

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

84958

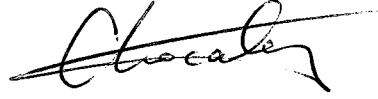
**NONSİNÜSOİDAL BÜYÜKLÜKLERİN
KAYIPLARA ETKİSİ**

Elk. Müh. Serkan CANSIZ

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

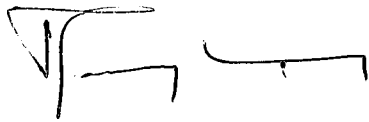
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Celal KOCATEPE



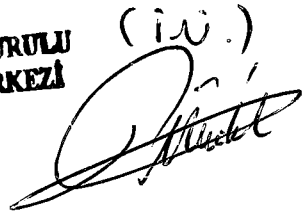
84958

Prof. Dr. Hüseyin SAKIR
(Y. T. Ü.)



Yrd. Doç. Dr. Hakan ÜNDİL

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

(i.Ü.)


İSTANBUL, 1999

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Harmonikler İle İlgili Yapılmış Olan Çalışmalar	2
2. HARMONİKLERİN OLUŞMASINA SEBEP OLAN KAYNAKLAR VE ETKİLERİ.....	5
2.1 Transformatörler.....	5
2.2 Generatörler.....	8
2.3 Konverterler.....	9
2.4 Ark Ocakları.....	10
2.5 Gaz Deşarjlı Aydınlatma.....	11
2.6 Statik VAR Kompanzatorler.....	12
2.7 Fotovoltaik Sistemler.....	12
2.8 Bilgisayarlar.....	12
2.9 Kesintisiz Güç Kaynakları.....	12
2.10 Elektrikli Lokomotifler.....	13
3. HARMONİKLERİN ENERJİ SİSTEMLERİNE ETKİLERİ.....	14
3.1 Harmoniklerin Yol Açtığı Rezonans Olayları.....	15
3.1.1 Paralel rezonans.....	17
3.1.2 Seri rezonans.....	18
3.2 Transformatörler Üzerindeki Etkiler.....	18
3.3 Döner Makinalar Üzerindeki Etkiler.....	19
3.4 İletim Hatları Üzerindeki Etkiler.....	20
3.5 Kondansatörler Üzerindeki Etkiler.....	20
3.6 Röleler Üzerindeki Etkiler.....	21
3.7 Ölçü Aletleri Üzerindeki Etkiler.....	22
3.8 Güç Elektronik Elemanları Üzerindeki Etkiler.....	23
3.9 İletişim Hatları Üzerindeki Etkiler.....	23
3.10 Sigortalar Üzerindeki Etkiler.....	24
4. HARMONİKLERİN ANALİZİ.....	25
4.1 Fourier Analizi.....	25
4.1.1 Fourier serisine açılabilme şartları.....	28
4.1.2 Enerji sistemlerinde harmonikler ile ilgili bazı tanımlar.....	31

5.	HARMONİKLERİN KAYIPLARA ETKİLERİ.....	34
5.1	Joule Kayıpları.....	34
5.1.1	Deri etkisi (skin effect).....	35
5.2	Dielektrik Kayıpları.....	37
5.3	Demir Kayıpları.....	37
5.3.1	Histerizis kayıpları.....	37
5.3.2	Fuko akımı kayıpları.....	39
6.	SAYISAL UYGULAMA.....	42
6.1	Demir Kesitinin Bulunması.....	45
6.2	Demir Gövdede Meydana Gelen Toplam Demir Kaybının Bulunması.....	46
6.3	Harmonikli Akımların Meydana Getirdiği Toplam Demir Kaybı.....	47
6.3.1	Toplam harmonik distorsiyon % 5'in altında ise.....	48
6.3.2	Toplam harmonik distorsiyon % 10 ise.....	52
6.3.3	Toplam harmonik distorsiyon % 15 ise.....	56
7.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	62
	KAYNAKLAR.....	65
	ÖZGEÇMİŞ	67

ÖZET

Elektrik enerji sistemlerindeki akım ve gerilim dalga şekillerinin sinüsoidal biçimde olması istenir. Fakat sisteme bağlanan yarı iletkenler, transformatör ve motor gibi nonlineer elemanlar dalga şeklinin bozulmasına sebep olurlar. Bu durumda enerji sisteminde nonsinüsoidal akım ve gerilimler meydana gelecektir. Teknolojik gelişmelere bağlı olarak nonlineer elemanların kullanımının her geçen gün artması, harmonikli akım ve gerilimlerin güç sisteminde etkilerinin ihmal edilemez seviyelere ulaşmasına sebep olmuştur.

Bu çalışmada, öncelikle harmoniklerin oluşmasına sebep olan kaynaklar tanımlanmış, ardından harmoniklerin enerji sistemlerindeki elemanlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. 4. bölümde harmoniklerin analizi için fourier serisinin elde edilmesi anlatılmıştır. Beşinci bölümde ise harmoniklerin sistemde ve özellikle transformatörler üzerinde oluşturduğu ek kayıplar incelenmiş ve formülleri ortaya konulmuştur.

Sayısal uygulama bölümünde ise, bir dağıtım sistemi gözönüne alınarak buradaki dağıtım transformatöründe ek kayıpların harmonik derecesine bağlı değişimleri hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Nonsinüsoidal Büyüklükler, Harmonikler, Ek kayıplar, Fourier serisi, Transformatörler.

ABSTRACT

It is essential that the current and voltage wave shapes in electrical energy systems should be sinusoidal form. But nonlinear elements such as semiconductor, transformer and motor cause distortion on sinusoidal wave shape. Thus, it takes place nonsinusoidal currents and voltages in the electrical energy system. According to technology improvements, the increasing use of nonlinear components, it reaches it can not be negligible levels as harmonic current and voltages the effect on power systems.

In the thesis, firstly, it is depicted the sources causing harmonics and then, it is studied the effect of harmonics on energy systems. It is explored fourier series for harmonics analysis in fourth chapter. In fifth section, it is shown addition losses of system and especially transformers caused by harmonics with necessary equations.

In the application chapter, it is calculated for a energy distribution system, the changes according to the harmonic degree of the addition loses in the distribution transfer.

Keywords: Nonsinusoidal Magnitudes, Harmonics, Addition Losses, Fourier Series, Transformers.

BÖLÜM 1

1. GİRİŞ

Güncel hayatımızın en önemli ihtiyaçlarından biri olan elektrik enerjisi, asrımızın başlarında kullanılmaya başlandığı yıllarda kısıtlı bir alanda kullanılıyordu. Haliyle, günümüzde karşılaştığımız pekçok problemle de karşılaşılmıyordu. Yıllar geçtikçe elektrik enerjisine olan ihtiyaç arttı. İhtiyacın artmasıyla beraber kullanılan tüketici cihazlarda da değişiklikler oldu. Buna bağlı olarak da üretilen güç de fevkalade artış gösterdi.

Elektrik enerjisi sektöründe özellikle 1970' li yıllardan itibaren çok yaygın olarak yarıiletken elemanlar kullanılmaya başlamıştır. Sanayideki hertür kontrolden, enerji iletim tekniğindeki uygulamalara (doğru akımla enerji iletimi) kadar her alanda bu tür elemanların sıkça kullanıldığı bu dönemde, bazı işletme problemleri ortaya çıkmıştır. Bu elemanların karakteristik özelliklerinden kaynaklanan en önemli bozucu etki, akım ve gerilim periyodik dalga şekillerinin sinüsoidal olmamalarıdır. Nonsinüsoidal dalgalar fourier serisine açıldığında genlik, frekans ve faz açısı olarak birbirinden farklı sinüsoidal dalgaların matematiksel toplamı olarak ifade edilebilmektedir. Burada 50 Hz frekanslı dalganın dışındaki dalgalar harmonik dalgalar adını almaktadır.

Elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtımı ile ilgili analizlerde göz önüne alınan başlıca varsayımlardan birisi de, akım ve gerilimlerin sinüsoidal olduğudur. Bu varsayım doğrultusunda "Tek-Hat eşdeğeri" kullanılabilir. Sistemde harmoniklerin bulunması halinde ise, harmonik sayısı kadar tek-hat eşdeğer devresinden söz edilecektir (Burada, sistemin lineer olduğunun kabul edildiği ve böylece "Toplamsallık Teoremi'nin uygulanabileceği varsayılmıştır).

Harmoniklerin sistemdeki elemanlar üzerinde pekçok olumsuz etkileri vardır. 1980' li yıllardan itibaren; bu olumsuz etkilerin sağlıklı olarak belirlenmesi, giderilmesi, analitik çözüm yöntemleri, ölçme teknikleri modelleme, simülasyon v.b. çalışmaların anlatıldığı uluslararası konferansların periyodik olarak yapılması konunun önemini açıkça göstermektedir.

Bu çalışmada, harmonikleri oluşturan non-lineer yükler ayrı ayrı incelenmiş, oluşan bu harmoniklerin devre elemanları üzerindeki olumsuz etkileri anlatılmış ve oluşturdukları kayıpların nasıl bulunduğu verilmiştir. Sayısal uygulamada ise harmoniklerin bir transformatörde oluşturduğu ek kayıplara ilişkin hesaplar yapıp elde edilen sayısal bulgular ışığında sonuçlar irdelenmiş ve gerekli öneriler ifade edilmiştir.

1.1 Harmonikler İle İlgili Yapılmış Olan Çalışmalar

Non-sinüsoidal akım ve gerilimlerin devre elemanları üzerindeki etkilerinin araştırılması yüzyılımızın başlarına kadar uzanır. Harmoniklerin çeşitliliği ve genel enerji sistemlerindeki etkinliği yıllar boyunca artarak süregelmiştir. Bu süreç içerisinde, harmoniklerin etkinliğini araştırmaya yönelik teorik ve pratik çeşitli yaklaşımlar bir bütün halinde ortaya konmuştur. Bu çalışmalar, harmoniklere yol açan kaynaklar, harmonik analizine yönelik matematiksel tanım ve çözümleme teknikleri, harmoniklerin olumsuz etkileri, harmonik seviyeleri, harmoniklerin yok edilmesi, harmonik analizine ilişkin sayısal çözümleme yöntem ve teknikleri gibi konular üzerinde yoğunlaşmıştır.

Alternatif akım ile çalışan redresörler, transformatörler ve generatörler incelenirken bunların birer harmonik kaynağı oldukları görülmüştür. Yarı iletken elemanlı redresörlerin kullanılmadığı o yıllarda, doğrultma işlemi motor-generatör grubu yardımıyla gerçekleştirilmekteydi. Burada, Steinmetz' in enerji sistemlerindeki harmonikler konusunda yaptığı araştırmalar ilgi çekicidir. I. dünya savaşı yıllarında yapmış olduğu bu çalışmalar (Steinmetz, 1916, 1917) transformatördeki doyma ve histerizis olaylarından kaynaklanan dalga bozulmalarını tanımlamaktaydı. Buradaki dalga biçiminin kare veya üçgen dalga olması ile sinüsoidal dalga olması çeşitli yönlerden karşılaştırılmış olup, enerji sistemleri için en uygun dalga biçiminin sinüsoidal dalga olduğu gösterilmiştir. Ayrıca generatörlerin dağılmış sargı ve yarı kutuplarından kaynaklanan gerilim harmonikleri üzerinde durulmuş ve yıldız-üçgen bağlı transformatörlerdeki akım-gerilim harmonikleri de tanımlanmıştır. Özellikle Simetrik Bileşenler Yönteminin ve Fourier Analizinin çok yaygın olarak kullanılmadığı o dönemde, Steinmetz' in araştırmaları çok önemli ve değerliydi.

Sonraki yıllarda yapılan çalışmalar, çoğunlukla transformatör bağlantılarından kaynaklanan harmonikler üzerine yoğunlaştırılmıştır (Clinker, 1914; Curtis, 1914; Fortescue, 1914). Civa buharlı doğrultucular, 1920' li ve 1930' lu yıllarda yaygın olarak kullanılmaktaydı. Bu elemanların ortaya çıkardığı harmonik akım ve gerilimlerini hesaplamaya yarayan bazı deneysel bağlantılara ve eşdeğer devrelere yer veren yayınlara da rastlanmaktadır (Blye ve Kent, 1914; Plucknett vd., 1941).

II. Dünya savaşının bitiminden sonra doğrultucularla ilgili analizler, daha karmaşık ve geniş bir yapı içinde ele alınmıştır. Örneğin: Civa buharlı doğrultucuların ateşleme açısı, komütasyon açısı gibi parametrelerine bağlı olarak akım harmonikleri ve rezonans koşulları incelenmiştir (Christensen vd., 1944; Schmidt, 1953).

Yarıiletken elemanlar kullanılarak yapılan konverterlerden, doğru akımla enerji iletiminde (HVDC) faydalanılır. HVDC' ye dair ilk çalışma Kimbark' a aittir (Kimbark, 1971). Bunu diğer çalışmalar izlemiştir. Bilindiği gibi gaz deşarjlı aydınlatma elemanları da genel harmonik kaynakları arasında sayılabilir ve özellikle yerleşim merkezlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu elemanlarda harmonik analizi içinde önemli yer tutarlar (Waymouth, 1971; Herrick, 1980; Laskowski ve Donoghue, 1981).

Transformatörlerin mıknatıslanma karakteristiğindeki "doyma" olayından kaynaklanan harmonik akımları da ayrı bir inceleme konusu olmuştur (Pender ve Del Mar, 1967; Szabados ve Lee, 1981). Aynı şekilde endüvi oluk sayısı ve rotor hızının bir fonksiyonu olan döner makine harmonikleri de dikkat çekicidir. Bununla birlikte, günümüzde uygulanan modern tasarım teknikleri sonucu bu harmoniklerin etkinliği önemli oranda azaltılmıştır. Ayrıca, non-lineer yük özelliği gösteren ark ocakları ve döküm tesisleri gibi elemanlar harmonik üreticileri olarak incelenmiştir (Sundberg, 1976; Dugan, 1980).

Harmoniklerin etkinliğini araştırmaya yönelik çalışmalar, başlangıçta haberleşme devrelerindeki bozulmaları incelemekteydi. Sonraki yıllarda harmoniklerin enerji sistemleri üzerindeki etkinlikleri de dikkate alınmaya başlanmıştır (IEEE Standarts Board, 1976; Linders, 1979). Bu çerçevede, harmoniklerin röleler ve diğer koruyucu elemanlar, ölçü aletleri gibi cihazlar üzerindeki etkinlikleri de araştırılmıştır (Baggott, 1974; Emanuel

vd., 1981). Harmonik analiziyle ilgili olarak geliştirilen ilk bilgisayar destekli çözümleme tekniği, doğru akımla enerji iletimi problemlerine yöneliktir (Hingorani vd., 1966, 1968; Hay ve Hingorani, 1970; Htsui ve Shepperd, 1971; Williams ve smith, 1973; El-Serefi ve Shehata, 1976; Coi vd., 1980). Bu yöntemde, çeviriciler ideal anahtar ile modellenmektedir ve sistemi karakterize eden nonlinear diferansiyel denklemler sayısal olarak çözülmektedir. Ancak, bu yöntemde tüm sistem elemanlarının ayrıntılı bir biçimde modellenmesinin gerekmesi ve çözüm süresinin uzunluğu gibi bazı zorluklar bulunmaktadır.

1970' li yıllardan itibaren enerji sistemleri, hatların T ve π eşdeğer devreleri ve bağımsız kaynaklarla modellenmeye başlanmıştır (Owen ve Granaghan, 1980; Mc Granaghan vd., 1981; Pileggi vd., 1981; Johnson vd., 1982; Densem vd., 1984; Mc Granaghan vd., 1984; Balsler ve Felts, 1985; Sharma ve Fleming, 1986). Lineerleştirilmiş modellemeye dayanan bu teknik, sistemin empedans veya admitans matrisinin doğrudan çözümüne dayanır. Harmonik kaynakları, ideal gerilim veya akım kaynaklarıyla gösterilir. Yapılan varsayımlar arasında, gerilimlerin dengeli ve sinüsoidal olduğu ve farklı harmonik diziler arasında herhangi bir bağı olmadiğı da bulunmaktadır.

Bir diğerk harmonik analizi yöntemi, nonlinear frekans domeni analizidir. Bu yöntemde, nonlinear yüklerin gerilim ve akımlarının Fourier eşdeğerleri gözönüne alınır. Güç akışı için de Newton-Raphson Yöntemi kullanılır (Xia ve Heydt, 1982; Heydt vd., 1983). Bu yöntem ideal akım ve gerilim kaynakları ile modellemeyi esas alan diğerk tekniklere göre duyarlıdır. Harmoniklerin oluşturduğu görünen güç ve eşdeğer güç katsayısı gibi tanımları veren ve devreler teorisi bakış açısı içinde çeşitli çözümleme teknikleri sunan araştırmalar da mevcuttur (IEEE, 1979; Shephard ve Zand, 1979).

BÖLÜM 2

2. HARMONİKLERİN OLUŞMASINA SEBEP OLAN KAYNAKLAR VE ETKİLERİ

Elektrik enerji sistemlerinde nonlinear yükler 1970 yılından beri özellikle 1980 yılından itibaren yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır (Bayrak ve Gül, 1997). Bununla beraber harmonik problemlerinin artması da söz konusu olmuştur. Harmoniklerin oluşmasına neden olan bu kaynakların en önemlileri şunlardır:

- 1) Transformatorler
- 2) Generatörler
- 3) Konverterler
- 4) Ark Ocakları
- 5) Gaz Deşarjlı Aydınlatma Elemanları
- 6) Statik VAR Kompanzatorler (SVC=Static VAR Compensator)
- 7) Fotovoltaik Sistemler
- 8) Bilgisayarlar
- 9) Kesintisiz Güç Kaynakları (UPS=Uninterruptible Power Supply)
- 10) Elektrikli Lokomotifler

Harmonik oluşturan bu elemanların bazılarını genel olarak inceleyelim,

2.1 Transformatorler

Enerji sistemlerinde demir çekirdeği bulunan bobinler harmoniklere yol açarlar. Bu tür elemanların başında güç sistemlerindeki en önemli elemanlardan transformatorler gelir (Dommel vd., 1986). Bunların harmonik üretme özelliği, demir çekirdeğin mıknatıslama karakteristiğinin lineer olmayışından ileri gelir (Bayram, 1984). Transformator çekirdeğinin mıknatıslama karakteristiği lineer özelliğe sahip olmadığından, uygulanan sinüsoidal uyarma akımı sonucu sinüsoidal akı ve gerilim oluşmamaktadır.

Transformatörler, normal işletme şartlarında, sinüsoidal gerilimle çalışma durumunda, mıknatıslama karakteristiği bölgesinde sinüsoidal çıkış büyüklüğü verirler. Transformatörlerin nominal değerlerinin dışında çalışması nüvenin daha çok doymasına ve harmonik akımların seviyesinin hızla artmasına sebep olabilmektedir (Szabados ve Lee, 1981).

Transformatörün mıknatıslanma akımı eğrisi, sinüs eğrisinden farklıdır. Bu eğri büyük oranda harmonikler içerir. Histerizis ihmal edilirse, mıknatıslama eğrisi n dereceli bir polinomla ifade olunabilir. Bu eğri o noktasına göre simetrik olduğundan mıknatıslama akımı $n=1,3,5,7,\dots$ v.b. gibi tek dereceden sinüsoidal bileşenlerin toplamı şeklinde ifade edilebilir.

Harmoniklerin genlikleri mertebeleri ile ters orantılı olduğundan, harmoniklerin mertebesi büyüdükçe etkileri azalır. En etkili olanı üçüncü harmoniktir. Bunun etkisi kuvvetli doymalarda büyük olur. Endüksiyonun artmasıyla üçüncü harmoniğin genliği büyümektedir. Bu mıknatıslama akım eğrisinin fazla distorsiyona uğraması demektir. Demek oluyor ki demir kesidini küçük tutmak yüksek harmoniklerden ötürü kuvvetli bir distorsiyona sebebiyet vermekte ve demir kesidini büyük tutmakta mıknatıslama akım eğrisinin sinüs şekline yaklaşmasını sağlamaktadır (Boduroğlu,1988).

Mıknatıslama akımı harmonikleri günün erken saatlerinde en yüksek seviyeye ulaşır, çünkü bu halde sistemdeki yük az olduğundan gerilim yükselmekte ve aşırı uyarma meydana gelmektedir. Aşırı uyarma ile oluşan akım harmoniklerinde 3., 5., ve 7. harmonikler etkili olurlar (Arrillaga vd.,1985).

Transformatörlerde uyarma gerilimi kesildiğinde transformatör saçlarında bir artık akı yoğunluğu kalması sonucu, gerilim yeniden uygulandığında bu akı yoğunluğu sebebi ile transformatörün aşırı doyma değerine sürülmesine ve mıknatıslama akımının değerinin 5-10 katı fazla miktarda bir darbe akımı meydana gelmesine sebep olmaktadır (Arrillaga vd.,1985).

Harmonik içeren akımlar devrelerini şebekedeki diğer elemanlar üzerinden tamamlayarak harmonik gerilimleri oluştururlar. Bu gerilimler ise başlangıçta sinüs kabul edilen gerilimin dalga şeklini bozarlar (Attar ve İnan, 1997).

Mıknatıslama akımındaki harmoniklerin şebekeye geçip geçmemesi şu faktörlere bağlıdır,

-Transformatör sargılarının bağlama grubu

-Primerin yıldız bağlı olması durumunda yıldız noktasının şebekenin nötr hattına bağlanıp bağlanmaması.

-Transformatördeki çekirdek (magnetik devre) yapısı. (Transformatörün mantel tipi veya çekirdek tipi olması)

Transformatörlerin çeşitli bağlama şekillerine göre durumlarını inceleyelim.

-Yıldız/Yıldız bağlı transformatör:

a)Primer yıldız noktası nötr hattına bağlanmış ise; mantel tipi transformatörde her bir faz sargısından gelen 3. ve 3'ün katları harmonik akımları nötr'de toplanarak fazdakinin 3 katı akımın geçmesine sebep olur. Buna karşılık 3'ün katlarına eşit olmayan (5.,7.,11.,13., v.b.) harmonikler yıldız noktasında sifira eşit olurlar. Bu tip transformatörlerde akılar ve herbir faz sargısında endüklenen gerilim sinüs şeklindedir.

Çekirdek tipi transformatörlerde mıknatıslama akımının toplamı yıldız noktasında sifira eşit olmaz, fark akım nötr hattı üzerinden geçer. Bunun dışında 3. ve 3'ün katlarındaki durum mantel tipindeki gibidir.

b)Primer yıldız noktası nötr hattına bağlanmamış ise;

Mıknatıslama akımının 3. ve 3'ün katı harmonikleri, yıldız noktasından dışarıya çıkamazlar. Mıknatıslama akımı 3. harmoniksiz bir akı oluşturur.

-Yıldız/Üçgen bağlı transformatör:

a) Primer yıldız noktası şebekenin nötr hattına bağlanmış ise; olaylar yukarıdaki a şıkında açıklandığı gibi gelişir.

b)Primer yıldız noktası şebekenin nötr hattına bağlanmamış ise; 3. ve 3'ün katı akı harmonikleri, üçgen sekonder sargıda 3. ve 3'ün katı frekanslı sirkülasyon akımlarının geçmesine sebep olurki, bu akımlarda kendilerini endükleyen akılara ters yönde tesir ederek bunları söndürürler.

-Primeri üçgen bağlı transformatör: Faz sargılarında mıknatıslama akımında 3.,9.,15.,v.b. harmonikler meydana gelirler. Bunlar her sargıda eşit fazlı olduklarından, üçgen bağlı sargı içinde kalırlar ve dışarı çıkamazlar. Bu yüzden şebekeden çekilen mıknatıslama akımında 3.,9.,15.,v.b. harmonikler bulunmazlar. Magnetik akı 3.,9.,15.,v.b. harmonikler ihtiva etmez.

Transformatörün bağlantı grubu nasıl olursa olsun, primer yıldız noktası nötr'e bağlansın veya bağlanmasın, çekirdek tipi nasıl olursa olsun, şebekeden 5.,7.,11.,13. gibi harmonikli mıknatıslama akımları daima çekilirler.

Şebekedeki mıknatıslama akımını düşürmek için en uygun tedbir, magnetik endüksiyonun düşük tutulmasıdır. Modern transformatörlerde soğuk haddelenmiş ve kristalleri yönlendirilmiş saç kullanmakla bu sonuç sağlanabilmektedir. Bu durumda harmonikler 1/5 değerine düşer.

2.2 Generatörler

En tabii harmonik üreticileri generatörlerdir. Çünkü şartlar müsait ise temel frekanslı gerilim ile beraber, yüksek harmonikli gerilimlerde meydana getirirler. Senkron generatörlerin harmonik üretme özelliği; çıkık kutbun alan şeklinden, magnetik direncin oluklara bağlı olmasından, ana devrenin doyuma ulaşmasından, kaçak akımlardan ve sık aralıklarla simetrik olmayan boşluklara yerleştirilen sönüm sargılarından kaynaklanmaktadır. Dönen makinalar makine ve endüvi oluk sayısına bağlı olarak harmonik üretirler (Arrillaga vd.,1985). Generatörün oluk şekli, sargı yapısı, uyarma sargısı ve kutuplarında uygun yapısal tedbirler alınarak ve generatörü amortisman sargısı ile donatarak gerilim eğrisinin sinüsoidal olması sağlanır. Generatörün gücü 100 kVA'dan küçükse oluşturduğu harmonikler gözönüne alınmaz.

Generatörlerin stator sargılarının bağlama şekillerine göre harmonik oluşumları:

-Statorun her üç faz sargısı aralarında yıldız bağlanmışsa 3. ve 3'ün katları frekanslı harmonikler sadece faz gerilimlerinde bulunurlar. Fazlar arası gerilimlerde bulunmazlar.

-Eğer yıldız bağlı böyle bir generatöre yıldız bağlı simetrik üç fazlı bir tüketici bağlanırsa ve yıldız noktası generatör yıldız noktasına bağlanmazsa 3. ve 3'ün katı harmonikli akımlar geçmez. Fakat bağlanırsa, faz iletkenlerinden 3. ve 3'ün katı frekanslı I_0 gibi bir sıfır akım bileşeni geçer ve bunlar yıldız noktasında toplanarak nötr iletkeni üzerinden $3I_0$ değerinde bir akım geçer. Bu akımlar tüketicide aynı şekilde 3. ve 3'ün katlarına eşit frekanslı bir gerilim düşümü meydana getirirler.

-Eğer generatör sargıları üçgen bağlanırsa; sargıların içinden 3'ün katları frekanslı bir sirkülasyon akımı geçer. Bu akım sargılarda oldukça büyük kayıpların meydana gelmesine yolaçar.

Bu nedenlerden ötürü generatör sargılarının yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılması tercih edilir. Fakat generatörün dört iletkenli bir şebekeyi beslemesi gerekiyorsa, bu durumda nötr hattı, zigzag bağlı bir bobinle oluşturulan suni yıldız noktasına bağlanır. Stator sargı adımlarının uygun seçilmesi ve kirşleme yolu ile alan eğrisindeki 3.harmonik ile 5. ve 7.harmonikler gerilim eğrisinde tamamen ortadan kaldırılabirler. Burada dikkate değer en düşük harmonik 2. harmoniktir (Arrillaga vd.,1985).

2.3 Konverterler

Günümüzde yarı iletken teknolojisinin hızla ilerlemesinden dolayı hat komütasyonlu konverterler geniş bir uygulama alanı bulmuşlardır. Bu nedenle transformatörlerden sonraki en önemli harmonik kaynağı konverterlerdir. Konverterlerin çalışma prensibi akımın periyodik olarak kesilmesi esasına dayanır. Bu ise bir nevi lineersizliktir.

Normal bir işletmede, konvertere sinüsoidal bir gerilim bağlandığında, konverter şebekeden I_1 temel harmonik akımı ile birlikte I_v harmonik akımları çekerler. Harmonik akımlarının ana dalga cinsinden bağlı değerleri,

$$\frac{I_v}{I_1} = \frac{1}{v} \quad (2.1)$$

bağıntısından yararlanarak bulunabilir. Burada harmonik numarası,

$$v = k \cdot p \pm 1 \quad (2.2)$$

'dir. Doğru gerilim ve şebeke akımındaki harmoniklerde en önemli faktör, dönüştürücünün darbe sayısıdır (p). Zira darbe sayısı ortaya çıkan harmoniğin numarasını ve dolayısı ile genliğini belirler (Gülgün, 1983). Konverterin darbe sayısı ne kadar yüksek olursa harmoniklerin genlikleri o kadar düşük olur.

Örnek olarak $p=6$ darbeleri bir konverterde meydana gelen harmonik mertebeleri $v=5,7,11,13,\dots$ olup harmonik akımları $I_5=I_1/5$, $I_7=I_1/7$, $I_{11}=I_1/11$, $I_{13}=I_1/13$ gibi değerler alırlar (Bayram, 1984).

2.4 Ark Ocakları

Ark ocakları ve kaynak makineleri gibi normal işletmelerini ark ile sürdüren tesisler ve makinelerde önemli harmonik kaynakları arasında sayılabilirler. Ark fırını bulunan işletmeler için harmonik oluşum nedeni olarak ark fırınlarındaki ateşleyici elektrotların özellikleri ve ark akım-gerilim karakteristikleri verilir (Arrillaga vd.,1985). Ark yükleri geçici yükler olup harmonik çalışmaları için kolayca modellenemezler. Ark direncinin bir yarım dalgada dahi değişmesi ve doğrusal olmaması nedeni ile sistemden sinüsoidal olmayan akım çekerler. Zaman zaman ark tutuşması veya sönmesi de harmonik akımların oluşmasına yol açmaktadır. Harmonikler en üst düzeye, ergitme safhasında ulaşırlar. Arıtma safhasında ise tamamen erimiş, metal karşısında her yarım dalgada tutuşan ark her seferinde bir öncekine benzer bir durum gösterir bu nedenle, akım harmonikleri daha

düşük düzeyde ve istikrarlıdır. Ark olayında akım ile gerilim, ark ocağının gücüne, çalışma safhasına, ocaktaki malzemeye ve elektrot mesafesine bağlı olarak değişir.

Ark boyundaki ani değişimin oluşturacağı şebeke dalgalanmaları, frekansın 0,1'den 30 Hz'e kadar geniş bir aralıkta dolaşmasına neden olur (Arrillaga vd.,1985).

Tipik bir ark fırınında 2.,3.,...9. mertebeli akım harmonikleri bulunur; en büyük harmonik bileşen temel bileşenin %30'u kadardır (Sundberg,1976). Harmonik bileşenlerden 6. ve daha yüksek mertebeli harmonikler için bu oran %5'in altında kalmaktadır. Harmonik derecesi büyüdükçe genlik değerleri küçülmekte ve genlik, temel bileşene göre 10. ve 11. harmoniklerde %2'nin altına düşmektedir. 12. ve daha yüksek mertebeli harmonikler ihmal edilebilir düzeyde kalmaktadır.

2.5 Gaz Deşarjlı Aydınlatma

Fluoresant, civa ark, neon, yüksek basınçlı sodyum lambalar v.b. gibi gaz deşarjlı aydınlatma elemanları; şebekeden harmonikler içeren akımların çekilmesine neden olurlar. Bu tür aydınlatma elemanlarının meydana getirdikleri harmonikler özellikle büyük şehir alanlarında daha çok hissedilirler. Bu tip lambaların elektriksel karakteristiği nonlineer olup akım geçişi esnasında negatif direnç karakteristiği gösterirler. Ev ve işyerlerinde yaygın kullanıma sahip bulunan floresant lambalar balastlarından ve gaz deşarjından kaynaklanan harmonik bileşenlerin meydana gelmesine sebep olmaktadır.

Üç fazlı sistemde faz-nötr gerilimle beslenen aydınlatmada 3. harmonik akımı nötr iletkeninden toplanarak geçer. Harmonik etkinliği açısından bakıldığında, floresant ile aydınlatmada tek mertebeli harmoniklerin büyüklüğü önemli oranda devreyi etkiler (Arrillaga vd.,1985; Grady ve Heydt, 1985).

Kompakt floresant lambalarda (KFL) kullanılan elektronik balastlar da, önemli harmonikler oluşturur. Yapılan testlerde 15 W elektronik balastlı bir KFL'nin gerilim harmoniklerinin temel bileşene oranı 3. harmonik için %65,5, 5.harmonikte %37, 7. harmonikte %30 ve 9. harmonikte %18,3 bulunmuştur (Çakır vd.,1997).

2.6 Statik VAR Kompanzatörler

Statik VAR kompanzatörler genel itibarı ile sinüsoidal dalganın belirli açılarla kesilmesine neden olur. Çalışma prensibi L ve C elemanları üzerinden kesilen bu dalgalar ile reaktif gücün ayarlanması esasına dayanır. İdeal olarak cevap gecikmesi olmaksızın sürekli reaktif güç ayarlaması yapabilirler. Bu kompanzatörlerin yapısında yarı iletken elemanlar bulunur. Tristör kontrollü olarak çalışan bu elemanlar tetikleme açısına ve iletim açısına bağlı olan darbe şekilleri meydana getirirler.

IGBT ile kademesiz olarak güç faktörünün düzeltilmesi ve harmoniklerin bertaraf edilmesi sağlanabilir (Kaşıkçı, 1997).

2.7 Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik sistemler harmonik üretme bakımından genel olarak konverterlerden kaynaklanan harmonik etkinliğe sahiptirler. Bu sistemler elektrik enerjisini fotovoltaik yoldan elde eden sistemler olup, ürettikleri doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek için konverterleri kullanırlar. Dolayısıyla dönüşüm esnasında yarı iletken elemanların sebep olduğu harmonikler söz konusu olmaktadır (Kocatepe ve Demir, 1998).

2.8 Bilgisayarlar

Hassas yüklerden biri olan bilgisayar sistemleri yalnızca bozucu etkilerden etkilenmekle kalmayıp aynı zamanda birer bozucu etki kaynağıdırlar. Bilgisayarların nonlineer yük karakteristikleri; güç sistemlerinde anormal gerilim düşümleri, nötr iletkenlerinin aşırı yüklenmesi ve hat gerilim distorsiyonları gibi bozucu etkilere neden olabilmektedir.

2.9 Kesintisiz Güç Kaynakları (UPS=Uninterruptible Power Supply)

Kesintisiz güç kaynaklarının yapılan ölçümler sonucu birer harmonik kaynağı oldukları görülmüştür. Bunun sebebi yapısında bulunan yarı iletken elemanlardır. Piyasada satılan UPS'lerin uygun filtre devreleri yardımı ile harmonik etkileri kaldırılmaya çalışılmıştır.

2.10 Elektrikli Lokomotifler

Harmoniğe neden olan kaynaklardan biri olan elektrikli lokomotifler genellikle tristörler ile kontrol edilirler. Bu nedenle sistem ve lokomotifler karşılıklı olarak birbirlerini etkiledikleri zaman büyük harmonik akımları ve rezonans aşırı gerilimleri meydana gelebilir (Yörükeren vd., 1995).



BÖLÜM 3

3. HARMONİKLERİN ENERJİ SİSTEMLERİNE ETKİLERİ

Harmonik akımları, harmonik kaynağından, en düşük empedansa doğru akma eğilimindedirler. Harmonik akım kaynağı tarafından görülen empedans, sistem kaynak empedansı ile sisteme paralel bağlı diğer yüklerin empedanslarının paralel eşdeğerlerinin toplamıdır. Genelde sistem kaynak empedansı, paralel bağlı yüklerin toplam empedansından çok daha düşüktür. Harmonik akımları, çok büyük miktarı sistem kaynağına doğru akmak üzere, empedans oranlarına göre bölünecektir. Daha yüksek mertebeli harmonik akımları ise, yüksek frekanslarda düşük bir empedans gösteren kondansatörlere doğru akacaktır.

Güç sisteminde gerilim harmonik bileşenler içerdiğinde bundan tüm yükler etkilenir. Akım, harmonik bileşenler içerdiğinde ise sadece harmonik akımı üreten yükler etkilenir. Gerilimdeki harmoniklerin nedeni, sistem empedansında akan harmonikli bir akımdır. Bu nedenle, gerilim harmoniklerini önlemenin yolu harmonik akımlarının akışını kontrol ederek gerilim harmoniklerine neden olabilecekleri yerlerden uzak tutmaktır.

Sistemin herhangi bir yerinde oluşan harmonik akımlarının her zaman sorunlara neden olacağı söylenemez. Güç sistemi herhangi bir önemli sorun oluşturmadan çok miktarda harmonik akımı taşıyabilir. Bir sorunun ortaya çıkması için harmonikli akımın yüksek bir empedans yolunda veya iletişim devrelerinde akması gerekir.

Harmonik içeren bir akım, yüksek bir empedans yolunda veya rezonans devresinde akarsa gerilimde harmonik bileşenler içermeye başlar. Bu, dolaylı bir etkidir. Akım harmoniklerinin doğrudan etkisi, akım yolundaki elemanlarda ek ısınma ve kayıplara yol açmasıdır.

Doğrusal olmayan bir elemanın akım-gerilim karakteristiği harmoniklere yol açar. Bu elemanlar sinüs biçimli bir gerilim kaynağına bağlandığında elemanın akımı, tam sinüs biçimli bir akım kaynağına bağlandığında ise elemanın gerilimi harmonik bileşenler

İçerecektir. Yani, doğrusal olmayan bir elemanın akım veya geriliminden herhangi birisi veya her ikisi birden tam sinüs biçimli olamaz.

Sistem kaynağının empedansı yük empedansına göre genelde çok daha düşük olduğundan, sistemdeki gerilim harmonik seviyeleri bazen izin verilebilir seviyeleri aşmasına rağmen genelde düşüktür. Sistemdeki akım dalga şekli yaklaşık olarak sabittir ve nonlinear yükler sabit harmonik akım kaynakları olarak düşünülebilirler.

Netice itibarı ile nonlinear yüklerin etkileri –öncelikle sistem empedansına –sistem karakteristiklerine bağlıdır.

Gerilim harmoniklerinin, etkinliği konusunda önemli bir kriter olan “Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)”

$$\%THD U = 100 \frac{\left(\sum_{n=2}^N U_n^2 \right)^{1/2}}{U_1} \quad (3.1)$$

olup U_1 temel bileşeni, U_2, U_3, \dots Fourier analizi sonucu bulunacak harmonik bileşenleri göstermektedir (Ay, 1996).

Nonlinear yükler tarafından üretilen harmonikler, güç sistemindeki tüm elemanları etkilerler. Harmonikler, elektrik makinaları, transformatörler ve enerji nakil hatlarında ilave harmonik akımların geçmesine dolayısıyla kayıpların artmasına neden olurlar. Bu durumda elektrik makinalarında, transformatörlerde ve enerji nakil hatlarında aşırı ısınmalar meydana gelebilir. Bazı durumlarda parçaların zarar görmesine ve devre dışı kalmasına neden olurlar (Aftar ve İnan, 1997).

3.1 Harmoniklerin Yolaçtığı Rezonans Olayları

Bilindiği gibi, endüktif reaktansın bulunmasında,

$$X_L = 2\pi fL \quad (3.2)$$

denkleminde yararlanılır. Dolayısıyla endüktif reaktans frekans ile doğru orantılı artar.

Kapasitif reaktans ise

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3.3)$$

denkleminde görüldüğü gibi frekans ile ters orantılıdır. Herhangi bir LC devresinde rezonans frekansında endüktif reaktans, kapasitif reaktansa eşit olur. Bunu

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3.4)$$

şeklinde gösterebiliriz. Buradan rezonans frekansı

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.5)$$

olur. Güç sistemine kompanzasyon amaçlı kondansatörler eklendiğinde, seri veya paralel rezonans oluşabilir. Bu durumda aşırı akım ve gerilimler ortaya çıkar.

Sistemin rezonans frekansı, harmonik frekanslarından birine yakın bir değerde olursa, yüksek seviyede harmonik akım ve gerilimleri ortaya çıkacaktır. Bu durumda, rezonansın oluştuğu harmonik mertebesi,

$$n = \frac{1}{2\pi f_1\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}} \quad (3.6)$$

olur.

Sistemdeki rezonans durumları, harmonik seviyelerini etkileyen çok önemli etkenlerdir. Seri rezonans harmonik akım akışı için düşük bir empedans göstermesine rağmen, paralel rezonans yüksek empedans gösterir. Şayet rezonans durumları bir sorun oluşturmaz ise, sistem önemli seviyelerdeki harmonik akımlarını taşıyabilir.

3.1.1 Paralel rezonans

Paralel rezonans olayı en çok karşılaşılan sorunlardan biridir. Doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonik frekanslarından birinin yakınında, kondansatör grupları ile sistem endüktansı arasında paralel rezonans oluşabilir. Paralel rezonans olayı sırasında kondansatör uçlarındaki gerilim aşırı yükseldiği için kondansatör zarar görebilir. Bu endüstriyel yüklerde ve sistemlerde yaygın olarak görülen bir olaydır.

Şebeke empedansı tamamen endüktif kabul edilerek rezonans frekansı,

$$f_p = f_1 \sqrt{\frac{S_K}{S_C}} \quad (3.7)$$

denklemleri ile ifade edilebilir. Burada,

f_p =Paralel rezonans frekansı

f_1 =Temel frekans

S_K =Şebekenin kısa devre gücü

S_C =Kapasitenin nominal gücü, olarak gösterilmiştir.

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

3.1.2 Seri rezonans

Seri rezonans, rezonans frekansı ile uyumlu olan harmonik akımlarına düşük bir empedans yolu sağlar. Bu durumda, harmonik akımlarda herhangi bir büyüme söz konusu olmaz. Ancak harmonik akımları şebekenin istenmeyen kısımlarına akabilirler. Bunun sonucunda iki tür sorun ortaya çıkabilir:

- Rezonans devresi ile hat boyunca seri bağlantılı devreler varsa, önemli ölçüde parazitler oluşabilir,
- Rezonans kolundaki harmonik akımların yoğunluğu nedeniyle kondansatör grubunda aşırı gerilim harmonikleri oluşabilir.

Seri rezonans frekansı,

$$f_s = f_1 \sqrt{\frac{S_t}{S_c Z_t} - \frac{S_1^2}{S_c^2}} \quad (3.8)$$

denklemini ile bulunur. Burada,

S_t =Transformatörün nominal gücü

Z_t =Transformatörün p.u empedansını

S_1 =Omik yükün gücünü, göstermektedir.

Rezonans oluşması sistemde arıza ve hasarlar meydana getirebilir. Harmonik rezonansının etkisi sistem yükünün az olduğu zamanlarda, örneğin gecenin geç saatleri ve tatil günlerinde, daha fazladır. Yük miktarı arttıkça, akımın akabileceği empedans yolları küçülür. Dolayısıyla rezonans nedeni ile oluşan harmonik artışı zayıflar. Birçok endüstriyel tesiste olduğu gibi, devreler daha az yüklendiğinde ve yüklerin tümü motor olduğunda, bunlar, rezonans nedeni ile oluşan harmoniklere karşı daha duyarlı olurlar.

3.2 Transformatörler Üzerindeki Etkiler

Gerilim harmonikleri, transformatörlerde fuko ve histerizis akımlarından dolayı demir

kayıplarını artırır, yalıtımın zorlanmasına neden olur. Akım harmonikleri ise bakır kayıplarını artırır.

Transformatörün endüktansı ile transformatlere bağı bir tüketicinin kapasitansı arasında rezonans meydana gelebilir.

Ayrıca, harmonikler transformatlelerde fazla ısınmalar meydana getirebilir (Ertan, 1994). Diğer bir önemli sorun da, transformatörün dengesiz bir yükü beslemesidir. Yük akımı doğru akım bileşeni içeriyorsa, transformatör manyetik devresinin doyması sonucu uyarma akımına ait tüm harmonik bileşenlerin seviyesi önemli ölçüde artacaktır.

Harmonik akım ve gerilimlerinin oluşturduğu transformatör kayıpları frekansa bağlıdır. Manyetik çekirdekdeki alternatif manyetik alanın yön değıştirmesi, yüksek frekanslarda daha hızlı olduğundan manyetik çekirdekdeki histerizis kayıpları artar. Ayrıca zamanla değışen manyetik akı, iletkenleri kestikçe değışken manyetik alan, çekirdek dilimlerinde eddy ve fuko akımları oluşturur. Bu da ek kayıplara neden olur. Yani frekans arttıkça transformatör kayıpları artar. Bu yüzden transformatörün ısınmasında yüksek frekanslı harmonik bileşenler düşük frekanslı harmonik bileşenlerden daha önemlidir (Attar ve İnan, 1997).

3.3 Döner Makinalar Üzerindeki Etkiler

Harmonikler, motorun yol alması esnasında moment karakteristiğı üzerinde beklenmeyen kötü etkiler meydana getirir, gürültülerin üretilmesine yol açar. Örneğın, stator oluk sayısı rotor oluk sayısına eşit olan sincap kafesli asenkron motorun moment karakteristiğı öylesine bozulur ki motor vınlr ve harekete geçemez. Bundan başka stator ve rotor olukları sayısı oranının başka değıerlerinde motor yol alır, fakat senkron hızdan çok küçük bir hızda takılır ve stabil olarak çalışmaya devam eder. Diğer bazı hallerde ise normal çalışma hızının altında büyük ölçüde gürültüler ve titreşimler meydana gelir (Sarıoğlu, 1975).

Harmoniklerin oluşturduğu döner alanların hızları, harmonik mertebesi ile ters orantılıdır.

Toplam momente 5. ve 11. harmonikler frenleme etkisi yaparken; 1.,7. ve 13. harmonikler birbirini desteklemektedir. Moment ve kayıplara sebep olan en önemli harmonikler 1,5,7,11,13 olarak bilinir. Daha yüksek mertebeli harmonikler düşük gerilim değerlerine sahip olduklarından ihmal edilirler (Mergen ve Kıyı, 1993).

Harmonik etkilerini azaltmak yada yok etmek için:

- Stator ve rotor oluk sayıları uygun seçilir.
- Rotor olukları motor eksenine göre belli açıda eğik yapılır.
- Hava aralığı büyütülür.

3.4 İletim Hatları Üzerindeki Etkiler

Akım harmonikleri iletim hattında ek I^2R kayıpları oluşturur. Diğer taraftan harmonik akımların hat boyunca çeşitli devre elemanları üzerinde oluşturduğu gerilim düşümleri de ayrı bir etkidir. n. akım harmoniğinin oluşturduğu gerilim düşümü,

$$(\Delta V)_n = I_n \cdot Z_n \quad (3.9)$$

olarak yazılabilir.

Kablolu iletim durumunda harmonik gerilimler, tepe gerilim değerleri ile orantılı olarak dielektrik zorlanmayı arttırmırlar. Buda kablunun kullanım ömrünü kısaltır. Aynı zamanda hata sayısını ve bu nedenle de onarım masraflarını arttırır. Aşırı gerilimler nedeni ile yalıtkan kablolarda delinme meydana gelebilir. Harmoniklerin korona başlangıç ve sönme seviyeleri üzerindeki etkileri, gerilimin tepeden tepeye değerinin bir fonksiyonudur. Tepe gerilimi ise, temel ve harmonik gerilim arasındaki faz ilişkisine bağlıdır.

3.5 Kondansatörler Üzerindeki Etkiler

Kondansatörün kapasitif reaktansı, harmonik frekansına bağlı olarak değişir. Yüksek frekanslı harmoniklerde küçülür. n. harmonik için kapasitif reaktans $1/n\omega C$ ve bu frekanstaki akımın tepe değeri,

$$I_{nm} = V_{nm} \cdot n \cdot \omega \cdot C \quad (3.10)$$

olacaktır. O halde, bir kondansatörün uçlarındaki gerilim,

$$v = V_{1m} \cdot \sin \omega t + V_{2m} \cdot \sin 2\omega t + \dots \quad (3.11)$$

biçiminde ise, bu kondansatörden geçen akım,

$$i = V_{1m} \cdot \omega \cdot C \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) + V_{2m} \cdot 2 \cdot \omega \cdot C \cdot \sin(2\omega t + 90^\circ) + \dots \quad (3.12)$$

olacaktır.

Bu bağıntılardan görüldüğü gibi, akım dalgasındaki harmonik içeriği yüzdesi, gerilim dalgasındaki yüzdeden daha büyüktür. Örneğin, n. harmonik için, n kat daha büyüktür.

Örneğin 3.,5.,7. harmoniklerin bulunması durumunda bir kondansatörden geçen akımın efektif değeri,

$$I_C = \sqrt{I_{C1}^2 + I_{C3}^2 + I_{C5}^2 + I_{C7}^2} \quad (3.13)$$

olarak hesaplanır.

Sonuç olarak, yüksek frekanslı harmoniklerin bulunduğu şebekelerde, kondansatörlerden geçen akım artar. Güç kondansatörleri, ilgili standartlar gereği, nominal çalışma akımının 1,3 katında sürekli olarak çalışabilecek şekilde imal edilirler. Eğer sürekli çalışma akımı harmonikler nedeni ile bu sınırın üzerine çıkarsa kondansatörün çalışma ömrü kısalmaktadır (Ertan, 1994).

3.6 Röleler Üzerindeki Etkiler

Röleler, genellikle temel akım ve gerilime göre tasarlanırlar. Gerilimin tepe değerine, akım veya gerilimin sıfır geçişlerine göre çalışan röleler, harmonik distorsiyonlardan çeşitli

şekillerde etkilenirler. Oluşabilecek harmoniklerin süzüldüğü veya ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilirse; elektromanyetik röle uygulamalarında yüksek harmoniklerin çok fazla etkinliğinin olmadığı söylenebilir (Arrillaga vd., 1985). Fakat hususiyile mesafe korumalarında, harmonik akımları (öncelikle 3. Harmonik) büyük oranlarda ölçme-değerlendirme hatalarına ve toprak rölelerinin hata yapmasına neden olabilmektedir. Dijital mesafe koruma sistemlerinde, akım ve gerilim dalgalarının mutlaka filtre edilmesi gerekmektedir. Röleler harmoniklerden özellikle şu şekillerde etkilenir;

-Röleler daha büyük tepe değerleri ile yavaş çalışmak yerine, daha küçük tepe değerleri ile hızlı çalışma eğilimi gösterirler.

-Statik rölelerin, aşırı akım ve gerilim rölelerinin, çalışma karakteristiklerinde önemli değişiklikler gözlenir.

-Harmonik bileşene bağlı olarak rölelerin çalışma momentlerinin yönü değişebilir.

-Çalışma zamanları, ölçülen büyüklükteki frekansın bir fonksiyonu olarak oldukça büyük bir farklılık gösterebilir.

-Dengeli empedans röleleri hem ayar ötesi hem ayar gerisi çalışma gösterebilirler.

-Fark röleleri yüksek hızla çalışmayabilirler.

Yapılan testlerde, %20'lik harmonik seviyesine kadar rölelerde fazla bir işletme probleminin oluşmadığı görülmüştür.

3.7 Ölçü Aletleri Üzerindeki Etkiler

Ölçü aletlerinin kalibrasyonu, tam sinüsoidal dalgalara göre yapılır. Gerilim harmonikleri, gerilimin karesi ile orantılı dönme momentine göre ölçüm yapan sayaçlarda, bazı kayıt hatalarına yol açmaktadır. Şebeke frekansındaki enerjileri okumak için tasarlanan konvansiyonel sayaçların, harmoniklerin varlığında daha yüksek değerler okuyabildikleri görülmüştür. Ancak bu hata, gelişmiş elektronik sayaçlarda görülmemektedir.

Elektrik sayaçları, temel bileşene göre çalışırlar. Diskte oluşan moment, akı ile diskte endüklenen girdap akımının çarpımına eşittir. Her iki bileşen de yüksek frekanslarda orantısız olarak azalır. Bu da elektrik sayacının temel frekansın üzerindeki frekanslarda hatalı ölçme yapmasına sebep olur. Harmonik distorsiyonun oluşturduğu faz

dengesizlikleri de bu elemanların hatalı çalışmalarına neden olur. Önemli hataların olmaması için harmonik seviyesi %20'nin altında olmalıdır.

3.8 Güç Elektroniği Elemanları Üzerindeki Etkiler

Güç elektroniği elemanları, harmonik distorsiyona karşı çok duyarlıdır. Bu elemanların düzenli çalışmaları gerilim sıfır geçişlerinin doğru belirlenmesine bağlıdır. Sıfır geçiş noktaları, bir çok elektronik kontrol devresi için kritik noktalardır. Harmonik bozulmanın bu noktaları kaydırması sonucu oluşan komütasyon hataları, elemanın çalışmasını olumsuz yönde etkiler.

Gerilimin tepe değerine göre cevap vererek çalışan, diyot gibi elemanlarda sorunlar çoğalabilir. Eleman, dalga şeklinin tepe değerine göre duyarlı olduğundan, harmoniklerin varlığında düzenli çalışmayabilir.

Söndürüm bobinlerinin, yüksek harmonikler sebebi ile tam olarak çalışmaması sonucu devre kesicileri akımı kesemezler. Sönüm bobini verimsiz çalışırsa arkın uzamasına ve kesicinin görevini yapamamasına neden olur. Benzer sorunlar diğer akım kesme aygıtlarında da oluşabilir.

Anahtarlama aygıtlarının akımı kesebileceği harmonik akım seviyeleri hakkında belirli standartlar yoktur. Günümüzde tüm kesme testleri anma besleme frekansında yapılmaktadır.

3.9 İletişim Hatları Üzerindeki Etkiler

Harmonik akımlarının iletişim hatlarındaki en yaygın etkisi meydana getirdiği parazitler ve gürültüdür. Haberleşme devrelerindeki gürültü, iletim kalitesini azaltır; iletilen sinyalle girişim yapabilir veya gönderilen bilgide kayba neden olabilir.

Enerji nakil hatları üzerinden akan harmonik akımların, yakından geçen telefon hatlarını manyetik kuplaj nedeni ile etkilediği ve bu etkinin yüzlerce kilometre öteye taşınabildiği bilinmektedir (Gürsel, 1999).

3.10 Sigortalar Üzerindeki Etkiler

Yüksek seviyedeki harmonik akımları, sigortaların akım-zaman karakteristiklerinde değişmelere ve dolayısıyla istenmeyen çalışma biçimlerine neden olabilirler. Harmonikler, minimum erime zamanlarını da azaltabilirler (Attar ve İnan, 1997).

Diğer bazı etkilerde şunlardır:

- Bilgisayarlar harmoniklere karşı çok duyarlıdır. Çeşitli üretici firmalar tarafından harmoniklere sınırlar koyulmuştur.
- Harmonikler tv görüntü kalitesini bozabilirler.
- Harmonikler akım transformatörünün çevirme oranını etkilerler.

BÖLÜM 4

4. HARMONİKLERİN ANALİZİ

4.1 Fourier Analizi

$$\frac{a_0}{2} + a_1 \cos x + b_1 \sin x + a_2 \cos 2x + b_2 \sin 2x + \dots \quad (4.1)$$

şeklinde bir seriye trigonometrik seri denir. Bu seri daha kısa olarak,

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{v=1}^{\infty} (a_v \cos vx + b_v \sin vx) \quad (4.2)$$

şeklinde gösterilebilir. a_0 , a_v ve b_v 'ler trigonometrik serinin katsayılarıdır ($v=1,2,3,\dots$) 2π periyodlu $f(x)$ fonksiyonunun $(-\pi, \pi)$ aralığında yakınsak bir trigonometrik seri ile temsil edilmiş olduğunu farzedelim. Yani;

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{v=1}^{\infty} (a_v \cos vx + b_v \sin vx) \quad (4.3)$$

olduğunu kabul ediyoruz.

Birinci taraftaki fonksiyonun integralinin (4.3) serisinin terimlerinin integrallerinin toplamına eşit olduğunu düşünelim. İlk olarak a_0 'ı hesaplamak üzere (4.3) ifadesinin her iki tarafını $-\pi$ 'den $+\pi$ 'ye kadar terim terim integrallerini hesaplayalım. Bu takdirde;

$$\int_{-\pi}^{+\pi} f(x) dx = \int_{-\pi}^{+\pi} \frac{a_0}{2} dx + \sum_{v=1}^{\infty} \left[a_v \int_{-\pi}^{+\pi} \cos vx dx + b_v \int_{-\pi}^{+\pi} \sin vx dx \right] \quad (4.4)$$

elde edilir. İkinci taraftaki her bir integrali hesaplarsak;

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \frac{a_0}{2} dx = \pi \cdot a_0 \quad (4.5)$$

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \cos vx dx = \frac{\sin vx}{v} \Big|_{-\pi}^{+\pi} = 0 \quad (4.6)$$

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \sin vx dx = -\frac{\cos vx}{v} \Big|_{-\pi}^{+\pi} = 0 \quad (4.7)$$

bulunur. Buna göre,

$$\int_{-\pi}^{+\pi} f(x) dx = \pi \cdot a_0 \quad (4.8)$$

ve buradan da ,

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) dx \quad (4.9)$$

elde edilir. Diğer katsayıları hesaplamak için evvela aşağıdaki yardımcı integralleri hatırlayalım. v ve k tamsayılar olarak;

$v \neq k$ ise

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \cos vx \cos kx dx = 0 ; \int_{-\pi}^{+\pi} \cos vx \sin kx dx = 0 ; \int_{-\pi}^{+\pi} \sin vx \sin kx = 0 \quad (4.10)$$

'dir.

$v = k$ ise

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \cos^2 vx dx = \pi ; \int_{-\pi}^{+\pi} \cos vx \sin vx dx = 0 ; \int_{-\pi}^{+\pi} \sin^2 vx dx = \pi \quad (4.11)$$

dir.

Bunlar yardımıyla (4.3) ifadesinin a_v ve b_v katsayılarını hesaplayabiliriz. $k \neq 0$ olarak a_v 'yi hesaplamak için (4.3) ifadesinin her iki tarafını terim terim $\cos kx$ ile çarpalım.

Böylece;

$$f(x) \cos kx = \frac{a_0}{2} \cos kx + \sum_{v=1}^{\infty} (a_v \cos vx \cos kx + b_v \sin vx \cos kx) \quad (4.12)$$

elde edilir. Eşitliğin her iki tarafının $-\pi$ 'den $+\pi$ 'ye kadar integralini alalım.

$$\int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \cos kx dx = \frac{a_0}{2} \int_{-\pi}^{+\pi} \cos kx dx + \sum_{v=1}^{\infty} \left[a_v \int_{-\pi}^{+\pi} \cos vx \cos kx dx + b_v \int_{-\pi}^{+\pi} \sin vx \cos kx dx \right] \quad (4.13)$$

Sağ taraftaki terimlerden a_v katsayılı olanı hariç, diğerleri $v=k$ olması durumunda yukarıda hatırlattığımız integrallere göre sıfır olacağından

$$\int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \cos vx dx = a_v \int_{-\pi}^{+\pi} \cos^2 vx dx = \pi a_v \quad (4.14)$$

ve buradan da ,

$$a_v = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \cos vx dx \quad (4.15)$$

elde edilir.

b_v katsayılarını belirtmek içinde (4.3) eşitliğinin her iki tarafını $\sin kx$ ile çarpalım ve her terimin $-\pi$ 'den $+\pi$ 'ye kadar integrallerini hesaplayalım. Bu takdirde;

$$\int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \sin kx dx = \frac{a_0}{2} \int_{-\pi}^{+\pi} \sin kx dx + \sum_{v=1}^{\infty} \left[a_v \int_{-\pi}^{+\pi} \cos vx \sin kx dx + b_v \int_{-\pi}^{+\pi} \sin vx \sin kx dx \right] \quad (4.16)$$

elde edilir. Buradan da sağ taraftaki terimlerden b_v katsayılı olanı hariç hepsi $v=k$ olması durumunda yukarıda verdiğimiz yardımcı integrallere göre sıfır olacağından;

$$\int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \sin vx dx = b_v \int_{-\pi}^{+\pi} \sin^2 vx dx = \pi b_v \quad (4.17)$$

ve buradanda,

$$b_v = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \sin vx dx \quad (4.18)$$

elde edilir.

(4.9), (4.15) ve (4.18) formülleri ile tanımlı katsayılara $f(x)$ fonksiyonunun Fourier katsayıları ve bu katsayılarla oluşturulmuş (4.1) trigonometrik serisine de $f(x)$ fonksiyonunun Fourier serisi denir.

4.1.1 Fourier serisine açılabilme şartları

Herhangi bir periyodik dalganın Fourier serisine açılabilmesi için “Dirichlet Koşulları” olarak bilinen şartları sağlaması gerekir. Bu şartlar şunlardır:

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

Elektrik enerji sistemlerindeki dalga şekilleri her zaman için bu koşulları sağladığından dolayı Fourier serisine açılmaları 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 şu şekilde yazılır;

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots + a_v \cos v\omega t \\ + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + \dots + b_v \sin v\omega t \quad (4.19)$$

aynı denklemi kısaca yazacak olursak;

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{v=1}^{\infty} (a_v \cos v\omega t + b_v \sin v\omega t) \quad (4.20)$$

olur. Burada periyot T olacağına göre integralleri (0,T) veya (-T/2, T/2) aralıkları için hesaplamak gerekir. Bu durumda a_0 , a_v ve b_v değerlerini veren formüller,

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (4.21)$$

$$a_v = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos v\omega t dt \quad (4.22)$$

$$b_v = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin v\omega t dt \quad (4.23)$$

şeklini alır.

Aynı frekanstaki sinüs ve kosinüs terimleri bir faz açısı ile birtek sinüs yada kosinüs terimi altında toplanabilirler. Böylece trigonometrik serilerin iki değişik şekli ortaya çıkar;

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{v=1}^{\infty} c_v \cos(v\omega t + \theta_v) \quad (4.24)$$

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{v=1}^{\infty} c_v \sin(v\omega t + \varphi_v) \quad (4.25)$$

$c_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$ terimine $f(t)$ fonksiyonunun birinci harmoniği yada temel dalga denir. Bu durumda aşağıdaki eşitlikler yazılabilir;

$$c_v = \sqrt{(a_v^2 + b_v^2)} \quad (4.26)$$

ifadesi harmoniğin genliğini,

$$\varphi_v = \tan^{-1}(b_v/a_v) \quad (4.27)$$

ise faz açısını verir.

Örneğin sinüsoidal olmayan bir gerilimin zaman domeni denklemi,

$$v(t) = V_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1) + V_{m2} \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + V_{mv} \sin(v\omega t + \varphi_v) \quad (4.28)$$

yazılacak olursa, burada;

V_{m1} , temel dalganın, V_{m2}, \dots, V_{mv} , harmoniklerin genlikleri; w , temel dalganın, $2w, \dots, vw$, harmoniklerin açısal frekansları; φ_1 , temel dalganın, $\varphi_2, \dots, \varphi_v$, harmoniklerin faz açılarıdır.

Uygulamalarda serinin genellikle ilk üç yada dört terimi ele alınır. Böylece elde edilecek efektif değerler ideale çok az hata ile yaklaşmış olurlar ve hesaplar kolaylaşır.

Periyodik bazı dalga şekilleri bazen yalnızca sinüs veya kosinüs terimlerini; bazen de sinüs, kosinüs veya her iki tür terimlerin tek harmoniklerini içerebilirler. Bu, dalga şekilleriyle ilgili bazı simetri türlerinin sonucudur. Böyle simetrilerin önceden farkedilmesi, seriler bulunurken yapılacak hesaplamaları oldukça basitleştirir. Bu amaçla aşağıdaki tanımlar önemlidir.

a) T periyoduna göre devirli bir $f(x)$ fonksiyonu, birbirinin aynı fakat ters işaretli iki yarım periyottan oluşmuş ise $f(x) = -f(\pi+x)$ şartı sağlanır. Bu durumda yarı-dalga simetrisi vardır denilir. Dalga şekli yarı-dalga simetrisine sahip ise, seride yalnızca tek mertebeli harmonikler bulunur. Böylece açılım,

$$f(t) = a_1 \cos \omega t + a_3 \cos 3\omega t + \dots + b_1 \sin \omega t + b_3 \sin 3\omega t + \dots \quad (4.29)$$

şeklini alır.

b) Periyodik fonksiyonun değişimini gösteren eğri (a)'daki şartı sağlamakla beraber aynı zamanda, eğrinin bir yarı periyotluk kısmı, 1/4 periyoda karşılık gelen noktadan geçen bir düşey eksene göre simetrik ise, $f(x)=f(\pi-x)$ şartı sağlanır. Bu durumda seride yalnızca tek mertebeli sinüs fonksiyonları bulunur. Dalga şeklinin açılımı,

$$f(t) = b_1 \sin \omega t + b_3 \sin 3\omega t + \sin 5\omega t + \dots \quad (4.30)$$

olur. Bu harmoniklerden 3. ve 3'ün katları olan 9.,15,.. v.b. gibi harmoniklerin R, S, T fazlarındaki değerleri arasındaki faz farkları, 120° 'nin ve 240° 'nin 3 katına veya 3'ün katlarına eşit olduklarından, bu faz farkları daima 360° 'nin tam sayılı katlarına eşittir. Bu yüzden 3. ve 3'ün katlarına eşit olan harmonikler, daima R, S ve T fazlarında eşit fazlıdır ve cebirsel toplanırlar. Bu nedenle bunlara sıfır bileşeni de denilebilir (Bayram, 1984).

c) Verilen fonksiyon $f(x)=f(-x)$ koşulunu sağlıyorsa çift fonksiyondur. Bu durumda eğride düşey eksene göre simetri vardır. Bu tip fonksiyonlarda sadece kosinüslü terimler bulunur. Serinin açılımı,

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + a_3 \cos 3\omega t + \dots \quad (4.31)$$

şeklinde olur.

d) Bir fonksiyon $f(x)=-f(-x)$ koşulunu sağlıyorsa tek fonksiyondur. Açılımında sadece sinüslü terimler mevcuttur. Fonksiyon aşağıdaki şekilde açılır,

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + b_3 \sin 3\omega t + \dots \quad (4.32)$$

4.1.2 Enerji sistemlerinde harmonikler ile ilgili bazı tanımlar

Maksimum harmonik mertebesi N olan, nonsinüsoidal akım ve gerilimin denklemleri şu şekilde yazılabilir,

$$i(t) = I_0 + \sum_{v=1}^N I_{mv} \sin(v\omega t + \psi_v) \quad (4.33)$$

$$v(t) = V_0 + \sum_{v=1}^N V_{mv} \sin(v\omega t + \phi_v) \quad (4.34)$$

Burada I_{mv} =Akım bileşeninin maksimum değeri, V_{mv} =Gerilim bileşeninin maksimum değeridir. Buna göre akımın efektif değeri,

$$I = \sqrt{(I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots)} \quad (4.35)$$

gerilimin efektif değeri ise,

$$V = \sqrt{(V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots)} \quad (4.36)$$

şeklinde yazılabilir.

Harmonikli bir gerilimin veya akımın efektif değeri, efektif değer ölçen normal ölçü aletleri ile ölçülebilir. Ancak yumuşak demirli ölçü aleti kullanıldığı takdirde, gerilimde veya akımda söz konusu olabilen en büyük harmoniklerin, ölçü aletinin frekans spektrumunun içinde kalmasına dikkat edilmelidir. Fakat en iyisi bunun için demir ihtiva etmeyen elektrodinamik ampermetre ve voltmetre kullanılmalıdır.

Aktif güç,

$$P = V_0 I_0 + \sum_{v=1}^N V_v I_v \cos(\phi_v + \psi_v) \quad (4.37)$$

olup, burada V_v ve ϕ_v gerilimin efektif değeri ve açısı, I_v ve ψ_v akımın efektif değeri ve açısıdır.

Reaktif güç,

$$Q = V_0 I_0 + \sum_{v=1}^N V_v I_v \sin(\varphi_v + \psi_v) \quad (4.38)$$

ve zahiri güç,

$$S = V \cdot I = (V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots)^{1/2} \cdot (I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots)^{1/2} \quad (4.39)$$

yazılabilir.

$$\text{GüçFaktörü} = \text{AktifGüç} / \text{ZahiriGüç} = P / S \quad (4.40)$$

Distorsiyon gücü,

$$D = \sqrt{(S^2 - P^2 - Q^2)} \quad (4.41)$$

tanımları verilebilir.

BÖLÜM 5

5. HARMONİKLERİN KAYIPLARA ETKİLERİ

5.1 Joule Kayıpları

Harmonikli akım akan devreler şebekeden

$$S = \left[\sum_{n=1}^N S_n^2 \right]^{1/2} \quad (5.1)$$

şeklinde ifade edilen görünen gücü çekerler. Burada S_n , n. harmoniğe ait görünen güçtür. n=1 için temel bileşen (yük) gücü olduğuna göre şebekeden çekilen harmonik güç

$$S_n = \left[\sum_{n=2}^N S_n^2 \right]^{1/2} \quad (5.2)$$

olacaktır. Omik değeri R olan bir iletkenin geçen ve N tane harmoniği içeren bir akımın ani değeri

$$i(t) = \sum_{n=1}^N i_n(t) \quad (5.3)$$

olmak üzere efektif değerinin

$$I = \left[\sum_{n=1}^N I_n^2 \right]^{1/2} \quad (5.4)$$

olduğu bilinmektedir.

Bu durumda n. harmonik için “akım harmoniği oranı” tanımlanırsa

$$\alpha_n = I_n / I_1 \quad (n = 2,3,\dots,N) \quad (5.5)$$

ve üç fazlı sistemde oluşacak toplam joule kayıpları

$$P_k = 3 \sum_{n=1}^N R_n \cdot I_n^2 \quad (5.6)$$

yazılabilecektir. Buradan I_n , n. harmonik akımın efektif değeri olup R_n , hattın n. harmonik frekansındaki direncini gösterir. Direnç değerinin frekansla artması ihmal edilirse,

$$P_k = 3.R.I^2 = 3.R.I_1^2 \left(1 + \sum_{n=2}^N \alpha_n^2\right) \quad (5.7)$$

şeklini alır. Formülden de görüldüğü gibi, akım harmoniği arttıkça temel bileşen omik kayıplarına ilave olan kayıplarda etkin olmaktadır.

5.1.1 Deri etkisi (skin-effect)

Bilindiği gibi elektrik devrelerinde kullanılan her bir iletkenin bir direnci vardır. Bu direnç kendisini enerji sistemlerinde gerilim düşümü ve ısı şeklinde aktif kayıplar ile göstermektedir. İletkenlerin doğru akımdaki direnci, iletkenin boyu ve öz direnci ile doğru orantılı, iletkenin kesiti ile de ters orantılıdır. Bir iletkenin doğru akıma gösterdiği zorluk ile alternatif akıma gösterdiği zorluk farklı olup, alternatif akımdaki daha büyük olmaktadır.

Bu artışın sebebi olarak, deri etkisi olarak bilinen skin-effect ve yakınlık etkisi olarak bilinen proximity-effect'dir. Çevredeki iletkenlerin magnetik akı halkalamaları sebebi ile ortaya çıkan proximity-effect, akımın iletken kesiti üzerinde muntazam dağılamamasından dolayı meydana gelen skin-effect'den daha az etkilidir. Bilhassa hava hatlarında bu etki daha da azalmakta ve deri etkisi yanında ihmal edilebilmektedir (Çakır, 1989).

Enerji sistemi analizlerinde iletkenlerin deri etkisi genellikle ihmal edilmektedir. Deri etkisi iletkenin kesiti ve akan akımın frekansı ile orantılı olarak arttığından iletkenden özellikle harmonikli akımlar akması ve büyük kesitlerin söz konusu olması halinde etkisini

dahada belirginleştirmektedir. Bu durumda iletkenin doğru akım direncine harmonik direnci de ilave olmaktadır.

Bütün bu etkilerin enerji sisteminde teknik ve ekonomik etkileri bulunduğundan bunların da analize dahil edilmeleri gerçek sonuçlara ulaşma bakımından gerekmektedir (Kocatepe ve Gülez, 1995).

Deri etkisini yansıtan bağıntılar 1920'li yıllardan başlayarak çoğunlukla ölçüm ve test sonuçlarına dayanan ampirik ifadelerdir:

$$x = 1.585.10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{f}{R_0}} \quad (5.8)$$

olmak üzere

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

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

'dir. Burada,

$$K_1 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{x^4}{48}} + 1 \right] \quad (5.9)$$

$$K_2 = \left[\frac{x}{2.828} + 0.26 \right] \quad (5.10)$$

R_0 =Doğru akım direnci

R =Deri etkisi dahil direnç

olarak tanımlanmıştır.

5.2 Dielektrik Kayıpları

Harmonikli gerilim uygulanan bir kapasite elemanında ki kayıplar,

$$\sum_{n=1}^N C(\tan \delta) \omega_n V_n^2 \quad (5.11)$$

şeklinde hesaplanabilir (Arrillaga vd., 1985).

Burada,

$$\tan \delta = 1/R\omega C \quad (5.12)$$

ile ifade edilen kayıp faktörüdür. Kayıp faktörü yüksek gerilim kondansatörlerinde yaklaşık olarak 0.004 ile 0.006 arasında değişir. $\omega_n = 2\pi f_n$, n. harmonik için açısal frekans olup, V_n , n. harmoniğin efektif değeridir.

5.3 Demir Kayıpları

Boşta çalışan bir transformatörün şebekeden çektiği akım, bilindiği gibi iki bileşenden teşekkül eder. Bunlardan biri daha büyük olan reaktif akım ve diğeri nispeten daha küçük olan aktif akım bileşenleridir. Transformatör boşta çalışma akımının reaktif bileşeni magnetik alan meydana getirmeye yarar ve mıknatıslanma akımı olarak adlandırılır. Buna mukabil aktif bileşenin küçük bir kısmı demir kayıplarını karşılar, çünkü demirde değişken bir magnetik akı meydana getirmek, ancak bir kayıp enerji sarfetmekle olur. Demir kayıpları histerisiz ve fuko kayıplarından teşekkül eder (Çakır, 1985).

5.3.1 Histerisis kayıpları

Demir çekirdeğin mıknatıslanmasının değiştirilmesi için lüzumlu olan kayıp enerjisidir. Fiziksel bakımdan ısı olarak görülür (meydana çıkar).

Transformatörün magnetik akısı değişken bir akı olduğundan, demir çekirdekte her bir periyotta iki defa magnetik akının yönü değişir ve böylece bir histerizis çevrimi tamamlanmış olur. Bundan dolayı histerizis kayıpları olan P_H , f frekansı ile orantılıdır. Bu da gösteriyor ki harmonikli gerilimler; frekansları yüksek olduğu için histerizis kayıplarını arttırmalar. Histerizis kayıpları hakkında Steinmetz' in (1917) vermiş olduğu formül,

$$P_H = \eta \cdot f \cdot B^{1.6} \quad (5.13)$$

'dır. Burada B (Gauss) endüksiyon, η ise demir cinsine bağlı sabit bir değerdir. Ancak bu formül 10000 Gauss'un altındaki endüksiyon değerleri için geçerlidir. Çünkü bu değer in üstündeki endüksiyonlarda gerçektekinden daha küçük histerizis kayıpları verir.

10000 Gauss' un üstündeki endüksiyon değerlerinde hakikata daha yakın sonuçları Richter' in (1951) vermiş olduğu formülle elde etmek mümkündür. Richter' in özgül histerizis kaybı hakkında vermiş olduğu formül şudur;

$$P_H = a \cdot f \cdot B + b \cdot f \cdot B^2 \quad (5.14)$$

10000 Gauss' un üstündeki endüksiyon değerlerinde birinci ifade ($a \cdot f \cdot B$), ikinci ifade' ye ($b \cdot f \cdot B^2$) göre ihmal edilebileceğinden, yeter bir duyarlılıkla özgül histerizis kaybı için,

$$P_H = \sigma_H \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \quad \text{watt / kg} \quad (5.15)$$

yazılabilir. Buradaki σ_H malzeme sabitidir. Bu değer kullanılan demir levhanın (saç) cinsine ve kalınlığına göre değişir. Örneğin 0.5 mm kalınlığında ki yüksek alaşımlı saçın σ sabiti 2.85 iken, aynı kalınlıkta ki normal saçın σ sabiti 4.4'tür. Aynı şekilde 0.35 mm kalınlığında yüksek alaşımlı saçın σ sa biti 2.4 iken, normal saçınki 4.7' dir. Bu değerler bize kullanılan malzemenin cinsinin ve kalınlığının, histerizis kayıpları üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

(5.15) denkleminde elde edilecek değer, 1 kg demir' de watt cinsinden meydana gelecek özlül histerizis kayıplarıdır. Demir çekirdeğin kg ağırlığı G_{fe} ile gösterilirse, denklem Şu hale gelir;

$$P_H = G_{fe} \cdot \sigma_H \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \quad \text{watt} \quad (5.16)$$

5.3.2 Fuko akımı kayıpları

Periyodik akı değişiklikleri neticesinde demir çekirdekte fuko akımları meydana gelir. Bu akımlar kendilerini meydana getiren magnetik akıya zıt yönde bir akı meydana getirirler ve bunu karşılamak için munzam mıknatıslanma akımına ihtiyaç gösterirler. Bundan başka fuko akımları demir çekirdekte omik kayıplar meydana getirirler, buna fuko akımı kayıpları denir. Bunları mümkün merteye alçak tutabilmek için, bilindiği gibi transformatörün çekirdeği saçlardan (kalınlığı 0.35 ila 0.5mm olan) yapılır. Bu saçlar araya konan kağıt tabakalarla yahut laklamak suretiyle birbirlerinden izole edilirler. Bundan başka demirin elektriksel iletkenliğini azaltmak için silisyumlu saçlar kullanılır. Fuko akımı kayıpları akımın karesi ile orantılı olarak artarlar; böylece endüksiyonun ve frekansın karesi ile orantılıdırlar. Kuvvet çizgilerinin eşit bir şekilde yayılmış oldukları bir demir ortamda ortaya çıkan fuko akımı kayıpları aşağıdaki Şekilde hesap edilirler,

$$P_w = \sigma_w \cdot \left(\frac{f}{100} \right)^2 \cdot \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \quad \text{watt / kg} \quad (5.17)$$

burada σ_w malzeme sabitidir. Malzeme sabiti, normal saçta, 0.35 mm kalınlıkta 3.2; 0.5 mm kalınlıkta ise 5.6 olur. Yüksek alaşımlı saçta ise 0.35 mm kalınlıkta 0.6; 0.5 mm kalınlıkta ise 1.1 olur. Kullanılan saç kalın olursa veya alaşım miktarı az olursa, fuko kayıplarının artacağını söyleyebiliriz.

Bir kg demirde meydana gelen histerizis ve fuko akımı kayıplarını bir arada yazacak olursak,

$$P_{Fe} = \left[\sigma_H \cdot \frac{f}{100} + \sigma_W \cdot \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right] \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \quad \text{watt / kg} \quad (5.18)$$

$f=50$ Hz sabit frekansı için ilk terim tamamen sabit değerlerden oluştuğundan bunu P_{10} ile gösterelim,

$$P_{10} = \left[\sigma_H \cdot \frac{f}{100} + \sigma_W \cdot \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right] \quad \text{watt / kg} \quad (5.19)$$

şeklinde olur. Bu takdirde 1 kg demirde meydana gelen toplam demir kaybı,

$$P_{Fe} = P_{10} \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \quad \text{watt / kg} \quad (5.20)$$

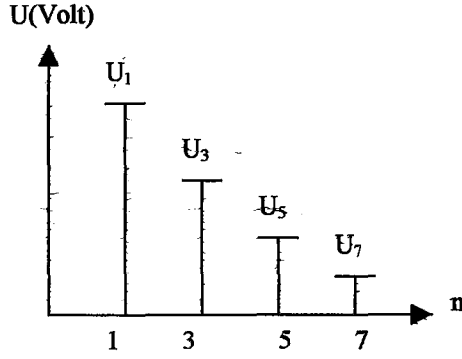
olur. P_{10} kayıp faktörü, 0.35 mm kalınlığındaki normal sac'ta 3.15; yüksek alaşımlı sac'ta ise 1.35 olmaktadır.

Eğer frekans 50 Hz' in üzerinde ise bu durumda denklem şu şekli alacaktır (Duman, 1955),

$$P_{Fe} = P_{10} \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \left(\frac{f}{100} \right)^{1.3} \quad \text{watt / kg} \quad (5.21)$$

Bu denklem frekansın artması ile birlikte demir kayıplarının da arttığını göstermektedir. 150 Hz, 250 Hz, 350 Hz gibi harmonik frekansları sistemde bulunduğu takdirde transformatörün demir kayıpları artacaktır. Ayrıca bu kayıplardan dolayı ısınma artacak ve yalıtım zorlanması meydana gelecektir.

Her bir harmonik bileşen için demir kayıplarının tesbitinde süperpozisyon yöntemi kullanılabilir. Enerji sistemindeki baranın geriliminin nonsinüsoidal olması durumunda bu gerilime ait harmonik spektrumu aşağıdaki şekilde verilebilir.



Şekil 5.1 Gerilime ait 1.,3.,5. ve 7. harmonik spektrumu

n . harmonik bileşenine ait gerilim U_n ile gösterilirse bu gerilimin meydana getireceği demir kaybı için,

$$P_{Fe_n} = P_{10} \left[\frac{B_n}{10000} \right]^2 \left[\frac{f_n}{100} \right]^{1.3} \quad \text{watt/kg} \quad (5.22)$$

yazılabilir. Burada n . harmonik frekansı şu şekildedir:

$$f_n = n \cdot f_1 \quad (5.23)$$

Burada n harmonik derecesi, f_1 ise temel bileşen frekans değeridir. n . harmonik frekansına ait magnetik endüksiyon değeri ise B_n' dir.

Transformatörlerde magnetik endüksiyonun hesabı için şu yol izlenmiştir; Transformatöre uygulanan gerilim U , sarım sayısı N ve demir nüve kesiti q_{Fe} olmak üzere,

$$U = \sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f \cdot B \cdot q_{Fe} \cdot N \cdot 10^{-8} \quad (5.24)$$

eşitliği geçerlidir. n . harmonik gerilimi için ,

$$U_n = \sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f_n \cdot B_n \cdot q_{Fe} \cdot N \cdot 10^{-8} \quad (5.25)$$

yazılabilir.

BÖLÜM 6

6. SAYISAL UYGULAMA

Sayısal uygulama olarak, (Boduroğlu, 1988) referansında verilen bir transformatöre ait analiz gerçekleştirilecektir. Bu transformatöre ait analizler, sinüsoidal sisteme ait kayıp analizi olup, harmonik bileşenlerin bulunmadığı ortam için geçerlidir. Çalışmada, bu transformatöre ait nonsinüsoidal büyüklüklerin olması halinde kayıpların analizi yapılacaktır. Söz konusu transformatördeki demir kayıplarının harmoniklerin etkisi sonucu nasıl değiştiğini inceleyelim:

Hesabını yapacağımız transformatör, üç fazlı, çekirdek tipi, yağlı transformatör olup aşağıdaki özelliklerde olacaktır.

Transformatörün gücü: $S_2=100 \text{ kVA} \pm \%4$

Primer ve sekonder gerilimleri: $U_1/U_2 = 20000/230 \text{ Volt}$

Bağlama grubu: YY0 (Yıldız/yıldız)

Güç faktörü : $\cos\phi_2=1$

Çekirdek tipi olarak hesabı yapılacak olan bu transformatörün sargıları silindirik tipten seçilecek ve soğutma şekli kendi kendine soğur tipten olacaktır.

Bu transformatör için izin verilen demir ve bakır kayıpları şekil 6.1. den alınabilir. Burada YY0 bağlanan ve 20000/230 V gerilimde üretilen transformatörlerden, 100 kVA gücünde olanına ait olan bakır ve demir kayıpları şunlardır:

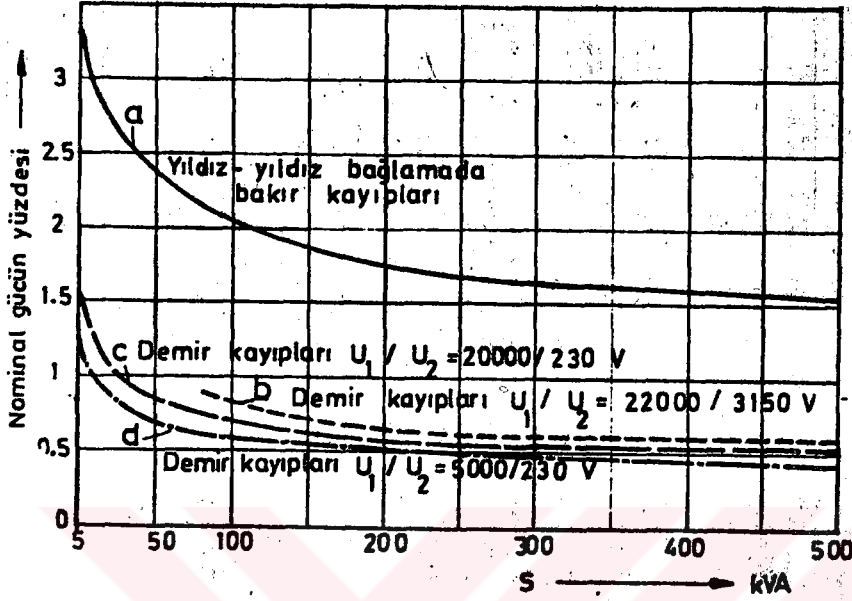
$$\Sigma P_{cu}=2000 \text{ watt}$$

$$\Sigma P_{Fe}=700 \text{ watt}$$

Hesabını yapacağımız bu transformatörün kayıp oranı,

$$\xi = 2000/700 = 2.86$$

olur.



Şekil 6.1. 5 ile 500 kVA arasında güce sahip üç fazlı yağlı transformatörlerin 50 Hz' deki demir ve bakır kayıpları (Boduroğlu, 1988).

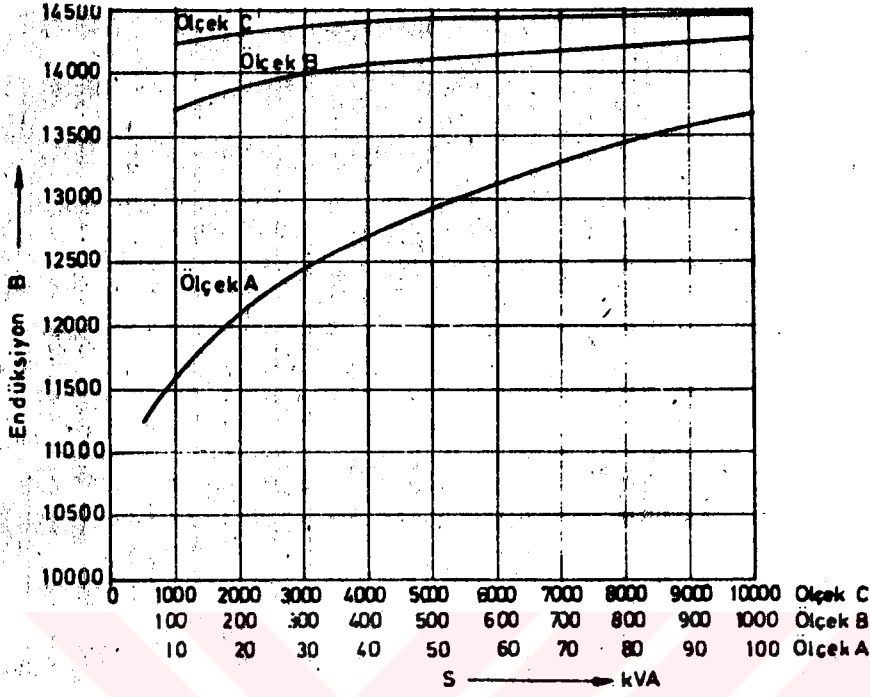
(5.20) eşitliğinden bilindiği gibi

$$P_{Fe} = P_{10} \cdot \zeta \cdot \left[\frac{B}{10000} \right]^2 \quad \text{watt/kg}$$

dır. İnşa olunmuş transformatörlerde saçların işlenmesi sonucunda husule gelen ilave kayıpları hesaba katarak $\zeta = 1.15$ kabul edelim. Şekil 6.2' den 100 kVA gücünde bir transformatörün; çekirdeğinde 13500 gauss civarında bir endüksiyonla çalışması gerektiği görülmektedir. Bu endüksiyonla çalışacağımıza göre, özgül demir kaybı olarak;

$$P_{Fe} = 1,35 \cdot 1,15 \cdot \left[\frac{13500}{10000} \right]^2 = 2,829 \text{ watt/kg}$$

bulunur. Burada Tablo 6.1'den 0.35 mm'lik silisyumlu sac için $P_{10} = 1,35$ watt/kg kabul olunmuştur.



Şekil 6.2. 5 ile 10000 kVA arasında güce sahip olan yağlı transformatörlerde çekirdek endüksiyonunun güce bağlı olarak değerleri (Boduroğlu, 1988).

Tablo 6.1. Transformatörde kullanılan saca göre kayıp faktörünün değişimi (Duman, 1955).

Sınıf	Levha cinsi	Levha kalınlığı Δ (mm)	Özgül ağırlık γ_{Fe} (kg/dm ³)	σ_H	σ_w	P_{10} (watt/kg)
1	Normal dinamo levhaları % 0.24 Si	0.35	7.8	4.7	3.2	3.15
		0.5		4.4	5.6	3.6
		1.0		4.4	22.6	7.8
2	Az alaşımlı levhalar %0.8-1.2 Si	0.5	7.75	4.7	2.6	3
3	Orta alaşımlı levhalar % 2.0 Si	0.5	7.65	3.8	1.6	2.3
4	Yüksek alaşımlı levhalar % 3.5 Si	0.35	7.6	2.4	0.6	1.35
		0.5	7.6	2.85	1.1	1.7

6.1 Demir Kesitinin Bulunması

$$q_{Fe} = C \sqrt{\frac{S}{f \cdot s \cdot B \cdot \xi} \cdot \frac{P_{cu}}{P_{Fe}} \cdot 10^9} \quad \text{cm}^2$$

dir. Burada tablo 6.2'den C sabiti=0.40 alınır.

s, akım yoğunluğu olup tablo 6.3'ten $s=2.6 \text{ A/mm}^2$ kabul edilebilir.

ξ , izin verilen bakır kaybı ile demir kaybı arasındaki kayıp oranıdır. Burada 2.86 olarak alıyoruz. Değerleri yerine yazdığımızda,

$$q_{Fe} = 0.40 \cdot \sqrt{\frac{100}{50 \cdot 2,6 \cdot 2,86 \cdot 13500} \cdot \frac{18,2}{2,829} \cdot 10^9} \cong 145 \text{ cm}^2$$

olarak bulunur.

Tablo 6.2. C sabitinin transformatörlerin yapım şekline göre değerleri (Boduroğlu, 1988).

	Bir fazlı transformatörler	Üç fazlı transformatörler
Yuvarlak bobinli çekirdek tipi Transformatörler	0.45	0.40
Dikdörtgen bobinli çekirdek tipi transformatörler	0.55	0.45
Mantel tipi transformatörler	0.85	0.55

Tablo 6.3. Akım yoğunluğunun farklı transformatörlerde alabileceği değerler (Boduroğlu, 1988).

Soğutma şekli	Akım yoğunluğu (s) A/mm ²
Hava ile soğuyan transformatörlerde	1.7 ~ 2.0
Kendi kendine soğuyan yağlı transformatörlerde	2.2 ~ 3.5
Yapay olarak soğutulan transformatörlerde	3.5 ~ 5.0

Boyunduruk kesiti bacak kesitinden %20 kadar daha büyük seçileceğine göre,

$$q_j = q_{Fe} \cdot 1,20 = 145 \cdot 1,20 = 174 \text{ cm}^2$$

dir. Buradaki endüksiyon, bacakta endüksiyona nazaran yaklaşık % 20 daha küçük olacaktır, yani

$$B_j = \frac{B}{1,20} = \frac{13500}{1,20} = 11250 \text{ gauss}$$

6.2 Demir Gövdede Meydana Gelen Toplam Demir Kaybının Bulunması

Bacaklardaki özgül demir kaybı,

$$P_{Fe_b} = P_{10} \cdot \zeta \cdot \left(\frac{B}{10000} \right)^2 = 1,35 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{13500}{10000} \right)^2 = 2,829 \text{ watt/kg}$$

her üç bacağın toplam ağırlığı,

$$G_{Fe_b} = 3 \cdot \gamma_{Fe} \cdot q_{Fe} \cdot L_s \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 7,6 \cdot 145 \cdot 40,1 \cdot 10^{-3} = 132,5 \text{ kg}$$

(L_s , bacak boyunun yüksekliği olup burada 40,1 cm alınmıştır.)

ve her üç bacağın toplam demir kaybı da,

$$\Sigma P_{Fe_{bacak}} = G_{Fe_b} \cdot P_{Fe_b} = 132,5 \cdot 2,829 \cong 375 \text{ watt}$$

Boyunduruktaki özgül demir kaybı,

$$P_{Fe_j} = P_{10} \cdot \zeta \cdot \left(\frac{B_j}{10000} \right)^2 = 1,35 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{11250}{10000} \right)^2 = 1,96 \text{ watt/kg}$$

olarak bulunur. Toplam boyunduruk ağırlığı,

$$G_{Fe_j} = \gamma_{Fe_j} \cdot q_{Fe_j} \cdot 2(2.a + 3.b_{bacak}) \cdot 10^{-3} = 7,6.174.2(2.15,6 + 3.14,05) \cdot 10^{-3} = 194,5 \text{ kg}$$

(a, pencere genişliği; b, bacak genişliğidir.)

olduğundan bütün boyunduruklarda meydana gelen demir kayıplarının toplamı,

$$\Sigma P_{Fe_j} = G_{Fe_j} \cdot P_{Fe_j} = 194,5 \cdot 1,96 = 382 \text{ watt}$$

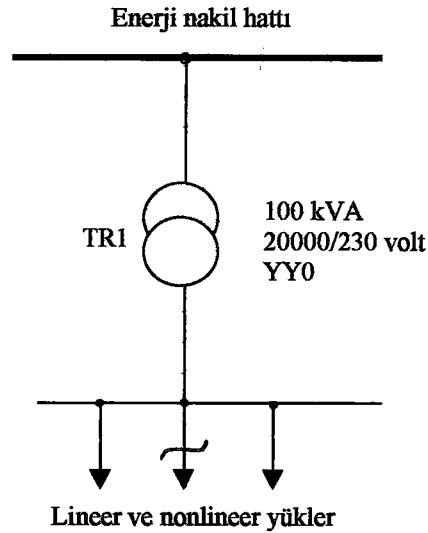
değerini alır. Demir gövdede meydana gelen toplam demir kaybı,

$$\Sigma P_{Fe} = \Sigma P_{Fe_{bacak}} + \Sigma P_{Fe_j} = 375 + 382 = 757 \text{ watt}$$

olur. Burada yapılan hesaplar sonucunda transformatörün 50 hz frekansta yani harmoniksiz durumda demir kayıplarını 757 watt olarak bulduk. Eğer transformatörde harmonikli akımlar mevcut ise demir kayıpları artacaktır.

6.3 Harmonikli Akımların Meydana Getirdiği Toplam Demir Kaybı

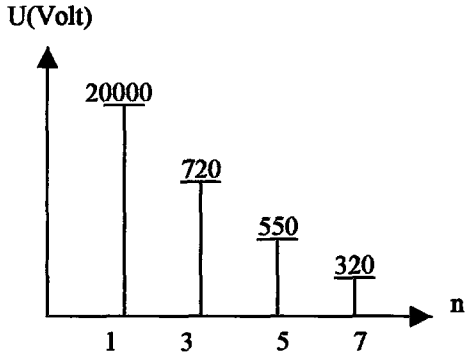
Aynı transformatör için nonsinüsoidal büyüklüklerin bulunması halinde, demir kayıplarının analizini yapalım.



Şekil 6.3 Sayısal uygulama için örnek sistem

6.3.1 Toplam harmonik distorsiyon % 5' in altında ise

Harmonik spektrumunu aşağıdaki şekilde verilmiş olsun,



Şekil 6.4 Alınan değerlerin harmonik spektrumu

Bu durumda THD şu şekilde bulunur,

$$\%THD = 100 \cdot \frac{\sqrt{U_3^2 + U_5^2 + U_7^2}}{U_1} = 100 \cdot \frac{\sqrt{720^2 + 550^2 + 320^2}}{20000} = \%4,8 < \%5$$

Görüldüğü gibi gerilimler şekildeki gibi verildiğinde THD % 5'in altında olmaktadır.

3. harmoniğin oluşturduğu demir kayıplarını bulalım. Bunun için öncelikle N sarım sayısı değerini bulmalıyız. Burada N, sinüsoidal durumdaki verilenler yerine yazılarak şu şekilde bulunur,

$$N = \frac{U \cdot 10^8}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f \cdot B \cdot q_{Fe}} = \frac{20000 \cdot 10^8}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 13500 \cdot 145} = 2657 \quad \text{sarım/bacak}$$

sarım sayısı yardımı ile oluşan endüksiyonu hesaplayabiliriz,

$$B_3 = \frac{U_3 \cdot 10^8}{\sqrt{3.4,44.2657.f_3.145}} = \frac{720.10^8}{\sqrt{3.4,44.2657.150.145}} = 162 \quad \text{Gauss}$$

olur. Bacaklardaki özgül demir kaybı,

$$P_{Fe_{b3}} = 1,35.115 \cdot \left(\frac{162}{10000}\right)^2 \cdot \left(\frac{150}{100}\right)^{1,3} = 6,9.10^{-4} \quad \text{watt/kg}$$

her üç bacağın toplam ağırlığı,

$$G_{Fe_b} = 132,5 \text{ kg}$$

ve her üç bacağın toplam demir kaybıda,

$$\Sigma P_{Fe_{b3}} = G_{Fe_b} \cdot P_{Fe_{b3}} = 132,5 \cdot 6,9.10^{-4} = 9,14.10^{-2} \quad \text{watt}$$

Boyunduruktaki özgül demir kaybı,

$$P_{Fe_{j3}} = 1,35.115 \cdot \left(\frac{135}{10000}\right)^2 \cdot \left(\frac{150}{100}\right)^{1,3} = 4,7.10^{-4} \quad \text{watt/kg}$$

olarak bulunur. Toplam boyunduruk ağırlığı,

$$G_{Fe_j} = 194,5 \text{ kg}$$

olduğundan bütün boyunduruklarda meydana gelen demir kayıplarının toplamı,

$$\Sigma P_{Fe_{j3}} = G_{Fe_j} \cdot P_{Fe_{j3}} = 194,5 \cdot 4,7.10^{-4} = 9,32.10^{-2} \quad \text{watt}$$

değerini alır. 3.harmoniğin demir gövdede meydana getirdiği toplam demir kaybı,

$$\Sigma P_{Fe_3} = \Sigma P_{Fe_{b3}} + \Sigma P_{Fe_{j3}} = 9,14 \cdot 10^{-2} + 9,32 \cdot 10^{-2} = 0.184 \quad \text{watt}$$

5.harmoniğin oluşturduğu demir kayıpları:

$$B_5 = \frac{U_5 \cdot 10^8}{\sqrt{3 \cdot 4,44 \cdot 2657 \cdot f_s \cdot 145}} = \frac{550 \cdot 10^8}{\sqrt{3 \cdot 4,44 \cdot 2657 \cdot 250 \cdot 145}} = 74,25 \quad \text{Gauss}$$

olur. Bacaklardaki özgül demir kaybı,

$$P_{Fe_{b5}} = 1,35 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{74,25}{10000} \right)^2 \cdot \left(\frac{250}{100} \right)^{1,3} = 2,81 \cdot 10^{-4} \quad \text{watt/kg}$$

her üç bacağın toplam ağırlığı,

$$G_{Fe_b} = 132,5 \quad \text{kg}$$

ve her üç bacağın toplam demir kaybıda,

$$\Sigma P_{Fe_{b5}} = G_{Fe_b} \cdot P_{Fe_{b5}} = 132,5 \cdot 2,81 \cdot 10^{-4} = 3,73 \cdot 10^{-2} \quad \text{watt}$$

Boyunduruktaki özgül demir kaybı,

$$P_{Fe_{j5}} = 1,35 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{61,875}{10000} \right)^2 \cdot \left(\frac{250}{100} \right)^{1,3} = 1,95 \cdot 10^{-4} \quad \text{watt/kg}$$

olarak bulunur. Toplam boyunduruk ağırlığı,

$$G_{Fe_j} = 194,5 \quad \text{kg}$$

olduğundan bütün boyunduruklarda meydana gelen demir kayıplarının toplamı,

$$\Sigma P_{Fe_{j5}} = G_{Fe_j} \cdot P_{Fe_{j5}} = 194,5 \cdot 1,95 \cdot 10^{-4} = 3,8 \cdot 10^{-2} \quad \text{watt}$$

değerini alır. 5.harmoniğin demir gövdede meydana getirdiği toplam demir kaybı,

$$\Sigma P_{Fe_5} = \Sigma P_{Fe_{b5}} + \Sigma P_{Fe_{j5}} = 3,73 \cdot 10^{-2} + 3,8 \cdot 10^{-2} = 0,0753 \quad \text{watt}$$

7.harmoniğin oluşturduğu demir kayıpları:

$$B_7 = \frac{U_7 \cdot 10^8}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 2657 \cdot f_7 \cdot 145} = \frac{320 \cdot 10^8}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 2657 \cdot 350 \cdot 145} = 30,85 \quad \text{Gauss}$$

olur. Bacaklardaki özgül demir kaybı,

$$P_{Fe_{b7}} = 1,35 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{30,85}{10000} \right)^2 \cdot \left(\frac{350}{100} \right)^{1,3} = 7,53 \cdot 10^{-5} \quad \text{watt/kg}$$

her üç bacağın toplam ağırlığı,

$$G_{Fe_b} = 132,5 \quad \text{kg}$$

ve her üç bacağın toplam demir kaybıda,

$$\Sigma P_{Fe_{b7}} = G_{Fe_b} \cdot P_{Fe_{b7}} = 132,5 \cdot 7,53 \cdot 10^{-5} = 9,97 \cdot 10^{-3} \quad \text{watt}$$

Boyunduruktaki özgül demir kaybı,

$$P_{Fe_{j7}} = 1,35 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{25,66}{10000} \right)^2 \cdot \left(\frac{350}{100} \right)^{1,3} = 5,21 \cdot 10^{-5} \quad \text{watt/kg}$$

olarak bulunur. Toplam boyunduruk ağırlığı,

$$G_{Fe_j} = 194,5 \text{ kg}$$

olduğundan bütün boyunduruklarda meydana gelen demir kayıplarının toplamı,

$$\Sigma P_{Fe_{j7}} = G_{Fe_j} \cdot P_{Fe_{j7}} = 194,5 \cdot 21 \cdot 10^{-5} = 1,01 \cdot 10^{-2} \text{ watt}$$

değerini alır. 7.harmoniğin demir gövdede meydana getirdiği toplam demir kaybı,

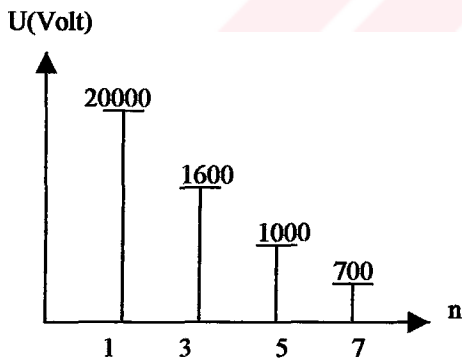
$$\Sigma P_{Fe_7} = \Sigma P_{Fe_{b7}} + \Sigma P_{Fe_{j7}} = 9,97 \cdot 10^{-3} + 1,01 \cdot 10^{-2} = 2,01 \cdot 10^{-2} \text{ watt}$$

harmoniklerin meydana getirdiği toplam kayıplar;

$$\Sigma P_{Fe_H} = \Sigma P_{Fe_3} + \Sigma P_{Fe_5} + \Sigma P_{Fe_7} = 0,184 + 0,0753 + 0,0201 = 0,279 \text{ watt}$$

6.3.2 Toplam harmonik distorsiyon % 10 ise

Harmonik spektrumu aşağıdaki şekilde verilmiş olsun,



Şekil 6.5 Alman değerlerin harmonik spektrumu

Bu durumda THD şu şekilde bulunur,

$$\%THD = 100 \cdot \frac{\sqrt{U_3^2 + U_5^2 + U_7^2}}{U_1} = 100 \cdot \frac{\sqrt{1600^2 + 1000^2 + 700^2}}{20000} = \%10$$

3. harmoniğin oluşturduğu demir kayıplarını bulalım.

$$B_3 = \frac{U_3 \cdot 10^8}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 2657 \cdot f_3 \cdot 145} = \frac{1600 \cdot 10^8}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 2657 \cdot 150 \cdot 145} = 360 \quad \text{Gauss}$$

olur. Bacaklarda ki özgül demir kaybı,

$$P_{Fe_{b3}} = 1,35 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{360}{10000}\right)^2 \cdot \left(\frac{150}{100}\right)^{1,3} = 3,41 \cdot 10^{-3} \quad \text{watt/kg}$$

her üç bacağıın toplam ağırlığı,

$$G_{Fe_b} = 132,5 \text{ kg}$$

ve her üç bacağıın toplam demir kaybıda,

$$\Sigma P_{Fe_{b3}} = G_{Fe_b} \cdot P_{Fe_{b3}} = 132,5 \cdot 3,41 \cdot 10^{-3} = 0,451 \quad \text{watt}$$

Boyunduruktaki özgül demir kaybı,

$$P_{Fe_{j3}} = 1,35 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{300}{10000}\right)^2 \cdot \left(\frac{150}{100}\right)^{1,3} = 2,37 \cdot 10^{-3} \quad \text{watt/kg}$$

olarak bulunur. Toplam boyunduruk ağırlığı,

$$G_{Fe_j} = 194,5 \text{ kg}$$

olduğundan bütün boyunduruklarda meydana gelen demir kayıplarının toplamı,

$$\Sigma P_{Fe_{j3}} = G_{Fe_j} \cdot P_{Fe_{j3}} = 194,5 \cdot 2,37 \cdot 10^{-3} = 0,460 \quad \text{watt}$$

değerini alır. 3.harmoniğin demir gövdede meydana getirdiği toplam demir kaybı,

$$\Sigma P_{Fe_3} = \Sigma P_{Fe_{b3}} + \Sigma P_{Fe_{j3}} = 0,451 + 0,460 = 0,911 \quad \text{watt}$$

5.harmoniğin oluşturduğu demir kayıpları;

$$B_5 = \frac{U_5 \cdot 10^8}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 2657 \cdot f_5 \cdot 145} = \frac{1000 \cdot 10^8}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 2657 \cdot 250 \cdot 145} = 135 \quad \text{Gauss}$$

olur. Bacaklardaki özgül demir kaybı,

$$P_{Fe_{b5}} = 1,35 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{135}{10000} \right)^2 \cdot \left(\frac{250}{100} \right)^{1,3} = 9,31 \cdot 10^{-4} \quad \text{watt/kg}$$

her üç bacağın toplam ağırlığı,

$$G_{Fe_b} = 132,5 \quad \text{kg}$$

ve her üç bacağın toplam demir kaybıda,

$$\Sigma P_{Fe_{b5}} = G_{Fe_b} \cdot P_{Fe_{b5}} = 132,5 \cdot 9,31 \cdot 10^{-4} = 0,123 \quad \text{watt}$$

Boyunduruktaki özgül demir kaybı,

$$P_{Fe_{j5}} = 1,35 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{112,5}{10000} \right)^2 \cdot \left(\frac{250}{100} \right)^{1,3} = 6,47 \cdot 10^{-4} \quad \text{watt/kg}$$

olarak bulunur. Toplam boyunduruk ağırlığı,

$$G_{Fe_j} = 194,5 \text{ kg}$$

olduğundan bütün boyunduruklarda meydana gelen demir kayıplarının toplamı,

$$\Sigma P_{Fe_{j5}} = G_{Fe_j} \cdot P_{Fe_{j5}} = 194,5 \cdot 6,47 \cdot 10^{-4} = 0,125 \text{ watt}$$

değerini alır. 5.harmoniğin demir gövdede meydana getirdiği toplam demir kaybı,

$$\Sigma P_{Fe_5} = \Sigma P_{Fe_{b5}} + \Sigma P_{Fe_{j5}} = 0,123 + 0,125 = 0,248 \text{ watt}$$

7.harmoniğin oluşturduğu demir kayıpları;

$$B_7 = \frac{U_7 \cdot 10^8}{\sqrt{3 \cdot 4,44 \cdot 2657 \cdot f_7 \cdot 145}} = \frac{700 \cdot 10^8}{\sqrt{3 \cdot 4,44 \cdot 2657 \cdot 350 \cdot 145}} = 67,5 \text{ Gauss}$$

olur. Bacaklardaki özgül demir kaybı,

$$P_{Fe_{b7}} = 1,35 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{67,5}{10000} \right)^2 \cdot \left(\frac{350}{100} \right)^{1,3} = 3,61 \cdot 10^{-4} \text{ watt/kg}$$

her üç bacağın toplam ağırlığı,

$$G_{Fe_b} = 132,5 \text{ kg}$$

ve her üç bacağın toplam demir kaybıda,

$$\Sigma P_{Fe_{b7}} = G_{Fe_b} \cdot P_{Fe_{b7}} = 132,5 \cdot 3,61 \cdot 10^{-4} = 0,0478 \text{ watt}$$

Boyunduruktaki özgül demir kaybı,

$$P_{Fe_{j7}} = 1,35 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{56,25}{10000}\right)^2 \cdot \left(\frac{350}{100}\right)^{1,3} = 2,5 \cdot 10^{-4} \quad \text{watt/kg}$$

olarak bulunur. Toplam boyunduruk ağırlığı,

$$G_{Fe_j} = 194,5 \text{ kg}$$

olduğundan bütün boyunduruklarda meydana gelen demir kayıplarının toplamı,

$$\Sigma P_{Fe_{j7}} = G_{Fe_j} \cdot P_{Fe_{j7}} = 194,5 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} = 0,0486 \quad \text{watt}$$

değerini alır. 7.harmoniğin demir gövdede meydana getirdiği toplam demir kaybı,

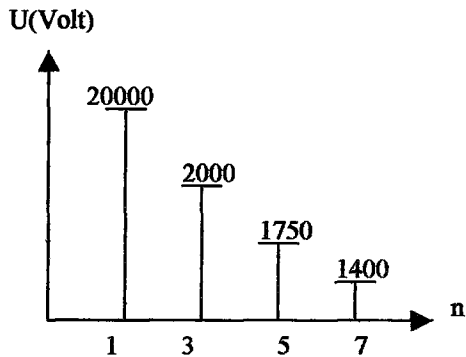
$$\Sigma P_{Fe_7} = \Sigma P_{Fe_{b7}} + \Sigma P_{Fe_{j7}} = 0,0478 + 0,0486 = 0,0964 \quad \text{watt}$$

harmoniklerin meydana getirdiği toplam kayıplar;

$$\Sigma P_{Fe_H} = \Sigma P_{Fe_3} + \Sigma P_{Fe_5} + \Sigma P_{Fe_7} = 0,911 + 0,248 + 0,0964 = 1,2554 \quad \text{watt}$$

6.3.3 Toplam harmonik distorsiyon % 15 ise

Harmonik spektrumu aşağıdaki şekilde verilmiş olsun,



Şekil 6.5 Alınan değerlerin harmonik spektrumu

Bu durumda THD şu şekilde bulunur,

$$\%THD = 100 \cdot \frac{\sqrt{U_3^2 + U_5^2 + U_7^2}}{U_1} = 100 \cdot \frac{\sqrt{2000^2 + 1750^2 + 1400^2}}{20000} = \%15$$

3. harmoniğin oluşturduğu demir kayıplarını bulalım.

$$B_3 = \frac{U_3 \cdot 10^8}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 2657 \cdot f_3 \cdot 145} = \frac{2000 \cdot 10^8}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 2657 \cdot 150 \cdot 145} = 450 \quad \text{Gauss}$$

olur. Bacaklardaki özgül demir kaybı,

$$P_{Fe_b3} = 1,35 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{450}{10000}\right)^2 \cdot \left(\frac{150}{100}\right)^{1,3} = 5,32 \cdot 10^{-3} \quad \text{watt/kg}$$

her üç bacağın toplam ağırlığı,

$$G_{Fe_b} = 132,5 \text{ kg}$$

ve her üç bacağın toplam demir kaybıda,

$$\Sigma P_{Fe_b3} = G_{Fe_b} \cdot P_{Fe_b3} = 132,5 \cdot 5,32 \cdot 10^{-3} = 0,704 \quad \text{watt}$$

Boyunduruktaki özgül demir kaybı,

$$P_{Fe_j3} = 1,35 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{375}{10000}\right)^2 \cdot \left(\frac{150}{100}\right)^{1,3} = 3,69 \cdot 10^{-3} \quad \text{watt/kg}$$

olarak bulunur. Toplam boyunduruk ağırlığı,

$$G_{Fe_j} = 194,5 \text{ kg}$$

olduğundan bütün boyunduruklarda meydana gelen demir kayıplarının toplamı,

$$\Sigma P_{Fe_{j3}} = G_{Fe_j} \cdot P_{Fe_{j3}} = 194,5 \cdot 3,69 \cdot 10^{-3} = 0,717 \text{ watt}$$

değerini alır. 3.harmoniğin demir gövdede meydana getirdiği toplam demir kaybı,

$$\Sigma P_{Fe_3} = \Sigma P_{Fe_{b3}} + \Sigma P_{Fe_{j3}} = 0,704 + 0,717 = 1,421 \text{ watt}$$

5.harmoniğin oluşturduğu demir kayıpları:

$$B_5 = \frac{U_5 \cdot 10^8}{\sqrt{3 \cdot 4,44 \cdot 2657 \cdot f_5 \cdot 145}} = \frac{1750 \cdot 10^8}{\sqrt{3 \cdot 4,44 \cdot 2657 \cdot 250 \cdot 145}} = 236,26 \text{ Gauss}$$

olur. Bacaklardaki özgül demir kaybı,

$$P_{Fe_{b5}} = 1,35 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{236,26}{10000} \right)^2 \cdot \left(\frac{250}{100} \right)^{1,3} = 2,85 \cdot 10^{-3} \text{ watt/kg}$$

her üç bacağın toplam ağırlığı,

$$G_{Fe_b} = 132,5 \text{ kg}$$

ve her üç bacağın toplam demir kaybıda,

$$\Sigma P_{Fe_{b5}} = G_{Fe_b} \cdot P_{Fe_{b5}} = 132,5 \cdot 2,85 \cdot 10^{-3} = 0,377 \text{ watt}$$

Boyunduruktaki özgül demir kaybı,

$$P_{Fe_{j5}} = 1,35 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{196,88}{10000}\right)^2 \cdot \left(\frac{250}{100}\right)^{1,3} = 1,98 \cdot 10^{-3} \quad \text{watt/kg}$$

olarak bulunur. Toplam boyunduruk ağırlığı,

$$G_{Fe_j} = 194,5 \text{ kg}$$

olduğundan bütün boyunduruklarda meydana gelen demir kayıplarının toplamı,

$$\Sigma P_{Fe_{j5}} = G_{Fe_j} \cdot P_{Fe_{j5}} = 194,5 \cdot 1,98 \cdot 10^{-3} = 0,385 \quad \text{watt}$$

değerini alır. 5.harmoniğin demir gövdede meydana getirdiği toplam demir kaybı,

$$\Sigma P_{Fe_5} = \Sigma P_{Fe_{b5}} + \Sigma P_{Fe_{j5}} = 0,377 + 0,385 = 0,762 \quad \text{watt}$$

7.harmoniğin oluşturduğu demir kayıpları:

$$B_7 = \frac{U_7 \cdot 10^8}{\sqrt{3 \cdot 4,44 \cdot 2657 \cdot f_7 \cdot 145}} = \frac{1400 \cdot 10^8}{\sqrt{3 \cdot 4,44 \cdot 2657 \cdot 350 \cdot 145}} = 135 \quad \text{Gauss}$$

olur. Bacaklardaki özgül demir kaybı,

$$P_{Fe_{b7}} = 1,35 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{135}{10000}\right)^2 \cdot \left(\frac{350}{100}\right)^{1,3} = 1,44 \cdot 10^{-3} \quad \text{watt/kg}$$

her üç bacağın toplam ağırlığı,

$$G_{Fe_b} = 132,5 \text{ kg}$$

ve her üç bacağıın toplam demir kaybıda,

$$\Sigma P_{Fe_{b7}} = G_{Fe_b} \cdot P_{Fe_{b7}} = 132,5 \cdot 1,44 \cdot 10^{-3} = 0,19 \quad \text{watt}$$

Boyunduruktaki özgül demir kaybı,

$$P_{Fe_{j7}} = 1,35 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{112,5}{10000} \right)^2 \cdot \left(\frac{350}{100} \right)^{1,3} = 1 \cdot 10^{-3} \quad \text{watt/kg}$$

olarak bulunur. Toplam boyunduruk ağırlığı,

$$G_{Fe_j} = 194,5 \text{ kg}$$

olduğundan bütün boyunduruklarda meydana gelen demir kayıplarının toplamı,

$$\Sigma P_{Fe_{j7}} = G_{Fe_j} \cdot P_{Fe_{j7}} = 194,5 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 0,194 \quad \text{watt}$$

değerini alır. 7.harmoniğın demir gövdede meydana getirdiği toplam demir kaybı,

$$\Sigma P_{Fe_7} = \Sigma P_{Fe_{b7}} + \Sigma P_{Fe_{j7}} = 0,19 + 0,194 = 0,384 \quad \text{watt}$$

harmoniklerin meydana getirdiği toplam kayıplar;

$$\Sigma P_{Fe_H} = \Sigma P_{Fe_3} + \Sigma P_{Fe_5} + \Sigma P_{Fe_7} = 0,421 + 0,762 + 0,384 = 2,567 \quad \text{watt}$$

Tablo 6.4 Temel ve harmonik bileşenler için demir kayıpları

% THD	$\Sigma P_{Fe1}(w)$	$\Sigma P_{Fe3}(w)$	$\Sigma P_{Fe5}(w)$	$\Sigma P_{Fe7}(w)$
4,8	757	0,184	0,0753	0,0201
10	757	0,911	0,248	0,0964
15	757	1,421	0,762	0,384

Temel ve harmonik bileşenlerin oluşturduğu, transformatöre ait demir kayıpları Tablo 6.4' de verilmiştir. Burada da görüldüğü gibi harmonik bileşenlerin değeri küçüldükçe kayıp güç değerleride küçülmektedir.

Tablo 6.5 Kayıpların oranları

%THD	$\Sigma P_{FeH}(\Sigma P_{Fe3} + \Sigma P_{Fe5} + \Sigma P_{Fe7})(w)$	$\Sigma P_{FeH}/P_1$
4,8	0,279	$3,68.10^{-4}$
10	1,2554	$1,65.10^{-3}$
15	2,567	$3,39.10^{-3}$

Harmonik bileşenlerin oluşturduğu demir kayıplarının toplamının, temel bileşene göre hangi seviyede olduğunu belirlemek için Tablo 6.5'de bu oranlar verilmiştir. Burada görüldüğü gibi toplam harmonik distorsiyon(THD) arttıkça temel bileşene göre harmonik kayıpları artış göstermektedir.

Tablo 6.6 Sinüsoidal ve nonsinüsoidal hal için transformatör demir kayıpları

%THD	$\Sigma P_{Fe,sin}(w)$	$\Sigma P_{Fe,nonsin}(w)$	% ARTIŞ
4,8	757	757,279	$3,68.10^{-2}$
10	757	758,2554	0,165
15	757	759,567	0,339

Tablo 6.6' da sinüsoidal(harmonik içermeyen) durumdaki demir kayıpları ile nonsinüsoidal durumdaki demir kayıpları ayrı ayrı verilmiştir. Burada da verildiği üzere nonsinüsoidal halde az dahi olsa bir güç kaybı artışı gözlenmektedir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elektrik enerji sistemlerinde bulunan nonlineer yükler, sistemde nonsinüoidal akım ve gerilimlerin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu ise ek kayıplara yol açmaktadır. Ayrıca bara gerilimlerinde temel bileşenin dışında harmonik bileşenlerin de varolması, bu baralara paralel bağlı tüm yüklerin uçlarına harmonik gerilimlerin düşmesine yol açacaktır. Haliyle bu durumda sağlıklı bir işletme yapılamayacaktır.

Elektrik enerji sistemlerindeki harmoniklerin analizini ve kayıplara etkilerini ortaya çıkaran bu çalışma, tanıtıcı giriş bölümünün dışında 5 bölümden oluşmaktadır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, harmonikleri meydana getiren nonlineer kaynakların neler olduğu ve bunların sistem üzerinde ne miktarda etkili oldukları açıklanmıştır.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, sistemdeki elemanların nonsinüoidal akım ve gerilimlerden ne şekilde etkilendikleri ve ne gibi zararlara uğradıkları açıklanmıştır.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, harmoniklerin analizine yönelik olarak fourier serisinin nasıl elde edileceği anlatılmıştır.

Çalışmanın beşinci bölümünde, nonsinüoidal büyüklüklerin kayıpları ne kadar arttırdığı formüllerle gösterilmiştir.

Çalışmanın altıncı bölümünde, bir dağıtım sistemi gözönüne alınarak, harmoniklerin burada oluşturduğu ek kayıplar hesaplanmıştır.

Yapılan bu çalışmada nonlineer yüklerin sebep olduğu harmoniklerin, güç transformatörlerinin kayıplarına etkisi ile ilgili çıkarılan sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

-Demir kayıpları sinüoidal durumda çok küçük değerlerdedir, nonsinüoidal hal içinde bu değerlerde çok aşırı bir artış olmamakla birlikte sayısal uygulamada (%THD=%15 için) % 0,339 kadar arttığı gözlenmektedir (Tablo 6.6).

-Harmonik distorsiyonuna bağlı olarak etkinliği artan harmonik bileşenler, daha büyük harmonik distorsiyon değerlerinde daha büyük demir kayıpları meydana getirmektedir (Tablo 6.5).

-Sayısal uygulamada görüldüğü gibi harmonik bileşenlerin genliği azaldıkça bunların meydana getirdiği demir kayıplarının değerleride azalmaktadır.

-Harmoniklerden kaynaklanan demir kayıp değerleri, temel bileşen kaybına göre $3,68 \cdot 10^{-4}$ (%THD=%4,8 için) kadardır. Bu değer distorsiyon artışı ile artış göstermektedir (Tablo 6.5).

-Çok sayıda güç transformatöründen meydana gelen bir enerji sistemi için, transformatörlerde meydana gelen toplam demir kayıp değerleri, ele alınan sistemin transformatör sayısı ve topolojisine bağlı olarak artış gösterecektir.

-Bu çalışmada, enerji sisteminde nonsinüsoidal büyüklüklerin olması halinde transformatörlerde sadece demir kayıpları incelenmiştir. Transformatörün sargılarında meydana gelecek joule kayıpları ayrı bir çalışma konusudur. Toplam kayıpların (demir ve bakır kayıpları) bu şekilde ortaya konularak transformatörün yüklenebilirliğinin (veriminin), kayıplardan kaynaklanan ısı artışının, ayrıca irdelenmesi yararlı olacaktır.

Harmonikleri ve etkinliklerini en aza indirmeye yönelik olarak şu öneriler yapılabilir:

- Enerji sistemlerinde uygun filtre devreleri kullanılarak nonlinear yüklerin etkilerinin olabildiğince azaltılması gereklidir. Aksi takdirde lineer yük baraları dahi harmonik bileşen içerebilirler.
- Dağıtım sistemlerine transformatör bağlanırken transformatörün bağlantı şekline dikkat edilmemektedir. Harmoniklere karşı duyarlı tüketicilerde bunun seçimi önem taşımaktadır.

- Nonlineer yükleri olan tüketicilere, filtre devrelerinin yaptırılması yönetmelik gereği zorunlu hale getirilebilir.
- Ülkemizdeki sanayi kuruluşlarının harmonikler hakkında yeterli bilgileri yoktur. Yetkililer tarafından, harmonikler hakkında tüketiciler bilinçlendirilmelidir.

THD miktarı hakkında ulusal standartlar konulup uygulamaya geçirilmelidir.



KAYNAKLAR

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

Attar, F. ve İnan, A., (1997), "Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Etkileri ve Bir Harmonik Kontrol Kartı Modeli", Kaynak Elektrik Dergisi, 3 : 130-143.

Ay, S., (1996), "Alçak Gerilim Tesislerindeki Gerilim Harmonikleri ve Filtre Tasarımı", Kaynak Elektrik Dergisi, 6 : 81-88.

Bayrak, M. ve Gül, Ö., (1997), "Harmoniklerin Enerji Kalitesine Etkisi ve Harmoniklerin Azaltılması", Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği 7. Ulusal Kongresi, 7-14 Eylül 1997, Ankara.

Bayram, M., (1984), "Harmoniklerin Kompanzasyon Tesislerindeki Tesirleri", Elektroteknik Mecmuası, 9: 1-4.

Boduroğlu, T., (1988), Elektrik Makinaları Dersleri-I, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul.

Çakır, H., (1989), Enerji İletimi (Elektriki Hesaplar), Y.T.Ü., İstanbul.

Çakır, H., (1985), Elektrik Şebeke Kayıpları, Y.T.Ü., İstanbul.

Dommel, H.W., Yan, A. ve Wei, S. (1986), "Harmonics from Transformer Saturation", IEEE Trans. on Power Systems, PWRD-1: 209-215.

Duman, H., (1955), Elektrik Makinelerinin Kayıpları ve Teorisi, İ.T.Ü., İstanbul.

Emanuel, A.E. ve Wang, X., (1985), "Estimation of Loss of Life of Power Transformers Supplying Nonlinear Loads", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-104: 628-636.

Ertan, U., (1994), "Elektrik Şebekelerinde Harmonikler", Kaynak Elektrik Dergisi, 4: 109-115.

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

Gülgün, R., (1983), Güç Elektroniğine giriş, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul.

Gürsel, G., (1999), "Elektrik Şebekelerinde Harmonikler", TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Dergisi, 108: 26-28.

İnan, A., Attar, F. ve Çakır, H., (1997), "Gerilim Distorsiyonu Üzerinde Kompakt Floresan Işık Kaynaklarının ve Elektronik Balastların Etkileri ve Ekonomik Analizleri", Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği 7. Ulusal Kongresi, 7-14 Eylül 1997, Ankara.

Kaşıkçı, İ., (1997), "Kuvvetli Akım Sistemlerinde Kompanzasyon Harmonikler ve EMC Normları", Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği 7. Ulusal Kongresi, 7-14 Eylül 1997, Ankara.

Kocatepe, C. ve Gülez, K., (1995), "Enerji Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi İçin Deri Etkisinin Yapay Sinir Ağı ile Yapılan Simülasyonu", Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi, 11-17 Eylül 1995, Bursa.

Mergen, A.F. ve Kıyı, M., (1993), "Sıncap Kafesli Asenkron Motorda Harmonik Momentlerinin İncelenmesi", Elektrik Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi, 13-18 Eylül 1993, K.T.Ü., Trabzon.

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

Sarıoğlu, K., (1975), Elektrik Makinalarının Temelleri I, İ.T.Ü., İstanbul.

Sundberg, Y., (1976), The Arc Furnace as a Load on the Network, ASEA Journal, 49: 75-87.

Steinmetz, C.P., (1917), Theory and Calculation of Electric Circuits, Mc Graw-Hill.

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

Ural, A., Yörükeren, N. Ve Bütün, E., (1995), "Elektrik Güç Sistemlerindeki Harmonikler ve Harmonik Dağılım için Ototransformatörlü Bir Cer Sisteminin Frekans Domeni Modeli", Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi, 11-17 Eylül 1995, Bursa.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 27.11.1973

Doğum yeri Trabzon

Lise 1987-1990 Maçka Teknik Lisesi

Lisans 1990-1995 Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik
Fak. Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1996-Devam ediyor Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri
Enstitüsü Elektrik Müh. Anabilim Dalı

Çalıştığı kurumlar 1998-Devam ediyor TEDAŞ