



YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

67699

SİNÜSOİDAL OLMAYAN BÜYÜKLÜKLERİ İÇEREN GÜÇ SİSTEMLERİNDE GÜÇ KOMPANZASYONU

Elek. Müh. Abdullah DEMİR

F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Prof. Dr. Hüseyin GARKIR

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Celal KOCATEPE

Prof. Dr. Feri et tin ASCAN

İSTANBUL, 1997

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa No |
|---|----------|
| TÜRKÇE ÖZET..... | IV |
| ABSTRACT..... | V |
| 1.GİRİŞ..... | 1 |
| 2. HARMONİKLERLE İLGİLİ TEMEL BAĞINTILAR..... | 5 |
| 2.1.Nonsinüsoidal Dalgaların Fourier Serisi ile İfade Edilmesi..... | 5 |
| 2.2. Analitik Metotla Fourier Katsayılarının Bulunması..... | 8 |
| 2.3.Grafik Metot ile Fourier Katsayılarının Bulunması..... | 9 |
| 3.GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİK ÜRETEN ELEMANLARIN İNCELENMESİ..... | 18 |
| 3.1. Harmoniklerin Oluşumu.. .. | 18 |
| 3.2. Harmonik Üreten Elemanlar..... | 18 |
| 3.2.1. Generatörler: | 18 |
| 3.2.2. Transformatörler..... | 19 |
| 3.2.3.Ark Kaynakları..... | 21 |
| 3.2.4. Çeviriciler (Konverterler) | 22 |
| 3.2.5. Gaz Deşarjı ile Aydınlatma..... | 22 |
| 3.3. Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Etkileri..... | 23 |
| 4.NONLİNEER DEVRELERDE REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU..... | 24 |
| 4.1.Sinüsoidal Kaynak ve Nonlinear Yüke Sahip Devrelerde Reaktif Güç Kompanzasyonu..... | 24 |
| 4.2.Nonsinüsoidal Kaynak ve Lineer Yüke Sahip Devrelerde Reaktif Güç Kompanzasyonu..... | 28 |
| 4.3.Nonsinüsoidal Kaynak ve Nonlinear Yüke Sahip Devrelerde Reaktif Güç Kompanzasyonu..... | 32 |

| | |
|----------------------------|----|
| 5.SAYISAL UYGULAMALAR..... | 38 |
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 58 |
| KAYNAKLAR..... | 61 |
| EK1..... | 64 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 71 |



ÖZET

Elektrik devrelerinde bulunan elemanlar lineer veya nonlinear karakterdedirler. Pratik bakımdan enerjinin sağlandığı kaynaklar ise genellikle sinüsoidaldir.

Harmonikler genel olarak nonlinear elemanların veya nonsinüsoidal kaynakların varolduğu elektrik devrelerinde meydana gelirler. Harmonik oluşumu sinüsoidal dalganın bozulması olarak ifade edilebilir. Bozulan bu dalgalar fourier analizi yardımıyla, temel frekans ve temel frekans dışındaki diğer frekanslardaki dalga bileşenleri cinsinden ifade edilebilir. Bu analiz sonucunda fonksiyonları yazılamayan ifadelerin matematiksel olarak yazılması mümkün olur. Böylece harmoniklerin analizleri kolaylıkla yapılabilir. Harmonikler güç sistemlerinde ek kayıplar, gerilim düşümleri, rezonans olayları, güç faktörünün azalması vb. gibi olumsuz etkilere neden olurlar.

Bu çalışmada, öncelikle harmonik üreten elemanlar tanıtıldıktan sonra, harmoniklerle ilgili tanımlar ve matematiksel ifadeler verilerek nonlinear devrelerde güç, güç faktörü gibi elektriksel büyüklükler incelenmiştir.

Sayısal uygulama bölümünde, nonlinear devrelerden elde edilen grafiklerin Ek 1'de verilen C dilinde yazılmış bilgisayar programı ile analizleri yapılarak gerekli optimum kapasite değerinin belirlenmesi ile ilgili örnekler verilmiştir.

ABSTRACT

The components of electrical circuits are either linear or nonlinear. The supplies from which energy is obtained are practically sinusoidal.

In general, harmonics occur in electrical circuits where there are nonlinear elements or nonsinusoidal supplies. The harmonics can be stated distortion of sinusoidal waveform. These distorted wave forms can be expressed as a fundamental frequency except for fundamental frequency (harmonics frequency) sinusoidal components by using Fourier Analysis. Thanks to Fourier Analysis these wave forms may be expressed mathematically by summation of sinus wave components of different frequency. Thus, the analysis of harmonic can easily be made. Harmonics cause some undesired effects on power systems such as additional losses, voltage-drops, resonance phenomena.

In this study, first, the elements that produce harmonics have been explained. After giving mathematical expressions and definitions related to the harmonics, electrical expression in the nonlinear circuits such as power factor has been studied.

In the numerical application section, graphics obtained from nonlinear circuit are analysed by using C program given Appendix 1 and examples are given to determine the necessary optimal capacity.

1. BÖLÜM

1. GİRİŞ

Güç sistemindeki harmoniklerin araştırılması yeni bir konu olmayıp, alternatif akımın ortaya çıktığı ilk günlerden itibaren 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 distorsiyonunun azaltılması için "filtrelerin" kullanılması önerilmiştir. Sonraki yıllarda cıva buharlı konverterlerle ilgili distorsiyonu konu alan yayınlara rastlanmaktadır (Rissik, 1935).

II. 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 sistemlerinin 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 eleman olarak davranırlar. Harmonik ürettiklerinden bunların çalışması ve uygulaması da bu çerçeve içinde verilebilir (Gyugyi et al., 1978). Nonlineer aydınlatma elemanları olarak gaz deşarj aydınlatması yapan elemanlarla ilgili çalışmalar floresant lambaların modellenmesi (Waymouth, 1971), cıva ve yüksek basınçlı sodyum lambalarının modellenmesi (Herrick, 1980), cıva ark lambanın elektriki çalışma karakteristiğinin modellenmesi (Laskowski and Donoghue, 1981) şeklinde özetlenebilir. Transformatörlerdeki üç ve üçün katları harmoniklerin geniş araştırması ve 3 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 (Mc Graw-Edison Co., 1980; Szabados and Lee, 1981).

Günümüzde yarı iletken teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak, tristör, triyak, GTO, IGBT gibi yarı iletken güç elektroniği elemanlarının elektrik güç sistemlerinde kullanımı her geçen gün artmaktadır. Yine güç sistemlerinde transformatörler, motor kontrol devreleri, gaz deşarjlı aydınlatma cihazları (örneğin; floresant, neon, cıva buharlı lambalar vb.) vazgeçilmez elemanlardır. Bu elemanlar nonlineer akım-gerilim karakteristiğine sahiptirler. Nonlineer akım-gerilim karakteristikli elemanlar bağlı oldukları devrede akım ve gerilimin dalga şekillerini bozdukları için elektrik güç sistemlerinde nonsinüsoidal dalgaların dolaşmasına neden olurlar. Sistemde akımın ve gerilimin nonsinüsoidal olması, akımın veya gerilimin temel bileşeni yanı sıra temel bileşenin tam katı frekanslara sahip bileşenlerin de ortaya çıkmasına neden olur. Harmonik bileşenler elektrik güç sistemlerinde birçok problemin oluşmasına neden olur. Bu problemlerden bazıları; generatör ve şebeke gerilimlerinin bozulması, gerilim düşümünün artması, kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenmesi, elektrik güç sistemlerindeki elemanlarda ve yüklerde kayıpların artması rezonans olayları, aşırı gerilimler vb. gibi etkilerin meydana gelmesidir. Reaktif güç kompanzasyonu bakımından harmoniklerin oluşturduğu en büyük problemlerden biri de sinüsoidal dalga şeklinin bozulmasıyla güç faktörünün azalmasıdır.

Sinüsoidal gerilimli ve lineer yüke sahip bir devreden çekilen akımın aktif bileşen ve reaktif bileşen olmak üzere iki bileşeni vardır. Bunlardan aktif bileşen bir elektrik makinası yardımıyla ısı, ışık veya mekanik gibi diğer enerji türüne dönüştürülen sonuç olarak bir iş yapan enerjidir. Akımın reaktif bileşeni ise elektrik alan veya magnetik alan oluşturulması amacıyla kullanılır. Yükün aktif gücünün kompleks gücüne oranı "güç faktörü" olarak tanımlanır. Güç faktörü, bir hattın akım taşıma kapasitesinin verimli

kullanılabilirliğinin ölçüsüdür. Güç faktörü ne kadar büyük ise akımın aktif bileşeni de o kadar büyüktür. İdeal olan, hattan çekilen akımının sadece aktif bileşenden meydana gelmesidir, bu ise güç faktörünün bir olması demektir. Tüketiciler için gerekli olan reaktif güç şebeke yerine yük uçlarına paralel bağlı (veya yükün bulunduğu tesisteki bir merkeze yerleştirilmiş) bir kondansatör veya kondansatör gruplarından temin edilebilir. Bu şekilde güç faktörünü bire yaklaştırmak mümkün olabilecektir ki bu işleme “reaktif güç kompanzasyonu” veya “güç katsayısının düzeltilmesi” denilir.

Enerji sistemlerinde harmoniklerin ortaya çıkması istenen bir durum değildir. Ancak çoğu işletmelerde harmoniklerin ortaya çıkması kaçınılmazdır. Bu ise, işletme araçlarını ve tesisleri yükleyerek ek kayıplara ve aşırı ısınmaya sebep olmaktadır. Ayrıca rezonans olaylarına da yol açarak işletmenin devamını imkansız bir duruma getirmektedir. Bu yüzden elektrik işletmelerinde harmoniklerin meydana gelmemesi için, ilk aşama olarak tedbirler düşünülüp ona göre tasarım ve tesis yapılır. Fakat buna rağmen işletmede ortaya çıkan harmonikler için, bunları etkisiz hale getirme işlemi ikinci aşamada yapılır.

Bu tezde nonsinüoidal akımın aktığı çeşitli devrelerde güç kompanzasyonunun yapılması incelenerek kompanzasyon için kullanılacak kapasitenin optimum değerinin tespiti yapılmış olup;

1. Bölümde, harmonik üretimine sebep olan elemanlar, bu elemanlar üzerinde yapılan incelemeler ve harmoniklerle ilgili yapılan çalışmalara ait literatür özeti tarihi bir perspektif içinde verilerek klasik güç kompanzasyonu tanımlanmıştır.
2. Bölümde, harmoniklerle ilgili temel matematiksel bağıntılar verilerek harmonik analizinde kullanılan analitik, grafik ve ölçme yöntemi ile bilgisayar destekli yöntemlerden bahsedilmiş olup elektrik devreleri için harmonikler ile ilgili genel tanımlar verilmiştir. Ayrıca, nonsinüoidal büyüklükler içeren çeşitli devreler incelenerek bunlarla ilgili akım, gerilim ve güç ifadeleri çıkarılmıştır.

3. Bölümde, enerji sisteminde harmonik üreten elemanlar ve bunların sisteme etkinlikleri verilmiştir. Ayrıca harmoniklerin devre elemanları üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.
4. Bölümde, çeşitli nonlineer devreler incelenerek bunlara ait matematiksel ve elektriksel bağıntılar verildikten sonra nonsinüsoidal büyüklükleri içeren devrelerde güç kompanzasyonu için gerekli optimum kapasite değerinin tespit edilmesi ile ilgili bağıntılar ortaya konmuştur.
5. Bölümde; 4. Bölümde ortaya konulan nonlineer devrelerde optimum kapasite değerinin tespit edilmesi ile ilgili bağıntılardan yararlanılarak sayısal uygulamalar yapılmıştır. Bu uygulamalarda nonlineer yükleri içeren çeşitli örnek devreler göz önüne alınarak bu devrelere ait optimum kapasite değerleri tespit edilmiştir.

2.BÖLÜM

2. HARMONİKLERLE İLGİLİ TEMEL BAĞINTILAR

2.1.Nonsinüsoidal Dalgaların Fourier Serisi ile İfade Edilmesi

Sinüsoidal olmayan alternatif akım ve gerilimler bir temel sinüs dalgası ve buna ilaveten çeşitli frekanslardaki(harmonik) sinüs dalga bileşenleri ile ifade edilebilirler.

Bir dalganın periyodik olabilmesi için genlik ve/veya yöndeki değişiklikler düzenli zaman aralıklarında tekrar etmelidir. Ayrıca bu dalga tek değerli ve sınırlı sayıda süreksizlik noktası ile sınırlı olması haricinde sürekli olmalıdır. Böyle bir dalga aşağıdaki sinüs ve cosinüs terimli Fourier Serisi ile tekrar yazılabilir.

$$y = A_0 + (A_1 \sin \alpha + B_1 \cos \alpha) + (A_2 \sin 2\alpha + B_2 \cos 2\alpha) + \dots + (A_n \sin n\alpha + B_n \cos n\alpha) \quad (2.1)$$

Burada ;

A_0 : D.C. Bileşen (sabit bir terim)

A_1, A_2, \dots, A_n ve B_1, B_2, \dots, B_n : Harmonik Bileşenlerin Genlikleri (Maksimum Değerleri)

α : Bağımsız bir değişkeni ifade eden ve dalganın x ekseninde herhangi bir noktadan ölçülmüş bir açı

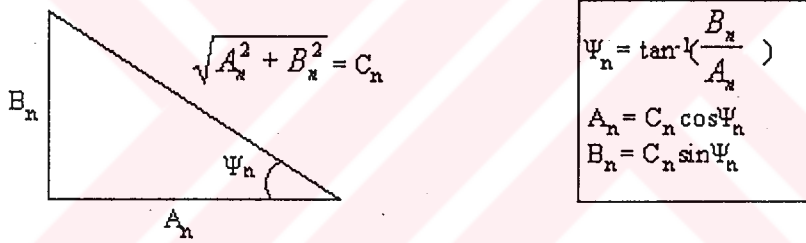
n : Tam sayı (Temel Bileşen için 1, 2. Harmonik için 2, 3. Harmonik için 3 değerlerini alır.)

Dalgada D.C. Bileşen yoksa A_0 sıfıra eşit olur. Ayrıca her bir nonsinüsoidal dalganın pozitif ve negatif yarıları tamamıyla aynı ise çift harmonikler ($n = 2, 4, 6, 8 \dots$)

olmayacaktır. Bundan dolayı dalga eşitliği sinüs ve cosinüs terimlerin temel bir seti ile bir veya daha fazla tek harmonikli terimler ile $[(A_3 \sin 3\alpha + B_3 \cos 3\alpha) \text{ ve } (A_5 \sin 5\alpha + B_5 \cos 5\alpha)]$ ifade edilebilecektir.

İlk olarak Fransız matematikçi Joseph Fourier tarafından ileri sürülen nonsinüsoidal bir dalga için genel ifade, kesin olarak sınırsız bir seridir, çünkü bu eşitlik bir dalgayı yalnız sınırsız sayıda terim içerdiği zaman ifade edebilir.

Her bir harmonik bileşeni için Fourier Serisi sinüs ve cosinüslü terimleri içerdiği için seri kendisi sadece sinüs terimlerinin bulunduğu bazı basitleştirmelere uyar. Bu tip bir matematiksel dönüşüm her hangi bir n. harmoniğin A_n ve B_n büyüklüklerinin, birbirleriyle 90° faz farkı bulunan sinüs ve cosinüs fonksiyonlarıyla ilişkili olması avantajından yararlanılarak yapılabilir. Bu Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Bir nonsinüsoidal dalgadaki harmonik bileşenin sinüs ve cosinüs terimlerinin büyüklükleri arasındaki üçgen ilişkisi

A_n ve B_n katsayıları bundan dolayı Şekil 2.1’deki gibi bir dik üçgenin köşeleri olarak ifade edilebilir. Böylece ;

$$A_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \cos \Psi_n \quad \text{ve} \quad B_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \sin \Psi_n \quad \Psi_n = \tan^{-1} \frac{B_n}{A_n} \quad (2.2)$$

Denklem 2.1'deki n. harmonik için olan A_n ve B_n yerine yukarıdaki eşitlikleri koyup düzenleme yaparsak :

$$A_n \sin n\alpha + B_n \cos n\alpha = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} (\sin\alpha \cdot \cos\Psi_n + \cos\alpha \cdot \sin\Psi_n) \quad (2.3)$$

elde edilir.

$$(\sin\alpha \cdot \cos\Psi_n + \cos\alpha \cdot \sin\Psi_n) = \sin(n\alpha + \Psi_n) \quad (2.4)$$

olduğunu gözönüne alırsak sonuçta ;

$$A_n \sin n\alpha + B_n \cos n\alpha = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \sin(n\alpha + \Psi_n) \quad (2.5)$$

olur. $\sqrt{A_n^2 + B_n^2}$ köklü ifadesini C ile değiştirerek denklem (2.1) 'de yerine yazılırsa

$$y = A_0 + C_1 \sin(\alpha + \Psi_1) + C_2 \sin(2\alpha + \Psi_2) + \dots + C_n \sin(n\alpha + \Psi_n) \quad (2.6)$$

ifadesi elde edilir.

Örnek 1 :

$v = (96 \sin\alpha - 72 \cos\alpha) + (-15.4 \sin 3\alpha - 12.8 \cos 3\alpha) + (-4.5 \sin 5\alpha - 6 \cos 5\alpha)$ olarak verilen nonsinüsoidal gerilim dalgasını yalnız sinüslü terimler cinsinden ifade edelim.

Çözüm:

$$C_1 = \sqrt{(96)^2 + (-72)^2} = 120$$

$$\Psi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{-72}{96} \right) = -36.9$$

$$C_3 = \sqrt{(-15.4)^2 + (12.8)^2} = 20$$

$$\Psi_3 = \tan^{-1} \left(\frac{12.8}{-15.4} \right) = 140.3^\circ$$

$$C_5 = \sqrt{(-4.5)^2 + (-6)^2} = 7.5$$

$$\Psi_5 = \tan^{-1} \left(\frac{-6}{-4.5} \right) = 233.1^\circ$$

Böylece v ifadesini aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$v = 120 \sin(\alpha - 36.9^\circ) + 20 \sin(3\alpha + 140.3^\circ) + 7.5 \sin(5\alpha + 233.1^\circ)$$

2.2. Analitik Metotla Fourier Katsayılarının Bulunması

Denklem 2.1 'deki terimlerin katsayıları analitik, grafik yada ölçme yöntemleriyle bulunabilir. Analitik yöntem kullanıldığında, söz konusu terimler

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin ntdt \quad (2.7)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos ntdt$$

eşitlikleriyle hesaplanabilir.

Periyodik fonksiyonun Fourier bileşenleri, fonksiyonun dalga şekline bağlıdır; böylelikle dalga analizi sonunda bazı bileşenler bulunabileceği gibi bazıları da bulunmayabilir.

Verilen fonksiyon çift fonksiyon ($f(t) = f(-t)$) ise bu halde eğride düşey eksene göre simetri vardır. Böyle fonksiyonlarda $A_n = 0$ ($n=0$) olur sadece cosinüslü terimler bulunur. Fourier bileşenleri şöyle ifade edilir:

$$f(t) = A_0 + B_1 \cos t + B_2 \cos 2t + \dots + B_n \cos nt \quad (2.8)$$

Göz önüne alınan fonksiyonda $f(-t) = -f(t)$ ise tek fonksiyondur. Buna tek simetrik fonksiyon denir. Fourier serisinde $B_n = 0$ olur ve seri sadece sinüslü terimlerden meydana gelir. Fonksiyon aşağıdaki biçimde yazılabilir:

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin t + A_2 \sin 2t + \dots + A_n \sin nt \quad (2.9)$$

Eğer fonksiyonda $f(t) = -f(t+\pi)$ eşitliği varsa, yani yarım periyot sağa veya sola π kadar kaydırıldığında t eksenine göre simetrikse, açılımda A_n ve B_n ' nin sadece tek sayılı terimleri bulunur. Böylece açılım

$$f(t) = A_1 \sin t + A_3 \sin 3t + \dots + B_1 \cos t + B_3 \cos 3t + \dots \quad (2.10)$$

şeklini alır.

2.3. Grafik Metot ile Fourier Katsayılarının Bulunması

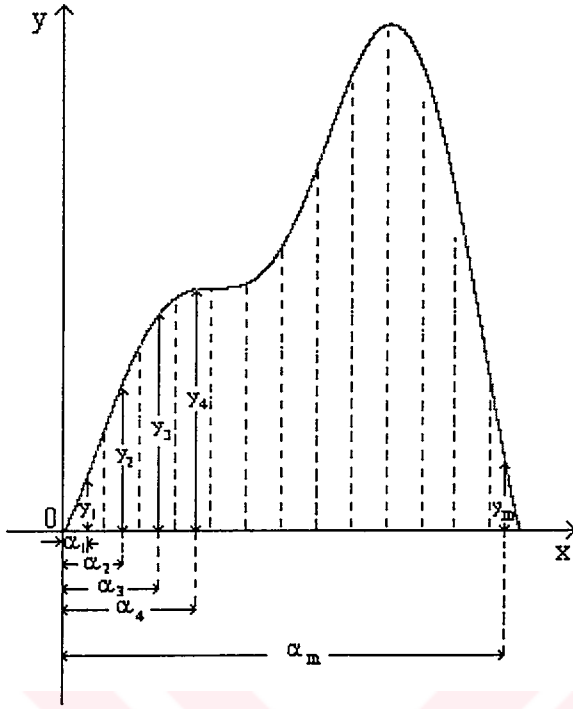
Genellikle cihazların osilografik kayıtları çoğu zaman alınır. Böylece cihazlara ait akım ve gerilim şekilleri üzerinde yorum yapmak mümkün olur. Ayrıca devrelerin ve makinelerin nonsinüsoidal dalgaların bulunduğu koşullarda çalıştığının pratik analizleri de yapılır. 2.1. denklemindeki $A_0, A_1, A_2, B_0, B_1, B_2$ gibi katsayıların belirlenmesini içeren bir dalga analizini yapmak gerekir.

Fourier denklemindeki katsayıların belirlenmesinde sıklıkla kullanılan bir metot dalgayı eşit aralıklı dikey parçalara bölmek ve her birinin ortalama ordinatlarını ölçmektir. Daha sonra ölçülmüş değerlerle ilgili sinüs ve cosinüs fonksiyonlarının toplamını içeren iki denklemi kullanmaktır. Grafikselleştirilmesinde sonucun iyi derecede doğruluğa sahip olması için çok fazla sayıda ordinat tahmin edilmeli ve bu tahminler büyük bir dikkatle yapılmalıdır. Ayrıca basit dahi olsa uzun hesaplamaları kolaylaştırmak için, temel bileşen ve harmonik bileşenler için değerleri düzenli bir şekilde tablo haline getirmek gerekir. Bunlar ileride bir örnekle açıklanacaktır. Nonsinüsoidal dalga simetrikse yani aynı pozitif ve negatif yarı dalgalara sahipse sadece bir yarı dalga değişimini analiz etmek ve temel bileşenler ile tek harmonikler için hesaplamalar yapmak gerekecektir.

Şekil 2.1.'de x eksenini boyunca elektriksel derece olarak $180/m$ aralıkla m adet dikey parçaya bölünmüş bir simetrik nonsinüsoidal dalganın pozitif yarı dalgasını göstermektedir. Birbirini takip eden bölümlerin ortalama ordinatları orijinden sırasıyla $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ açılarındaki $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ değerlerine sahiptir. Temel bileşen için Fourier eşitlikleri; aşağıdaki denklemleri kullanarak belirlenebilir.

$$A_1 = \frac{2}{m} (y_1 \sin \alpha_1 + y_2 \sin \alpha_2 + \dots + y_m \sin \alpha_m) \quad (2.11)$$

$$B_1 = \frac{2}{m} (y_1 \cos \alpha_1 + y_2 \cos \alpha_2 + \dots + y_m \cos \alpha_m)$$



Şekil 2.1. Grafik Metotla Fourier Analizinin Yapılması

Bu denklemleri

$$A_1 = \frac{2}{m} \sum (y \sin \alpha) \quad (2.12)$$

$$B_1 = \frac{2}{m} \sum (y \cos \alpha) \quad (2.13)$$

olarak daha basit bir şekilde ifade edebiliriz. Aynı şekilde 3.harmonik için

$$A_3 = \frac{2}{m} \sum (y \sin 3\alpha) \quad (2.14)$$

$$B_3 = \frac{2}{m} \sum (y \cos 3\alpha) \quad (2.15)$$

n. harmonik için :

$$A_n = \frac{2}{m} \sum (y \sin n\alpha) \quad (2.16)$$

$$B_n = \frac{2}{m} \sum (y \cos n\alpha) \quad (2.17)$$

şeklinde yazılabilir.

İstenilen doğruluk derecesine göre bölünme sayısı belirlenip düzgün bir şekilde bölme işlemi yapıldıktan sonra herhangi bir harmonik için sinüs veya cosinüs terimlerinin katsayılarının belirlenmesi için aşağıda gösterilen yol izlenir:

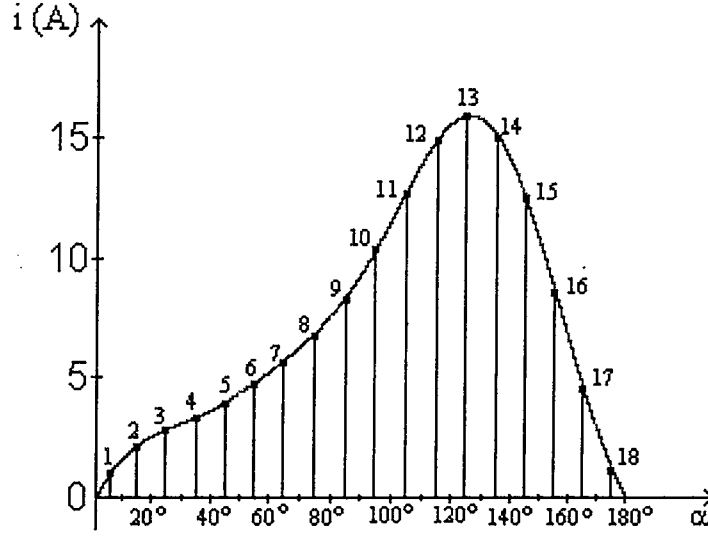
1. Orjinden dikey olarak bölünmüş kısımların orta noktalarına kadar ölçülen açıları birinci kolona yazılır.
2. Sinüs ve cosinüs işlemleri yardımıyla $\sin n\alpha$ ve $\cos n\alpha$ nın değerleri her bir açı için bulunur. Burada işaretlerin doğru olup olmadığına dikkat edilmelidir.
3. Bölünen parçaların orta noktalarına karşılık gelen y değerlerini ölçüp açıların yanına yazılır.
4. Sinüs terimlerinin katsayısı olan A_n 'i bulmak için $y \sin n\alpha$ çarpımını yazmak için bir kolon daha yapılır.
5. Aynı şekilde B_n 'i bulmak için $y \cdot \cos n\alpha$ çarpımlarını bulunur ve bir kolon daha yapılır.
6. Bulunan $y \cdot \sin n\alpha$ ve $y \cdot \cos n\alpha$ çarpımlarını cebirsel olarak toplanır.
7. Verilen eşitlikler kullanılarak gerekli değerler bulunur.

Bunu daha iyi açıklayabilmek için bir örnek verelim.

Örnek 2:

Tipik bir simetrik nonsinüsoidal akım olan transformatör uyarma akımının pozitif yarı dalgası Şekil 2.2.'de gösterilmiştir. Bu dalgayı grafik metot ile analiz edelim.

Çözüm:



Şekil 2.2. Analizi yapılan dalga

TABLO 1 $f(\alpha)$ DEĞERLERİ

| α | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|----|------|------|------|-----|-----|-----|
| I | 1.3 | 2.4 | 3.1 | 3.7 | 4.4 | 5.2 | 6.1 | 7.3 | 9.3 | 11.5 | 13.6 | 15 | 15.5 | 14.4 | 11.7 | 6.6 | 2.8 | 0.5 |

Böyle bir dalga çok güçlü bir temel bileşen üzerine eklenmiş oldukça bir baskın üçüncü harmonik ve zayıf bir beşinci harmoniğe sahiptir. 5. harmonikten sonraki harmonikler fazla etkili değildir ve bu analizde göz önüne alınmayacaktır.

Yukarıda verilen işlem sırasını izleyerek fourier katsayıları için tablo ve hesaplamalar yapılır. Daha sonra dalganın eşitliği sinüs ve cosinüslü terimlerden oluşan bir fonksiyon olarak ifade edilir. Daha önceki bilgilerimizden bu dalganın çift harmonik içermediğini, yani sadece sinüs terimlerinin bulunacağını kolaylıkla söyleyebiliriz.

TABLO 2 TEMEL BİLEŞEN İÇİN YAPILAN HESAPLAMALAR

| α (Derece) | $\sin\alpha$ | $\cos\alpha$ | y | y($\sin\alpha$) | y($\cos\alpha$) |
|--------------------|--------------|--------------|------|-------------------|-------------------|
| 10 | 0.1736 | 0.9848 | 1.3 | 0.226 | 1.280 |
| 20 | 0.3420 | 0.9397 | 2.4 | 0.821 | 2.555 |
| 30 | 0.5000 | 0.8660 | 3.1 | 1.550 | 2.680 |
| 40 | 0.6428 | 0.7660 | 3.7 | 2.380 | 2.840 |
| 50 | 0.7660 | 0.6428 | 4.4 | 3.370 | 2.830 |
| 60 | 0.8660 | 0.5000 | 5.2 | 4.510 | 2.600 |
| 70 | 0.9397 | 0.3420 | 6.1 | 5.720 | 2.090 |
| 80 | 0.9848 | 0.1736 | 7.3 | 7.190 | 1.268 |
| 90 | 1.0000 | 0.0000 | 9.3 | 9.300 | 0.000 |
| 100 | 0.9848 | -0.1736 | 11.5 | 11.310 | -1.995 |
| 110 | 0.9307 | -0.3420 | 13.6 | 12.760 | -4.650 |
| 120 | 0.8660 | -0.5000 | 15.0 | 15.000 | -7.500 |
| 130 | 0.7660 | -0.6428 | 15.5 | 11.880 | -9.960 |
| 140 | 0.6428 | -0.7660 | 14.4 | 9.250 | -11.030 |
| 150 | 0.5000 | -0.8660 | 11.7 | 5.850 | -10.130 |
| 160 | 0.3420 | -0.9397 | 6.6 | 2.260 | -6.200 |
| 170 | 0.1736 | -0.9848 | 2.8 | 0.485 | -2.755 |
| 180 | 0.0000 | -1.0000 | 0.5 | 0.000 | -0.500 |
| TOPLAM | | | | 103.862 | -36.877 |

$$A_1 = \frac{2}{18} * 103.862 = 11.54$$

$$B_1 = \frac{2}{18} * (-36.877) = -4.10$$

TABLO 3 3. HARMONİK İÇİN YAPILAN HESAPLAMALAR

| α (Derece) | 3α | $\sin 3\alpha$ | $\cos 3\alpha$ | y | $y(\sin 3\alpha)$ | $y(\cos 3\alpha)$ |
|--------------------|-----------|----------------|----------------|------|-------------------|-------------------|
| 10 | 30 | 0.500 | 0.866 | 1.3 | 0.65 | 1.13 |
| 20 | 60 | 0.866 | 0.500 | 2.4 | 2.08 | 1.20 |
| 30 | 90 | 1.000 | 0.000 | 3.1 | 3.10 | 0.00 |
| 40 | 120 | 0.866 | -0.500 | 3.7 | 3.20 | -1.85 |
| 50 | 150 | 0.500 | -0.866 | 4.4 | 2.20 | -3.81 |
| 60 | 180 | 0.000 | -1.000 | 5.2 | 0.00 | -5.20 |
| 70 | 210 | -0.500 | -0.866 | 6.1 | -3.05 | -3.28 |
| 80 | 240 | -0.866 | -0.500 | 7.3 | -6.32 | -3.65 |
| 90 | 270 | -1.000 | 0.000 | 9.3 | -9.30 | 0.00 |
| 100 | 300 | -0.866 | 0.500 | 11.5 | -10.00 | 6.75 |
| 110 | 330 | -0.500 | 0.866 | 13.6 | -6.80 | 11.78 |
| 120 | 360 | 0.000 | 1.000 | 15.0 | 0.00 | 15.00 |
| 130 | 390 | 0.500 | 0.866 | 15.5 | 7.75 | 13.40 |
| 140 | 420 | 0.866 | 0.500 | 14.4 | 12.50 | 7.20 |
| 150 | 450 | 1.000 | 0.000 | 11.7 | 11.70 | 0.00 |
| 160 | 480 | 0.866 | -0.500 | 6.6 | 5.72 | -3.30 |
| 170 | 510 | 0.500 | -0.866 | 2.8 | 1.40 | -2.43 |
| 180 | 540 | 0.000 | -1.000 | 0.5 | 0.00 | -0.50 |
| TOPLAM | | | | | 14.83 | 30.44 |

$$A_3 = \frac{2}{18} * 14.83 = 1.65$$

$$B_3 = \frac{2}{18} * 30.44 = 3.38$$

TABLO 4 5. HARMONİK İÇİN YAPILAN HESAPLAMALAR

| α (Derece) | 5α | $\sin 5\alpha$ | $\cos 5\alpha$ | y | $y(\sin 5\alpha)$ | $y(\cos 5\alpha)$ |
|--------------------|-----------|----------------|----------------|------|-------------------|-------------------|
| 10 | 50 | 0.766 | 0.643 | 1.3 | 1.00 | 0.81 |
| 20 | 100 | 0.985 | -0.174 | 2.4 | 2.36 | -0.42 |
| 30 | 150 | 0.500 | -0.866 | 3.1 | 1.55 | -2.68 |
| 40 | 200 | -0.342 | -0.940 | 3.7 | -1.26 | -3.17 |
| 50 | 250 | -0.940 | -0.342 | 4.4 | -4.13 | -1.50 |
| 60 | 300 | -0.866 | 0.500 | 5.2 | -4.50 | 2.60 |
| 70 | 350 | -0.174 | 0.985 | 6.1 | -1.06 | 6.00 |
| 80 | 400 | 0.643 | 0.766 | 7.3 | 4.70 | 5.59 |
| 90 | 450 | 1.000 | 0.000 | 9.3 | 9.30 | 0.00 |
| 100 | 500 | 0.643 | -0.766 | 11.5 | 7.40 | -8.82 |
| 110 | 550 | -0.174 | -0.985 | 13.6 | -2.36 | -13.40 |
| 120 | 600 | -0.866 | -0.500 | 15.0 | -13.00 | -7.30 |
| 130 | 650 | -0.940 | -0.342 | 15.5 | -14.55 | 5.30 |
| 140 | 700 | -0.342 | 0.940 | 14.4 | -4.92 | 13.50 |
| 150 | 750 | 0.500 | 0.866 | 11.7 | 5.85 | 10.14 |
| 160 | 800 | 0.985 | 0.174 | 6.6 | 6.50 | 1.15 |
| 170 | 850 | 0.766 | -0.643 | 2.8 | 2.15 | -1.58 |
| 180 | 900 | 0.000 | -1.000 | 0.5 | 0.00 | -0.50 |
| TOPLAM | | | | | -4.97 | 5.25 |

$$A_5 = \frac{2}{18} * (-4.97) = -0.55$$

$$B_5 = \frac{2}{18} * 5.25 = 0.58$$

Bu dalga için ordinat akım olduğu için Fourier Eşitliği ;

$$i = 11.54 \sin \alpha - 4.10 \cos \alpha + 1.65 \sin 3\alpha + 3.38 \cos 3\alpha - 0.55 \sin 5\alpha + 0.58 \cos 5\alpha \text{ olur.}$$

Bu eşitliği daha çok istenilen denklem 2.1 'deki formda edebilmek için I_1 , I_2 , I_3 akımlarının büyüklükleri ve Ψ_1 , Ψ_2 , Ψ_3 açıları belirlenmelidir. Bunlar;

$$I_1 = \sqrt{(11.54)^2 + (-4.1)^2} = 12.25$$

$$\Psi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{-4.1}{11.54} \right) = -19.5^\circ$$

$$I_3 = \sqrt{(1.65)^2 + (3.38)^2} = 3.76$$

$$\Psi_3 = \tan^{-1} \left(\frac{-3.38}{1.65} \right) = 64^\circ$$

$$I_5 = \sqrt{(-0.55)^2 + (0.58)^2} = 0.80$$

$$\Psi_5 = \tan^{-1} \left(\frac{0.58}{-0.55} \right) = 133.5^\circ$$

Böylece akım eşitliği

$$i = 12.25 \sin(\alpha - 19.5^\circ) + 3.76 \sin(3\alpha + 64^\circ) + 0.80 \sin(5\alpha + 133.5^\circ).$$

şeklinde elde edilir.

3. BÖLÜM

3.GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİK ÜRETEN ELEMANLARIN İNCELENMESİ

3.1.Harmoniklerin Oluşumu

Arızasız bir işletmede harmonikler çeşitli sebeplerle ortaya çıkarlar. Bunların başında magnetik ve elektrik devrelerindeki lineersizlik gelir. Magnetik devrelerde doyma, elektrik devrelerin ark ve güç elektroniğinde sinüs eğrisinin kesilmesi, lineer olmayan olaylardır. Örneğin generatör, transformatör, motor ve bobin gibi demir çekirdek içeren cihazlar, doymanın baş göstermesi ile harmonikli akımlar üretirler. Ark fırınları ve kaynak makinalarındaki gibi, normal işletmeleri gereği bir arkın oluşması sonucunda da harmonikler oluşur. Yine doğrultucular ve tristörler sinüsoidal akım dalgasını keserken harmonikler üretirler. Böylece başlangıçta saf sinüsoidal olan gerilimin dalga şekli bozulur. Normal çalışma şartlarının dışında yüksek gerilim hatlarındaki korona olayları, iki fazlı kısa devreler ve arklı kısa devreler de harmoniklerin meydana gelmesine sebep olurlar (Bayram, 1985).

3.2. Harmonik Üreten Elemanlar

3.2.1.Generatörler:

En doğal harmonik üreticileri generatörlerdir. Dönen makinalar, makina hızının ve endüvi oluk sayısının fonksiyonu olan akım harmonikleri üretir (Arrillaga et al., 1985) Fakat oluk şekli, sargı yapısı, uyarma sargısı ve kutuplar gibi hususlarda uygun konstrüktif tedbirler alınarak ve generatörü amortisman sargısı ile donatarak gerilim eğrisinin sinüsoidal olması sağlanır. Bunun için generatörler önemli bir harmonik üreticisi sayılmazlar. Alman VDE yönetmenliğine göre senkron generatörlerde endüklenen gerilim sinüs şeklinden farklı olması halinde, akımın herhangi bir andaki değeri ile aynı anda sinüs şeklindeki temel harmoniğin değeri arasındaki farkın, temel

dalganın tepe değeri ile oranı % 5 'den küçük ise, bu akım pratik olarak sinüsoidal kabul edilir (Bayram, 1985).

3.2.2. Transformatörler

Enerji sistemlerinde demir çekirdeği bulunan bobinler harmoniklere yol açar (Dommel et al., 1986) tabiidir ki bunların başında güç sistemlerindeki en önemli eleman olan transformatörler gelir. Bunların harmonik üretme özelliği, demir çekirdeğin mıknatıslama karakteristiğinin lineer olmayışından, yani transformatörün doymasından kaynaklanmaktadır. 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 nüveyi daha çok doymaya ve harmonik akımları seviyesinin hızla artmasına sebep olabilir (Szabados and Lee, 1981).

$V(t)=V_m \cdot \sin \omega t$ biçiminde sinüsoidal şebeke geriliminin uygulanması halinde uyarma akısı olarak $\phi = \phi_m \cdot \cos \omega t$ şeklinde yine sinüsoidal bir akı üretecektir.

Kararlı çalışma durumunda magnetik endüksiyon bir sinüs fonksiyonu olup histerisiz ihmal edilirse, mıknatıslama eğrisi n dereceli bir polinom ile ifade edilebilir. Bu eğri 0 noktasına göre simetrik olduğundan, mıknatıslama akımı $n=1,3,5,7,9,\dots$ dereceden sinüsoidlerin toplamı şeklinde ifade edilebilir.

Mıknatıslanma akımı harmonikleri günün erken saatlerinde en yüksek seviyeye ulaşır, çünkü sistem yükü az olup, gerilim yükselerek aşırı uyarma meydana gelir, aşırı uyarımayla oluşan akım harmoniklerinde 3., 5. ve 7. harmonikler etkili olur (Arrillaga et al., 1985). Akım şiddeti bakımından en önemli harmonik 3. harmoniktir. 3'ncü ve 3'ün katları harmonikler arasında 360 derecenin tam katları kadar faz farkı olduğundan hepsi aynı fazdadır.

Transformatörlerde uyarma gerilimi kesildiğinde transformatör saçlarında bir artık akı yoğunluğu kalabilir, gerilim yeniden uygulandığında bu akı yoğunluğu sebebiyle transformatörün aşırı doyma değerlerine sürülmesine ve mıknatıslama akımının değerinin 5-10 kat değerine yükselerek bir darbe akımı meydana gelmesine neden olur. Bu darbe akımı primer sargı direncine bağlı olarak sönümlenir. Büyük transformatörlerde primer direncinin küçük olması sebebiyle sönümleme süresi çok daha uzundur (Arrillaga et al., 1985).

Harmonik akımları transformatörün primer reaktansı, hattın reaktansı ve generatörünün kaçak reaktansı üzerinden geçerek harmonikli gerilim düşümü meydana getirir; generatörde sinüs şeklinde emk üretildiği halde çıkış uçlarındaki gerilimin şekli bozulabilir.

Mıknatıslama akımındaki harmoniklerin şebekeye geçip geçmemesi şu koşullara bağlıdır (Kocatepe, 1995) :

- Transformatörün bağlantı grubu,
- Primerin yıldız bağlı olması halinde, yıldız noktasının şebekenin nötrüne bağlı olup olmaması
- Transformatördeki magnetik devrenin geometrik yapısı.
- Transformatörün Yıldız/Yıldız bağlı olması halinde

a) Primer yıldız noktası nötre bağlı ise: Her faz sargısından geçen 3 ve 3'ün katları harmonik akımları nötrde toplanarak 3 katı akımın geçmesine sebep olur. Diğer harmonikler (5,7,11,13 v.b. gibi) yıldız noktasında sifira eşit olurlar. Böyle transformatörlerde akılar ve her bir faz sargısında endüklenen gerilim sinüs şeklindedir.

b) Primer yıldız noktası nötre bağlı değilse: Mıknatıslama akımının 3 ve 3'ün katları olan harmonikleri yıldız noktasından dışarı çıkamazlar ve mıknatıslama akımı 3'üncü harmoniksiz (tepesi basık) bir akı oluşturur.

- Yıldız/Üçgen bağlı transformatör:

a) Eğer primer yıldız noktası nötre bağlanmışsa yukarıda (a) bölümündeki gibi olur.

b) Eğer yıldız noktası nötre bağlanmamışsa 3. ve 3'ün katı akı harmonikleri üçgen sargıda 3 ve 3'ün katı frekanslı sirkülasyon akımların geçmesine sebep olur, bu akımlar kendisini endükleyen akıya zıt etkileyerek bunları söndürürler.

- Primeri üçgen bağlı transformatörler:

Faz sargılarında mıknatıslama akımında 3., 9., 15. vb. harmonikler meydana geldiklerinden şebekeden çekilen mıknatıslama akımında 1., 5., 7. vb gibi harmonikler çekilir. Magnetik akı 3., 9., 15. vb gibi harmonikleri içermez.

Transformatörler nasıl bağlanırsa bağlansın, primer şebekenin nötrüne bağlansın ya da bağlanmasın, çekirdek tipi nasıl olursa olsun şebekeden 1., 5., 7., 11., 13. gibi harmonikli mıknatıslama akımları daima çekilir.

3.2.3. Ark Kaynakları

Ark, akım ve gerilim arasında doğrusal olmayan bir bağıntının bulunduğu fiziksel bir olaydır. Ark devreleri deşarj prensibi ile çalıştığından şebekeden sinüsoidal olmayan akım çekerler. Ark fırını, floresant lamba, cıva ve sodyum buharlı aydınlatma armatürleri bunların başlıcalarıdır.

Ark fırınlarındaki ateşleyici elektrotların özellikleri ve ark akım-gerilim karakteristikleri bu işletmelerde harmonik oluşumlarının nedenidir (Arrillaga et al., 1985). Bunlar geçici yükler olup harmonik çalışmaları için kolayca modellenemezler. Tipik bir ark fırınında 2,3,...,9 mertebesinde akım harmonikleri bulunur; maksimum harmonik temel bileşenin % 30'u kadardır (Sundberg, 1976).

Aydınlatma amacı ile kullandığımız floresant lambalar, cıva veya sodyum buharlı lambalar ise, genellikle tek dereceli harmonikler üretirler.

3.2.4. Çeviriciler (Konverterler)

Transformatörlerden sonra ana harmonik kaynağı günümüzde hat komütasyonlu konverterlerdir. DC iletim sistemleri, akü ve fotovoltaik sistemler hat komütasyonlu konverterler üzerinden beslenirler.

Harmoniklerin üretilmesi, akımın periyodik olarak kesilmesi esasına dayanır. p tristörlü bir çeviricinin meydana getireceği akım harmoniklerinin mertebesi

$$n=k.p \pm 1 \quad k=1,2,3,\dots \quad (3.2)$$

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

Harmonik akımı $I_n=I_1.(u_n/n)$ olup $u_n=1$ 'den küçük bir katsayıdır; çeviricilerin kumandasına bağlı olarak çeşitli harmonik değerlerinde farklı değerler alır. Komütasyon süresi ihmal edilirse $u_n=1$ alınabilir. Buna göre $I_n=I_1/n$ elde edilir. Harmonik akımın efektif değeri harmonik mertebesi ile ters orantılıdır. p darbe sayısı ile harmonik akımın mertebesi artırılarak harmonik akımının efektif değeri azaltılır.

3.1.5. Gaz Deşarjı ile Aydınlatma

Gaz deşarjı aydınlatması örneğin floresant, cıva 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. Floresant 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).

3.3. Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Etkileri

Enerji sistemlerinde harmoniklerle gerilim ve akım dalga şekillerinin bozulması (distorsiyon) çok çeşitli problemlere yol açmaktadır. Bunlar maddeler halinde şöyle verilebilir:

Gerilim düşümünün artması ve fliker olayları

Elektrik makinalarının aşırı ısınması

Generatör ve şebeke geriliminin bozulması

Enerji iletim hatlarının aşırı yüklenmesi

Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenme ve dielektrik zorlanma nedeniyle zarar görmesi

Enerji sistemindeki elemanlarda ve yüklerde kayıpların artması

Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler

Şebekede rezonans olayları, rezonansın neden olduğu aşırı gerilimler ve akımlar

Koruma ve kontrol düzenlerinde sinyal hataları

İzolasyon malzemesinin delinmesi

Elektrik cihazlarının ömürlerinin azalması

Haberleşme sistemlerinde parazitlerin meydana gelmesi

Bu etkinliklerin teknik ve ekonomik yönden en olumsuz sonuçlara yol açanları, kayıplardaki artış ve sistem ölçü cihazları üzerindeki hata paylarının artması şeklinde özetlemek mümkündür. Bunlardan birincisi omik direnç içeren tüm tesis elemanları üzerinde ek harmonik kayıplara yol açmaktadır (Emanuel and Wang, 1985; Hwang et al., 1987; Hwang et al., 1988; Forrest, 1991; Meliopoulos and Martin, 1992). İkincisi ise ölçü ve kayıp cihazlarındaki istenmeyen hata miktarlarının oluşması, bir başka deyişle kayıt/ölçüm hatalarının artmasıdır (Stratford, 1980; Goldberg and Horton, 1987; Fuchs et al., 1986; Fuchs et al., 1987a, 1987b; Filipiski and Labaj, 1992; Makram et al., 1992).

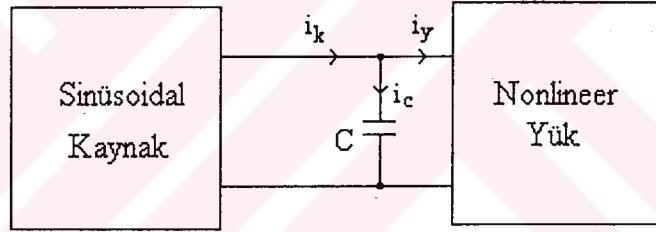
4.BÖLÜM

4.NONLİNEER DEVRELERDE REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU

4.1.Sinüsoidal Kaynak ve Nonlineer Yüke Sahip Devrelerde Reaktif Güç Kompanzasyonu

Herhangi bir devrede besleme kaynağının sinüsoidal olması ve bu kaynaktan beslenen yükün nonlineer olması durumunda devredeki (Şekil 4.1) büyüklüklerin analizi ve bu devrenin reaktif güç kompanzasyonunun nasıl yapılacağını inceleyelim.

Şekil 4.1 'de görüldüğü gibi endüktif karakterdeki yükün kompanzasyonunu sağlayacak C kapasitesinin nonlineer yükün uçlarına paralel olarak bağlandığını farz edelim.



Şekil 4.1 Sinüsoidal kaynak ve nonlineer yüke sahip bir devrenin şönt kompanzasyonu

Burada kaynak geriliminin ani değerini

$$v = V_m \cdot \sin \omega t \quad (4.1)$$

ile ifade edebiliriz. Kondansatörün ani akımı ise

$$i_c = \frac{V_m}{X_c} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$i_C = \sqrt{2} \cdot V \cdot \omega \cdot C \cdot \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (4.2)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada V_m , gerilimin maksimum değerini, V gerilimin efektif değerini belirtmektedir. X_c ise şönt olarak bağlanan kondansatörün kapasitif reaktansıdır. Kirşof'un akımlar kanununun uygulanmasıyla kaynak akımının değeri kolayca bulunabilir.

$$i_k = i_Y + i_C \quad (4.3)$$

Yükün nonlineer olması sebebiyle yük akımında harmonik bileşenlerin bulunması söz konusu olup burada i_Y ile gösterilen yük akımının ani değeri aşağıdaki gibi verilebilir:

$$i_Y = \sqrt{2} I_{Y1} \sin(\omega t - \Psi_{Y1}) + \sqrt{2} \cdot \sum_2^h I_{Yh} \sin(h\omega t + \Psi_{Yh}) \quad (4.4)$$

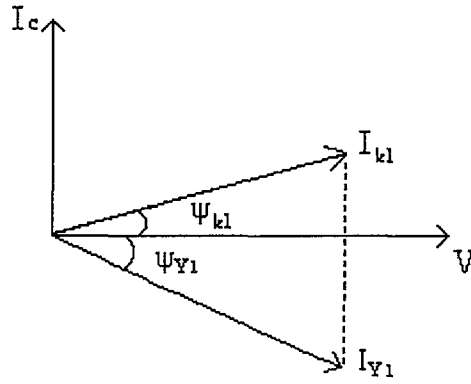
Burada ilk terim temel bileşen akımını, ikinci terim ise toplam harmonik akımlarını göstermektedir. I_{Y1} , yük akımının temel bileşen efektif değerini I_{Yh} ise harmonik bileşenlerin efektif değerini göstermektedir. Denklem 4.2 ve denklem 4.4 'ü kullanılarak kaynak akımı i_k 'nin ifadesi

$$i_k = \sqrt{2} I_{k1} \sin(\omega t + \Psi_{k1}) + \sqrt{2} \cdot \sum_2^h I_{Yh} \sin(h\omega t + \Psi_{Yh}) \quad (4.5)$$

ile bulunur. Efektif değerlerin kullanılması halinde kaynak akımının efektif değeri

$$I_k^2 = I_{k1}^2 + \sum_2^h I_{Yh}^2 \quad (4.6)$$

ile belirlenebilir. Yukarıda verilen denklemlerden devreye ait fazör diyagramı Şekil 4.2'deki gibi çizilebilir.



Şekil 4.2. Şönt kompanzasyona ait devrenin fazör diyagramı

Şekil 4.2 'deki fazör diyagramının kullanılması ile kaynak akımının temel bileşeninin efektif değeri için

$$I_{k1} = \sqrt{V^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2 + I_{Y1}^2} - 2 \cdot V \cdot \omega \cdot C \cdot I_{Y1} \cdot \sin \Psi_{Y1} \quad (4.7)$$

yazılabilir. Sinüsoidal bir kaynaktan beslenen nonlinear bir devrede nonlinear yüke yapılan güç transferi (nonlinear yükün aktif gücü) akımın ve gerilimin temel bileşeni tarafından iletilmektedir. Kaynak tarafından verilen gücün tamamen yüke verildiği , yani iletimde herhangi bir kaybın olmadığı düşünüldüğünde aktif güç şu şekilde ifade edilebilir.

$$P_k = P_Y = V \cdot I_{Y1} \cdot \cos \Psi_{Y1} = V \cdot I_{k1} \cdot \cos \Psi_{k1} \quad (4.8)$$

Güç faktörü ise

$$\cos \Psi = \frac{P_k}{S_k} = \frac{P_k}{V \cdot I_k} \quad (4.9)$$

dır. Buna göre

$$\cos \Psi = \frac{I_{Y1} \cdot \cos \Psi_{Y1}}{\sqrt{V^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2 + I_{Y1}^2 - 2 \cdot V \cdot I_{Y1} \cdot \omega \cdot C \cdot \sin \Psi_{Y1} + \sum_2^h I_{Yh}^2}} \quad (4.10)$$

dır. $\cos \Psi$ 'nin maksimum olabilmesi için güç kompanzasyonunda kullanacağımız kondansatörün değerini hesaplamak isteyelim. Bunun için

$$\frac{d(\cos \Psi)}{dC} = 0 \quad (4.11)$$

ifadesini çözmemiz ve buradan bir C değeri bulmamız gerekir. Elde edilen C değeri yani en büyük güç faktörünü sağlayan şönt kapasite

$$C_k = \frac{I_{Y1} \cdot \sin \Psi_{Y1}}{\omega \cdot V} \quad (4.12)$$

dır. Bu değer denklem 4.10 'da yerine konursa güç faktörünün en büyük değeri

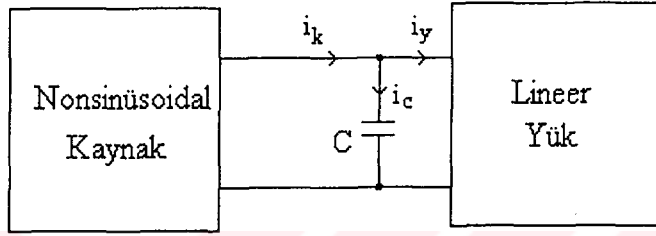
$$\cos \Psi_{\max} = \frac{I_{Y1} \cdot \cos \Psi_{Y1}}{\sqrt{I_{Y1}^2 \cdot \cos^2 \Psi_{Y1} + \sum_2^h I_{Yh}^2}} \quad (4.13)$$

$$\cos \Psi_{\max} = \frac{P_k}{\sqrt{P_k^2 + D_k^2}} \quad (4.14)$$

olarak bulunmuş olur.

4.2. Nonsinüsoidal Kaynak ve Lineer Yüke Sahip Devrelerde Reaktif Güç Kompanzasyonu

Herhangi bir devrede besleme kaynağının nonsinüsoidal olması ve bu kaynaktan beslenen yükün lineer (ve endüktif) karakterde olması halinde devrenin (Şekil 4.3) reaktif güç kompanzasyonunu inceleyelim.



Şekil 4.3. Nonsinüsoidal kaynak ve lineer yüke sahip bir devrenin şönt kompanzasyonu

Şekil 4.3 'de görüldüğü gibi C kapasitesinin periyodik nonsinüsoidal bir gerilim kaynağına paralel olarak bağlandığını ve yük olarak da direnç ve endüktansdan oluştuğunu kabul edelim.

Burada nonsinüsoidal kaynak geriliminin ani değerini

$$v = \sqrt{2} \sum_1^h V_h \cdot \sin(h \cdot \omega \cdot t + \alpha_h) \quad (4.15)$$

ile ifade edebiliriz. Böyle bir gerilimin oluşturduğu yük akımı gerilimde bulunan bütün harmonik bileşenlerini içerir. Dolayısıyla yük akımı

$$i_Y = \sqrt{2} \cdot \sum_1^h I_{Yh} \cdot \sin(h \cdot \omega \cdot t + \alpha_h - \Psi_{Yh}) \quad (4.16)$$

şeklinde ifade edilebilir. Reaktif güç kompanzasyonu için bağlanan kondansatörün ani akımı ise

$$i_C = \sqrt{2} \cdot \sum_1^h V_h \cdot h \cdot \omega \cdot C \sin(h \cdot \omega \cdot t + \alpha_h + \frac{\pi}{2}) \quad (4.17)$$

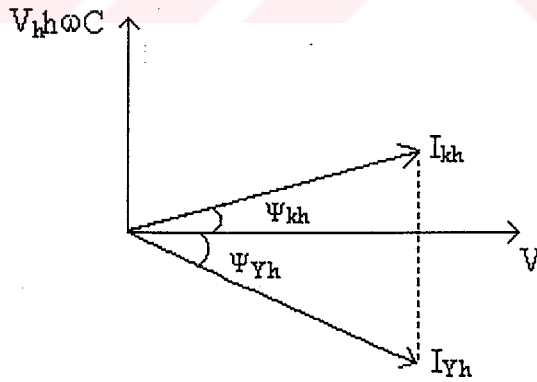
ile tanımlanabilir. Kirşof 'un akımlar kanunundan kaynak akımı

$$i_k = i_Y + i_C \quad (4.18)$$

ile bulunur. Denklem 4.15 ve 4.17 denklem 4.18 'de yerine konularak i_k 'nın ifadesi

$$i_k = \sqrt{2} \cdot \sum_1^h \left[I_{Yh} \cdot \sin(h \cdot \omega \cdot t + \alpha_h - \Psi_{Yh}) + V_h \cdot h \cdot \omega \cdot C \cdot \sin(h \cdot \omega \cdot t + \alpha_h + \frac{\pi}{2}) \right] \quad (4.19)$$

olarak bulunur. Yukarıda verilen denklemlerden fazör diyagramı Şekil 4.4 'deki gibi çizilebilir.



Şekil 4.4. Şönt kompanzasyona ait devrenin fazör diyagramı

Şekil 4.4 'deki fazör diyagramının kullanılmasıyla kaynak akımının h . harmoniği için

$$I_{kh}^2 = (V \cdot h \cdot \omega \cdot C)^2 + I_{Yh}^2 - 2 \cdot V \cdot h \cdot \omega \cdot C \cdot I_{Yh} \cdot \sin \Psi_{Yh} \quad (4.20)$$

yazılabilir. Kaynak akımının efektif değeri ile gerilim değeri sırasıyla şöyle hesaplanabilir.

$$I_k^2 = \sum_1^h I_{kn}^2 \quad (4.21)$$

$$V = \sum_1^h V_h^2 \quad (4.22)$$

Denklem 4.21 ve denklem 4.22 'yi kullanarak görünür güç ifadesini şu şekilde

$$S_k^2 = V^2 \cdot I_k^2 = \left(\sum_1^h V_h^2 \right) \left(\sum_1^h I_{kn}^2 \right) \quad (4.23)$$

bulabiliriz. Buradan güç faktörü

$$\cos \Psi = \frac{P}{S} \quad (4.24a)$$

$$= \frac{\sum_1^h V_h \cdot I_{Yh} \cdot \cos \Psi_{Yh}}{\sqrt{\left(\sum_1^h V_h^2 \right) \left(\sum_1^h I_{kh}^2 \right)}} \quad (4.24b)$$

ile tanımlanır. Denklem 4.24b 'deki güç faktörünün maksimum olabilmesi için gereken kapasite değeri için

$$\frac{d(\cos \Psi)}{dC} = 0 \quad (4.25)$$

eşitliğinin çözülmesi gerekir. Bu çözümden elde edilen kapasite değeri

$$C_s = \frac{\sum_1^h V_h \cdot I_{Yh} \cdot h \cdot \sin \Psi_{Yh}}{\omega \cdot \sum_1^h V_h^2 \cdot h^2} \quad (4.26)$$

dir. Bu değer denklem 4.20 ve denklem 4.24b' de yerine konursa kaynak akımının (I_k) minimum değeri ve güç faktörünün en büyük değeri şu şekilde elde edilir.

$$I_{kmin}^2 = \sum_1^h \left[\left(\frac{V_h \cdot h \cdot \sum_1^h V_h \cdot h \cdot I_{Yh} \cdot h \cdot \sin \Psi_{Yh}}{\sum_1^h V_h^2 \cdot h^2} - I_{Yh} \cdot \sin \Psi_{Yh} \right)^2 + I_{Yh}^2 \cdot \cos^2 \Psi_{Yh} \right] \quad (4.27)$$

Denklem 4.27, denklem 4.23 'de yerine konursa S gücü minimum olur. Böylece

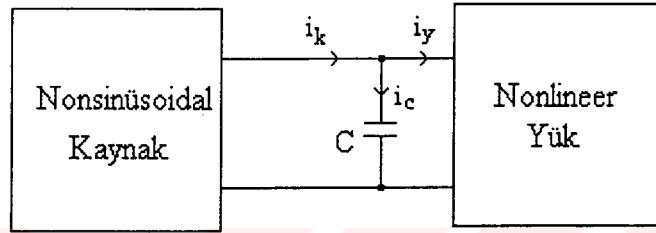
$$\cos \Psi_{max} = \frac{P}{S_{min}} \quad (4.28)$$

$$= \frac{\sum_1^h V_h \cdot I_{Yh} \cdot \cos \Psi_{Yh}}{\sqrt{\sum_1^h V_h^2 \cdot \left\{ \sum_1^h \left[\left(\frac{V_h \cdot h \cdot \sum_1^h V_h \cdot h \cdot I_{Yh} \cdot h \cdot \sin \Psi_{Yh}}{\sum_1^h V_h^2 \cdot h^2} - I_{Yh} \cdot \sin \Psi_{Yh} \right)^2 + I_{Yh}^2 \cdot \cos^2 \Psi_{Yh} \right] \right\}}} \quad (4.29)$$

şeklinde elde edilir.

4.3. Nonsinüsoidal Kaynak ve Nonlinear Yüke Sahip Devrelerde Reaktif Güç Kompanzasyonu

Besleme kaynağının nonsinüsoidal olduğu ve yükün (yükün endüktif karakterde olması hali için) nonlinear olduğu herhangi bir devre (Şekil 4.5) için reaktif güç kompanzasyonunda kullanılacak kapasite değerini araştıralım.



Şekil 4.5 Nonsinüsoidal kaynak ve nonlinear yüke sahip bir devrenin şönt kompanzasyonu

Şekil 4.5 'de görüldüğü gibi reaktif güç kompanzasyonunda kullanılacak kondansatörün C kapasitesi periyodik nonsinüsoidal bir gerilim kaynağına paralel olarak bağlanmış olsun. Burada nonsinüsoidal kaynak geriliminin ani değerini

$$v = \sqrt{2} \left[\sum_1^{h1} V_{h1} \cdot \sin(h_1 \cdot \omega \cdot t + \alpha_{h1}) + \sum_1^{h2} V_{h2} \cdot \sin(h_2 \cdot \omega \cdot t + \alpha_{h2}) \right] \quad (4.30)$$

ile ifade edebiliriz. Bu gerilimin efektif değeri ise

$$V^2 = \sum_1^{h1} V_{h1}^2 + \sum_1^{h2} V_{h2}^2 \quad (4.31)$$

dir. Kondansatör akımının ve yük akımının ani değerleri sırasıyla

$$i_C = \sqrt{2} \left[\sum_1^{h1} V_{h1} \cdot h_1 \cdot \omega \cdot C \cdot \sin(h_1 \cdot \omega t + \alpha_{h1} + \frac{\pi}{2}) + \sum_1^{h2} V_{h2} \cdot h_2 \cdot \omega \cdot C \cdot \sin(h_2 \cdot \omega t + \alpha_{h2} + \frac{\pi}{2}) \right] \quad (4.32)$$

$$i_Y = \sqrt{2} \left[\sum_1^{h1} I_{Yh1} \cdot \sin(h_1 \cdot \omega t + \alpha_{h1} - \Psi_{Yh1}) + \sum_1^{h3} I_{Yh3} \cdot \sin(h_3 \cdot \omega t + \alpha_{h3} - \Psi_{Yh3}) \right]$$

ile ifade edilebilir. Bu akımların efektif değerleri ise

$$I_C^2 = \sum_1^{h1} (V_{h1} \cdot h_1 \cdot \omega \cdot C)^2 + \sum_1^{h2} (V_{h2} \cdot h_2 \cdot \omega \cdot C)^2 \quad (4.33)$$

$$I_Y^2 = \sum_1^{h1} I_{Yh1}^2 + \sum_1^{h3} I_{Yh3}^2 \quad (4.34)$$

ile ifade edilebilir. Burada h_1 , h_2 ve h_3 bileşenleri farklı frekans dizilerini yani harmonik dizilerini belirtmektedir. h_1 , harmonik dizileri ile hem gerilim hem de yük akımında ortak olarak bulunan harmonik bileşenlerini gösterir. h_2 , sadece gerilimde bulunan harmonik bileşenlerini gösterir. h_3 , ise sadece yük akımında bulunan harmonik bileşenlerini gösterir. Şekil 4.5 'daki devrede Kirşof'un akımlar kanununun uygulanmasıyla kaynak akımı

$$i_k = i_C + i_Y \quad (4.35)$$

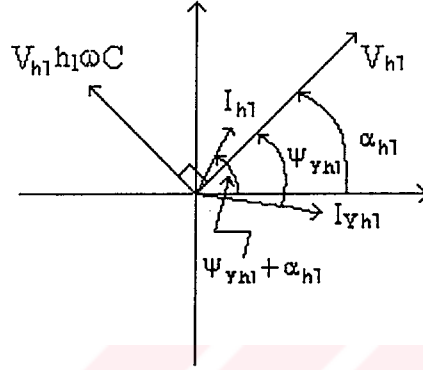
dır. Denklem 4.33 ve 4.34 , denklem 4.35 'de yerine yazılırsa kaynak akımının ani değerini aşağıdaki gibi elde ederiz.

$$i_k = \sqrt{2} \left[\sum_1^{h1} V_{h1} \cdot h_1 \cdot \omega \cdot C \cdot \sin(h_1 \cdot \omega t + \alpha_{h1} + \frac{\pi}{2}) + I_{Yh1} \cdot \sin(h_1 \cdot \omega t + \alpha_{h1} - \Psi_{Yh1}) \right] \quad (4.36)$$

Burada kaynak akımının temel bileşeni

$$i_{k1} = \sqrt{2} \cdot \sum_1^{h1} I_{h1} \cdot \sin(h_1 \cdot \omega \cdot t + \alpha_h + \Psi_{h1}) \quad (4.37)$$

şeklinde elde edilebilir. Yukarıda verilen denklemlerden fazör diyagramını çizecek olursak, Şekil.4.6'daki diyagram elde edilir.



Şekil 4.6. Şönt kompanzasyona ait devrenin fazör diyagramı

Şekil 4.6 'deki fazör diyagramının kullanılmasıyla ,

$$I_{h1}^2 = (V_{h1} \cdot h_1 \cdot \omega \cdot C)^2 + I_{Yh1}^2 - 2 \cdot V_{h1} \cdot h_1 \cdot \omega \cdot C \cdot I_{Yh1} \cdot \sin \Psi_{Yh1} \quad (4.38)$$

yazılabilir. Nonlineer bir devrede kaynak akımının efektif değeri

$$I_k^2 = \sum_1^{h1} I_{h1}^2 + \sum_1^{h2} (V_{h2} \cdot h_2 \cdot \omega \cdot C)^2 + \sum_1^{h3} I_{Yh3}^2 \quad (4.39)$$

ile ifade edilebilir. Buradan devrenin aktif , reaktif ve görünür güç ifadesi sırasıyla şu şekilde tanımlanabilir:

$$P_k = \sum_1^{h1} V_{h1} \cdot I_{Yh1} \cdot \cos \Psi_{Yh1} \quad (4.40)$$

$$Q_k = \sum_1^{h1} V_{h1} \cdot I_{h1} \cdot \sin \Psi_{Yh1} \quad (4.41)$$

$$\begin{aligned} S_k^2 &= V^2 \cdot I_k^2 \\ &= \sum_1^{h1} V_{h1}^2 \cdot \sum_1^{h1} I_{h1}^2 + \sum_1^{h2} V_{h2}^2 \cdot \sum_1^{h2} (V_{h2} \cdot h_2 \cdot \omega \cdot C)^2 + \sum_1^{h1} V_{h1}^2 \cdot \sum_1^{h2} (V_{h2} \cdot h_2 \cdot \omega \cdot C)^2 \\ &\quad + \sum_1^{h1} V_{h1}^2 \cdot \sum_1^{h3} I_{Yh3}^2 + \sum_1^{h2} V_{h2}^2 \cdot \sum_1^{h1} I_{h1}^2 + \sum_1^{h2} V_{h2}^2 \cdot \sum_1^{h3} I_{Yh3}^2 \end{aligned} \quad (4.42)$$

Yine fazör diyagramından elde edilen ifadelerden

$$\begin{aligned} S_k^2 &= V^2 \cdot I_k^2 \\ &= \left(\sum_1^{h1} V_{h1}^2 + \sum_1^{h2} V_{h2}^2 \right) \left(\sum_1^{h1} (V_{h1}^2 h_1^2 \omega^2 C^2 + I_{Yh1}^2 - 2V_{h1} I_{Yh1} h_1 \omega C \sin \Psi_{Yh1}) \right. \\ &\quad \left. + \sum_1^{h2} (V_{h2} h_2 \omega C)^2 + \sum_1^{h3} I_{Yh3}^2 \right) \end{aligned} \quad (4.43)$$

elde edilir. Buradan güç faktörünü yazacak olursak

$$\begin{aligned} \cos \Psi &= \frac{P_k}{S_k} \\ &= \frac{P_k}{V \cdot I_k} \end{aligned} \quad (4.44)$$

ile tanımlanır. Denklem 4.44 'deki güç faktörünün maksimum olabilmesi için birinci türevinin sifira eşitlenmesiyle elde edilen

$$\frac{d(\cos \Psi)}{dC} = \frac{d(S_k)}{dC} = \frac{dI_k}{dC} = 0 \quad (4.45)$$

denkleminin çözümünden güç faktörünü en büyük değere getiren kapasite değeri

$$C_s = \frac{\sum_1^{h1} V_{h1} \cdot I_{Yh1} \cdot h_1 \cdot \sin \Psi_{Yh1}}{\omega \cdot \sum_1^{h1} V_{h1}^2 \cdot h_1^2 \cdot \sum_1^{h2} V_{h2}^2 \cdot h_2^2} \quad (4.46)$$

olarak bulunur. Bu değer denklem 4.39 ve denklem 4.43 'de yerine konursa kaynak akımı ile görünür gücün minimum değeri sırası ile

$$I_{kmin}^2 = \sum_1^{h1} (V_{h1}^2 h_1^2 \omega^2 C_s^2 + I_{Yh1}^2 - 2V_{h1} I_{Yh1} h_1 \omega C_s \sin \Psi_{Yh1}) + \sum_1^{h2} (V_{h2} h_2 \omega C_s)^2 + \sum_1^{h3} I_{Yh3}^2 \quad (4.47)$$

$$S_{kmin}^2 = V^2 \cdot I_{kmin}^2 = \left(\sum_1^{h1} V_{h1}^2 + \sum_1^{h2} V_{h2}^2 \right) \left(\sum_1^{h1} (V_{h1}^2 h_1^2 \omega^2 C_s^2 + I_{Yh1}^2 - 2V_{h1} I_{Yh1} h_1 \omega C_s \sin \Psi_{Yh1}) + \sum_1^{h2} (V_{h2} h_2 \omega C_s)^2 + \sum_1^{h3} I_{Yh3}^2 \right) \quad (4.48)$$

şeklinde elde edilir. Denklem 4.48, denklem 4.44 'de yerine konursa güç faktörünün en büyük değeri

$$\cos \Psi_{max} = \frac{\sum_1^{h1} V_{h1} \cdot I_{h1} \cdot \cos \Psi_{Yh1}}{S_{kmin}} \quad (4.49a)$$

$$\cos \Psi_{\max} = \frac{\sum_1^{h1} V_{h1} \cdot I_{Yh1} \cdot \cos \Psi_{Yh1}}{\sqrt{\left(\sum_1^{h1} V_{h1}^2 + \sum_1^{h2} V_{h2}^2 \right) \cdot I_{k \min}^2}} \quad (4.49b)$$

şeklinde elde edilmiş olur.



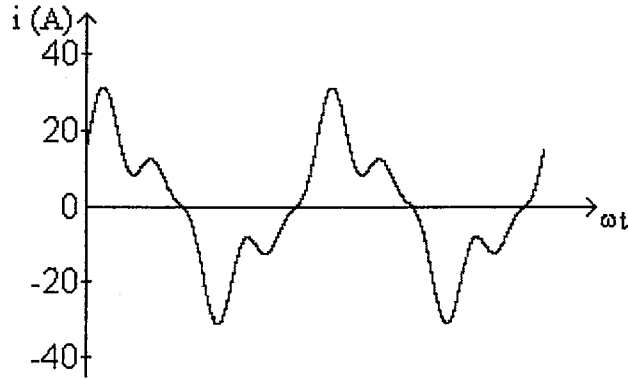
5.BÖLÜM

5. SAYISAL UYGULAMALAR

Bu bölümde nonsinüsoidal büyüklüklerin bulunduğu devreler üzerinde sayısal uygulamalar yapılmıştır. Nonsinüsoidal büyüklükleri içeren, sinüsoidal beslemeli nonlinear devreler, nonsinüsoidal beslemeli lineer devreler ve nonsinüsoidal beslemeli nonlinear devreler üzerinde güç kompanzasyonu için analizler yapılarak bu devrelere ait aktif, reaktif ve görünür güçler tespit edilmiştir. Her bir devre için, güç kompanzasyonu için gereken optimum kapasite değeri hesaplanmış ve kapasitenin değişmesiyle güç faktörünün değişimi grafiğe aktarılmıştır.

UYGULAMA 1:

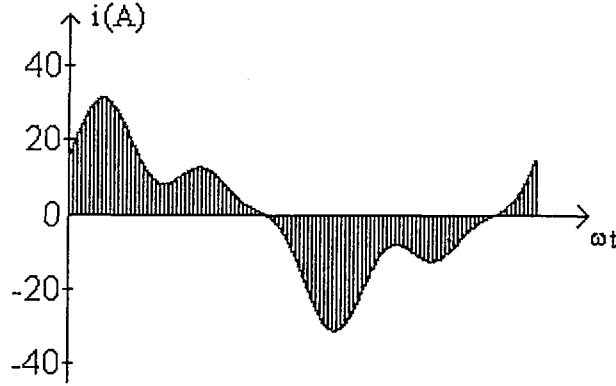
Şekil 4.1' de verilen devrede yük akımının osiloskop ile ölçülmesi sonucu dalga şeklinin Şekil 5.1 'deki gibi olduğu görülmüştür. Buna göre devrenin görünür gücünü, reaktif gücünü ve aktif gücünü bularak , güç faktörünü maksimum yapan kapasite değerini bulalım.



Şekil 5.1. Yük akımının osiloskoptan elde edilen dalga şekli

Çözüm:

Şekil 5.1 'de verilen dalganın fourier analizini Bölüm 2.3 'de bahsedilen grafik metot yardımıyla yapalım. Bunun için Şekil 5.2 'de verilen dalga üzerinden elde edilen $f(x)$ değerlerini Ek 1 'de verilen bilgisayar programı yardımıyla fourier analizine açalım.



Şekil 5.2. $f(x)$ değerlerinin tespit edilmesi

Bu analizin sonucunda yük akımının fourier analizine açılmış hali

$$i = \sqrt{2} [14,64 \cdot \sin(\omega t + 45) + 5,48 \cdot \sin(3\omega t + 30) + 3,233 \sin(5\omega t + 45)]$$

olarak bulunur. Akımın efektif değeri ise

$$\begin{aligned} |I| &= \sqrt{14,64^2 + 5,48^2 + 3,233^2} \\ &= 15,9521 \text{ A} \end{aligned}$$

dir. Buradan aktif güç, reaktif güç, distorsiyon gücü ve görünür güç sırasıyla

$$\begin{aligned} P &= V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \Psi_1 \\ &= 220 \cdot 14,64 \cdot \cos 45 \\ &= 2277,449 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q &= V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \Psi_1 \\
 &= 220 \cdot 14,64 \cdot \cos 45 \\
 &= 2277,449 \text{ VAr}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D &= \sqrt{V^2 \cdot (I_3^2 + I_5^2)} \\
 D &= \sqrt{220^2 \cdot (5,48^2 + 3,233^2)} \\
 &= 1399,437
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S &= V \cdot I \\
 &= 220 \cdot 15,9521 \\
 &= 3511,69 \text{ VA}
 \end{aligned}$$

olarak hesaplanır. Buradan güç faktörü

$$\begin{aligned}
 \cos \Psi &= \frac{P}{S} \\
 &= \frac{2277,449}{3511,69} \\
 &= 0,648
 \end{aligned}$$

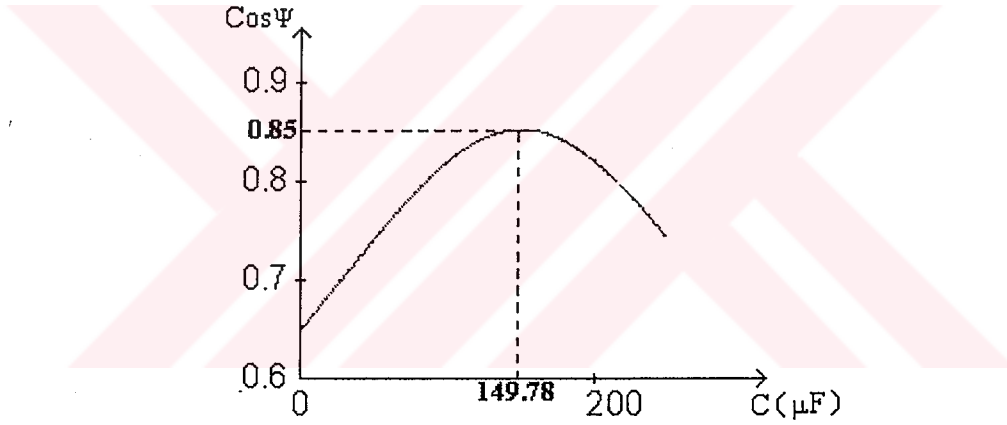
olarak bulunur. $\cos \Psi$ 'nin maksimum olabilmesi için gereken kapasite değeri ise Denklem 4.12' den

$$\begin{aligned}
 C_k &= \frac{I_{Y1} \cdot \sin \Psi_{Y1}}{\omega \cdot V} \\
 &= \frac{14,64 \cdot \sin 45}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 220} \\
 &= 149,78 \mu\text{F}
 \end{aligned}$$

olur. C_k 'nın devreye girmesiyle devredeki reaktif güç sıfır olacağından devrede yeni oluşan güç faktörünün yeni değeri maksimum olacaktır. Bu değeri ise

$$\begin{aligned}\cos\Psi_{\max} &= \frac{P}{\sqrt{P^2 + D^2}} \\ &= \frac{2277,449}{\sqrt{2277,449^2 + 1399,437^2}} \\ &= 0,852\end{aligned}$$

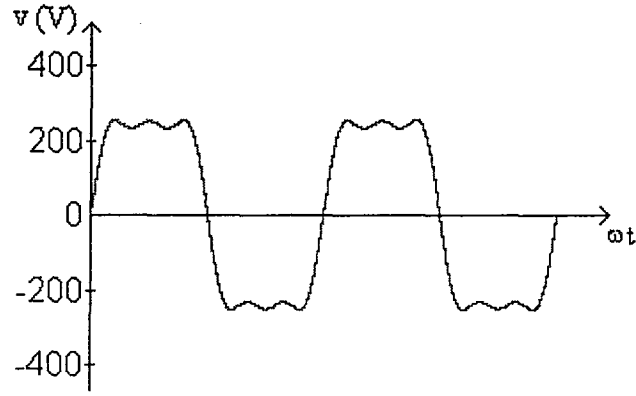
olarak elde edilir. Şekil 5.3 'de çeşitli kapasite değerlerinde güç faktörünün nasıl değiştiği görülmektedir.



Şekil 5.3. Yüke şönt olarak bağlanan kapasite değerine göre güç faktörünün değişimi

UYGULAMA 2:

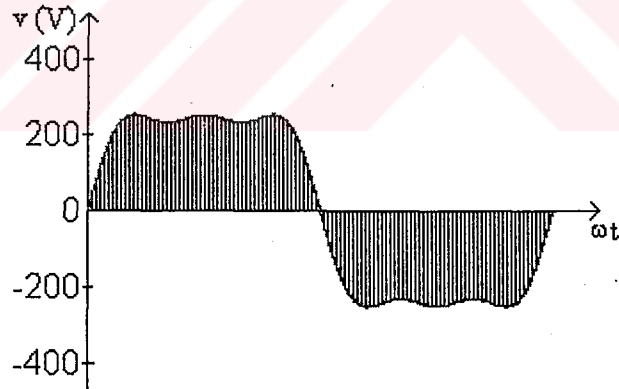
Şekil 4.3' de verilen bir devrede $X= 8\Omega$ ve $R= 5\Omega$ dur. Gerilim kaynağının osiloskop ile ölçülmesi sonucu dalga şeklinin Şekil 5.4' deki gibi olduğu görülmüştür. Buna göre devrenin görünür gücünü, reaktif gücünü ve aktif gücünü tespit ederek güç faktörünü maksimum yapan kapasite değerini bulalım.



Şekil 5.4. Kaynak geriliminin osiloskoptan elde edilen dalga şekli

Çözüm:

Şekil 5.4 'de verilen dalganın fourier analizini Bölüm 2.3' de bahsedilen grafik metot yardımı ile yapalım. Bunun için dalga üzerinden elde edilen $f(x)$ değerlerini Ek 1'de verilen bilgisayar programı yardımıyla fourier analizine açalım. Bu analizin sonucunda gerilim kaynağının fourier analizine açılmış hali



Şekil 5.5. $f(x)$ değerlerinin tespit edilmesi

$$v(t) = \sqrt{2} (212,24 \sin \omega t + 56,82 \sin 3\omega t + 21,93 \sin 5\omega t)$$

olarak bulunur. Bu gerilim kaynağının efektif değeri ise

$$|V| = \sqrt{212,24^2 + 56,82^2 + 21,93^2}$$

$$= 220,8059 \text{ V}$$

dır. Buradan her bir harmonik için empedans değerlerini hesaplayabiliriz. Buna göre,

$$Z_1 = R + j X_1$$

$$= 5 + j8 \ \Omega$$

$$|Z_1| = 9,4339 \Omega$$

$$\Psi_1 = \arctan \frac{X_1}{R}$$

$$= \arctan \frac{8}{5}$$

$$\Psi_1 = 57,99^\circ$$

$$X_3 = 3 \cdot X_1$$

$$= 3 \cdot 8$$

$$= 24 \ \Omega$$

$$Z_3 = R + j X_3$$

$$= 5 + j 24 \ \Omega$$

$$|Z_3| = 24,5153 \ \Omega$$

$$\Psi_3 = \arctan \frac{X_3}{R}$$

$$= \arctan \frac{24}{5}$$

$$\Psi_3 = 78,231^\circ$$

$$X_5 = 5 \cdot X_1$$

$$= 5 \cdot 8$$

$$= 40 \ \Omega$$

$$Z_5 = R + j X_5 = 5 + j 40 \ \Omega$$

$$|Z_5| = 40,311 \quad \Omega$$

$$\begin{aligned} \Psi_5 &= \arctan \frac{X_5}{R} \\ &= \arctan \frac{40}{5} \end{aligned}$$

$$\Psi_5 = 82,87^\circ$$

olarak hesaplanır. Buradan devreden akacak akımları bulalım,

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{V_1}{Z_1} \\ &= \frac{212,24}{9,4339} \\ &= 22,497 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_3 &= \frac{V_3}{Z_3} \\ &= \frac{56,82}{24,5153} \\ &= 2,3177 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_5 &= \frac{V_5}{Z_5} \\ &= \frac{21,93}{40,311} \\ &= 0,554 \text{ A} \end{aligned}$$

Bulunan bu değerler zaman domeninde yazılırsa akımın ani değeri için

$$i(t) = \sqrt{2} \left[22,497 \cdot \sin(\omega \cdot t - 57,99) + 2,3177 \cdot \sin(3\omega t - 78,231) + 0,554 \cdot \sin(5\omega t - 82,87) \right]$$

yazılabilir. Akımın efektif değeri ise

$$|I| = \sqrt{22,497^2 + 2,3177^2 + 0,554^2}$$

$$= 22,62 \text{ A}$$

olarak hesaplanır. Buradan devrenin görünür gücünü ve aktif gücünü sırasıyla bulalım.

$$S^2 = V^2 \cdot I^2$$

$$= 220,8059^2 \cdot 22,62^2$$

$$= 24,95 \cdot 10^6 \text{ (V.A)}^2$$

$$P = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\Psi_1 + V_3 \cdot I_3 \cdot \cos\Psi_3 + V_5 \cdot I_5 \cdot \cos\Psi_5$$

$$= 212,24 \cdot 22,497 \cdot \cos 57,99 + 56,82 \cdot 2,3177 \cdot \cos 78,231 + 21,93 \cdot 0,554 \cdot \cos 82,87$$

$$= 2559 \text{ W}$$

Buradan devrenin güç faktörü

$$\cos\Psi = \frac{P}{S}$$

$$= \frac{2559}{4995}$$

$$= 0.512$$

olarak hesaplanır. $\cos\Psi$ 'nin maksimum olabilmesi için gereken kapasite değeri ise denklem 4.26 'dan

$$C = \frac{212,24 \cdot 22,497 \cdot 1 \cdot \sin 57,99 + 56,82 \cdot 2,3177 \cdot 3 \cdot \sin 78,231 + 21,93 \cdot 0,5473 \cdot \sin 82,87}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot [212,24^2 \cdot 1^2 + 56,82^2 \cdot 3^2 + 21,93^2 \cdot 5^2]}$$

$$= 166,13 \mu\text{F}$$

bulunur. $\cos\Psi$ 'nin maksimum olabilmesi için görünür gücün minimum olması gerekmektedir. Bunun için de akımın minimum olması gerekir. Buna göre denklem 4.27 ' den

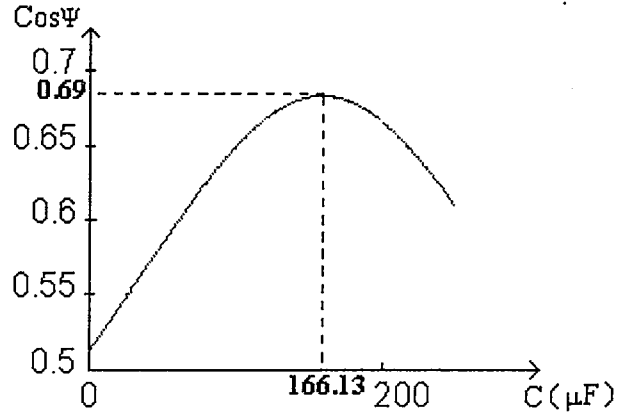
$$\begin{aligned}\omega C &= 2\pi \cdot 50 \cdot 166,13 \cdot 10^{-6} \\ &= 0,052191\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_{kmin}^2 &= (212,24 \cdot 1 \cdot 0,052191)^2 + 22,497^2 - (2 \cdot 212,24 \cdot 1 \cdot 22,497 \cdot 0,052191 \cdot \sin 57,99) \\ &\quad + (56,82 \cdot 3 \cdot 0,052191)^2 + 2,3177^2 - (2 \cdot 56,82 \cdot 3 \cdot 2,3177 \cdot 0,052191 \cdot \sin 78,23) \\ &\quad + (21,93 \cdot 5 \cdot 0,052191)^2 + 0,5473^2 - (2 \cdot 21,93 \cdot 5 \cdot 0,5473 \cdot 0,052191 \cdot \sin 82,87) \\ &= 16,648 \text{ A}\end{aligned}$$

olarak hesaplanır. Buradan maksimum güç faktörü

$$\begin{aligned}\cos\Psi_{max} &= \frac{P_Y}{V \cdot I_{kmin}} \\ &= \frac{2559}{220,8 \cdot 16,648} \\ &= 0,696\end{aligned}$$

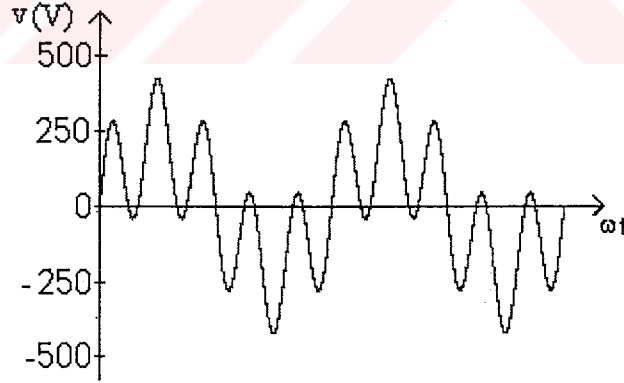
olarak bulunur. Şekil 5.6 'da ise çeşitli kapasite değerlerinde güç faktörünün nasıl değiştiği görülmektedir.



Şekil 5.6. Yüke şönt olarak bağlanan kapasite değerine göre güç faktörünün değişimi

UYGULAMA 3:

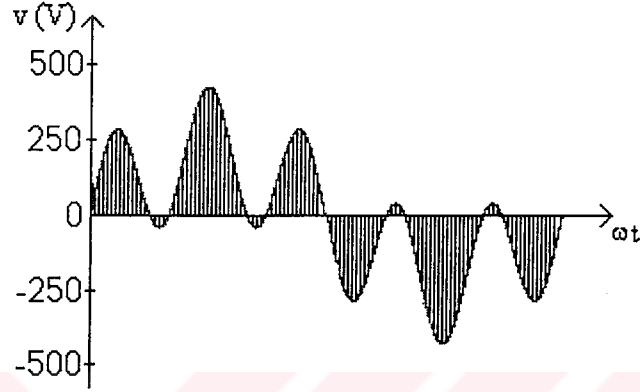
Şekil 4.5 'de verilen bir devrede $X=8\Omega$ ve $R=5\Omega$ dur. Gerilim kaynağının osiloskoptan elde edilen dalga şeklinin Şekil 5.7 'deki gibi olduğu görülmüştür. Buna göre devrenin görünür gücünü, reaktif gücünü ve aktif gücünü bularak güç faktörünü maksimum yapan kapasite değerini bulalım.



Şekil 5.7. Kaynak geriliminin osiloskoptan elde edilen dalga şekli

Çözüm:

Şekil 5.7 'de verilen dalganın fourier analizini Bölüm 2.3 'de bahsedilen grafik metot yardımıyla yapalım. Bunun için dalga üzerinden elde edilen $f(x)$ değerlerini Ek 1' de verilen bilgisayar programı yardımıyla fourier analizine açalım.



Şekil 5.8. $f(x)$ değerlerinin tespit edilmesi

Bu analizin sonucunda gerilim kaynağının fourier analizine açılmış hali

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot (155,8 \sin \omega t + 155,8 \sin 5\omega t)$$

olarak bulunur. Bu gerilim kaynağının efektif değeri ise

$$\begin{aligned} |V| &= \sqrt{155,8^2 + 155,8^2} \\ &= 220,33 \text{ V} \end{aligned}$$

dur. Buradan her bir harmonik için empedans değerlerini hesaplayabiliriz. Buna göre,

$$\begin{aligned} Z_1 &= R + j X_1 \\ &= 5 + j8 \ \Omega \end{aligned}$$

$$|Z_1| = 9,4339 \Omega$$

$$\Psi_1 = \arctan \frac{X_1}{R}$$

$$= \arctan \frac{8}{5}$$

$$\Psi_1 = 57,99^\circ$$

$$X_5 = 5 \cdot X_1$$

$$= 5 \cdot 8$$

$$= 40 \Omega$$

$$Z_5 = R + X_5$$

$$= 5 + j 40 \Omega$$

$$|Z_5| = 40,311 \Omega$$

$$\Psi_5 = \arctan \frac{X_5}{R}$$

$$= \arctan \frac{40}{5}$$

$$\Psi_5 = 82,87^\circ$$

olarak hesaplanır. Buradan devreden akan akımlar,

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1}$$

$$= \frac{155,8}{9,4339}$$

$$= 16,514 \text{ A}$$

$$\begin{aligned}
 I_5 &= \frac{V_5}{Z_5} \\
 &= \frac{155,8}{40,311} \\
 &= 3,8649 \text{ A}
 \end{aligned}$$

dir. Bulunan bu değerler zaman domeninde yazılırsa akımın ani değeri

$$i(t) = \sqrt{2} \left[16,514 \cdot \sin(\omega \cdot t - 57,99) + 3,8649 \cdot \sin(5\omega t - 82,87) \right]$$

yazılabilir. Akımın efektif değeri ise

$$\begin{aligned}
 |I| &= \sqrt{16,514^2 + 3,8649^2} \\
 &= 16,9609 \text{ A}
 \end{aligned}$$

dir. Buradan devrenin görünür gücünü ve aktif gücünü sırasıyla bulalım.

$$\begin{aligned}
 S^2 &= V^2 \cdot I^2 \\
 &= 220,33^2 \cdot 16,9609^2 \\
 &= 13,96 \cdot 10^6 \text{ (V.A)}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P &= V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \Psi_1 + V_5 \cdot I_5 \cdot \cos \Psi_5 \\
 &= 155,8 \cdot 16,514 \cdot \cos 57,99 + 155,8 \cdot 3,8649 \cdot \cos 82,87 \\
 &= 1438,375 \text{ W}
 \end{aligned}$$

Buradan devrenin güç faktörünün değerini

$$\cos \Psi = \frac{P}{S}$$

$$\cos\Psi = \frac{2259}{3736,31}$$

$$\cos\Psi = 0,3848$$

olarak hesaplayabiliriz. $\cos\Psi$ 'nin maksimum olabilmesi için gereken kapasite değeri ise Denklem 4.26 'dan

$$C = \frac{155,8.16,514.1.\sin 57,99 + 155,8.3,8649.\sin 82,87}{2.\pi.50.[155,8^2.1^2 + 155,8^2.5^2]}$$

$$= 26,072 \mu\text{F}$$

bulunur. $\cos\Psi$ 'nin maksimum olabilmesi için görünür gücün minimum olması gerekmektedir. Bunun için de akımın minimum olması gerekmektedir. Buna göre denklem 4.27 'den

$$\omega C = 2.\pi.50.26,072.10^{-6}$$

$$= 0,0081909$$

$$I_{k\min}^2 = (155,8.1.0,0081909)^2 + 16,514^2 - (2.155,8.1.16,514.0,0081909.\sin 57,99)$$

$$+ (155,8.5.0,0081909)^2 + 3,8649^2 - (2.155,8.5.3,8649.0,0081909.\sin 82,87)$$

$$= 245,39 \text{ A}^2$$

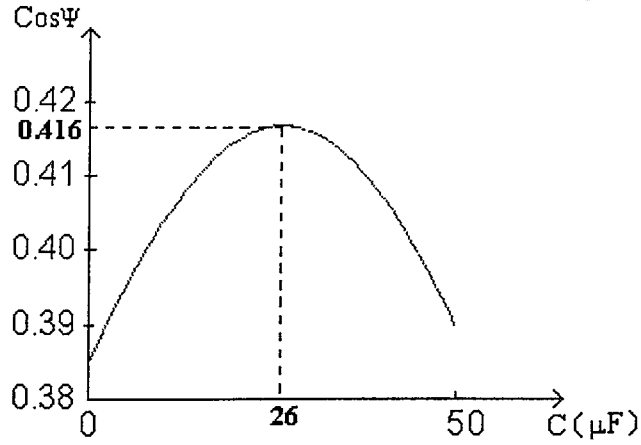
olarak hesaplanır. Buradan maksimum güç faktörü değeri

$$\cos\Psi_{\max} = \frac{P_Y}{V.I_{k\min}}$$

$$= \frac{1428,375}{220,33.15,663}$$

$$= 0,416$$

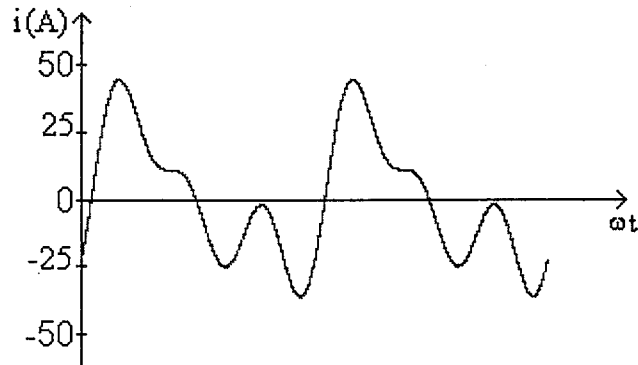
olarak bulunur. Şekil 5.9 'da ise çeşitli kapasite değerlerinde güç faktörünün nasıl değiştiği görülmektedir.



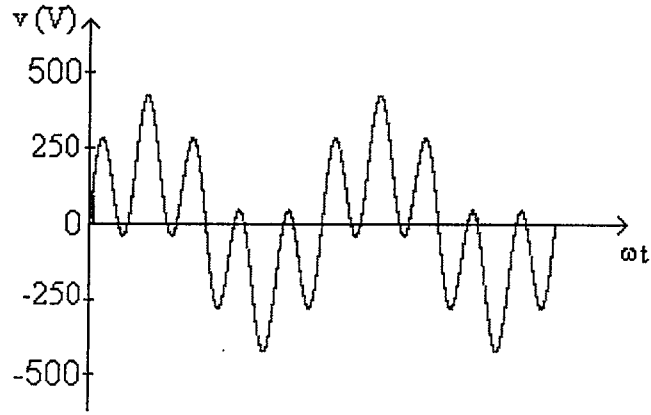
Şekil 5.9. Yüke şönt olarak bağlanan kapasite değerine göre güç faktörünün değişimi

UYGULAMA 4:

Nonsinüsoidal gerilim veren bir kaynak ve nonlinear yüke sahip olan bir devrede (Şekil 4.5) gerilim kaynağının ve yük akımının osiloskoptan elde edilen dalga şekilleri Şekil 5.10 ve 5.11 'deki gibi olduğu görülmüştür. Buna göre devrenin görünür gücünü, reaktif gücünü ve aktif gücünü bularak güç faktörünü maksimum yapan kapasite değerini bulalım.



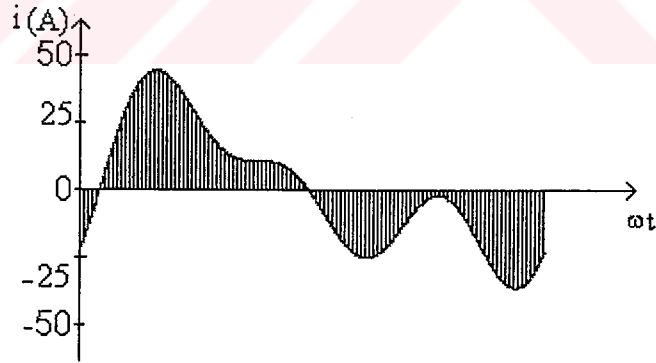
Şekil 5.10. Nonlinear yükün akımına ait dalga şekli



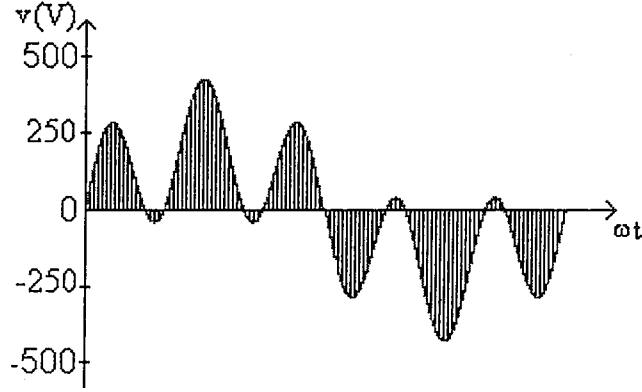
Şekil 5.11. Nonsinusoidal kaynağın gerilim dalga biçimi

Çözüm:

Şekil 5.10 ve Şekil 5.11 'de verilen dalganın fourier analizini Bölüm 2.3 'de bahsedilen grafik metot yardımı ile yapalım. Bunun için dalga üzerinden elde edilen $f(x)$ değerlerini Ek 1' de verilen bilgisayar programı yardımıyla fourier analizine açalım. Bu analizin sonucunda gerilim kaynağının ve yük akımının fourier analizine açılmış hali



Şekil 5.12. Nonlineer yükün akımının grafik metot ile fourier analizine ait $f(x)$ değerlerinin tespiti



Şekil 5.13. Nonsinüsoidal kaynağın gerilim dalga biçiminin grafik metot ile fourier analizine ait $f(x)$ değerlerinin tespiti

Bu analizin sonucunda gerilim kaynağının ve yük akımının fourier analizine açılmış hali

$$v(t) = \sqrt{2} (155,78 \sin \omega t + 56,82 \sin (2\omega t - 30) + 19,21 \sin(3\omega t - 30))$$

$$i(t) = \sqrt{2} (18,24 \sin (\omega t - 45) + 10,37 \sin (2\omega t - 60) + 9,83 \sin (3\omega t - 45))$$

olarak bulunur. Gerilim kaynağının ve yük akımının efektif değeri ise

$$\begin{aligned} |V| &= \sqrt{155,78^2 + 56,82^2 + 19,21^2} \\ &= 220,4599 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |I| &= \sqrt{18,24^2 + 10,37^2 + 9,83^2} \\ &= 23,17 \text{ A} \end{aligned}$$

olarak hesaplanır. Buradan devrenin aktif gücünü ve görünür gücünü sırasıyla bulalım.

$$\sum_1^{h_1} V_{h_1,1} \cdot I_{k_{h_1}} \cdot h_1 \cdot \sin \Psi_{kh_1}$$

$$= 155,78 \cdot 18,24 \cdot 1 \cdot \sin 45 + 154,87 \cdot 10,37 \cdot 2 \cdot \sin 30 + 19,21 \cdot 9,83 \cdot 3 \cdot \sin 15$$

$$= 3761,19$$

$$P = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \Psi_1 + V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \Psi_2 + V_3 \cdot I_3 \cdot \cos \Psi_3$$

$$= 155,78 \cdot 18,24 \cdot \cos 45 + 154,87 \cdot 10,37 \cdot \cos 30 + 19,21 \cdot 9,83 \cdot \cos 15$$

$$= 3581 \text{ W}$$

$$S = V \cdot I$$

$$= 220,4599 \cdot 23,17$$

$$= 5108,12 \text{ VA}$$

Buradan devrenin güç faktörünü

$$\cos \Psi = \frac{P}{S}$$

$$= \frac{3581}{5108,12}$$

$$= 0,7012$$

olarak hesaplarız. $\cos \Psi$ 'nin maksimum olabilmesi için gereken kapasite değeri ise Denklem 4.46 'dan

$$C = \frac{3761,19}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot [155,78^2 \cdot 1^2 + 154,87^2 \cdot 2^2 + 19,21^2 \cdot 3^2]}$$

$$= 96,97 \mu\text{F}$$

olarak bulunur. $\cos\Psi$ 'nin maksimum olabilmesi için görünür gücün minimum olması gerekmektedir. Bunun için de akımın minimum olması gerekir. Buna göre denklem 4.49a 'dan

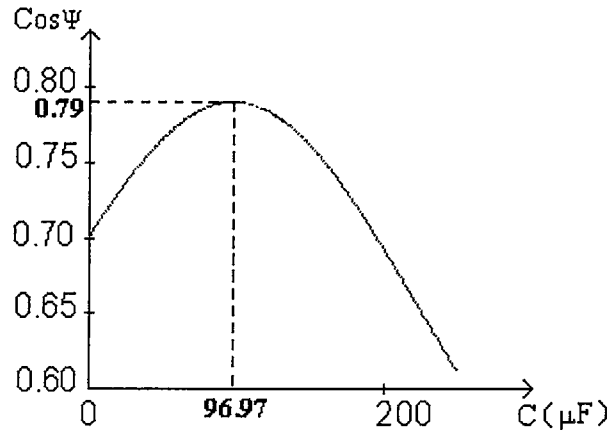
$$\begin{aligned}\omega C &= 2\pi \cdot 50 \cdot 96,97 \cdot 10^{-6} \\ &= 0,03046\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_{kmin}^2 &= (155,78 \cdot 1 \cdot 0,03046)^2 + 18,24^2 - (2 \cdot 155,78 \cdot 1 \cdot 18,24 \cdot 0,03046 \cdot \sin 45) \\ &\quad + (154,81 \cdot 2 \cdot 0,03046)^2 + 10,37^2 - (2 \cdot 154,81 \cdot 2 \cdot 10,37 \cdot 0,03046 \cdot \sin 30) \\ &\quad + (19,21 \cdot 3 \cdot 0,03046)^2 + 9,83^2 - (2 \cdot 19,21 \cdot 3 \cdot 9,83 \cdot 0,03046 \cdot \sin 15) \\ &= 422,2727 \text{ A}^2\end{aligned}$$

olarak hesaplanır. Buradan maksimum güç faktörü

$$\begin{aligned}\cos\Psi_{max} &= \frac{P_Y}{V \cdot I_{kmin}} \\ &= \frac{3581}{220,4599 \cdot 20,55} \\ &= 0,79\end{aligned}$$

olarak bulunur. Şekil 5.14 'de ise çeşitli kapasite değerlerinde güç faktörünün nasıl değiştiği görülmektedir.



Şekil 5.14. Yüke şönt olarak bağlanan kapasite değerine göre güç faktörünün değişimi



SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Sinüsoidal besleme ve lineer elemanlardan meydana gelen enerji sistemlerinin güç kompanzasyonu bilindiği gibi basit bir inceleme (veya ölçme) ile yapılabilmektedir. Fakat besleme kaynağının nonsinüsoidal olması veya elemanların nonlineer karakterde olması durumunda güç kompanzasyonu işleminde bir takım farklılıklar meydana gelmektedir.

Nonsinüsoidal büyüklükleri içeren devrelerde, güç faktörünün düzeltilmesi için harmonik bileşenlerin göz önüne alınması gerekmektedir. Bu harmonik bileşenler devreyi besleyen kaynağa veya yükün karakterine göre akım harmonikleri yada gerilim harmonikleri şeklinde devrelerde etkisini gösterir.

Harmonik akımların aktığı devrelerde (sinüsoidal beslemeli lineer devredeki benzer şekilde) devreye ilave edilen kapasite değerinin artırılması ile güç faktörünün artırılması her zaman mümkün olmamaktadır. Yapılan incelemeden ve analizden harmonik bileşenlerin bulunduğu devrelerde elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi verilebilir:

- Sinüsoidal beslemeli nonlineer devrelerde güç faktörünün tam olarak 1' değerine çıkarılması sadece güç kompanzasyonunun yapılması ile yeterli değildir. Bağlanan kapasiteler ile güç faktörü belirli bir aralıkta değişmektedir. Bunun nedeni ise akım harmoniklerinin sebep olduğu distorsiyon gücünün etkili olmasıdır. Güç faktörünün ($\cos\psi$) 1' değerine çıkarılması için akım harmoniklerinin filtre edilerek güç kompanzasyonu yapılmalıdır.
- Nonsinüsoidal beslemeli lineer devrelerde güç faktörünün tam olarak 1' değerine çıkarılmasında bir takım güçlükler vardır. Bunun gerçekleştirilmemesindeki en büyük etken besleme gerilimindeki harmoniklerin şiddetidir. Bu harmonik değerler, eğer

temel bileşene yakın değerler almış ise güç faktörünün değişim aralığı (yükselme aralığı) çok sınırlıdır. Uygulama 3’de bu durum açıkça görülmektedir.

- Nonsinüsoidal beslemeli nonlinear devreler, nonlinear devrelerin en genel durumudur. Bu tip devrelerde besleme gerilimindeki harmoniklerin ve yük akımının harmoniklerinden dolayı sadece kapasite bağlamak suretiyle güç faktörünün 1’değerine çıkarılması zordur, hatta mümkün değildir. Güç faktörünün ($\cos\psi$) 1’değerine çıkarılması için akım harmoniklerinin ve gerilim harmoniklerinin filtre edilerek güç kompanzasyonu yapılması gereklidir.
- Nonsinüsoidal büyüklükleri içeren devrelerde paralel bağlanan kapasite değerinin artması ile güç faktörü değeri aynı şekilde artmamaktadır. Güç faktörü belirli bir değere kadar artış gösterip daha sonra kapasite ilave edilmesine rağmen azalma göstermektedir (Şekil 5.14). Bu olay da bize pratikte bir takım uygulamalarda ne kadar gereksiz kapasite kullanıldığını ortaya çıkarmaktadır.
- Nonsinüsoidal beslemeli nonlinear devreler, akım ve gerilim akım harmoniklerin oluşmasından dolayı harmoniklerin şiddetine bağlı olarak güç kompanzasyonu için en elverişsiz devrelerdir.
- Uygulama 1, Uygulama 2, Uygulama 3 ve Uygulama 4’ de görülmüştür ki, nonlinear devrelerde harmoniklerin oluşumundan dolayı güç faktörünü 1’değerine çıkarabilmek için mutlaka filtre devrelerinin kullanılması gereği ortaya çıkmaktadır.
- Bunlara ilave olarak, pratikte yapılan güç kompanzasyonlarının devrelerin karakterleri (harmonik içerip içermediği) göz önüne alınarak yapılmadığı için bu gibi devrelerde optimal bir biçimde ve tam anlamıyla güç kompanzasyonunun yapılmadığı söylenebilir.

Yukarıda belirtildiği ve bu çalışmada da gösterildiği gibi nonsinüsoidal büyüklüklerin bulunduğu devrelerin g kompanzasyonunda;

- Yapılacak g kompanzasyonun ekonomikliği için, mutlaka optimum kapasite değerinin hesaplanması ve kapasite değerini ile g faktörünün grafik olarak değişimi izlenmelidir.
- G faktörü için bir takım değerlerin üzerine ıkılamamakta (1'e yakın değerler veya 1 değerini elde edilememektedir). Bu durumda mutlaka filtre devrelerinin kullanımı gerekmektedir.



KAYNAKLAR

1. Arrillaga, J., Bradley, D.A. and Bodger, P.S., 1985. Power System Harmonics, John Wiley & Sons.
2. Bayram, Mustafa, 1985. Elektroteknik M.
3. Clinker, C.R., 1914 Harmonic Voltage and Currents in Y and Delta Connected Transformers, Trans. AIEE, Vol. 33, pp. 334-723.
4. Dommel, H.W., Yan, A. and Wei, S., 1986. Harmonics from Transformer Saturation, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRD-1, No.2, pp.209-215.
5. Emanuel, A.E. and Wang X., 1985. Estimation of Loss of Life of Power Transformers Supplying Nonlinear Loads, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No.3, pp. 628-636.
6. Fuchs, E.F., Roesler, D.J. and Kovacs, K.P., 1986. Aging of Electrical Appliances due to Harmonics of the Power System's Voltage, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No.3, pp. 301- 307.
7. Fuchs, E.F., Roesler, D.J. and Alashhab, F.S., 1987. Sensitivity of Electrical Appliances to Harmonics and Fractional Harmonics of the Power System's Voltage. PartI: Transformers and Induction Machines, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No.2, pp. 437-444.
8. Fuchs, E.F., Roesler, D.J., and Kovacs, K.P., 1987. Sensitivity of Electrical Appliances to Harmonics and Fractional Harmonics of the Power System's Voltage. Part II: Television Sets, Induction Watthour Meters and Universal Machines, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No.2, pp. 445-453.
9. Filipski, P.S. and Labaj, P.W., 1992. Evaluation of Reactive Power Meters in the Presence of High Harmonic Distortion, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-7, No.4, pp. 1793-1799.
10. Forrest, J.A.C., 1991. Harmonic Load Losses in HVDC Converter Transformers, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-6, No.1, pp. 153- 157.
11. Golberg, S. and Horton, W.F., 1987. Induction Watthour Meter Accuracy with Nonsinusiodal Currents, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No.3, pp. 683- 690.
12. Grady, W.M. and Heydt, G.T., 1985. Prediction of Power System Harmonics due to Gaseous Discharge Lighting, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, pp. 554-561.

13. Gyugyi, L, Otto, R.A. and Putnam, T.H., 1978. Principles and Applications of Static Thyristor-Controlled Shunt Compensators, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, pp. 1935-1945.
14. Herrick, P.R., 1980. Mathematical Models for High Intensity Discharge Lamps, IEEE, Trans. on Industry Applications, Vol. IA-16, pp. 648-654.
15. Hwang, M.S., Grady, W.M. and Sanders, H.W., 1987. Distribution Transformer Winding Losses due to Nonsinusoidal Currents, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No.1, pp. 140- 146.
16. Hwang, M.D., Grady, W.M. and Sanders, H.W., 1988. Calculation of Winding Temperatures in Distribution Transformers Subjected to Harmonic Currents, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-3, No.3, pp. 1074- 1079.
17. IEEE Working Group on Power System Harmonics, Power System Harmonics: An Overview, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, pp. 2455-2460.
18. Kimbark, E.W., 1971. Direct Current Transmission, Vol. I, Wiley-Interscience.
19. Kocatepe, Celal, 1995. Sinüsoidal Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu, Doktora Tezi
20. Laskowski, E.L. and Donoghue, J.F., 1981. A model of a Mercury Arc Lamp's Terminal V-I Behavior, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-17, pp. 419-426.
21. Makram, E.B., Wright, C.L., and Girgis, A.A., 1992. A Harmonic Analysis of the Induction Watt-hour Meter's Registration Error, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-7, No.3, pp. 1080-1088.
22. Mc Graw-Edison Co., 1980. United Technologies Corporation System Control Inc., Study of Distribution System Surge and Harmonic Characteristics, RP1024-1 Final Report, Report No. EL-1627, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
23. Meliopoulos, A.P.S. and Martin, M.A., 1992, Calculation of Secondary Cable Losses and Ampacity in the Presence of Harmonics, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-7, No.2, pp. 451- 459.
24. Pender, H. and Del Mar, W.A., 1967. Electric Engineers' Handbook-Electric Power, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc.
25. Read, J.C., 1945. The Calculation of Rectifier and Inverter Performance Characteristic, J.IEE, Pt II. 92, pp. 495.
26. Rissik, H., 1935. The Mercury Arc Current Converter, Pitman, London.

27. Stratford, R.P., 1980, Harmonic Pollution on Power Systems-A Change in Philosophy, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-16, pp. 617-623.
28. Sundberg, Y., 1976. The Arc Furnace as a Load on the Network, ASEA Journal, Vol. 49, pp. 75-87.
29. Szabados, B. and Lee, J., 1981. Harmonic Impedance Measurements on Transformers, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS -100, pp. 5020-5026.
30. Wortman, N.A, Allen D.L, and Grigsby, L.L, 1985. Techniques for the Steady State Representation of Unbalanced Power Systems, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, pp. 2805-2824.



EK 1

```
#include <stdlib.h>
#include <CONIO.h>
#include <STDIO.h>
#include <STRING.h>
#include <dos.h>
#include <math.h>
#include <GRAPHICS.h>
#define pi= 3.14;
abd( );
abd1( );
int n;
float x,y,m,r,m1=0;
float f[90],m2[90],m3[90];
float z,z1;
main(void)
{  m1=0;

    printf("degisken eleman sayisini giriniz.\n",x);
    scanf("%f",&x);
    /* printf("%f\n",x);*/
    x=12;
    z=2/x;
    z1=1/x;
    /* printf("%f\n",z);
    f[1]=7.5;
    f[2]=17.6;
    f[3]=30.5;
    f[4]=48;
```

```
f[5]=68;
f[6]=83;
f[7]=94;
f[8]=100;
f[9]=100;
f[10]=100;
f[11]=100;
f[12]=100;  */

y=0;
do{
y++;
    printf("%f elemanın degerini giriniz.\n",y);
    scanf("%f",&f[y]);
/*    printf("%f\n",f[y]); */
    }while(y < x);
clrscr();
y=0;
n=0;
do{
    n++;
    do{
y++;
        r=(y*3.14159265*n)/(2*x);
        m=z*f[y]*sin(r);
        m1=m+m1;

    }while(y < x-1);
        r=(3.14*n)/2;
        m=z1*f[x]*sin(r);
```

```

        m1=m+m1;
        m2[n]=m1;
        printf("b%d ",n);
        printf("%f ",m1);
        printf(" %d.harmonik\n",n);
        y=0;
        m1=0;
    }while(n < 10);
//an degerleri//
y=0;
n=0;
do{
n++;
do{
y++;
        r=(y*3.14159265*n)/(2*x);
        m=z*f[y]*cos(r);
        m1=m+m1;
    }while(y < x-1);
        r=(3.14*n)/2;
        m=z1*f[x]*cos(r);
        m1=m+m1;
        m3[n]=m1;
        printf("a%d ",n);
        printf("%f ",m1);
        printf(" %d.harmonik\n",n);
        y=0;
        m1=0;
    }while(n < 10);

```

```

        delay(2000);
        abd();
        abd1();
        return 0;
    }
}

abd()
{
    int th=0,sdf;
    /* request auto detection */
    int gdriver = DETECT, gmode, errorcode;
    int i, x, y, color, maxx, maxy,maxcolor, seed;

    /* initialize graphics and local variables */
    initgraph(&gdriver, &gmode, "");

    /* read result of initialization */
    errorcode = graphresult( );
    /* an error occurred */
    if (errorcode != grOk)
    {
        printf("Graphics error: %s\n", grapherrormsg(errorcode));
        printf("Press any key to halt:");
    }
    /* terminate with an error code */
    exit(1);
}

maxx = getmaxx() + 1;
maxy = getmaxy() + 1;
maxcolor = getmaxcolor() + 1;

```



```

while (!kbhit())
{
    th=0;
    n=0;
    do{
        n++;
    }
    do{
        th++;
        putpixel(10+th,250+m2[n]*2*sin((n*th*3.1415)/180), 2);
        putpixel(380+th,250+m3[n]*2*cos((n*th*3.1415)/180), 9);
    }while( th < 360);
    th=0;
    }while( n < 10);
    th=0;
}

closegraph();
return 0;

}

```

```

abd1()
{
clrscr();
int th=0,sdf;
/* request auto detection */
int gdriver = DETECT, gmode, errorcode;
int i, x, y, color, maxx, maxy,maxcolor, seed;

```

```

/* initialize graphics and local variables */
initgraph(&gdriver, &gmode, "");

/* read result of initialization */
errorcode = graphresult( );
/* an error occurred */
if (errorcode != grOk)
{
    printf("Graphics error: %s\n", grapherrormsg(errorcode));
    printf("Press any key to halt:");
/* terminate with an error code */
    exit(1);
}

maxx = getmaxx( ) + 1;
maxy = getmaxy( ) + 1;
maxcolor = getmaxcolor( ) + 1;

while (!kbhit( ))
{
    th=0;
    n=0;
    do{
        n++;
    do{
        th++;
        putpixel(150+th,250+m3[n]*2*cos((n*th*3.1415)/180), 2);
    }while( th < 360);
    th=0;
    }while( n < 10);
}

```

```
    th=0;  
  
    }  
  
    closegraph( );  
    return 0;  
  
}
```



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Abdullah DEMİR

Doğum Tarihi : 5.2.1973

Doğum Yeri : Aşkale

Eğitim : 1991-1995 Yıldız Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü
: 1987-1990 Sivas Endüstri Meslek Lisesi
: 1984-1987 Sivas Selçuk Ortaokulu
: 1979-1984 Sivas Reşit Akif Paşa İlkokulu

Görevi :1996- Araştırma Görevlisi
Yıldız Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Mühendisliği Bölümü
Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı

Yabancı Dil : İngilizce