

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ SİSTEM HARMONİK FİLTRELERİ

Elek. Müh. Mehmet ARGİN


95095

F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
Hazırlanan

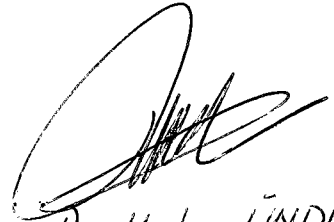
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı


: Doç.Dr. Celal KOCATEPE


Prof. Dr. Selim AY
(Y.T.Ü.)

İSTANBUL, 2000


Doç. Dr. Hakan ÜNDİL
(İ.Ü.)

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Harmonikler.....	1
1.2. Harmoniklerin Analiz Yöntemi.....	2
1.3. Harmoniklerle İlgili Bazı Tanımlar.....	4
2. HARMONİKLERİ ÜRETEN ELEMANLAR.....	7
2.1. Harmonik Kaynaklar.....	7
2.1.1. Generatörler.....	7
2.1.2. Transformatörler.....	8
2.1.3. Çeviriciler (Konverterler).....	8
2.1.4. Ark fırınları.....	9
2.1.5. Gaz deşarjı ile aydınlatma.....	9
3. HARMONİKLERİN ETKİLERİ.....	11
3.1. Harmoniklerin Yol Açtığı Rezonans Olayları.....	11
3.2. Kondansatörler.....	14
3.3. Devre Kesiciler ve Sigortalar.....	15
3.4. İletkenler.....	15
3.5. Elektronik Donanımı.....	16
3.6. Aydınlatma Donanımı.....	16
3.7. Ölçme Aletleri.....	16
3.8. Koruyucu Röleler.....	17
3.9. Döner Makinalar.....	17
3.10. Telefonlar.....	17
3.11. Transformatörler.....	18
3.12. Harmonik Standartları.....	18
4. HARMONİKLERİN GİDERİLMESİ.....	19
4.1. Tasarım Sırasında Alınabilecek Önlemler.....	19
4.1.1. Generatörlerde alınabilecek önlemler.....	19
4.1.2. Dönüştürücülerde alınabilecek önlemler.....	20
4.1.3. Transformatörlerde alınabilecek önlemler.....	20
4.1.4. Yüksek harmoniklerin oluşturduğu rezonansa ilişkin önlemler.....	20
4.2. Harmoniklerin Filtrelenmesi.....	21
4.2.1. Pasif filtreler.....	22
4.2.1.1. Pasif harmonik filtreleriyle ilgili genel tanımlar.....	22
4.2.1.2. Seri filtreler.....	24
4.2.1.3. Şönt filtreler.....	25
4.2.1.3.1. Tek ayarlı filtreler (bant geçiren filtreler).....	26
4.2.1.3.2. Çift ayarlı filtre.....	27
4.2.1.3.3. Yüksek geçiren sönümlü filtreler.....	28
4.3. Aktif Filtre.....	29

4.3.1.	Aktif filtre konfigürasyonları.....	31
4.3.2.	Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması.....	32
4.4.	Çeşitli Filtre Tasarım Kriterleri.....	33
4.4.1.	Elham B. Makram'ın filtre tasarım yaklaşımı.....	33
4.4.1.1.	Temel frekans reaktif güç kompanzasyonu.....	34
4.4.1.2.	Filtre tasarımında ekonomik bakış açıları.....	35
4.4.1.3.	Minimum filtre.....	37
4.4.1.4.	Filtre çeşidinin seçimi.....	38
4.4.2.	Damian A. Gonzales'in filtre tasarım yaklaşımı.....	39
4.4.2.1.	Tek ayarlı filtre.....	39
4.4.2.2.	Tek ayarlı filtrenin tasarım eşitlikleri.....	39
4.4.2.3.	Kalite faktörü.....	40
4.4.2.4.	Tek ayarlı filtrenin tasarım düşünceleri.....	41
4.4.2.5.	Yüksek geçiren filtre tasarımı.....	42
4.4.2.6.	Yüksek geçiren filtre tasarım eşitlikleri.....	42
5.	SAYISAL UYGULAMA.....	44
5.1.	Minimum Maliyetli Filtrenin Tespiti.....	50
6.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	55
KAYNAKLAR.....		57
ÖZGEÇMİŞ.....		60

ÖNSÖZ

Bu çalışmada güç sistemindeki harmoniklerin filtrelenmesi ile ilgili bilgiler sunmaya çalıştık. Tezimin hazırlanması sırasında desteğini esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Celal KOCATEPE'ye, Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı Başkanı sayın hocam Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR'a, beni yetiştiren fedakar anne ve babama, çalışmalarımnda her zaman bana destek olan eşime, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Mehmet ARGİN
İSTANBUL, 2000



ÖZET

Güç sistemine bağlanan elemanların akım ve gerilim şeklinin sinüsoidal olması istenir. Bu durum sisteme lineer elemanların bağlanması sonucu elde edilebilir. Günümüzde gittikçe artan sayıdaki nonlineer elemanlar güç sisteminde nonsinüsoidal büyüklüklere sebep olurlar. Nonsinüsoidal büyüklüklerin bulunması harmoniklerin güç sisteminde bulunması demektir. Bu çalışmada, harmonikler genel olarak incelenmiş ve bunların etkilerinin giderilmesine yönelik kullanılan filtreler araştırılmıştır. Filtreleme işleminde kullanılacak elemanların hem distorsiyonu azaltacak hem de ekonomik olacağı düşünülerek filtreler bu düşünce ile incelenmiştir.

Bu çalışmanın birinci bölümünde, harmoniklerle ilgili tanımlar ve matematiksel bağıntılar verilmiştir. İkinci bölümde harmoniklere sebep olan elemanlar genel olarak incelenmiştir. Tezin üçüncü bölümünde harmoniklerin güç sistemine etkileri verilmiş ayrıca bu etkiler maddeler halinde sıralanmıştır. Çalışmanın ana konusu olan harmoniklerin giderilmesi ise dördüncü bölümde irdelenmiştir. Bu bölümde, filtre çeşitleri ve bunlara ait genel tanımlar verilmiştir. Ayrıca, çeşitli filtre tasarım kriterleri başlığı altında bazı araştırmacılara ait filtre hesaplamaları ilave edilmiştir. Filtreleme işleminin ekonomik boyutunun da irdelendiği buna ait kriterin uygulandığı bir sayısal uygulama 5. Bölümde verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Harmonikler, Nonlineer yükler, Nonsinüsoidal akım, Nonsinüsoidal gerilim, Filtreler, Ekonomik filtreler.

ABSTRACT

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

In the first chapter of this study, general mathematical expressions and concepts for harmonics are given. In the second chapter, elements which are caused to harmonics are examined in general. In the third chapter effects of harmonics are given and also the effects are listed in order. It is examined the elimination of harmonics which are main topic of this study (in the fourth chapter). In this chapter kinds of filters and their general definitions are given. Also it is added some filter computations belong to some researchers.

It is given a numerical application in chapter five. In this chapter a criteria which includes economic way of filtering action is applied.

Keywords: Harmonics, Nonlinear loads, Nonsinusoidal current, Nonsinusoidal voltage, Filters, Economic filters.

1. GİRİŞ

1.1. Harmonikler

Alternatif akım güç sisteminde ideal koşullar altında elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılması belirli gerilim seviyesinde, tek ve sabit frekansta yapıldığı için böyle bir sistemde gerilim ve akım dalga şekli tam sinüs şeklindedir. Pratikte bu tür enerjinin sağlanmasında birtakım zorluklarla karşılaşılabilir. Güç sistemine bağlanan bazı elemanlar ve bunların yol açtığı olaylar sebebiyle tam sinüsoidal dalga şeklinde sapmalar olabilmektedir. Tam sinüsoidaldan sapma, genellikle harmonik bileşenlerin ortaya çıkması ile ifade edilir ve manyetik ve elektrik devrelerindeki lineer olmayan durumlar bunun en önemli etkenleridir. Bu lineersizliklere sebep, ark fırınlarında normal çalışma gereği ark oluşturulması ile demir çekirdekleri bulunan bobin, transformatör, generatör ve benzeri elemanların doymaya giderek manyetik bakımdan lineer olmayan bir olayın meydana gelmesi ve yarıiletken elemanların kullanılarak sinüsoidal dalganın bazı kısımlarının kırılmasıdır. Bu lineersizlikler akım ve gerilim dalga şeklinin bozulmasına sebep olur.

Nonlinear elemanlar ve nonlinear yükler AC güç sisteminin başlangıcından beri varolmuştur. Önceleri nonlinear yükler olarak sadece doğrultucular biliniyordu. Transformatörler de normal değer seviyelerinin dışında çalıştığında nonlinear şebeke elemanı olarak davranır. Harmonik üreten elemanların güç sistemine bağlanmasıyla nonlinearlik etkisi ve nonlinear eleman sayısı hızlı bir şekilde artmıştır. Bu artmanın temel sebebi yüksek güçlü yarıiletken anahtarların gelişimi ve onların doğrultucu, evirici ve çeşitli elektronik devrelerde uygulanması (örneğin; DC iletim konverter istasyonları, motor kontrol devreleri , statik VAR generatörleri vs...) gaz deşarjı aydınlatmasının (örneğin; floresan, civa ark, civa buhar , neon, xenon ve yüksek basınçlı sodyum lambalar) yaygınlaşması, akü ve fotovoltaik sistemlerin ve elektrikli vasıtaların kullanımının artmasıdır. Bu tip yüklerin gelecek için daha etkili olacağı düşünülmektedir. (IEEE Working Group on Power System Harmonics, 1983)

Harmoniklerin meydana çıkması enerji sistemleri için istenen bir durum değildir, fakat çoğu işletmelerde harmoniklerin ortaya çıkması kaçınılmazdır. Harmoniklerin ortaya çıkması işletme araçlarını ve tesislerini yükleyerek ek kayıplara ve aşırı ısınmaya sebep olmaktadır. Ayrıca rezonans olaylarına da sebep olarak işletme için çok zararlı bir durum meydana getirmektedir. Bu yüzden elektrik işletmelerinde harmoniklerin meydana gelmemesi için, ilk

aşama olarak tedbirler düşünülüp ona göre tasarım ve tesis yapılır. Fakat işletmede meydana gelen harmonikleri etkisiz hale getirme işlemi ikinci aşamada yapılmaktadır.

Alternatif akımın ortaya çıktığı ilk günlerden itibaren güç sistemindeki harmoniklerin araştırılması güç mühendislerini ilgilendirmiştir. 1900'lü yıllarda transformatörlerin nonlineerliği ile, üretilen harmonikler ve Y/Δ bağlamadaki 3. harmoniklerin oluşumu araştırılmıştır. (Clinker, 1914; Curtis, 1914). Bunun hemen arkasından yine transformatörlere ilişkin dalga şekilleri Steinmetz tarafından verilmiş ve harmonik distorsiyonun azaltılması için 'filtrelerin' kullanılması önerilmiştir. Sonraki yıllarda civa buharlı konverterlerle ilgili distorsiyonu konu alan yayınlara rastlanmaktadır. (Rissik, 1935)

2. Dünya savaşı sonrası doğrultucuların kullanımı oldukça genişlemiştir. Günümüzde güç sistem mühendisleri ve tasarımcılar tarafından geniş bir şekilde kullanılmakta olan statik konverterlerin harmonik üretimi üzerinde durulmuştur (Read, 1945). Doğru akımla iletim sistemlerin detaylı incelenmesi ve bu sistemlerde kullanılan hat komütasyonlu dönüştürücülerin her iki çalışma (evirici ve doğrultucu) için karakteristiği ilk kez Kimbark tarafından verilmiştir (Kimbark, 1971). Doğru akımla enerji iletiminde, akü ve fotovoltaik sistemlerde sık sık kullanılan hat komütasyonlu dönüştürücüler bugün güç sistemlerinde harmoniklerin ana kaynağı olmaktadır. Reaktif gücü ayarlayarak bara gerilimini kontrol eden statik VAR generatörler de nonlineer bir elemandırlar. Harmonik ürettiklerinden bunların çalışması ve uygulaması da bu çerçevede verilebilir. Nonlineer aydınlatma elemanları olarak gaz deşarj aydınlatması yapan elemanlarla ilgili çalışmalar flüoresan lambaların modellenmesi (Waymouth, 1971), civa ve yüksek basınçlı sodyum lambalarının modellenmesi (Herrick, 1980), civa ark lambanın elektrikli çalışma karakteristiğinin modellenmesi (Laskowski and Donoghue, 1981) şeklinde özetlenebilir. Transformatörlerdeki üç ve üçün katı harmoniklerin geniş araştırması ve üç fazlı transformatörlerle ilişkisi de ortaya konulmuş (Pender and Del Mar, 1967) ve transformatörlerin nominal değerleri dışında çalışması halinde nüveyi daha çok doymaya ve harmonik akımlarının hızlı bir şekilde artmasına sebep olduğu ifade edilmiş ve bu durum deneysel olarak ispatlanmıştır.

1.2. Harmoniklerin Analiz Yöntemi

Alternatif akım enerji sistemlerinde akım ve gerilime ilişkin dalga şeklinin ideal olarak sinüsoidal olmasına çalışılmasına rağmen, bir takım sebeplerle nonsinüsoidal dalgalar da ortaya çıkmaktadır. Nonsinüsoidal dalgalar genellikle lineer ya da nonlineer bir devreye

nonsinüsoidal besleme gerilimi uygulaması veya nonlinear bir devreye sinüsoidal gerilim uygulamasıyla oluşur. Nonsinüsoidal büyüklüklerin analizi için Fourier Analiz yöntemi kullanılmaktadır.

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

Herhangi periyodik bir dalganın Fourier serisine açılabilmesi için Dirichlet koşulları olarak bilinen koşulların sağlanması gerekir. Bu koşullar, bir periyot içinde sonlu sayıda süreksizlik bulunması, sonlu sayıda maksimum ve minimumların bulunması ve ortalamasının sonlu değer olmasıdır. Elektrik enerji sistemlerindeki dalga şekilleri her zaman bu koşulları sağladığından Fourier bileşenlerinin elde edilmesi mümkündür. Fourier serisinin elde edilme işlemi dalga analizi veya harmonik analizi olarak da tanımlanır. Sinüsoidal olmayan periyodik bir işaretin Fourier analizi sonrasında zaman domeni denklemi aşağıdakilerden herhangi biri ile gösterilebilir.

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

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(nt + \phi_n) \quad (1.2)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(nt + \phi_n) \quad (1.3)$$

Bu denklemlerde;

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

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

A_0 =Sabit terim (doğru bileşen veya ortalama değer) olup literatürde A_0 yerine $A_0/2$ de kullanılmaktadır.

Diğer katsayılara ($A_1, A_2,\dots,A_n,\dots, B_1, B_2,\dots,B_n,\dots$) $f(t)$ fonksiyonunun 'harmonik katsayıları' denir.

Uygulamalarda serinin genellikle ilk üç ya da dört terimi ele alınır. Elde edilecek efektif değerler ile ideale çok az hata ile yaklaşılmış olur ve hesaplar kolaylaşır. Diğer taraftan, Fourier açılımı yukarıdaki gibi trigonometrik biçimde verilebileceği gibi, üstel biçimde de ifade edilebilir. Bilgisayar destekli olarak gerçekleştirilen frekans domeni analizlerinde kullanılan bu gösterim, şu şekilde verilebilir:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (D_n e^{jnt} + D_{-n} e^{-jnt}) \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \quad (1.4)$$

$$D_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) e^{-jnt} dt \quad D_n = D_{-n}^*$$

Trigonometrik biçimden üstel biçime geçmek için

$$\left. \begin{array}{l} D_n + D_{-n} = B_n \\ j(D_n - D_{-n}) = A_n \end{array} \right\} \quad (1.5)$$

eşitlikleri kullanılır.

Bir dalganın 'frekans spektrumu', bu dalganın Fourier serisinde her bir frekansa karşılık düşen genlikler işaretlenerek elde edilebilir. Yatay ekseninde frekans seçilip buna dik paralel çizgilerle her bir frekansa karşılık düşen genlikler ordinat üzerinde işaretlenir. Fourier katsayılarının bulunmasında yukarıdaki yöntemin haricinde kullanılan yöntemler vardır, bunlar: Fourier katsayılarının analitik yöntemle, grafik yöntemle, ölçme yöntemiyle ve bilgisayar destekli analiz yöntemiyle bulunmasıdır.

1.3. Harmoniklerle İlgili Bazı Tanımlar

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

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^M I_n \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (1.6)$$

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^M V_n \sin(n\omega t + \delta_n) \quad (1.7)$$

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

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = (I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2)^{1/2} \quad (1.8)$$

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = (V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2)^{1/2} \quad (1.9)$$

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

$$THD_1 = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (1.10)$$

$$DF_1 = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I} \quad (1.11)$$

Gerilim için de aynı eşitlikler geçerlidir.

Aktif Güç,

$$P = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^M V_n I_n \cos(\delta_n - \alpha_n) \quad (1.12)$$

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

Reaktif Güç

$$Q = \sum_{n=1}^M V_n I_n \sin(\delta_n - \alpha_n) \quad (1.13)$$

Görünen Güç,

$$S = VI = \left(\sum_{n=0}^M V_n^2 \right)^{1/2} \left(\sum_{n=0}^M I_n^2 \right)^{1/2} \quad (1.14)$$

ve distorsiyon gücü

$$D = (S^2 - P^2 - Q^2)^{1/2} \quad (1.15)$$

olarak verilebilir.



2. HARMONİKLERİ ÜRETEN ELEMANLAR

2.1. Harmonik Kaynaklar

Alternatif akım güç sistemlerinde en çok karşımıza çıkan harmonikler nonlineer yüklerin meydana getirdiği harmoniklerdir. Aşağıda bu kaynakların bazıları ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

2.1.1. Generatörler

Makina hızına ve endüvi oluk sayısına bağlı olarak döner makinalarda akım harmonikleri üretilir(Arrillaga et al., 1985). Yuvarlak kutuplu makinalarda alan eğrisi trapez şeklinde olup, çıkık kutuplu senkron makinalarda yaklaşık dikdörtgen şeklindedir. Endüklenen elektromotor kuvveti bu alan eğrilerinin içerdiği harmoniklere uygun olarak aynı harmonikleri içerir; yani 1., 3., 5., 7., 9. vb gibi tek bileşenleri vardır. Harmonik mertebesi (h) arttıkça genlikleri azalır harmonik frekansı ise artar ($h.f_1$), h. harmonik gerilimi

$$U_h = 4.44hf_1N_s k_h \phi_h \quad (2.1)$$

olup burada;

f_1 : temel harmoniğin frekansını(Hertz)

N_s : Bir faz sargısının sarım sayısını

k_h : h'inci harmoniğin sargı faktörünü

ϕ_h : h'inci harmoniğin akısını

göstermektedir.

Eğer statorun sargısı yıldız bağlanmışsa, 3 ve 3'ün katı frekanslı harmonikler sadece faz gerilimlerinde bulunup faz arası gerilimlerinde ise bulunmazlar.

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

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

2.1.2. Transformatörler

Güç sistemlerindeki en önemli eleman olan transformatörler harmoniklere sebep olurlar, çünkü güç sistemlerinde demir çekirdeği bulunan bobinler harmoniklere yol açmaktadır (Dommel et al., 1986); Demir çekirdeğinin mıknatıslama karakteristiği lineer olmadığından, transformatör doyuma gitmekte ve harmonikleri üretmektedir. Transformatör nüvesi için mıknatıslama karakteristiği lineer olsa idi, uygulanan sinüsoidal uyarma akımı neticesi sinüsoidal akı ve gerilim oluşacaktı.

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

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

2.1.3. Çeviriciler (Konverterler)

Günümüzdeki ana harmonik kaynaklarından birisi de hat komütasyonlu konverterlerdir. DC iletim sistemleri, akü ve fotovoltaik sistemler hat komütasyonlu konverterler üzerinden beslenirler.

p darbeleri bir çeviricinin meydana getireceği akım harmoniklerinin mertebesi

$$h=k.p \pm 1 \quad k=1,2,3,\dots \quad (2.2)$$

olmaktadır. Çeviricilerde darbe sayısı $p=6,12,18$ veya 36 'dır.

Harmonik akımı $I_h=I_1.(ü_h/h)$ olup $ü_h=1$ 'den küçük bir katsayıdır; Çeşitli harmonik değerlerinde çeviricilerin kumandasına bağlı olarak farklı değerler almaktadır. Komütasyon süresi ihmal edildiği hallerde $ü_h=1$ alınabilir. Bu durumda $I_h=I_1/h$ elde edilir. Harmonik akımın efektif değeri harmonik mertebesi ile ters orantılıdır. Harmonik akımın mertebesi p darbe sayısı ile artırılarak harmonik akımın efektif değeri azaltılır.

2.1.4. Ark fırınları

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

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

2.1.5. Gaz deşarjı ile aydınlatma

Gaz deşarjı aydınlatması örneğin floresan, civa ark, neon vb ve yüksek basınçlı sodyum lambalar, özellikle büyük şehir alanlarında daha çok hissedilen harmonikler meydana getirirler. Bu tip lambaların elektriksel karakteristiği nonlineer olup iletim esnasında negatif direnç karakteristiği gösterir. Floresan aydınlatmada tek harmoniklerin seviyesi önemli oranda

devreyi etkiler. Üç fazlı dört telli montajda 3. harmonik akımı nötr iletkeninden geçer(Arrillaga et al. 1985 ; Grady and Heydt, 1985).

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

- Alternatif enerji kaynaklarından rüzgar ve güneş enerjisi gibi kaynaklarda ac/dc dönüştürücülerde kullanılan yarı iletken teknolojisi
- Elektrikli taşıtlardaki akü-şarj devresi
- Güç üretim tesislerinde ateşleyici, fan ve pompayı sürmede kullanılan kontrol düzenleri
- Kaynak makinaları
- Kesintisiz güç kaynakları
- Elektrokimya teknolojisinde plakalara şekil verme ve elektrokaplama işlemlerinde kullanılan statik dönüştürücüler
- Fuzzy kontrollu bulaşık ve çamaşır makinaları, çok ekranlı televizyonlar, mikrodalga fırınlar ve klimalar
- Anahtarlama güç kaynakları
- Kompakt floresanlar ve beraberindeki elektronik balastlar ile ışık ayarlı halojen lambalar
- Bilgisayarlar ve bunların kullanıldığı otomasyon tesisleri
- Dönüştürücü istasyonlar
- Doğru akımla enerji iletimi kontrolü
- Statik VAR kompanzatorler

3. HARMONİKLERİN ETKİLERİ

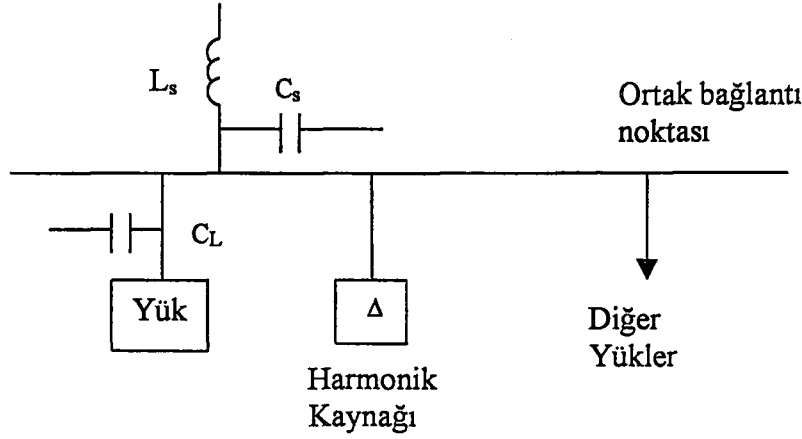
Harmonikler gerilim ve akımın dalga şeklini bozmaları sonucu enerji sistemlerinde çeşitli problemlere neden olmaktadır. Bu problemleri genel olarak maddeler halinde şu şekilde sıralayabiliriz:

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

3.1. Harmoniklerin Yol Açtığı Rezonans Olayları

Güç sistemlerinde endüktif reaktans frekans ile doğru orantılı olarak artarken, kapasitif reaktans frekans ile ters orantılı olarak azalmaktadır. Endüktif reaktansın kapasitif reaktansa eşit olduğu frekansa rezonans frekansı denmektedir. Sistem rezonansı, harmonik frekanslardan birine yakın bir değerde oluşursa, aşırı seviyede harmonik akım ve gerilimleri ortaya çıkacaktır. Harmonik seviyelerini etkileyen en önemli etkenlerden birisi rezonans durumudur. Seri rezonans harmonik akım akışına düşük bir empedans gösterirken, paralel rezonans yüksek empedans göstermektedir. Sistemde herhangi bir rezonans durumu yoksa sistem önemli seviyelerdeki harmonik akımlarını taşıyabilir. Bundan dolayı sistemin cevap karakteristikleri analiz edilerek sistemin rezonans problemlerinin giderilmesi çok önemlidir (Shipp, 1979).

Seri rezonans ve paralel rezonans olmak üzere iki grup rezonans durumu söz konusudur. Şekilde bir paralel rezonans devresi görülmektedir.



Şekil 3.1 Paralel rezonans durumu

Karşımıza en çok çıkan problemlerden birisi paralel rezonans durumudur. Nonlineer yüklerin ürettiği harmonik frekanslarından birinin yakınında, kondansatör grupları ile sistem endüktansı arasında paralel rezonans oluşabilir. Paralel rezonans olayı kondansatör uçlarındaki gerilimin aşırı yükselmesine sebep olmakta ve kondansatöre zarar verebilmektedir. Bu durum endüstriyel yüklerde ve sistemlerde yaygın olarak görülen bir olaydır.

Rezonans frekansı şebeke empedansının tamamen endüktif olduğu kabul edilerek

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

şeklinde yazılabilir. Burada f temel frekansı, f_p paralel rezonans frekansını, S_k şebekenin kısa devre gücünü ve S_c kapasitenin anma gücünü göstermektedir. Sistemin endüktansının (L_s), kapasitesinin (C_s) ve yükün kapasitesinin (C_L) değerleri rezonans koşulunu belirleyecektir. Hangi durumda rezonans koşulu oluşacağını belirleyebilmek için, baradaki harmonik gerilim ile birlikte, baraya bağlı her tüketici yük ve kaynakların harmonik akımlarını ölçmek gerekir. Genellikle, baradan enerji sistemine akan akım değerinin küçük, harmonik gerilim değerinin yüksek olduğu durumda, rezonansın enerji sistemi tarafında oluşacağı söylenebilir. Baraya bağlı yükler harmonik akımlar çekerek, barada harmonik gerilimler meydana getiriyorsa

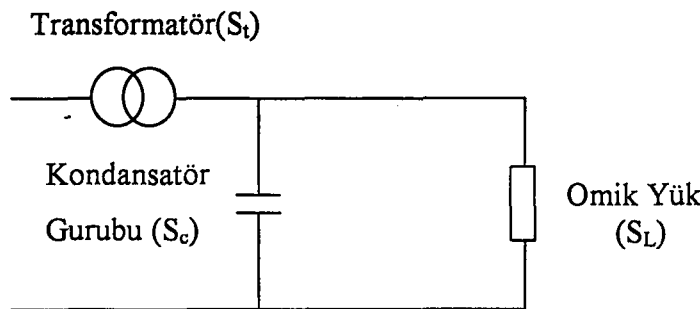
rezonansın sistemin endüktansı ile yük kondansatörü arasında oluşacağı söylenebilir. (Arrillaga, 1985)

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

Paralel rezonans durumu kondansatör grubunun kapasitif reaktansının sistemin endüktif reaktansına eşit olduğu yerde meydana gelir. Eğer bu rezonans frekansı yük tarafında üretilen harmoniklerin birinde veya bu harmoniklerin yanında meydana gelirse, harmonik gerilim ve akımında yükselmeler olacağı malumdur. Eğer paralel rezonans frekansı biraz değiştirilirse veya yükün en düşük dereceli harmonik teriminden daha düşük bir değerde meydana getirilirse, harmonik yük akımlarının yükselmesi minimize edilebilir veya elimine edilebilir. Paralel rezonans frekansının biraz değiştirilmesi kondansatör grubuyla seri bir endüktansın yerleştirilmesiyle yapılır. Bu gruba filtre denilmektedir. Bu harmonik filtre grubunda yıldız bağlı veya üçgen bağlı kondansatörler kullanılır.

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

İkinci rezonans türü olan seri rezonans şekilde görülmektedir.



Şekil 3.2 Seri Rezonans Devresi

Seri rezonans koşulu

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

şeklindedir. Burada f_s seri rezonans frekansını, S_t transformatörün nominal gücünü, Z_t transformatörün (p.u) empedansını ve S_L omik yükün gücünü göstermektedir. Seri rezonans, rezonans frekansıyla uyuşan, harmonik akımlarına düşük bir empedans yolu sağladığı için harmonik akımlarda bir büyüme meydana gelmez. Fakat harmonik akımlar şebekenin istenmeyen kısımlarına akabilirler. Bu durumda da iki tür sorunla karşı karşıya kalınabilir. (a) Rezonans devresi ile hat boyunca seri bağlantılı devreler varsa, önemli ölçüde parazitler oluşabilir (Gonzales. 1987), (b) Rezonans kolundaki harmonik akımlar nedeniyle kondansatör grubunda aşırı gerilim harmonikleri oluşabilir ve bobin sargılarının izolasyonu zorlanır. Kondansatör uçlarındaki gerilim şebeke geriliminin X_c/R katına çıkar (Van, 1993).

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

3.2. Kondansatörler

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

$$n = \sqrt{Q_s / Q_c} \quad (3.3)$$

ifadesinden hesaplanabilir. Burada n , rezonansın meydana gelebileceği harmoniğin derecesini; Q_s , sistemin, kondansatör grubunun bulunduğu noktadaki kısa devre gücünü, Q_c ise kondansatörlerin gücünü göstermektedir. Kapasitif empedans frekans arttıkça azalır. Bu da, herhangi bir harmoniğin, akımdaki oranının gerilimdeki oranından büyük olmasına böylece kondansatör akımının artmasına ve ilave ısınmalara yol açmaktadır.

3.3. Devre Kesiciler ve Sigortalar

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

3.4. İletkenler

Harmonik akımların iletkenlerde ısınmaya neden olduğu iki mekanizma söz konusudur. Birincisinde 'skin effect' ve 'proximity effect' olarak adlandırılan etkiler akımın iletken içinde yeniden dağılımına neden olur. Akım iletkenin dışına doğru yoğunlaştığında, iletkenin etkin direnci büyür. 'Skin effect' budur ve frekansla birlikte artar. 'Proximity effect' ise iletkenin içindeki akım dağılımının, komşu iletkenlerde akan akımın oluşturduğu manyetik alanlar tarafından etkilenmesi olayıdır. İkinci mekanizma ise, tek fazlı yükleri besleyen 3-fazlı-4-telli sistemlerin nötr iletkenlerinde anormal ölçülerde büyük akımlara sebep olur. Bazı güç kaynakları önemli oranda harmonik üretir. Temel frekanstaki dengeli 3 fazlı akımlar nötr iletkeninde akım oluşturmazlar. Ancak, 3 fazlı sistemlerde 3. harmonikler nötr iletkende birbirlerini zayıflatmaz tam tersine güçlendirir. Hatta, nötr akımı faz akımının 1.7 katına kadar çıkabilir. Nötr iletkenleri faz iletkenleriyle aynı boyutlarda olduğundan bu durumda nötr iletkeni aşırı yüklenebilir. Bu soruna en çok 3 fazlı dağıtım sisteminin tek fazlı büyük yükleri beslediği ticari binalarda rastlanmaktadır. Söz konusu soruna karşı alınan en yaygın önlem nötr iletkeninin, faz iletkenlerinin iki katı büyüklüğünde boyutlandırılmasıdır.

3.5. Elektronik Donanımı

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

3.6. Aydınlatma Donanımı

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

3.7. Ölçme Aletleri

Modern efektif (rms) değer ölçen voltmetreler ve ampermetreler dalga şeklindeki bozulmalara karşı hassastır. Bu aletlerde, giriş gerilimi veya akımı elektronik bir devre yardımıyla işlenir. Test sonuçları göstermektedir ki, modern voltmetre ve ampermetrelerin sinüs biçimli olmayan akım ve gerilimlerden kaynaklanan hataları % 0.2' den az olmaktadır. Etkin değer ölçümü için kalibre edilmiş olan voltmetre ve ampermetreler, harmoniklerin varlığında hatalı sonuçlar verir. Örneğin 45 derecelik bir ateşleme açısıyla kıyılmış bir sinüs işaretinin etkin değerini, böyle bir alet % 13 oranında düşük ölçmektedir. Eğer bu alet bir ampermetre ise, aşırı yüklenmiş bir iletkenin fark edilmemesine neden olacaktır.

Akım ve gerilimin elektronik olarak çarpıldığı modern wattmetreler mükemmel bir performans göstermektedir. Test sonuçlarından, bu aletlerin, sinüs biçimli olmayan akım ve

gerilimlerden kaynaklanan hatalarının % 0.1'den az olduğu anlaşılmaktadır. Elektrik sayaçları en yaygın kullanılanlardandır. Bu aletler, frekans karakteristiklerinden ve doğrusal olmayan davranışlarından ötürü hatalar oluşturur. Akım ve gerilimin her iki sininde değışmiş olduğu bir testte, bu sayaçlar, % 20'lere kadar varan hatalar yapmıştır. Sinüs biçimli olmayan akım ve gerilimlerin yoğun olarak bulunduğu ortamlarda endüksiyon diskli elektronik sayaçlarının kullanımından kaçınmak gerekir. Çünkü, hatalı ölçümler yapmak dışında 400-1000 Hz aralığındaki mekanik rezonanstan kaynaklanan arızalarda olasıdır.

3.8. Koruyucu Röleler

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

3.9. Döner Makinalar

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

3.10. Telefonlar

Telefon ve enerji hatlarının yanyana geçmesi güç frekanslarında geçişmenin olanaklarını oluşturmaktadır. Telefon frekans aralığının 300-400 Hz olması nedeniyle, harmonik frekansları temel frekanstan daha büyük bir sorun oluşturur. Geçişmenin dört mekanizması vardır. İlki, güç hattının, iki telefon iletkeninin oluşturduğu çevrimde bir gerilim endüklemesidir. İkincisinde, çevrimi iki telefon iletkeni değil, bir telefon iletkeniyle toprak oluşturur. Bu en yaygın görülen geçişme tipidir. Üçüncü mekanizmada, güç ve telefon iletkenleri arasında kapasitif kuplaj söz konusudur. Sonuncusu ise, güç nötr iletkeninin iyi bağlanmamasından kaynaklanır. Bir noktadaki toprak potansiyelinin güç nötr hattından dolayı

artması, telefon devresi üzerinde bulunan diğer bir toprak noktasını etkiler. Bu da geçişmeye yol açar.

3.11. Transformatörler

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

3.12. Harmonik Standartları

Harmoniklerin sınırlandırılması için THD kriterine göre çeşitli standartlar mevcuttur. Müsade edilen maksimum gerilim ve akım distorsiyonu IEEE (standart 519-1992)'de belirtilmiştir. Buna göre birçok endüstriyel tesis için maksimum müsade edilen gerilim THD'si %5, herhangi bir harmonik bileşen içinse %3'tür (Bosela R.T.). IEEE(519-1992)'nin dağıtım sistemleri için akım distorsiyonu limitleri ise Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Birçok ülkede harmoniklerin sınırlandırılması için THD kriterine göre bu gibi standartlar bulunmasına rağmen, ülkemizde henüz bu konuda bir çalışma yoktur.

Çizelge 3.1 Dağıtım sistemleri için akım distorsiyonu limitleri

I_K/I_1	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THD
<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

Bu çizelgede,

I_K : Kısa devre akımını

I_1 : Temel bileşen akımını

h : Harmonik derecesini göstermektedir.

4. HARMONİKLERİN GİDERİLMESİ

Harmoniklerin güç sistemi üzerindeki zararlarını ortadan kaldırmak için çeşitli önlemler alınabilir. Her ne kadar harmoniklerin şebekeler üzerindeki zararlı etkilerini ortadan kaldırmak mümkün olmasa da, en alt düzeye indirmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemleri işletme öncesinde ve sonrasında olmak üzere ikiye ayırabiliriz.

4.1. Tasarım Sırasında Alınabilecek Önlemler

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

4.1.1. Generatörlerde alınabilecek önlemler

Senkron generatörlerde hava aralığındaki manyetik alan endüvi iletkenlerinde endüklenen elektromotor kuvvetini belirler. Bu yüzden eğer ϕ manyetik akısı sinüsoidal ise elektromotor kuvveti de sinüsoidal olacaktır. Yuvarlak rotorlu senkron makinalarda uyarma sargısının bütün rotor çevresine homojen olarak dağıtıldığı durumlarda, üçgen (trapez) şeklinde bir alan eğrisi elde edilir. Bu gibi sinüsoidal olmayan eğriler 1., 3., 5., 7., 9. vb. tek mertebeli sinüs terimlerinin toplamına eşit olduğundan endüklenen elektromotor kuvvet de aynı mertebeden harmonikleri içerir.

Yuvarlak rotorlu senkron makinalarda sinüsoidal olmayan alan eğrisini sinüs eğrisine yaklaştırmak için, ya kutup taksimatının yalnız 2/3'ü sarılır ya da oluklar arasındaki uzunluklar birbirinden farklı yapılır.

Senkron makinada alan eğrisinde belirli harmoniklerin bulunmasına rağmen, endüklenen gerilimde harmoniklerin etkisi çok daha düşüktür. Alan eğrisindeki 3. 5. ve 7. harmonikler, endüvi sargılarının özel bir şekilde düzenlenmesi ve sargı adımının uygun seçilmesi ile gerilim eğrisinde tamamen ortadan kaldırılabilir. Çıkık kutuplu senkron makinalarda, endüvi oluklarının belirli bir şekilde düzenlenmesi ve kutuplara uygun şekil verilmesi ile, gerilim eğrisinin sinüsoidal olması sağlanmaya çalışılmaktadır. Çıkık kutuplu senkron makinalarda alan eğrisi dikdörtgen olduğu için kutup ayaklarına değişik şekiller verilerek sinüs eğrisine yakın alan eğrileri elde edilebilmektedir.(Rao, 1996).

4.1.2. Dönüştürücülerde alınabilecek önlemler

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

Bu özellikten dolayı harmonik üreten güç elektroniği aygıtlarında, daha tasarım aşamasında gerekli tedbirler alınarak harmoniklerin şebekedeki etkinlikleri azaltılabilir. Örneğin, bazı tesislerde darbe sayısının 6'dan 12'ye veya 12'den 36'ya çıkartılmasıyla, daha önce görülen olumsuzlukların artık söz konusu olmadığı literatürde kaydedilmiştir (Mohan vd., 1989).

4.1.3. Transformatörlerde alınabilecek önlemler

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

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

4.1.4. Yüksek harmoniklerin oluşturduğu rezonansa ilişkin önlemler

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

$$L = 1/C\omega^2 \quad (4.1)$$

$$C = 1/L\omega^2 \quad (4.2)$$

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

- Teorik olarak yüksek harmonik akımlarını azaltmak için devreye omik direnç yerleştirilebilir. Fakat devreye ilave edilen her ek direnç kayıplara yol açacağından, mümkün olduğu kadar yapay direnç artırma yoluna gidilmez. Buna karşılık doğal olarak devrede bir omik direncin bulunmasını sağlamak amacı ile, kompanzasyon tesisleri doğrudan doğruya baraya bağlanma yerine bir veya birkaç kablo üzerinden bağlanırlar.
- Kompanzasyon yapmak amacıyla hesaplar yapılırken, bağlanacak kondansatör değeriyle tesisteki mevcut motor, transformatör ve hatların endüktif direnç değerleri göz önünde bulundurulmalıdır. Rezonansa neden olacak harmonik frekanslarından kaçınılmalıdır. Örneğin kurulacak kompanzasyon tesisinin rezonans frekansının mevcut harmonik frekans değerleri arasında olmaması gerekir.
- Kompanzasyon için gerekli olmayan kondansatör bataryaları devreden çıkarılmalıdır. Yükün az olduğu saatlerde tesisi besleyen transformatörler ile kompanzasyon için yerleştirilen kondansatörlerin tamamı devrede kalırsa, aşırı kompanzasyon nedeni ile gerilim yükselir ve transformatörler doyma bölgesinde çalışmaya başlar. Doyma anında mıknatıslama akımının şekli bozulacağından transformatör bir harmonik üretici gibi çalışır. Bunun sonucu yüksek harmonik rezonansı baş gösterebilir. Onun için kondansatör gücünü kompanzasyon ihtiyacına göre ayarlamak amacı ile tesisin otomatik güç faktörü regülatörü ile donatılması uygun olur.

4.2. Harmoniklerin Filtrelenmesi

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

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

- Harmonik üreten bir cihazdan (bir redresörden veya inverterden) beslenen yükün gerilim dalgasını düzeltmek
- A.C. sisteme geri gönderilen istenmeyen harmonik bileşenleri önlemek
- Radyo frekans girişimlerini elimine etmek şeklinde özetlenebilir.

Temel olarak iki çeşit filtre vardır.

- 1) Filtre bileşenlerinin direnç, endüktans ve kondansatör gibi pasif elemanlardan oluşturulduğu 'pasif filtreler'.
- 2) Filtrelerin kontrollü akım ya da gerilim kaynağına sahip olduğu 'aktif filtreler'.

4.2.1. Pasif filtreler

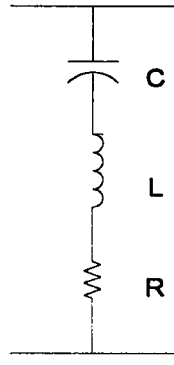
Pasif filtreler kaynak ile alıcı arasına konulan ve temel frekans dışındaki bileşenleri yok eden seri bağlı kondansatör (sığa, C) ve endüktansın (bobin, L) bileşimidir. Bazı durumlarda direnç (R) de ilave edilebilir.

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

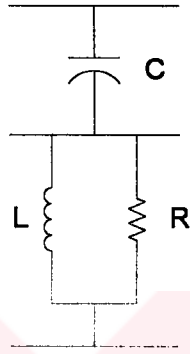
4.2.1.1. Pasif harmonik filtreleriyle ilgili genel tanımlar

Pasif filtreler endüktif ve kapasitif reaktansları birbirine eşit yapan frekansa ayarlanabilir. Kalite faktörü Q, ayar keskinliğini belirlemektedir. Q faktörüne bağlı olarak filtreler ya yüksek Q ya da düşük-Q tipindedirler. Q değeri yüksek Q tipi filtrelerde 30 ile 60 arasında değerler alırken, düşük Q tipi filtrelerde 0.5 ile 5 arasında değerler almaktadır.

Yüksek Q filtresi, düşük harmonik frekanslardan birine ayarlanır. Düşük Q filtresi ise, geniş bir frekans aralığında düşük bir empedansa sahiptir ve yüksek mertebeli harmonikleri süzmek için kullanıldığında yüksek geçiren filtre olarak da düşünülür. Düşük ve yüksek Q tipi filtreler sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Tek ayarlı filtre devresi



Şekil 4.2 İkinci mertebe zayıflatan sönümlü filtre devresi

Q kalite faktörü

$$Q = X_0 / R \quad (4.3)$$

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

$$Q = R / X_0 \quad (4.4)$$

şeklindedir.

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

$$\delta = (\omega - \omega_n) / \omega_n \quad (4.5)$$

olarak tanımlanır.

Ayar sapma faktörü aşağıda belirtilen etkileri içerir:

1. Temel frekansta meydana gelen değişimler
2. Filtre ömrü ve sıcaklığının neden olduğu kapasite ve endüktanstaki değişimler
3. Yapım toleransı ve Q için öngörülen ayar aralığının neden olduğu etkiler

Yukarıda belirtilen (4.5) ifadesi

$$\delta = \frac{\Delta f}{f} + \frac{1}{2} \frac{\Delta L}{L} + \frac{1}{2} \frac{\Delta C}{C} \quad (4.6)$$

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

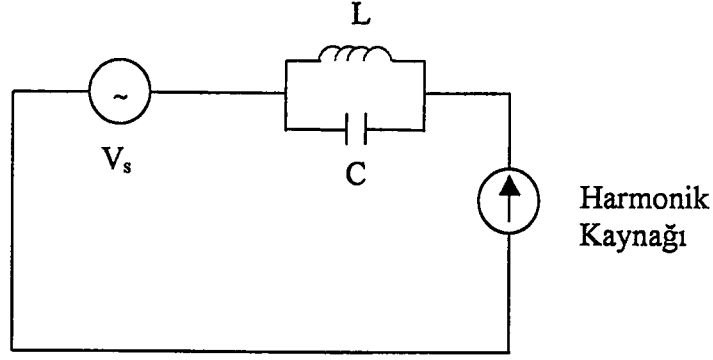
Örneğin, bobin sıcaklık katsayısı $^{\circ}\text{C}$ başına %0.01, kondansatör sıcaklık katsayısı $^{\circ}\text{C}$ başına %0.05, frekans toleransı $\pm\%1$ ve çevre sıcaklığı ± 20 $^{\circ}\text{C}$ alınırsa bu durumda δ , 0.016 olarak elde edilir. (Arrillaga vd., 1985).

Pasif filtreler kendi içinde seri ve şönt filtre olmak üzere ikiye ayrılır.

4.2.1.2. Seri filtreler

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

Seri filtreler bir fazlı sistemde 3. harmoniğin baskın olduğu 1 fazlı uygulamada yaygındır. Seri filtreler genellikle temel frekansta düşük empedans gösterir. Seri filtrelerin en büyük dezavantajı tam yük akımını taşımaları ve tam hat gerilimi için yalıtılmalarıdır. Bununla birlikte seri filtrelerin rezonans problemi yoktur. Buda şönt filtreye nazaran avantajıdır.

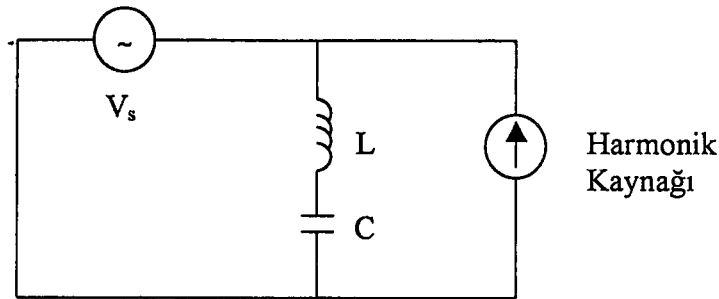


Şekil 4.3 Devrede seri filtrenin kullanımı

4.2.1.3. Şönt filtreler

Şönt filtreler harmonik kaynağıyla şebeke arasına paralel olarak bağlanırlar. Düşük bir şönt empedans yoluyla istenmeyen harmonik akımların yönünün saptırılması sağlanır. Şönt filtreler harmonik akımlarına çok düşük bir empedans göstermek için tasarlanırlar. Ayrıca şönt filtreler temel frekansta reaktif güç sağlamak için kullanılabilir. Şönt filtreler güç faktörü düzeltiminde de kullanılır. Şönt filtrede seri filtre gibi sadece ayarlı frekansında veya ayarlı frekansı civarında etkilidir.

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

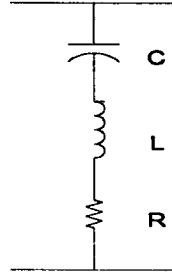


Şekil 4.4 Devrede şönt filtrenin kullanımı

Şönt filtrele örne olarak aşağıdaki filtreleri verebiliriz.

4.2.1.3.1. Tek ayarlı filtreler (bant geçiren filtreler)

Tek ayarlı filtreler, kısa devre yolu oluşturarak istenen özel bir frekanstaki harmonik akımının hattan saptırılmasını sağlarlar. Bu işlemi genellikle tek bir frekans değeri için yaparlar. Tek ayarlı filtreler seri R-L-C devresinden meydana gelmektedir (Şekil 4.5). Tek ayarlı filtre için filtre empedansı Z_f şu şekilde verilir:



Şekil 4.5 Tek ayarlı filtre devresi

$$Z_f = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (4.8)$$

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

$$\omega = \omega_n (1 + \delta) \quad (4.9)$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.10)$$

$$C = \frac{1}{\omega_n X_0} = \frac{1}{\omega_n RQ} \quad (4.11)$$

$$L = \frac{X_0}{\omega_n} = \frac{RQ}{\omega_n} \quad (4.12)$$

Sonuç olarak

$$Z_f = R \left(1 + jQ\delta \left(\frac{2+\delta}{1+\delta} \right) \right) \quad (4.13)$$

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

$$Z_f = R (1 + j2Q\delta) = X_0(Q^{-1} + j2\delta) \quad (4.14)$$

şeklinde yazılabilir (Arrillaga, 1985).

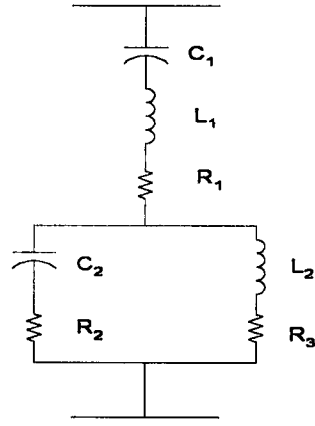
Tek ayarlı filtrelerin başlıca üstünlükleri şunlardır:

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

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

4.2.1.3.2. Çift ayarlı filtre

Çift Ayarlı Filtrenin eşdeğer empedansı iki adet tek ayarlı filtreninki ile aynıdır. Çift ayarlı filtre iki harmoniği elimine edebilir. Tek ayarlı filtre ile karşılaştırıldığında temel frekanstaki

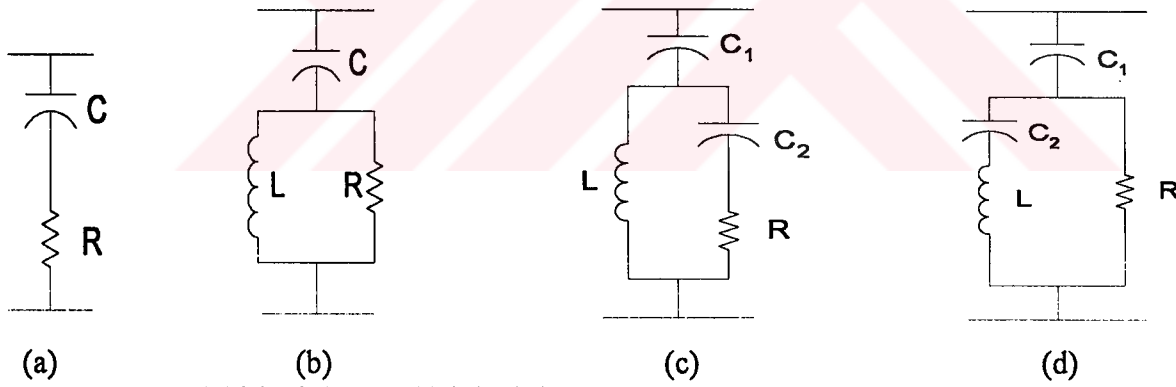


Şekil 4.6 Çift ayarlı filtre

güç kaybının azlığı bu filtrelerin en önemli özelliğidir. Bundan başka endüktansların sayısının ayarlanması ile yüksek gerilimlerde bütün impuls gerilimlerini denetim altına alırlar

4.2.1.3.3. Yüksek geçiren sönümlü filtreler

Şekil 4.7'de yüksek geçiren sönümlü birinci, ikinci, üçüncü dereceden ve C tipi filtre devreleri verilmiştir.



a) birinci derece b) ikinci derece c) üçüncü derece d) C tipi

Şekil 4.7. Yüksek geçiren sönümlü filtreler

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

performansı ikinci ve üçüncü dereceden filtrelerin arasında yer alır. C tipi filtrenin en önemli avantajı temel frekans kayıplarındaki azalmadır.

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

- Kapasite kayıpları, çalışma ve yüklenme sırasında ısı değişiminden etkilenmediği gibi, frekans sapmaları da üretim toleransları üzerinde fazlaca etkili olmamaktadır.
- Artan anahtarlama ve bakım sorunları bakımından paralel kolların ek devrelere ayrılmasına gerek duyulmaksızın, geniş bir frekans aralığında düşük bir empedans sağlarlar.
- Yüksek geçiren filtreler çeşitli mertebeler için tasarlanırlar. Örneğin ikinci mertebeden yüksek geçiren bir filtre temelde endüktansına paralel bir direnç eklenmiş tek ayarlı bir filtredir. Farklı direnç değerleri için farklı filtre cevapları elde edilir.

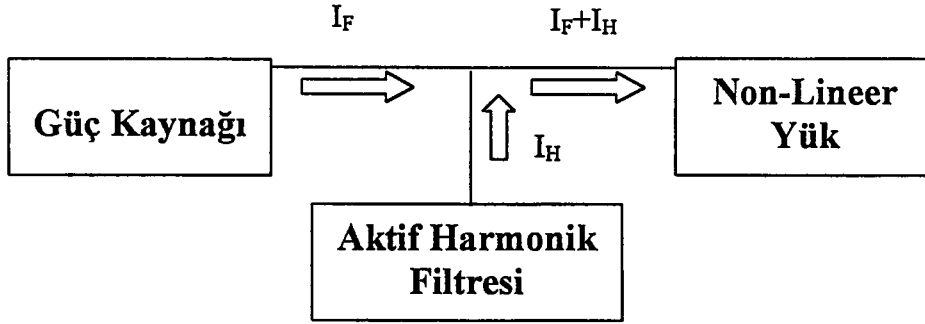
İkinci mertebeden yüksek geçiren bir filtre, yüksek frekanstaki harmonikleri zayıflatmada tek ayarlı bir filtreden daha etkilidir. Ayrıca filtre, tek ayarlı filtre için ayarlanan frekans değerine duyarlı değildir. Endüktif ve kapasitif elemanların seçimi, tek ayarlı filtredeki gibi yapılır. Bunlara ek olarak anma etkin gücüne dayalı bir direnç değeri tanımlanır. Düşük mertebeli harmonikler için yüksek geçiren filtreler kullanmak ekonomik değildir. Ayrıca direnç değeri artacağından kayıplar artar.

4.3. Aktif Filtre

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

Aktif filtrenin çalışma prensibi Şekil 4.8'de görülmektedir. Buna göre aktif filtreler yük tarafından çekilen harmonikleri analiz ederler ve uygun bir fazda yüke aynı harmoniği ters

fazda enjekte ederler. Sonuç olarak, istenilen noktada harmonik akımlar sınırlanır. Bu da harmoniklerin şebekeden çekilmemesi demektir. Güç elektroniği uygulamaları geliştikçe bu konu da ilerleme göstermiştir. En büyük harmonik kaynak olarak gösterilen güç elektroniği elemanları ve uygulamalarından kaynaklanan sorun yine aynı yöntemle giderilmeye çalışılmaktadır.



Şekil 4.8 Aktif harmonik filtresinin çalışma prensibi

Şekil 4.9'da aktif filtrenin çeşitli non-linear yüklere göre çalışma şeklinin bir örneği gösterilmiştir. Burada verilen dalga şekilleri 6-darbeli Graetz köprüsüne ait olup bu sisteme ait elektriksel değerler de aşağıda verilmiştir.

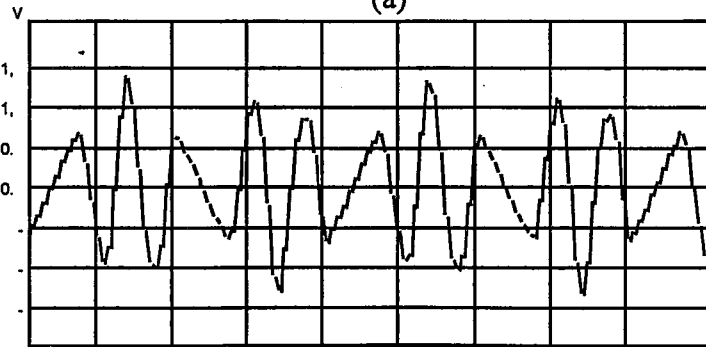
Yük akımı ($I_{rms} = 82$ A, $THD_i = \%41$)

Aktif Filtre akımı ($I_{rms} = 30$ A)

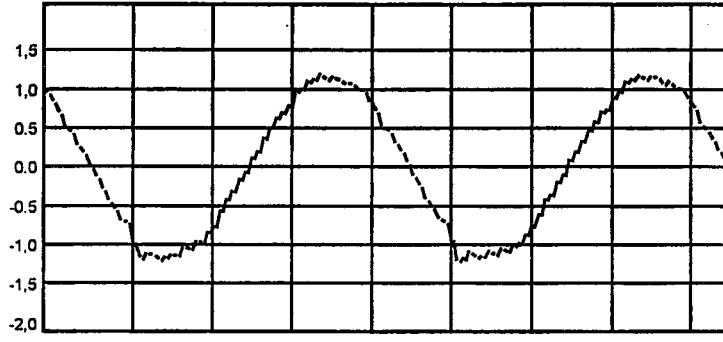
Şebeke akımı ($I_{rms} = 75$ A, $THD_i = \%3,6$)



(a)



(b)



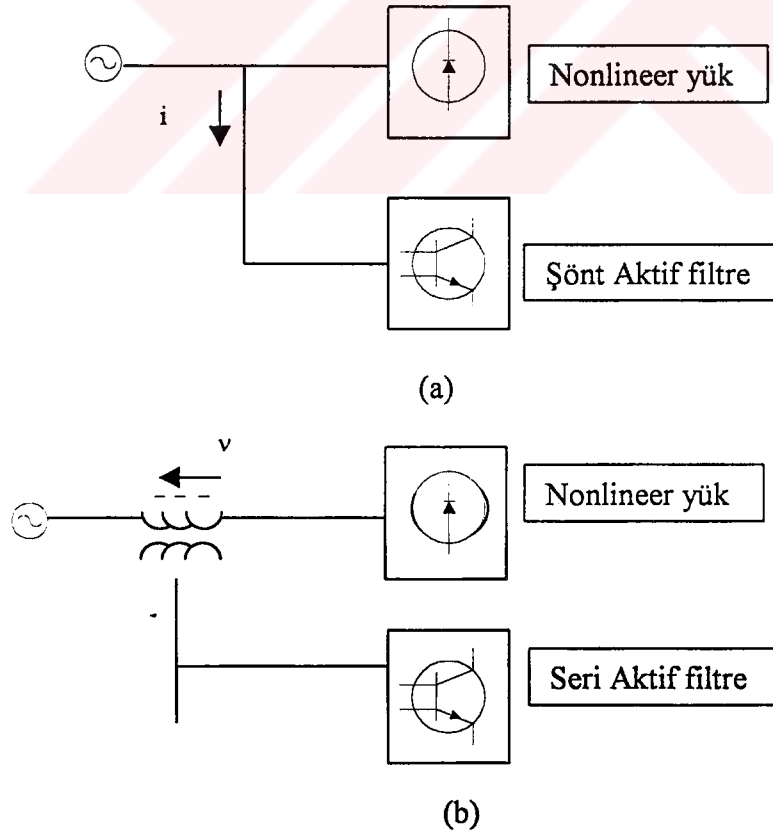
(c)

Şekil 4.9 6-darbeli Graetz köprüsünde aktif filtre kullanımı

(a) Yük akımı, (b) aktif filtre akımı, (c) şebeke akımı

4.3.1. Aktif filtre konfigürasyonları

Aktif filtreleri genel olarak şönt (Şekil 4.10.a) ve seri (Şekil 4.10.b) olarak ikiye ayırabiliriz. Günümüzde yaygın olarak şönt tipi aktif filtre kullanılmaktadır. Çizelge 4.1'de şönt aktif filtre ile seri aktif filtrenin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 4.10 Şönt aktif filtre (a) ve seri aktif filtrenin şematik gösterimi

Şönt filtrenin kullanım alanlarını şu şekilde sıralayabiliriz.

- Sanayi için diyod veya tristör doğrultucular ve frekans dönüştürücülerde IGBT'lerle reaktif güç kompanzasyonlu veya kompanzasyonsuz harmonik kompanzasyonunda.
- Ark fırınlarında GTO tristörlerle flicker kompanzasyonunda.
- Hızlı tek raylı trenlerde GTO tristörlerle gerilim regülasyonu ayarında.

Şönt aktif filtre, tesiste var olan pasif filtre ile kombine olarak da çalışabilmektedir. Ancak bu durumda frekans domeninde kompanzasyon paylaşımı konusunda problem çıkabilmektedir.

Çizelge 4.1 Seri ve şönt aktif filtrelerin karşılaştırılması

	Şönt aktif filtre	Seri aktif filtre
Güç devresi	Akım çevrimli gerilim beslemeli PWM inverter	Akım çevrimsiz gerilim beslemeli PWM inverter
Davranışı	Akım kaynağı	Gerilim kaynağı
İlave işlevi	Reaktif güç kompanzasyonu	a.c. gerilim regülasyonu
Yüke uygun harmonik üretimi	Endüktif yüklü diyod veya tristör doğrultucular ve cycle dönüştürücüler	Kapasitif yüklü büyük kapasiteli diyod doğrultucular

4.3.2. Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması

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

- Harmonik yüklerin büyüklükleri ve sırası ne olursa olsun otomatik konfigrasyon
- Aşırı yüklenme riskinin kaldırılması
- Her türlü yük (tek-faz veya üç-faz) için uyumlu
- Generatör grupları ile uyumlu
- Dağıtımda istenilen herhangi bir noktaya bağlanabilme
- Güncelleştirilmesi (ilave modül ilavesi) kolay ve pratik
- Uzaktan bağlantılı kullanıcı arabirim desteği
- Kirlilik seviyesini azaltmak için bir çok filtrenin aynı dağıtımda kullanılması
- Elektrik tesisatı için en doğru ve kesin projelendirme yapılabilir
- Tüm ya da seçilen harmoniklerin süzülmesi sağlanabilir

- Şebekeye paralel bağlanır ve aşırı yüklerle karşı akım koruması ile devamlılık da sağlar
- Filtreleme kapasitesi artırımı için 4 adede kadar paralel bağlantı yapılabilir

Aktif filtre ile pasif filtrenin çeşitli durumlardaki davranışları da karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması (İnan, 1999)

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

4.4. Çeşitli Filtre Tasarım Kriterleri

4.4.1. Elham B. Makram'ın filtre tasarım yaklaşımı

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

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

4.4.1.1. Temel frekans reaktif güç kompanzasyonu

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

n. harmonik için açısal frekans

$$\omega_n = 2.\pi.f_n \quad (4.15)$$

$$\omega_n = 2.\pi.(n.f_o) \quad (4.16)$$

ile belirlenir. Burada,

f_o :Güç sisteminin temel frekansıdır.

f_n :Filtrenin n. harmoniğe ayarlı frekansıdır.

C_f filtrenin kapasitesi ve L_f filtrenin özendüktansı olmak üzere;

Ayarlanmış frekansta filtrenin kapasitif ve endüktif reaktansları eşit olacaktır:

$$\frac{1}{n.\omega_o.C_f} = n.\omega_o.L_f \quad (4.17)$$

veya

$$\frac{X_{Cf}}{n} = n.X_{Lf} \quad (4.18)$$

Sonuç olarak

$$n.\omega_o = \omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_f.C_f}} \quad (4.19)$$

elde edilir.

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

$$Q_f = \frac{|V|^2}{(X_{Lf} - X_{Cf})} \quad (4.20)$$

şeklinde elde edilir.

Burada $|V|$ filtrenin yerleştirildiği baradaki temel gerilimin büyüklüğüdür. (4.18) ve (4.20) /denklemlerine bağlı olarak filtrenin toplam reaktif gücü şu şekilde elde edilir.

$$Q_f = \frac{|V|^2}{\left(\frac{X_{Cf}}{n^2} - X_{Cf}\right)} = \frac{|V|^2}{X_{Cf}} \cdot \frac{n^2}{(1 - n^2)} \quad (4.21)$$

Filtrenin endüktif reaktansı ve direnci ise,

$$X_{Lf} = \frac{X_{Cf}}{n^2} = \frac{|V|^2}{Q_f \cdot (1 - n^2)} \quad (4.22)$$

$$R_{Lf} = \frac{n \cdot X_{Lf}}{Q} \quad (4.23)$$

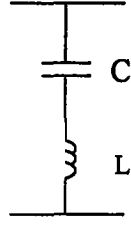
olarak bulunur. (Q bobinin kalite faktörüdür)

Eğer filtrenin sağlaması gereken reaktif gücünün değeri bilinirse, 4.21 eşitliği kullanılarak filtrenin kapasitif bileşeni, 4.22 eşitliği kullanılarak filtrenin endüktif bileşeni hesaplanabilir. Farklı kalite faktörlerinin değerleri standart imalatçı tablolarının kullanılmasıyla bulunarak 4.23 eşitliğinden R_{Lf} değeri bulunur.

4.4.1.2. Filtre tasarımında ekonomik bakış açıları

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

Tek ayarlı bir filtrede toplam gerilim filtre elemanlarının gerilimleri toplamıdır, yani



Şekil 4.11 Tek ayarlı filtre

$$V \cong V_L + V_C \quad (4.24)$$

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

$$V_C \cong V \cdot \frac{n^2}{(n^2 - 1)} \quad (4.25)$$

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

$$\frac{V_C^2}{X_{Cf}} = Q_f \cdot \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \quad [\text{kVAr}] \quad (4.26)$$

Harmonik kapasitif reaktif gücü de şu şekilde elde edilir.

$$\frac{\left\{ I_{fn} \cdot \frac{X_{Cf}}{n} \right\}}{X_{Cf}} = I_{fn}^2 \cdot \frac{|V|^2 \cdot n^2}{Q_f \cdot n(n^2 - 1)} \quad (4.27)$$

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

Temel endüktif ve reaktif güç şu şekilde elde edilir.

$$\frac{V_L^2}{X_{Lr}} = |V|^2 \cdot \left\{ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right\}^2 \cdot \frac{1}{n^2 \cdot X_{Cf}} \quad (4.28)$$

4.24 eşitliğinin 4.26 eşitliğinde yerine yazılması ile

$$\frac{|V_L|^2}{X_L} = \frac{Q_f}{n^2} \cdot \left\{ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right\} \quad (4.29)$$

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

Toplam maliyet aşağıdaki gibi verilir.

$$TM = Q_f \cdot \left\{ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right\} + \left\{ \frac{I_{fn}^2 \cdot |V|^2}{Q_f \cdot n} \right\} \cdot \left\{ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right\} + \frac{Q_f}{n^2} \cdot \left\{ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right\} + \left\{ \frac{I_{fn}^2 \cdot |V|^2}{Q_f \cdot n} \right\} \cdot \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (4.30)$$

Toplam maliyet şu şekilde de yazılabilir.

$$TM = Q_f \cdot \left\{ J_C + \frac{J_L}{n^2} \right\} + \frac{1}{Q_f} \cdot \left[\frac{I_{fn}^2 \cdot |V|^2}{n} \cdot (J_C + J_L) \right] \quad (4.31)$$

$$TM = K \cdot Q_f + \frac{G}{Q_f} \quad (4.32)$$

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

4.4.1.3. Minimum filtre

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

$$\frac{d(TM)}{dQ_f} = K - \frac{G}{Q_f^2} = 0 \quad (4.33)$$

Böylece

$$Q_f^2 = \frac{G}{K}, Q_f = \sqrt{\frac{G}{K}} \quad (4.34)$$

olur.

4.34 eşitliğindeki Q_f 'in değeri 4.33 eşitliğinde yerine yazılarak

$$T_{M_{\min}} = 2\sqrt{K \cdot G} \quad (4.35)$$

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

4.4.1.4. Filtre çeşidinin seçimi

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

$$R_f = Q^2 \sqrt{X_{L_f} \cdot X_{C_f}} \quad (4.36)$$

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

Filtre kollarının sayısı gerilim ve akımın harmonik bileşenlerinin yüzdesine bağlı olarak seçilir. Temel frekans reaktif gücü genellikle eşit bir şekilde farklı filtre kolları arasında

bölünür, fakat bu her zaman doğru olmayabilir. Bununla birlikte eğer varsa rezonans problemlerini azaltmak için filtreleri sistemde başka yere yerleştirmek faydalı olabilir.

4.4.2. Damian A. Gonzales'in filtre tasarım yaklaşımı

İstenmeyen harmonik akımlarının sisteme akması iki yöntemden birisiyle engellenebilir.

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

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

4.4.2.1. Tek ayarlı filtre

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

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

4.4.2.2. Tek ayarlı filtrenin tasarım eşitlikleri

Filtre kolunun empedansı şu şekilde verilebilir,

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (4.37)$$

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

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.38)$$

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

$$X_{Ln} = n\omega L \quad (4.39)$$

$$X_{Cn} = \frac{1}{n\omega C} \quad (4.40)$$

Rezonans durumunu r indisi ile gösterirsek rezonans halinde

$$X_{Lr} = X_{Cr} \quad (4.41)$$

dir.

4.4.2.3. Kalite faktörü

Kalite Faktörü ayar keskinliğinin ölçüsüdür.

$$Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{X_{Lr}}{R} = \frac{X_{Cr}}{R} \quad (4.42)$$

olarak verilebilir. Denklemden X_{Lr} ve X_{Cr} reaktans değerleri, rezonans frekansındaki değerlerdir.

Tek ayarlı filtrenin kalite faktörüyle ilgili olarak şunları söyleyebiliriz:

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

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

4.4.2.4. Tek ayarlı filtrenin tasarım düşünceleri

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

$$f_{\text{sis}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(L_s + L)C}} \quad (4.43)$$

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

$$Q_{\text{sis}} = \frac{1}{(R + R_s)} \sqrt{\frac{(L_s + L)}{C}} \quad (4.44)$$

4.38 ve 4.44 eşitliklerinin incelenmesinden paralel rezonans pikinin ve filtre çentiğinin yakınlığının tamamen kaynak endüktansına bağlı olduğu açıktır. Komşu rezonans noktalarıyla ilişkili bu problem filtre değer değişimidir. Eğer bir filtre kesin olarak ilgili frekansta ayarlı ise, ayarlı frekansta yukarıya doğru olan bir değişme harmonikten görüldüğü gibi empedansta keskin bir artışı netice verecektir. Bu durumda sonuçtaki gerilim yükselmesi tehlikeli olabilir.

Filtre ayarlı frekansının değişimine sebep olacak etkenler şunlardır:

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

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

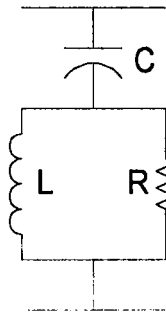
4.4.2.5. Yüksek geçiren filtre tasarımı

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

- Yüksek geçiren filtrenin kendi geçiş bandındaki en düşük empedansı kendi çentik frekansındaki tek ayarlı filtreninkiyle mukayese edilebilecek bir değeri hiç bir zaman meydana getirmez.
- Tüm sistem harmoniklerinin yüzdesinin bir filtre üzerinden şöntlenmesi, filtrenin temel frekans açısından çok önem verilmesini gerektirebilir.

4.4.2.6. Yüksek geçiren filtre tasarım eşitlikleri

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



Şekil 4.12 İkinci dereceden yüksek geçiren filtre

İkinci dereceden yüksek geçiren filtrenin empedansı

$$Z = \frac{1}{j\omega C} + \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} \right)^{-1} \quad (4.45)$$

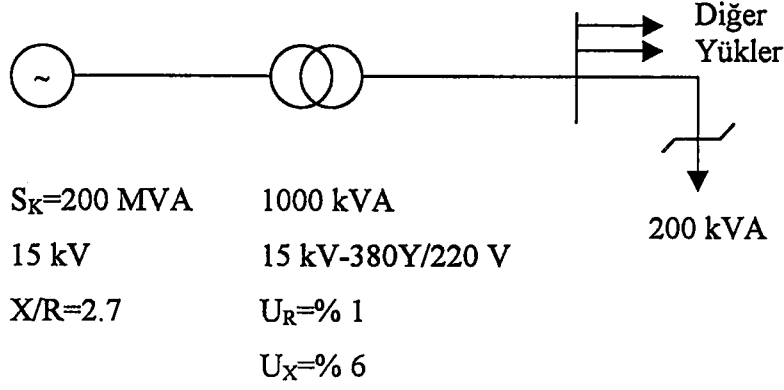
Filtrenin ayarlandığı frekans (köşe frekansı) 4.38 eşitliğinde verilmiştir. Filtrenin kalite faktörü de şu şekilde verilir.

$$Q = \frac{R}{(L/C)^{1/2}} = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{X_C} \quad 4.46)$$

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

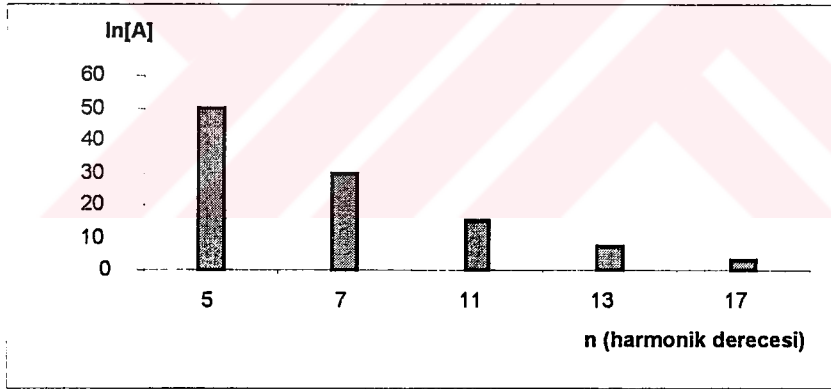
- Filtrenin ayarlı olduğu frekans
- Telefon girişimiyle olan ilişki
- Kayıplar

5. SAYISAL UYGULAMA



Şekil 1 Örnek sistemin tek hat diyagramı

Nonlinear yüklerin bulunduğu enerji sistemlerinde meydana gelen distorsiyonun giderilmesinde kullanılacak filtre elemanlarının tespiti amacıyla bir örnek sistem (Şekil 1) üzerinde sayısal uygulama gerçekleştirilmiştir. Örnek sistemde 15 kV'luk 50 Hz frekanslı şebekeye 200 kVA gücünde 380 Voltluk nonlinear bir yük bağlanmıştır. Nonlinear yükün harmonik akım değerleri Çizelge 1'de verilmiştir. Nonlinear yükün harmonik spektrumu şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2 Nonlinear yüke ait harmonik spektrumu

Çizelge 1 Nonlinear yüke ait harmonik akım değerleri

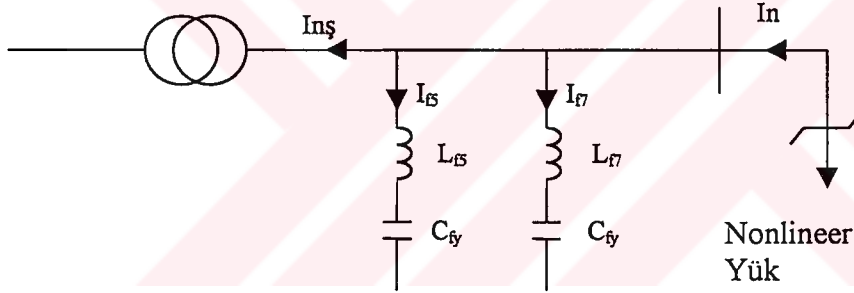
Harmonik Derecesi [n]	I_n [A]
5	50
7	30
11	15
13	7
17	3

Öncelikle, nonlinear elemanlar sonucu sistemde oluşan nonsinüsoidal büyüklüklerin sebep olduğu distorsiyonun seviyesini belirleyelim. Nonlinear yükün sebep olduğu harmonikli akım ve gerilimlerin Toplam Harmonik Distorsiyonları (THD) ilgili bağıntılar kullanılmak suretiyle

$$THD_i = \%25,22$$

$$THD_v = \%2,04$$

olarak hesaplanmıştır. Gerilime ait toplam harmonik distorsiyonu harmonik standardı IEEE 519'a göre % 3 olan en büyük sınır değerinin altında olmasına rağmen, akıma ait toplam harmonik distorsiyonu % 8'lik istenen limitlerin çok üzerinde bulunmuştur. Ayrıca 5. ve 7. harmonik bileşenlerin baskın harmonikler olduğu tespit edilmiştir. Harmoniklerin sistemdeki bozucu etkisini gidermek ve distorsiyonları istenen sınır değerlerin altına indirebilmek için filtreleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Baskın olan 5. ve 7. harmonikleri filtrelemek için tek ayarlı şönt filtrelerin kullanımı öngörülmüştür.



Şekil 3 Filtrelerin örnek sisteme bağlantısı

Genel olarak uygulamada yapıldığı gibi, filtreleme işlemi yapılırken sistem için gereken reaktif gücün bir kısmının filtre elemanlarından karşılanmasına çalışılmıştır. Filtre kullanarak harmonik distorsiyon değeri her ne kadar filtre tarafından istenen limitlerin altına indirilse de, filtre elemanlarının sisteme ilave edilmesi ile devrede paralel rezonansın meydana gelip gelmediği mutlaka araştırılmalıdır. Kullanılan filtrenin sistemle paralel rezonansa girip girmediği için reaktif güç (Q_f) değeri için MATLAB programlama dili kullanılarak yazılan bir program vasıtasıyla tespit edilmiştir. Filtre elemanlarının tespiti adım-adım şu şekilde gerçekleştirilmiştir:

Yapılan hesaplamada reaktif güç $Q_f = 0.6$ MVAR alınarak;

Paralel rezonans şartı;

$$\frac{X_{Cf7}}{n} \cong X_s \cdot n \quad (5.1)$$

gerçekleştiğinde 7. harmonik frekansı civarında paralel rezonans meydana gelmektedir. Burada,

X_{Cf7} :Filtre kolunun 7. harmonikteki kapasitif reaktansını,

X_s : Sistemin endüktif reaktansını,

n : 7. harmonik filtresinin ayarlı olduğu harmonik derecesini göstermektedir.

Rezonansın oluşmaması bakımından 'n oranı' 7. harmonik filtresi için 6.7'ye , 5. harmonik filtresi için de 5'e ayarlanmıştır.

Filtrenin kapasitif reaktansı ve kapasitesi

$$X_{Cf} = \frac{U^2}{Q_f} = \frac{0,38^2}{0,6} = 0,24 \quad [\Omega] \quad (5.2)$$

$$C_f = 1/2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_{Cf} = 1/2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,24 = 0,0132 \quad [F] \quad (5.3)$$

olarak tespit edilir.

Reaktif gücün (Q_f) 5. ve 7. harmonik kollarından eşit olarak elde edildiğini kabul edersek,

$$C_{fy} = C_f / 2 = 0,0066 \quad [F] \quad (5.4)$$

$$X_{Cfy} = 1/2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{fy} = 1/2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,0066 = 0,48 \quad [\Omega] \quad (5.5)$$

Filtrenin reaktans ve özendüktans değerleri

5. Harmonik Filtresi için

$n=5$

$$X_{Lf5 \cdot n} = X_{Cfy} / n \quad [\Omega] \quad (5.6)$$

$$L_{f5} = X_{Cfy} / 2 \cdot \pi \cdot f \cdot n^2 = 0,48 / 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5^2 = 6,1285 \cdot 10^{-5} \quad [H] \quad (5.7)$$

7. Harmonik Filtresi için

$$n=6.7$$

$$X_{Lf7 \cdot n} = X_{Cfy} / n \quad [\Omega] \quad (5.8)$$

$$L_{f7} = X_{Cfy} / 2 \cdot \pi \cdot f \cdot n^2 = 0,48 / 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 6,7^2 = 3,4131 \cdot 10^{-5} \quad [H] \quad (5.9)$$

olarak hesaplanmış olur.

Bu filtre elemanları güç sistemine yerleştirildiğinde her bir harmonik frekansındaki akım ve gerilimler hesaplandığında Çizelge 2'deki değerler bulunur. Bu hesaplamada süperpozisyon teoremi kullanılmış, sonuçlar bilgisayar programı ile elde edilmiştir.

Çizelge 2 Filtreleme sonrası akım ve gerilim değerleri

Frekans[Hz]	Inş [A]	I _{f5} [A]	I _{f7} [A]	Unş [V]
250	0.20	49.98	0.22	0.009
350	2.37	2.36	25.25	0.15
550	5.00	3.06	6.93	0.51
650	2.53	1.44	3.01	0.30
850	1.17	0.62	1.20	0.18

Bu çizelgede,

Inş :Şebekeden çekilen akımı,

I_{f5} :5. harmonik filtresinin akımını,

I_{f7} :7. harmonik filtresinin akımını,

Unş :Yükün bağlı olduğu noktadaki gerilimi göstermektedir.

Filtre elemanlarının bağlanmasından önce nonlineer yükün sebep olduğu harmonik akım ve gerilimlerden dolayı akım ve gerilimin toplam harmonik distorsiyon değerleri

$$THD_i = \% 25,22$$

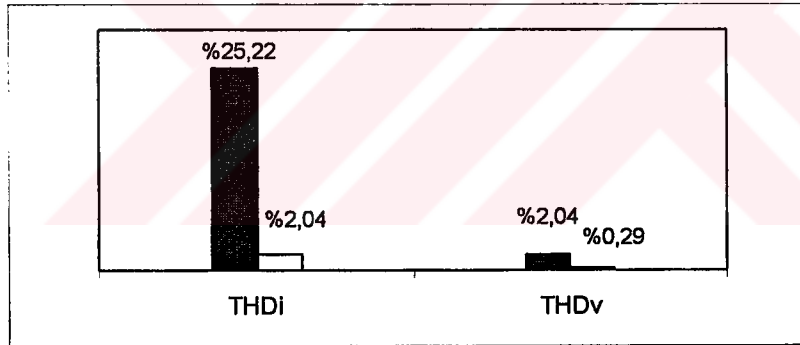
$$THD_v = \% 2,04$$

olarak hesaplanmış idi. Filtreleme işleminden sonraki akım ve gerilimin toplam harmonik distorsiyonu tekrar hesaplanmış ve

$$THD_i = \% 2,04$$

$$THD_v = \% 0,29$$

değerleri elde edilmiştir. Her iki durum Şekil 4'te gösterilmiştir. Burada koyu olan kısım filtrelemeden önceki değerleri boş olan ise filtrelemeden sonraki değerleri göstermektedir.



Şekil 4 Filtrelemeden önce ve sonraki THD değerleri

Şekil 4'ten görüldüğü gibi filtre elemanı işlevini gerçekleştirerek filtreleme işleminden sonra akım distorsiyonunu % 25.22'den % 2.04'e, gerilim distorsiyonunu ise %2.04'ten %0.29'a düşürmüştür.

Reaktif güç için kullanılacak kondansatör grubunun değeri değiştiğinde filtre elemanlarının da değeri değişecektir. Burada önemli olan rezonans şartlarının gerçekleşip gerçekleşmediğidir. Şayet $Q_f = 1$ MVar'lık kondansatör grubunun kullanılması söz konusu olursa, bu halde filtreleme işleminde ne gibi değişiklikler olacaktır bunu inceleyelim. Bu halde herhangi bir harmonik frekansında rezonans meydana gelmemektedir, dolayısıyla 'n' değeri 5. harmonik

filtresi için 5'e 7. harmonik filtresi için 7'ye ayarlanmıştır. Filtrelemeden sonraki akım ve gerilimler Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3 Filtreleme sonrası akım ve gerilim değerleri.

Frekans(Hz)	$I_{nş}$ (A)	I_{5} (A)	I_{7} (A)	$U_{nş}$ (V)
250	0.12	49.92	0.20	0.005
350	0.03	0.06	30.09	0.002
550	3.20	3.26	8.53	0.32
650	1.67	1.58	3.73	0.20
850	0.79	0.70	1.50	0.12

Bu çizelgede,

$I_{nş}$:Şebekeden çekilen akımını,

I_{5} :5. harmonik filtresinin akımını,

I_{7} :7. harmonik filtresinin akımını

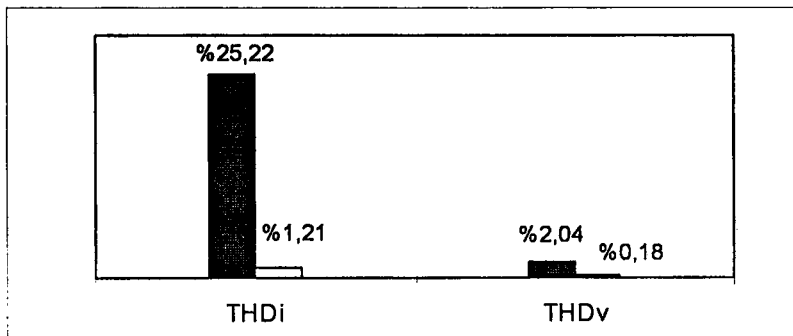
$U_{nş}$: Yükün bağlı olduğu noktadaki gerilimi göstermektedir.

Filtrelemeden sonra akım ve gerilimin toplam harmonik distorsiyonu hesaplanmış ve

$THD_i = \% 1,21$

$THD_v = \% 0,18$

değerleri elde edilmiştir. Filtrelemeden önce ve filtrelemeden sonraki toplam harmonik distorsiyon değeri Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5 Filtrelemeden önce ve sonraki THD değerleri

Şekil 5 den de görüldüğü gibi, filtrelemeden sonra akım distorsiyonu % 25.22'den % 1.21'e, gerilim distorsiyonu ise % 2.04'den % 0.18'e düşmüştür.

Sonuç olarak nonlineer yükün sebep olduğu harmonikler tek ayarlı şönt filtre kullanılarak istenen sınır değerlerinin altına düşürülmüştür. Filtreleme yaparken sisteme gereken reaktif gücü karşılamak için kullanılan kondansatörlerin paralel rezonansa girmesini engellemek için filtre elemanları L,C uygun değerlere ayarlanmıştır.

5.1. Minimum Maliyetli Filtrenin Tespiti

Nonlinear yükün sebep olduğu harmonikleri gidermek için kullanılan filtrenin aynı zamanda ekonomik olması gerekir. Bu amacı gerçekleştirmek için örnek sistemimizdeki minimum maliyetli filtreyi tespit edelim.

Daha önce reaktif güç değeri $Q_f = 0.6$ MVAR için tasarlanan 5. ve 7. harmonik filtrelerinin değerleri referans alınarak minimum maliyetli filtreyi belirleyelim. Minimum maliyetli filtreyi belirlemekteki amaç, minimum filtreyi sağlayacak reaktif güç değerinin belirlenmesidir. TM ile toplam maliyeti gösterirsek;

$$TM = Q_f \cdot \left\{ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right\} + \left\{ \frac{I_{fn}^2 \cdot |V|^2}{Q_f \cdot n} \right\} \cdot \frac{n^2}{n^2 - 1} + \frac{Q_f}{n^2} \cdot \left\{ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right\} + \left\{ \frac{I_{fn}^2 \cdot |V|^2}{Q_f \cdot n} \right\} \cdot \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (5.10)$$

$$TM = Q_f \cdot \left\{ J_C + \frac{J_L}{n^2} \right\} + \frac{1}{Q_f} \cdot \left[\frac{I_{fn}^2 \cdot |V|^2}{n} \cdot (J_C + J_L) \right] \quad (5.11)$$

$$TM = K \cdot Q_f + \frac{G}{Q_f} \quad (5.12)$$

Minimum filtre için $\frac{d(TM)}{dQ_f} = 0$ şartı araştırılırsa,

$$\frac{d(TM)}{dQ_f} = K - \frac{G}{Q_f^2} \quad (5.13)$$

$$T_{Mmin} = 2\sqrt{K.G} \quad (5.14)$$

olarak bulunur [Makram, 1993].

Çizelge 2'den 5. ve 7. harmonik filtrelerinin efektif değerlerini hesaplayalım:

$$I_{fn5}=581,35 \text{ [A]}$$

$$I_{fn7}=564,5 \text{ [A]}$$

değerleri elde edilir.

5. ve 7. harmonik filtre kollarındaki endüktans ve kondansatörün gerilimi Çizelge 2'den yararlanılarak temel bileşen ve harmonikli bileşenler için hesaplanarak toplam gerilim değeri

$$U_5=291,54 \quad \text{[V]}$$

$$U_7=278,3 \quad \text{[V]}$$

olarak bulunur. Bu değerler kullanılarak;

5. Harmonik filtresi n=5 iken;

$$K = \frac{n^2 + 1}{n^2 - 1} = 1,08$$

$$G = \frac{I_{fn}^2 \cdot |V|^2 \cdot 2.n}{n^2 - 1} = 1,19 \cdot 10^{10}$$

$$Q_f = \sqrt{G/K} = 0,1 \quad \text{[MVar]}$$

elde edilir.

7. Harmonik filtresi n=6.7 iken;

$$K = \frac{n^2 + 1}{n^2 - 1} = 1,04$$

$$G = \frac{I_{fm}^2 |V|^2 \cdot 2 \cdot n}{n^2 - 1} = 0,75 \cdot 10^{10}$$

$$Q_f = \sqrt{G/K} = 0,085 \quad [\text{MVA}_r]$$

olarak elde edilir.

Elde ettiğimiz bu sonuçlara göre 5. harmonik filtresini minimum yapan reaktif güç (Q_f) değeri 0.1 MVA_r, 7. harmonik filtresini minimum yapan reaktif güç (Q_f) değeri de 0.085 MVA_r olarak bulunmuş olur. Yeni Q_f değerleri kullanılarak 5. ve 7. harmonik filtre kollarının yeni endüktans (L) ve kapasite (C) değerlerini hesaplayalım.

5. Harmonik filtresi için:

$$Q_f = 0,1 \quad [\text{MVA}_r]$$

$$X_{Cfy} = \frac{U^2}{Q_f} = \frac{0,38^2}{0,1} = 1,444 \quad [\Omega]$$

$$L_{f5} = \frac{X_{Cfy}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot n^2} = 1,83 \cdot 10^{-4} \quad [\text{H}]$$

$$C_{f5} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_{Cfy}} = 0,0022 \quad [\text{F}]$$

elde edilir.

7. Harmonik filtresi için:

$$Q_f = 0,085 \quad [\text{MVA}_r]$$

$$X_{Cfy} = \frac{U^2}{Q_f} = \frac{0,38^2}{0,085} = 1,69 \quad [\Omega]$$

$$L_{f7} = \frac{X_{Cfy}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot n^2} = 1,198 \cdot 10^{-4} \quad [H]$$

$$C_{f7} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_{Cfy}} = 0,0022 \quad [F]$$

olarak elde edilir.

Bu filtre elemanlarını örnek sisteme yerleştirdiğimizde her bir harmonik frekansındaki akım ve gerilimler Çizelge 4'teki gibi bulunur.

Çizelge 4 Minimum maliyetli filtrenin akım ve gerilim değerleri

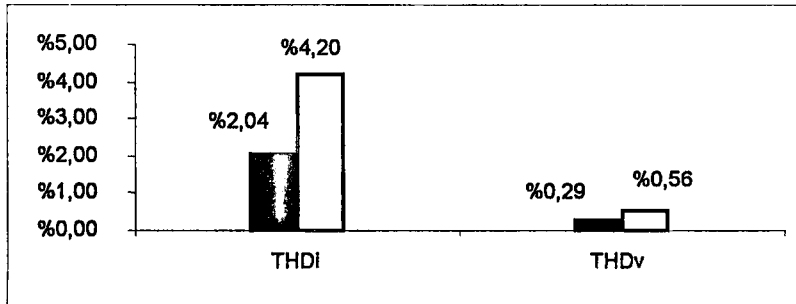
Frekans(Hz)	Inş (A)	I _{r5} (A)	I _{r7} (A)	Unş(V)
250	2.11	51.45	0.65	0.005
350	6.87	2.29	20.83	0.002
550	9.37	1.92	3.70	0.32
650	4.57	0.87	1.54	0.20
850	2.03	0.36	0.59	0.12

Bu çizelgedeki değerleri kullanarak toplam akım ve gerilim harmonik distorsiyonlarını yeniden hesaplırsak ,

$$THD_i = \% 4,2$$

$$THD_v = \% 0,56$$

bulunur.



Şekil 6 Filtreleme işlemi sonucu THD değerleri

Şekil 6'daki gösterimde dolu kısım 0.6 MVar'lık filtre kullanıldığı durumdaki toplam harmonik distorsiyon değerlerini, boş olan kısım ise minimum filtre durumundaki değerleri göstermektedir. Minimum filtreye ait distorsiyon değerleri istenen sınır değerlerin altında olduğundan , 0.1 MVar ve 0.085 MVar'lık kondansatör gruplarının kullanılmasıyla en düşük maliyetli filtre tasarımı gerçekleştirilmiş olur. Klasik filtreleme işlemi sonucu gereken kapasite değeri 5. ve 7. harmonik filtre kolu için 0.0066 [F] iken ekonomik filtre için kapasite değeri 5. harmonik filtre kolu için 0.0022 [F], 7. harmonik filtre kolu için ise 0.00188 [F] olmaktadır. Kullanılacak filtre kolu ekonomik filtre için yaklaşık 3 kat daha az kapasite değerine sahip olmaktadır.

Parasal olarak filtrelere ait ilk tesis maliyetini ve kayıp enerjinin maliyetini hesaplayacak olursak aşağıdaki sonuçları elde ederiz:

Filtrenin ilk tesis maliyetlerinin filtre elemanları için endüktansta 17 DM/kVar kapasitede 14 DM/kVar'lık birim değeri kullanılarak ilk maliyetleri hesaplanmıştır (İnan, 1999). Normal filtrenin ilk maliyetinin ekonomik filtrenin ilk maliyetine oranı 3,15 bulunmuştur. Görüldüğü gibi ekonomik filtre normal filtrenin yaklaşık %30'u kadar bir ilk maliyete sahiptir. Eğer filtreleri kayıp enerji bakımından karşılaştıracak olursak: Aynı çalışma süresinde, normal filtredeki kayıp enerjinin ekonomik filtredeki kayıp enerjiye oranı yine 3,15 olarak bulunmuştur. Bu değerler çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5 Optimum filtre ile normal filtrenin çeşitli oranları

Oranlama	Elde edilen değer
Kapasiteler	$C_{opt}/C \cong 1/3$
İlk tesis maliyetleri	$M_{opt}/M \cong 1/3,15$
Kayıp enerji	$E_{opt}/E \cong 1/3,15$

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

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

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

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

Güç sistemine yerleştirilen filtreler distorsiyonu azaltmanın yanında maliyet bakımından da ekonomik olmalıdırlar. Bu yüzden filtre tasarımında ekonomik filtre göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çalışmada, ekonomik filtre tasarımıyla ilgili olarak Makramın kriteri uygulanmıştır. Makramın kriterine göre tek ayarlı bir filtrede maliyetin hesaplanmasında şu yol izlenmiştir: Temel frekanstaki endüktif ve kapasitif reaktif güçlerin maliyetleri ile harmonik frekanstaki endüktif ve kapasitif reaktif güçlerin maliyetleri toplanmış ve toplam maliyet elde edilmiştir. Elde edilen toplam maliyetin filtre devresinin sağlaması gereken reaktif güce göre türevi alınarak minimum maliyet bulunmuştur. Bu kritere göre distorsiyon istenen sınır değerlerin altına düşürülürken, minimum maliyetli filtre bulunmuş olmaktadır.

Gerçekleştirilen sayısal uygulamada klasik yöntemlerle yapılan pasif filtre elemanları ile ekonomik filtre karşılaştırılmıştır. Buna göre ekonomik filtrede daha az kapasite kullanılarak kayıplar azaltılmıştır.

Bu çalışmada dikkat edilen ikinci önemli bir hususta filtre tasarlanırken filtre devresi ile sistemin rezonansa girmesinin engellenmeye çalışılmasıdır. Filtrenin sistemle rezonansa girmemesi için 0,6 MVar'lık reaktif gücün sağlandığı filtre devresinde, filtrenin ayarlı olduğu harmonik derecesi 7. harmonik filtresi için 6.7'ye 5. harmonik filtresi için de 5'e ayarlanmıştır. Bunun yanında 1 MVar'lık reaktif gücün sağlandığı filtrede ise herhangi bir rezonans durumu söz konusu olmadığı için filtrenin ayarlı olduğu harmonik derecesi 5. harmonik filtresi için 5'e 7. harmonik filtresi için ise 7'ye ayarlanmıştır.

Bu çalışmanın ışığında güç sistemindeki mevcut harmoniklerin eliminasyonu ile ilgili olarak şunlar önerilebilir:

- Nonlineerlik özelliği gösteren elemanların ve özellikle güç elektroniği elemanlarının gün geçtikçe kullanımının artması ve buna bağlı olarak nonsinüsoidal büyüklüklerin şebekede dolaşması sonucu önümüzdeki senelerde harmoniklerin etkisinin daha da artması tabidir. Bu etkilerin giderilmesi veya azaltılması çalışmalarına önem verilmelidir.
- Ulusal elektrik ağıımızda filtre elemanlarının kullanımı yaygın değildir. Sınır harmonik distorsiyon değerlerinin verileceği harmonik standartları ülkemiz için detaylı bir biçimde belirlenmeli ve uygulamasına mutlaka geçilmelidir.
- Filtre tasarımı gerçekleştirilirken güç sistemiyle yerleştirilen filtre elemanı arasında meydana gelebilecek rezonans durumu göz önünde bulundurulmalı ve buna göre tasarım yapılmalıdır. Aksi halde filtre devresi görevini yapamayacağı gibi işletmede arızalara sebep olabilecektir.
- Filtrelerin teknik olumsuzlukları gidermesi yanında ekonomik olumsuzlukları da gidermesi gerekir. Filtre maliyetleri ve filtrenin enerji kaybı bakımından karşımıza çıkan filtrenin ekonomikliği göz ardı edilemeyecek bir etkidir. Filtre tasarımı yapılırken ekonomik filtrenin tasarımı da gerçekleştirilmelidir.

KAYNAKLAR

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Hammond, P.W., (1988), "A harmonic Filter Installation to Reduce Voltage Distortion from Static Power Converters", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No 1

Herrick, P.R., (1980), "Mathematical Models for High Intensity Discharge Lamps", IEEE, Trans. on Industry Applications, Vol. IA-16: 648-654

Heydt, R.C., Grady, W.M., (1984), "Distributed Rectifier Loads in Electric Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS 103, No. 9: 2452-2459.

IEEE Working Group on Power System Harmonics, (1983), "Power Systems: An overview", IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No 8: 2455-2460

İnan, A., (1999) "Lineer Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Kayıpların Yapay Sinir Ağları ile Analizi ve Filtre Maliyetlerinin Kestirimi", Y.T.Ü Doktora Tezi

Kimbark, E.W., (1971), "Direct Current Transmission", Vol. 1, Wiley-Interscience

Laskowski, E.L. ve Donoghue., (1981), "A Model of a Mercury Arc Lamp's Terminal Behavior", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-17: 419-426

Ludbrook, A., (1986), "Harmonic Filters for Notch Reduction", IEEE Transactions on Power Systems, 1043-1047.

Makram, E.B., Subramaniam, E.V., Girgis, A.A. ve Catoe, R., (1993), "Harmonic Filter Design Using Actual Recorded Data", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No 6: 1176-1183.

McCall, J.C., (1985), "Harmonic Simulation of Cycloconverter Operation in a Mine Power System," IAS Annual Meeting, 6-11 October 1985, Toronto.

Mc Granahan, M.F., (1981), "Digital Simulation of Distribution System Frequency-Response Characteristics", IEEE Trans. Power App. Syst. Vol. PAS-100, No 3: 1362-1369

Mc Granahan, M.F., (1984), "Distribution Feeder Harmonic Study Methodology", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-103, No 12: 3663-3671.

Mohan, N., Undeland, T.M ve Robbins, W.P., (1989), Power Electronic, John Wiley & Sons.

Rao, S., (1996), "EHV-AC and HVDC Transmission Engineering and Practice", Khanna Publishers, Delhi.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	06.04.1974	
Doğum yeri	Dortmund	
Lise	1985-1992	İzmir 60. Yıl Anadolu Lisesi
Lisans	1992-1997	İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1998-2000	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Müh. Anabilim Dalı
Çalıştığı Kurum	1998-	YTÜ Elektrik Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi

