

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Sinüsd. Olm. Büy. Elek. Ene.
Sist. Üze. Etk.

Yüksek Lisans Tezi

Tufan Aksoy

1991

152
113

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

20,0002

SİNÜSOİDAL OLMAYAN BÜYÜKLÜKLERİN
ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİ
ÜZERİNDEKİ ETKİNLİKLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜH. TUFAN AKSOY

İSTANBUL 1991

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
KÜTÜPHANE DOKÜMANTASYON
DAİRE BAŞKANLIĞI

Kot : R 152
113

Alındığı Yer : FEN BİL. ENS.

Tarih : 16.04.1992

Fatura : - - - - -

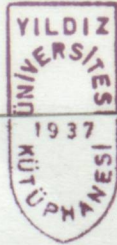
Fiyatı : 20.000.1L.

Ayniyat No : 1/2

Kayıt No : 48324

UDC : 621.3 378.242

Ek :



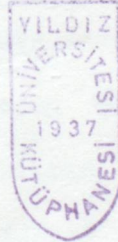
YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



SİNÜSOİDAL OLMAYAN BÜYÜKLÜKLERİN
ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİ
ÜZERİNDEKİ ETKİNLİKLERİ

İSTANBUL, 1991

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜH. TUFAN AKSOY



İSTANBUL 1991

İÇİNDEKİLER TEŞEKKÜR

Tüm üniversite öğrenimim süresince iyi bir mühendis olabilmem için bana her konuda yardımcı olup yol gösteren ; ayrıca Tez Danışmanım olma lütfunu gösterip çalışmalarım da etkin bilgi ve deneyimini mütevazî bir şekilde aktaran , kısıtlı zamanını bana ve arkadaşlarıma hiç düşünmeden ayıran değerli insan , Hocam Sayın Doç. Dr. Selim Ay a en derin saygı ve bağlılıklarımı belirtir , içten teşekkürlerimi sunarım .

2.2.1. Fourier Açılımı Yardımıyla Harmoniklerin Belirlenmesi	12
2.2.2. Grafik Yöntemler Yardımıyla Harmoniklerin Belirlenmesi	14
2.2.3. Sığma Yoluyla Harmoniklerin Belirlenmesi	16
BÖLÜM 3. ENERJİ SİSTEM ELEMANLARININ SİNÜSOİDAL GERANLARA GÖRE MODELLENMESİ	19
3.1. İletken Gevherlerinin Harmonik - Bağımlı Modeli	19
3.1.1. Dengeli Yüklemeye Göre Modelleme	19
3.1.2. Dengesiz Yüklemeye Göre Modelleme	20
3.2. Transformörlere Harmonik Bağımlı Modeli	24
3.3. İzolekron Motorların Harmonik Bağımlı Modeli	31
BÖLÜM 4. HARMONİKLERİN ENERJİ SİSTEMLERİNDEKİ ETKİLERİ	34
4.1. Harmoniklerin Dielektrik Dayanım Üzerindeki Etkileri	41

İSTANBUL 1991

İ Ç İ N D E K İ L E R

ÖZET

SUMMARY

BÖLÜM 1.	GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	ENERJİ SİSTEMLERİNDE HARMONİK KAYNAKLAR VE HARMONİK ANALİZİ	4
2.1.	Enerji Sistemlerinde Harmonik Kaynaklar	4
2.1.1.	Günümüzdeki Başlıca Harmonik Kaynakları	4
2.1.2.	Gelecekte Oluşabilecek Harmonik Kaynakları	7
2.2.	Harmonik Analizi	10
2.2.1.	Fourier Açılımı Yardımıyla Harmoniklerin Belirlenmesi	12
2.2.2.	Grafik Yöntemler Yardımıyla Harmoniklerin Belirlenmesi	16
2.2.3.	Ölçme Yoluyla Harmoniklerin Belirlenmesi	18
BÖLÜM 3.	ENERJİ SİSTEM ELEMANLARININ SİNÜSOİDAL OLMAYAN AKIMLARA GÖRE MODELLENMESİ	19
3.1.	İletim Hatlarının Harmonik - Bağımlı Modeli	19
3.1.1.	Dengeli Yüklemeye Göre Modelleme	19
3.1.2.	Dengesiz Yüklemeye Göre Modelleme	30
3.2.	Transformatörlerin Harmonik Bağımlı Modeli	33
3.3.	Asenkron Motorların Harmonik Bağımlı Modeli	37
BÖLÜM 4.	HARMONİKLERİN ENERJİ SİSTEMLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ	41
4.1.	Harmoniklerin Dielektrik Dayanımı Üzerindeki Etkileri	42

4.2.	Harmoniklerin Ölçme İşlemleri Üzerindeki Etkileri ..	43
4.3.	Harmoniklerin Ev Tipi Tüketiciler Üzerindeki Etkileri	47
4.4.	Harmoniklerin Elektrik Makinalarının Isınması Üzerindeki Etkileri	48
4.5.	Harmoniklerin Gerilim Düşümleri Üzerindeki Etkileri	51
4.6.	Harmoniklerin Rezonans Olayları Üzerindeki Etkileri	52
4.7.	Harmoniklerin Enerji Sistemlerindeki Bozucu Etkileri	54
4.8.	Harmoniklerin Sayaçlar Üzerindeki Etkileri	56
4.9.	Harmoniklerin koruyucu Röleler Üzerindeki Etkileri .	57
4.10.	Harmoniklerin Oluşturdukları Ek Kayıplar	57
4.10.1.	Ek I^2R Kayıpları	57
4.10.2.	Ek Demir Kayıpları	59
BÖLÜM 5.	SAYISAL UYGULAMA	61
5.1.	Genel Açıklama ve Veriler	61
5.2.	I^2R (Hat) Kayıplarının Analizi	62
5.3.	Demir Kayıplarının Analizi	65
5.4.	Harmoniklerin Süzülmesine İlişkin Süzgeç Devre (Filtre) Tasarımı	66
SONUÇLAR ve ÖNERİLER		69
REFERANSLAR		72
ÖZGEÇMİŞ		77

S Ö Z E T

Enerji sistemleri üzerinde harmoniklerin incelenmesi uzun yıllara dayanır . Daha 1920 'li yıllarda sinüsten ayrılmış akım ve gerilimlerin iletim hatları üzerinde oluştuğuna tanık olunmuştur .

Bu çalışmada enerji sistemlerinde başlıca harmonik kaynakları incelenmiş ve harmonikleri analiz etmeye yönelik yöntemler verilmiştir . Enerji sistem elemanlarının (transformatör , hat , asenkron motor) sinüsoidal olmayan akımlar için modellenmesi yapılmıştır . Harmoniklerin enerji sistemleri üzerindeki çeşitli etkileri incelenmiştir .

Son bölümde (5. Bölüm) bir sayısal uygulama verilmiştir . Sinüsoidal ve sinüsoidal olmayan iki yük içeren bu sistem üzerinde yapılan bu hesaplama sonuçlarından ; hat kayıplarının harmonik mertebesine ve dengesiz yüklenmeye bağlı olarak arttığı gözlenmiştir . İkinci olarak , bir evirici çıkış gerilimi gözönüne alınmıştır . Gerilim harmonikleri nedeniyle , eddy - akım kayıplarının arttığı , histerizis kayıplarının ise azaldığı görülmüştür . Son olarak bir filtre devresi tasarlanmış , harmoniklerin süzülmesinin önemi açıklanmıştır .

S U M M A R Y

The problem of power system harmonics is not new . Utilities recognized that distorted voltage and current waveforms were observed on transmission lines in the 1920 s .

In this study the main harmonic sources have been considered and the methods for harmonic analysis have been given . The modelling of electric power system elements —such as transformer , transmission line and induction motor has been illustrated for non - sinusoidal mode . The various effects of harmonics upon power systems have been discussed .

In the last chapter (in 5 th chapter) an illustrative example is given . From the computation results of the system including two loads with sinusoidal and non - sinusoidal modes , it is observed that I^2R losses increase depending on harmonic order and unbalanced loading . Later, an inverter output voltage is considered . Where Eddy - current losses increase but hysteresis losses reduce depending on voltage harmonic order . Finally , a filter circuit is designed and the importance of filtering is stated .

B Ö L Ü M 1. G İ R İ Ş

Elektrik enerjisi , günümüzün vazgeçilmez bir enerji kaynağıdır . Elektrik enerjisini üreten , ileten veya dağıtan kuruluşların görevi kesintisiz , ucuz ve kaliteli bir hizmeti müşterilerine (tüketicilerine) sunmaktır . Buradaki " kalite " kavramı , sabit uç gerilimi ve sabit şebeke frekansıyla ilgili olarak kullanılmıştır . Bunun yanı sıra , hat kayıplarının minimize edilmesi ve tüketicilerin arzu ettikleri sinüsoidal biçimli uç gerilimlerinin ulaştırılması da modern işletme açısından son derece önemlidir .

Elektrik enerjisinin üretimi , iletimi ve dağıtımı ile ilgili konular ve heslemler , " Elektrik Güç Sistemleri Mühendisliği " adı altında toplanır ve incelenir . Bu konuları içine alan hesaplarda öngörülen varsayımlar , şu şekilde özetlenebilir :

- Sistem , her üç fazından eşit genlikli ve aralarında 120° faz farkı bulunan akımlarla yüklenmektedir . (Dengeli Yüklenme)
- Sisteme ilişkin elektriksel büyüklükler (akım ve gerilimler) tam olarak sinüsoidal değişime sahiptirler . (Harmonikler yer almaz)
- Sistem elemanları lineer-doğrusal özellik taşırlar . (Doyma ihtimal edilmştir)

Elektrik enerji sistemleri , çoğunlukla bu varsayımlara uygun karakter göstermektedir . Gerçekten elektrik enerjisinin uygun olarak kullanılmaya başlandığı 19. Yüzyıl'ın sonlarından günümüze kadar , yukarıdaki varsayımlar her zaman için geçerli olmuştur .

Elektrik enerjisinin yaygın olarak kullanımı , tüketimi arttır

dığı gibi refah düzeyinin gelişmesine bağlı olarak da yeni teknolojiler ve tüketici modelleri ortaya çıkmaktadır .

Sözkonusu yeni tüketici modelleri ve denenen yeni sistemler , karakteristikleri gereği , yukarıda sıralanan varsayımlarla uygunluk göstermemektedir .

Özellikle günümüzde çok yaygın olarak kullanılan yarı-iletken doğrultucular (S C R `ler) birer sinüsoidal olmayan işaret (harmonik) kaynaklarıdır . Aynı şekilde son otuz yıldır kaliteli çelik üretiminde kullanılan ark fırınları , dengesiz yüklenme ve harmonikleri bir arada içerirler .

Harmoniklerin analizine yönelik ilk çalışmalar 1930'lara dayanır [1] . Bu çalışmalarda , sinüsten ayrılan akım ve gerilim dalgalarının iletim hatları üzerindeki etkinlikleri üzerinde durulmuştur . Örneğin ; 400 km uzunluğundaki 220 kV `luk bir enerji iletim hattıyla ilgili olarak şu saptamalar yapılmıştır [1] :

— Hatbaşındaki gerilim %7 oranında 3. harmonik içerdiğinde bunun hat sonu gerilimi üzerindeki etkisi %53 oranında 3. harmoniktir .

— Tam yük altında , harmonik yüzdesi 29'a düşmektedir .

— Generatör tarafında saptanan güç katsayısı (harmonikli halde) 0.848 iken , sinüsoidal halde bu değer 0.96 dir .

— Yük tarafında bulunan asenkron motorlar , harmoniklerin etkisiyle mekanik salınımlara uğramakta ve gürültü oluşmaktadır .

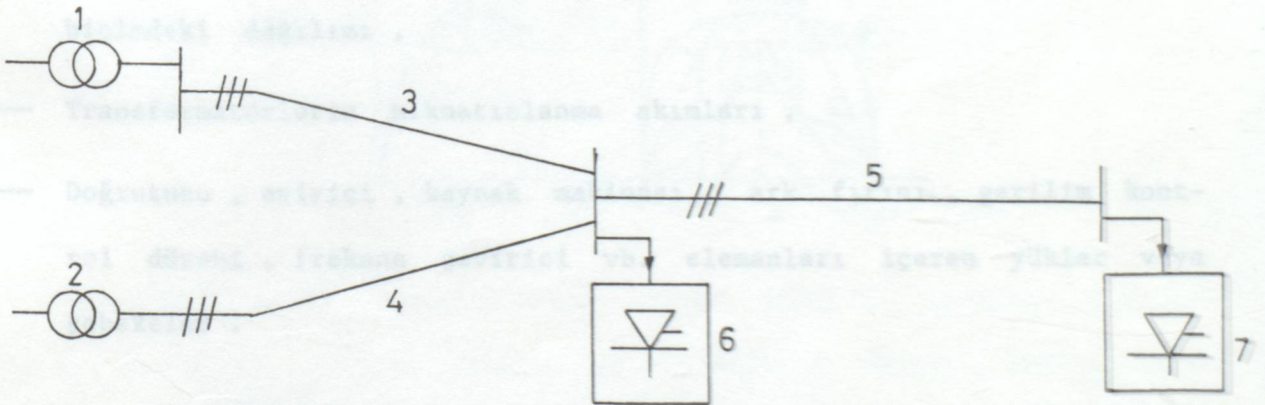
1930 larda yapılan bu saptamalar , günümüzde de daha ayrıntılı olarak geçerliliğini korumaktadır .

Günümüzde enerji sistem harmonikleri şu iki kısımda ele alınabilir :

- Yarı-iletken doğrultucuların yaygın olarak kullanılması
- Enerji tesis elemanlarının tasarımında harmoniklerinden ötürü öngörülecek değişiklikler .

Bu çalışmada enerji sistemleri üzerindeki harmoniklerin etkinlikleri teknik ve ekonomik yönlerden ayrıntılı olarak incelenmiştir .

Hava hatları ve yeraltı kabloları -hem dengeli hem de dengesiz çalışma için- asenkron makinalar güç transformatörleri sinüsoidal akımlara karşı modellenmiştir . Sinüsoidal olmayan akımların enerji sistemleri üzerindeki olumsuz etkileri (teknik/ekonomik) incelenmiştir . Şekil 1.1 de harmonik içeren bir enerji sisteminin basit bağlantı şeması verilmiştir .



Şekil 1.1 Harmonik içeren bir enerji sisteminin basit bağlantı şeması (1,2: transformatörleri , , , 3,4,5: hatları ve 6,7: harmonik akım çeken yükleri göstermektedir) .

B Ö L Ü M 2. E N E R J İ S İ S T E M L E R İ N D E H A R M O N İ K K A Y N A K L A R V E H A R M O N İ K A N A L İ Z İ

2.1. Enerji Sistemlerinde Harmonik Kaynaklar

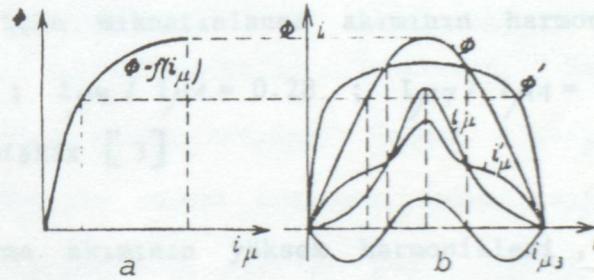
Son 50 yıldır yapılan teorik ve uygulamalı araştırmaların sonucuna göre ; harmonik kaynakları , günümüzde mevcut olanlar ve gelecekte ortaya çıkabilecek kaynaklar şeklinde iki bölümde incelemek mümkündür [2] .

2.1.1. Günümüzdeki Başlıca Harmonik Kaynakları :

- Dönen makinalarda gerilim değişimindeki dalgalılık ,
- Senkron makinaların kutup başları boyunca hava aralığı relüktansının değişken olması ,
- Ani yük değişimlerinde senkron makinaların akılarındaki sinüsten ayrılma özelliği ,
- Senkron makinaların hava aralığında akımın sinüsoidal olmayan biçimdeki dağılımı ,
- Transformatörlerin mıknatıslanma akımları ,
- Doğrutucu , evirici , kaynak makinası , ark fırını , gerilim kontrol düzeni , frekans çevirici vb. elemanları içeren yükler veya şebekeler .

Örneğin , bir transformatörün sekonder sargısı yüklenmeden , primer sargısı sinüsoidal bir gerilime bağlanırsa , transformatör şebekeden " boşa çalışma akımını " çekecektir . Bu akımın , demir kayıplarına karşılık düşen gerçel bileşeni ve mıknatıslanma akımına karşılık düşen sanal bileşeni vardır . Akımın gerçel bileşeni ihmal edilerek boşa çalışma akımının yalnız mıknatıslanma akımına eşit olduğu ka-

bul edilebilir . Mıknatıslanma akımı , kendisi ile aynı fazda bir akı oluşturur ve faz olarak 90° geride bir gerilim endükler . Demir çekirdekten geçen manyetik akı sargı uçlarına uygulanan gerilim gibi aynı frekansta ve sinüsoidal olduğu halde demirin mıknatıslanma karakteristiği doyma nedeniyle lineer olmadığı için , mıknatıslanma akımı tam sinüsoidal olmayacaktır . Sargı şekline ve yalıtım noktası- Mıknatıslanma akımı temel ve yüksek harmoniklere ayrıştırılırsa , temel harmonik dışında tek sayılı harmonikler bulunur . Bunlar içinde en etkilisi 3. harmoniktir . Şekil 2.1 de mıknatıslanma eğrisi ile sinüs şeklindeki ϕ_1 akısı ve buna karşılık gelen mıknatıslanma akımı (i_μ) gösterilmiştir . Endüksiyon büyüdükçe , mıknatıslanma akımının



Şekil 2.1 Mıknatıslanma eğrisi (a) ve manyetik akı ile mıknatıslanma akımının zamana göre değişimi (b) . (ϕ : sinüsoidal magnetik akı , ϕ' : üçüncü harmoniği olmayan magnetik akı , i_μ : mıknatıslanma akımı , $i_{\mu 3}$: mıknatıslanma akımının üçüncü harmoniği ve $i_{\mu' 3}$: üçüncü harmoniği olmayan mıknatıslanma akımı) .

(Sinüsoidal olarak değişen B magnetik alanının veya ϕ magnetik akısının ani değerleri yardımıyla mıknatıslanma akımı , zamana göre

grafik olarak da çizilebilir .)

Mıknatıslanma akımında 3. harmoniğin oluşum nedeni şebeke gerilimi olmayıp , transformatör nüvesidir . Şebeke geriliminin ve bunun sonucu olarak magnetik akımın sinüsoidal olarak değişmesine karşılık , transformatör demiri , 3 ve 3'ün katı harmonikleri içeren mıknatıslanma akımını oluşturur . Ancak bu akım , sargı şekline ve yıldız noktasının durumuna bağlıdır .

Magnetik endüksiyon küçük olursa , akı ile akım arasında lineer bağıntı olacağından , mıknatıslanma akımı sinüsoidal olabilir . Ancak ekonomik olarak demirin cinsine göre belirli bir B endüksiyonu ile çalışmak gerekir . Magnetik endüksiyon büyüdükçe , mıknatıslanma akımının sinüsten sapması o derece artar .

Mıknatıslanma akımının Fourier Serisine göre açılımı gerçekleştirilirse yalnız tek sayılı harmonikler oluşur . Örneğin ; sıcak haddelenmiş

transformatör sacı için mıknatıslanma akımının harmonikleri , (B = 1.4T

$$I_{M3} / I_{M1} = 0.50 ; I_{M5} / I_{M1} = 0.28 ; I_{M7} / I_{M1} = 0.12$$

şeklinde elde edilmiştir [3] .

Mıknatıslanma akımının yüksek harmonikleri , transformatörü

besleyen selfler ve kapasitelerden oluşan şebekede rezonans olaylarına yol açar ve telefon şebekesinde parazitler oluşur . Ayrıca transformatörün sargı dirençlerinde ve şebekenin geri kalan omik dirençlerinde ek gerilim düşümleri oluşturur .

Bilindiği gibi , generatörde endüklenen gerilimin sinüsoidal olduğu kabul edilir . Transformatörün mıknatıslanma akımı generatör sargılarından geçtiğinde , bunun temel harmonikleri de generatörün endüktif ve

omik dirençlerinde sinüs şeklinde gerilim düşümü meydana getirirler; ancak bu durum , gerilimin sinüsten ayrılmasına yol açmaz .

Buna karşılık mıknatıslanma akımının yüksek harmoniklerinin , generatörün özellikle reaktif direnci (reaktansı) üzerinde meydana getirdikleri gerilim düşümleri , gerilimin sinüsten ayrılmasına neden olur . Her ne kadar mıknatıslanma akımları çok küçük ve bunların harmonik genlikleri oldukça küçükse de , generatörün ve şebekenin reaktif dirençleri frekansla orantılı olarak arttığı için , gerilim düşümlerinde de hissedilir artışlar olabilir .

Böylece transformatörün primer tarafına sinüsoidal olmayan bir gerilim uygulanmış olur ve bu gerilim sekondere geçer . Bu durum transformatörün mıknatıslanma akımının daha da sinüsten ayrılmasına yol açar [4] .

Öte yandan , ileriki bölümlerde görüleceği gibi , yarı-iletken (tristör- SCR) eleman içeren devreler , şebekeden " Harmonik Reaktif Güç " çekerler . Bu güç , sıfır ortalama değeri etrafında dalgalanır . Harmoniklerce oluşturulan bu gücün ortalama değeri sıfırdır . Bu nedenle , harmonik güç , " harmonik reaktif güç " olarak adlandırılabilir [5]

Elektrik makinalarında , makina yapısından kaynaklanan harmoniklerin giderilmesi için çeşitli önlemler alınır . Örneğin ; Senkron makinalarda endüklenen gerilimde istenmeyen harmonikleri önlemek için, kutup başına oluk ve bobin sayısı büyük yapılır [8] .

2.1.2. Gelecekte Oluşabilecek Harmonik Kaynakları

— Motor verimini artırmaya yönelik enerji dönüşüm düzenekleri ,

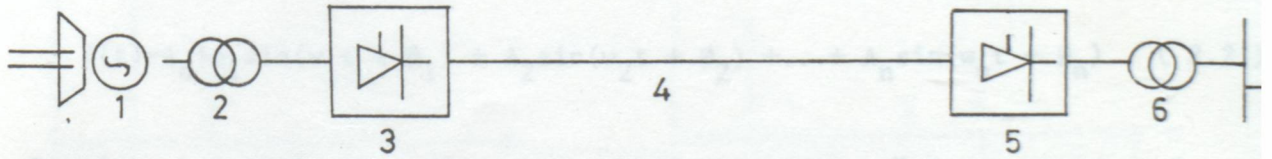
- Elektrikli cer için hız kontrol düzenleri ,
 - Yüksek gerilim doğru akımla enerji iletiminin yaygınlaşması ,
 - Rüzgar ve güneş enerjisinden yararlanan generatörlerin merkezi şebekeye bağlanması ,
 - Statik VAR-kapasitörlerin yaygın olarak kullanılması ,
 - Bataryalı elektrikli taşıtların yaygınlaşması ,
 - Magneto-hidrokinamik (MHD) , yakıt pilleri vb. enerji üreteçlerinin gelişmesi ve yaygınlaşması ,
 - Büyük fırınlar için darbe-modüleli ısıtaçların yayılması ,
- bu sınıflandırma içinde yer alabilir .

Bu sınıflandırmada , örneğin; ark fırınları , son yıllarda kaliteli çelik üretiminde kullanılmaktadır . Ark fırınının aktif direnci sabit değildir . Bir yarı periyodun başlangıcında bu direnç büyüktür . Bundan sonra bir minimum değere düşer , ve yarı periyodun sonuna doğru gene yükselir . Bu nedenle , akım tam sinüs biçiminde değildir . Ergitme aşamasının başında akım harmonikleri çok fazladır ve hurda demir eridikten sonra harmonikler azalır . Bir ark fırını için 2. harmoniğin %4 ile 9 , 3. harmoniğin %6 ile 10 , 4. harmoniğin %2 ile 6 , 5. harmoniğin %2 ile 10 , 6. harmoniğin %2 ile 3 , 7. harmoniğin %3 ile 6 ve 9. harmoniğin %2 ile 5 arasında olduğu gözlenmektedir [9] . Ark fırını bir harmonik generatörü gibi rol oynar . Ark fırınına bağlı paralel devrelerde , bazı durumlarda rezonans oluşabilir . Ayrıca şebekeye geçen harmonik akımları şebeke empedansı üzerinde gerilim düşümüne ve kayıplara yol açar .



Öte yandan çok hızlı değişen reaktif güç ihtiyacını karşılayacak kompanzasyon , geleneksel kompanzasyon düzenleriyle gerçekleştirilemez . Bunun yerine yarı-iletken düzenlerle gerçekleştirilen " VAR-Kompanzasyon " dan yararlanılır . Örneğin; ark fırınlarında , fırının çektiği reaktif gücün değişimi çok hızlı olduğu için , normal mekanik cihazlarla kompanzasyon gücünü karşılamak mümkün olmaz . Tristörler , bir senkron anahtar gibi çalışırlar ve kapı devrelerine uygun işaret verilerek devreye uygulanan gerilimin efektif değeri ayar edilebilir .

1960`lı yıllardan başlayarak , yarı-iletken teknolojisinin gelişmesiyle , doğru akımla enerji iletimi gündemdedir . Kararlılık probleminin olmaması , kayıpların azalması ve farklı frekanslı iki noktanın birleştirilme olanağının olması , doğru akımla enerji iletimini tercih edilir yapmaktadır . Şekil 2.2`de bir doğru akımla enerji iletim hattının basit bağlantı şeması verilmiştir .



Şekil 2.2 Bir doğru akım enerji iletim hattının prensip bağlantı şeması (1:generatör , 2:yükseltici transformatör , 3:doğrultucu , 4:iletim hattı , 5:evirici ve 6:indirici transformatör) .

Doğru akım enerji iletim hatlarında hat başında ve sonunda yer alan " doğrultucu " ve " evirici " bloklar , yarı-iletken elemanlardan oluştuklarından , birer harmonik kaynağı olmaktadır .

Örneğin; altı-yollu çeviricilerin kullanıldığı bir doğru akımla enerji

iletim hattında faz akımının efektif değeri

$$I = I_1 \left[1 + \left(\frac{1}{5}\right)^2 + \left(\frac{1}{7}\right)^2 + \left(\frac{1}{11}\right)^2 + \dots \right]^{1/2} \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilebilir [10]. Burada I_1 , akımın temel bileşenin efektif değeridir.

Uygulamada harmoniklerin olabildiğince az olduğu çevirici düzenlerden yararlanılır. Yapılan incelemelerden, "tek-kutuplu iletim modeli"nde 5,7,17 ve 19 numaralı harmoniklerin ortaya çıktığı, buna karşılık "iki-kutuplu iletim modeli"nde bu mertebeden harmoniklerin oluşmadığı gözlenmiştir [11].

2.2. Harmonik Analizi

Zamana göre sinüsoidal değişmemekle birlikte periyodik olma özelliğini taşıyan bir dalganın, değişik genlik ve faz açılarındaki sinüsoidal bileşenlerin toplamı olarak yazılabileceği J.Fourier tarafından gösterilmiştir.

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \phi_2) + \dots + A_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (2.2)$$

Burada, l indisi ile gösterilen birinci terime "Temel Bileşen" adı verilir. "0" indisi ile gösterilen bileşen ise "Sabit Terim"dir. Temel bileşen, dalganın sinüsoidal değişimine karşılık düşer. 2,3,4,.....,n indisleriyle gösterilen bileşenlere ise "Harmonik" adı verilmektedir.

A_2, A_3, \dots, A_n harmoniklerin genlikleri, $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ harmoniklerin açısal frekansları ve $\phi_2, \phi_3, \dots, \phi_n$ harmoniklerin faz açılarını göstermektedir. Harmoniklerin açısal frekansları

ile temel bileşenin açısal frekansı arasında

$$w_n = n * w_1 \quad (2.3)$$

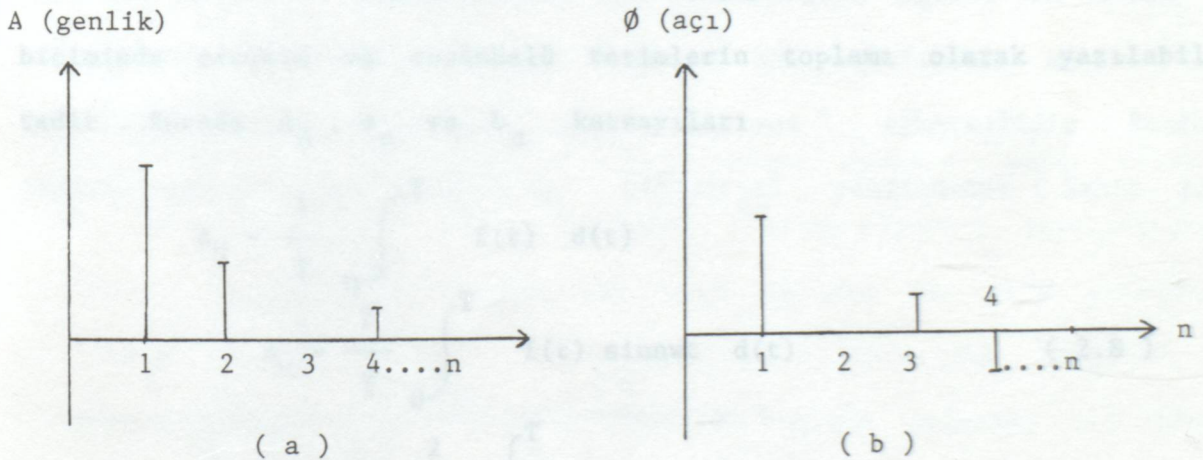
ilişkisi vardır .

(2.2) denklemini ile Fourier açılımı yapılan bir dalganın efektif değeri ise

$$A_{ef} = A = \left[\left(A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_n^2 \right) / 2 \right]^{1/2} \quad (2.4)$$

şeklinde bulunur . A genel biçimindeki dalga , yerine göre akım yerine göre de gerilim dalgası olabilir .

Hesaplarda , bir dalgaya ilişkin genlik ve faz spektrumlarının çizilmesi yoluna gidilir . Bu diyagramlar , ilk bakışta dalganın harmonik mertebesi ve yakınsaması hakkında bilgi verir (Şekil 2.3.) .



Şekil 2.3 Bir sinüsoidal olmayan dalgaya ilişkin genlik (a) ve faz (b) spektrumları .

Ele alınan dalganın bozularak sinüsten uzaklaşmasının ölçütü " Temel Bileşen Katsayısı -- g " ile verilir .

$$g = \frac{\text{Temel bileşenin efektif değeri}}{\text{Dalgaının efektif değeri}} \quad (2.5)$$

Temel bileşen katsayısı yerine , " Harmonik Distorsiyon Katsayısı--k " da kullanılabilir . Bu iki büyüklük arasındaki bağıntı

$$g^2 + k^2 = 1 \quad (2.6)$$

şeklindedir .

Harmoniklerin belirlenmesi için çeşitli yollar kullanılabilir . Aşağıda bu yöntemler incelenmiştir .

2.2.1. Fourier Açılımı Yardımıyla Harmoniklerin Belirlenmesi

Harmoniklerin belirlenmesiyle ilgili en temel yöntem , Fransız matematikçi J.Fourier'in 1812'de açıkladığı " Açılım-Dönüşüm " yöntemidir .

Buna göre , T peryod boyunca sinüsten farklı bir biçimde değişen bir f(t) dalgası , Fourier'e göre

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n * \sin n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n * \cos n\omega t \quad (2.7)$$

biçiminde sinüslü ve cosinüslü terimlerin toplamı olarak yazılabilmektedir . Burada A_0 , a_n ve b_n katsayıları

$$\begin{aligned} A_0 &= \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt \end{aligned} \quad (2.8)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır . $T = 2\pi / \omega$ dır . Diğer taraftan , (2.7) ifadesinde harmonik mertebesi sonsuz (∞) olarak ifade edilmekle birlikte , uygulamada maksimum harmonik mertebesi daima sonlu değer alır . (Literatürde , harmonik numarası için , çoğunlukla ν harfi kullanılmaktadır .) [12 , 13] .

Analizi yapılması istenen periyodik bir dalganın Fourier Serisinde terimlerin (a_n, b_n) hepsi olmayabilir . Bir periyodik dalganın dik eksenlere göre simetrisinin olması , serinin hangi terimlerden oluştuğu hakkında fikir verir . Böylece serinin elde edilmesi için gereksiz işlemler yapılmamış olur . Simetri , genellikle , dalganın şekline bakmakla görülebilir . Simetri türleri :

— Çift Fonksiyon Simetrisi ,

— Tek Fonksiyon Simetrisi ,

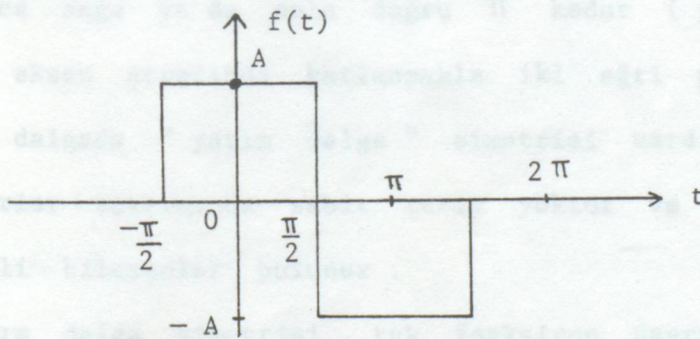
— Yarım Dalga Simetrisi ,

— Çeyrek Dalga Simetrisi ,

şeklinde sınıflandırılabilir [12] .

Çift Fonksiyon Simetrisi :

Peryodik dalganın düşey eksenin sağ tarafındaki eğrisi bu eksen etrafında sola katlandığı zaman , dalganın sol tarafındaki eğrisi ile üst üste gelirse fonksiyon " çift fonksiyon " simetridir . Bu fonksiyonun matematiksel ifadesi de $f(t)=f(-t)$ şeklindedir (Şekil 2.4) .

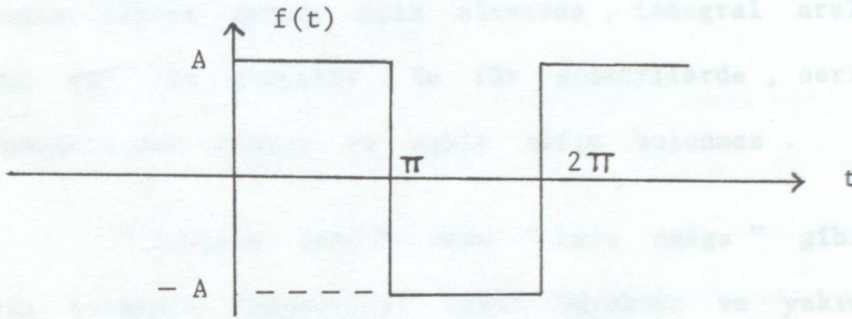


Şekil 2.4 Çift fonksiyon simetrisi :

Çift fonksiyonun Fourier serisinde , yalnızca cosinüs terimleri bulunur . Bazı durumlarda sabit terim de yer alır . Tüm sinüs terimleri sıfırdır .

Tek Fonksiyon Simetrisi :

Peryodik dalganın düşey eksenin sağ tarafındaki eğrisi bu eksen etrafında önce sola ve sonra soldaki eğrinin üstüne gelecek biçimde yatay eksen etrafında kullanıldığı zaman , bu iki eğri parçası üst üste gelirse bu fonksiyon , " Tek fonksiyon " simetridir . Bu fonksiyonun matematiksel ifadesi de $f(t)=-f(-t)$ şeklindedir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Tek fonksiyon simetrisi

Tek fonksiyonun Fourier serisinde , yalnızca sinüs terimleri bulunur. Sabit bileşen ve tüm cosinüs terimleri sıfırdır .

Yarım Dalga Simetrisi :

Peryodik bir dalganın eğrisinin yarım periyot parçası , yatay eksen boyunca sağa ya da sola doğru π kadar (yarım periyot) kaydırılır ve bu eksen etrafında katlanmakla iki eğri parçası üst üste gelirse , bu dalgada " yarım dalga " simetrisi vardır . Böyle bir dalganın Fourier açılımında sabit terim yoktur ve seride yalnızca tek harmonikli bileşenler bulunur .

Yarım dalga simetrisi , tek fonksiyon üzerinde ise yalnızca sinüslü terimler ; çift fonksiyon üzerinde ise yalnızca cosinüslü terimler bulunur .

Çeyrek Dalga Simetrisi :

Peryodik bir dalgada hem yarım dalga simetrisi hem de çift/tek dalga özelliği varsa , böyle bir dalgada " çeyrek dalga " simetrisi bulunur .

Böyle bir dalga için Fourier serisi terimleri hesaplanırken , integral sınırları tam , yarım veya çeyrek periyot için alınabilir .

Örneğin; çeyrek periyot için alınırsa , integral aralığı $0-\pi/2$ olup, sonuç (4) ile çarpılır . Bu tür simetride , seri açılımı tek harmoniklerden oluşur ve sabit terim bulunmaz .

" Testere dişi " veya " kare dalga " gibi periyodik dalgaların harmonik katsayıları hayli büyüktür ve yakınsaklıkları azdır . Kesintisiz olan periyodik dalga serileri ilk birkaç terimle fonksiyona yaklaşırlar . Böylece bu tür dalgaların serilerinin ilk dört-beş teriminden sonra diğer terimler önemini yitirir .

Diğer taraftan , Fourier serisi açılımı (2.7) deki trigonometrik biçimde verilebildiği gibi " üstel seri " halinde de yazılabilir . Buna göre , üstel seri biçiminde

$$f(t) = D_0 + \sum_{n=1}^{\infty} D_n e^{jnt} + \sum_{n=-1}^{-\infty} D_n e^{jnt} \quad (2.9)$$

ifade edilebilir .

Burada D_0 , sabit terim A_0 a eşittir .

$$\begin{aligned} D_n &= \frac{1}{T} \int_0^T f(t) (\cos nt - j \sin nt) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-jnt} dt \end{aligned} \quad (2.10)$$

şeklindedir . Yukarıdaki eşitlik , Euler Formülleri yardımıyla elde

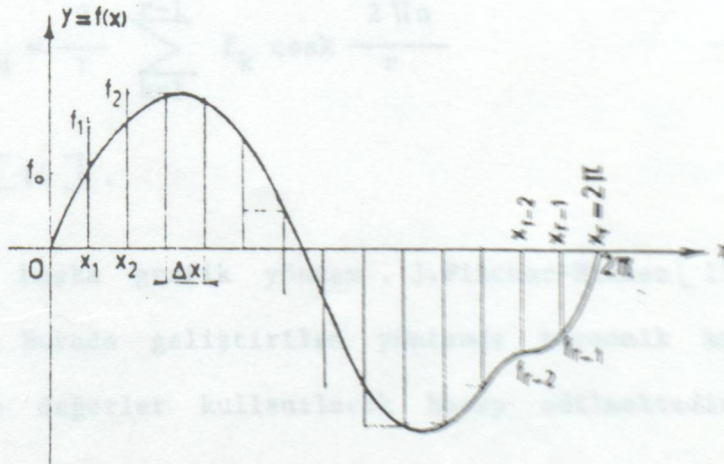
edilmiştir . $D_{-n} = D_n^*$ olduğu için (" * " , eşlenik anlamında kullanılmıştır .)

$$D_{-n} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{jnt} dt \quad (2.11)$$

olacaktır .

2.2.2 Grafik Yöntemler Yardımıyla Harmoniklerin Belirlenmesi

Sinüsoidal olmayan dalganın matematiksel denklemi yerine , zamana göre değişimi biliniyor olabilir . Bu değişim , ya deneysel olarak ya da osilograf veya printer den alınır . Bu durumda , (2.8) ile verilen integrallerin yaklaşık olarak hesaplanması gerekecektir . Değişimi verilen eğriyi küçük parçalara bölmek ve bu parçalarla ilgili toplamları yaparak (2.8) deki integrallere dönmek gerekecektir . Şekil 2.6 da , denklemi bilinmeyen periyodik bir fonksiyonun yatay eksenini r tane eşit parçaya bölünmüştür .



Şekil 2.6 Bir periyodik fonksiyonda harmonik katsayılarının grafik olarak belirlenmesi .

P.Thomson'un geliştirdiği bu yönteme göre , r tane eşit parçaya bölünen yatay eksenin her parçasına ($X_0 = 0$; $X_1, X_2, \dots, X_r = 2\pi$)

karşılık düşen uzaklıklar ($f_0=0$; f_1, f_2, \dots, f_r) ölçülür .

Şekil 2.5 deki bütün dikdörtgenlerin toplamı

$$SS = \sum_{k=0}^{r-1} f_k \Delta X \quad (2.12)$$

olduğundan , A_0 sabit terimi

$$\dot{A}_0 = \frac{SS}{X_r} = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^{r-1} f_k \quad (2.13)$$

olur . Benzer şekilde (2.8) denkleminde ,

$$a_n = \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{r-1} f_k \sin nx \Delta X \quad (2.14)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{r-1} f_k \cos nx \Delta X$$

veya , Şekil 2.5 den Δ ve Δ olduğu göz önüne alınırsa

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{r} \sum_{k=1}^{r-1} f_k \sin k \frac{2\pi n}{r} \\ b_n &= \frac{2}{r} \sum_{k=1}^{r-1} f_k \cos k \frac{2\pi n}{r} \end{aligned} \quad (2.15)$$

elde edilir [14] .

Bir başka grafik yöntem , J.Fischer-Hinnen [15] tarafından verilmiştir . Burada geliştirilen yöntemde harmonik katsayıları , bir önce bulunan değerler kullanılarak hesap edilmektedir .

Son yıllarda paket programların ve PC tip bilgisayarların yaygınlaşmasıyla , sinüsoidal olmayan dalgaların analizinde paket program kullanımı artmıştır . Diğer taraftan , Fourier dönüşümünün bilgisayarlar (sayısal) dönük incelemelerine de rastlanmaktadır [16 , 17] .

2.2.3. Ölçme Yoluyla Harmoniklerin Belirlenmesi

Harmonik gerilim ve akımlarının , temel bileşen gerilim ve akımlarına göre belirlenebilmesi için bir dalga analizörüne gerek vardır . Örneğin; Amerika Birleşik Devletlerinde Connecticut ve Potamac Elektrik kuruluşlarına ilişkin dağıtım tesislerinde akım ve gerilim harmoniklerinin seyyar olarak ölçülmesi gerçekleştirilmiştir . Havai dağıtım hattı üzerinde gerilim probu yardımıyla gerilim harmonikleri, pens tipi akım transformatörü üzerinden de akım harmonikleri belirlenmiştir [18] .

B Ö L Ü M 3. E N E R J İ S İ S T E M E L E M A N L A R I N I N S İ N Ü S O İ D A L O L M A Y A N A K I M L A R A G Ö R E M O D E L L E N M E S İ

Bu bölümde iletim hatları , transformatörler ve asenkron motorlar gibi enerji sistemlerinin başlıca elemanlarının harmonik-bağımlı eşdeğer devreleri verilmiş , ilgili devre denklemleri yazılarak matematiksel modelleri elde edilmiştir .

3.1. İletim Hatlarının Harmonik-Bağımlı Modeli

İletim hatları için , dengeli ve dengesiz yüklenmeyi gözönüne alan modellere gerek vardır . Bu modellemede , hat parametrelerinin (R,L,C) lineer oldukları ve zamanla değişmedikleri kabul edilmiştir .

3.1.1. Dengeli Yükleme Göre Modelleme

bir iletim hattı için genel hat parametreleri , omik direnç(R) , endüktans(L) ve kapasite(C) dir .

Bunlardan R direnci üzerinde , akımın karesiyle değişen Joule kayıpları oluşacaktır . Sinüsoidal olmayan bir dalganın her harmoniği , R direnci üzerinde bir Joule kaybı oluşturur . Örneğin; ν . akım harmoniğinin R direncinde oluşturacağı kayıp $I_{\nu}^2 * R$ dir . Bütün harmoniklerin Joule kayıpları toplamı sinüs biçimli olmayan ve içinde süperpoze olmuş bir doğru akım bileşeni bulunmayan bu akımın efektif değerinin vereceği Joule kaybına eşit olacaktır . O halde

$$R \sum_{\nu=1}^{\nu=\infty} I_{\nu}^2 = R * I^2 \quad (3.1)$$

dir . Diğer taraftan esas eğrinin efektif değeri , eğrinin ortalama

değeridir . Akımın ani değeri olmak üzere , bu ortalama değer

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (3.2)$$

dir . 0 halde harmonikli bir eğrinin oluşturduğu Joule kaybı şu şekli alır ,

$$R \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 = \frac{R}{T} \int_0^T i^2 dt = R * I^2 \quad (3.3)$$

Maksimum değer in efektif değere oranı " Tepe Faktörü--- σ " olarak tanımlanırsa

$$\sigma = \frac{I_{max}}{I} \quad (3.4)$$

olacağından , Joule kaybı

$$\sigma^2 R * I_{max}^2 \quad (3.5)$$

yazılıbilir . σ tepe faktörü , eğri cinsine göre başka başka değerler alır . Örneğin; eşit kenarlı üçgende $\sigma = 1.732$, dikdörtgende $\sigma = 1$, sinüs eğrisinde $\sigma = 1.414$ ve trapez dalgada $\sigma = 1.22$ dir [19] .

Eğer doğru akım bileşeni (I_0) de bulunuyor ise , Joule kaybı

$$\left[I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \right] R \quad (3.6)$$

olacaktır .

Alternatif akım bir iletken den geçtiğinde , iletken içinde doğurduğu alanın değişmesi nedeniyle bizzat iletken için Foucault akımları oluşturur . Diğer taraftan iletken için de bu gibi Foucault akımları , iletkenin içinden alternatif akım geçmeden de , dış alanların değişmeleri ile de oluşabilir . 0 halde alternatif akımda bu akımın iletkenin içinde doğurduğu magnetik alanın değiş-

mesi ile iletken içinde endüklediği Foucault akımları , iletkende bir doğru akımın vereceği Joule kayıplarına göre daha fazla enerji kayıplarına neden olurlar . Bu fazla kayıp , akımın , Foucault akımları tarafından iletkenin yüzeylerine doğru sıkıştırılması , yani " deri etkisi " şeklindeki olayın sonucudur .

Doğru akımda iletken kesitinde her tarafta aynı olan omik direç alternatif akımda , akım sıkıştırılması sonucu iletken kesitindeki bu homojenliğini kaybeder ve iletkenin omik direnci iletken içinde çok büyümüş ve yüzeylere doğru sabit kalmış gibi gözükür . Sonuç olarak bu durum , iletkenin omik direncine bir parça büyümüş olarak etkir . Yani alternatif akımda iletken direnci büyür .

Doğru akım direnci R_{-} ve alternatif akım direnci R_{\sim} olmak üzere , bu iki değer arasında

$$R_{\sim} = k * R_{-} \quad (3.7)$$

ilişkisi vardır . Burada ki k , daima 1'den küçük bir sayıdır . Bir iletken içinde endüklenen Foucault akımlarının verecekleri akım yoğunluğunu bulmak için o iletken içinde alternatif akımla endüklenen ayırık akım hatlarının iletken merkez ekseninden olan mesafelerine göre akım yoğunluklarını saptamak gerekir . Sonuçta , büyüyen frekansla ayırık akım çizgileri gittikçe iletken yüzeyine doğru sıkışır . Yapılan araştırmalar , akım yoğunluğunun iletken eksenine doğru azalması bir üstel fonksiyonla belirlenmektedir . Buna göre , iletkenin yüzeyinden itibaren X derinliğindeki akım yoğunluğunu j_x ve yüzeyde maksimum değerli akım yoğunluğunu $j_{yü}$ ile gösterecek olursak , iletken kesitindeki akım yoğunluğu azalması

$$\vec{j}_x = \vec{j}_{yü} * e^{-\frac{x}{\theta}} \quad (3.8)$$

fonksiyonu ile verilir . Burada θ , iletken malzemesine bağlı bir derinliktir .

Alternatif akımın çok yüksek frekanslarda büyük bir akım yoğunluğu ile ince bir tabaka şeklinde iletkenin yüzeyinde aktığı ve iletken içinin hemen hemen akım ve alandan oluştuğu kabul edilebilir . Bu olaya alternatif akımın " deri etkisi " veya akımın yüzeye sıkıştırılması denir .

Genel olarak akım yoğunluğunun iletken içinde azalmasının nedeni , omik direncin belirli bir miktar artmasıdır . Bu teoriye göre tüm iletken kesitinde aynı direnç büyümesi esas tutularak bir maksimum akım yoğunluğu j_0 ile , yüzeyden θ tabaka derinliğinden akıyormuş gibi düşünülür . O halde , doğru akımda olduğu gibi alternatif akım iletkeninin toplam kesiti $r^2 \pi$ den akmayıp $2\pi r \theta$ kesitli bir kısımdan akmaktadır . O halde , d iletken çapı olmak üzere

$$1 < k = \frac{R_{\sim}}{R_{-}} = \frac{r^2 \pi}{2 \pi r \theta} = \frac{r}{2 \theta} = \frac{d}{4 \theta} \quad (3.9)$$

olur . Buradan

$$k = \frac{R_{\sim}}{R_{-}} = \frac{2 \pi}{2 \sqrt{10^7}} r \sqrt{\frac{\mu f}{\rho}} \quad (3.10)$$

çıkar . $\pi^2 \approx 10$ alınarak

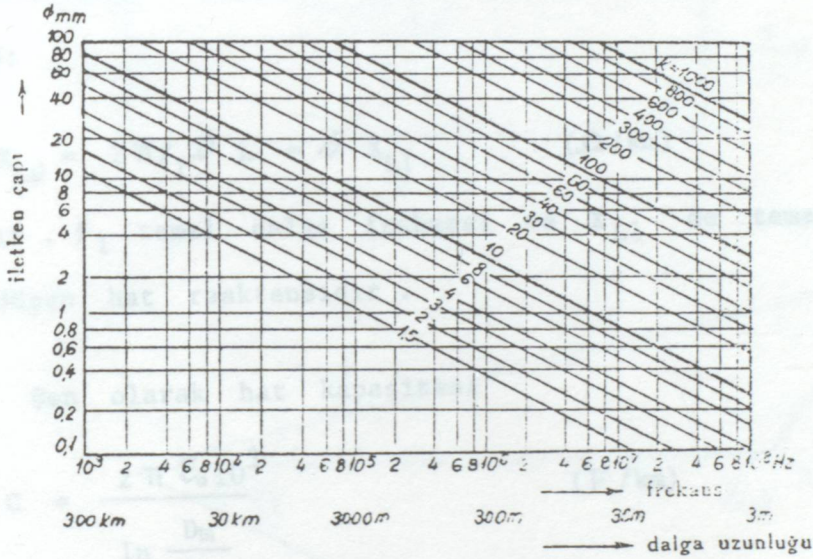
$$1 < k = \frac{1}{10^3} r \sqrt{\frac{\mu f}{\rho}} \quad (3.11)$$

bulunur .

Burada r iletken yarıçapını , μ bağlı permeabiliteyi , ρ özgül

direnci ve f de frekansı göstermektedir .

Yapılan incelemelerden , direnç büyümesinin (k katsayısı) iletken çapı ve frekansla ilişkili olduğu anlaşılmaktadır . Yuvarlak kesitli iletkenler (hat iletkenleri gibi) için , k direnç oranının frekans ve iletken çapıyla değişimi Şekil 3.1 de gösterilmiştir .



Şekil 3.1 Doğru akım direncine göre bakır elektrik direncinin çeşitli frekanslardaki artışı .

Bakırın dışındaki iletken malzemeleri için (örneğin, iletim hatlarında Alüminyum kullanılır) k oranını bulmak için , bakır için kullanılacak değeri " malzeme direnç faktörü ζ " ile çarpmak gerekir .
Örneğin; alüminyum için $\zeta = 0.74$ dür [19] .

harmonik için hattın omik direnci R_d

$$R_d = R_{-} * k_d$$

(3.12)

şeklinde ifade edilebilir .

Diğer taraftan , iletken çapı ve iletkenler arası uzaklığın bir fonksiyonu olan hat endüktansı , hattın çaprazlanmış olduğu varsayımı ile

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_m}{D_s} \quad (\text{H/km}) \quad (3.13)$$

yazılabilir . Burada D_m iletkenlerin " geometrik ortalama açıklığı " ve D_s de iletkenin " geometrik ortalama yarıçapı " dır . Hat için " hat reaktansı " önemlidir . Buna göre ω . harmoniğe ilişkin hat reaktansı

$$X_{L\omega} = 2 \pi f_1 \omega L = \omega X_{L1} \quad (\Omega/\text{km}) \quad (3.14)$$

olacaktır . f_1 temel dalga frekansı ve X_{L1} de temel frekansa karşılık düşen hat reaktansıdır .

Son olarak hat kapasitesi

$$C = \frac{2 \pi \epsilon_0 10^3}{\ln \frac{D_m}{D_s}} \quad (\text{F/km}) \quad (3.15)$$

şeklinde ifade edilebilir . ϵ_0 boşluğun geçirgenliği olup $8.85 \cdot 10^{-9}$ F/m dir . Hesaplarda hattın kapasitif reaktansı kullanıldığına göre , ω . harmoniğe ilişkin hattın kapasitif reaktansı

$$X_{C\omega} = \frac{1}{2 \pi f_1 \omega C} = \frac{1}{\omega X_{C1}} \quad (\Omega/\text{km}) \quad (3.16)$$

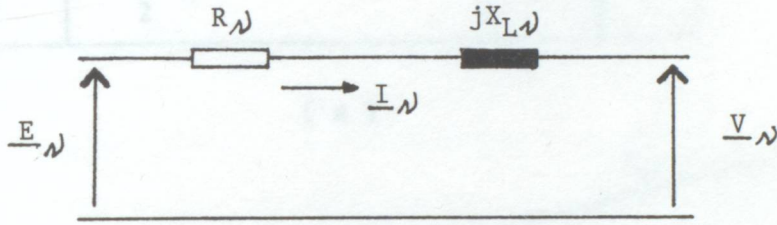
olacaktır . X_{C1} temel frekansa karşılık gelen hattın kapasitif reaktansıdır . Kompleks düzlemde ise , ω . harmonik için

$$\underline{Z}_{\omega} = R_{\omega} + jX_{L\omega} \quad (\Omega/\text{km}) \quad (3.17)$$

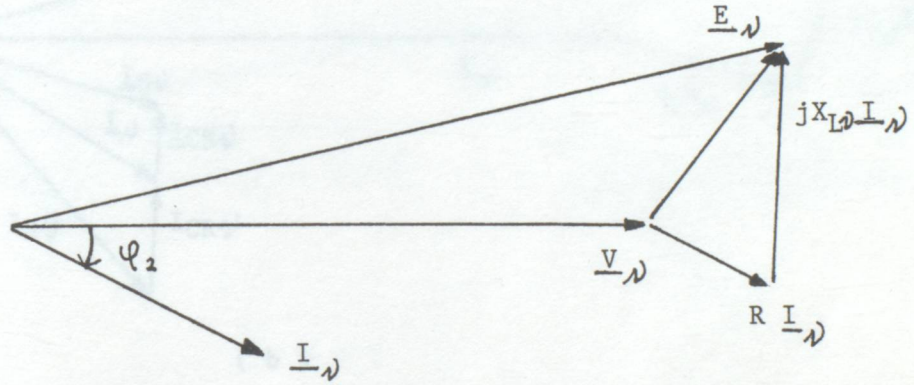
$$X_{C\omega} = -jX_{C\omega}$$

bağlantıları yazılabilir .

İletim hatları , uzunluklarına göre , " kısa uzunlukta " , " orta uzunlukta " ve " uzun " iletim hattı olarak sınıflandırılabilir . Ortalama 100 km ye kadar olan hatlar kısa iletim hattı olarak gözönüne alınır . Bu tip hatlarda kapasite etkisi ihmal edilir ve hat , basit R,L devresi gibi çözülebilir .



(a)



(b)

Şekil 3.2 Kısa uzunluktaki bir iletim hattının harmonikte tek-hat diyagramı (a) ve fazör diyagramı (b) :
(E hat başı gerilimini ve V hat sonu gerilimini göstermektedir .)

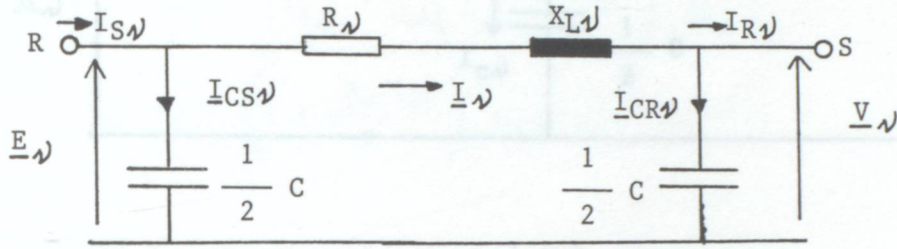
Şekil 3.2 ye karşılık düşecek devre denklemi

$$\underline{E}_n = \underline{V}_n + \underline{Z}_n \underline{I}_n \quad (3.18)$$

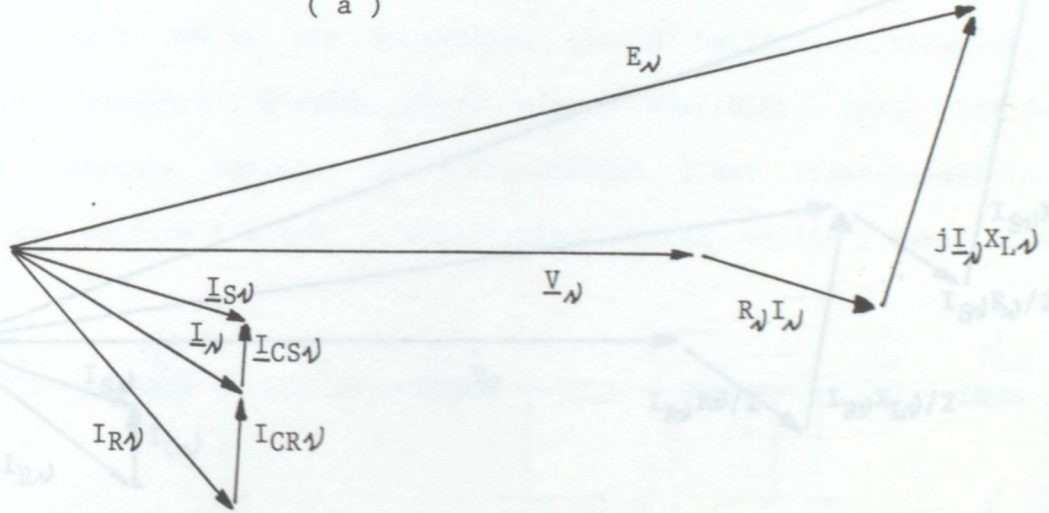
olacaktır . ("-" işareti , kompleks büyüklüğü göstermektedir .)

Orta uzunluklardaki hatlarda hat kapasiteleri tamamen ihmal

edilmez ; hattın belirli noktalarına toplanmış gibi düşünülebilir .
(Π ve T modelleri — Şekil 3.3 ve Şekil 3.4) .

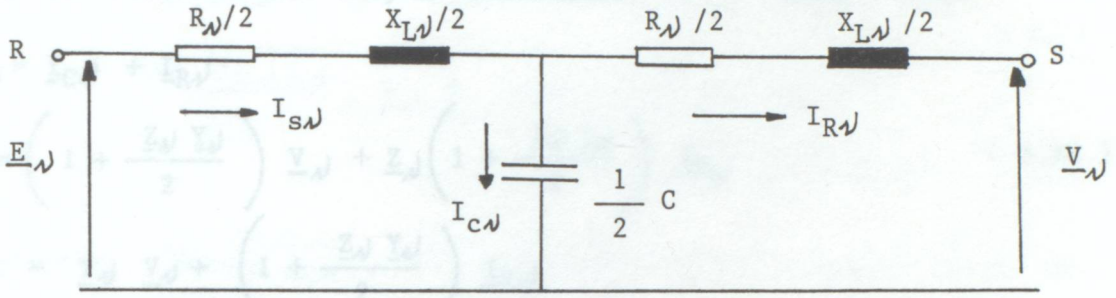


(a)

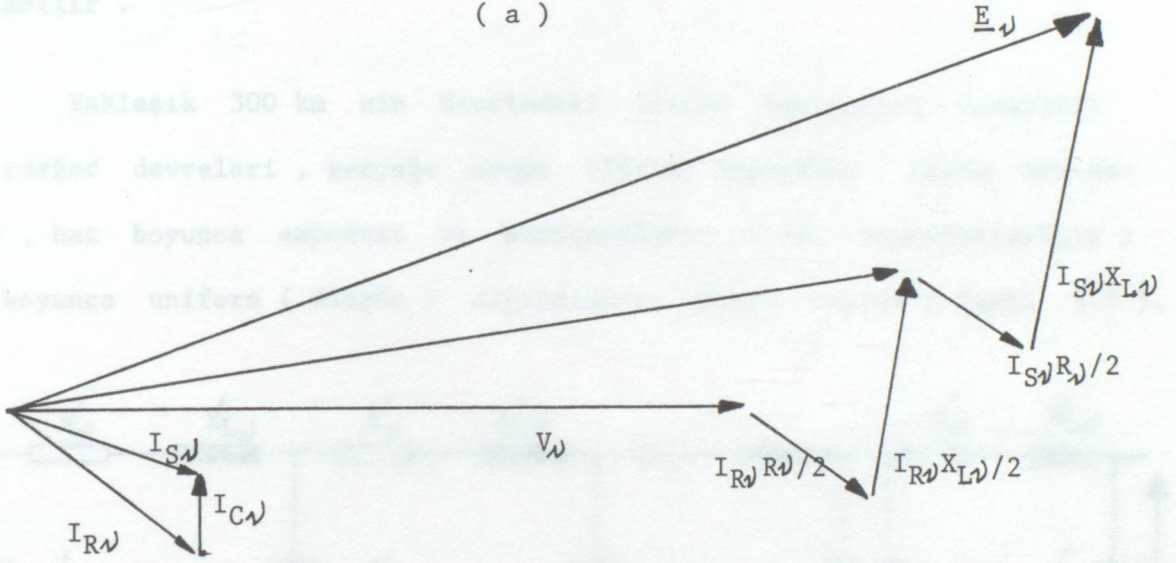


(b)

Şekil 3.3 Orta uzunluktaki bir iletim hattının n . harmonikte tek-diyagramı (a) ve fazör diyagramı (b) .
(Π devresinin kullanıldığı bu devrede , " S " indisi hat başını , " R " indisi ise hat sonunu göstermektedir .)



(a)



(b)

Şekil 3.4 Orta uzunluktaki bir iletim hattının n . harmonikteki tek-hat diyagramı (a) ve fazör diyagramı (b) dir . Burada T _ devresi kullanılmıştır .

Hattın Π modeli için devre denklemleri

$$\underline{I}_{Sn} = \underline{I}_{Cn} + \underline{I}_{Rn}$$

$$\underline{I}_{Rn} = \underline{I}_{Cn} + \underline{I}_{Rn}$$

$$\underline{E}_n = \left(\frac{Z_n Y_n}{2} + 1 \right) \underline{V}_n + Z_n \underline{I}_{Rn}$$

(3.19)

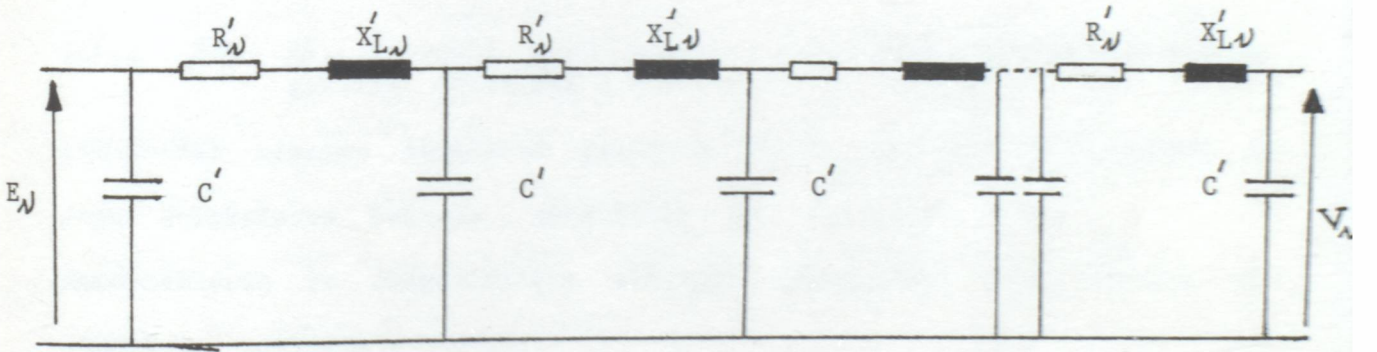
$$\underline{I}_{Sn} = Y_n \left(1 + \frac{Z_n Y_n}{4} \right) \underline{V}_n + \left(1 + \frac{Z_n Y_n}{2} \right) \underline{I}_{Rn}$$

şeklinde sıralanabilir . Aynı denklemler T _ modeli için

$$\begin{aligned} \underline{I}_{S\lambda} &= \underline{I}_{C\lambda} + \underline{I}_{R\lambda} \\ \underline{E}_{\lambda} &= \left(1 + \frac{\underline{Z}_{\lambda} \underline{Y}_{\lambda}}{2} \right) \underline{V}_{\lambda} + \underline{Z}_{\lambda} \left(1 + \frac{\underline{Z}_{\lambda} \underline{Y}_{\lambda}}{2} \right) \underline{I}_{R\lambda} \\ \underline{I}_{S\lambda} &= \underline{Y}_{\lambda} \underline{V}_{\lambda} + \left(1 + \frac{\underline{Z}_{\lambda} \underline{Y}_{\lambda}}{2} \right) \underline{I}_{R\lambda} \end{aligned} \quad (3.20)$$

yazılabilir .

Yaklaşık 300 km nin üzerindeki iletim hatlarının hesapları ve eşdeğer devreleri , gerçeğe uygun olarak öngörülür . Başka bir deyişle , hat boyunca empedans ve admitansların (hat kapasitelerinin) hat boyunca uniform (düzgün) dağıldıkları kabul edilir (Şekil 3.5) .



Şekil 3.5 Uzun bir iletim hattının λ. harmonikte tek-hat diyagramı . (' ile birim uzunluğa ilişkin hat parametreleri gösterilmiştir .)

Söz konusu iletim hattının hat başı gerilimi ve akımı

$$\begin{aligned} \underline{E}_{\lambda} &= \cosh \sqrt{\underline{Z}_{\lambda} \underline{Y}_{\lambda}} * \underline{V}_{\lambda} + \underline{Z}_{C\lambda} * \sinh \sqrt{\underline{Z}_{\lambda} \underline{Y}_{\lambda}} * \underline{I}_{R\lambda} \\ \underline{I}_{S\lambda} &= \frac{\sinh \sqrt{\underline{Z}_{\lambda} \underline{Y}_{\lambda}}}{\underline{Z}_{C\lambda}} \underline{V}_{\lambda} + \cosh \sqrt{\underline{Z}_{\lambda} \underline{Y}_{\lambda}} * \underline{I}_{R\lambda} \end{aligned} \quad (3.21)$$

ve hat sonu gerilimiyle akımı ise

$$\underline{V}_{\mathcal{N}} = \cosh \sqrt{\underline{Z}_{\mathcal{N}} \underline{Y}_{\mathcal{N}}} * \underline{E}_{\mathcal{N}} - \underline{Z}_{C\mathcal{N}} * \sinh \sqrt{\underline{Z}_{\mathcal{N}} \underline{Y}_{\mathcal{N}}} * \underline{I}_{S\mathcal{N}} \quad (3.22)$$

$$\underline{I}_{R\mathcal{N}} = - \frac{\sinh \sqrt{\underline{Z}_{\mathcal{N}} \underline{Y}_{\mathcal{N}}}}{\underline{Z}_{C\mathcal{N}}} \underline{E}_{\mathcal{N}} + \cosh \sqrt{\underline{Z}_{\mathcal{N}} \underline{Y}_{\mathcal{N}}} * \underline{I}_{S\mathcal{N}}$$

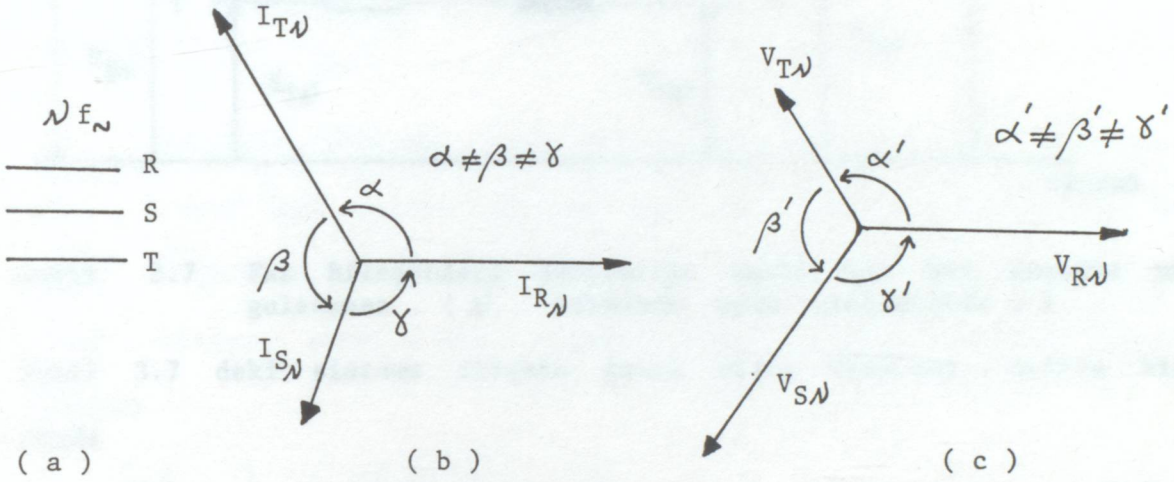
yazılabilir . Burada $\underline{Z}_{C\mathcal{N}}$, \mathcal{N} . harmoniğe ilişkin karakteristik empedans olup

$$\underline{Z}_{C\mathcal{N}} = \sqrt{\underline{Z}_{\mathcal{N}} / \underline{Y}_{\mathcal{N}}} \quad (3.23)$$

şeklindedir .

3.1.2. Dengesiz Yüklenmeye Göre Modelleme

Dengesiz yüklenen enerji sistemlerinde , her faz ; genlik bakımından birbirinden farklı ve faz bakımından da 120° den farklı akımlarla yüklenirler . Şekil 3.6 da dengesiz yüklenen bir şebekeye ilişkin akım ve gerilim fazörleri gösterilmiştir .



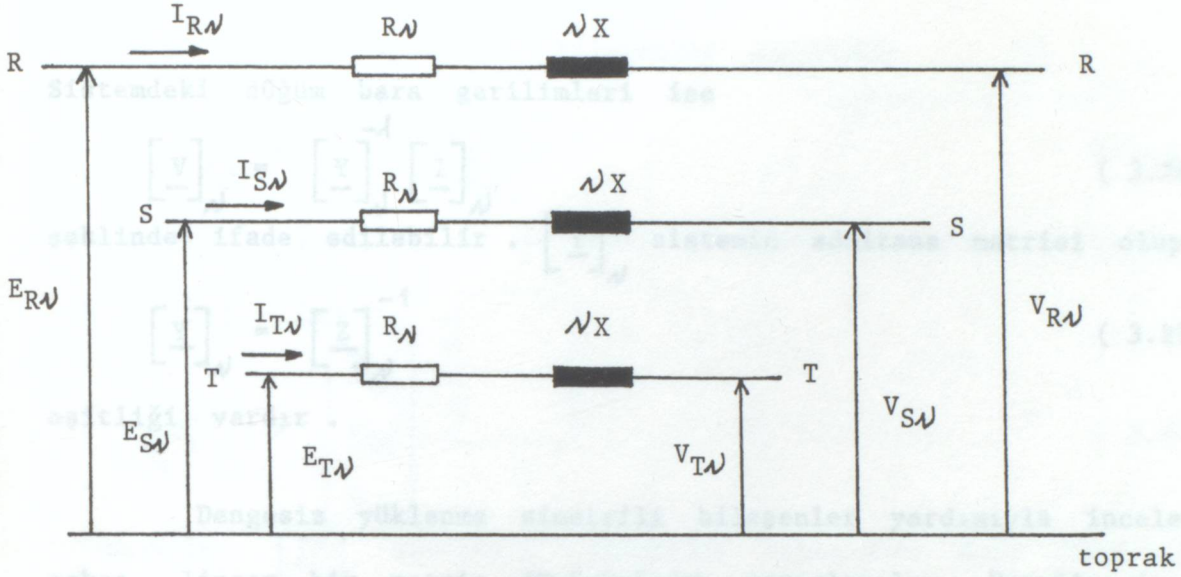
Şekil 3.6 ω . harmonik için şebeke (a) , akım fazörleri (b) ve gerilim fazörleri (c) .

Sinüsoidal olmayan akımların yanısıra bir de dengesiz yüklenmenin olduğu şebekelerin başında , genellikle ark fırınları gelir .

Harmoniklerin ve dengesizliğin birarada gözetilmesi için Fourier dönüşümüyle birlikte :

- Faz Bileşenleri Yöntemi ,
 - Simetrik Bileşenler Yöntemleri
- kullanılabilir .

Bu yöntemlerden " Faz Bileşenleri Yöntemi " , sistemin fiziksel büyüklükleriyle işlem yaparak her faz ile toprak(nötr) hattının ayrı ayrı gözönüne alınmasını öngörür [20 , 21] .



Şekil 3.7 Faz Bileşenleri Yönteminin basit bir hat üzerine uygulanması . (n . harmonik için çizilmiştir .)

Şekil 3.7 deki sisteme ilişkin genel devre denklemi , matris biçiminde

$$\begin{bmatrix} E_{R,S,T} \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} Z \end{bmatrix}_n \begin{bmatrix} I_{R,S,T} \end{bmatrix}_n + \begin{bmatrix} V_{R,S,T} \end{bmatrix}_n \quad (3.24)$$

yazılabilir . Burada $\begin{bmatrix} E_{R,S,T} \end{bmatrix}_n$, $\begin{bmatrix} I_{R,S,T} \end{bmatrix}_n$ ve $\begin{bmatrix} V_{R,S,T} \end{bmatrix}_n$, sırasıyla , n . harmonik için hat başı gerilim vektörünü , akım vektörünü ve hat sonu gerilim vektörünü göstermektedir . (Her biri (3×1) boyutunda sütun matristir .)

$\begin{bmatrix} Z \end{bmatrix}_n$, hattın n . harmoniğe ilişkin empedans matrisi olup

$$\begin{bmatrix} Z \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} Z_{RR} & Z_{RS} & Z_{RT} \\ Z_{SR} & Z_{SS} & Z_{ST} \\ Z_{TR} & Z_{TS} & Z_{TT} \end{bmatrix}_n \quad (3.25)$$

şeklinde ifade edilebilir .

3.26) İfadesi , simetrik bileşenler sisteminde

Sistemdeki düğüm bara gerilimleri ise

$$\begin{bmatrix} \underline{V} \end{bmatrix}_{\mathcal{N}} = \begin{bmatrix} \underline{Y} \end{bmatrix}_{\mathcal{N}}^{-1} \begin{bmatrix} \underline{I} \end{bmatrix}_{\mathcal{N}} \quad (3.26)$$

şeklinde ifade edilebilir . $\begin{bmatrix} \underline{Y} \end{bmatrix}_{\mathcal{N}}$ sistemin admitans matrisi olup

$$\begin{bmatrix} \underline{Y} \end{bmatrix}_{\mathcal{N}} = \begin{bmatrix} \underline{Z} \end{bmatrix}_{\mathcal{N}}^{-1} \quad (3.27)$$

eşitliği vardır .

Dengesiz yüklenme simetrik bileşenler yardımıyla incelenecekse , lineer bir matris dönüşümünden yararlanılır . Örneğin; \mathcal{N} . harmoniğe ilişkin R,S,T faz akımları ile , simetrik bileşen akımları (doğru bileşen akımı , ters bileşen akım ve sıfır bileşen akım) arasında

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{R,S,T}^S \end{bmatrix}_{\mathcal{N}} = \begin{bmatrix} \underline{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{R,S,T} \end{bmatrix}_{\mathcal{N}} \quad (3.28)$$

bağıntısı yazılabilir . " s " üssü , simetrik bileşenleri göstermektedir . $\begin{bmatrix} \underline{T} \end{bmatrix}$ dönüşüm matrisi

$$\begin{bmatrix} \underline{T} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

biçimindedir . \underline{a} ve \underline{a}^2 kompleks operatörler olup

$$\underline{a} = 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j 0.866 \quad (3.30)$$

$$\underline{a}^2 = 1 \angle -120^\circ = -0.5 - j 0.866$$

biçimindedir . Sistemin lineer olduğu varsayımıyla , sistemin her bileşene karşılık düşen Thevenin eşdeğer devreleriyle gösterilmesi mümkündür .

(3.26) ifadesi , simetrik bileşenler cinsinden

$$\begin{bmatrix} \underline{V}^s \\ \underline{I}^s \end{bmatrix}_N = \begin{bmatrix} \underline{Y}^s \end{bmatrix}_N^{-1} \begin{bmatrix} \underline{I}^s \\ \underline{V}^s \end{bmatrix}_N \quad (3.31)$$

yazılabilir . Örneğin; i. baradaki gerilimin simetrik bileşenleri \underline{V}_{1i} , \underline{V}_{2i} , \underline{V}_{0i}

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_i^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{V}_{1i} \\ \underline{V}_{2i} \\ \underline{V}_{0i} \end{bmatrix}_N \quad (3.32)$$

olacaktır . $\begin{bmatrix} \underline{Y}^s \end{bmatrix}$ matrisi , " Simetrik Bileşenler Bara Admitans Matrisi " adını alır [22] . (" 1 " indisi doğru bileşeni , " 2 " indisi ters bileşeni ve " 0 " indisi sıfır bileşeni göstermektedir .)

i. ve j. düğüm noktaları arasında akan harmonik akımı (\underline{I}_{ij}) için

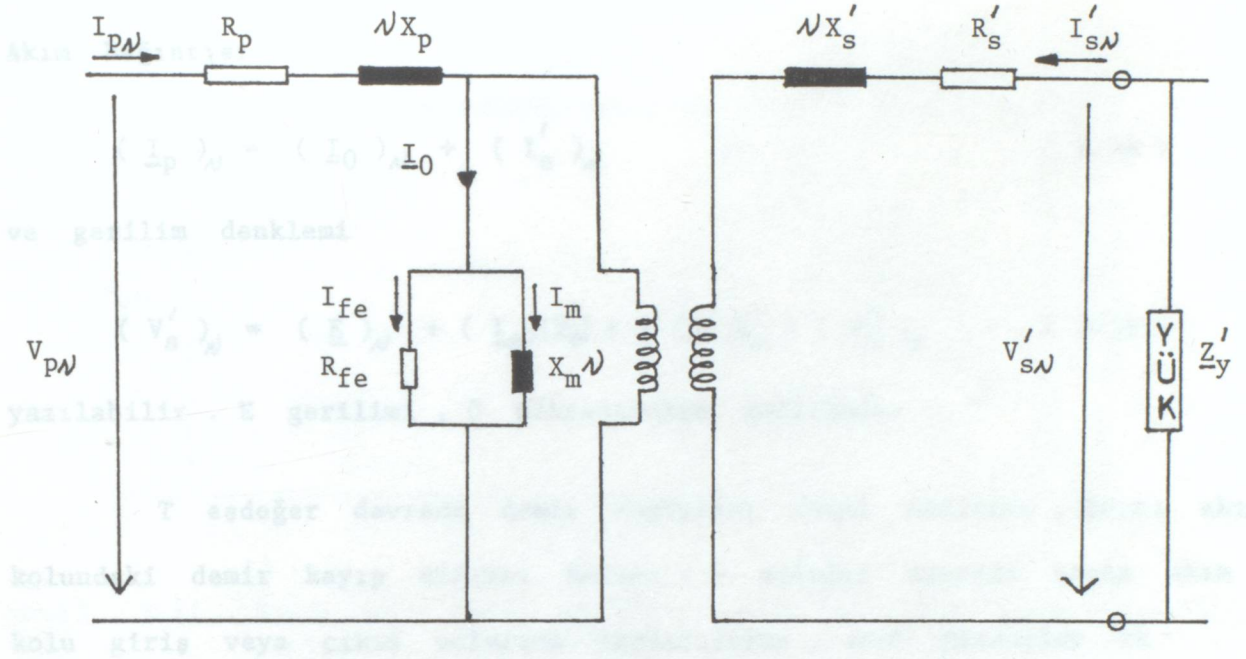
$$\left(\underline{I}_{ij} \right)_N = \begin{bmatrix} \frac{\underline{V}_i - \underline{V}_j}{\underline{Z}_{ij}} \end{bmatrix}_N \quad (3.33)$$

yazılabilir . \underline{V}_i ve \underline{V}_j , düğüm noktalarının gerilimleri ve \underline{Z}_{ij} i-j hattının empedansıdır .

3.2. Transformatörlerin Harmonik Bağımlı Modeli

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

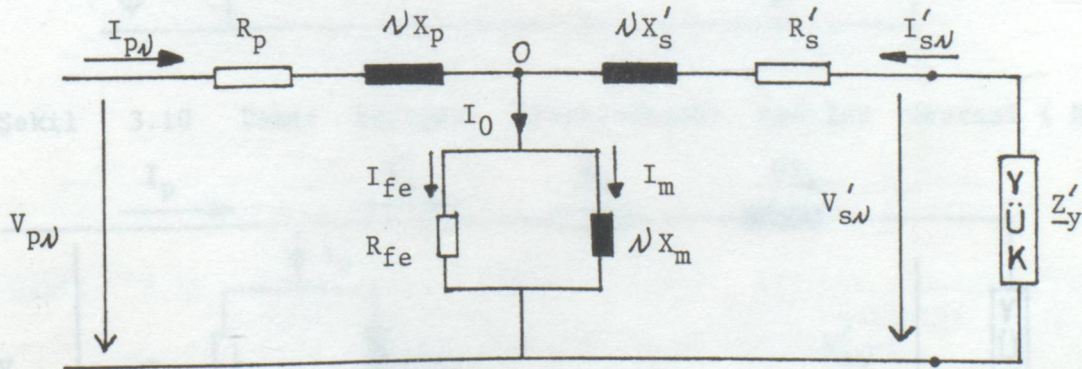
İdeal transformatörün primer ve sekonder sargılarında sarım sayıları ve endüklenen kaynak gerilimleri eşit olduğundan , eşdeğer devrenin iki tarafı birbirine bağlanabilir .



Şekil 3.8 N . harmonik için ayrı kaçak akılı eşdeğer devre

Şekil 3.8 de " p " indisi primeri ve " s " indisi sekonderi göstermektedir . R sargı direnci ve X kaçak reaktanstır . R_{fe} demir kayıplarına karşılık düşen direnç ve X_m mıknatıslanma reaktansıdır . " ' " ile , primere indirgenmiş büyüklükler gösterilmiştir . (I_0 , boşa çalışma akımıdır .)

İdeal transformatörün kalkması ile , transformatörün " T eşdeğer devresi " kullanılabilir . (Şekil 3.9) .



Şekil 3.9 Transformatörün T eşdeğer devresi . (N . harmonik için çizilmiştir .)

Akım bağıntısı

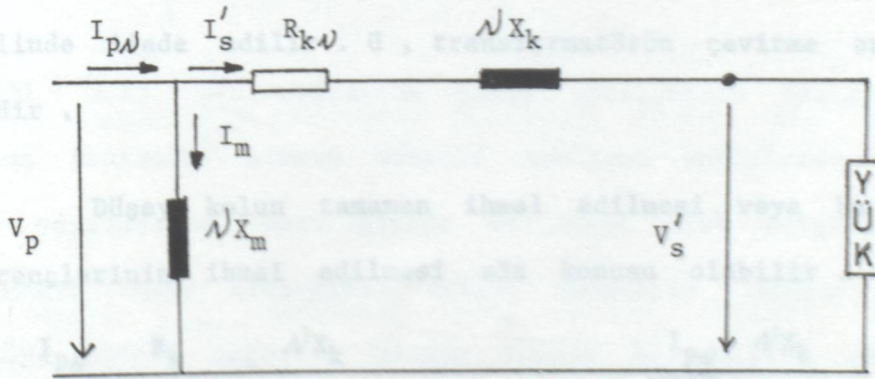
$$(\underline{I}_p)_{\omega} = (\underline{I}_0)_{\omega} + (\underline{I}'_s)_{\omega} \quad (3.34)$$

ve gerilim denklemi

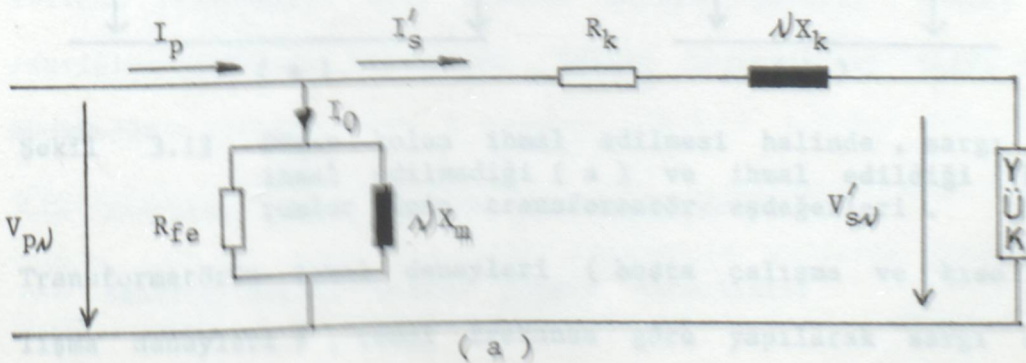
$$(\underline{V}'_s)_{\omega} = (\underline{E})_{\omega} + (\underline{I}_s)(R'_s) + j(\omega X'_s)(\underline{I}'_s)_{\omega} \quad (3.35)$$

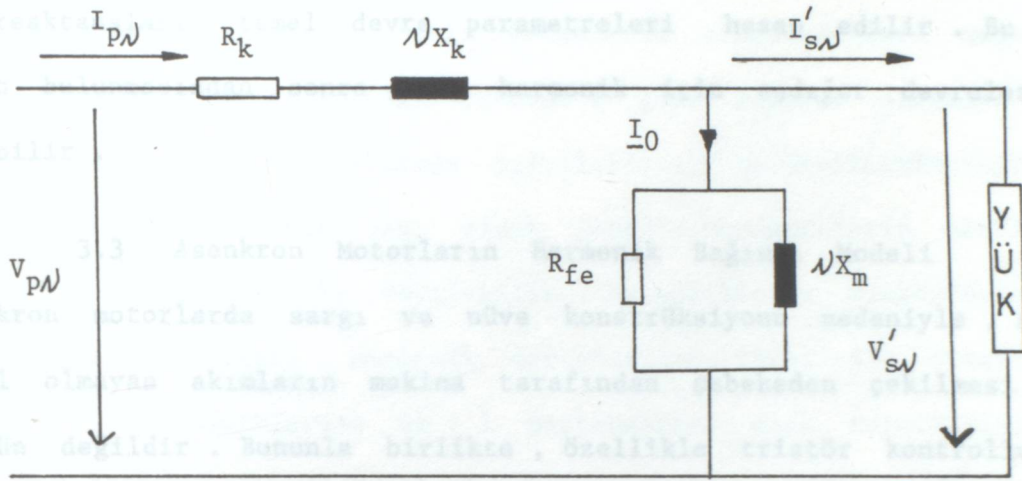
yazılabilir . E gerilimi , 0 noktasındaki gerilimdir .

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



Şekil 3.10 Demir kayıpsız transformatör eşdeğer devresi ($R_{fe} \rightarrow \infty$)





(b)

Şekil 3.11 Boşta akım kolu girişte (a) ve çıkış uçlarında (b) toplanmış halde transformatörün L eşdeğer devresi .

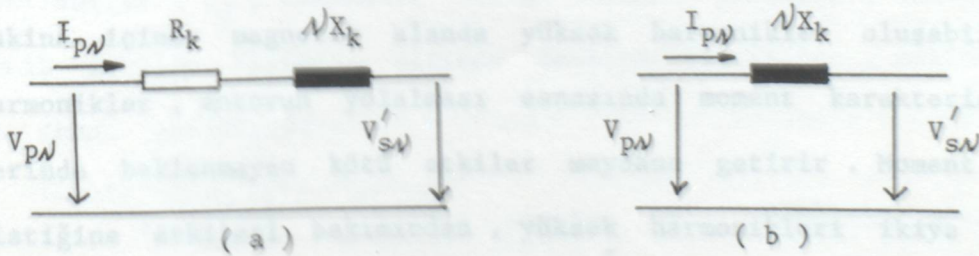
R_k ve X_k , kısa devre büyüklükleri olup

$$R_k = R_p + \dot{u}^2 R'_s \quad (3.36)$$

$$X_k = X_p + \dot{u}^2 X'_s$$

şeklinde ifade edilir . \dot{u} , transformatörün çevirme oranını göstermektedir .

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



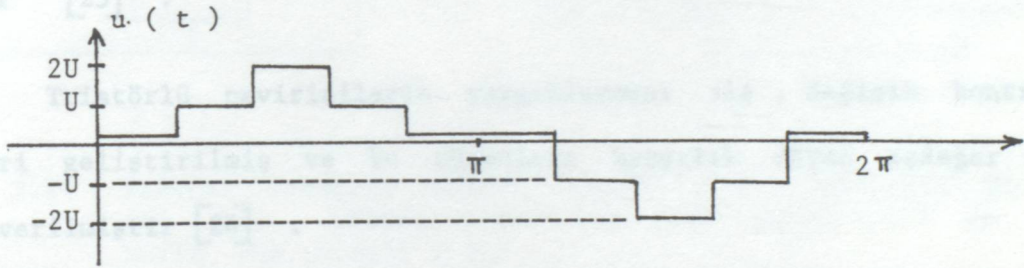
Şekil 3.12 Düşey kolun ihmal edilmesi halinde , sargı direnci ihmal edilmediği (a) ve ihmal edildiği (b) durumlar için transformatör eşdeğerleri .

Transformatörün temel deneyleri (boşta çalışma ve kısa devre çalışma deneyleri) , temel frekansa göre yapılarak sargı dirençleri

ve reaktansları temel devre parametreleri hesap edilir . Bu değerlerin bulunmasından sonra , . harmonik için eşdeğer devreler verilebilir .

3.3 Asenkron Motorların Harmonik Bağımlı Modeli

Asenkron motorlarda sargı ve nüve konstrüksiyonu nedeniyle , sinüsoidal olmayan akımların makina tarafından şebekeden çekilmesi pek mümkün değildir . Bununla birlikte , özellikle tristör kontrollü hız kontrol düzenleri üzerinden beslenen motorlarda uç gerilimleri harmonik içerebilir . Şekil 3.13 de asenkron motorların beslendiği evirici çıkış gerilimi gösterilmiştir .



Şekil 3.13 Bir eviricide çıkış geriliminin değişimi .

Bunun yanısıra , sincap kafesli asenkron motorlarda sargı bobinlerinin yapılışından bazı stator ve rotor oluk sargılarında , magnetik doymadan , hava aralığının imalat nedeniyle düzgün yapılamamasından makina içinde magnetik alanda yüksek harmonikler oluşabilir . Bu harmonikler , motorun yolalması esnasında moment karakteristiği üzerinde beklenmeyen kötü etkiler meydana getirir . Moment karakteristiğine etkileri bakımından , yüksek harmonikleri ikiye ayırmak mümkündür :

— Asenkron moment üreten yüksek harmonikler

— Senkron moment üreten yüksek harmonikler

Genel olarak üç fazlı sargıların oluşturdukları magnetomotor kuvvetler hava aralığı çevresine göre Fourier serisine açıldığında, temel bileşen yanında 5,7,11,13,... harmoniklerin olduğu görülür. k pozitif bir sayı olmak üzere, harmoniklerin mertebesi $(6k + 1)$ bağıntısı ile verilebilir. Harmoniklerin oluşturduğu döner alanların hızları, harmonik mertebesinin tersi ile orantılıdır. Üstelik bu harmoniklerden $6k + 1$ mertebesinde olan harmoniklerin $(\nu = 1,7,13,19,...)$ ürettikleri döner alanlar, bileşke döner alan ile aynı yönde; $6k - 1$ mertebesinde olanların $(\nu = 5,11,17,...)$ ürettiği döner alanlar ise bileşke döner alana göre ters yönde dönerler [23].

Tristörlü çeviricilerin yaygınlaşması ile, değişik kontrol düzenleri geliştirilmiş ve bu düzenlere karşılık düşen eşdeğer devreler verilmiştir [24].

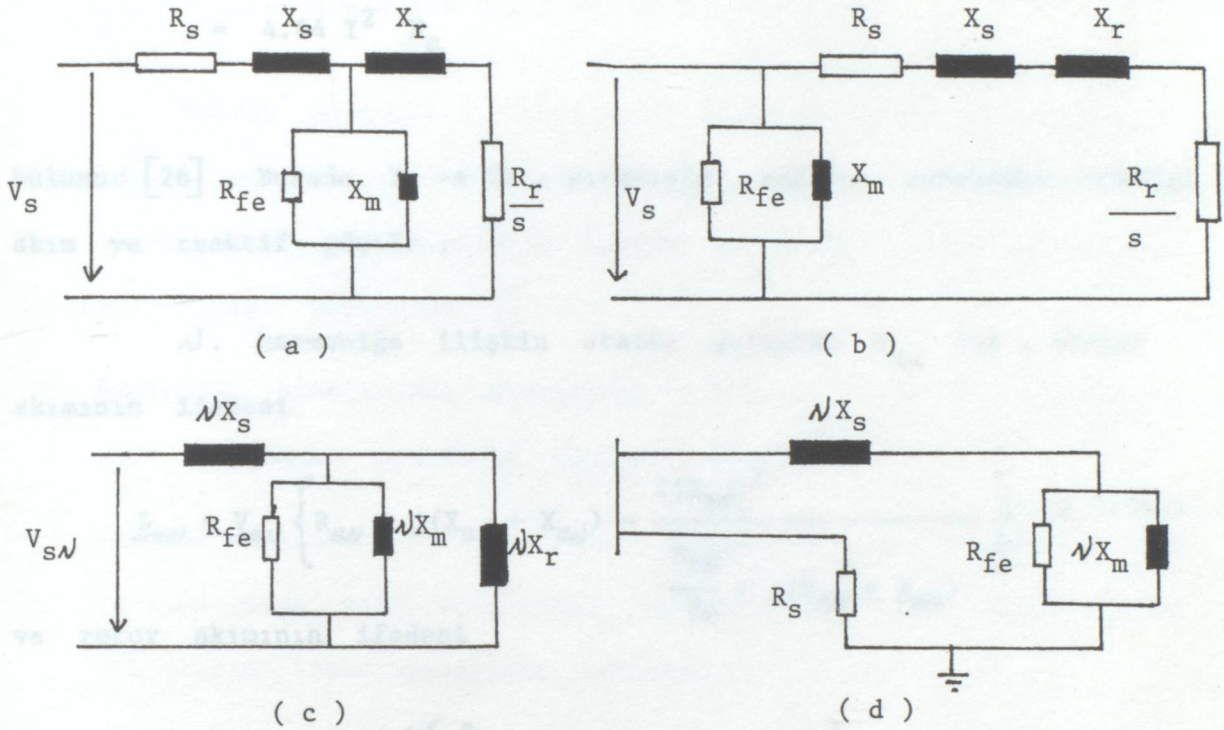
"s" indisi statoru, "r" indisi rotoru ve ($'$) statora indirgenmiş rotor büyüklüklerini göstermek üzere, akım denklemi

$$(\underline{I}_0)_{\nu} = (\underline{I}_s)_{\nu} - (\underline{I}'_r)_{\nu} \quad (3.37)$$

yazılabilir. \underline{I}_0 , makinanın boşa çalışma akımıdır. Burada ν , harmonik gerilim bileşeni altında denklem yazılırken, makinadaki doyma ihmal edilmiştir.

Berg [25], şebekeye paralel bağlı asenkron motorların belirli bir frekans için (örneğin; 60 Hz) eşdeğer bir model ile gösterilebileceğini öne sürmüştür. Bu modellemeye göre, ele alınan baraya paralel bağlı bir şönt empedansla gösterim mümkün olabilmektedir. Şekil 3.14 de bir asenkron motor için öngörülen eşdeğer

devreler verilmiştir [26] .



Şekil 3.14 Eşdeğer asenkron makina modeli (a) , yaklaşık model (b) , yüksek frekanslar için model (c) ve basit yük modeli (d) .

Frekans arttıkça (harmoniklerin etkinliği arttıkça) makinanın kayması (s) artar . Öte yandan , yüksek frekanslarda stator ve rotor kaçak reaktanslarını yaklaşık olarak eşit almak büyük bir hataya yol açmaz . Bu anda X_m reaktansı için $X_m \approx 35 X_s$ bağıntısı yazılabilir [26] .

Asenkron motorun (örneğin ; 60 Hz frekansta) şebekeden çekeceği reaktif güç (Q) ifadesi

$$\begin{aligned} \frac{Q}{3} &= I^2 X_s + (0.3 I)^2 X_m + (0.7 I)^2 X_r \\ &= I^2 X_s + (0.3 I)^2 35 X_s + (0.7 I)^2 X_s \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned}
 &= I^2 X_S (1 + 3.15 + 0.49) \\
 &= 4.64 I^2 X_S
 \end{aligned} \tag{3.38}$$

bulunur [26]. Burada I ve Q , sırasıyla, motorun şebekeden çektiği akım ve reaktif güçtür.

ν . harmoniğe ilişkin stator gerilimi $V_{s\nu}$ ise, stator akımının ifadesi

$$\underline{I}_{s\nu} = \underline{V}_{s\nu} \left\{ R_{s\nu} + j(X_{s\nu} + X_{m\nu}) - \frac{(jX_{m\nu})^2}{\frac{R_{r\nu}}{S_\nu} + j(X_{r\nu} + X_{m\nu})} \right\} \tag{3.39}$$

ve rotor akımının ifadesi

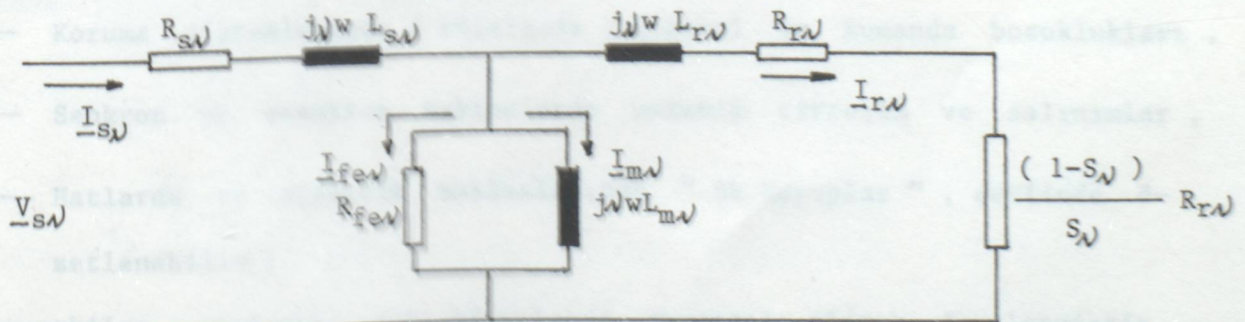
$$\underline{I}_{r\nu} = j X_{m\nu} I_{s\nu} / \left\{ \frac{R_{r\nu}}{S_\nu} + j (X_{r\nu} + X_{m\nu}) \right\} \tag{3.40}$$

yazılabilir. S_ν , ν . harmoniğe ilişkin kayma olup,

$$S_\nu = (\nu \omega_s - \omega_r) / \nu \omega_s = \left\{ \nu \mp (1 - S_1) \right\} / \nu \tag{3.41}$$

şeklinindedir. Senkron hızda $S_1 = 0$ olup, $s_\nu = (\nu \mp 1) / \nu$ dir. Burada (+) işaret esas alana göre geriden dönen harmonikler; (-) işaret ise ileri yönde dönen harmonikler için kullanılacaktır.

ν . harmonik için en genel eşdeğer devre Şekil 3.15 de verildi.



Şekil 3.15 ν . harmonik için asenkron motorun genel eşdeğer devresi.

B Ö L Ü M 4. H A R M O N İ K L E R İ N E N E R J İ S İ S T E M L E R İ Ü Z E R İ N D E K İ E T K İ L E R İ

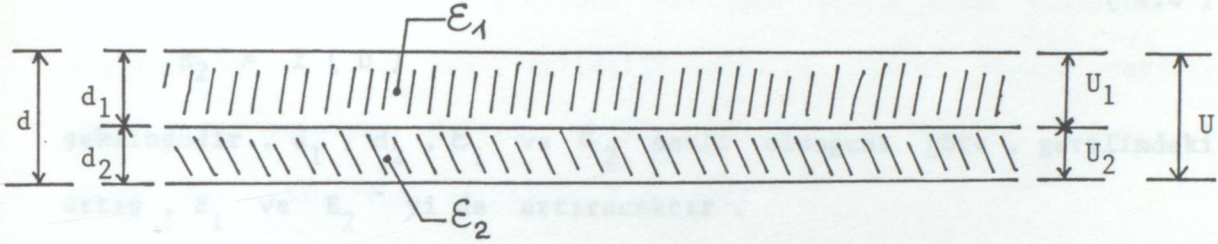
Enerji sistemleri üzerindeki harmonik etkinliği değişik yönlerden incelenebilir . Yaklaşık 50 yılı aşkın bir süredir yapılan araştırmalar , bu etkilerin aşağıdaki biçimde sınıflandırılabilceğini ortaya koymuştur [2] :

- Kapasitör bloklarında dielektrik delinmesi veya aşırı reaktif güç yüklenmesi nedeniyle oluşan arızalar ,
- Uzaktan kumanda , yük kontrolü , ölçme vb. gibi fonksiyonlarda bozulma veya hata oranlarının artması , ev tipi tüketicilerde cihazların fonksiyonlarında bozukluklar ,
- Elektrik makinalarında ısınmanın artması ,
- Hatlarda ek gerilim düşümleri ,
- Şebekedeki harmoniklere bağlı olarak sistemde aşırı gerilim ve akımların oluşması (rezonans olayları) ,
- Kabloların yalıtım hatlarında izolasyon bozulması ,
- Haberleşme tesislerinde gürültü ve parazitler ,
- Endüktif sayaçlarda okuma ve kayıt hataları ,
- Koruma sistemlerinde (rölelerde) kontrol ve kumanda bozuklukları ,
- Senkron ve asenkron makinalarda mekanik titreşim ve salınımlar ,
- Hatlarda ve elektrik makinalarında " Ek Kayıplar " , şeklinde özetlenebilir .

Bu etkiler , aşağıdaki alt bölümlerde ayrıntılı olarak incelenmiştir .

4.1. Harmoniklerin Dielektrik Dayanımı Üzerindeki Etkileri

İki tabakalı bir dielektriğin kesiti Şekil 4.1 de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 İki tabakalı bir dielektrik (U_1 ve U_2 tabaka gerilimleri , d_1 ve d_2 tabaka kalınlıkları , ϵ_1 ve ϵ_2 tabakaların ϵ permittiviteleri) .

Dielektriğe uygulanan gerilim U ve tabakaların kapasiteleri C_1 ve C_2 olmak üzere , tabakalara düşen gerilimler

$$U_1 = U \frac{C_2}{C_1 + C_2} \quad (4.1)$$

$$U_2 = U \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

olacaktır . Diğer taraftan tabakaların dielektrik dayanımları E_1 ve E_2

$$E_1 = \frac{U_1}{d_1} \quad (4.2)$$

$$E_2 = \frac{U_2}{d_2}$$

veya permittiviteler cinsinden

$$E_1 = \frac{U}{d_1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} d_2} \quad (4.3)$$

$$E_2 = \frac{U}{d_2 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} d_1}$$

yazılabilir .

Görüldüğü gibi dielektrik dayanımları , uygulanan uç geriliminin birer fonksiyonudur . Bir başka deyişle

$$E_1 = f (U) \quad (4.4)$$

$$E_2 = f (U)$$

şeklindedir . d_1 , d_2 , ϵ_1 ve ϵ_2 sabit olduğuna göre , gerilimdeki artış , E_1 ve E_2 yi de artıracaktır .

Uygulanan gerilimin harmonik içermesi durumunda , harmonik bileşenleri U_2 , U_3 , ... , U_n olmak üzere , gerilimin efektif değeri

$$U = \left[(U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2) \right]^{1/2} \quad (4.5)$$
$$= \sum_{\nu=1}^n \sqrt{U_\nu^2}$$

yazılabilir . 0 halde (4.3) ifadesindeki alan şiddetleri

$$E_1 = \frac{1}{d_1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} d_2} \sum_{\nu=1}^n U_\nu^2 \quad (4.6)$$

$$E_2 = \frac{1}{d_2 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} d_1} \sum_{\nu=1}^n U_\nu^2$$

şekline dönüşecektir . Elektrik alan şiddetlerindeki artış (ΔE) için

$$\Delta E = \alpha \sum_{\nu=2}^n U_\nu^2 \quad (4.7)$$

orantısı yazılabilir .

4.2. Harmoniklerin Ölçme İşlemleri Üzerindeki Etkileri

Akım ve gerilimler , çoğunlukla efektif değerleriyle (RMS___root mean square) verilir . Bu büyüklükler döner demirli ölçü aletleriy-

le (\bar{u}) ölçülürler . Dalga şeklinden bağımsız olarak , bu tip a-
letler efektif (etkin) değer gösterirler .

Örneğin ; bir doğrultucu devrenin doğru akım yanındaki
değer gösterirler . Değişken akım ve gerilim ölçmelerinde ise , öl-
gerilim ve akımlar ise , aritmetik ortalama değer olarak verirler .
Genellikle ortalama değerler küçük harfler ve üzerine koyulan bir
çizgi ile sembolize edilirler (\bar{u} gibi) .

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot dt \quad (4.8)$$

Aritmetik ortalama değerlerin ölçümü için döner bobinli ölçü alet-
leri (Δ) kullanılır . Bu aletler , ölçü büyüklüğünün ortalama değe-
rini gösterirler .

Bir doğrultulmuş değeri ölçmek için , değişken ölçü büyüklüğü , ölçü
doğrultucu devresinden geçirilir ve döner bobinli ölçü aleti ile
ölçülür . Efektif değer ile doğrultulmuş değer arasındaki bağıntı
" şekil katsayısı — f " ile verilir .

$$f = \frac{\text{Efektif değer}}{\text{Doğrultulmuş ortalama değer}} \quad (4.9)$$

Değişken bileşenleri karakterize edebilmek için aşağıdaki kavramlar
kullanılır :

Dalgalılık (distorsiyon) katsayısı (W_u)

$$W_u = \frac{\text{Değişken gerilim bileşeninin efektif değeri}}{\text{Doğru gerilim bileşeninin ortalama değeri}} \quad (4.10)$$

ve dalgalılık genliği . (W_{ss})

$$W_{ss} = \frac{\text{Maksimum değer} - \text{Minimum değer}}{\text{Ortalama değer}} \quad (4.11)$$

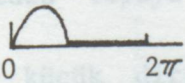
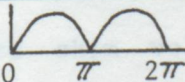
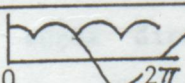
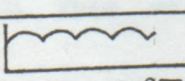
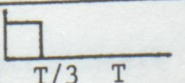
Laboratuarlarda üniversal ölçü aletleri geniş uygulama alanı bulur . Bu aletler doğru akım ve doğru gerilim ölçme bölgelerinde normal döner bobinli aletler olarak çalışır ve ortalama değer gösterirler . Değişken akım ve gerilim bölgelerinde ise , ölçü büyüklüğü bir ölçü doğrultucu devresinden geçer . Aletin göstergesi de doğrultulmuş değer gösterir . Zamana göre sinüsoidal olarak değişen elektriksel büyüklükler için şekil katsayısı $f = 1.11$ dir . Bu değer , skalanın ölçeklenmesinde kullanılır . Eğer sinüsoidal olmayan akım ya da gerilim için şekil katsayısı biliniyor ise , ölçü aletinden okunan hatalı değerden " doğru " efektif değer hesap edilebilir [27] .

$$\text{" doğru " efektif değer} = \frac{\text{Skaladan okunan değer}}{1.11} * f \quad (4.12)$$

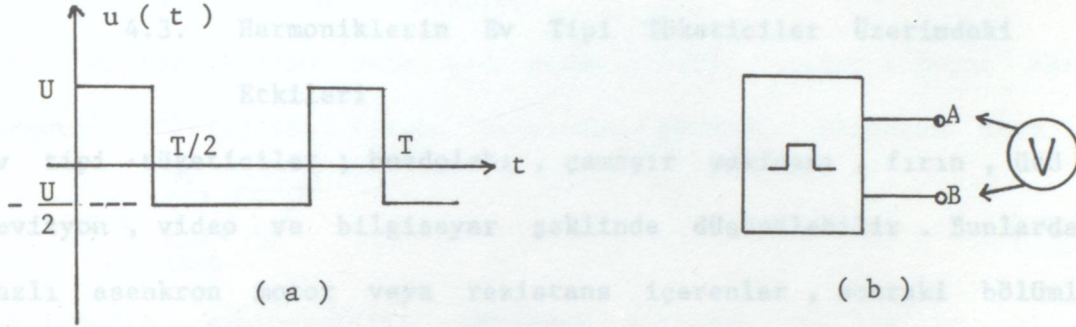
Dalga şekline bağlı olarak f , W_u , W_{ss} değerleri , Tablo 4.1 de verilmiştir [27] .

Tablo 4.1

Dalga şekline bağlı olarak f , W_u , W_{ss} büyüklükleri

Dalga Şekli	f	W_u [%]	W_{ss} [%]
	1.57	244	3.14
	1.11	48	1.57
	1.015	18.3	0.427
	1	4.2	0.07
	1.73	82	3

Örneğin ; Şekil 4.2 de verilen sinüsoidal olmayan bir dal-
nın A — B uçlarından ölçülmesi gündeme gelse , çeşitli seçenekler
sıralanabilir . Böyle bir dalga için 11 seçenek sıralanmış ve ölçü
aletlerinden okunacak değerlere işaret edilmiştir [28] .



Şekil 4.2 Gözönüne alınan dalganın biçimi (a) ve ölçü noktaları A — B (b)

Ölçü aletleri ve gösterecekleri skala değerleri aşağıda sıralanmıştır :

- Döner demirli voltmetre → 0
- Sinüsoidal akım için efektif değere göre ölçeklenmiş olan doğrultuculu voltmetre → $1.11 * \text{Ortalama değer}$
- Pozitif kutbu A noktasına bağlı tepe değer voltmetresi → $+ U$
- Pozitif kutbu B noktasına bağlı tepe değer voltmetresi → $+ U/2$
- Tepeden tepeye ölçen voltmetre → $U + \frac{U}{2} = 1.5 U$
- Çok küçük dirençli tek yönlü doğrultucu ile seri bağlı bir doğru akım voltmetresi → $U/3$
- Çok küçük dirençli çift yönlü doğrultucu ile seri bağlı bir doğru akım voltmetresi → $(2/3) U$
- Döner demirli voltmetre → Efektif değer
- Elektrodinamik voltmetre → 0

— Elektrostatik voltmetre —→ 0

— Termik voltmetre —→ 0

şeklindedir . Harmoniklerin Elektrik Makinalarının Isınması

Üzerindeki Etkileri

4.3. Harmoniklerin Ev Tipi Tüketiciler Üzerindeki

Sargı dirençlerinden skim geçtiğinde , ısıya isinir . Geçen skim , Etkileri

harmonik içeriyorsa , isinme açısından şüphesiz alınacak skim

Ev tipi tüketimciler ; buzdolabı , çamaşır makinası , fırın , ütü , te-

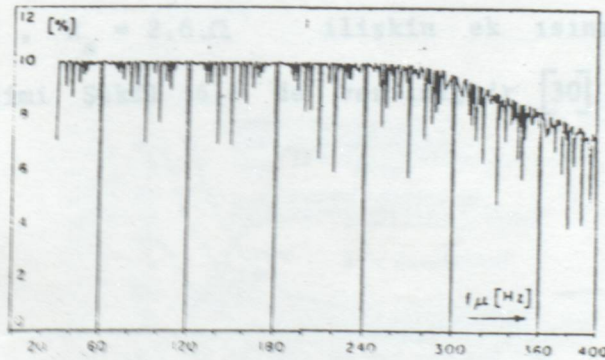
levizyon , video ve bilgisayar şeklinde düşünülebilir . Bunlardan , bir

fazlı asenkron motor veya rezistans içerenler , sonraki bölümlerde

şeklindedir . Aynı şekilde , şüphesiz alınacak grilim

harmonik etkinliği açısından incelenecektir .

Bu alt bölümde , özellikle hassas elektronik parçaları içeren televizyonlar üzerindeki harmonik etkinliğinden söz edilecektir . Şekil 4.3 de harmonik içeren bir uç geriliminin değişimi gösterilmiştir [29] .



Şekil 4.3 30 ile 400 Hz lik frekans aralığında değişim gösteren bir uç geriliminde genlik salınımları .

Yapılan gözlemler , gerilim harmoniklerinin televizyon cihazlarında resim büyümesi - küçülmesine ve görüntü bozukluklarına yol açtığını göstermektedir [29] . Televizyon alıcılarına benzer şekilde

elektronik katları bulunan video ve bilgisayar gibi cihazların da , harmoniklerden olumsuz şekilde etkilenecekleri söylenebilir .

4.4 Harmoniklerin Elektrik Makinalarının Isınması Üzerindeki Etkileri

Sargı dirençlerinden akım geçtiğinde , sargı ısınır . Geçen akım , harmonik içeriyorsa , ısınma açısından gözönüne alınacak akım

$$I = \sum_{\nu=1}^n \sqrt{I_{\nu}^2} \quad (4.13)$$

şeklindedir . Aynı şekilde , gözönüne alınacak gerilim

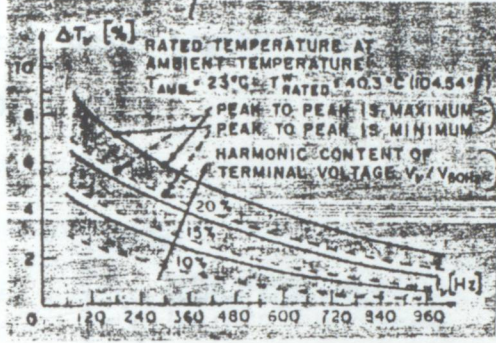
$$U = \sum_{\nu=1}^n \sqrt{U_{\nu}^2} \quad (4.14)$$

olmalıdır . Yapılan araştırmalar ve ölçümler , harmonik frekansı art-
tıkça , harmoniklerden ötürü ortaya çıkan sıcaklık artışının (ΔT_{ν})
azaldığını göstermektedir [30] .

Tek fazlı bir transformatöre 150 VA , 230/115 A , 50/60 Hz ,
 $R_p = 1.6 \Omega$, $R_s = 2.6 \Omega$ ilişkin ek ısınmanın harmonik frekansa
göre değişimi Şekil 4.4 de verilmiştir [30] .

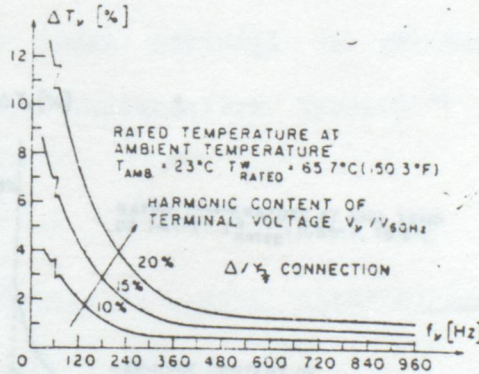
Şekil 4.4 Bir fazlı transformatörlerin harmoniklerin etkisiyle oluşan ΔT_j ek sıcaklık artışının harmonik frekansına göre değişimi — $\Delta/\frac{1}{2}$ değeri için (a) ve $\frac{1}{2}/\frac{1}{2}$ bağlantı için (b) için .

Şekil 4.5 Bir fazlı transformatörlerin harmoniklerin etkisiyle oluşan ΔT_j ek sıcaklık artışının harmonik frekansına göre değişimi — $\Delta/\frac{1}{2}$ değeri için (a) ve $\frac{1}{2}/\frac{1}{2}$ bağlantı için (b) için .



Şekil 4.4 Harmoniklerin etkisiyle ek sıcaklık artışının harmonik frekanslara (f_v) göre değişimi . (ölçme işlemi , bir termokupl ile gerçekleştirilmiştir.)

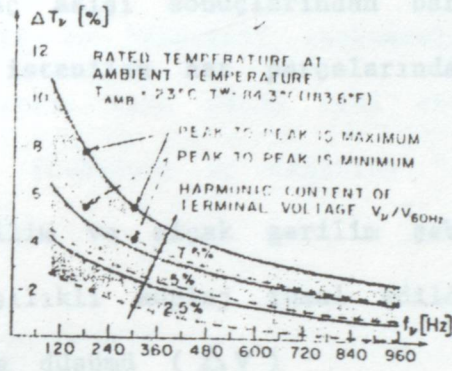
ΔT_v değişimi , üç fazlı transformatörlerde sargıların bağlantı biçimine ve toprakla bağlantısına (Δ/g gibi) göre farklılık oluşturur (Şekil 4.5) .



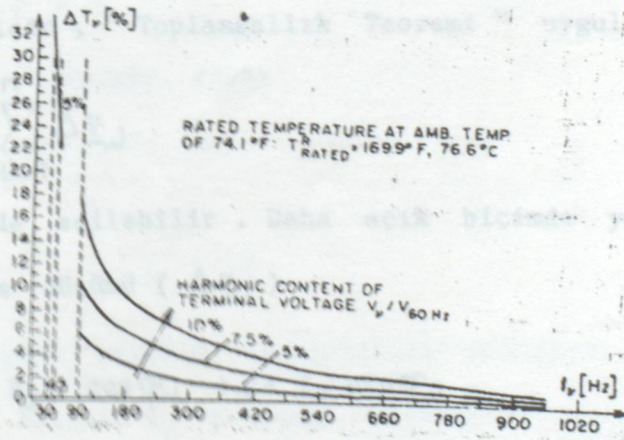
Şekil 4.5 Üç fazlı transformatörlerde harmoniklerin etkisiyle oluşan ΔT_v ek sıcaklık artışının harmonik frekanslara göre değişimi Δ/g bağlantısı (a) ve g/g bağlantı (b) için .

Benzer şekilde , asenkron motorların stator ve rotor kısım-

larında da ek sıcaklık artışları oluşur . Örneğin ; 2 HP , 60 Hz , 1725 d/dak , 200 V , 7.1 A etiket değerli üç fazlı sincap kafesli bir motor için ilgili değişimler Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 de verilmiştir [30] .



Şekil 4.6 Tam yük altında stator sargılarındaki ek sıcaklık değişimi .



Şekil 4.7 Sincap kafes çubuklarında ek sıcaklık değişimi (Tam yük altında ölçülmüştür) .

4.5 Harmoniklerin Gerilim Düşümleri Üzerindeki Etkileri
Karmaşık enerji sistemleri üzerindeki gerilim düşümleri , uç (bara) gerilimlerinin hesabına indirgenmiş olur . Harmonik içeren enerji sistemlerinde de , benzer şekilde , Newton - Raphson Yönteminin değişik bir algoritması olarak " Harmonik Güç Akışı " [31], [32] kullanılır . Söz konusu güç akışı sonuçlarından bara (uç) gerilimleri hesaplandığı için , istenilen hat parçalarındaki gerilim düşümleri de bulunabilir .

Orta gerilim ve alçak gerilim şebekelerinde , çoğunlukla , fazlar arası karşılıklı kuplaj ihmal edildiği için , hat üzerindeki toplam gerilim düşümü ($\Delta \underline{V}$)

$$\Delta \underline{V} = \Delta V + j \mathcal{S} U \quad (4.15)$$

yazılabilir . Burada , ΔV " boyuna gerilim düşümü " ve $\mathcal{S} U$ ise " enine gerilim düşümü " adını alır . Çoğu şebeke hesabında enine gerilim düşümünün ($\mathcal{S} U$) ihmalî yoluna gidilir .

Karşılıklı kuplaj ihmal edildiği ve şebekenin lineer kabul edildiği durum için , " Toplamsallık Teoremi " uygulanabilir . Buna göre

$$\Delta \underline{V} = \sum_{\mathcal{N}=1}^n \Delta \underline{V}_{\mathcal{N}} \quad (4.16)$$

şeklinde ifade edilebilir . Daha açık biçimde yazılırsa , \mathcal{N} . boyunca gerilim düşümü ($\Delta V_{\mathcal{N}}$)

$$\Delta V_{\mathcal{N}} = R_{\mathcal{N}} I \cos \varphi_{\mathcal{N}} + \mathcal{N} X I_{\mathcal{N}} \sin \varphi_{\mathcal{N}} \quad (4.17)$$

ve \mathcal{N} . enine gerilim düşümü ($\mathcal{S} V_{\mathcal{N}}$)

$$\mathcal{S} V_{\mathcal{N}} = \mathcal{N} X I_{\mathcal{N}} \cos \varphi_{\mathcal{N}} - R I_{\mathcal{N}} \sin \varphi_{\mathcal{N}} \quad (4.18)$$

yazılabilir . Bu ifadelerde ; R hattın omik direnci , X hattın reak-

tansı , φ_n n . harmoniğe ilişkin güç açısı , I_n n . harmoniğe ilişkin faz akımı ve n harmonik mertebesidir . (4.23)

4.6 Harmoniklerin Rezonans Olayları Üzerindeki Etkileri
Bir şebekede frekansa göre , devre ya endüktif ya da kapasitif karakter taşır . Frekansın belirli bir değerinde (örneğin ; $\omega_r = n\omega$ değerinde) endüktif ve kapasitif reaktanslar birbirine eşit olurlar ve bunlar birbirlerine ters yönde etki ettiklerinden bunların toplamı sıfır olur . Frekansın bu değerine " Rezonans Frekansı " adı verilir . Bu durumda (4.24)

$$\omega_r C - \frac{1}{\omega_r L} = 0 \quad (4.19)$$

veya

$$\omega_r = n\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.20)$$

bulunur . Öte yandan devrenin " öz frekansı ω_0 " olarak

$$\omega_0 = \omega \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (4.21)$$

olup , buradan rezonans şartı

$$\omega_r = \omega_0 \quad (4.22)$$

bulunur . (4.23)

Şebekede gerilim harmonikleri bulunuyor ise , bu harmonik frekanslardan birisi ω_r rezonans frekansına eşit olduğunda rezonans baş gösterir . Elektrik enerji sistemlerinde omik dirençler , endüktif reaktanslara göre çok küçüktür . O bakımdan

harmoninin gerilim oranı λ ise , bunun meydana getirdiği aşırı akımın kondansatör akımı I_r ,

$$I_r = \frac{U}{R} \quad (4.23)$$

şeklinde rezonans akımı çok büyük değerler alır . Elektrik tesislerinde seri rezonans devrelerinin öz frekansları 150 — 700 Hz arasındadır . Yüksek harmonik mertebeleri de yaklaşık bu civardadır ($\lambda = 3 - 15$) .

Yüksek harmonikle rezonans halinde kondansatör akımı

$$I_{cr} = \frac{U_{\lambda r}}{\sqrt{3} R} \quad (4.24)$$

dir . Burada U_r , rezonansa yol açan λ . harmonik geriliminin efektif değeri olup

$$U_{\lambda} = a_{\lambda} U_N \quad (4.25)$$

şeklinde dir . U_N , nominal (temel bileşen) gerilimidir .

Eğer I_N nominal kondansatör akımının oluşturduğu gerilim düşümü % olarak

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{3} I_N R}{U_N} \cdot 100 \quad (4.26)$$

ise , λ . harmonikteki kondansatör akımı

$$I_{\lambda} = 100 \cdot \frac{a_{\lambda}}{\varepsilon} I_N \quad (4.27)$$

olacaktır . $a_{\lambda} / \varepsilon$ oranı 1 'den çok büyüktür .

Diğer taraftan şebeke geriliminde yüksek harmoniklerin bulunması halinde , tam rezonans olmasa dahi , öz frekanstan farklı her harmonik küçük bir aşırı akım meydana getirir . Örneğin ; λ .

harmoniğin gerilim oranı % a_N ise , bunun meydana getirdiği aşırı kondansatör akımı bileşeni

$$I_{cN} = \frac{a_N U_N}{\sqrt{3} \sqrt{R^2 + X^2}} \quad (4.28)$$

dir . Öz frekanstan farklı diğer harmonikler için kondansatörün akımları (4.28) 'e göre hesaplanırsa , toplam kondansatör akımı

$$I_c = \sqrt{\sum_{N=1}^n I_{cN}^2} \quad (4.29)$$

olacaktır .

4.7 Harmoniklerin Enerji Sistemlerindeki Bozucu Etkileri

Literatürde , harmoniklerle ilgili olarak bir " Telefon Etkileşim Faktörü — T I F " tanımlanmıştır [33] .

$$T I F = \frac{\left[\sum_{f=5kHz}^{f=60Hz} (W_f * A_f) \right]^{1/2}}{A_t} \quad (4.30)$$

Burada :

A_t : Efektif akımı ,

A_f : Tek frekanslı efektif akımı ,

W_f : Tek frekansı

göstermektedir .

Tablo 4.2

Telefon Etkileşim Fatörü Değerleri [33] .

Harmonik	f (Hz)	T I F	Harmonik	f (Hz)	T I F
1	60	0.5	29	1740	7580
3	18	38	31	1860	8000
5	300	225	33	1980	8520
7	420	650	35	2100	9040
9	540	1320	37	2220	9560
11	660	2260	39	2340	10100
13	780	3220	41	2460	10560
15	900	4200	43	2580	10850
17	1020	5100	45	2700	11100
19	1140	5630	47	2820	11300
21	1260	6020	49	2940	11400
23	1380	6370	51	3060	10800
25	1500	6680	53	3180	10000
27	1620	7140			

4.8 Harmoniklerin Sayaçlar Üzerindeki Etkileri

Endüksiyon tipi sayaçlarda , sayaç diskine etki eden ortalama kuvvet

$$\bar{F} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (4.31)$$

şeklinde yazılabilir . Sözkonusu kuvvet , gerilimin karesiyle orantılı olduğundan ,

$$(\Delta \text{ okuma})_{\mathcal{N}} = \left(\frac{V_{\mathcal{N}}}{V_1} \right)^2 \left(\frac{\cos^2 \beta_{\mathcal{N}} R_{D1}}{\cos^2 \beta_1 R_{D\mathcal{N}}} \right) \frac{k_{m1}}{k_{m\mathcal{N}}} \quad (4.32)$$

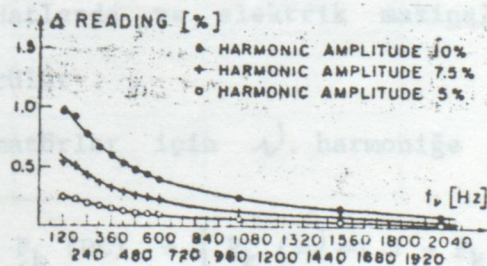
şeklinde verilebilir [29] .

Burada R_{D1} ve $R_{D\mathcal{N}}$, diskin omik direncinin temel frekans ve \mathcal{N} frekans için değerleridir .

$$\beta_1 = \tan^{-1} (\omega_1 L_{D1} / R_{D1}) \quad (4.33)$$

$$\beta_{\mathcal{N}} = \tan^{-1} (\omega_{\mathcal{N}} L_{D1} / R_{D\mathcal{N}})$$

şeklinde tanımlanmıştır . L_D , diskin endüktansdır . k_{m1} ve $k_{m\mathcal{N}}$, saç yapısıyla ilgili olarak 1. ve \mathcal{N} . bileşene ilişkin katsayı-
lardır .



Şekil 4.8 Harmoniklerin etkisiyle oluşan kayıt (okuma) hatasının değişimi [29] .

4.9 / Harmoniklerin Koruyucu Röleler Üzerindeki Etkileri
Aşırı akım prensibine göre çalışan koruyucu rölelerde , harmonik-
ler olumsuz etki yapar . Ayar akımı , koruma alanı değişikliğe uğ-
rar . Ayrıca rölelerin bağlandığı ölçü transformatörlerinin çevirme
Ornak transformatöre ilişkin harmonik kayıpları
oranı , hata oranı üzerinde hata payları artar .

Koruyucu röleler üzerinde harmoniklerin etkinliğini araştıran araş-
tıran çeşitli çalışmalar mevcuttur [34] .

4.10 Harmoniklerin Oluşturdukları Ek Kayıpları

4.10.1. Ek I^2R Kayıpları

Harmonik içeren bir enerji sisteminde , akımın (4.13) ile veri-
len ifadesi gereği , ek I^2R kayıpları ΔP_{ek}

$$\Delta P_{ek} = \sum_{\nu=2}^n R I_{\nu}^2 \quad (4.34)$$

şeklinde ifade edilebilir . \sum , faz sayısıdır .

(4.33) ile verilen ifade , omik direnç içeren hat ,
kablo , transformatör sargısı (transformatörün yükte kayıpları) ve
motor sargısı (transformatörün yükte - bakır kayıpları) gibi eleman-
lara aynen uygulanabilir . Buradaki R omik direnci , alternatif a-
kım direncidir . Hatlarda ve elektrik makinalarında değişik ortam
sıcaklıkları öngörülür .

Örneğin ; transformatörler için ν . harmoniğe ilişkin kayıplar $R_{k\nu}$,

$$P_k(\nu) = P_k(DC) + [P_k(\nu=1) - P_k(DC)] \cdot \nu^2 \quad (4.35)$$

olarak ifade edilebilir [35] .

$P_k(DC)$, doğru akım direncinde oluşan kayıpları göstermektedir .

7200 / 240 V , 10 kVA değerli tek fazlı bir transformatör için , ölçüm sonuçları Tablo 7.3 de verilmiştir [36] .

Tablo 7.3

Örnek transformatöre ilişkin harmonik kayıpları

γ	$P_k(\gamma)$ W
1	9.14
3	9.26
5	9.5
7	9.9
9	10.3
11	11.0
13	11.6
15	12.3
17	13.1
19	14.2
21	15.2
23	16.3
25	17.5

Burada 4.10.2. Ek Demir Kayıpları ve 2. periyodu göstermektedir.

Bilindiği gibi demir kayıpları . histerizis ve eddy - akım kayıplarından oluşur . Bu kayıplar birim demir nüve için (W / kg olarak) verilir [19] :

$$W_h = \sigma_h \cdot f \cdot B_m^x \quad (4.36)$$

$$W_e = \sigma_e \cdot f^2 \cdot t^2 \cdot B^2$$

Burada t , f , B_m ve B , sırasıyla , malzemenin kalınlığını , akımın frekansını , magnetik alanın tepe ve efektif değerlerini göstermektedir . S , akının kestiği nüve yüzeyi olmak üzere

$$k_h = \sigma_h \cdot f/S \quad (4.37)$$

$$k_e = \sigma_e \cdot f^2 \cdot t^2/S \quad (4.43)$$

dönüşümü yapılırsa , histerizis kayıpları (W_h) ve eddy - akım kayıpları (W_e)

$$W_h = k_h \cdot \phi_m \quad (4.38)$$

$$W_e = k_e \cdot \phi^2$$

şeklini alır . k_h ve k_e , makina sabitleri olup , kaynak frekansıyla ilgilidir .

Sinüsoidal dalganın değişimi değişimlerini verecektir .

$$V(t) = \hat{V} \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \quad (4.39)$$

olmak üzere , makinada endüklenen akı

$$\phi_m = \frac{\hat{V}T}{2} \sin \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \quad (4.40)$$

yazılabilir . (Doyma ihmal edilmiştir .)

Burada \hat{V} maksimum genlik değerini ve T periyodu göstermektedir .

Böylece

$$W_h = k_h \cdot \frac{\hat{V}T}{2\pi} \quad (4.41)$$

$$W_e = k_e \cdot \left(\frac{\hat{V}T}{2\pi} \right)^2$$

bulunur . Gerilim için efektif değer kullanılacak olursa

$$W_h = k_h \cdot \frac{VT}{\sqrt{2}\pi} \quad (4.42)$$

$$W_e = k_e = k_e \cdot \left(\frac{VT}{\sqrt{2}\pi} \right)^2$$

yazılır . Burada

$$\hat{V} = \sqrt{2} \cdot V \quad (4.43)$$

dir .

(') sinüsoidal olmayan dalgaya ilişkin büyüklükleri göstermek üzere

$$\frac{W_h'}{W_h} \quad \text{ve} \quad \frac{W_e'}{W_e}$$

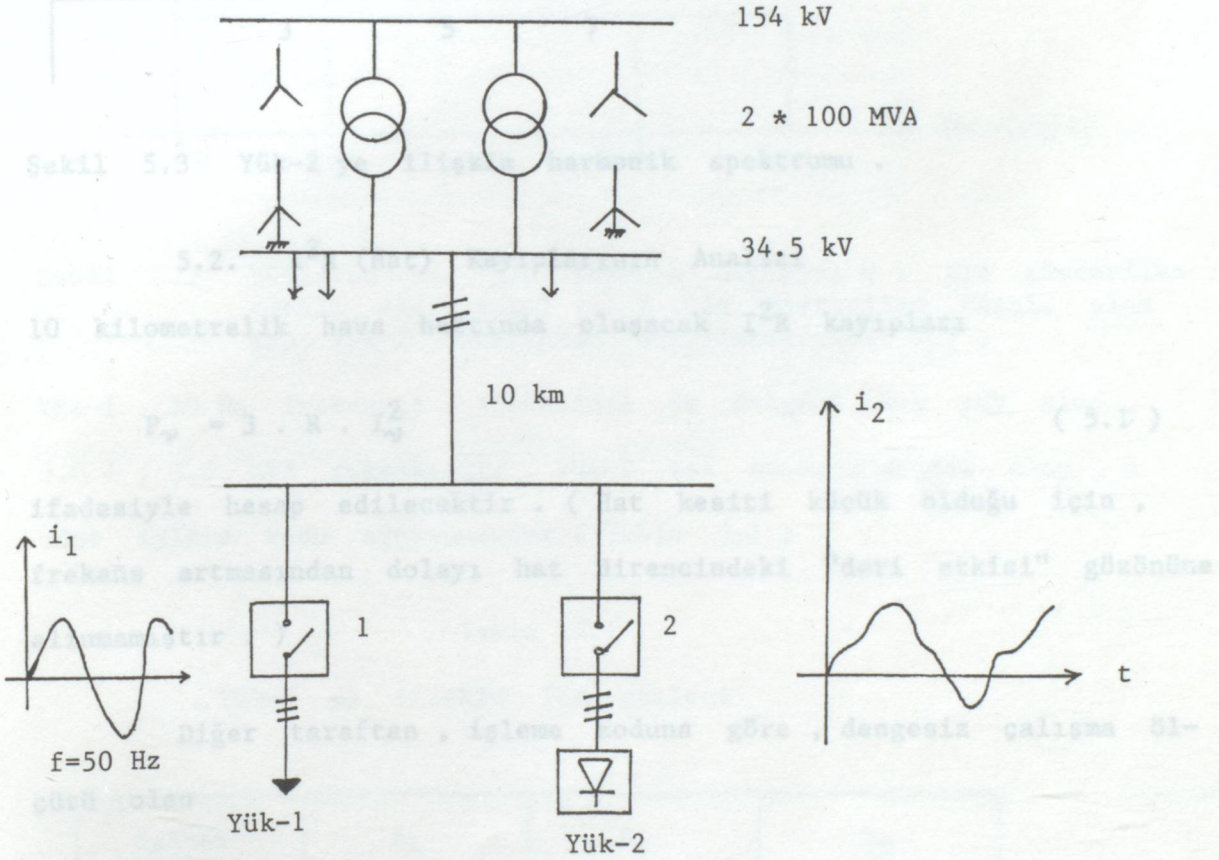
oranları , harmoniklerdeki kayıpların değişimlerini verecektir .

W_h' ve W_e' , ilgili dalgaların değişimlerinden elde edilir [37] .

B Ö L Ü M 5. S A Y I S A L U Y G U L A M A

5.1. Genel Açıklama ve Veriler

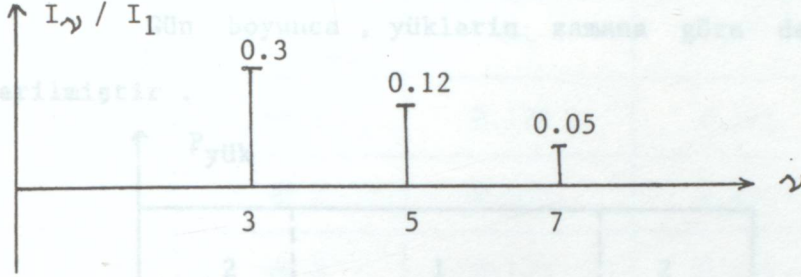
Harmoniklerin etkinliğini sayısal olarak ifade etmek üzere ,
Şekil 5.1 de verilen örnek enerji sistemi gözönüne alınmıştır .



Şekil 5.1 Gözönüne alınan örnek enerji sistemi (Yüklere ilişkin akımların zamana göre değişimleri ile verilmiştir) .

Şekil 5.1 den de görüleceği gibi , Yük-1 sinüsoidal , Yük-2 ise non-sinüsoidal akım çekmektedir . Hat uzunluğu 10 km olup , 3 fazlı hava hattı ile 34.5 kV luk barayı yük barasına bağlamaktadır . Yükle-
rin bağlı olduğu noktada , 15 kV ve 0.4 kV luk alt gerilim kade-
melerine düşürücü , indirici transformatörler mevcuttur . (Bunlar ,
tek hat diyagramında gösterilmemiştir .) Hat , 3*Swallow iletkenen

Her işleme kodu için geçerli olan harmonik spektrumu Şekil 5.3 de verilmiştir .



Şekil 5.3 Yük-2 ye ilişkin harmonik spektrumu .

5.2. I²R (Hat) Kayıplarının Analizi

10 kilometrelik hava hattında oluşacak I²R kayıpları

$$P_n = 3 \cdot R \cdot I_n^2 \quad (5.1)$$

ifadesiyle hesap edilecektir . (Hat kesiti küçük olduğu için , frekans artmasından dolayı hat direncindeki "deri etkisi" gözönüne alınmamıştır .)

Diğer taraftan , işleme koduna göre , dengesiz çalışma ölçütü olan

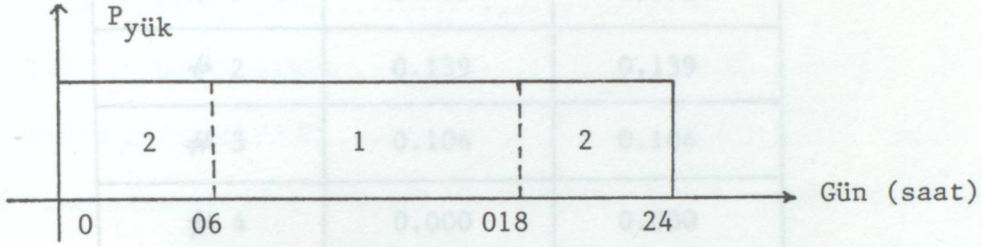
$$\alpha = I_- / I_+ \quad \text{ve} \quad \beta = I_0 / I_+ \quad (5.2)$$

değerleri hesap edilmiş ve Tablo 5.2 de verilmiştir . (I₊ , I₋ ve I₀ , sırasıyla , akımın doğru , ters ve sıfır simetrik bileşenleridir .)

İşleme Kodu	S _g (MVA / faz)	S _g (MVA / faz)	S _g (MVA / faz)
#1	1.52 + j 0.76	2.48 + j 1.24	2.0 + j 1.0
#3	1.64 + j 0.82	2.36 + j 1.18	2.0 + j 1.0
#4	2.0 + j 1.0	2.0 + j 1.0	2.0 + j 1.0

(Swallow : Toplam kesit = 31.14 mm^2 ; toplam iletken çapı = 7.14 mm ;
ortalama direnç = $1.2 \Omega/\text{km}$) .

Gün boyunca , yüklerin zamana göre değişimi Şekil 5.2 de verilmiştir .



Şekil 5.2 Yüklerin bir gün boyunca değişimi (1 ile gösterilen taralı alan Yük-1 ; ; ; 2 ile gösterilen taralı alan ise Yük-2 tarafından karşılanmaktadır .) .

Yük-1 , 50 Hz frekanslı , sinüsoidal ve dengeli bir yük olup ,
 $6.0 + j 3.0 \text{ MVA}$ çekmektedir . Yük-2 ise non-sinüsoidal olup , 4
adet işleme kodu sözkonusudur (Tablo 5.1) .

Tablo 5.1

Yük-2 ye ilişkin faz güçleri

İşleme kodu	S_R (MVA / faz)	S_S (MVA / faz)	S_T (MVA / faz)
# 1	$1.4 + j 0.7$	$2.6 + j 1.3$	$2.0 + j 1.0$
# 2	$1.52 + j 0.76$	$2.48 + j 1.24$	$2.0 + j 1.0$
# 3	$1.64 + j 0.82$	$2.36 + j 1.18$	$2.0 + j 1.0$
# 4	$2.0 + j 1.0$	$2.0 + j 1.0$	$2.0 + j 1.0$

Tablo 5.2

Akımın simetrik bileşenlerinin değerleri

İşleme kodu	α	β
# 1	0.173	0.173
# 2	0.139	0.139
# 3	0.104	0.104
# 4	0.000	0.000

Temel bileşen akımı

$$I_1 = \frac{S_1}{\sqrt{3} U} \quad (5.3)$$

ifadesiyle bulunmuş ve harmonik akımları

$$\begin{aligned} I_3 &= 0.3 I_1 \\ I_5 &= 0.12 I_1 \\ I_7 &= 0.05 I_1 \quad \text{dir.} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Sistem lineer olarak kabul edilebileceğinden , " Toplamsallık Teoremi " uygulanmıştır .

Hat kayıplarına ilişkin hesap sonuçları Tablo 5.3 de verilmiştir .

Y Ü K	Hat kayıpları kW
Yük-1(sinüsoidal)	451.6
Yük-2(non-sinüsoidal)	
# 1	529.8
# 2	519.2
# 3	510.7
# 4	499.8

5.3. Demir Kayıplarının Analizi

Bir üç fazlı asenkron motorun beslendiği eviricinin çıkış gerilimi

$$0 < \omega t < \pi/6 \dots\dots\dots 0$$

$$\pi/6 < \omega t < 5\pi/6 \dots\dots\dots U$$

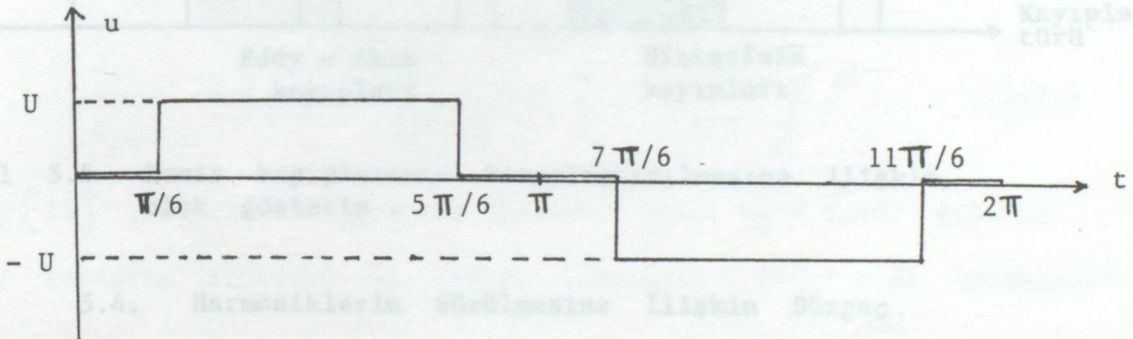
$$5\pi/6 < \omega t < 7\pi/6 \dots\dots\dots 0$$

$$7\pi/6 < \omega t < 11\pi/6 \dots\dots\dots -U$$

$$11\pi/6 < \omega t < 2\pi \dots\dots\dots 0$$

olarak tanımlanmaktadır . Temel bileşenin % 7.5 undan daha küçük harmonikleri ihmal ederek , makinanın demir kayıplarındaki harmoniklerin etkinliği incelenecektir .

Şekil 5.4 de gerilim dalgasının zamana göre değişimi verilir.



Şekil 5.4 Eviricinin çıkış geriliminin değişimi .

Söz konusu dalga'nın Fourier açımında , sabit terim ve sinüslü terimler bulunmamaktadır (dalga biçimi gereği) .

Buna göre

$$b_{\nu} = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \cdot \sin(\nu \omega t) \cdot d(\omega t) \quad (5.5)$$

bağıntısı kullanılarak

$$b_{\nu} = \frac{U}{\pi \nu} \left(\cos \nu \frac{\pi}{6} - \cos \nu \frac{5\pi}{6} + \cos \nu \frac{11\pi}{6} - \cos \nu \frac{7\pi}{6} \right)$$

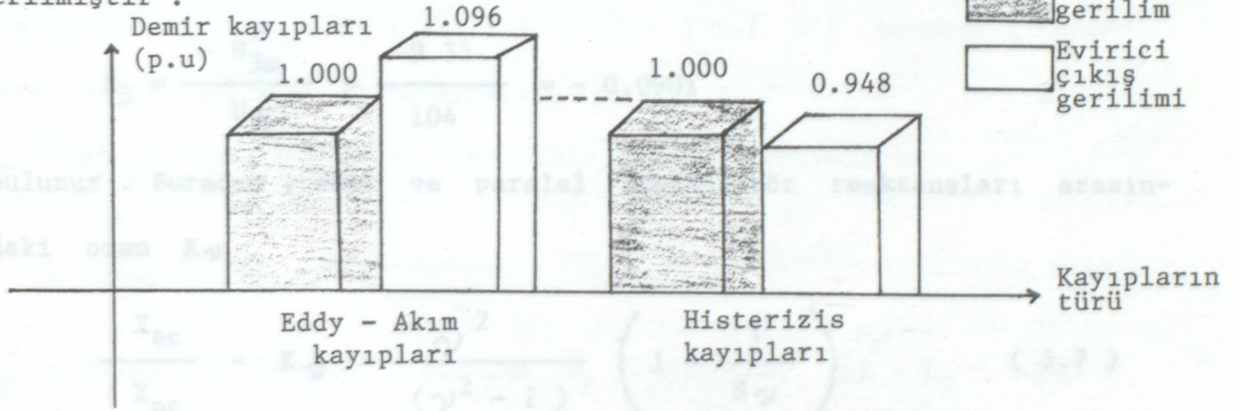
bağıntısı elde edilir . Buradan , gerilimin efektif değeri

$$b_1 = 1.1 U \quad , \quad b_5 = - 0.22 U \quad , \quad b_7 = - 0.158 U$$
$$b_{11} = 0.10 U \quad , \quad b_{13} = 0.085 U \quad , \quad b_{17} = - 0.065 U$$

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} U^2 \cdot dt + \int_{7\pi/6}^{11\pi/6} (-U)^2 \cdot dt} \quad (5.6)$$

ifadesinden $U_{\text{eff}} = 0.816 U$ elde edilir .

Sinüsoidal haldeki demir kayıpları ile , verilen evirici gerilimine ilişkin demir kayıplarının karşılaştırılması Şekil 5.5 de verilmiştir .

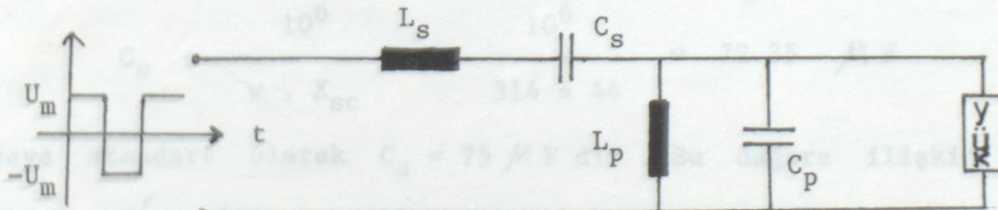


Şekil 5.5 Demir kayıplarının karşılaştırılmasına ilişkin blok gösterim .

5.4. Harmoniklerin Süzülmesine İlişkin Süzgeç

Devre (Filtre) Tasarımı

Bu altbölümde , Şekil 5.6 da gösterilen filtre devresine ilişkin parametre tasarımı (L_s , L_p , C_s , C_p) yapılmıştır .



Şekil 5.6 Filtre devresi (" p " indisi paralel , " s " indisi seri eleman göstermektedir .) .

Efektif değeri 220 V olan bir kare dalga gerilimin , Fourier açılımı sonucu bulunacak 3. harmoniği 104 V tur . Bu değerin , dalga

tepe değerinin % 3 ünü aşmaması koşulu altında , filtre parametreleri elde edilmiştir .

3. harmonik için verilen maksimum değer

$$U'_{3m} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{100} \cdot 3 = 9.33 \text{ V}$$

dur . Üçüncü harmonik için $\nu = 3$ olup , buna karşılık düşen filtre faktörü (-) işaretli olacaktır [38] . 0 halde , filtre faktörü S_3

$$S_3 = \frac{-U'_{3m}}{U_{3m}} = \frac{-9.33}{104} = -0.0901$$

bulunur . Buradan , seri ve paralel kondansatör reaktansları arasındaki oran K_ν

$$\frac{X_{sc}}{X_{pc}} = K_\nu = \frac{\nu^2}{(\nu^2 - 1)} \left(1 - \frac{1}{S_\nu} \right) \quad (5.7)$$

olup [38] , sayısal değerlerle $\nu \rightarrow 3$ için $K_3 = 1.702$ bulunur .

Seri kapasite akımının 5A olduğu kabulüyle (220 V - 5A kondansatör)

$$X_{sc} = \frac{220}{5} = 44 \Omega$$

bulunur . Kapasitenin değeri de

$$C_s = \frac{10^6}{\omega \cdot X_{sc}} = \frac{10^6}{314 \cdot 44} = 72.35 \mu F$$

veya standart olarak $C_s = 75 \mu F$ dir . Bu değere ilişkin yeni reaktans X'_{sc} ise

$$X'_{sc} = \frac{1}{\omega \cdot C'_s} = \frac{10^6}{314 \cdot 75} = 42.2 \Omega$$

bulunur . Rezonans koşulu

$$\frac{1}{\omega \cdot C'_{sc}} = X_{sL} \quad (5.8)$$

den $L_s = 42.4 / 314 = 0.1348$ H elde edilir .

Ayrıca

$$X_{pc} = \frac{X_{sc}}{K_3} \quad (5.9)$$

koşulundan $C_p = C_s \cdot K_3 = 72.35 * 1.702 = 123.2 \mu F$ bulunur . (Standart değer $125 \mu F$ alınabilir .)

$C_p = 125 \mu F$ kullanılarak rezonans koşulu uygulanırsa

$$X'_{pc} = X_{pL} = \frac{1}{\omega \cdot C'_p} \quad (5.10)$$

$X'_{pc} = 25.45 \Omega$ bulunur . Buradan L_p endüktansı ise , $L_p = 0.081$ H olacaktır .

S O N U Ç V E Ö N E R İ L E R

Son yıllarda yaygınlaşan yarı - iletken elemanların etkili ve geniş kullanımı sonucu , harmoniklerin oluşacağı ve bu bileşenlerin enerji sistemleri üzerinde olumsuz etkileri olacağı açıktır.

Bu çalışmada enerji sistemlerinin başlıca harmonik kaynakları incelenmiş , harmonikleri analiz etmeye yönelik çeşitli yöntemler ve harmoniklerin etkinliği altındaki tesis elemanlarının modellenmesi verilmiştir . (Bölüm 2,3 ve 4) . Harmoniklerin enerji sistemleri üzerindeki teknik ve ekonomik etkileri , çeşitli yönlerden ayrıntılı olarak incelenmiştir . Hatların , transformatörlerin ve asenkron motorların harmonik bileşenlere göre eşdeğer devreleri çıkarılmış , ilgili devre denklemleri verilmiştir . (Şekil 3.2 , 3.3 , 3.4 , 3.7 , 3.8 , 3.9 , 3.10 , 3.11 , 3.12 , 3.14 ;;;; Denklemler (3.17) (3.18) , (3.19) , (3.20) , (3.21) , (3.22) , (3.23) , (3.24) , (3.25) , (3.28) , (3.31) , (3.32) , (3.34) , (3.35) , (3.36)) .

Son bölümde verilen bir sayısal uygulama ile , harmoniklerin kayıplar (veya işletme) açısından etkinliği vurgulanmıştır . Burada bir karşılaştırma olanağı doğması için , sinüsoidal ve non-sinüsoidal yükler için yaklaşık aynı güçler seçilmiş , ve dengesiz yüklenme halinde de her işleme kodu için şebekeden çekilen güç aynı tutulmuştur . (Tablo 5.1 , Şekil 5.1,5.2,5.3)

Yapılan hesap sonucu , hat kayıpları dengesiz yüklenme ve harmonikler nedeniyle artış göstermektedir (Tablo 5.3) : Örneğin , dengeli sinüsoidal işleme göre ,

* dengeli non-sinüsoidal işlemede \longrightarrow %10.7 fazla

* dengesiz non-sinüsoidal işlemede ise ,

\neq 1 işleme kodu için \longrightarrow % 17.3 fazla ,

\neq 2 işleme kodu için \longrightarrow % 15 fazla ,

\neq 3 işleme kodu için \longrightarrow % 13 fazla ,

hat kaybının olduğu gözlenmektedir .

Diğer taraftan , non-sinüsoidal gerilimin demir kayıplarına etkisi değişik olmaktadır (Altbölüm 5.3 , Şekil 5.4 ve Şekil 5.5). Elde edilen sonuçlara göre , yaygın olarak kullanılan bir evirici gerilimi için , demir kayıplarındaki sinüsoidal gerilime göre değişiklik miktarları

Eddy - akım kayıplarında \longrightarrow % 9.6 ve

Histerezis kayıplarında \longrightarrow - % 5.2

şeklindedir .

Harmoniklerin süzülmesine yönelik bir filtre devresinin tasarımı ise , Şekil 5.6 - Altbölüm 5.4 de gerçekleştirilmiştir . Harmoniklerin enerji sistemleri üzerinde , gelecekte daha etkin olacağı söylenebilir . Bu açıdan , özellikle işletme kayıplarında uzun vadede bir artış gelecektir . Elektrik enerjisinin birim fiyatı

TL / kWh ve yüklenme programı yardımıyla , bu artışın mali portresi bulunabilir .

Harmonik analizi yapılarak maksimum harmoniğin mertebesi (veya genliği) , hangi dereceden filtre kullanılacağı hakkında bir ölçüt olabilir , λ , Filtre katının tesis maliyetinin , λ . harmoniğin işletme kayıp tutarından (belirli bir dönemde) düşük kalması beklenir; bu esasa göre filtre katı tasarlanabilir .

Harmoniklerin tüm şebeke üzerindeki olumsuz etkileri , elektrik enerjisini üreten , ileten , dağıtan kuruluşlarca sınırlandırılabilir . Örneğin güç katsayısıyla ilgili kompanzasyon tesisi kurma zorunluluğuna benzer şekilde , harmonik % leri doğrultusunda filtre tesisi kurma zorunluluğu getirilebilir . Bunun için , ilgili tesislere harmonikleri ölçecek ve kaydedecek cihazların bağlanması , belirli noktalara kayıt ve kontrol ünitelerinin yerleştirilmesi düşünülebilecek önlemlerdir . - 102, pp. 2435 - 2460, 1983 .

- [3] Reiser, J., "Elektrische Maschinen I", Carl Hanser Verlag, 1968.
- [4] Bayram, M., "Düzensiz Yükleli Transformatörler Enerji Tesirleri", Matbas Teknisyenleri Basınevi, 1979.
- [5] Shepard, W. and P. Zwikowski, "Suggested Definition of Reactive Power for Non-Sinusoidal Systems", Proc. IEEE, vol. 119, pp. 1361 - 1362, 1972.
- [6] Sharon, D., "Reactive Power Definitions and Power Factor Improvement in Non-Linear Systems", Proc. IEEE, vol. 120, pp. 704 - 706, 1972.
- [7] Mita, H., "Suggested Definition of Reactive Power for Non-Sinusoidal Systems", Proc. IEEE, vol. 120, pp. 706 - 707, 1972.
- [8] Saricijic, M.E., "Elektrik Makinalarında Enerji - II", I.T.B. Matbas, 1980.
- [9] Vanders, E. W. and J. J. Van der, "Statistical Analysis of Power

- [1] Schilling, E.W., "The Distortion of Current and Voltage Wave on Transmission Lines", PhD. Dissertation, Iowa State University, Ames, 1933.
- [2] IEEE Working Group on Power System Harmonics, "Power System Harmonics: An Overview", IEEE Trans. on Power Appar. and Systems, vol. PAS - 102, pp. 2455 - 2460, 1983.
- [3] Reiser, J., "Elektrische Maschinen I", Carl Hanser Verlag, 1968.
- [4] Bayram, M., "Dengesiz Yüklere Transformatörler Üzerine Tesirleri", Matbaa Teknisyenleri Basimevi, 1979.
- [5] Shepard, W. and P. Zakikhani, "Suggested Defination of Reactive Power for Non - Sinusoidal Systems", Proc. IEEE, vol. 119, pp. 1361 - 1362, 1972.
- [6] Sharon, D., "Reactive Power Definitions and Power Factor Improvement in Non - Linear Systems", Proc. IEEE, vol. 120, pp. 704 - 706, 1973.
- [7] Micu, E., "Suggested Definition of Reactive Power for Non - Sinusoidal Systems", Proc. IEEE, vol. 120, pp. 796 - 797, 1973.
- [8] Sarioğlu, M.K., "Elektrik Makinalarının Temelleri - II", İ.T.Ü. Matbaası, 1980.
- [9] Wanner, E. und H. Herbst, "Statische Bilndleistungs Kompan-

für Lichtogenöfen " , Brown Boveri Mitteilungen, No.2, 1977 .

- [10] Kimbark, E.W., " Direct Current Transmission " , vol. 1, John Wiley and Sons, 1971 .
- [11] Grady, W.M. and G.T. Heydt, " Determination of Harmonics in AC Power Systems Caused by HVDC Converters " , Electric Machines and Power Systems , vol. 10, pp. 39 -52, 1985 .
- [12] Eralp, F.Y., " Fourier Yöntemi ile Dalga Analizi " , Nur Ofset Matbaası, 1985 .
- [13] Ergeneli, A., " Elektrikte Laplace Dönüşümü ve Fourier Analizi " , Bakış Ofset, 1984 .
- [14] Fallov, J. - H.N. Gürmen, " Genel Elektronik Dersleri " , Cilt 1:2, İ.T.Ü., 1967 .
- [15] Fischer - Hinnen, J., Elek. Zt., vol. 22, pp. 396, 1901 .
- [16] Cohran, W.T., " What is the Fast Fourier Transform ? " , Proc. IEEE, vol. 55, pp. 1664 - 1674, 1977 .
- [17] Harris, F.J., " On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform " , Proc. IEEE, vol.66,1978.
- [18] Mc Granaghan, M.F., J.H. Shaw and R.E. Owen, " Measuring Voltage and Current Harmonics on Distribution Systems " , IEEE Trans. on Power App. and Systems, vol. PAS-100, pp. 3599 - 3607, 1981 .
- [19] Duman, H., " Elektrik Makinalarının Kayıpları ve Teorisi " ,

i.T.Ü., 1955 .

- [20] Laughton, M.A., " Analysis of Unbalanced Polyphase Networks by the Method of Phase Co - ordinates , Part 1 " , Proc. IEEE vol. 115, pp. 1163 - 1172, 1968 .
- [21] Laughton, M.A., " Analysis of Unbalanced Polyphase Networks by the Method of Phase Co - ordinates , Part 2 " , Proc. IEEE vol. 116, pp. 857 - 865, 1969 .
- [22] Elgerd, O.I., " Electric Energy Systems Theory " , McGraw-Hill 1971 .
- [23] Bödefeld, T.H., " Elektrische Maschinen Achte Auflage " , Springer-Verlag Wien, 1971 .
- [24] Jacovides, L.J., " Analysis of Induction Motor Drives with a Non - sinusoidal Supply Voltage Using Fourier Analysis " , IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 1A -9, pp. 741-747 1973 .
- [25] Berg, G.J. and M.M. Abdel Hakim, " Dynamic Single Unit Representation of Induction Motor Groups " , IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS - 95, 1976 .
- [26] Mahmoud, A.A. and R.D. Shultz, " A Method for Analyzing Harmonic Distribution in A.C. Power Systems " , IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS -101, pp. 1815 - 1824, 1982 .
- [27] Çeltekligil, U., " Güç Elektroniği Devreleri --- Ders Notu " ,

- İ.T.Ü., 1981 .
- [28] Erimez, E. ve M.T. Menalioğlu, " Elektrik Ölçmesi Problemleri " , İ.T.Ü., 1975
- [29] Fuchs, E.F., D.J. Roesler and K.P. Kovacs, " Sensitivity of Electrical Appliances to Harmonics of the Power System's Voltage --- Part II " , IEE Trans. on Power Delivery, vol. PWRD - 2, pp. 445 - 451, 1987 .
- [30] Fuchs, E.F. , D.J. Roesler and F.S. Alashhab, " Sensitivity of Electrical Appliances to Harmonics and Fractional Harmonics of the Power System's Voltage --- Part I " , IEEE Trans. on Power Delivery, vol. PWRD - 2, pp. 437 - 444, 1987 .
- [31] Xia, D. and G.T. Heydt, " Harmonic Power Flow Studies --- I", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS - 101, pp. 1257 - 1265 .
- [32] Xia, D. and G.T. Heydt, " Harmonic Power Flow Studies ---II", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS - 101, pp. 1266 - 1270, 1982 .
- [33] Szabados, B., " On the Interaction between Power System Configuration and Industrial Rectifier Harmonic Interference " , IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS -101, pp. 2762 - 2768, 1982 .
- [34] IEEE Power System Relaying Committe, " The Impact of Sine-Wave Distortions on Protective Relays " , IEEE Trans. on

Industrial Applications, pp. 335 - 343, 1984 .

- [35] IEEE — PES Transformer Committee, " Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Non - Sinusoidal Load Currents " , C 57. 110/D2, May 6, 1983 .
- [36] Hwang, M.S. , W.M. Grady and H.W. Sanders, " Distribution Transformer Winding Losses due to Nonsinusoidal Currents ", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. PWRD - 2, pp. 140 - 146, 1987 .
- [37] Mergen, F., " Effects of Supply Voltage Waveforms upon Iron Losses in an Induction Motor " , Bulletin of the Technical University of Istanbul, vol. 43, pp. 9 - 21, 1990 .
- [38] Csàki, F. et al., " Power Electronics - Problems Manual " , Akadèmiai Kiado , 1979 .

- Ö Z G E Ç M İ Ş

1966 yılında Balıkesir`de doğdum . İlk öğrenimimi Aydın-
lıkevler (Ankara) İlkokulu`nda , orta ve lise öğrenimimi
T.E.D. Ankara Koleji`nde tamamladım . Daha sonra , 1984 yılında
Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği
Bölümüne girerek , 1989 yılında aynı bölümden mezun olarak
Elektrik Mühendisi oldum . 1989 yılında yine aynı üniversitenin
Fen Bilimleri Enstitüsü`nde Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans
Programına başladım .

