

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KArk Fır. Şeb. Üze. Etk. ve
Har. kay. Ana.

Yüksek Lisans Tezi

Sibel Zorlu

1996



YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elek.
değisiklik
(18)

ARK FIRINLARININ ŞEBEKE
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ VE HARMONİK
KAYIPLARININ ANALİZİ

Elek.Müh. Sibel ZORLU

F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Y.Doç.Dr. İbrahim ŞENOL

İSTANBUL, 1996

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
KÜTÜPHANE VE DOKÜMANTASYON
DAİRE BAŞKANLIĞI

Yer No (DDC): R 152
282

Kayıt No :..... 225

Geldiği Yer:.. Fen.Bil.Ens....

.....
Tarih :..... 22.04.1999

Fiyat :..... 300.000.TL.....

Fatura No:.....

Ayniyat No:..... 1-1

Ek :.....



YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



77s.

Y. T. Ü.
KÜTÜPHANE DOK. DALI BAŞKANLIĞI

ARK FIRINLARININ ŞEBEKE ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ VE HARMONİK KAYIPLARININ ANALİZİ

Y. T. Ü.
KÜTÜPHANE DOK. DALI BAŞKANLIĞI

Elek.Müh. Sibel ZORLU

F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Y.Doç.Dr. İbrahim ŞENOL

İSTANBUL, 1996

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 3: ARK FİRLERİ

ÖZET

ABSTRACT

BÖLÜM 1: HARMONİKLER

1.1. Nonlineer Yükler ve Harmonikler	1
1.2. Harmoniklerin Oluşumu ve Şebeke Harmoniklerinin Olumsuz Etkileri ..	2
1.3. Harmonik Bileşenlerin Fourier Serisiyle İfadesi	4
1.4. Dünyadaki Harmonik Standartları	7

BÖLÜM 2: HARMONİK ÜRETİCİLER

2.1. GİRİŞ	13
2.2. Transformatörler	13
2.2.1. Transformatör Bağlantı Şekillerinin Harmoniklerin İncelenmesindeki Önemi	15
2.2.1.1. Yıldız / Yıldız Bağlı, Primer Yıldız Noktası Nötr Hattına Bağlı Transformatör	15
2.2.1.2. Yıldız / Üçgen Bağlı Transformatör	15
2.2.1.3. Primer Sargısı Üçgen Bağlı Transformatörler	16
2.3. Generatörler	16
2.3.1. Generatör Sargıları Yıldız Bağlanmışsa	17
2.3.2. Generatörün Sargıları Üçgen Bağlanmışsa	17
2.3.3. Gerilim Eğrisinin Sinüse Yaklaştırılması	17
2.4. Dönüştürücüler	18
2.4.1. Büyük Güç Dönüştürücüler	18
2.4.2. Orta Büyüklükteki Dönüştürücüler	19
2.4.3. Düşük Güç Dönüştürücüler	19
2.5. Statik VAR Kompanzatörleri	20
2.6. Ark kaynakları	22

BÖLÜM 3: ARK FIRINLARI

3.1. Ark Fırınlarının Yapısı ve Elektriksel Donanımı.....	24
3.1.1. Yapısı	24
3.1.2. Çalışma Aşamaları	24
3.1.3. Elektrik Ark Fırınlarının Sınıflandırılması	25
3.1.3.1. Elektrot düzenlerine Göre.....	25
3.1.3.2. Büyüklüklerine Göre.....	26
3.1.3.3. Astarlama Prensiplerine Göre.....	26
3.1.4. Elektrik Ark Fırınlarında Elektriksel Bileşenlerin Yeri	26
3.1.4.1. Elektriksel Ekipmanları.....	27
3.1.4.2. Ortak Bağlantı Noktası	28
3.1.4.3. Transformatör	30
3.1.4.4. Elektrotlar.....	30
3.1.4.5. Elektrot Regülatörleri.....	31
3.1.5. Elektriksel Gelişmeler.....	31
3.2. Ark Fırınlarında Reaktif Güç Değişimi	33
3.3. Ark Fırınlarının Sebep Oldukları Bozucu Tesirler.....	34
3.3.1. Reaktif Güç	34
3.3.2. Gerilim Değişimi (Fliker Olayı).....	35
3.3.3. Dengesiz Yük	37

BÖLÜM 4 : ARK FIRINLARININ HARMONİKLERİ ve KAYIP HESABI

4.1. Ark Fırını Harmoniklerinin Üretilmesi.....	38
4.2. Harmonik Kayıplarının Analizi	40
4.2.1. Harmoniklerin Sebep Oldukları Ek (Omik) Kayıplar.....	40
4.2.1.1. Ek (Omik) Hat Kayıpları.....	40
4.2.1.2. Ek (Omik) Sargı Kayıpları.....	41
4.2.2. Harmoniklerin Sebep Olduğu Ek Nüve Kayıpları.....	42
4.2.1.2. Ek Histeresis Kayıpları	43
4.2.2.2. Ek Girdap Akım Kayıpları.....	44

SAYISAL UYGULAMA 1.....	45
SAYISAL UYGULAMA 2.....	61
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	75
KAYNAKLAR	77

ÖZET

ÖZGEÇMİŞ

Bu çalışmada, genel olarak nonlineer yükler ve bu yüklerin harmoniklerini incelemiş, harmoniklerin matematiksel ifadeleri vermiştir. Aynı zamanda harmonik kaynakları incelemiş, daha sonra bunlardan, elektriklerin ana konusunu oluşturan ark fırınları ve harmonik analizi delatı olarak da yazmıştır.

Çalışmada, nonlineer yükler doğrusal olmayan akım genliri karakterlerinden dolayı harmonik akım ve genliri üretirler. Harmoniklerden olan bu yüklerin bir de ark fırınlardır. Ark fırınlardan güç sisteminden güç çekilerek güçlenirler. Yükün sürekli değişmesi ve fılının sürekli değişmesi, harmoniklerin buna sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak akım ve genlirin değeri sürekli olarak değişir. Akım ve genlirindeki bu değişim harmoniklerin oluşmasına sebep olur.

Çalışmada, harmoniklerin, harmoniklerin harmoniklerin analizi ve delatı olarak verildiği harmoniklerin analizi yazılmıştır. Bununla ilgili olarak ark fırınlardan harmoniklerin analizi yazılmıştır. Sonuçlar delatı olarak verildiği harmoniklerin analizi yazılmıştır.

ÖZET

Bu çalışmanın ilk bölümünde, genel olarak nonlinear yükler ve bu yüklerin sebep olduğu harmonikler incelenmiş, harmoniklerin matematiksel ifadeleri verilmiştir. İkinci bölümde harmonik kaynakları incelenmiş, daha sonra bunlardan, çalışmanın ana konusunu oluşturan ark fırınları ve harmonik analizi detaylı olarak ele alınmıştır.

Güç sistemlerinde, nonlinear yükler, doğrusal olmayan akım gerilim karakteristikleri nedeniyle harmonikli akım ve gerilim üretirler. Harmoniğe neden olan bu yüklerden biri de ark fırınlarıdır. Ark fırınlarının güç sisteminden çektiği akımlar gelişigüze'dir. Yükün sürekli değişmesi ve fazların sürekli dengesiz yüklenmeleri, buna sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak akım ve gerilimin dalga şekli sinüs formundan uzaklaşır. Akım ve gerilimdeki bu değişimler harmoniklerin oluşmasına sebep olur.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, ark fırını harmoniklerinin analizi ve ölçümüne yer verilmiş, harmonik kayıpların analizi yapılmıştır. Bununla ilgili olarak, ark fırını içeren 2 farklı sisteme ait sayısal uygulama yapılmış, sonuçlar irdelenmiştir.

ABSTRACT

In the first chapter of this study, non-linear loads and their harmonics are investigated, then the mathematical formulation is given. In the second chapter, harmonic sources are analyzed, later arc furnace and the analysis that is the main subject of this thesis are studied in detail.

Non-linear loads in power systems produce harmonic current and voltages, because of non-linear current-voltage characteristics. One of the loads creating harmonics is arc furnace. The current that arc furnace draws from power system is at random. That is because the load changes and the phases are charged unsteady, continuously. As a result of this, the wave form of current and voltage deviates from sine form. These changes in the current and voltage characteristics cause harmonics.

In the fourth chapter, the analyzing and measuring of the arc furnace harmonics are considered and the analyzing of harmonics losses is submitted. Numerical applications for two different systems containing arc furnace are submitted and the results are discussed.

BÖLÜM 1

HARMONİKLER

1.1. NONLİNEER YÜKLER VE HARMONİKLER

Güç sistemi, elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve tüketimine ilişkin tesislerden oluşmuştur. Bu tesisler elektrik enerjisinin akım ve gerilim değerlerini ve türünü, dalga şekillerini ve frekanslarını istenen çalışma koşullarına göre değiştirir. Güç sisteminde farklı amaçlarla kullanılan bazı cihaz ve devrelerin (generatör, transformatör, a.a. ve d.a. enerji nakil hattı, kondansatör, dinamik kompanzatör, elektrik motoru, doğrultucu, evirici, direkt frekans çeviricisi, ark fırını, güç filtresi, statik VAr sistemi, alternatif akım kıyıcısı, anahtarlama güç kaynağı, endüksiyon fırını) giriş veya çıkış kapılarındaki $V - I$ karakteristikleri doğrusal değilse, bu tür devreler, şebeke akım ve gerilim dalga şeklinin sinüsten uzaklaşmasına ve harmoniklerin meydana gelmesine neden olurlar. Akım ve gerilimde bozulmalar gözlemlendiğinde, sürekli ve geçici hal durumlarında devre modellemesi yapılırken, kaynaklarda, şebekede veya yükte lineersizlik olduğu düşünülür. Aslında bozulmuş olan akım ve gerilim dalga şekilleri, şebekede bulunan değişik frekanstaki gerilim ve akımların toplamından ibarettir.

Yukarıda oluşumundan bahsedilen harmonikler istenmese de birçok işletmede kendiliğinden ortaya çıkarlar. Bunlar işletme araçlarını ve tesisleri olumsuz şekilde yükleyerek kaybın artmasına sebep olurlar. Ayrıca rezonans olaylarına da yol açarak işletmenin devamını imkansız bir duruma getirirler. Bazı durumlarda harmoniklerin başgöstermesi, işletme araçlarında belirli hataların meydana geldiğine işarettir. Bu yüzden elektrik işletmelerinde birinci derecede harmoniklerin meydana gelmemesi için tedbirler alınır. Ancak bunun

gerçekleştirilmesi her zaman mümkün olmadığından, ikinci derecede bunları etkisiz hale getirmek için çarelere başvurulur.

1.2. HARMONİKLERİN OLUŞUMU VE ŞEBEKE HARMONİKLERİNİN OLUMSUZ ETKİLERİ

Harmoniklerin ortaya çıkış sebepleri çeşitlidir. Bunların başında magnetik ve elektrik devrelerindeki lineersizlik gelir. Örneğin transformatörler veya bobinler gibi demir çekirdekleri olan cihazlarda doymanın meydana gelmesi, magnetik bakımdan lineer olmayan bir olaydır. Ark fırınlarında olduğu gibi, normal işletme gereği bir arkın oluşması ve redresörler ile tristörlerde olduğu gibi, sinüzoidal akım dalgasının kesilmesi de elektrik devrelerinin lineer olmamasına yol açar. Bunun sonucu olarak akım ve gerilimin dalga şekli bozulur.

Lineersizlik yüksek mertebeli, mesela karesel terimlerin meydana gelmesine sebep olur. Bu da kendisini çeşitli şekillerde hissettirir :

1. Karesel bir terim, bir doğru akım bileşeninin meydana gelmesine yol açar.
2. Akım ve gerilimin temel harmoniklerinin tepe değerleri birbirleri ile orantılı olmazlar.
3. Her temel harmoniğin tepe değeri üzerine, başka harmonikler tesir ederler.
4. Tam sayılı harmonikler meydana gelir.

Bu sebeplerden dolayı, işletme araçlarının elektriksel büyüklüklerinin hesaplanması esnasında karakteristiklerin lineer olmaması ayrıca göz önünde bulundurulmalıdır.

Harmonik üretimi bakımından çok çeşitli imkanlar vardır. En belirgin sınır haller şunlardır :

1. Harmoniksiz gerilim ile işletme:

İşletme araçlarının karakteristiklerinin lineer olmaması sebebi ile harmonikli akım meydana gelir. Bu akımın, iç empedansı çok büyük olan bir akım kaynağında üretildiği kabul edilir.

2. Harmoniksiz akım ile işletme :

İşletme araçlarının karakteristiklerinin lineer olmaması sebebi ile harmonikli bir gerilim meydana gelir. Bu gerilimin, iç empedansı ihmal edilecek kadar küçük olan bir gerilim kaynağından üretildiği kabul edilir.

3. Harmonikli akım ile işletme :

Bunun tesiri ile gerilim de harmonik kazanır. Aksine olarak, gerilim harmonikli ise bu, akımın da harmonikli olmasını gerektirir.

Bunlardan en önemlisi ve pratikte en çok rastlanan durum 1. durumdur. Yani şebekeden tesise uygulanan faz arası gerilim sinüs şeklinde olduğu halde özellikle akım, bu arada faz gerilimi harmonikli olur.

Akım ve gerilimdeki bu bozulmalar, şebekeye harmonikli bileşenlerin verilmesi anlamına gelir. Aslında bozulmuş olan akım ve gerilim dalga şekilleri, şebekede bulunan değişik frekanstaki akım ve gerilimlerin toplamından ibarettir.

Anlatıldığı gibi, üretilirken tam sinüs şeklinde olmayan şebeke gerilimi iletim ve tüketim sırasında daha da harmonikli hale gelmektedir. Bu da şebekede aşağıda kısaca verilen olumsuz etkilere sebep olmaktadır.

1. Paralel ya da seri rezonans olaylarının meydana gelmesi
2. Generatör ve şebeke gerilimi üzerine etki
3. Gerilim düşümünün artması ve fliker olayı
4. Kondansatör üzerine etki
5. Kayıpların artması
6. Elektrik makinaları üzerine etki

7. Sayaçlar üzerine etki
8. Kontrol cihazları üzerine etki
9. Mikro bilgi işlemciler üzerine etki
10. İzolasyon delinmesi
11. Yarı iletkenler üzerine etki
12. Haberleşme tesisleri üzerine etki.

Şebeke harmoniklerinin bu etkilerini kontrol etmek amacıyla bazı sınırlamalara gidilmiştir. Bunlardan en önemlisi, harmonik bozulma katsayısıdır^(*). Bu katsayı toplam harmonik miktarını gösterir. Bu sınırlamaya ilave olarak, akım harmoniği için de sınırlamaya gidilmiştir. Bazı ülkelerde, şebeke kısa devre gücüne göre sınırlamalar da getirilmektedir. Yukarıda belirtilen harmonik etkilerini gidermek için öncelikle tesisi, şebeke kısa devre gücünün büyük olduğu noktaya kurmak ya da kurulmuş tesis ise tesisin bulunduğu noktadaki şebeke kısa devre gücünü artırmak gerekir. Bu mümkün olmazsa uygun filtreler ve/veya statik VAR sistemleri kurulabilir. Bu noktada maliyet optimizasyon sorununa dikkat etmek gerekir.

1.3. HARMONİK BİLEŞENLERİN FOURIER SERİSİYLE İFADESİ

Harmoniklerin yukarıda anlatılan genel oluşumundan da anlaşılacağı gibi, harmonikler, periyodik bir dalganın, temel frekansın tam katı olan bir frekansa sahip sinüs biçimli bileşeni olarak tanımlanabilir. Böylece harmonikler, bir elektrik sisteminde temel frekansın bazı tam katlarında ortaya çıkan akımlar ve gerilimler olarak dikkate alınırlar. Buna göre harmoniğin frekansı,

$$f_n = n \cdot f_1 \quad (n \neq 1) \quad (1)$$

^(*) Harmonik bozulma katsayısına “Dünyadaki Harmonik Standartları” konusunda geniş yer verilmiştir.

olacaktır. Burada ;

n : Harmoniklerin mertebesi

f_1 : Temel frekans

Dengeli üç fazlı alternatif akım şebekelerinde, kalıcı durumlarda etkin olabilecek harmonikler,

$$n=6k \pm 1 \quad (k=1,2,3,\dots) \quad (2)$$

eşitliğiyle bulunur. Buna göre 5,7,11,13, ... mertebeli harmonikler etkin olabilir. Görüldüğü gibi çift mertebeli harmonikler ile üçlü (üç ve üçün katı) harmonikler söz konusu değildir. Dengesiz bir sistemde ise, sistem parametrelerine ve çalışma koşullarına bağlı olarak her mertebeden harmonikler görülebilir. Harmonik akım ve gerilimlerinin genlikleri harmonik mertebesiyle ters orantılıdır; mertebe büyüdükçe genlik azalır.

Genel olarak bilindiği gibi, sinüs şeklinde olmayan herhangi periyodik bir fonksiyon Fourier serisine göre, sonsuz sayıda harmoniklerin toplamına eşittir. Buna göre sinüs şeklinde olmayan bir periyodik dalga şekli, 50 Hz'in tam katları olan frekanslara sahip sinüs biçimli dalga şekillerinin bir serisine açılabilir.

$$X(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right] \quad (3)$$

Bu ifade ile periyodik bir fonksiyon frekans domeninde gösterilebilir. Burada a_0 , $X(t)$ fonksiyonunun ortalama değeri, a_n ve b_n ise serinin katsayılarıdır. n . harmonik vektörüne karşılık gelen ifade ;

$$A_n \angle \varphi_n = a_n + j b_n \quad (4)$$

olarak verilir. Burada n . harmoniğin genliği

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (5)$$

ve faz açısı da

$$\varphi_n = \tan^{-1}(b_n/a_n) \quad (6)$$

şeklinde verilir. Serideki a_0 , a_n ve b_n aşağıdaki eşitliklerden bulunur.

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} X(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (7)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} X(t) \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (8)$$

Sinüzoidal olmayan periyodik dalga şekillerinin özelliklerine göre fonksiyon da bazı özellikler gösterir. Mesela denklem (3)'teki fonksiyonda $X(t) = X(-t)$ ise, buna çift simetrik fonksiyon denir. Bu durumda $b_n = 0$ 'dır ve fonksiyon sadece cosinüslü terimlerden oluşur. Eğer $X(t) = -X(-t)$ ise, buna tek simetrik fonksiyon denir. Bu durumda da $a_n = 0$ 'dır ve fonksiyon sinüslü terimlerden oluşur.

Ama $X(t) = -X(t+\pi)$ ise, yani fonksiyon 0^- noktasına göre simetrik ise, bu durumda a_n ve b_n 'in yalnız tek sayılı terimleri mevcuttur, yani harmonik mertebesi $n = 1, 3, 5, 7, 9, \dots$ gibi sayılar alır. Eğer aynı zamanda $X(t) = -X(\pi - t)$ ise, yani eğrinin yalnız bir yarı periyottaki bölümü, π kadar kaydırıldığında ikinci yarı periyottaki bölümüne x eksenine göre simetrik eşit ise, bu durumda fonksiyon tek mertebeli sinüs fonksiyonlarından oluşur. Sinüzoidal olmayan endüksiyon akım, gerilim v.b. gibi elektriksel büyüklükler için en çok rastlanan şekiller, dikdörtgen, eşkenar üçgen ve trapez dalga şekilleri veya bunların

benzerleridir. Bu eğrilerde $b_n = 0$ olduğu gibi $n = 1, 3, 5, 9, \dots$ dur, yani bu eğrilere ait fourier serisi, tek mertebeli sinüslü terimlerin toplamına eşittir. Bunlardan 3. ve 3' ün katları olan 3., 9., 15., ... v.b. gibi harmoniklerin R, S, T fazlarındaki değerleri arasındaki faz farkı 120° nin ve 240° nin 3 katına veya 3' ün katlarına eşit olduklarından, bu faz farkları daima 360° nin tam sayılı katlarına eşittir. Bu yüzden 3. ve 3' ün katlarına eşit olan harmonikler, daima R, S ve T fazlarında eşit fazlıdır ve cebirsel toplanırlar, onun için bunlara sıfır bileşeni de denilebilir. Bunun dışında kalan 1., 7., 13., ... gibi harmonikler sağa dönen (doğru sistem) ve 5., 11., 17. gibi harmonikler ise sola dönen (ters sistem) sistemler verirler.

2. Bu aşamada yapılacak olan harmonik akım ve gerilimleri ile harmonik Distorsiyona sebep olan yük bağlanırken, bu yüklerin sisteme etkilerinin belirlenmesine dikkat edilir. Burada

Bazı ülkeler harmoniklere, son yıllarda önem kazanmasından dolayı sınırlamalar getirmişlerdir. Sınırlamada en önemli ölçüt olarak “ Toplam Harmonik Distorsiyon (THD) “ katsayısı dikkate alınmıştır. Gerilim için bu değer aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

Tablo 3- 4. Avrupa 1. aşama için kabul edilen harmonik değerleri.

$$\% THD = \frac{\left| \sum_{h=2}^{\infty} V_h^2 \right|^{1/2}}{V_1} \quad (9)$$

Çeşitli ülkelerdeki bara gerilimlerine göre farklı THD değerleri kabul edilmiştir. Ükelere göre bu sınır değerler şöyle uygulanmaktadır :

FRANSA

Bu ülkede EDF'nin kayıtlarına göre, bağlantı noktasındaki tek harmoniklerin % 1.0, çift harmoniklerin ise %0.6 değerini aşmaması öngörülmüştür. Bu oranlar temel bileşen cinsinden verilmektedir.

İNGİLTERE

İngiltere'nin bu konu ile ilgili yönetmeliği G5/3 dönüştürücü boyutlarını üç aşamada değerlendirmiştir.

1. Bu aşamada harmonik üreten kaynak sadece boyutları açısından değerlendirilir, harmonik seviyeleri kapsamlı olarak dikkate alınmaz. Aşağıda Tablo 1' de, 1. aşama kapsamına giren, teorik olarak tek harmonikleri üreten 5 kVA'yı veya 415/480 V 'da, 7.5 kVA' yı aşmayan tek fazlı harmonik kaynakları bulunmaktadır (Arrillaga et al, 1985).

2. Bu aşamada boyutlar yerine, harmonik akım ve gerilimleri ile harmonik gerilim distorsiyonu seviyesi dikkate alınmıştır. Distorsiyona sebep olan yük bağlanırken, ek yükün akım seviyesini aşmamasına dikkat edilir. Burada bağlantı öncesi mevcut gerilim distorsiyonu izin verileninkinden %75 daha azdır. Bu aşamada yer alan dönüştürücüler için harmonik sınırları Tablo 2 ve gerilim distorsiyon sınırları da Tablo 3' de verilmiştir.

Tablo 1. İngiltere'de 1. aşama için kabul edilen harmonik değerleri

Ortak bağlantı noktasında kaynak gerilimi (kV)	Üç fazlı dönüştürücüler		
	3- faz (kVA)	6- faz (kVA)	12- faz (kVA)
0.415	8	12	-
6.6 ve 11	85	130	250

Bu aşamada 1. ve 2. aşama sınırlarına girmeyen, gerilim distorsiyonunun %75 seviyesinin üzerinde olduğu durumlardaki bozucu yükler sınıflandırılmıştır. Bu yüklerin şebekeye bağlanmasında bu konuda öngörülen bir hesap yöntemi

kullanılır. Tablo 4' de harmonik akım sınırlarına göre dönüştürücü yerleştirilmesindeki maksimum yük sınırları verilmektedir.

Tablo 2. İngiltere'de 2. Aşama için kabul edilen harmonik sınırları

Kaynak Gerilimi (k V)	Harmonik mertebesi ve harmonik akımı (A)															
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0.415	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6
6.6 ve 11	1	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2
33	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2
132	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1

Tablo 3. Sistemin herhangi bir noktasındaki gerilim distorsiyon sınırları

Kaynak Gerilimi (kV)	Toplam Harmonik Distorsiyon (%)	Harmonik distorsiyonu (%)	
		Tek	Çift
0.415	5	4	2
6.6 ve 11	4	3	1.75
33	3	2	1
132	1.5	1	0.5

Ta blo 4. İngiltere’de 3. aşamada dönüştürücü yerleştirilmesindeki maksimum yük sınırları

Kaynak Gerilimi (kV)	Dönüştürücü Tipi	Kabul Edilebilir kVA Sınırları		
		3-faz	6-faz	12-faz
0.415	Kotrolsüz	-	150	300
	Yarı kontrollü	-	65	-
	Kontrollü	-	100	150
6.6 ve 11	Kotrolsüz	400	1000	3000
	Yarı kontrollü	-	500	-
	Kontrollü	-	800	1500
33	Kotrolsüz	1200	3000	7600
	Yarı kontrollü	-	1200	-
	Kontrollü	-	2400	3800
132	Kotrolsüz	1800	5200	15000
	Yarı kontrollü	-	2200	-
	Kontrollü	-	4700	7500

ALMANYA

Bu ülkede DIN 57160 (VDE 0160/11.81) normuna göre, toplam harmonik gerilimi temel bileşenin %10'unu aşmamalıdır. Ayrıca 15. harmoniğe kadar izin verilen gerilim harmoniği yüzdesi 5 iken, 100. harmoniğe kadar %1' lik gerilim harmoniğine izin verilebilmektedir.

AMERİKA BİRLEŞİK DEVLETLERİ

Bu ülkede IEEE'nin THD ile ilgili sınırlamaları genel enerji sistemleri için bir tablo şeklinde şöyle verilebilir (IEEE, 1981).

Tablo 5. IEEE'nin Amerika Birleşik Devletleri için belirlediği THD sınırları

İşletme Gerilimi	THD (%)
2.4 kV, ..., 69 kV	5.0
115 kV ve üzeri	3.0

AVUSTRALYA

Bu ülkenin standartı AS 2279, gerilim kademesini dikkate alarak değerlendirme yapmıştır (Australian Standards Authority, 1979). Örneğin tek ve çift harmonik sınırlamaları şu şekilde belirlenmiştir.

Tablo 6. AS 2279 Standardına göre harmonik sınırlamaları

İşletme Gerilimi	THD (%)	Tek Harmonik (%)	Çift Harmonik (%)
33 kV'a kadar	5	4	2
22 kV, 33 kV, 66 kV	3	2	1
110 kV ve üzeri	1.5	1.5	0.5

YENİ ZELANDA

Bu ülkenin 1981 yılında yayımlanan ilgili yönetmeliği, akım ve gerilim harmoniklerinin sınırlarını 66 kV üzerindeki gerilim kademeleri için vermektedir. Tablo 7' de harmonik mertebesine göre gerilim harmoniklerinin sınırları verilmiştir.

Tablo 7. Yeni Zelanda için harmonik sınırları

Harmonik Mertebesi (n)	V_n / Nominal Faz Gerilimi
3	2.3
5	1.4
7	1.0
9	0.8
11	0.7
13	0.6
15	0.5
17-21	0.4
23-49	0.3
2	1.2
4	0.6
6	0.6
8 ve 10	0.3
12-50	0.2

BÖLÜM 2

HARMONİK ÜRETİCİLER

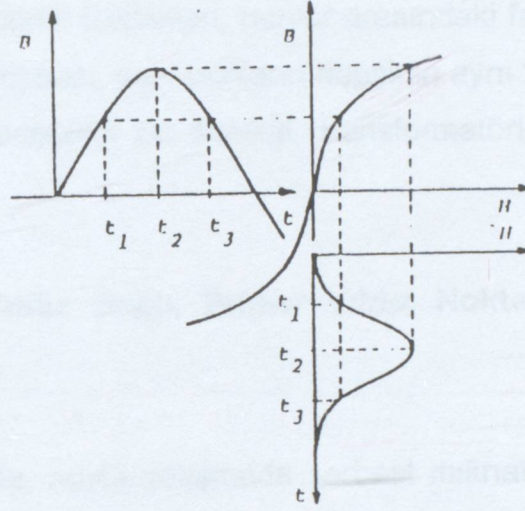
2.1. GİRİŞ

Şebekelerdeki doğrusal olmayan devre elemanları, lineer olmayan akım-gerilim karakteristikleri nedeniyle harmonikli akım ve gerilim üretirler. Bu elemanlar, 50 Hz temel frekanslı aktif ve reaktif güç tüketirken, harmonik frekanslı akımlar üretirler. Harmonik akımları devrelerini diğer elemanlar üzerinden tamamlayarak, harmonik frekanslı gerilimlerin oluşmasına neden olurlar. Harmonik üreten kaynakların en önemlileri şunlardır :

- 1- Transformatörler
- 2- Generatörler
- 3- Statik Dönüştürücüler
- 4- Statik VAr Kompanzatörleri
- 5- Ark Kaynakları

2.2. TRANSFORMATÖRLER

Transformatörlerin önemli bir harmonik kaynağı olmasının sebebi, demir çekirdeğinin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmayışına dayanır. Sinüs şeklinde bir gerilimle beslenen üç fazlı transformatörler şebekeden mıknatıslanma akımı çekerler. Demir çekirdeğinin magnetik karakteristiği lineer olmadığından, bu mıknatıslanma akımı da sinüzoidal olmaz. Şekil 1' de sinüzoidal şebeke gerilimi, mıknatıslanma karakteristiği ve mıknatıslanma akımı gösterilmiştir.



Şekil 1. Transformatörün mıknatıslanma karakteristiği

Mıknatıslanma akımının harmoniklerinin tepe değerleri, temel mıknatıslanma akımının tepe değerinden küçüktür. Aslında transformatörlerin mıknatıslanma akımları da, nominal akımlarının %1-10'u kadardır. Buna rağmen seri bağlı generatör, hat ve transformatör reaktansları frekansla orantılı olarak arttığında, özellikle düşük yüklerde, yüksek harmonik akımları bunlar üzerinde büyük değerli reaktif gerilimlere sebep olurlar. Mıknatıslanma akımındaki harmoniklerin şebekeye geçip geçmemesi aşağıdaki faktörlere bağlıdır :

1. Transformatör sargılarının bağlantı şekli
2. Primerdeki yıldız bağlı sargılarda, yıldız noktasının, şebekenin nötr hattına bağlanıp bağlanmaması
3. Transformatörlerde mıknatıslanmanın serbest veya zorunlu olması

2.2.1. Transformatör Bağlantı Şekillerinin Harmoniklerin İncelenmesindeki Önemi

Akım şiddeti bakımından en önemli harmonik, 3. harmoniktir. 3. ve 3'ün katı harmoniklerin en önemli özellikleri, bunlar arasındaki faz farkının 360^0 nin tam sayılı katlarına eşit olması, yani bunların hepsinin aynı fazda olmalarıdır. İşte 3. ve 3'ün katı harmoniklerin bu özelliği, transformatörlerin bağlama şekillerini mühim kılar.

2.2.1.1. Yıldız / Yıldız Bağlı, Primer Yıldız Noktası Nötr Hattına Bağlı Transformatör

Bu bağlantı şeklinde, boşta çalışmada serbest mıknatıslanmalı transformatörlerde her bir faz sargısından bir mıknatıslama akımı akar. Ancak temel harmoniğin faz akımları arasında 120^0 lik faz farkı olduğundan, yıldız noktasında bunların toplamı sıfır eder. 3. ve 3'ün katı harmonik akımları ise eşit fazlı olduklarından yıldız noktasında cebirsel olarak toplanırlar. Bu yüzden nötr hattından her bir faz sargısından gelen 3. ve 3'ün katı frekanslı harmonik akımının 3 katına eşit bir akım geçer. Buna karşılık 3'ün katlarına eşit olmayan 5., 7., 11., 13., ... gibi harmoniklerin toplamı da yıldız noktasından geçmezler. Bu gibi transformatörlerde akılar ve her bir faz sargısında endüklenen gerilim sinüs şeklindedir. Demir çekirdeğin her üç bacağından geçen akımlar toplamı sıfıra eşittir.

2.2.1.2. Yıldız / Üçgen Bağlı Transformatörler

Bu bağlantı şeklinde primer yıldız noktası şebekenin nötr hattına bağlanmamışsa, sekonder sargının üçgen bağlı olmasının hiçbir önemi yoktur ve olaylar yukarıda anlatılan yıldız/yıldız bağlantıyla aynıdır. Ama primer yıldız noktası nötr hattına bağlanmamışsa, bu anlatılanlara ilaveten 3. ve 3'ün katı

akı harmonikleri, üçgen sekonder, sargıda 3 ve 3'ün katı frekanslı sirkülasyon akımlarının geçmesine sebep olur. Bu akımlar da kendilerini endükleyen akılara ters yönde tesir ederek bunları söndürürler. Üçgen bağlantının bu özelliğinden dolayı transformatörlerin sargılarından biri tercihen üçgen bağlanır ya da transformatörler üçgen bağlı özel bir tersiyer sargı ile donatılırlar.

2.2.1.3. Primer Sargısı Üçgen Bağlı Transformatörler

Primer taraf üçgen olduğundan her bir sargı kendi başına beslenmiş gibi tesir eder. Faz sargılarında mıknatıslanma akımında 3., 9., 15. v.b. harmonikler meydana gelir. Bunlar her sargıda eşit fazlı olduklarından, üçgen bağlı sargı içinde kalırlar ve dışarı çıkmazlar. Bu yüzden şebekeden çekilen mıknatıslanma akımında 3., 9., 15. v.b. gibi harmonikler çekilirler. Böylece magnetik akının sinüs şeklinde olabilmesi için mıknatıslanma akımında gerekli bütün harmonikler bulunduğundan, mıknatıslanma zor olmaz ve magnetik akı 3., 9., 15. v.b. harmonikleri bulundurmaz.

2.3. GENERATÖRLER

Dönen makinalarda harmonik üretimi bakımından en önemli faktör, alan eğrisinin şeklidir. Stator sargılarında endüklenen emk, ϕ endüksiyon akısıyla orantılıdır. Bu yüzden emk'nın sinüs şeklinde olması, ϕ 'nin de sinüs şeklinde olmasına bağlıdır. Ama çıkık kutuplu ve kutup başlığı boyunca hava aralığı sabit olan senkron makinalarda alan eğrisi yaklaşık dikdörtgen ve yuvarlak kutuplu makinalarda trapez şeklindedir. Bu gibi sinüzoidal olmayan eğriler 1., 3., 5., 7., ... gibi tek mertebeli sinüslü terimlerinin toplamına eşit olduğundan, endüklenen emk da prensip olarak aynı mertebeden harmonikleri içerir.

Her üç faz sargısında 3. ve 3'ün katı gerilim harmonikleri aynı fazda olduğundan, bunlar 3 fazlı bir döner alan sistemi oluşturmazlar. Ancak her bir

faz sargısının ya başından sonuna ya da sonundan başına doğru yönelmişlerdir.

2.3.1. Generatör Sargıları Yıldız Bağlanmışsa

3. ve 3'ün katı frekanslı harmonikler sadece faz gerilimlerinde bulunurlar. Buna karşılık faz arası gerilimler, iki faz geriliminin farkına eşit olduklarından, eşit fazlı harmonikler birbirini götürür ve faz arası gerilimler bu harmoniklerden arınmış olurlar.

2.3.2. Generatörün Sargıları Üçgen Bağlanmışsa

Her fazın sargısına ait eşit fazlı harmonik emk'ları kapalı üçgen sargı içinde 3'ün katları frekanslı bir sirkülasyon akımı geçer. Bu akımlar sargı içinde kalırlar ve dışarıdaki faz iletkenlerinde bulunmazlar. Bu sirkülasyon akımları, makinanın yüküne hemen hemen hiç bağlı değildir. Ama bunlar, sargılarda oldukça büyük kayıpların meydana gelmesine yol açarlar. Bu yüzden elektrik makinalarında üçgen bağlamadan mümkün olduğunca kaçınılır ve generatör sargılarının yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılmış olması tercih edilir.

Üç fazlı sistemde 3. ve 3'ün katı harmonikler bir döner alan vermedikleri için geriye 5., 7., 11., 13. gibi harmonikler kalır; bunlardan büyüklük bakımından en önemlisi 5. ve 7. harmoniklerdir. 7. ve 13. harmonikler, temel harmonik gibi doğru yönde döndükleri halde 5. ve 11. harmonikler ters yönde dönerler. Endüklenen gerilimlerde bu harmonikler bulunurlar.

2.3.3. Gerilim Eğrisinin Sinüse Yaklaştırılması

1. Üç fazlı normal bir sargıda n. harmonik geriliminin temel harmonik gerilimine oranı $1/n$ ile orantılı olarak azalır. Bu durumda alan eğrisinde belirli harmonik

değerleri bulunmasına rağmen, endüklenen gerilimde harmoniklerin etkisi çok daha düşüktür, yani gerilim eğrisi sinüs eğrisine çok yakındır.

2. Stator sargılarının özel bir şekilde düzenlenmesi, örneğin sargı adımlarının uygun seçilmesi ve kırışlenme yolu ile alan eğrisindeki 3. harmonikten başka özellikle belirgin olan, mesela 5. ve 7. harmonikler, gerilim eğrisinde tamamen ortadan kaldırılabirler.

3. Çıkık kutuplu senkron makinalarda kutuplara uygun şekil verilmesi, hava aralığının belirli şekilde düzenlenmesi, olukların yan meyilli yapılması v.b. gibi konstrüktif çarelere başvurarak gerilim eğrisinin tamamen sinüzoidal olması sağlanır.

Bu açıklamalardan da anlaşıldığı gibi generatörler önemli bir harmonik kaynağı değildirler. Bununla beraber generatörün yüklenmesi ile gerilimde beliren küçük harmonikler, generatör yüküne bağlı olarak, akım eğrisinde az veya çok bozulma meydana getirirler. Örneğin kapasitif yük, akımda da önemli harmoniklerin baş göstermesine sebep olur. Onun için, generatör yüklendiğinde gerilim eğrisinin mümkün olduğu kadar sinüs şeklinde kalması arzu edilir.

2.4. DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

Günümüzde geniş bir uygulama alanı olan güç elektroniği düzenekli donanımlar, önemli harmonik kaynağıdırlar. Anahtarlama prensibine göre çalışan redresörler, inverterler, doğrudan frekans çeviriciler ve a.a. kıyıcılar gibi elemanlardan oluşurlar. Dönüştürücüler 3 grupta incelenebilir :

2.4.1. Büyük Güç Dönüştürücüleri

Daha çok, yüksek gerilim doğru akım ile enerji iletiminde ve özel metal endüstrisinde kullanılırlar. Güçleri MW' lar mertebesindedir. D.a. tarafında, a.a. tarafından daha yüksek endüktansa sahiptirler. Bu yüzden dönüştürücü, a.a.

tarafında harmonik akım kaynağı, d.a. tarafında ise harmonik gerilim kaynağı gibi davranır. Bir dönüştürücüdeki harmonik mertebesi;

$$n = k.p \pm 1 \quad k = 1,2,3,\dots \quad (10)$$

eşitliğiyle verilir (Sundberg, 1976). Burada p, dönüştürücünün darbe sayısıdır, genelde 6,12 veya 24'dür. n ise harmonik mertebesini gösterir.

2.4.2. Orta Büyüklükteki Dönüştürücüler

Bu büyüklükteki dönüştürücüler üretim endüstrisinde, motor kontrolünde ve ayrıca elektrikli ulaşım sistemlerinde kullanılır. Endüstriyel tesislerde, özellikle a.a. ve d.a. motor kontrolünde geniş kullanım alanları vardır.

2.4.3. Düşük Güç Dönüştürücüler

Bu dönüştürücülere, televizyon setlerinde ve akü doldurma devrelerinde kullanılan dönüştürücüler örnek verilebilir. Bu iki tip yükü gözönünde bulundurarak, harmonik bozulmaya katkı bulunabilir. Bu yükler, aynı anda etken olan birimlerin sayısı çok olduğunda önemlidir (Arrillage et al, 1985).

Dönüştürücülerin harmonik davranışları için yapılan bazı kabuller:

1. Üç fazlı sistemin tüm parametrelerinin simetrik olması :

Alternatif gerilimler tam sinüs biçimli, genlikleri eşit, aralarındaki faz farkı 120° (dengeli) ve pozitif sıradadırlar.

2. D.a. tarafındaki akım dalgalanmasının sıfır olması (harmonik bileşen içermemesi)

Bu durumda doğru akım tarafındaki düzleştirme endüktansı için $L_m = \infty$ varsayımı yapılmaktadır.

3. Tristörlerin tetikleme açılarının aynı olması.
4. Her üç fazdaki komütasyon endüktanslarının aynı olması.
5. Dönüştürücünün kararlı halde olması.
6. D.a veya a.a. tarafında herhangi başka bir harmonik kaynağın bulunmaması.

Bunlardan herhangi birisinin bozulması, pratik çalışma koşullarında, harmonik davranış gösteren 6 ve 12 darbeleri dönüştürücülerin sıradışı davranışta bulunmasına sebep olur (Reeve, 1971).

2.5. STATİK VAR KOMPANZATÖRLERİ

Tristör kontrollü reaktör (TKR), ark fırınlı güç dağıtım sistemlerinde bir şönt kompanzatör olarak veya değişik amaçlar için kullanılmaktadır. Gerilim seviyelerini korumak, gerilim flikerini azaltmak, güç faktörünü düzeltmek, faz dengesizliğini gidermek ve güç sistem kararlılığını sağlamak TKR'nin uygulama alanlarıdır.

Şekil 2'de bir TKR güç devresi gösterilmiştir. Güç kayıplarından dolayı sadece küçük bir faz bileşeni içeren reaktör akımı, gerilimden yaklaşık 90° geridedir. Tam iletim akımı sinüs biçimli olmakla birlikte, tristörlerin tetikleme gecikmesi akım genliğini azaltır ve dalga biçimini değiştirir. Her iki tristör için tetikleme açısı dengeli ise, kısmi iletim sonucu oluşan harmonik akımları tek sıralı olacaktır.

Harmonik bileşenin etkin değeri,

$$I_n = \frac{4V}{\pi X} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{2(n+1)} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{2(n-1)} - \cos\alpha \frac{\sin\alpha}{n} \right] \quad (11)$$

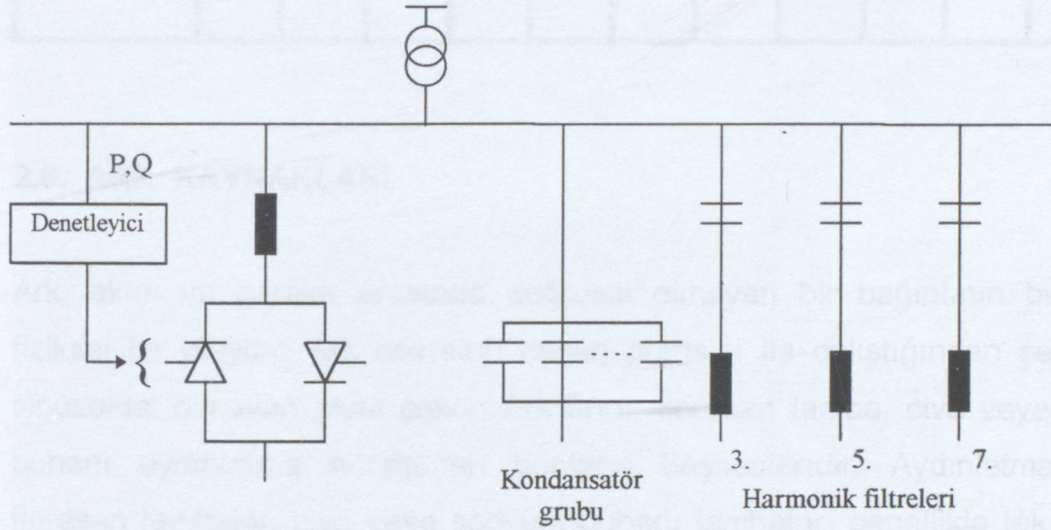
eşitliği ile verilir. Burada;

$n = 3, 5, 7, \dots$

V = Hatlararası temel gerilim

X = Her bir fazdaki reaktörlerin toplam endüktif reaktansı

α = Tetikleme açısı



Şekil 2. TKR ve sabit kondansatörlü bir kompensasyon sistemi

Dengeli durumlar için 25. mertebeye kadar olan harmoniklerin en büyük genlikleri Tablo 8'e verilmiştir. Tam iletimde temel bileşen genliğinin yüzdesi olarak verilen değerler, faz ve hat akımlarının her ikisi için de aynıdır. Parantez içindeki değerler üçlü harmoniklere aittir. Dengeli durumlarda faz akımlarında üçlü harmonikler görülür ama hat akımlarında görülmez. Bununla birlikte, dengesiz durumların bulunduğu ark fırın uygulamasında, hat akımlarında bazı üçlü harmonikler görülür. Faz akımlarının dengesiz olduğu durumda, hat akımlarında faz harmoniklerinin fazör toplamaları olan özel harmonikler görülür.

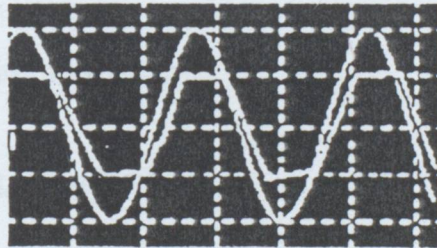
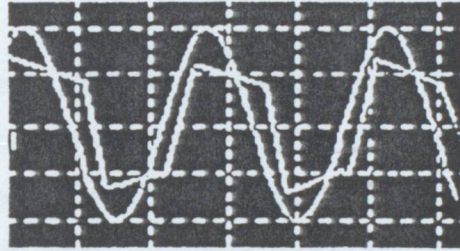
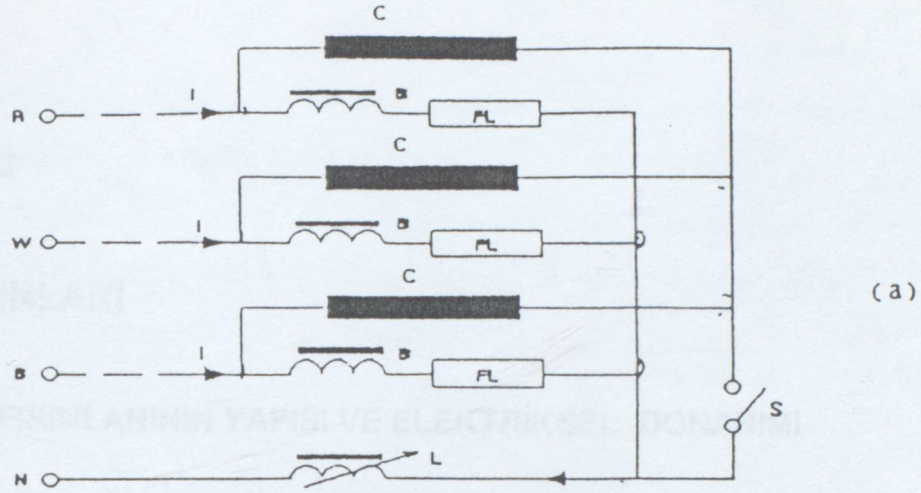
Tablo 8. TKR' de harmonik akımların en büyük genlikleri

Harmonik mer tebesi	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
Harmonik genliği (%)	13.8	5.05	2.59	1.57	1.05	0.75	0.57	0.44	0.35	0.29	0.24	0.20

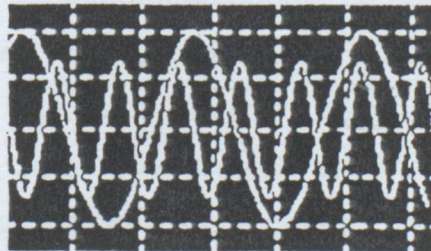
2.6. ARK KAYNAKLARI

Ark, akım ve gerilim arasında doğrusal olmayan bir bağıntının bulunduğu fiziksel bir olaydır. Ark devreleri deşarj prensibi ile çalıştığından şebekeden sinüzoidal olmayan akım çeker. Ark fırını, floresan lamba, civa veya sodyum buharlı aydınlatma armatürleri bunların başlıcalarıdır. Aydınlatma amaçlı floresan lambalar, civa veya sodyum buharlı lambalar, genellikle tek dereceli harmonik üreticilerindendir.

Şekil 3'deki test devresine ilişkin osilogram sonuçlarından görüleceği üzere, sinüzoidal olmayan değişimler gözlenmektedir. Diğer önemli bir harmonik kaynağı olan ark fırınları, bundan sonraki bölümlerde geniş olarak ele alınacaktır.



(b)



Şekil 3. a) Floresan tüp devresi

b) Bu devreye ilişkin kısa devre sonuçlar.

BÖLÜM 3

ARK FIRINLARI

3.1. ARK FIRINLARININ YAPISI VE ELEKTRİKSEL DONANIMI

3.1.1. YAPISI

Ark fırınları yoğun enerji tüketen ortalama güç faktörleri düşük (ocağın nitelikleri ve işletme koşullarına bağlı olarak 0,65-0,80) elektrik yükleridir. Büyük güçlü ark fırınları gerek tesis ve işletme masrafları ve gerekse verim bakımından daha ekonomik olduğundan, bunların kapasiteleri 120-250 ton ve buna bağlı olarak güçleri 50-100 MW değerlerini bulmaktadır (Maksimum kapasite 400 ton ve maksimum güç 160 MVA'dır.). Bütün dünyada çelik üretiminin yaklaşık %25'i ark fırınları ile sağlanmaktadır.

3.1.2. ÇALIŞMA AŞAMALARI

1. Ergime aşaması : Hurda demir, ark yoluyla verilen elektrik enerjisi ile eritilir. Hurda demir çok yer kapladığından fırın bir defada doldurulmaz ve bir çok kısmi şarjın yapılması gerekir. Bir evvelki şarjın ergimesinden sonra, bunu takip eden şarjın doldurulması için, fırın bir çok defa devreden çıkartılır. Ergitme aşaması 1-1,5 saat sürer. Ark fırınının en önemli çalışma aşaması, ergime olayıdır. Zira bu esnada en büyük güç çekilir.

2. Oksidasyon aşaması : Ergimiş demirin içine suyla soğutulmuş boru ile oksijen üflenir. Örneğin fosfor ve kükürt gibi yabancı maddeler okside olur, curuf halinde yüzeyde toplanır.

3. Tasfiye aşaması : Ergimiş demirin kalitesi analiz yolu ile tayin edilir ve istenen özelliği elde edebilmek için gerekli katkıları ilave edilir. Tasfiye aşaması, demirin kalitesine göre 0.5-2 saat sürer. Tasfiye aşamasında ark sakindir ve kısadır. Bu esnada çekilen enerji sadece ısı kaybını karşılar. Ergimiş tasfiye edilmiş demir potalara dökülür ve haddehanelere sevk olunur. Bir ark fırını tam nominal gücü ile yılda sadece 2500 saat çalışır.

3.1.3. ELEKTRİK ARK FIRINLARININ SINIFLANDIRILMASI

Elektrik ark fırınları, elektrot düzenlerine, büyüklüklerine, astarlama pratiklerine göre 3 kısımda incelenebilir.

3.1.3.1. Elektrot Düzenlerine Göre

1. Endirekt ark ocakları : Bütün ark ocakları küçük kapasiteli ocaklardır. Oluşan ısı çok şiddetli olduğundan refrakter ömrü kısadır ve demir dışı metallerin ergitilmesi için uygundur. Elektrotlar arasında oluşan arkın, ısı radyasyonu neticesinde meydana getirdiği enerji ile ergitme yaparlar.

2. Direkt ark ocakları : Direkt ark ocaklarında ark elektrot, curuf ve metal arasında oluşur. Akım metalden geçer ve diğer elektrotta ulaşır. Uygulamada genellikle 3 fazlı sistemler kullanılır. Üç elektrotun herbiri bir faza bağlanır, metal banyosu noktası ise nötr noktası olur. Direkt ark ocakları elektrotların yerleştirilme tarzına göre 2'ye ayrılır :

a) Seri ark : Ocak içine daldırılan elektrotlardan birinden metal banyosuna geçen akım, banyodan diğer elektrotlara atlayarak ark oluşturur.

b) Tek yönlü ark : Elektrik akımı ocağa daldırılan elektrottan metal banyosuna, banyodan da ocak tabanındaki elektrotta atlayarak ark oluşturur.

Endüstride kullanılan EAF genellikle direkt ark tipi, seri ark yapan, 3 fazlı ocaklardır ve 3 elektrotla çalışırlar.

3. Kapalı Ark Ocakları : Elektrot uçları şarj içerisinde gömülüdür ve iki elektrot arasında bulunan malzeme elektrik iletici bir unsur olmaktadır. Isı enerjisi ark ve malzeme direnci tarafından meydana gelmektedir.

3.1.3.2. Büyüklüklerine Göre

1. **Küçük ark fırınları:** Kapasiteleri yaklaşık 1500-1200 kg, güçleri 75-500 kVA'dır. Daha çok demir olmayan metallerin ergitilmesinde kullanılır.
2. **Orta büyüklükteki ark fırınları:** Kapasiteleri 6-8 t., güçleri 1800 kW'dır.
3. **Büyük güçteki ark fırınları:** Kapasiteleri 25-200 t.'a, güçleri 6000-20000 kW'a ulaşmaktadır.

Orta ve büyük kapasiteli fırınlar daha çok demir ve alaşımların ergitilmesinde kullanılırlar.

3.1.3.3. Astarlama Pratiklerine Göre

1. **Asit astarlama**
2. **Bazik astarlama:** Elektrik ark fırınlarında bu pratik daha çok kullanılır.

3.1.4.ELEKTRİK ARK FIRINLARINDA ELEKTRİKSEL BİLEŞENLERİN YERİ

Elektriksel bileşenler, şebekeden elde edilen enerjinin tamamından yararlanmayı garanti etmelidirler. Sekonder sistemdeki optimizasyonla maksimum güce ulaşılmalıdır. Ergitme için spesifik elektrik gücü harcanmasıyla, şarj arasındaki bağıntıya önem verilmelidir. Çünkü proses zamanıyla, elektriksel güç arasında ilişki vardır.

Spesifik ergitme akımı, hurdanın kalitesine, içerdiği alaşım elementlerinin reaksiyon ısılarına ve diğer metallere bağlıdır. Ergitme programı bittiğinde, ergitme periyodu için zaman, gerilim, akım ve transformatörün görünen gücü biliniyorsa, ortalama güç faktörü ($\cos\phi$) ve transformatör ortalama gücünün maksimum değeri belirlenebilir.

Transformatör ortalama gücünün maksimum değeri S olarak verildiğinde :

$$S = \frac{\text{Spesifik ergitme için harcanan güç (kWh)} \cdot \text{Şarj ağırlığı (t)}}{\text{Ergitme zamanı (h)} \cdot \text{Ergime sırasındaki ortalama } \cos\phi} \quad (12)$$

Şebeke gücü temininde yapılan elektriksel proje çalışmalarında özellikle, sabit yada otomatik güç düzeltme faktörüne, harmonik etkilerin azaltılmasında filtre kullanılmasına ve senkronize akım üreticinden yararlanmaya dikkat edilmelidir. Böylelikle, elektrot tüketimi azalır, kayıp enerji geri kazanılır ve daha büyük faz dengelenmesi sağlanır.

Tüm elektriksel bileşenlerin boyutları yüksek sekonder transformatör gerilimi ve özel akım yoğunluğuna bağlı olarak belirlenir. Referans veriler şöyledir:

- Bakır borularda akım yoğunluğu 5 A / mm^2
- Esnek kablolarda akım yoğunluğu 4.5 A / mm^2

3.1.4.1. ELEKTRİKSEL EKİPMANLARI

Elektrik ark fırınlarının temeli, ilk faz-hurda arasında oluşan elektrik arkının $3000-4000^\circ \text{ C}$ lik ısısından yararlanarak ergime işlemini yapmaktadır. 1,2 veya 3 fazlı olabilen ark fırınları, ayrıca doğru akımla da çalışabilirler.

Elektrik ark fırınları teknoloji ve kapasite açısından oldukça büyük gelişmeler göstermiştir. 500-1000 kg kapasite, 250-300 kVA transformatör gücünden,

360-400 ton kapasite, 160-200 MVA transformatör gücüne kadar ark fırınları bugün dünyanın pek çok yerinde çalıştırılmaktadır.

Elektrik ark fırınları, transformatör güçlerine ve ergitme zamanlarına göre aşağıdaki gibi sıralanabilir :

Standart Güçlü	STDP
Yüksek Güçlü	HP
Ultra Yüksek Güçlü	UHP
Süper- Ultra Yüksek Güçlü	X-UHP

Tablo 9. Fırın Tiplerine Göre Birim Güçler

Fırın	Transformatör Özgöl Ağırlığı		
	KVA/t	KVA/m ³	KVA/m ²
Standart STDP	120-200	5-9	650-1200
Yüksek Güçlü HP	250-300	11-16	1210-1740
Ultra Yüksek Güçlü UHP	400-550	20-39	1865
Süper Ultra Yüksek Güçlü X-UHP	≥600	-	-

Burada, KVA/t ton başına transformatör gücü, KVA/m³ birim (m³) fırın hacmi başına transformatör gücü, KVA/m² birim (m³) ergimiş metal yüzeyi başına transformatör gücüdür.

3.1.4.2. ORTAK BAĞLANTI NOKTASI

Ortak bağlantı noktası elektrik ark fırınının şehir şebekesine bağlandığı nokta yada baradır. Elektrik ark fırını dizayn edilirken, fırının çalıştırılacağı

bölge şebekesinin dayanımı yani elektriksel kısa devre gücü (S_k) düşünülmelidir.

Bara kısa devre güçleri ülkelere ve bölgelere göre çok farklılık gösterir. Gelişmiş ülkelerde ortak bağlantı noktasındaki ortalama kısa devre güçleri gerilim düzeylerine göre şöyledir :

380 kV sistemde	: 12000 - 16000 MVA
220 kV sistemde	: 5000 - 8000 MVA
110 kV sistemde	: 4000 - 6000 MVA
66 kV sistemde	: 2500 - 4000 MVA

Türkiye’de ise durum (1984 değerlerine göre) aşağıdaki düzeydedir :

380 kV sistemde	: 1600 - 2200 MVA
154 kV sistemde	: 1600 MVA
34.5kV sistemde	: 500 MVA

oluşturmak, elektrik ark fırılarında ana amaçtır. Elektrik arkı,düşük gerilim ve yüksek akımla karakterize edilmiş,fırın atmosferini kaplayan buhar ve gazların karışımı içinde oluşan iki sıcak nokta arasında çok kuvvetli ışık kolonu biçiminde,sıcaklığı yaklaşık 4000°C olan bir elektriksel deşarjdır.

Fırına verilen gerçek güç ark içinde oluşan ısı enerjisidir. Tüm fırınlarda elektrot/ark ayar sistemi $Z = U/I$ ark empedansının denetimi esasına dayanır. Arkin oluşturduğu ısının yayılması radyasyon ve konveksiyon yolları ile olur.

Isı iletiminin ark boyu ile doğrudan ilişkisi vardır. Ark boyu kısa ise ısı elektrotun yakın bölgelerinde toplanacaktır. Ark boyu uzun ise ısının büyük bir bölümü fırın duvarlarına ve kapağına doğru uzanacaktır. Ark boyu,ark gerilimine dolayısıyla fırın transformatörünün sekonder gerilimine bağlıdır. Kısa bir ark oluşturmak için düşük gerilim uygulamak gerekir.

3.1.4.3. Transformatör

Ark ocaklarında arkin oluşması için gerekli enerjinin sağlanması ve ocağın çalışması için düşük gerilim ve yüksek akım şiddetinin temini ve ayarlanması için kullanılır. Kullanılan transformatörler standart kuvvet transformatörlerine benzemekle beraber, gerilimin fazla inişli çıkışlı olması nedeniyle mekanik bakımdan daha ağır ve kuvvetli bir konstrüksiyona ve sargılar arasında daha kuvvetli bir izolasyona sahiptir. Yüksek akım şiddetini ileterek ocakta bir güç sistemini oluşturmak için daha da önemlisi sistemin gereği olan yüksek kayıplardan dolayı, transformatör sistemi ocağa çok yakın inşa edilir. Transformatörlerin seçiminde fırının gösterdiği özellikler dikkate alınır.

Ocaklarda 3 fazlı bir çalışma için trifaze bir transformatöre gerek vardır. Primer gerilim 2200V ile 33000V arasında değişir. Maksimum sekonder gerilim 300V'dur, minimum gerilim ise 90 V'dur. Transformatör kapasitesi hazne çapına göre değişmektedir. Hazne içi alanına göre transformatör kapasitesi bazik ocaklarda her m² için 68-80 kVA, asit ocaklarda 95 kVA'dır.

2. Elektrotlar

Elektrik enerjisini ark bölgesine taşıyarak, yüksek sıcaklığa maruz kalan elemandır. Grafit ve karbon olmak üzere iki çeşittir. Elektrotlar su soğutmalı ve kamalı mengeneler vasıtası ile askıda tutulur. Elektrik akımı transformatörlerden elektrot mengenelerine, elektrot kolları boyunca uzanan su soğutmalı bakır borulara getirilir ve ark oluşturulur.

Elektrotların aşağıdaki özellikleri aranması istenir :

1. Düşük elektrik rezistansı ve yüksek akım yüklenebilirliği sağlayan yüksek ısı iletkenliği

2. Sıcaklık şokuna karşı yüksek rezistans (Bu direnç, düşük ısı genleşmesiyle sağlanır.).
3. İyi mekanik özellikler (özellikle yüksek bükülme mukavemeti), iyi mekanik işlenebilirlik.
4. Oksidasyona karşı yüksek mukavemet.

3.1.4.5. Elektrot Regülatörleri

Ocaktaki gerekli enerjinin çabuk ve dakik olarak elde edilmesi için otomatik bir elektrot kontrolüne gerek vardır. Ocağa giren güç, transformatör akımına ve gerilimine bağlıdır. Akım, akım ayarlayıcı reostalarla kontrol edilir.

3.1.5. ELEKTRİKSEL GELİŞMELER

1. Ultra Yüksek Güç (UHP)

Elektrik ark fırınlarının hazne boyutları artırılarak kapasiteleri artırılabilir. Ancak fırın kapasiteleri büyüyünce normal fırınlarda ergitme zamanının uzaması fırın verimini azaltacağından, özellikle ergitme süresi boyunca daha büyük güçler kullanılarak ergitme süresinin kısaltılmasına gidilir. Bu amaçla yüksek güçlü hatta çok yüksek güçlü elektrik ark fırınları geliştirilip, geniş kullanım alanı bulmaktadır.

Düşük Güç	100-200 kVA/t
Normal Güç (RP)	200-400 kVA/t
Yüksek Güç (HP)	400-700 kVA/t
Ultra Yüksek Güç (UHP)	700 kVA/t ve daha yukarısı

2. DC Ocaklar

DC ark fırınları, elektrot tüketiminde önemli bir düşüş, enerji tüketiminde tasarruf sağladığı, ayrıca arkin titreşim yanması sorununu da ortadan kaldırdığı için giderek daha çok kullanım alanı bulmaktadır. DC ark fırınlarının en umut verici kullanım alanı düşük güçlü, yüksek elektrot tüketen ocaklar ile pota ocaklardır.

DC ocakların merkezlerinde tek bir elektrot ve tabanda güvenlik için özel şekilde dizayn edilmiş hava soğutmalı taban elektrot vardır. Ekipman olarak AC ark ocaklarından tek farkı taban elektrotudur.

	AC	DC
Elektrot Tüketimi	100	47
Güç Tüketimi	100	95
Döküm Alma Zamanı	100	100
Refrakter Tüketimi	100	70

Yukarıda ac ve dc ark ocaklarının karşılaştırılması verilmiştir. AC ocağa göre DC ocağın en büyük yararı elektrod tüketimini düşürmesidir. Tek merkezi elektrottan dolayı daha üniform bir ısı iletimi sağlanmakta ve ısı kayıplarının azlığından dolayı enerji tüketiminde azda olsa kazançlar görülmektedir. Bunun yanında tek elektrod kullanımı, elektrot tüketimi açısından bir avantaj sağlasa da güç girdisi için bir engel teşkil etmektedir. Ayrıca düşük elektrot ömrü de bir dezavantajdır. DC ark ocakları daha çok düşük kapasiteli fırınlarda kullanılır.

3.2. ARK FIRINLARINDA REAKTİF YÜK DEĞİŞİMİ

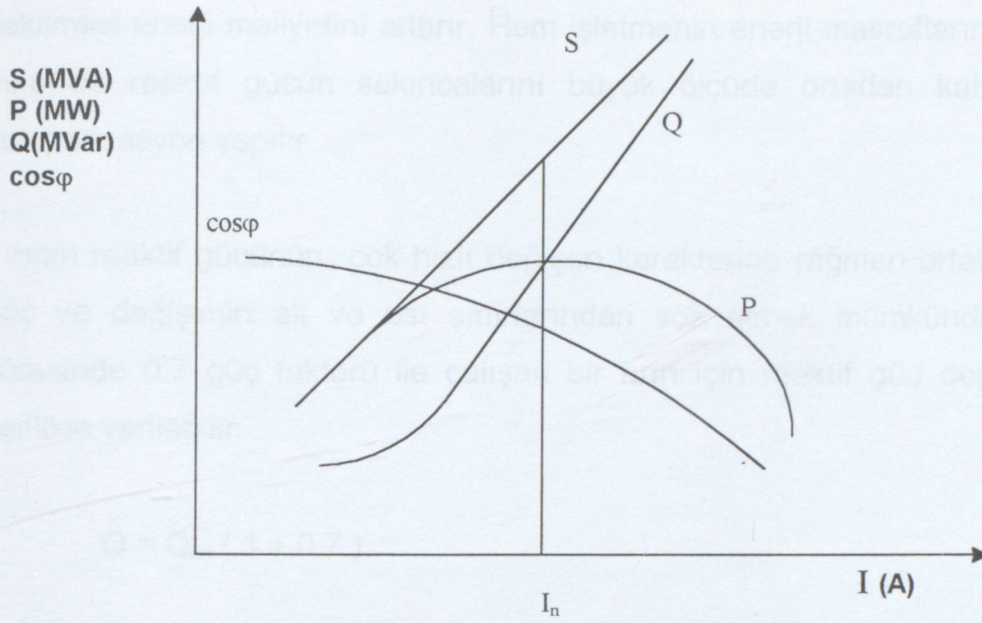
Büyük fırın güçleri yüzünden elektrot akımının çok büyük olması ark fırınlarının en önemli özelliğidir. Bu akım, elektrot ile hurda demir arasında birdeşarj olayı sonucu, gaz ortamda ark şeklinde geçmeye devam eder. Alternatif akımın doğal olarak her sıfırdan geçmesi sırasında ark söner ve bunu takip eden her yarım peryotta arkın yeniden tutuşabilmesi için, elektrot aralığında yeteri kadar bir alan şiddetinin oluşması gerekir. Bunun için akım ile gerilim arasında belirli bir faz farkının olması gerekir. Ark fırınının, bu sebepten dolayı 0.7 gibi oldukça düşük bir güç katsayısı ile çalışması gerekir. Ark fırınının çektiği reaktif güç;

$$Q = 3 I^2 X_f \quad (13)$$

dir. Burada I faz akımını, X_f ise transformatör dahil, fırının reaktansdır. Büyük hat akımlarında reaktif gücün uygun sınırlar içinde kalması için reaktansının küçük tutulması gerekir. Bunun için ilk önlem olarak transformatör ile fırın arasındaki iletkenler özel bir şekilde düzenlenirler. Şekil 4'de ark fırınının karakteristikleri verilmiştir.

Belirli bir kapasitedeki ark fırını için genellikle belirli güçte bir transformatör seçilir. Bu transformatörün ergitme aşamasında gücü S ise, transformatörün sekonder gerilimi aşağıdaki denklemden bulunur.

$$U_{r2} = \frac{\sqrt{S + X_f}}{3 \cdot \sin \phi} \quad (14)$$



Şekil 4. Ark fırınının karakteristikleri

Burada ϕ , ocak transformatörünün önünde akım ile gerilim arasındaki açıdır.

Ergitme aşamasında güç katsayısı $\cos\phi = 0.7$ olduğundan, fırın tarafından çekilen aktif güç ile reaktif güç yaklaşık birbirine eşittir. Ergitme aşamasında mümkün olduğu kadar kararlı ark teşekkülü için böyle bir güç katsayısı seçilmesine rağmen, akım hiç bir zaman sabit kalmaz ve reaktif güçte büyük değişimler baş gösterir. Bunlar 50 Hz' lik normal periyodik titreşimler dışında, tesadüfi titreşimlerden, salınımlardan ve ani değişimlerden oluşur.

3.3. ARK FIRINLARININ SEBEP OLDUKLARI BOZUCU TESİRLER

Ark fırınları, şebeke üzerine çeşitli yönlerden olumsuz ve bozucu tesirler yaparlar.

3.3.1. Reaktif Güç

Ark fırını düşük bir güç katsayısıyla çalışır. Bu yüzden ark fırını, şebekeden çektiği aktif güce yaklaşık olarak eşit olan reaktif güç çeker. Reaktif güç

çekilmesi enerji maliyetini artırır. Hem işletmenin enerji masraflarını düşürmek hem de reaktif gücün sakıncalarını büyük ölçüde ortadan kaldırmak için kompanzasyon yapılır.

Fırının reaktif gücünün çok hızlı değişen karakterine rağmen ortalama reaktif güç ve değişimin alt ve üst sınırlarından söz etmek mümkündür. Ergitme süresinde 0.7 güç faktörü ile çalışan bir fırın için reaktif güç değişimleri şu eşitlikle verilebilir.

$$Q = Q_{kd} (1 \pm 0.7) \quad (15)$$

Bu eşitlikte Q , ocağın belli bir andaki reaktif güç istemi, Q_{kd} ise kararlı durum çalışma koşullarındaki ortalama reaktif güç istemidir.

3.3.2. Gerilim Değişimi (Fliker olayı)

Reaktif güç zamana bağlı olarak tesadüfi değişimler yapar. Yük değişimlerine karşılık gelen akım değişimleri ΔI ise, tüketici barasındaki reaktif güç değişimleri,

$$\Delta Q = 3 \cdot U_2 \cdot \Delta I \cdot \sin\phi \quad (16)$$

dir. Yük değişiminin tüketici barasındaki gerilim değişmesi aşağıdaki gibidir:

$$\Delta u = \Delta I \cdot X_s \cdot \sin\phi \quad (17)$$

Burada X_s , şebeke reaktansıdır. Büyük güçlü şebekelerde reaktanslar yanında omik dirençler küçük olduğundan, şebeke direnci ihmal edilmiştir. Ark fırınının bağlı bulunduğu noktada şebekenin kısa devre gücü

$$S_k = \frac{3 \cdot (U_2)^2}{X_s} \quad (18)$$

olduğuna göre

$$\frac{\Delta u}{U_2} = \frac{\Delta Q}{S_k} \quad (19)$$

Reaktif güç değişimlerinin ve kısmen de aktif güç değişimlerinin, özellikle dengesiz yüklerin şebekede sebep oldukları gerilim değişimleri herşeyden önce akkor flemalı lambalarda ve televizyonlarda fliker olayı denilen ışık titreşimlerine yol açarlar. Bundan başka fırın tarafından büyük reaktif güç çekilmesi sonucunda, fırın barasında da gerilim düşeceğinden, baranın gerilimi ile orantılı olarak ergitme gücü de azalır.

İnsan gözü akkor flemalı lambalarda ışığın 6-10 Hz gibi bir frekansla titreşmesine karşı çok hassastır. Floresan lambalarda ise 20 Hz'den büyük frekanslı titreşimler çok rahatsız eder. Ark fırınları genellikle 2 - 15 Hz frekans bölgesindeki gerilim değişimlerine yol açarlar.

Bu konu üzerinde uzun yıllardan beri yapılan araştırmalar göstermiştir ki, reaktif güç kompanzasyonu olmayan normal büyüklükteki bir fırının gerilim değişmelerinin sınırlı olması için, bunun kısa devre gücü çok büyük olan bir noktaya bağlanması gerekir. Bu gibi büyük kısa devre güçleri, genellikle çok yüksek gerilimli şebekelerde söz konusu olur. Pratik sonuçlara göre, bağlama yerinde şebeke kısa devre gücünün 80 - 120 katı kadar olması gerekir. Şebeke kısa devre gücü bu değer altında kalırsa, duruma göre, fliker olayı az veya çok şiddetli olarak kendini hissettirir.

Ark fırınlarında gerek reaktif güç değişimlerinin değerleri ve gerekse bunların sıklığı, yani değişim frekansı tamamen tesadüfi olduğundan, bunların hesap yolu ile incelenmesine imkan yoktur. Bu yüzden işletmede kazanılan tecrübelerle dayanmak gerekir. Zayıf şebekelerde fliker olayını müsaade edilen sınırlarda tutmak için reaktif güç kompanzasyonundan yararlanılır.

3.3.3. Dengesiz Yük

Ark fırınları şebekeyi dengesiz olarak yükler. Mesela fazlarından birinde ark sönerse veya iki fazlı kısa devrede, ters bileşen, nominal doğru bileşenin % 20' si kadardır. Dengesiz aktif güç değişimleri, bağlantı yerinde, hemen hemen reaktif güç değişimleri kadar gerilim değişimlerine sebep olurlar.

Dengesiz akımlar, bağlantı yerinde gerilim dengesizliklerine de sebep olurlar. Böylece hem şebeke, hem de tüketiciler daha fazla yüklenirler ve kayıplar artar. Dengesiz yükler generatörlerde ve motorlarda ters yönlü döner alan meydana getirdiklerinden, rotorlarda ilave kayıplar ve aşırı ısınmalar olur. Makinaların termik bakımdan aşırı yüklenmelerine meydan vermemek için sürekli olarak müsaade edilen ters akım bileşeni, nominal akımın % 5- 10'undan büyük olmamalıdır.

Aynı şebekeye bağlı diğer işletme araçlarının şebeke dengesizliklerinden zarar görmemeleri için gerilim değişimleri, bağlantı noktasında % 0.5' den büyük olmamalıdır. Dengesiz yükün sebep olduğu gerilim değişimleri ve bulunan döner makinalar üzerine olumsuz etkileri, özellikle zayıf şebekelerde, ters akım bileşenlerini sınırlamaya yönelik tedbirlerle önlenir.

BÖLÜM 4

ARK FIRINI HARMONİKLERİ ve HARMONİK KAYIPLARIN ANALİZİ

4.1. Ark Fırını Harmoniklerinin Üretilmesi

Ark fırını aktif direnci sabit değildir. Bir yarı periyodun başlangıcında direnç büyüktür. Bundan sonra bir minimum değere düşer ve yarı periyodun sonuna doğru tekrar yükselir. Bu yüzden akım tam bir sinüs şeklinde değildir ve bir çok harmonikler ihtiva eder. Ergitme aşamasının başında akım harmonikleri çok fazladır ve hurda eridikten sonra yani ark sakinleşince harmonik azalır. Tablo 9'da ortalama harmonik değerleri verilmiştir.

Ark fırınlarının çalışma şartlarında bu değişimlerden dolayı güç sisteminden çektikleri akımlar da gelişigüzel olur. Bunun sonucu olarak, şebeke gerilimi de akıma bağlı olarak sinüs formundan uzaklaşır. Akım ve gerilimdeki bu bozulmalar, şebekeye harmonikli bileşenlerin verilmesi anlamına gelir. Aslında bozulmuş olan akım ve gerilim dalga dalga şekilleri, şebekede bulunan değişik frekanstaki gerilim akımdan ibarettir.

Ark fırınlarında harmonik dağılımın kuramsal olarak saptanması için güç sistemi modelinin tam olarak kurulması gerekir. Bu modele harmonik meydana getiren elemanların modellerinin eklenmesi gerekir. Daha sonra sistem çözülerek harmoniklerin baralara göre dağılışı elde edilir.

Güç sistemindeki harmonik dağılımın analizinde başlıca üç yöntem kullanılabilir. Bunlar ;

1. Admitans matris yöntemi ile frekans domeninde analiz
2. Zaman domeninde analiz
3. Yük akışı yöntemi ile analizi

Tablo 10. Ortalama harmonik değerleri

Harmonikler	Ortalama genlik (%)
2	4-9
3	6-10
4	2-6
5	2-10
6	2-3
7	3-6
9	2-5

Bu açıklamalardan da anlaşıldığı gibi, ark fırını bir harmonik generatörü gibi tesir eder. Ark fırınına paralel bağlı devrelerde, şartların gerçekleşmesi halinde, rezonans olayı baş gösterebilir. Bundan başka şebekeye geçen harmonik akımları şebeke empedansı üzerinde gerilim düşümüne ve kayıplara sebep olur. Bu yüzden başka tüketicilerin de bağlı bulunduğu barada harmonik gerilimleri meydana gelir. Şebeke geriliminin bozulması ile hassas elektronik cihazlar bundan zarar görür. Bugün ark fırınlarının düşük güç katsayısı ile çalıştırılması tercih edilir. Bu yüzden fırın daha büyük bir reaktif yük çeker. Bunu kompanze etmek için büyük güçlü kondansatör bataryası kullanılır. Böylece şebekenin rezonans frekansı düşer. Düşük frekanslı harmoniklerin

genlikleri de genellikle büyük olur. Tesislerde, harmoniklerin sebep oldukları sakıncalar gözönüne alınarak sınırlayıcı tedbirler alınmıştır.

4.2. Harmonik Kayıpların Analizi

Akım, gerilim gibi sistem büyüklüklerinin sinüzoidal oldukları varsayılarak gerçekleştirilen kayıp analizi, bu büyüklüklerinin non-sinüzoidal olması durumunda bazı değişikliğe uğrar. Bu yüzden akım ve gerilimin fonksiyonlarına bağlı olan işletme kayıpları, bu büyüklüklerin harmonikli değerlerine göre yeniden düzenlenmelidir. Bu düzenleme için sistemde harmonik akım dağılımları belirlenmeli, harmonik gerilim spektrumları elde edilmelidir. Bu değerler kullanılarak non-sinüzoidal duruma göre kayıplar hesaplanır.

4.2.1. Harmoniklerin Sebep Oldukları Ek (Omik) Kayıplar

Genel olarak, iletim hatlarında, motor, generatör, transformatör gibi elemanların sargılarında ve omik direnç içeren tüm akım yolu elemanlarında oluşur. İletim hatlarındaki omik kayıplar, güç akışı sonrasında hesaplanan salınım barasının gücü yardımıyla, diğer elemanlarda ise analitik bağıntılar veya ölçme-test yöntemleriyle belirlenir. Non-sinüzoidal yükler için bu kayıplar aşağıda ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

4.2.1.1. Ek (Omik) Hat Kayıpları

Yükün lineer olmamasından dolayı akımdaki bozulmalarla n. harmoniğe ilişkin harmonik kayıplar şu şekildedir.

$$\Delta P_n = 3 \cdot R_n \cdot I_n^2 \quad (20)$$

Toplam kayıplar

$$\sum \Delta P_n = \sum_{n=2}^{\infty} 3 \cdot R_n \cdot I_n^2 \quad (21)$$

Ark fırını gibi dengesiz non-sinüzoidal akım çeken yüklerde, dengeli durum için kullanılan (3) çarpanı geçerli değildir. Her fazın çektiği harmonik akımlar (I_{Rn} , I_{Sn} , I_{Tn}) dikkate alınıp, dengeli yüklemde çekilen gücün sabitliği koşulu altında dengesiz yüklemde bu kayıplar şu şekilde ifade edilebilir :

$$\Delta P'_n = \frac{\Delta P_n}{3} \left[\left(\frac{I_{Rn}}{I_{R1}} \right)^2 + \left(\frac{I_{Sn}}{I_{S1}} \right)^2 + \left(\frac{I_{Tn}}{I_{T1}} \right)^2 \right] \quad (22)$$

Burada ΔP_n nominal frekans altındaki ek (omik) hat kayıpları, I_{R1} , I_{S1} , I_{T1} her faz için temel frekanstaki akımlar ve I_{Rn} , I_{Sn} , I_{Tn} n. harmonik derecesi için faz akımlarıdır. $\Delta P'_n$ dengesiz non-sinüzoidal durum için ek hat kayıplarıdır.

4.2.1.2. Ek (Omik) Sargı Kayıpları

Enerji sisteminde yer alan generatör, transformatör ve asenkron motorlardan non-sinüzoidal akımların geçmesi durumunda (bakır sargılarda) ek bakır kayıpları oluşacaktır. İki sargı içeren asenkron motorlar ve transformatörler için bu sargı kayıplarının n. harmonik için ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\Delta P_{cu} = 3 \cdot R_n \cdot I_n^2 \quad (23)$$

Toplam kayıplar

$$\sum \Delta P_{cu} = \sum_{n=2}^{\infty} 3 \cdot R_n \cdot I_n^2 \quad (24)$$

Burada R_n makinanın n . harmoniğe ait toplam sargı direcidir. Dengesiz durum için toplam sargı kayıpları

$$\Delta P'_{cun} = \frac{\Delta P_{cun}}{3} \left[\left(\frac{I_{Rn}}{I_{R1}} \right)^2 + \left(\frac{I_{Sn}}{I_{S1}} \right)^2 + \left(\frac{I_{Tn}}{I_{T1}} \right)^2 \right] \quad (25)$$

şeklindedir.

P_{cun} nominal frekans altındaki sargı kayıpları, $\Delta P'_{cun}$ dengesiz non-sinüzoidal durumdaki sargı kayıplarıdır. Diğer büyüklükler ise (22)'deki gibi açıklanabilir. Toplam harmonik sargı kayıpları ise

$$\sum \Delta P_{cun} = \sum_{n=2}^{\infty} \Delta P_{cun} \quad (26)$$

$$\sum \Delta P'_{cun} = \sum_{n=2}^{\infty} \Delta P'_{cun} \quad (27)$$

4.2.2. Harmoniklerin Sebep Olduğu Ek Nüve Kayıpları

Ferromagnetik malzemeden nüvesi olan elemanlarda (transformatörler ve asenkron motorlar gibi), nüve (demir) kayıpları oluşmaktadır. Bu kayıplar elemene uygulanan gerilimin bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Uygulanan bu gerilimin non-sinüzoidal olması durumunda bu kayıplar da farklılık gösterir.

4.2.1.2. Ek Histerezis Kayıpları

Makinaya sinüzoidal gerilim uygulandığında bu kayıplar

$$P_H = k_H \cdot f \cdot B_{\max}^\sigma = K_H \cdot f \cdot (V_{\text{ort}})^\sigma \quad (28)$$

şeklindedir. k_H (ölçek farkıyla K_H) makinaya ait sabit, σ Steinmetz katsayısıdır.

Gerilimin non-sinüzoidal olması durumunda zamana bağlı değişim

$$V(\omega t) = \sum \sqrt{2} \cdot V_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t + \varphi) ; \quad V(0) = V(\pi) = 0 \quad (29)$$

şeklinde ise, oluşacak endüksiyonun tepe değeri

$$B_{\max} = \frac{\pi}{2 \cdot N \cdot A \cdot \omega} \cdot \frac{1}{\pi} \int_0^\pi V(\omega t) \cdot d\omega t = \frac{\pi}{2 \cdot N \cdot A \cdot \omega} V_{\text{ort}} \quad (30)$$

olacaktır. Gerilimin ortalama değeri ise,

$$V_{\text{ort}} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \sum \frac{V_n}{n} \cdot \cos \varphi_n \quad (31)$$

şeklindedir. N sarım sayısı, n harmonik derecesi, A nüve kesitini göstermektedir.

Sinüzoidal gerilim için verilen kayıp formülü yardımıyla non-sinüzoidal gerilim için bu kayıp

$$P'_{Hn} = P_{Hn} \left(\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n} \cdot \frac{V_n}{V_N} \cdot \cos \varphi_n \right)^{\sigma} \quad (32)$$

şeklinde olur. P_{Hn} nominal frekanstaki histeresis kayıpları, V_N nominal uç gerilimi, $\cos \varphi_n$ n. harmonik için güç faktörüdür.

Dengesiz durum için bu kayıplar

$$P'_{Hn} = \frac{P_{Hn}}{3} \left[\left(\frac{1}{n} \cdot \frac{V_{Rn}}{V_N} \cdot \cos \varphi_{Rn} \right) + \left(\frac{1}{n} \cdot \frac{V_{Sn}}{V_N} \cdot \cos \varphi_{Sn} \right) + \left(\frac{1}{n} \cdot \frac{V_{Tn}}{V_N} \cdot \cos \varphi_{Tn} \right) \right]^{\sigma} \quad (33)$$

4.2.2.2. Ek Girdap Akımı Kayıpları

Girdap akımı (foucault veya eddy akımı) kayıpları endüksiyonun karesiyle doğru orantılıdır. Sinüzoidal gerilimin uygulanması durumunda bu kayıplar

$$P_G = K_G \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (34)$$

şeklindedir. K_G girdap akımı kayıplarına ilişkin bir sabittir, B magnetik endüksiyondur. Non-sinüzoidal gerilim altında bu ifade

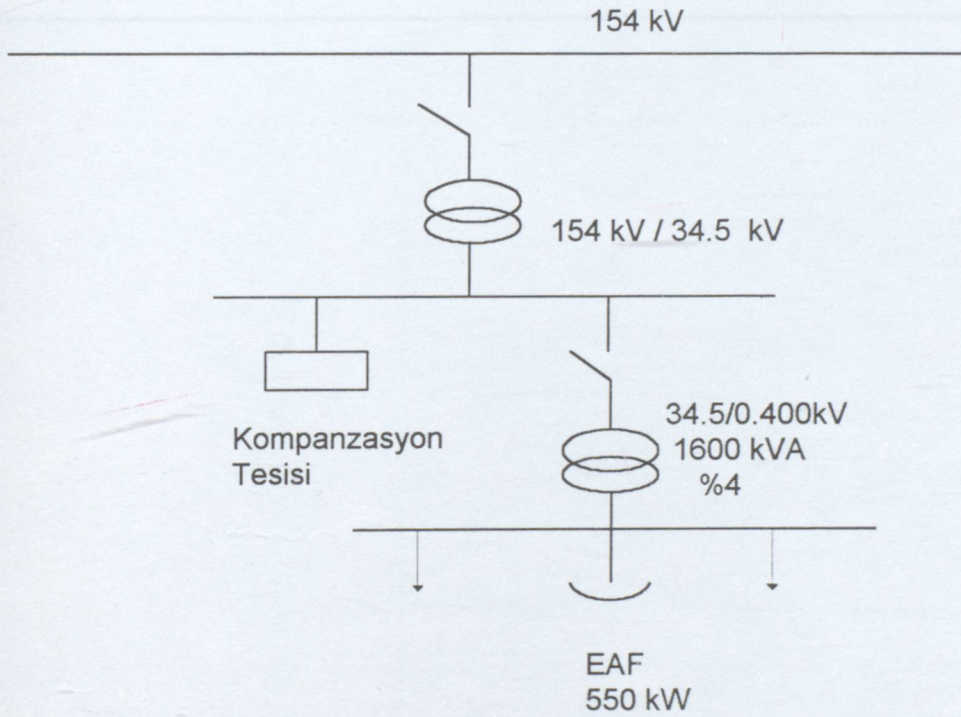
$$P'_{Gn} = K_G \cdot f^2 \cdot B^2 \left(\frac{V_1}{V_N} \right)^2 \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{V_1} \right)^2 \right] \quad (35)$$

$$P'_{Gn} = P_{Gn} \left(\frac{V_1}{V_N} \right)^2 \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{V_1} \right)^2 \right] \quad (36)$$

şeklindedir.

Harmoniklerin oluşturduğu ek nüve kayıpları histeresis ve girdap akımı kayıplarının toplamıdır. Bu toplamın nominal demir kayıplarına (P_{fe}) oranı ise bağıl kayıp artışını verir.

SAYISAL UYGULAMA 1



Şekil 5. Sayısal Uygulama 1'e ait sistemin şeması

Sistem TEK'in 154 kV'luk barasından, 154/34.5 kV'luk gerilim düşürücü bir transformatör ile beslenmektedir. Ark fırını ise 34.5/0.400 kV'luk 2. transformatörün çıkışına bağlıdır. Alınan ölçüm sonuçlarına göre, her faza ilişkin harmonikli gerilim ve akım değerleri ile harmonik distorsiyonlar tablolar halinde aşağıda verilmiştir. Kayıp hesaplarında 2. transformatör ve ark fırını

dikkate alınmıştır. Hesaplamalarda hattın direnci 0.0075 ohm ve transformatöre ait değerler de Tablo 11 de verildiği gibi alınmıştır.

Tablo 11. TRF 2 Parametreleri

Nominal Güç (kVA)	Nominal Gerilim (Pri./Sek.) (kV)	Uk (%)	Pcu (kW)	Po (kW)
1600	34.5 / 0.4	5	16.500	2.350

Tablo 12. Sayısal Uygulama 1'e ait her faza ilişkin akım ve gerilimdeki bozulmalar

	InvTA	Hz	V	A	W(k)	VA(k)	VAr(k)	P.F.	DV%	DI %
L1(R)	Inverse	50.00	222.9	1113	228.6	248.1	51.80	0.921	5.73	30.21
L2(S)	Forward	50.00	222.6	1128	229.6	251.1	54.50	0.914	6.69	31.42
L3(T)	Forward	50.00	223.7	1086	217.8	242.9	54.20	0.897	7.92	34.47

Tablo 13. L1(R) Fazına Ait Harmonik Bozulmalar (Tek)

H	Volt	% Volt	Amper	% Amper	Cosφ
1	222.2	100	1053	100	0.971
3	300.0m	0.14	3.000	0.28	0.667
5	7.800	3.51	257.0	24.41	-0.203
7	9.900	4.46	211.0	20.04	-0.054
9	700.0m	0.32	13.00	1.23	0.385
11	800.0m	0.36	10.00	0.95	0.400
13	1.000	0.45	13.00	1.23	-0.246
15	400.0m	0.18	2.000	0.19	0.500
17	300.0m	0.14	4.000	0.38	0.374
19	0	0	2.000	0.19	0
21	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0
25	400.0m	0.18	0	0	0

Tablo 14. L1(R) Fazına Ait Harmonik Bozulmalar (Çift)

H	Volt(m)	% Volt	Amper	% Amper	Cosφ
2	400	0.18	10.00	0.95	-0.197
4	0	0	8.000	0.76	0.000
6	500	0.23	4.000	0.38	-0.750
8	700	0.32	11.00	1.04	-0.364
10	0	0	0	0	0.000
12	0	0	2.000	0.19	0.000
14	300	0.14	2.000	0.19	-1.000
16	400	0.18	0	0	0.000
18	300	0.14	2.000	0.19	-0.979
20	0	0	0	0	0.000
22	300	0.14	0	0	0.000
24	0	0	3.000	0.28	0.000

Tablo 15. L2(S) Fazına Ait Harmonik Bozulmalar (Tek)

H	Volt	% Volt	Amper	% Amper	Cosφ
1	221.6	100	1067	100	0.967
3	600.0m	0.27	11.00	1.03	-0.269
5	7.200	3.25	230.0	21.56	-0.265
7	12.80	5.78	266.0	24.93	-0.112
9	300.0m	0.14	10.00	0.94	0.333
11	700.0m	0.32	12.00	1.12	0.188
13	1.300	0.59	14.00	1.31	-0.178
15	0	0	2.000	0.19	0
17	600.0m	0.27	2.000	0.19	0.167
19	0	0	3.000	0.28	0
21	300.0m	0.14	0	0	0
23	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0

Tablo 16. L2(S) Fazına Ait Harmonik Bozulmalar (Çift)

H	Volt(m)	% Volt	Amper	% Amper	Cosφ
2	600.0	0.27	11.00	1.03	0.818
4	0	0	10.00	0.94	0
6	500.0	0.23	4.000	0.37	-0.800
8	1.000	0.45	14.00	1.31	-0.755
10	500.0	0.23	7.000	0.66	-0.857
12	0	0	2.000	0.19	0
14	400.0	0.18	2.000	0.19	0.250
16	0	0	0	0	0
18	400.0	0.18	2.000	0.19	0.750
20	0	0	2.000	0.19	0
22	0	0	0	0	0
24	400.0	0.18	0	0	0

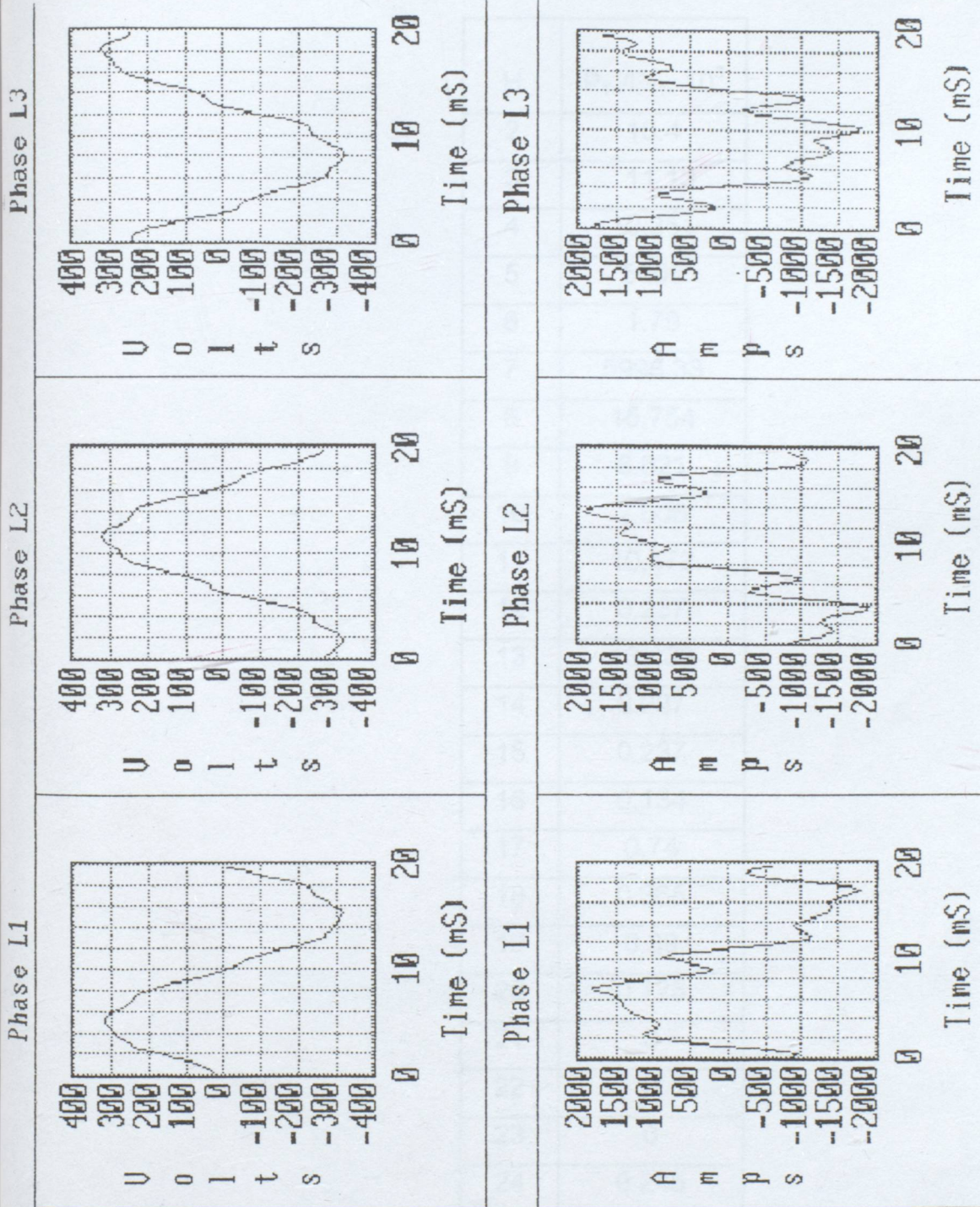
Tablo 17. L3(T) Fazına Ait Harmonik Bozulmalar (Tek)

H	Volt	% Volt	Amper	% Amper	Cosφ
1	222.2	100	1012	100	0.963
3	800.0m	0.36	15.00	1.48	-0.533
5	9.600	4.32	240.0	23.72	-0.337
7	14.60	6.57	282.0	27.87	-0.021
9	500.0m	0.23	5.000	0.49	-0.600
11	800.0m	0.36	10.00	0.99	-0.120
13	1.000	0.45	9.000	0.89	0.300
15	0	0	0	0	0
17	500.0m	0.23	4.000	0.40	-0.600
19	0	0	0	0	0
21	300.0m	0.14	0	0	0
23	0	0	0	0	0
25	400.0m	0.18	0	0	0

Tablo 18. L3(T) Fazına Ait Harmonik Bozulmalar (Çift)

H	Volt(m)	% Volt	Amper	% Amper	Cosφ
2	1000	0.45	11.00	1.09	-0.977
4	400	0.18	13.00	1.28	-0.077
6	0	0	2.000	0.20	0
8	600	0.27	14.00	1.38	-0.045
10	800	0.36	6.000	0.59	0.125
12	700	0.32	0	0	0
14	700	0.32	0	0	0
16	300	0.14	2.000	0.20	-0.312
18	0	0	2.000	0.20	0
20	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0

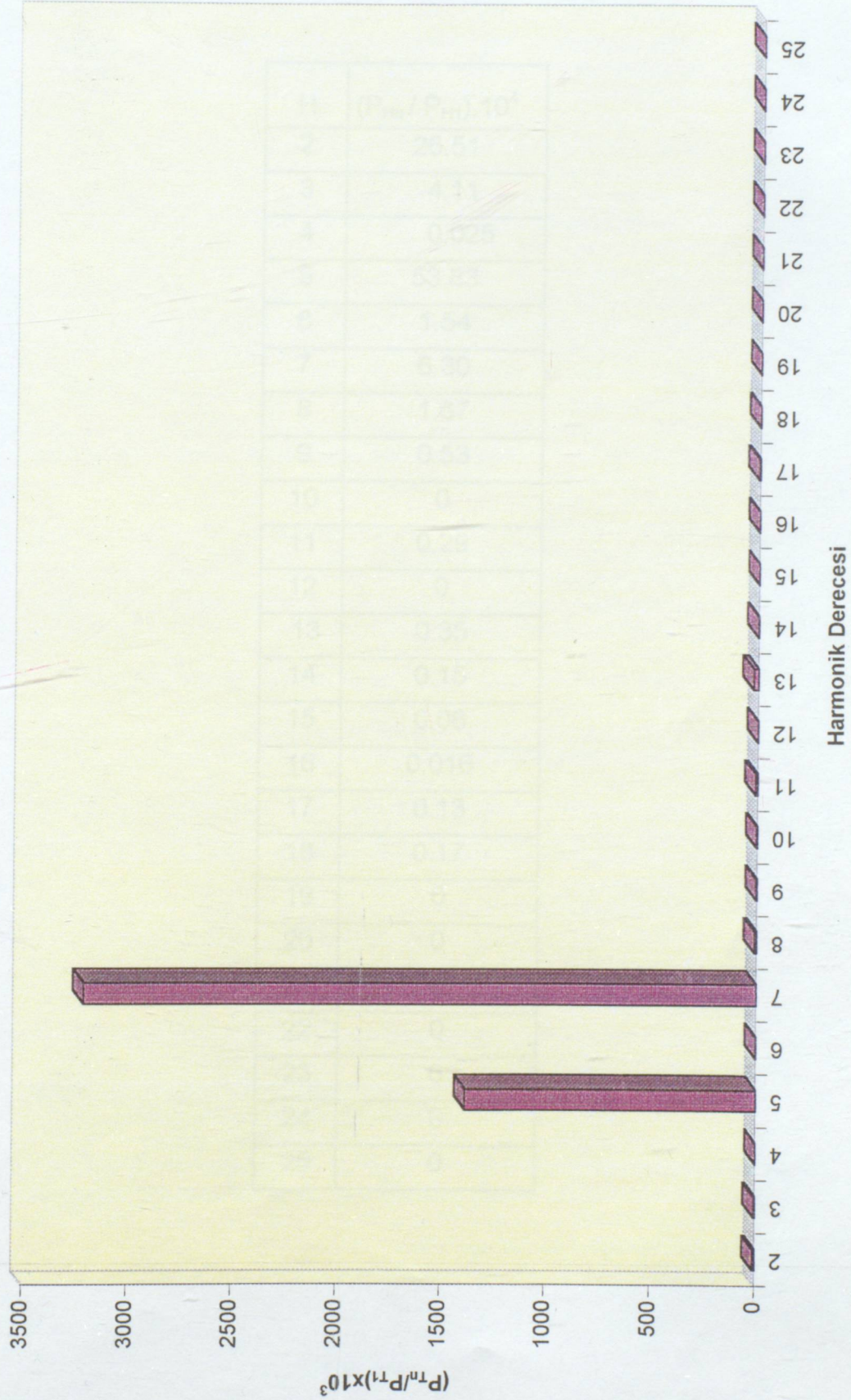
Tablo 19. Bağlı torçların empedansları ve sarf kayıpları



Şekil 6. Harmonikli akım ve gerilim dalga şekilleri

Tablo 19. Bağlı toplam ek (omik) hat ve sargı kayıpları

H	$P_{Tn}/P_{T1} \cdot 10^3$
2	10.4
3	11.13
4	10.351
5	5406
6	1.79
7	5998.33
8	15.754
9	8.821
10	2.606
11	10.472
12	0.237
13	13.433
14	0.237
15	0.237
16	0.134
17	0.74
18	0.365
19	0.39
20	0.125
21	0
22	0
23	0
24	0.245
25	0

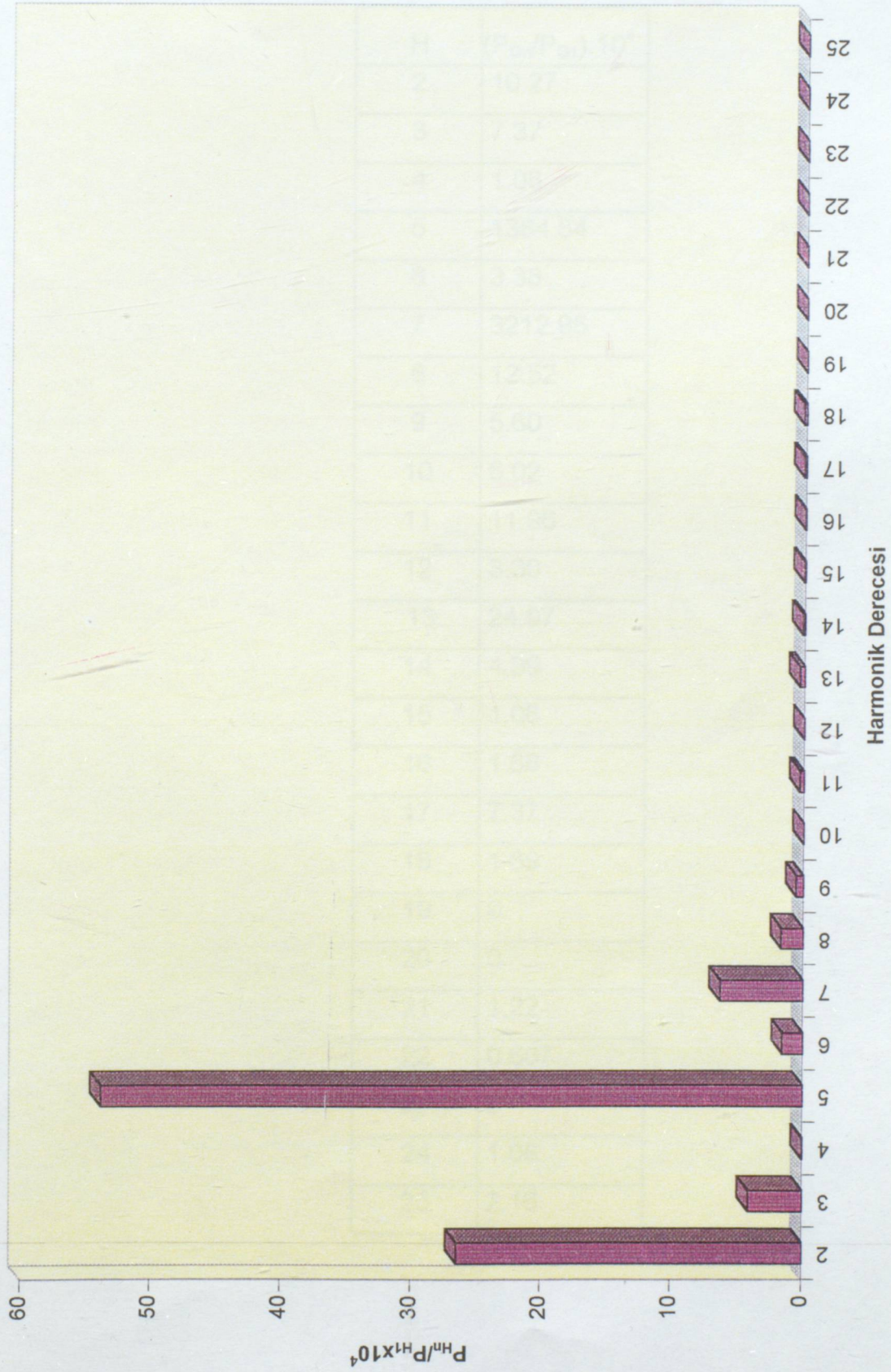


Şekil 7. Bağıl Toplam Ek (omik) Hat ve Sargı Kayıpları

Tablo 20. Bağıl Ek Histeresiz Kayıpları

H	$(P_{Hn} / P_{H1}) \cdot 10^4$
2	26.51
3	4.11
4	0.025
5	53.83
6	1.54
7	6.30
8	1.67
9	0.53
10	0
11	0.29
12	0
13	0.35
14	0.15
15	0.06
16	0.016
17	0.13
18	0.17
19	0
20	0
21	0
22	0
23	0
24	0
25	0

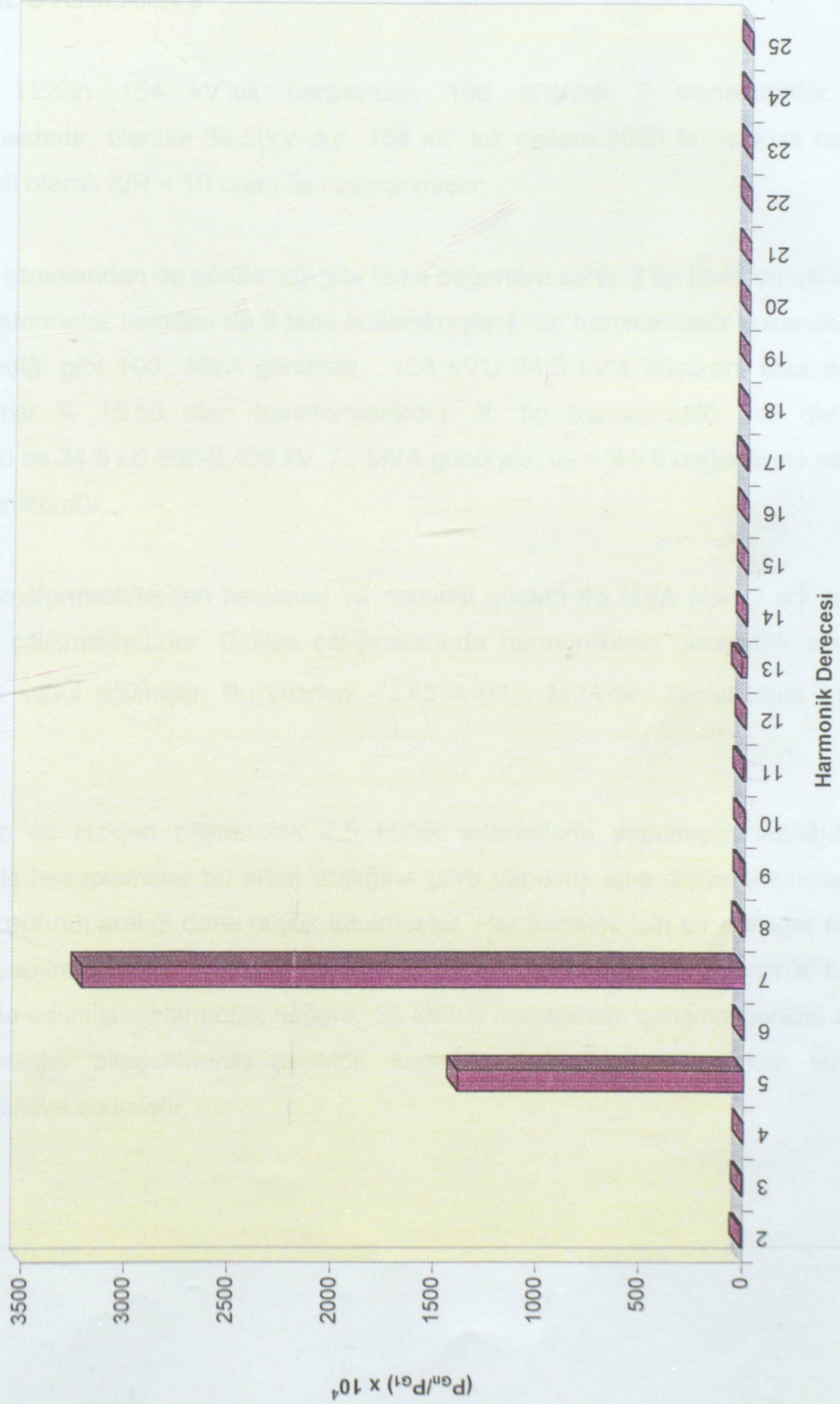
Tablo 21. Bağıl Ek Girdap Akımı Kayıpları



Şekil 8. Bağıl Ek Histeresiz Kayıpları

Tablo 21. Bağıl Ek Girdap Akımı Kayıpları

H	$(P_{Gn}/P_{G1}).10^4$
2	10.27
3	7.37
4	1.08
5	1384.84
6	3.38
7	3212.95
8	12.52
9	5.60
10	6.02
11	11.96
12	3.30
13	24.97
14	4.99
15	1.08
16	1.68
17	7.37
18	1.69
19	0
20	0
21	1.22
22	0.607
23	0
24	1.08
25	2.16



Şekil 9. Bağıl Ek GirdapAkımı Kayıpları

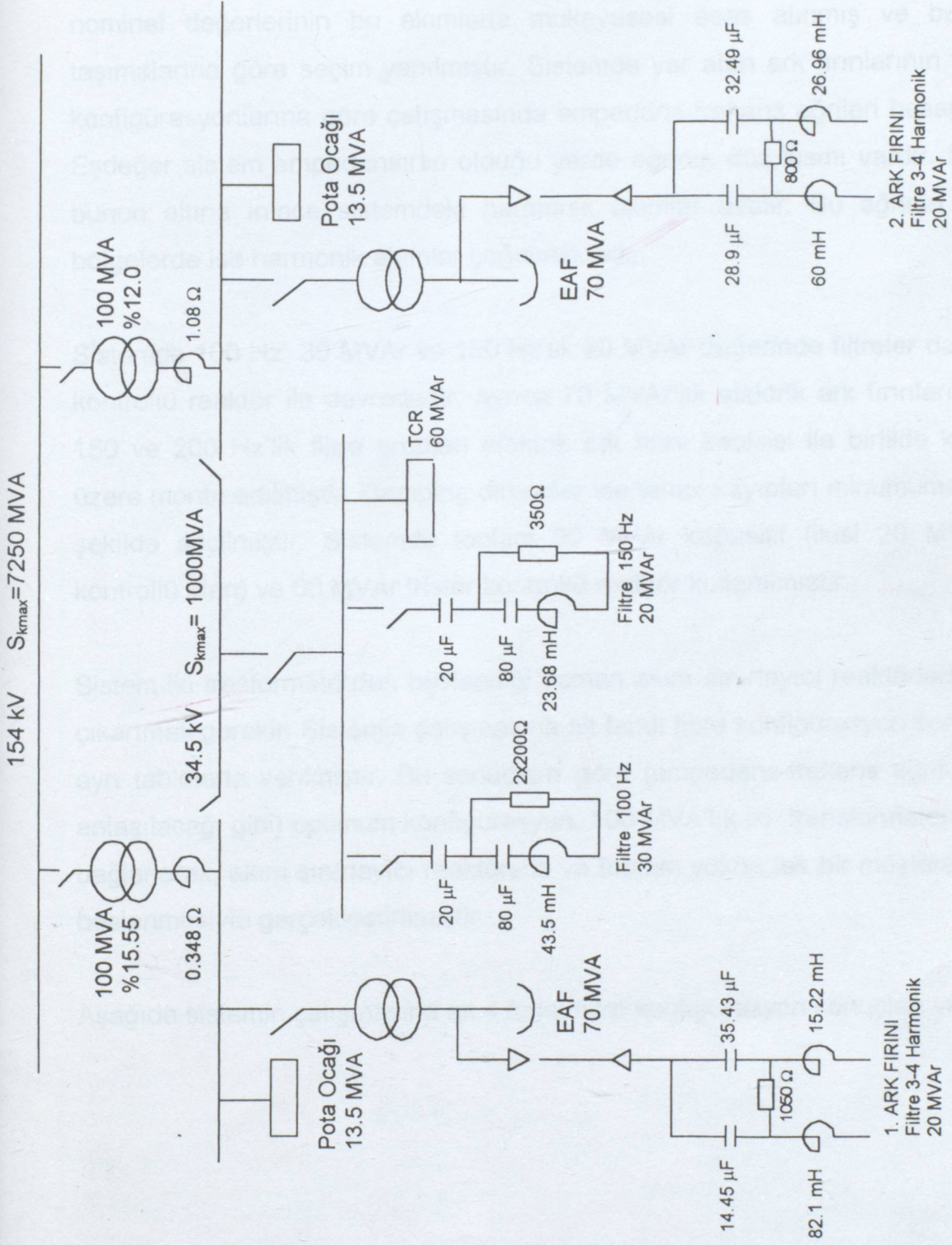
SAYISAL UYGULAMA 2

Sistem TEK'in 154 kV'luk barasından 100 MVA'lık 2 transformatör ile beslenmektedir. Gerilim 34.5 kV dur. 154 kV' luk sistem 2500 MVAr kısa devre kapasiteli olarak $X/R = 10$ oranı ile hazırlanmıştır.

Tek hat şemasından da görüleceği gibi farklı değerlere sahip 2 tip transformatör ve her transformatör tipinden de 2 tane kullanılmıştır. 1. tip transformatör yukarıda da bahsedildiği gibi 100 MVA gücünde, 154 kV'u 34.5 kV'a düşüren, kısa devre empedansı % 15.55 olan transformatördür. 2. tip transformatör ise gerilim düşürücü ve 34.5 / 0.600-0.400 kV, 70 MVA gücünde, $u_k = \%5.5$ değerlerine sahip transformatördür.

2. tip transformatörlerden beslenen ve nominal güçleri 45 MVA olan 2 ark fırını beraber çalışmaktadırlar. Birlikte çalışmalarında harmoniklerin geometrik olarak üretildiği kabul edilmiştir. Bu yüzden $\sqrt{2} 45 = 63.5$ MVA'dır. Temel akım 1100 A'dir.

Ölçümler 45 Hz'den başlanarak 2.5 Hz'lik arttırmalarla yapılmıştır. Aşağıdaki tablolarda hesaplamalar bu artım aralığına göre yapılmış ama ölçüm sonuçlarını verirken arttırım aralığı daha büyük tutulmuştur. Her kademe için bir eşdeğer filtre hesabı yapılmıştır. Herbir değer geometrik olarak ilave edilerek harmonik filtre yükü elde edilmiştir. Harmonik değere, 36 kV'luk maksimum çalışma gerilimi için filtre eşdeğer bileşenlerinin (reaktör, kapasitör, dirençler) maksimum temel değerleri ilave edilmiştir.



Şekil 10. Sayısal Uygulama 1'e ait sistemin tek hat şeması

Filtre dizaynında harmonik akımlar dikkate alınarak, filtre eşdeğer bileşenlerinin nominal değerlerinin bu akımlarla mukayesesi esas alınmış ve bu akımları taşımalarına göre seçim yapılmıştır. Sistemde yer alan ark fırınlarının farklı filtre konfigürasyonlarına göre çalışmasında empedans-frekans eğrileri hesaplanmıştır. Eşdeğer sistem empedansının olduğu yerde eğrinin düz kısmı vardır. Empedans bunun altına inince sistemdeki harmonik akımlar azalır. Bu eğrinin üstündeki bölgelerde ise harmonik akımlar çoğalmaktadır.

Sistemde 100 Hz 30 MVar ve 150 Hz'lik 20 MVar değerinde filtreler daima tristör kontrollü reaktör ile devrededir. Ayrıca 70 MVar'lık elektrik ark fırınlarına paralel 150 ve 200 Hz'lik filtre grupları elektrik ark fırını kesicisi ile birlikte kullanılmak üzere monte edilmiştir. Damping dirençler ise temel kayıpları minimuma indirecek şekilde seçilmiştir. Sistemde toplam 90 MVar kapasitif (ikisi 20 MVar kesici kontrollü olan) ve 60 MVar tristör kontrollü reaktör kullanılmıştır.

Sistem iki transformatörden beslendiği zaman akım sınırlayıcı reaktörleri devreden çıkartmak gerekir. Sistemin çalışmasına ait farklı filtre konfigürasyon sonuçları ayrı ayrı tablolarla verilmiştir. Bu sonuçlara göre (empedans-frekans eğrilerinden de anlaşılacağı gibi) optimum konfigürasyon, 100 MVA'lık iki transformatörün paralel bağlanarak, akım sınırlayıcı reaktörsüz ve toplam yükün tek bir müşterek baradan beslenmesiyle gerçekleştirilmiştir.

Aşağıda sistemin çalışmasına ait 4 farklı filtre konfigürasyon sonuçları verilmiştir:

1.100-150 Hz Filtresi ve 1.Ark Fırını 3-4 Harmonik Filtresi

Tablo 22. 100-150 Hz Filtresi

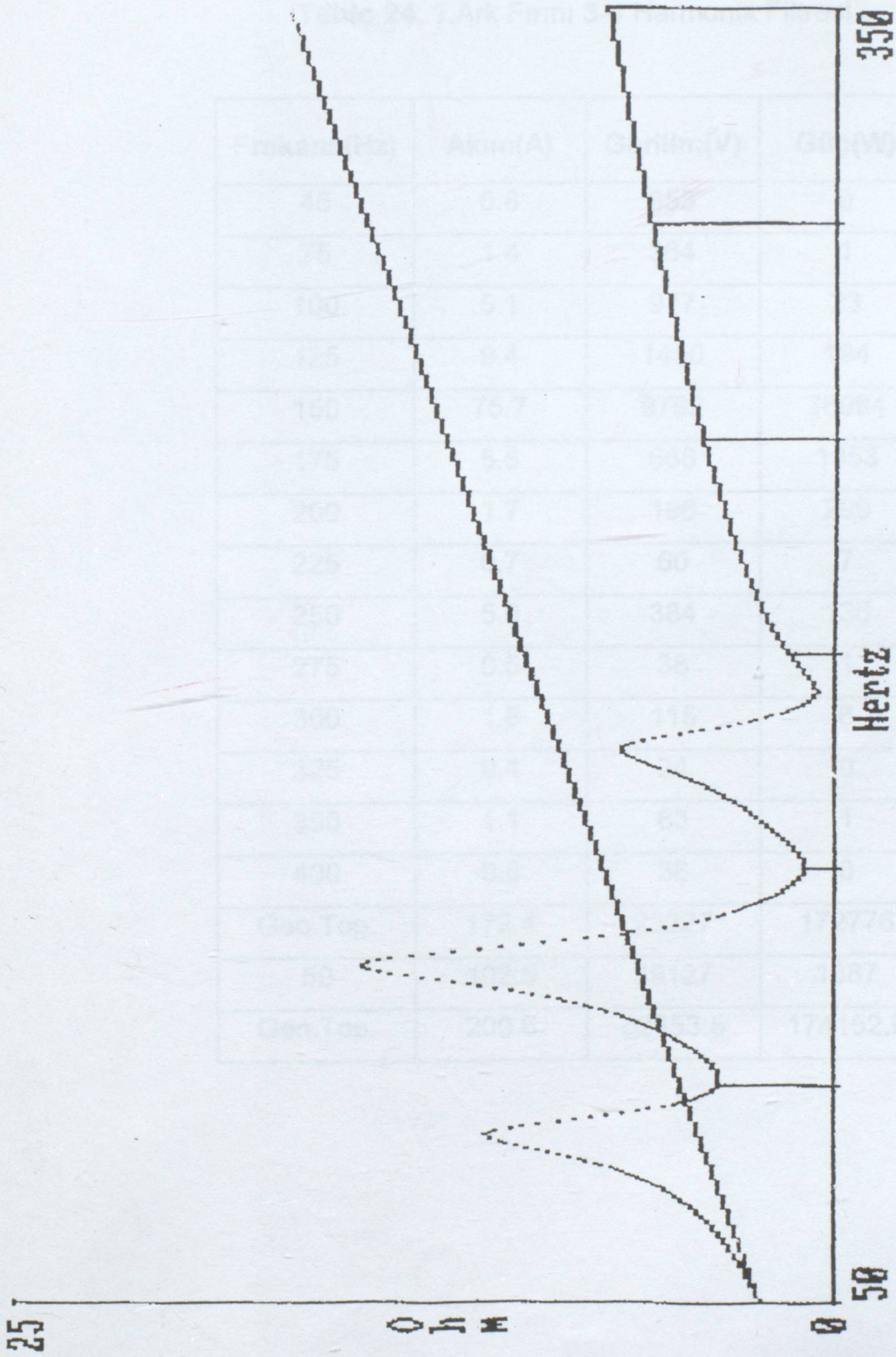
Frekans	100 Hz			150 Hz		
	(A)	(V)	(W)	(A)	(V)	(W)
45	6	460	2	4.1	474	0
75	21.7	981	609	9.7	665	10
100	29.8	2370	19361	15.9	820	90
100	188.9	Bu kısmın geo.top.		57.5	Bu kısmın geo.top.	
125	29.8	857	7405	49.7	2053	1728
150	6.4	157	548	119.6	4118	16114
150	102.3	Bu kısmın geo.top.		236.5	Bu kısmın geo.top.	
175	3.9	85	302	18.5	547	562
200	1.9	36	93	6	155	80
200	11.5	Bu kısmın geo.top.		86.7	Bu kısmın geo.top.	
225	1.0	18	35	2.7	62	21
250	7.9	131	2701	19.2	399	1348
250	10.8	Bu kısmın geo.top.		26.8	Bu kısmın geo.top.	
275	0.9	14	45	2.1	40	20
300	3.1	46	625	6.9	119	253
300	6.6	Bu kısmın geo.top.		15	Bu kısmın geo.top.	
325	0.7	10	42	1.6	25	16
350	2.1	28	386	4.3	65	141
350	4.4	Bu kısmın geo.top.		9.3	Bu kısmın geo.top.	
400	1.5	19	267	3.0	40	91
400	2.3	Bu kısmın geo.top.		4.7	Bu kısmın geo.top.	
Geo.Top.	216.6	8209	191819	260.4	10012	68100
50.0	504.6	34851	537	334.8	34521	8
Gen. Top.	548.7	48760.6	192355	424.2	46296.6	68107

Tablo 23.1.Ark Fırını 3-4 Harmonik Filtresi

Frekans(Hz)	Akım(A)	Gerilim(V)	Güç(W)
45	1.3	537	0
75	3	764	3
100	5.13	971	22
125	17.3	2654	649
150	20.9	2706	2977
175	5.1	610	1131
200	2.0	236	434
225	0.8	55	8
250	5.3	413	158
275	0.6	41	1
300	1.9	123	7
325	0.4	26	0
350	1.2	67	2
400	0.9	41	0
Geo.Top.	78.2	11542	32710
50	102.5	39127	1387
Gen.Top.	128.9	30669.2	34097.1

2. 1. Ark Fırını 3-4 Harmonik Filtresi

Şekil 24. 1. Ark Fırını 3-4 Harmonik Filtresi

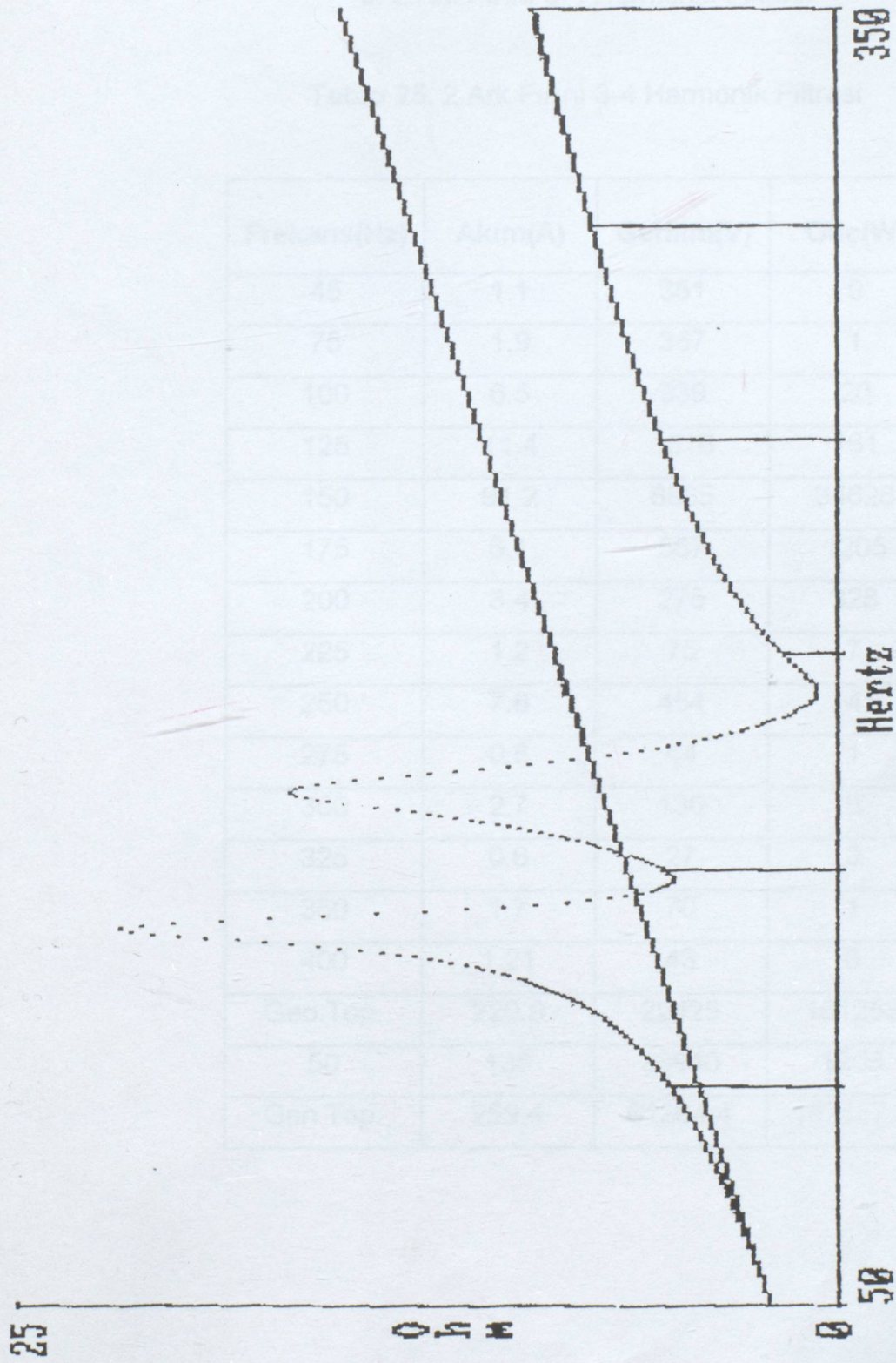


Şekil 11. 100-150 Hz Filtresi ve 1. Ark Fırını 3-4 Harmonik Filtresi

2. 1.Ark Fırını 3-4 Harmonik Filtresi

Tablo 24. 1.Ark Fırını 3-4 Harmonik Filtresi

Frekans(Hz)	Akım(A)	Gerilim(V)	Güç(W)
45	0.8	353	0
75	1.4	364	1
100	5.1	977	23
125	9.4	1450	194
150	75.7	9792	38994
175	5.5	668	1353
200	1.7	196	299
225	0.7	60	7
250	5.0	384	136
275	0.5	38	1
300	1.8	115	6
325	0.4	24	0
350	1.1	63	1
400	0.8	38	0
Geo.Top.	172.4	23227	172776
50	102.5	39127	1387
Gen.Top.	200.6	62353.5	174152.9

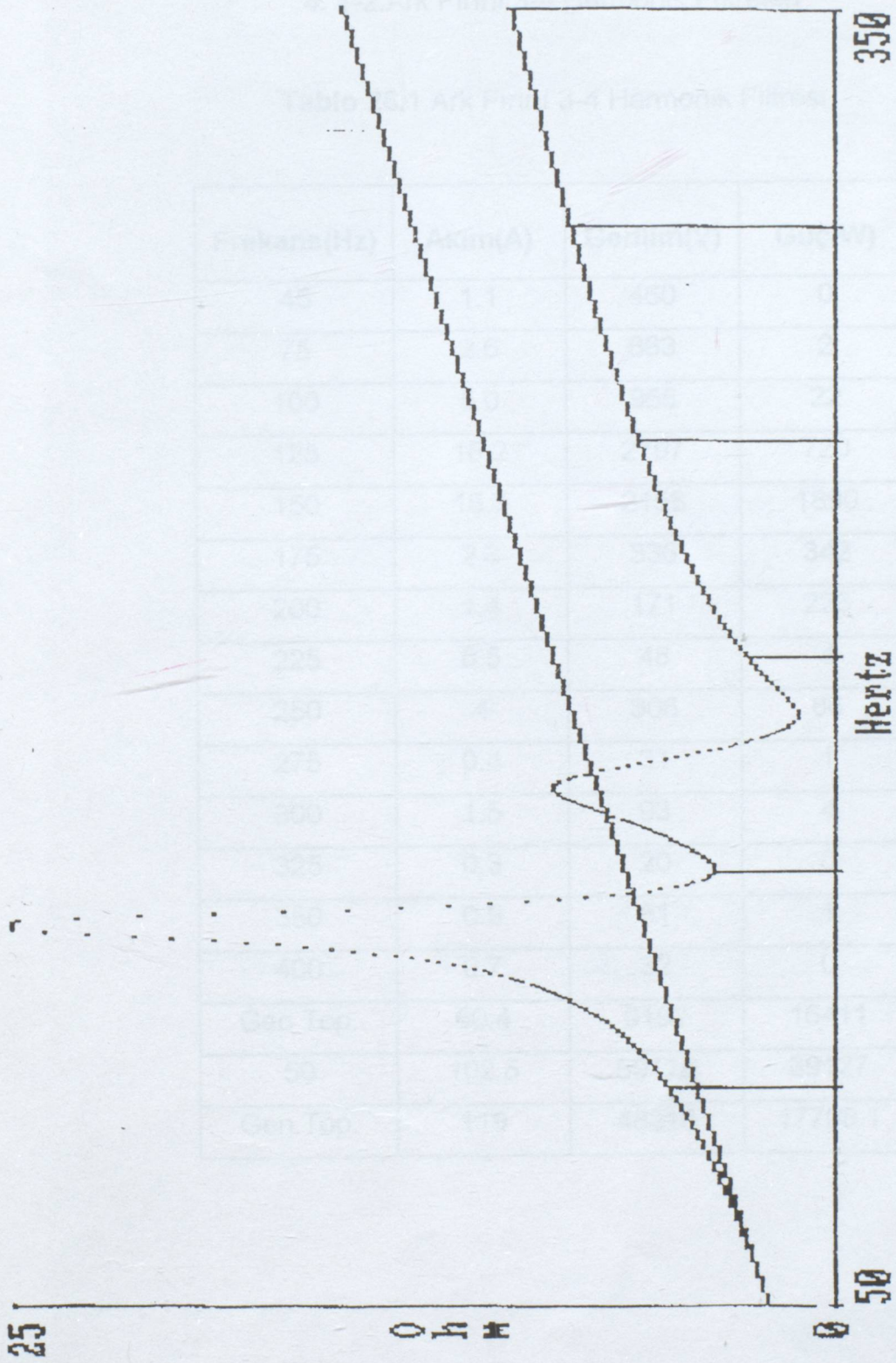


Şekil 12. 1.Ark Fırını 3-4 Harmonik Filtresi

3. 2.Ark Fırını 3-4 Harmonik Filtresi

Tablo 25. 2.Ark Fırını 3-4 Harmonik Filtresi

Frekans(Hz)	Akım(A)	Gerilim(V)	Güç(W)
45	1.1	351	0
75	1.9	357	1
100	6.5	939	20
125	11.4	1316	161
150	91.2	8865	34628
175	6.1	567	1205
200	3.4	275	328
225	1.2	75	7
250	7.8	454	141
275	0.8	44	1
300	2.7	130	6
325	0.6	27	0
350	1.7	70	1
400	1.21	43	0
Geo.Top.	220.9	22425	161253
50	136	38940	1295
Gen.Top.	259.4	61364.4	162557.9



Şekil 13. 2. Ark Fırını 3-4 Harmonik Filtresi

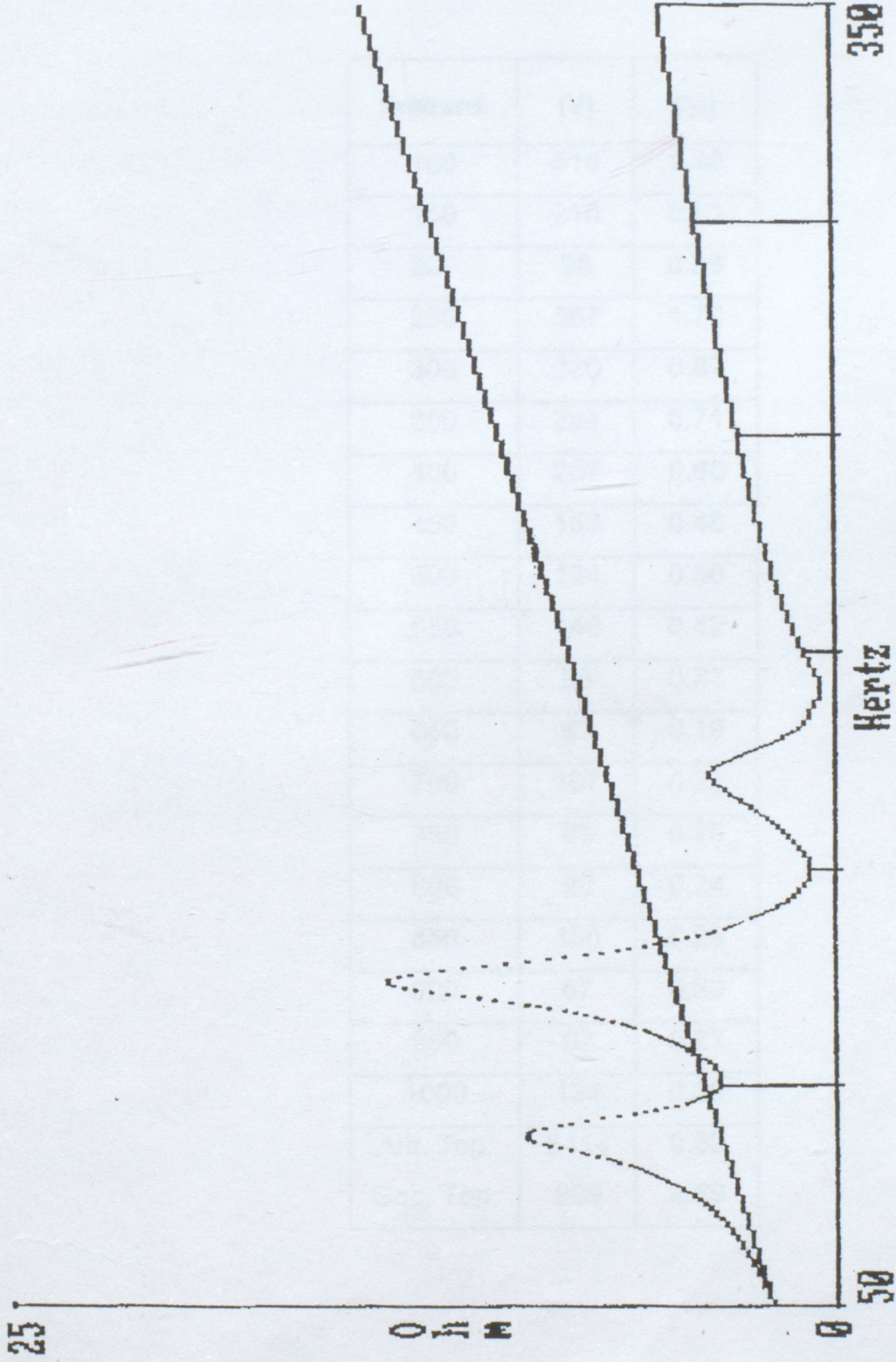
4. 1-2.Ark Fırını 3-4 Harmonik Filtreleri

Tablo 26.1.Ark Fırını 3-4 Harmonik Filtresi

Frekans(Hz)	Akım(A)	Gerilim(V)	Güç(W)
45	1.1	460	0
75	2.6	663	2
100	5.0	965	22
125	18.2	2797	720
150	16.7	2156	1890
175	2.8	336	342
200	1.4	171	226
225	0.5	48	4
250	4	306	86
275	0.4	31	1
300	1.5	93	4
325	0.3	20	0
350	0.9	51	1
400	0.7	32	0
Geo.Top.	60.4	9192	16411
50	102.5	39128	39127
Gen.Top.	119	48318	17798.1

Tablo 27. 2.Ark Fırını 3-4 Harmonik Filtresi

Frekans(Hz)	Akım(A)	Gerilim(V)	Güç(W)
45	1.4	459	0
75	3.4	655	2
100	6.5	936	20
125	22.2	2553	604
150	28.2	2746	3321
175	4.8	446	745
200	1.9	149	97
225	0.8	50	3
250	5.6	322	71
275	0.6	32.	0
300	2	97	3
325	0.5	21	0
350	1.3	53	1
400	0.9	33	0
Geo.Top.	78.1	8832	19822
50	136	38940	1295
Gen.Top.	156.8	47771.6	21116.8



Şekil 14. 1-2.Ark Fırını 3-4 Harmonik Filtresi

Tablo 28. Harmonik Distorsiyon

Frekans	(V)	(%)
100	510	1.48
150	210	0.61
200	98	0.28
250	587	1.70
300	300	0.87
350	244	0.71
400	207	0.60
450	159	0.46
500	124	0.36
550	145	0.42
600	95	0.27
650	67	0.19
700	107	0.31
750	85	0.25
800	82	0.24
850	100	0.29
900	67	0.20
950	92	0.27
1000	134	0.39
Arit. Top.	3414	9.89
Geo. Top.	996	2.89

SONUÇ ve ÖNERİLER

Enerji sistemlerinde gerek enerjinin üretilmesi, gerekse dağıtımı sırasında akım ve gerilimin sinüzoidal olması hedeflenir. Ancak sistemde harmonik üreten kaynakların varlığı, istenmesede harmonikli akım ve gerilimlerin oluşmasına yol açar. Bu da işletmelerde önemli sorunlar doğurur. Bu yüzden harmonikler giderek önem kazanmış ve giderilmesi yolunda alınacak önlemlerin artırılması hız kazanmıştır.

Enerji sistemlerinde nonlinear yükler ve bunların sebep oldukları harmoniklere çalışmanın birinci bölümünde geniş yer verilmiştir. İkinci bölümde ise harmonik kaynakları ayrı ayrı ele alınmıştır ;

Transformatörlerin harmonik kaynağı olma sebepleri, demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin doğrusal olmamasından ileri gelir. Gerilim nominal değerinin üzerine çıktığında, çekirdek doyması sonucu, mıknatıslanma akımı harmonik bileşenler içerir. Bu yüzden gerilim kontrol altına alınmalıdır. Bu kontrol ile, harmonik seviyeler düşürülebilir. Transformatörlerde önemli olan üçlü harmonikler ise bağlantı şeklini üçgen yapmakla önlenabilir. Diğer bir harmonik kaynağı olan dönüştürücülerde ise, yüksek darbe birim işletmeler gerçekleştirilerek harmonikler giderilebilir. Ayrıca uygun filtreleme teknikleri de harmonikleri önlemede uygun yoldur. Yarım dalga doğrultmanı çift mertebeli harmonikler üretir. Çünkü transformatörü doyuma ulaştıran d.a. bileşene sahiptir. Bu yüzden yarım dalda yerine, tam dalga doğrultma uygulanmalıdır. Statik VAR kompanzatörler içeren tesislerde ise uygun bir filtre tasarımıyla harmonikler giderilebilir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde ise ark fırını harmonikleri incelenmiş ve harmonik kayıpların analizi yapılmıştır. Harmonik kayıpların analizinde üç fazlı ve dengesiz yüklenme durumu için yeni kayıp formülleri geliştirilmiştir. Ark fırını içeren 2 farklı sisteme ait sayısal uygulamalar yapılmıştır. 1. sayısal

uygulamada, sistemde yer alan ark fırınının sebep olduğu harmonikli akım ve gerilim değerleri tablolar halinde verilmiş, 4. bölüm içerisinde geliştirilen kayıp formülleri yardımıyla bu değerler kullanılarak harmonik kayıpların analizi yapılmıştır. Sonuçlar, temel frekanstaki kayıplara göre mukayese edilerek grafikler halinde sunulmuştur. 2. sayısal uygulamada ise, 2 ark fırını içeren kompleks bir sisteme ait harmonikli akım ve gerilim değerleri tablolar halinde verilmiş ve bu değerler için farklı filtre konfigürasyonlarına gidilmiştir. Her yeni durum için akım ve gerilim değerleri alınmış, empedans-frekans eğrileri çıkartılmıştır. Alınan değerler ve eğriler yardımıyla harmoniklerin süzülmesi durumu için optimum çalışma belirlenmiştir.

Sayısal uygulamalardan da görüldüğü gibi, nonlinear yükler içeren sistemlerde oluşan harmonik akım ve gerilimler ek kayıplar oluşturmaktadır. Bu da beraberinde ek maliyet getirmektedir. Hem harmoniklerin oluşumundan önce, hem de sonra alınacak bir dizi önlemlerle bu kayıplar azaltılabilir.

Harmoniklerin oluşumundan sonra, sayısal uygulamalarda da verildiği gibi, harmonikli akım ve gerilim değerleri ölçülmeli ve bu değerler dikkate alınarak yapılan kayıp analizinde, en fazla kayıba sebep olan akım ve gerilimlerin bastırılması yoluna gidilmelidir. Bunun için maliyet analizi de gözönünde bulundurularak filtre devreleri geliştirilmelidir. Harmonik oluşumundan önce ise, sistemlerin yapım aşamasında harmonikli akımların, temel frekanstaki akımlara oranında (I_n/I_1) bazı sınırlamalar getirilmelidir. Hatta bu konuda hizmet veren özel birimler oluşturulmalı ve gerekli durumlarda danışmanlık hizmeti verilmelidir. Ayrıca sistemde yer alan nonlinear yükler günlük yüklenme periyodunda daha az bir süre çalıştırılmalıdır. Böylece daha sonra önemli problemler oluşturacak harmonikler konusunda dikkate değer önlemler alınmış olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Arrillage, J., Bradley, D.A. and Bodger P.S., 1985. Power Systems Harmonics, John Wiley and Sons
2. Attar, F., 1994. Nonlineer Yükleri İçeren Elektrik Enerjisi Sistemlerinin İşlemesinde Harmoniklerin Etkinlikleri Ve Kayıp Analizi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
3. Australian Standarts Authority, 1979. Disturbances in Main Supply Network, Australian Standarts AS2279, Parts 1 and 2, Canberra, Australian Standarts Authority.
4. Balser, S.J. and Feltes, J.W., Power Systems Harmonics Measurement and Analysis, Rural Electric Power Conference, Paper 85CH 2126-1-C5, Springfield, Illinois.
5. Bayram, M., Şubat 1985.Harmoniklerin Kompanzasyon Tesislerindeki Tesirleri, MAG-E-82 / 2-1.
- 6.Buck, F.G.G., P. Gistelin and D. Backer,1984. A Simple But Reliable Loss Model for Inverter Supplied Induction Motor, IEEE Transactions on Industrial Applications, 1A-20, pp.190-202.
7. Densem, T.J., Bodger, and Arrillage, J.,1984. Three-Phase Transmission System Modelling for Harmonic Penetration Studies, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, pp.310-317.
8. Emanuel, A.E., Levitsky F.J., and Gulachenski, 1981. Induction Watthour Meter Performance on Rectifier Inverter Circuitc, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, vol. PAS-100, pp.4422-4427.

9. Gelopoulos, D. and Lightfoot, S.,1978. Realistic Reduction of Nonlinear Networks, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, vol. PAS-97, pp.495-503.
10. Hammond, P.W., Jan/Feb 1988. A Harmonic Filter Installation to Reduce Voltage Distorsion From Static Power Converter, IEEE Transactions on Industrial Applications, vol. IA-24, no:1, pp. 53-58.
11. Hasarlı, B.,1995. Güç Sistem Harmonikleri Ve Harmoniklerin Süzülmesi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
12. IEEE, Standarts. 519-1981. IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters.
13. Jost, F.A., Menzies D.F. and Sachdev, M.S., 1974. Effects of System Relays, Power System Committee Meeting, Canadian Electrical Association.
14. McGranaghan, M.F., Shaw, J.H. and Owen R.E., 1981. Measuring Voltage and Current Harmonics on Distribution Systems, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, vol. PAS-100, pp.3599-3605.
15. Plessing,R. Ark Ocaklarında Çelik Yapımı,Segem Yayınları,No:94,Ekim 1981,Ankara.
16. Pluckinger Erwin and Etterich,OTTO. Electric Furnace Steel Production 1979,Düsseldorf.
17. Reeve, J., 1971. Harmonic Interaction Between HVDC Converters and A.C. Power Systems IEEE Winter Power Meeting, pp. 2785-2793.
18. Steel Times International, May,1989. Desing of a Modern Electric Arc Furnace and Secondary Steel Making Facility.

19. Sundberg, Y.,1976. The Arc Furnace As a Load On The Network, ASEA Journal, vol.49, pp.75-87

20. Wirth, R.K.,1984. Analysis of Harmonics and Their Effects on Power Systems, Brawn Boveri Review 1/2,

