

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLER VE
HARMONİKLERİN TRANSFORMATÖR
ÜZERİNDE OLUŞTURDUĞU EK BAKIR
KAYIPLARI**

Elek. Müh. Süleyman GÜRCAN

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Erdin GÖKALP

İSTANBUL, 1996

57493

ÖZET

Bu çalışmada harmoniklerin yapıları, çıkış sebepleri, harmonikleri meydana getiren yükler ve bunların güç sistemlerinde meydana getireceği tesirler incelenmiştir.

Günümüzde yarı iletken teknolojisine bağlı olarak tahrik ve kontrol sistemlerinde SCR elemanlar kullanılmaktadır. Bu elemanların oluşturduğu akım ve gerilim harmonikleri ek transformatör kayıplarına yol açmaktadır. Ek demir ve bakır kayıpları transformatörün verimini düşürecektir. Bu çalışmada ek bakır kayıpları ifadeleri verilmiştir. Sayısal uygulama bölümünde 11/2,2 kv'luk bir dağıtım transformatöründe ek bakır kayıplarının harmonik derecesine bağlı değişimleri verilmiştir.

ABSTRACT

In this paper, the structure of harmonics, their causes, the load which causes them and their effects on the power system are studied.

At present, in drive and control systems, SCR components are used depending on the developing semiconductor technology. The current and voltage harmonics generated by these components cause additional losses for transformers. Additional iron and copper losses will decrease efficiency of the transformer. In this study the expressions of these copper losses are given. In the numerical example, additional copper losses versus harmonic order are obtained for a distribution transformer, 15/2,2 kv rating.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No:

BÖLÜM 1	1
1. HARMONİKLER	1
1.1. GİRİŞ	1
1.2. Harmoniklerin Meydana Gelmesi	1
1.2.1 Generatörler	2
1.2.2 Transformatörler	2
1.2.3 Redresörler	4
1.2.4. Arkla Çalışan İşletme Araçları	5
1.3. Harmonik Kaynakların Gösterilişi	6
1.4 Harmoniklerin Elektrik Tesisleri Üzerine Etkileri	8
BÖLÜM 2	14
2. HARMONİKLERİN ANALİZİ	14
2.1 Harmonik Analizine Genel Bakış	14
2.2. ANALİZ YÖNTEMLERİ	14
2.2.1. Fourier Analizi	14
2.2.2 Grafik Yöntemi	21
2.2.3. Ölçme Yöntemi	25
BÖLÜM - 3	28
3. HARMONİKLERİN TRANSFORMATÖR ÜZERİNE ETKİSİ	28
3.1 TRANSFORMATÖRLERİN NONSİNÜSOİDAL AKIMLARLA YÜKLENMESİ	28
3-1-1 Transformatörlerin Eşdeğer Dengesi	28
3.1.2. Transformatörlerin Dört Uçlu Gösterilmesi	29
3-2. Transformatörlerin Harmonik Bağımlı Modeli	29
3.3 Transformatörün Nonsinüsoidal Akımla Yüklenmesi	33

BÖLÜM -4.....	35
SAYISAL UYGULAMA	35
ÖRNEK SİSTEME UYGULAMA.....	35
ÖRNEK DEVRE.....	35
4.1. Maksimum akım değerleri eşit olan non sinusoidal akımların sekonder devresinden çekilmeleri.....	36
4.1.1 Yük akımının kare dalga olması hali.....	36
4.1.2 Yük Akımının Üçgen Dalga Olması Hali.....	38
4-1-3 Yük Akımının Trapez Dalga Olması Hali	39
4-1-4 Yük Akımının Bozulmuş Sinüs Olması Hali	40
4-2 Efektif Değerleri Eşit Olan Nonsinusoidal akımların Sekonder Devresinden Çekilmesi.....	41
4-2-1. Yük Akımının Kare Dalga Olması Hali.....	41
4-2-2 Yük Akımının Üçgen Dalga Olması Hali	42
4-2-3 Yük akımının trapez dalga olması hali	43
4-2-4 Yük Akımının Bozulmuş Sinüs Olması Hali	44
4-3 Ek Kayıpların Toplam Kayıp Güce Oranı.....	45
4-3-1 Maksimum akım değerlerinin eşit olması durumunda harmoniklerin oluşturduğu ek kayıpların toplam kayıp güce oranları.....	45
4-3-2 Efektif değerlerinin eşit olması durumunda harmonik kayıpların toplam kayba oranları.....	47
4-4 Yük Akımlarının Harmonik Spektrumları	50
4-4-1 $I_m = 10$ A olması durumunda yük akımlarının harmonik spektrumları	51
4-4-2 $I_{eff} = 7,07$ A olması durumunda yük akımlarının harmonik spektrumları	52
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	53
KAYNAKLAR	54

BÖLÜM 1

1. HARMONİKLER

1.1. GİRİŞ

Elektrik tesislerinde enerjinin üretilmesi, iletilmesi ve tüketilmesi esnasında normal olarak akımın ve gerilimin 50 Hz'lik tam sinüs şeklinde olması arzu edilir. Fakat bazı yan etkiler ve bozucu olaylar yüzünden elektriksel büyüklüklerin şekli bozulur ve akı, akım ve gerilim gibi işletme büyüklükleri artık sinusoidal değildir ve harmonik ihtiva ederler. Bunların işletme araçları ve tesisler üzerine zararlı etkileri olduğu gibi ayrıca bunlar önemli rezonans uyarıcılarıdır. Bu yüzden çeşitli harmonik frekanslarında rezonans şartı daha kolay gerçekleşir ve enerji tesislerinde harmonik rezonansları işletme araçlarının aşırı akımla veya aşırı gerilimle zorlanmasına harap olmalarına yol açar.

1.2. Harmoniklerin Meydana Gelmesi

Arızasız bir işletmede harmonikler çeşitli sebeplerle ortaya çıkarlar. Bunların başında manyetik ve elektrik devrelerindeki lineersizlik gelir. Manyetik devrelerdeki doyma, elektrik devrelerindeki ark ve güç elektroniğindeki sinüs eğrisinin kesilmesi lineer olmayan olaylardır. Mesela generatör, transformatör, motor ve bobin gibi demir çekirdek ihtiva eden cihazlar doymanın baş göstermesi ile harmonikli akımlar üretirler. Ark fırınları ve kaynak makinaları gibi normal işletmeleri gereği bir arkın oluşması sonucunda da harmonikler üretilirler. Nihayet redresörler ve tristörler sinusoidal akım dalgasını keserken yine harmonikler üretirler. Şu halde karakteristiği lineer olmayan devreler tüketiciler 50 Hz frekanslı aktif ve reaktif güç tüketirken harmonik frekanslı akımlar üretirler. Bunlar devrelerini yakınlarında bulunan tüketiciler üzerinden kapatırlar ve harmonik frekanslı gerilimlerin meydana gelmesine sebep olurlar.

Böylece başlangıçta saf sinüsoidal olan gerilimin dalga şekli bozulur. Normal çalışma şartlarının dışında yüksek gerilim hatlarındaki korona olayları iki fazlı kısa devreler de harmoniklerin meydana gelmesine sebep olan olaylar arasındadır. Harmoniklerin meydana geldiği elemanları genel olarak inceleyelim.

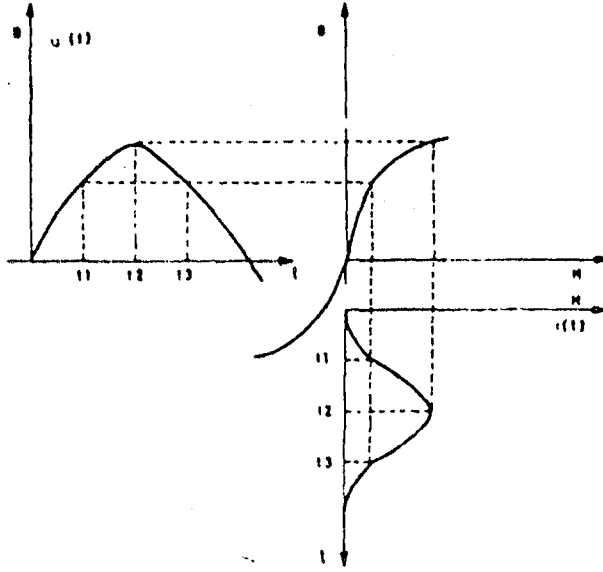
1.2.1 Generatörler

En tabii harmonik üreticisi generatörlerdir. Fakat oluk şekli, sargı yapısı, uyarma sargısı ve kutuplar gibi hususlarda uygun konstrüktif tedbirler alınarak ve generatörü amortisman sargısı ile donatarak gerilim eğrisinin sinusoidal olması sağlanır. Onun için generatörleri önemli bir harmonik üreticisi sayılmazlar. Alman VDE yönetmeliğine göre senkron generatörlerde endüklenen gerilimin sinüs şeklinden farklı olması halinde, akımın herhangi bir andaki değeri ile aynı anda sinüs şeklindeki temel harmoniğin değeri arasındaki farkın, temel dalganın tepe değeri ile oranı %5'ten küçük ise bu akımın pratik olarak sinüsoidal olduğu kabul edilir.

1.2.2 Transformatörler

Enerji tesislerinde en önemli harmonik üreticiler, transformatörler, bobinler vb. gibi demir çekirdeği olan sargılardır. Bunların harmonik üretme özellikleri demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmayışına dayanır.

Transformatörler şebekede sinusoidal ön gerilimle beslendiklerinde, şebekeden bir mıknatıslanma akımı çekerler. Demir çekirdeğin magnetik karakteristiği lineer olmadığından bu mıknatıslanma akımı artık sinusoidal değildir. Şekil 1-1 de şebeke gerilimi mıknatıslanma karakteristiği ve mıknatıslanma akımının oluşması gösterilmiştir.



Şekil 1-1 Transformatörün mıknatıslanma karakteristiği yardımı ile mıknatıslanma akımının elde edilişi.

$u(t)$ Şebeke gerilimi, $B(t)$ mıknatıslanma karakteristiği, $i(t)$ mıknatıslanma akımı.

Şebeke gerilimi belirli bir değerin üzerine çıkarsa transformatör doyma bölgesine girer. Eğer transformatör, mesela geceleri düşük yükte çalışırsa, şebekedeki gerilim düşümü azalacağından transformatör gerilimi yükselir. Aynı şekilde, kompanzasyon maksadı ile sabit paralel kondansatörlerin bağlı olması halinde düşük yükte transformatör kapasitif yükleneceğinden gerilim yükselir. Bu gibi durumlarda mıknatıslanma akımı 1, 3, 5, 7, 9, 11 gibi tek mertebeli harmonikler ihtiva eder. Bunlardan özellikle 5. ve 7. harmonikler daha şiddetli olarak kendilerini hissettirirler.

Harmonik akımlarının tepe değerleri, temel akım dalgasının tepe değerinden çok küçüktür. Esasen transformatörlerin mıknatıslanma akımları, nominal akımlarının %1-%10'u kadardır. Buna rağmen seri bağlı generatör, hat ve transformatör reaktansları frekansla orantılı olarak arttıklarından

özellikle düşük yüklerde yüksek harmonik akımlarının bunlar üzerinde sebep oldukları gerilim düşümleri büyük değerler alırlar ve ayrıca gerilimlerin harmonik kazanmalarına sebep olurlar. Bununla beraber mıknatıslanma akımındaki harmoniklerin şebekeye geçip geçmemesi şu faktörlere bağlıdır.

- Transformatör sargılarının bağlanma şekli.
- Primeri yıldız bağlı transformatörde yıldız noktasının şebekenin nötr hattına bağlı olup olmaması

- Transformatörlerde mıknatıslanmanın serbest veya zorunlu olması

Akım şiddeti bakımından en önemli olan 3. ve 3'ün katlarına eşit olan 9 ve 15. harmoniklerin şebekeye geçmesini önlemek için transformatörün primer veya sekonder sargılarından biri üçgen bağlanır. Yahut büyük güçlü transformatörde olduğu gibi, transformatör güçlü veya tersiyer sargı ile donatılır. Bununla beraber 5. ve 7. harmoniklerin şebekeye geçmesini önlemek mümkün değildir.

Modern transformatörlerde soğuk haddelenmiş ve kristalleri yönlendirilmiş sac kullanıldığından manyetik akı ve bunun sonucu olarak mıknatıslanma akımı çok düşük değerler alır. Böylece şebeke harmonik tehlikesi geniş çapta önlenir.

1.2.3 Redresörler

Enerji tesislerinde güç elektroniği gittikçe önem kazanmakta ve redresörler ile tristörler geniş uygulama alanı bulmaktadır. Fakat bunlarda transformatörler kadar ve hatta daha çok harmonik ürettiklerinden şebekelerde büyük sorunlara yol açmaktadırlar.

Redresörlerde harmonik üretilmesi akımın periyodik olarak kesilmesi esasına dayanır. Sinüs şeklinde bir alternatif gerilime bağlı olan bir redresör şebekeden I temel harmonik akımı ile birlikte yaklaşık olarak

$$I_v = \frac{I_1}{V} \quad (1.1)$$

harmonik akımları çekerler. Redresörlerde darbe sayısı p olmak üzere harmonik mertebesi

$$V = np \pm 1 \quad (1.2)$$

değerini alır. Burada $n = 1, 2, 3...$ gibi tam sayılardır. Genellikle redresörlerde darbe sayısı 6, 12, 24 ve 36'dır. Mesela 6 darbeli bir redresörde $v = 5, 7, 11, 13...$ 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 alır. Darbe sayısı ne kadar büyükse, harmonik mertebeleri o kadar yüksek ve harmonik değerleri o kadar küçük olur.

Pratikte ölçülen harmonik akımları yukarıda hesaplanan değerlerden daha küçüktür ve yukarıda verilen ifadelerin k gibi bir katsayı ile çarpılması ile elde olunur.

$$I_v = \frac{I_1}{V} \cdot k_v \quad (1.3)$$

k_v katsayısı 1'den küçüktür ve redresörün kumandasına bağlı olarak çeşitli harmoniklerde farklı değerler alır.

Mesela: Keşisim açısı $\bar{u}=20^\circ$, kumanda açısı $\alpha=5^\circ$ ve endüktif doğru gerilim düşümü $dx = \%4$ için

$$k_5 = \%92 \quad k_7 = \%83 \quad k_{11} = \%62 \quad k_{13} = \%50 \text{ 'dir.}$$

Redresörlerde darbe sayısı ne kadar yüksek olursa, harmonik mertebeleride o kadar yüksek ve harmonik akımların değerleride o kadar küçük olur. Böylece bunların zararlı tesirleride o oranda azalır.

1.2.4. Arkla Çalışan İşletme Araçları

Ark ocakları ve kaynak makinaları gibi normal çalışmalarını ark ile sürdüren cihazlarda ve tesislerde önemli harmonikler meydana gelir. Ark, akım ile gerilim arasında lineer olmayan bir bağıntının bulunduğu fiziksel bir olaydır. Ark ocaklarının ve kaynak makinalarının ürettikleri akımların harmoniklerini, ne mertebede ve ne de değer bakımından mesela redresörlerde olduğu gibi hesap yöntemi ile tayin etmeye imkan yoktur. Zira arkın meydana gelişi, o anda etkili olan bir çok tesadüfî iç ve dış tesirlere bağlıdır. Onun için

ark akımında tek veya çift mertebeden harmonik bulunduğu gibi bunların değerleri zamana bağlı olarak her an değişebilirler. Ayrıca harmonikler ark ocağının gücüne çalışma safhasına da bağlıdır. Onun için böyle işletmedeki akım harmonikleri hakkında bilgi edinmek için bunların ölçülmesi veya akım eğrilerinin analizinin yapılması gerekir. Ark ocaklarında temel harmoniğin yüzdesi cinsinden en çok rastlanan harmonik akımların ortalama değerleri cetvelde verilmiştir.

Harmonik derecesi	Ortalama Değer	En Büyük Değer
2	4.....9	30
3	6.....10	20
5	2.....6	15
6	2 10	12
7	2.....10	10
9	3 6	8

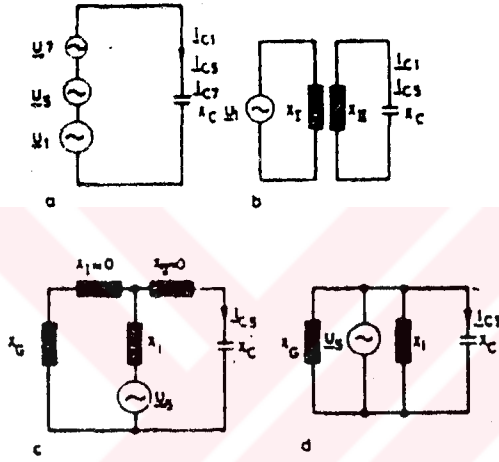
Tablo 1-1 ark ocaklarında en çok rastlanan harmonik akımlarının yüzdesi cinsinden ortalama değeri

Tablo 1-1'de verilen ortalama değerler Fourier analizi sonucu elde edilmiş olup uzun bir zamanı kapsar. En büyük değerler ise saniyeler mertebesindeki analizörler ile ölçülmüştür.

1.3. Harmonik Kaynakların Gösterilişi

Harmonikli gerilim üreticileri gerilimi U_1 olan bir temel frekans üreticisi ile gerilimleri mesela U_3 , U_5 , U_7 U_v olan birçok harmonik üreticilerinin seri bağlandıkları kabul edilir. Böyle bir tesiste aktif güç temel frekans generatörlerinin verdikleri akımlar, parazitlere tekabül eder. Aslında yapılan bu kabül, yalnız generatörler motorlar ve redresörler için geçerlidir. Buna karşılık en önemli harmonik üreticilerinden biri olan transformatörler de yalnız yüksek harmonik üreticilerin seri bağlandıkları kabul edilir; buna karşılık temel frekanslı gerilimin şebeke tarafından verilmesi gerekir. Harmonik üreticisi olan transformatör ya bir sabit gerilim kaynağı, yahut da sabit akım kaynağı olarak kabul edilir. Sabit gerilim kaynağında seri büyük bir

X_i içi harmonik reaktansı vardır. Buna karşılık akım kaynağında sonsuz büyük bir iç reaktansı vardır. Buna karşılık akım kaynağında sonsuz büyük bir iç reaktans ve buna paralel bağlı daha küçük bir X_i reaktansı vardır. Transformatörlerin çok küçük olan primer ve sekonder kaçak reaktansları ihmal edilmişlerdir. Şebekeyi besleyen temel frekans generatörleri harmonik akımları için sadece bir reaktans gibi tesir ederler. Şekilde mesela bir kondansatörle yüklü harmonik kaynaklarının gösteriliş tarzı işaret edilmiştir.



Şekil 1-2 Harmonik Kaynakların Gösterilişi

a. Kapasitif yüklü generatör veya redresör. U_1 , U_5 , U_7 gerilim üreticiler seri bağlı.

b. Kapasitif yüklü transformatör.

c. Transformatör, sabit gerilim kaynağı olarak

d. Transformatör, sabit akım kaynağı olarak.

Pratikte harmonik kaynakları daha çok akım kaynağı olarak tesir ederler.

1.4 Harmoniklerin Elektrik Tesisleri Üzerine Etkileri

Harmonik üreticilerin bulundukları tesislerde bunların çeşitli tesis bölümleri üzerinde birçok zararlı tesirleri vardır. Bunlar aşağıda özet olarak açıklanmıştır.

1. Generatör ve şebeke gerilimi üzerine tesiri:

Bilindiği gibi endüktif dirençler frekansla doğru orantılı olarak artar. Bu yüzden temel harmonikteki değeri de alan endüktif bir direnç harmonik mertebesi r olan bir akım karşısında

$$X_{Lv} = v \cdot X_L \quad (1.4)$$

değerimi alır, yani akımın frekansı büyüdükçe endüktif dirençde büyür. Her ne kadar boşta çalışan generatörlerde sinüs şeklinde bir gerilim (EMK) endüklenir ise de şebekede üretilen harmonikler sebebi ile, yüklenen generatörün sargılarından harmonikli akımlar geçtiğinde bunlar stator kaçak reaktanslarında kaçak alanlar ve yüksek harmonikli gerilim düşümleri meydana getirirler. EMK'nın sinüs şeklinde olmasına rağmen bu yüzden generatör uçlarındaki gerilimin ve şebeke geriliminin şekli bozulur.

2. Gerilim düşümünün artması ve fliker olayı

Harmonik akımlarının frekansları, normal şebeke frekansı 50 Hz'in v katlarına eşit olduğundan bu akımlar karşısında generatör, transformatör ve hat reaktansları üzerinde meydana gelen gerilim düşümleride v ile orantılı olarak artar. Bu gerilim düşümlerinin frekansları v ile orantılı olduğundan bunların normal gerilim birleşmesi sonucunda gerilimin şekli bozulur.

Mesela ark ocakları gibi, olayların hızlı değiştiği yerlerde harmonik akımlarının yol açtıkları gerilim düşümleride zamana bağlı olarak hızlı değiştiğinden, şebeke geriliminde 2-15 Hz. mertebesinde titreşimler baş gösterir; buna "flicker olayı" denir. Bu olay yakında bulunan tesislerdeki cihazlara ve aydınlatma tüketicilerine olumsuz etki yapar. Özellikle akkor flamanlı lambalarda ışığın titreşmesine yol açar. Bu olayda gözlerin rahatsızlanmasına yol açar.

3) Kondansatör üzerine tesir

Kapasitif dirençler frekansla ters orantılı olarak azalır. Bu yüzden temel harmonikteki değeri X_c olan kapasitif direnç, harmonik mertebesi v olan bir akımda;

$$X_{cv} = \frac{X_c}{v} \quad (1.5)$$

değerini alır, yani akımın frekansı büyüdükçe kapasitif direnç küçülür. Bunun sonucu olarak büyük harmonik frekanslarında kondansatörler daha büyük akımlar çekerler ve aşırı yüklenirler.

v . harmoniğin U_v harmonik gerilimi altında kondansatörün çektiği akım:

$$I_v = W_v C U = v.W. C.U_v. \quad (1.6)$$

ve gücü

$$Q_v = v.W.C U_v^2 = \frac{I_v^2}{v.W.C} \quad (1.7)$$

değerini alır; burada $W = W_1$ temel harmoniğin dairesel frekansıdır. Kondansatör uçlarındaki gerilimin efektif değeri

$$U_c = \sqrt{\sum_1^n U_v^2} \quad (1.8)$$

dir. Kondansatör akımının efektif değeri de, aynı şekilde harmonik akımlarının karesel ortalamasına eşittir.

$$I_c = \sqrt{\sum_1^n I_v^2} \quad (1.9)$$

Bu kondansatör harmonik akımının harmonik derecesi ile artmasından akım, harmonikli gerilimin efektif değerine eşit sinüsel bir gerilim altında kondansatörün çektiği akımdan büyüktür. Onun için kondansatör tesislerinde besleme iletkeninin kesitinin sigortaların ve anahtarların seçiminde, harmonikli akımın sinüsoidal nominal akımdan daha büyük olduğu daima göz önünde bulundurulmalıdır.

v. harmonik için kondansatör gücü

$$Q_v = I_v \cdot U_v = v \cdot w \cdot c \cdot U^2 v = \frac{I_v^2}{v \cdot W \cdot c} \quad (1.10)$$

ifadesine göre hesaplanır. Harmonikli U_c ve I_c efektif değerleri uygun ölçü cihazları ile ölçülebildikleri halde kondansatörün Q_c gücü akım ile gerilimin efektif değerlerinin çarpımı ile hesaplanan ve ayrıca normal watmetre ile ölçülemez. Kondansatör gücü gerekirse;

$$Q_c = \sum_1^x Q_v = WC \sum (v \cdot U_v)^2 = \frac{1}{WC} \sum \left(\frac{I_v}{v} \right)^2 \quad (1.11)$$

ifadesine göre hesaplanabilir.

Gerilimdeki harmonikler sebebi ile kondansatörün gücü de artar. Şebeke işletmesinde sadece temel harmoniğe ait güç önem taşır. Buna karşılık kondansatörün dielektrik kayıpları yani termik zorlanması bakımından toplam kondansatör gücü geçerlidir. Eğer temel harmonikten başka bir adet v gibi belirli bir harmonik varsa toplam kondansatör gücünün nominal kondansatör gücüne oranı yaklaşık olarak;

$$\frac{Q_c}{Q_{cn}} = \frac{\bar{V}}{V+1} \left(\frac{U_c}{U_{cn}} \right)^2 + \frac{1}{V+1} \left(\frac{I_c}{I_{cn}} \right)^2 \quad (1.12)$$

ifadesine göre hesaplanır.

Mesela kondansatöre uygulanan gerilim, temel harmoniğin %20 oranında 5. harmonik iltiva ederse, yani $U_5=0.2U$ ise, kondansatörün çektiği 5. harmonik akımı

$$I_5=5W.C.0.2.U_1=W.C.U_1 \quad (1.13)$$

olur. Temel harmonik akımı ise $I_1 = I_n$ olduğu kabul edilirse

$$I_1=W.C.U_1 \quad (1.14)$$

$$I_5=I_1 \quad (1.15)$$

dır. Buna göre kondansatörün çektiği toplam akım

$$I_c = \sqrt{I_1^2 + I_5^2} = I_1 \sqrt{2} = 1,41 \cdot I_1 \quad (1.16)$$

değerini alır. Bu akım ise, temel harmonik akımından %41 oranında daha büyüktür. TS604'e göre kondansatörün en fazla 1,3 In değerinde aşırı yüklemesine müsaade edildiğinden, bu verilen misalde bir taraftan kondansatörün dielektrikumu, müsaade edilen değere göre %10 kadar daha fazla zorlandığı gibi, diğer koldan kondansatörü besleyen iletkenler ve sair tesis elemanları aşırı, yüklemiş olurlar.

%20 oranında 5. harmoniği olan gerilimin efektif değerinin

$$U_e = U_1 \sqrt{1 + 0,2^2} = 1,02 \cdot U_1 \quad (1.17)$$

olduğu göz önüne alınırsa kondansatörün gücü normal değerin yaklaşık

$$\frac{Q_c}{Q_{cn}} = 1,2 \quad (1.18)$$

katı olur.

TS 804'e göre kondansatörler, sinüs şeklinde gerilim altında ve nominal frekansla sürekli olarak nominal efektif akım değerinin 1,5 katı ile yüklenebilirler. Aynı şekilde gerilim içinde 1,1 U_n gibi bir sınır değer konmuştur. Şu halde sinüsoidal olmayan bir gerilim altında, yukarıda söz konusu akım ve gerilim şartları ile kondansatörün sürekli olarak 1,55 Q_n ile çalıştırılmasına müsaade edilmektedir.

4. Zayıflığın artması:

Harmonik akımları, şebekede faz başına $I_v^2 \cdot R$ gibi ilave bir zayıflığın meydana gelmesine sebep olur. Gerilim eğrisindeki harmonikler makinelerin yüklenmeleri halinde zararlı ilave akımların geçmesine yol açar. Bu yüzden makinalar, transformatörler ve enerji nakil hatları ilave olarak ısınırlar. Ayrıca generatörleri amortisman sargıları, bir fazlı veya iki fazlı kısa devrelerde meydana gelen harmonikleri azaltarak ve ortadan kaldıracak şekilde tesir ederken kendileride çok ısınırlar. Bunun sonucundada generatörlerde ilave kayaçların meydana gelmesine yol açarlar.

5. Elektrik makinaları üzerine tesir;

Harmonikli gerilimle beslenen senkron makinalarda ve asenkron makinalarda aşırı ısınma olayları oluşmasının yanısıra harmonikler bunların salınım yapmalarına yol açar.

6. Sayaçlar üzerine tesir;

Endüksiyonlu tip sayaçlarda yapılan enerji ölçümü, harmonikli deverelerde yanlış sonuç verir.

7. Kontrol cihazları üzerine tesir;

Özellikle ateşleme anları, gerilimin sıfırdan geçmesine göre ayarlanmış olan kontrol cihazları ve otomatik anahtarları harmoniklerin etkisiyle hatalı çalışırlar.

8. Mikro bilgi işlemcileri üzerine tesir;

Yarı iletkenli bilgi işlemci sistemlerde harmonikler hatalı çalışmalara yol açarlar.

9. Toprak temasının kompanzasyonu;

Eğer faz arası gerilimler harmonikler ihtiva ederlerse, kompanzasyonlu şebekelerde bir toprak teması halinde, toprak akımlarında o kadar büyük harmonikler bulunurki, yıldız noktasına bağlı kompanzasyon bobini görevini tam olarak yapamaz ve erken söndürülmesi zorlaşır. Kompanzasyon şebekelerde ise sık sık gelip giden toprak kısa evresi işletme frekansından daha yüksek frekanslı aşırı gerilerin meydana gelmesine sebep olur; zira arkın her sönüp ve yeniden tutuşması şebeke frekanslı cebri titreşimlere yol açar.

10. İzalasyon Delinmesi

Sinus şeklindeki gerilim eğrisine eklenen gerilim harmoniklerinin meydana getirdiği iğne ucu şeklinde sivri çok kısa süreli ani gerilim yükselmeleri mesela gerilim rezonansı gibi hallerde makina ve transformatör sayılarının izalasyonları ve kondansatörlerin dielektrik maddeleri için büyük bir tehlike teşkil ederler ve icabında izolasyonda delinmeye yol açabilirler.

Buna karşılık mesnet, askı ve geçiş izalatörleri için bu aşırı gerilimler hemen hemen hiç bir tehlike arz etmezler.

11. Rezonans olayları

Harmoniklerin en önemli tesirlerinden biri rezonans olaylarıdır. Genellikle elektrik tesislerinde mesela redresör grublarının veya ark ocaklarının bağlı oldukları baralara reaktif güç kompanzasyonu için kondansatör bataryaları paralel bağlanırlar. Tesis elemanlarının tabii X_2 endüktif dirençleri ile kompanzasyon kondansatörlerinin X_c kapasitif dirençleri bilindiği gibi bir titreşim devresi oluştururlar. Bunlar bir taraftan normal şebeke frekanslı gerilimin tesiri altında oldukları gibi diğer taraftan harmonik üreticileri tarafından harmonikli akımlarla beslenirler. X_L ve X_c 'nin değerine göre belirli harmonik frekanslarında rezonans olayı oluşabilir. Titreşim devresinin tipine göre rezonans halinde aşırı akımlar veya aşırı gerilimler meydana getirirler. Bunlar yalnız kondansatörlerin değil diğer tesis elemanlarında zarar görmelerine neden olabilir.

12. Yarı İletkenler Üzerine Tesir

Normal frekanslı gerilim üzerine bindirilmiş olan harmonik gerilimlerinin kısa süreli iğne şeklinde ani yükselen uçları izolatörlerde olduğu gibi yarı iletkenlerinde delinmelerine yol açarlar.

13. Telekomünikasyon tesislerini tesir

Çok yüksek mertebeli harmonikler, amplitidlerin küçük olması sebebi ile kuvvetli akım tesislerinde zararsız oldukları halde bunlar, haberleşme tesisleri için zararlı olurlar. Ve parazitler meydana getirirler.

14. Boşta çalışmada ve düşük yüklerde harmoniklerin tesiri şebekenin tam yüklenmesi haline göre daha büyüktür.

BÖLÜM 2

2. HARMONİKLERİN ANALİZİ

2.1 Harmonik Analizine Genel Bakış

Alternatif akım teorik olarak zamanın sinusoidal bir fonksiyonu olduğu düşünülür. Bu düşünce doğrultusunda gerekli incelemeler kolaylıkla yapılabilir. Uygulama alanında ise alternatif akım veya gerilim tam olarak bir sinusoidal fonksiyon şeklinde olmayıp buna yakın fakat periyodik olarak değişen bir fonksiyon şeklindedir.

Harmonikli akım ve gerilim büyüklüklerinin etkisinin analizinde harmonik bileşenlerinden yararlanılır.

Bir fonksiyon sonsuz sayıda sinusoidal fonksiyonların toplamı şeklindedir. Burada etkinliği en fazla olan 1. harmonik yani temel bileşendir.

Harmoniklerin dairesel frekansı W_v ile gösterilirse genellikle

$$W_v = v.W \quad (2.1)$$

dir. Burada w , temel harmoniğin frekansı olup $W = W_1$ dir. ve kuvvetli akım tesislerindeki sebeke frekansı.

$$W_s = W = W_1 = 314 \text{ 1/5'dir}$$

v = harmonik mertebesi

2.2. ANALİZ YÖNTEMLERİ

2.2.1. Fourier Analizi

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

şeklindeki bir seriye trigonometrik seri denir. Bu seri daha kısa olarak

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

şeklinde gösterilebilir.

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

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{v=1}^{\infty} (a_v \cos vx + b_v \sin vx) \quad (2.2)$$

olduğunu kabul ediyoruz.

Birinci taraftaki fonksiyonun integralinin (2.2) serisinin terimlerinin integrallerinin toplamına eşit olduğunu farzediyoruz. İlk olarak a_0 'ı hesaplamak üzere (2.2) ifadesinin her iki tarafının $-\pi$ 'den $+\pi$ 'ye kadar terim integrallerini hesaplayalım. Bu takdirde;

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

elde edilir. İkinci taraftaki herbir integrali hesaplarsak;

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \frac{a_0}{2} dx = \pi \cdot a_0$$

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \cos vx dx = \left| \frac{\sin vx}{v} \right|_{-\pi}^{+\pi} = 0$$

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \sin vx dx = \left| -\frac{\cos vx}{v} \right|_{-\pi}^{+\pi} = 0 \text{ elde edilir.}$$

Buna göre

$$\int_{-\pi}^{+\pi} f(x) dx = \pi \cdot a_0 \text{ ve buradan da}$$

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x).dx \quad (2.3)$$

bulunur. Diğer katsayıları hesaplamak için evvela aşağıdaki yardımcı integralleri hatırlayalım. V ve k tam sayılar olarak;

$$v \neq k \text{ ise}$$

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \cos v x \cdot \cos k x \cdot dx = 0 \quad ; \quad \int_{-\pi}^{+\pi} \cos v x \cdot \sin k x \cdot dx = 0 ;$$

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \sin v x \cdot \sin k x \cdot dx = 0 \text{ dir.}$$

$v = k$ ise

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \cos^2 k \cdot dx = \pi \quad ; \quad \int_{-\pi}^{+\pi} \sin k x \cdot \cos k x \cdot dx = 0 ;$$

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \sin^2 k x \cdot dx = \pi \text{ dir.}$$

Bunlar yardımıyla (2.2) serisinin a_k , b_k katsayılarını hesaplayabiliriz. $k \neq 0$ olarak a_k 'yi hesaplamak için (2.2) eşitliğinin her iki tarafını terim $\cos kx$ ile çarpalım.

Böylece

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

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

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

İkinci taraftaki terimlerden a_k katsayılı olanı hariç yukarıda hatırlattığımız integrallere göre sıfır olacağından

$$\int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \cdot \cos k x \cdot dx = a_k \int_{-\pi}^{+\pi} \cos^2 k x \cdot dx = \pi \cdot a_k$$

ve buradan da

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \cdot \cos k x \cdot dx$$

elde edilir.

b_k katsayılarını belirtmek içinde (2.2) eşitliğinin her iki tarafını $\sin kx$ ile çarpalım ve her terimin $-\pi$ 'den $+\pi$ 'ye kadar integrallerini hesaplıyalım. Bu takdirde;

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

elde edilir. Buradan da ikinci taraftaki terimlerden b_k katsayılı olanı hariç hepsi yukarıda verdiğimiz yardımcı integrallere göre sıfır olacağından:

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \sin kx \cdot dx = b_k \int_{-\pi}^{\pi} \sin^2 kx \cdot dx = 11. b_k \text{ ve buradan da}$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \sin kx \cdot dx$$

elde edilir.

(2.5)

(2.3), (2.4), (2.5) formülleri ile tanımlı katsayılara $f(x)$ fonksiyonunun Fourier katsayıları ve bu katsayılarla oluşturulmuş (2.1) trigonometrik serisine de $f(x)$ fonksiyonunun Fourier Serisi denir.

Fourier Serisine Açılabilme Şartları;

$f(t) = f(t + I)$ ifadesiyle belirlenen periyodik herhangi bir fonksiyon şu şartları sağladığında Fourier Serisine açılabilir:

a) Fonksiyon süreksiz ise, I periyodu içerisinde sonlu sayıda süreksizlik noktası bulunmalıdır.

b) Fonksiyonun I periyodu için sonlu ortalama değeri bulunmalıdır.

c) Fonksiyonun sonlu sayıda pozitif ve negatif maksimum değerleri olmalıdır.

Dirichlet şartları olarak adlandırılan bu şartlar sağlandığında fonksiyonun Fourier açılımı vardır ve trigonometrik formda şöyle yazılır;

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + a_1 \cos. wt + a_2 \cos 2. wt + + a_v \cos vwt$$

$$+ b_1 \sin wt + b_2 \sin 2wt + + b_v \sin vwt + \dots \quad (2.6)$$

veya

$$f(t) = C_0 + C_1 \sin (wt - \varphi_1) + C_2 \sin (2wt - \varphi_2) + + C_v \sin (vwt - \varphi_v) + \dots \quad (2.7)$$

şeklinde yazılabilir. Bu takdirde periyod I olacağına göre integralleri $(0, T)$ veya $(-I/2, I/2)$ aralıkları için hesaplamak gerekir.

a_0, a_v, b_v katsayılarını veren formüller ise

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.8)$$

$$a_v = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos vwt dt \quad (2.9)$$

$$b_v = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin vwt dt \quad (2.10)$$

şeklini alır. (2.6) ile (2.7) denklemlerini

$$a_v \cos vwt + b_v \sin vwt = C_v \sin (vwt - \phi_v)$$

şeklinde eşitlenirse

$$C_v = \sqrt{a_v^2 + b_v^2} \quad (2.11)$$

ifadesine "Harmonik Modülü" denir. Ve faz açısı da

$$\phi_v = \arctan \frac{b_v}{a_v} \quad (2.12)$$

olarak bulunur.

Fourier Serisinin (2.7) ifadesindeki C_0 katsayısına "doğru bileşen", wt 'yi içeren C_1 katsayılı terimlere periyodik fonksiyonun "temel terimi" veya "fundamental terimi" denir. Diğer terimler ise "harmonik bileşenler" ya da kısaca harmoniklerdir.

Mesela; $2wt$ 'yi içeren ve C_2 katsayılı terim ikinci harmonik, $3wt$ 'yi içeren terim üçüncü harmonik, vwt 'yi içeren ve C_v katsayılı terim de v 'inci harmoniktir.

Periyodik fonksiyonun değişimini gösteren eğrinin şekline göre açılımı bazı harmonikler bulunmayabileceği gibi bazen de yalnız kosinüslü veya yalnız sinüslü terimlerin sadece bir kısmı mevcut olabilir. Bu suretle açılımı birtakım kısaltmalar yapılabileceğini önceden kestirmek mümkündür. Rastlanan başlıca durumları şöyle sıralayabiliriz:

a) $y = f(x)$ fonksiyonunun değişimini gösteren eğri, birbirinin aynı fakat ters işaretli iki yarım periyottan oluşmuştur. Bu takdirde $f(\pi+x) = -f(x)$ şartı sağlanır. Şu halde $a_0 = 0$ olmalı ve aynı zamanda x 'in çift katlarının

kosinüsleri ile sinüsleri bulunmamalı, yani bunların katsayıları da sıfır olmalıdır. Bu şartlar kısaca $a_0 = b_{2k} = 0 = a_{2k}$ olarak ifade edilebilir.

Ve böylece, açılım daha basit olan

$$f(x) = a_1 \cos x + a_3 \cos 3x + \dots + b_1 \sin x + b_3 \sin 3x + \dots$$

şeklini alır.

b) Periyodik fonksiyonun değişimini gösteren eğri (a)'daki şartı gerçeklemekle beraber, ayrıca her yarım periyotluk kısım $1/4$ periyoda karşılık gelen noktadan geçen bir düşey eksene göre simetriktir. Bu takdirde $f(\pi - x) = f(x)$ şartı sağlanır. Şu halde

$$a_1 = a_{2k+1} = b_2 = b_{2k} = 0 \text{ olması gerekir}$$

Bundan önce de (a) şıkında bulunan şartı da ekleyerek açılımda x 'in yalnız tek katlarının sinüslerinin bulunacağı görülür. O halde açılım $f(x) = b_1 \sin x + b_3 \sin 3x + \dots + b_{2k+1} \sin (2k+1)x + \dots$ şeklinde olur. Yani açılımda sadece tek harmonikler mevcuttur.

c) Eğri, fonksiyonun sıfır değerine tekabül eden noktaya göre simetriktir. $f(-x) = -f(x)$ şartı sağlanır. Burada $a_0 = a_1 = a_2 = \dots a_n = 0$ şartı bulunarak açılım

$$f(x) = b_1 \sin x + b_2 \sin 2x + \dots + b_n \sin nx + \dots$$

şeklinde yazılır. Yani açılımda sinüslü terimler vardır. Hem tek, hem çift harmonikler mevcuttur.

d) Eğrinin bir periyoda karşılık gelen düşey bir simetri eksenine bulunması hali. Yani; $f(-x) = f(x)$ şartı gerçekleşmiştir. Bu şart (c)'deki şarta benzer. Fakat sadece bir işaret farkı vardır. O halde açılımda sinüslü terimler bulunmayacak buna karşılık sabit terimle kosinüslü terimler bulunacaktır. Buna göre açılım;

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos x + a_2 \cos 2x + \dots + a_n \cos nx \text{ şeklinde olacaktır.}$$

Efektif değeri ve Gücü için

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

fonksiyonu ele alalım.

$$F_{ef} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} a_0\right)^2 + \frac{1}{2} a_1^2 + \dots + \frac{1}{2} b_1^2 + \frac{1}{2} b_2^2 + \dots} \quad (2.13)$$

ifadesinde $C_v = \sqrt{a_v^2 + b_v^2}$ ile harmonik genliğini ifade ederek ve ortalama değeri için C_0 yazarak,

$$F_{ef} = \sqrt{C_0^2 + \frac{1}{2} C_1^2 + \frac{1}{2} C_2^2 + \dots} \quad (2.14) \text{ bulunur.}$$

Lineer bir devreye uygulanan periyodik bir gerilim düşünelim. Akım gerilimle aynı harmonikteki terimleri içereceğinden ancak empedans $v\omega$ ile değişeceğinden, görünen harmonik genliklerinin değiştiğini söyleyebiliriz. Ayrıca sonsuz empedansa yol açabilecek paralel rezonans durumlarında akımın bazı harmoniklerinin görülememesi de mümkündür.

Genel olarak; akım ve gerilimin anı değerleri için

$$V = V_0 + \sum V_v \sin(v\omega t + \phi_v) \quad (2.15)$$

$$i = I_0 + \sum I_v \sin(v\omega t + \Psi_v) \quad (2.16)$$

yazılabilir. Efektif değerler ise;

$$V_{ef} = \sqrt{V_0^2 + \frac{1}{2} V_1^2 + \frac{1}{2} V_2^2 + \dots} \quad (2.17)$$

$$I_{ef} = \sqrt{I_0^2 + \frac{1}{2} I_1^2 + \frac{1}{2} I_2^2 + \dots} \quad (2.18)$$

Akım ve gerilimin anı değerlerinin çarpımıyla verilen anı güç,

$$p = v \cdot i = \left[V_0 + \sum V_v \sin(v\omega t + \phi_v) \right] \left[I_0 + \sum I_v \sin(v\omega t + \Psi_v) \right] \quad (2.19)$$

ve anı gücün integrali olan ortalama güç

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt = V_0 I_0 + \frac{1}{2} V_1 I_1 \cos \theta_1 + \frac{1}{2} V_2 I_2 \cos \theta_2 + \dots \quad (2.20)$$

yazılabilir.

Burada $\phi_v = \phi_v - \Psi_v$ devrenin (vw) rad/s frekansında eşdeğer empedans açısıdır.

V_v , I_v , sinüs fonksiyonlarının maksimum değerleridir. Tek frekanslı alternatif akım devresinde ortalama güç $\frac{1}{2} V_{\max} I_{\max} \cos \theta$ iken doğru akım devresinde $V_o I_o$ 'dır.

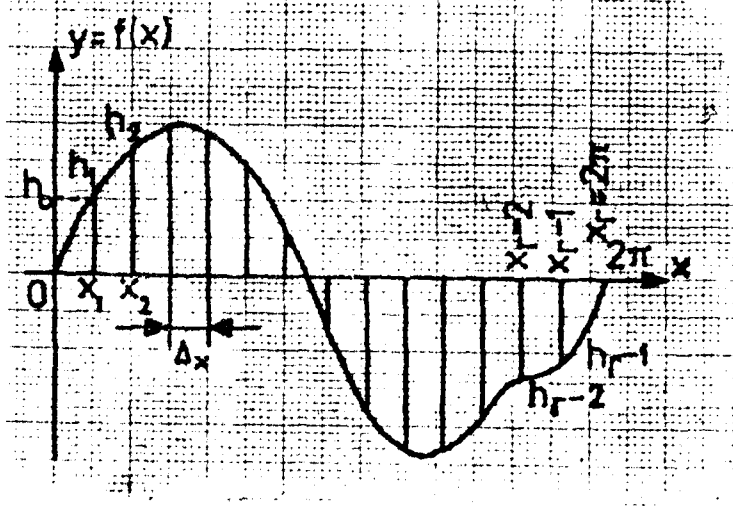
Böylece (2.20) denklemi doğru akım, tek frekanslı alternatif akım ve periyodik nonsinüsoidal dalgalara ilişkin genel güç ifadesidir. (2.20) denkleminde farklı frekanslarda akım ve gerilimlerden ortalama güce bir katkı yoktur. Böylece güç bakımından her bir harmonik birbirinden bağımsızdır.

2.2.2 Grafik Yöntemi

Denklemi bilinen bir periyodik $f(x)$ fonksiyonunun Fourier serisi halinde açılımını yazmak için terimlerin katsayıları olan ve (2.3), (2.4), (2.5) denklemleri ile verilen integralleri hesaplamak gerekir. Halbuki fonksiyonun denklemi bilinmiyorsa ve sadece değişimini gösteren eğri deneyle veya herhangi bir yoldan nokta çizilerek verilmişse, bu integralleri ancak yaklaşık olarak hesaplamak mümkün olacaktır. Bunu yapmak içinde verilen eğriyi küçük parçalara bölerek bu parçalarla ilgili toplamları yapmak ve bunları katsayıları veren formüllerdeki integrallere eşitlemek gerekir.

Denklemi bilinmeyen $y = f(x)$ periyodik fonksiyonunun değişimini gösteren şekil 2.1'deki eğrinin, deneyle çizilmiş olarak verildiğini farzedelim. Bu eğrinin apsisini $(0, 2\pi)$ aralığı içinde r tane eşit parçaya bölelim. Bu parçalara karşılık gelen x değerlerini de

$$X_0 = 0, X_1, X_2, \dots, X_{r-1}, X_r = 2\pi \text{ ile gösterelim.}$$



Şekil 2.1. Sinüsoidal olmayan bir dalga'nın $(0, 2\pi)$ aralığında r tane parçaya bölünmesi.

$f(x)$ 'in bunlara uyan değerleri eğri üzerinde ölçülerek $h_0 = 0, h_1, h_2, h_3, \dots, h_{r-1}, h_r$ olsun. $h_r = h_0$ 'dır ve bu $x = 0$ ve $x_r = 2\pi$ 'ye karşılık gelen x_0 ve x_r değerlerinin eşit olduğu aşîkardır. r ne kadar büyük olursa, bölünen parçalar o kadar küçük olacak ve hesaptaki yaklaşıklık da o kadar azalacaktır. Bu fonksiyonun açılımının sabit terimini bulalım. Denklemi bilinen $f(x)$ fonksiyonunun açılımının sabit terimi

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x).dx \text{ formülü ile verilmişti. Bu formül}$$

fonksiyonun ortalama değerini gösterir. Eğrisi verilen periyodik fonksiyonun ortalama değerini yaklaşık olarak bulmak için, küçük dikdört-genlerin yüzölçümlerini toplamak ve sonra bunu dikdörtgenlerin tabanlarının toplamı olan X_r 'e bölmek gerekir. Dikdörtgenlerin ortak olan taban boylarını Δx ile ve herhangi birinin yüksekliğini de h_k ile gösterelim. Bütün dikdörtgenlerin yüzölçümlerinin toplamı

$$S = \sum_{k=1}^{k=r-1} h_k \cdot \Delta x \quad (2.21)$$

dir. $k = 0$ ve $k = r$ için $h_0 = h_r = 0$ olacağından yukarıdaki ifade de k 'ya sadece 1'den $r-1$ 'e kadar değerler verilmiştir. 0 ve r değerleri verilmemiştir. Böylece yapılan toplamda h_k 'lar değişik değerler alacak, fakat ΔX 'ler daima aynı kalacaktır. O halde

$$\begin{aligned} S &= \sum_{k=1}^{k=r-1} h_k \cdot \Delta X = h_1 \cdot \Delta X + h_2 \cdot \Delta X + \dots + h_{r-2} \Delta X + h_{r-1} \Delta X \\ &= \Delta X (h_1 + h_2 + \dots + h_{r-1}) \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$S = \Delta X \cdot \sum_{k=1}^{k=r-1} h_k \quad (2.23)$$

elde edilir. Buradan $x_r = r \cdot \Delta x$ olduğu da gözönünde tutulursa $\frac{1}{2} a_0$ terimini veren ortalama değer

$$\frac{1}{2} a_0 = \frac{S}{x_r} = \frac{\Delta x}{r \cdot \Delta x} \sum_{k=1}^{k=r-1} h_k \quad (2.24) \text{ veya}$$

$$a_0 = \frac{2}{r} \sum_{k=1}^{k=r-1} h_k \quad (2.25)$$

olarak bulunur. Şimdi de kosinüslü ve sinüslü terimlerin katsayılarını bulalım. (2.4) ve (2.5) ifadelerine benzeterek a_v ve b_v katsayılarını hesaplayabiliriz. Denklemi bilinen bir periyodik fonksiyon için:

$$b_v = \frac{1}{\Pi} \int_{-11}^{+11} f(x) \cdot \sin vx \cdot dx \text{ ve } a_v = \frac{1}{\Pi} \int_{-11}^{+11} f(x) \cdot \cos vx \cdot dx$$

şeklindeydi. Bu fomüllerin a_0 sabit terimini veren formüllerden farkı, sadece integral işareti içinde $\cos vx$ ve $\sin vx$ 'in bulunmasıdır. O halde integralleri gene küçük dikdörtgenlerin toplamı gibi düşünerek;

$$\left. \begin{aligned} a_v &= \frac{1}{\Pi} \sum_{k=1}^{k=r-1} h_k \cdot \cos vx_k \cdot \Delta x \\ b_v &= \frac{1}{\Pi} \sum_{k=1}^{k=r-1} h_k \cdot \sin vx_k \cdot \Delta x \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

yazılabilir. Burada Δx , dikdörtgenin tabanıdır ve $2\pi/r$ 'e eşittir. Diğer taraftan, $x_k = k \cdot \Delta x$ olduğundan Δx yerine değeri konarak $x_k = k \cdot \frac{2\pi}{r}$ bulunur ve (2.26)

ifadelerinde Δx 'leri Σ işareti dışına çıkararak ve x_k yerine de değerini koyarak:

$$\left. \begin{aligned} a_v &= \frac{2}{r} \sum_{k=1}^{k=r-1} h_k \cdot \cos k \cdot \frac{2\pi \cdot v}{r} \\ b_v &= \frac{2}{r} \sum_{k=1}^{k=r-1} h_k \cdot \sin k \cdot \frac{2\pi \cdot v}{r} \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

bulunur. Şu halde Σ ile gösterilen toplamı ayrı ayrı yazarsak

$$\left. \begin{aligned} a_v &= \frac{2}{r} h_1 \cdot \cos \frac{2\pi v}{r} + h_2 \cdot \cos \frac{4\pi v}{r} + \dots + h_{r-1} \cdot \cos(r-1) \cdot \frac{2\pi v}{r} \\ b_v &= \frac{2}{r} \cdot h_1 \cdot \sin \frac{2\pi v}{r} + h_2 \cdot \sin \frac{4\pi v}{r} + \dots + h_{r-1} \sin(r-1) \frac{2\pi v}{r} \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

elde edilir.

Eğer fonksiyonun açılımında bir takım kısaltmalar yapmak mümkünse, bu takdirde gereğine göre eğrinin yalnız $(0, \pi)$ aralığına veya $(0, \pi/2)$ aralığına karşılık gelen kısmı hesaba katılır. Ve bu aralıklar r tane eşit parçaya bölünür. Fakat $(0, \pi/2)$ aralığı alındığı takdirde, x_r 'e karşılık gelen h_r değeri bundan önce söylendiği gibi sıfıra eşit olmayıp fonksiyonun maksimum değerine karşılık gelir. Bu takdirde (2.27) formüllerinde Σ işaretlerini, k 'nın 1'den r 'e kadar olan değerleri için yazmalıdır. Yani;

$$\left. \begin{aligned} a_v &= \frac{2}{r} \sum_{k=1}^{k=r} h_k \cdot \cos k \cdot \frac{2\pi \cdot v}{r} \\ b_v &= \frac{2}{r} \sum_{k=1}^{k=r} h_k \cdot \sin k \cdot \frac{2\pi \cdot v}{r} \\ a_0 &= \frac{2}{r} \sum_{k=1}^{k=r} h_k \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

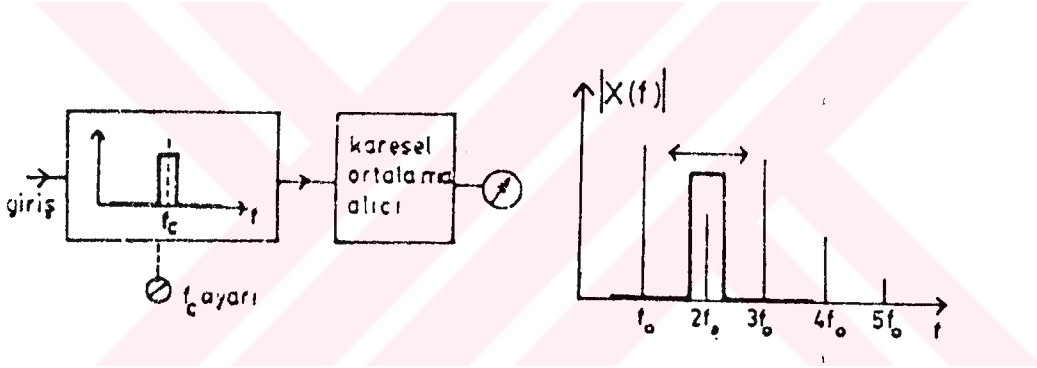
şeklinde yazılmalıdır. Esasen bu formüller genel olarak herhangi bir eğri şekline uygulanabilir. Ve eğri $(0, 2\pi)$ aralığı için hesaplanıyorsa ve $h_0 = 0$ ise, mutlaka $h_r = 0$ 'dır. Bu takdirde toplamın k 'nın 1'den r 'e kadar bütün değerleri alınarak hesaplanmasının sonuca bir etkisi olmayacağı açıkça

belirgindir. Yalnız hesaplar eğrinin hangi aralığı için yapılıyorsa formüllerdeki r 'in de 0 aralığın r parçaya bölündüğünü göstereceğine dikkat etmelidir.

2.2.3. Ölçme Yöntemi

Elektrik devrelerinde $x(t)$ fonksiyonu bir devrenin herhangi bir yerindeki gerilim değişimi olabilir. Zamana göre periyodik olarak değişen böyle bir gerilimde harmoniklerin ölçülmesi için çok çeşitli ölçme düzenleri geliştirilmiştir.

Bu ölçme düzenlerinin çoğunun kullandığı yaygın yol çok darbandlı ve orta frekansı değiştirilebilen bir filtre ile harmoniklerin süzülerek bir voltmetre ile ölçülmesi temeline dayanır. Böyle bir düzenin basitleştirilmiş blok diyagramı şekil 2.2'de gösterilmiştir.

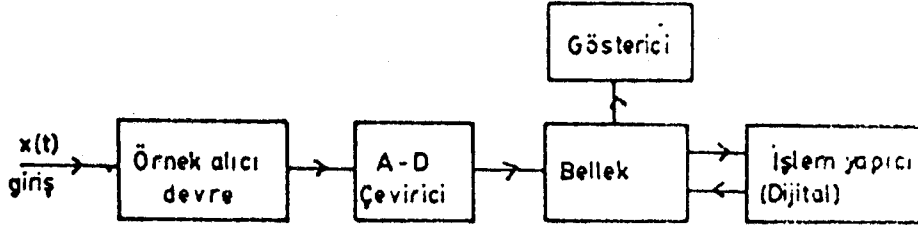


Şekil-2.2. Filtre tipi analog harmonik genlik analizörü.

Bu tür düzenler "harmonik genlik analizörü" ya da "dalga analizörü" olarak isimlendirilir. Bunlara harmonik genlik analizörü demek daha doğrudur. Çünkü bu tür analizörlerle harmoniklerin faz açıları ile ilgili hiçbir bilgi elde edilememektedir.

Harmoniklerin ölçülmesi için kullanılan ölçme düzenlerinin bir kısmı da dijital harmonik analizörlüdür.

Bir dijital harmonik analizörünün basitleştirilmiş blok diyagramı şekil 2.3’de verilmiştir. Bu analizörün belirgin bir üstünlüğü incelenecek işaretin sadece bir periyodunun ele alınmasının yeterli oluşudur.



Şekil 2.3. Dijital harmonik analizörü.

Yöntemin başarılı olabilmesi için işaret/gürültü oranının çok büyük olması gerekir. Başka bir tabirle bir periyotta alınan örneklerin diğer periyottakilerle aynı olup olmadığı ya da örnek alma sırasında geçici bir bozulma olup olmadığı problemi vardır. Bu problemi gidermek için sadece bir periyot değilde birkaç periyod incelenerek ortalama alınır. Bunun sonucu olarak da sistemde yazma ve tekrarlama için ayrı bir bölümün gerekliliği ortaya çıkar.

Görülüyor ki örnek alma ve dijital hesaplama ile harmonikler faz açıları ile birlikte ölçülebilmektedir. Üstelik hassasiyet artırılabilir. Ancak bu sistemler pahalı ve karmaşık olduğu için her alanda rahatça kullanılamamaktadır.

Harmonikleri faz açıları ile birlikte ölçülebilecek analog türden ölçü düzenleri henüz pek geliştirilememiştir. Bunun nedenini elektronğin birçok dallarında olduğu gibi harmonik analizinin ençok uygulandığı yerlerde bile harmoniklerin faz açılarının bulunmasına çok fazla ihtiyaç duyulmayışına bağlayabiliriz.

Elektrik devrelerinde lineer olmayan elemanların kullanılmasının gün geçtikçe artması, harmoniklerin genliklerinin ölçülmesi kadar faz açılarının da ölçülmesinin önemini artırmıştır. Sadece ikinci harmoniğin var olduğu durumlarda bile bu harmoniğin genliği aynı kalmak şartıyla faz açısının değişiminin işaretin dalga şeklini ne kadar etkilediği malumdur.

Dijital harmonik analizörleri, sadece belli ve az sayıda harmonik katsayısının ölçülmesi ile uğraşıldığında pahalı gelmektedir. Bu bakımdan zaman zaman az sayıda harmoniği ölçebilecek analizörler de araştırılmıştır.

Potter/1/, Medhurst/2/ ve Atherton/3,4 / sinüsoidal kaynakla uyarılar lineer olmayan bir devrenin çıkışındaki harmonikler bilindiğinde, devrenin giriş-çıkış karakteristiğinin nasıl bulunabileceği ile ilgili metodları geliştirmelerinden sonra, 1967'de Jain ve Ather/5/ alternatif akım denkleştiricisi prensibine dayanan bir harmonik analizörü geliştirmişler ve bunun lineer olmayan bir devrenin karakteristiğinin bulunmasında kullanılabileceğini göstermişlerdir.

1977 yılında Szabados ve Hill/6/ aynı ilkeye dayanan benzer bir analizör geliştirmişlerdir. Jain ve Atherton'un daha az eleman kullanılarak yapılan bu analizör ile harmoniklerin faz açısı daha doğru ölçülmesinde zaman alıcı üç ayrı ayara ihtiyaç duyulmasının yanı sıra sadece tek harmoniklerin ölçülebilmesi bu düzenin fazla tutulmasını önlemiştir.

1978'de Takagi'nin geliştirdiği bir Fourier dönüştürücüsü/7/ harmoniklerin faz açıları ile birlikte ölçülmesi için kullanılabilir. Bu Fourier dönüştürücüsü dördüncü harmoniğe kadar genliği ve faz açısıyla ölçebilmektedir.

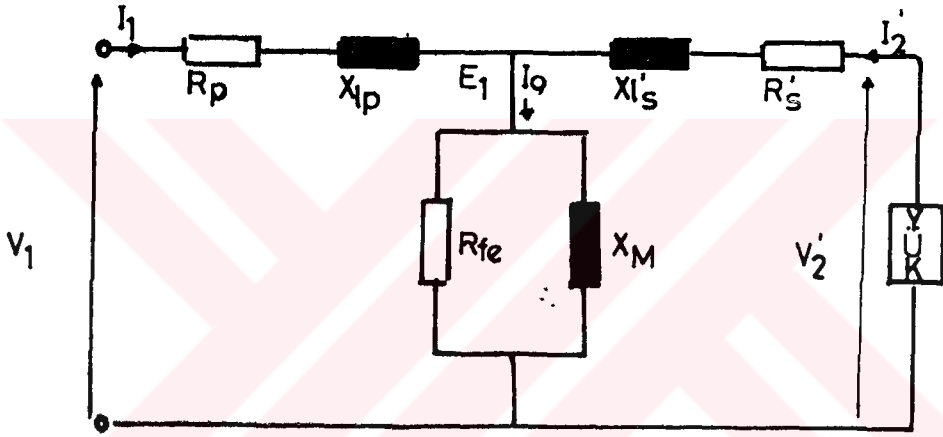
BÖLÜM - 3

3. HARMONİKLERİN TRANSFORMATÖR ÜZERİNE ETKİSİ

3.1 TRANSFORMATÖRLERİN NONSİNÜSOİDAL AKIMLARLA YÜKLENMESİ

3-1-1 Transformatörlerin Eşdeğer Dengesi

Yüklü çalışan bir transformatörde primer ile sekonder sargılar arasında magnetik bir bağlantı vardır. Bu iki devreyi elektriki yönden kıyaslayabilmek için sargılardan birisine ait büyüklükler diğerine indirgenir. Ancak bu işlem yapıldıktan sonra iki devre elektriki olarak incelenebilir.



Şekil 3-1 Transformatörün primere indirgenmiş eşdeğer devresi

$$N_2' = a \cdot N_2 \quad (3.1)$$

N_2' = Sekonder sarım sayısı

$$E_2' = a E_2 \quad (3.2)$$

E_2 = Sargı gerilim değeri

$$V_2' = a V_2 \quad (3.3)$$

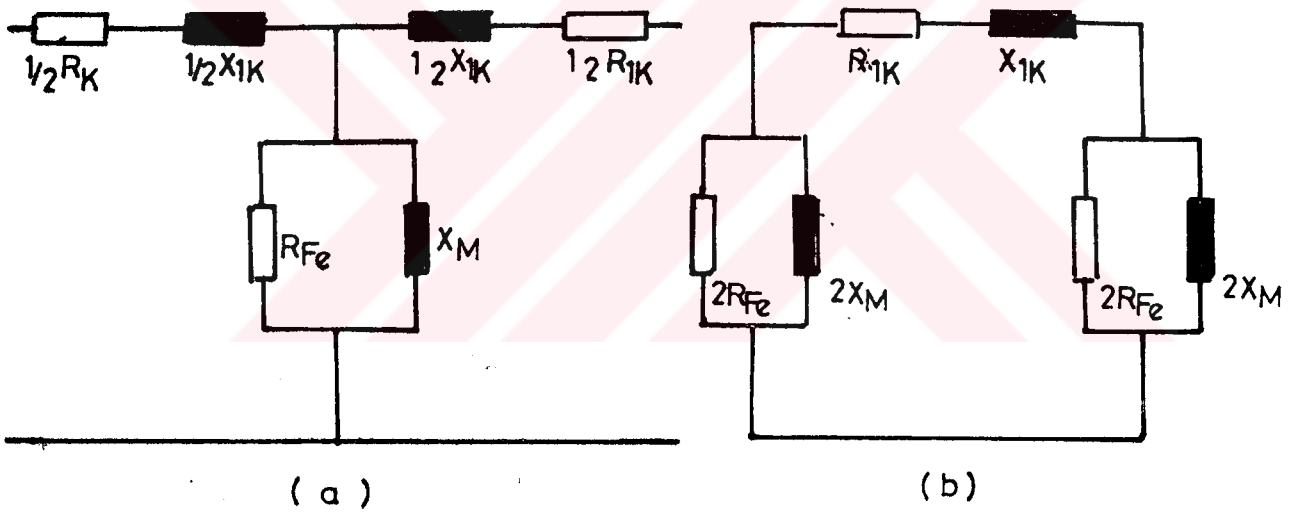
$$R_2' = a^2 R_2 \quad (3.4)$$

$$X_{l_2}' = a^2 X_{l_2} \quad (3.5)$$

3.1.2. Transformatörlerin Dört Uçlu Gösterilmesi

Transformatör eşdeğer şemalarının en basiti dört uçlu şeklidir. Bir transformatörün, $R_{1k}X_{1k}$, X_M ve R_{fe} değerleri biliniyorsa o transformatörün dört uçlu şeklide biliniyor demektir.

Dört uçlu teorisi aynen transformatörlerde de uygulanır. Genel olarak dört uçlularda T ve Π bağlamaları kullanılır. Devre şemaları aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Y bağlamasında kısa devre omik direnci ve kısa devre reaktansı ikiye bölünmüş olup X_m ve R_{fe} paralel dirençlerinin iki tarafına yerleştirilmiştir. Π bağlamasında ise paralel dirençlerin iki katları dört uçlunun iki ucuna paralel olarak bağlanmaktadır.



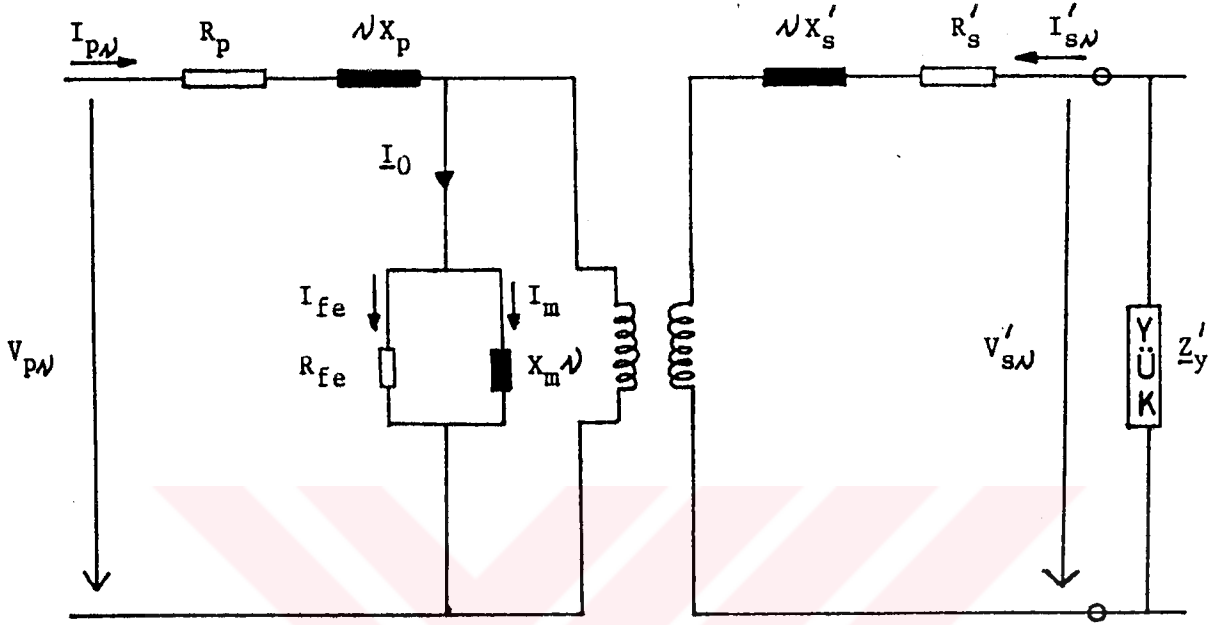
Sekil 3-2 a) Transformatörün dört uçlu olarak T bağlaması

b) Transformatörün dört uçlu olarak Π bağlama

3-2. Transformatörlerin Harmonik Bağımlı Modeli

Sekonder tarafından sinusoidal olmayan akımların çekildiği transformatörlerde hem primer hem sekonder sargılarından harmonikler akar. Ayrıca uç gerilimleri harmonik gerilim düşümlerinden ötürü harmonik bileşenleri içerebilir.

İdeal transformatörün primer ve sekonder sargılarında sarım sayıları ve endüklenen kaynak gerilimleri eşit olduğundan, eşdeğer devrenin iki tarafı birbirine bağlanabilir.

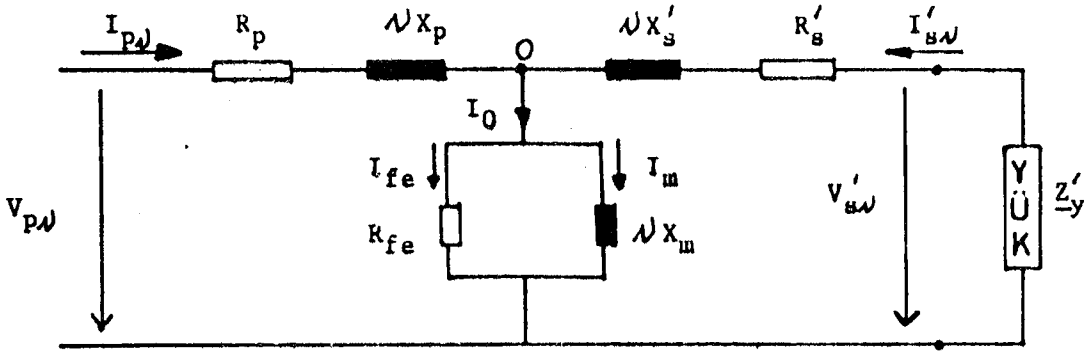


Şekil 3-3 v. Harmonik için ayrı kaçak akılı eşdeğer devre

Şekil 3-1'de "p" indisi primeri ve "s" indisi sekonderi göstermektedir. R sargı direnci ve x kaçak reaktansıdır. R_{fe} demir kayıplarına karşılık düşen direnç ve X_m mıknatıslanma reaktansıdır.

" ' " ile primere indirgenmiş büyüklükler gösterilmiştir. (I₀, boşa çalışma akımıdır).

İdeal transformatörün kalkması ile transformatörün T eşdeğer devresi kullanılabilir. (Şekil- 3.2)



Şekil 3-4 Transformatörün T eşdeğer devresi

(v. harmonik için çizilmiştir)

Akım bağıntısı

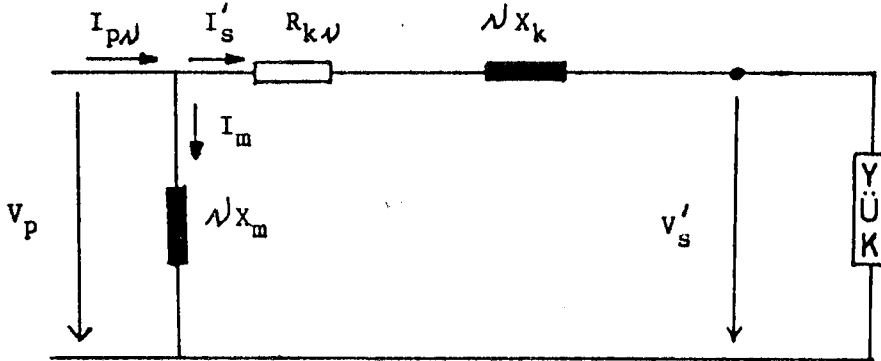
$$(I_p) v = (I_o) v + (I_s) v \quad (3.6)$$

ve gerilim denklemi

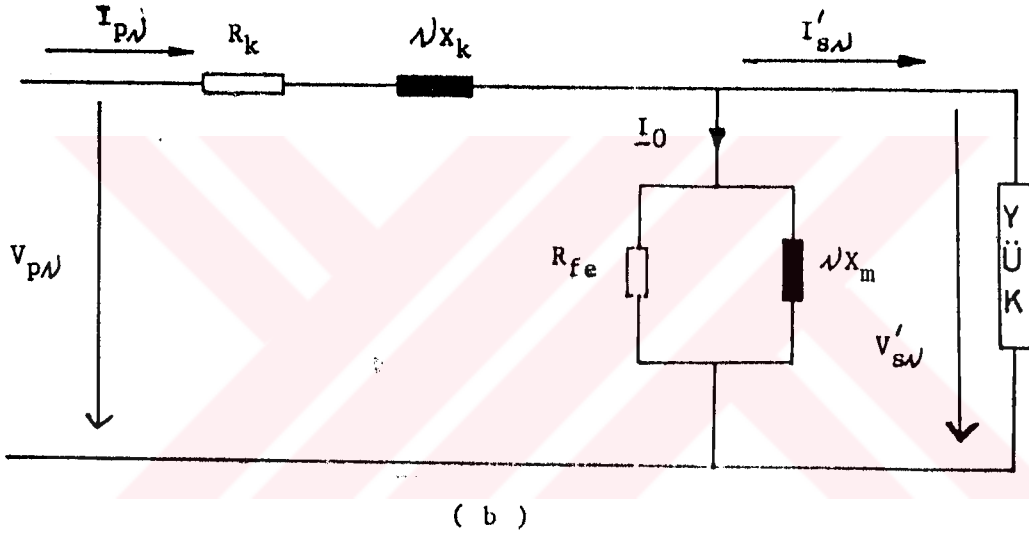
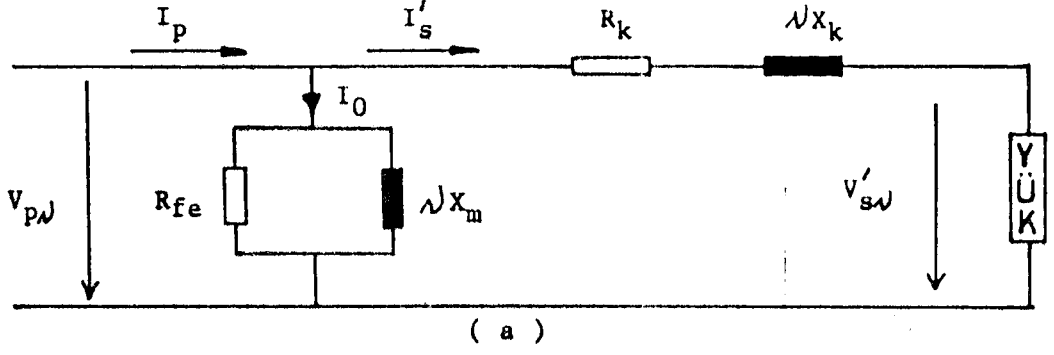
$$(V'_s) = (E)_v + (I_s) (R'_s) + j (v. X'_s) (I'_s) v \quad (3.7)$$

yazılabilir. E gerilimi, O noktası gerilimidir.

T eşdeğer devrede demir kayıpları ihmal edilirse, boşa akım kolundaki demir kayıp direnci ortadan kalkar. T eşdeğer devrede boşa akım kolu giriş veya çıkış uçlarından birime kaydırılırsa, seri dirençler ve kaçak reaktanslar toplanabilir. (L eşdeğer devre elde edilir) T ve L eşdeğer devrede boşa akım kolu tamamen ihmal edilirse, paralel bağlı demir kayıp direnci ve esas reaktans ortadan kalkar. Böylece en basit devre elde edilir.



Şekil 3-5 Demir kayıpsız transformatör eşdeğer devresi



Şekil 3-6 a) Boşta akım kolu girişte toplanmış L eşdeğer devre

b) Boşta akım kolu çıkışta toplanmış L eşdeğer devre

R_k ve X_k kısa devre büyüklükleri olup

$$R_k = R_p + a^2 R_s' \quad (3.8)$$

$$X_k = X_p + a^2 X_s' \quad (3.9)$$

şeklinde elde edilirler. a, transformatörün çevirme oranını gösterir.

Düşey kolun tamamen ihmal edilmesi veya bu durumda sargı dirençlerinin ihmal edilmesi göz konusu olabilir.

Transformatörün temel deneyleri (başta çalışma ve kısa devre çalışma deneyleri) temel frekansa göre yapılarak sargı dirençleri ve reaktansları temel

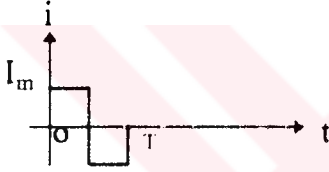
devre parametreleri hesap edilebilir. Bu işlemlerden sonra harmonik için eşdeğer devreleri verilir.

3.3 Transformatörün Nonsinüoidal Akımla Yüklenmesi

Elektrik enerji sistemlerinde daha öncede belirttiğimiz gibi nonsinüoidal akımlar dolaşır. Bu tür akımların nasıl oluştukları bölüm 1-2'de ele alınmıştır. Burada çeşitli şekillerle meydana gelmiş olan bazı akımların transformatör üzerindeki etkisi incelenecektir.

Transformatör üzerinde kare, üçgen, trapez ve genel olarak bozulmuş sinüs şeklindeki akımların etkisi incelendiğinde bunların transformatör üzerinde ek kayıplar meydana getirdikleri görülür.

a) Kare dalga

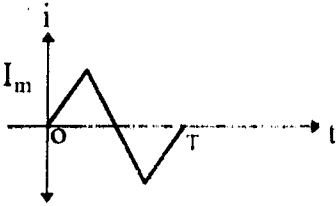


Şekil 3-7 Kare dalga akım

Fourier açılımı: ($T = 2\pi$ ise)

$$i(t) = \frac{4 I_m}{\pi T} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \dots + \frac{1}{2k+1} \sin (2k+1) \omega t \right) \quad (3.10)$$

b) Üçgen dalga

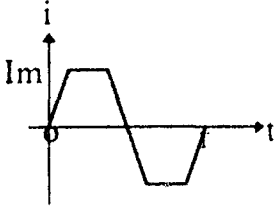


Şekil 3.8 Üçgen dalga akım

Fourier açılımı: ($T = 2\pi$ ise)

$$i(t) = \frac{8 I_m}{\pi^2} \left(\sin \omega t - \frac{1}{3^2} \sin 3\omega t + \dots + \frac{1}{2k+1} \sin (2k+1) \omega t \right) \quad (3.11)$$

c) Trapez Dalga

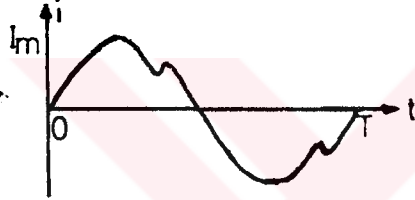


Şekil 3-9 Trapez dalga akım

Fourier açılımı ($T = 2\pi$ ise)

$$i(t) = \frac{4I_m}{\pi} \frac{1}{2k+1} \left[\frac{1}{(2k+1)\pi} \sin(2k+1)\frac{\pi}{4} + \frac{1}{(2k+1)} \cos(2k+1)\frac{\pi}{4} \right] \quad (3.12)$$

d) Bozulmuş sinüs dalga



Şekil 3-10 Bozulmuş sinüs dalga akım

Fourier analizi: Grafik yöntem kullanılarak ($T = 2\pi$ ise)

$$i(t) = I_{m1} \sin \omega t + I_{m3} \sin 3\omega t + \dots + I_{mh} \sin(h\omega t) \quad (3.13)$$

Yukarıda matematiksel ifadeleri verilen akımların meydana getirdikleri ek bakır kayıpları genel olarak şöyle ifade edilir.

$$P_k = \sum_{h=1}^n P_{k_h} = \sum_{h=1}^n I_h^2 R_{k_h} \quad (3-14)$$

Burada

n: En büyük harmonik mertebesini

 I_h : h. bileşen harmonik akımı $R_{k_h}^*$: h. bileşen omik direnç (Transformatör kısa devre direnci)

* Çalışmamızda her harmonik bileşen için R_k değerinin değişmediği kabul edilmiştir.
($R_k = R_{kn} = \text{sabit}$)

BÖLÜM -4

SAYISAL UYGULAMA

ÖRNEK SİSTEME UYGULAMA

Transformatörün sekonder sargılarından çekilecek olan nonsinusoidal akımlarla oluşacak kayıpların incelenmesinde

- Kare dalga
- Üçgen dalga
- Trapez dalga
- Bozulmuş sinüs dalga

gözönüne alınmıştır.

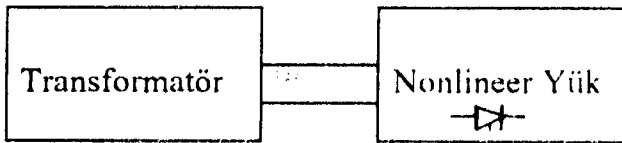
Bu dalga şekilleri uygulamada ençok karşımıza çıkan sinusoidal olmayan akım dalga şekilleridir. Bu dalgaların meydana geliş şekilleri incelenmeyip sistemde varoldukları düşünülmektedir.

Analizde iki durum; bu akımların değerleri bakımından iki hali dikkate alınmıştır.

- 1) Nonsinusoidal akımların maxsimum değerlerinin eşit olması
- 2) Nonsinusoidal akımların efektif değerlerinin eşit olması.

Her iki halde de transformatörde oluşan bakır kayıpları hesaplanmış ve sonuçlar tablolar verilerek irdelenmiştir.

ÖRNEK DEVRE



Şekil (4-1) Örnek devir Gösterilimi

Şekil 4-1'deki sistem gözönüne alınmıştır.

Bu sistemde büyüklükler primere indirgenmiş durumda

100 kvA 11000/2200 Volt 1faz olup

$$R_k = 13,3 \, \Omega \quad (R_1 = 6,1 \, \Omega \quad R_2' = 7,2 \, \Omega)$$

$$X_k = 62,4 \, \Omega \quad (X_{l_1} = X_{l_2} = 31,2 \, \Omega)$$

R_k : Kısa devre eşdeğer direnci

X_k : Kısa devre eşdeğer reaktans

R_1 : Primer sargı direnci

R_2' : Primere indirgenmiş sekonder direnci

X_{l_1} : Sekonder reaktansı

X_{l_2} : Prime indirgenmiş sekonder reaktansı.

Oluşacak ek bakır kaybı

Etkili olacak akım değeri I ise

$$I = (I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2)^{1/2}$$

$$P_{cu} = \sum_{j=1}^n R_k I_j^2$$

formülüyle hesaplanır.

I_1 = Temel harmonik efektif değeri

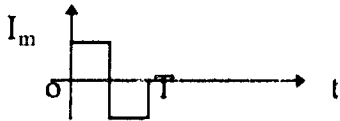
I_2 = 2. harmonik efektif değeri

I_n = n. harmonik efektif değeri.

4.1. Maksimum akım değerleri eşit olan non sinusoidal akımların sekonder devresinden çekilmeleri

4.1.1 Yük akımının kare dalga olması hali.

Bu akımın harmanik spektrumu şekil 4.7.a'da verilmiştir.



Şekil 4.2 Kare dalga yük akımı

Fourier analizi şu şekildedir.

$$i(t) = \frac{4Im}{\Pi} \left(\sin wt + \frac{1}{3} \sin 3wt + \frac{1}{5} \sin 5wt + \dots + \frac{1}{(2k+1)} \sin (2k+1)wt \right)$$

Im yerine 10 A değeri konularak sekonderden çekilen (I_{2n} $n = 1 \dots \infty$) akımların maksimum değerleri bulunur. Bu değerler $\sqrt{2}$ ye bölünerek efektif akım değerleri elde edilir.

$$I_{21} = \frac{4 \cdot Im}{\sqrt{2}\Pi} = 9,003 \text{ A} \quad \text{Temel bileşen}$$

$$I_{23} = \frac{4 \cdot Im}{3\sqrt{2}\Pi} = 3,001 \text{ A}$$

$$I_{25} = \frac{4Im}{5\sqrt{2}\Pi} = 1,8006 \text{ A}$$

$$I_{27} = \frac{4Im}{7\sqrt{2}\Pi} = 1,286 \text{ A}$$

$$I_{29} = \frac{4Im}{9\sqrt{2}\Pi} = 1,003 \text{ A}$$

$$I_{211} = \frac{4Im}{11\sqrt{2}\Pi} = 0,818 \text{ A}$$

Bu büyüklüklerin primere indirgenmiş hali
ü: çevirme oranı olmak üzere $\ddot{u} = 5$ alınırsa;

$$I'_{21} = \frac{I_{21}}{\ddot{u}} = 1,8005 \text{ L (Temel bileşen)}$$

$$I'_{23} = \frac{I_{23}}{\ddot{u}} = 0,4002 \text{ A}$$

$$I'_{25} = \frac{I_{25}}{\ddot{u}} = 0,3601 \text{ A}$$

$$I'_{27} = \frac{I_{27}}{\ddot{u}} = 0,2572 \text{ A}$$

$$I'_{29} = \frac{I_{29}}{\ddot{u}} = 10,2 \text{ A}$$

$$I'_{211} = \frac{I_{211}}{\ddot{u}} = 0,163 \text{ A}$$

Toplam kayıp P_{cu} olmak üzere

$$P_{cu} = \sum_{n=1}^{11} R_k \cdot I_{2n}^2$$

$$P_{cu1} = 43,6 \text{ w}$$

$$P_{cu_3} = 6,85 \text{ w}$$

$$P_{cu_5} = 1,79 \text{ w}$$

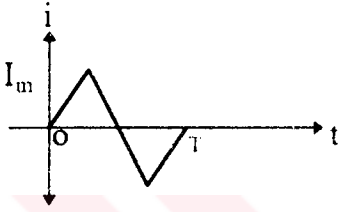
$$P_{cu_7} = 0,88 \text{ w}$$

$$P_{cu_9} = 0,25 \text{ w}$$

$$P_{cu_{11}} = 0,05 \text{ w bulunur.}$$

4.1.2 Yük Akımının Üçgen Dalga Olması Hali

Harmonik spektrumu şekil 4-7b'de verilmiştir.



Şekil 4-3 Üçgen dalga yük akımı

Fourier analizi şu şekildedir.

$$I(t) = \frac{8}{\pi^2} Y_m \left(\sin \omega t - \frac{1}{3^2} \sin 3\omega t + \frac{1}{5^2} \sin 5\omega t - \frac{1}{7^2} \sin 7\omega t + \dots \right)$$

$I_m = 10 \text{ A}$ olması durumunda sekonderden geçen harmonik akım değerleri Efektif akım değerleri olarak

$$I_{21} = \frac{8 Y_m}{\pi^2 \sqrt{2}} = \frac{8 \cdot 10}{\pi^2 \sqrt{2}} = 5,73 \text{ A (Temel bileşen)}$$

$$I_{23} = \frac{8 Y_m}{\pi^2 3^2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{8 \cdot 10}{\pi^2 \sqrt{2} \cdot 9} = 0,636$$

Primere indirgenmiş hali: ($ü = 5$ için)

$$I_{21} = \frac{I_{21}}{ü} = \frac{5,73}{5} = 1,146 \text{ A}$$

$$I_{23} = \frac{I_{23}}{ü} = \frac{0,636}{5} = 0,127 \text{ A}$$

Diğer harmoniklerin etkisi ihmal edilebilir düzeyde

$$P_{cu} = R_k (I_{21}^2 + I_{23}^2) = 13,3 (1,146^2 + 0,025^2) = 17,76 \text{ w}$$

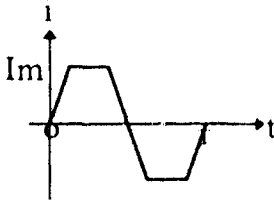
$P_{cu_1} = 17,46 \text{ w}$ L Temel bileşenin oluşturduğu kayıp,

$$P_{cu_3} = 0,22 \text{ w}$$

$$P_{cu5} = 0,023 \text{ w}$$

4-1-3 Yük Akımının Trapez Dalga Olması Hali

Harmonik spektrumu şekil 4-7c'de verilmiştir.



Şekil 4-4 Trapez Dalga Yük Akımı

Fourier analizi şu şekildedir.

$$i(t) = \frac{4I_m}{\pi} \frac{1}{2k+1} \left[\frac{1}{(2k+1)\pi} \sin(2k+1) \frac{\pi}{4} + \frac{1}{(2k+1)} \cos(2k+1) \frac{\pi}{4} \right]$$

$I_m = 10A$ olması durumunda sekonderden çekilen harmonik akım değerleri; efektif akım değerleri olarak:

$$i(t) = 11,86 \sin t + 1,34 \sin 3t - 0,412 \sin 5t$$

$$I_{21} = \frac{81,86}{\sqrt{2}} = 9,386 \text{ A (Temel bileşen)}$$

$$I_{23} = \frac{1,34}{\sqrt{2}} = 0,95 \text{ A}$$

$$I_{25} = \frac{0,412}{\sqrt{2}} = 0,296 \text{ A}$$

Sekondere indirgenmiş durumda: $ü = 5$ için

$$I_{21} = 1,67 \text{ A (Temel bileşim)}$$

$$I_{23} = 0,19 \text{ A}$$

$$I_{25} = 0,36 \text{ A}$$

Oluşacak ek bakır kayıpları

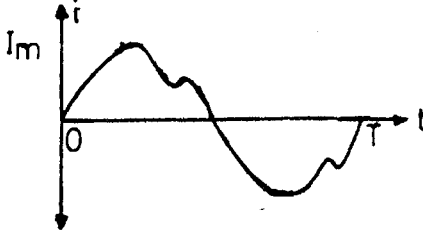
$$P_{cu1} = 13,3 \cdot 1,67^2 = 37,4 \text{ w}$$

$$P_{cu3} = 13,3 \cdot 0,19^2 = 0,55 \text{ w}$$

$$P_{cu5} = 13,3 \cdot 0,66^2 = 0,05 \text{ w}$$

4-1-4 Yük Akımının Bozulmuş Sinüs Olması Halli

Harmonik Spektrumu şekil 4-7'de verilmiştir.



şekil 4-5 Bozulmuş sinüs şeklinde yük akımı

Fourier analizi (Grafik yöntem ile)

$I_m = 10 \text{ A}$ için

$$i(t) = 8,26 \sin t + 3,07 \sin 3t + 0,65 \sin 5t \dots$$

Harmonik akımları efektif değerleri

$$I_{21} = \frac{8,26}{\sqrt{2}} = 5,81 \text{ A (Temel bileşen)}$$

$$I_{23} = \frac{3,07}{\sqrt{2}} = 2,17 \text{ A}$$

$$I_{25} = \frac{0,65}{\sqrt{2}} = 0,46 \text{ A}$$

Primer tarafına indirgenmiş akım değerleri ( 5 için)

$$I'_{21} = \frac{I_{21}}{5} = 1,168 \text{ A}$$

$$I'_{22} = \frac{I_{23}}{5} = 0,434 \text{ A}$$

$$I'_{25} = \frac{I_{25}}{5} = 0,052 \text{ A}$$

$$P_{cu1} = 13,3 \times 1,168^2 = 18,14 \text{ w}$$

$$P_{cu2} = 13,3 \times 0,434^2 = 2,5 \text{ w}$$

$$P_{cu5} = 13,3 \times 0,052^2 = 0,11 \text{ w}$$

Bu değerleri tabloya taşırsak maximum değerleri eşit olan nonsinüsoidal akımların örnek transformatör sistemine uygulanması sonucu oluşan kayıtlar Tablo 1'de verilmiştir.

TABLO 1

Çekilen Yük Akımı	Kayıp Güç (Pcu) (W)						TOPLAM KAYIP GÜÇ
	Harmonik derecesi						(W)
	1	3	5	7	9	11	
Kare dalga	43,6	4,85	1,79	0,88	0,25	0,05	51,42
Üçgen dalga	17,46	0,22	0,023				17,76
Trapez dalga	37,4	0,55	0,05		-	-	38
Bozulmuş sin. dalga.	18,14	2,5	0,11	-		-	20,75

4-2 Efektif Değerleri Eşit Olan Nonsinusidal akımların Sekonder Devresinden Çekilmesi

$$i(t) = I_m \cdot \sin \omega t$$

$$I_m = 10 \text{ A ise}$$

$$I_{\text{eff}} = \frac{10}{\sqrt{2}} = 7,07 \text{ A olup}$$

$I_{\text{eff}} = 7,07 \text{ A}$ değeri her dalga (sinüs, kare, üçgen, trapez ve bozulmuş sinüs) için sabit kabul edilir. Ve kayıp güçler hesaplanır.

4-2-1. Yük Akımının Kare Dalga Olması Hali

$$I_m = I_{\text{eff}} = 70,7 \text{ A bulunur.}$$

$$i(t) = \frac{4 I_m}{\pi} \left(\sin t + \frac{1}{3} \sin 3 t + \frac{1}{5} \sin 5 t + \dots \right)$$

Fourier açılımında $I_m = 7,07 \text{ A}$ alınırsa;

$$I_{21} = \frac{4Im}{\sqrt{2}\Pi} = 6,36 \text{ A}$$

$$I_{23} = 2,12 \text{ A}$$

$$I_{25} = 1,27 \text{ A}$$

$$I_{27} = 0,9 \text{ A}$$

$$I_{29} = 0,707 \text{ A}$$

Bu büyüklüklerin primere indirgenmiş hali ($\ddot{u} = 5$ iç in

$$I'_{21} = \frac{I_{21}}{\ddot{u}} = \frac{6,36}{5} = 1,272 \text{ A}$$

$$I'_{23} = \frac{I_{23}}{\ddot{u}} = \frac{2,12}{5} = 0,424 \text{ A}$$

$$I'_{25} = \frac{I_{25}}{\ddot{u}} = \frac{1,27}{5} = 0,254 \text{ A}$$

$$I'_{27} = \frac{I_{27}}{\ddot{u}} = \frac{0,9}{5} = 0,182 \text{ A}$$

$$I'_{29} = \frac{I_{29}}{\ddot{u}} = \frac{0,707}{5} = 0,141 \text{ A}$$

Bu akımlarda oluşacak kayıp güçler:

$$P_{cu} = \sum_{n=1}^9 R_k \cdot I_{2n}'^2$$

$$P_{cu1} = 13,3 \times 1,2722 = 21,52 \text{ w.}$$

$$P_{cu3} = 13,3 \times 0,4242 = 2,4 \text{ w.}$$

$$P_{cu5} = 13,3 \times 0,2542 = 0,86 \text{ w}$$

$$P_{cu7} = 13,3 \times 0,1722 = 0,44 \text{ w}$$

$$P_{cu9} = 13,3 \times 0,1412 = 0,26 \text{ w}$$

4-2-2 Yük Akımının Üçgen Dalga Olması Hali

$I_{ef} = 7,07 \text{ A}$ ise

Yapılan hesaplamalar sonucu

$I_m = 12,25 \text{ A}$ sonucu bulunmuştur.

$$i(t) = 8 \frac{I_m}{\Pi^2} \left(\sin t - \frac{1}{3^2} \sin 3t + \frac{1}{5^2} \sin 5t \dots \right)$$

Fourier açılımında $I_m = 12,25$ A değeri konulursa sekonderden çekilen efektif akım değerleri;

$$I_{21} = 7,021 \text{ A (Temel bileşim)}$$

$$I_{23} = 0,636 \text{ A}$$

$$I_{25} = 0,226 \text{ A}$$

$$I_{27} = 0,116 \text{ A}$$

sonuçları bulunur. Bu akımların primere indirgenmiş değerleri ($n = 5$ için)

$$I_{21}' = 1,41 \text{ A (Temel bileşen)}$$

$$I_{23}' = 0,156 \text{ A}$$

$$I_{25}' = 0,056 \text{ A}$$

$$I_{27}' = 0,039 \text{ A}$$

Bu akım değerleri için oluşacak kayıp güçler

$$P_{cu} = \sum_{n=1}^7 R_k \cdot I_n^2$$

formülüne göre hesaplanacak olursa:

$$P_{cu1} = 13,3 \times 1,41^2 = 26,23 \text{ w}$$

$$P_{cu3} = 13,3 \times 0,156^2 = 0,324 \text{ w}$$

$$P_{cu5} = 13,3 \times 0,056^2 = 0,04 \text{ w}$$

$$P_{cu7} = 13,3 \times 0,039^2 = 0,01 \text{ w}$$

sonuçlarına varılır.

4-2-3 Yük akımının trapez dalga olması hali

$I_{eff} = 7,07$ A değeri için hesaplanan max akım değeri

$I_{max} = 8,4$ A'dır.

$$i(t) = \frac{4I_m}{\pi} \frac{1}{2k+1} \left[\frac{1}{(2k+1)\pi} \sin(2k+1) \frac{\pi}{4} + \frac{1}{(2k+1)} \cos(2k+1) \frac{\pi}{4} \right]$$

Fourier açılımında $I_m = 8,4$ A konulursa sekonderden çekilen efektif akım değerleri.

$$I_{21} = 6,95 \text{ A (Temel Bileşen)}$$

$$I_{23} = 0,8 \text{ A}$$

$$I_{25} = 0.3 \text{ A}$$

olur. B udeğerlerin primere indirgenmiş hali ($\ddot{U} = 5$ için)

$$I_{21}' = 1,4 \text{ A}$$

$$I_{23}' = 0,16 \text{ A}$$

$$I_{25}' = 0,057 \text{ A}$$

Bu akım değerleri için oluşacak kayıp güçler.

$$P_{cu} = \sum_{n=1}^5 R_k \cdot I_{2n}'^2$$

formülüne göre hesaplanacak olursa

$$P_{cu1} = 13,3 \times 1,42 = 26 \text{ w}$$

$$P_{cu3} = 13,3 \times 0,162 = 0,35 \text{ w}$$

$$P_{cu5} = 13,3 \times 0,0572 = 0,04 \text{ w}$$

sonuçlarına varılır.

4-2-4 Yük Akımının Bozulmuş Sinus Olması Hali

$I_{eff} = 7,07 \text{ A}$ şartını sağlayan eğri



Şekil 4-6 $I_{eff} = 7,07 \text{ A}$ şartını sağlayan eğri.

şeklinde olup grafik yöntemle fourier analizi sonucu

$$i(t) = 9,3 \sin t + 3,53 \sin 3t + 0,7 \sin 5t$$

şeklinde bir açılım elde edilir. Sekonderden çekilen efektif akım değerleri.

$$I_{21} = 6,52 \text{ A (Temel bileşen)}$$

$$I_{23} = 2,53 \text{ A}$$

$$I_{25} = 0,5 \text{ A}$$

olur. Bu akımların primere indirgenmiş hali ($\ddot{U} = 5$)

$$I_{21}' = 1,3 \text{ A (Temel bileşen)}$$

$$I_{23}' = 0,5 \text{ A}$$

$$I_{25}' = 0,1 \text{ A}$$

Bu akım değerleri için oluşacak kayıp güçler.

$$P_{cu} = \sum_{n=1}^{\infty} R_k \cdot I_{2n}^2$$

formülüne göre hesaplanırsa

$$P_{cu1} = 13,3 \times 1,32 = 22,98 \text{ w}$$

$$P_{cu3} = 13,3 \times 0,52 = 3,05 \text{ w}$$

$$P_{cu5} = 13,3 \times 0,1 = 0,13 \text{ w}$$

Bu değerleri tablolara taşırsak; Tablo 2’de efektif değerler eşit olan örnek sisteme uygulanan nonsinüsoidal akımların transformatörün meydana getirdiği kayıplar verilmiştir.

TABLO 2

Çekilen Yük Akımı	Kayıp Güç (P _{cu}) (W)						TOPLAM KAYIP GÜÇ
	Harmonik derecesi						
	1	3	5	7	9	11	
Kare dalga	21,52	2,4	0,86	0,44	0,26		26,48
Üçgen dalga	26,23	0,156	0,056	0,039			26,48
Trapez dalga	26,21	0,35	0,04	-			26,4
Bozulmuş sin. dalga.	22,98	3,505	0,13	-			26,615

4-3 Ek Kayıpların Toplam Kayıp Güce Oranı

4-3-1 Maksimum akım değerlerinin eşit olması durumunda harmoniklerin oluşturduğu ek kayıpların toplam kayıp güce oranları

a) Kare dalga için

$$P_k = P_{k1} + P_{kh}$$

$$P_{kh} = \text{Harmonik kayıp güç}$$

$$P_k = 43 + 4,8 + 1,73 + 0,9 + 0,5 + 0,3$$

$$P_{k1} = 43 \text{ w}$$

$$\% \frac{P_{k_3}}{P_k} = \%9,4 \quad \% \frac{P_{k_1}}{P_k} = \%83,76$$

$$\% \frac{P_{k_5}}{P_k} = \%3,34$$

$$\% \frac{P_{k_7}}{P_k} = \%1,8$$

$$\% \frac{P_{k_9}}{P_k} = \%1$$

$$\% \frac{P_{k_{11}}}{P_k} = \%0,7$$

b) Üçgen dalga için

$$P_k = P_{k1} + P_{kh}$$

$$P_k = 17,46 + 0,22 + 0,03$$

$$P_k = 17,6 \text{ w}$$

$$P_{k1} = 17,46$$

$$\% \frac{P_{k_3}}{P_k} \%1,2 \quad \% \frac{P_{k_1}}{P_k} = \%98,63$$

$$\% \frac{P_{k_5}}{P_k} \%0,17$$

c) Trapez dalga için

$$P_k = P_{k1} + P_{kh}$$

$$P_k = 37,4 + 0,5 + 0,05$$

$$P_k = 38 \text{ w}$$

$$P_{k1} = 37,4 \text{ w}$$

$$\% \frac{P_{k_3}}{P_k} = \%1,5 \quad \% \frac{P_{k_1}}{P_k} = \%98,42$$

$$\% \frac{P_{k_5}}{P_k} = \%0,14$$

d) Bozulmuş Sinüs Dalga İçin

$$P_k = P_{k1} + P_{kh}$$

$$P_k = 18,14 + 2,5 + 0,11$$

$$P_k = 20,75 \text{ w}$$

$$P_{k1} = 18,14 \text{ w}$$

$$\% \frac{P_{k_3}}{P_k} = \%12$$

$$\% \frac{P_{k_1}}{P_k} = \%87,42$$

$$\% \frac{P_{k_5}}{P_k} = \%0,53$$

TABLO -3

Harmonik Derecesi	Çekilen Yük Akımı			
	Kare	Üçgen	Trapez	Bozulmuş sinüs
h	%Pki/pk	%Pki/pk	%pki/pk	%pki/pk
1	83,76	98,63	98,42	87,42
3	9,4	1,2	1,5	12
5	3,34	0,17	0,14	0,53
7	1,8	-	-	-
9	1	-	-	-
11	0,7	-	-	-

4-3-2 Efektif değerlerinin eşit olması durumunda harmonik kayıpların toplam kayba oranları

a) Kare dalga için

$$P_k = P_{k_1} + P_{kh}$$

$$P_k = 26,6 \text{ w}$$

$$P_{k_1} = 22,52 \text{ w}$$

$$\% \frac{P_{k_3}}{P_k} = \%9,3$$

$$\% \frac{P_{k_1}}{P_k} = \%84,66$$

$$\% \frac{P_{k_5}}{P_k} = \%3,23$$

$$\% \frac{P_{k_7}}{P_k} = \%1,7$$

$$\% \frac{P_{k_9}}{P_k} = \%0,99$$

$$\% \frac{P_{k_{11}}}{P_k} = \%0,68$$

b) Üçgen dalga için

$$\begin{aligned} P_k &= P_{k1} + P_{kh} \\ &= 26,6 \text{ w} \end{aligned}$$

$$P_{k1} = 26,23 \text{ w}$$

$$\% \frac{P_{k1}}{P_k} = \%1,22 \quad \% \frac{P_{k1}}{P_k} = \%98,6$$

$$\% \frac{P_{k5}}{P_k} = \%0,15$$

c) Trapez dalga için

$$P_k = P_{k1} + P_{kh}$$

$$P_k = 26,5 \text{ w}$$

$$P_{k1} = 26,1 \text{ w}$$

$$\% \frac{P_{k1}}{P_k} = \%1,4 \quad \% \frac{P_{k1}}{P_k} = \%98,4$$

$$\% \frac{P_{k5}}{P_k} = \%0,15$$

d) Bozulmuş Sinüs Dalgası için

$$\begin{aligned} P_k &= p_{k1} + P_{kh} \\ &= 26,6 \text{ w} \end{aligned}$$

$$P_{k1} = 22,98 \text{ w}$$

$$\% \frac{P_{k1}}{P_k} = \%13 \quad \% \frac{P_{k1}}{P_k} = \%86,4$$

$$\% \frac{P_{k5}}{P_k} = \%0,48$$

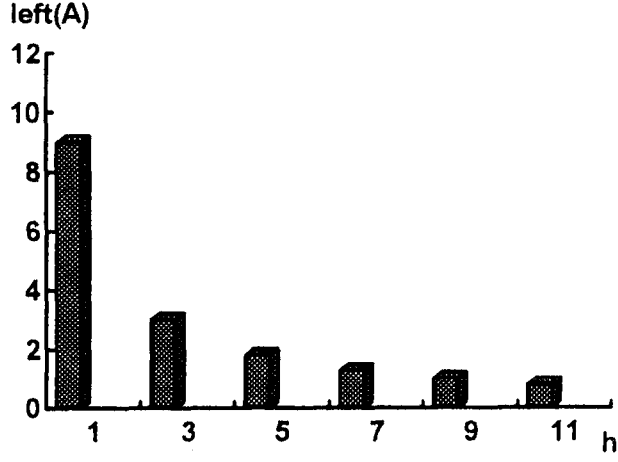
Sonuçlar toplu olarak tablo 4'de verilmiştir.

TABLO 4

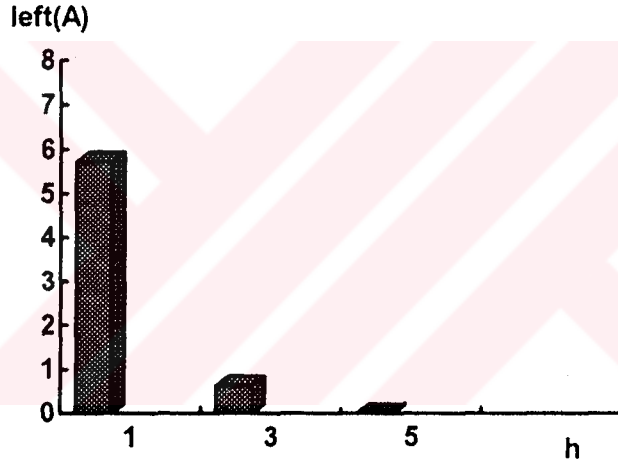
Harmonik Derecesi	Çekilen Yük Akımı			
	Kare	Üçgen	Trapez	Bozulmuş sinüs
h	%Pki/pk	%Pki/pk	%pki/pk	%pki/pk
1	84,66	98,6	98,4	86,4
3	9,3	1,22	1,4	12
5	3,23	0,15	0,15	0,48
7	1,7	-	-	-
9	0,99	-	-	-
11	0,68	-	-	-

4.4. Yük akımlarının harmonik spektronları

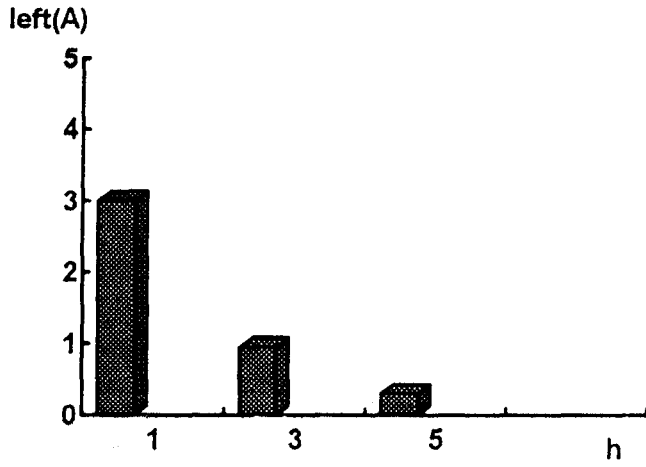
4.4.1. Yük akımlarının harmonik spektrumları ($I_m=0$)



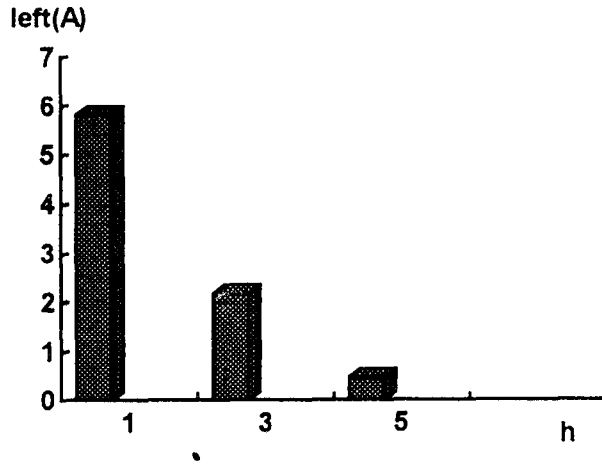
Şekil 4.7.a. Kare dalga için.



Şekil 4.7.b. Üçgen dalga için.

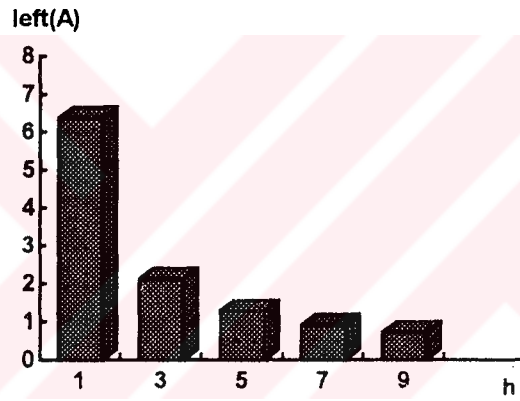


Şekil 4.7.c. Trapez dalga için

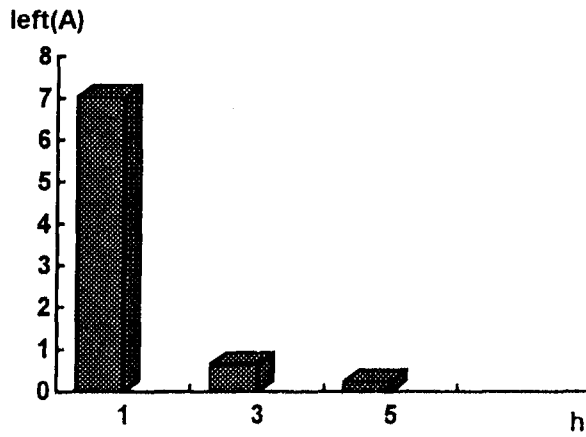


Şekil 4.7.d. Bozulmuş sm. dalga için.

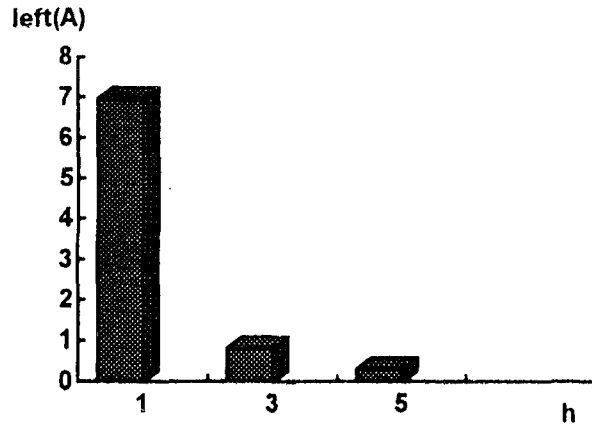
4.4.2. Yük akımlarının harmonik spektrumları (Left=10A) için



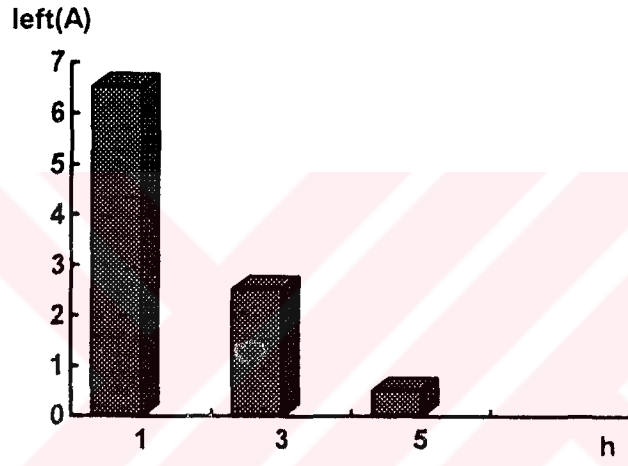
Şekil 4.8.a. Kare dalga için.



Şekil 4.8.b. Üçgen dalga için.



Şekil 4.8.c. Trapez dalga için.



Şekil 4.8.d. Bozulmuş sin. dalga için.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Enerji sistemlerinde çeşitli sebeplerden dolayı harmonikler meydana gelir. Bu harmoniklerin meydana gelmesini sağlayan kaynaklar Bölüm-1'de açıklandığı üzere genel olarak transformatörler generatörler redresörler ve arkla çalışan cihazlardır.

Harmonikler enerji sistemlerinde istenmeyen sonuçlar meydana getirirler. Bu olumsuz etkileri teknik ve ekonomik etkiler olarak iki ana başlık altında toplamak mümkündür.

Teknik problemler, sistemin çalışmasını olumsuz yönde etkileyen tüketiciye kaliteli enerji sunulmasını engelleyen problemlerdir.

Ekonomik problemler ise optimal çalışmayı etkileyen problemlerdir.

Bütün bu etkilerinden dolayı güç sistemlerinde harmoniklerin bulunması istenmez. Ve bu harmonikler mümkün oldukça giderilmeye çalışılır.

Harmonikler transformatörler üzerinde de oldukça problem oluştururlar. Bunların başında harmoniklerin sebep oldukları ek kayıplar gelir. Bu çalışmada oluşan ek kayıplar sayısal değerler olarak ortaya konulmuştur. Örnek olarak ele aldığımız transformatörde bu ek kayıpların seviyesi 30-50 w. arasında değerler almıştır.

Harmonikler dolayısıyla oluşan bu ek kayıplar, transformatörlerin ısınmasına sebep olurlar. Bu ısınma olayıda ekonomik açıdan dezavantaj oluşturur. Aynı şekilde transformatörün aşırı yüklenmeside söz konusudur. Transformatörlerdeki ısı artışı beraberlerinde başka problemleride getirirler. Bunlar yalıtma ve soğutma problemleridir. Isınma olayı arttıkça yalıtma ve soğutma işlemleri için ek masraflar söz konusu olacaktır.

Harmonik seviyesindeki artış ısı artışına buna paralel olarakta yüklenme oranında artışa sebep olur.

Bütün bu istenmeyen etkilerin yok edilebilmeleri veya azaltılabilmeleri için harmonikli (nonlineer) yüklerin filtre edilmeleri gereklidir.

Bu filtre devreleri, işletme optimizasyonu göz önünde bulundurularak tasarlanır.



KAYNAKLAR

1. Potter. B.E., A note on Obtaining Power Series Transfer Coefficients From Harmonic Levels. IEEE Trans. CT-11, (1964), 291.
2. Medhurst, R.G.: Calculations of Transfer Characteristics from Measured Harmonic Levels, Elektronik Letters, 2, (1966), 152.
3. Atherton D.P., Jain, N.K., Identification of Double Valcied Nonlinearities from their Harmonics Response, Electronic Letters, 3. (1967), 485.
4. Jain. N.K., Atherton D.P., Development and Application of Generalized Harmonic Analyser İnternational Electronics Conf. Toronto. (1967), Makale No: 67072.
5. Szabados, B., Hill, E.F., On Line Measurement of Power System Harmonic JEEE Trans. Ins Meas, IM-26, (1977), 170-175.
6. Takayi, T. An Analog parallel Fourier Transform Equipment and its Appication to the moving Vehicle Petection in a special Frequency Domain, IEEE, Trans Ins. Meas. IM-27, 3, (1978), 215-219.
7. Gülgün, R. Güç Elektroniğine Giriş (1980).
8. Power-System harmonics, An overview. IEEE Transactions on power apparatus and systems, vol. PAS-102, No. 8, August 1983.

ÖZGEÇMİŞ

28 Temmuz 1973'de Burdur'un Bucak ilçesinde doğdum. İlk, orta ve lise tahsilimi Isparta'da tamamladım. 1993-1994 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümünden mezun oldum. Aynı yıl yine Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans Programına başladım.