

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HARMONİKLERDEN KAYNAKLANAN AŞIRI
AKIMLAR VE BU AŞIRI AKIMLARIN İLETKENLERDE
YARATTIĞI ÖMÜR KAYIPLARININ İNCELENMESİ**

Elektrik Mühendisi A.Gökhan ARPINAR

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 30.06.2006

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Ferit ATTAR (YTÜ)

Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Celal KOCATEPE (YTÜ)

: Doç.Dr. Hakan ÜNDİL (İÜ)

İSTANBUL,2006

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
GRAFİK LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1	HARMONİKLERE AİT TEMEL KAVRAMLAR
	ve HARMONİKLERİN ETKİLERİ.....1
1.1	Giriş.....1
1.2	Harmonikler ile ilgili Literatür İncelemesi.....1
1.3	Harmoniklerin Oluşum Nedenleri.....4
1.4	Harmonikli Devreler.....5
1.4.1	Sinüsoidal Beslemeli Nonlineer Devreler.....6
1.4.2	Nonsinüsoidal Beslemeli Lineer Devreler.....6
1.4.3	Nonsinüsoidal Beslemeli Nonlineer Devreler.....7
1.5	Başlıca Harmonik Kaynakları.....7
1.5.1	Anahtarlama Güç Kaynakları.....8
1.5.2	Bilgisayarlar.....9
1.5.3	Gaz Deşarjı Prensibi ile Çalışan Aydınlatma Elemanları9
1.5.4	Elektronik Balastlar.....10
1.6	Harmonik Bileşenlere Ait Temel Gösterimler ve Formüller.....10
1.6.1	Toplam Harmonik Distorsiyon (THD).....16
1.6.2	Toplam Talep Distorsiyonu (TTD).....16
1.7	Uluslararası Sınırlamalar.....16
1.8	Harmonik Standartları.....17
1.9	Harmonik Ölçümleri.....19
1.10	Direnç, Endüktif ve Kapasitif Reaktansın Harmonikle Değişimi.....20
1.10.1	Harmoniklerin Direnç Üzerindeki Etkisi20
1.10.2	Harmoniklerin Reaktanslar Üzerine Etkisi.....21
1.11	Harmonik Bileşenlerinin Faz Sırası.....22

1.12	Harmoniklerin Modellenmesi.....	23
1.13	Süperpozisyon Teoremi.....	25
2.	HARMONİKLERİN BULUNDUĞU DURUMDA NÖTR İLETKENİNİN ANALİZİ.....	27
2.1	Nonlineer Yükler Bakımından Alçak Gerilimi Şebekesinin Durum.....	27
2.2	Alçak Gerilim Enerji Dağıtım Şebekesinde Yer Alan Harmonik Kaynakları.....	28
2.3	Nötr İletkeninin Durumu.....	32
2.3.1	Harmonikli nötr akımlarının sebep olabildiği problemler.....	35
2.4	Nötr İletkeninden Geçen Harmonikli Akımın Şebeke Üzerindeki Etkinliğinin Analizi.....	36
2.4.1	Isınma yönünden harmonikli nötr akımının etkinliği.....	38
2.5	Isınmanın Kablo Ömrüne Tesiri ve Arrhenius Yaklaşımı.....	40
2.5.1	Svante August Arrhenius (1859 - 1927)......	40
2.5.2	İzoleli güç kablolarının Aşırı ısınmadan kaynaklanan Ömür Kayıpları.....	41
2.5.2.1	Sembol Listesi:.....	41
2.5.2.2	Kablonun ömür kaybı hesaplanırken izlenecek yöntem.....	42
2.5.3	Tipik Aşırı Yüklenme Durumunda Kablonun Ömür Kayıpları.....	44
3.	HARMONİK AKIMLARININ BULUNDUĞU DURUM İÇİN MODELLEME VE ORTAYA ÇIKAN SONUÇLARIN ANALİZİ.....	49
3.1	Modelleme hakkında.....	49
3.2	Modelde kullanılan elemanlar ve değerleri.....	49
3.2.1	Kaynak.....	49
3.2.2	Yükler.....	50
3.2.3	Harmonik Kaynakları:.....	50
3.2.4	Ölçüm ve değerlendirme elemanları.....	51
3.3	Modelleme.....	51
4	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	70
	KAYNAKLAR.....	72
	ÖZGEÇMİŞ.....	76

SİMGE LİSTESİ

U-V-v	Gerilim
I-i	Akım
X	Reaktans
R	Omik Direnç
Z	Empedans
ρ	Özgöl toprak direnci
S	Görünen güç
P	Aktif güç
Q	Reaktif güç
D	Distorsiyon gücü
f	Frekans
$\cos\phi$	Güç faktörü
l	Uzunluk

İndisler

dc	doğru akım
1	Temel bileşen
n	harmonik derecesi
f	Arıza
F	fark
L	Endüktif
C	Kapasitif
h	harmonikli bileşen

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Lineer elemanın uç karakteristiği.....	4
Şekil 1.2	Nonlinear elemanın uç karakteristiği.....	4
Şekil 1.3	Lineer elemanın akım-gerilim dalga şekilleri.....	5
Şekil 1.4	Nonlinear elemanın akım-gerilim dalga şekilleri.....	5
Şekil 1.5	Sinüsoidal şebekeye bağlı nonlinear yük.....	6
Şekil 1.6	Nonsinüsoidal beslemeli lineer yük.....	6
Şekil 1.7	Nonsinüsoidal beslemeli nonlinear devre.....	7
Şekil 1.8	Harmonik üreten elemanlar.....	8
Şekil 1.9	Lineer güç kaynağı.....	8
Şekil 1.10	Anahtarlama güç kaynağı.....	9
Şekil 1.11	Bilgisayarlar için tipik akım dalgası.....	9
Şekil 1.12	Fluoresant lambalar için tipik akım dalga şekli.....	10
Şekil 1.13	Harmonik spektrum gösterimi:	12
Şekil 1.14	Harmonik histogram gösterimi.....	12
Şekil 1.15.	Harmonikli durumda güçlerin grafik (vektörel) gösterimi.....	15
Şekil 1.16	Akımın toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi (I_1 =sabit).....	17
Şekil 1.17	Nonlinear yük içeren bir enerji dağıtım hattı.....	24
Şekil 1.18	Tek hat harmonik bileşen modelleri.....	24
Şekil 1.19	Nonsinüsoidal gerilim kaynağı eşdeğeri.....	25
Şekil 1.20	Nonsinüsoidal beslemeli devrenin eşdeğeri.....	26
Şekil 2.1	Lineer güç kaynağı.....	29
Şekil 2.2	Anahtarlama güç kaynağı.....	29
Şekil 2.3	Kişisel bilgisayarlar için kullanılan bir anahtarlama güç kaynağının giriş akımına ait dalga biçimi.....	30
Şekil 2.4	Bilgisayarlar (Şekil 2.3), televizyonlar, elektrikli taşıma aracı batarya şarj cihazları, tek fazlı hız kontrollü motor sürücüler ile elektronik balastların bir kategorisine ait akım dalga biçimi.....	31
Şekil 2.5	Trapez veya yaklaşık kare biçimindeki dalga biçimi.....	31
Şekil 2.6	Yarım periyot başına çift tepeli bu akım dalgası biçimi.....	32
Şekil 2.7	Üç fazlı dengeli nonsinüsoidal akımlar halinde nötr akımın meydana gelmesine bir örnek.....	35

Şekil 2.8	Bir alçak gerilim şebekesinde nonlinear yüklerin iki farklı bağlantısı sonucu nötr akımları.....	37-38
Şekil 2.9	Kablodan geçen aşırı akımın şekli.....	45
Şekil 3.1	Harmonik kaynaklarının bulunmadığı modelleme devresi.....	52
Şekil 3.2	Harmonik kaynaklarının devreye alındığı modelleme devresi.....	56

GRAFİK LİSTESİ

Grafik 3.1	Harmonik akımlarının bulunmadığı modellemedeki faz akımları.....	53
Grafik 3.2	Harmonik akımlarının bulunmadığı modellemedeki nötr akımı.....	54
Grafik 3.3	Harmonik akımlarının bulunduğu modellemedeki faz akımları.....	57
Grafik 3.4	Harmonik akımlarının bulunduğu modellemedeki nötr akımı.....	58
Grafik 3.5	Harmonik akımlarının bulunduğu modellemedeki faz akımları (Dengesiz yüklenme).....	62
Grafik 3.6	Harmonik akımlarının bulunduğu modellemedeki nötr akımı (Dengesiz yüklenme).....	63

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1	Kaynak ve yüke göre meydana gelen harmonik bileşenler.....	6
Çizelge 1.2	Çeşitli ülkeler için THD değerleri.....	18
Çizelge 1.3	Konutlar ile ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC 61000-2-2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri.....	18
Çizelge 1.4	Endüstriyel santraller için IEC 61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri.....	19
Çizelge 1.5	Konutlarla ilgili alçak ve orta gerilim şebekeleri için harmonik distorsiyon limitleri.....	19
Çizelge 1.6	Çeşitli gerilimler için düzeltme faktörleri ile direnç değerlerinin belirlenmesi.....	21
Çizelge 2.1	Değişik döşenme şekillerine göre K Katsayıları.....	45

ÖNSÖZ

Harmonik içeren yüklerin bulunduğu durumlarda geçen aşırı akımların kabloları, özellikle de nötr iletkenine verebileceği zararları inceleyen bu çalışmada, öncelikle harmonikler konusunda genel bilgiler verilerek konulara alt yapı sağlanmaya çalışılmıştır.

Tez çalışmasının içinde de görüleceği gibi, ilk bölümde harmonikler, oluşma nedenleri, harmonik kaynakları, değişik karakterli yüklerin harmonik karakteristiklerine ilişkin bazı örnekler verilmiş ve bu örnekler grafik ve çizelgelerle desteklenmeye çalışılmıştır.

Daha sonraki bölümlerde ise tezimizin asıl konusu olan aşırı akımlar olarak harmoniklerden kaynaklanan akımlar kullanılmış, bunlara dayanarak kabloya tesir eden aşırı ısınma değerlerine ulaşılmıştır. Burada önemli husus, kablomuzdan geçen aşırı akımların büyüklüğüdür. Harmonik akımlarının kullanılmasının nedeni ise güncel olarak harmonik kaynaklarının yarattığı akımların mevcut elektrik şebekelerinde meydana getirdiği olumsuz durumlardır.

Ancak tezin sonunda varılan sonuç, yalnızca harmonikli durumlar için değil, herhangi bir şekilde oluşmuş herhangi bir aşırı akım için de aynıdır.

Yani burada asıl incelenen, aşırı akımların bulunması halinde, kablomuzun fiziksel yapısının bundan nasıl etkileneceğidir. Sonuç olarak ister harmonik kaynaklı olsun, ister fazların dengesiz yüklenmesine bağlı veya değişik bir nedenden kaynaklanıyor olsun, aşırı akımlar, şebekemizde ve tesisatımızda kullandığımız iletkenlerimizde (kablolarda) yabana atılmayacak derecede tahribatlar oluşturabilmektedirler.

Bu noktada da yaptığım çalışmanın, özgün bir yanı olduğuna da inandığımı söylemek isterim. Çünkü harmonikler, aşırı akımlar ve benzeri elektrik tesisat sorunlarıyla ilgili çalışmalarla sıklıkla karşılaşmakta, ancak bunların zararlarını çok detaylı bir biçimde irdelleyerek ortaya koyan bilimsel çalışmalar az sayıdadır. Bu yüzden, konunun özgünlüğüne önem vererek beni bu konuda çalışmaya sevk eden kıymetli hocam Yrd. Doç. Dr. Ferit ATTAR başta olmak üzere, değerli zamanlarını ve bilgilerini benden esirgemeyen sayın hocalarım Prof. Dr. Selim AY, Prof. Dr. Celal KOCATEPE, Doç. Dr. Aslan İNAN ve Yrd. Doç. Dr. Recep YUMURTACI' ya ayrıca teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

ÖZET

İlk bölümde harmoniklere ait tanımlar, büyüklükler, genel bir takım bilgiler ve uluslar arası bazı standartlar açıklanarak teze giriş yapılmıştır.

Daha sonraki bölümlerde ise sırasıyla bu harmonik akımlarının özellikle nötr iletkeninde oluşturduğu aşırı akımlar, bunların genlikleri ve farklı harmonik mertebeleri için gösterebileceği farklılıklar ele alınmış olup, yapılacak modellemeye temel olacak durumlar ortaya konmaya çalışılmıştır.

Aşağıda anlatılacak olan tüm şartları sanal olarak modellemek için MATLAB-Simulink programından yararlanılmıştır.

Harmonikli durumda geçecek aşırı akımların ne kadar yüksek genlikli olabileceğinin daha açık anlaşılabilmesi için öncelikle aynı şartları taşıyan ancak harmoniklerin bulunmadığı bir durum göz önüne alınarak, buna ait akım-gerilim değerleri bulunmuş ve grafiklere dökülmüştür.

Bir sonraki adımda yaratılan tesisin belli harmonik değerlerini içerdiği varsayılarak bunlara ait akım-gerilim değerleri hesaplatılmış, grafik analizleri yapıp efektif akım ve gerilim değerleri bulunarak, bu değerler ömür hesaplarında kullanılabilecek değerlere dönüştürülmüştür.

Son kısımda ise elde edilen değerler, Arrhenius formülleri adı verilen formüllerde yerlerine konularak, kabloların fiziksel yapılarına tesir eden büyüklükler olarak çözümlenebilmiştir.

Anahtar kelimeler: Harmonikler, Aşırı Akımlar, Nötr İletkeni, Dengesiz Yüklenme, Arrhenius, MATLAB-Simulink

ABSTRACT

In first chapter, some descriptions about harmonics, some quantities, general information about harmonics and some international standarts are been given due to beginning to subject.

In the later chapters in order, overload currents related with harmonics especially in neutral wire, their amplitudes and differences according to different harmonic degrees have been explained to build some case which is acceptable for our model.

All cases which are going to be explained below are modelled in MATLAB-Simulink program.

First of all, case without harmonics modelled according to show how harmonics can produce overload currents when compared with basic component(50 Hz.)

Then, it is assumed that the facility has some degrees of harmonics in some amounts. Effective current and voltage values are been calculated and current-voltage graphs are formed. And at last, these current and voltage values are been transformed into some different values to be used for cable life loss expectancy.

The formulas which have been used for life loss expectancy are called Arrhenius formulas and they have been builded some physical relation between overload currents and material life loss.

Keywords: Harmonics, Overload Currents, Neutral Wire, Unbalanced Phase Loading, Arrhenius, MATLAB-Simulink

1. HARMONİKLERE AİT TEMEL KAVRAMLAR ve HARMONİKLERİN ETKİLERİ

1.1 Giriş

Ülkemizde ve dünyada enerji talebi gün geçtikçe artmaktadır. Talebin artması daha güvenilir ve kaliteli enerjinin sağlanması durumunu ortaya çıkarmıştır. Faz gerilimlerinin dengeli olması, enerjinin sürekliliği, gerilim ve frekansın sabitliği gibi kriterler kaliteli enerji sağlamak için göz önünde bulundurulmalıdır.

Son yıllarda yarı-iletken elemanların ve büyük güçlü nonlineer elemanların kullanılması harmonik bileşenlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu harmonik kirlilik tüketiciye verilen enerjinin kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir.

Harmonikler; motorlar, generatörler, kondansatörler, transformatörler ve enerji iletim hatlarında ilave kayıplara neden olurlar. Bazı durumlarda da harmonikler, güç sistem elemanlarının zarar görmesine veya devre dışı kalmalarına yol açabilirler. Ayrıca harmonikler nedeniyle sistemde çeşitli frekansta akım ve gerilim bileşenleri bulunacağından, rezonans olayının meydana gelme olasılığı artacaktır. Rezonans sonucu oluşabilecek aşırı akım ve gerilimler, işletmedeki elemanlara büyük zararlar verecektir (Kocatepe vd.,2003).

1.2 Harmonikler ile ilgili Literatür İncelemesi

Nonsinüsoidal akım ve gerilim dalga biçimlerinin elektrik sistemi elemanları üzerindeki etkilerinin araştırılması yüzyılın başlarına, hatta daha öncesine kadar uzanmaktadır. Distorsiyona uğrayıp sinüs biçiminden ayrılan dalgaların içinde saklı diyebileceğimiz harmoniklerin büyüklüğü, çeşitliliği ve sistem elemanları üzerine olan etkileri, yıllar içinde artarak süregelmiştir. Bu süre içinde harmonikleri ve etkilerini araştırmaya yönelik teorik ve deneysel çeşitli yaklaşımlar ortaya konulmuştur. Bu yaklaşımlarla yapılan araştırmalar, harmoniklere yol açan kaynaklar, harmonik analizine yönelik matematiksel tanım ve çözümleme teknikleri, harmoniklerin olumsuz etkileri, harmonik

tolerans sınırları, harmoniklerin yok edilmesi - zayıflatılması, harmonik analizine yönelik sayısal metotlar ve teknikler vb. konular üzerine yoğunlaştırılmıştır.

İlk defa 1886'da Great Barrington / Massachusetts'te ilk alternatif akım elektrik sisteminin hizmete girişinin ardından, enerji sistemi harmoniklerinin farkına varılmış ve incelemesi yapılmıştır (Westinghouse Electric Corporation, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, 1964). Alternatif akımın ortaya çıktığı o ilk yıllardan itibaren, doğrultucular, transformatörler, doyma olayı ve generatörler incelenirken, bunların aynı zamanda birer harmonik kaynağı olduğu ortaya konulmuştur. Yarıiletkenli veya cıva buharlı doğrultucuların kullanılmadığı o ilk yıllarda doğrultma işlemi motor-generatör grupları ile yapılmakta idi. Bu alanda Steinmetz'in enerji sistemi harmonikleri konusundaki araştırmaları ilgi çekicidir. Birinci Dünya Savaşı yıllarında Steinmetz'in yaptığı çalışmalar (Steinmetz, 1916 ve 1917), transformatörlerdeki doyma ve histerezis olaylarından kaynaklanan dalga bozulmalarını ortaya çıkarmıştır. Burada dalga biçiminin kare veya üçgen olması ile sinüsoidal olması çeşitli yönlerden karşılaştırılmış ve enerji sistemleri için en uygun dalga biçiminin sinüsoidal dalga olduğu gösterilmiştir. Ayrıca generatörlerin oluklu yapılarından ve oluklara dağıtılmış sargılarından ötürü ortaya çıkan gerilim harmonikleri üzerinde de durulmuş ve yıldız-üçgen bağlı transformatörlerdeki akım/gerilim harmonikleri de incelenmiştir. Simetrik Bileşenler Yönteminin ve Fourier Analizinin çok yaygın olarak kullanılmadığı o dönemde Steinmetz'in araştırmaları çok önemli ve değerliydi.

İkinci Dünya Savaşı'nın bitiminden sonra doğrultucu devrelerinin kullanımının yaygınlaşması, bu elemanların ateşleme açısı ve komütasyon açısı gibi parametrelere bağlı olarak akım harmoniklerinin incelenmesini gerektirmiştir (Christensen vd., 1944; Schmidt, 1953). Ayrıca sinüsoidal alternatif akımla yapılan enerji iletimi dışında kullanılan yüksek gerilimle doğru akım (HVDC) enerji iletim sistemlerinde oluşan harmoniklerin incelenmesi (Kimbark, 1971) ile deşarj lâmbalarının yol açtığı harmoniklerin etkinliklerinden (Weymouth, 1971; Herrick, 1980) söz edilebilir.

Transformatörlerin demir nüvesinin doyması sonucu olarak şekillenen lineer olmayan mıknatıslama akımlarının harmonik analizi kapsamında incelenmesi (Szabados ve Lee, 1981) ve kendi başına lineer, olmayan yük empedansı ile ark fırınlarının analizi (Sundberg, 1976; Dugan, 1980), yapılmış olan diğer çalışmalar arasındadır.

Harmoniklerin etkinliğini araştırmaya yönelik çalışmalar, başlangıçta haberleşme devrelerindeki bozulmaları incelemekteydi. Sonraki yıllarda harmoniklerin enerji sistemleri (ve sistem elemanları) üzerindeki etkinlikleri de dikkate alınmaya başladı (IEEE Standards Board, 1976; Linders, 1979). Bu çerçevede, harmoniklerin, röleler ve diğer koruyucu elemanlar, ölçü aletleri vb. cihazlar üzerindeki bozucu etkileri de araştırılmıştır (Baggott, 1974; Emanuel vd., 1981). Harmonik analiziyle ilgili olarak geliştirilen ilk bilgisayar destekli çözümleme tekniği, doğru akımla enerji iletimi (hvdc) problemlerine yöneliktir (Hingorani vd., 1968; Hay ve Hingorani, 1970; Htsui ve Shepherd, 1971; Williams ve Smith, 1973; El-Serefi ve Shehata, 1976; Coi vd., 1980). Bu yöntemde, çeviriciler ideal anahtar ile modellenmektedir ve sistemi karakterize eden nonlinear diferansiyel denklemler sayısal olarak çözülmektedir. Ancak, bu yöntemde tüm sistem elemanlarının ayrıntılı bir biçimde modellenmesinin gerekmesi ve çözüm süresinin uzunluğu gibi bazı zorluklar bulunmaktadır.

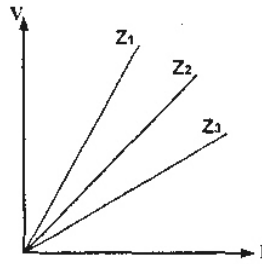
1970'li yıllardan itibaren enerji sistemleri, hatların T ve Π eşdeğer devreleri ve bağımsız kaynaklarla modellenmeye başlanmıştır (Owen ve McGranaghan, 1980; McGranaghan vd., 1981; Pileggi vd., 1981; Johnson vd., 1982; Densem vd., 1984; Balser ve Feltes, 1985; Sharma ve Fleming, 1986). Lineerleştirilmiş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

Bir diğ er harmonik analizi yöntemi, nonlinear frekans domen i analizidir. Bu yöntemde, nonlinear yüklerin, gerilim ve akımların Fourier eşdeğ erleri göz önüne alınır. Güç akışı için de Newton-Raphson Yöntemi kullanılır (Xia ve Heydt, 1982; Heydt vd. 1983). Bu yöntem, ideal akım ve gerilim kaynaklarıyla modellemeyi esas alan diğ er tekniklere göre duyarlıdır.

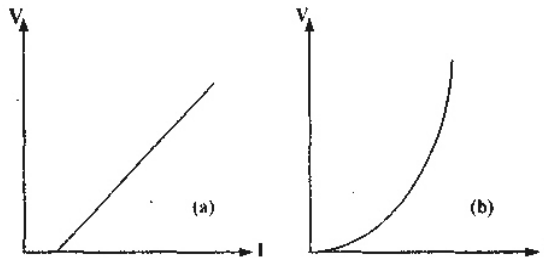
Buna karş ılık, geleneksel güç akışı problemlerine göre iterasyon fazlalığı dikkat çekicidir. Son olarak harmoniklerin oluşturduğu harmonik görünen güç, eşdeğ er güç katsayısı gibi tanımları veren ve Devreler Teorisi bakış açısı içinde çeşitli çözümleme teknikleri sunan araştırmalar da mevcuttur (IEEE, 1979; Shepherd ve Zand, 1979; Dugan vd., 1996).

1.3 Harmoniklerin Oluş um Nedenleri

Akım-gerilim karakteristiğ i lineer olmayan elemanların kullanımına duyulan ihtiyaç nedeni ile harmoniklerin etkisi her geçen gün artış göstermektedir. Nonlinear eleman, uç karakteristiğ i yani akımı ile gerilimi arasındaki ilişkisi doğrusal olmayan elemandır. Nonlinear devre, nonlinear elemanlardan oluşabileceğ i gibi , bir elemanı nonlinear diğ erleri lineer elemanlardan oluş an bir devre de olabilir. Lineer ve nonlinear elemanların uç karakteristikleri Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de verilmiştir.



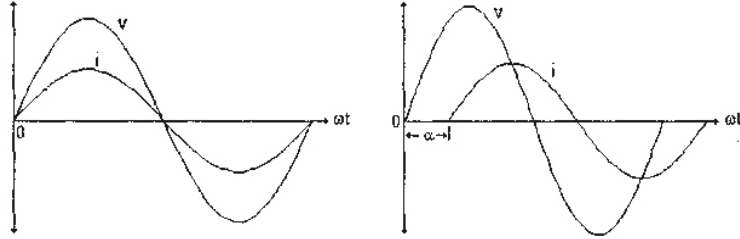
Şekil 1.1 Lineer elemanın uç karakteristiğ i



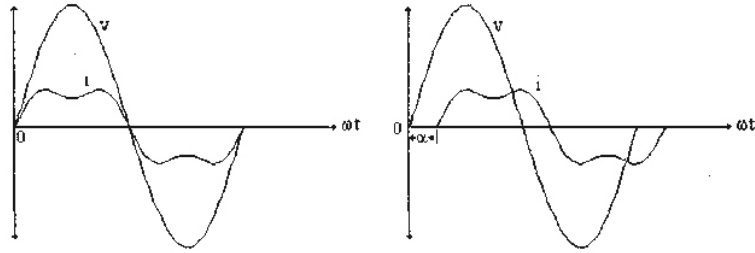
Şekil 1.2 Nonlinear elemanın uç karakteristiğ i

Nonlinear elemanlar ohm kanunu gerçeklemeyen elemanlar olarak da adlandırılabilirler. Çünkü; lineer elemanların sağladığı, sabit ve skaler bir değer olan V / I oranını nonlinear elemanlar sağlamazlar. (Şekil 1.1, Şekil 1.2) (Kocatepe vd.,2003).

Nonlinear eleman gerilim dalga şekli ve akım dalga şekli aynı olmayan elemanlar olarak da tanımlanabilir. Nonlinear eleman kendisine uygulanan gerilim şeklinden farklı şekilde akım akıtır. Şekil 1.3 ve Şekil 1.4’de lineer ve nonlinear elemanların akım-gerilim dalga şekilleri verilmiştir. (Kocatepe vd.,2003).



(a) Faz farkı yok (b) Faz farkı var
Şekil 1.3 Lineer elemanın akım-gerilim dalga şekilleri



(a) Faz farkı yok (b) Faz farkı var
Şekil 1.4 Nonlinear elemanın akım-gerilim dalga şekilleri

1.4 Harmonikli Devreler (Kocatepe vd.,2003).

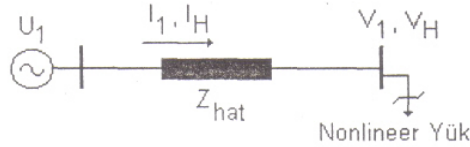
Nonsinüsoidal işaretlerin ortaya çıkması, besleme kaynağının ve devre parametrelerinin karakteristikleri ile bağlantılıdır. Besleme geriliminin nonsinüsoidal veya yükün nonlinear olması durumunda harmonikli akım ve gerilim meydana gelir. Kaynak ve yüke göre meydana gelen harmonik bileşenler Çizelge 1.1’de verilmiştir. (Kocatepe vd.,2003).

Çizelge 1.1 Kaynak ve yüke göre meydana gelen harmonik bileşenler

İşletme Türü		Harmonik Bileşenler		
Kaynak	Yük	Gerilimde	Akımda	Açıklama
Sinüsoidal	Lineer	-	-	Harmonik bileşenler yok.
Sinüsoidal	Nonlineer	-	Var	Yük nedeni ile akımda harmonikler oluşur.
Nonsinüsoidal	Lineer	Var	Var	Gerilim ile aynı harmonik bileşenler bulunur.
Nonsinüsoidal	Nonlineer	Var	Var	Aynı ve farklı harmonik bileşenler bulunabilir

1.4.1 Sinüsoidal Beslemeli Nonlineer Devreler

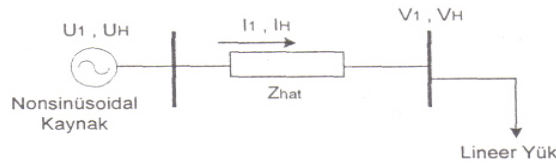
Besleme kaynağının sinüsoidal olduğu bir şebekeye nonlineer devre ya da devrelerin bağlı olması durumunda ortaya çıkan devrelerdir. Kaynakta sadece temel bileşen (U_1) bulunurken, nonlineer yükler nedeni ile harmonik akım bileşenleri (I_H) meydana gelir ve bu akımlar sonucunda Şekil 1.5’de görülen harmonik gerilim bileşenleri (V_H) sistemde görülür.



Şekil 1.5 Sinüsoidal şebekeye bağlı nonlineer yük

1.4.2 Nonsinüsoidal Beslemeli Lineer Devreler

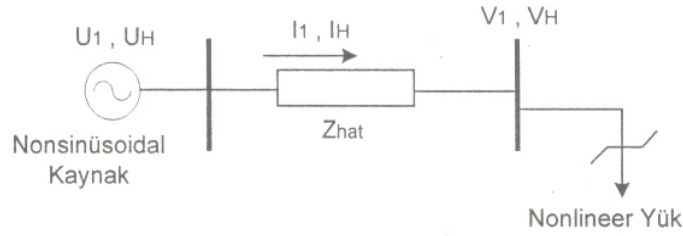
Devreye bağlı elemanlar lineer olduğu halde gerilim kaynağını nonsinüsoidal olması nedeni ile harmoniklerin olduğu devrelerdir (Şekil 1.6). Bu devrede, yük lineer olduğu için sadece besleme gerilimi harmoniklere bağlı olacaktır ve gerilimdeki harmonik bileşenler aynı harmonik dereceli olarak akımda da bulunacaklardır.



Şekil 1.6 Nonsinüsoidal beslemeli lineer yük

1.4.3 Nonsinüsoidal Beslemeli Nonlineer Devreler

Nonlineer elemanların nonsinüsoidal gerilim kaynağından beslenmesi halinde karşımıza çıkan devrelerdir (Şekil 1.7). Harmonik bileşenler, W.Shepherd ve P. Zand tarafından, hem gerilim hem akımda bulunan bileşenler,sadece gerilimde bulunan bileşenler ve sadece akımda bulunan bileşenler olarak üçe ayrılmıştır (Shepherd ve Zand, 1978; Kocatepe vd.,2003).

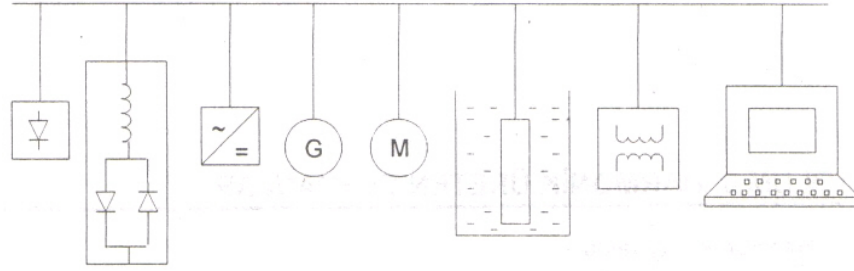


Şekil 1.7 Nonsinüsoidal beslemeli nonlineer devre

1.5 Başlıca Harmonik Kaynakları

Harmonik bileşenler, akım-gerilim karakteristiği lineer olmayan elemanlar tarafından üretilmektedir. Şekil 1.8’de bu elemanlar genel olarak görülmektedir. (Kocatepe vd.,2003).Harmonikleri meydana getiren başlıca elemanlar şunlardır:

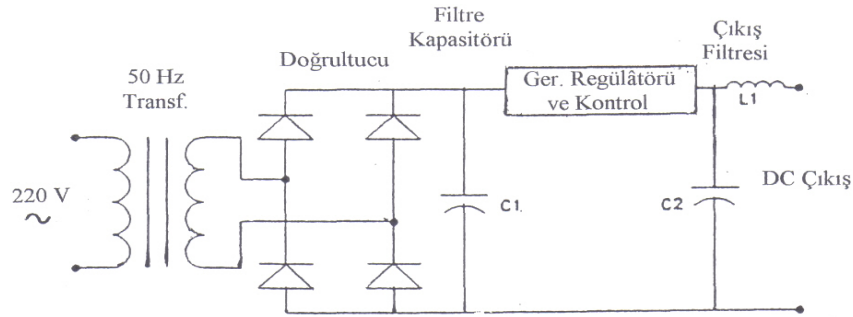
- Anahtarlama güç kaynakları,
- Gaz deşarj prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları,
- Bilgisayarlar, yazıcılar, kopyalama makineleri,
- Elektronik balastlar,
- Konverterler,
- Motorlar,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Kontrol devreleri,
- Frekans dönüştürücüleri.



Şekil 1.8 Harmonik üreten elemanlar

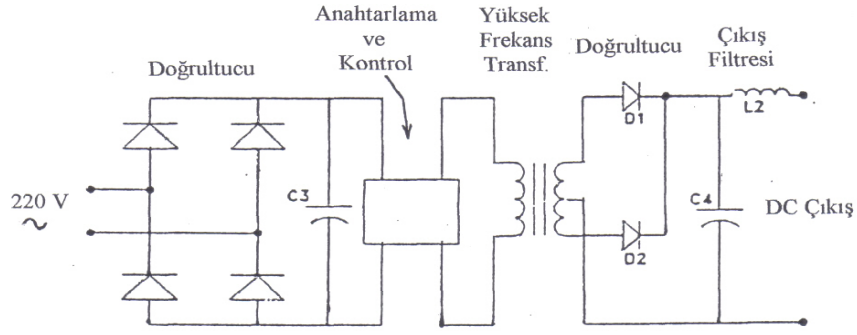
1.5.1 Anahtarlama Güç Kaynakları

Yarıiletken çipler kullanan modern elektronik cihazlar için genellikle 3-15 volt arasında bir dc güç kaynağı gerekli olur. Yakın geçmişteki yıllarda bu gerilimi elde etmek için bir indirici transformatör, doğrultucu köprüsü, filtre ve gerilim regülâtöründen oluşan besleme üniteleri kullanılmaktaydı (Şekil 1.9).



Şekil 1.9 Lineer güç kaynağı

Şekil 1.10'da prensip şeması görülen modern teknoloji anahtarlama güç kaynaklarında ise, girişteki transformatör elimine edilmiş olup, doğrultucu diyot köprüsü doğrudan doğruya 220 voltluk giriştedir. Bu DC gerilim, anahtarlama devresi üzerinden 10-100 kHz mertebesinde yüksek frekanslı AC gerilime dönüştürülür. Bu gerilim yüksek frekanslı indirici transformatörden geçirilerek çıkışta yeniden doğrultulur. Yüksek frekans sayesinde buradaki transformatör ve demir çekirdekli filtre bobini, lineer güç kaynağına göre daha küçük boyutlu, daha hafif ve daha verimlidir.

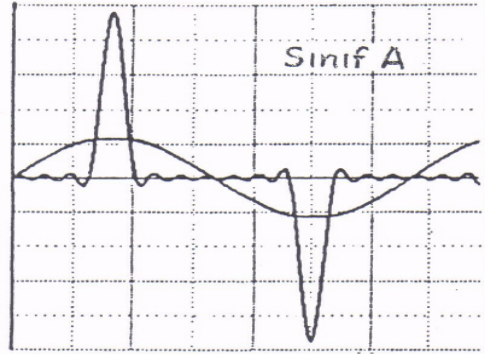


Şekil 1.10 Anahtarlamalı güç kaynağı

1.5.2 Bilgisayarlar

Bilgisayarlar nonlineer yük karakteristiğine sahiptirler ve yalnızca bozucu etkilere maruz kalmayıp, aynı zamanda birer etki kaynağıdır. İçlerinde bulunan anahtarlamalı güç kaynaklarından dolayı giriş akımının dalga biçimi, içindeki kondansatörünün yeniden deşarj olmasından dolayı çok kısa darbeler gösterirler (Şekil 1.11).

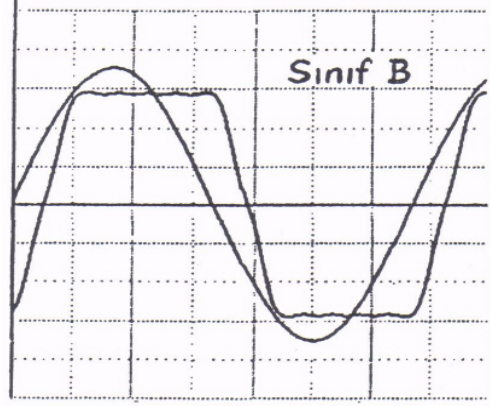
Hattaki gerilim distorsiyonları, güç sistemlerinde anormal gerilim düşümleri ve nötr iletkeninin aşırı yüklenmesine neden olabilirler.



Şekil 1.11 Bilgisayarlar için tipik akım dalgası

1.5.3 Gaz Deşarjı Prensibi ile Çalışan Aydınlatma Elemanları

Civa buharlı lambalar, floresant lambalar, sodyum buharlı lambalar gibi bir tüp içerisindeki gazın deşarjı prensibine dayanarak geliştirilen aydınlatma elemanları nonlineer akım-gerilim karakteristiğine sahip olduğu için harmonik üretirler. Trapez ya da yaklaşık kare biçimine sahiptirler (Şekil 1.12).



Şekil 1.12 Floresant lambalar için tipik akım dalgası

1.5.4 Elektronik Balastlar

Yüksek frekanslı elektronik balastlarda en etkin harmonik bileşenler 3., 5., 7., 9. bileşenlerdir. Elektronik balastlar, filtreli ise harmonik etkinliği yok sayılır. Manyetik balastlı floresant aydınlatmada gerilim için THD=%3,6 değerinde iken, filtresiz sistemlerde THD=%7,41 değerine ulaşmakta, filtreli sistemlerde ise THD=%0,74 değerine inmektedir.

1.6 Harmonik Bileşenlere Ait Temel Gösterimler ve Formüller

Sinüsoidal olmayan bir işaretin (dalganın) sinüsoidal bileşenler cinsinden ifade edilebileceği ve ayrıştırılmış olan bileşenlerin toplamının orijinal dalgaya karşılık düşeceği, J. Fourier tarafından gösterilmiş bulunmaktadır. Bu durumda sinüsoidal olmayan bir $f(x)$ fonksiyonu

$$f(x) = \frac{1}{2} A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos nx + B_n \sin nx) \quad (1.1)$$

şeklinde yazılabilir. A_0 katsayısı pratikte sıfır alınabilir, çünkü karşılaşılan çoğu dalga biçiminde dalganın pozitif ve negatif alternansları simetriktir.

A_n ve B_n katsayıları ise T periyodu boyunca $f(x)$ fonksiyonunun integrasyonundan elde edilir.

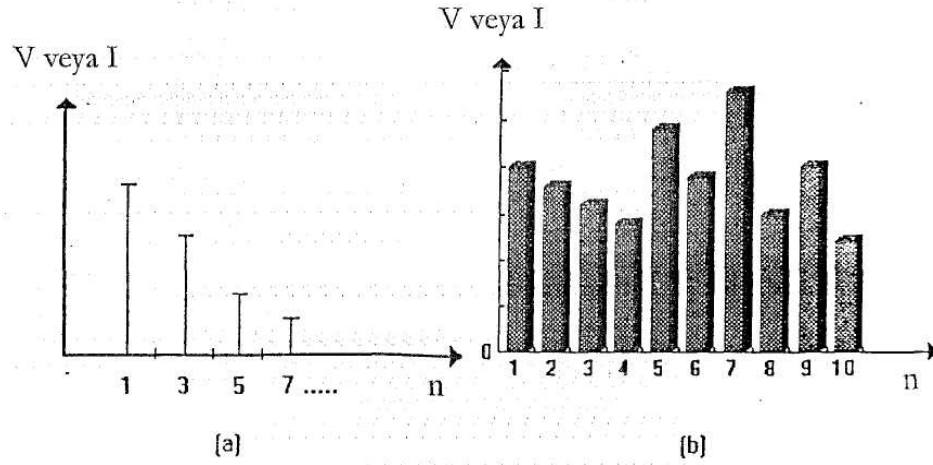
$$\left. \begin{aligned} A_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cos nx \cdot dx \\ B_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \sin nx \cdot dx \end{aligned} \right\} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1.2)$$

$n=1$ olan yani "1" indisli terim "dalga'nın temel bileşeni" adını alır; diğer bileşenler ise "harmonikleri" meydana getirmektedir.

$n=1$ için frekans (aynı zamanda şebeke frekansıdır) $f_1=50\text{Hz}$ ise, harmonik bileşenlerin frekansları arasında $f_n = n \cdot f_1 = n \cdot 50$ bağıntısı vardır.

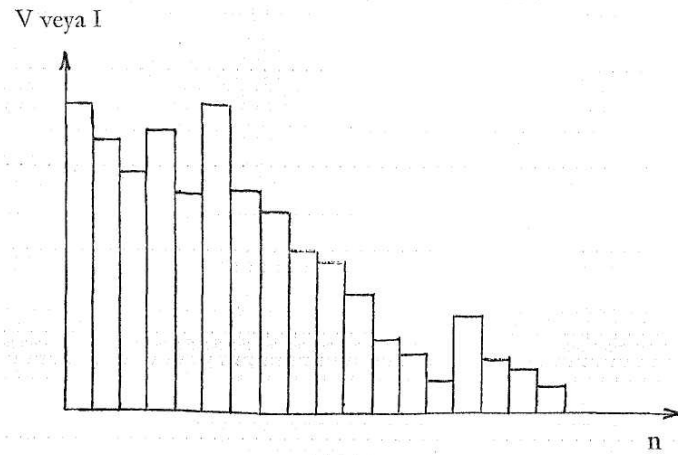
Uygulamadaki akım ve gerilim dalgalarının harmonik analizi sonucunda; harmonik bileşenlerin "genliklerinin, harmonik mertebesi arttıkça azaldığı, "faz açıları" için ise bu tip bir genel kuralın verilemeyeceği söylenebilir. Ayrıca A_0 katsayısı, gerek akım gerekse gerilim için sıfır değerini alır ($I_0=0$; $V_0=0$). Ve uygulamadaki alternatif gerilim ve akımda pozitif ve negatif alternanslar simetrik olduğu için, çift mertebeli harmonikler söz konusu değildir $\{n = 1, 3, 5, 7, \dots\}$.

Ampermetre ve Voltmetrelerin efektif değer ölçtüğü, ayrıca harmonik analizörlerinin de genlik değerlerini verdiği göz önünde bulundurularak, harmonik bileşenlerin efektif değerleriyle işlem yapmak yerinde olur. Bir akım veya gerilim dalgasının (harmonik) bileşenleri, sırasıyla $I(I_1, I_3, I_5, \dots)$ ve $V(V_1, V_3, V_5, \dots)$ olarak biliniyorsa, bu bilgilerin tanıtımı için şu yollar izlenebilir:



Şekil 1.13 Harmonik spektrum gösterimi:
2-boyutlu (a) ve 3-boyutlu (b) gösterim

- Harmonik **spektrumu**" gösterimi kullanılabilir. Yatay eksen harmonik mertebesini verirken düşey eksen harmonik genliğini verir. Bu gösterim 2-boyutlu olabileceği gibi 3-boyutlu da olabilir (Şekil 2.1).
- Harmonik histogram gösterimi kullanılabilir (Şekil 1.14). Bu metod harmonik mertebesinin çok olduğu (mesela $n=50$ gibi) hallerde, yatay eksenin daraltılması durumunda tercih edilebilir.



Şekil 1.14 Harmonik histogram gösterimi.

- Harmonik Tablo (çizelge)" gösterimi kullanılabilir. Tüm harmoniklerin topluca gösterilmesi, özellikle veri girişinin yapılmasında ve çıktıların topluca değerlendirilmesinde yardımcı olur.
- Nonlineer yükün uç denklemi (v-i karakteristiği) ile harmoniklerin bir arada gösterimi mümkün olabilir, örnek olarak, deşarj tüpü cinsinden yükler için $F=a + eb(l-b)$ şeklinde (amprik) bir uç denklemi tarif edilmek suretiyle, a ve b katsayılarının aldıkları değerlere bağımlı olarak, harmoniklerin dökümü verilebilir (DİgSILENT Data Systems, Integrated Electrical Engineering Program, Version 9.1). Ancak bu metod pek pratik değildir. Harmonik ölçmeleri sonucu harmoniklerin genlikleri doğrudan alınırken, elde edilmesi - özel yükler dışında çok zor olan uç denkleminin ayrıca uygulanması fazla kullanılan bir yol değildir. Akım veya gerilim harmoniklerinin değeri, fiziksel boyutlarında (Amper veya Volt) verilebileceği gibi, temel bileşen referans alınarak da verilebilir. Harmoniklerin sinüsoidal temel dalgaya göre etkilerinin araştırılması hedeflendiğinden, karşılaştırmada kolaylık sağlamak üzere "temel bileşene oranlama" daha sık kullanılır. Böylece harmonik bileşenler (%) veya per-unit (p.u.) olarak belirtilirler.

Güç sisteminde akım ve gerilim harmoniklerinin ani değerleri aşağıdaki biçimde gösterilebilir:

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} v_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n) \quad (1.3)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t + \delta_n) \quad (1.4)$$

v_n : n. harmonik geriliminin ani değeri,

i_n : n. harmonik akımının ani değeri,

V_n : n. harmonik geriliminin efektif değeri,

I_n : n. harmonik akımının efektif değeri,

ω_1 : temel frekansa (f_1) ait açısal frekans,

θ_n : n. harmonik için gerilime ait faz açısı

δ_n : n. harmonik için akıma ait faz açısıdır.

Ani güç,

$$p(t) = v(t) i(t) \quad (1.5)$$

$p(t)$ 'nin T periyodunda aktif gücü,

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (1.6)$$

bu eşitliklerden aktif güç,

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\theta_n - \delta_n) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \quad (1.7)$$

Farklı frekanslardaki akım ve gerilimlerin aktif güce katkısı yoktur (3.harmonik gerilimi ile 5. harmonik akımının çarpımı gibi).

Harmonikli toplam gerilim,

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (1.8)$$

Harmonikli toplam akım,

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (1.9)$$

olarak bulunur. Eğer gerilim ve akımın tepe değerleri (V_{mn} , I_{mn}) verilmiş ise,

$$V = \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_{mn}^2}{2} \right]^{1/2} \quad (1.10)$$

$$I = \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_{mn}^2}{2} \right]^{1/2} \quad (1.11)$$

ile gösterilir.

Görünen güç,

$$S = V.I \quad (1.12)$$

veya

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (1.13)$$

Burada D, distorsiyon gücüdür ve,

$$D = (S^2 - P^2 - Q^2)^{1/2} \quad (1.14)$$

olarak ifade edilir.bu değer sinüsoidal işaretli lineer devrelerde sıfır değerindedir.

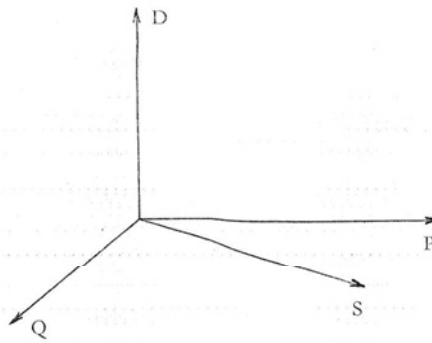
Reaktif güç,

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin(\theta_n - \delta_n) \quad (1.15)$$

Sinüsoidal olsun veya olmasın toplam güç faktörü,

$$GF = P / S \quad (1.16)$$

'dir ve aktif güç eşitlik (4.4)'de gösterildiği gibi temel frekans bileşeni ve diğer harmonik bileşenlere ait güçlerin toplanması ile bulunur (Kocatepe vd.,2003)



Şekil 1.15. Harmonikli durumda güçlerin grafik (vektörel) gösterimi.

1.6.1 Toplam Harmonik Distorsiyon (THD)

THD, harmonik içeren periyodik dalga şeklinin tam bir sinüs dalga şeklinden sapmasını tespit için kullanılır. Sadece temel dalgadan oluşan bir sistem için THD sıfırdır.

THD, harmonik bileşenlerinin efektif değerlerinin, temel bileşen efektif değere oranıdır. Eşitlik (4.15)'de akım ve gerilim için THD gösterilmektedir,

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad \text{ve} \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (1.17)$$

THD'nin gerilim için diğer eşitlikleri aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$THD = \frac{[V^2 - V_1^2]^{1/2}}{V_1} \quad \text{veya} \quad THD = \left[\left(\frac{V}{V_1} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \quad (1.18)$$

1.6.2 Toplam Talep Distorsiyonu (TTD)

Yüke ait bir değer olup toplam harmonik akım distorsiyonu olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (1.19)$$

I_L : yük tarafında, besleme sisteminin ortak bağlantı noktasından çekilen, temel frekanslı maksimum akımdır. Hesap yapılacak tarihten bir yıl öncesine kadar süre zarfında yük tarafından talep edilen maksimum akımların ortalaması olarak hesaplanır .

1.7 Uluslararası Sınırlamalar

Son yıllarda harmoniklerin artmasına bağlı olarak çeşitli standartların ortaya konulması zorunlu hale gelmiştir. THD, TTD'nin akım ve gerilim değerlerinin maksimum sınırlarını belirlemeye ihtiyaç duyulmuştur.

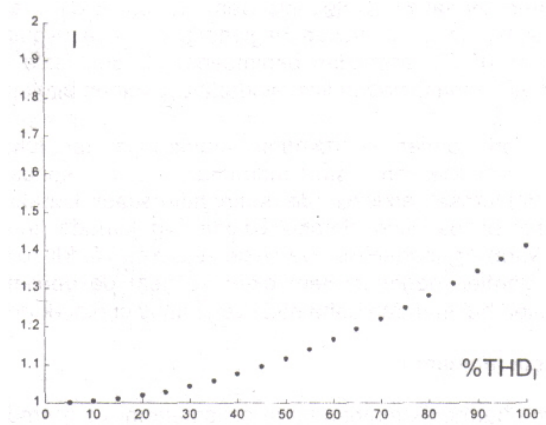
Toplam harmonik distorsiyon (THD) ve toplam talep distorsiyonu (TTD) standartlarda bozulma ölçütleri olarak kullanılmaktadırlar. Akım ve gerilim büyüklüklerinin , harmonikleri içermesi durumundaki efektif değerleri THD'ye bağlı olarak aşağıdaki

gibi ifade edilebilir:

$$V = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{\text{THD}_V}{100}\right)^2} \quad \text{ve} \quad I = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{\text{THD}_I}{100}\right)^2} \quad (1.20)$$

V_1, I_1 : akım ve gerilimin efektif olarak temel bileşenidir.

Akım ve gerilim değerleri distorsiyon ile beraber artış göstermektedir. Akım için bu durum Şekil 1.13’de belirtilmiştir (Kocatepe vd.,2003).



Şekil 1.16 Akımın toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi (I_1 =sabit)

1.8 Harmonik Standartları

Şebekenin ve sistemdeki diğer yüklerin harmoniklerden zarar görmesini engellemek amacı ile harmonik bileşenleri sınırlandırılmışlardır ve buna bağlı olarak çeşitli standartlar oluşturulmuştur.

IEEE 519 ve VDE-0839’da elektrik dağıtım ve üretimi ile ilgili standartlar ortaya konmuştur. Bu standartlar Toplam Harmonik Distorsiyon değerine göre belirlenmiştir. Çizelge 1.2’de çeşitli ülkeler için THD değerleri verilmiştir.

Çizelge 1.2 Çeşitli ülkeler için THD değerleri

Ülke	Gerilim (kV)	THD _v (%)
A.B.D.	Genel	5
	2.4-69	1,5
	≤ 115	8
	Özel	1,5
Almanya	2.4-69	8
	< 115	1,5
Almanya	Tüm Gerilimler (15.harmoniğe kadar)	10
Fransa	Tüm Gerilimler	1.6
İngiltere	0.415	5
	6.6-11	4
	33-66	3
	132	1.5

IEC 61000-2-2 konutlar ile ilgili, IEC 61000-2-4 ise endüstriyel tesisler için 2. sınıf olarak verilen standart değerlerini içerir (Çizelge 1.3 ve Çizelge 1.4).

Çizelge 1.3 Konutlar ile ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC 61000-2-2 gerilim distorsiyon limitleri

harmonik

Tek harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün katı Harmonikler	
n	% V _n	n	% V _n	n	% V _n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6	0,5	15	0,3
13	3	8	0,5	≥ 21	0,2
17	2	10	0,5		
19	1,5	≥ 12	0,2		
23	1,5				
25	1,5				
> 29	k				

$$(k = 0,2+12,5/n)$$

Çizelge 1.4 Endüstriyel santraller için IEC 61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri

Tek harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün katı Harmonikler	
n	% V _n	n	% V _n	n	% V _n
5	8	2	3	3	6
7	7	4	1,5	9	2,5
11	5	≥ 6	1	15	2
13	4,5			21	1,75
17	4			≥ 27	1
19	4				
23	3,5				
25	3,5				
≥ 29	m				

$$[m = 5\sqrt{(11/n)}]$$

Avrupa standartları EN 50160'da alçak gerilim ve orta gerilime ait gerilim harmoniklerinin sınır değerleri Çizelge 1.5'de verilmiştir.

Çizelge 1.5 Konutlarla ilgili alçak ve orta gerilim şebekleri için harmonik distorsiyon limitleri

Tek harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün katı Harmonikler	
n	% V _n	n	% V _n	n	% V _n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6...24	0,5	15	0,5
13	3			21	0,5
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

1.9 Harmonik Ölçümleri

Harmonik ölçümlerinde aşağıdaki kriterlere göre hareket edilir ve gerekli kontroller ve ölçümler yapılır:

- Sürekli bir analizin (ölçümler arasında zaman boşluğu olmaksızın) gerekli olmadığı kabul edilen uygulamalar:

1) Sabit harmonik akımların ölçümü (TV alıcıları, aydınlatma dimmerleri vb. tarafından üretilen),

2) Bir besleme sisteminde, harmoniklerin ani etkilerinin önemli kabul edilmediği, uzun vadeli harmonik ölçümleri.

b) Sürekli bir gerçek-zaman analizinin gerekli olduğu durumlar. Elektronik faz kontrol ve regülasyon uygulamaları, motor dönüş yönünün ve hızının değişmesi gibi sebeplerden oluşan değişken harmonik akımlarının ölçümü, bu tip ölçümlerdir.

c) Sürekli bir gerçek-zaman ölçümünün kesinlikle gerekli olduğu durumlar. Zararlı olabilen, çok hızlı değişen harmonikler ya da çok kısa harmonik sıçramaların (1 s veya daha kısa süreli oluşabilen değişimler) analizi için bu tip ölçümler gerekli olabilecektir.

Veri değerlendirilmesi için, aşağıdaki zaman aralıklarının kullanılması tavsiye edilir:

çok kısa aralık $(T_{vs}) : 3 \text{ s}$

kısa aralık $(T_{sh}) : 10 \text{ dk.}$

uzun aralık $(T_L) : 1 \text{ saat}$

bir gün aralığı $(T_D) : 24 \text{ saat}$

bir hafta aralığı $(T_{wk}) : 7 \text{ gün}$

1.10 Direnç, Endüktif ve Kapasitif Reaktansın Harmonikle Değişimi

Bir iletkenin içinden geçen akımın frekans sebebi ile iletken yüzeyinde homojen dağılması sonucu iletken direncinin değişmesi deri etkisi (skin effect) olarak tanımlanır.

Deri etkisi olayının sonucu; doğru akımdaki direncine göre iletkenin alternatif akım direncinin artması ve endüktansının azalmasıdır.

1.10.1 Harmoniklerin Direnç Üzerindeki Etkisi

İletkenin sinüsoidal akımdaki temel bileşen omik direnç değerine (R_1) nonsinüsoidal akım akışı halinde harmoniklerin her biri için R_n direnci ilave olmaktadır. Deri etkisi ile oluşan direnç değeri Arnold'un verdiği bir bağıntıyla hesap edilebilir (Arnold, 1938);

r_{dc} iletkenin km başına doğru akım direnci, n harmonik mertebesi $f_1(\text{Hz})$ temel frekans olmak üzere bir $x(n)$ değişkeni hesaplanmıştır.

$$x(n) = 0.050132 \sqrt{\frac{nf_1}{r_{dc}}} \quad (1.21)$$

olmak üzere h . harmonik frekansı için iletkenin direnci,

$$r_{ac} = \begin{cases} 0 \leq x(n) \leq 3 & \text{için} & r_{ac} = \frac{1}{2} \left[1 + \left(1 + \frac{x(n)^4}{48} \right)^{1/2} \right] r_{dc} & (\Omega/\text{km}) \\ x(n) > 3 & \text{için} & r_{ac} = \left[0.26 + \frac{x(n)}{2,828} \right] r_{dc} & (\Omega/\text{km}) \end{cases} \quad (1.22)$$

olarak tanımlanmıştır. Bu bağıntılarda görüldüğü gibi harmonik mertebesi ve dolayısı ile frekans yükseldikçe hat iletkenlerinin direnç değeri artmaktadır.

Pratikte enerji şirketleri tarafından gerilim değerine bağlı olarak tanımlanan düzeltme faktörleri ile iletkenin temel frekanstaki direnci R_1 çarpılarak n .harmonik frekansındaki direnç değeri kolayca belirlenebilmektedir.

Çizelge 1.6 Çeşitli gerilimler için düzeltme faktörleri ile direnç değerlerinin belirlenmesi

Enerji Şirketi	Gerilim (kV)	Harmonik Mertebesi (n)	n. Harmonik Frekansındaki Direnç (Ω)
NGC (İngiltere)	400, 275	$n \geq 1,5$	$0,74R_1 \cdot (0,267 + 1,073 \cdot \sqrt{n})$
EDF (Fransa)	132	$n \geq 2,35$	$R_1 \cdot (0,187 + 0,532 \cdot \sqrt{n})$
	400, 225	$n \geq 2$	$0,74R_1 \cdot (0,267 + 1,073 \cdot \sqrt{n})$
	150, 90	$n \geq 2$	$R_1 \cdot (0,187 + 0,532 \cdot \sqrt{n})$

1.10.2 Harmoniklerin Reaktanslar Üzerine Etkisi

Elektrik güç sistem elemanlarının modellenmesinde endüktif ve/veya kapasitif reaktanslar geniş bir yer tutmaktadır. Temel frekanstaki (f_1), endüktif reaktansı $X_L^{(1)}$ olan bir bobin ile temel frekanstaki kapasitif reaktansı $X_C^{(1)}$ olan bir kondansatör elemanının n . harmonik frekansındaki $X_L^{(n)}$ ve $X_C^{(n)}$ reaktansları,

$$X_L^{(n)} = \omega L = 2\pi f L = 2\pi n f_1 L = n \underbrace{2\pi f_1 L}_{X_L^{(1)}} = n X_L^{(1)} \quad (1.23)$$

$$X_C^{(n)} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi n f_1 C} = \frac{1}{n \underbrace{2\pi f_1 C}_{X_C^{(1)}}} = \frac{X_C^{(1)}}{n}$$

eşitlikleri ile bulunur. Harmonik mertebesi arttığı zaman endüktif reaktans artmakta kapasitif reaktans ise azalmaktadır (Kocatepe vd.,2003).

1.11 Harmonik Bileşenlerinin Faz Sırası

Nonlineer yükler içeren üç fazlı dengeli bir sistemde, faz-nötr geriliminin temel bileşeninin efektif değeri V_1 ve temel frekans için hesaplanan açısal hız ω_1 olmak üzere, L1, L2, L3 faz gerilimlerinin temel bileşenlerinin ani değerleri sırasıyla,

$$\begin{aligned} &= \sqrt{2} V_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) \\ &= \sqrt{2} V_1 \sin(\omega_1 t - 2\pi/3 + \phi_1) \\ &= \sqrt{2} V_1 \sin(\omega_1 t + 2\pi/3 + \phi_1) \end{aligned} \quad (1.24)$$

olarak ifade edilebilir. Gerilimin n. harmonik bileşeninin efektif değeri V_n olmak üzere; L1, L2, L3 faz gerilimlerinin n. harmonik bileşenlerinin ani değerleri sırasıyla,

$$\begin{aligned} &= \sqrt{2} V_n \sin(n\omega_1 t + \phi_n) \\ &= \sqrt{2} V_n \sin(n\omega_1 t - 2\pi n/3 + \phi_n) \\ &= \sqrt{2} V_n \sin(n\omega_1 t + 2\pi n/3 + \phi_n) \end{aligned} \quad (1.25)$$

eşitlikleri ile hesaplanabilir. (4.23) eşitliğinde görüldüğü gibi, harmonik mertebesi n'e bağlı olarak harmonik bileşenlerinin faz gerilimlerinin faz açılan arasında pozitif sequence, negatif sequence veya sıfır sequence faz sırasına uygun olarak $\pm 120^\circ$ veya 0° faz farkı meydana gelmektedir. 4.23 eşitliği ile 2.harmonik ve 3.harmonik faz gerilimlerinin ani değerleri sırasıyla,

$$\begin{aligned} &= \sqrt{2} V_2 \sin(2\omega_1 t + \phi_2) \\ &= \sqrt{2} V_2 \sin(2\omega_1 t + 2\pi/3 + \phi_2) \\ &= \sqrt{2} V_2 \sin(2\omega_1 t - 2\pi/3 + \phi_2) \end{aligned} \quad (1.26)$$

$$\begin{aligned}
&= \sqrt{2} V_3 \sin(3\omega_1 t + \phi_3) \\
&= \sqrt{2} V_3 \sin(3\omega_1 t + \phi_3) \\
&= \sqrt{2} V_3 \sin(3\omega_1 t + \phi_3)
\end{aligned} \tag{1.27}$$

olarak verilebilir.

Dengeli olduğu kabul edilen bir nonlinear yük akımının temel bileşeninin efektif değeri I_1 ve temel frekans için hesaplana açısal hızı ω_1 olmak üzere, L1, L2, L3 fazlarına ait yük akımların temel bileşen ani değerleri sırasıyla,

$$\begin{aligned}
&= \sqrt{2} I_1 \sin(\omega_1 t) \\
&= \sqrt{2} I_1 \sin(\omega_1 t - 2\pi/3) \\
&= \sqrt{2} I_1 \sin(\omega_1 t + 2\pi/3)
\end{aligned} \tag{1.28}$$

olarak tanımlanır. Nonlinear yük akımının n. harmonik bileşeninin efektif değeri I_n olmak üzere; L1, L2, L3 faz akımlarının n, harmonik bileşenlerinin ani değerleri sırasıyla,

$$\begin{aligned}
&= \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t) \\
&= \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t - 2\pi n/3) \\
&= \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t + 2\pi n/3)
\end{aligned} \tag{1.29}$$

eşitlikleri ile hesaplanabilir.

Buradan üç ve üçün katı harmonik bileşenleri için önemli sonuçlar çıkarılabilir. Özel bir durum olarak $k=1,2,3,\dots$ olmak üzere $n=3k$ mertebesindeki harmonik bileşenlerinin (3.,6.,9., ...) ani değerleri (1.26) ve (1.27) eşitliklerine göre;

$$i_{a_{3k}}(\omega t) = i_{b_{3k}}(\omega t) = i_{c_{3k}}(\omega t) = \sqrt{2} I_{3k} \sin(3k\omega_1 t) \tag{1.30}$$

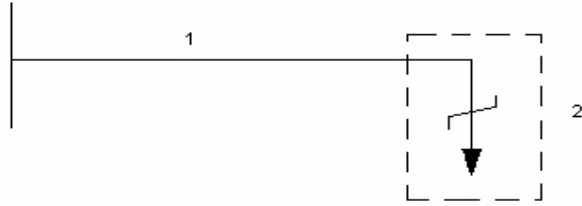
değerini alır. Yukarıdaki eşitlikte de görüldüğü gibi, dengeli şebeke ve yük koşulları altında üç ve üçün katı harmonik bileşenlerinin her üç faz akımları birbirine eşittir.

1.12 Harmoniklerin Modellenmesi

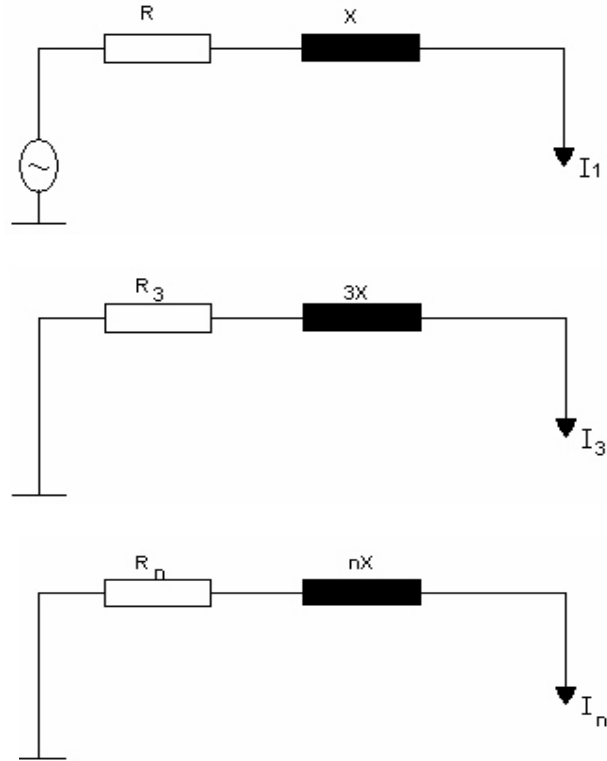
Şekil 1.14’de nonlinear yük içeren basit bir enerji dağıtım hattının modellenmesi göz önüne alınmıştır. Bu modelleme yapılırken aşağıdaki kabuller geçerlidir:

- Besleme gerilimleri dengeli ve sünüsoidaldir.

- Yük akımları dengelidir.
- Hattın omik direnci ve reaktansı lineer özelliktedir.
- Faz iletkenleri arasındaki karşılıklı kuplaj etkisi ihmal edilebilir.
- Bütün şönt (kaçak) kapasiteler ve dirençler ihmal edilebilir.



Şekil 1.17 Nonlinear yük içeren bir enerji dağıtım hattı
1: Enerji dağıtım hattı
2: Nonlinear yük



Şekil 1.18 Tek hat harmonik bileşen modelleri
R: hattın omik direnci
X: hattın reaktansı

Bu durumda n'inci harmonikle ilgili devre denklemi

$$E_n = Z_n \cdot I_n + V_n \quad (n=1,3,5,\dots) \quad (1.31)$$

şeklinde yazılabilir. E hat başı (besleme), V_n ise hat sonu gerilimidir. Hattın empedansı ise

$$Z_a = R_n + jnX \quad (1.32)$$

olacaktır. Burada, R_n değeri (1.22) eşitliğinden veya Tablo 1.6'dan, X_n değeri ise (1.23) eşitliğinden bulunacaktır.

Faz akımlarının dengesiz olması ve alçak gerilim tesisinde nötr iletkeninin bulunması halinde, denklem (1.29) ifadesine ek olarak nötr iletkeni için de denklem yazmak gerekir. Birden fazla yük içeren (d tane yük düğüm-uç noktası olan) bir tesiste, nötr akımı parça parça göz önüne alınabilir. Toplamsallık teoremi yardımıyla n'inci harmonik için nötr akımının değeri

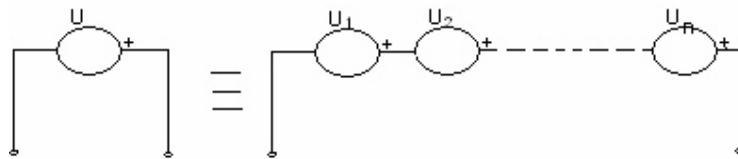
$$I_{n\text{ötr}_n} = \sum_{k=1}^d I_{n\text{ötr}_{n,k}} \quad (1.33)$$

olacaktır.

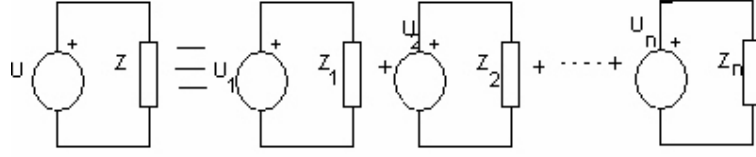
1.13 Süperpozisyon Teoremi

Devrede birden fazla sayıda kaynağın bulunması halinde, sisteme süperpozisyon teoremi uygulanarak devrenin eşdeğerinin bulunması sağlanır. Sistemde Bölüm 1.3'de anlattığımız durumlardan biri dolayısı ile çeşitli harmoniklerin oluşması halinde, sistemin çözümü için süperpozisyon teoremi kullanılır.

Örneğin; bir sistemde çok sayıda nonsinüsoidal gerilim kaynağı olduğunu ve bunların çeşitli harmonikler ürettiğini farz edelim. Bu durumda sistemi ayrı ayrı kaynaklardan beslenen bir devre gibi düşünüp, bu şekilde hareket edebiliriz. (Şekil 1.19 , Şekil 1.20) (Kocatepe vd.,2003).



Şekil 1.19 Nonsinüsoidal gerilim kaynağı eşdeğeri



Şekil 1.20 Nonsinüsoidal beslemeli devrenin eşdeğeri

Bu durumda oluşacak akım ve gerilim harmoniklerinin değerleri için şu eşitlikler ortaya konmaktadır,

$$V = \left[\sum_{n=1}^N V_n^2 \right]^{1/2} \quad (1.34)$$

$$I = \left[\sum_{n=1}^N I_n^2 \right]^{1/2} \quad (1.35)$$

Sistem temel bileşenin yanı sıra, 3. 5. ve 7. harmoniklere sahip ise bu durumda gerilim ve akım değerleri,

$$V = [V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + V_7^2]^{1/2} \quad (1.36)$$

$$I = [I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2]^{1/2} \quad (1.37)$$

olarak bulunur.

2. HARMONİKLERİN BULUNDUĞU DURUMDA NÖTR İLETKENİNİN ANALİZİ

2.1 Nonlineer Yükler Bakımından Alçak Gerilimi Şebekesinin Durumu

Yarıiletken teknolojisine dayalı modern güç elektroniği elemanlarının geliştirilmesi sayesinde güç dönüştürücüleri alanında büyük değişimler gerçekleşmiştir. Bipolar jonksiyonlu transistörler (BJT), metal-oksit yarıiletkenli alan etkili transistörler (MOSFET), yalıtılmış kapılı bipolar transistörler (İGBT) ve MOS kontrollü tristörler (MCT) bu elamanlardandır (Mohanvd., 1989). Bu yeni ve yüksek verim sağlayan teknoloji sayesinde enerji kayıplarında, cihaz boyut ve ağırlıklarında ve maliyetlerde çarpıcı azalmalar mümkün olmaktadır. Günümüzde bu teknolojiye birçok alanda artışı süren bir talep vardır. Bu alanlara şunlar örnek gösterilebilir:

- Mikro imalât teknolojisindeki ilerlemeler sayesinde önemli gelişmelerin ve hızla artan bir kullanım yaygınlaşmasının görülmekte olduğu bilgisayar ve bilgi işlem sistemleri, haberleşme sistemleri ve televizyon vb. elektronik aygıtlar için ihtiyaç duyulan regülasyonlu besleme cihazları ve çoğu zaman kesintisiz güç kaynakları
- Proses kontrolünde kullanılan kompresörler ve pompalar gibi makineler için gereken hız kontrollü motor besleme sistemleri
- Fabrika otomasyonunda robotlar vb. için gerekli servet tahrik sistemleri
- Klima ve mekan ısıtma sistemlerinde kullanılan hız kontrollü, kapasite modülasyonlu ısı pompaları
- Floresan ve diğer deşarjlı aydınlatma sistemleri,
- Endüksiyonla ısıtma.

Bu örneklerin hepsi, eski teknolojinin çeşitli problem ve noksanlıklarına çareler getirdiğinin gözlemlenmesi sonucu olarak modern güç elektroniğinin rağbette olan uygulamalarıdır. Ancak, modern güç elektroniğinin de başka sistem problemlerine yol açtığı fark edilmesi fazla gecikmemiştir. Çünkü modern

güç kontrol yöntemlerinin uygulamaya girmesi ve nonlinear karakterli yüklerin toplam sistem yükü içindeki oranının artışı ile birlikte, elektrik enerji sisteminin harmonik akımlarla aşırı bir "kirlenme" yoluna girdiği gözlenmiştir. Yukarıda örnek verilen uygulamaların çok önemli bir kısmı ise, enerji sisteminin alçak gerilim bölümlerindedir. Dolayısıyla günümüzde alçak gerilim enerji dağıtım sistemleri önemli ölçüde harmonik kirlenmesine açık durumdadır.

2.2 Alçak Gerilim Enerji Dağıtım Şebekesinde Yer Alan Harmonik Kaynakları

Yukarıda sözü geçen uygulamalar çerçevesinde, alçak gerilim sistemlerinde yer alan başlıca harmonik kaynakları olarak şunlardan söz edilebilir:

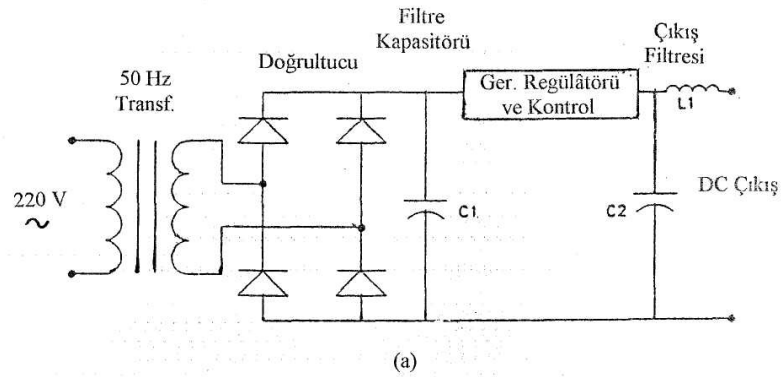
- Anahtarlama güç kaynakları,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Fan, pompa, klima cihazı, asansör, takım tezgahı vb cihazların tahrik motorları için kullanılan yarıiletken temelli hız kontrollü besleme donanımları,
- Çeşitli amaçlar için yarıiletken temelli güç dönüştürücüleri,
- Floresan ve diğer deşarjlı aydınlatma donanımlarında kullanılan demir nüveli endüktif balastlar ve elektronik balastlar.

Yarıiletken "yongalar" ("chip"ler) kullanan modern elektronik cihazlar için genellikle 3 volt ile 15 volt arasında bir de güç kaynağı gerekli olur. Yakın geçmişteki yıllara kadar bu gerilimi elde etmek için bir indirici transformatör, doğrultucu köprüsü, filtre ve gerilim regülatöründen oluşan alışılmış tip besleme üniteleri kullanılmıştır (Şekil 2.1). Doğrultucudan elde edilen doğru akım C1 ve C2 kondansatörleri ve L1 şok bobini ile süzülerek düzgün bir çıkış gerilimi elde edilir. Girişteki transformatörün endüktansının, çekilen akımın dalga şeklindeki bozulmaları önleyici etkisi vardır. Böylece giriş akımının harmonik içeriği düşük kaldığından, bu cihazlar lineer güç kaynakları olarak bilinir

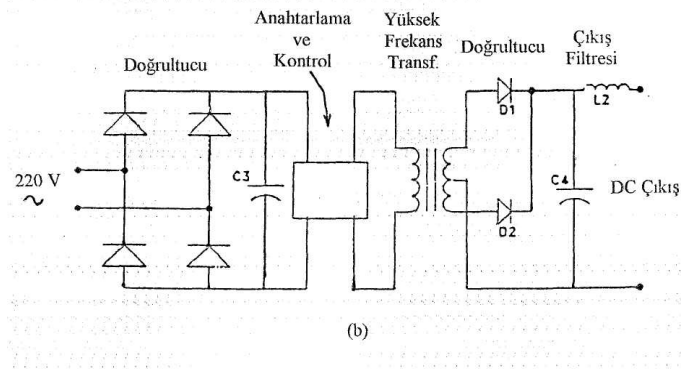
(Dugan vd., 1996). 50 Hz' de çalışan transformatör ve filtre bölümündeki demir çekirdekli bobin, ağır, verimsiz ve pahalıdır.

Şekil 2.2'de prensip şeması görülen modern teknoloji anahtarlamalı güç kaynaklarında ise, girişteki transformatör elimine edilmiş olup, doğrultucu diyot köprüsü doğrudan doğruya 220 voltluk giriştedir. Bu de gerilim, anahtarlama devresi üzerinden 10-100 kHz mertebesinde yüksek frekanslı ac gerilime dönüştürülür. Bu gerilim yüksek frekanslı indirici transformatörden geçirilerek çıkışta yeniden doğrultulur. Yüksek frekans sayesinde buradaki transformatör ve demir çekirdekli filtre bobini, lineer güç kaynağındakine nazaran daha küçük boyutlu, daha hafif ve daha verimlidir.

Bilgisayarlar, yazıcılar, kopyalama makinaları ve diğer birçok tek faz beslemeli elektronik donanımda bugün artık anahtarlamalı güç kaynakları kullanılmaktadır. Bu kaynakların kullanımı, floresan aydınlatmada elektronik balastlar için de yaygınlaşmaktadır.

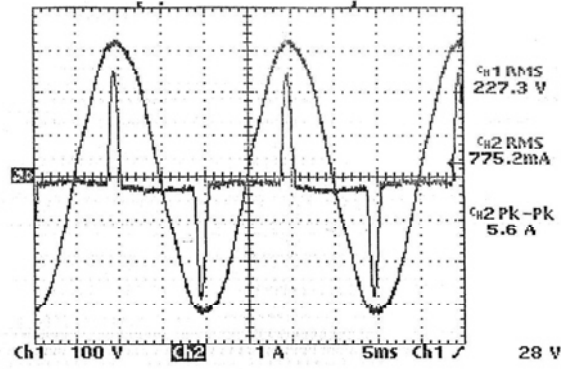


Şekil 2.1 Lineer güç kaynağı,



Şekil 2.2 Anahtarlamalı güç kaynağı.

Anahtarlama güç kaynaklarında giriş akımının dalga biçimi, Şekil 2.2'deki C3 kondansatörünün her bir yarım periyotta yeniden şarj oluşundan ötürü çok kısa darbeler şeklindedir (Şekil 2.3)

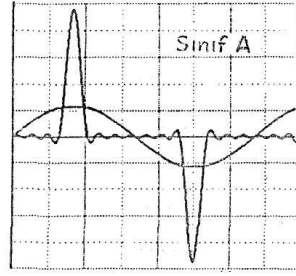


Şekil 2.3 Kişisel bilgisayarlar için kullanılan bir anahtarlama güç kaynağının giriş akımına ait dalga biçimi (Sinüsoidal dalga, cihazın uçlarına uygulanan gerilimi göstermektedir) (Tunçmatik San.ve Tic. Ltd. Şti. 1997).

Enerji dağıtım şebekelerinde halen kullanımı yaygınlaşmakta olan nonlineer yükler, akım dalgası biçimlerine göre, başlıca üç sınıfta toplanabilmektedir (Emanuel vd., 1995). Bu sınıflar aşağıda A. B. C adlandırılmıştır. Şekil 2.4'te bu sınıflara ait tipik akım dalgası biçimleri görülmektedir.

Sınıf A

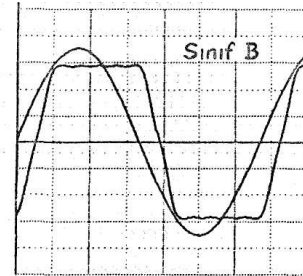
Bilgisayarlar (Şekil 2.3), televizyonlar, elektrikli taşıma aracı batarya şarj cihazları, tek fazlı hız kontrollü motor sürücüler ile elektronik balastların bir kategorisi bu sınıf yüklere girmektedir. Akım dalgasındaki darbe genişliğine bağlı olarak, *akım toplam harmonik distorsiyonu* % 40 ile % 140 arasında veya daha yüksek olabilir.(Akım şekli altta Şekil 2.4'tedir)



Şekil 2.4

Sınıf B

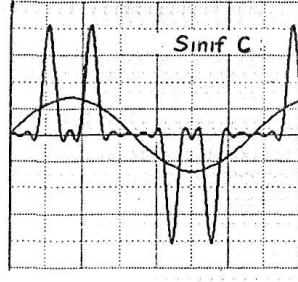
Trapez veya yaklaşık kare biçimindeki bu dalga biçimi, şu tip yüklere özgüdür: floresan aydınlatma, DC tarafında büyük değerde düzeltici endüktans bulunan tek fazlı doğrultucular, bazı batarya şarj cihazları, hız kontrollü de seri motor sürücüler, özel filtreli elektronik balastlar ve akım kaynağı tipi inverterler .(Akım şekli altta Şekil 2.5’tedir)



Şekil 2.5

Sınıf C

Yarım periyot başına çift tepeli bu akım dalgası biçimi, hız kontrollü 3 fazlı AC motor sürücüler için tipiktir. Akım toplam harmonik distorsiyonu % 100'lere kadar çıkabilir, fakat üçüncü harmoniğin zayıflığı (veya yokluğu) halinde ve girişte reaktans kullanımı ile % 60 veya daha aşağıya inebilir. (Akım şekli altta Şekil 2.6’dadır)



Şekil 2.6

2.3 Nötr İletkeninin Durumu

Günümüzde en yaygın olarak kullanılan alçak gerilim sistemi, "üç fazlı dört telli", yani üç adet faz ve bir nötr hattından meydana gelen sistemdir. Böylece, büyüklük ve tiplerine göre üç fazlı ve tek fazlı olabilen alçak gerilimli yüklerin aynı sistemde yer alması mümkün olur. Enerjinin alçak gerilimli alıcı elemanlara ulaşmasını sağlayan bu sistem, endüstriyel tesislerde, ticari kompleks ve binalarda ve yerleşim bölgelerinde dağıtım şebekesi olarak yer almaktadır.

Alçak gerilimli enerji dağıtım sisteminin tasarım ve tesis aşamasında tek fazlı yüklerin kW, çalışma rejimi vb. bakımından üç faz arasında dengeli dağıtılmasına özen gösterilir. Üç fazlı yükler ise, yapıları gereği zaten dengelidir. Böylece normal işletme şartlarında nötr iletkenindeki akımın küçük değerlerde olması ve örnek olarak faz akımının % 20'si dolayını geçmemesi beklenir. Fakat nonlinear yüklerin toplam yük içindeki oranının artışına bağlı olarak, sistemde bu ideal şartların artık hüküm sürmediği durumlar olabilmektedir. Özellikle bilgisayar donanımlarının yoğun olduğu sistemlerde çarpıcı nötr akımı seviyeleri gözlemlenir hale gelmiştir.

ABD'de bilgisayar ve bilgi-işlem ortamının ağırlıklı olduğu 146 mahal üzerinde yapılan bir tarama, bu mahallerin % 22.6'sında nötr iletkenindeki akımın, ortalama faz akımının % 100'ünü aştığını ortaya çıkarmıştır (Gruzs, 1990).

Sadece lineer yüklerin bulunduğu varsayılan bir sistemde, bu yüklerin fazlara dengeli dağılmış olması halinde faz akımlarının toplamı sıfır olduğundan, nötrde akım bulunmaz; ancak fazlarda yük dengesizliği varsa nötrden akım akabilir. Fakat

sistemde nonlinear yükler de varsa nötrde daima akım bulunur ve bunların fazlara dengeli dağıtılması ile nötr akımı yok olmaz. Durum genel haliyle aşağıdaki gibi açıklanabilir. (Not:"3'ün katları" deyiminden "3'ün tek katları" anlaşılmalıdır, çünkü enerji sistemindeki alternatif gerilim ve akım dalgalarında çift sayı mertebeli harmonikler söz konusu değildir.)

- (a) Üç fazlı nonlinear yüklerin 3.ve 3'ün katları mertebelerdeki akım harmonikleri, *her bir yük için* üç faz iletkenlerinde aynı faza (yani homopoler duruma) düşerek toplamda çakışıklarından, faz büyüklüklerinin 3'er misli akımlar olarak nötr iletkenine yığılırlar. Sadece yükler arasında olabilecek spektrum açısı farkları ve şebeke empedanslarındaki gerilim düşümleri, bu 3'er misli büyüklükteki harmoniklerin nötr iletkeninde tam üst üste düşmelerini (yani global toplamlarının tam aritmetik toplamlar olmasını) engelleyebilir. Aynı ayrı yük noktalarının üçer fazında dengeli çalışma halinde bulunan eş karakterli tek fazlı nonlinear yükler için de aynı durum geçerlidir (Fakat bunların üç fazda dengeli çalışmada olmamaları halinde, spektrum "data"ları kısmi yüklerde genellikle değişmiş bulunacağından (IEEE Standard 519-1992), 3. ve 3'ün katı mertebeli harmonikler bakımından durumları daha ziyade (b)'deki gibi de olabilecektir.).
- (b) Üç faza dağıtılmış farklı karakterlerde tek fazlı nonlinear yüklerin 3. ve 3'ün katı mertebeli akım harmonikleri, özellikle spektrum açısı farkları yüzünden çakışma durumundan oldukça ayrılabilmelerine rağmen gene de hatırı sayılır bileşkerler halinde nötr iletkenine yığılırlar.
- (c) (a)'da belirtilen nonlinear yüklerin temel bileşen ve 5., 7., 11., 13. vb. harmonik akımları, üç faza dengeli dağıldıklarından, toplamda sıfır olur ve dolayısıyla bunların nötr akımına katkıları olmaz.
- (d) (b)'de sözü geçen ve zaten spektrum farkları yüzünden dengeli olamayan farklı karakterli tek fazlı nonlinear yüklere ve (a)'da parantez içinde belirtildiği gibi fazlar arasında dengeli çalışmayan eş karakterli

tek fazlı nonlinear yüklere ait akımların temel bileşen ve 5., 7., 11., 13. vb. harmonikleri ise, üç fazın toplamında sıfır olmadıklarından, fazör toplamaları halinde nötr akımına katılırlar.

- (e) Üç fazlı lineer yüklerden nötr akımı kaynaklanamaz. Ancak, tek fazlı lineer yükler, gerek kuruluştan gelen ve gerekse çalışma rejimlerine ve eşzamanlılık durumlarına göre değişen fazlar arası dengesizlikleri oranında nötr akımına temel bileşen katkısında bulunurlar. Bu katkı zaman zaman hatırı sayılır bir ölçüde olabilir.

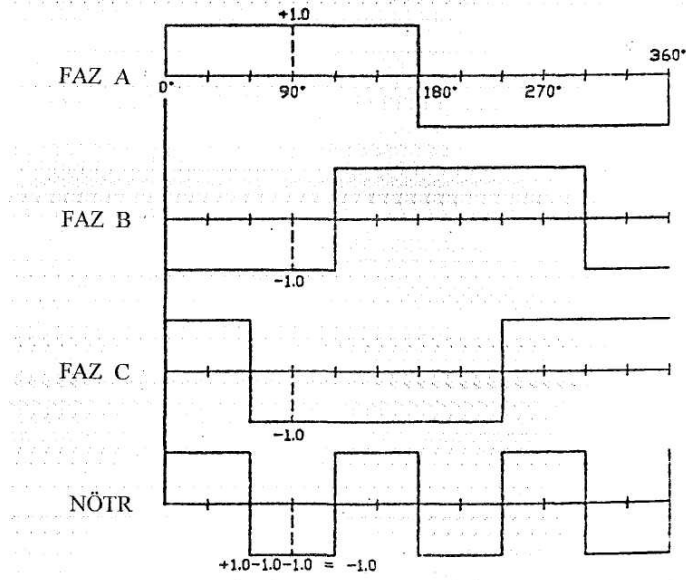
Özetle, 3. ve 3'ün katları mertebelerdeki harmonikler, fazlara ister dengeli, ister dengesiz dağılmış olsunlar, nötr iletkeninde ağırlıklı olarak bulunurlar; bu bulunuş, faz değerlerinin aritmetik toplamına eşit veya ona yakın büyüklüklerde olur. Temel bileşen ve 5., 7., 11., 13. vb. harmonikler ise sadece dengesiz olmaları halinde nötr akımında mevcut olurlar.

Şekil 2.7'de 3 fazlı nonsinüsoidal akımların dengeli olmaları halinde bile toplamalarının sıfır olmayıp 3. ve 3'ün katı mertebeli harmoniklerden meydana gelen nötr akımlarına sebep oluşlarının örneği görülmektedir. Yine şekildeki nötr akımında ise 3. harmoniğe ilâveten 3'ün katı mertebeli harmoniklerin de fark edilir derecede mevcut oluşu, nötr akımının sinüs değişiminden uzak dalga şeklinden bellidir.

Dolayısıyla, lineer olmayan yüklerin de bulunduğu üç fazlı dört iletkenli alçak gerilim dağıtım sistemlerinde (bilhassa da yüklerin çalışma rejimleri ve aralarındaki eşzamanlılık derecesi bakımından önemli farklılık ve değişimlerin olabildiği tesislerde) tedbir alınmadığı takdirde nötr iletkeninde ciddi aşırı akımların beklenebileceği, gerçekten ortaya çıkmaktadır.

Literatürde, faz-nötr beslemeli bilgi işlem ve elektronik ofis donanımının ağırlıklı olduğu mahallerde faz akımının 1.73 katma kadar mertebede nötr akımlarına rastlandığının saptandığı bazı araştırmaları açıklayan ve nötr hattı olarak faz iletkenine eşit kesitte çift iletken kullanılmasını tavsiye eden kaynaklara da rastlanmaktadır (Computers and Business Equipment Manufacturers Association.

{CBEMA}, 1988; Grusz, 1990). Nötr iletkeninin faz iletkenleri ile aynı kesitte olduğu hallerde, faz akımının 1.73 katı değerinde bir nötr akımı, nötr iletkeninde, faz iletkenlerindeki ısınmanın $(1.73)^2=3$ katı mertebede bir ısınmaya yol açacaktır.



Şekil 2.7 Üç fazlı dengeli nonsinüsoidal akımlar halinde nötr akımının meydana gelmesine bir örnek (Gruzs, 1990).

2.3.1 Harmonikli nötr akımlarının sebep olabildiği problemler

Harmoniklerin daha önce değinilen etkilerinin dışında, harmonikli nötr akımlarının yol açabileceği şu problemlerden söz edilebilir.

- Nötr iletkeninde aşırı ısınmalar ve bununla bağlantılı ilave enerji kayıpları meydana gelecektir.
- Nonlineer yüklerin yol açtığı harmonik yönünden zengin nötr akımları çoğunlukla "tepe değeri / efektif değer" oranı yüksek olan akımlar olduğundan, harmonik frekanslardaki şebeke empedansları üzerinde bunların yapacağı gerilim düşümleri, şebekede gerilim dalgalarını "basık tepeli" olacak biçimde bozacaktır. Bu gerilim distorsiyonu da, motor vb. elektromanyetik elemanlarda ek ısınmalara yol açacaktır.

- Nötr iletkenindeki 3. ve 3'ün.tek. katı mertebeli harmonik akımlar üç fazlı sistemde homopoler özellikte olduklarından, bunlar üçgen / yıldız bağlı dağıtım transformatörlerinin giriş hat akımlarına yansımaya üçgen bağlı primer sargılarda aynı mertebeli harmonik sirkülasyon akımlarının dolaşmasına sebep olur. Bu ise, bir yandan transformatörlerde ilave bir ısınma ve diğer yandan primer devredeki aşırı akım cihazlarının gerçek durumu algılayamaması demektir.
- Elektriksel gürültünün bir çeşidi, nötr-toprak arası gerilim farkı niteliğinde olanıdır. Yüksek harmonikli nötr akımlarında, nötr iletkeninin harmonik frekanslardaki empedansı üzerinde önemli gerilim düşümleri ortaya çıkabilir. Bunlar, yüklerin bağlantı noktalarına nötr-toprak arası elektriksel gürültü olarak yansır. Bu ise bilgisayarlar, programlanabilir kontrolörler gibi hassas elektronik cihazların çalışmasını bozabilir (Gruzs, 1990; Dugan vd., 1996).
- Anahtarlama vb. güç kaynaklarında giriş tarafı kondansatörünün tam dolması gerilimin tepe değerine bağlı olduğundan, yukarıda sözü geçen "basık tepeli" gerilim dalgası bu güç kaynaklarına düşük gerilim gibi görünecektir (Gruzs. 1990).

2.4 Nötr İletkeninden Geçen Harmonikli Akınını Şebeke Üzerindeki Etkinliğinin Analizi

Bu çalışmada üzerinde durulan nötr iletkeninden geçen harmonik akımı bileşenleri şebekeyi

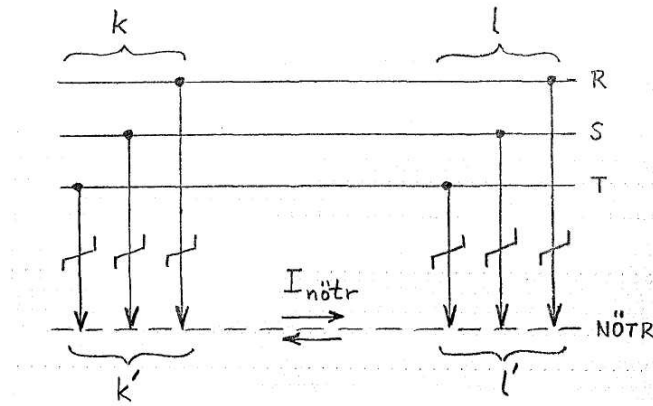
- Nötr iletkeninin ısınması yönünden,
- Nötr iletkeninde ek I^2R kayıplarına yol açılması bakımından

olumsuz yönde etkileyecektir. Yalnız, bu çalışmanın konusu itibarıyla, bu akımların yalnızca Nötr iletkenleri üzerindeki ısınma etkilerine değinilecektir

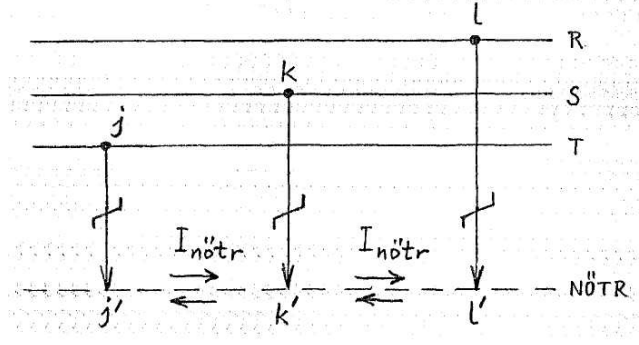
"d" adet düğüm (yük bağlantı) noktası bulunan bir alçak gerilim şebekesinde, "harmonik akım dağılımı" analizi yapıldıktan sonra,

- (Tüm düğümler arasındaki) her bir faz iletkeni parçasından geçen akımların harmonik bileşenleri,
- Şebeke boyunca (tüm düğümlerin görüntüleri arasındaki) nötr iletkeni parçalarından geçen akımların harmonik bileşenleri (Şekil 3.5)'de elde edilecektir

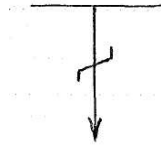
Şekil 2.8'deki nötr akımının yönü, beslenme noktasının sayısı, hattın topolojisi, hat yüklerinin (faz güçlerinin) değerleri gibi parametrelere bağlı olarak soldan sağa veya sağdan sola olabilir. Tek taraftan beslenen radyal ve dalbudak şebekelerde nötr akımı (dolayısıyla harmonik bileşenler) için "tek" yön söz konusu iken, iki taraftan beslenen radyal şebekeler ile ring ve gözlü şebekelerde "farklı" yönler ortaya çıkabilir. Şekil 2.8'den görüldüğü gibi, harmonikli nötr akımının etkinliğinin araştırılması çerçevesinde, (b) deki düzende, (a) daki düzene göre 2 kat daha fazla "nötr parçası" dikkate alınacaktır. Her nötr parçasından farklı harmonik bileşenler akacağı için, gerek "ısınma", gerekse "ek kayıplar" bakımından yapılacak incelemelerde, ortaya konulacak bağıntılar "d" adet düğüm noktasını içine alacaktır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.8 Bir alçak gerilim şebekesinde nonlinear yüklerin iki farklı bağlantısı sonucu nötr akımları: yüklerin aynı noktadan beslenmesi (a) ve yüklerin faz atlanarak (ötelenmiş olarak) beslenmesi (b).

Nonlinear yük gösterimi (c). (j', k' ve l', görüntü noktalarıdır.)

2.4.1 Isınma yönünden harmonikli nötr akımının etkinliği

Bir alçak gerilim şebekesinde nötr akımının ısınma yönünden etkinliği şunlara göre ele alınmak durumundadır:

- Harmonik bileşenlerin akım yoğunluğu,
- Harmonik bileşenlerden en büyük olanının temel bileşene oranının mertebesi,
- Maksimum harmonik mertebesi,
- Nonlinear yüklerin günlük yüklenme programı (saatlik, tam yük, yarım yük, % 20 aşırı yük vb.),
- Nonlinear yüklerin şebekede yerleşim biçimi
- Yükler arasındaki mesafeler (k-l veya j-k-l aralıkları),
- Besleme noktalarının sayısı,
- Nötr iletkeninin malzemesi ve yapım özelliği,
- Nötr iletkeninin şebeke boyunca kesitinin değişimi (Uygulamada, besleme noktasından itibaren gittikçe küçülen, böylece malzemeden maliyet

minimizasyonu sağlayan kademeli kesit kullanmak yerine çoğunlukla sabit kesit yaklaşımı tercih edilmektedir).

Bir alçak gerilim şebekesinde nötr iletkenindeki harmonik bileşenlerin yol açtığı aşırı ısınma iki şekilde ortaya konulabilir:

Harmonik akım dağılımı sonunda, k'-l' veya j'-k'-l' arasındaki akımlar içindeki en büyük harmonik distorsiyon akımı belirlenir. Bu akım, nötr akımının temel bileşen dışındaki harmonik bileşenlerini ihtiva eder:

$$I_{n\ddot{o}tr,h} = \left\{ \sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots} \right\}_{n\ddot{o}tr} \quad (2.1)$$

Bu akımın temel bileşene nazaran yol açtığı ek ısınma, "iletken ısınma çizelgesinden" görülebilir. Veya analitik olarak bağıl ısınma için

$$= \frac{\left\{ I_1^2 + I_h^2 \right\}_{n\ddot{o}tr}}{I_{n\ddot{o}tr,1}^2} \quad (2.2)$$

değeri yazılabilir. Diğer taraftan, harmoniklerin ısınma üzerindeki etkileri akım yoğunluğu vasıtasıyla de gösterilebilir; şöyle ki:

$$J_{n\ddot{o}tr} = \frac{I_{n\ddot{o}tr,1}}{q} \quad (A/mm^2) \quad (2.3)$$

$$J'_{n\ddot{o}tr} = \frac{\left\{ I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots \right\}_{n\ddot{o}tr}^{1/2}}{q} \quad (A/mm^2) \quad (2.4)$$

ifadeleri kullanılarak "ısınma $\Leftrightarrow$ akım yoğunluğu" ilişkisinden ;
($J'_{n\ddot{o}tr} > J_{n\ddot{o}tr}$ olduğundan) ısınma artışı kolaylıkla görülebilir.

2.5 Isınmanın Kablo Ömrüne Tesiri ve Arrhenius Yaklaşımı

2.5.1 Svante August Arrhenius (1859 - 1927)

Henüz 22 yaşında elektriğin sulu çözeltilerden geçişi ile ilgili olarak bir çok deney yapan Arrhenius, doktorasını hazırlamak için bu deneylere devam etmeye karar verdi. Upsala Üniversitesindeki laboratuvarında, yüzlerce çözelti üzerinde, çok geniş bilgiler topladı. Bunlara dayanarak, sulu çözeltilerin yüklü tanecikler yani iyonlar içerdiği hipotezini ileri sürdü. Bu, o sıralarda devrim yaratıcı bir görüştü; profesörleri bu hipotezi kendi düşüncelerinden o kadar farklı gördüler ki ona "doktor" ünvanını istemeyerek verdiler.

Arrhenius tezinin örneklerini diğer bilim adamlarına gönderdi fakat bu köklü düşünceleri ancak bir kaç kişi ciddiye aldı. Almanyalı büyük bilgin Ostwald da bunlardan biriydi ve Arrhenius'la tanışmak için İsveç'e gitti. Bu büyük bilim adamı tarafından yüreklendirilen Arrhenius, Almanya ve Hollanda'ya giderek incelemeler yaptı. 1889 da " Sulu Çözeltilerde Maddelerin Ayrışması " başlıklı çalışmasını yayınladı. Sonra Leibzig Üniversitesine profesör olmak üzere çağrıldı; ama o Stocholm'da bir lise öğretmeni olmayı yeğledi. İleri sürdüğü kuram hala genel bir kabul görmüş değildi. Kendisine karşı çıkanlar, onun görüşlerini "vahşi İyonyalıların göçü" diyerek küçümsüyorlardı. Uzun tartışmalar sonucunda 1893'te Stockholm'de profesör oldu. Almanyadaki bilim adamları Arrhenius'a büyük destek verdi. Profesör olarak atanmasından iki yıl sonra rektör seçildi ve daha sonra da "Çözünmenin elektrolitik kuramını ortaya koyarak kimyanın gelişmesine sağladığı üstün hizmetler için" Nobel Kimya Ödülünü kazandı. (1903) Böylece uzun bir süre sonunda da olsa hak ettiği başarının sonuçlarını elde etti. Kendisine Berlin'de kimya profesörlüğü önerildi. Ancak o sıra İsveç Kralı Fizikokimya Nobel Enstitüsünü kurdu; 1905 yılında da Arrhenius bu kurumun direktörü oldu. Ölümüne dek, yorulmaz bir deneyci ve çok yönlü bir bilim adamı olarak çalıştı.

Burada kullanacağımız formüller ise, ünlü bilim adamının, ısınmanın, bazı yalıtkan malzemelerin ömürlerine olan tesirlerini ortaya koymaya çalıştığı amprik ifadelerdir.

2.5.2 İzoleli güç Kablolarının Aşırı ısınmadan kaynaklanan Ömür Kayıpları

2.5.2.1 Sembol Listesi:

$I_B =$	Devreden geçmesi tasarlanan akım
$I_Z =$	Kablo akım taşıma kapasitesi
$I_E =$	Kabloya acil durumlarda yüklenen akım
$I_S =$	Kablodan t_h süresince geçen aşırı yüklenme akımı
$I_n =$	Koruma aygıtlarının açma akımı
$I_f =$	Koruma aygıtlarının kesinlikle açma yapacağı akım değeri
$\emptyset_0 =$	Ortam sıcaklığı
$\emptyset_Z =$	Kablonun normal yüklenme sıcaklığı
$\emptyset_H =$	Kablonun t_h süresi sonundaki sıcaklık artışı
$\emptyset_S =$	Kablonun I_S akımı geçtiği süredeki kararlı sıcaklığı
$t_h =$	Kablodan I_S akımı geçerken aşırı ısınma süresi
$t_c =$	Kablodan I_Z akımı geçerken soğuma süresi
$t_{hc} =$	Kablonun ısınma ve soğuma süreleri toplamı ($t_h + t_c$)
$t_f =$	Koruma düzeneğinin açma süresi
$K =$	Kablo için termal zaman sabiti
$230 =$	Sıfır direnç sıcaklık değeri (Bakır=234 , Alüminyum=228)
$a, b =$	İzolasyon malzemeleri için Arrhenius parametreleri

$D(\emptyset)=$ Bir kablunun $\emptyset$ sıcaklığındaki ömrü (saat)

$d(\emptyset)=$ Bir kablunun $\emptyset$ sıcaklığındaki ömrü (saniye)

$d(\emptyset_z)=$ Bir kablunun $\emptyset_z$ sıcaklığındaki ömrü , normal ömür (saniye)

$L(\emptyset,t)\%_0=$ Kablunun t süresi ve $\emptyset$ sıcaklığı yüzünden oluşan ömür kaybı

(Kablo ömrünün bindeleri olarak tanımlanır)

$L(\emptyset_z,t)\%_0=$ Kablunun t süresi ve $\emptyset_z$ sıcaklığı yüzünden oluşan ömür kaybı

(Kablunun normal yaşlanması. Ömrünün bindeleri olarak tanımlanır)

2.5.2.2 Kablunun ömür kaybı hesaplanırken izlenecek yöntem

Kablolar, belirtilen değerdeki bir akımı (I_z), belirli bir süre için (birkaç yıl) sürekli olarak gece ve gündüz taşıyabilecek şekilde tasarlanırlar. I_z ve Q_z değerleri birbirleriyle ilişkili olarak kablunun sürekli hal sıcaklığına tesir ederler.

Arrhenius modeline göre, bir kablunun termel yaşlanması :

$$\text{Log}D(\emptyset)= a + (b/(\emptyset+273)) \quad (2.5)$$

olarak tanımlanır.

Bazı araştırmacılar ise formülü $d(\emptyset)$ 'ya (termal ömüre) uyarlamışlardır;

$$d(\emptyset) = 10^{(a+\log 3600+(b/(\emptyset+273)))} \quad (2.6)$$

Sonuçta da t süresine ve $\emptyset$ sıcaklığına bağlı olarak kablunun binde cinsinden ömür kayıplarını modelleyebilmek amacıyla aşağıdaki formülü öngörmüşlerdir:

$$L(\emptyset,t)\%_0 = t*1000 / d(\emptyset) \quad (2.7)$$

Bir kablunun ömrünü ortalama 20 yıl kabul eder ve bu süreyi saniye cinsinden ifade etmek istersek:

$$20 \text{ yıl} = (60*60*24*365*20) = 0,63072*10^9 \text{ saniye} = \alpha * 10^9 \text{ saniye} (\alpha \text{ yaklaşık } 2 / \pi)$$

Yine 20 yıl için kablonun normal yüklenme sıcaklığındaki ($\emptyset_z$) ömrü tanımlamasını yapmak sanıyorum ki uygun olacaktır. Buna göre;

$$d(\emptyset_z) = (60*60*24*365*20) = 10^{(a+\log 3600+(b/(\emptyset+273)))} \quad (2.8)$$

eşitliği yazılabilir. Bunun yanında, EPR izoleli kablolar için normal yüklenme sıcaklığının da yaklaşık 90°C olduğu bilgisini de kullanırsak , Arrhenius parametreleri aşağıdaki şekilde oluşacaklardır;

$$a = -11,627 \quad b = 6127 \text{ }^\circ\text{C}$$

İncelemeye devam edersek, kablonun normal yüklenme sıcaklığındaki yaşlanması için formüller aşağıdaki şekilde gelişir:

$$L(\emptyset,t)\%_0 = t*1000 / d(\emptyset)$$

Daha önceden normal yüklenme şartları için $d(\emptyset_z)$ değerini $\alpha * 10^9$ olarak tanımlamıştık ve α değeri için de yaklaşık $(2 / \pi)$ olduğunu söylemiştik. Buna göre:

$$L(\emptyset,t)\%_0 = t*1000 / d(\emptyset) = L(\emptyset,t)\%_0 = t / \alpha * 10^{-6} = (\pi / 2) * t * 10^{-6} \quad (2.9)$$

Ortaya çıkmış olur. Ortaya çıkan bu sonuca göre $\emptyset_z$ sıcaklığında ve t süresinde bir kablonun saniye cinsinden ömür kaybı ortaya konabilecektir.

$$\text{Örneğin } t=1s \text{ için } L(\emptyset,t)\%_0 = (\pi / 2) * 10^{-6} \%_0 (s)$$

Daha önce de belirtildiği gibi $L(\emptyset,t)$, yani ömür kaybı, kablonun normal ömrünün ($d(\emptyset_z)$) bindelik kısımları olarak ifade edilir. Aynı zamanda burada bulunan değer de kablonun normal yüklenmesi sırasındaki normal yaşlanmasına ait değerdir. Burada süre için 1s tercih edilmiştir. Sonucunda da bir saniyelik normal yüklenme koşullarında kablonun ömrünün ne kadar kısalacağı elde edilmiştir. Baştan yapılan kabullerde kablonun ömrü için de 20 yıl seçilmişti. Yine bu süre de formülde yerine konulabilir. Sonuçta elde edilecek sayı 1000 değeridir. Bu da 20 yıllık çalışma

sonucunda öngörüldüğü gibi kablonun ömrünün binde binini yani tamamını tamamladığını göstermektedir.

$$L(\emptyset, t) \%_0 = t * 1000 / d(\emptyset)$$

$$t = (60 * 60 * 24 * 365 * 20)$$

$$d(\emptyset_Z) = (60 * 60 * 24 * 365 * 20)$$

$$\text{Sonuç} = 1000 \%_0$$

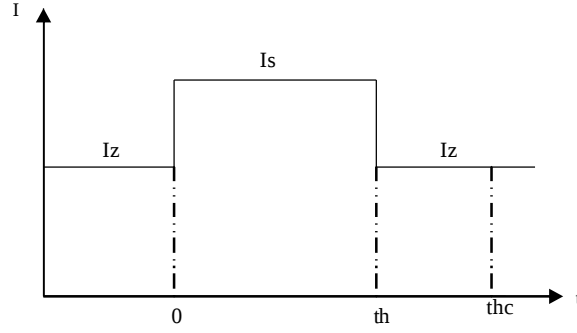
2.5.3 Tipik Aşırı Yüklenme Durumunda Kablo'nun Ömür Kayıpları

Normal zamanlarda I_Z ve $\emptyset_Z$ değerlerine sadece seyrek bazı durumlarda erişilir. Bu seyrek durumların dışında kablo genelde akım taşıma kapasitesinin altındaki akım değerlerini taşır. Bu yüzden de bir aşırı yüklenme olduğunda kablo'nun $\emptyset_Z$ normal akım taşıma sıcaklığına erişebilmesi için kablo'nun yapısal özelliklerinden kaynaklanan bir sürenin geçmesi gereklidir.

Ancak genelde yapılan kabullerde kablo'nun aşırı yüklenmeden önceki durumda da I_Z akımını taşıdığı ve $\emptyset_Z$ sıcaklığında bulunduğu varsayılır.

Bundan yola çıkarak aşağıdaki koşulları taşıyan bir aşırı yüklenme akımının kablomuz üzerinden geçtiğini varsayalım:

- I_S aşırı akımı t_h süresince kablodan geçecek ve kabloyu ısıtacak.
- t_h süresi sonunda aşırı akım kesilecek ve kablo yeniden ilk akım değerine ve o değerdeki sıcaklığına geri dönecek. (I_Z , $\emptyset_Z$)
- soğuma süresi ise t_c kadar sürecektir ve bu süre de kablo'nun termal zaman sabiti olan K nın 5 katı olacaktır
- t_{hc} süresi sonunda, kablomuz yeniden ilk çalışma sıcaklığına dönmüş olacaktır. ($\emptyset_Z$)



Şekil 2.9 Kablodan geçen aşırı akımın şekli

Aşağıda tablo 1 de kablolar için termal zaman sabiti olan K değerleri verilmiştir. Bu değerler, kablonun belirtilen akıma maruz kaldıktan sonraki sıcaklığını hesaplamakta faydalanılacak olan formülde kullanılacaktır.

Kesit (mm ²)	Havada		Beton Kanala Serilmiş	Toprağa Gömülmüş
	İyi Havalan.	Kötü Havalan.		
< 35	0,33	0,67	1,00	1,25
35-120	1,00	1,50	2,50	3,00
>= 120	1,50	2,50	4,00	6,00

Tablo 2.1 Değişik döşeme şekillerine göre K Katsayıları

ısıtma süresindeki sıcaklığı bulmak için kullanılacak formül de aşağıdaki gibidir:

(0 ≤ t ≤ t_h)

$$\theta(t) = ((\theta_s - \theta_0) * (1 - e^{-t/3600 * K})) + ((\theta_z - \theta_0) * e^{-t/3600 * K}) + \theta_0 \quad (2.10)$$

Buna ek olarak t_c soğuma zamanındaki sıcaklık da aşağıdaki formül yardımıyla bulunacaktır. (t_h < t ≤ t_{hc})

$$\theta(t) = ((\theta_z - \theta_0) * (1 - e^{-(t-t_h)/3600 * K})) + ((\theta_h - \theta_0) * e^{-(t-t_h)/3600 * K}) + \theta_0 \quad (2.11)$$

Formül 2.10 da verilen $\emptyset_s$ ifadesi ise aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\emptyset_s = \frac{\emptyset_0 + (230 * (I_s / I_z)^2 * (\emptyset_z - \emptyset_0) / (230 + \emptyset_z))}{1 - ((I_s / I_z)^2 * (\emptyset_z - \emptyset_0) / (230 + \emptyset_z))} \quad (2.12)$$

Bu noktaya varıldığında artık bir kablonun hangi seviyedeki bir aşırı akımla sıcaklığının ne kadar yükseleceği bulunabilir duruma gelmiş oluyor. Ancak buradaki eksik nokta, varılan sıcaklık değerinin, kablonun normal ömrüne olan etkisini oransal olarak ortaya koymaktır.

Burada ise Arrhenius'un ortaya koyduğu yeni bir bağıntı kullanılacaktır:

$$L(\emptyset, t) \%_0 = (d(\emptyset_z) / d(\emptyset)) * t * 1000 / d(\emptyset_z) \quad (2.13)$$

$$L(\emptyset, t) \%_0 = C_{tr} * t * 1000 / d(\emptyset_z) = C_{tr} * L_z \%_0 \quad (2.14)$$

Buradaki C_{tr} değeri, kablonun normal ömrü ile kablonun $\emptyset$ sıcaklığındaki ömrünü mukayese edebilmek maksadıyla ortaya konmuş bir katsayıdır.

$$C_{tr}(\emptyset, Q_z) = 10^{b * (\emptyset - Q_z) / ((\emptyset + 273) * (Q_z + 273))} \quad (2.15)$$

Burada da görüldüğü gibi daha önce bahsedilen Arrhenius parametrelerinin sadece biri (b) burada karşımıza çıkmaktadır. Ortaya konan bu katsayı yardımıyla kablonun normal çalışma sıcaklığındaki ömrü ile $\emptyset$ sıcaklığındaki ömrü kıyaslanabilmektedir.

Örnek verecek olursak;

$$Q_z = 90^\circ\text{C} \text{ (Kablonun normal yüklenme sıcaklığı)}$$

$$\emptyset = 130^\circ\text{C} \text{ (Aşırı yüklenmede ortaya çıkan sıcaklık)}$$

$$t = 500 \text{ saat (} 60 * 60 * 500 \text{ saniye)}$$

Öncelikle kablonun normal yüklenme sıcaklığındaki ömür kaybını bulalım;

$$L(\emptyset, t) \%_0 = t * 1000 / d(\emptyset) = L(\emptyset, t) \%_0 = t / \alpha * 10^{-6} = (\pi / 2) * t * 10^{-6}$$

Burada t yerine 60 * 60 * 500 yani 18*10⁵ yazılırsa;

$$L(\emptyset, t) \%_0 = (\pi / 2) * t * 10^{-6} = (\pi / 2) * 18 * 10^5 * 10^{-6} = 2,854 \%_0$$

Bu sayıya göre kablomuz zaten normal çalışması esnasında ömrünün binde 2,854'ünü tamamlamıştır. Ancak sıcaklığını 130°C'a yükseltecek bir aşırı yüklenme durumuna maruz kaldığında bunun ömrüne olan tesirini ortaya koyabilmek için yukarıda bahsedilen $C_{tr}(\emptyset, Q_z)$ katsayısının burada hesaplanması gerekmektedir.

$$C_{tr}(\emptyset, Q_z) = 10^{b * (\emptyset - Q_z) / ((\emptyset + 273) * (Q_z + 273))} \quad \text{eşitliği daha önce verilmişti}$$

Burada ;

$$b = 6127^\circ\text{C} \text{ (Daha önceden hesaplanmıştı)}$$

$$\emptyset = 130^\circ\text{C} \text{ (Aşırı yüklenme sonucunda varılan sıcaklık)}$$

$$Q_z = 90^\circ\text{C} \text{ (Normal yüklenme sıcaklığı)}$$

Sayılar yerlerine yazılırsa;

$$C_{tr}(\emptyset, Q_z) = 10^{6127 * (130 - 90) / ((130 + 273) * (90 + 273))}$$

$$C_{tr}(\emptyset, Q_z) = 10^{1,675} = 47,315$$

Bu da demektir ki 90°C yerine 130°C lık sıcaklık yaratacak akıma maruz kalan kablonun ömrü normale göre aynı süre içerisinde 47,315 kat daha hızlı tükenmiştir. Elde edilen bu değeri bindelik ömür dilimi cinsinden ifade etmek istersek;

$$L(\emptyset, t) \%_0 = C_{tr} * L_z \%_0 = 47,315 * 2,854 \text{ (normal yüklenmedeki ömür kaybı)}$$

$$L(\emptyset, t) \%_0 = 135,03 \%_0$$

Görülmektedir ki kablomuz normal yüklenme şartlarında 500 saatlik süre içerisinde ömrünün binde 2,854'ünü tamamlarken aşırı yüklenme meydana geldiği zaman aynı süre içerisinde tükettiği ömrü binde 135,03 değerine ulaşmaktadır.

Buradan da, aşırı akımların kabloların işletme ömürlerine ne denli yıpratıcı tesirlerinin olabildiği gayet açık ve net olarak görülmektedir.

Bundan sonraki işimiz ise tezimizin asıl konusu olan, Nötr iletkenindeki aşırı yüklenme akımlarının modellenerek, geçen aşırı akımların tarifi, değerlerinin ortaya konması ve elde edilen değerlerin yukarıda üzerinde çalışılan formüller yardımıyla gerçek verilere dönüştürülmesidir. Bu bahsedilen işlemi yapmak için ise MATLAB-Simulink veya P-Spice türündeki simülasyon programları kullanılabilir. Bunlarda yapılması gereken ise non lineer yüklerin dengeli 3 fazlı, dengeli 1 fazlı ve dengesiz 1 fazlı olarak yerleştirilmesi sonucunda ortaya çıkan Nötr akımlarının modellenmesi ve elde edilen bulguların ömür cinsinden ifade edilmesidir.

3. HARMONİK AKIMLARININ BULUNDUĞU DURUM İÇİN MODELLEME VE ORTAYA ÇIKAN SONUÇLARIN ANALİZİ

3.1 Modelleme hakkında

Bu kısımda, tüm bu yukarıda anlatılan olayların bilgisayar destekli modellemesi yapılacak ve elde edilen bulgulara göre Arrhenius formülleri kullanılarak aşırı akımlardan dolayı kablounun ömründe meydana gelecek kayıplar hesaplanmaya çalışılacaktır. Burada kullanacağımız modelleme yolu MATLAB-Simulink'dir.

Durumu incelenmeye çalışılacak olan model yapısı ise, içinde bilgisayarları, klima santralleri, ısıtma ve soğutma üniteleri, fotokopi makineleri, kesintisiz güç kaynakları (UPS) ve bunlara benzer karakterdeki yükleri içeren bir ofis katıdır. Genelde az akım çeken fakat içinde elektronik devreler ve doğrultucular bulunan bu sistemin 3., 5., 7., ve 9. harmonikleri içerdiği kabul edilmiştir. Bu harmoniklerin dereceleri ise yaklaşık değerler alınarak yapılmıştır.

Modellemede iki temel durum incelenecektir. Bunlardan birincisi, fazlar arasında dengeli bir yüklenmenin olduğu, yani sistemdeki Nötr iletkeninin sadece geçen harmonik akımlarının tesiri altında kaldığı durumdur. İkinci durumumuz ise belli zamanlardaki dengesiz yüklenmelerin de etkisiyle, Nötr iletkeninden harmonik akımlarının yanı sıra dengesizleşen yük akımlarının da geçtiği, yani yüklenmenin biraz daha arttığı durumdur.

3.2 Modelde kullanılan elemanlar ve değerleri

3.2.1 Kaynak

Gerilim: 380 V (Faz-Faz)

Frekans: 50 Hz.

3 fazlı programlanabilir gerilim kaynağı.

3.2.2 Yükler

Gerilim: 220 V (Monofaze)

Frekans: 50 Hz.

Rezistif Yük: 20 kW

Endüktif Yük: 15 kVar

Kapasitif Yük: 100 Var

$\cos\Phi$: 0.8 End.

Yüklerde dengesizleşme modellenirken, rezistif yük 15 kW, endüktif yük ise 12 kVar olarak kabul edilecektir.

3.2.3 Harmonik Kaynakları:

Kullanılacak harmonik kaynakları, belli harmonik mertebelerinde, yaklaşık bazı yüzdesel akım değerlerini modelleyeceklerdir. Her bir yükün oluşturacağı harmonik mertebeleri ve yüzdesel değerleri farklılık gösterebileceğinden, yapılacak kabullerde tüm temsil edilecek yüklerin toplam karakterine uyacak yüzdesel değerler kullanılmaya çalışılacaktır.

Örneğin tüm bu yükler için;

3. harmonik akımı, temel bileşen akımının yaklaşık %22 si civarında

5. harmonik akımı, temel bileşen akımının yaklaşık %5 i civarında

7. harmonik akımı, temel bileşen akımının yaklaşık %3  civarında

9. harmonik akımı, temel bileşen akımının yaklaşık %2 si civarında

Olabileceğine ilişkin bir kabul yapılarak modelleme yapılacaktır.

3.2.4 Ölçüm ve değerlendirme elemanları

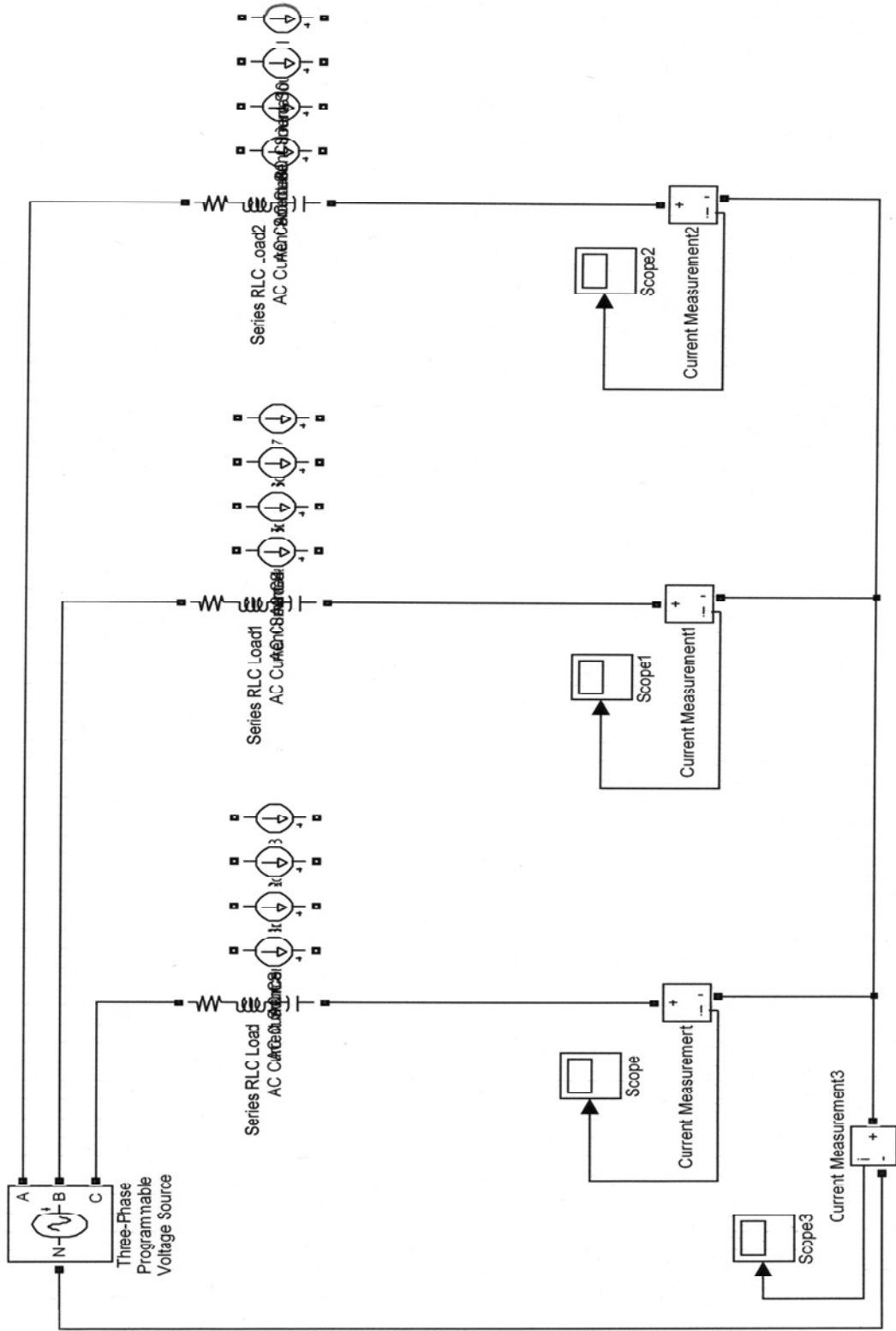
Değerlerin elde edilmesinde ise Dijital ampermetre bloğu, dalga şekillerinin ortaya konmasında Oskiloskop bloğu, ve tüm Akım-Gerilim değerlerinin Hesaplanmasında da Powergui bloğu kullanılmıştır.

3.3 Modelleme

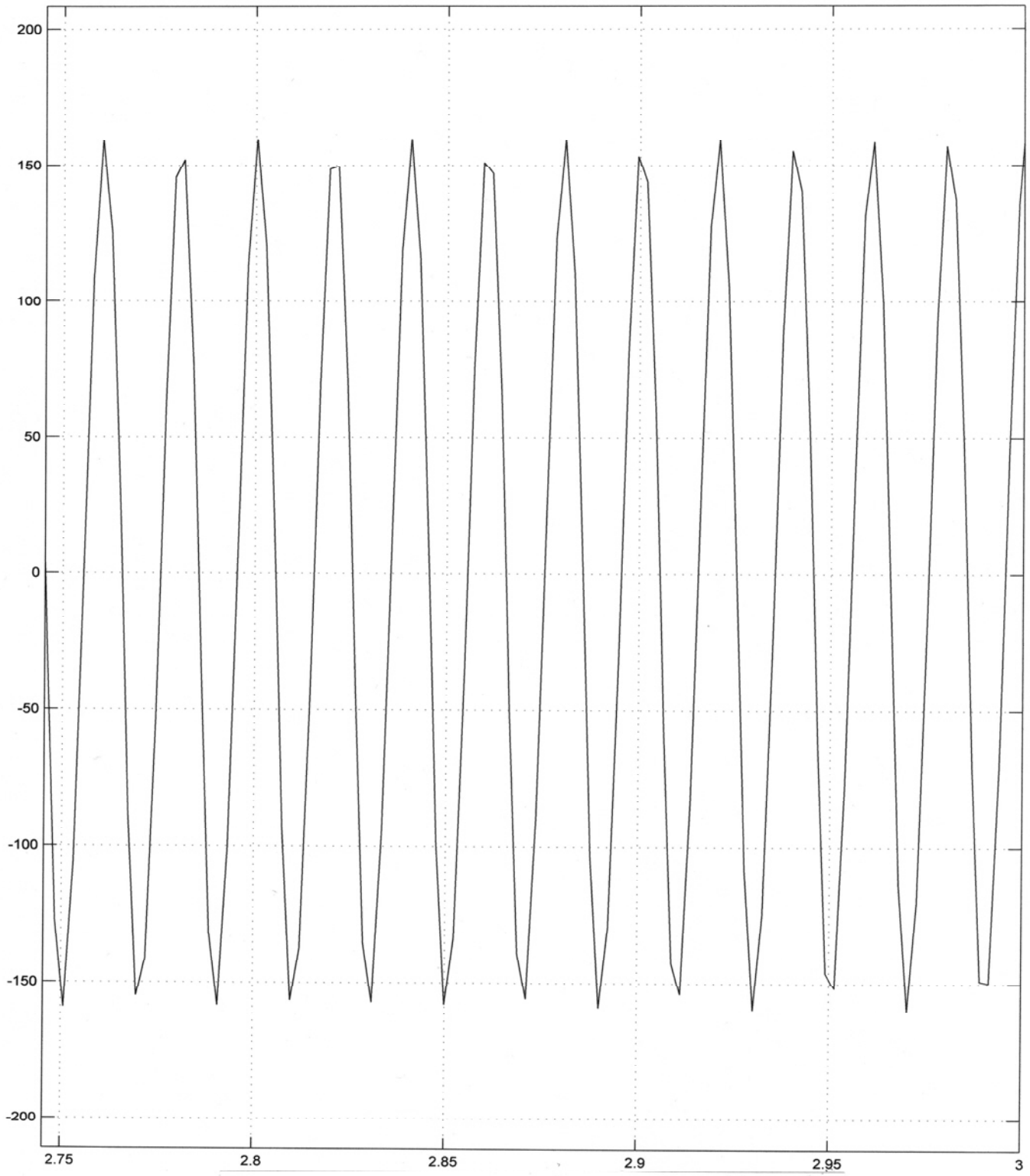
Bahsedilen ofis katının toplam gücü 60 kW kabul edilmiştir ve en başta fazlara dengeli olarak dağıldığı düşünülecektir. Bu ofisi besleyen güç kablosu ise 3x25/16 mm² lik NYY tipi güç kablosudur. Bina içinde kablonun şaft içinde kanala monte edildiği, havalandırma durumunun normal, çalışmadaki iletken sıcaklığının 90° olduğu kabulleri yapılmıştır.

Aşağıda, fikir vermek amacıyla öncelikle harmoniklerin söz konusu olmadığı durum için kullanılan modelleme devresi, dengeli durumdaki faz ve nötr akımları verilmiştir.

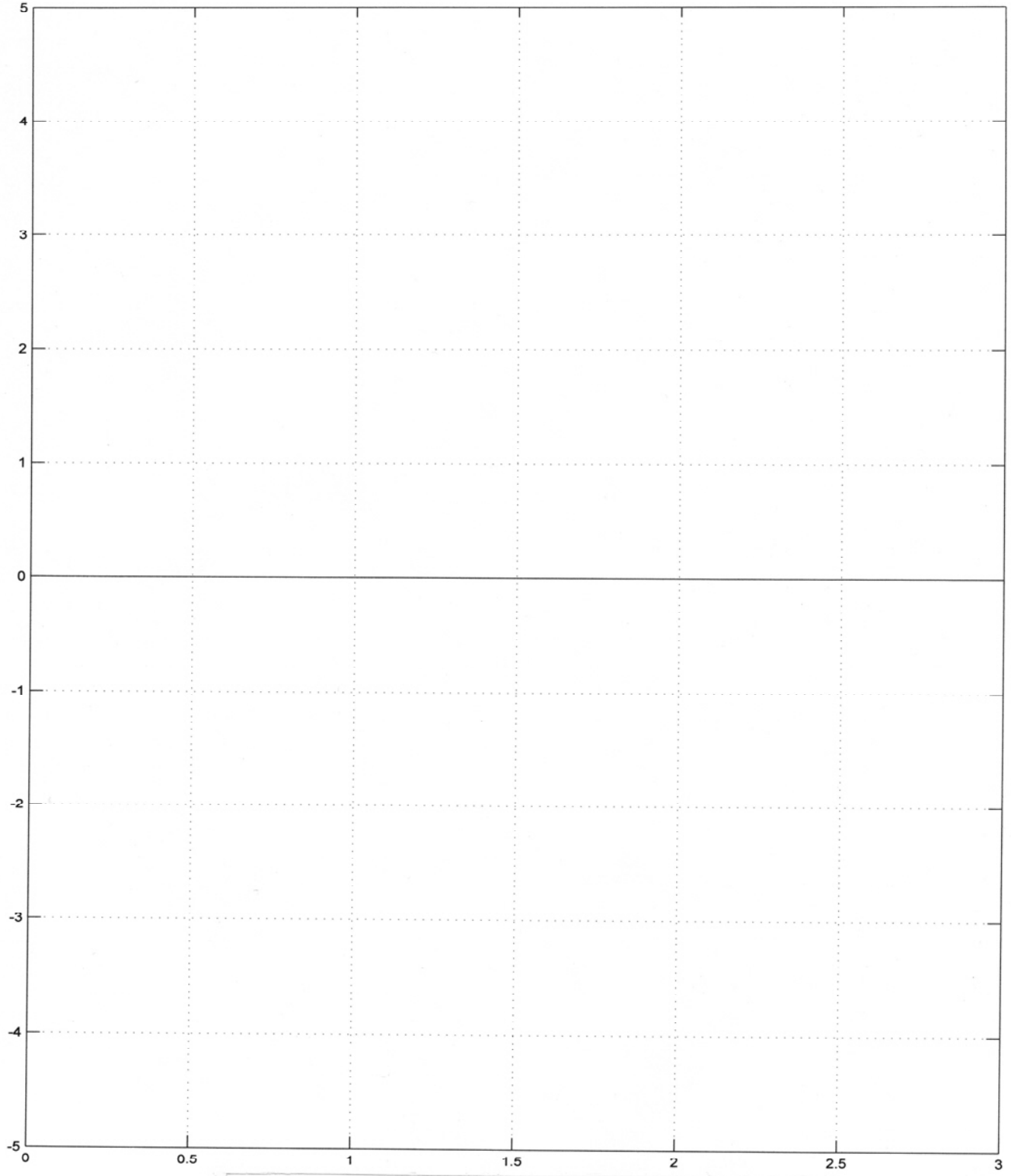
Harmoniklerin olmaması ve yükün de dengeli olması sebebiyle nötr iletkeninden akım geçmediği görülmektedir. Teorik olarak da üzerinden akım geçmeyen iletkenin ömrünün sonsuz olacağı kabulü yapılabilir. Ancak kablomuzda Faz ve Nötr iletkenleri aynı üst yalıtım katmanının altında bulunduklarından ve nötr iletkeninden akım geçmese de faz iletkenlerinden akım geçmesi dolayısıyla faz iletkenleri normal yaşlanmasına devam etmektedirler. Faz iletkenleri ömrünü tamamladıkları zaman da nötr iletkeni tek başına yaşlanmamış da olsa ömrü tamamlanmış demektir. Ancak buradaki harmoniksiz ve tamamen dengeli yüklenme durumu, yalnızca akımların nasıl büyük artmalar gösterdiği hakkında fikir vermek amacıyla gösterilmiştir. Günümüzdeki modern elektronik devreler, harmonik akımları oluşturdıklarından dolayı, dengesiz yüklenme olmasa bile Nötr iletkenlerinden harmonik akımları geçebilmektedir.



Şekil 3.1 Harmonik kaynakların bulunmadığı modellenen devresi



Grafik 3.1 Harmonik akımlarının bulunmadığı modellemedeki faz akımları



Grafik 3.2 Harmonik akımlarının bulunmadığı modellemedeki nötr akımı

Şimdi de Harmonik kaynaklarını devreye alarak, harmonik akımlarının devremizde dolaştığı durumdaki değerlerimize bir göz atalım.(Değerler Powergui elemanın orijinal değerleridir.Grafikler ise arka sayfadadır)

50 Hz (Temel bileşen) Akımları:

- Current Measurement = 113.1 A rms 83.31°
- Current Measurement1 = 113.1 A rms -156.69°
- Current Measurement2 = 113.1 A rms -36.69°
- Current Measurement3 = 3.623×10^{-14} A rms -56.31°

150 Hz (3. Harmonik) Akımları:

- Current Measurement = 25.46 A rms
- Current Measurement1 = 25.46 A rms
- Current Measurement2 = 25.46 A rms
- Current Measurement3 = 76.37 A rms

250 Hz (5. Harmonik) Akımları:

- Current Measurement = 6.364 A rms
- Current Measurement1 = 6.364 A rms
- Current Measurement2 = 6.364 A rms
- Current Measurement3 = 19.09 A rms

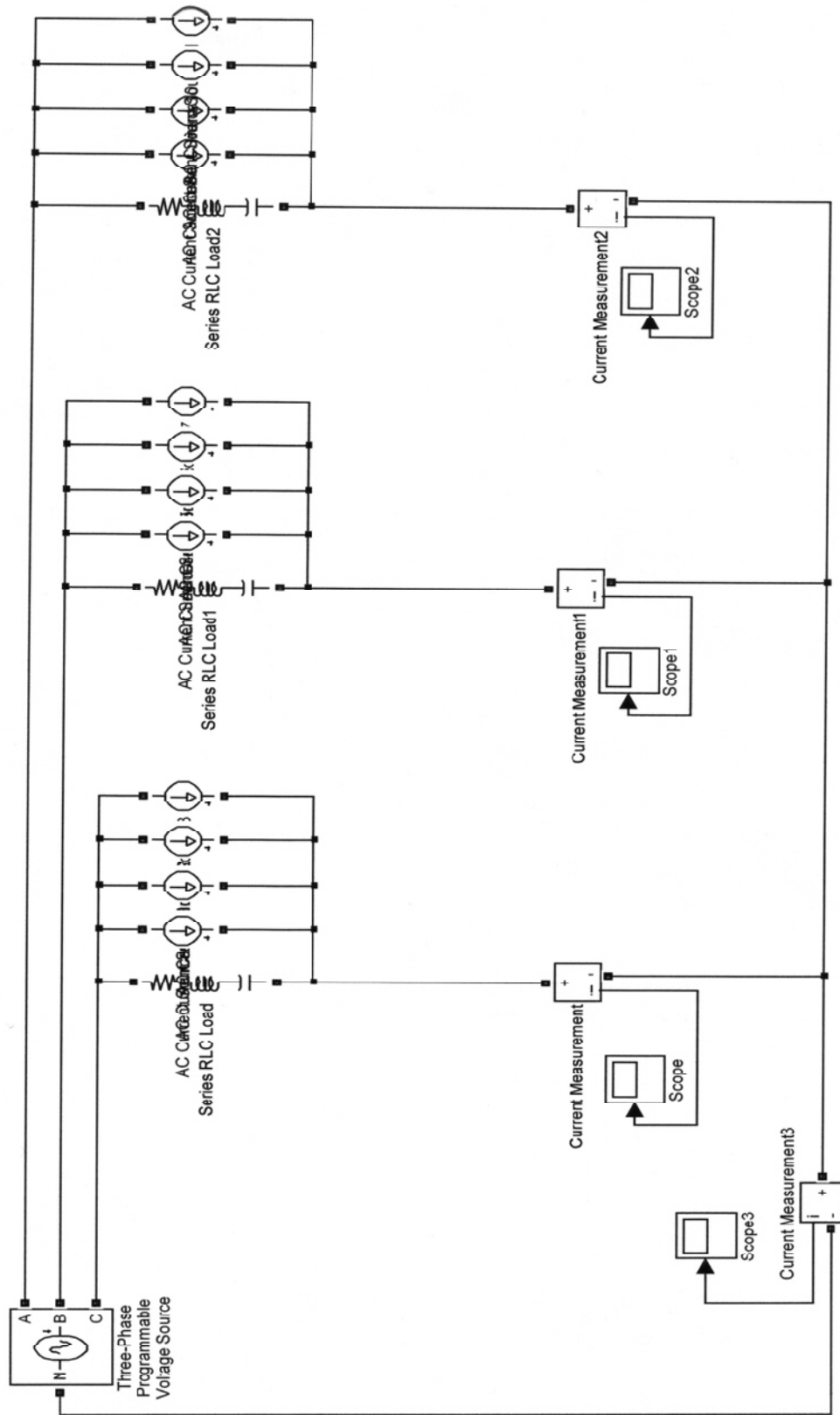
350 Hz (7. Harmonik) Akımları:

- Current Measurement = 3.536 A rms
- Current Measurement1 = 3.536 A rms
- Current Measurement2 = 3.536 A rms
- Current Measurement3 = 10.61 A rms

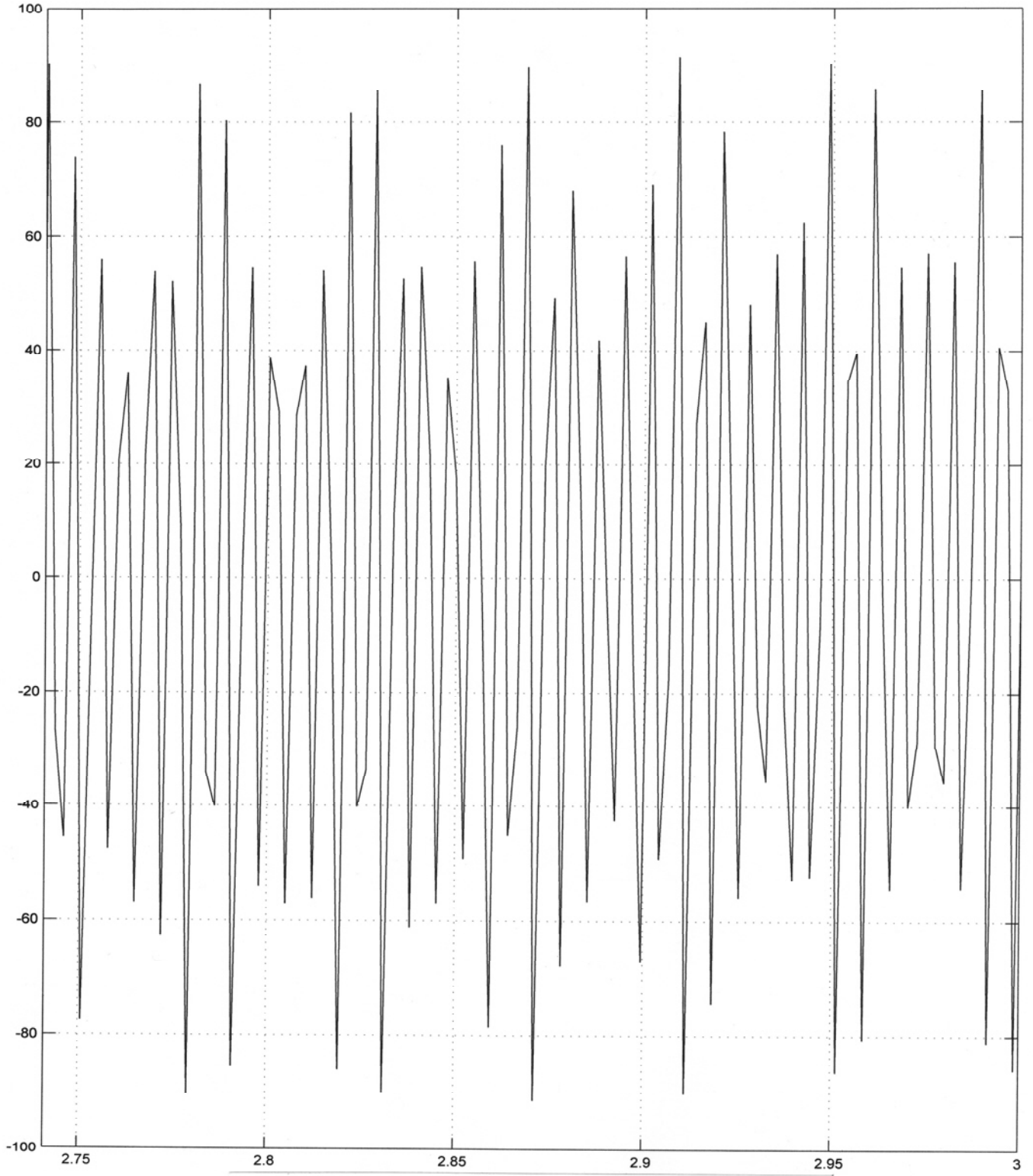
450 Hz (9. Harmonik) Akımları:

- Current Measurement = 2.828 A rms
- Current Measurement1 = 2.828 A rms
- Current Measurement2 = 2.828 A rms
- Current Measurement3 = 8.485 A rms

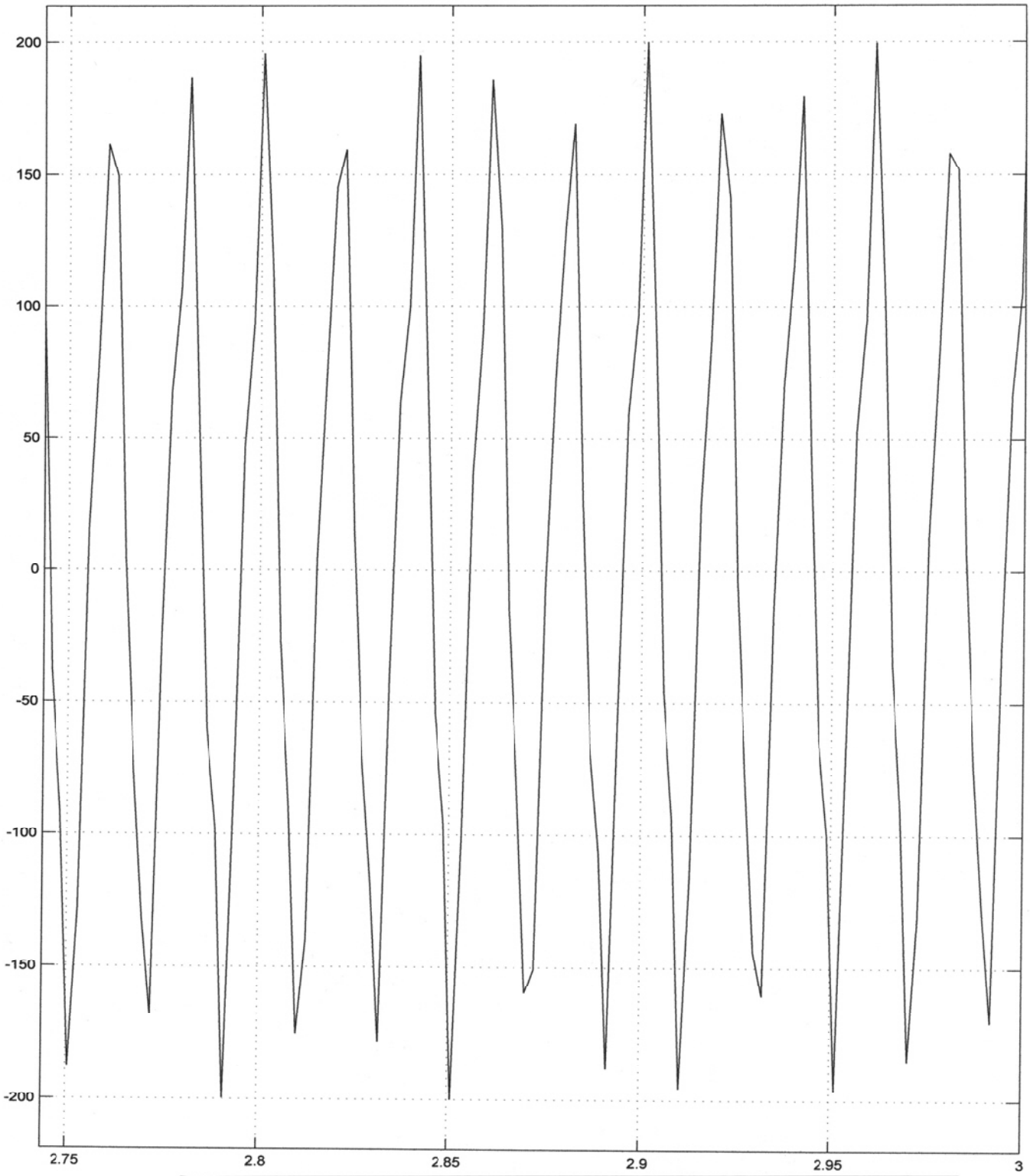
Görülen harmonik akım değerlerinden yalnızca 3. harmonik değeri tek başına dahi bulunsa, aşırı akım olacak kadar yüksek değerli bir akım oluşturmaktadır.



Şekil 3.2 Harmonik kaynaklarının devreye alındığı modelleme devresi



Grafik 3.4 Harmonik akımlarının bulunduğu modellemedeki nötr akımı



Grafik 3.5 Harmonik akımlarının bulunduğu modellemedeki faz akımları (Dengesiz yüklenme)

Görüldüğü üzere dengeli yüklenme söz konusu olduğunda, temel bileşen akımları içerisinde nötr ampermetresinde akım görülmemektedir. Ancak harmonikler de işin içine dahil olduğunda 3, 5, 7 ve 9. harmoniklerin yukarıda gösterilen RMS değerleri kadar akım, nötr iletkeni üzerinden akmaktadır. Nötr üzerinden akan toplam akım değeri için de;

$$I^2 = I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 \quad (3.1)$$

Formülü kullanılabilir.

Yalnızca 3. harmoniğin bulunduğu durumda akım değeri 3. harmonik akım değerine eşit olacaktır (yani 76,3 A). Bu akım değeri bile nötr iletkeninin taşıyacağı en yüksek akım değerinden daha yüksektir. Bütün mertebelerin akım değerleri işin içine girecek olursa akım değeri; 80 A bulunur ki bu akım değeri az önceki değerden daha da yüksektir. 16mm² lik bakır iletkenin taşıyacağı en yüksek akım değeri döşenme şartlarına da bağlı olarak 65-70 A civarındadır. (Üretici kataloglarına göre de farklılıklar gösterebilmektedir). Elde edilen akım değerleri de gösteriyor ki nötr kablomuz sürekli aşırı akım altında çalışacaktır.

Yine yapacağımız kabulde dengeli yüklenme durumunun günün 6 saatinde olacağını, geri kalan 4 çalışma saatinde ise önceden belirtilen şekilde dengesiz yüklenme olacağını varsayalım.

Elde edilen bu akım değeri, daha önce tanımlanan Arrhenius formüllerinde kullanılacak olursa;

$$\varnothing(t) = ((\varnothing_s - \varnothing_0) * (1 - e^{-t/3600 * K})) + ((\varnothing_z - \varnothing_0) * e^{-t/3600 * K}) + \varnothing_0 \quad (\text{Formül 2.10})$$

$$\varnothing_s = \frac{\varnothing_0 + (230 * (I_s / I_z)^2 * (\varnothing_z - \varnothing_0) / (230 + \varnothing_z))}{1 - ((I_s / I_z)^2 * (\varnothing_z - \varnothing_0) / (230 + \varnothing_z))} \quad (\text{Formül 2.12})$$

Formüllerdeki simgeler:

$\varnothing(t)$: Ulaşılabilecek sıcaklık (Aranan değer)

$\varnothing_0$: Ortam sıcaklığı (30°C)

$\emptyset_s$:	Kablodan Is akımı geçtiği süredeki kararlı sıcaklığı
$\emptyset_z$:	Kablonun normal yüklenme sıcaklığı (60°C)
I_s :	Kablodan geçen Aşırı akım miktarı
I_z :	Kablonun normal yüklenme akımı
K :	Katsayı (Döşenme şartlarıyla ilgili, Burada 0,67 alınacak)
t :	Süre (Saniye, Burada 6*60*60 alınacak)

Öncelikle yalnızca 3. harmoniğin mevcut olduğu durum için $\emptyset_s$ hesaplanırsa;

$$\emptyset_s = \frac{30 + (230 * (76,3 / 65)^2 * (60 - 30) / (230 + 60))}{1 - ((76,3 / 65)^2 * (60 - 30) / (230 + 60))}$$

Buradan $\emptyset_s = 73,21$ bulunur.

Bu değer yardımıyla $\emptyset(i)$ hesaplanacak olursa;

$$\emptyset(i) = ((73,21 - 30) * (1 - e^{-6*3600/3600*0,67})) + ((60 - 30) * e^{-6*3600/3600*0,67}) + 30$$

$\emptyset(i) = 69,6^\circ\text{C}$ hesaplanır.

Harmonik bileşenlerinin tamamı mevcut olduğu durum için $\emptyset_s$ hesaplanırsa;

$$\emptyset_s = \frac{30 + (230 * (80 / 65)^2 * (60 - 30) / (230 + 60))}{1 - ((80 / 65)^2 * (60 - 30) / (230 + 60))}$$

Buradan $\emptyset_s = 78,31$ bulunur.

Bu değer yardımıyla $\emptyset(i)$ hesaplanacak olursa;

$$\emptyset(i) = ((78,31 - 30) * (1 - e^{-6*3600/3600*0,67})) + ((60 - 30) * e^{-6*3600/3600*0,67}) + 30$$

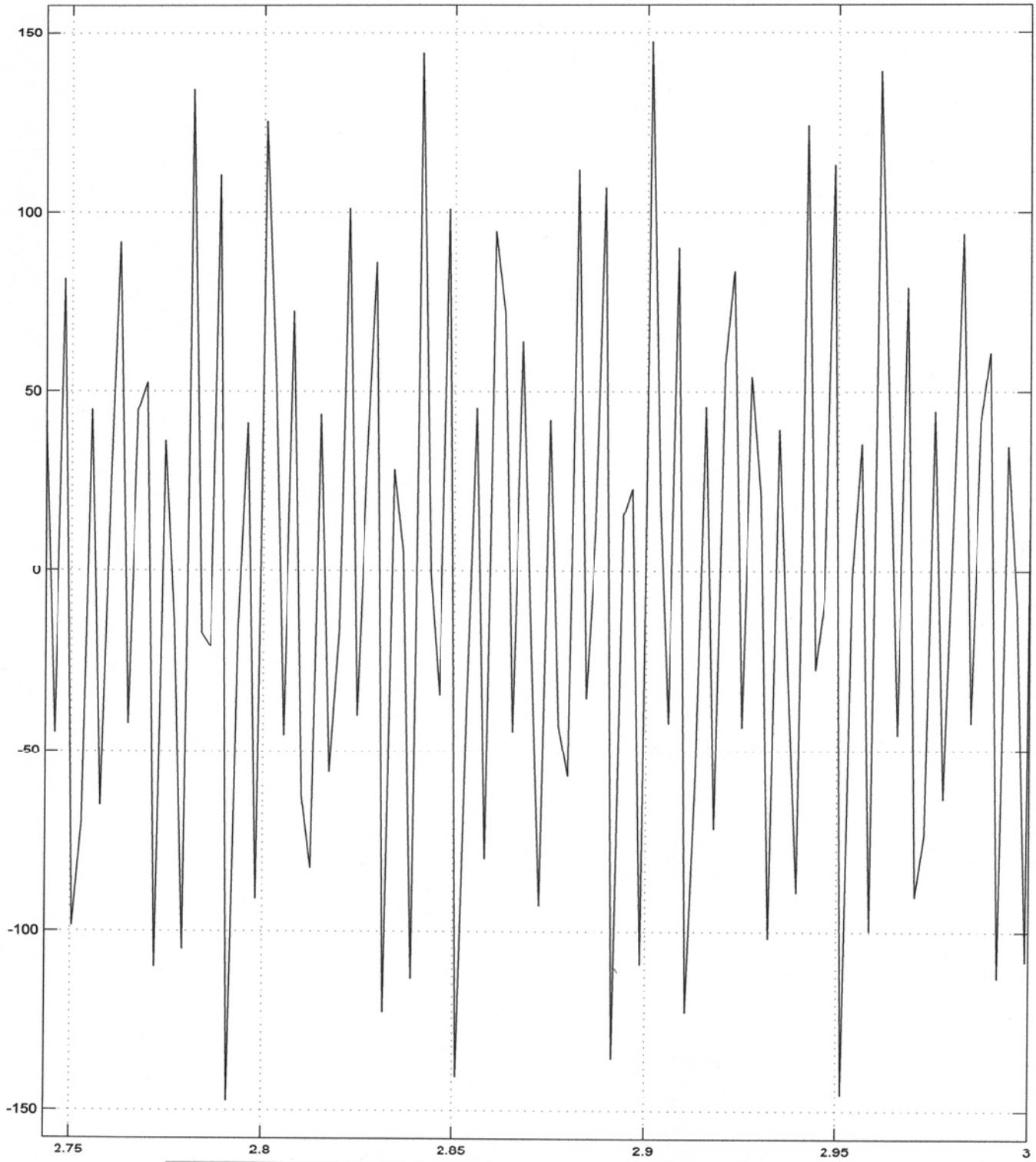
$\emptyset(i) = 77,82^\circ\text{C}$ hesaplanır.

Bulunan değerlere bakılacak olursa, 3. harmonik akım değerinin oluşturduğu sıcaklık da kablonun çalışma sıcaklığının üzerindedir. Bu durumlardan yola çıkılarak, kablomuzda her durumda bir ömür kaybından bahsetmenin yanlış olmayacağı söylenebilir.

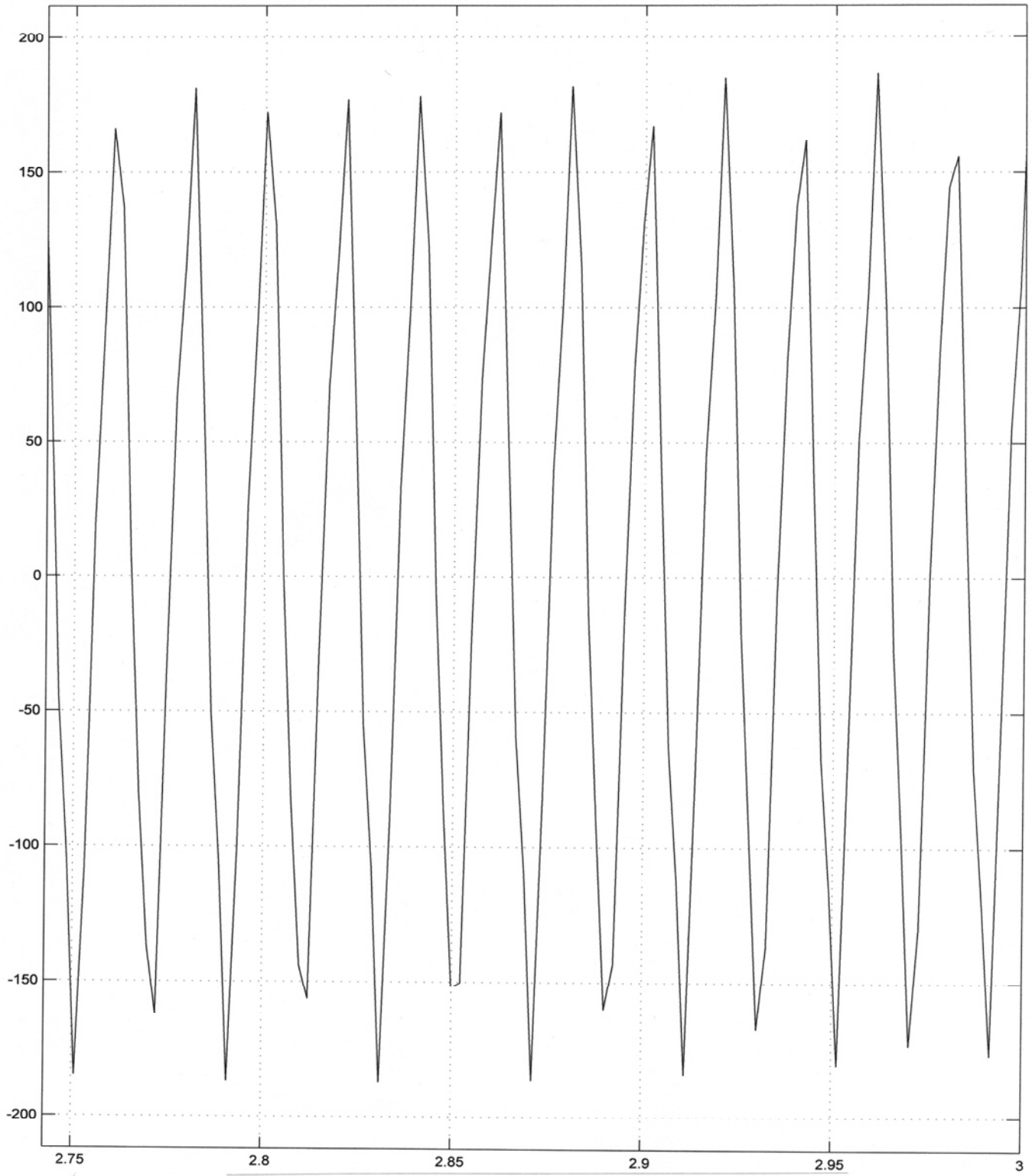
Yukarıda da anlatıldığı gibi kullanılan bu akım değeri, günün belli saatlerinde oluşan dengeli yüklenme durumu için geçerlidir.

Yine 10 saatlik çalışma periyodunun 4 saatinde ise daha önce bahsedilen şekildeki dengesiz yüklenme hali ortaya çıkacaktır.

Bu durumda oluşan faz ve nötr iletkeni akımları ise hemen arka sayfada verilmiştir. Sıradaki hesaplama ise bu dengesiz yüklenme akımının nötr iletkeninde meydana getireceği sıcaklık artışıdır.



Grafik 3.6 Harmonik akımlarının bulunduğu modellemedeki nötr akımı (Dengesiz yüklenme)



Grafik 3.3 Harmonik akımlarının bulunduğu modellemedeki faz akımları

Elde edilen bu akım değerleri yine Powergui bloğunun yardımıyla RMS akım değerlerine dönüştürülürse aşağıdaki değerler ortaya çıkmaktadır.

50 Hz (Temel bileşen) Akımları:

- Current Measurement = 113.1 A rms 83.31°
- Current Measurement1 = 86.79 A rms -158.43°
- Current Measurement2 = 113.1 A rms -36.69°
- Current Measurement3 = 26.43 A rms 29.04°

150 Hz (3. Harmonik) Akımları:

- Current Measurement = 25.46 A rms
- Current Measurement1 = 19.09 A rms
- Current Measurement2 = 25.46 A rms
- Current Measurement3 = 70 A rms

250 Hz (5. Harmonik) Akımları:

- Current Measurement = 6.364 A rms
- Current Measurement1 = 4.95 A rms
- Current Measurement2 = 6.364 A rms
- Current Measurement3 = 17.68 A rms

350 Hz (7. Harmonik) Akımları:

- Current Measurement = 3.536 A rms
- Current Measurement1 = 2.616 A rms
- Current Measurement2 = 3.536 A rms
- Current Measurement3 = 9.687 A rms

450 Hz (9. Harmonik) Akımları:

- Current Measurement = 2.828 A rms
- Current Measurement1 = 2.051 A rms
- Current Measurement2 = 2.828 A rms
- Current Measurement3 = 7.707 A rms

Buradaki değerlere de bakıldığında, 3. harmonik akım değerinin, yine kablunun akım taşıma kapasitesinden yüksek olduğu, buna ek olarak da devre dışı bırakılması mümkün olmayan bir dengesiz yük akımıyla birleştiğinde akım değerinin iyice büyüyeceği görülmektedir.

Bu değerler de elde edildikten sonra harmonikli durumdaki dengeli ve dengesiz yüklenme halleri için ortaya çıkan sıcaklıklar yardımıyla artık ömür analizi yapabilecek duruma gelmiş oluyoruz.

Yine daha önce yaptığımız gibi buradan akım değerlerini hesaplayacak olursak;

Yalnız 3. harmonik mevcut durumda;

$$I^2 = I_1^2 + I_3^2$$

$$I^2 = 74,82 \text{ A}$$

Tüm harmonik mertebeleri hesaba katılacak olursa;

$$I^2 = I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2$$

$$I = 77,87 \text{ A bulunur.}$$

Yük miktarı azalırken, bununla beraber sisteme enjekte edilen harmonik akım miktarları da aynı oranda azalmıştır. Ancak dikkatli bakılacak olursa, yükteki azalma miktarının %25 civarında olmasına rağmen akımdaki azalmanın yaklaşık %3 ler seviyesinde olması dengesiz yüklenmenin ne denli zararlı olabileceğini göstermesi açısından ilginçtir.

Yine elde edilen bu değerle Arrhenius formülleri kullanılacak olursa;

Yalnızca temel bileşen ve 3. harmonik olması durumunda;

$$\theta_s = \frac{30 + (230 * (74,82 / 65)^2 * (60 - 30) / (230 + 60))}{1 - ((74,82 / 65)^2 * (60 - 30) / (230 + 60))}$$

$$\text{Buradan } \theta_s = 71,29 \text{ hesaplanır}$$

$$\theta(t) = ((71,29 - 30) * (1 - e^{-4 * 3600 / 3600 * 0,67})) + ((60 - 30) * e^{-4 * 3600 / 3600 * 0,67}) + 30$$

$$\theta(t) = 71,18^\circ\text{C bulunur.}$$

Tüm harmonik mertebeleri hesaplara dahil edilirse;

$$\varnothing_s = \frac{30 + (230 * (77,87 / 65)^2 * (60 - 30) / (230 + 60))}{1 - ((77,87 / 65)^2 * (60 - 30) / (230 + 60))}$$

Buradan $\varnothing_s = 75,32$ bulunur.

$$\varnothing(t) = ((75,32 - 30) * (1 - e^{-4 * 3600 / 3600 * 0,67})) + ((60 - 30) * e^{-4 * 3600 / 3600 * 0,67}) + 30$$

$\varnothing(t) = 75,27^\circ\text{C}$ hesaplanır.

Burada da yine yük azalmasına rağmen ısınmada çok az bir düşme yaşandığı açıkça görülebilmektedir.

Şimdi elde edilen tüm bu değerler, kablunun ömrüne tesir katsayılarına dönüştürülebilecek hale gelmişlerdir.

Öncelikle kablunun normal yüklenme sıcaklığındaki ömür kaybını bulalım;

$$L(\varnothing, t) \%_0 = t * 1000 / d(\varnothing) = L(\varnothing, t) \%_0 = t / \alpha * 10^{-6} = (\pi / 2) * t * 10^{-6}$$

Burada t yerine 60 * 60 * 6 ve 60 * 60 * 4 yazılacaktır (Ayrı ayrı hesaplanacak)

Kablunun normal çalışmada 6 saatteki ömür kaybı binde cinsinden;

$$L(\varnothing, t) \%_0 = (\pi / 2) * t * 10^{-6} = (\pi / 2) * 21,6 * 10^3 * 10^{-6} = 0,034 \%_0$$

Yine kablunun normal çalışmada 4 saatteki ömür kaybı binde cinsinden;

$$L(\varnothing, t) \%_0 = (\pi / 2) * t * 10^{-6} = (\pi / 2) * 14,4 * 10^3 * 10^{-6} = 0,023 \%_0$$

$$C_{tr}(\varnothing, Q_z) = 10^{b * (\varnothing - Q_z) / ((\varnothing + 273) * (Q_z + 273))} \quad \text{eşitliği daha önce verilmişti}$$

Burada ;

b= 6127°C (Daha önceden hesaplanmıştı)

Ø= 69,6 ve 77,82°C (Aşırı yüklenme sonucunda varılan sıcaklıklar)

Q_z= 60°C (Normal yüklenme sıcaklığı)

Sırasıyla sayılar yerlerine yazılırsa;

Dengeli yüklenme, yalnız 3. harmonik akımı için

$$C_{tr}(\emptyset, Q_z) = 10^{6127 * (69,6 - 60) / ((69,6 + 273) * (60 + 273))}$$

$$C_{tr}(\emptyset, Q_z) = 10^{0,51} = 3,27$$

Dengeli yüklenme, tüm harmonik akımları için

$$C_{tr}(\emptyset, Q_z) = 10^{6127 * (77,82 - 60) / ((77,82 + 273) * (60 + 273))}$$

$$C_{tr}(\emptyset, Q_z) = 10^{0,93} = 8,6$$

Bu değer günün dengeli yüklenme zamanlarındaki ömür kaybıdır. Bu da demek olmaktadır ki kablomuz, 60°C yerine 69,6°C sıcaklıkta 6 saat boyunca çalışınca 3,27 kat, yine 60°C yerine 77,82°C sıcaklıkta 6 saat boyunca çalışınca 8,6 kat daha fazla yaşlanmıştır.

Aynı şekilde dengesiz yüklenme akımı için de aynı formül kullanılarak değer hesaplanırsa;

b= 6127°C (Daha önceden hesaplanmıştı)

Ø= 71,18 ve 75,27°C (Aşırı yüklenme sonucunda varılan sıcaklık)

Q_z= 60°C (Normal yüklenme sıcaklığı)

Sayılar yerlerine yazılırsa;

Yalnızca temel bileşen ve 3. harmonik akımlarının bulunması halinde;

$$C_{tr}(\emptyset, Q_z) = 10^{6127 * (71,18 - 60) / ((71,18 + 273) * (60 + 273))}$$

$$C_{tr}(\emptyset, Q_z) = 10^{0,59} = 3,95$$

Tüm mertebelerdeki harmonik akımlarının bulunması halinde;

$$C_{tr}(\emptyset, Q_z) = 10^{6127 * (75,27 - 60) / ((75,27 + 273) * (60 + 273))}$$

$$C_{tr}(\emptyset, Q_z) = 10^{0,80} = 6,4$$

Yine buradan da kablomuzun normal yüklenme şartlarına göre 3,95 veya 6,4 kat daha fazla yaşlandığını söylemek mümkündür.

Eğer kablomuz normal şartlarında çalışmış olsaydı 10 saat çalışmayla ömrünün binde $(0,034+0,023)=0,057$ lik kısmını tamamlamış olacaktı.

Ortaya çıkan aşırı yüklenme durumunda ise,

6 saatlik normal yüklenme durumunda (Yalnız 3. harmonik bulunması halinde)
 $3,27*0,034 = 0,111$ lik kısmı

6 saatlik normal yüklenme durumunda (Tüm harmoniklerin bulunduğu halde)
 $8,6*0,034 = 0,292$ lik kısmı

4 saatlik dengesiz yüklenme durumunda (Yalnız 3. harmonik bulunması halinde)
 $3,95*0,023 = 0,090$ lik kısmı

4 saatlik dengesiz yüklenme durumunda (Tüm harmoniklerin bulunduğu halde)
 $6,4*0,023 = 0,147$ lik kısmı

tükenmiş görünmektedir. Yani toplamda ömür için bakılacak olursa;

10 saatlik çalışma periyodunda, (6saat dengeli + 4 saat dengesiz) sadece temel bileşen ve 3.harmonik akımları bulunması halinde; $0,111 + 0,090 =$ (binde) $0,201$ lik kısmı tükenmiştir

Yine 10 saatlik çalışma periyodunda, tüm mertebelerdeki harmonik akımlarının bulunması halinde; $0,292 + 0,147 =$ (binde) 0,439 luk kısmı harcanmıştır.

Yukarıda elde edilen değerler ayrı ayrı normal yaşlanma değeriyle oranlanırsa:

Yalnızca temel bileşen ve 3. harmonik için;

$$0,201 / 0,057 = 3,52$$

Tüm mertebelerdeki harmonik akımlarının bulunması halinde;

$$0,439 / 0,057 = 7,70$$

Görülmektedir ki kablomuz ortalama olarak 3,52 veya 7,70 kat daha fazla yaşlanmıştır.

Daha açık bir dille çalıştığı her 1 saat karşılığında, yalnızca temel bileşen ve 3. harmonik akımlarının bulunması halinde sanki 3,52 saat, tüm mertebelerdeki harmonik akımlarının bulunması halinde ise sanki 7,70 saat çalışmış kadar yorulmaktadır.

Bu da kablomuzun toplam ömrünü bu oranlarda azaltacaktır.

Normal şartlarda 20 yıl hizmet vermesi düşünülen bir kablonun, $20 / 3,52 = 5,68$ yıl veya $20 / 7,70 = 2,6$ yıl sonra çeşitli arızalar sebebiyle yenisiyle değiştirilmesi gerekecektir. Bu arada, sıcaklıklar arasındaki $5-6^{\circ}\text{C}$ lık farkların ömürler arasında yarattığı %50 lik farka da dikkat çekmek isterim. Konuya bu açıdan bakıldığında durumun ciddiyeti daha net görülebilecektir.

Ancak unutulmamalıdır ki bulunan bu değer, ancak varsayılan çalışma şartları için geçerli olan bir değerdir.

Yüklerin ve dolayısıyla akımların karakteristiklerinin, harmonik mertebelerinin ve miktarlarının, yüklenme sürelerinin, dengesiz yüklenme miktarlarının ve daha bir çok kriterin değişmesiyle sonucun değişmesi, doğrudan doğruya ilişkilidir. Yaşlanma etkilerine dikkat çekebilmek için burada kötü sayılabilecek bir şartlar yaratılmış ve modellemeler bunun üzerine kurgulanmıştır. Elde edilen bu sonuç, her kablonun herhangi bir aşırı yüklenme durumunda 2-3 yılda ömrünü tamamlayacağı sonucu değildir.

4 SONUÇ VE ÖNERİLER

En başta da söylendiği gibi bu tez çalışmasında, belli şartlar altında aşırı yüklenen kabloların ve de özellikle Nötr iletkeni olarak kullanılan kablonun, aşırı akımların yaratacağı aşırı ısınma sebebiyle ömürlerinde meydana gelen kayıplar incelenmeye çalışıldı. Aşırı akımların özel durumları olarak da HARMONİK akımları kullanıldı.

Ancak aşırı akım demek her zaman harmonik akımları demek değildir. Yani burada dengesiz yüklenmeden kaynaklanan nötr akımları da belli değerleri aştıkları zamanlarda, aşırı akım seviyelerinde akımlara yol açabilirler ve bunlara bağlı olarak da iletkenlerde aşırı ısınmalara sebebiyet verebilirler.

Bu modelleme şartlarında gördük ki, belirli mertebelerde harmonik akımları içeren yüklerin bulunduğu tesislerde, tamamen dengeli yüklenmeler dahi olsa, harmonik akımları yüzünden üzerinden hiç akım geçmemesi gereken iletkenlerden nominal çalışma akım değerlerinin üzerindeki akımlar geçmektedir. Harmonik akımlarının mertebeleri ve değerleri değişebilir ancak bu akımlar sürekli az da olsa akacaktır.

Dengesiz yüklenme durumlarında dahi yük azalmasından dolayı akımda azalma olması beklenirken yükün ortalama %25 azalmasına karşılık akım değerindeki azalma %4 mertebesinde gerçekleşmiştir. Bu da göstermektedir ki harmonik akımları tek başlarına tehlikeli oldukları kadar dengesiz yüklenmeden kaynaklı Nötr akımlarıyla birlikte de olumsuz sonuçlar oluşturabilmektedirler.

İstenmeyen akımların oluşturduğu ömür kayıplarının yanı sıra, nötr iletkeninde oluşacak gerilim değerleri de dikkat edilmesi gereken sonuçlar olarak ortaya çıkmaktadırlar. Ancak bunları incelemek daha farklı tez çalışmalarına konu oluşturabilir.

Burada ortaya konulmaya çalışılan gerçek, harmoniklerin ne denli pahalıya mal olduklarının sadece iletkenler üzerine düşen kısımlarıdır. Aynı şekilde geçen aşırı akımlar devredeki tüm yükler, kondansatörler, transformatörler ve şalt malzemelerinde de istenmeyen etkiler oluşturacaklardır.

Son olarak görünen açık gerçek, g elektronik ve elektronik elemanların aşamalar kaydettiği günümüzde, harmonik sorunlarının da bunlarla birlikte aşama kaydettiği ve her gün daha fazla hesapta olmayan maliyetler oluşturduğudur. Bunun zm ise, harmonik üreten elemanların harmonik düzeylerini uluslar arası standartlara taşıyacak sistemlerin kurulması ve işletilmesidir. Aksi taktirde kurulmayan sistem maliyetlerini kat kat aşacak tamir, bakım, malzeme ve işçilik giderleriyle karşı karşıya kalınması sürpriz bir sonuç olmayacaktır.

KAYNAKLAR

ANSI / IEEE Std. 242, (1986), "Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems", Chapter 8, Conductor Protection

Arrilaga, J., Bradley, D. A. Ve Bodger, P. S., (1985), "Power System Harmonics", John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England.

Baggott, A. G., (1974), "The Effect of waveshape Distortion on the Measurement of Energy Tarif Meters", IEE Conf. Publ., Vol. 110.

Balser, S. J. Ve Feltes, J. W., (1985), "Power System Harmonics Measurement and Analysis", Rural Electric Power Conference, Paper 85CH2126-1-C5

Christensen, E. F., Willis, C. H., ve Herskind, C. C., (1944), "Analysis of Rectifier Circuits", AIEE Trans., 115;1048-1058

Densem, T. J., Bodger, P. S. Ve Arrilaga, J., (1984), "Three-Phase Transmission System Modelling for Harmonic Penetration Studies", IEEE Trans. On Power Apparatus Systems, PAS-103;310-317

Domijan, A., Heydt, G. T., Meliopulos, A. P. S., Venkata, S. Ve West, S., (1993), "Directions of Research in Electric Power Quality", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 8, Jan. 1993; 429-436

Dugan, R. C., McGranaghan, M. F. Ve Beaty, H. W., (1996), "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill, New York

Emanuel, A. E., vd., (1995), "Distribution Feeders with Non-Linear Loads in the North-East USA; Part 1-Voltage Distortion Forecast", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol 10, No. 1, Jan. 1995: 340-347

Erden, S. S., (2004), “Alçak Gerilim Topraklama Şebekelerinin Analizi Ve Simülasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Kütüphanesi

Gönen, T., (1986), “Electric Power Distribution System Engineering”, McGraw-Hill, New York

Gruzs, T. M., (1980), “A Survey of Neutral Currents in Three-Phase Computer Power Systems”, IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 26, No. 4, July/Aug. 1990: 719-725

Heydt, G. T., Grady, W. M., ve Xia, D., (1983), “Harmonic Power Flow Studies”, Vol.1, EPRI, EL-3306-CCM Research Project

IEEE, (1979), “IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters”, Project No. 519

IEEE, (1993), “IEEE Recommended Practises and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”, IEEE Standart 519-1992

IEEE Standarts Board, (1976), “IEEE Recommended Guide for Measurement of Electrical Noise and Harmonic Filter Performance of High Voltage Direct Current Systems”, Project No. 368

IEEE Task Force on Harmonic Impacts, (1993), “Effects of Harmonics on Equipment”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 2, April 1993; 672-680

IEEE Task Force on Harmonics Modelling and Simulation, (1996), “Modelling and Simulation of Propagation of Harmonics in Electric Power Networks; Part 1; Concepts, Models and Simulation Techniques”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 1, No. 1, Jan 1996; 452-465

IEEE Working Group on Power System Harmonics, (1983), “Power System Harmonics: An Overview”, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 1, PAS. 102, Aug. 1983; 2455-2460

Katzaraoff, P., (1990), “Effects of Non-Linear Loads on the Power Distribution Systems – A General Overview”, Power Quality, Jan. 1990; 281-286

Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A. ve Arıkan, O., (2003), “Elektrik Tesislerinde Harmonikler”, Birsen Yayınevi, İstanbul

Linders, J. R., (1979), “Electric Wave Distortions, Their Hidden Costs and Containment”, IEEE Trans. on Industry Applications, IA-15; 458-471

McGranaghan, M. F., Shaw, J. F. Ve Owen, R. E., (1981), “Measuring Voltage and Current Harmonics on Distribution Systems”, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-93;453-457

Owen, R. E., ve McGranaghan, M. F., (1980), “Study of Distribution System Surge-Harmonic Characteristics”, EPRI Final Report Research Project, EPRI EL-1627

Parise, G., Rubino, G. Ve Ricci, M., (1996), “Life Loss of Insulated Power Cables: An Integrative Criterium to Improve the ANSI / IEEE and the CENELEC / IEC Method for Overload Protection”, University of Rome “La Sapienza”, Scientific Article, 0-7803-3544-9/96 © 1996 IEEE

Pileggi, D. J., Chandra, N. H. Ve Emanuel, A. E., (1981), “Prediction of Harmonic Voltages and Distribution Systems”, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-100; 1307-1315

Schmidt, A., (1953), “Capacitors in Power Systems with Rectifier Loads”, AIEE Trans. 77; 14-17

Sharma, V. K. ve Fleming, R. J., (1986), "Harmonic Analyses of Power Transmission Networks in the Frequency Domain", Proc. Second Int. Conference on Harmonics in Power Systems, Monitoba, Canada, 148-157

Shepherd, W. Ve Zand, P., (1979), "Energy Flow and Power Factor in Non-Sinusoidal Circuits", Cambridge University Press

Short, T. A. ve Steward, J.R., (2002), "Five-Wire Distribution System Demonstration Project", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, PAS; 649-654

Siemens AG, (1987), "Electrical Installations Handbook", Siemens AG. Ve John Wiley, New York

Steinmetz, C. P., (1917), Theory and Calculation of Electrical Circuits", McGraw-Hill, New York

The Mathworks Inc., MATLAB[®], 3 Apple Hill Drive, Natick MA USA

Westinghouse Electric Corporation, (1964), "Electrical Transmission and Distribution Reference Book", East Pittsburgh, Pennsylvania

Xia, D. Ve Heydt, G. T., (1982), "Harmonic Power Flow Studies, Part 1-Formulation and Solution", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-101

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi:		06.10.1980
Doğum Yeri:		İstanbul
Lise Eğitimi:	1991-1998	Gebze Anadolu Lisesi Fen-Matematik Bölümü
Lisans Eğitimi:	1998-2002	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans Eğitimi:	2002-2006	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Elektrik Tesisleri Programı

Çalıştığı Kurumlar:

2002-2004	Elektrik Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi
2005-2006	AREL Elektrik Ltd. Şti.