sınırlarına göre beslenmektedir. Transformatör akımı

$$I_{tr} = \frac{1500 * 1000}{\sqrt{3} * 480} = 1804,2 \text{ A} \quad (3.4)$$

Sekonder taraftaki akımda per unit olarak aynı değerde olduğundan ,

$$I_{sekonder} = \frac{1804,2}{0,04} = 45105,5 \text{ A} \quad (3.5)$$

Kısa devre gücünü bulmak için 100HP 480 V'luk sistem için 124 A olan yük akımını kullanarak kısa devre gücünü bu akıma oranlarsak,

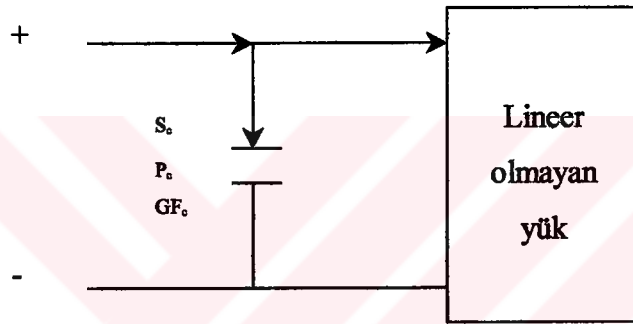
$$\frac{I_{sc}}{I_L} = \frac{45105,2}{124} = 363,75 \quad (3.6)$$

bulunur. Bu sonuç %THD değerinin %15 den az olması gerektiğini gösterir.

4. GÜÇ FAKTÖRÜNÜN İYİLEŞTİRİLMESİ

4.1 Sinüzoidal olmayan şebeke geriliminden beslenen lineer olmayan devrelerde güç faktörünün iyileştirilmesi

Genelde şebekeye bağlı en az bir lineer olmayan elemana, sinüzoidal olmayan bir gerilimin uygulanması ile şebeke akım şeklinde sinüzoidal olmayan bir bozulma meydana gelir. Lineer olmayan yüke paralel bir kondansatör bağlandığında, kondansatör akımı şebekeye bağlı n_1 ve n_2 'den oluşan yükteki tüm harmonikleri içerir. Ayrıca, n_1 ve n_2 'nin birlikte oluşturduğu n_3 bileşeni de bulunmaktadır (W. Shephard, 1979). Şekil 4.1'de lineer olmayan yüke paralel bağlı kondansatörün şekli gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Lineer olmayan yüke bağlı kondansatör.

Ani şebeke gerilimini u ile gösterirsek;

$$u = \sqrt{2} \left[\sum_1^{n_1} U_{n1} \sin(n_1 \omega t + \alpha_{n1}) + \sum_1^{n_2} U_{n2} \sin(n_2 \omega t + \alpha_{n2}) \right] \quad (4.1)$$

Kesintili kondansatör ve yük akımı i_C ve i_L ,

$$i_C = \sqrt{2} \left(\sum_1^{n_1} U_{n1} n_1 \omega C \sin(n_1 \omega t + \alpha_{n1} + \pi/2) + \left(\sum_1^{n_2} U_{n2} n_2 \omega C \sin(n_2 \omega t + \alpha_{n2} + \pi/2) \right) \right) \quad (4.2)$$

$$i_L = \sqrt{2} \left(\sum_1^{n_1} I_{Ln1} \sin(n_1 \omega t + \alpha_{n1} - \Psi_{Ln1}) + \left(\sum_1^{n_2} I_{Ln3} \sin(n_3 \omega t + \alpha_{n3} - \Psi_{Ln3}) \right) \right) \quad (4.3)$$

Burada Ψ_{Ln1} n_1 yük grubunu besleyen şebeke geriliminin faz açısıdır. Şebekeden çekilen akım da bu iki akımın toplamı kadardır. n_1 grubunun çektiği ortalama güç;

$$P_1 = P_L = \sum_1^{n_1} U_{n1} I_{Ln1} \cos \Psi_{Ln1} \quad (4.4)$$

Güç faktörünü bulmak için ortalama gücü toplam görünür güce oranlandığında;

$$GF_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{U_1 I_1} \quad (4.5)$$

değeri bulunur.

4.1.1 Kondansatör kullanarak maksimum güç faktörünün elde edilmesi

Güç faktörü ile C arasındaki ilişkiyi bulabilmek için güç faktörünün C'ye göre türevi alınır ve sıfıra eşitlenir.

$$\frac{d(GF_1)}{dC} = -\frac{P_1}{S_1^2} \frac{dS}{dC} = -\frac{P_1}{U_1 I_1^2} \frac{dI_1}{dC} \quad (4.6)$$

C değeri;

$$C_1 = \frac{\sum_{n1}^{n1} U_{n1} \cdot I_{Ln1} \cdot n1 \cdot \sin \Psi_{Ln1}}{w \sum_{n1}^{n1} U_{n1}^2 \cdot n1^2 + \sum_{n2}^{n2} U_{n2}^2 \cdot n2^2} \quad (4.7)$$

$$S_{1min}^2 = U^2 \cdot I_{1min}^2 = \left(\sum_{n1}^{n1} U_{n1}^2 + \sum_{n2}^{n2} U_{n2}^2 \right) \times \left(\sum_{n1}^{n1} (U_{n1}^2 \cdot n1^2 \cdot w^2 \cdot C_1^2 + I_{Ln1}^2 - 2U_{n1} \cdot I_{Ln1} \cdot n1 \cdot w \cdot C_1 \cdot \sin \Psi_{Ln1}) + \sum_{n2}^{n2} U_{n2}^2 \cdot n2^2 \cdot w^2 \cdot C_1^2 + \sum_{n2}^{n2} I_{Ln2}^2 \right) \quad (4.8)$$

Sonuç olarak;

$$GF_{max} = \frac{\sum_{n1}^{n1} U_{n1} \cdot I_{Ln1} \cdot \cos \Psi_{Ln1}}{S_{1min}} = \frac{\sum_{n1}^{n1} U_{n1} \cdot I_{Ln1} \cdot \cos \Psi_{Ln1}}{\sqrt{\left(\sum_{n1}^{n1} U_{n1}^2 + \sum_{n2}^{n2} U_{n2}^2 \right) I^2_{1min}}} \quad (4.9)$$

değeri elde edilmiş olur.

4.2 Sinüzoidal şebeke geriliminden beslenen lineer olmayan yükler,

Lineer olmayan devreler sinüzoidal gerilimle beslendiğinde temel akım bileşeninin yanında harmonikler de oluşur. Bir önceki bölümde açıklanan koşullara göre,

$n_1 = 1$, $n_2 = 0$ ve iki bileşenden oluşan n_3 bulunmaktadır. Formül 4.7'ye göre,

$$C_1 = \frac{I_{L1} \cdot \sin \Psi_{L1}}{w U_1} \quad (4.10)$$

$$I_{1\min}^2 = I_{L1}^2 \cos^2 \Phi_{L1} + \sum_1^{n3} I_{Ln3}^2 \quad (4.11)$$

$$S_{2\min} = U \sqrt{I_{L1}^2 \cos^2 \Phi_{L1} + \sum_1^{n3} I_{Ln3}^2} \quad (4.12)$$

$$GF_{\max} = \frac{U I_1 \cos \Phi_1}{U \sqrt{I_{L1}^2 \cos^2 \Phi_{L1} + \sum_1^{n3} I_{Ln3}^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\sum_1^{n3} I_{Ln3}^2}{I_{L1}^2 \cos^2 \Phi_{L1}}}} \quad (4.13)$$

Formül 4.13'den görüleceği gibi güç faktörü 1'den küçüktür. Bunun sebebi $n3$ gibi bozucu etkilerden oluşmaktadır.

4.3 Sinüzoidal şebeke geriliminden beslenen lineer yükler,

Şebeke gerilimi tam sinüzoidal olduğu ve yükün tam lineer olduğu durumda,

$n_1=1, n_2=0, n_3=0$ dır. Buna göre,

$$C_1 = \frac{I_{L1} \sin \Psi_{L1}}{w U_1} \quad (4.14)$$

$$I_{Ln3} = 0 \quad (4.15)$$

$$S_{2\min} = U_1 I_{L1} \cos \Phi_{L1} = P_2 \quad (4.16)$$

$$GF_{\max} = 1 \quad (4.17)$$

Formül 4.17'den görüleceği üzere maksimum güç faktörü, tam sinüzoidal şebeke gerilimi ve tam lineer yük koşullarında 1 değerini almaktadır.

4.4 Sinüzoidal olmayan şebeke geriliminden beslenen lineer yükler,

Şebeke gerilimin sinüzoidal olmaması durumunda lineer yük sadece şebekede bulunan harmonik akımlarını içerir. Buna göre,

$n_1= n_1, n_2=0, n_3=0$ dır.

$$C_1 = \frac{\sum_1^{n1} U_{n1} \cdot I_{Ln1} \cdot n_1 \cdot \sin \Phi_{Ln1}}{w \sum_1^{n1} U_{n1}^2 \cdot n_1^2} \quad (4.18)$$

$$GF_{max} = \frac{\sum_{n1}^{n1} U_{n1} \cdot I_{Ln1} \cdot \cos \Phi_{Ln1}}{\sqrt{\sum_{n1}^{n1} U_{n1}^2 \left[\sum_{n1}^{n1} I_{Ln1} \cdot \cos^2 \Phi_{Ln1} \times \frac{n1 \cdot U_{n1} \sum_{n1}^{n1} U_{n1} \cdot I_{Ln1} \cdot n1 \cdot \sin \Phi_{Ln1} - I_{Ln1} \cdot \sin \Phi_{Ln1} \sum_{n1}^{n1} n1^2 \cdot U_{n1}^2}{\sum_{n1}^{n1} n1^2 \cdot U_{n1}^2} \right]}} \quad (4.19)$$

Formül 4.19’da görüldüğü gibi güç faktörünün maksimum değeri 1’in altındadır.

4.5 Sinüzoidal olmayan şebeke geriliminden beslenen lineer olmayan devrelerde kompanzasyon

4.5.1 Kompanzasyon problemine genel bir yaklaşım

Elektrikle beslenen yüklerde en ekonomik çalışma güç faktörünün 1 olduğu, yani aktif gücün görünür güce eşit olduğu yerdir. Güç faktörünü düzeltme işlemi görünür gücün azaltılarak aktif güce ulaşılmaya çalışılmasıdır. Bu şekilde sistemin verimi de artırılmış olur (M. Bayram, 1997). Elektrik sistemlerinde iki çeşit verimden bahsedilir bir tanesi sistemin çıkış aktif gücü ile giriş aktif gücü arasındaki iç verimi,

$$\eta_{iç} = P_o / P_{in} \quad (4.20)$$

ikincisi ise, sistemin aktif giriş gücü ile giriş görünür gücü arasındaki dış verimi olup,

$$\eta_{dış} = P_{in} / S_{in} \quad (4.21)$$

güç faktörüne bağlıdır. Örneğin saf bir omik yükün güç faktörü veya dış verimi 1 dir. Ani şebeke gerilimini u , şebeke frekansını w ile gösterirsek, ani lineer omik yük R ,

$$u_i = \frac{U^2}{R} (1 - \cos 2wt) \quad (4.22)$$

şeklinde ifade edilir. Dış verimi 1 yapmak için ani görünür güçlerin toplamı formül 4.20’e eşit olmalıdır.

4.5.2 Devre kompanzasyon metotları

Dış verim veya güç faktörü kompanzasyonunun amacı şebeke akımı dalga şeklinin, şebeke bara gerilimi dalga şekline mümkün olduğunca yakın olmasını sağlamaktır. Yüksek harmonik bileşenleri şebeke hattında bastırılmalı ya da alternatif akım yolları sağlanarak şebekeden ayrılmalıdır. Kompanzasyon probleminin çözümünde 4 metot vardır.

1. Yük empedansının kendi içerisinde değiştirilmesi
2. Aktif veya pasif yardımcı devreler yüke paralel bağlanarak, harmoniklerin elemine edilmesi (Bölüm 4 ve 5’de açıklanacaktır).
3. Şebekede filtre kullanımı ile sinüzoidal olmayan kaynak geriliminin sisteme soktuğu harmonik akımlarının yükten temizlenmesi.
4. Transformatörler yardımıyla harmonik akımlarının ters fazda sisteme sokulmasıdır.

Aşağıda bu metotlarla ilgili 2 örnek verilmiştir.

4.5.2.1 Paralel bağlı kompanzasyon devreleri

Bu tip kompanzasyon devrelerinin devrelerin lineer olmayan yüke paralel bağlanması ile şebeken sinüzoidal bir akım çekilebilir. Ancak buradaki problem, lineer olmayan yük ile paralel kompanzasyon devresinin uyuşmasında ortaya çıkar. İdeal bir güç faktörünü elde edebilmek için kompanzasyon devresi empedansının çok iyi ayarlanmasını gerektirir ki bu da pahalı ve tasarımı zor bir iştir.

4.5.2.2 Rezonans devreleri kullanarak kompanzasyon

Yükün şebekeden çektiği akımın, seri harmonik akımlardan oluştuğu kabul edilirse, paralel bağlı her L-C kolun ayrı bir frekansa ayarlanarak, bu harmonik akımlarını kısa devre etmesi gerekir. Ancak güç faktörünü iyileştirmek için yapılan analizlerde, süper pozisyon prensibi bile devrenin tam çözümünde yeterli olamamaktadır. Ancak yaklaşık bir çözüm olarak, paralel bağlı filtre kollarının toplam çektikleri akım değeri 4.23 formülü ile bulunabilir

$$I_c = \sqrt{2} \cdot E \left(wC_1 \sin(wt + 90^\circ) + \frac{wC_2}{1 - w^2 L_2 C_2} \sin(wt + 90^\circ) + \dots + \frac{wC_p}{1 - w^2 L_n C_n} \sin(wt + 90^\circ) \right) \quad (4.23)$$

Burada dikkat edilmesi gereken husus, $w^2 L_n C_n < 1$ koşulunun sağlanmasıdır. Bu durumda endüktif ve kapasitif güçler rezonans anında birbirine ters yönde eşit olduklarından reaktif güç sıfır olur ve bağımsız bir kondansatörün lineer olmayan yüke paralel bağlanmasıyla güç faktörü, “ $\cos\phi = 1$ ” değerini alır. Bu konuyla ilgili daha geniş bilgi 5. bölümde açıklanacaktır.

4.6 Güç faktörünü düzeltmenin yararları

Güç faktörünü düzeltmenin hem şebekeye hem de tüketiciye olmak üzere iki faydası bulunmaktadır.

4.6.1 Şebekeye yararları:

Şebeke denince enerjinin üretildiği, iletildiği ve dağıtıldığı tüm sistem ifade edilmektedir. Şebekeye sağladığı yararlar başlıca 3'e ayrılır.

4.6.1.1 Şebeke güç taşıma yeteneğinin artırılması:

Şebekeden çekilen P aktif gücünün sabit olduğunu kabul edersek,

$$S_1 = P / \cos \varphi_1 \quad (4.24)$$

ve kompanzasyondan sonra çekilen görünür gücü incelersek,

$$S_2 = P / \cos \varphi_2 \quad (4.25)$$

olur. Buna göre, iki görünür güç arasındaki fark,

$$\Delta S = S_1 - S_2 \quad (4.26)$$

bunu başlangıçtaki değerine oranlarsak,

$$\% \Delta S = \frac{\Delta S}{S_1} * 100 = 100 \left(1 - \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} \right) \quad (4.27)$$

formülü bulunur. Bu sonuç gösteriyor ki, $\% \Delta S$ kadar sisteme daha az yüklenilebilir. Aynı şekilde eğer görünür güç sabit tutulursa, aktif güç de $\% \Delta P$ kadar artar. Bu durum

$$\% \Delta P = \frac{\Delta P}{P_1} * 100 = 100 \left(1 - \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} \right) \quad (4.28)$$

formülüyle hesaplanabilir.

4.6.1.2 Şebekede ısı kaybının azalması:

Şebekeden çekilen aktif gücün sabit olduğu kabul edilirse, kompanzasyonsuz halde faz başına ısı kaybı,

$$P_{z1} = \frac{R P_2}{U_2 \cos^2 \varphi_1} \quad (4.29)$$

kompanzasyon sağlandıktan sonraki faz başına ısı kaybı ise,

$$P_{z2} = \frac{RP_2}{U_2 \cos^2 \varphi_2} \quad (4.30)$$

Sonuç olarak güç faktörünün düzeltilmesi ile bağlı ısı kaybı ,

$$\%z = \frac{P_{z1} - P_{z2}}{P_{z1}} * 100 = 100 \left(\frac{\cos^2 \varphi_2}{\cos^2 \varphi_1} - 1 \right) \quad (4.31)$$

formülü ile verilir.

4.6.1.3 Gerilim düşümünün azalması

Şebeke besleme hattının başı ile sonu arasındaki hat kayıplarından oluşan iki farklı gerilim değeri U_1 ve U_2 , hat üzerinde boyuna bir gerilim düşümü oluşturur. Bu iki gerilimin farkı,

$$\Delta u = IR \cos \varphi + IX \sin \varphi \quad (4.32)$$

formülüyle hesaplanır. Güç faktörünün arttırılması ile hat üzerinde kabul edilebilecek kayıp güç, P aktif gücü sabit iken,

$$\%p = 100 \frac{3I^2 R}{P} \quad (4.33)$$

şeklinde ifade edildiğinde,

$$\%e = 100 \left(p_z \cos^2 \varphi + \frac{PX}{U_N^2} \tan \varphi \right) \quad (4.34)$$

formülü ortaya çıkar.

4.6.2 Alıcıya yararları:

Güç faktörünün düzeltilmesinin alıcıya yapacağı en büyük yarar ise reaktif enerji için ayrıca üreticiye bir bedel ödememesidir. Bu şekilde sadece aktif güç için bir bedel ödenir. Bununla birlikte şebekede yapılacak aşırı kompanzasyonun da sonuçları bilinmelidir.

4.7 Aşırı kompanzasyon

Alıcıyı besleyen transformatörlere, reaktif güç kompanzasyonu için paralel bağlanan kondansatör alıcı gücünün azalması durumunda , transformatörün primer tarafını reaktif güç ile besler. Bu gibi aşırı kompanzasyon durumunda alıcı uçlarında aşırı bir gerilim yükselmesi olur. Bu olay daha çok güç faktörünün 1'e çok yakın olduğu değerlerde gerçekleşir. Bu

sebeple hiçbir zaman güç faktörü 1 yapılmaz. Aşırı kompanzasyon sırasında oluşan gerilim artışı ΔU 'nun, kondansatör ve transformatör gücüne oranı aşağıdaki formülle belirlenir.

$$\% \frac{\Delta U}{U} = \frac{u_x}{100} \frac{Q_c}{S_T} \quad (4.35)$$

Burada Q_c kVAr cinsinden kondansatör gücünü, S_T kVA cinsinden transformatör gücünü gösterir.

Aşırı kompanzasyondan oluşan aşırı gerilim artışlarının tesislere zarar vermesini önlemek için kondansatör bataryaları şebekeye reaktif akım akıtmayacak şekilde tesis edilir. Bu şekildeki kondansatörler gruplar halinde olup ihtiyaca göre devreye alınıp çıkartılır. Elle de yapılabilen bu devreye alıp çıkarma işlemi büyük güçlü ve önemli tesislerde reaktif güç regülatörleri ile otomatik olarak yapılır ve daima 0,90 – 0,95 gibi bir değere ayar edilir. Bu tipteki bir sistemde devreye alınıp çıkartılan kondansatör grupları C/k değerleri ile regülatör tarafından kontrol edilir. Belirli değerler arasında kontrol çıkışı sağlayan bu sistemlerde, C/k değeri aşağıdaki gibi hesap edilir.

$$C/k = \frac{C}{k} \quad (4.36)$$

Burada C , kVAr cinsinden ilk kondansatör grubunun gücünü; k , ise kullanılan akım transformatörünün çevrim oranını belirtir.

4.8 Kompanzasyon tesislerindeki rezonans olayları ve bunların önlenmesi

Bir çok tesis yüklerin durumuna göre, şebekeden reaktif güç ile birlikte harmonikli akım da çeker. Reaktif güç genelde endüktif olmasına karşın sisteme bağlı bulunan kondansatörler, transformatörler ve motor reaktansları ile birlikte rezonans olayını gerçekleştirirler. Rezonans olayı sonucunda aşırı akım ya da gerilimler oluşarak sisteme zarar verebilirler. Bu rezonans olaylarını engellemek için tesisin harmonik filtrelerle kompanze edilmesi gerekir.

Rezonans olayı sırasında oluşan titreşim devresinde şebeke , transformatör ve kondansatörün dirençleri hesaplanarak rezonansın hangi frekansta oluşacağı daha kesin tespit edilebilir.

Şebeke direnci:

$$X_s = \frac{1,1 U_N^2 (kV)^2}{S_k^{''} (MVA)} \quad (4.37)$$

Transformatör direnci:

$$X_T = \frac{u_k}{100} \frac{U_N^2 (\text{kV})^2}{S_T (\text{MVA})} \quad (4.38)$$

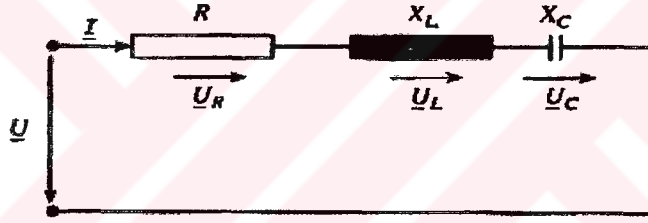
Kondansatör direnci:

$$X_C = \frac{U_N^2 (\text{kV})^2}{Q_C (\text{MVA})} \quad (4.39)$$

olarak bulunur. Oluşacak rezonans devrelerinde kapasitif direnç ile endüktif-omik dirençler seri veya paralel rezonans devreleri oluştururlar.

4.8.1 Seri rezonans devresi

Generatör, transformatör veya motor gibi yüklere kondansatör seri olarak bağlanırsa seri rezonans devresi şekil 4.2'deki gibi oluşur.



Şekil 4.2 Seri rezonans devresi.

Tesisin endüktif direnci,

$$j.X_L = j.\omega.L \quad (4.40)$$

Kapasitif direnci,

$$j.X_C = 1/j.\omega.C \quad (4.41)$$

Şekildeki devreden U gerilimini çekersek

$$U = I \left[R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right] \quad (4.42)$$

Devrenin toplam empedansı ise,

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = R + j(X_L - X_C) \quad (4.43)$$

Mutlak değer olarak da,

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (4.44)$$

ϕ gerilim ile akım arasındaki faz açısı olup,

$$\phi = \arctan \frac{\omega L - 1/\omega C}{R} \quad (4.45)$$

dir. Burada $\omega = 2\pi f = 314$ 1/s olup, devreden geçen akımın efektif değeri,

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (4.46)$$

olur. Buradaki değişkenler L ve C olduğundan ,

$$\omega L_r - \frac{1}{\omega C_r} = 0 \quad (4.47)$$

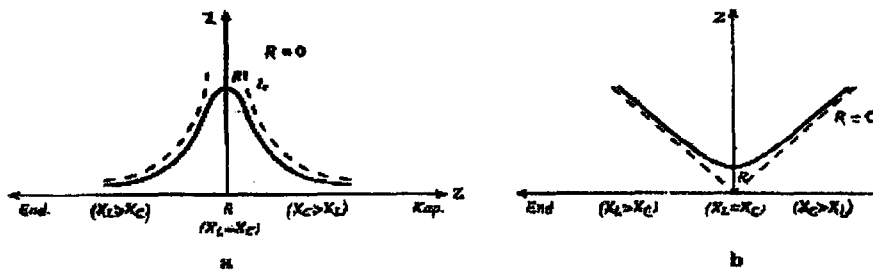
şartı gerçekleşirse,

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (4.48)$$

şebeke frekansı ile rezonans aynı frekansta oluşur ve bu durumda devre sadece R empedansına kalarak, çok büyük değerdeki bir akımı içinden geçirir.

$$I_{\text{mak}} = I_r = \frac{U}{R} \quad (4.49)$$

Eğer omik direnç de ihmal edilecek olursa akım sonsuz değerini alır. Şekil 4.3'de bununla ilgili grafik gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Seri rezonans anı.

Bu durumda endüktif ve kapasitif gerilim değerleri ters yönde aynı olmasına karşın, çok büyük değerler alırlar. Bu gerilim,

$$U_{Cr} = I_r X_c = \frac{I_r}{\omega C} = I_r \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.50)$$

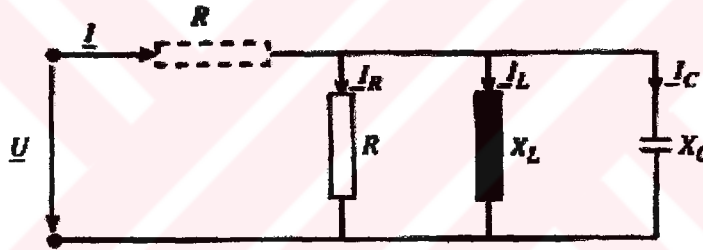
veya

$$U_{Cr} = \frac{U}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = U \frac{X_c}{R} \quad (4.51)$$

gibi çok yüksek bir değer aldığından bu tip rezonansa “gerilim rezonansı” denir. Bu tip durumlarda kondansatörler ve sargı izolasyonları zarar görebilir.

4.8.2 Paralel rezonans devresi

Seri rezonanstaki elemanlar bu sefer paralel olarak bağlanırsa paralel rezonans devresi şekil 4.4’deki gibi gösterilir.



Şekil 4.4 Paralel rezonans devresi.

Bu devreden geçen toplam akım kollarındaki akımlar toplamına eşit olduğundan,

$$I = U \left[\frac{1}{R} + j(\omega C - \frac{1}{\omega L}) \right] \quad (4.52)$$

olur ve buna göre Z empedansı,

$$Z = \frac{1}{\left[\frac{1}{R} + j(\omega C - \frac{1}{\omega L}) \right]} \quad (4.53)$$

ve faz açısı,

$$\varphi = \arctan R(\omega C - \frac{1}{\omega L}) \quad (4.54)$$

değerini alır. Eğer,

$$\omega C_r - \frac{1}{\omega L_r} = 0 \quad (4.55)$$

veya

$$X_{Lr} = X_{Cr}, \quad (4.56)$$

koşulu gerçekleşirse, bu durumda şebeke frekansı ile rezonans frekansı eşit olur ve rezonans olayı gerçekleşir.

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (4.57)$$

Sistemin empedansı ise,

$$Z_r = R \quad (4.58)$$

olup şebekeden çektiği akım,

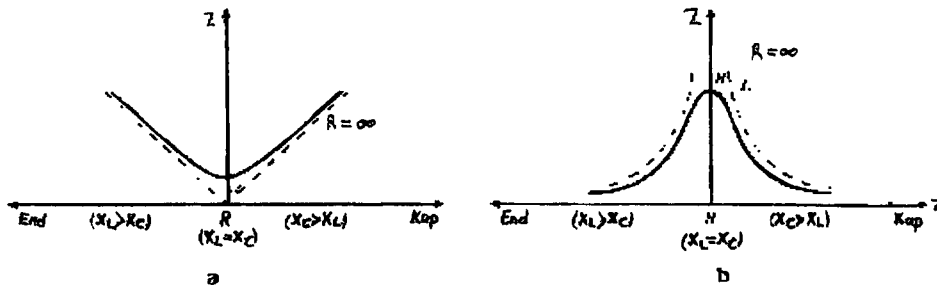
$$I_r = \frac{U}{R} \quad (4.59)$$

değerini alır ki bu akım değeri sadece aktif akımdır. Şebekeden hiçbir endüktif veya kapasitif akım çekilmez. Bu yüzden $\cos \phi = 1$ olur. Bu durumda akan akımlar,

$$I_{Lr} = \frac{U}{X_{Lr}} \quad (4.60)$$

$$I_{Cr} = \frac{U}{X_{Cr}} \quad (4.61)$$

olup aralarında 180° faz farkı vardır. Bu tipteki rezonanslara “akım rezonansı” denir. Şekil 4.5’de paralel rezonans anı gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Paralel rezonans anı.

4.9 3 fazlı diyot doğrultucu için güç faktörünün aktif olarak düzeltilmesi

Genelde AC hat gerilimi, diyot veya faz kontrollü doğrultucular ile doğrultulduktan sonra cihazlar beslenir. İdeal olmayan karakterdeki giriş akımındaki düşüş güç dağıtım hattında

aşağıdaki sorunlara yol açar:

- Akım ve gerilim fazlarının kayması ile oluşan reaktif güç akım ve gerilim değerlerini artırır.
- Girişte yüksek akım harmoniklerine ve düşük güç faktörüne yol açar.
- Doğrultucunun verimi düşer.
- Yüksek akım pikleri, gerilim bozulmalarına yol açar.
- Reaktif elemanların güç değerleri artar.

Bütün bu sorunlarla baş edebilmek için giriş aktif güç faktörünün iyileştirilmesi gerekir. Orta ve yüksek güçlü uygulamalarda giriş doğrultucu devresi 3 fazlı sistemden beslenir. Bu sistemlerde güç faktörünün 1 yapılması faz kontrollü ac-dc çeviricilere göre daha üstün olsa da, bazı olumsuz yanları bulunmaktadır:

- Sistemin karmaşık bir senkronizasyon mantığı bulunmaktadır.
- Anahtarlama frekansı yüke bağlıdır.
- Tek fazlı çevirici sisteme göre 3 kat fazla eleman gerekmektedir.

Tasarlanan 3 fazlı AC-DC çevirici, iki temel bölümden oluşur. İlk bölüm 3 fazlı AC –DC çeviricinin giriş filtresi, endüktansı, 3 fazlı diyot doğrultucusu, aktif güç faktörü düzeltme bölümü ve DC hat filtre kondansatöründen oluşur. İkinci bölüm ise yük olarak alınabilecek tek veya 3 fazlı inverter veya DC-DC çeviriciler olabilir. Giriş akımı dalga şekli, 3 kıyıcı eleman olan L_b , D_b ve Q_b elemanlarının kullanılması ile elde edilir. Q_b anahtarı sabit frekansta yük durumuna göre anahtarlanır. Sonuçta girişten süreksiz bir akım çekilir. Anahtarın iletim durumunda tüm fazlardan geçen akımlar I_{ia} , I_{ib} , I_{ic} , diyot doğrultucu ve anahtar üzerinden geçerken kısa sürede kesildiği için aşırı bir akım artışı olur. Aynı olay gerilim dalga şeklinde de meydana gelir. Eğer gerilim sinüzoidal değişiyor ise akım da sinüzoidaldir denir.

Sonuçta, yer değiştirme giriş güç faktörü “ $\cos \phi_1$ ” fitreden önce 1 değerindedir. Bu da, filtreden önceki toplam giriş güç faktörünün harmonik giriş güç faktörüne eşit olduğunu gösterir ve aşağıdaki gibi formülленir.

$$L_{ia} = 0.1 \text{ p.u}$$

$$I_{ia(tepe)} = \frac{V_{an(tepe)}}{L_{ia}} \times \frac{T_b}{2} = 1.48 \text{ p.u} \quad (4.63)$$

Burada T_b anahtarlama periyodudur. $I_{ia,1} = 0.62$ olarak bilindiğine göre aralarındaki oran;

$$I_{ia,1(tepe)} = I_{ia(tepe)} * 0.418 \quad (4.64)$$

$$I_{ia,1(tepe)} = \frac{V_{an(tepe)}}{L_{ia}} \times \frac{T_b}{2} * 1.48$$

Bu formülden L_{ia} değeri bulunabilir.

4.9.2 Doğrultucu çıkış akımı ve filtre dizaynı

Doğrultucu çıkış akımı ($I_{b2}(wt)$) seri halde gelen darbelerden oluşmuş olup bir filtre ile istenmeyen harmoniklerin DC taraftan ayıklanması gerekir. f_b Sıradaki gerilim harmoniğini;

$$V_{d,fb} = \frac{I_{b2,fb(tepe)}}{f_b * w * C_d} \quad (4.65)$$

Burada, $I_{b2,fb(tepe)}$, f_b . Harmoniğin I_{b2} akımıdır. Çıkış gerilimindeki dalgalanma,

$$\% \text{ Dalgalanma} = \frac{100 * V_{d,fb(efektif)}}{V_{d,0}} \quad (4.66)$$

Bu formülden yararlanarak,

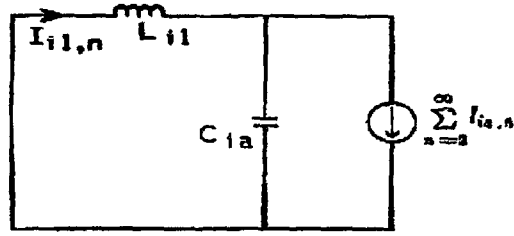
$$C_d = \frac{I_{b2,fb(tepe)} * 100}{\sqrt{2} * V_{d,0} * (\% \text{ dalgalanma}) * f_b * w} \quad (4.67)$$

olarak bulunur.

4.9.3 Giriş filtre dizaynı

Birçok uygulamada THD değerinin $< \%5$ olması, hatta I_{i1} değerinin de $\%3$ 'den küçük olması istenir. Bununla ilgili olarak tek faz eşdeğer filtre devresi şekil 4.7'de verilmiştir. Filtre endüktansının harmonik bileşeni,

$$I_{i1,n} = \frac{X_{Cia,1} * I_{i1,n}}{n^2 * X_{Li1,1} - X_{Cia,1}} \quad (4.68)$$



Şekil 4.7 Tek faz eşdeğer giriş filtre dizaynı.

Burada,

$X_{C_{1a},1}$ = Temel frekanstaki filtre kondansatörü

$X_{L_{i1},1}$ = Temel frekanstaki filtre endüktansdır.

$$\frac{X_{L_{i1},1}}{X_{C_{1a},1}} = \frac{1}{n^2} \left[\frac{I_{ia,n}}{I_{i1,n}} + 1 \right] \quad (4.69)$$

f_b 'nin yüksek frekanslardaki değeri için L ve C'nin değerleri ve büyüklükleri azalır. Bununla birlik girişteki tüm harmonik akımları (I_{i1}) küçülür ve güç faktörü yaklaşık 1 olur. Bu konuyla ilgili olarak harmoniklerin nasıl giderileceği bölüm 5'de anlatılmıştır.

5. HARMONİKLERİN GİDERİLMESİ

5.1 Tasarım Sırasında Alınabilecek Önlemler

Tasarım sırasında alınacak önlemler harmonik kaynakların imalatları sırasında veya şebekelere bağlanmaları esnasında alınır.

5.1.1 Generatörlerde alınabilecek önlemler

Senkron makinalar sabit hızda dönerek elektrik enerjisinin üretilmesinde generatör olarak kullanılırlar. Yuvarlak rotorlu senkron generatörlerde endüklenen elektro motor kuvvet (e.m.k.) şekli alan şekli ile aynı olduğundan, gerilim dalga şekli sinüs formuna yakın yapılmaya çalışılır. Rotorda doğru akımla beslenen uyarma döner alanını oluşturan sargı, bir kutup altındaki $2/3$ oranındaki oluklara yerleştirilip, bir kutup altındaki olukların $1/3$ 'ü boş bırakılarak alandaki 3 ve 3'ün katı harmonikleri yok edilir. $2p=2$ kutuplu senkron makina 50 Hz'lik şebekede 3000 d/d ile döner. Sonuç olarak, rotor çevresinin $2/3$ 'sine farklı aralıklarla açılan oluklara yerleştirilen sargılardan geçen doğru akımın meydana getirdiği alan şekli sinüs eğrisine en yakın alan eğrisidir. Rotor senkron devir sayısında döndürülünce uyarma alan şekli de rotora çakışık olduğu için rotor ile beraber senkron devir sayısında döner. Böylece rotor döner alanı elde edilir. Rotor döner alanın stator iletkenlerini kesmesi ile stator sargısında da sinüzoidal bir gerilim endüklenmiş olur.

Yuvarlak rotorlu senkron makinalarda uyarma sargısının bütün rotor çevresine homojen olarak dağıtıldığı durumlarda, üçgen (trapez) şeklinde bir alan eğrisi elde edilir. Bu gibi sinüzoidal olmayan eğriler 1., 3., 5., 7., 9. vb. tek mertebeli sinüs terimlerinin toplamına eşit olduğundan endüklenen elektromotor kuvvet de aynı mertebeden harmonikleri içerir.

5.1.2 Dönüştürücülerde alınabilecek önlemler

Sinüzoidal bir alternatif gerilime bağlı olan redresörlerde darbe sayısı p ise, harmonik mertebesi formül (1.1) ifadesinden $n = k.p \pm 1$ değerini almaktadır. Burada $k = 1, 2, 3, \dots$ gibi tamsayılardır. Genellikle redresörlerde $n = 5, 7, 11, 13, \dots$ olduğu için, harmonik akımları $I_5 = I_1/5$, $I_7 = I_1/7$, gibi değerler almaktadır. Bundan dolayı darbe sayısı ne kadar büyük olursa, harmonik mertebeleri o kadar yüksek ve harmonik değerleri de o kadar küçük olur. Böylece harmoniklerin zararlı etkileri de o oranda azalır.

Bu özellikten dolayı harmonik üreten güç elektroniği aygıtlarında, daha tasarım aşamasında gerekli tedbirler alınarak harmoniklerin şebekedeki etkinlikleri azaltılabilir. Örneğin, bazı

tesislerde darbe sayısının 6'dan 12'ye veya 12'den 36'ya çıkartılmasıyla, daha önce görülen olumsuzlukların artık söz konusu olmadığı literatürde kaydedilmiştir (Mohan vd., 1989).

5.1.3 Transformatörlerde alınabilecek önlemler

Büyük transformatörlerde endüksiyon değerinin büyük tutulmasının sebebi çekirdekten maksimum yararı sağlamaktır. Fakat bu durumda mıknatıslanma akım dalga şeklinde harmonikler meydana gelmektedir. Mıknatıslama akımının dalga şeklindeki harmonikleri düşürmek için alınabilecek en iyi tedbir, manyetik endüksiyonun düşük tutulmasıdır.

Modern transformatörlerde soğuk haddelenmiş ve kristalleri yönlendirilmiş saç kullanmakla, manyetik akı ve bunun sonucu olarak mıknatıslama akımı düşürülür. Bu tip saç kullanılması halinde harmonikler sıcak haddelenmiş saçlardakine göre 1/5 değerine düşer. Böylece şebekelerde harmonik tehlikesi büyük oranda önlenir (Mohan vd., 1989).

Bununla birlikte üçgen-yıldız transformatörler özellikle sıfır sequence (zero-sequence) harmoniklerini harmonikleri azaltır. Bunun için Zig-zag transformatörler kullanılır; sistemi üçgenden yıldıza çevirmeye gerek kalmadan dönüş nötr hattaki akımları da azaltır.

Eğer yüksek nötr akımları varsa, ilk etapta mümkün olan yerlerde ortak nötr hatları ayrılmalı, bu olay mümkün değil ise nötr hattını aşırı ısınmayacak şekilde tekrar hesaplanması gerekir. Bu çözüm de olmazsa yukarıda anlatılan çözümler denenir.

5.1.4 Yüksek harmoniklerin oluşturduğu rezonansa ilişkin önlemler

Rezonans esnasında endüktif reaktans kapasitif reaktansa eşit olduğundan $\omega = 1 / \sqrt{LC}$ olmaktadır. L ya da C parametrelerinden herhangi birisinin değiştirilmesiyle rezonanstan kaçınmak teorik olarak mümkündür. Rezonans halinde;

$$L = 1/C\omega^2 \quad (5.1)$$

$$C = 1/L\omega^2 \quad (5.2)$$

ifadeleri göz önüne alınırsa, C sabit kalmak koşuluyla devrenin endüktansını düşürmek ya da artırmak bir çözüm olabilir. Rezonansın yol açtığı zararlı etkilerden kurtulmak için, kompanzasyon tesisinin öz frekansı, rezonansa neden olabilecek şebeke frekansının altında olmalıdır. Harmoniklerin sebep olduğu zararlı etkilerden kaçınmak için şu önlemler alınabilir:

- Teorik olarak yüksek harmonik akımlarını azaltmak için devreye omik direnç yerleştirilebilir. Fakat devreye ilave edilen her ek direnç kayıplara yol açacağından,

mümkün olduğu kadar yapay direnç artırma yoluna gidilir. Buna karşılık doğal olarak devrede bir omik direncin bulunmasını sağlamak amacı ile, kompanzasyon tesisleri doğrudan doğruya baraya bağlanma yerine bir veya birkaç kablo üzerinden bağlanırlar.

- Kompanzasyon yapmak amacıyla hesaplar yapılırken, bağlanacak kondansatör değeriyle tesisteki mevcut motor, transformatör ve hatların endüktif direnç değerleri göz önünde bulundurulmalıdır. Rezonansa neden olacak harmonik frekanslardan kaçınılmalıdır. Örneğin kurulacak kompanzasyon tesisinin rezonans frekansının mevcut harmonik frekans değerleri arasında olmaması gerekir.
- Kompanzasyon için gerekli olmayan kondansatör bataryaları devreden çıkarılmalıdır. Yükün az olduğu saatlerde tesisi besleyen transformatörler ile kompanzasyon için yerleştirilen kondansatörlerin tamamı devrede kalırsa, aşırı kompanzasyon nedeni ile gerilim yükselir ve transformatörler doyma bölgesinde çalışmaya başlar. Doyma anında mıknatıslama akımının şekli bozulacağından transformatör bir harmonik üretici gibi çalışır. Bunun sonucu yüksek harmonik rezonansı baş gösterebilir. Onun için kondansatör gücünü kompanzasyon ihtiyacına göre ayarlamak amacı ile tesisin otomatik güç faktörü regülatörü ile donatılması uygun olur.

5.2 3 Faz Hat Reaktörleri

Bu bölümde açıklanan tüm tekniklerin amacı hat başından çekilen akımın daha devamlı bir şekilde çekilmesi içindir. Böylece akımdaki toplam harmonik bozulmaları azaltılabilir. 3 faz hat reaktörü 3 faz için hat endüktanslarını ifade eder. Hat reaktörleri hat akımındaki bozulmaları değiştirebilecek kadar önemli etki ederler. Reaktör düşük akım harmoniklerinde akım dalga şeklini daha az kesintili hale getirir. Reaktör empedansı, frekansa bağlı olarak yükselir ve yüksek dereceli harmonik akımlarına daha geniş empedans gösterir. Ancak akım cihazlarının çok yüksek frekanslara çıkmasındaki mekanik engellemelere karşın başlıca frekanslar için kolay geçiş sağlanır. Giriş reaktans değeri bilinerek, akımdaki harmonik bozulmalar tahmin edilebilir. Çizelge 5.1’de değişik değerdeki giriş reaktanslarına karşın tahmin edilen giriş akım harmonikleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 Değişik giriş reaktanslarına karşın tahmin edilen giriş akım harmonikleri.

% Harmoniklerine Karşın Toplam Hat Empedansı Toplam Giriş Empedansı								
Harmonik	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%
5.	40	34	32	30	28	26	24	23
7.	16	13	12	11	10	9	8.3	7.5
11.	7.3	6.3	5.8	5.2	5	4.3	4.2	4
13.	4.9	4.2	3.9	3.6	3.3	3.15	3	2.8
17.	3	2.4	2.2	2.1	0.9	0.7	0.5	0.4
19.	2.2	2	0.8	0.7	0.4	0.3	0.25	0.2
%THID	44.13	37.31	34.96	32.65	30.35	28.04	25.92	24.68

Bir diyot çiftinin davranışını izlerken AC girişte ani dalgalanma olsa bile giriş ile DC hat arasında konan 3 fazlı hat reaktörünün akım dalga şeklindeki ani dalgalanmalara izin vermediği ve AC ile DC kısmı birbirinden ayırarak izole ettiği görülür. Bu durum birçok ayarlanabilir hız sürücülerinin (ASD) düşük AC gerilimde dalga şeklinin tepelerinin kesilmesini engeller.

Hat reaktörü basit bir endüktanstır. Frekans arttıkça direnci de artar. Örneğin 60 Hz de akım az bir zorlanmaya karşın endüktans içinden akar, ancak yüksek frekansta endüktansın değeri artacağından akım çok zor geçer. Harmonik akımlar, hat reaktörlü sisteme uygulandığında değerleri azalmaya başlar. Hat reaktörleri harmonik akım değerini sınırladığı için gerilim bozulmalarını da azaltır. Hat reaktörünün iş yapan empedansı, üzerindeki değeri değil efektif değeridir ve ana akım ile reaktörün gerçek empedansı arasındaki ilişkiye dayanır. Efektif empedans değeri % olarak gerçek yüklenme değeri aşağıdaki formülle bulunur.

$$Z_{eff} = \frac{\sqrt{3} * 2 * \pi * f * I_{aktif}}{V_{faz-faz}} \times 100 \quad (5.3)$$

50 - 60 Hz deki akım için çok düşük bir direnç gösteren AC hat reaktörü diğer harmonik bileşenlere yüksek empedans gösterir. Şekil 5.1'de 6-darbeli doğrultucu için akım dalga şekilleri görülmektedir.



Şekil 5.1 6-Darbeli doğrultucunun, filtresiz ve %3 hat reaktörlü giriş akım dalga şekli.

5.2.1 DC hat tıkaçı

Yeterli değerdeki bir endüktansın AC kaynak ile ASD ye bağlı DC bara kondansatörü arasına yerleştirilmesi ile akım dalga şekli iyileşir. Bu gözlem sonucunda DC hat tıkaçı diyot doğrultucu ile DC bara arasına yerleştirilir. DC hat tıkaçı 6 darbeleri ASD için giriş AC frekansının 6 katı bir dalgalanma yapar ancak genliği düşük seviyededir ve ac endüktansa göre yarı değerinde bir efektif empedans kullanır. Aşağıdaki formül bu eşitliği göstermektedir.

$$P_{ac} = \frac{3V_{L-N}^2}{R_{ac}} \quad P_{ac} = P_{dc} \quad (5.4)$$

$$P_{dc} = \frac{V_{dc}^2}{R_{dc}} \quad R_{dc} = 2 * R_{ac} \quad (5.5)$$

DC hat tıkaçı 3 fazlı hat reaktörüne göre daha küçük ve daha ucuzdur. Ancak diyot doğrultucu devresine gelebilecek ani gerilim piklerini önleyemez sadece çıkışı düzeltebilir. Bu sebeple hat reaktörleri ile dc hat tıkaçları birlikte ASD ler için mükemmel bir koruma sağlarlar.

5.3 Harmoniklerin Filtrelenmesi

Harmoniklerin zararlı etkilerini engellemek için tasarıma yönelik alınacak tedbirler yeterli değildir. Bu tedbirlere ilave olarak harmonik akımların şebekeye geçmesinin engellenmesi gerekmektedir, bunun için sisteme ilave edilmesi gereken ek devrelere ihtiyaç vardır.

Devreye yerleştirilen ve istenen harmonik akımının süzülmesini sağlayan bu devrelere “harmonik filtresi” adı verilir. Harmonik filtrelerin amacı bir ya da daha fazla frekanstaki akım veya gerilimlerin etkisini yani harmonik içeriğini azaltmak veya yok etmektir. Harmonik filtrelerin görevini kısaca şöyle sıralayabiliriz;

- Harmonik üreten bir cihazdan (bir redresörden veya inverterden) beslenen yükün gerilim dalgasını düzeltmek

- A.C. sisteme geri gönderilen istenmeyen harmonik bileşenleri önlemek
- Radyo frekans girişimlerini elimine etmek şeklinde özetlenebilir.

Temel olarak iki çeşit filtre vardır.

Birincisi, filtre bileşenlerinin direnç, endüktans ve kondansatör gibi pasif elemanlardan oluşturulduğu 'pasif filtreler'. İkincisi, filtrelerin kontrollü akım ya da gerilim kaynağına sahip olduğu 'aktif filtreler' dir.

5.3.1 Pasif filtreler

Pasif filtreler endüktans, kapasite ve rezistanstan oluşur ve kaynak ile alıcı arasına konularak temel frekans dışındaki bileşenleri yok eder. Seri, şönt, ve alçak geçiren geniş bantlı pasif filtreler bulunmaktadır. Seri ve şönt filtreler ayarlı oldukları frekanslar için etkilidir. Alçak geçiren geniş bant filtreler ise kendi kesim frekansları hariç hemen hemen her türlü harmoniği azaltır.

Pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik bileşen ile rezonansa gelecek L ve C değerlerini belirlemektir. Her bir harmonik bileşen için onu rezonansa getirecek ayrı bir filtre kolu konulması gereklidir. Fakat bununla beraber genelde en etkin harmonik bileşenler için tasarım yapılır. Etkisi az alan harmonik bileşenler için zayıflatan bir filtre devresi düşünülebilir. Filtre devrelerinde kullanılan kondansatörlerin normal güç kondansatörlerine göre daha yüksek gerilimlerde çalışabilmeleri gerekmektedir. Bu tür bir tasarım dengeli sistemler için uygundur.

Harmonik Filtrelerin Kullanım Alanları:

- Güç faktörünü arttırmak için
- Harmonikleri azaltmak için
- 3 faz dönüş nötr akımını azaltmak için
- Dağıtım trafolarındaki etkiyi azaltmak
- Yük harmoniklerinden etkilenen ara generatörlerde
- Dağıtım kapasitesini arttırmak

5.3.1.1 Pasif harmonik filtreleriyle ilgili genel tanımlar

Pasif filtrelerin endüktif ve kapasitif reaktansları birbirine eşit yapan bir frekansa ayarlanır. Kalite faktörü Q , ayar keskinliğini belirlemektedir. Q faktörüne bağlı olarak filtreler ya yüksek Q ya da düşük Q tipindedirler. Q değeri, yüksek Q tipi filtrelerde 30 ile 60 arasında değerler alırken, düşük Q tipi filtrelerde 0.5 ile 5 arasında değerler almaktadır. Yüksek Q filtresi, düşük harmonik frekanslardan birine ayarlanır. Düşük Q filtresi ise, geniş bir frekans aralığında düşük bir empedansa sahiptir ve yüksek mertebeli harmonikleri süzmek için kullanıldığında yüksek geçiren filtre olarak da düşünülür. Düşük ve yüksek Q tipi filtreler sırasıyla şekil 5.2 ve şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.2 Tek ayarlı filtre devresi, Şekil 5.3 İkinci merteben zayıflatan sönümlü filtre devresi.

Q kalite faktörü

$$Q = X_0 / R \quad (5.6)$$

olarak tanımlanır. Bu ifadede, X_0 rezonans frekansındaki reaktansı (kapasitesinin veya endüktansın) ve R filtrenin direncini göstermektedir. Yüksek geçiren sönümlü filtrelerde ise ayar keskinliği ifadesi,

$$Q = R / X_0 \quad (5.7)$$

şeklindedir.

Bir filtrenin anma ayar frekansından uzaklaşması, ayar sapma faktörü δ ile tanımlanmıştır. ω_n rad/s olarak ayarlanan açısal frekansını ifade ederse

$$\delta = (\omega - \omega_n) / \omega_n \quad (5.8)$$

olarak tanımlanır.

Ayar sapma faktörü aşağıda belirtilen etkileri içerir:

- Temel frekansta meydana gelen deęişimler
- Filtre sıcaklığının neden olduğu kapasite ve endüktanstaki değişimler
- Yapım toleransı ve Q için öngörülen ayar aralığının neden olduğu etkiler

Yukarıda belirtilen (5.8) ifadesi

$$\delta = \frac{\Delta f}{f} + \frac{1}{2} \frac{\Delta L}{L} + \frac{1}{2} \frac{\Delta C}{C} \quad (5.9)$$

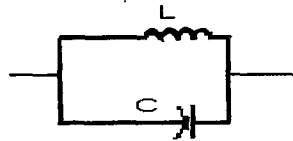
olarak da yazılabilir. Burada, Δf şebeke frekansındaki sapmayı, ΔL ve ΔC ayarlı filtrenin L (bobin) ve C (kondansatör) değerindeki sapmayı (örneğin çevre sıcaklığından dolayı değerlerinin değişmesi gibi) gösterir.

Pasif filtreler kendi içinde seri, şönt ve alçak geçiren geniş bantlı filtre olmak üzere üç gruba ayrılır.

5.3.1.2 Seri filtreler

Seri filtreler harmonik kaynağıyla şebeke arasına seri olarak bağlanır ve harmonik akışına yüksek empedans gösterirler. Bu yüzden seri filtrelerin ayarlı frekanslarında yüksek empedansı vardır. Seri filtre belirli bir frekansa ayarlandığı için sadece o ayarlı frekans bileşenine yüksek empedans gösterir.

Seri filtreler tek fazlı sistemde 3. harmoniğin baskın olduğu uygulamada yaygındır. Seri filtreler genellikle temel frekansta düşük empedans gösterir. Seri filtrelerin en büyük dezavantajı tam yük akımını taşımaları ve tam hat gerilimi için yalıtılmalarıdır. Bununla birlikte seri filtrelerin rezonans problemi yoktur. Buda şönt filtreye nazaran avantajdır. İlgili yapı şekil 5.4’de gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Devrede seri filtrenin kullanımı.

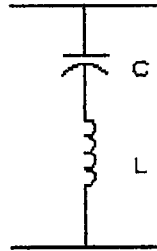
5.3.1.3 Şönt filtreler ve çeşitleri

Şönt filtreler harmonik kaynağıyla şebeke arasına paralel olarak bağlanırlar. Düşük bir şönt empedans yoluyla istenmeyen harmonik akımlarının yönü saptırılır. Şönt filtreler harmonik

akımlarına çok düşük bir empedans göstermek için tasarlanır. Ayrıca şönt filtreler temel frekansta reaktif güç sağlamak ve güç faktörünü düzeltmek için de kullanılabilir. Şönt filtrede seri filtre gibi sadece ayarlı frekansında veya ayarlı frekansı civarında etkilidir.

Şönt filtre kullanımının en büyük sakıncası güç sistemiyle rezonansa girmesidir. Filtre bileşenleri mevcut şebeke empedansı ile birbirini etkileyerek rezonansı gerçekleştirirler. Bundan dolayı, ayarlı bir şönt filtrenin dizaynı ve uygulaması için bu filtrenin uygulanacağı mevcut güç sistem şebekesinin ayrıntılı bir analizi gerekmektedir. Şönt filtrelerin yerleşimi de çok önemlidir. Merkezi bir yerleşim rezonans durumunda daha büyük bir zarara sebep olur. Her ne kadar rezonans problemi dikkate alınarak şönt filtrenin tasarımı yapılsa da, gelecekte elektrik şebekesinde olabilecek herhangi bir büyüme ve değişme sistemin dinamiklerini değiştirecek ve yeni bir yerleşim ve tasarımı gerektirecektir.

Genelde kullanılan ayarlı şönt filtreler 5. ve 7. için olup, 11. için de yüksek geçiren filtre kullanılır. Eğer yeterli önlem alınmazsa şönt filtreler lineer olmayan yükün ihtiyaç duyduğu harmonik enerjisini kendisi sağlamaya çalışır ve aşırı yüklenerek sigortaları attırır ve filtre zarar görür. Bunu önlemek için seri hat reaktörleri konulmalıdır ki bu da yeni başlangıç şartlarını oluşturur. Bunun nedeni de şönt filtrede oluşan reaktif gücün ASD uçlarında oluşturduğu gerilimin hat reaktöründen şebekeye geçemediğinden sadece ASD'ye zarar vermesidir. Eğer bu olay anahtarlama kondansatör gruplarının yakınında olursa daha da ciddi bir problem oluşur bu da sistemde rezonansın oluşmasıdır. Şönt filtre devresi şekil 5.5'de gösterildiği gibidir.

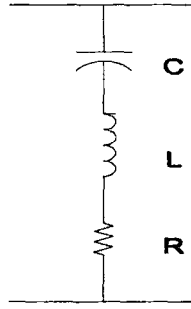


Şekil 5.5 Şönt filtrenin devrede kullanımı.

Şönt filtrelere örnek olarak aşağıdaki filtreleri verebiliriz.

A) Tek ayarlı filtreler (bant geçiren filtreler)

Tek ayarlı filtreler, kısa devre yolu oluşturarak istenen özel bir frekanstaki harmonik akımının hattın saptırılmasını sağlarlar. Bu işlemi genellikle tek bir frekans değeri için yaparlar. Tek ayarlı filtreler seri R-L-C devresinden meydana gelmektedir. Örneğin Şekil 5.6 gibi.



Şekil 5.6 Tek ayarlı filtre devresi.

Tek ayarlı filtre için filtre empedansı Z_f şu şekilde verilir:

$$Z_f = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (5.10)$$

Filtre empedansını Q ve δ 'ye bağlı olarak elde etmek için aşağıdaki bağıntılardan yararlanılır. Bu bağıntılarda X_0 rezonans anındaki reaktans değerini göstermektedir.

$$\omega = \omega_n (1 + \delta) \quad (5.11)$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5.12)$$

$$C = \frac{1}{\omega_n X_0} = \frac{1}{\omega_n RQ} \quad (5.13)$$

$$L = \frac{X_0}{\omega_n} = \frac{RQ}{\omega_n} \quad (5.14)$$

Sonuç olarak

$$Z_f = R \left(1 + jQ\delta \left(\frac{2 + \delta}{1 + \delta} \right) \right) \quad (5.15)$$

δ 'nin değeri 1'e nazaran çok küçük olduğundan,

$$Z_f = R (1 + j2Q\delta) = X_0 (Q^{-1} + j2\delta) \quad (5.16)$$

şeklinde yazılabilir (Arrillaga, 1985).

Tek ayarlı filtrelerin başlıca üstünlükleri şunlardır:

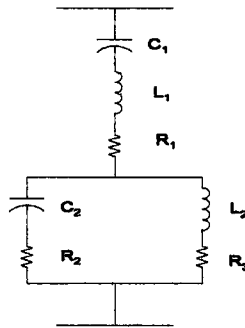
- Sistemin rezonans frekansını zararlı bir harmonik frekansından uzağa taşıyabilirler.

- Filtre devresinde direnç olmadığı durumlarda kayıpları çok azdır.
- Ayarlı olduğu harmonik frekansında, harmonik akımına sıfıra yakın bir empedans göstermektedir.
- Filtrelenecek harmonik akımı birden fazla ise, birden fazla filtre paralel olarak kullanılabilir. Paralel kolların her birisi kendi rezonans frekansında harmonik akımı için en kısa yolu oluşturur. Harmonik akımları devrelerini bu kollar üzerinden tamamladıklarından şebekeye geçmemiş olurlar.

Tek ayarlı filtrelerin tek olumsuz yanı ise, keskin ayarları nedeniyle eleman değerlerinin harmonik seviyelerinin değişen değerlerine karşı duyarlı olmalarıdır. Fakat kondansatör büyüklüğünün arttırılması veya direnç eklenmesiyle bu problem çözülebilir. Sadece bir tane kondansatör ünitesi bulunan bir tesiste 7. harmonik frekansı civarında paralel rezonans olduğunu kabul edelim. Bu durumda kondansatör ünitesine bobin ilave edilmek suretiyle kondansatör ünitesi 7. harmonik frekansında tek ayarlı filtreye dönüştürülür. Fakat bu kez filtre ile sistem empedansı arasında 5. harmonik frekansı civarında paralel rezonans oluşursa, bu problemin en iyi yolu, 5. harmonik frekansına tek ayarlı bir filtre kullanmaktır. Böylece hem 7. Harmonikdeki rezonans önlenir hem de 5. harmonik akımı filtre edilir. Bu yüzden bu tip problemlerde filtre en düşük harmonik bileşenine göre seçilmelidir.

B) Çift ayarlı filtre

Çift Ayarlı Filtrenin eşdeğer empedansı iki adet tek ayarlı filtreninki ile aynıdır. Şekil 5.7'deki çift ayarlı filtre iki harmoniği elimine edebilir.

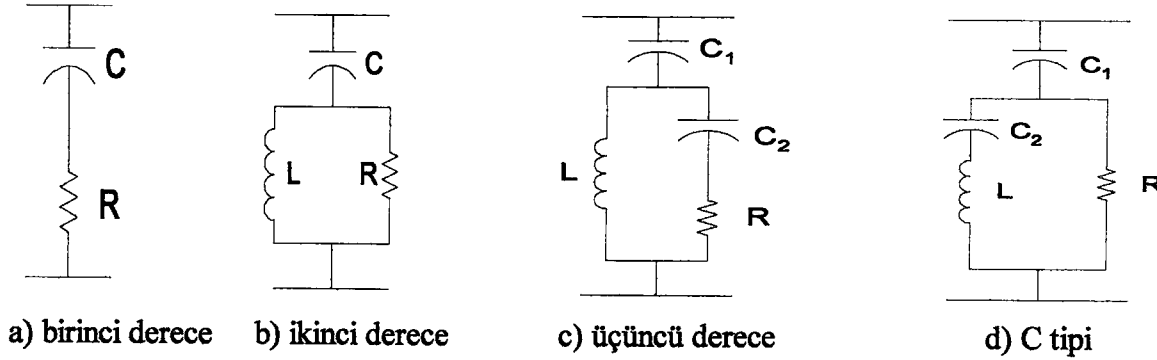


Şekil 5.7 Çift ayarlı filtre.

Tek ayarlı filtre ile karşılaştırıldığında temel frekanstaki güç kaybının azlığı bu filtrelerin en önemli özelliğidir. Bundan başka endüktansların sayısının ayarlanması ile yüksek gerilimlerde bütün darbe gerilimlerini denetim altına alırlar.

C) Yüksek geçiren sönümlü filtreler

Şekil 5.8’de yüksek geçiren sönümlü birinci, ikinci, üçüncü dereceden ve C tipi filtre devreleri verilmiştir.



Şekil 5.8. Yüksek geçiren sönümlü filtreler.

Birinci dereceden yüksek geçiren filtreler normalde büyük bir kapasite gerektirdiğinden kullanılmaz ve temel frekansta aşırı kayıplara sahiptir. İkinci dereceden filtreler iyi bir filtreleme performansı sağlar, fakat üçüncü dereceden filtrelerle karşılaştırıldığında daha yüksek temel frekans kayıplarına sahiptir. Üçüncü dereceden yüksek geçiren filtrelerin ikinci dereceye göre temel üstünlüğü, C_2 kapasitesinin neden olduğu frekansta empedansın artmasından dolayı temel frekans kaybına neden olmaktadır. C tipi filtrenin filtreleme performansı ikinci ve üçüncü dereceden filtrelerin arasında yer alır. C tipi filtrenin en önemli avantajı temel frekans kayıplarındaki azalmadır.

Bu filtrelerin başlıca üstünlükleri şu şekilde ifade edilebilir (Stanley vd., 1977):

- Kapasite kayıpları, çalışma ve yüklenme sırasında ısı değişiminden etkilenmediği gibi, frekans sapmaları da üretim toleransları üzerinde fazlaca etkili olmamaktadır.
- Artan anahtarlama ve bakım sorunları bakımından paralel kolların ek devrelere ayrılmasına gerek duyulmaksızın, geniş bir frekans aralığında düşük bir empedans sağlarlar.
- Yüksek geçiren filtreler çeşitli mertebeler için tasarlanırlar. Örneğin ikinci mertebeden yüksek geçiren bir filtre temelde endüktansına paralel bir direnç eklenmiş tek ayarlı bir filtredir. Farklı direnç değerleri için farklı filtre cevapları elde edilir.
- İkinci mertebeden yüksek geçiren bir filtre, yüksek frekanstaki harmonikleri zayıflatmada tek ayarlı bir filtreden daha etkilidir. Ayrıca filtre, tek ayarlı filtre için ayarlanan frekans değerine duyarlı değildir. Endüktif ve kapasitif elemanların seçimi, tek ayarlı filtredeki

gibi yapılır. Bunlara ek olarak anma etkin gücüne dayalı bir direnç değeri tanımlanır. Düşük mertebeli harmonikler için yüksek geçiren filtreler kullanmak ekonomik değildir. Ayrıca direnç değeri artacağından kayıplar da artar.

5.3.1.4 Alçak geçiren geniş bantlı harmonik filtresi

Son yıllarda elektrik sistemlerindeki kalite faktörünü incelemek için belli tipteki yükler üzerine odaklanılmıştır. Birçok alanda kullanılan lineer olmayan yüklere örnek olarak bilgisayar güç kaynakları, aydınlatma balastları, ayarlanabilir hızdaki sürücüler, kesintisiz güç kaynakları verilebilir. Lineer olmayan yüklerin meydana getirdiği akım harmonikleri lineer yükler üzerine ters etki yapabilir. Bu olay 50 Hz'lik sinüzoidal dalga için dizayn edilmiş yüklerde gözlenebilir. Sınaiye enerji taşıyan trafolar, bağlı bulundukları lineer olmayan yükler tarafından üretilen harmoniklerden dolayı aşırı ısı kayıpları oluşur. Harmonikler acil jeneratör sistemlerine, telefon ve diğer elektrik cihazlarına zarar verebilir. Lineer olmayan yükler ile reaktif güç kompenzasyonu için kullanılan kapasiteler bir arada kullanıldığında rezonans koşullarını oluşturabilir ve daha yüksek değerlerde harmonik gerilim ve akım bozulmalarına yol açar. Bunun sonucu olarak cihaz hatalarına, güç kesintilerine ve tehlikeli koşullarda yangın zararlarına sebep olur.

Geçmişte elektrikselsistemler bu problemlerden çok zarar görmüştür. Bununla birlikte bu problem Avrupa, Amerika ve diğer ülkelerde sistem mühendislerinin belirli standartlar getirmelerine sebep olmuştur. IEEE 519-1992 ve IEC 555 mühendislik projelerinde ortak gereksinimleri belirtmiştir. Bu özellikleri sağlamak için geniş bant harmonik filtreleri dizayn edilmiştir. IEEE 519-1992 dokümanı kabul edilebilir seviyedeki harmonik akım ve gerilim değerlerini fider çıkışlarındaki ticari ve endüstriyel kullanıcılar için belirlemiştir

Bu tip filtre seri ve şönt filtrenin en iyi taraflarından oluşmuş bir filtre olup, en önemli özelliği ayarlanması çok daha kolaydır. 5., 7. ve yüksek geçiren şönt filtrenin sağladığı performansa yakın olup, sistem ile lineer olmayan yük arasında harmonik akımların geçişini engeller.

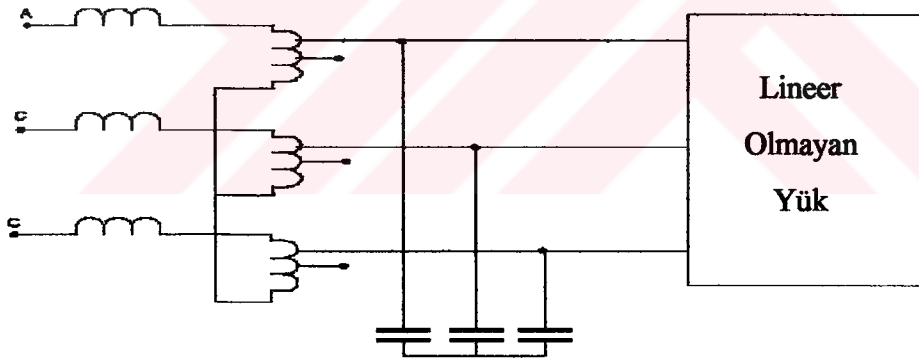
En iyi pasif filtre kondansatördür. Ancak 2 kötü yanı vardır bunlardan birincisi, harmonik çekmesi ve bu sebeple aşırı yüklenerek kendisine zarar vermesi, ikincisi ise, temel dalga bileşeninde güç faktörü düzeltici kondansatör gibi davranmasıdır. Bu sebeple ASD girişinde aşırı gerilim sonucu hasara sebep olur.

Tüm bu problemlerin çözümü için büyük değerdeki bir hat reaktörü şönt filtreden sonra bağlanarak harmoniklerin giriş ve çıkışı engellenir. Ayrıca ASD girişinde aşırı gerilimi

önlemek için buck tipi bir transformatör kondansatörden önce bağlanır. Bu şekilde daha düşük gerilimle şarj olan kondansatör temel frekansta güç faktörünü düzeltirken normal değerine ulaşır. ASD girişindeki kondansatörün yüklenmeye göre aniden boşalması ile giriş AC kondansatörü ile DC bara kondansatörü arasında en mükemmel aktarım hızı arada hiçbir empedans olmadan sağlanarak harmonik enerji aktarılabilir.

Bu performansı değerlendiren bir başka analizde, 2 adet AC kaynak ile ASD'nin harmonik enerji ihtiyacı beslenmekte ve bunlar temel AC kaynak ile kondansatör grubundan oluşmaktadır. Şekil 5.9'da patentli olan bu sistem görülmektedir.

Bu modelin uygulanmasında sistemin rezonansı oldukça zordur çünkü 3 fazlı sistem için çok düşük bir kesim frekansına ayarlıdır. Sistemin performansına bakarsak toplam harmonik bozulma ilk değeri %100 alırsak, toplamda %9-12'ye düşmüştür. Ancak geniş bantlı filtre yapısı gereği sadece lineer olmayan yükleri içeren devreler için tasarlanmıştır, diğer tipte yükler için harmonik bastırmasında kullanılmaz. Ayrıca gerilim yükselmelerine sebep olmadığından senkron motorların güç faktörünü düzelttiği birçok tesiste kullanılabilir.



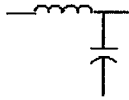
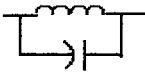
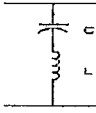
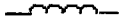
Şekil 5.9 Alçak geçiren geniş bantlı harmonik filtresi.

Kullanım alanları;

- AC değişken frekanslı sürücülerde
- Değişken momentli uygulamalarda
- 6-diyotlu-köprü doğrultucularda
- Fan ve pompa uygulamalarında
- Sadece lineer olmayan yükler için

Çizelge 5.2'de pasif filtrelerin kendi aralarındaki karşılaştırmaları gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 Pasif filtrelerin karşılaştırılması.

Özellik	Alçak Geçiren Geniş Bant Harmonik Filtresi	Seri Pasif Harmonik Filtresi	Şönt Pasif (Ayarlı) Harmonik Filtresi	Seri Pasif AC Giriş Reaktörü
Yapısı				
Filtrelenecek Harmonik Frekansları	Rezonans frekansı üzerindeki tüm frekanslar	3. 5. gibi özel ayarlı frekanslar	5. 7. 11. gibi özel ayarlı frekanslar	Değişken büyüklükteki tüm harmonik frekanslar
Avantajları	Tüm harmonik frekanslarını minimize eder Yükün tüm harmonik frekanslarına uygulanır Sistem rezonansı üretmez Diğer kaynaklardan harmonik kapmaz Sistem analizi gerektirmez Güç faktörünü düzeltir	Ayarlanan frekansa yüksek empedans gösterir Tek fazlı uygulamalarda 3. harmoniği azaltır Sistem rezonansı oluşturmaz Diğer kaynaklardan harmonik kapmaz Sistem analizi gerektirmez Güç faktörünü düzeltir	Ayarlanan frekansa düşük empedans gösterir Özel harmonik bileşenlere uygulanır Ayarlanan frekansa iyi bir etki yapar Sadece harmonik akımı taşır Güç faktörünü düzeltir	Düşük maliyetli Güç faktörünü düzeltir Küçük boyutludur Diğer lineer olmayan yüklerden harmonik kapmaz Sistem rezonansı oluşturmaz Güç hattı bozulmalarına karşı korur
Dezavantajları	Tüm yük akımı değerlendirilmelidir Sadece lineer olmayan yüklere uygulanabilir	Tüm yük akımı değerlendirilmelidir Ayarlandığı frekans dışındaki harmoniklere en az etkiyi gösterir Sadece lineer olmayan yüklere uygulanabilir	Sadece ayarlı frekanstaki harmoniği yok eder Diğer lineer olmayan yüklerden harmonik kapar İstenilen sınırların altında kalmak için birden fazla ayarlı filtre kullanmak gerekir Sistemin harmonik analizi gerekir	Tüm yük akımı değerlendirilmelidir En iyi durumda harmonik akım bozulmalarının %30'unu düzeltebilir Güç faktörünü biraz azaltabilir

5.3.1.5 Elham B. Makram'ın filtre tasarım yaklaşımı

Filtre tasarımındaki en önemli kriter temel frekansta istenen bir güç faktörü için bir kondansatör gurubunun seçilmesidir.

Reaktansın değeri istenen harmoniğe ayarlanır. Bununla birlikte genellikle ortak uygulama, filtrenin direncini reaktörün direncine sınırlandırmaktır. Ayrıca ayar keskinliğini biraz değiştirmek için veya frekans karşısında empedansın bant genişliğini değiştirmek için devreye direnç eklenebilir.

5.3.1.6 Temel frekans reaktif güç kompenzasyonu

X_{Cf} , X_{Lf} ve R_{Lf} parametrelerini tek ayarlı bir filtrenin temel frekans kapasitif, endüktif ve omik direnç değerleri olmak üzere, Q_f filtre tarafından sağlanması gereken toplam reaktif gücü (Q_f) belirleyelim.

n . harmonik için açısal frekans

$$\omega_n = 2\pi.f_n \quad (5.17)$$

$$\omega_n = 2\pi.(n.f_o) \quad (5.18)$$

ile belirlenir. Burada,

f_o :Güç sisteminin temel frekansdır.

f_n :Filtrenin n . harmoniğe ayarlı frekansdır.

C_f filtrenin kapasitesi ve L_f filtrenin öz endüktansı olmak üzere;

Ayarlanmış frekansta filtrenin kapasitif ve endüktif reaktansları eşit olacaktır:

$$\frac{1}{n.\omega_o.C_f} = n.\omega_o.L_f \quad (5.19)$$

veya

$$\frac{X_{Cf}}{n} = n.X_{Lf} \quad (5.20)$$

Sonuç olarak

$$n.\omega_0 = \omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_f.C_f}} \quad (5.21)$$

elde edilir.

Filtre elemanındaki bobinin direncinin (R_{Lf}) çok küçük olduğunu düşünürsek, temel frekans reaktif gücü

$$Q_f = \frac{|V|^2}{(X_{Lf} - X_{Cf})} \quad (5.22)$$

şeklinde elde edilir.

Burada $|V|$ filtrenin yerleştirildiği baradaki temel gerilimin büyüklüğüdür. (5.18) ve (5.20) denklemlerine bağlı olarak filtrenin toplam reaktif gücü şu şekilde elde edilir.

$$Q_f = \frac{|V|^2}{\left(\frac{X_{Cf}}{n^2} - X_{Cf}\right)} = \frac{|V|^2}{X_{Cf}} \cdot \frac{n^2}{(1 - n^2)} \quad (5.23)$$

Filtrenin endüktif reaktansı ve direnci ise,

$$X_{Lf} = \frac{X_{Cf}}{n^2} = \frac{|V|^2}{Q_f \cdot (1 - n^2)} \quad (5.24)$$

$$R_{Lf} = \frac{n.X_{Lf}}{Q} \quad (5.25)$$

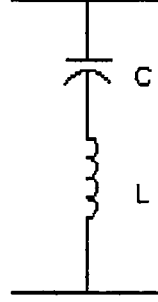
olarak bulunur. (Q bobinin kalite faktörüdür)

Eğer filtrenin sağlaması gereken reaktif gücünün değeri bilinirse, 5.21 eşitliği kullanılarak filtrenin kapasitif bileşeni, 5.22 eşitliği kullanılarak filtrenin endüktif bileşeni hesaplanabilir. Farklı kalite faktörlerinin değerleri standart imalatçı tablolarının kullanılmasıyla bulunarak 5.23 eşitliğinden R_{Lf} değeri bulunur.

5.3.1.7 Filtre tasarımında ekonomik bakış açıları

Tek ayarlı filtreler için maliyet herhangi bir filtrenin tasarımında önemli bir kriterdir. Tek ayarlı filtreler en ucuz olanıdır. Sönümlü filtrelerin büyük bir direnci ve yüksek kondansatör değeri vardır. Bu yüzden sönümlü bir filtre tek ayarlı bir filtreden daha pahalı olmaktadır. Tek

ayarlı bir filtrede toplam gerilim filtre elemanlarının gerilimleri toplamıdır, yani



Şekil 5.10 Tek ayarlı filtre.

$$V \cong V_L + V_C \quad (5.26)$$

dir. Burada V_L , V_C ve V sırasıyla filtrenin endüktans ve kondansatör gerilimleri ve filtre boyundaki gerilimdir. Kondansatör gerilimi için,

$$V_C \cong V \cdot \frac{n^2}{(n^2 - 1)} \quad (5.27)$$

yazılabilir. Aşağıdaki denklemler kullanılarak filtre bileşenlerindeki temel ve harmonik reaktif gücü elde edilebilir.

$$\frac{V_C^2}{X_{Cf}} = Q_f \cdot \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) [\text{kVAr}] \quad (5.28)$$

Harmonik kapasitif reaktif gücü de şu şekilde elde edilir.

$$\frac{\left\{ I_{fn} \cdot \frac{X_{Cf}}{n} \right\}}{\frac{X_{Cf}}{n}} = I_{fn}^2 \cdot \frac{|V|^2 \cdot n^2}{Q_f \cdot n(n^2 - 1)} \quad (5.29)$$

Burada I_{fn} n. harmonik için filtrenin akımıdır.

Temel endüktif ve reaktif güç şu şekilde elde edilir.

$$\frac{V_L^2}{X_{Lr}} = |V|^2 \cdot \left\{ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right\}^2 \cdot \frac{1}{n^2 \cdot X_{Cf}} \quad (5.30)$$

5.24 eşitliğinin 5.26 eşitliğinde yerine yazılması ile

$$\frac{|V_L|^2}{X_L} = \frac{Q_f}{n^2} \cdot \left\{ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right\} \quad (5.31)$$

elde edilir. Benzer şekilde harmonik endüktif reaktif güç, ayarlı harmonik frekansı için kapasitif güce eşit olur ($X_{Cn} = X_{Ln}$).

Toplam maliyet aşağıdaki gibi verilir.

$$TM = Q_f \cdot \left\{ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right\} + \left\{ \frac{I_{fn}^2 \cdot |V|^2}{Q_f \cdot n} \right\} \cdot \left\{ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right\} + \frac{Q_f}{n^2} \cdot \left\{ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right\} + \left\{ \frac{I_{fn}^2 \cdot |V|^2}{Q_f \cdot n} \right\} \cdot \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (5.32)$$

Toplam maliyet şu şekilde de yazılabilir.

$$TM = Q_f \cdot \left\{ J_C + \frac{J_L}{n^2} \right\} + \frac{1}{Q_f} \cdot \left[\frac{I_{fn}^2 \cdot |V|^2}{n} \cdot (J_C + J_L) \right] \quad (5.33)$$

$$TM = K \cdot Q_f + \frac{G}{Q_f} \quad (5.34)$$

J_C ve J_L sırasıyla kondansatör ve endüktansın TL/kVAr olarak birim maliyeti, n ayarlı harmonik frekansı, Q_f ise filtrenin vereceği reaktif güçtür.

5.3.1.8 Minimum filtre

Minimum filtre olarak minimum maliyetli filtre tanımlanır. Bu filtreler tasarım esnasında reaktif güç kompanzasyonunun önemli olmadığı zamanlarda kullanılır. Minimum filtre şu şekilde elde edilir,

$$\frac{d(TM)}{dQ_f} = K - \frac{G}{Q_f^2} = 0 \quad (5.35)$$

Böylece

$$Q_f^2 = \frac{G}{K}, Q_f = \sqrt{\frac{G}{K}} \quad (5.36)$$

olur.

5.34 eşitliğindeki Q_f 'in değeri 5.33 eşitliğinde yerine yazılarak

$$T_{M_{\min}} = 2\sqrt{K \cdot G} \quad (5.37)$$

olarak elde edilir. Bununla birlikte, ekonomik açıdan ideal gözüken ve yukarıda elde edilen minimum bir filtre gerilim veya akım bozulmanın belirtilen sınırların altına indirilmesinde çok etkili olmayabilir. Daha sonra ikinci olarak filtre boyutunun (bozulmanın azaltma etkinliğinin) düşünülmesi ve filtre performansının değerlendirilmesi faydalı olacaktır.

5.3.1.9 Filtre çeşidinin seçimi

Bir filtre ya simülasyon programlarından ya da harmonik kaynağındaki gerçek kaydedilmiş verilerden elde edilen akım ve gerilimin harmonik içeriklerine göre tasarlanır. Dalga şekillerinin büyük bir kısmında daha düşük dereceli harmoniklerde büyük bir bozulma yüzdesi vardır. Bu yüzden tek ayarlı filtreler bu harmonikleri elimine etmek için tasarlanır. Harmonik derecesi artarken harmonik akımların değeri düştüğünden, daha yüksek dereceli harmoniklerin geniş bir bant aralığını engellemek için sönümlü bir filtre ya da yüksek geçiren filtre tavsiye edilir. Bu filtreler daha düşük dereceli harmoniklerde yüksek empedans (kapasitif) ve daha yüksek dereceli harmoniklerde sabit omik direnç sağlarlar. Q 'nun 0.5 ile 2 arasında değer aldığı

$$R_f = Q^2 \sqrt{X_{L_f} \cdot X_{C_f}} \quad (5.38)$$

eşitliğinden filtrenin direnci bulunabilir. Diğer elemanların değerleri tek ayarlı filtrelere benzer şekilde elde edilir.

Filtre kollarının sayısı gerilim ve akımın harmonik bileşenlerinin yüzdesine bağlı olarak seçilir. Temel frekans reaktif gücü genellikle eşit bir şekilde farklı filtre kolları arasında bölünür, fakat bu her zaman doğru olmayabilir. Bununla birlikte eğer varsa rezonans problemlerini azaltmak için filtreleri sistemde başka yere yerleştirmek faydalı olabilir.

5.3.1.10 Damian A. Gonzales'in filtre tasarım yaklaşımı

İstenmeyen harmonik akımlarının sisteme akması iki yöntemden birisiyle engellenebilir.

1. Harmonik akımlarını bloke etmek için yüksek bir seri empedansın kullanımı
2. Harmonik akımlarının düşük empedanslı bir şönt yol yardımıyla akıtılması

Seri filtreler tam yük akımını taşımali ve tam hat gerilimi için yahtılmaladırlar. Buna karşılık

şönt filtreler yük akımının sadece bir kısmını taşırlar. Seri filtrelerin maliyetinin yüksek olması ve şönt filtrelerin temel frekansta reaktif güç ihtiyacını karşılamamasından dolayı genellikle şönt filtreler tercih edilir. En yaygın şönt filtreler tek ayarlı ve yüksek geçiren filtredir. Bu iki özellikli filtre tasarımı en kolay ve uygulaması en ucuz olanıdır.

5.3.1.11 Tek ayarlı filtre

Tek ayarlı filtre kullanımı en yaygın olan filtredir. Filtre aşağıdaki karakteristikleri göstermektedir.

- Ayarlandığı frekansta çok küçük bir empedans göstermektedir, böylece o frekanstaki harmonik bileşenlerin çoğunu etkili bir şekilde şöntlemektedir.
- Kaynak empedansı endüktif olduğunda, filtrenin ayarlandığı frekans değerinden daha düşük bir frekansta meydana gelen bir rezonans piki vardır.
- Rezonans frekansının yakınlığından dolayı ayarlı frekansın altında empedansta keskin bir artış vardır.
- Filtrenin ayarlandığı frekansların üzerinde frekansla empedans artar.

5.3.1.12 Tek ayarlı filtrenin tasarım eşitlikleri

Filtre kolunun empedansı şu şekilde verilebilir,

$$Z = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (5.39)$$

İmajiner kısmı sıfıra eşit olduğunda rezonans meydana gelir, o anda empedans R direncinin değeriyle sınırlandırılır. Filtrenin ayarlı olduğu frekans seri rezonansla neticelenen ω 'nın değeriyle verilir. Bu frekans şu şekildedir.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5.40)$$

Harmonik derecesi n. harmonik frekansının temel sistem frekansına bölünmesiyle elde edilir, n. harmonikte sistemin endüktif ve kapasitif reaktansları şu değerleri alır.

$$X_{Ln} = n\omega L \quad (5.41)$$

$$X_{Cn} = \frac{1}{n\omega C} \quad (5.42)$$

Rezonans durumunu r indisi ile gösterirsek rezonans halinde

$$X_{Lr} = X_{Cr} \quad (5.43)$$

dir.

5.3.1.13 Kalite faktörü

Kalite Faktörü ayar keskinliğinin ölçüsüdür.

$$Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{X_{Lr}}{R} = \frac{X_{Cr}}{R} \quad (5.44)$$

olarak verilebilir. Denklemden X_{Lr} ve X_{Cr} reaktans değerleri, rezonans frekansındaki değerlerdir. Tek ayarlı filtrenin kalite faktörüyle ilgili olarak şunları söyleyebiliriz:

Q 'nın değeri bazen filtreleme performansı hususunda göz önüne alınır. Bunun sebebi filtrenin cevabını önemli ölçüde değiştirmesi gereken R direncinin değerinin genellikle filtrede kayıpların önemli ölçüde artmasına sebep olmasından dolayıdır.

R sadece endüktanstaki dirençten ibarettir. Bu durumda filtrenin Q değeri ayarlı reaktörün X/R değerinin R katına eşittir. Bu durum Q kalite faktörünün çok büyük bir değeriyle ve çok keskin bir filtrelemeyle neticelenir.

5.3.1.14 Tek ayarlı filtrenin tasarım düşünceleri

Filtrenin kaynak empedansı ile etkileşime girmesiyle rezonans meydana gelir. Bu nokta filtrenin ayarlandığı frekansın altındaki bir frekanstır. L_s kaynak öz endüktansı olmak üzere,

$$f_{sis} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(L_s + L)C}} \quad (5.45)$$

Çok kısımlı paralel tek ayarlı filtre tesisatlarında her bir filtrenin tek bir rezonans piki vardır. Rezonans pikinin kendi Q değeri vardır.

$$Q_{sis} = \frac{1}{(R + R_s)} \sqrt{\frac{(L_s + L)}{C}} \quad (5.46)$$

5.38 ve 5.44 eşitliklerinin incelenmesinden paralel rezonans pikinin ve filtre ayar yakınlığının tamamen kaynak endüktansına bağlı olduğu açıktır. Komşu rezonans noktalarıyla ilişkili bu problem filtre değeri değişimidir. Eğer bir filtre kesin olarak ilgili frekansta ayarlı ise, ayarlı

frekansta yukarıya doğru olan bir değişme harmonikden görüldüğü gibi empedansta keskin bir artışa sebep olacaktır. Bu durumda sonuçtaki gerilim yükselmesi tehlikeli olabilir.

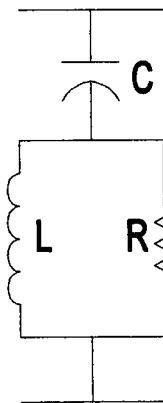
Filtre ayarlı frekansının değişimine sebep olacak etkenler şunlardır:

- Kondansatörün sigortasının atması. (Bu hal toplam kapasiteyi düşürür ve bu suretle filtrenin ayarlı olduğu frekansı artırır.)
- Ayarlı her iki reaktör ve kondansatör ünitelerindeki imalat toleransları
- Sıcaklık değişimleri
- Sistem değişimleri

Bunu göz önünde bulundurarak filtreyi ayarlanması düşünülenin biraz altında bir frekansa ayarlamak avantajlı olabilir. Bu uygun bir harmonik filtrelenmesini sağlayacaktır. Bundan dolayı filtreler tahminen düşünülen frekansın yüzde 3 ile yüzde 10 altına ayarlanır.

5.3.1.15 Yüksek geçiren filtre tasarımı

Şekil 5.11'deki yüksek geçiren filtre belirli bir köşe frekansının üzerinde düşük empedans göstermektedir. Yüksek geçiren filtre köşe frekansının üzerinde tüm harmoniklerin büyük bir yüzdesini şöntleyecektir. Köşe frekansı elimine edilmesi gereken en düşük harmonikte yerleştirilmiş bir yüksek geçiren filtre bütün filtreleme işlemi için kullanılır. Şu iki faktör öyle bir uygulamanın yapılmasına imkan vermeyebilir.



Şekil 5.11 Yüksek geçiren filtre.

1. Yüksek geçiren filtrenin kendi geçiş bandındaki en düşük empedansı kendi ayar frekansındaki tek ayarlı filtreninkiyle mukayese edilebilecek bir değeri hiç bir zaman meydana getirmez.

2. Tüm sistem harmoniklerinin yüzdesinin bir filtre üzerinden şöntlenmesi, filtrenin temel frekans açısından çok önem verilmesini gerektirebilir.

5.3.1.16 Yüksek geçiren filtre tasarım eşitlikleri

Yüksek geçiren filtreler üç değişik şekildedir. Birinci dereceden yüksek geçiren filtrenin temel frekansta büyük güç kayıpları vardır, ve bu yüzden nadiren kullanılırlar. İkinci dereceden yüksek geçiren filtre uygulaması en kolay olandır. İyi bir filtreleme yapar ve temel frekans kayıplarını düşürür. Üçüncü dereceden yüksek geçiren filtrenin düşük performansı ikincisinden iyidir, fakat filtrelenmesi daha az verimlidir.

İkinci dereceden yüksek geçiren filtrenin empedansı

$$Z = \frac{1}{j\omega C} + \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} \right)^{-1} \quad (5.47)$$

Filtrenin ayarlandığı frekans (köşe frekansı) 5.38 eşitliğinde verilmiştir. Filtrenin kalite faktörü de şu şekilde verilir.

$$Q = \frac{R}{(L/C)^{1/2}} = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{X_C} \quad (5.48)$$

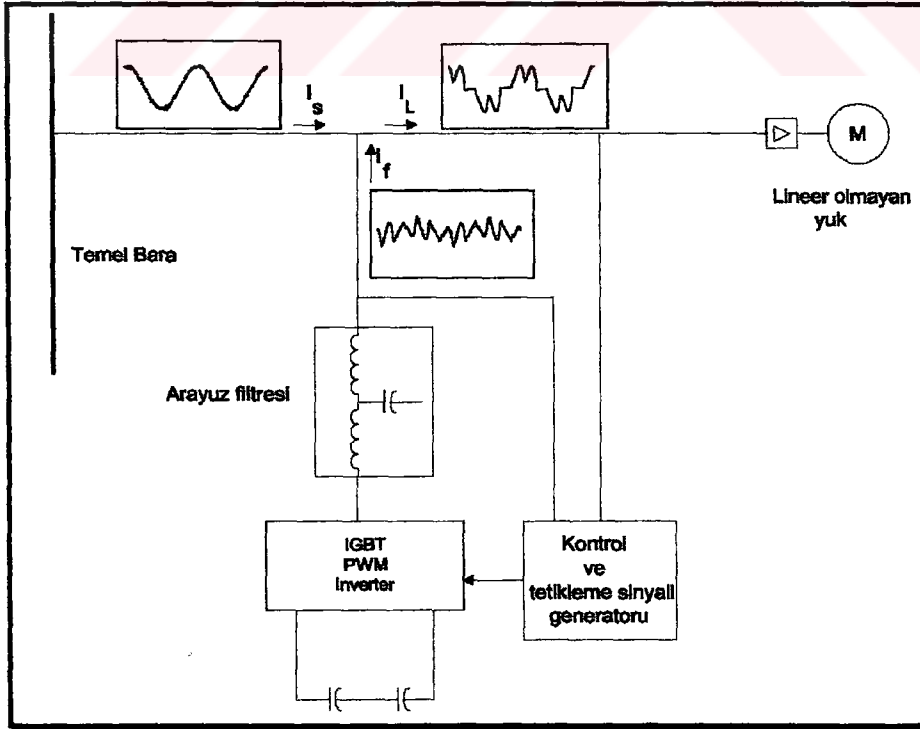
$r = \frac{X_C}{X_L}$ eşitliği de yüksek geçiren filtre için sınırlıdır. Yüksek geçiren filtre de Q (kalite faktörü) 0.5 ile 2 arasında değişik değerler alır. Köşe frekansında Q'nun değeri 2 iken filtrelemeden daha çok söz edilir. Daha yüksek frekanslarda filtre empedansı durmadan yükselirken Q'nun daha düşük değerleri için köşe frekansındaki cevabı görülemez ve frekans artarken empedans aşağı yukarı sabittir. Q'nun seçiminde düşünülebilecek diğer faktörler şunlardır:

- Filtrenin ayarlı olduğu frekans
- Telefon girişiyle olan ilişki
- Kayıplar

5.4 Aktif Filtre

Harmoniklerin filtrelenmesi için pasif filtrelerin kullanılmasında karşılaşılan en önemli iki problem, bunların mevcut dağıtım sistemine özel olması sebebiyle mevcut dağıtıma ekler gelmesi veya yüklerin artması durumunda ilk yapıyı geçersiz kılması ve sisteme montajlarının oldukça zor olmasıdır. Günümüzde kullanım alanı gittikçe yaygınlaşan aktif filtre düşüncesinin temelleri Bird vd. (1969) tarafından atılmış, daha sonra Ametani (1972) tarafından geliştirilmiştir. Gelişen güç elektroniği teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak 1980'li yılların başlarından itibaren kullanımı artmış ve endüstriyel tesislerde kullanılmaya başlanmıştır. Aktif filtrelerin en önemli avantajı mevcut dağıtımda değişiklikler yapıldığı zaman bile, etkili bir şekilde harmonikleri önler.

Aktif filtrenin çalışma prensibi Şekil 5.12'de görülmektedir. Buna göre aktif filtreler yük tarafından çekilen harmonikleri analiz ederler ve uygun bir fazda yüke aynı harmoniği ters fazda enjekte ederler. Sonuç olarak, istenilen noktada harmonik akımlar sınırlanır. Bu da harmoniklerin şebekeden çekilmemesi demektir. Güç elektroniği uygulamaları geliştikçe bu konu da ilerleme göstermiştir. Örnek olması açısından bundan sonraki açıklamalarda Mark McGranagan'un 1994'de yaptığı aktif filtre modeli incelenecektir.



Şekil 5.12 Aktif filtre blok devresi.

Çok değişik aktif filtre konfigürasyonları uygulanmasına rağmen aktif filtrenin

değerlendirilmesinde standart bir metot yoktur. Güç elektroniği temelli yüklerin (hız ayar sürücüler, anahtarlama güç kaynakları, vb.) güç sistemindeki verim ve kontrolü geliştirmesine rağmen genel olarak harmonik bozulmalara neden olmaktadır. Ayarlı pasif filtrenin devreye uygulanması ile yeni sistem rezonansları oluşur ki bunlar sistem koşullarına bağlıdır.

Pasif filtre değerleri yükün reaktif güç ihtiyacına ve güç faktörü değerinin yükün durumuna göre değişmemesini önlemek için dikkatlice seçilmelidir. Aktif filtrelerin avantajı reaktif güce gerek duymadan harmonikleri bastırabilmesidir. Aktif filtrenin değerleri aynı lineer olmayan yük için pasif filtreden daha az olabilir ve bir frekanstan diğerine taşınan harmonik problemlerini üretecek sistem rezonansı oluşturmaz.

Aktif filtreler, lineer olmayan yüklerde oluşan harmonik bileşenleri yok etmek için güç elektroniği elemanlarını kullanır. Bu aktif filtreler oldukça yeni olup çok değişik amaçlar için yapılandırılır. Her yapıda genel filtre değerlerinin seçilmesi oldukça zordur. Geçici elektro manyetik program (EMTP) değerlendirmeleriyle modele göre ayrıntılı olarak aktif filtre değerleri elde edilmektedir.

5.4.1 Aktif filtre dizaynı

Bu bölümde aktif filtrenin kısımları detaylı olarak anlatılacaktır.

5.4.1.1 Aktif filtre ayarları

Aktif filtreleri genel olarak şönt ve seri olarak ikiye ayırabiliriz. Günümüzde yaygın olarak şönt tipi aktif filtre kullanılmaktadır. Çizelge 5.3'de şönt aktif filtre ile seri aktif filtrenin karşılaştırılması verilmiştir. Şönt filtrenin kullanım alanlarını şu şekilde sıralayabiliriz.

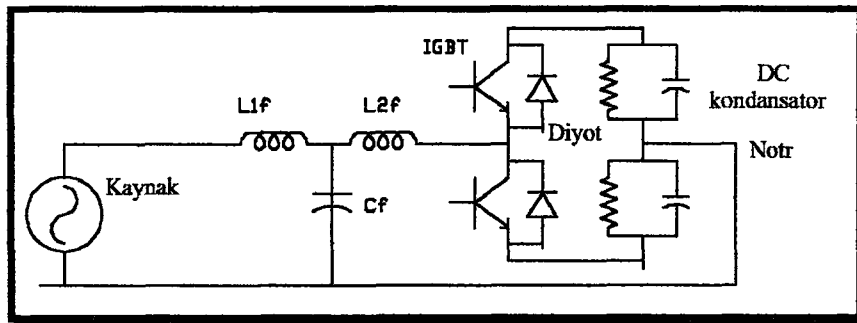
- Sanayi için diyot veya tristörlü doğrultucular ile frekans dönüştürücülerde IGBT'lerle reaktif güç kompanzasyonlu veya kompanzasyonsuz harmonik kompanzasyonunda.
- Ark fırınlarında GTO tristörlerle flicker kompanzasyonunda.
- Hızlı tek raylı trenlerde GTO tristörlerle gerilim regülasyonu ayarında.
- Şönt aktif filtre, tesiste var olan pasif filtre ile kombine olarak da çalışabilmektedir. Ancak bu durumda frekans domeninde kompanzasyon paylaşımı konusunda problem çıkabilmektedir.

Çizelge 5.3 Seri ve şönt aktif filtrelerin karşılaştırılması.

	Şönt aktif filtre	Seri aktif filtre
Güç devresi	Akım çevrimli gerilim beslemeli PWM inverter	Akım çevrimsiz gerilim beslemeli PWM inverter
Davranışı	Akım kaynağı	Gerilim kaynağı
İlave işlevi	Reaktif güç kompenzasyonu	AC gerilim regülasyonu
Yüke uygun harmonik üretimi	Endüktif yüklü diyot veya tristörlü doğrultucular ve cycle dönüştürücüler	Kapasitif yüklü büyük kapasiteli diyot doğrultucular

Aktif filtreler lineer olmayan yüklerdeki harmonik akımlarını elemine etmek için güç elektroniği yarıiletkenlerini kullanır. Bu araştırmada gerilim beslemeli dalga genişlik modülasyonlu (PWM) bir inverter kullanılmış olup şekil 5.12'deki gibi sistem ile şebeke arasındaki ara yüzdür. Bu sistemde filtre yük ile paralel olarak bağlanmıştır. Bu sebepten bu düzenleme paralel aktif filtre olarak tanımlanacaktır. Şekil 5.12'de harmonik akımın aktif filtre tarafından karşılanması ile kaynak akımın sinüzoidal olduğu görülür.

Gerilim beslemeli inverter kullanılarak aktif filtrenin harmonik kontrolü sağlanması mümkündür. Bu inverter DC kondansatörü güç kaynağı olarak kullanır ve yüksek frekansta anahtarlama yaparak lineer olmayan yükteki harmonikleri yok eder. Şekil 5.13'de inverter bağlantısı gösterilmiştir.



Şekil 5.13 İnverter bağlantısı.

Aktif filtrenin yükteki harmonik akımlarını elemine etmek için gerçek bir güce gereksinimi yoktur. Yok edilecek harmonik akımları reaktif güç olarak gösterilir. Kaynak empedansından akan harmonik akımının azalması ile harmonik gerilim bozulmalarında da bir azalma gözlenir. Bu sebepten yok edilecek harmoniklerin reaktif güçleri ve gerçek akım dalga

şekilleri (efektif ve tepe akım değerleri) belirlenerek DC kondansatör ve filtre elemanları belirlenebilir.

Yok edilecek harmonik akım dalga şekilleri gerilim beslemeli inverter ve ara yüz filtresi ile elde edilebilir. Ara yüz filtresi geniş izolasyona sahip bir endüktanstan oluşur ve inverter gerilim sinyali akım sinyaline dönüştürür. Filtrenin diğer kısımları ise dalga şeklini düzgünleştirmek ve geniş bir frekans aralığında izolasyonu sağlamak amacıyla kullanılır. Arzu edilen akım dalga şekli inverterdeki IGBT anahtarlama elemanları kontrol edilerek elde edilir. Kontrol edilen akım dalga şekilleri inverterin anahtarlama frekansından ve ara yüz endüktansının gerilim geçişine göre sınırlandırılır.

Arayız endüktansından geçen d_i/d_t değerinin maksimum değeri filtre tarafından belirlenir. Bunun sebebi ise yüksek dereceli harmonikler için yüksek değerlerde d_i/d_t değerleri gerekebilir. Ancak burada ara yüz endüktansının sınırlandırılması gerekir, yüksek değerlerdeki endüktans güç sistemini korumada daha iyi bir izolasyon sağlar, bununla birlikte yüksek değerlerdeki endüktans aktif filtrenin yüksek dereceli harmonikleri yok etme yeteneğini sınırlandırır.

5.4.1.2 EMTP Aktif filtre modeli

Elektro manyetik geçiş programı (EMTP) aktif filtrenin kontrol sistemindeki ihtiyaçları görmek ve verimini ölçmek için iyi bir çalışma programıdır. Bu modelle hiçbir prototip veya devre dizayn etmeden olası seçenekleri değerlendirmek mümkündür. Bu modeldeki önemli elemanlar aşağıda açıklanmıştır.

5.4.1.3 IGBT Gerilim Beslemeli İnverter

Gerilim beslemeli inverter aktif filtrenin en önemli merkezidir. Bu üç fazlı tam dalga köprüde birbirinin aynı olan 6 adet IGBT, toplam 3 kol üzerinde bulunmaktadır. DC kondansatör pozitif ve negatif uçlar arasına bağlanarak bu modelle her kolun ayrı ayrı kontrolü sağlanmış olup, dengesiz yük veya tek fazlı yükler için bile aktif filtre ile kontrol mümkün kılınmıştır.

5.4.1.4 Kontrol Referansı ve Örnekleme

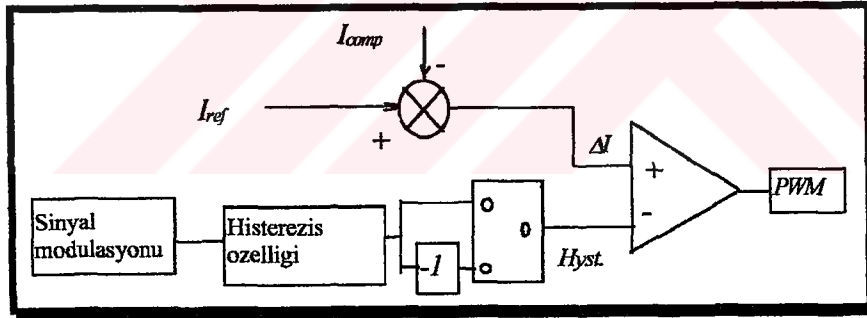
Bu paralel aktif filtre modelinde kontrol, lineer olmayan yükün akım şekli izlenerek yük akımındaki harmonikleri yok edecek kapı sinyalleri elde edilmiş ve inverterdeki IGBT kapı uçlarına verilmiştir. Yük akımındaki örnekleme yük akımındaki tüm akım harmoniklerini karakterlerini belirleyecek kadar çok olmalıdır. Bu örnekte 256 örnekleme kullanılmıştır. Daha sonra bu örnek yük akımı işlenerek harmonik gücünü bastıracak bir referans elde edilir.

Yük akımındaki harmonikleri yok edecek birçok kontrol metodu bulunmaktadır. Tüm bu referans akım sinyallerinin birbirinden ayrılan özellikleri bulunmaktadır. Buradaki örnekte FFT olarak adlandırılan metot kullanılacaktır.

Bu metot yük akımındaki her bir harmonik bileşen için dönen FFT metodu ile örnek yük akımı dalga şeklinin aynı fazda tam tersini alır. Bu hesaplamalar her döngüde yapılarak arzulanan bastırma sağlanır. Bu döngülerden birindeki gecikme bile hızla değişen karakteristikteki lineer olmayan yük için bir problem olabilir.

5.4.1.5 PWM Tetikleme Darbe Jeneratörü

Birçok PWM uygulamasında iki anahtarlama olayı, güç frekans döngüsüne bağlı olarak değişir bunun için ortalama frekans değeri kullanılır. Prensipte inverterin yüksek anahtarlama akım dalga şekillerini daha iyi bastırdığı sanılır. Bununla birlikte aktif filtrenin gerçek performansı izoleli endüktansın yüksek anahtarlama ile sınırlanmış olur. Ortalama frekansın kontrolü şekil 5.14'deki gibi PWM tetikleme darbe jeneratöründe bir histerezis karakteristiği oluşturur.



Şekil 5.14 PWM tetikleme darbe jeneratörü.

Şekil 5.14'de, I_{ref} bastırılacak akımın referans sinyalidir. I_{comp} ise inverterin bir kolundaki çıkış akımıdır. ΔI ise hata akım şekli olup karşılaştırıcı ünitenin pozitif girişine bağlanır. Negatif giriş ise histerezis karakterli jeneratörün çıkışı ile bağlantılıdır.

Ne zaman I_{ref} I_{comp} 'dan büyük olur, ΔI pozitif olur. Eğer ΔI değeri maksimum bandı aşarsa karşılaştırıcı ünite çıkışı yükselerek köprü kollarındaki tetiklemeleri arttırarak akımı yükseltir.

Eğer I_{comp} I_{ref} 'dan büyük olursa, ΔI negatif olur ve bandın minimum değerini geçerse işlemler tersine dönerek kollarındaki akım azaltılır. Hata akım sinyalini arttırarak veya azaltarak ortalama anahtarlama frekansı değiştirilebilir. Tetikleme algoritması delta modülasyonu olarak adlandırılır ve en basit şekliyle eşit histerezis bant genişliğindedir. Bu durumda

modülasyon frekansı sabittir. Lineer olmayan modülasyon sabit bant genişliği ile anahtarlama değişimlerini azaltır.

5.4.1.6 Sistem Ara yüz Modülü

Sistem ara yüz modülü aktif filtrenin bağlandığı şebeke ile gerilim beslemeli inverterin çıkışı arasında filtreleme yapar ve izolasyonu sağlar. İzolasyon iki adet endüktans L_{1f} , L_{2f} ve bunlara bağlı yüksek frekanslı filtre formundaki küçük kondansatörden oluşur.

İzolasyon endüktansı, aktif filtrenin çıkışında akım kaynağı gibi davranmasını sağlar ve DC kondansatörün şebekenin fazlar arası geriliminden bile daha büyük bir gerilimle şarjını sağlar. Ayrıca haberleşme endüktansı gibi davranarak bilgi alıp vermedeki akım atlamalarını azaltır ve anahtarlama sırasındaki ani akım değişimlerini önler.

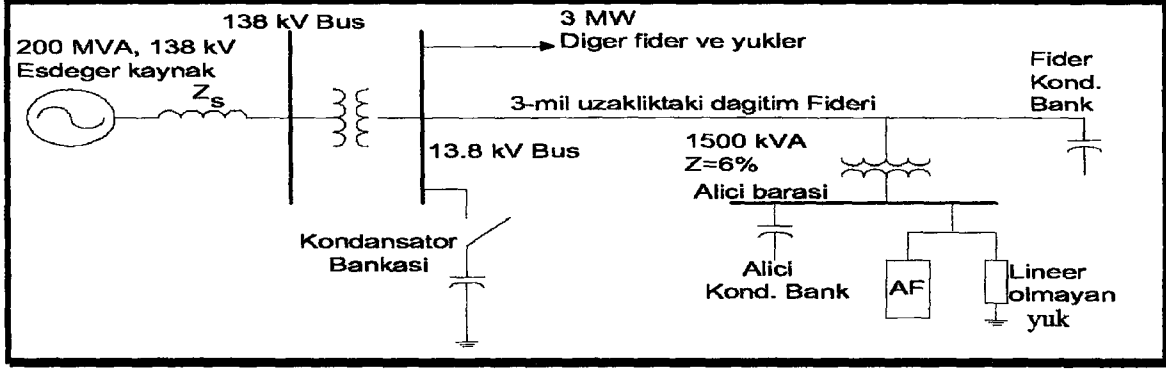
Filtrenin PWM anahtarlama inverter yüksek frekanslı bileşenler üretir. Bu bileşenlerin kaynak olarak sisteme girmemesi için 2. dereceden pasif filtre gibi bir kondansatör izoleli endüktansa ilave edilir. Kondansatörün de sistemden L_{2f} endüktansı ile izole edilir.

Endüktans ve kondansatörün değerlerinin belirlenmesi için inverter anahtarlama frekansının kontrolü, güç sistemi anahtarlama geçişi ve bastırılacak lineer olmayan yükün karakteristikleri bilinmelidir.

5.4.1.7 Aktif Filtre performansının değerlendirilmesi için örnek sistem

Değişik yükler için filtre performansı değerlendirilmiş ve sistem anahtarlama olan etkileri incelenmiştir. Şekil 5.15’da bu değerlendirme için seçilen devre görülmektedir. Önemli değerler aşağıdaki gibidir.

Kaynak Gücü: 200 MVA, transformator: 138/13,8kV 10MVA %7 empedans, Kondansatör gücü: 3 Mvar, Paralel fider için eşdeğer yük : 3MW , modellenen fider devresi: Alıcıya 3 mil uzaklıkta, fider kondansatörü 13.8 kV, alıcı transformatörü 1500 kVA %6 empedans, alıcı yükü 1MW, aktif filtre boyutları: 400V efektif, 30 A lineer olmayan değişken yük



Şekil 5.15 Örnek devre.

5.4.1.8 Lineer olmayan yük çeşitleri için aktif filtrenin değerlerinin seçilmesi

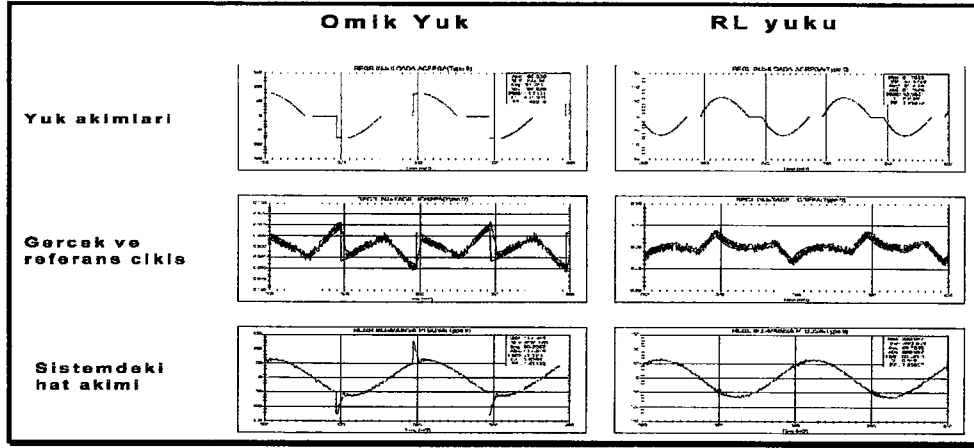
Aktif filtre uygulamalarında en önemli sorun sabit bir yükün harmoniklerini bastırmak için gerekli olan aktif filtre değerlerinin belirlenmesidir. Paralel bağlı aktif filtre için sağladığı efektif akım değeri ile ölçülür. Böylece değişik tipteki yüklerin harmoniklerini bastırmak için gerekli efektif akım değeri bulunur. Burada tipik birkaç lineer olmayan yük için aktif filtre değerleri simüle edilmiştir.

Paralel bağlı aktif filtrenin pasif filtreye göre bir özelliği de istenilen harmoniği yok ederken sınırlarını kendisinin koymasındır. Bu sebepten, filtrenin güç kaynağındaki harmonikler veya yüke bağlı eksik değerli filtre için aşırı yüklenme söz konusu değildir. Bu durumda en kötü koşul eksik değerli filtrenin, lineer olmayan yük akımı harmoniklerinin hepsini bastıramamasıdır. Gerçekte lineer olmayan yükün tüm harmoniklerini bastırmak önemli değildir. Aktif filtre ile istenilen seviyedeki bir bastırma seçilebilir. Bu fikri kullanmanın bir güzel yanı da sadece yeteri kadar bir bastırma yapması ve bu şekilde filtre ya da yükün IEEE 519 – 1992 gibi özel sınırlamalara uymasındır.

5.4.1.9 Yük dalga şekillerinin filtre hassasiyetine etkisi

Yük akımı harmoniklerini bastırmada aktif filtrenin hassasiyeti özel yük akımı dalga şekillerine bağlıdır. Birbirinin aynı efektif içerikteki iki farklı dalga şekline aktif filtre uygulanması ile dalga biçimlerine bağlı olarak bir tanesi diğerine göre daha iyi bastırılmış olabilir.

AC gerilim regülatörü bu gösterimde kullanılmış olup, şekil 5.16'de iki durum karşılaştırılmıştır. İki durumdaki tek fark ise AC regülatörün yüküdür. Sol taraftaki şekilde dalga şekilleri sadece omik yük devrede iken, sağ taraftaki ise seri bağlı omik endüktif yük içindir. Yumuşak akım dalga şekilli olan RL yükü için aktif filtre performansı daha iyidir.



Şekil 5.16 Yüklerine göre regülatörlerin karşılaştırılması.

Birçok aktif filtre uygulamasında şekil 5.16'nin sağ tarafındaki gibi dalga şekilleri (örneğin, köprü doğrultucular ile ayarlanabilir hız kontrol veya tek fazlı elektronik yükler) görülür.

Genelde omik yüklü AC regülatördeki akım dalga şekilleri aktif filtre için tam olarak bastırılması çok zordur. Buradaki problem regülatörün çalışması ile birlikte çok yüksek değerdeki di/dt değerinin filtre tarafından elde edilmesidir. Özellikle tetikleme açısı 90° 'nin yakınında iken giriş kondansatöründeki gerilim minimum değerde olduğu için istenilen di/dt değerine ulaşamaz. Bunun için çıkıştaki di/dt değeri ya giriş DC gerilimini yükselterek ya da ara yüz endüktansının değerini azaltarak sağlanır. DC gerilimi arttırmadaki sınırlayıcı etken IGBT elemanının gerilim dayanımı, ara yüz endüktansının değerini azaltmadaki sınırlayıcı etken ise IGBT'nin di/dt değerine, kontrol gereksinimlerine, ara yüz pasif filtre ihtiyaçlarına ve tüm sistemin kararlılığına bağlıdır. Eğer ara yüz endüktansı çok küçük değerde ise, girişteki DC gerilim değeri normal çalışmada bile sabit bir değer gösteremez.

5.4.1.10 Kararlı hal gereksinimleri ve aktif filtre hassasiyeti

Aktif filtre değerlerinin belirlenmesinde en iyi yol lineer olmayan yükün bastırılacak harmoniklerinin efektif akım değerlerinin bilinmesidir. Şekil 5.17'de değişik tipteki lineer olmayan yükler için örnek dalga şekilleri ve tipik harmonik akım bozulmaları her yük için gösterilmiştir. Bu tipik dalga şekillerini kullanarak aktif filtrenin bastırması gerektiği harmonik akım değerleri hesaplanabilir. Sonuçta her türlü lineer olmayan yük dalga şekilleri için THD ve aktif filtrenin yükün kVA başına efektif akım değeri gösterilmiştir. Bu değerler aktif filtrenin yükteki toplam efektif harmonik akımı için temel teşkil etmektedir. Bu tabloda ayrıca simüle edilmiş aktif filtre dalga şekilleri tüm yük dalga şekilleri için verilmiştir.

Yük tipi	Lineer olmayan yük akım dalga şekli	Aktif filtre ile Sebeke akımı	Lineer olmayan yük akımı THD (%)	Sebeke Akımı THD (%)	Aktif filtre değerleri (yük efektif akım/kVA)	
					120/208 volt uygulanması	480 volt uygulanması
Tek faz Güç kaynağı			84%	8.2%	1.79	0.77
Yarı iletkenler			87%	9.6%	1.82	0.79
AC gerilim Regulator, RL yük			23%	4.3%	0.62	0.27
AC gerilim Regulator, Omik yük			51%	16.7%	1.26	0.54
6 Darbeli, Akım beslemeli inverter			31%	10.3%	0.82	0.36
6 Darbeli Gerilim beslemeli, seri enduktansız inverter			109%	13.2%	2.05	0.88
6 Darbeli, Gerilim beslemeli, %3 empedanslı inverter			45%	5.0%	1.14	0.49
12 Darbeli konverter, Akım kaynaklı inverter			13%	5.6%	0.36	0.15
12 Darbeli inverter, Gerilim beslemeli inverter			13%	6.3%	0.36	0.15

Şekil 5.17 Filtrelerin çeşitli yüklere göre karşılaştırılması.

Şekil 1'deki değerler ideal aktif filtre karakteristikleridir. Yukarıdaki sonuçlarından anlaşılıyor ki harmoniklerin yok edilmesi mükemmel bir sonuç vermemiştir. Akım kaynağındaki bozulmalar zaten şekilde aktif filtrenin hassasiyeti için gösterilmiştir. Bu sonuçlar kararlı halde yani yük değişmez iken alınmıştır. Bu sebepten FFT kontrolün cevap süresine bir etkisi yoktur. Şekil 5.17 için yapılan gözlemler şu şekilde sıralanabilir:

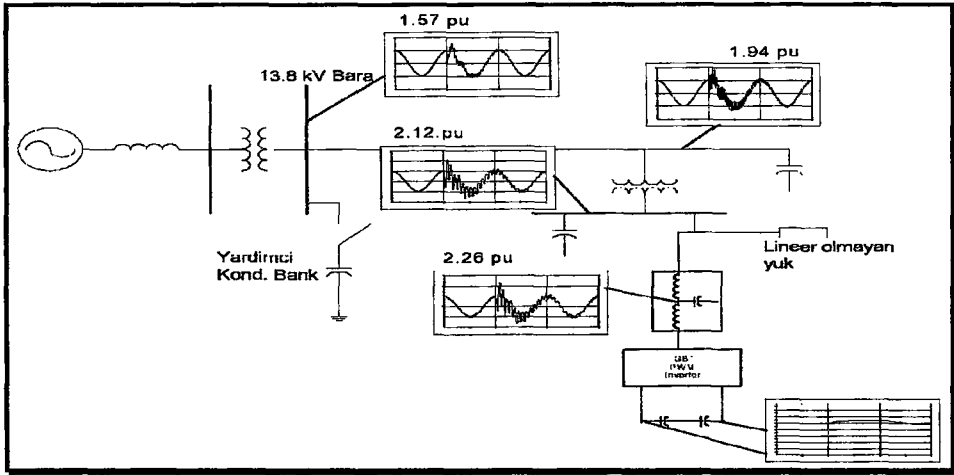
- Genel filtre hassasiyeti bastırılacak yük çeşidine bağlıdır. Yük akımı THD'si ile filtre hassasiyeti arasında basit bir ilişki yoktur.

- Aktif filtre yük akımı çok ani değişmediği zamanlarda etkisini en fazla hissettirir. Sonuç olarak, birçok gerilim beslemeli inverter tipi yükler için bozulma fazla bile olsa çok etkilidir.
- 12 darbeli doğrultucu için aktif filtre hassasiyeti çok iyi değildir. Bunun da sebebi, yüksek frekanslardaki bastırmalarda bu tüp yükler daha hakimdir.
- Pasif filtre kondansatörünün değerleri de yük akımı karakteristiklerinden bağımsızdır. Yüksek frekans içerikli (12 darbeli doğrultucu) yük akımı dalga şekillerinde filtre kondansatörüne daha çok görev düşer.

5.4.1.11 Geçici güç sistemi etkilerinin aktif filtre üzerine etkisi

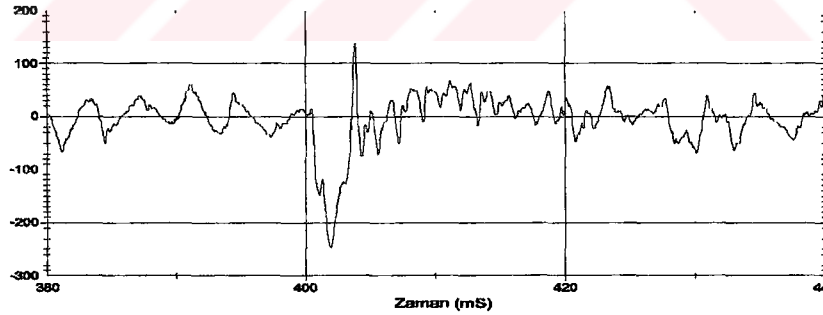
Aktif filtre yükteki geçici akım akışları için tasarlanmaz. Kararlı halde kontrol yapar. Bununla birlikte geçici haldeki koşulların aktif filtre elemanları üzerine etkisini de anlamak lazımdır. İnverter kontrolleri geçici ve kararlı hal koşullarında oluşabilecek harmonikleri engellemek için katı sınırları vardır. Pasif filtre elemanları için geçici haldeki en önemli etken şekil 5.12'den de görüleceği üzere inverterli güç sistemi ile ara yüz modülü arasındadır.

Ara yüz modülü endüktans ve kondansatör içerir. Geçici durumlarda oluşabilecek yüksek frekanslı gerilim tepelerini çok ani olarak bastırarak önlenabilir. Bu örnekte kondansatörün anahtarlama ile oluşabilecek geçici gerilim incelenecektir. Ara yüz modülünde bulunan endüktans veya kondansatör ile anahtarlama yapılan kondansatör sistemde bir osilasyona gidebilir. 3.6 MVar'lık kondansatörün anahtarlama ile sisteme olan etkisi şekil 5.17'da incelenmiştir. Kondansatör bloğunun anahtarlama ile geçici gerilim yükselmeleri meydana gelir. Aktif filtreden görüleceği gibi geçici halin karakteristiği fider kondansatör bloğunun büyüklüğüne göre değişmekte ve alıcı tarafına yakın konularak düşük gerilim değerindeki kondansatörün etkisi değerlendirilmiştir. Şekil 5.17'da hem fider hem de alıcı kondansatör grubunun birlikte kullanılması halindeki büyümeyi göstermektedir. Geçici gerilim yükselmesi ara yüz filtresi kondansatöründen geçerek düşük frekanslarda yaklaşık olarak aynı büyüklükte bir geçici gerilim darbesini alıcı istasyonunda oluşturmuştur. Aktif filtre dizaynında bu gibi durumları değerlendirmek önemlidir. Eğer izolasyon endüktansı değeri artırılmış ise, daha ciddi bir biçimde ara yüz kondansatöründeki geçici etki de artacaktır. Çözüm için ara yüz devresine bir direnç yerleştirilerek aşırı yükselme problemlerinin de önüne geçilmiş olur. Sistemdeki dalga şekilleri şekil 5.18'de gösterilmiştir.



Şekil 5.18 Sistemdeki dalga şekilleri.

Bu geçici etkinin aktif filtre akımına etkisi de incelemek önemlidir. Geçici hal gerilim değerinin DC kondansatör gerilimini geçmesi sonucu, IGBT'ye hiçbir kontrol sinyali gitmez. Bunun yerine DC kondansatörü şarj edecek bir geçici akım geçer. Şekil 5.18'deki dalga şekillerinde DC kondansatörü şarj eden akım çok önemli değildir ancak şekil 5.19'deki akım dalga şekillerinde kondansatörün anahtarlanması ile yüksek değerdeki bir geçici akım gösterilmiştir. Bu akım IGBT'nin kapısını ulaşmadığı sürece IGBT içinden geçemez. Bunun yerine ters paralel bağlı diyotlar üzerinden akar ve sistemin aşırı yüklenmesine ya da diyotların yanmasına sebep olur.



Şekil 5.19 Sistem aşırı yüklenmesi.

Bu geçici darbeler ara yüz filtresindeki kondansatörün seçiminde önemlidir. Tüm geçici darbeler kondansatör anahtarlanması ile ters paralel diyotlardan yüksek bir akımın geçmesine neden olur.

5.4.1.12 Aktif filtre sonuçları

Aktif filtreler lineer olmayan yüklerin harmonik akımlarının kontrolünde çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. En iyi performans PWM tipindeki ayarlı hız kontrolünde ve anahtarlamalı güç kaynaklarındaki gibi ani akım değişimlerinin olmadığı yüklerde elde

edilmiştir.

Aktif filtre inverteri ve kontrolü için anahtarlama kondansatörün geçici hal darbeleri çok büyük bir problem değildir. Bununla birlikte, ara yüz filtre kondansatörü yüksek gerilim pikleri yaratabilir ve inverter köprü devresindeki ters paralel diyotların aşırı yüklenmesine sebep olabilir. Alıcı tarafındaki diğer problemler de geçici darbeler ve birçok uygulamanın kondansatör gruplarındaki geçici anahtarlama darbelerini kontrol etmeye çalışmasıdır.

5.4.2 Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması

Aktif harmonik filtre ile pasif harmonik filtreyi karşılaştırdığımızda, aktif harmonik filtrenin pasif harmonik filtreye nazaran üstünlüklerini maddeler halinde şu şekilde verebiliriz.

- Harmonik yüklerin büyüklükleri ve sırası ne olursa olsun otomatik konfigürasyon
- Aşırı yüklenme riskinin kaldırılması
- Her türlü yük (tek-faz veya üç-faz) için uyumlu
- Generatör grupları ile uyumlu
- Dağıtımda istenilen herhangi bir noktaya bağlanabilme
- Güncelleştirilmesi (ilave modül ilavesi) kolay ve pratik
- Uzaktan bağlantılı kullanıcı arabirim desteği
- Kirlilik seviyesini azaltmak için bir çok filtrenin aynı dağıtımda kullanılması
- Elektrik tesisatı için en doğru ve kesin projelendirme yapılabilir
- Tüm ya da seçilen harmoniklerin süzülmesi sağlanabilir
- Şebekeye paralel bağlanır ve aşırı yüklerle karşı akım koruması ile devamlılık da sağlar
- Filtreleme kapasitesi artırımı için 4 adete kadar paralel bağlantı yapılabilir

Aktif filtre ile pasif filtrenin çeşitli durumlardaki davranışları da karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.4 Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması (İnan, 1999).

Konu	Pasif Filtre	Aktif Filtre
Harmonik akımların kontrolü	Her frekans için bir filtre ister (çok hacimlidir)	Aynı anda bir çok harmonik akımının kontrolü mümkün
Frekans değişimi etkisi	Etkinliği azaltır	Etkisi yoktur
Empedans modifikasyonu etkisi	Rezonans riski vardır	Etkisi yoktur
Akım yükselmesi etkisi	Aşırı yük ve bozulma riski	Aşırı yüklenme riski yoktur
Yeni yük eklenmesi	Filtrenin değiştirilmesi gerekebilir	Herhangi bir probleme yol açmaz
Harmonik sırasının kontrolü	Oldukça zor	Ayar ile mümkün
Temel dalga frekans değişimi	Mümkün değil	Ayar ile mümkün
Genel boyutlar ve ağırlık	Harmonik derecesine göre çok değişken	Kompakt çözümler sunar

Şekilde çeşitli filtreler için bir karşılaştırma yapılmıştır. Tüm durumlarda tek fazlı anahtarlamalı güç kaynağı son yük olarak kullanılmıştır. Filtre yüklenme özelliklerinin aynı olması için yük akım değerleri değişiktir. Çizelge 5.5’de kıyas açısından hat reaktörlü, pasif ve aktif filtre ile alınmış değerler gösterilmektedir.

Çizelge 5.5 Hat reaktörlü, pasif ve aktif filtrenin karşılaştırılması.

Alınan Değerler	Hat Reaktörlü	Pasif Filtre	Aktif Filtre
I efektif filtresiz	8.5	8.5	4.1
I efektif filtreli	6.6	6.9	2.9
PF filtresiz	0.71	0.71	0.66
PF filtreli	0.81	0.95	-0.97
Giriş Gerilim THD	2.7%	3.1%	2.2%
Çıkış Gerilim THD	27.6%	25.7%	23.4%
Giriş Tepe Gerilimi	168V	169V	170V
Çıkış Tepe Gerilimi	128V	132V	154V
Giriş Akım THD	35.9%	27.0%	23.9%
Çıkış Akım THD	36.1%	32.9%	31.2%
Giriş Gücü	729W	781W	340W
Çıkış Gücü	685W	697W	326W
% Verim	93.9	89.2	95.9

5 % Hat reaktörü 30 - 35 % THID

5% Hat reaktörü + 3% Dc hat tıkaçı 25 - 30 % THID

5. Harmonik ayarlı 20 - 30 % THID

5. + 7. Harmonik ayarlı 12 - 20 % THID

12 – Darbeli sürücü 15% THID

18 - Darbeli sürücü < 5 % THID

Geniş bantlı harmonik filtreleri 8 - 12 % THID

Birçok sürücü üreticisi genelde düşük değerli harmonikler yanında yüksek değerli birçok harmonik üretir ve bu ASD'ler, IGBT gibi aktif anahtarlama elemanlarını kullanır. Bu şekilde anahtar kontrol edilerek giriş gerilim dalga şekli aynen takip edilir. Hibrit yapı olarak adlandırılan aktif seri filtre nin yanına şönt pasif filtre konularak neredeyse mükemmel bir sinüzoidal form yakalanır.

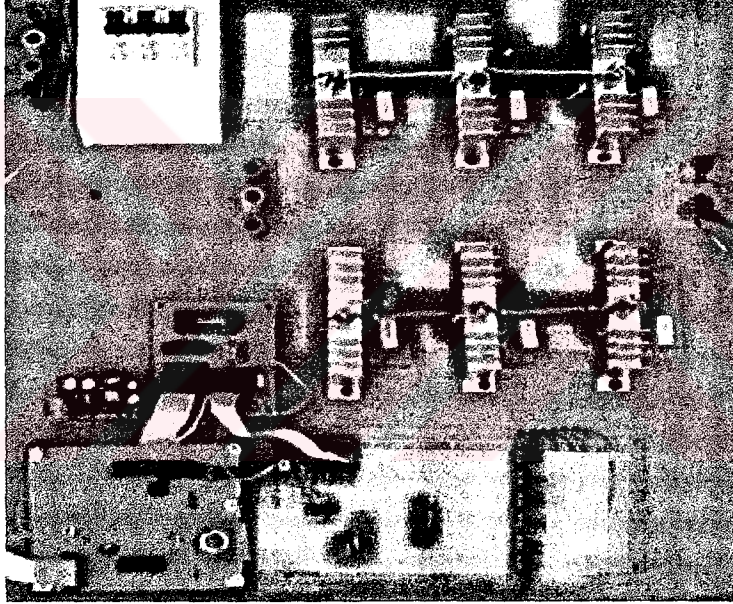
Birçok aktif filtre aktif anahtarlama elemanı (IGBT) ve dijital sinyal işleme çipleri (DSP) gibi kontrol algoritması kullanır. Ayrıca akım ve gerilim sensörleri analog dijital çeviriciler (ADC) ile bilgiyi okur ve bu gibi elemanlar artarken maliyet artar ve sistemin genel güvenilirliği azalır.

6. UYGULAMA DEVRESİ

Şebekede ve yükte oluşan harmonikleri daha iyi inceleyebilmek için hazırlamış olduğumuz düzende, 1 adet 3 fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu ve yük olarak 700Ω 'luk direnç, 1 adet 3 fazlı 1.5 kW'lık 1405 d/d'lık 2 BG gücünde motor ve son olarak R-L den oluşan yük arabasında her faz için 250 W'lık 2 adet paralel bağli 192Ω direnç ve 250 Var'lık 0.61 H'lik endüktans kullanılmıştır. Bu sistemlere sırasıyla incelenecektir.

6.1 3 fazlı tam dalga kontrollü doğrultu

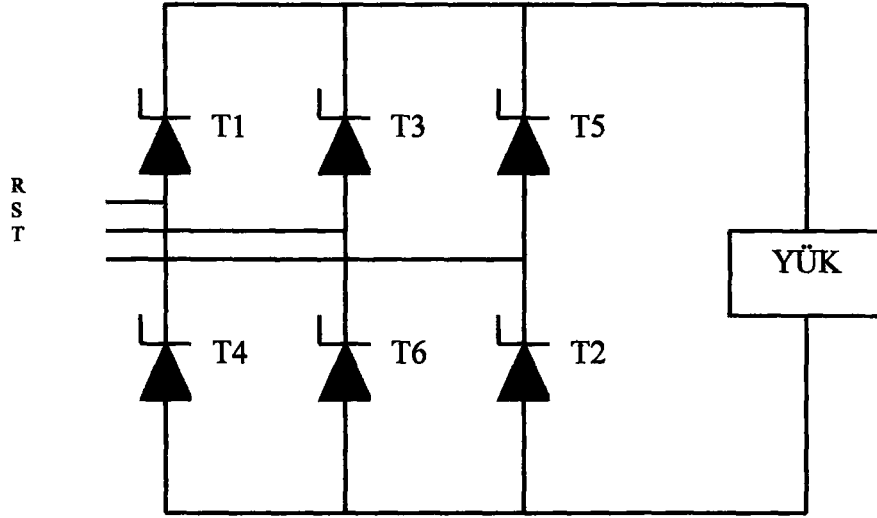
3 fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu şekil 6.1'de gösterildiği gibi tasarlanmıştır.



Şekil 6.1 3 fazlı kontrollü doğrultucu.

3 fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun yapısı ve çalışması kısaca şöyledir:

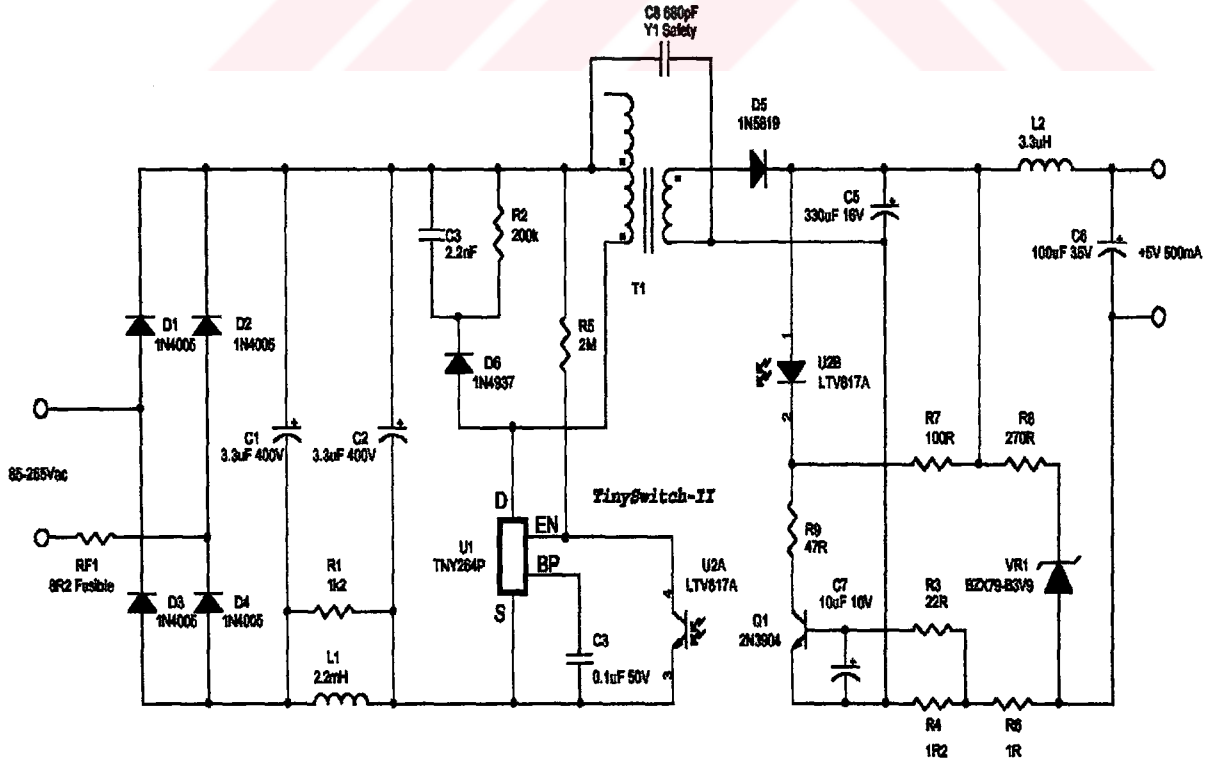
R,S,T fazlarından gelen 120° faz farklı gerilimler sırasıyla 3 kol üzerinden tristörlere bağlanmıştır. Uygun zamanda gelen tetikleme sinyalleri ile ilettime girip çıkan tristörler üzerlerinde gerilim dalgasının negatif alternansa gitmesi ile devreden çıkarlar. Burada dikkat edilmesi gereken husus aynı kol üzerindeki tristörlerin aynı anda ilettime girmemesidir. Aksi takdirde, fazlar tristörler üzerinden kısa devre olacağından yarı iletken elemanlara ve sisteme zarar verirler. Temel 3 fazlı kontrollü doğrultucu devresi şekil 6.2'de gösterildiği gibidir.



Şekil 6.2 6-Darbeli kontrollü doğrultucu.

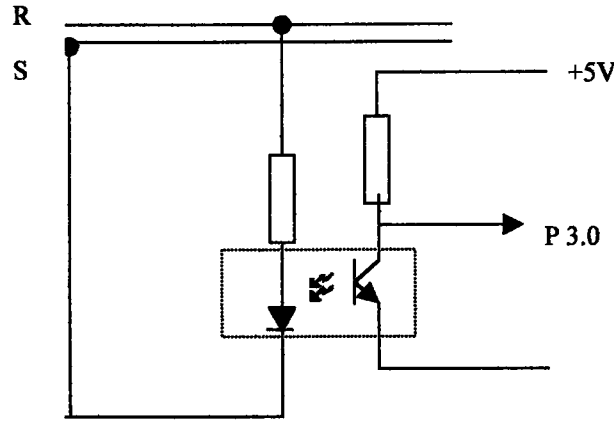
Uygun şekilde kaydırılan tetikleme sinyalleri ile kontrollü doğrultucu çıkış gerilimi 0-540V arasında değişmektedir. Tristörler 16A'e kadar akım geçirebildiğinden devremiz 8.5 kW'a kadar olan yükleri besleyebilmektedir.

Devrede kullanılan kontrol elemanlarının beslenmesi için 5 V 600mA'lık anahtarlama güç kaynağı kullanılmış olup şekil 6.3'de devre şeması gösterilmiştir.



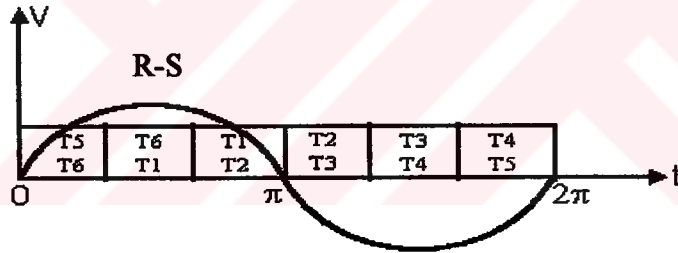
Şekil 6.3 Anahtarlama güç kaynağı.

Tristörleri tetiklemek için gerekli olan sinyalleri elde etmeden önce tetikleme sinyallerinin referansı olarak alınan R-S geriliminin sıfır geçişini görmemiz gerekir. Bunun için kullanılan devre şekil 6.4’de gösterilmiştir.



Şekil 6.4 R-S sıfır geçişi algılama devresi.

Sıfır geçişini gördükten sonra tetikleme sinyallerinin hangi sırayla geleceğini görmek için şekil 6.5’den yararlanılır.

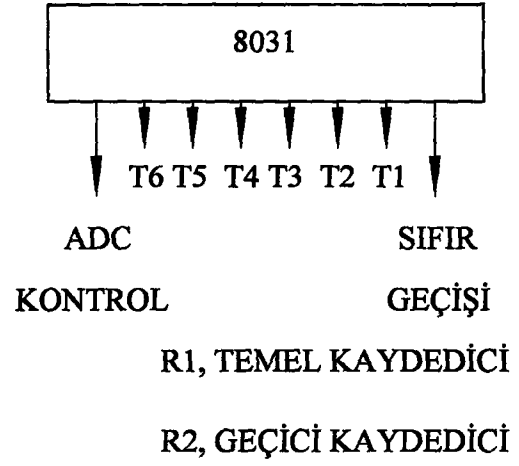


Şekil 6.5 Tristör tetikleme sırası.

Bir periyot = $2\pi = 360^\circ$ dir. 50 Hz’lik şebekede bir periyot 20ms’ye eşittir. Buna göre her $1^\circ = 20 \cdot 10^{-3} / 360 = 55 \mu s$ olup her 60° ’lik bölüm $20 \cdot 10^{-3} / 6 = 3333 \mu s$ ’lik yer teşkil eder. Ayrıca ADC elemanı kullanarak bu 1° ’lik sinyaller mikroişlemcinin P1 ucuna gönderilmektedir. Mikroişlemcinin algoritması şekil 6.6’da gösterilmiştir.

Şekil 6.6 Mikroişlemci için algoritma.

MICROİŞLEMÇİ PROGRAMI



```

ORG 00H
JMP INIT
INIT: JB P3.0, $
INIT1: JNB P3.0, $
SETB P3.7
CLR P3.7
MOV R1, P1
JZ FA01
CJNE R1, #60, K2
JMP K2
FA01:JMP FA0
K2: JC K3;
CJNE R1, #90, K4
K4:JC K5
SETB P3.1
SETB P3.2
SETB P3.3
SETB P3.4
SETB P3.5
SETB P3.6
JMP INIT1

```

K3: SETB P3.1

SETB P3.2

SETB P3.3

CLR P3.4

CLR P3.5

SETB P3.6

MOV A, R1

MOV R2, A

K33: MOV R3, #28

DJNZ R3, \$

DJNZ R2, K33

SETB P3.4

CLR P3.6

CALL S3

SETB P3.5

CLR P3.1

CALL S3

SETB P3.6

CLR P3.2

CALL S3

SETB P3.1

CLR P3.0

CALL S3

SETB P3.2

CLR P3.4

MOV A, #61

SUBB A,R2

MOV R2, A

K44: MOV R3, #28

DJNZ R3, \$

DJNZ R2, K44

JMP INIT1
K5: SETB P3.1
SETB P3.2
CLR P3.3
CLR P3.4
SETB P3.5
SETB P3.6
MOV A, R1
MOV R2, A
K55: MOV R3, #28
DJNZ R3, \$
DJNZ R2, K55
CLR P3.5
SETB P3.3
CALL S3
CLR P3.6
SETB P3.1
CALL S3
CLR P3.1
SETB P3.5
CALL S3
CLR P3.2
SETB P3.1
CALL S3
CLR P3.3
SETB P3.1
CALL S3
CLR P3.4
SETB P3.1
MOV A, #91
SUBB A, R2

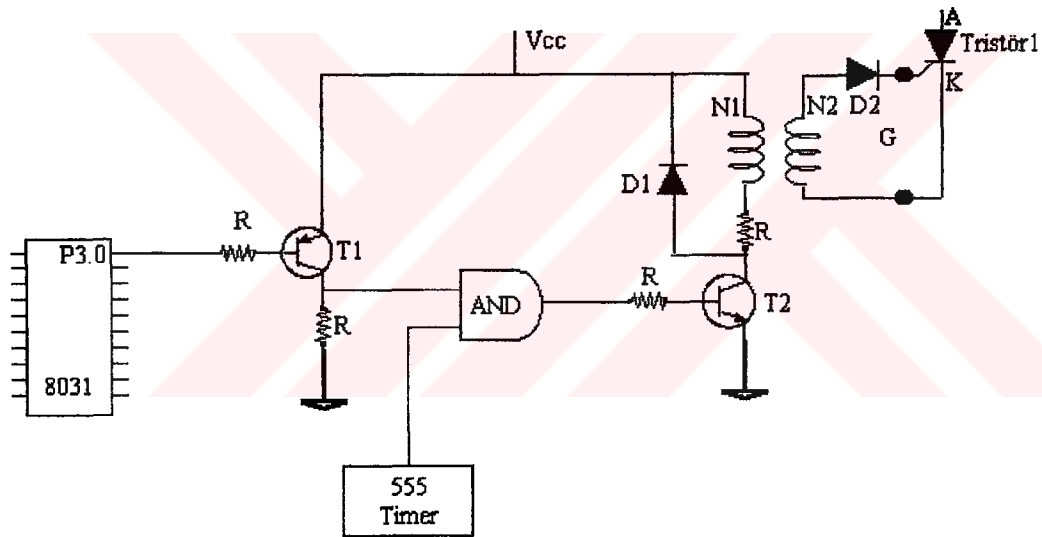
MOV R2, A
K66: MOV R3, #28
DJNZ R3, \$
DJNZ R2, K66
JMP INIT1
S3:MOV R4, #119
S33:MOV R5, #14
DJNZ R5, \$
DJNZ R4, S33
RET
FA0: CLR P3.5
CLR P3.6
CALL S3
SETB P3.5
SETB P3.6
CLR P3.1
CLR P3.5
CALL S3
SETB P3.1
SETB P3.5
CLR P3.2
CLR P3.6
CALL S3
SETB P3.2
CLR P3.3
CLR P3.1
CALL S3
SETB P3.3
SETB P3.1
CLR P3.4
CLR P3.2

```

CALL S3
SETB P3.4
SETB P3.2
CLR P3.5
CLR P3.3
CALL S3
JMP INIT1
END;

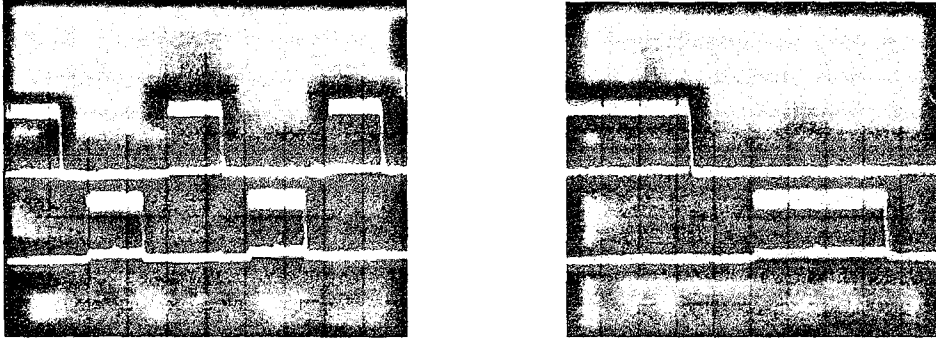
```

Mikroişlemciden elde edilen çıkış sinyallerini şekil 6.7’de görülen sürme devresi ile kuvvetlendirip kıyılır ve izole edilerek tristörlerin kapı uçlarına gönderilmektedir.



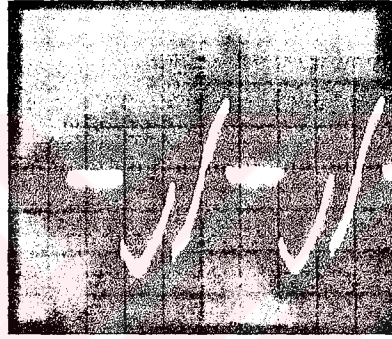
Şekil 6.7 Tristör sürme devresi.

Sonuç olarak elde edilen tristör tetikleme sinyalleri şekil 6.8’deki gibi elde edilir dikkat edilirse T1-T4 sinyalleri hiç çakışmamaktadır.



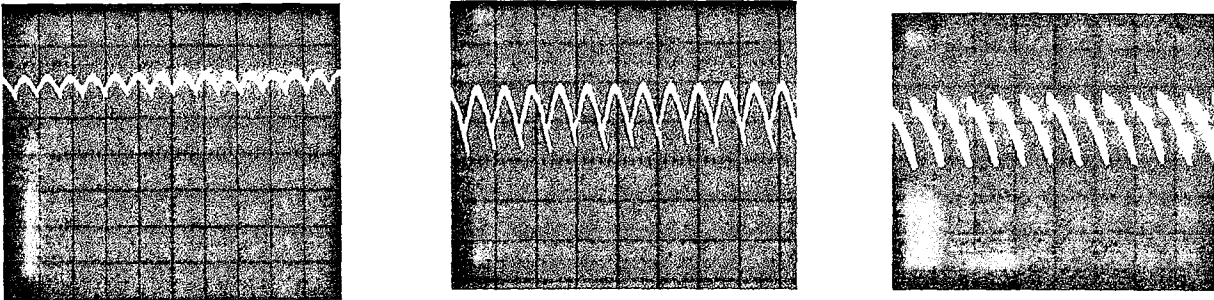
Şekil 6.8 Tetikleme darbeleri (T1-T4) (5 msn-0.5V, 2msn-0.5V).

T1 tristörü tetiklenip ilettime girdiğinde uçlarında görülen gerilim dalga şekli, şekil 6.9’da gösterilmiştir.



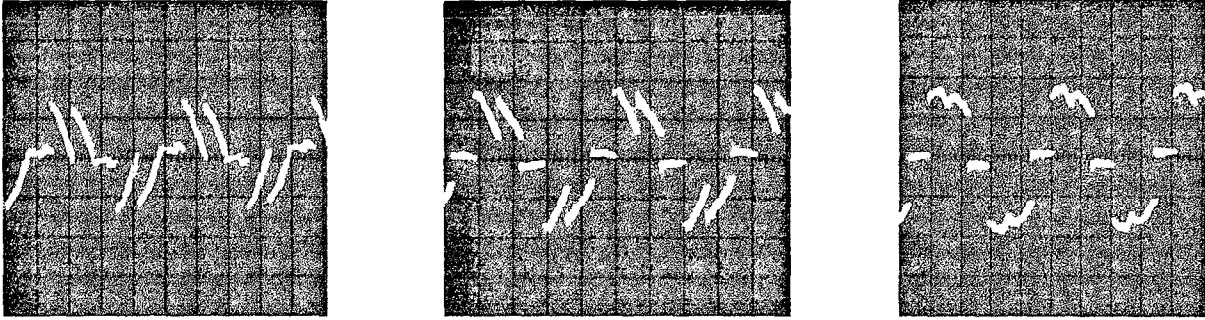
Şekil 6.9 Tristör uçlarındaki gerilim.

Bu sırada yük uçlarındaki dalga şekillerine bakacak olursak, tetikleme açısının 0, 30 ve 60 dereceleri için 700Ω ’luk yük uçlarındaki gerilim dalga şekli bir periyotta (20 msn) 6 tepe olacak biçimde şekil 6.10’da verilmiştir.



Şekil 6.10 6-Darbeli doğrultucu çıkış gerilimleri $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ için (5msn-100V(-3 kare)).

Yine aynı şartlar altında iken şebekeden çekilen akım incelenecek olursa, şekil 6.11’de de görüldüğü gibi sinüzoidal olmayan bir akım çekilmektedir.



Şekil 6.11 Doğrultucunun şebekeden çektiği akım $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ için (5msn-0,5V).

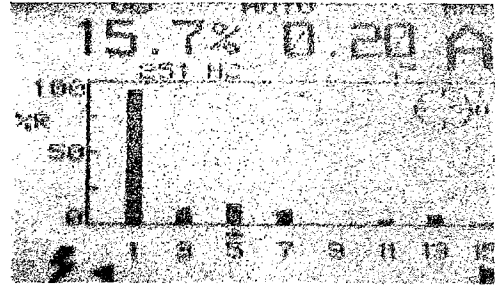
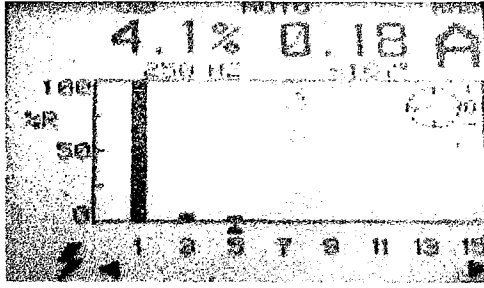
6.2 Motor, R-L yükü

Motor ve R-L yükü her faza dengeli bir şekilde eşit olarak yüklenilmiştir. Sistemin kuruluşu 4 ana bölüme ayrılmıştır. 1. Bölümde motor ile R-L yükü birlikte sisteme bağlanmış ve harmonikler incelenmiştir. Daha sonra çektiği reaktif güce en yakın güçteki kondansatör grubu devreye alınarak güç faktöründeki iyileşme yanında getirdiği harmonikler şekil 6.12’de gösterilmiştir.



Şekil 6.12 Motor, R-L yükü varken 5. harmonik normal ve kompanzasyonlu hali.

Daha sonra sisteme dahil edilen 3 fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu ile aynı işlem tekrarlanmıştır. Çekilen aktif ve reaktif güçler artmasına rağmen güç faktöründe aynı büyüklükte bir iyileşme gerçekleşmemiş ve harmonikler derecesi ve değeri artmıştır. Bununla ilgili grafik şekil 6.13’de gösterilmiştir.



Şekil 6.13 Motor, R-L yükü, doğrultucu varken 5. harmonik normal ve kompanzasyonlu hali.

Yapılan ölçümlere göre alınan gerilim, akım, aktif, reaktif, görünür güç, güç faktörü ve çeşitli harmonik seviyeleri tespit edilip bir tablo halinde çizelge 6.1'de gösterilmiştir. Görülen harmonik akımlarını azaltmak veya yok etmek için pasif şönt filtre kullanılacak olursa gerekli L ve C değerleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir. Öncelikle yok edilecek harmoniğin frekansının %5 altındaki değerdeki frekans baz alınır ve elimizdeki kondansatörün C değeri belli iken formül 5.1'den hesaplanan L değerindeki bir endüktans kondansatöre seri bağlanarak harmonikler şöntlenir.

Çizelge 6.1 Deney devresinden alınan değerler.

DEĞERLER		MOTOR, R-L YÜKÜ	MOTOR, R-L YÜKÜ VE KOMPANZASYON LU	MOTOR, R-L YÜKÜ VE 6-DARBELİ KONTROLLÜ DOĞRULTUCU	MOTOR, R-L YÜKÜ, 6-DARBELİ KONTROLLÜ DOĞRULTUCU VE KOMPANZASYONLU
VOLT		387	388	387	388
AKIM		4,31	1,04	4,41	1,3
W		572	595	708	700
VAr		2830	383	2870	541
VA		2880	711	2970	884
COSφ		0,2	0,86	0,26	0,79
HARMONİK AKIMLARI	1.	%99,9 4,10	%93,7 0,98	%99,7 4,36	%96,1 1,22
	3.	%2,3 0,09	%3,1 0,04	%5,7 0,25	%13,4 0,17
	5.	%2,7 0,11	%25,7 0,26	%4,1 0,18	%15,7 0,20
	7.	-	%15,5 0,16	-	%10,5 0,14
	9.	-	%6 0,06	-	%2,7 0,04

$w = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ den C değerimiz 50 μF iken örneğin 5. harmonik için L değerimiz,

$$L = \frac{1}{w^2 C} \quad (6.1)$$

$$L = \frac{1}{(2 * 3,14 * 0,95 * 250)^2 * 50 \cdot 10^{-6}} = 9 \text{ mH}$$

değeri çıkar. Taşıyacağı akım değeri kondansatöre seri olduğundan kondansatör akımı olan 3.63 A'e dayanıklı olması gerekir. Bu şekilde kurulan bir pasif şönt filtre 5. harmoniğin genliğini azaltarak akımdaki %THD değerini aşağıya çekerek arzulanan filtrelemeyi gerçekleştirir ve güç faktörünü iyileştirir.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İdeal bir güç sisteminde akım ve gerilimin dalga şeklinin tam sinüs şeklinde olması istenir. Güç sistemine bağlanan lineer olmayan elemanlar sebebiyle tam sinüzoidal dalga şeklinde sapmalar meydana gelmekte ve harmonikler oluşmaktadır. Harmoniklerin meydana çıkması güç sistemleri için istenen bir durum değildir. Harmoniklerin varlığı sebebiyle işletme araçları ve tesisleri aşırı yüklenerek ek kayıplar ve aşırı ısınma meydana gelmekte ve güç faktörü düşmektedir. Ayrıca rezonans olaylarına da sebep olarak işletme için zararlı bir durum meydana getirmektedir.

Harmoniklerin enerji sistemindeki teknik ve ekonomik olumsuzluklarının giderilmesi bakımından birtakım önlemlerin alınması gerekir. Enerji sisteminin tasarımından sonraki safhada harmonik bozulmanın istenen sınır değerlerin altına düşürülmesinde filtre devreleri gerekmektedir.

Harmoniklerin giderilmesinde kullanılan filtreler bozulmanın istenen değerlere düşürmesinin yanında, sistem için gereken reaktif güç ihtiyacını da karşılayarak güç faktörünü düzeltirler. Günümüzdeki filtre uygulamalarında aktif ve pasif filtreler kullanılmaktadır. Sisteme ilave edilmesi gereken filtrelerde dikkat edilmesi gereken en önemli husus filtrelerin güç sistemiyle çalışma frekansının dışında rezonansa girmemesidir.

Güç sistemine yerleştirilen filtreler bozulmanın azaltılması yanında maliyet bakımından da ekonomik olmalıdırlar. Bu yüzden filtre tasarımında ekonomik filtre göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çalışmanın sonucunda güç sistemindeki mevcut harmoniklerin azaltılması veya yok edilmesi ile ilgili olarak şunlar önerilebilir:

1. Lineer olmama özelliği gösteren elemanların ve özellikle güç elektroniği elemanlarının gün geçtikçe kullanımının artması ve buna bağlı olarak sinüzoidal olmayan büyüklüklerin şebekede dolaşması, sisteme zarar verdiğinden, gerek kuruluş gerekse işletme sırasında oluşabilecek harmoniklere ve bunun sonucu olarak düşecek olan güç faktörünü arttırıcı önlemler alınmalıdır.
2. Ulusal elektrik ağıımızda filtre elemanlarının kullanımı yaygın değildir. Sınır harmonik bozulma değerlerinin verileceği harmonik standartları, ülkemiz için detaylı bir biçimde belirlenmeli ve uygulamasına mutlaka geçilmelidir.
3. Filtre tasarımı gerçekleştirilirken, güç sistemiyle yerleştirilen filtre elemanı arasında meydana gelebilecek rezonans durumu göz önünde bulundurulmalı ve buna göre

tasarım yapılmalıdır. Aksi halde filtre devresi görevini yapamayacağı gibi işletmede arızalara sebep olabilecektir.

4. Filtrelerin teknik olumsuzlukları gidermesi yanında ekonomik olumsuzlukları da gidermesi gerekir. Filtre maliyetleri ve filtrenin enerji kaybı bakımından karşımıza çıkan filtrenin ekonomikliğı göz ardı edilemeyecek bir etkindir. Filtre tasarımı yapılırken ekonomik filtrenin tasarımı da gerçekleştirilmelidir.
5. Güç faktörü arttırılarak 0.99 değerlerine yaklaştırılmalı ve böylece kayıplar minimuma indirilmelidir.



KAYNAKLAR

Ametani, A., (1972), "Generalized Method of Harmonic Reduction in a.c-d.c Converter by Harmonic Current Injection", Proc. IEE, 116:1730-1734.

A.R. Prasad., P.D. Ziogas ve S. Manias, (1989), "an Active Power Factor Correction Technique For Three-Phase Diode Rectifiers", IEEE, Rec pp. 58-66.

Arrillaga, J., Bradley, D.A. ve Bodger, P.S., (1985), Power System Harmonics, John Wiley&Sons New York.

Bird, B.M., Marsh, J.F. ve McLellan, P.R., (1969), "Harmonic Reduction in Multiplex Convertors by Triple-frequency Current Injection", Proc. IEE, 116:1730-1734

Bosela, T. R., Introduction to Electrical Power System Technology, Youngstown State University.

Clinker, C. R., (1914), "Harmonic Voltage and Currents in Y and Delta Connected Transformers, Trans, AIEE, Vol. 33: 723-334.

Dan, A.M., (1984), "Through Transformer Fitted Harmonic Filter Group", International Conference on Harmonics in Power System, Worcester, October, 1984, 174-177.

Dommel, H.V., Yan, A. ve Wei, S., (1986), "Harmonics from Transformer Saturation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRD-1, No.2: 209-215.

Duran, R.C. ve Ko, C.D., (1984) "Analyzing and Controlling Harmonic Distortion Distribution Feeders", International Conference on Harmonics in Power Systems, Worcester Polytechnic Institute, October 1984., 22-23

IEEE Working Group on Power System Harmonics, (1993), "Effects of Harmonics on Equipment", Report of the IEEE Task Force on the Equipment, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No 1 April 1993

Gonzalez, D.A. ve Mc Call, J.C., (1987), "Design of Filters to Reduce Harmonic Distribution in Industrial Power Systems", IEEE Transactions on Power Industry Applications, Vol. IA-23, No 3: 504-511.

Grady, W.M ve Heydt, G.T., (1985), "Prediction of Power System Harmonics due to Gaseous Discharge Lighting", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104: 554-561

Hammond, P.W., (1988), "A harmonic Filter Installation to Reduce Voltage Distortion from

- Static Power Converters", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No 1
- Herrick, P.R., (1980), "Mathematical Models for High Intensity Discharge Lamps", IEEE, Trans. on Industry Applications, Vol. IA-16: 648-654
- Heydt, R.C., Grady, W.M., (1984), "Distributed Rectifier Loads in Electric Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS 103, No. 9: 2452-2459.
- IEEE Working Group on Power System Harmonics, (1983), "Power Systems: An overview", IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No 8: 2455-2460
- İnan, A., (1999) "Lineer Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Kayıpların Yapay Sinir Ağları ile Analizi ve Filtre Maliyetlerinin Kestirimi", Y.T.Ü Doktora Tezi
- Kimbark, E.W., (1971), "Direct Current Transmission", Vol. 1, Wiley-Interscience
- Laskowski, E.L. ve Donoghue., (1981), "A Model of a Mercury Arc Lamp's Terminal Behavior", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-17: 419-426
- Ludbrook, A., (1986), "Harmonic Filters for Notch Reduction", IEEE Transactions on Power Systems, 1043-1047.
- Makram, E.B., Subramaniam, E.V., Girgis, A.A. ve Catoe, R., (1993), "Harmonic Filter Design Using Actual Recorded Data", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No 6: 1176-1183.
- Mark McGranaghan, (1994), "Active Filter Design and Specification for Control of Harmonics in Industrial and Commercial Facilities", Elektrotec Concepts.
- McCall, J.C., (1985), "Harmonic Simulation of Cycloconverter Operation in a Mine Power System," IAS Annual Meeting, 6-11 October 1985, Toronto.
- Mc Granahan, M.F., (1981), "Digital Simulation of Distribution System Frequency-Response Characteristics", IEEE Trans. Power App. Syst. Vol. PAS-100, No 3: 1362-1369
- Mc Granahan, M.F., (1984), "Distribution Feeder Harmonic Study Methodology", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-103, No 12: 3663-3671.
- Mohan, N., Undeland, T.M ve Robbins, W.P., (1989), Power Electronic, John Wiley & Sons.
- Mustafa Bayram, (1997), "Kuvvetli Akım Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu"
- Rao, S., (1996), "EHV-AC and HVDC Transmission Engineering and Practice", Khanna

Publishers, Delhi.

Read, J. C., (1945), "The Calculation of Rectifier and Inverter Performance Characteristic", IEE, 92:495

Reid, W.E. ve Petrus, K.J., (1985), "Harmonics and Capacitors in The Power System", Pacific Coast Electrical Association Engineering & Operating Conference , CA, 19-20 March 1985.

Rissik, H.,(1935), "The Mercury Arc Current Converter", Pitman, London.

Shipp, D.D., (1979), "Harmonics Analysis and Suppression for Electrical Systems Supplying Static Power Converters and Other Nonlinear Loads", IEEE Trans on industrial Application, Vol. IA-15, No 5:453-458.

Sundberg, Y., (1980), "The Arc Furnace as a Load on the Network", ASEA Journal, Vol.49: 75-87

Szabados, B. ve Lee, J., (1981), "Harmonic Impedance Measurements on Transformers", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100:5020-5026.

Van, W.J., (1993), Power Quality, Power Electronics and Control, The European Power Electronics Association.

Vilcheck, W.S. ve Gonzalaz, D.A., (1985), "Guidelines for Applying Capacitors on Industrial Power Systems", Industrial Commercial Power Systems Conference, Denver, CO, May 1985.

Waymouth, J.F., (1971), "Electric Discharge Lamps", M.I.T. Press.

W.Shepherd ve P. Zand , (1979), "Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Circuits" Cambridge university press.

EKLER

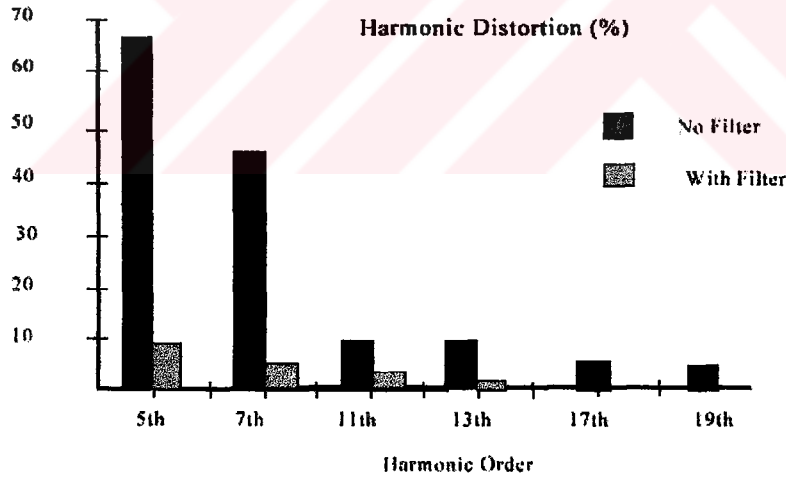
EK 1 Harmoniklerin etkileri

Harmoniklerin etkileri.

KALİTELENDİRME	PROBLEMLER	ÖLÇME METODU	SEBEPLERİ	ÇÖZÜMLERİ
ANİ DARBE	Cihaz hatası Bilgisayar hatası	Tepe değer Yükselme zamanı Darbe süresi	Yıldırım ESD Yükün anahtarlama	Darbe tutucular Ultra izole trafolar Hat gerilim takipçileri Filtreler
ÇÖKÜNTÜLER YAVAŞ > 100ms	Bilgisayar hatası Güç kaynağı hatası	Tepe değer Darbe süresi	Yükün anahtarlama Motor çalışması	Gerilim regülatörü Ferrezonans trafo
ÇÖKÜNTÜLER Hızlı < 30ms	Işık titreşimi Bilgisayarda bilgi kaybolması Bazı cihazlarda hatalar	Tepe değer Darbe tutucu	Yükün anahtarlama Sigorta Ark	Gerilim regülatörü Ferrezonans trafo Gerilim bastırıcı
DÜŞÜK/AŞIRI GERİLİM	Motor momentinde azalma Motor aşırı ısınma Motorun yanması Devre kesicilerde hatalar Güç kaynağı hatası	Efektif İstatistik Dalga şekli Tepe değer	Endüstri Aşırı yüklenme Yük değişimi	Ferrezonans trafo Gerilim bastırıcı Gerilim regülatörü
GERİLİM TITREMESİ	Işık titreşimi Trafo gürültüsü Monitörün ekranının sallanması	Genlik ve frekans modülasyonu	Kablo bağlantısı Yükün anahtarlama Yük değişimi	Gerilim regülatörü Ferrezonans trafo
3 FAZDA HARMONİK AKIM BOZULMASI	Nötr hat kablosunun yanması Transformatörün yanması Nötr hattı kaçak	THD analizi	Lineer olmayan yük Ayarlanabilir hız sürücüler Sistem rezonansı	Pasif filtre Aktif harmonik filtresi
TEK FAZDA HARMONİK AKIM BOZULMASI	Transformatörün yanması Monitörün ekranının sallanması	THD analizi	Lineer olmayan yük Ayarlanabilir hız sürücüler	Pasif seri/paralel filtre Ferrezonans trafo Aktif harmonik filtresi

HARMONİK GERİLİMDE BOZULMA	Bazı cihazlarda hatalar Tetikleme problemleri Birçok sıfır geçişi sonucu senkronizasyonda bozulma	THD analizi	Yüksek lineer olmayan akım Ayarlanabilir hız sürücüler Sistem rezonansı Yüksek empedans	Gerilim regülatörü Aktif harmonik filtresi
ELEKTRİK ARIZASI	Bilgi kaybı Üretim hattının durması	Bekleme zamanı	Sigorta hatası Yük değişimi	Kesintisiz güç kaynağı Yedek jeneratör
KÖTÜ GÜÇ FAKTÖRÜ	Yüksek talep Aşırı boyutlandırılan kaynak	kVA/kW kVAR	Motor yükü Aydınlatma	Güç faktörünü düzeltmek Kondansatör grubu

EK 2 Alçak geçiren geniş bantlı pasif filtre harmonikleri



Solution	Expected THD - I	Cost of 150HP VFD + Solution
5% Line Reactor	25-35%	\$15K
5th Harmonic Trap	15-30%	\$20K-\$21K
5th + 7th Traps	10-20%	\$22K - \$24K
12-Pulse Drive	* 15%	\$22K
18 - Pulse Drive	* < 5%	\$23K
Broad Band Filter	8 - 12%	\$17K - \$19K

* Based on balanced line voltages.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	21.03.1977	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1991-1994	İntaş Lisesi
Lisans	1994-1998	Yıldız Üniversitesi Elektrik Fak. Elektrik Mühendisliği Bölümü
Ön Lisans	1998-1999	Anglo World Education Pre-Master / MBA Year
Yüksek Lisans	1999-Devam ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Müh. Ana bilim Dalı
Çalıştığı kurum	1999-Devam ediyor	YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi

