

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

PASİF HARMONİK FİLTRELER ve ENERJİ ÖLÇÜMÜ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisi N. Onur MESTA

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Salih TACİ

Yrd. Doç. Dr. M. Salih TACİ

Yrd. Doç. Dr. Yazar BİNGÖL

Y. Doç. Dr. A. Faruk BAKAN

İSTANBUL, 2005

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMALAR	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. HARMONİKLER	1
2.1. Harmoniklerin Tanımlanması	1
2.2. Güç Sistem Harmoniklerinin Tanımı	1
2.3. Harmoniklerin Oluşumuna Neden Olan Elemanlar	4
2.4. Harmoniklerin Enerji Sistemleri Üzerindeki Genel Olarak Etkileri	5
2.5. Harmonikleri azaltmanın yolları	7
3. FİLTRELER	7
3.1. Harmoniklerin Azaltılmasında Kullanılan Harmonik Filtrelerin Tanımı	7
3.2. Genel Olarak Harmonik Filtre Sistemleri	8
3.2.1. Harmonik Analizörü	8
3.2.2. Harmonik Filtre Sistemlerinin İncelenmesi	9
3.2.2.1. Pasif Filtre:	9
3.3. Pasif Harmonik Filtre Çeşitleri	17
3.4. Üç Fazlı Şebekeler için Filtre konfigürasyonları ve en düşük harmonikler için kısa devre linkli filtre örnekleri:	18
3.5. Filtrelerde Kalite Faktörü (Q)	18
3.6. Filtre Tasarımı Öncesinde Dikkate Alınması Gereken Noktalar	19
3.7. IEEE 519 -1992 standartları	20
3.8. Toplam Harmonik Distorsiyonu	21
3.9. Toplam Talep Distorsiyonu	22
3.10. Filtre Tasarımı	22
4. HVDC (High Voltage Direct Current – Yüksek Gerilim Doğru Akım)	31
4.1. HVDC Teknolojisi	31
4.2. Ekonomik Değerlendirmeler:	31
4.3. Teknik değerlendirmeler:	32
4.4. Çevresel değerlendirmeler:	32
4.5. HVDC sistem yapısı:	32
4.5.1. Dönüştürücüler	34
4.5.2. HVDC Transmisyon Projesindeki Tipik Yerleşim Grafiği ve Komponent Düzenlemeleri	36
4.5.3. Düzleştirici reaktörler	39
4.5.4. Harmonik Filtreler	40
4.6. Dizayn Kriterleri	40
4.6.1. Reaktif Güç Gereklileri	40
4.6.2. Harmonik Performans Gereklileri	41
4.6.3. Şebeke Empedansı	41
4.6.4. Sürekli Hal Hesaplamaları	42
4.6.5. Filtre Enerjilendirilmesi	42
5. MATLAB UYGULAMASI	43

5.1. HVDC Sisteminde İncelenen 3 Fazlı Harmonik Filtre Simülasyonu.....	43
5.2. AC Kaynak.....	45
5.3. 3 Fazlı Transformator.....	45
5.4. Doğrultucu.....	45
5.5. 12 Darbeli Senkron Üreteci.....	46
5.6. Düzleştirici Reaktör.....	48
5.7. Omik Yük.....	48
5.8. Kapasitör Bankası.....	49
5.9. AC Filtreler.....	49
5.10.Paralel Rezonans	50
5.11.Sonuçlar:.....	51
6. SAYISAL ÖRNEK	55
7. YAZILIM.....	69
7.1. Örnek Uygulama	70
8. SONUÇLAR ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR.....	76
İNTERNET KAYNAKLARI.....	78
EKLER.....	79
ÖZGEÇMİŞ.....	80



SİMGE LİSTESİ

C	Kapasite
f	Frekans
f_1	Temel frekans
f_h	h. harmonik frekansı
f_p, f_0	Paralel rezonans frekansı
f_r	Rezonans frekansı
h	Harmonik bileşen (harmonik mertebesi)
h_r	Rezonans frekansının harmonik mertebesi
I	Yük akımın efektif değeri
I (pu)	Yük akımın efektif değerinin pu değeri
I_h	Harmonik bileşen yük akımı
I_h (pu)	Harmonik bileşen yük akımının pu değeri
V_h	Harmonik bileşen gerilimi
V_h (pu)	Harmonik bileşen geriliminin pu değeri
I_{rms}, I_{rss}	Akımın efektif değeri
L	Endüktans
P	Aktif güç
P_{LL}	Toplam yük kaybı
h,q	Konverterin darbe sayısı
Q_c	Reaktif güç
Q	Kalite faktörü
a	Transformatörün dönüşüm oranı
R	Direnç
S	Kompleks güç
S_c	Kapasitenin nominal gücü
S_k	Şebekenin kısa devre gücü
S_1	Omik yükün gücü
T	Periyot
THD_I	Akım için toplam harmonik distorsiyonu
THD_V	Gerilim için toplam harmonik distorsiyonu
X	Reaktans
X_C	Kapasitif reaktans
X_L	Endüktif reaktans
V	Gerilim genliği
V_{rms}	Gerilimin efektif değeri
Z_{tr}	Transformatörün pu empedansı
δ_h	h. harmonik akım bileşeninin faz açısı
θ_h	h. harmonik gerilim bileşeninin faz açısı
ω	Açısal frekans
ω_0	Doğal frekans veya açısal frekans (temel frekans)
ω_{sys}	Sistemin açısal frekansı
R_{sys}	Eşdeğer sistem direnci
R'_{sys}	Alçak gerilim tarafına uygulanan direnç
R_{tot}	Toplam sistem direnci
R_{pu}	Sistem direncinin pu değeri
R_{tr}	Transformatörün direnci
X_{sys}	Eşdeğer sistem reaktansı
X'_{sys}	Alçak gerilim tarafına uygulanan reaktans
X_{tot}	Toplam sistem reaktansı

X_{pu}	Sistem reaktansının pu değeri
X_{tr}	Transformatörün reaktansı
X_{cap}	Kapasitörün reaktansı
L_f	Filtre grubunun endüktans değeri
I_f	Filtre grubu akımı
I_{fl}	Filtre grubunun temel bileşen akımı
Z_{in}	Giriş empedansı
I_{abc_B1}	Bara1'den geçen akım
I_{abc_B2}	Bara2'den geçen akım
V_{abc_B1}	Bara1'deki gerilim
P_y	12 darbeleri senkron üreticinin P_y çıkış darbesi
P_d	12 darbeleri senkron üreticinin P_d çıkış darbesi



KISALTMALAR

AC	Alternatif Akım
DC	Doğru Akım
DFT	Ayrık Fourier Dönüşümü
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
HD	Harmonik Distorsiyon
H.V.	Yüksek Gerilim
HVDC	Yüksek Gerilim Doğru Akım
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
L.V.	Alçak Gerilim
rms, rss	Efektif değer
TDD	Toplam Talep Distorsiyonu
THD	Toplam Harmonik Distorsiyon



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa	
Şekil 2.1 Temel bileşen ve harmoniklerin toplam grafiği	2	
Şekil 3.1 Bir trafonun anlık akım ve gerilim sinüs eğrileri	11	
Şekil 3.2 Harmoniklerinin açılımını gösteren tablo	11	
Şekil 3.3 Harmoniklerinin açılımını gösteren bar grafiği.....	12	
Şekil 3.4 Harmonik bar grafiği.....	12	
Şekil 3.5 Prensiptiyagramı	Şekil 3.6 Eşdeğer şema	13
Şekil 3.7 Kompanzasyon sisteminin (C) frekansa göre empedans cevabı ile Durduran Filtre sisteminin (LC) frekansa göre empedans cevabı.....	14	
Şekil 3.8 Sönüm Filtre Tesisi Lokal Uygulama Prensiptiyagramı.....	15	
Şekil 3.9 Sönüm Filtre Tesisi + Durduran Filtreli Statik Kompanzasyon Tesisi Merkezi Uygulama Prensiptiyagramı.....	15	
Şekil 3.10 Bir trafonun anlık akım ve gerilim sinüs eğrileri	16	
Şekil 3.11 Harmoniklerinin açılımını gösteren tablo	16	
Şekil 3.12 Şekil 3.13 Şekil 3.14 Şekil 3.15	17	
Şekil 3.16 Şekil 3.17 Şekil 3.18 Şekil 3.19	17	
Şekil 3.20 Üç Fazlı Şebekeler için Filtre konfigürasyonları ve en düşük harmonikler için kısa devre linkli filtre örnekleri	18	
Şekil 3.21 Düşük frekanslar için Q kalite faktörü grafiği	18	
Şekil 3.22 Yüksek frekanslar için Q kalite faktörü grafiği	19	
Şekil 3.23 Şebekenin eşdeğer devresindeki akım ve empedans gösterimi.....	22	
Şekil 3.24 Şebekenin eşdeğer devresindeki akım ve admitans gösterimi	23	
Şekil 3.25 İkinci mertebeden bir sönüm filtresinin admitansındaki kondüktans, süseptans ve minimum admitans değerlerinin grafiksel gösterimi.....	23	
Şekil 3.26 İkinci mertebeden alçak geçiren filtredeki admitansın grafiksel gösterimi	24	
Şekil 3.27 Üçüncü mertebeden bir alçak geçiren filtrede kondüktansın grafiksel gösterimi... ..	24	
Şekil 3.28 Beklenen grafik	Şekil 3.29 Pratikte ulaşılan grafik	25
Şekil 3.30 Empedans grafiği ve R- jX eğrisi	Şekil 3.31 Dairesel grafik yapısı	25
Şekil 3.32 Filtre dizaynında Z düzleminden Y düzlemine geçişin grafiksel gösterimi	26	
Şekil 3.33 Tek bir frekansa ayarlı seri rezonans filtrenin Z ve Y düzlemlerindeki dairesel grafikleri	26	
Şekil 3.34 Uygun Q değerinin bulunması	Şekil 3.35 Y_n minimum sonuç admitansı için Y_{sn} minimum şebeke admitansının belirlenmesi	27
Şekil 3.36 Bandgenişliğinin grafiksel gösterimi	27	
Şekil 3.37 Tek frekansa ayarlı, 315 kV , 49 Mvar, 5. harmoniğe ayarlı Q=30 'luk bir filtre .	28	
Şekil 3.38 Çift frekansa ayarlı, 315 kV , 49 Mvar, 11. ve 13. harmoniğe ayarlı Q=16 'lık bir filtre	29	
Şekil 3.39 Yüksek geçiren, 315 kV , 49 Mvar, 24. harmoniğe ayarlı Q=10 'luk bir filtre	29	
Şekil 3.40 C-type Yüksek geçiren, 315 kV , 49 Mvar, 3. harmoniğe ayarlı Q=1.75 'lik bir filtre	30	
Şekil 4.1 AC/DC taşıma kuleleri	Şekil 4.2 AC-DC terminal giderleri, hat giderleri ve kayıp değerlerinin dikkate alınarak çıkarıldığı grafik.....	31
Şekil 4.3 HVDC'nin tristör valflerinden oluşan klasik yapısı.....	32	
Şekil 4.4 HVDC istasyonu örneği	33	
Şekil 4.5 Eşdeğer DC devre	33	
Şekil 4.6 Uçtan uca dönüştürücü.....	34	
Şekil 4.7 Tek kutuplu toprak dönüşüm	34	
Şekil 4.8 Tek kutuplu metalik dönüşüm.....	34	
Şekil 4.9 Tek kutuplu yapı	34	

Şekil 4.10 İki kutuplu yapı	35
Şekil 4.11 6-darbeli iki adet seri dönüştürücüden oluşan 12darbeli valf grup konfigürasyonu	35
Şekil 4.12 Auchencrosch HVDC istasyonu örneği	37
Şekil 4.13 HVDC transmisyon istasyonu tipik yerleşim gösterimi.....	38
Şekil 4.14 HVDC transmisyon istasyonu tipik yerleşimi grafiksel gösterimi	39
Şekil 4.15 Hava çekirdekli yapı Şekil 4.16 Yağ yalıtımlı yapı	40
Şekil 4.17 Filtre empedans vektörünün grafiksel gösterimi ve Y düzlemine geçiş	42
Şekil 5.1 12-darbeli AC/DC dönüştürücüde kullanılan üç fazlı harmonik filtreler	44
Şekil 5.2 AC Kaynak.....	45
Şekil 5.3 3 fazlı transformatör	45
Şekil 5.4 Doğrultucu ve iç yapılarının gösterimi	45
Şekil 5.5 6 darbeli tristör köprüsünün iç yapısı- Greatz köprüsü.....	46
Şekil 5.6 12 Darbeli senkron üretici	46
Şekil 5.7 12 darbeli senkron üreticinde oluşan P_y ve P_d darbeleri	47
Şekil 5.8 12 darbeli senkron üreticinde giriş gerilimlerine göre darbelerin tetiklenmesi.....	47
Şekil 5.9 Düzleştirici Reaktör	48
Şekil 5.10 OmikYük.....	48
Şekil 5.11 Kapasitör bankası	49
Şekil 5.12 AC Filtreler	49
Şekil 5.13 Bazı HVDC projelerinde uygulanan C-type filtre parametreleri.	50
Şekil 5.14 Simulink sonucu elde edilen grafikteki I_{abc_B1} akımı ile Bara2'den geçen I_{abc_B2} akımının karşılaştırılması.....	51
Şekil 5.15 Simulink sonucu I_{abc_B2} için elde edilen THD değerinin gösterimi	52
Şekil 5.16 Simulink sonucu I_{abc_B1} için elde edilen THD değerinin gösterimi	53
Şekil 5.17 Simulink sonucu elde edilen empedans-frekans ve faz-frekans grafikleri.....	53
Şekil 7.1 Örnek değerler için doldurulmuş durum	69
Şekil 7.2 Örnek değerler için filtre konfigürasyonu.....	70
Şekil 7.3 Değişken Frekans sürücülerini besleyen bir elektrik dağıtım şebekesi	70
Şekil 7.4 Elektrik dağıtım şebekesi ve değerleri	70
Şekil 7.5 5. Harmonik için giriş değerleri ve sonuçları.....	71
Şekil 7.6 7. Harmonik için giriş değerleri ve sonuçları.....	72
Şekil 7.7 Sonuçların sistem üzerinde gösterimi	72

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 IEEE 519 Standartlarına göre THD gerilim limitleri.....	20
Çizelge 3.2 IEEE 519 Standartlarına göre THD akım limitleri	20
Çizelge 6.1 Harmonik mertebelere göre elde edildiği kabul edilen akım değerleri.....	57
Çizelge 6.2 Kapasitör bağılı olmayan devrede ulaşılan empedans ve gerilim değerleri.....	57
Çizelge 6.3 Filtreli hat akımı değerleri.....	63
Çizelge 6.4 Kaynak hat akımı tablosu.....	65
Çizelge 6.5 Bara gerilmeleri tablosu.....	67
Çizelge 7.1 Filtreli ve filtresiz hallerdeki gerilim harmonik distorsiyon değerleri	73
Çizelge 7.2 Filtreli ve filtresiz hallerdeki akım harmonik distorsiyon değerleri.....	73



ÖNSÖZ

Günümüzde güç sistem harmonikleri konusunun artan önemi karşısında, harmoniklerin incelenmesi ve filtrelenmesi bitirme tezi çalışmamda ve araştırmalarımda yer bulmuştur.

Bu doğrultuda oluşturduğum tez çalışmamda harmonikler, pasif harmonik filtreler, harmonik üreten HVDC sistemler, simülasyon ve sayısal örnekler yer almaktadır.

Çalışmalarım sırasında yakın ilgi ve desteklerini gördüğüm, çalışmalarımı yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Salih Taci'ye, araştırma görevlisi dostum Oktay Arıkan'a, beni yetiştiren ve destekleyen canım aileme ve her anımda yanımda olan Mine Aydın'a teşekkürlerimi sunarım.



ÖZET

Bu çalışmada, yeni bir konu olmamasına rağmen günümüzdeki harmonik üreten elemanların artışıyla önemi bir kat daha artan harmonikler incelenmektedir.

Harmoniklerin zararları, harmoniklere neden olan etkenler ve giderilmesi için üretilen yollardan bahsedilmiştir.

Daha sonra, tezin temel konusu olan pasif harmonik filtrelerin tanımları, çeşitleri ve dizayn kriterleri incelenmiştir.

Sonraki bölümde yer alan Matlab Simulink simülasyonu için gereken harmonik üreten bir sistem olarak seçilen HVDC sistemi, harmonik üreten ve filtre gruplarının kullanıldığı bir sistem olarak tercihimiz olmuştur.

Konuyla ilgili olarak son kısımda verilen sayısal uygulama ile harmoniklerin giderilmesi ve filtre tasarımında baştan itibaren karşılaşıcağımız mühendislik formülleri, rezonans ve toplam harmonik distorsiyon kavramları ile sonuçlar incelenmiştir.

Ek olarak da, üç fazlı şebekeler için filtre konfigürasyonları ve en düşük harmonikler için kısa devre linkli filtre örneklerinde de belirtilen uygulamalar için filtrenin dizayn parametrelerinde kullanılacak büyüklüklerin bir bilgisayar yazılımı ile kolaylıkla elde edilmesi sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Pasif harmonik filtre, Harmonikler, Filtre çeşitleri, HVDC teknolojisi, Harmonik filtre dizayn hesaplama yazılımı.

ABSTRACT

In this thesis, harmonics, not a new subject, but with an improving importance with the development of harmonic producing elements will be investigated.

Damages of harmonics, harmonic producing effects and elimination methods have been mentioned.

Later on, the main subject of the thesis, definitions of passive harmonic filters, kinds and design criterias has been researched.

In the following part, for our Matlab Simulink simulations the HVDC system has been chosen because of its harmonic producing and filter group containing properties.

With the numerical example at the end of the thesis, harmonic elimination, engineering formulas that will be used with the filter design, resonance and total harmonic distortion concepts and their solutions have been studied.

As an addition to this work, a software has been developed in which the filter configurations for three phase systems and the ratings of the short circuit linked filter samples for lowest harmonics for the design parameters of the filter will be calculated easily.

Key Words: Passive harmonic filter, Harmonics, Filter types, HVDC technology, Harmonic filter design calculation software.

1. GİRİŞ

Güç sistem harmonikleri konusu son yıllarda artan bir önem kazanmıştır. Harmonik akımlar ve gerilimlerin varlığı yeni bir konu olmamasına karşın harmoniğe neden olan elemanların kullanımındaki artış, oluşan harmonik akım ve gerilimlerini de arttırmıştır. Güç elektroniği teknolojisi daha önce mümkün olandan çok daha fazla miktarda gücü kontrol edilebilir hale getirmiştir. Klasik analizlerde güç sistemi, sabit genlik ve frekansa sahip sinüsoidal gerilim kaynakları tarafından beslenen ve pasif elemanlardan meydana gelen lineer bir sistem olarak modellenmektedir. Ancak sistemde nonlineer elemanların bulunması bu modellemeyi değiştirecektir. Sistemde dolaşan harmonik akımlar, sadece yüklerin dalga şekillerinde bozucu etkiler oluşturmayıp aynı zamanda güç sistem elemanları üzerinde de olumsuz etkilere neden olabilmektedir.

Harmoniklerin seviyesini ve değerlerini belirlemeye yönelik matematiksel analiz “Fourier Analizi” olarak tanımlanmaktadır. Böylece harmonik bileşenler bu analiz sonucu belirlenen Fourier serisi elemanları olarak ifade edilirler.

2. HARMONİKLER

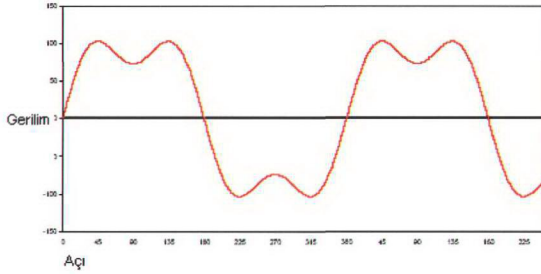
2.1. Harmoniklerin Tanımlanması

Harmonikler, enerji sisteminde akım ve/veya gerilim dalga şekillerinin sinüsoidalden uzaklaşması olarak bilinir. Periyodik, nonsinüsoidal, zamanla değişen dalga şekillerinin toplamı veya çeşitli sinüsoidal dalga şekillerinin toplamı harmonik bileşenler olarak adlandırılırlar. Her bir harmonik bileşen belirli bir genlik, frekans ve faza sahiptir. Herbir harmoniğin genlik ve faz değeri temel dalga şekline uygulanan Fourier analizi ile belirlenebilir. Bu ayrıştırma işlemi sayesinde herhangi bir bozulmuş periyodik dalga şekli temel dalga ve harmoniklerin bir kümesi olarak da ayrıştırılabilir.

2.2. Güç Sistem Harmoniklerinin Tanımı

Bilindiği gibi güç sistemlerindeki sinüsoidal bir dalga temel frekansa sahip (temel bileşeni) olan bir dalgadır. Bir frekansa sahip nonsinüsoidal periyodik bir dalganın sinüsoidal bileşenleri, temel frekansın tam katıdır. Bu yüzden, f_1 temel frekanslı büyüklüğün, h . harmonik mertebesinin frekansı $h.f_1$ 'dir. Harmonikli (nonsinüsoidal) büyüklükler farklı

genlikli ve frekanslı gerilimlerin ve akımların toplamından oluşmuş bozulmuş bir sinüs dalgası olarak tanımlanır.



Şekil 2.1 Temel bileşen ve harmoniklerin toplam grafiği

Bir güç sistemindeki elemanların ve yüklerin çoğu, hem pozitif hem de negatif yarı dalgasında aynı şekilde cevap verir. Bu nedenle devre elemanlarının üzerindeki gerilimler ve akımlar yarı dalga simetrisine sahip olurlar. Gerilim ve akımlara ait çift mertebeli harmonik bileşenler bu simetri nedeniyle karakterize edilemezler. Aynı zamanda üç ve üçün katı olan harmonikler, dengeli üç fazlı sistemlerde yıldız noktası topraklı veya üçgen transformatör bağlantısıyla bloke edilebilirler. Bu nedenle, harmonik analizlerinde çift harmonik bileşenleri, üç ve üçün katları olan harmonik bileşenleri ihmal edilirler.

Güç sistemlerindeki harmoniklerin ana kaynaklarından biri statik güç konverterleridir. İdeal işletim şartları altında, p-darbeleri hat komutasyonlu bir konvertere ait h. harmonik akım harmonikleri, $I_h = I_1/h$ genliğine sahip olup harmonik bileşenleri $h = pn \pm 1$ olacaktır. ($n = 1, 2, \dots$), (Günümüz 3 fazlı elektrik teknolojisinde diyot ve tristörler bir cihaz içerisinde 6 adet veya 12 adet kullanılarak 6 darbeleri veya 12 darbeleri sistemler olarak adlandırılırlar. Buna göre $p=6$ veya $p=12$).

Örnek:

$$n = hq \pm 1 \quad (2.1)$$

formülünde h ; puls sayısı

q ; sıra ile ilerleyen tam sayı olmak üzere

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

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

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

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

Üretilecek bu harmoniklerin temel şebeke frekansındaki akıma olan yüzdesel değerleri ise ;

$$\% = 100 / n \quad (2.2)$$

formülü ile hesaplanabilir.

Örnek ;

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

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

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

$$13. \text{ Harmonik yüzdesel değeri } \% = 100 / 13 = \% 8$$

$$17. \text{ Harmonik yüzdesel değeri } \% = 100 / 17 = \% 6$$

$$19. \text{ Harmonik yüzdesel değeri } \% = 100 / 19 = \% 5$$

$$23. \text{ Harmonik yüzdesel değeri } \% = 100 / 23 = \% 4$$

$$25. \text{ Harmonik yüzdesel değeri } \% = 100 / 25 = \% 4$$

2.3. Harmoniklerin Oluşumuna Neden Olan Elemanlar

Yapılan araştırmalar sonucu, harmoniklerin meydana gelmesine neden olan elemanlar aşağıdaki şekilde verilebilir

- Statik VAR kompanzatörler,
- Konverterler,
- Yarı iletken elemanlar,
- Generatörler,
- Motorlar,
- Senkron makinaların uyarılması için kullanılan diyot ve tristörlü dönüştürücüler,
- Transformatörler,
- Gaz deşarjlı aydınlatma elemanları,
- Fotovoltaik sistemler,
- Bilgisayarlar,
- Elektronik balastlar,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Anahtarlama güç kaynakları,
- Civa ve sodyum buharlı lambalar ile floresant lambalar,
- Kaynak makinaları,
- Kontrol devreleri,
- Frekans dönüřtürücülerini,
- Ark fırınları,
- Elektrikli ulaşım sistemleri ,
- HVDC sistemleri.

2.4. Harmoniklerin Enerji Sistemleri Üzerindeki Genel Olarak Etkileri

Harmonik bileşenler dolaştıkları sistemde birçok probleme yol açarlar. Enerji sistemlerindeki bu problemleri şöyle verebiliriz (Kocatepe, 1995):

- Generatör ve şebeke gerilim dalga şeklinin sinüsoidalden uzaklaşması,
- Transformatörlerde ve yüklerde ek kayıpların oluşması,
- Gerilim düşümündeki artmalar,

Harmonik akımlarının frekansları f_1 'in tam katları olduğundan, bu akımların jeneratörler, transformatörler ve hat reaktansları üzerinde meydana getirdiği gerilim düşümleri artar, şebeke geriliminin frekansından farklı frekanstaki bu gerilim düşümleri, temel şebeke gerilimi üzerine binerek sinüzoidal gerilim biçimini bozarlar.

Elektriksel olayların hızla değiştiği yerlerde, harmonik akımların neden olduğu gerilim düşümleri de hızla değişir ve bazı hallerde şebeke geriliminde 2-15 Hz frekanslı salınımlar ortaya çıkar. Bu salınımların meydana geldiği yere yakın yerlerdeki cihaz ve aydınlatma aygıtları, bu salınımlardan olumsuz etkilenir

- Kondansatörler üzerindeki etkileri,

Bir kondansatörün kapasitif reaktansı $1/wC$ olup, harmonik frekansına bağlı olarak ters orantılı biçimde değişir. Diğer bir deyişle, yüksek frekanslı harmoniklerde reaktans küçülür. n'inci harmonik için kapasitif reaktans $1/nwC$ ve bu frekanstaki akımın tepe değeri ;

$$I_{nm} = V_{nm} \times nwC \quad (2.3)$$

olacaktır.

O halde bir kondansatörün uçlarındaki gerilim,

$$V = V_{1m} \sin wt + V_{2m} \sin 2wt + \dots \quad (2.4)$$

biçiminde ise, bu kondansatörden geçen akım,

$$i = V_{1m} wC \sin (wt+90) + V_{2m} 2wC \sin (2wt+90) + \dots \quad (2.5)$$

olacaktır.

Bu bağıntılardan görüldüğü gibi akım dalgasındaki harmonik yüzdesi, gerilim dalgasındaki harmonik yüzdesinden daha büyüktür.

Sonuç olarak, yüksek frekanslı harmoniklerin bulunduğu şebekelerde, kondansatörlerden geçen akım artar. Güç kondansatörleri, ilgili standartlar gereği, nominal çalışma akımının 1,3 katında sürekli olarak çalışabilecek şekilde imal edilirler. Eğer sürekli çalışma akımı harmonikler nedeni ile bu sınırın üzerine çıkarsa reaktif güç kompanzasyonu amacı ile sistemde kullanılan kondansatörlerin ömrü kısalmaktadır

- Dielektrik malzemesinin delinmesi,
- Bazı elemanların ömrünün kısılması,
- Mikroşlemcilerin çalışmalarında hatalar,
- Motorlar ve diğer bazı elektrik cihazlarında ek gürültülerin oluşması,
- Enerji ölçüm sayaçlarında hatalı ölçmeler,
- İletişim araçlarında parazitlerin oluşması ve anormal çalışma,
- Koruma sistemlerinin çalışmalarında hatalar,
- Rezonans olaylarının meydana gelmesi,

Harmonikler içeren bir gerilim, endüktans ve kapasitansların bulunduğu bir devreye uygulanırsa harmonik frekanslarından birinde rezonans meydana gelebilir. Devrenin yapısına bağlı olarak seri rezonans meydana gelirse, rezonans frekansında devredeki toplam omik direncin değerine bağlı olarak (direnç ne kadar küçükse akım o kadar büyük olur) büyük akımlar dolaşabilir. Bu akımlar endüktans ve kapasitans uçlarında aşırı gerilimler oluşmasına neden olabilir. Eğer paralel rezonans meydana gelirse, devrenin şebekeden çekeceği akım azalır. Talep gücün sağlanabilmesi için bara gerilimi çok yüksek değerlere yükselir: Eşdeğer akım çok küçük değerlere düşerken devredeki endüktans ve kapasitanslarda dolaşan lokal akımlar çok büyük değerlere ulaşabilir.

Rezonansların oluşması sistemde arıza ve hasarlar meydana getirebilir. Koruma cihazlarının görevlerini yerine getirmesi bu aşamaya gelmiş bir sistemde karşılaşılabilecek iyi bir durumdur. Bu anlatılanlar, elektrik sistemlerinin genel yapısından ötürü normal yüklü zamanlara nazaran sistem yükünün az olduğu yüksek oranlı harmonikli zamanlarda daha sık meydana gelmektedir

- Sistem üzerinde aşırı akım ve gerilim değerlerinin ve sistem kayıplarının meydana gelmesi,

Harmonikler; elektrik makineleri, transformatörler ve enerji nakil hatlarında temel bileşen akıma ilave olarak yüksek frekanslı akımların da geçmesine, dolayısı ile kayıpların artmasına neden olurlar. Bu durumda elektrik makineleri ve transformatörlerde aşırı ısınmalar meydana gelebilir. f_1 sürekli çalışma frekansına göre imal edilmiş olan tüm

makine, trafo, ölçüm ve kontrol cihazları v.b. elektrikli donanımlar bu ilave ısınmalardan olumsuz yönde etkilenirler. Arızalanma, aşırı ısınma, veri kayıpları, verimsizlik gibi olumsuzluklara sıkça rastlanır

- UPS alarmları.

2.5. Harmonikleri azaltmanın yolları

- Faz kaydırmalı transformatörler
- K-Faktörlü transformatörler
- Hat Reaktörleri
- Düşük distorsiyonlu girişler
- Aktif harmonik kompenzasyon
- Filtreler

3. FİLTRELER

3.1. Harmoniklerin Azaltılmasında Kullanılan Harmonik Filtrelerin Tanımı

Üç fazlı harmonik filtreler, güç sistemlerindeki gerilim bozulmaları ve güç faktörü doğrulamaları için kullanılan şönt elemanlarıdır. Güç elektroniği dönüştürücüleri gibi non-lineer elemanlar güç sisteminde harmonik akımlar veya gerilimler üretirler. Sistem empedansına akan harmonik akımları harmonik gerilim distorsiyonları oluşturur. Harmonik filtreler, harmonik akımları düşük empedanslı alanlara yönlendirerek azaltırlar. Harmonik filtreler temel frekansta kapasitif olacak şekilde dizayn edilirler. Öyle ki, sistemdeki harmonik filtreler aynı zamanda dönüştürücülerin ihtiyacı olan reaktif gücün üretilmesi ve güç faktör doğrulaması için kullanılırlar.

Kabul edilebilir bir sonuç elde etmek için genellikle değişik tiplerdeki filtreler filtre bankası olarak paralel bağlanmış şekilde kullanılırlar. En çok kullanılan filtre çeşitleri şu şekildedir:

- **Band geçiren Filtreler:** 5. 7. 11. ve 13. gibi en düşük mertebeli harmoniklerin filtrelenmesinde kullanılırlar. Band geçiren filtreler tek bir frekansa veya iki frekansa ayarlanabilir.
- **Yüksek geçiren Filtreler:** Yüksek mertebeli harmoniklerin filtreleneceği ve geniş bir frekans aralığının kapsanacağı durumlarda kullanılırlar. Yüksek geçiren filtrelerin bir özel çeşidi olan C-type (C tipindeki) yüksek geçiren filtreler reaktif güç sağlamada ve paralel

rezonansların önlenmesinde kullanılırlar. Aynı zamanda temel frekanslardaki sıfır kayıplarını yerine getirirken düşük mertebeli harmoniklerin (3.mertebe gibi) filtrelenmesini de sağlar.

Üç Fazlı Harmonik Filtreler RLC elemanlarından oluşmaktadırlar. Direnç, endüktans ve kapasitans değerleri filtre çeşidine ve aşağıdaki parametrelere göre belirlenir:

- Nominal gerilimdeki reaktif güç
- Ayarlama frekansları
- Kalite faktörü. Q kalite faktörü, ayarlama frekansının keskinliğinin bir ölçüsüdür. Direnç değeri tarafından belirlenir.

3.2. Genel Olarak Harmonik Filtre Sistemleri

3.2.1. Harmonik Analizörü

Harmonik bileşenlerinin sağlıklı biçimde saptanabilmesi, genlik ve frekanslarının belirlenebilmesi için bu yöntemlerden birinin kullanımı zorunludur. Ancak teorik hesaplama ve analizör ile tespit yapılmadan da basit bir test sistemiyle tesiste harmonik akımlarının var olup olmadığının kabaca saptanması mümkündür. Bunun için kompanzasyon tesisinin yapımına başlamadan önce, işletmede harmonik üretmesi mümkün olan cihazların gerektirdiği reaktif güce denk güçte bir kondansatör bataryası bir sigorta koruma devresi üzerinden geçici olarak işletmeye alınır. (Örneğin tristörlerle doğrultulmuş gerilim kontrollü bir DC motor için test kondansatörü gücü motor gücünün yaklaşık % 30'u kadardır. Yalnızca harmonik üretme olasılığı mevcut cihazlar çalıştırılır. Tüketici cihazlar belirli sürelerle tam ve yarı yükte çalıştırılır ve bu esnada kondansatör bataryasından geçen akım bir pensampermetre yardımıyla ölçülür. Hızlı akım değişimleri ve sigorta erimesi türünden olaylarla karşılaşılmıyorsa tüketicilerin rezonansa yol açabilecek yada kompanzasyon tesisine zarar verebilecek ölçüde etkin harmonik üretmedikleri söylenebilir.

Harmonik analizörler yardımıyla da herhangi bir gerilim eğrisinin bileşenlerinin frekans ve genliklerinin ölçümü ve çeşitli dalga biçimlerine ilişkin spektrumların çıkarılması mümkündür.

Ana hatlarıyla söz edilen harmonik analizörleri kompanzasyon panosunun bağlanacağı baralar üzerindeki gerilimin niteliği hakkında oldukça sağlıklı bilgiler edinmemizi sağlar. Harmonik

analizörleriyle yapılan inceleme tesiste rezonans olasılığının belirlenmesi açısından çok iyi bir kriter olmasına karşın bu cihazlar oldukça pahalıdır.

3.2.2. Harmonik Filtre Sistemlerinin İncelenmesi

Belirli elektriksel çalışma özellikleri olan yüklere sahip elektrik dağıtım sistemlerindeki harmoniklerin ortaya çıkaracakları zararların ortadan kaldırılmasına veya en asgari seviyeye indirilmesine “Harmonik Filtrasyon” ismi verilmektedir. Harmonikleri süzecek veya tesisteki zararlarını en aza indirecek şekilde teknik olarak sistem özelliklerine göre boyutlandırılan sistemlere ise “Harmonik Filtre Paneli” denilmektedir.

50 Hz’lik frekans değerine kalibre edilmiş ölçü aletleri ile görülemeyen harmoniklerin kesin olarak tespiti için, fourier analizi yapabilen ve harmonik analizörü adı verilen kompleks bir cihaz ile ölçümler yapıp kayıtlar tutularak gerçek durum tespit edilmeli ve bu ölçüm sonuçlarına göre hareket edilerek, sorunların giderilmesi ve ekonomiklik hususları dikkate alınarak optimum çözüm için gerekli hesaplamalar yapıp “Harmonik Filtre” sistem veya sistemleri tasarlanmalıdır.

Aşağıdaki kısımlarda harmonik problemlerinin çözümü için kullanılan mevcut yöntemler, sanayiden gerçek ölçümlere ait sinüzoidal eğriler, harmonik tablo ve bar grafikleri ile birlikte verilmişlerdir.

“Harmonik Filtre Sistemleri”ni genel olarak aşağıda belirtildiği şekilde başlıklar altında toplayabiliriz :

- **Pasif Filtre**

Durduran Filtre

Sönüm Filtre

- **Aktif Filtre**

3.2.2.1. Pasif Filtre:

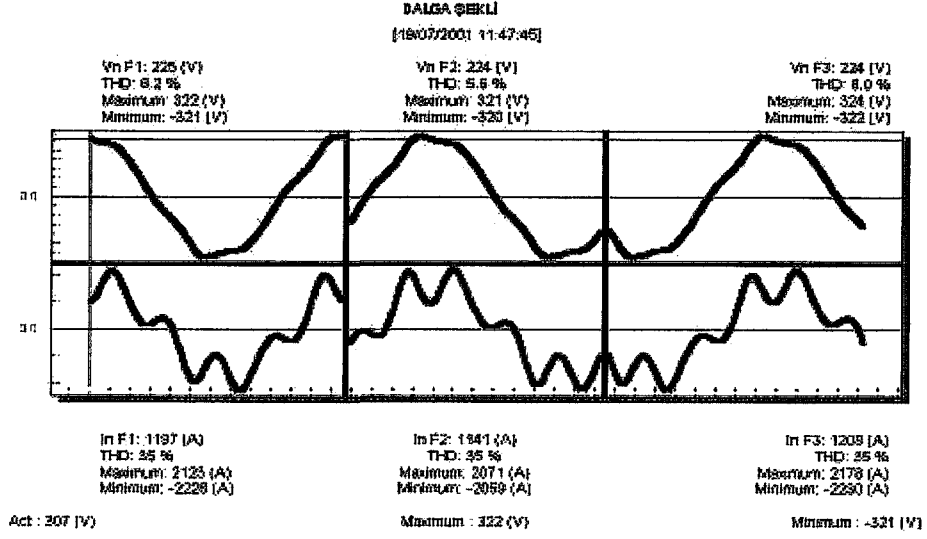
Pasif filtre olarak adlandırılan harmonik filtre konstrüksiyonu, sistem için seçilen kondansatörlerin önüne konulan filtre bobinleri ile yapılmaktadır. Bu tür filtrelemede, karşılaşılan iki tür durum için, konstrüke edilebilecek iki tür harmonik filtre sistemi ve bu iki

tip filtreleme yönteminin kombinasyonunun uygulanması biçiminde çözümler vardır ve sözkonusu sistem için optimum iyileştirme ve ekonomi sağlayacak olan filtreleme yöntem veya yöntemleri seçilmelidir. Aşağıda pasif filtreleme yöntemleri ele alınmışlardır.

- **Durduran Filtre :**

Durduran (Band-frekans geçirmeyen-Rejection) Filtre sistemi harmonikler sebebi ile rezonans oluşumlarının meydana gelmesini kesin olarak engelleyecek ve harmonik akımların kondansatörler üzerindeki bozucu etkilerinin önüne geçecek bir filtreleme yöntemidir. Durduran filtreleme, reaktif güç kompanzasyonunu ve harmonik filtreleme görevlerini beraberce yerine getirir. Kondansatörler önüne, ölçümler sonucu görülen harmoniklere göre rezonans frekanslarına ayarlı olarak seçilen filtre reaktörlerinin bağlanması ile oluşturulurlar. Durduran Filtre reaktörleri üretici firmalar tarafından standartlaştırılmış değerler olarak genellikle 133 Hz , 189 Hz ve 210 Hz rezonans frekansı değerlerinde üretilirler. Bu değerlerden birinin seçimi filtre tesisini dizayn edecek kişilerce yapılacak harmonik ölçümleri neticesinde belirlenmelidir. Örneğin 5. harmoniğin baskın olduğu harmonikli bir tesiste bu şekildeki bir filtreleme ile çözüm yoluna gidildiğinde, 250 Hz frekansının altında bir değerde ayarlı reaktör + kondansatör grubu oluşturulur (örneğin 189 Hz). Her kademedede oluşturulan bu seri rezonans devreleri 250 Hz frekansının altında bir değerde titreştiğinden sistemde rezonans noktası gelişemez. Ayrıca seri bağlı bu grubun eşdeğer olarak harmoniklere gösterecekleri düşük direnç sayesinde harmoniklerin akış yönü bu filtreli kompanzasyon kademelerine doğru çekilerek sistemin çeşitli noktalarındaki THD'lerde belli oranlarda azalmalar sağlanacaktır. Eşdeğer devre olarak düşük direnç gösteren bu noktaya akan harmonik akımları yüksek direnç gösteren filtre reaktörleri tarafından büyük oranda absorbe edilerek reaktörler üzerinden ısıya çevrileceklerinden kondansatörlerin harmoniklerden etkilenmeleri minimum düzeyde olacaktır.

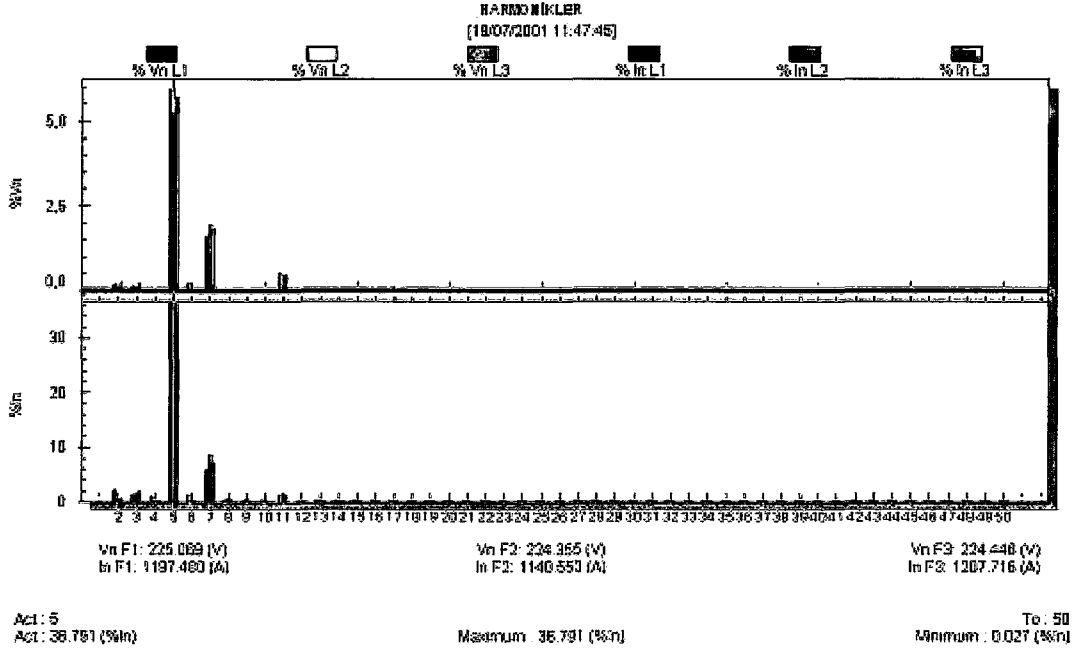
Aşağıda verilen Şekil 3.1'de, bir trafonun alçak gerilim ana çıkış şalterinden harmonik analizörü ile alınan ölçüm sonucunda görülen anlık akım ve gerilim sinüs eğrileri verilmişlerdir. Görüldüğü üzere gerilim %THD'u %6 , akım %THD'u %35 değerlerindedir. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te ise bu şebeke eğrisinin aynı ana ait harmoniklerinin açılımını gösteren tablo ve bar grafikler verilmişlerdir. Görüldüğü üzere %35 değerinin üzerinde olmak üzere yüksek seviyede 5. harmonik akımları mevcuttur. 7. ve diğer harmonik akımları %10 oranının altında oluşmaktadırlar.



Şekil 3.1 Bir trafonun anlık akım ve gerilim sintis eğrileri

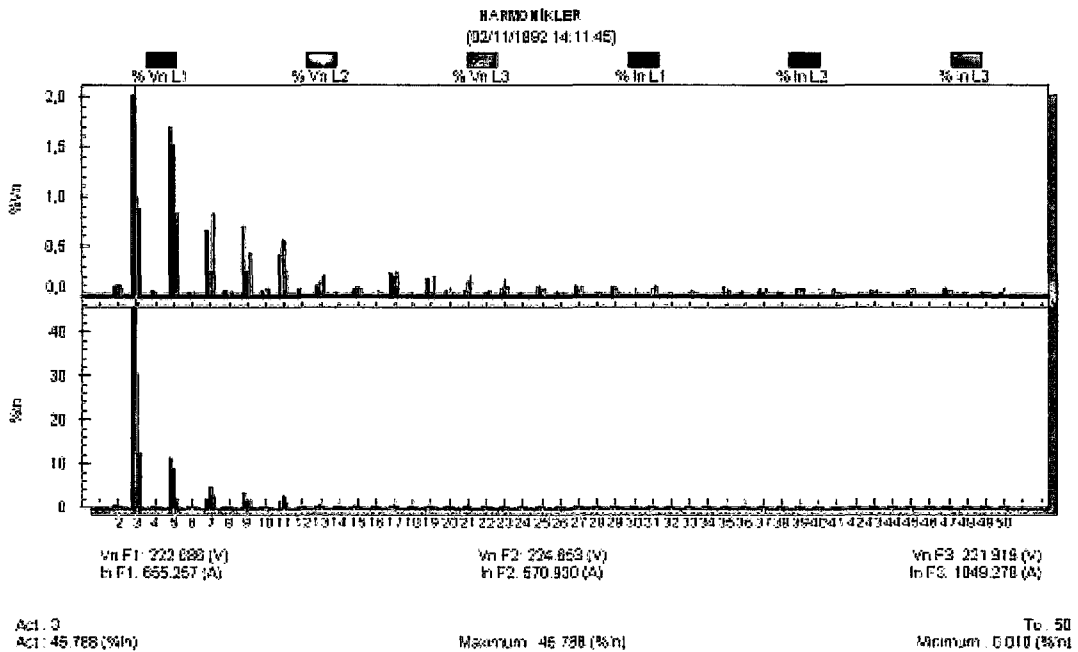
Data 19/07/2001 11:47:45					
Phase voltage3			Phase current3		
Vrms (V) 225		THD (%) 8,2	Irms (A) 1209		THD (%) 25,0
Fundamental (V) 224		Disphase (%) 20,8	Fundamental (A) 1209		Disphase (%) 20,6
Harmonics	Amplitude (A)	Disphase (°)	Harmonics	Amplitude (A)	Disphase (°)
2	0,242	318,1	2	0,588	332,6
3	0,220	142,4	3	2,017	263,6
4	0,034	45,2	4	0,261	151,2
5	5,723	112,8	5	36,344	222,5
6	0,009	622,5	6	0,040	355,0
7	1,627	901,4	7	2,149	101,0
8	0,069	92	8	0,475	143,1
9	0,054	135,7	9	0,201	262,9
10	0,022	33,1	10	0,112	135,5
11	0,479	150,7	11	1,124	319,9
12	0,041	249,1	12	0,109	24,4
13	0,028	325,9	13	0,145	163,1
14	0,021	126,2	14	0,040	316,9
15	0,033	259,4	15	0,151	147,7
16	0,021	152,2	16	0,025	316,4

Şekil 3.2 Harmoniklerinin açılımını gösteren tablo

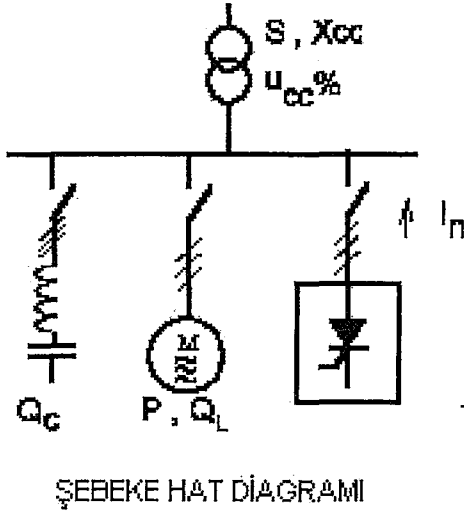


Şekil 3.3 Harmoniklerinin açılımını gösteren bar grafiği

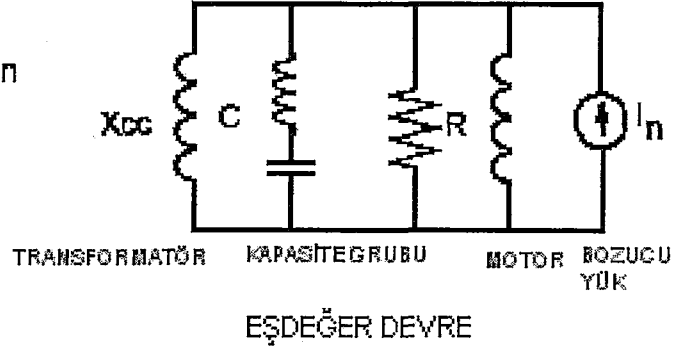
Bazı durumlarda, aydınlatma cihazları gibi tek fazlı yüklerin, ve kaynak makineleri gibi iki fazlı yüklerin ağırlıklı olarak bulunduğu tesislerde ise 3. harmonik akımları çok yüksek değerlere ulaşırlar. Bu yapıdaki bir sistemde yapılacak olan durduran filtreleme sistemindeki seri rezonans devreleri 150 Hz frekansının altında değerde (örneğin 133 Hz) dizayn edilmelidirler. Bu sayede filtre sisteminin etkinliği attırılacak ve muhtemel rezonans davranışının önüne geçilecektir. Aşağıda Şekil 3.4'te bu şekildeki bir tesiste alınmış ölçümün neticesindeki harmonik bar grafiği verilmiştir.



Şekil 3.4 Harmonik bar grafiği



Şekil 3.5 Prensip diyagramı

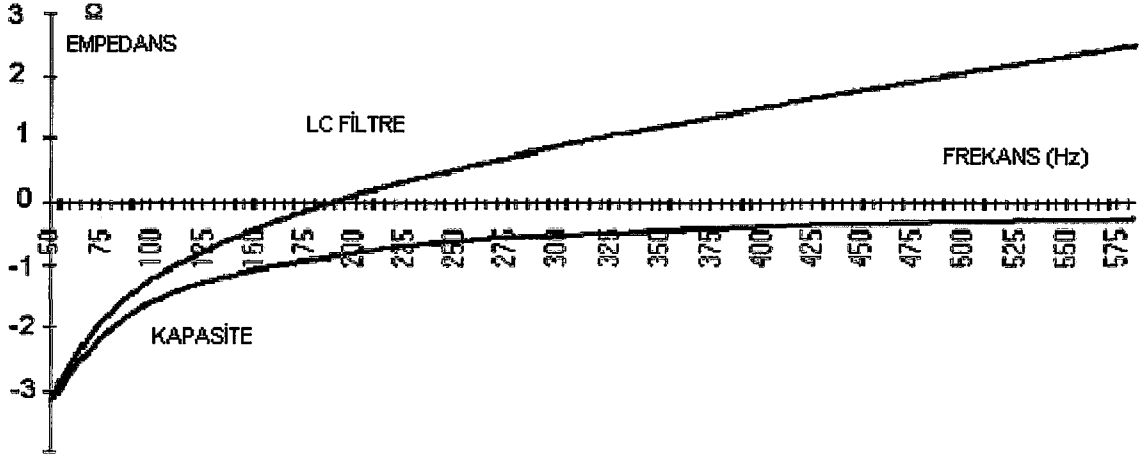


Şekil 3.6 Eşdeğer şema

Yukarıda verilen şekillerde durduran filtre uygulamasından sonra genel bir sistemin prensip diyagramı (Şekil 3.5) ve bu diyagramın eşdeğer şemaya dönüştürülmüş hali (Şekil 3.6) verilmişlerdir.

Aşağıda ise (Şekil 3.7), kompanzasyon sisteminin (C) frekansa göre empedans cevabı ile 189 Hz Durduran Filtre sisteminin (LC) frekansa göre empedans cevabı, karşılaştırma amacı ile aynı grafik üzerinde gösterilerek verilmişlerdir. Görüldüğü üzere; frekans arttıkça kapasitörlerin direnci sıfıra doğru azalmakta, bu sebeple de harmonik frekanslarının birinde rezonans ihtimali varolmaktadır. Seri LC filtre uygulamasında ise empedans 189 Hz de sıfır olmakta, bu frekans değerinin altında ve üzerinde ise sıfırdan uzaklaşan değerlerde olmaktadır. Böylece 250, 350, ... Hz frekanslarda kompanzasyon sisteminin empedansı yüksek değerlerde olacağından sistemdeki endüktif dirençler ve trafo ile rezonans şartlarının önüne geçilmiş olur. Görüldüğü gibi 50 Hz temel frekansta C devresi ile LC devresinin empedans değerleri benzer değerlerde olacaktır. Burada ayrıca görülmektedir ki sistemi çok aşırı biçimde kompanza etmek de sistemi temel bileşen frekansta rezonansa götürebilecek şartları oluşturabilecektir. Ancak uygulamalarda bu şekilde bir çalışma yapısı istenmez ve sağlanmaz.

LC FİLTRE VE KAPASİTE KARŞILAŞTIRMASI
(Aynı kvar büyüklüğünde oldukları kabul edilmiştir)



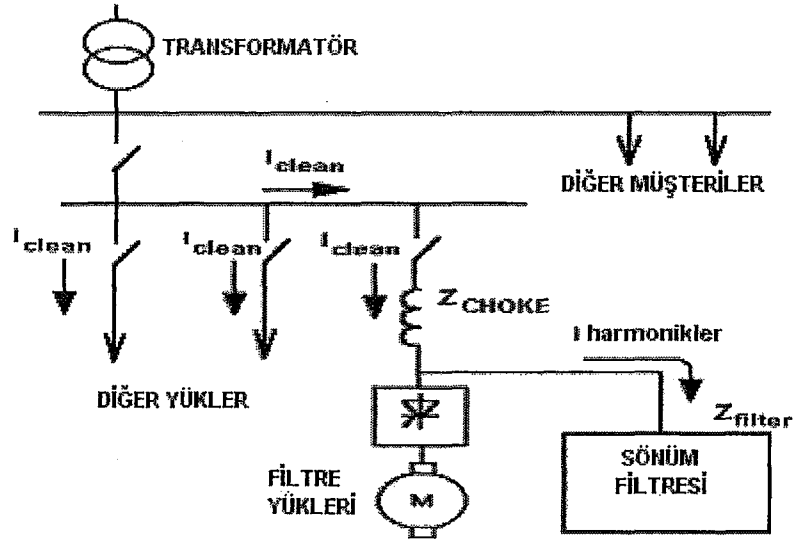
Şekil 3.7 Kompanzasyon sisteminin (C) frekansa göre empedans cevabı ile Durduran Filtre sisteminin (LC) frekansa göre empedans cevabı

- **Sönüm Filtre :**

Sönüm (Absorption) Filtre uygulaması; dağıtım sisteminin çeşitli noktalarındaki harmoniklerin kaynaklarında ve/veya merkezi biçimde süzülmesini sağlamak, böylece kendileri harmonik üretmeyen tüketicilerin bu harmoniklere maruz kalmalarının önüne geçerek zararlı etkilerin minimize edilmesini sağlamak amacı ile kullanılan “Harmonik Süzücü” özellikteki filtre uygulamasıdır. Bu filtreleme işleminde, “Durduran Filtre” sisteminde baz alınan kVar değeri yerine süzülecek harmonik akımlarının amplitüdüleri baz alınarak boyutlandırma yapılır. Bu sistemde de seri LC devreleri kullanılırlar. Burada LC devrelerinin ayar frekansları mevcut harmoniklerin tam değerlerine ayarlıdır (250 Hz, 350 Hz, 550 Hz, ...). Bir Sönüm Filtre tesis edilmesi düşünülen sistemde detaylı harmonik ölçümleri yapılarak harmonik akımlarının dereceleri (3., 5., 7., 11., ...) , temel bileşen akım içerisindeki oranları ve buna göre de her bir yüksek frekanslı akımın genliği belirlenmelidir. Filtre tasarımı bu belirlemeler neticesinde harmonik akımlarının etkin değerleri baz alınarak yapılmalıdır (160A 5. Harmonik , 70A 7. Harmonik , 30A 11. Harmonik , ... gibi). Sönüm filtre uygulaması lokal olarak harmonik kaynağı gibi davranan makinelerin veya makine gruplarının şalterlerine paralel biçimde uygulanacağı gibi, merkezi biçimde ana barada da çözüm yapılabilir. Aşağıda bu tip uygulamalar için prensip şemaları verilmiştir (Şekil 3.8 , Şekil 3.9).

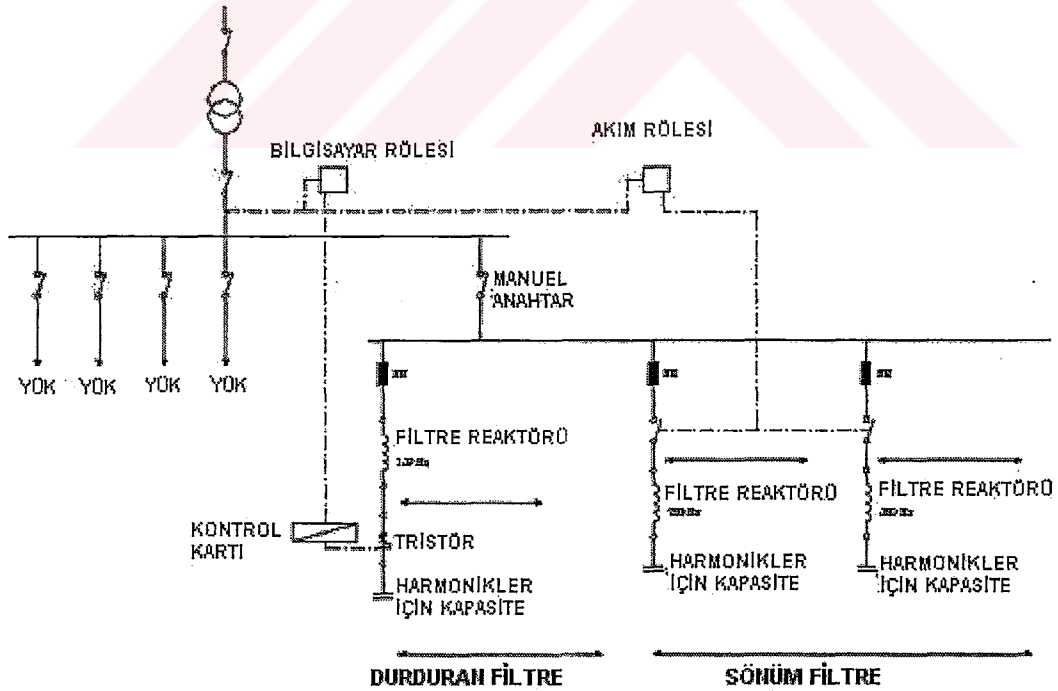
Sönüm Filtre sistemleri süzülecek harmonik akımı başına yaklaşık 0,5 kVAr değerinde olmak üzere temel frekansta kompanzasyon işlevi de yapmaktadırlar.

Sönüm Filtre Tesisi Lokal Uygulama Prensi Şeması (Şekil 3.8)



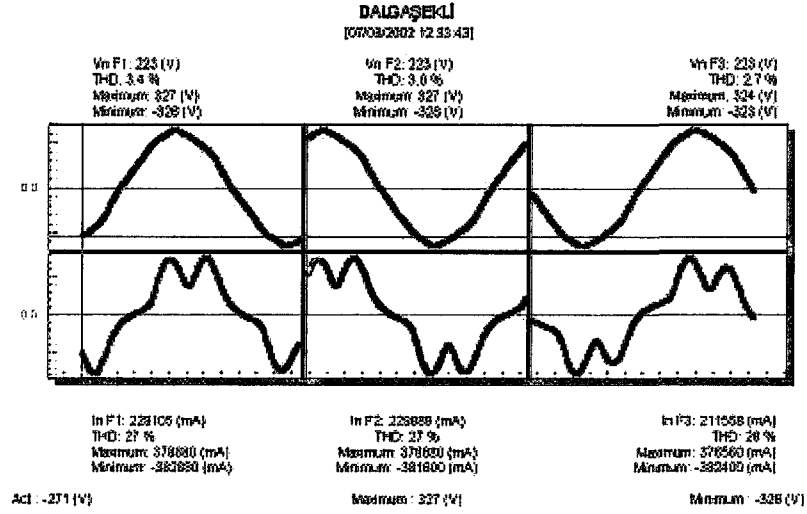
Şekil 3.8 Sönüm Filtre Tesisi Lokal Uygulama Prensi Şeması

Sönüm Filtre Tesisi + Durduran Filtreli Statik Kompanzasyon Tesisi Merkezi Uygulama Prensi Şeması :



Şekil 3.9 Sönüm Filtre Tesisi + Durduran Filtreli Statik Kompanzasyon Tesisi Merkezi Uygulama Prensi Şeması

Örnek Sönüm Filtre Boyutlandırılması : Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'e göre



Şekil 3.10 Bir trafonun anlık akım ve gerilim sintüs eğrileri

Date: 07/03/2002 12:35:43

Phase voltage3			Phase current3		
Vrms (V):223	THD (%):2.7		Irms (mA):220533	THD (%):28.4	
Fundamental (V):223	Disphase (%):103.6		Fundamental (mA):211558	Disphase (%):170.0	
Harmonic	Amplitude (%)	Disphase (°)	Harmonic	Amplitude (%)	Disphase (°)
2	0.241	351.0	2	0.476	145.1
3	0.076	171.0	3	1.757	255.9
4	0.156	339.5	4	0.463	310.1
5	2.147	65.7	5	27.804	124.9
6	0.115	325.2	6	0.101	174.1
7	1.375	139.7	7	9.727	257.9
8	0.036	167.0	8	0.055	49.0
9	0.061	69.6	9	0.138	260.8
10	0.056	98.7	10	0.059	59.3
11	0.076	224.8	11	1.673	218.7
12	0.028	164.2	12	0.047	69.0
13	0.021	107.2	13	1.246	46.7
14	0.026	230.8	14	0.056	163.3
15	0.036	82.3	15	0.102	65.3
16	0.011	68.2	16	0.046	37.5

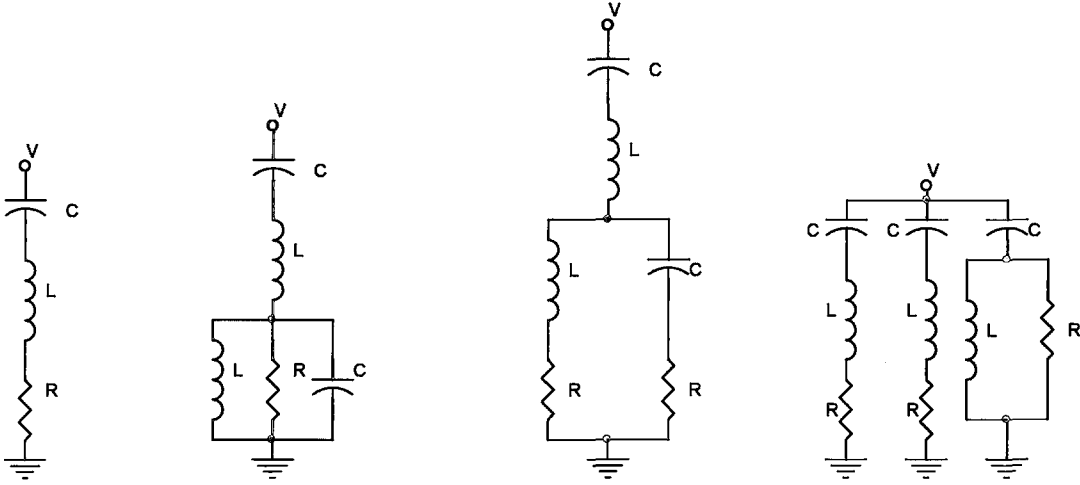
Şekil 3.11 Harmoniklerinin açılımını gösteren tablo

Hat Akımı = 220 A ; %THDI = 28,4 ; 5.Harmonik Akımı %27,8 ; 5.Harmonik Akımı %9,7

5.Harmonik Akımı = 61,16 A ; 7.Harmonik Akımı = 21,34 A

80 A'lık 250 Hz , 30 A'lık 350 ayarlı LC devreleri uygun görülmektedir. Sistem yaklaşık olarak 55 kVAr değerinde olmak üzere kompanze edilecektir. 300 A seri tıkama reaktörü ile filtrelenecek yük diğer kısımlardan izole edilebilir.

3.3. Pasif Harmonik Filtre Çeşitleri



Şekil 3.12

Single Tuned Filter

(Seri Rezonans Filtre)
(Band Geçiren)

Şekil 3.13

Double Tuned Filter

(Çift frekansa ayarlı Filtre)
(Band Geçiren)

Şekil 3.14

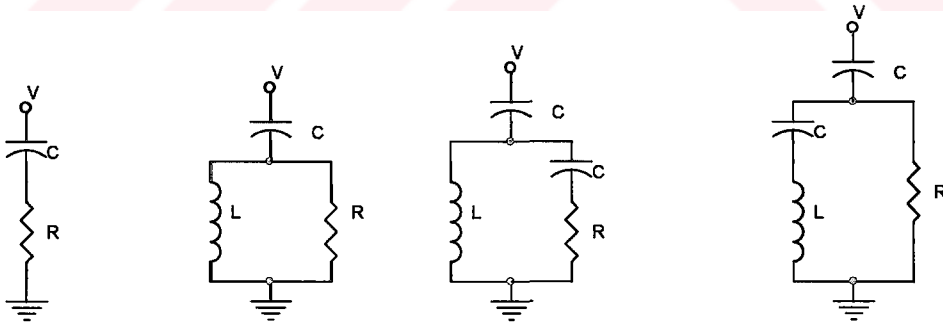
Double Band Pass

(Çift Band Geçiren
Filtre)

Şekil 3.15

Composite

Yüksek Geçiren Sönüm Filtreleri



Şekil 3.16

Birinci Mertebe

Şekil 3.17

İkinci Mertebe

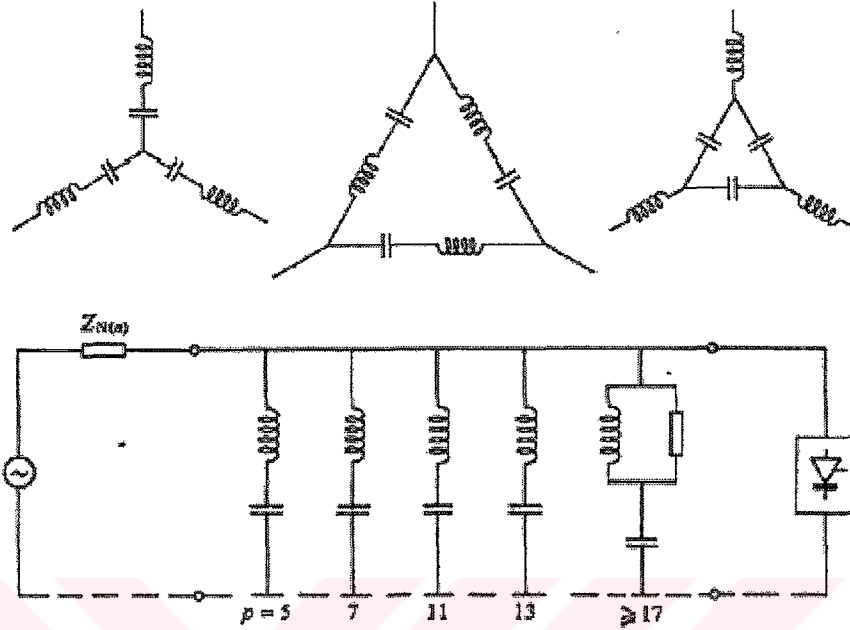
Şekil 3.18

Üçüncü Mertebe

Şekil 3.19

C-Type

3.4. Üç Fazlı Şebekeler için Filtre konfigürasyonları ve en düşük harmonikler için kısa devre linkli filtre örnekleri:



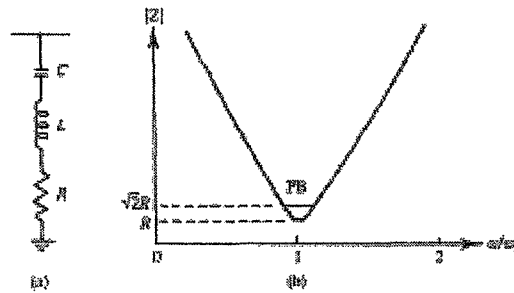
Şekil 3.20 Üç Fazlı Şebekeler için Filtre konfigürasyonları ve en düşük harmonikler için kısa devre linkli filtre örnekleri

3.5. Filtrelerde Kalite Faktörü (Q)

Q kalite faktörü, ayarlama frekansının genlik yanıtının keskinliğinin bir ölçüsüdür. Direnç değeri aracılığıyla belirlenir.

Yüksek kalite faktörüne sahip örnek bir seri band geçiren filtre için:

$Q = 30..50$ arasında değer alır. Düşük frekanslara keskin bir şekilde ayarlanabilir.

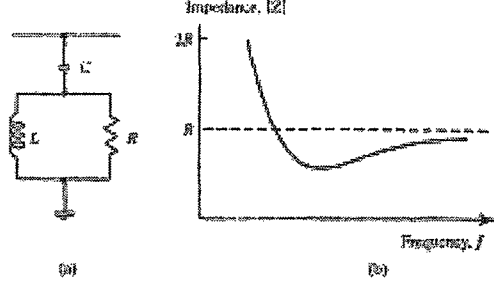


Şekil 3.21 Düşük frekanslar için Q kalite faktörü grafiği

$$Q = \frac{X_0}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{\omega_n}{PB} \quad (3.1)$$

Düşük kalite faktörüne sahip örnek bir 2. mertebeden sönüm filtresi için:

$Q = 0,5...5$ arasında değer alır. Yüksek mertebeden harmonikleri yok etmek için ayarlanmıştır.



Şekil 3.22 Yüksek frekanslar için Q kalite faktörü grafiği

$$Q = \frac{R}{X} \quad (3.2)$$

$$Q = \frac{n \cdot X_L}{R} = \frac{X_C}{n \cdot R} \quad (3.3)$$

Çift frekansa ayarlanmış bir filtrede Q kalite faktörü f_m frekansında ($f_m = \sqrt{\frac{f_1}{f_2}}$) paralel R ve L elemanları cinsinden şu şekilde ifade edilir:

$$Q = \frac{R}{L \times 2\pi f_m} \quad (3.4)$$

Yüksek geçiren ve C-Type filtreler için kalite faktörü yine R ve L elemanları cinsinden (f_n harmoniğe ayarlı frekans olmak üzere) şu şekilde ifade edilir:

$$Q = \frac{R}{L \times 2\pi f_n} \quad (3.5)$$

3.6. Filtre Tasarımı Öncesinde Dikkate Alınması Gereken Noktalar

Harmonik filtre tasarımı yapılacak işletmenin ana trafosundan ve gerekli görülen diğer yerlerden bir harmonik analizör yardımıyla gerekli ölçümler yapılır. Daha sonra yapılacak olan yapılan ölçüm sonucu elde edilen verilerle hangi harmonikten ne kadar var ve değerleri

nelerdir tespit edilir. Buna göre işletmede kurulacak filtre tipi, avantajları, dezavantajları ve maliyet hesapları yapıldıktan sonra seçilir ve reaktif kompanzasyon (MVAR) değeri belirlenir. Burada tasarlanan filtrenin büyüklüğü temel frekansta sağlayabildiği reaktif güç olarak tanımlanır. Gerilim standartlarına uygun kapasitörlerin ve filtrenin ayarlanacağı harmonik mertebesi frekansı için endüktör değerleri belirlenir. Filtre bankasının harmonik akım spektrumu hesaplanır. Filtre uygulandıktan sonra harmonik spektrum, THD, rrs değerleri hesaplanır. Aynı değerler akım kaynağı için de hesaplanır ve IEEE 519 standartlarına uygunluğu incelenir.

3.7. IEEE 519 -1992 standartları

Harmonik problemlerinin belli bir seviyeye ulaşmasından sonra, ülkeler kabul edilebilir gerilim ve akım harmonik değerlerini bir standarda oturtmak üzere IEEE 519-1992 belgesini hazırlamışlardır. Bu sayede cihazlardaki harmonik akımlarını sınırlayarak PCC (point to common coupling)'deki gerilim THD belirlenen limitlerde tutulmuş olacaktır. Çoğu endüstriyel güç sisteminde, izin verilen maksimum THD değeri %5 iken bu değer tek bir harmonik komponenti için %3 olarak kabul edilir.

Gerilim Distorsiyon Limitleri		
	Ayrık Gerilimler	Toplam Gerilim
PCC'deki Bara Gerilimi	Distorsiyon (%)	Distorsiyon THD (%)
69 kV ve altı	3	5
69.001kV - 161 kV	1,5	2,5
161.001kV ve üstü	1	1,5
HVDC terminalleri gibi yüksek gerilimli sistemlerde THD değeri %2'ye kadar değerler almalıdır.		

Çizelge 3.1 IEEE 519 Standartlarına göre THD gerilim limitleri

Genel Dağıtım Şebekeleri için Akım Distorsiyon Limitleri						
120 V - 69.000 V arasında						
% IL olarak Maksimum Harmonik Akım Distorsiyonu						
ISC/IL	<11	11_h<17	17_h<23	23_h<35	35_h	TDD
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100<1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20
Çift harmonikler için limitler tek harmoniklerin %25 üzerindedir						
DC offsette oluşan akım distorsiyonlarına izin verilmez, örn. Yarı-dalga dönüştürücüleri						
Bütün güç üreten ekipmanlar ISC/IL değerlerinden bağımsız olarak belirtilen akım distorsiyon limitleri ile sınırlandırılmıştır						
ISC= PCC'deki maksimum kısa devre akımı						
IL= PCC'deki maksimum talep yük akımı (temel frekans bileşenleri)						

Çizelge 3.2 IEEE 519 Standartlarına göre THD akım limitleri

Çift harmonikler yukarıda belirtilen tek harmoniklerin %25'i ile sınırlandırılmışlardır.

Tablodaki izin verilen maksimum akım THD I_{SC}/I_1 'in veya kısa devre oranı (SCR)'nin bir fonksiyonudur. Burada I_{SC} PCC'deki kısa devre akımının büyüklüğü ve I_1 de toplam yükün PCC'deki oransal temel akımdır.

3.8. Toplam Harmonik Distorsiyonu

Harmoniklerin seviyesinin belirlenmesinde yaygın bir ölçüt olarak kullanılan toplam harmonik distorsiyonu

$$THD_v = \frac{\sqrt{(V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_i^2)}}{V_1} \cdot 100 \quad (3.6)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_i^2)}}{I_1} \cdot 100 \quad (3.7)$$

ifadeleri ile gerilim ve akım için tanımlanmaktadır. Burada THD, harmonik bileşenlerin efektif değerinin, temel bileşen efektif değerine oranıdır. Bu değer, tam bir sinüs dalga şeklinden, harmonikleri içeren periyodik dalga şeklinin uzaklaşmasını belirlemek için kullanılır. Sinüsoidal bir dalga şekli için toplam harmonik distorsiyonu sıfırdır. Benzer şekilde, h. harmonik mertebesindeki gerilim ve akım için tekil harmonik distorsiyonları sırasıyla,

$$HD_v = \frac{V_h}{V_1} \quad (3.8)$$

$$HD_i = \frac{I_h}{I_1} \quad (3.9)$$

olarak tanımlanır.

3.9. Toplam Talep Distorsiyonu

Bu kavram IEEE 'Standart 519' da yer almaktadır. Bu standartta toplam talep distorsiyonu (TDD),

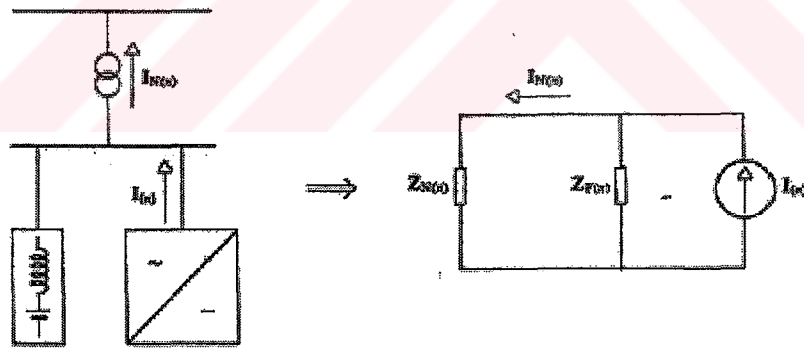
$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (3.10)$$

olarak tanımlanır. Eşitlikteki I_L , önceki 12 ay için maksimum taleplerin ortalama akımı olarak temel frekans için maksimum yük akımıdır (15 veya 30 dakika boyunca).

3.10. Filtre Tasarımı

Akım kaynağı, filtre admitansı ve sistem admitansı filtre dizaynı yapılırken detaylı şekilde dikkate alınması gereken komponentlerdir. Dönüştürücüden gelen akım şebeke ve filtrenin ilgili empedanslarına dağıtılacaktır.

$$I_{N(n)} Z_{N(n)} = (I_{(n)} - I_{N(n)}) Z_{F(n)}$$



Şekil 3.23 Şebekenin eşdeğer devresindeki akım ve empedans gösterimi

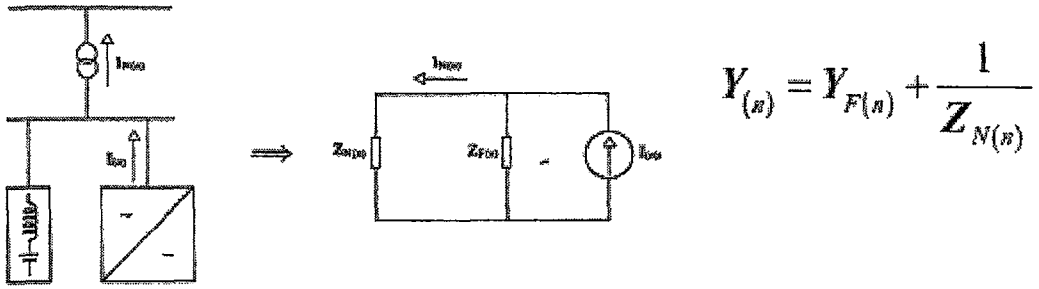
Şebekedeki harmonik akım değeri :

$$I_{N(n)} = I_{(n)} \frac{Z_{F(n)}}{Z_{F(n)} + Z_{N(n)}} = I_{(n)} \frac{1}{1 + Y_{F(n)} Z_{N(n)}} \quad (3.11)$$

Harmonik gerilimi :

$$U_{(n)} = \frac{I_{(n)}}{Y_{(n)}} \quad (3.12)$$

Dönüştürücü tarafından bakıldığındaki admitans filtre ve şebekenin bir özetini sunmaktadır.



Şekil 3.24 Şebekenin eşdeğer devresindeki akım ve admitans gösterimi

Filtre dizaynlarında ikinci mertebeden bir sönüm filtresinin admitansındaki kondüktans, süseptans ve minimum admitans değerleri sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

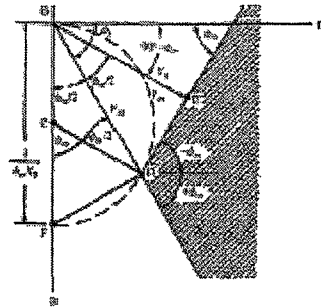
$$B_f = \frac{x}{R_1} \left[\frac{1 - mx^2 + m^2 x^2}{(1 - mx^2)^2 + m^2 x^2} \right] \quad (3.13)$$

$$G_f = \frac{1}{R_1} \left[\frac{m^2 x^4}{(1 - mx^2)^2 + m^2 x^2} \right] \quad (3.14)$$

$$(x = f / f_0) \quad (3.15)$$

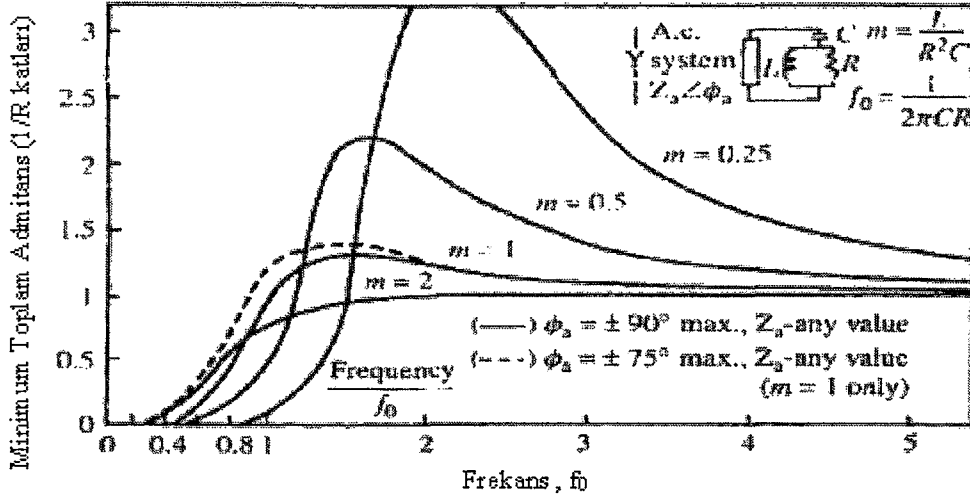
$$Y = B_f \cos \phi_m + G_f \sin \phi_m$$

$$|\cot \phi_f| = |G_f / B_f| = |\tan \phi_m|$$



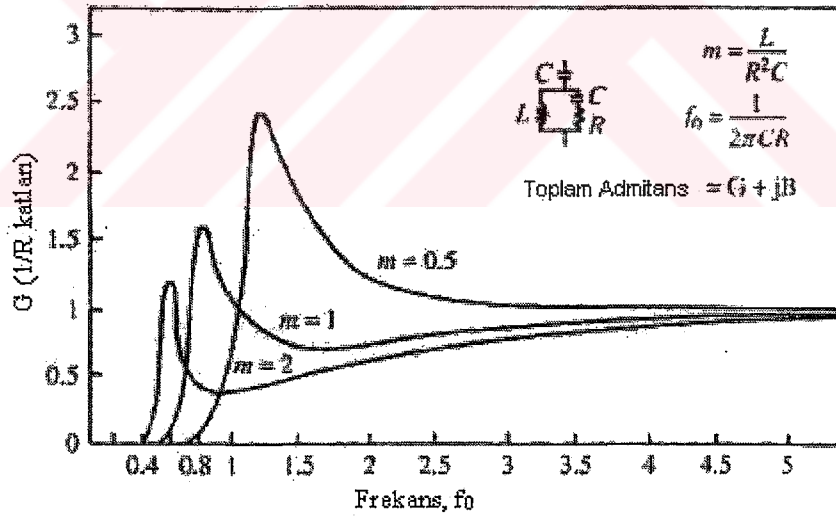
Şekil 3.25 İkinci mertebeden bir sönüm filtresinin admitansındaki kondüktans, süseptans ve minimum admitans değerlerinin grafiksel gösterimi

İkinci mertebeden alçak geçiren filtredeki admitansın grafiksel gösterimi ise aşağıdaki gibidir:



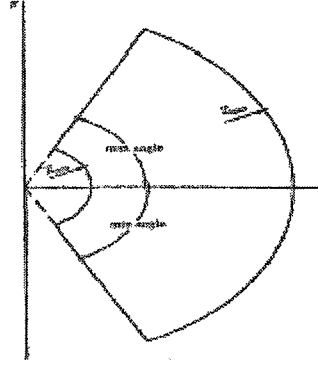
Şekil 3.26 İkinci mertebeden alçak geçiren filtredeki admitansın grafiksel gösterimi [1]

Üçüncü mertebeden bir alçak geçiren filtrede kondüktansın grafiksel gösterimi de aşağıdaki gibidir:

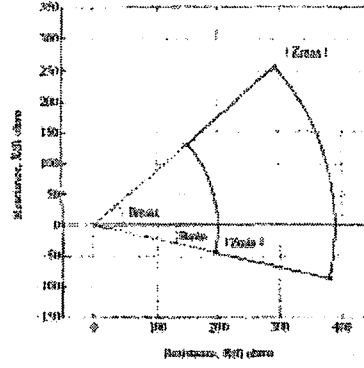


Şekil 3.27 Üçüncü mertebeden bir alçak geçiren filtrede kondüktansın grafiksel gösterimi

Sektör diyagramları incelendiğinde de direnç ve reaktans arasında aşağıdaki grafiklere ulaşılır:

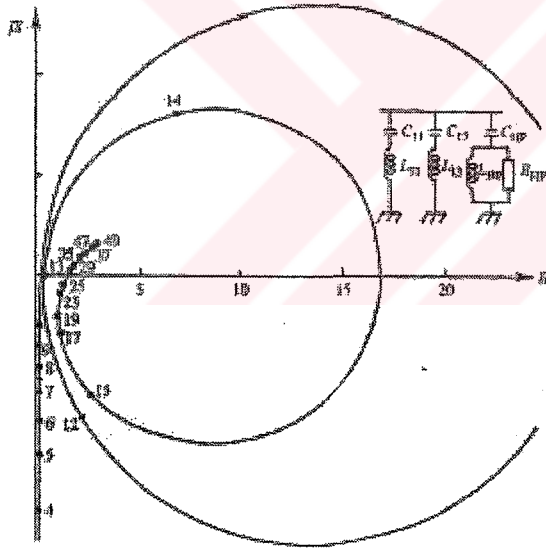


Şekil 3.28 Beklenen grafik

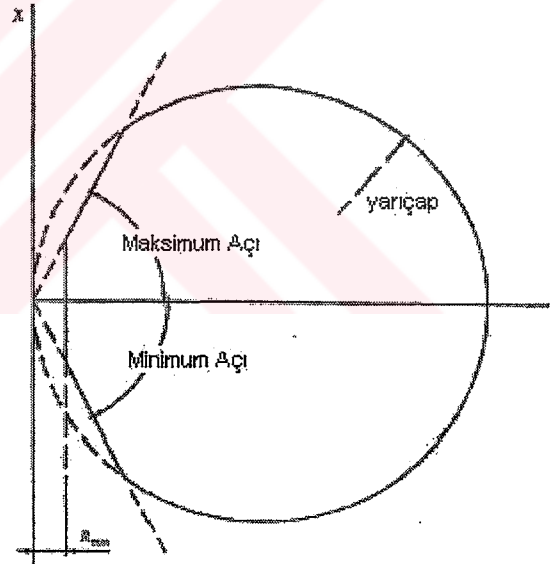


Şekil 3.29 Pratikte ulaşılan grafik

Kompozit bir filtrede benzer şekilde:

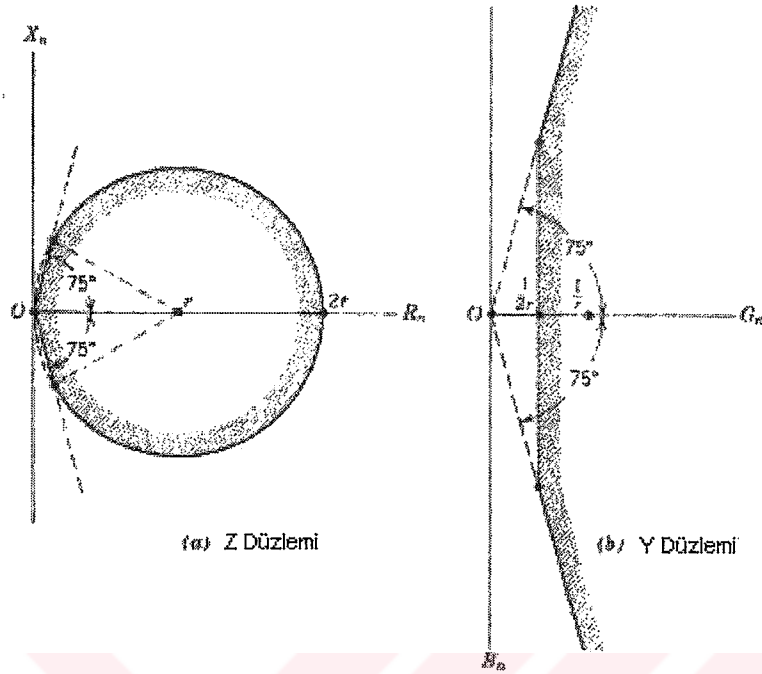


Şekil 3.30 Empedans grafiği ve R- jX eğrisi



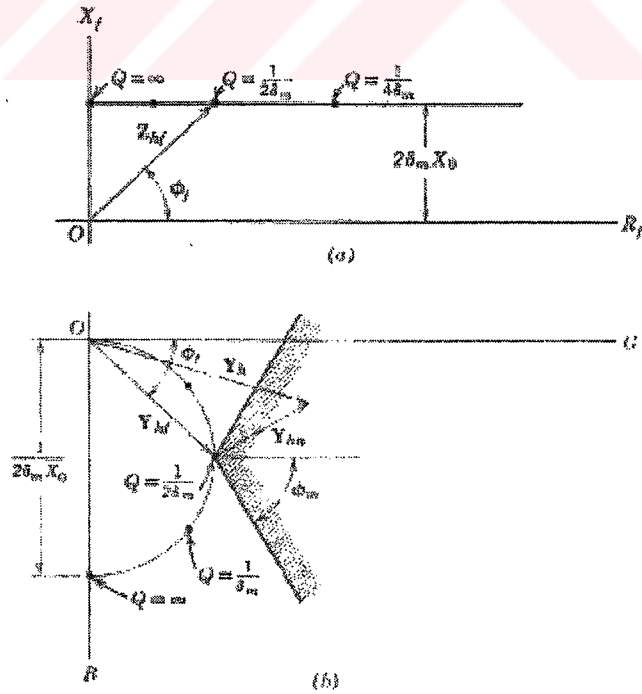
Şekil 3.31 Dairesel grafik yapısı

Filtre Dizaynında Z düzleminde Y düzlemine geçiş :



Şekil 3.32 Filtre dizaynında Z düzleminde Y düzlemine geçişin grafiksel gösterimi

Tek bir frekansa ayarlı seri rezonans filtrenin Z ve Y düzlemlerindeki dairesel grafikleri:



Şekil 3.33 Tek bir frekansa ayarlı seri rezonans filtrenin Z ve Y düzlemlerindeki dairesel grafikleri

Filtrelerde temel frekandaki Reaktif ve Aktif güçlerin hesaplanması:

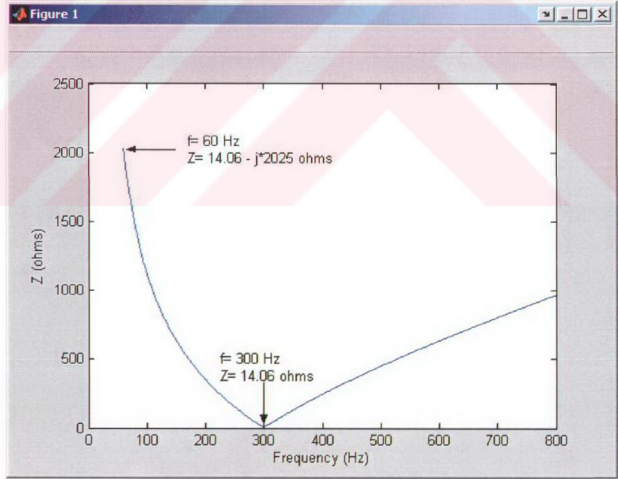
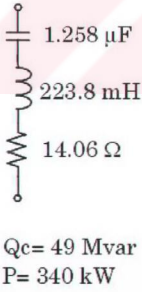
f_1 temel frekansındaki Reaktif güç :

$$Q_c = \frac{V^2}{X_c} \cdot \frac{n^2}{(n^2 - 1)} \quad (3.17)$$

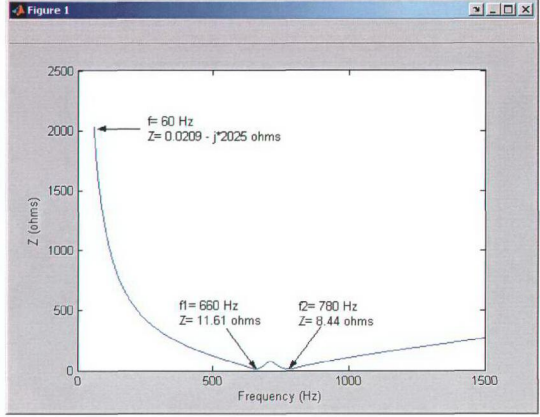
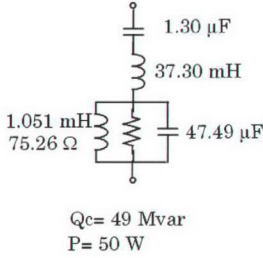
f_1 temel frekansındaki Aktif güç (kayıplar) :

$$P \cong Q_c \cdot \frac{n}{n^2 - 1} \cdot \frac{1}{Q} \quad (3.18)$$

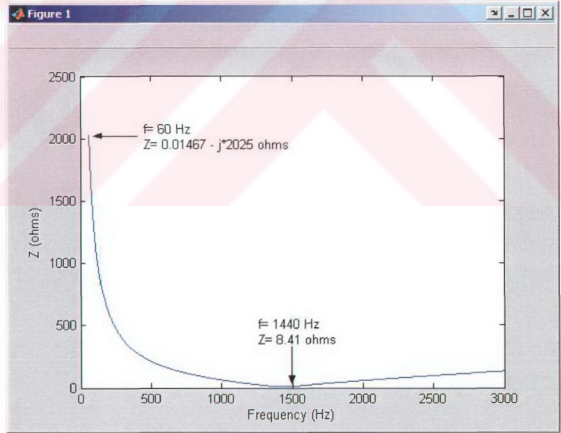
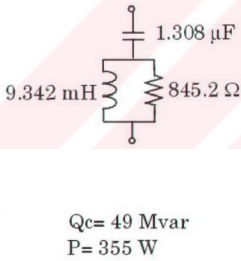
Aşağıdaki şekillerde dört çeşit filtre için 60 Hz temel frekansındaki örnek empedans – frekans grafikleri verilmiştir. Reaktif ve Aktif güç değerleri hesaplanmıştır.



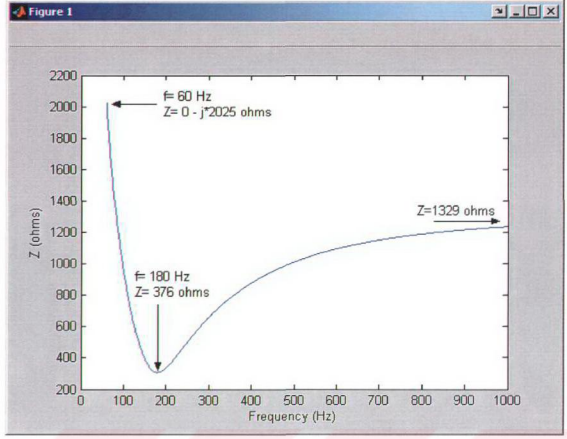
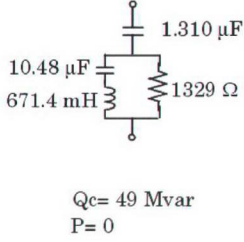
Şekil 3.37 Tek frekansa ayarlı, 315 kV , 49 Mvar, 5. harmoniğe ayarlı $Q=30$ 'luk bir filtre



Şekil 3.38 Çift frekansa ayarlı, 315 kV , 49 Mvar, 11. ve 13. harmoniğe ayarlı $Q=16$ 'lık bir filtre



Şekil 3.39 Yüksek geçiren, 315 kV , 49 Mvar, 24. harmoniğe ayarlı $Q=10$ 'luk bir filtre



Şekil 3.40 C-type Yüksek geçiren, 315 kV, 49 Mvar, 3. harmoniğe ayarlı $Q=1.75$ 'lik bir filtre

4. HVDC (High Voltage Direct Current – Yüksek Gerilim Doğru Akım)

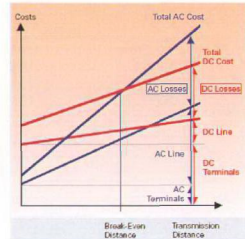
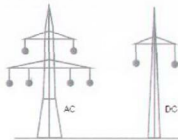
4.1. HVDC Teknolojisi

Hazırlanan bitirme tezinde harmonik filtrelerin incelenmesindeki uygulama için harmoniklere neden olan bir sistem kullanılması gerekiyordu. Bunun için harmoniğe neden olan HVDC (High Voltage Direct Current – Yüksek Gerilim Doğru Akım) Teknolojisi ile elektrik iletimi temel alınmıştır. Buna geçmeden önce HVDC'nin incelenmesinin konuyu anlamada kolaylık olacağını düşünüyorum.

DC transmisyunun neden tercih edildiğini anlamak için AC linklerin DC'ye geçişi gerektirdiği dezavantajları incelemek gerekir. Bir cevap, kayıpların daha düşük olduğudur; fakat bu tam anlamıyla doğru değildir. Bir transmisyon sisteminde kayıpların seviyesi belirlenmiştir ve seçilen iletkenle ilgili olarak düzenlenir. DC ve AC iletkenler gerek yerüstü gerekse yeraltı kabloları ile daha az kayıplara ulaşabilir ancak harcamalar da bu oranda artacaktır. Dolayısıyla seçim genel anlamda ekonomiktir.

4.2. Ekonomik Değerlendirmeler:

Bir DC transmisyon hattı taşıma kuleleriyle birlikte eşdeğer bir AC transmisyon hattından daha az masrafla aynı enerjiyi taşımak üzere dizayn edilebilir. Her iki hat sonundaki DC dönüştürücülerin AC hat sonlandırıcılardan daha pahalı olmasına rağmen toplam maliyetler incelendiğinde AC alternatifine göre DC transmisyonun maliyetlerinin yine de çok düşük olduğu görülecektir. Transmisyunun denizaltından veya yer altından kablo ile yapıldığı düşünülürse, bir uçtan bir uca uzaklıkları yerüstündeki transmisyondan çok daha az olacaktır. AC-DC masraflarının karşılaştırması için aşağıda AC-DC terminal giderleri, AC-DC hat giderleri ve AC-DC kayıp değerlerinin dikkate alınarak çıkarıldığı grafik incelenebilir. [2]



Şekil 4.1 AC/DC taşıma kuleleri Şekil 4.2 AC-DC terminal giderleri, hat giderleri ve kayıp değerlerinin dikkate alınarak çıkarıldığı grafik

4.3. Teknik değerlendirmeler:

Yerüstündeki hatların ve kabloların endüktif ve kapasitif elemanları AC transmisyonda transmisyona kapasitesi ve mesafesini sınırlandırmaktadır.

Farklı frekanstaki iki AC sistem arasında bir bağlantı mümkün değildir. (Japonya'da ülkenin yarısının 50Hz diğer yarısının 60Hz şebekeyle beslenmesi gibi). Bu sistemin kararsızlık, çok yüksek kısa devre seviyeleri ve istenmeyen güç atlamalarından kaynaklanmaktadır. Oysa bir DC link farklı frekans veya şebekeler arasında güç transmisyonuna imkan sağlamaktadır.

Açık denizler veya geniş şehirlerde örneği görüldüğü gibi uzun mesafe kablo bağlantılarında, AC kabloların yüksek akım çekmesi sebebiyle HVDC tek çözüm olarak görülmektedir.

4.4. Çevresel değerlendirmeler:

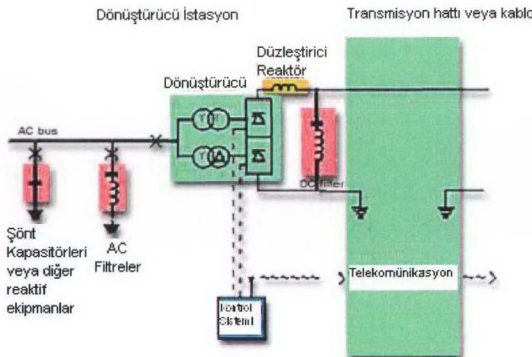
Bir DC hat AC hattan çok daha az yer kullandığı için görsel olarak da kapladığı yer olarak da daha kabul edilebilirdir.

Şekil 4.1'deki aynı miktar enerjii taşıyan AC ve DC kulelerin yapıları incelendiğinde DC kulelerin enerji taşıma kapasitelerinin artırılabilirliğinin devam ettiği görülebilir.

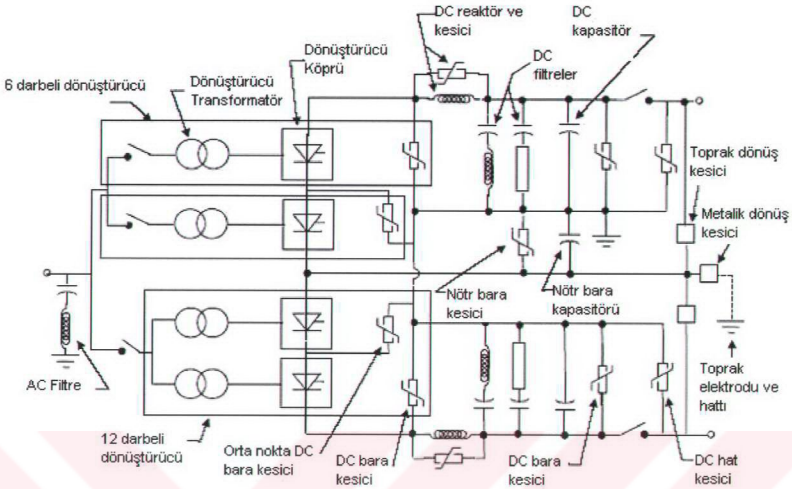
Burada dönüştürücü istasyonlarında dikkat edilmesi gereken birkaç nokta vardır. Bunlar, ses gürültüleri, görsel etkiler, elektromanyetik uygunluktur.

4.5. HVDC sistem yapısı:

HVDC'nin klasik yapısı 1970'lerde civa ark fırınlarının yerini tristör valflerinin almasıyla oluşmuştur ve şekilde ana hatlarıyla gösterilmiştir. [1]



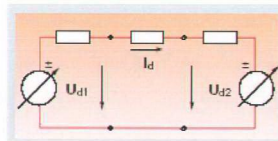
Şekil 4.3 HVDC'nin tristör valflerinden oluşan klasik yapısı



Şekil 4.4 HVDC istasyonu örneği

Bir HVDC istasyonu AC'den DC'ye ve tam tersi dönüşümde tristör valflerini kullanır. 12 darbeli dönüştürücü köprüsü AC sisteme dönüştürücü transformatörlerle bağlanmıştır. HVDC dönüştürücü AC tarafında 11, 13, 23, 25, 35 ve 37. harmonikler oluşturur. Bu harmoniklerin bağlanan AC şebekeye girmemesi AC filtreler ile sağlanır. Filtreler aynı zamanda dönüştürücü tarafından tüketilen reaktif gücün bir kısmını üretirler.

HVDC dönüştürücüler DC devre düzenlemeleri ile ayırıt edirlirler. Aşağıda bir HVDC kutbundaki eşdeğer DC devresi görülmektedir. [2]

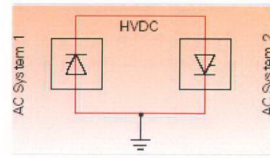


Şekil 4.5 Eşdeğer DC devre

Akım ve güç kontrol edilen gerilim farklılıkları ile kontrol edilir. Akım yönü sabit ve gücün yönü gerilim kutuplarıyla kontrol edilir.

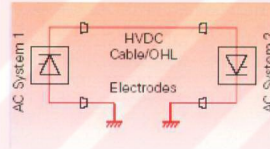
4.5.1. Dönüştürücüler

Doğrultucu ve dönüştürücünün aynı istasyonda olduğu uçtan uca dönüştürücüler.[2]

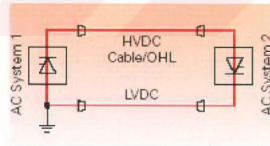


Şekil 4.6 Uçtan uca dönüştürücü

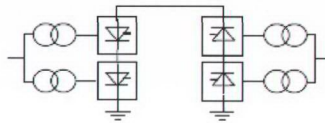
Çok uzun mesafelerde ve çok uzun deniz altı kablolama sistemlerinde toprak/deniz elektrodları en fizibil sonuç olarak görülmektedir. [2]



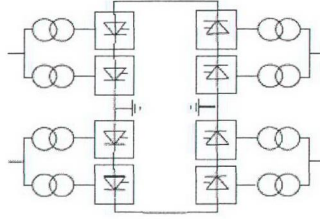
Şekil 4.7 Tek kutuplu toprak dönüşüm



Şekil 4.8 Tek kutuplu metalik dönüşüm

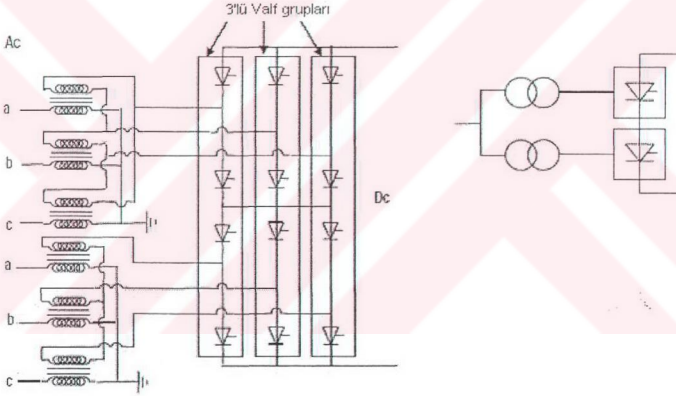


Şekil 4.9 Tek kutuplu yapı



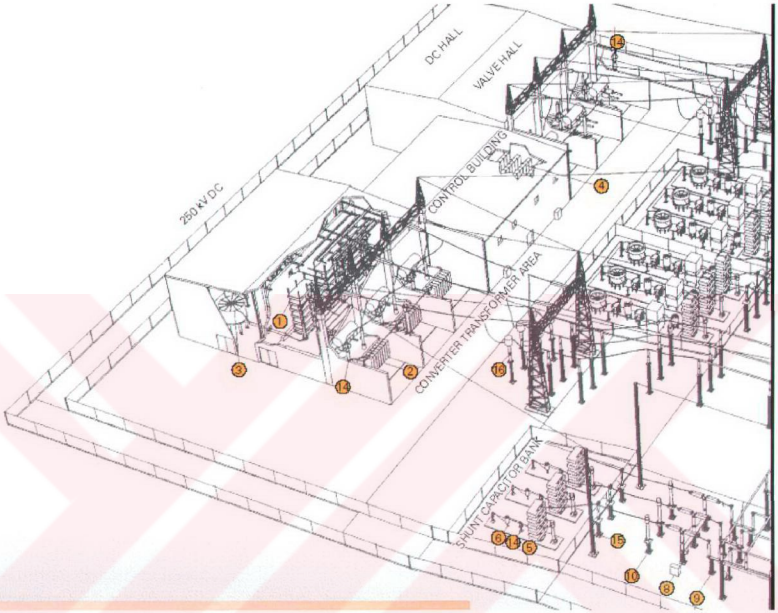
Şekil 4.10 İki kutuplu yapı

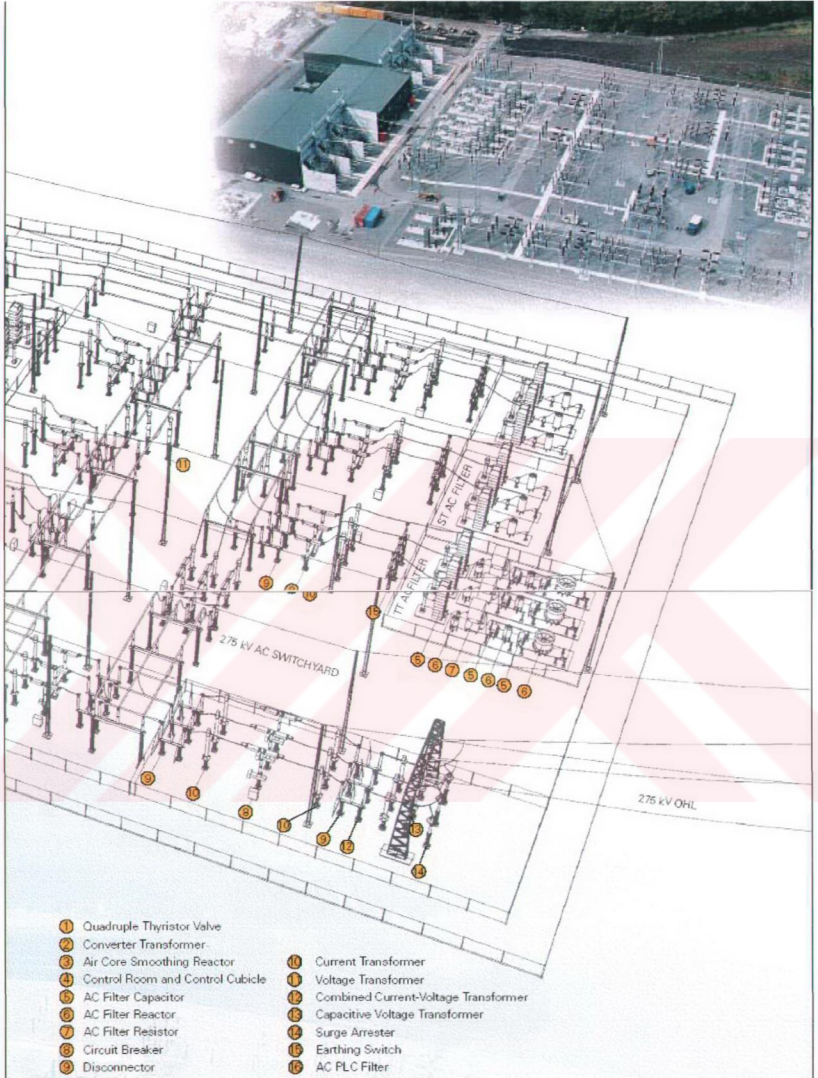
HVDC dönüştürücüler genellikle 12-darbeli olarak tasarlanırlar. Bunlar iki adet 6-darbeli dönüştürücü köprülerinin seri bağlanması ile elde edilebilir ve iki 3-fazlı birbirinden 30 derecelik açılar ile ayrılmış iki sisteme ihtiyaç duyar. (R.L. Hauth 1997)



Şekil 4.11 6-darbeli iki adet seri dönüştürüciden oluşan 12-darbeli valf grup konfigürasyonu

4.5.2. HVDC Transmision Projesindeki Tipik Yerleşim Grafiği ve Komponent Düzenlemeleri



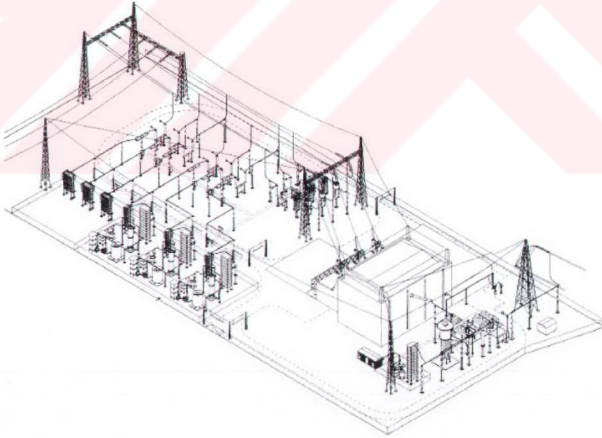


Şekil 4.12 Auchencrosch HVDC istasyonu örneği

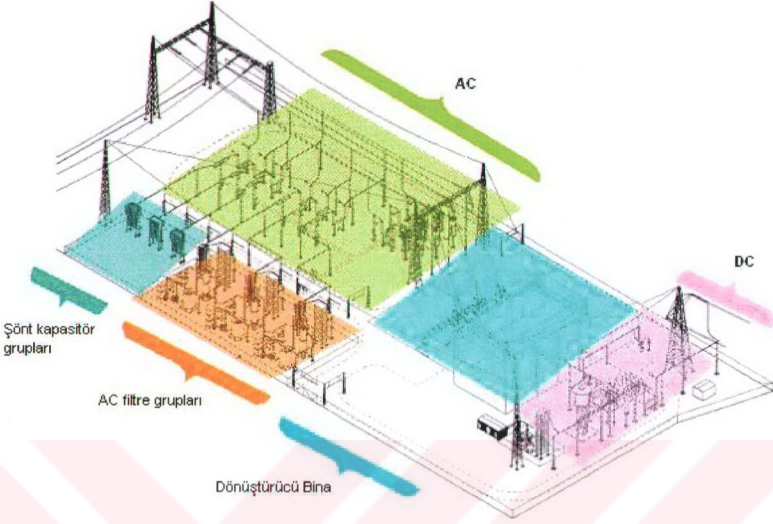
- | | |
|---|-------------------------------------|
| 1-Dörtlü tristör valfi | 5- AC filtre kapasitör |
| 2-Dönüştürücü transformatör | 6- AC filtre reaktör |
| 3-Düzleştirici reaktör | 7- AC filtre resistör |
| 4-Kontrol odası | 8- Devre bölücü |
| 9-Ayrıcı | 13-Kapasitif gerilim transformatörü |
| 10-Akım transformatörü | 14-Dalga engelleyici |
| 11-Gerilim transformatörü | 15-Topraklama anahtarı |
| 12-Birleşik akım-gerilim transformatörü | 16-AC PLC filtre |

Tristör valfleri AC-DC arasındaki dönüşümü yaptıkları için bir HVDC sistemindeki esas elemanlar olarak adlandırılabilirler. Tristörler anahtarlama elemanları olarak kullanılırlar ve bu şekilde valflerin kontrol edilebilirlikleri sağlanır.

Dönüştürücü transformatörler AC baradaki gerilimi alıp dönüştürücünün gereken gerilim girişine yönlendirir. 12-darbeli dönüştürücü, birbirinden 30 veya 150 elektriksel derece ile ayrılmış iki 3-fazlı sisteme gereksinim duyar. [2]



Şekil 4.13 HVDC transmisyon istasyonu tipik yerleşim gösterimi



Şekil 4.14 HVDC transmision istasyonu tipik yerleşimi grafiksel gösterimi

4.5.3. Düzleştirici reaktörler

Düzleştirici reaktörlerin temel görevi DC tarafındaki harmonik akımları azaltmaktır. Bunun yanında düzleştirici reaktörler, süreksiz akımları önlemede, DC hata akımlarının sınırlandırılmasında, DC devredeki rezonansların önlenmesinde ve tetiklemeyi azaltarak DC hattın kaynaklanabilecek potansiyel telefon enterferelerinin önlenmesinde etkili olurlar. Çoğu düzleştirici reaktörler hava çekirdekli ve hava yalıtımlıdır, bunun yanısıra geniş HVDC projeleri için demir çekirdekli ve yağ-yalıtımlı elemanlar kullanılır. Düzleştirici reaktörler DC'de 100 ve 150Hz gibi düşük mertebeli harmonik frekanslardaki rezonansları önlemede kullanılırlar. Dizayn yönü hesaba katıldığında düzleştirici reaktörlerin genellikle uzun mesafeli DC hatlar için 100-300mH arasında ve uçtan uca istasyonlar için de 30-80mH arasında seçilirler. [1]



Şekil 4.15 Hava çekirdekli yapı
Enduktans: 150 mH
Gerilim: 500 kV DC
Akım: 1800 A DC



Şekil 4.16 Yağ yalıtımlı yapı
Enduktans:270 mH
Gerilim: 500 kV DC
Akım: 3000 A DC

4.5.4. Harmonik Filtreler

Daha önce kapsamlı olarak tanımlandırılmış olan harmonik filtrelerin HVDC dönüştürücü istasyonlarındaki iki esas görevi vardır.

HVDC dönüştürücünün oluşturduğu harmonik akımlarını absorbe etmek ve bunların bağlı olduğu AC sistemlere olan gerilim distorsiyonu ve telefon enterfereleri gibi etkilerini azaltmak.

Dönüştürücü istasyonlarında ihtiyaç duyulan reaktif güç ihtiyacının karşılanması.

4.6. Dizayn Kriterleri

4.6.1. Reaktif Güç Gereklere

Bir HVDC dönüştürücüde reaktif güç tüketimi aktif güç, transformatör reaktansı ve kontrol açısına bağlıdır. Reaktif güç artan aktif güçle birlikte artar. Bir dönüştürücü istasyonundaki ortak ihtiyaç, belirli yükteki tam kompenzasyon veya aşırı kompenzasyondur. İlave olarak, yük ve gerilim aralığı için bir reaktif band, ve banka anahtarlama sırasında gerilim adımları belirlenmelidir. Bu faktörler filtre ve şönt kapasitör bankalarının sayı ve boyutlarının belirleyecektir.

4.6.2. Harmonik Performans Gereklere

HVDC dönüştürücüler karakteristik ve karakteristik olmayan harmonik akımları üretirler. 12 darbeli dönüştürücü için karakteristik harmonik mertebeleri şu şekilde ifade edilir:

$$n=(12*k) \pm 1 \quad (k=1,2,3\dots) \quad (4.1)$$

Bunlar ideal koşullarda oluşan harmonik bileşenleridir.

Örn. Doğru akımın ideal düzleştirilmesi, simetrik AC gerilimleri, transformatör empedansı ve tetikleme açıları.

Karakteristik harmonik bileşenleri en büyük akım değerinde olanlardır, fakat diğer bileşenler de önemli görülebilir. AC sistemin negatif ardışıl bileşeni tarafından oluşan üçüncü harmonik çoğu zaman filtreleme gerektirecektir.

Harmonik performansı ile ilgili en sık kullanılan kriter, dönüştürücü istasyonundaki baradaki harmonik gerilimidir. Filtre devresinin amacı ilgili harmonik elemanlara yeterli düşük empedanslar sağlamak suretiyle harmonik gerilimleri kabul edilebilir seviyelere indirmektir.

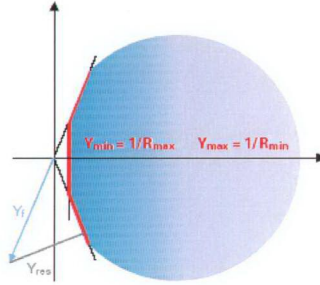
4.6.3. Şebeke Empedansı

AC baradaki distorsiyon seviyesi, filtre empedansına olduğu kadar şebeke empedansına da bağlıdır. Filtre empedansı ve şebeke empedansı arasındaki paralel rezonanslar filtrelerin ayarlanmadığı harmonik komponentlerdeki istenmeyen artışlara sebep olabilir. Bu sebeple, filtre dizaynını optimize etmek için ilgili bütün harmoniklere uygun bir empedans modeli gerekmektedir. Şebeke empedansını filtre hesaplarına dahil etmek için iki metod vardır:

İlgili bütün harmonikler ve şebeke durumları için empedans vektörlerinin hesaplamak, Empedans vektörleri için bir geometrik yer varsaymak.

Tüm bir AC şebekenin modellenmesi çok karmaşık ve zaman alıcıdır. Bu sebeple geometrik yer metodu sıklıkla kullanılır. Sınırlı sayıda hesaplama ve ölçüm esas alınarak yapılmaktadır. Daha kesin bir harmonik performans hesaplaması yapmak için farklı harmonikler veya bandlar için farklı geometrik yerler belirlenir.

Tipik geometrik yer aşağıda verildiği gibidir. Şekile göre empedans vektörü renkli alanın çevresinin içerisinde bir yerdedir.[2]



Şekil 4.17 Filtre empedans vektörünün grafiksel gösterimi ve Y düzlemine geçiş

Filtrenin empedans vektörü her bir harmonik frekansı için Y düzlemine dönüştürülmüştür.

Admitans düzlemine yerleştirilen şebeke ve filtre empedansları ile filtre admitans noktası ve şebeke admitans sınırı arasındaki en kısa vektör, şebeke ve filtre arasındaki paralel kombinasyon için olası en düşük admitans değerini verir. Bu değer olası en yüksek harmonik gerilimin belirlenmesinde kullanılır.

4.6.4. Sürekli Hal Hesaplamaları

Bir AC filtrenin gerilim ve akım değerleri temel frekans ve harmonik bileşenlerden oluşur. Büyüklükleri AC sistem gerilimi, harmonik akımlar, operasyon şartları ve AC sistem empedanslarına bağlıdır. Her bir filtre bileşeni için en yüksek sürekli hal akım ve gerilim değerlerinin belirlenmesi için operasyonun geneline bakılır.

4.6.5. Filtre Enerjilendirilmesi

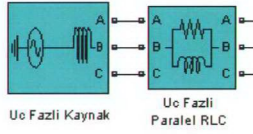
AC filtrenin en yüksek bara tepe gerilimine sahip olduğu anda enerjilendirilmesi beklenir. Bu durum AC filtrelerin inrush akımları için geçerli değildir.

5. MATLAB UYGULAMASI

5.1. HVDC Sisteminde İncelenen 3 Fazlı Harmonik Filtre Simülasyonu

HVDC teknolojisinin temeli AC bir şebekenin doğrultucu aracılığıyla DC'ye dönüştürülmesi ve bu şekilde yüzlerce kilometre taşınarak tekrar dönüştürücü tarafında AC şebekeye çevrilmesidir. HVDC konusunu incelerken de karşılaştığımız, projelerini ve komponent düzenlemelerini verdiğimiz sistemlerde bu AC kaynağın DC'ye dönüştürülmesinde harcanan reaktif gücün sağlanmasında ve sinyaldeki harmonik gerilim ve akım distorsiyonlarının düzeltilmesinde kullanılmak üzere kapasite bankası ve değişik türlerde harmonik filtrelerin kullanıldığını görmüştük. Bunların yanı sıra dönüştürücü tarafında da üç fazlı transformatör ve ardından gelen senkron üreticiden tetiklenen bir doğrultucu kullanılmıştı. Sisteme harmonik veren ve bizi filtre kullanmak zorunda bırakan elemanlar da bu nonlineer elemanlardır. Daha sonra elde edilen DC akım, şebekede seri bağlı bir düzleştirici reaktörden geçirilerek DC olarak kullanılabilir hale getirilebilir. Bütün bu veriler doğrultusunda eleman düzenlemeleri yapılarak bir 1000 MW'lık (500 kV – 2kA) bir HVDC doğrultucu şebekesi tasarlanmıştır. Bu HVDC sistemde 12-darbeli bir senkron üretici kullanılmış olup, bu dönüştürücü sisteme 1200 MVA'lık bir üç fazlı transformatör üzerinden bağlanmıştır. Harmoniklerin giderilmesi ve reaktif güç elde edilmesi için de her biri 150 Mvar reaktif güç üreten bir kapasitör bankası, bir 3. harmoniğe ayarlı C-Type yüksek geçiren filtre, bir 11. ve 13. harmoniklere ayarlı band geçiren filtre ve bir de 24. harmoniğe ayarlı yüksek geçiren filtre kullanılmıştır. Matlab uygulamasındaki simülasyon detayları ve komponentlerin teker teker incelemeleri blok diagramından sonra verilecektir.

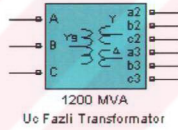
5.2. AC Kaynak



Şekil 5.2 AC Kaynak

Sistem 3 fazlı bir AC kaynak tarafından beslenmektedir. 500 kV gerilimine sahip kaynağın temel frekansı 60 Hz olarak seçilmiştir. İç direncini sıfır kabul ettiğimiz kaynağın endüktansı 98.03 mH varsayılan olarak alınmıştır. AC kaynak Sisteme direnç değeri 26.07 Ohm olan ve endüktans değeri de 48.86 mH varsayılan olarak seçilmiş bir paralel R-L-C elemanıla bağlanmıştır.

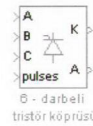
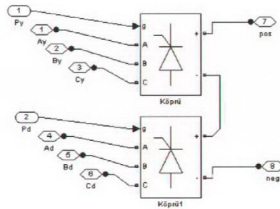
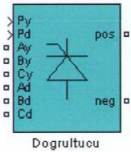
5.3. 3 Fazlı Transformör



Şekil 5.3 3 fazlı transformör

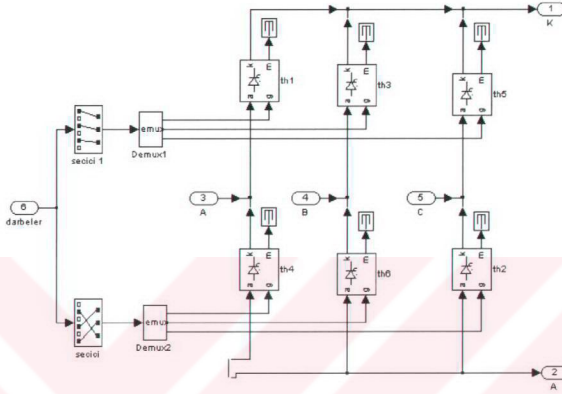
Sistem nominal gücü 1200 MVA ve frekansı 60 Hz olarak alınmış bir transformöre göre tasarlanmıştır. ABC sarımı bağlantısı (Y_g) yıldız noktası topraksız ve sekonder sarımları (Y)Yıldız ve (Δ) üçgen bağlı olarak alınmıştır.

5.4. Doğrultucu



Şekil 5.4 Doğrultucu ve iç yapılarının gösterimi

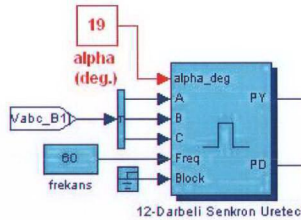
Sistemdeki doğrultucu iki adet seri bağlı 6 darbeli tristör köprüsünden oluşmaktadır. İç yapısını incelediğimizde, birinci tristör köprüsünün 12 darbeli senkron üreticinden aldığı P_y darbesi ile tetiklenirken, ona seri bağlı ikinci köprünün yine 12 darbeli senkron üreticinin çıkışından aldığı P_d darbeleri aracılığıyla tetiklendiğini görmekteyiz.



Şekil 5.5 6 darbeli tristör köprüsünün iç yapısı- Greatz köprüsü

Tristörün çalışma prensibine dayanarak, tristörde anod-katod arasındaki gerilim pozitif olduğunda ve tetiklendiğinde akım geçer. Aksi durumda, anod-katod arası gerilim negatif ise tetiklenmesi bir işe yaramaz ve tristördeki akım son bulur.

5.5. 12 Darbeli Senkron Üretici

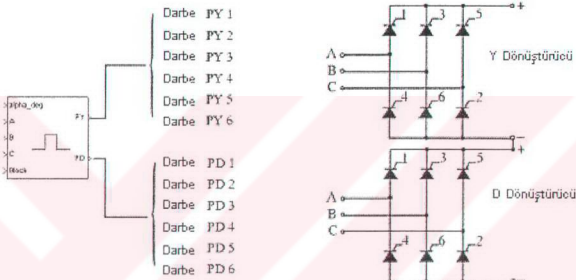


Şekil 5.6 12 Darbeli senkron üretici

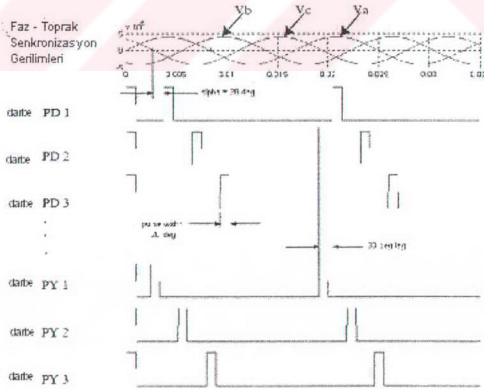
Sistemde daha önce de bahsettiğimiz gibi darbe üretici olarak 12 darbeli senkron üreticini tercih ettik. Burada esas aldığımız nokta, yarıiletken bir dönüştürücüde meydana gelen

karakteristik harmoniklerin bu dönüştürücüye ait darbe sayısının bir fonksiyonu oluşuydu. Dolayısıyla 12 darbeleri bir dönüştürücü en düşük olarak 11. mertebeden harmoniklere sahip olacaktır. Bir başka deyişle 12 darbeleri bir dönüştürücüde 5. ve 7. harmonikler teorik olarak bulunamayacaktır. Harmonikleri filtrelemesi istenen pasif filtrenin boyutu da spektrumdaki en küçük harmoniğin mertebesi arttıkça azalacaktır. Bu sebeple, 12 darbeleri bir dönüştürücünün harmoniklerini filtrelemek için gereken filtrenin boyutu, 6 darbeleri bir dönüştürücünün harmonikleri için kullanılacak filtreden çok daha küçük olacaktır.

12 darbeleri senkron üreticinin doğrultucu tristörlerini tetikleyen P_y ve P_d çıkışlarını incelediğimizde aşağıdaki sonuçlara ulaşırız:



Şekil 5.7 12 darbeleri senkron üreticinde oluşan P_y ve P_d darbeleri



Şekil 5.8 12 darbeleri senkron üreticinde giriş gerilimlerine göre darbelerin tetiklenmesi

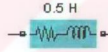
Şekil, üç senkron gerilimini ve iki çıkış vektörünün ilk üç darbesini göstermektedir. 12 darbeli senkron üreticinde gerilimler B1'e giriş yapan dönüştürücü transformatörün primer tarafındaki V_a , V_b ve V_c gerilimlerinden oluşmaktadır. Alpha açısı sabit bir bloktan değer alabileceği gibi bir kontrol sistemine ve üretilen darbeleri kontrol edebilmek üzere de bağlanabilir. Alpha açısı değiştirilerek farklı simülasyonlar yapılabilir, DC seviyesi ve üretilen harmoniklerdeki etkisi gözlemlenebilir. Bu farklı sonuçlar tez çalışması içerisinde sunulacaktır.

Frekans girişi sadece 6-darbeli jeneratörün ayrıık versiyonunda bulunmaktadır. Bu giriş temel frekansı Hertz olarak belirten bir sabit bloğa veya sistemin frekansını ayarlayan bir PLL'e bağlanmalıdır.

P_y çıkışı dönüştürücü transformatörün Y (yıldız) sekonder sarımına bağlı 6 darbeli tristör dönüştürücüye gönderilecek olan 6 darbeyi sağlar.

P_d çıkışı ise dönüştürücü transformatörün D (üçgen) sekonder sarımına bağlı 6 darbeli tristör dönüştürücüye gönderilecek olan 6 darbeyi sağlar.

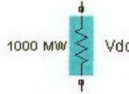
5.6. Düzleştirici Reaktör



Şekil 5.9 Düzleştirici Reaktör

Sistemde kesikli akımların önlenmesinde, DC akım hatalarının sınırlandırılmasında, DC devredeki rezonansların önlenmesinde ve telefon interfereleri de dahil olmak üzere harmonik akımların azaltılmasında kullanılmak üzere 1 ohmluk bir dirence ve 0.5 H'lik bir endüktansa sahip bir düzleştirici reaktör kullanılmıştır.

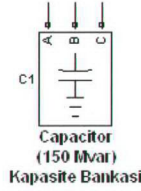
5.7. Omik Yük



Şekil 5.10 Omik Yük

Sistemde 1000MW'lık bir omik yük kullanılmıştır. Burada amacımız HVDC temelinde harmonik filtreleri incelemek olduğu için, belli bir hat uzunluğu belirlenip hattın diğer tarafında bir dönüştürücü ile tekrar AC dönüşüm yapılmamış, bunun yerine $R = (500kV)^2 / 1000MW$ 'lik bir resistiv yük ile konu incelenmiştir.

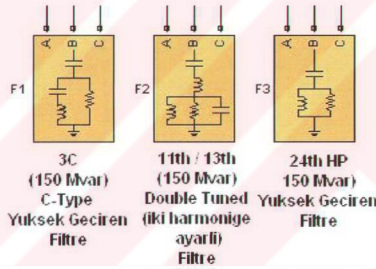
5.8. Kapasitör Bankası



Şekil 5.11 Kapasitör bankası

Sistemde 150 Mvar'lık bir kapasitif reaktif güce sahip 60Hz temel frekansında çalışan bir kapasitör bankası kullanılmıştır. Burdaki amaç hem reaktif güç sağlamak, hem de filtre görevi görmesidir.

5.9. AC Filtreler



Şekil 5.12 AC Filtreler

Sistemde üç adet AC filtre kullanılmıştır. Bunlar 3. harmoniğe ayarlı kalite faktörü 2 olan bir c-type filtre, 11. ve 13. harmoniğe ayarlı kalite faktörü 20 olan bir band geçiren filtre ve 24. harmoniğe ayarlı kalite faktörü 7 olan bir yüksek geçiren filtredir.

12 darbeli dönüştürücü için karakteristik harmonik mertebeleri $n=(12*k) \pm 1$ ($k=1,2,3,\dots$) olduğu için $k=1$ durumu için çift harmoniğe ayarlı filtre kullanılmıştır.

Yine benzer şekilde $k=2$ için karakteristik 23. ve 25. mertebeden harmonikler gibi yüksek mertebeden harmoniklerin filtrelenmesinde ve geniş frekans aralıklarının kapsanmasında kullanılmak üzere bir yüksek geçiren filtre kullanılmıştır.

C-type filtre ise yüksek geçiren bir filtre olmasının yanısıra 3. mertebeden harmonikler gibi düşük mertebeleri de filtreleme özelliği ve paralel rezonansları önleyebilme kapasitesi yüzünden tercih edilmiştir.

Bazı HVDC projelerinde uygulanan C-type filtre parametrelerini tablodaki gibi ele alabiliriz:

Parameters	f	h_0	U_l	Q_l	q	R	L	C	C_l
	Hz		kV	Mvar		Ω	mH	μF	μF
France-England Interconnection	50	3	400	130	1.64	666	424	23.89	2.586
Intermountain Power Project	60	3	345	58	2	1300	658	10.7	1.3
Quebec-New England Radisson	60	3	315	49	2	1349	671	10.48	1.31
Nicolet Terminal	60	3	230	38	2	928	462	15.24	1.91
Sandy Pond Terminal	60	3	345	88	1	450	450	15.63	1.954
Longquan-Zhenpung	50	3	525	118	2.3	1800	929.39	10.929	1.363

Şekil 5.13 Bazı HVDC projelerinde uygulanan C-type filtre parametreleri. (Yao XIAO, Jie ZHAO, Shijie MAO, Theory for the Design of C-type Filter)

C-type filtrelerin incelenmesi sırasında karşılaştığımız paralel rezonansı şu şekilde ifade edebiliriz:

5.10. Paralel Rezonans

Doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonik frekanslarından herhangi biri için, kondansatör grupları ile sistem endüktansı arasında paralel rezonans oluşabilir. Paralel rezonans olayı sırasında kondansatör uçlarındaki gerilim aşırı yüklediği için kondansatör zarar görebilir. Bu endüstriyel yüklerde ve sistemlerde yaygın olarak görülen bir olaydır.

Şebeke empedansı tamamen endüktif kabul edilerek rezonans frekansı,

$$f_p = f_1 \sqrt{\frac{S_K}{S_C}} \quad (5.1)$$

denklemleri ile ifade edilebilir. Burada ,

f_p : Paralel rezonans frekansını

f_1 : Temel frekans

S_K : Şebekenin kısa devre gücünü

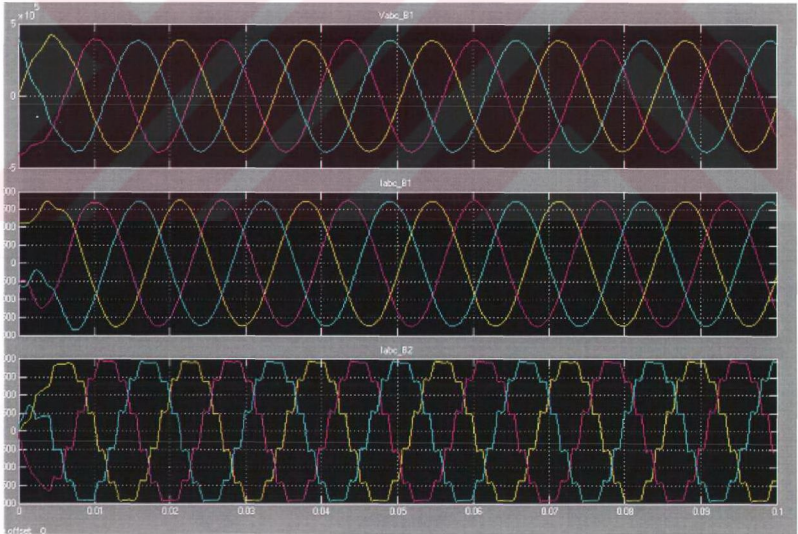
S_C : Kapasitenin nominal gücünü ifade etmektedir.

Hangi durumda rezonans koşulu oluşacağını belirleyebilmek için, baradaki harmonik gerilim ile birlikte, baraya bağlı bütün tüketicilerin harmonik akımlarını ölçmek gerekir. Genel olarak, baradan enerji sistemine akan akım küçük ancak harmonik gerilim değeri yüksek ise, rezonansın enerji sistemi tarafında oluşacağı söylenebilir. Eğer baraya bağlı yükler harmonik akımlar çekiyor ve bu durum barada harmonik gerilimlerin oluşmasına sebep oluyorsa, rezonansın sistemin endüktansı ve yük kondansatörü arasında oluşacağı söylenebilir.

5.11. Sonuçlar:

İlk olarak simülasyonu 19 alpha açısına göre çalıştıralım. Burada 500kV'lık bir AC gerilim kaynağından üretilen gerilimin omik yük üzerinde 500kV'lık DC bir gerilim olarak dönüştürüldüğünü rahatlıkla görebiliriz.

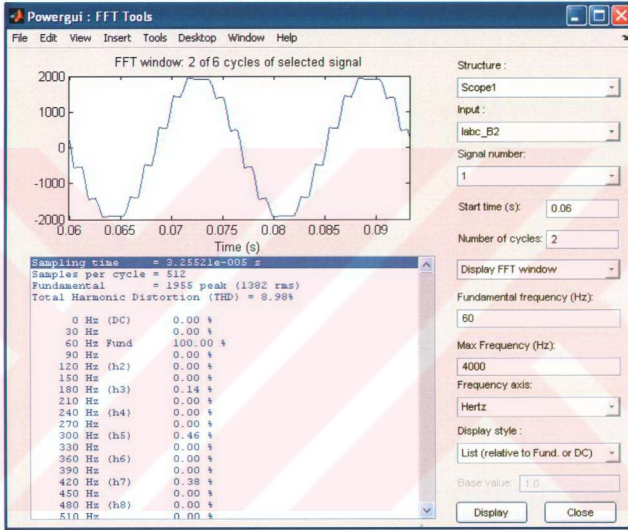
Ayrıca, Bara 1'den geçen I_{abc_B1} akımı ile Bara 2'den geçen I_{abc_B2} akımını karşılaştıralım.



Şekil 5.14 Simulink sonucu elde edilen grafikteki Bara1'den geçen I_{abc_B1} akımı ile Bara2'den geçen I_{abc_B2} akımının karşılaştırılması

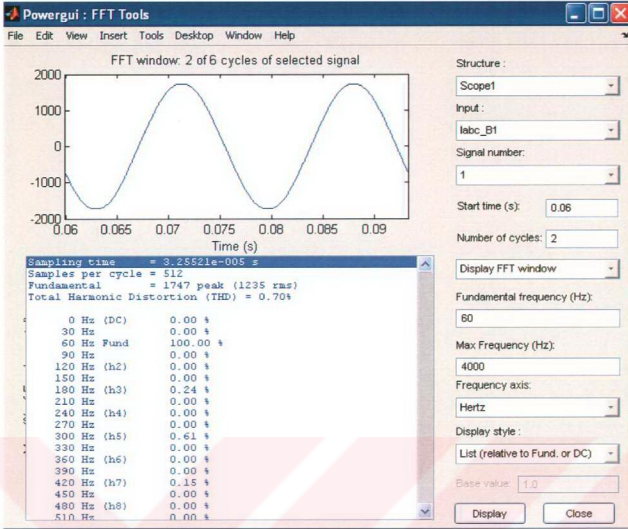
Transformatör ve doğrultucu gibi nonlinear elemanlardan oluşan harmoniklerin filtreler tarafından neredeyse yok edildiğini ve I_{abc_B1} akımının filtrendikten sonra Baral'den yapılan ölçümlerinde sinyaldeki bozulmaların azaldığını rahatlıkla görebiliriz.

Sonuçları rakamsal olarak karşılaştırmak istersek, THD (Toplam Harmonik Distorsiyon) değerlerini karşılaştırdığımızda I_{abc_B2} için elde edilen THD değerinin % 8.98 olarak hesaplandığını görürüz.



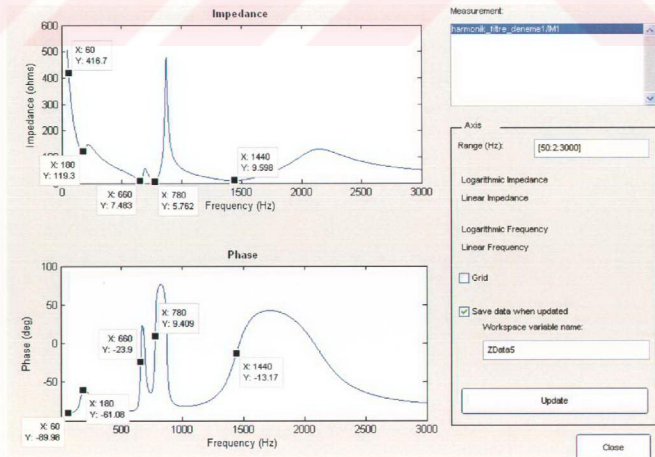
Şekil 5.15 Simulink sonucu I_{abc_B2} için elde edilen THD değerinin gösterimi

Diğer taraftan I_{abc_B1} için aynı incelemeyi yaparsak filtrenilmiş akımdaki THD değerinin %0.7 değerlerine düştüğünü görebiliriz.



Şekil 5.16 Simulink sonucu I_{abc_B1} için elde edilen THD değerinin gösterimi

Harmonik filtrelerde Emdepans-frekans ve faz grafikleri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken devre bölücü açık hale getirilmiş ve filtreler devreden bağımsız olarak ölçümler yapılmıştır.



Şekil 5.17 Simulink sonucu elde edilen empedans-frekans ve faz-frekans grafikleri

Empedans-frekans grafiği üzerinde çalıştığımız 60Hz temel frekansı işaretlendiğinde karşımıza temel frekanstaki empedans 417 ohm ve faz açısı da -90° olarak çıkmaktadır.

Bu değerler formülde yerine konduğunda filtrelerden elde edilen toplam reaktif güç aşağıdaki Şekilde hesaplanır :

$$Q_c = \frac{V^2}{X_c} \cdot \frac{n^2}{(n^2 - 1)} \quad (5.2)$$

$$Q_c = (500 \text{ kV})^2 / 417 \approx 600 \text{ Mvar.} \quad (5.3)$$

Bu da bizlere herbiri 150 Mvar olarak tasarlanan 1 adet kapasitör bankası ve 3 adet AC filtrenin toplam reaktif gücünün 600 Mvar olmasını ispatlıyor.



6. SAYISAL ÖRNEK

Seri bağlı direnç, endüktans, transformatör, kapasitör grubu ve yüklerden oluşan sisteme ait veriler aşağıda verilmiştir. Bu veriler doğrultusunda filtre büyüklüklerinin hesaplanması ve rezonans değerleri ile ilgili elde edilen sonuçlar formülleriyle birlikte aşağıda verilmiştir:

Şebekeden elde edilen Gerilim : 14.63 kV

3 fazlı kısa devre görünür gücü : 300 MVA

X / R oranı : 2.2

Transformatörün görünür gücü : 1200 kVA

Sistem Frekansı : 50 Hz

Güç faktörü düzelten kapasite değerleri : 150 kVAR

Harmoniğe neden olan yükün görünür gücü S = 200 kVA

Harmoniğe neden olan yükün gerilimi U = 480 V

Eşdeğer sistem direnci ve reaktansı şu şekilde hesaplanır:

$$R_{\text{sys}} = \frac{kV_{LL}^2}{MVA_{sc}} \cdot \cos \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \text{ ratio} \right) \right\} = \frac{14.63^2}{300} \cdot \cos \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \text{ ratio} \right) \right\} = 0.2952 \Omega \quad (6.1)$$

$$X_{\text{sys}} = \frac{kV_{LL}^2}{MVA_{sc}} \cdot \sin \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \text{ ratio} \right) \right\} = \frac{14.63^2}{300} \cdot \sin \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \text{ ratio} \right) \right\} = 0.6495 \Omega \quad (6.2)$$

Transformatörün dönüşüm oranı a 'nın hesaplanması :

$$a = 14630 \div 480 = 30.4791$$

Alçak gerilim tarafına uygulanan eşdeğer istem direnç ve reaktans değerlerinin hesaplanması:

$$R'_{\text{sys}} = \frac{R_{\text{sys}}}{a^2} = 0.2952 \div 30.4791^2 = 0.000317 \Omega \quad (6.3)$$

$$X'_{sys} = \frac{X_{sys}}{a^2} = 0.6495 \div 30.4791^2 = 0.000699 \Omega \quad (6.4)$$

Alçak gerilim tarafına uygulanan Transformatörün direnç ve reaktans değerlerinin hesaplanması :

$$R_{tr} = R_{pu} \cdot \frac{1000 \cdot kV^2}{kVA_{tr}} = 0.01 \cdot \frac{1000 \cdot 0.48^2}{1200} = 0.00192 \Omega \quad (6.5)$$

$$X_{tr} = X_{pu} \cdot \frac{1000 \cdot kV^2}{kVA_{tr}} = 0.06 \cdot \frac{1000 \cdot 0.48^2}{1200} = 0.01152 \Omega \quad (6.6)$$

Transformatörün alçak gerilim tarafına uygulanan toplam sistem direnç, reaktans ve endüktansının hesaplanması :

$$R_{tot} = R'_{sys} + R_{tr} = 0.000317 + 0.00192 = 0.002237 \Omega \quad (6.7)$$

$$X_{tot} = X'_{sys} + X_{tr} = 0.000699 + 0.01152 = 0.012219 \Omega \quad (6.8)$$

$$L_{tot} = \frac{X_{tot}}{2\pi \cdot f_{sys}} = \frac{X_{tot}}{\omega_{sys}} = \frac{0.012219}{2\pi \cdot 50} = 38.89 \times 10^{-6} H \quad (6.9)$$

150 kVAR, 480V için kapasitif reaktans değeri :

$$X_{cap} = \frac{1000 \cdot kV_{cap}^2}{kVA_{cap}} = \frac{1000 \cdot (0.48)^2}{150} = 1.536 \Omega \quad (6.10)$$

Kapasitansın hesaplanması :

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f_{sys} \cdot X_{cap}} = \frac{1}{\omega_{sys} \cdot X_{cap}} = 2.0723 \times 10^{-3} \quad (6.11)$$

Paralel Rezonans frekansının hesaplanması :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{(L_{tot} C)}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{38.89 \times 10^{-6} \cdot 2.0723 \times 10^{-3}}} = 560.62 Hz \quad (6.12)$$

Paralel rezonansın oluştuğu harmonik mertebesi ise:

$$h = \frac{f_0}{f} = 560.62 \div 50 = 11.21 \quad (6.13)$$

150 kVAR'lık kapasitör bağlanmamış haldeki $S = 200$ kVA ve $U = 480$ V değerlerine sahip ve harmonik spektrumu tabloda verilen harmoniğe neden olan yüke göre kaynak akımının r_{ss} ve THD değerlerinin hesaplanması :

$$I_1 = \frac{200.000}{\sqrt{3.480}} = 240.6A \quad (6.14)$$

Harmonik mertebelerine göre şebekeden ölçülen akım değerlerinin tablodaki gibi olduğunu kabul ediyoruz.

Frekans	Harmonik Mertebesi	Hat Akım Genliği
250	5	40.0
350	7	25.0
550	11	12.0
650	13	4.0
850	17	1.0

Çizelge 6.1 Harmonik mertebelere göre elde edildiği kabul edilen akım değerleri

Kapasitör bağlı olmayan devre sadece seri RL devresi olarak düşünülmelidir. Buna bağlı olarak ulaşılacak değerler aşağıdaki tabloda özetlenmiştir :

Frekans	R_{tot}	X_L	Z_{tot}	I	V
250	0,002237	0,061088269	0,06112921	40	2,445169
350	0,002237	0,085523577	0,08555283	25	2,138821
550	0,002237	0,134394192	0,13441281	12	1,612954
650	0,002237	0,1588295	0,15884525	4	0,635381
850	0,002237	0,207700115	0,20771216	1	0,207712

Çizelge 6.2 Kapasitör bağlı olmayan devrede ulaşılan empedans ve gerilim değerleri

Bunlara göre akım için:

$$r_{ss} = \sqrt{(I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_i^2)} = \sqrt{(240.6^2 + 40^2 + 25^2 + 12^2 + 4^2 + 1)} = 210.35A \quad (6.15)$$

$$THD = \frac{\sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_i^2)}}{I_1} \cdot 100 = \frac{\sqrt{40^2 + 25^2 + 12^2 + 4^2 + 1}}{240.6} \cdot 100 = 20.30\% \quad (6.16)$$

Ve gerilim için:

$$r_{ss} = \sqrt{(V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_i^2)} \quad (6.17)$$

$$= \sqrt{(277^2 + 2.445169^2 + 2.138821^2 + 1.612954^2 + 0.635381^2 + 0.207712^2)} = 277.02V$$

$$THD = \frac{\sqrt{(V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_i^2)}}{V_1} \cdot 100 \quad (6.18)$$

$$= \frac{\sqrt{2.445169^2 + 2.138821^2 + 1.612954^2 + 0.635381^2 + 0.207712^2}}{277} \cdot 100 = 1.331\%$$

Harmonik Filtrenin Dizaynı

Yükte oluşan esas harmonikler düşük olsa dahi bu akımlar paralel rezonans durumlarında istenmeyen yüksek seviyelere çıkabilir. Hesaplanan paralel rezonans durumları kapasitör grubunun kapasitif reaktansının sistemin endüktif reaktansına eşit olduğu frekanslarda meydana gelmektedir. Eğer rezonans frekansı yük elemanlarından kaynaklanan harmoniklere ait veya yakın bir harmonikte oluşursa, harmonik gerilim ve akımlarında istenmeyen artışlar da gözlenecektir. Eğer paralel rezonans frekansı kaydırılabilir veya yük elemanının düşük mertebeli harmoniğinden daha düşük bir değerde oluşursa harmonik yük akımlarının artışı azaltılabilir veya yok edilebilir. Paralel rezonans frekansının kaydırılması kapasite grubuna seri bir endüktans elemanı koymakla sağlanır. Seri endüktör-kapasitör grubu harmonik filtre grubu olarak veya ayarlı kapasite grubu olarak adlandırılırlar. Paralel rezonans frekansını kaydırmanın yanı sıra, filtre, yük tarafından talep edilen harmonik akımın bir kısmını sağlayacaktır. Filtreden sağlanan harmonik yük akımının en önemli kısmı filtrenin ayarlandığı mertebeye en yakın harmonik mertebeye oluşacaktır. Örneğin, 4.7. mertebeye ayarlı bir filtre yük tarafından talep edilen 5. harmonik akımının önemli bir kısmını sağlayacaktır. Sıradaki hesaplamalar devrede filtreler de dikkate alınarak yapılacaktır.

Filtre elemanının seri rezonans frekansı :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C}} \text{ Hz} \quad (6.19)$$

Buradan gereken endüktans değeri L_f 'yi çekersek :

$$\begin{aligned} L_f &= \frac{1}{C.(2\pi.f_0)^2} \\ &= \frac{2\pi.f_{sys}.X_{cap}}{(2\pi.f_0)^2} \\ &= \frac{f_{sys}.X_{cap}}{2\pi.(f_0)^2} \\ &= \frac{f_{sys}.1000.(kV_{cap})^2}{2\pi.(f_0)^2.kVA_{cap}} = 3.88 \times 10^{-5} \text{ H} \end{aligned} \quad (6.20)$$

Harmonik yükten kaynağa bakıldığında giriş empedansı kaynakla paralel filtreden oluşmaktadır. Giriş empedansı frekansın bir fonksiyonu olarak şu şekilde ifade edilir:

$$\begin{aligned} Z_{in} &= \frac{(R_{tot} + j\omega K_{tot}).[j\omega L_f - j/(\omega C)]}{R_{tot} + j\omega L_{tot} + j\omega L_f - j/(\omega C)} \\ &= \frac{(R_{tot} + j\omega K_{tot}).[j\omega L_f - j/(\omega C)]}{R_{tot} + j(\omega L_{tot} + \omega L_f - 1/(\omega C))} \end{aligned} \quad (6.21)$$

Paralel rezonans paydanın imajiner kısmı sifıra eşit olduğu hallerde gerçekleşir.

$$\omega_0 L_{tot} + \omega_0 L_f - 1/(\omega_0 C) = 0 \quad (6.22)$$

eşitlik ω_0 için çözümlürse;

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{(L_{tot} + L_f)C}} \quad (6.23)$$

Paralel rezonans frekansı L_f hesaba katıldığında şu hali alır:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{tot} + L_f) \cdot C}} \quad (6.24)$$

$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{(38.89 \times 10^{-6} + 3.88 \times 10^{-5}) \cdot 2.0723 \times 10^{-3}}} = 396.653 \text{ Hz}$$

Devreye L_f 'yi ekledikten sonra harmonik mertebesi şu hali alır:

$$h = \frac{f_0}{f} = \frac{396.653}{50} = 7.93 \quad (6.25)$$

Harmonik filtre grubu tarafından üretilen akım aşağıdaki şekilde bulunur:

$$I_f = I_h \cdot \frac{R_{tot} + j\omega L_{tot}}{R_{tot} + j[\omega L_{tot} + \omega L_f - 1/(\omega C)]} \quad (6.26)$$

Benzer bir ifadeyle kaynaktan sağlanan akım :

$$I_s = I_h \cdot \frac{j[\omega L_f - 1/(\omega C)]}{R_{tot} + j[\omega L_{tot} + \omega L_f - 1/(\omega C)]} \quad (6.27)$$

Her bir harmonikteki bara gerilimi kaynak akımının kaynak empedansı ile çarpılmasıyla bulunur:

$$V_h = I_s \cdot (R_{tot} + j\omega L_{tot}) \quad (6.28)$$

Verilen son üç eşitlik istenilen harmonik frekanslarında filtrenin harmonik cevabının belirlenmesinde ve filtre kapasitörleri ilave edildiğinde THD bara gerilim yüzdesinin sonuçlandırılmasında hesaplanır. Bu eşitlikler temel frekanslar hariç bütün frekanslara uygulanabilir.

Kaynak akımının temel bileşeninin genliği ise şu şekilde ifade edilir:

$$I_{s.1} = \frac{\text{Toplam Üç Faz Yük..kVA}}{\sqrt{3} \cdot \text{Nom. Hatlar Arası Gerilim}} \quad (6.29)$$

Filtre grubunun temel bileşeninin genliği ise:

$$I_{f.1} = \frac{\text{Nom. Hat Nötr Bara Gerilim}}{\omega_{\text{sys}} L_f - 1/(\omega_{\text{sys}} C)} \quad (6.30)$$

Bara geriliminin temel bileşeninin genliği, nominal hat-nötr arası bara geriliminin genliğine eşit kabul edilir.

Buna göre :

$$I_{f.1} = \frac{480/\sqrt{3}}{2\pi \cdot 50 \cdot 3.88 \times 10^{-5} - 1/(2\pi \cdot 50 \cdot 2.0723 \times 10^{-3})} = 181.862 \text{ A} \quad (6.31)$$

$$I_f = I_h \cdot \frac{R_{\text{tot}} + j\omega L_{\text{tot}}}{R_{\text{tot}} + j[\omega L_{\text{tot}} + \omega L_f - 1/(\omega C)]} \quad (6.32)$$

yardımıyla filtrenin harmonik spektrumu her bir harmonik frekansı için aşağıdaki şekilde hesaplanır:

5. Harmonik f=250 Hz ve i=40 için ;

```
>> c=complex(0.002237,2*pi*250*38.89*10^(-6));
>>b=complex(0.002237,(2*pi*250*38.89*10^(-6))+(2*pi*250*3.88*10^(-5))-
(1/(2*pi*250*2.0723*10^(-3))));
>> c
c =
0.0022 + 0.0611i
>> b
b =
0.0022 - 0.1852i
```

```
>> a=40*c/b;
>> a
a =
-13.1884 + 0.6426i
```

7. Harmonik f=350 Hz ve i=25 için ;

```
>> c=complex(0.002237,2*pi*350*38.89*10^(-6));
>>b=complex(0.002237,(2*pi*350*38.89*10^(-6))+(2*pi*350*3.88*10^(-5))-
(1/(2*pi*350*2.0723*10^(-3))));
>> a=25*c/b;
>> a
a =
-43.8634 + 3.1708i
```

11. Harmonik f=550 Hz ve i=12 için ;

```
>> c=complex(0.002237,2*pi*550*38.89*10^(-6));
>>b=complex(0.002237,(2*pi*550*38.89*10^(-6))+(2*pi*550*3.88*10^(-5))-
(1/(2*pi*550*2.0723*10^(-3))));
>> a=12*c/b;
>> a
a =
12.5173 + 0.0090i
```

15. Harmonik f=650 Hz ve i=4 için ;

```
>> c=complex(0.002237,2*pi*650*38.89*10^(-6));
>>b=complex(0.002237,(2*pi*650*38.89*10^(-6))+(2*pi*650*3.88*10^(-5))-
(1/(2*pi*650*2.0723*10^(-3))));
>> a=4*c/b;
>> a
a =
3.1905 - 0.0091i
```

17. Harmonik f=850 Hz ve i=1 için ;

```
>> c=complex(0.002237,2*pi*850*38.89*10^(-6));
>>b=complex(0.002237,(2*pi*850*38.89*10^(-6))+(2*pi*850*3.88*10^(-5))-
(1/(2*pi*850*2.0723*10^(-3))));
>> a=c/b;
>> a
a =
0.6400 - 0.0025i
```

Buna göre ;

Frekans(Hz)	Harmonik mertebe	Filtreli Hat Akımı
250	5	-13,1884
350	7	-43,8634
550	11	12,5173
650	13	3,1905
950	17	0,6400

Çizelge 6.3 Filtreli hat akımı değerleri

Filtre grubu hat akımının rss değeri :

$$r_{ss} = \sqrt{(181,862^2 + 13,1884^2 + 43,8634^2 + 12,5173^2 + 3,1905^2 + 0,64^2)} = 187,9866764A \quad (6.33)$$

Kapasitör grubunun akımı:

$$I = \frac{150.000}{\sqrt{3.480}} = 180.421A \quad (6.34)$$

rss filtre akımı oransal akımın yüzdeli ifadesi olarak:

$$I = \frac{187.987}{180.421} \cdot 100 = 104.19\% \quad (6.35)$$

Bara gerilimi harmonik distorsiyonu kaynaktan elde edilen harmonik akımlarının hesaplanmasıyla bulunur. Bunun için ;

$$I_s = I_h \cdot \frac{j[\omega L_f - 1/(\omega C)]}{R_{tot} + j[\omega L_{tot} + \omega L_f - 1/(\omega C)]} \quad (6.36)$$

ifadesinden kaynak akımları şu şekilde hesaplanır:

5. Harmonik f=250 Hz ve i=40 için ;

```
>> c=complex(0,(2*pi*250*3.88*10^(-5))-(1/(2*pi*250*2.0723*10^(-3)))));
>>b=complex(0.002237,(2*pi*250*38.89*10^(-6))+(2*pi*250*3.88*10^(-5))-
(1/(2*pi*250*2.0723*10^(-3)))));
>> a=40*c/b;
>> a
a =
53.1884 - 0.6426i
```

7. Harmonik f=350 Hz ve i=40 için ;

```
>> c=complex(0,(2*pi*350*3.88*10^(-5))-(1/(2*pi*350*2.0723*10^(-3)))));
>>b=complex(0.002237,(2*pi*350*38.89*10^(-6))+(2*pi*350*3.88*10^(-5))-
(1/(2*pi*350*2.0723*10^(-3)))));
>> a=25*c/b;
>> a
a =
68.8634 - 3.1708i
```

11. Harmonik f=550 Hz ve i=40 için ;

```
>> c=complex(0,(2*pi*550*3.88*10^(-5))-(1/(2*pi*550*2.0723*10^(-3)))));
>>b=complex(0.002237,(2*pi*550*38.89*10^(-6))+(2*pi*550*3.88*10^(-5))-
(1/(2*pi*550*2.0723*10^(-3)))));
>> a=12*c/b;
>> a
```

a =
-0.5173 - 0.0090i

13. Harmonik f=750 Hz ve i=40 için ;

```
>> c=complex(0,(2*pi*750*3.88*10^(-5))-(1/(2*pi*750*2.0723*10^(-3))));
>>b=complex(0.002237,(2*pi*750*38.89*10^(-6))+(2*pi*750*3.88*10^(-5))-
(1/(2*pi*750*2.0723*10^(-3))));
>> a=4*c/b;
>> a
a =
1.2201 + 0.0103i
```

17. Harmonik f=950 Hz ve i=40 için ;

```
>> c=complex(0,(2*pi*950*3.88*10^(-5))-(1/(2*pi*950*2.0723*10^(-3))));
>>b=complex(0.002237,(2*pi*950*38.89*10^(-6))+(2*pi*950*3.88*10^(-5))-
(1/(2*pi*950*2.0723*10^(-3))));
>> a=1*c/b;
>> a
a =
0.3937 + 0.0023i
```

Bunları tabloda göstermek istersek :

Frekans(Hz)	Harmonik mertebe	Kaynak Hat Akımı
250	5	53,1884
350	7	68,8634
550	11	-0,5173
650	13	1,2201
950	17	0,3937

Çizelge 6.4 Kaynak hat akımı tablosu

Daha sonra bara geriliminin harmonik bileşenlerini bulmak için aşağıdaki formül uygulanır ve tablodaki sonuçlar elde edilir:

$$V_h = I_s \cdot (R_{tot} + j\omega L_{tot}) \quad (6.37)$$

5. Harmonik f=250 Hz ve i=40 için ;

```
>> c=(complex(0.002237,2*pi*250*38.89*10^(-6)));
>> v=53.1884*c;
>> v
v =
0.1190 + 3.2492i
```

7. Harmonik f=350 Hz ve i=40 için ;

```
c=(complex(0.002237,2*pi*350*38.89*10^(-6)));
>> v=68.8634*c;
>> v
v =
0.1540 + 5.8894i
```

11. Harmonik f=550 Hz ve i=40 için ;

```
>> c=(complex(0.002237,2*pi*550*38.89*10^(-6)));
>> v=0.5173*c;
>> v
v =
0.0012 + 0.0695i
```

13. Harmonik f=750 Hz ve i=40 için ;

```
>> c=(complex(0.002237,2*pi*750*38.89*10^(-6)));
>> v=1.2201*c;
```

```
>> v
```

```
v =
```

```
0.0027 + 0.2236i
```

17. Harmonik f=950 Hz ve i=40 için ;

```
>> c=(complex(0.002237,2*pi*950*38.89*10^(-6)));
```

```
>> v=0.3937*c;
```

```
>> v
```

```
v =
```

```
0.0009 + 0.0914i
```

Frekans(Hz)	Harmonik mertebe	Bara Gerilimi
250	5	3,2492
350	7	5,8894
550	11	0,0695
650	13	0,2236
950	17	0,0914

Çizelge 6.5 Bara gerilimleri tablosu

Toplam Harmonik Distorsiyonu hesaplamadan önce temel bileşen gerilimini tekrar kontrol edelim:

$$V_1 = \frac{480}{\sqrt{3}} = 277V \quad (6.38)$$

Buna göre THD değeri;

$$\begin{aligned}
 THD &= \frac{\sqrt{(V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_i^2)}}{V_1} \cdot 100 \\
 &= \frac{\sqrt{3.2492^2 + 5.8894^2 + 0.0695^2 + 0.2236^2 + 0.0914^2}}{277} \cdot 100 = 2.43\%
 \end{aligned} \quad (6.39)$$

Ve rss gerilimi;

$$\begin{aligned}
 r_{SS} &= \sqrt{(V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_i^2)} \\
 &= \sqrt{(277^2 + 3.2492^2 + 5.8894^2 + 0.0695^2 + 0.2236^2 + 0.0914^2)} = 277.08V
 \end{aligned}
 \tag{6.40}$$

olarak bulunur.

Şu an çıkan sonuçlarda THD değerinin filtre konulduktan sonra %1.33'ten %2.43'e çıktığını görüyoruz. Bu beklediğimiz bir sonuç değildi. Örneği seçerken değerlerin bu şekilde seçilmesi ise filtre dizaynlarında sonucu etkileyecek parametrelerin çokluğunu gözler önüne sermek ve bunların hesaplanmasında bir bilgisayar yazılımından faydalanmanın getireceği kolaylıkları ispatlamak içindir. Çünkü, aşağıda verilen değerler için dizayn edilen filtrenin istenilen harmonikleri filtreleyeceği ve toplam harmonik bozulmayı azaltacağını görebiliriz. Bu istenen değerlerin de yazılım aracılığıyla test edilmesi bize hem zaman kazandıracak hem de hataları minimuma indirgeyecektir.

$Z_{tot}=0.002747$ ohm ; $L_{tot}=39.5 \times 10^{-6}$ H olan bir devrede ; kapasitör grubu : 600 kVAR- 480 V , $L_f= 4.61 \times 10^{-5}$ H ve kapasitör grubunun kapasitansı $C=6.9076 \times 10^{-3}$ olarak seçilseydi THD değeri %2.045 değerinden %0.7 değerine indirilmiş olacaktı.

7. YAZILIM

Güç sistemlerindeki nonlineer elemanların, iletim ve dağıtım sistemlerinde önemli bir harmonik kirliliğe sebep olduğunu incelemiştik. Bu harmoniklerin sisteme olan etkilerini gidermek için belli başlı harmoniklere filtreler uygulanmalıdır. 6 darbeli sistemler için daha önce incelediğimiz formüller uygulandığında 5. ve 7. harmonikler, 12 darbeli sistemler için de 11. ve 13. harmonikler başta olmak üzere tamsayı katlarının dikkate alınması gerekmektedir. Tez çalışmasında hazırlanan yazılım ile Şekil 3.20'deki üç fazlı şebekeler için filtre konfigürasyonları ve en düşük harmonikler için kısa devre linkli filtre örneklerinde de belirtilen uygulamalar için filtrenin dizayn parametrelerinde kullanılacak büyüklüklerin bir bilgisayar yazılımı ile elde edilmesi amaçlanmıştır. Hazırlanan yazılımda filtre mertebesi, filtrenin ayarlandığı meritebe, kapasitör grubu büyüklüğü, bara gerilimi, sistem frekansı, kapasitör büyüklükleri, transformatör büyüklükleri giriş parametreleri için dizayn edilecek filtrenin kapasitör ve reaktör büyüklükleri, akım değerleri, yük harmonik akımları gibi birçok çıkış değeri elde edilebilmekte, giriş değerlerinin değiştirilmesi durumunda çıkış değerlerinin anında görülebilmesi sayesinde alternatifler çok daha kolaylıkla incelenebilmektedir.

Sistem Bilgileri		
Filtre Mertebesi	5	Hz
Kapasitör Grubu Büyüklüğü	500	kVAR
Normal Bara Gerilisi	480	Volt
Filtrenin Ayarlanan Harmoniği	4.7	Hz
Sistem Frekansı	60	Hz
Kapasitör Büyüklükleri	600	Volt
	60	Hz
Toplam Harmonik Yüklü	300	kVA
Transformatör Büyüklüğü	2000	kVA
Büyüklet ve Empedans %	8	%
Yük Harmonik Akımı	25	% Fund
Şebekle Harmonik Gerilim Kaynağı	1	% THD
Hesaplamayı Yap		

Kapasitör Büyüklüğü	320.0	kVAR
Grup Akımı	481.12523432465813	Amps
Kapasitör Akımı (Gerçek)	384.9001794597506	Amps
Filtrenin Ayarlandığı Frekans	282.0	Hz
Kapasitör Empedansı	0.72	Ω
Kapasitör Değeri	3684.1422012012818	μF
Reaktör Empedansı	0.02223929330674513	Ω
Reaktör Büyüklüğü	0.086450509433448360	mH
Filtre Tem Yük Akımı (Gerçek)	403.1505435877815	Amps
Filtre Tem Yük Akımı (Oransal)	503.8381794847019	Amps
Ekle edilen Kompensasyon	335.17306780464673	kVAz
Yük Harmonik Akımı	90.21097956017904	Amps
Şebekle Harmonik Akımı	51.77093967232871	Amps
Max. Toplam Harmonik Akımı	141.98191923320775	Amps

Kapasitör Hesaplamaları	
RMS Filtre Akımı	427.4216022607035
Temel Kapasitör Gerilimi	502.75560170697016
Harml. Kapasitör Gerilimi	35.412465293000146
Max. Tepe Gerilimi	538.1720868999703
RMS Kapasitör Gerilimi	504.00521803516995
Max. Tepe Akımı	545.1324628209693

Kapasitör Limitleri		
Limit %		Gerçek %
Tepe Gerilim	120	89.69524449999504
Akım	180	88.03791178972926
kVAz	135	74.62461950228815
RMS Gerilim	110	84.0008967252832

Şekil 7.1 Örnek değerler için doldurulmuş durum

Yukarıda örnek değerler için doldurulmuş durumda elde edilen çıkış değerleri görülmektedir. Buna göre dizayn edilecek örnek filtrenin büyüklükleri ve filtre konfigürasyonu aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi olacaktır.

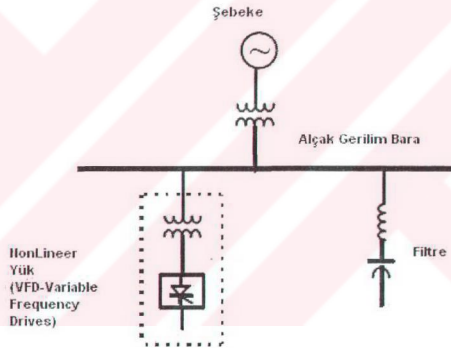


Şekil 7.2 Örnek değerler için filtre konfigürasyonu

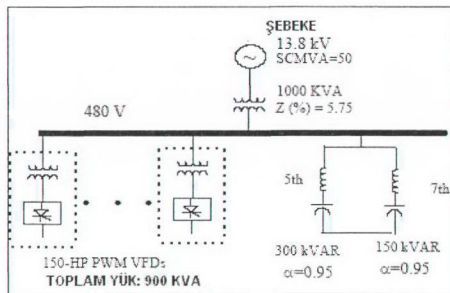
Reaktör		Reaktör	
Empedansı:	0,0326 Ohm	Büyüklüğü:	0,0865 mH
Temel Akım		Harmonik Akımı:	142,0 Amps
değeri:	403,2 Amps		

7.1. Örnek Uygulama

Değişken Frekans sürücülerini besleyen bir elektrik dağıtım şebekesi için uygulanabilecek alçak gerilim harmonik filtrelerine ait bir örnek üzerinde yazılım sonuçlarını inceleyebiliriz



Şekil 7.3 Değişken Frekans sürücülerini besleyen bir elektrik dağıtım şebekesi
Bunun için aşağıda gösterilen sistem ele alınmıştır.



Şekil 7.4 Elektrik dağıtım şebekesi ve değerleri

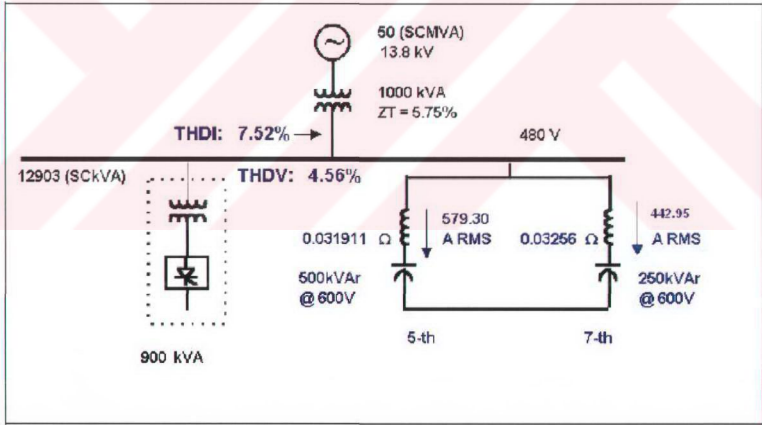
7. harmonik filtresi

Sistem Bilgileri		Kapasitör Büyüklüğü		Kapasitör Hesaplamaları	
Filtre Merkezi	7	Grup Akımı	240.56261216234407	RMS Filtre Akımı	442.957693795410393
Kapasitör Grubu Büyüklüğü	250	Kapasitör Akımı (Gerçek)	192.4500897298753	Temel Kapasitör Gerilimi	491.19532708659894
Nominal Bara Gerilimi	480	Filtrenin Ayarlanacağı Frekans	399.0	Harici Kapasitör Gerilimi	141.3784882709724
Filtrenin Ayarlanan Harmonajı	8.65	Kapasitör Empedansı	1042.0711006006409	Max Tepe Gerilimi	632.483975913684
Sistem Frekansı	60	Reaktör Empedansı	0.03256260953134716	RMS Kapasitör Gerilimi	511.05025646896917
Kapasitör Büyüklükleri	600	Reaktör Büyüklüğü	0.0963750044490861	Max Tepe Akımı	593.690032969994
	60	Filtre Tam Yük Akımı (Gerçek)	196.9026338046529		
Toplam Harmonik Yüğü	900	Filtre Tam Yük Akımı (Oransal)	246.12829235981611		
Transformatör Büyüklüğü	1000	Elde edilen Kompensasyon	163.70177599552997		
Büyükük ve Empedans %	5.75	Yük Harmonik Akımı	348.6752250232966		
Yük Harmonik Akımı	32.2	Şebeke Harmonik Akımı	48.21287407810446		
Şebeke Harmonik	2	Max Toplam Harmonik Akımı	396.7881991013411		
Gerilim Kaynağı					
Hesaplama Yap					

Kapasitör Limitleri			
Tepe Gerilim	120	Limit %	Gerçek %
Akım	180	105.41398988561401	
kVAr	135	164.12405723046156	
RMS Gerilim	110	156.83628195383206	
		95.1750427448282	

Şekil 7.6.7. Harmonik için giriş değerleri ve sonuçları

Yazılımdan elde edilen akım, empedans büyüklüklerinin şekil üzerindeki gösterimi aşağıdaki gibidir.



Şekil 7.7. Sonuçların sistem üzerinde gösterimi

Açık gerilim barasındaki gerilimlerin filtreli ve filtersiz hallerdeki değerleri incelendiğinde, yazılım ile elde ettiğimiz değerler doğrultusunda gerilimdeki toplam harmonik distorsiyon değerinin %15,176'dan %4,5581 değerine düştüğünü görmekteyiz.

h	FİLTRESİZ		FİLTRELİ	
	%I(h)	% V(h)	a(h)	% Vf(h)
5	33,7	11,753	6,03	1,9504
7	1,09	0,5322	7,66	0,0695
11	7,37	5,6546	2,55	2,2158
13	3,5	3,1736	2,39	1,3287
17	3,5	4,1501	2,25	1,8409
19	2,1	2,783	2,22	1,2526
23	1,6	2,5668	2,18	1,1759
25	1,4	2,4413	2,17	1,1247
29	0,8	1,6182	2,15	0,7513
31	0,9	1,946	2,15	0,906
35	0,6	1,4648	2,14	0,6848
37	0,5	1,2904	2,14	0,6042
41	0,4	1,1439	2,13	0,537
43	0,3	0,8998	2,13	0,4228
THDV(%)		15,176		4,5681

Çizelge 7.1 Filtreli ve filtresiz hallerdeki gerilim harmonik distorsiyon değerleri

Benzer şekilde sisteme giren harmonik akımlarının ve filtre akımlarının değerleri de yazılım ile elde edilen sonuçlar doğrultusunda aşağıdaki şekilde tabloya işlenmiştir. Bunun sonucunda da akım harmonik distorsiyon değerinin de %35'ten %7,52'ye düştüğü görülmektedir.

	XFMR(FİLTRESİZ)	XFMR(FİLTRELİ)	5. FİLTRE	7. FİLTRE
	I(AMPS)	I(AMPS)	I(AMPS)	I(AMPS)
TEMEL	1082,5	982,62	402,75	196,9
5	364,8	60,54	347,45	43,18
7	11,80	1,54	1,60	8,66
11	79,80	31,26	21,50	27,02
13	37,90	15,86	10,24	11,78
17	37,90	16,81	10,20	10,88
19	22,70	10,23	6,11	6,39
23	17,30	7,93	4,64	4,75
25	15,20	6,98	4,05	4,12
29	8,70	4,02	2,31	2,33
31	9,70	4,54	2,60	2,61
35	6,50	3,04	1,73	1,73
37	5,40	2,53	1,44	1,44
41	4,30	2,03	1,15	1,14
43	3,20	1,53	0,86	0,86
HARMONİK AKIMI	379,2	73,85	348,55	55,01
RMS AKIMI	1147	985,39	532,63	204,44
THDI (%)	35.0%	7.52%		

Çizelge 7.2 Filtreli ve filtresiz hallerdeki akım harmonik distorsiyon değerleri

Sonuç olarak tez çalışması içerisinde hazırlanmış olan yazılım sayesinde giriş değerlerinin kullanıcı kontrolünde olması, çok basit şekilde çıkıştaki sonuçların karşılaştırılabilirliği, harmonik distorsiyonun akım ve gerilim değerleri için kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmasını sağlayacak filtre dizayn parametrelerine kolaylıkla erişim olanağı sağlamıştır.



8. SONUÇLAR ÖNERİLER

Güç sistemlerindeki nonlinear elemanlar, iletim ve dağıtım sistemlerinde önemli bir harmonik kirliliğe sebep olmakta ve enerji kalitesini düşürmektedir. Elektrik enerjisine olan talebin devamlı artması, daha kaliteli enerji gereğini ve bunu gerçekleştirmek için çeşitli kriterlerin gerekliliğini göstermektedir. Elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtımında kalite kavramının bilinmeli ve bu konudaki çalışmalara gereken önem verilmelidir.

Nonlinear yükler, enerji sisteminde gerilimin dalga şeklini bozmaktadır. Enerji sistemlerinde çok sayıda nonlinear yük bulunduğundan, sistemde ve elemanlarda ek kayıplar, harmonik gerilimleri ve THD değerleri yüksek değerlere çıkmaktadır. Bu yüzden, nonlinear yüklerin etkileri olabildiğince azaltılmalıdır.

Bu tezin birinci bölümünde harmonikler genel olarak tanıtılmıştır. İkinci bölümde harmonik filtreler ile harmoniklerin yok edilebileceği ve bunun için gerekli olan filtrelerin çeşitlerinden dizayn kriterlerine kadar elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Üçüncü bölümde harmoniğe neden olan bir sistem olan HVDC teknolojisi hakkında bilgiler verilmiş ve bu teknolojinin gerçek hayattaki uygulamalarına da yer verilerek komponent düzenlemeleri incelenmiştir. Dördüncü bölümde incelenen HVDC teknolojisi doğrultusunda bir simülasyon kontrol diagramları kurulup filtreli ve filtresiz durumlar için sonuçlar incelenmiştir. Son bölümde ise verilen sayısal uygulama ile filtreler tasarımları ve harmonik eliminasyonda sıfırdan başlanarak karar mekanizmalarının nasıl çalıştığı mühendislik formülleriyle desteklenerek incelenmiştir.

Ulaşılan sonuçlardan biri, harmonik filtrelemede kapasitör ve reaktör büyüklükleri ile akım değerlerinin hesaplanması başta olmak üzere çeşitli hesaplamalarda kullanılacak bir bilgisayar yazılımının bize değişik giriş değerleri için elde edilecek sonuçlara ulaşmada zaman ve doğruluk açısından son derece yarar sağlayacağıdır.

Ayrıca nonlinear yüklerin yoğun olduğu veya ileride yoğun olacağı belirlenen bölgelerde gerekli ölçümler yapıp, şebekenin özellikleri incelenerek, gelişmiş ülkelerde olduğu gibi harmonik standartları geliştirilmelidir. Akım ve gerilimler için THD, TDD, HD_V ve HD_I değerleri için standartlar getirilmelidir.

KAYNAKLAR

“IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”, IEEE Std. 519-1992.

Mahesh M. Swamy, Steven Rossiter, et. al, “Case Studies on Mitigating Harmonics in ASD Systems to meet IEEE 519-1992 Standards, “IEEE IAS Annual meeting, 1994, pp. 685-692”.

B. J. Abramovich, G. L. Brewer, “Harmonic filters for the Sellindge convert station”, GEC Journal of science & technology, Vol. 48, No. 1, 1982.

CIGRE WG 14.03, ‘AC harmonic filters and reactive compensation for HVDC with particular reference to non-characteristic harmonics: complement to the paper published in Electra No. 63(1979), CIGRE report, June 1990

J. Arrillaga, D.A.Bradley, P.S.Bodger, Power system harmonics, Jhon-wiley & sons, 1985

Yao XIAO, Jie ZHAO, Shijie MAO, Theory for the Design of C-type Filter

F. Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, “A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems - A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters, “IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 26, No. 6, Nov./Dec. 1990”.

Brian Prokuda, “Power Quality Site Surveys for Industrial and Commercial Buildings, “IEEE A&CPS Conference 1994, pp. 97-103”.

IEC Committee SC22F, Terminology for high-voltage direct current transmission, *IEC reference number 22F/37/CDV*.

Physical Layout of Recent HVDC Transmission Projects in North America, IEEE Special Publication 87TH0177-6-PWR, September 1986.

R.L. Hauth, P.J. Tatro, B.D. Railing, B.K. Johnson, J.R. Stewart and J.L. Fink, *HVDC Power Transmission Technology Assessment Report ORNL/Sub/95-SR893/1*, Oak Ridge National Laboratory, April 1997.

O.C. Norris-Elye, N. Tarko and C.V. Thio, *Nelson River HVDC Transmission Lines External Electrical Effects*, Final Report No. E4.55.4, Manitoba HVDC Research Centre, June 1995.

W.H. Bailey, D.E. Weil and J.R. Stewart, HVDC Power Transmission Environmental Issues Review, Report ORNL/Sub/95-SR893/2, Oak Ridge National Laboratory, April 1997.

E.W. Kimbark, Direct Current Transmission, Volume 1. New York: John Wiley & Sons, 1971.

E. Uhlman, Power Transmission by Direct Current, New York: Springer-Verlag, 1975.

J. Arrillaga, High Voltage Direct Current Transmission, London: Peter Peregrinus Ltd., 1983.

K.R. Padiyar, HVDC Transmission - Technology and System Interactions, New York: John Wiley & Sons, 1990

Guide for Planning DC Links Terminating at AC Locations Having Low Short Circuit Capacities, Part 1: AC/DC Interaction Phenomena, CIGRE Technical Brochure No. 68, 1992.

High-Voltage Direct Current Handbook, First Edition, Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1994.

FACTS Overview, IEEE and CIGRE joint publication 95 TP 108, April 1995.

CIGRE Working Group 14-05, Commutation failures - causes and consequences, ELECTRA, No. 165, April 1996.

J. Reeve, J.A. Baron and G.A. Hanley, A technical assessment of artificial commutation of hvdc converters, IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-87, No. 10, 1830-1840, October 1968.

D.A. Woodford, Solving the ferroresonance problem when compensating a d.c. converter station with a series capacitor, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 3, No. 2, 1325-1331, August 1996.

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

Chang, C., (1998), "Harmonics Theory", Tutorial on Harmonics Modelling and Simulation, IEEE Power Engineering Society.

Dommel, H.W., Yan, A. and Wei, S., (1986), Harmonics from Transformer Saturation, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRD-1, No.2.

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

Emanuel, A.E. ve Wang., X., (1985), "Estimation of Loss of Power Transformer Supplying Nonlinear Loads", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS 104.

Emanuel, A.E., (1993), "Apparent and Reactive Powers in Three-Phase Systems: in Search of a Physical Meaning and a Better Resolution", Eup. Trans. on Electric Power.

Filipski, P.S., ve Labaj, P.W., (1992), "Evaluation of Reactive Power Meters in the Presence of High Harmonic Distortion", IEEE Trans. on Power Delivery, 7.

Grady, W.M., (1983), Harmonic Power Flow Studies, Ph. D. Thesis, Purdue University (U.S.A.).

Grady, W.M., ve Heydt, G.T., (1985), "Prediction of Power System Harmonics due to Gaseous Discharge Lightning", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 97.

IEEE Working Group on Power System Harmonics, (1983), "Power Systems Harmonics: An Overview", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS 102.

IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, (1993), New York, USA.

Kocatepe, C., (1995), "Sinüsoidal Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simulasyonu", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

GÖKALP Erdin, (1988) "Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Etkileri" Yüksek Lisans Tezi Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

DİNÇBAŞ Serkan, (2003) "Kompanzasyon Ve Harmonik Filtreleme"

Yalçın Bahadır, (2004) "Kompanzasyon ve Harmonik Filtre Sistemleri"

Ortmeyer, T.H., Chakravarthi, K.R., ve Mahmoud, A.A., (1985), "The Effects of Power Systems Harmonics on Power Systems Equipment and Loads", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 9.

Richter, R., (1951), Elektrische Maschinen Bd. I. Zweite, Verbesserte Auflage, Verlag Birkhaeuser Basel.

Steinmetz, C.P., (1917), Theory and Calculation on Electrical Circuits, McGraw-Hill.

Sundberg, Y., (1976), The Arc Furnace as a Load on The Network, ASEA Journal, Vol. 49.

Wagner, V.E., ve IEEE Task Force, (1993), "Effects of Harmonics on Equipment", IEEE Trans. on Power Delivery 2.

Yıldırım, D., Fuchs, E.F., (1999), "Measured Transformer Derating and Comparison with Harmonic Loss Factor (FHL) Approach", PE-084-PWRD-0-03-1999, IEEE.

Peeran S.M. and Cascadden C. "Application, Design and Specification of harmonic filters for Variable Frequency Drives", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 31, pp. 841-847, July/August 1995

Boonin Elisabeth, Using Excel Visual Basic for Applications, QUE, 1995

ELECTROTEK, Harmflo+ Tech Notes, Issue # 93-2, September, 1993

İNTERNET KAYNAKLARI

[1] www.ABB.com

[2] www.siemens.com/hvdc

[3] www.stanleygroup.com, (June 1998), Industry Info.

[4] www.schneiderelektrik.com

EKLER

EK1 Harmonik filtrelerdeki hesaplamalar için hazırlanan bilgisayar programı CD'si.

(Bu program Java 1.4.2_05 Versiyonu ile derlenmiştir, farklı versiyonlarda desteği olmayabilir.)



ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi	20.08.1978	
Doğum Yeri	Edirne	
Lise	1989-1996	Edirne Anadolu Lisesi
Lisans	1997-2001	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik–Elektronik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2002-2005	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı Kurum

2001-Devam ediyor

CNN TÜRK – Kanal D
Uydu Haberleşme Mühendisi ve
Dış Yayınlar Şefi