

168369

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

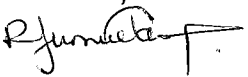
ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE ARK FIRINI  
HARMONİKLERİNİN İNCELENMESİ

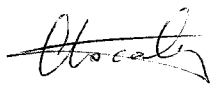
Elektrik Mühendisi - Korcan DOKUZOGUZ


FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr.Recep YUMURTACI

oç. Dr. Recep YUMURTACI  


Prof. Dr. Celal KOCATEPE  


Doç. Dr.  


İSTANBUL, 2005

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	i
KISALTIMA LİSTESİ.....	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vi
ÖNSÖZ.....	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Konu ve Önemi.....	1
1.2 Tezin Amacı ve İçeriği.....	2
2. Ark Fırınlarnn İncelenmesi.....	3
2.1 Elektrik Ark Ocaklarında Gelişmeler.....	3
2.2 Elektrik Ark Ocağı Elemanları.....	3
2.3 Fırlama işlemi.....	5
2.3.1 Fırının şarj olması.....	8
2.3.2 Erime işlemi.....	8
2.3.3 Arıtma.....	10
2.3.4 De-slagging.....	12
2.3.5 Fırının dönmesi.....	13
2.3.6 Fırın sıcaklığının Dengelenmesi.....	14
2.4 Mekanik Sistemler.....	15
2.4.1 Hidrolik Sistemler.....	16
2.4.2 Su Soğutmalı Sistemler.....	16
2.4.3 Yağlama Sistemi.....	17
2.5 Yardımcı Sistemler.....	17
2.5.1 Oksijen Düzenleyici Sistemler.....	17
2.5.2 Karbon Enjeksiyon Sistemi.....	17
2.5.3 Oksi-yakıt Yakma Sistemleri.....	17
2.5.4 Elektrodun Spreyli Soğutma Sistemi.....	18
2.5.5 Sıcaklık Örnekleme Sistemi.....	18
2.5.6 Sönmüş Gazların Boşaltım Sistemi.....	18
2.6 Elektrik Sistemi.....	19
2.6.1 Vakum Anahtarı.....	19
2.6.2 Motorlu Açma Anahtarı.....	20
2.6.3 EAF Transformatörleri.....	20
2.6.4 İşlem Değıştirici.....	20
2.7 İkincil Elektriksel Devre.....	21
2.7.1 Üçgen Bağlantısı.....	21
2.7.2 Bara Kolu / Akım İleten Kollar.....	22
2.7.3 Elektrot Başları ve Bağlantı Kısımları.....	23
2.7.4 Elektrotların Regülasyonu.....	24

2.7.5	Fırın Güç Kabloları.....	24
2.8	Elektrotlar.....	24
2.9	Sekonder Devre.....	26
2.9.1	Sekonder Çıkış Baraları.....	27
2.9.2	Fleksibl Kablolar.....	29
2.10	Oniki Darbeli Paralel Bağlı Tristörlü Doğrultucu.....	30
2.11	Güç Kalite Düzenleyicileri.....	32
2.12	Örnek Olarak Bir Ark Fırını Tesisinin İncelenmesi.....	34
2.12.1	Firma Bilgileri.....	34
2.12.2	Üretim Akışı.....	34
2.12.3	Kroman Çelik Fabrikasından Ark Fırını Resimleri.....	36
3	Harmoniklerle İlgili Temel Kavramlar.....	45
3.1	Harmonikli Devrelerde Efektif Değer.....	45
3.1.1	RMS-Efektif Değer Ölçümü.....	45
3.1.2	RMS-Gerçek Değer Nedir?.....	45
3.1.3	Düşük Ölçümlerin Yol Açtığı Sorunlar.....	48
3.1.4	RMS Ölçümünün Yorumlanması.....	49
3.2	Harmonikler.....	49
3.2.1	Harmonik Kaynakları.....	51
3.3	3 Fazlı Sistemler için Güç Tanımlamaları.....	68
3.4	Güç Tanımlamaları ile Yük Karakteristiği Analizi.....	70
3.4.1	Güç Büyüklüğü.....	71
3.4.2	Güç Faktörü.....	73
3.4.3	Ark Fırınlarında Harmonikler.....	74
3.5	AA(AC) ve DA(DC) Ark Fırınlarının Harmonikler Açısından karşılaştırılması.....	75
3.5.1	Sistemin Açıklanması.....	75
3.5.2	Ark Fırınlarının Karakteristiklerinin Karşılaştırılması.....	76
4	Literatürde Ark Fırınlarının Harmonik Etkinliği Konusunda Yapılmış çalışmaların incelenmesi.....	79
4.1	Yeni Ark Fırını Modeli ile Dalgalanma Çalışmaları.....	79
4.1.1	Çalışmanın Açıklanması.....	79
4.1.2	Başlangıç Şartlarındaki Ani Bağımlılık.....	80
4.1.3	Ark Fırını Modeli.....	81
4.1.3.1	Elektrik Arklarının Dinamik Davranışları.....	81
4.1.3.2	Kaotik Zaman Varyasyonu.....	84
4.1.3.3	Ark Fırını Modeli.....	84
4.1.4	IEC Dalga Ölçer.....	84
4.1.5	Simülasyon Sonuçları.....	87
4.1.6	Çalışmanın Yorumlanması.....	89
4.1.7	Çalışmada Kullanılan Değerler.....	90
4.2	DC Ark Fırını Tesislerinde İnterharmoniklerin Analizi.....	90
4.2.1	Çalışmanın Açıklanması.....	90
4.2.2	Tesisin Açıklanması.....	93
4.2.3	Transfer Fonksiyonu Yaklaşımı.....	96
4.2.4	Adapte Edilmiş Öngörüler için Dizayn Kriterleri.....	99
4.2.4.1	Harmoniklerin Filtreler ile Söndürülmesi.....	100
4.2.4.2	Senkronizasyon Şeması.....	101
4.2.4.3	Akım Çevrimindeki Notch Filtresi.....	101

4.2.4.4 Akım Çevrimi Bant Genişliği.....	101
4.2.5 Değişik Konfigürasyonlar için Deneysel Ölçümler.....	103
4.2.6 Çalışmanın Yorumlanması.....	108
4.3 DC Ark Fırını Çalışmasının Analizi ve 187Hz'lik Voltaj Distorsiyonu Nedeniyle Oluşan Dalgalanmalar.....	108
4.3.1 Çalışmanın Açıklanması.....	108
4.3.2 187Hz'lik Gürültü Dalgalanması.....	110
4.3.3 Sistemin Açıklanması.....	111
4.3.4 Sistem Frekansının Cevap Karakteristiği.....	113
4.3.5 İdeal Konvertör Çalışması.....	115
4.3.6 Pratik Konvertör Çalışması.....	115
4.3.7 Normal Olmayan Konvertör Çalışma Koşulları.....	117
4.3.7.1 Bozulmuş Referans Sinyali ile Olan Çalışma.....	117
4.3.7.2 Voltajla Birlikte Faz Dışındaki Zamanlama Sinyali ile Olan Çalışma.....	119
4.3.8 Çalışmanın Yorumlanması.....	121
4.4 Elektrik Şebekelerinde Titreşme Telafisinin İncelenmesi için Ark Fırını Modeli.....	126
4.4.1 Çalışmanın Açıklanması.....	126
4.4.2 Non-linear zamanla Değişen Ark Modelleri.....	128
4.4.3 Titreşme Simülasyonu için Zaman Değişim Yasaları.....	130
4.4.3.1 Zamanla Değişim için Sinüsoidal Yasa.....	132
4.4.3.2 Beyaz Gürültülü Zamanla Değişimi.....	134
4.4.3.3 Modelin Yorumlanması.....	136
4.4.4 Seri İndüktörlerle Titreşme Telafisi.....	137
4.4.5 Seri İndüktörler ve Akım – Gerilim Distorsiyonu.....	142
4.4.6 Çalışmanın Yorumlanması.....	143
4.5 Elektrik Arkı Ocaklarından Gelen Titreşim Hesaplama için Bir Model Geliştirilmesi..	145
4.5.1 Çalışmanın Açıklanması.....	145
4.5.2 Elektrik Arkı Ocaklarının Karakteristikleri.....	145
4.5.2.1 Ark Ocaklarında Gerilim Titreşmesi.....	147
4.5.2.2 Ark Ocağı Yüklerini Karakterize Etme.....	149
4.5.2.3 Ocak Girdi Verilerinin Ölçülmesi.....	151
4.5.3 Manyetik Kaset Kaydedici Verilerinin Dijitalleşmesi.....	151
4.5.4 Dijital Sinyal Analiz Programı.....	152
4.5.5 Bantla Sınırlanmış Beyaz Gürültü ile Denemeler.....	153
4.5.5.1 Güç Spektrumuna Ortalamanın Etkisi.....	154
4.5.5.2 Güç Spektrumuna Bant Aralığının Etkisi.....	154
4.5.5.3 Transfer Fonksiyonunun Belirlenmesi.....	154
4.5.6 Dijitalleştirilmiş Ocak Verilerinin Analize Hazırlanması.....	154
4.5.7 Temel Analiz Yaklaşımı.....	154
4.5.7.1 Analizin Yorumlanması.....	155
4.5.7.2 Global Gerçekler.....	155
4.5.8 İki Ocak İşletimi Örneği.....	158
4.5.8.1 Zaman Bölgesi ve Spektral Pencere Tepkileri.....	158
4.5.8.2 Reaktif Güç Spektral Pencere Arasındaki İlişkiler.....	158
4.5.8.3 Farklı Ölçüm Bant Genişlikli Bağlantı Gerilimlerinin Normalize Spektral Pencere Tepkileri.....	158
4.5.8.4 Farklı Ölçüm Bant Genişlikli Ocak ve Reaktif Güçlerinin Normalize Sepktral Pencere Tepkileri ve Ortalamasının Alınması.....	162
4.5.8.5 4-14Hz ile 1-25Hz'lik Ölçüm Bant Genişliklerinde Ocak Reaktif Güç Sinyalinin Farklı Karakteristiklerinin Resmedilmesi.....	163
4.5.8.6 Transfer Fonksiyonu İlişkileri.....	167

4.5.9	Ocak Reaktif Güç Spektral Penceresinin Ocak Elektrot Uçlarındaki Kısa Devre MVA'sına Tepkisinin Maksimum Genlik İlişkisi.....	167
4.5.10	Önerilen Ark Ocağı Modeli.....	168
4.5.11	Çalışmanın Yorumlanması.....	169
5	Sayısal Uygulama.....	171
5.1	İncelenen Örnek Tesiste Yapılmış Harmonik Ölçümlerine Ait Rapor.....	171
5.2	Ölçüm Sonuçları.....	174
5.3	Ölçüm Analizi.....	176
5.4	Örnek Sistemin İncelenmesi.....	179
5.5	Kroman Çelik Tek Hat Diyagramının Formüle Edilmesi.....	181
5.5.1	Hesaplamalar.....	182
6	Sonuçlar ve Öneriler.....	193



## SİMGE LİSTESİ

$\Delta W$	Senkronizasyon Açısal Frekansı
$CaF_2$	Kalsiyum difosfat
$CaO$	Kalsiyum monooksit
$CO$	Karbon Monoksit
$dB$	Gürültü Birimi
$D_i$	Kümülatif Dağılım
$dPF^+$	Pozitif Sekvans Deplasman Güç Faktörü
$F$	Fahrenheit (Sıcaklık Birimi)
$Fe$	Demir
$FeO$	Demir oksit
"g"	Ark İletkenliği
$Hz$	Hertz (Frekans Birimi)
$I$	Ark uzunluğu
$k_i$	Ağırlık
$kV$	Volt (Gerilim Birimi)
$kW$	Güç birimi
$MnO$	Magnezyum oksit
$N$	Aktif olmayan güç
$n_i$	Gözlenme Periyodunun Kısmi Yüzdesi
$^{\circ}C$	Santigrat (Sıcaklık birimi)
$P$	Potasyum
$P_1^+$	Temel Pozitif Sekvans Aktif Güç
$P_{a1}, P_{b1}, P_{c1}$	3 Fazın Aktif Güçleri
$P_{ah}, P_{bh}, P_{ch}$	3 Fazın Aktif Harmonik Güçleri
$ppm$	Çözünürlük birimi
"r"	Arkın Yarıçapı
$Q_{a1}, Q_{b1}, Q_{c1}$	3 Fazın Reaktif Güçleri
$Q_{ah}, Q_{bh}, Q_{ch}$	3 Fazın Harmonik Reaktif Güçleri
$S$	Sülfür
$SiO_2$	Silisyumdioksit
$Sv_1$	Dengesiz Temel Görünen Güç
$V_1$	Pozitif Sekvans bileşenleridir

## KISALTMALAR LİSTESİ

AC	Alternative Current (Alternatif Akım)
DAD	Delay Angle Determination (Gecikme Açısının Belirlenmesi)
DC	Doğru Akım (Direct Current)
DES	Dördüncü Delik Terimi
EAF	Elektrik Ark Fırını (Electrical Arc Furnare)
EMTP	Elektromanyetik Geçici (Transient) Programı
EPC	Equidistant Pulse Control (Darbe Kontrolü)
FM	Frekans Modülasyonu
HVDC	High Votaged Direct Current (Yüksek Gerilimli Doğru Akım)
IEEE	Uluslararası Elektrik-Elektronik Mühendisleri
IISI	International Iron and Steel Institue (Uluslararası Demir ve Çelik Enstitüsü)
MDS	Motorized Discannect Switch (Motorlu Açma Anahtarı)
MgO	Magnezyum monooksit
OG	Middle Voltage (Orta Gerilim)
PCC	The Point of Common Coupling
PDF	Probability Distribution Function
PF	Deplasman Güç Faktörü
RMS	Efektif Değer
S	Eşdeğer Görünen Güç
SCR	Kısa Devre Oranı
SVC	Statik Var Kompanzasyonu
SVS	Static-Var Systems (Statik Var Sistemleri)
TACS	Geçiş Elemanı Analiz Kontrol Sistemi
TCR	Tristör Kontrollü Reaktörler
THD	Total Harmonic Distortion (Toplam Harmonik Distorsiyonu)
USBM	U.S. Bureau of Mines
VA	Görünen Güç Birimi
VD	High Voltage (Yüksek Voltaj)

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Bir Elektrik Ark ocağı devresinin prensip şeması. (Orhon,1986).....	5
Şekil 2.2 Elektrik Ark Fırınının yandan ve üstten görüntüsü.....	7
Şekil 2.3 Tipik DC EAF Düzenneği.....	21
Şekil 2.4 EAF prosesinin basit bir şeması.....	25
Şekil 2.5 Ark ocağı ve sekonder devresi. (Orhon,1986).....	27
Şekil 2.6 Sekonder Çıkış Bara Düzenlemesi. (Orhon,1986).....	28
Şekil 2.7 Farklı bir Sekonder Çıkış Bara Düzenlemesi . (Orhon,1986).....	29
Şekil 2.8 Orta uçlu reaktör üzerinden paralel bağlı oniki darbeleri doğrultucu.....	30
Şekil 2.9 DA ark fırını güç kaynağının elektriksel şeması. (Birbir,1999).....	31
Şekil 2.10 Birleşik güç kalite düzenleyici olarak pasif filtrelerle paralel ve seri aktif güç filtresinin DA ark fırınında kullanılması (Binbir 1999).....	33
Şekil 2.11 Kroman Çelik Fabrikası Üretim Akışı.....	34
Şekil 2.12 Ergitme İşleminin başlaması.....	36
Şekil 2.13 Fırın kapağının açılması.....	37
Şekil 2.14 Kapağın açılmasından sonra devam eden ergitme işlemi.....	38
Şekil 2.15 Ark Fırınının kapağının kapatılması.....	39
Şekil 2.16 Pota Fırınının kararlı hale gelmesi.....	40
Şekil 2.17 Fırında Ergitme İşleminin tamamlanması.....	41
Şekil 2.18 Ark Fırınının kapağının açılması.....	42
Şekil 2.19 Potanın taşınması.....	43
Şekil 2.20 Hurdaların taşınması.....	44
Şekil 3.1.1 İdeal sinüs eğrisi.....	46
Şekil 3.1.2 Bir bilgisayarın çektiği akımın tipik dalga şekli.....	47
Şekil 3.2.1 Temel harmonikle 3.ve 5. harmonikler.....	49
Şekil 3.2.2 Bozuk akım dalga şekli.....	50
Şekil 3.2.3 Tipik bir PC’de harmonik spektrumu.....	52
Şekil 3.2.4 Tipik bir CFL harmonik spektrumu.....	53
Şekil 3.2.5 Üç fazlı veya altı darbeleri köprü.....	53
Şekil 3.2.6 12 darbeleri köprü.....	54
Şekil 3.2.7 Tipik bir 12 darbeleri köprü harmonik spektrumu.....	55
Şekil 3.2.8 Doğrusal bir yükte akım dalga şekli.....	56
Şekil 3.2.9 Doğrusal olmayan yükte akım dalga şekli.....	56
Şekil 3.2.10 Doğrusal olmayan yük eşdeğer devresi.....	57
Şekil 3.2.11 Nötrde birleşen üçlü N akımları.....	59
Şekil 3.2.12 Üçlü N harmonikleri için kablo anma değeri yenilenmesi.....	60
Şekil 3.2.13 PFC Kapasitörlü doğrusal olmayan yüke ait eşdeğer devre.....	61
Şekil 3.2.14 Doğrusal olmayan yükün neden olduğu gerilim bozulması.....	62
Şekil 3.2.15 Doğrusal ve doğrusal olmayan yüklerin ayrımı.....	62
Şekil 3.2.16 Pasif harmonik şönt filtre.....	65
Şekil 3.2.17 Pasif seri ve şönt filtreler.....	65
Şekil 3.2.18 Yıldız üçgen izolasyon transformatörü.....	66
Şekil 3.2.19 Aktif harmonik şartlandırıcı.....	66
Şekil 3.4.1 20 dakikalık periyot içindeki AC ark fırını beslemesi dalga formları. Voltaj. (b) Akım.....	71
Şekil 3.4.2 20 dakikalık süre içinde AC ark fırınının beslemesinin dalga formları (3 doğrultucu) (a) Voltaj (b) Akım.....	72

Şekil 3.4.3	20 dakikalık periyot içindeki DC ark fırını beslemesinin (tek doğrultuculu) akım dalga formları. (Fu, T-H., and Wu, C-J; 2002).....	73
Şekil 3.4.4.	Güç faktörü değerlerinin karşılaştırılması. (a) AC ark fırını beslemesi. (b) 3 doğrultuculu ark fırını beslemesi. (c) tek doğrultuculu ark fırını beslemesi. (Fu, T-H., and Wu, C-J; 2002).....	74
Şekil 3.5.1	Elektrik ark fırını çelik tesisinin tek hat diyagramı (a) AC ark fırını (b) DC ark fırını. (Fu, T-H., and Wu, C-J; 2002).....	76
Şekil 3.5.2.1	15 dakikalık süre içindeki AC ark fırını beslemesinin sonucu.....	76
Şekil 3.5.2.2	15 dakikalık süre içindeki 3 doğrultuculu DC ark fırını beslemesinin sonucu.....	77
Şekil 3.5.3	AC ve DC ark fırınlarının V-I harmonik spektrumlarının karşılaştırılması. (1.(a)-(b)-(c) AC Ark fırını karakteristikleri.) (2.(a)-(b)-(c) DC Ark fırını karakteristikleri.).....	78
Şekil 4.1.1.	Elektrik arkının dinamik v-i karakteristikleri.....	82
Şekil 4.1.2.	Elektrik arkının tipik voltaj dalga formu.....	82
Şekil 4.1.3.	Ark fırını modelinin Matlab'de tasarlanması.....	83
Şekil 4.1.4.	IEC dalgaölçerin blok diyagramı.....	85
Şekil 4.1.5.	Örnek güç sistemine göre MATLAB simulink için ark fırını modeli (Abur, A., and Ozgun, O., 2002).....	87
Şekil 4.1.6	Simülasyonla elde edilen ark akımı.....	87
Şekil 4.1.7.	Ark fırını transformatörünün sekonderinde ve primerindeki voltaj.....	88
Şekil 4.1.8.	Sınıf 1 den 4096'ya kadar CPF sinyalleri.....	88
Şekil 4.1.9.	Simule edilmiş voltaj dalga formunun harmonik analizi. (Abur,A.,and Ozgun,O.,2002).....	89
Şekil 4.2.1	DC ark fırını şeması.....	92
Şekil 4.2.2.	33kV'luk konvertörler tarafından görülen upstream empedansı $Z_L$ .....	94
Şekil 4.2.3.	T1 transformatörünün 33kV'luk tarafında ölçülen hat akımının spektrumu.....	95
Şekil 4.2.4.	Altı darbeli konvertörün anahtarlama fonksiyonu (Faz 1) (a)Voltaj modülasyonu için. (b) akım modülasyonu için.....	96
Şekil 4.2.5.	DC akım ve ateşleme açısı arasındaki transfer fonksiyonunun diyagramı.....	99
Şekil 4.2.6.	DC akım ile ateşleme açısı arasındaki transfer fonksiyonunun işaret diyagramı; frekans domeni modeli için birleştirilmiş eğri.....	100
Şekil 4.2.7.	Ateşleme açısı ve DC akım arasındaki transfer fonksiyonunun nokta diyagramı; frekans domeni modeli için çizilen grafik.....	102
Şekil 4.2.8.	Söndürme direncinin erişilebilen bant genişliği varyasyonu için belirlenen fonksiyonunun grafiği.....	102
Şekil 4.2.9.	GF filtresinin $\xi$ fonksiyonunun erişilebilen bant genişliğinin varyasyonu.....	103
Şekil 4.2.10.	Kapalı çevrim operasyonu altında ark fırını tarafından görülen DC empedans.....	104
Şekil 4.2.11.	Durum 1 için tek köprüdeki DC akımın IDC spektrumu.....	105
Şekil 4.2.12.	Durum 1 için 33kV'luk bara voltajının spektrumu.....	105
Şekil 4.2.13.	Durum 2 için bir köprüdeki IDC akımın spektrumu.....	106
Şekil 4.2.14.	Durum 2 için 33kV'luk bara voltajının spektrumu.....	106
Şekil 4.2.15.	Durum 3 için tek köprüdeki akım IDC spektrumu.....	106
Şekil 4.2.16.	Durum 4 için bir köprüdeki IDC akımın spektrumu.....	107
Şekil 4.2.17.	Durum 4 için 33 kV'luk bara voltajının spektrumu (% olarak temel bileşen).....	107
Şekil 4.2.18.	220 kV'taki Pst (% 99) ve Pst (maks.) dalgalanma ölçümleri.....	107
Şekil 4.3.1.	26. 4kV baradaki DC ark fırınında kaydedilen gerilim değişimi.....	109
Şekil 4.3.2.	26.4kV baradaki DC ark fırınında kaydedilen akım değişimi.....	109
Şekil 4.3.3.	138/26.4 kV'luk sistemin tek hat diyagramı.....	111
Şekil 4.3.4.	Ark fırınının DC güç kaynağı.....	111
Şekil 4.3.5.	Sabit akım kontrolü Blok diyagramı.....	112
Şekil 4.3.6.	Çelik Tesisinin 26,4 kV tarafındaki Sürücü noktasındaki empedans.....	113
Şekil 4.3.7.	Alt istasyondaki tranformatör empedansı = 6, 7, 8, ve % 9 için sürücü noktasındaki empedans.....	114
Şekil 4.3.8.	26.4kV Bara sürücü noktası empedansı.....	114

Şekil 4.3.9.	Üçüncü Akım harmoniği civarındaki Frekans spektrumu.....	116
Şekil 4.3.10.	SCR Ateşleme gecikme Açısı.....	116
Şekil 4.3.11.	Sisteme verilen akım dalga formu.....	118
Şekil 4.3.12.	Üçüncü harmonik civarındaki zaman ve değişim.....	118
Şekil 4.3.13.	26.4kV'luk bara voltajlarındaki bozulmanın dalga formları.....	118
Şekil 4.3.14.	26.4kV'luk baranın akım dalga formu.....	120
Şekil 4.3.15.	26.4kV'luk baranın voltaj dalga formu.....	120
Şekil 4.3.16.	Ateşleme gecikme açısı.....	120
Şekil 4.3.17.	Farklı güç kapasitesi bloğu uygulamaları ile 26.4kV'luk Charter barasındaki sürücü noktası empedansı.....	125
Şekil 4.3.18.	Farklı alt istasyon güç kapasitesi blokları uygulamaları ile 26.4kV'luk Charter barasından 26.4kV'luk Cedarsauk barasına olan transfer empedansı.....	125
Şekil 4.4.1	Referans elektrik santralının şeması.....	129
Şekil 4.4.2.	EMTP ile hesaplanan önerilen modellemeden elde edilen ocak elektrik arkının dinamik gerilim-akım karakteristiği.....	129
Şekil 4.4.3.	Nonlineer ark dirençli EMTP simülasyonundan elde edilen tek fazlı ark fırınının karakteristik eğrileri.....	131
Şekil 4.4.4.	Nonlineer, zamanla değişen dirençle gerçekleştirilen ark fırını simülasyonundan elde edilen ark fırını noktasındaki (Şekil 4.4.1'deki 4 noktası) gerilim ve akım dalga biçimleri.....	133
Şekil 4.4.5.	Zamanla sinüzoidal olarak değişen ark uzunluğu (a) ve sabit ark uzunluğu (b) için, Şekil 4.4.1'deki Bara 2 bağlantı çubuğunun harmonik analizi.....	134
Şekil 4.4.6.	Ark uzunluğunun beyaz gürültülü zamanla değişimine dayanan bilgisayar simülasyonlarından elde edilen PCC'deki aktif olmayan gücün zaman davranışı (a) ve buna karşılık gelen birim başına titreşme hassaslığı (b).....	137
Şekil 4.4.7.	Kısa devreli elektrotlu reaktans-transformatör-fırın sistemi tarafından soğurulan sabit güç kriterine dayanan bir tasarım için, seri reaktans ile toplam reaktans arasındaki oranın bir fonksiyonu olarak yüzde gerilim değişimi, $\%DV_{eq}/V$ .....	139
Şekil 4.4.8.	Fırın tarafından soğurulan sabit ortalama güç kriterine dayanan bir tasarım için, seri reaktansın toplam reaktansa oranının ve kısa devre oranı, SCR'nin bir fonksiyonu olarak kısa süreli titreşme şiddeti.....	140
Şekil 4.4.9	Seri reaktans değerlerinin bir fonksiyonu olarak $\%10$ 'luk bir olasılıkla aşılacak maksimum $P_{ST}$ 'nin davranışı.....	141
Şekil 4.4.10.	Seri reaktans varken ve yokken, PCC'deki kısa devre gücünün bir fonksiyonu olarak $\%10$ 'luk bir olasılıkla aşılacak maksimum $P_{ST}$ 'nin davranışı.....	142
Şekil 4.4.11.	Ark uzunluğunun beyaz gürültülü zamanla değişim yasası için, fırın transformatörünün besleme tarafındaki ark fırını akımının harmonik analizi.....	144
Şekil 4.5.1.	Elektrik ark ocağı.....	147
Şekil 4.5.2.	Bir Ark Ocağının Elektriksel Karakteristikleri.....	148
Şekil 4.5.3.	Bir ocak ısınması sırasında tipik güç seviyeleri.....	148
Şekil 4.5.4.	Bir elektrik arkı ocağının işletim durumundan dolayı gerilim değişiklikleri.....	149
Şekil 4.5.5.	Elektrik arkı ocaklarındaki Elektrik girdilerini kaydetmek için ölçme sistemi...	152
Şekil 4.5.6.	a-b-c. Üç farklı tesisteki ocak üç fazlı güç ve reaktif gücünün zaman ve spektral pencere tepkileri.....	157
Şekil 4.5.7.	Ocak tesislerinden birinin basitleştirilmiş çizgi diyagramı.....	157
Şekil 4.5.8.	Ocak gücü ve reaktif gücün, dengeleyici ve sistem reaktif gücünün iki ocak işletimi periyodu boyunca zaman ve spektral pencere yanıtları.....	159
Şekil 4.5.9.	Reaktif güç spektral pencere tepkileri arasındaki korelasyonlar.....	160
Şekil 4.5.10.	Ocak bağlantı gerilimlerinin normalize spektral pencere genlikleri (sol) ve bunların kümülatif olasılık dağılımı (sağ).....	161
Şekil 4.5.11.	Ocak bağlantı geriliminin RMS ortalaması ile ocak bağlantı geriliminin zaman ortalaması arasındaki spektral pencere genliği oranı.....	162
Şekil 4.5.12.	Farklı ölçüm bant genişliklerinde ocak ve dengeleyici reaktör güçlerinin normalize spektral pencere genlikleri.....	163

Şekil 4.5.13.	İki farklı ölçme bant genişliğinde ocak reaktif güç sinyalinin farklı Karakteristikleri.....	165
Şekil 4.5.14.	Hz'lik ilerleyen frekanslar kullanılarak ocak reaktif gücünün ve bağlama geriliminin birbirini izleyen altı frekans penceresinin Log-Log çizimleri.....	166
Şekil 4.5.15.	Frekansın bileşik etkisini ve pencere ortalamasının etkisini (Sol) ve büyüklükler arasındaki ilişkileri (sağ) gösteren ocak reaktif gücü ve bağlama gerilimi frekans pencereleri.....	166
Şekil 4.5.16.	Ocak ile dengeleyici reaktif güçleri arasındaki ve ocak ile sistem reaktif güçleri arasındaki ilişkiler.....	167
Şekil 4.5.17.	Ark Ocağı Modeli.....	169
Şekil 5.1	Ark fırını tesisinde oluşabilecek rezonans olayı.....	174
Şekil 5.2.	Kroman Çelik Fabrikasında yapılan ölçümlerin, ölçüm cihazından alınma Görüntüleri.....	177
Şekil 5.3.	Örnek sistemin tek hat şeması.....	179
Şekil 5.4.	Örnek sistemin bir faz eşdeğer devresi.....	180
Şekil 5.5.	Ark fırını modeli.....	188
Şekil 5.6.	Ark fırını prosesinde harmonik Analiz devresi.....	189
Şekil 5.7.	Örnek Sistemin Tek Hat Şeması.....	190
Şekil 5.8.	Dalga şekilleri ve beyaz gürültü dalga formuna ilişkin ekran görüntüsü.....	191
Şekil 5.9.	Kroman Çelik tek hat diyagramının simulink tasarım modeli.....	192
Şekil 5.10.	DC Ark Fırınının akımının 2. bileşeninin zamanla değişimi.....	193
Şekil 5.11.	DC Ark Fırınının akımının 3. bileşeninin zamanla değişimi.....	193
Şekil 5.12.	DC Ark Fırınının akımının 4. bileşeninin zamanla değişimi.....	194
Şekil 5.13.	DC Ark Fırınının akımının 6. bileşeninin zamanla değişimi.....	194
Şekil 5.14.	DC Ark Fırınının akımının RMS değerinin zamanla değişimi.....	195
Şekil 5.15.	AC Pota Ocağının akımının 3. bileşeninin zamanla değişimi.....	195

## ÇİZELGE

Çizelge 2.1	Elektrik Ark Ocaklarının transformatör güçlerine göre sınıflandırılması. (Orhon,1986).....	3
Çizelge 2.2	X-UHP Ocaklarında Bazı Özgül değerler.....	4
Çizelge 2.3	İşleme.....	13
Çizelge 2.4	EAF Giriş Çıkış Döngüsü. ( Electric Arc Furnace Steelmaking, 2002).....	14
Çizelge 3.1	Ortalama ve gerçek RMS değer karşılaştırılması.....	48
Çizelge 4.1	Performans Testleri.....	86
Çizelge4.3.1	Sistemde var olan VAR kaynakları.....	124
Çizelge4.3.2	Farklı VAR kaynaklarının listelenmesi.....	124
Çizelge4.4.1	Ark uzunluğunun zamanla sinüzoidal değişim yasası.....	142
Çizelge4.4.2	Ark uzunluğunun zamanla sinüzoidal değişim yasası.....	142
Çizelge4.4.3	Ark uzunluğu için sinüzoidal zamanla değişim yasası.....	144
Çizelge4.4.4	Ark uzunluğu için sinüzoidal zamanla değişim yasası.....	145
Çizelge4.5.1	Mevcut Bozulma Limiti Tanımlama Yöntemleri.....	150
Çizelge4.5.2	Ocak Reaktif Gücünün Maksimum Spektrum Büyüklüğü.....	158
Çizelge 5.1	Transformatörlerin etiket değerleri.....	182
Çizelge 5.2	Trafoların Bakır kayıpları.....	183
Çizelge 5.3	Matlab Simulink Kroman Çelik Ark fırını prosesinin modellenmesinde kullanılan R ve L değerleri.....	187

## ÖNSÖZ

Elektrik Enerjisi kullanımının günümüzde artması ve bununla birlikte kaliteli enerji gereksinimi bu konudaki çalışmaların yapılmasına neden olmuştur.Çünkü enerji kalitesizliği ileri teknoloji ile çalışan bir çok hassas cihazda büyük maliyetlere neden olan arızalara sebep olmaktadır.

Bu kalitesizliği yaratan başlıca nedenlerin biri de harmoniklerdir. Elektrik güç sistemlerinde büyük güçlü harmonik kaynaklarının başında büyük sanayi kuruluşlarında çalışan ark fırınları gelmektedir.Enerji kalitesi günümüzde çok büyük önem kazanmıştır.İşletmeler verimli çalışma üzerine çalışmalarını yoğunlaştırmışlardır.Harmoniklerin tam olarak analiz edilmesi ise bu enerji kalitesizliğinin önüne geçilmesinde büyük önem taşımaktadır.Bu nedenle bu çalışma yapılmıştır.

Mühendislik eğitimi gören öğrencilerin ve sadece harmonikler değil aynı zamanda ark fırınlarının neden olduğu enerji kalitesizliğini de öğrenmek isteyenlere yararlı olacağı inancıyla sunulan bu tez çalışmasının hazırlanmasında beni destekleyen, bana yön veren yüksek lisans tez danışmanım Sayın Doç.Dr.Recep Yumurtacı'ya, aileme, Kroman Çelik Fabrikası Elektrik Bakım Sorumlusu Sayın Sinan Peruh'a ve Elektrik Bakım Genel Formeni Sayın Hasan Akkoç'a ve Panel Endüstriyel Elektrik San. ve Tic. Ltd. Şti. firmasına teşekkür ederim.

Saygılarımla;

## ÖZET

Elektrik Ark Fırınları temeli iki-faz-hurda, arasında oluşan elektik arkının 3000-4000°C'lik ısısından yararlanarak ergitme işleminin yapılmasına dayanır.Bu işlemlerden dolayı Elektrik Ark Fırınlarının gerilim-akım karakteristikleri non-lineerdir.Bu nedenle ark fırınlarının akımının harmonik bileşenler içerir.Bu da şehir şebekesinde enerji kalitesizliğine yol açar.Bu kalitesizliğin elimine etmek için ark fırını harmoniklerinin belirlenmesi ve filtrelenmesi gerekmektedir.

Bu amaçla önceki çalışmalar ayrıntılı olarak incelenmiştir.Bu inceleme farklı bir yaklaşım yapılabilmesi için bir ön adım olmuştur.

Enerji kalitesizliği ve harmoniklerle ilgili tanımlamalar yapılmıştır.Şebekede yarattığı problemler kısaca açıklanmıştır.

Ark fırınlarındaki harmoniklerin analizi ve modellenmesi MATLAB Simulink programı ile yapılmıştır.Böylece ark fırını prosesinin tam olarak analiz edilmesi sağlanmıştır.

Sayısal uygulamada Kroman Çelik tesisleri incelenmiş, tesise ait harmonik ölçüm sonuçları verilmiştir.Tesisin tek hat şeması MATLAB Simulink programına uyacak şekilde basitleştirilmiştir.Tesisin harmonik simülasyonu gerçekleştirilmiş, ark fırınları modellenmiştir.

Oluşturulan ark fırını simülasyonu ile enerji kalitesizliğine yol açan ve sadece kendi prosesini etkilemekle kalmayıp diğer sistemlere de zarar veren,ark fırını harmoniklerinin analizi gerçekleştirilmiştir.

Sistemin modellenmesi özellikle filtreleme ve kompanzasyon işlemleri için bir ön adım oluşturmaktadır. Böylece gerekli işlemler yapılarak özellikle 3. 5. ve 7. harmonikler kontrol altına alınabilecektir.

**Anahtar Kelimeler :** Ark Fırınları, Harmonikler, MATLAB Simulink modeli.

JÜRİ :

1.Yrd.Doç.Dr.Recep YUMURTACI(Danışman)

Kabul tarihi: 04.03.2005

2.Prof.Dr. Celal KOCATEPE

Sayfa sayısı: 200

3.Doç.Dr. Hakan ÜNDİL

## **ABSTRACT**

Basics of Electric Arc Furnaces are relied on electric arc that is formed between two phases and scrap at 3000-4000°C by melting. Because of this melting, voltage-current characteristics of Electric Arc Furnaces are non-linear. For this reason, current of electric arc furnace are composed of harmonic components. These harmonic components causes lack of quality in utility. To prevent this lack of quality, arc furnace harmonics must be determined and filtered.

For that purpose, former studies are researched in detail. This forms a first step for a different approach.

Definitions are made for lack of quality in Energy and Harmonics. Problems in utility are shortly mentioned.

The analysis and modeling of arc furnace harmonics are made by MATLAB Simulink program. In this manner, analysis of arc furnace proses completely provided.

In numerical application, Kroman Steel installation are studied, result of harmonic measurements are given. Single line diagram of installation are simplified for MATLAB Simulink program. Harmonic simulation of installation and model of arc furnace are carried out.

Harmonics of Arc furnace, not only effect own system but also cause lack of quality in utility, are carried out by Arc furnace simulation.

Modeling of system are formed a first step for filtration and compensation. In this way, 3. , 5. and 7. harmonics are going to be taken under control.

**Keywords:** Arc furnaces, Harmonics, MATLAB Simulink model.

**JURY:**

1.Yrd.Doç.Dr.Recep YUMURTACI(Supervisor)

Date: 04.03.2005

2.Prof.Dr. Celal KOCATEPE

Page: 200

3.Doç.Dr. Hakan ÜNDİL

# 1 GİRİŞ

## 1.1 Konu ve Önemi

Alternatif akım (AA) ark fırınlarında ergime sırasında oluşan kısa devreler ve arkın düzensiz yanmaları, şebeke gerilim değişmelerine neden olmakta ve bunun sonucunda endüstriyel kuruluşlar ve aydınlatma tesislerinde kırpışmalar gibi rahatsız edici durumlar ortaya çıkmaktadır. Bu tip fırın sistemlerinde, non-lineer yük özellikleri nedeni ile daha fazla problemler görülmektedir. Bu sebepten dolayı bir çok ülkede yeni alternatif akım ark fırını kurmak için sıkı denetimler ile pahalı kompanzasyon sistemlerinin kurulmasına zorunluluk getirilmektedir.

Doğru akım (DA) ark fırınlarının avantajları yıllar öncesinden bilinmesine rağmen Alternatif Akım – Doğru Akım dönüşüm sistemlerinin pahalı olması nedeni ile çelik endüstrisinde alternatif akım ark fırınlarının kullanımı tercih edilmiştir. Son yıllarda yarı iletken teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak birim maliyetlerin düşmesi sonucu DA ark fırınlarının AA ark fırınlarıyla rekabet etmesini ve hatta onların yerini almasını sağlamıştır. AA ark fırınlarından elde edilen bilgi ve tecrübeler sayesinde, DA ark fırınları kolayca tasarlanabilmektedirler. DA ark fırınlarında, alternatif akım doğrultulduktan sonra eksi uç grafit elektrotta, artı uç ise potaya bağlanmaktadır. Büyük güçlü doğrultucular ve bunların transformatörlerinin uzun yıllar elektroliz uygulamalarında kullanılması, DA ark fırınlarının gerçekleştirilmesinde önemli bir adım teşkil etmiştir.

DA ark fırınları aynı üretim kapasitesine sahip AA ark fırınları ile karşılaştırıldığında şebekedeki harmonik ve kırpışma gibi bozucu etkilerin en azından % 50'ye kadar azaltıldığı ispatlanmıştır. DA'da arkın daha düzgün yanması nedeni ile, doğru akım sistemi daha kararlı ve kolay ateşlenebilmektedir. Bu nedenle kompanzasyon sistemi daha küçük boyutta yapılabilmektedir. DA ark fırını, ergitme işlemi sırasında genliği ayarlanabilen bir DA kaynağı olarak düşünülebilir. DA ark fırınlarının AA ark fırınlarına nazaran şebekeye harmonik ve kırpışma gibi zararlı etkileri büyük oranda azalmasına rağmen tamamen giderilememiştir. Bu nedenle DA ark fırınları da AA ark fırınları gibi büyük kısa devre kapasitesine sahip şebelere bağlanırlar. (Birbir,1999)

Bu nedenlerden dolayı gerek DA ark fırınları olsun gerekse AA ark fırınları enerji kalitesizliğine yol açan harmoniklerin kaynağı durumunda olduğu için bu konu üzerinde ciddi çalışmaların yapılması gerekmektedir.

## 1.2 Tezin Amacı ve İçeriği

Güç sistemlerinde önemli bir yere sahip olan ark fırınları bölüm 2’de ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Büyük enerji kaybına yol açan bu sistemlerin çok iyi analiz edilerek üzerinde çalışılması gerektiğinden ayrıntılı olarak bu konu üzerine tanımlama ve açıklamalar yapılmıştır.

Bu çalışmada Enerji kalitesi ve harmonikler üzerinde durulmuştur. Bu konular güç sistemleri için büyük önem taşımaktadır. Bu sistemler büyük güçlü olduklarından verim kayıpları işletmeler için sorunlar çıkarmaktadır. Bunun için bölüm 3’te bu konulara ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Sayısal uygulama bölümü için bir ön adım oluşturması ve yardımcı olması açısından bölüm 4’te literatürde ark fırınlarının harmonik etkinliği konusunda yapılmış çalışmaların incelenmiştir.

Sayısal uygulamanın yer aldığı Bölüm 5’de gerçek bir ark fırını tesisinde yapılan ölçümler verilmiş bu tesisin MATLAB Simulink ile bir ark fırını tesisinin basitleştirilmiş simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 6’da ise sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

## 2 ARK FIRINLARININ İNCELENMESİ

### 2.1 Elektrik Ark Ocaklarında Gelişmeler

Birinci Dünya Savaşından önce geliştirilmiş olan elektrik ark ocaklarının temeli, iki-faz-hurda arasında oluşan elektrik arkının 3000-4000°C lık ısısından yararlanarak ergitme işlemini yaptırmaktır.

Bir faz-2 faz oldukları gibi, bugün ençok 3 fazlı olarak kullanılır, 6 paralel fazlı olanları da vardır. Son yıllarda Doğru Akımlı ark ocakları üzerinde de yoğun araştırma ve çalışmalar olup, bu tip ocaklar için de uygulamalar vardır.

Elektrik ark ocakları her geçen yıl hem teknoloji hem de kapasite olarak oldukça büyük gelişmeler göstermiştir. 500-1000 kg. kapasite 250-300kVA transformatör gücünden, 360-400 ton kapasite ve 160-200MVA transformatör gücüne kadar ark ocakları bugün dünyanın pek çok yerinde çalıştırılmaktadır. Amerika Birleşik Devletlerinde 700 ton kapasiteli ark ocaklarının olduğu bilinmektedir.

Büyüyen güçlerle birlikte, transformatör primer gerilimler 110-220 kV'a kadar çıkmıştır. Bunlara paralel olarak yüksek gerilim tesis ve elemanları da uygun ölçülerde gelişmiştir.

Elektrik ark ocakları, transformatör güçlerine ve ergitme zamanlarına göre şöyle sınıflandırılabilir:

Standart güçlü	STDP
Yüksek güçlü	HP
Ultra yüksek güçlü	UHP
Süper-Ultra yüksek güçlü	X-UHP

Çizelge 2.1 Elektrik Ark Ocaklarının transformatör güçlerine göre sınıflandırılması. (Orhon,1986)

Ocak Transformatör Tipi	Trafo Özgül Gücü		
	kVA / t	kVA / m <sup>3</sup>	kVA / m <sup>2</sup>
Standart – STDP	120-200	5-9	650-1020
Yüksek Güçlü – HP	250-350	11-16	1210-1740
Ultra Yüksek Güçlü - UHP	400-550	20-39	1865-2105
Süper-Ultra yüksek güçlü X-UHP	>600	-	-

Çizelge 2.1'de trafo özgül güçler ile ilgili birimler aşağıda açıklanmıştır.

kVA/t : ton başına transformatör gücü,  
kVA/m<sup>3</sup> : birim (m<sup>3</sup>) ocak hacmi başına düşen transformatör gücü,  
kVA/m<sup>2</sup> : birim (m<sup>2</sup>) ergimiş metal yüzeyi başına düşen transformatör gücüdür.

Çizelge 2.2 X-UHP Ocaklarında Bazı Özgül değerler.

Ocak Çapı	Ocak Kapasitesi	Trafo Gücü	Trafo Özgül Gücü	Ocak Üretimi	
				t / Ay	t / h
M	T	MVA	kVA / t		
5,8	70	43-53	600-800	28000-37000	42-56
6,4	100	70-97	600-800	43000-53000	55-70
6,7	120	70-97	600-800	50000-65000	73-95
7,6	200	120	600	85000	124

Elektrik ark ocaklarındaki gelişmeler daha çok son 10-15 yıl içinde olmuştur. Transformatör güçlerinin büyümesi, ocak astarlarında yeni uygulamalarla (kapak ve yan duvarlarının suyla soğutulması) refrakterlerin daha uzun bir zaman dayanabilme yeteneğinin sağlanması, soğuk bölge olarak isimlendirilen kısımların hızlı ertilmesi için yakıt- O<sub>2</sub> brülörlerinin kullanılması, çelik dökümünde tüm işlemlerin bilgisayarlarla denetleme ve optimize edilmesi, çevre korunma ekipmanlarının uygun biçimde geliştirilmesi ve elektrik şebekeleri üzerinde yarattığı olumsuz etkileri en aza indiren teknoloji ve işletmelerin geliştirilmesi sonucu bu ocaklar yalnız yüksek alaşımli çelik için değil, kitle çeliği üretiminde de büyük ölçülerde kullanılmaktadır.

Elektrik ark ocaklarının bugünkü duruma gelmesi metalurji, elektrik ve mekanik mühendisliğinin ortak çabalarının sonucudur ve bunlara ilişkin olarak ısı transfer, elektrod, refrakter ve yüksek gerilim elektrik teknolojilerindeki yeni gelişmeler ve bunların başarıyla kullanılmasıdır. Ark ocaklarında bilimsel prensipler ve mühendislik uygulamalarından başka deneyimlerde çok önemlidir. Yapıcı firma ocak operatörüne ocağı denetlemek ve en iyi ocak performansını bulmak için ancak temel bir takım değerleri verir ki bunlar daha çok üretim ve elektrikle ilgili olan değerlerdir.

Daha sonra ki iş; çaba, deneyim, pratik bir takım bulgu ve verilere dayanmaktadır.

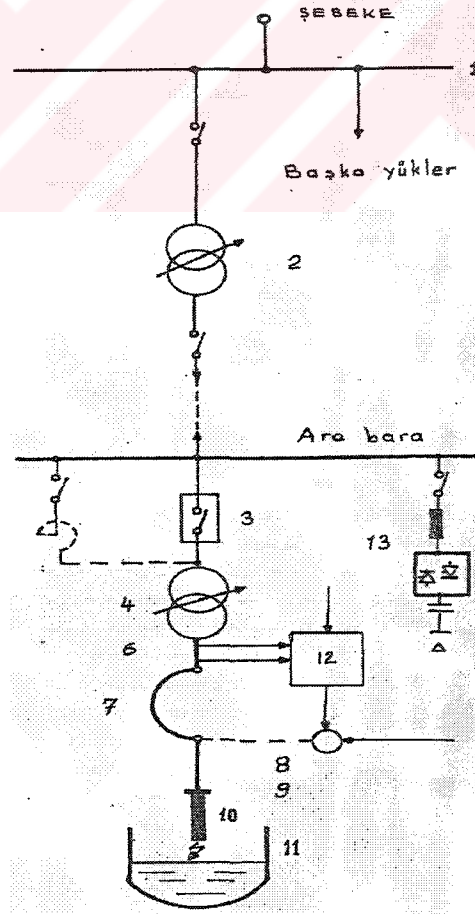
Elektrik ark ocaklarının büyük boyutlara ulaşması ve ufak çaplı bir elektrik santralinin gücünü tek bir ünite olarak tüketilmesi sonucu birçok problemleri de birlikte getirmiştir.

Geçmiş yıllarda çok daha küçük güçlü olan ark ocaklarının olumsuz etkileri fazla görülmemekte idi. Bugün için elektriği yeterli, ulusal şebekeleri kuvvetli olan ileri ülkeler bile ark ocaklarının olumsuz etkilerine karşı önlem almakta ve ayrıca elektrik üreten kurumlar da ark ocağı işleticilerini bu yola zorlamaktadırlar.

Gelişmekte olan ülkeler için ise problem oldukça zordur. Hem yeteri kadar elektrik enejisi üretmek ve hem de bir takım önlemler almak durumundadırlar. Bugünkü zor koşullar altında çelik üreticilerinin amacı, dünya enerji krizinin olduğu son yıllarda gerekli önlemleri alarak, ark ocaklarının zararlı etkilerini en aza indirmek ve elektrik enerjisini en uygun biçimde kullanarak çelik üretmek olmalıdır.

Bir takım önlemler ve uygun çalışmalarla ark ocaklarındaki birim enerji tüketimini en aza indirmekle sağlanacak % 3 - % 5 gibi bir tasarruf toplamda büyük boyutlara ulaşacaktır. Bu ise enerjinin pahalı ve az bulunur bu dönemde, hem işletici ve hem de ülke ekonomisi için hiçte küçümsenecek bir rakam değildir.

## 2.2 Elektrik Ark Ocağı Elemanları



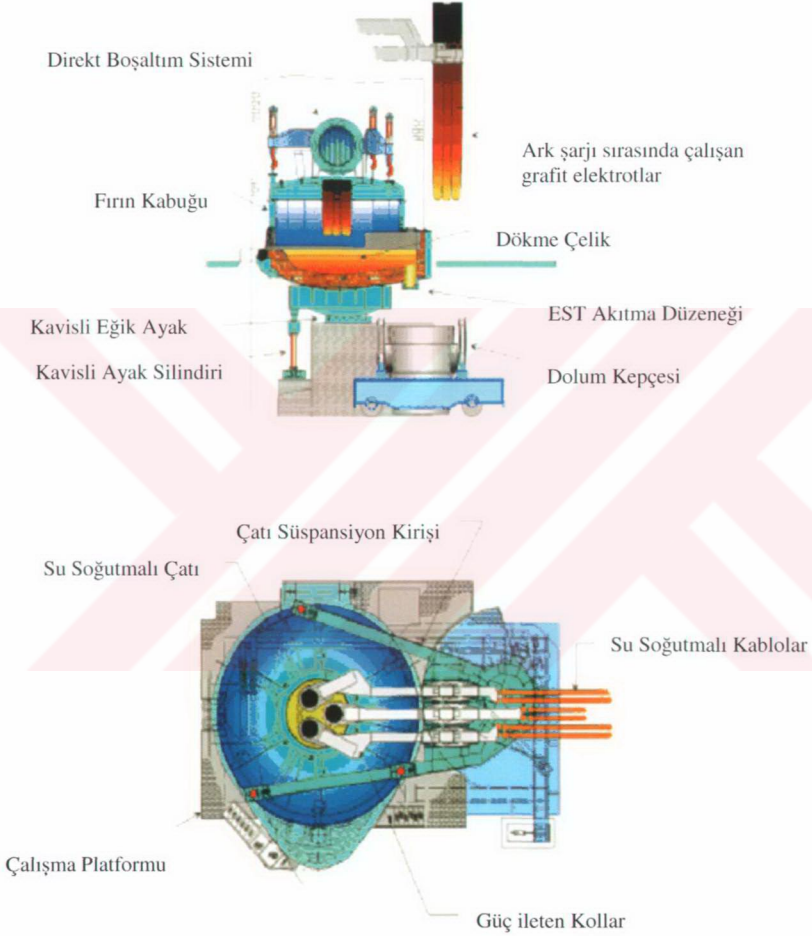
Şekil 2.1 Bir Elektrik Ark ocağı devresinin prensib şeması. (Orhon,1986)

Şekil 2.1’de bir ark ocağının devresinin prensib şeması görülmektedir.Buna göre bir ark ocağı kuruluşu aşağıdaki ana elemanlardan oluşmaktadır.

- 1.Ortak bağlantı noktası(OBN).
- 2.Ara transformatör
- 3.Ocak şalteri
- 4.Ocak transformatörü ve kademe şalteri
- 5.Şok bobini
- 6.Sekonder çıkış baraları
- 7.Fleksibil kablolar
- 8.Ocak üzeri baralar
- 9.Elektrod tutucuları
- 10.Elektrodlar
- 11.Elektrik arkı
- 12.Elektrod – enerji denetim düzeni
- 13.Kompanzatör

(Orhon,1986)

Şekil 2.2 ‘de ise bir ark fırınının (ocağının) önden ve üstten görüntüsü verilmiştir. Burada ark fırını oluşturulan kısımlar şekil üzerinde açıklanmıştır.



Şekil 2.2 Elektrik Ark Fırınının yandan ve üstten görüntüsü.

## 2.3 Fırınlama İşlemi

Elektrik ark fırınları, pişirme ve eritme prosesinde çelik için kullanılırlar. Elektrik ark fırınları (EAF) işlemleri döngüsü, aşağıda adım adım açıklanmıştır.

- Fırının şarj olması
- Eritme işlemi
- Arıtma işlemi
- De-slagging
- Akıtma işlemi
- Fırının dönmesi

Modern işlemlerde adım adım açıklanan bu döngü, 60 dakikadan az bir sürede gerçekleşir.

### 2.3.1 Fırının Şarj Olması

Isı üretiminin ilk aşamasında yapılacak olan şey, kullanılacak çeliğin seçilmesidir. Genelde bu üretimin amacına yönelik olarak belirlenir. Bu yüzden de eritici, yer değiştirici ile uyumlu çalışmak zorundadır. Artık parça operatörü, eriticinin ihtiyacına göre kovalar oluşturarak depolanmayı sağlar. Şarj kovasının hazırlanması önemli bir işlemdir. Bu sadece kimyasal erimeyi sağlamaz, aynı zamanda erime için gerekli koşulları da yaratır. Artık parçalar, kovalarda sadece katmanlar halinde bulunmalıdır. Böylece ısı halindeki sıvı çelik havuzu korunmuş olur. Ayrıca yan duvarlar ve çatı, elektrik ark radyasyonuna karşı korunmuş olur. Diğer önemli işlem ise artık parçalar için hazırlanmış olan bölmedeki minimizasyon işlemidir. Eğer bu yapılmazsa, elektrotlar kırılabilir. Ayrıca, su soğutmalı paneldeki artık parçaların doğru dizilmesi gereklidir. Şarj, kireç ve karbon içerebilir ve bunlar ısıtma sırasında fırına girebilir. Artık parçalar için hazırlanmış kovaya kireç ve karbon eklemek için birçok işlem yapılır. Bu işlemlerin amacı enjektreyi gerçekleştirmektir.

Adım adım açıklanan döngüdeki ilk işlem, artık parçaların şarj edilmesidir. Çatı ve elektrotlar yükselir. Fırının duvarına iyice yaklaşarak artık parçaların fırın içersinde şarj olan vinç ile yerleşmeleri sağlanır.

Kovanın alt kısmı, yer değiştirebilen iki kısımdan oluşur. Bunlar açılarak döngünün devamını sağlar. Böylece artık parçalar fırına düşer ve artık parçalar için tasarlanmış vinç, artık parçaları alır. Çatı ve elektrotlar fırındaki eski yerlerini alırlar. Önce çatı düşük seviyeye iner sonra da elektrotlar artık parçalarda ark oluşturmak üzere işleme geçer. Bu, döngünün eritme işlemini başlatmış olur. Artık parçaların kovalarının sayısı, çeliğin ısınması için gereklidir. Bu da birincil olarak fırının sesine ve artık parçaların yoğunluğuna bağlıdır. Bu ölü zamandaki

şarj için bir avantaj olarak kabul edilebilir. Bu da fırının güçsüz olduğu duruma denk gelir ki bu durumda eritme gerçekleşmez.

Ölü zamanların minimizasyonu, fırının üretkenliğinde bir artış sağlar. Buna ek olarak, her bir zaman için olan kayıp fırının çatısında bir açılmaya neden olur. Bu da her oluşum için 10 – 20 kWh/ton'a denk gelir. İşlemlerin çoğu, ısı başına artık parçaların 2 ile 3 kovalasına denk gelir. Bu ise, artık parçaların karşılaşmasına ve karışmasına neden olur. Bazı işlemler, tek kovalık işlem oluştururlar. O zaman CONSTEEL ve fırın şaftı, şarj döngüsünü elimine etmiş olur.

### 2.3.2 Erime İşlemi

Erime süresi, EAF işlemlerinin ana kısmını oluşturur. EAF, yüksek verimlilikle erime aparatının ve modern tasarımların yavaş yavaş gelişmesini sağlar. Böylece EAF'nin eritme kapasitesi üzerinde yoğunlaşmış olur. Bu da fırında maksimizasyonu sağlar. Erime, fırının dahili kısımlarına enerji uygulanması ile gerçekleştirilir. Bu enerji elektriksel veya kimyasal olabilir. Elektriksel enerji, grafit elektrotlar ve genellikle de büyük ölçüde erime işlemleri aracılığıyla sağlanır. Önce, orta değerdeki başlatma voltajı seçilir ta ki elektrotlar artık parçaları delene kadar bu devam eder. Genellikle, hafif artık parçalar şarjın en üstüne yerleştirilir ki delme işlemi hızlansın. Yaklaşık olarak artık parçaların % 15'i dahili delme periyodu sırasında erir. Birkaç dakika sonra elektrotlar artık parçaların içine girerler ki, bundan sonra uzun yüksek voltaj ark musluğu çatıya doğru olan radyasyondan bağımsız olarak işlemin gerçekleşmesini sağlar. Uzun ark, artık parçalara olan güç transferini hızlandırır ve sıvı metal havuzunda, yani fırın merkezinde ark nedeniyle başlayan erime sürecinde istikrarsız ve durdurulamaz bir hal alır. Akımdaki sapmalar, elektronların hızlı yer değiştirmeleri ile gözlenebilir. Fırın atmosferi ark stabilitesini ısıtmaya başladığında ve erimiş havuz oluştuğunda, ark neredeyse dengeli hale gelir ve ortalama güç artışı girişi yükselir. Kimyasal enerji, oksitli yakıt ve oksijen türevleri gibi birçok çeşitteki kaynaktan sağlanabilir. Yanıcı oksitli yakıtların yanmasıyla oksijen ve havanın karışımı bir bileşik oluşur. Isı, artık parçalara ateş radyasyonu ile iletilir ve konveksiyon ile ısı ürünleri oluşur. İletim sayesinde, hurdalara ısı transfer edilir. Küçük parçalı hurdalara göre büyük parçalı hurdaların banyoda erimesi daha uzun süre sürer. Bazı durumlarda oksijen, bir boru ile hurdaların erimesi için enjekte edilir ki böylece hurdalar kesilmiş olur. Oksijen sıcak hurdalar ile tepkimeye girerek içsel ısının oluşmasını sağlar. Öncelikle erimiş hurdalar, ark fırınının havuzunda birikmeye başlar. Böylece oksijen havuza iyice çökmüş olur. Bu oksijen havuzda birçok maddeyle tepkimeye girer, örneğin: Alüminyum, magnezyum, silikon, fosfor, karbon ve demir gibi...

Bütün bu reaksiyonlar, ekzotermik reaksiyonlardır. (ör. bunlar ısı açığa çıkartırlar.) ve hurdaların erimesi için ek enerjiyi sağlarlar. Havuzda oksijenin karbon ile reaksiyonu, karbon monoksit oluşmasına neden olur. Bu da ark fırınının döngüsünde, oksijenin sürekliliğini sağlar. Bu döngünün kontrolünde, kirlenme kontrol sistemi devreye girer. Yardımcı yedek yakıt reaksiyonları, EAF işlemlerinde daha ayrıntılı açıklanacaktır.

İkinci şarj için yeteri kadar hurda eridiğinde, şarj prosesi tekrarlanmış olur.

Öncelikle ana hurdalar erir. Ark fırını duvarları, oluşan radyasyondan etkilenir. Bu radyasyon, ark sonucu oluşur. Sonuç olarak voltaj azaltılır. Oluşan dumanlı sis kütlesi, alternatif bir enerji yaratarak enerjinin arkı söndürmesi yönünde bir tepki-etki oluşturur. Bu da fırının kalkanının korunmasını sağlar. Ek olarak, büyük miktardaki enerji cürufa dönüşmüş olur. Bu da banyoda büyük bir enerji verimliliğini sağlar.

Ana hurdalar öncelikle eridikten sonra, kısıtlı banyo koşullarına erişilmiş olur. Bu noktada, banyo sıcaklığı ve örnekler alınabilir. Banyonun analizinde kimyasal olarak oksijenin miktarı erime olayı için belirlenir. Bu nokta da, eritici alaşımların oluşmasını sağlar. Bu değerler, artma periyodu sonunda bitirilir.

### 2.3.3 Arıtma

Arıtma operasyonları, elektrik ark fırınlarında geleneksel olarak artık, fosfor, sülfür, alüminyum, silikon, magnezyum ve karbonun çelikte tepkimeye girmesiyle gerçekleştirilir. Bu sırada çözülmemiş gazlar, özellikle hidrojen ve nitrojen gözlenebilir. Geleneksel olarak artma işlemleri, erime sırasında gerçekleşir. Örnek olarak banyo işlemleri verilebilir. Bu artma işlemlerinin çoğu, oksijenin varlığına bağlıdır. Oksijen, banyonun düşük seviyesine yerleşerek erime işlemlerinin sona ermesini sağlar. Böylece de karbon seviyesi işletmeye başlamak için uygun duruma gelmiş olur. Bileşiklerin birçoğu, oksijen ve karbon için arındırılır. Sonuçta oksijen, bu elementlerle oksitleri oluşturur ve çelik oluşumu sağlar ve cüruflar oluşur.

Modern EAF operasyonlarında, “sıcak ökçe” denilen erimiş çelik ve cüruflar sıcak sonucu oluşur. Isı için oksijen fırın banyosuna gönderilir. Sonuç olarak, erimenin bir kısmı ve arıtma operasyonları simule edilir.

Fosfor ve sülfür, fırın şarjı sırasında normal olarak oluşur ve yüksek konsantrasyonda çelik oluşur ama bu çeliğin bir kısmı kabul edilmez. İstenmeyen koşullar çerçevesinde fosfor ve sülfür elimine edilir. Bu elimine edilen maddeler, banyo sıcaklığı için hurdaya çıkarılır. Hurda

içindeki fosfor döngüsü, banyo sıcaklığının hurda fonksiyonları için FeO – demir oksit hurda kısmına atılır. Yüksek sıcaklıklarda veya düşük FeO seviyesinde, fosfor banyodan hurdaya çıkartılır. Sıcaklık için fosforun çok kısa sürede artırılması ve ayrılması gerekir. Sıcak ökçenin pratikte fosfordan arındırılması gerekir. Çünkü düşük sıcaklıklarda oksijen, banyonun dibine çöker. Hurdanın erken sıcaklıklarında, FeO atılması için fosfor seviyesinin arındırılması gerekir. Yüksek hurda temeli için (yüksek yoğunluklu durum) fosforun arındırılabilmesi için hurdaya doyması ile sağlanmalıdır. Bu, hurda viskozitesinde bir artışa neden olur ki bu da hurdanın daha az efektif olmasına neden olur. Hurdanın sıvılaşması için plazma seviyesinde bazı maddelerin eklenmesi gerekebilir. Banyonun hareketsiz gazlarla doldurulması sırasında, hurda – metal kinetik reaksiyonlarının dengelenmesi gerekir.

Genel olarak düşük fosfor seviyesi mevcutsa, pratikte çelik için hurda düşük erime seviyesine indirgenir. Fosfor bileşikleri, hurda için fırının banyosunda % 5 - % 15 seviyesine indirgenir. Genellikle fosfor EAF'da % 20 - % 50 seviyesine indirgenir.

Sülfür, sülfat olarak hurdada çözülür. Hurda ve çelik arasındaki sülfür döngüsü, hurda döngüsüne dayanır. Bu da çelik oksidasyon seviyesinin düşük olmasını sağlar. EAF'da sülfürün arındırılması, modern pratikte zordur. Bunun için de banyodaki oksidasyon seviyesi yüksek tutulur. Buna göre de EAF'daki operasyon seviyesi oranı 3 ve 5 arasında tutulur. Operasyonların çoğu desülfürizasyonun daha efektif olması için çelik üretiminde kısıntıya gidilmesine neden olur. Böylece, işletme sırasında desülfürizasyon oluşur. (sonuç olarak hurdada kalsiyum oluşur.) ki bu işlem kepçe ile doldurma-boşaltma fırın işleminin bir sonucudur. Koşulları azaltmak için banyoda daha fazla oksijenin aktif hale getirilmesi gerekir. İşlem sonucunda sülfür dağılım oranları 20 ile 100 arasında değişir.

Bütünü oluşturan metallerin kontrolü, banyo için önem taşır. Bu da ana ürünün temellerinin atılması için bir adım oluşturur. Banyoda eritici, ana ürüne göre daha düşük seviyelerde yer alır. Oksijen, alüminyum ile tepkimeye girerek silikon ve manganez gibi metalik oksitleri oluşturur. Bunlar , hurda bileşikleridir. Bu metaller, oksijenden önce karbon oluşumuna neden olur. Bunlar, genelde FeO ile tepkimeye girerler. Buna örnek olarak,



Magnezyum, tipik olarak azalır ve % 0.06 seviyelerine iner.

Karbonun oksijenle reaksiyonundan, banyoda CO oluşur ki bu da banyoda enerjinin oluşmasından daha ucuzdur. Bu da arıtma işlemlerinin bir parçasını oluşturur. Modern EAF

operasyonlarında, oksijenin karbonla kombinasyonu, fırına giren net ısının % 30 ila % 40'ını oluşturur. Karbon monoksidin oluşumu, hurda dumanı için önemlidir. Temel hurda ile birlikte CO kabarcıkları, hurda oluşumunda "sisin" açığa çıkmasına neden olur ve arkın çürümesini sağlar. Bu, büyük ölçüde kanıtlanmış termal verimliliği sağlar ve banyo için yüksek ark voltajlarının işleme girmesine neden olur. Arkın çürümesi nitrojenin varlığını yaratır ki, bu da arkın çelik üretim aşamasında büyük rol oynar.

Eğer CO yavaş yavaş çelik banyosu ile tepkimeye girerse, nitrojenin ve hidrojenin çelikten ayrılmasına neden olur. Çelikteki nitrojen seviyelerinin 50 ppm değeri, fırında işletmeye girmesine sağlar. Alt kısımlardaki işleme düşük nitrojen seviyesi için önemlidir ki işleme çabuk olsun ve işleme iklimi sağlansın. Yüksek oksijen potansiyeli, çelikte düşük nitrojen seviyelerinin oluşmasına neden olur ki, bu sıcaklık, işleme sırasında ısının kontrol edilmesiyle dengelensin.

1600 °C'de saf demirdeki nitrojenin maksimum çözünürlüğü 450 ppm ise, tipik olarak çeliğin işlemindeki nitrojen seviyesi 80 – 100 ppm dir.

Hidrojenin ayıklanması da önemlidir. Her saat için % 1'lik oran, düşük hidrojen seviyesinin çelikte 10 dakika için 8 ppm den 2 ppm'e kadar değişmesine neden olur.

Aritmanın sonunda, banyo sıcaklığı ölçümü ve banyo örneği alınır. Eğer sıcaklık çok düşük ise, güç banyoya uygulanır. Modern eritme dükkanlarında önemli olmayan bu konu, fırın keçe ile dolmuş / boşaltımında önem kazanır.

### 2.3.4 De-Slagging

De-Slagging operasyonları, yabancı maddelerin fırından temizlenmesi için yapılır. Eritme ve arıtma işlemleri sırasında bazı istenmeyen maddeler, banyo da dahil olmak üzere okside olurlar ve hurda fazına geri dönerler.

Mümkün olduğu kadar çok fosforu hurdaya çıkarmak büyük önem taşır ki sıcaklık sağlansın. (ör: Banyo sıcaklığının hala düşük olması durumu) Ark fırını arka tarafa yatırılır ve hurda, fırından hurda kapısına doğru dökülür. Hurdanın dökülmesi, fosforun geri dönme olasılığını elimine eder.

Hurda dumanının oluşması sırasındaki operasyonlarda, karbon, hurdaya enjekte edilir ki metalik demirdeki FeO azalır. Böylece proseste karbon monoksit oluşur ve bu da hurda

dumanının dengelenmesine yardımcı olur. Eğer yüksek fosforlu hurda atılmazsa, fosforun geri dönmesi oluşur. Hurda dumanının oluşması sırasında hurda güvenlik seviyesini aşarak taşar ve hurda kapısından dışarı taşar.

Aşağıdaki tablo EAF hurdalarındaki bazı bileşikleri göstermektedir.

Çizelge 2.3 İşleme

Bileşik	Kaynak	Karşılaştırma Aralığı
CaO	Şarj edilen	% 40 – 60
SiO <sub>2</sub>	Oksidasyon ürünü	% 5 – 15
FeO	Oksidasyon ürünü	% 10 – 30
MgO	Şarj ile oluşan	% 3 – 8
CaF <sub>2</sub>	Şarj ile oluşan hurda plazması	
MnO	Oksidasyon ürünü	% 2 – 5
S	Çelikten elde edilen	
P	Oksidasyon ürünü	

İstenen çelik bileşimi ve sıcaklığa ulaşıldığında, fırında işleme deliği açılır, fırın ayarlanır ve fırının boşalma/dolum kepçesi devreye girerek transferi sağlar, böylece bir sonraki pişirme işlemine geri dönülür. (genellikle bu işlemi fırının kepçe ile boşaltma/dolum mekanizması veya boşaltım/dolum istasyonu gerçekleştirilir.) İşleme operasyonu sonucunda, hacimsel alaşımlar eklenerek banyo analizi yapılır ve istenen çelik ürünü elde edilmiş olur. De-oksitler, düşük oksijen seviyesinde proses işlemleri devam ederken çeliğe eklenir. Bu genelde “sıcağı bloke etmek” veya “çeliği öldürmek şeklinde tanımlanır”. Ortak de-oksitler, ferrosilikon veya silikon magnezyum denilen alüminyum veya silikon bileşikleridir. Birçok karbon çelik operasyonları , minimum hurda taşınmasını gerçekleştirmek için oluşturulur. İşleme sırasında, yeni bir hurda ürünü oluşturulur. Kepçe ile dolum boşaltım operasyonlarında, sülfür kontrolü için doğru bir seçim ile kalsiyumun hurdayı elimine etmesi sağlanır. Bileşikleri oluşturan hurdaya, işleme sırasında kepçe ile dolum / boşaltım işlemi tabi tutulur, bu da hurda ürününün boşaltımı için gereklidir.Eğer hurda ürünü yetersiz ise, dolum / boşaltım sırasında ek hurda materyalleri fırının boşaltım-dolum hurdalarına eklenir .

### 2.3.5 Fırının Dönmesi

Fırının dönmesi, fırının bir sonraki sıcaklık için yeniden şarj olmasına kadar olan işleme süresince olur. Bu periyot boyunca, elektrotlar ve çatı yükselir ve fırının işlenmeyen, yani erimiş kısmı denetlenir. Eğer gerekirse, merkezde tamir işlemi gerçekleştirilir, hurda hattı, işleme deliği ve fişkıрма, kontrol altına alınarak denge sağlanır. Fırında alt kısımların işlenmesi

için işleme deliği kum ile doldurulur. Fırındaki tamir, erimeyen maddeler ve çamur için yapılır. Birçok modern fırında, yükseltilmiş su soğutmalı paneller, yamanarak düzeltilir. Bu işlem, sıcaklıklar arasında gerçekleştirilir. Yapılan bir çok operasyonlar ışığında, fırının alt kısmında hurda, 2 ile 6 hafta kadar kalır. Böylece merkez, devre dışı kalır. Bu EAF için güç akış zamanının kapalı kalmasını sağlayarak ve fırın üretimini maksimize eder. Fırının dönmesi, ölü zamanın büyük ölçüde oluşmamasını sağlar. (ör. güç kesilir ) Bu da işlemeden işleme döngüsünü oluşturur. Fırın pratiğinin avantajları: Bu işlemler, 20 dakika yerine 5 dakikadan az bir süreye iner. Böylece de yeni işlemler gerçekleştirilir

### 2.3.6 Fırın Sıcaklığının Dengelenmesi

Erimiş çelik hurdası için, teorik olarak minimum 300kWh / ton'dur. Yüksek sıcaklığı sağlamak için erime noktası 2768 F ek enerji gereksinimi vardır ve tipik işleme koşulları için toplam 350 – 370 kWh / ton toplam enerjiye gereksinim vardır. Bunun yanında EAF, çelik üretiminde sadece % 55 ila % 65 verimliliği sağlar. Bunun bir sonucu olarak toplam eşdeğer enerji girişi modern operasyonlar için 560 – 680 kWh / ton arasında değişmektedir. Bu enerji, birçok kaynaktan sağlanabilir. Bununla ilgili Çizelge 2.4'de verilmiştir. Enerji dağılımı, büyük ölçüde yerel materyallere ve işletilebilir maliyetlere bağlıdır ve erime dükkânındaki operasyonlar bunun sayesinde gerçekleşir. Eski ve yeni EAF için denge giriş – çıkışları Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.4 EAF Giriş Çıkış Döngüsü. ( Electric Arc Furnace Steelmaking, 2002)

		UHP FIRINI	Düşük güçten orta seviyedeki güçlü fırın
	Elektrik enerjisi	% 50 -60	% 75 - 85
<b>GİRİŞLER</b>	Yanıclar	% 5 - 10	
	Kimyasal reaksiyonlar	% 30 - 40	% 15 - 25
<b>TOPLAM GİRİŞ</b>		% 100	% 100
	Çelik	% 55 - 60	% 50 - 55
	Hurda	% 8 - 10	% 8 - 12
<b>ÇIKIŞLAR</b>	Soğutma suyu	% 8 - 10	% 5 - 6
	Çeşitli maddeler	% 1 - 3	% 17 - 30
	Sönmüş gazlar	% 17 - 28	% 7 - 10

Tabii ki yukarıdaki değerler, iç operasyona ve bir tesisten diğerine farklılıklar göstermektedir. Bazı faktörler, işlenmemiş materyallerin durumu, güç girişi oranları ve operasyon kriterleri, kolayca üst katmanlardaki işlemleri etkileyebilir. Büyük güçlü şarjın operasyonu sırasında, karbon veya yüksek derecede karbon içeren materyaller için, enerjinin % 60'ı kullanılarak

sönmüş gazlardan karbon monoksit oluşturulur. Bu enerjinin geri kazanılması, EAF için enerji girişinin % 8 ila % 10 artmasına neden olur.

Uluslar arası demir ve çelik enstitüsü (International Iron and Steel Institute – I I S I) EAF’leri güçlerine göre sınıflandırmıştır. Bu sınıflandırma ton başına düşen fırın ağırlığı ile yapılır. Birçok modern operasyon için, ton başına 500VA düşecek şekilde fırınlar tasarlanır. I I S I raporlarına göre “The Electric Furnace 1990”, bir çok yeni tesis ton başına 900 – 1000 kVA düşecek şekilde ayarlanır. Çoğu fırın 0.85 maksimum güç faktöründe çalışır.” Bu yüzden de, transformatör maksimum giriş güçleri 0.75 ila 0.85 MW ton başına fırın kapasitesi ile dizayn edilir.

## 2.4 Mekanik Sistemler

Mekanik sistemler, EAF’nın operasyonuna bağlıdır ve bir çoğu, buna göre tasarlanmıştır. Fırın operasyonlarında değişik sistemler için farklı bir bakış açısı kazanabilmek için, bundan önceki adımlara bir göz atmak ve fırının kendisini yani elektrik ark fırınının fonksiyonlarını anlamakla mümkündür. EAF başlıca aşağıdaki fonksiyonlara sahiptir.

- 1.Çelik hurdayı içermek
- 2.Çelik hurdanın ısıtılması ve eritilmesi
- 3.Erimiş çeliğin bir sonraki proses adımına transfer edilmesi

İlk fonksiyonun gözlenmesi oldukça kolaydır. Hurdanın oluşumu, sadece şu düzgün işlemler sonucu oluşabilir: Eğer fırın kabuğu düzgün oluşturulmuşsa; Fırın kabuğu düz bir hat şeklinde erimeyen bir tabandan oluşur ki bu da sıvı çeliğe yardımcı olur ve tipik olarak, su soğutmalı üst katmanları sadece artık ve hurdayla dolmasını sağlar. Hurdanın erimesi ve ısıtılması, elektrotlar vasıtasıyla alınan elektrik enerjisi ile sağlanır ve yanıcı gazların ve oksijen gazının kimyasal enerji ile birleşmesinden oluşur. Kepçe ile dolmuş/boşaltım için sıvı çeliğin transferi, fırının ayarlanması ile gerçekleştirilir ve işleme mekanizmasının açılması ile veya alt taraftaki işleme boşluğunun çeliğin fırından akmasını sağlaması ile olur. İşlemeden işlemeye döngüsüne birçok alt sistem müdahale eder. Bu sistemlerin birçoğu, aşağıdaki sistemlere fonksiyonel olarak bağlıdır.

### 2.4.1 Hidrolik Sistemler

### 2.4.2 Su soğutmalı Sistemler

### 2.4.3 Yağlama Sistemleri

### 2.4.1 Hidrolik Sistemler

Hidrolik sistemler, birçok ark fırını işlemleri için motive edici güce sahiptir. Bu sistemler çatının alçaltılması / yükseltilmesi, çatının döndürülmesi, elektrot kollarının yukarı / aşağı hareketi / regülasyonu / döndürülmesi, fırının ileri / geri sallanması, hurda kapısının yükseltilip alçaltılması ve yedek sistemlerin (yardımcı sistemlerin) yanma için çalıştırılmasından sorumludurlar. Hidrolik sistemler; merkez rezervuarı, filtreler, akümülatör, hidrolik valflerden ve hidrolik pompalardan oluşur. Hidrolik sıvısı valflerden geçerken iki yönlü hareketin bir tanesini belirlenen devreler sayesinde gerçekleştirir. Hidrolik silindirler genişletilerek ve yerleştirilerek birçok mekanik eleman için hareket imkânı sağlarlar. Hidrolik sıvısı akışı olmadan ve basınç olmadan, devreyi de içine alacak şekilde hareket, imkânsızdır. Bu konu, düşük hidrolik sıvısı seviyesi, düşük seviyedeki akümülatör basıncı, sistem aksaklıkları, sıvının ayarlanamaması (aşırı ısınma sonucu) – sıvı hidroliklerde kalır veya hidrolik hatları ve mekanik tesisteki düzen, düşük sistem performansına yol açar ve bazı durumlarda sistem hatasının oluşmasına neden olur.

### 2.4.2 Su Soğutmalı Sistemler

Ark fırınları için olan bir başka önemli sistem ise su soğutmalı sistemdir. Birçok su soğutmalı sistem vardır. Bazı operasyonlar oldukça temizdir, bu da yüksek kalitedeki su soğutmalı sistem ile mümkündür. Transformatörün soğutulması; üçgen bağlı kısmın soğutulması, terminal tüplerinin soğutulması ve elektrotların bağlantı kısımlarının soğutulması gibi işlemlerden oluşur. Tipik olarak, bu sistemler kapalı çevrim devresi döngüsünden oluşur ki bu da sulu cihazların hassas parçalarının su ile soğutulması içindir. Kapalı çevrim devresindeki su, ısıyı azaltmak için bir sıcaklık değiştiriciden geçer. Açık çevrim tarafındaki devrenin ısı değiştiricisi tipik olarak, akıcılığı sağlayarak bir soğutma kulesi ile irtibatlandırılmıştır. Diğer su soğutmalı elemanlar, fırın yan panelleri, çatı panelleri, sönmüş gaz sistemi, fırın mağarası düzeneği... tipik olarak su soğutma kulesindeki suyun kullanımını oluştururlar.

Soğutma devresi tipik olarak besleme pompaları, geri dönüşüm pompaları, filtreler, soğutma kulesi hücreleri veya hücreler ve akış monitör enstrümanından oluşur. Cihazın hassas parçaları normal olarak, enstrümana sahiptirler ve böylece monitörden soğutma suyu akış oranları izlenebilir ve sıcaklık kontrol altına alınmış olur. Birçok su soğutmalı cihaz, akışa müdahale veya önemli su kontrolü için termal aşırı yüklenmeyi bazı katastrofik (abartılı) durumlarda hatayı önleyici özelliğe sahiptir.

### 2.4.3 Yağlama Sistemi

Birçok modern sistemde, yağlama sistemi, otomatik olarak sistem tarafından gerçekleştirilir ve hareketli parçalar için yağlama görevini sağlar. Bu olaylar, işlemeden işleme döngüsünün bir parçası olarak görülür. Örneğin bazı parçalar; ağaç çatısının döndürülmesi, işleme süreci gibi... Bazı parçalar ise döner mil yatağı gibi kritik olarak fırın operasyonlarının bir kısmını oluşturur ve yağlama, el ile yapılır. Bazı ulaştırma güç parçaları ise borular veya yer değiştirebilen bloklarla yağlanır.

### 2.5 Yardımcı Sistemler

Ana mekanik sistemlere ek olarak EAF'da bazı yardımcı sistemler de kullanılır ki bu fırın operasyonlarını ve performansını etkiler.

#### 2.5.1 Oksijen Düzenleyici Sistemler

Geçen 20 yıl boyunca, EAF'da çelik yapımı için oksijenin kullanımı gözle görülür şekilde artmıştır. Geçmişte oksijen tüketimi, fit başına 300 kübikten azdı. Bu tüketim, tabii ki de ton başına düşen çelik içindi. Oksijen düzenleme operasyonları, ince bir boru ile manuel olarak yapılırdı. Birçok modern operasyon, günümüzde otomatik olarak su soğutmalı sistemlerle oksijenin enjekte edilmesi ile yapılmaktadır. Aynı zamanda bu süreç içinde karbon da enjekte edilmektedir.

#### 2.5.2 Karbon Enjeksiyon Sistemi

Hurda dumanına karbonun enjekte edilmesi, karbon enjeksiyon sisteminin bir parçasıdır. Bu sistem, büyük güçlü fırın operasyonları için geçerlidir. Karbon FeO ve CO ile tepkimeye girer ve karbon döngüsünü oluşturur.

#### 2.5.3 Oksi-yakıt Yakma Sistemleri

Oksi-yakıt yakıcıları, günümüzde yüksek güçlü fırınların standart operasyonları haline gelmiştir. İşlemeden işleme döngüsü operasyonları için, hurdanın çabuk eritilerek soğutulması gerekir. Hurda mağrası minimum koşullarda tutulmalıdır ve bunun bir sonucu olarak elektrotların kırılması, minimize edilir. Büyük çaplı fırınlar da, uniform erime işlemi için, yakıcılar büyük önem taşımaktadır. Uniform olmayan metallerin erimesi, operasyonun ertelenmesine ve üretim kaybına yol açmaktadır. Yakıcıların en önemli özelliği, metal veya hurdanın durumuna göre ısıtma sağlamasıdır. Yakın yakıcılar, banyoya monte edilmiştir. Düşük ateş modunda, bu yakıcıların zarar görme olasılığı vardır. Bazı yakıcılar, doğrudan su

soğutmalı panellere bağlanmıştır ama diğerleri ise bakır bloklar içine monte edilmişlerdir. Eğer yakıcılar, hurdanın küçük parçaları için büyük oranlarda ısıtırlarsa, alev kapanı oluşarak fırın kılıfına ve su soğutma sistemine zarar verebilir. Bu yüzden de panel alanı yakıcıların bulunduğu alandan uzak olmalıdır. Eğer bakır blok kullanılırsa, alev kapanına karşı daha iyi önlem alınmış olur, ama hala yalıtım problemi devam etmektedir.

#### **2.5.4 Elektrodun Spreyli Soğutma Sistemi**

Elektrotlar için su soğutma sprej sisteminin olması, doğal bir şeydir. Böylece elektrottaki oksidasyon, engellenmiş olur. Spreyler, direkt olarak suyu elektrodun başına fışkırtarak elektrodun baştan aşağıya soğutulmasını gerçekleştirirler. Su soğutma sistemi, elektrodun genişlemesini % 10 - % 20 kadar azaltabilir. Ayrıca su sprej soğutma sistemi, elektrodun kullanım ömrünü de uzatır. Bunun yanında elektrot bağlantı düzeneği de daha uzun ömürlü olur. Elektrottaki radyasyona bağlı olarak, güç kabloları, hava sistemi ve hidrolik sistem daha iyi çalışır. ( Electric Arc Furnace Steelmaking, 2002)

#### **2.5.5 Sıcaklık Örnekleme Sistemi**

Modern geri dönüşümlü termal çifti, çelik yapımında yaklaşık olarak 40 yıl önce bulunmuştur ve sıcaklık ölçümü, işlemden işleme döngüsünde ayarlama prosesinin önemli bir adımı haline gelmiştir. Harcanabilir probalar, banyodaki karbon seviyesini düzeltmek için de kullanılır ve böylece çelikteki çözülmüş oksijen dengelenir. Bu araçlar, işlemden işleme döngüsünü geçerli kılar ki bu da laboratuvar sonuçlarının daha çabuk elde edilmesini sağlar. Harcanabilir probalar, çelikle işleme girecek şekilde monte edilirler ki böylece elektriksel olarak içsel bir temas sağlanır. Harcanabilir probe bir elektrik sinyali ileterek çeliğin kutuplarını uyarır, böylece sinyal, elektronik üniteye iletilmiş olur. Hemen hemen bütün probalar, sıcaklık ölçümüne dayanır. Böylece oksijen seviyesi kontrol altına alınmış olur. Birçok işlem, kutupların uyarılması ile gerçekleşir ki bu da okuma sırasında kolaylık sağlar.

#### **2.5.6 Sönmüş Gazların Boşaltım Sistemi**

Eskiden kullanılan sönmüş gaz sistemi fırın operasyonları sonucunda yapıldı ki böylece fırın etrafında olan olaylar dengelenmiş olsun. EAF'ları ile çelik üretiminin ilk günlerinde, sönmüş gaz sistemi, bir çok modern EAF işleminin temelini oluşturmaktadır. Böylece sönmüş gazlar "dördüncü delikten" kolayca boşaltılabilir. (DES) Dördüncü delik terimi, elektrodlar için tasarlanmış yardımcı bir delik anlamındadır. DC fırınlarda sadece bir elektrod kullanılır.

Bunun için de “ikinci delik” yeterli kalmaktadır. Bu fenomenin nedenleri, aşağıda açıklanmıştır.

1. Düzgün bir kirlenme kontrol sisteminin sağlanması,
2. Vinç operatörünün fırın şarj etmesinin kolaylaştırılması,
3. Büyük emilimler nedeniyle elektrod düzeneğinin etrafında; kabloların, elektrod bağlantılarının fırın üçgeninin, çatı düzeneğinin, hızlandırılmış elektrot kılıfının ve elektrot sprej soğutma sisteminin güvenliğinin sağlanması,
4. Çatı yapısının emisyon sonucu zarar görmemesi,
5. Büyük emilimler yüzünden karbon monoksidin ikincil dengeleme sisteminin aşağı katmanlarda duman birikmesinin önlenmesi,
6. Elektrot fazları arasındaki tozun ark oluşturmasının engellenmesi.

Birçok DES sistemi su soğutmalıdır, sprej soğutma sistemi, kurutucu sistem ve DES düzenleyici fanı, bu sistemin ana parçalarını oluşturmaktadır.

## 2.6 Elektrik Sistemi

EAF’da erime işlemi için elektriksel sistemler kullanılır. Bu sistem, ilk olarak elektriksel bir kaynaktan enerji sağlar ve ikinci olarak elektriksel sistem, tesisten gelen voltajı adım adım küçültür. EAF’da transformatör, birinci işlem olarak çelik üretimi için gerilimi ayarlar. Böylece birçok transformatör beslenmiş olur. Bu da EAF trafolarının döngüsel çalışma sistemini oluşturur. Bu döngüye bağlı olarak ana kesici, çelik üretimi için tasarlanan elektrik sistemini yalıtılmış olur. Böylece güç sistemi dengelenmiş olur. Birincil elektrik sisteminin ikincil tarafında ise, vakum anahtarı vardır. Bu anahtar, motorla çalışır ve ikincil fırın trafosunu birincil güç kaynağından ayırır.

### 2.6.1 Vakum Anahtarı

Vakum anahtarı, uzun ömürlüdür ve birçok elektrik ark fırınının uygulamalarında kullanılır. Geleneksel vakum anahtarı ikincil elektriksel devreyi yüklü veya yüksüz durumlar için keserek kontrolü sağlar. Vakum anahtarlarının çoğu, 4 yıl veya 40,000 operasyona dayanacak şekilde üretilmiştir. Pratikte bazı anahtarlar, 200,000 denemeye de herhangi bir müdahale olmadan dayanacak şekilde kullanılmaktadırlar. Bu ünitelerdeki hataların ilk nedeni metalik materyallerdir. Bu parçalar, hareketli kısımlardan oluşurlar. Bunlar, vakumlu ortamda çalışırlar. Bu parçalar mühürlenmiştir. 100,000 çalışma sonucu, birincil gücün ikinci kısmı için zor da olsa izolasyon sağlanmış olur.

### 2.6.2 Motorlu Açma Anahtar

Motorlu Açma Anahtarı (Motorized Disconnect Switch- MDS) tipik olarak motorlu bıçak kapılarından oluşur. Bu kapılar, EAF'nin birincil güç beslemesini izole eder. Bıçaklı anahtarlar, yüksüz durumda da kontrolü elden bırakmazlar. (Vakum anahtarı açık durumdadır ve elektrotlar yükselmektedir.) Böylece bıçaklar arasında bir ark meydana gelmez.

### 2.6.3 EAF Transformatörleri

Tesisin jeneratöründen gelen güç akışı, network yani bağlantı sistemi üzerinden çelik üretim merkezine yüksek voltajı düşük voltaja çevirerek fırın arkının oluşmasını sağlar. Bu işlem, transformatörlerin görevidir. EAF transformatörü, birincil düşük akımı alır, yüksek voltaj gücünü dönüştürerek bu akımı yüksek akım yapar ve düşük voltaj gücü EAF'nin kullanımına sunar. Birçok yüksek akım transformatörü 100MVA veya daha büyük değerlerde çalışır.

Güçü dönüştürerek kV seviyelerine indirir ve böylece tesis hattının voltaj seviyesi EAF'nin ihtiyaç seviyesine getirilmiş olur. Bu işlem, iki seviyede gerçekleştirilir. İlk trafo, (genelde iki transformatör paralel çalışırlar) yüksek voltaj hattındaki voltajı düşürerek orta seviyedeki voltaj durumuna getirir ve bu değer, ülkeden ülkeye değişiklik gösterir. Amerikada bu değer, 54.5 kV'tır. Avrupa'da, Japonya'da ve diğer ülkelerde bu değer bazen 30 – 33 kV değerini bulmaktadır. 34.5 kV bara gerilim değeri için ark fırınları büyük güçlü özel fırın transformatörleri ile donatılmışlardır. Bu fırın transformatörünün ikincil voltajı, ark oluşumunu ark voltajı ve akımlarında gerçekleştirecek şekilde tasarlanmıştır. Çünkü ark voltaj /akım kombinasyonları, ısı sonucu ortaya çıkarlar ve ikincil voltaj bu ısının oluşumunda büyük rol oynar. Fırın transformatörü, işlem değiştirici, için çok önemlidir.

### 2.6.4 İşlem Değiştirici

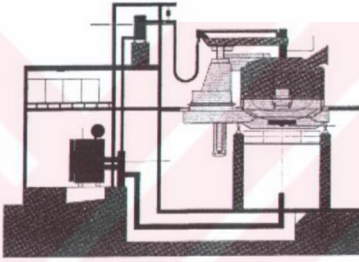
İşlem değiştiricinin görevi, farklı volt ve amper değerleri için sıcaklık değişimini ayarlamaktır. Bu da birincil kömürün sayısının değişimini düzenler. (Birincil işlem, düşük akımda gerçekleşir ki bu da ikincil kömürün yüksek akımda olduğu sonucunu belirler.)

Temel olarak işlem değiştirici, motorlu kontak kutusundan oluşur. Bu işlem değiştirici, demir korunun etrafındaki kömür miktarını kontrol eder. Birçok işleme değiştirici "yükklü" durumda birincil akımı anahtarlayarak, gücü 2kVA'den 34.5kVA'e yükselterek kesme işlemi öncesi hareket kontağını sağlar ve akıma müdahale eder. Bu kontaklar, ark nedeniyle büyük bir aşınmaya neden olur ki bu da bu sistemin aşınmasına neden olur.

Bazı çelik üretimi yapan firmalar, “yüksüz” işleme değiştiriciyi seçerler. Böylece aşırı yüklü durum anahtarlanarak kontrol altına alınmış olur. Bunun yanında, işlem değiştirici arki keserek fırın elektrotlarının kalkmasını sağlar ve bu prosedürün bir dakikanın altında gerçekleşmesini sağlar. Günümüzde bu gecikmeleri azaltmak için işlem değiştiriciler bu süreyi azaltacak şekilde dizayn edilirler. ( Electric Arc Furnace Steelmaking, 2002)

## 2.7 İkincil Elektriksel Devre

EAF sistemindeki ikincil devre şunlardan oluşur: Üçgen bağlantısı, bara kolu ve akım ileten kollar, elektrod başları ve bağlantı kısımları



Şekil 2.3 Tipik DC EAF Düzeneği .

### 2.7.1 Üçgen Bağlantısı

EAF'nı transformatörünün ikincil devresi, düşük voltajlı izolatörlere bağlıdır. Bunlar üçgen şeklinde bağlanmışlardır ve bir seri bakır plakalardan oluşurlar. Bunlar, transformatörün ikincil sargıları kapalı bir devre oluşturacak şekilde dizayn edilmişlerdir. Bu cihazın büyük bir bölümü, transformatöre güvenlik için bağlanmıştır ve temiz bir ortam sağlama amacını gütmektedirler. Üçgen bağlantısı, EAF ve bağlantıları ile kesişerek fırın güç kablolarına ulaşır, diğer kısımları ise fırın barasında akım ileten kollara bağlanır.

EAF'nın direkt akıma maruz kalması durumunda, güç elektroniği yani tristör devreye girerek iki bakır iletkeni çalıştırır ve EAF güç kabloları ve diğerleri alt katmandaki elektrotlarla elektriksel olarak birleşirler. Alt katmandaki fırın elektrodu, genelde fırın operasyonları sırasında hareket eder. Prensip, tristörün terminalle bağlantısı, analog olarak üçgen bağlantısına uzanır ve fiziksel olarak bundan ayrılır. Üçgen bağlantısı baz alınarak, DC operasyonlar için benzer bir yol izlenir.

Bara sistemlerinin, üçgen bağlantı kasası sağlam çelikten yapılmış ve tavana asılı olarak dizayn edilmiştir. İkincil bara için olan süspansiyon sistemi veya üçgen bağlantısı, kasa duvarlarının içine yerleştirilmiştir. Böylece bu devrenin kuru kalması sağlanır.

İkincil bara sistemi veya üçgen bağlantısı fazdan faza izole edilerek topraklanmıştır ki böylece komşu elemanlar korunmuş olur. Su soğutmasının sağlandığı kısım, fabrikasyonla oluşturulmuş fiberden, oluşmuş bir materyal ile korunur. Bu materyal, silikondan veya alüminyumdan oluşan fiber bir malzemedir. İlerlemiş kablo dizaynlarında, “deri etkisine” bağlı olarak tipik bir AC operasyonu için, akım bakır iletkenlerle orantılı olarak taşınır. Bu yüzden merkez plastik oval bir tüp ile kablo ağırlığını taşıyacak ve maliyeti karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Diğer operasyonlar bu içsel su soğutma kanalı yoluyla soğutulur.

DC fırın işlemlerinde, kablo, içindeki içsel lastik tüp, soğutma için kullanılır. Çünkü DC operasyonlar “deri etkisine” maruz kalmazlar ve tüm sarmal kısımlar bakır kablolardan oluşur ve uniform olarak dağılmışlardır. Bunun yanında, DC kablolar soğutulurken merkez ve soğutmanın dış kısma nazaran daha efektif yani etkili olmasını sağlarlar.

### 2.7.2 Bara Kolu / Akım İleten Kollar

Birçok tasarım, elektrot kolları ve bara kolu için gerçekleştirilir. Birçok eski fırın, bir kol yapısına sahiptir. Bu yapı da elektriksel olarak bara kolunu oluşturur. Bara kolu, kablolar arasında elektriksel bağlantıyı sağlar ve elektrotları tutar. Bara kolları, yuvarlak bakır borulardan oluşur. Tipik bir bara tüpü, bir veya iki bağlantıdan oluşur. İyi bir bağlantı, bara tüpü ve onun koruyucu elemanları arasında sağlanmalıdır ki ark bara tüpünde bir zarara yol açmasın. Bara tüpleri genellikle güç kablolarının değiştirilebilen, bakır terminallerine bağlanarak, fabrikasyonla oluşturulmuş bakır terminal plakalarından oluşurlar.

Birçok uygulama, bara tüpü için elektrotların bağlantı noktalarındaki terminaller için geçerlidir. Bu önemli bağlantı bölgesinde ve paralel bağlantılar için tutan kısımlarda korunma, sigortalar ile sağlanmıştır.

Birçok modern fırında akım iletken kollar, kolların kendilerini de içine alacak şekilde bağlantı bölgesi ve elektrot tutucuları bölgesinden elektriği iletirler. Akım iletken kollar, genellikle bakır, çelik ya da alüminyum alaşımlardan oluşurlar. İletken kolların azalan ağırlığına bağlı olarak konvansiyonel kollar ve bara tüpleri mekaniksel yapıyı oluştururlar. Bunun yanında, aynı yapıdaki bara tüpleri ve akım iletken kolları elektriğin düzenli olarak dağıtılmasını sağlarlar. ( Electric Arc Furnace Steelmaking, 2002)

### 2.7.3 Elektrot Başları ve Bağlantı Kısımları

Elektrod başları ve bağlantı kısımları, güç sağlayıcı ve grafit elektrotlar arasında ana bağlantıları sağlarlar. Bunlar, birçok değişik koşulda olağan üstü durumlar için (vibrasyon, tork ...) ve termal döngü için çalışabilme imkânına sahiptirler. Böylece en zayıf bağlantılara sahip olan ikincil devre korunmuş olur. Geleneksel elektrot tutucuları fabrikasyonla oluşmuş bakır plakalardan oluşurlar. Bağlantı plakaları daha küçüktür ve elektrot bağlantı alanı ile birleştirilirler. Bağlantı kısımları için elektrodlar çekilerek geri yerleşirler ve çelikten yapılmış cihazlar daha iyi bir bağlantı oluşturmak için düzenlenirler. Elektrod ve bağlantı kısımları arasındaki akım transferi 3 ila 4 inç arasında oluşur. Elektrotlar ve bağlantı alanı arasında ark oluşumu için kaplama izolasyonu şarttır. Bu kısımda oluşabilecek herhangi bir kirlilikte akım dirençten akar ve aşırı sıcaklığa bağlı olarak elektrot tutucularında bir bozulmaya neden olabilir.

Tipik olarak soğutma suyu ihtiyacı 2 den 40 galona kadardır. Bu bir dakikalık süre için geçerlidir. Ayrıca bu değerler, elektrodun boyutlarına göre de değişim göstermektedir. Bağlantı alanı iyice temizlenerek oksidasyondan arındırılır ve karbon döngüsü burada devreye girer ve birçok maddenin oluşması sağlanır.

### 2.7.4 Elektrotların Regülasyonu

Tipik olarak elektrod / kol / direk / kablo yaklaşık olarak 20 ton civarındadır. Direktteki hidrolik silindir yardımıyla dikey olarak hareket ettirilir. (Bazı eski fırınlarda hareket, elektrikli motor ve kablolar yardımıyla gerçekleştirilir.) Çünkü ark uzunluğu, hurdanın veya plazma fazındaki sıvının durumuna bağlıdır. Elektrod pozisyonunun otomatik kontrol ile kontrol edilmesi gerekir. Buna da regülasyon sistemi denir.

Regülasyon sistemi, bir çok önemli fırın operasyonunu enerji girişi için gerçekleştirir. Enerji girişini; ana akım, ark stabilitesi, hurda erime durumu, su soğutma sisteminde kaybolan enerji, elektrotlar, yeniden fabrikasyon etmenleri etkiler. Bütün bu parametreler, kompleks düzende değerlendirilir ve bu da farklılıklar sonucu "optimum" kontrol stratejilerini ortaya çıkarır.

Elektriksel sinyallerin alınması "standart" olarak kabul edilirse, "empedans kontrolü" oluşturulmalıdır. Bu metot, elektriksel akım sabitinin oranının, belli bir değerde kalmasını sağlar. Bu da "empedans" kontrolünün bir parçasıdır. Voltaj sinyali, faz-toprak hattından alınır ve akım sinyali dağıtılarak doğrultucudan geçirilir. Sonuçta DC değerler elde edilir ve bunlar da "geriden geriye" döngüsünün bir parçası olurlar. Eğer voltaj ve akım, istenilen

seviyede değilse, ayarlama noktası belirlenir, çelik yapımı işlemine geçilir. Bu karşılaştırmanın çıkış sinyalleri, sıfıra indirgenir. Eğer akım belirli bir değeri aşarsa, kendi sinyali artarak ve simültane olarak voltaj azaltılır. Sonra bu geriden geriye voltajları dengede değilse çıkış voltajı üretilir. Bu sinyal, regülasyon değerini oluşturur ve böylece elektrot kollarına yükselme komutu gönderilir. Böylece akım azalır.

### **2.7.5 Fırın Güç Kabloları**

Su soğutmalı fırın güç kabloları, esnek bağlantıyı sağlarlar. Bu esnek bağlantı ikincil devre için geçerlidir. Bu kablolar esnek olmalıdır. Esnek elektrod kolları, yukarı ve aşağı doğru hareket ederek fırının şarjı sırasında, kollar ile tavanın uyumlu biçimde çalışmasını sağlar. Üçgen bağlantının bağlantıları için, transformatör kasasının dış kısmı gümüş plakalarla temiz bir güç kablosu teması elde etmek için tasarlanmıştır. Silindirik yapı içindeki güç kablolarının bakır telleri bakır terminallere bağlanarak su soğutmalı kablolar haline getirilmiştir. Plastik bir kalkan kullanılarak kabloların su soğutmalı olması sağlanmıştır. Böylece sağlam çelik uçlar eritilerek dizayn edilmiştir.

### **2.8 Elektrotlar**

Elektrik ark fırınlarında çelik üretiminde kullanılan, elektrik devreleri ve maliyetler açısından en önemli eleman, elektrotlardır. Elektrotlar, fırına güç iletirler ve elektrotlar arasında ark oluşmasını sağlarlar. Böylece de fırın şarj olur. Arkın kendisi plazma durumundadır ve iyonik gazlardan oluşur. Yaklaşık olarak 6000 F'ı bulan sıcaklıklara ulaşır. Elektrotlar iki formdadır: Şekilsiz ve grafit karbon veya grafitten oluşurlar. Çünkü grafit elektrotlar, sadece çelik üretiminde kullanılırlar.



Şekil – 2.4 EAF prosesinin basit bir şeması.

Grafit elektrotlar, temiz bir şekilde karıştırılmış ve ayrılmış, galvanizli petrolün kömürle % 30 civarında karıştırılması ile oluşmuşlardır. Bazıları, üreticinin ihtiyacına göre ek maddeler de içerirler. Bu karışım, yaklaşık olarak 220 F'tır. Elektrotların uzama sıcaklığı, genelde silindirik bir çubuk şeklinde "yeşil elektrot" haline geldiğinde belli olur. Yeşil elektrot, azalan atmosfer sıcaklıklarında 1800 F bulur. Bu sıcaklıkta, elektrodun gücü ve yoğunluğu artar, elektriksel öz direnci ise azalır. Elektrotlar şimdi grafitleşmeye hazır hale gelirler. Örn. Şekilsiz karbon kristalleşerek grafitte dönüşür.

Bu olay, elektrotlar boyunca elektriğin iletilmesi ile olur. Bu iletim sırasında, sıcaklıkları 5000 F bulur. Grafitleşme işlemi 3000–5000 kWh / ton dur. Ana ürün sağlamdır, yoğundur ve düşük elektriksel özdirence sahiptir. Son olarak elektrod, kendi ana şekline bürünür. Her elektrodun sonunda bir makine vardır. Bu makineler, elektrodun ısınma olayı nedeniyle oluşan arktan sonra, elektrotların eski konumuna gelmelerini sağlar

Geçmişe bakarsak elektrodun uzaması çeliğin tonu başına 12 –14 pound olarak açıklanabilir. Gelişen teknoloji ışığında, çelik üretimi için bu değerler azalarak ton başına 3.5 ila 4.5 pounda inmiştir.

Elektrotlar, genelde 15 – 30 inç çapa sahiptirler ve uzunlukları yaklaşık olarak 10 feet uzunluğundadırlar. Elektrotların 3 ana şekli vardır, biri normal şekilleri, ikincisi uzamış halleri bir de DC durumdaki boyutları mevcuttur. ( Electric Arc Furnace Steelmaking,2002)

Burada, konunun bütünlüğü açısından, ayrıca sekonder devreye de yer verilmiştir.

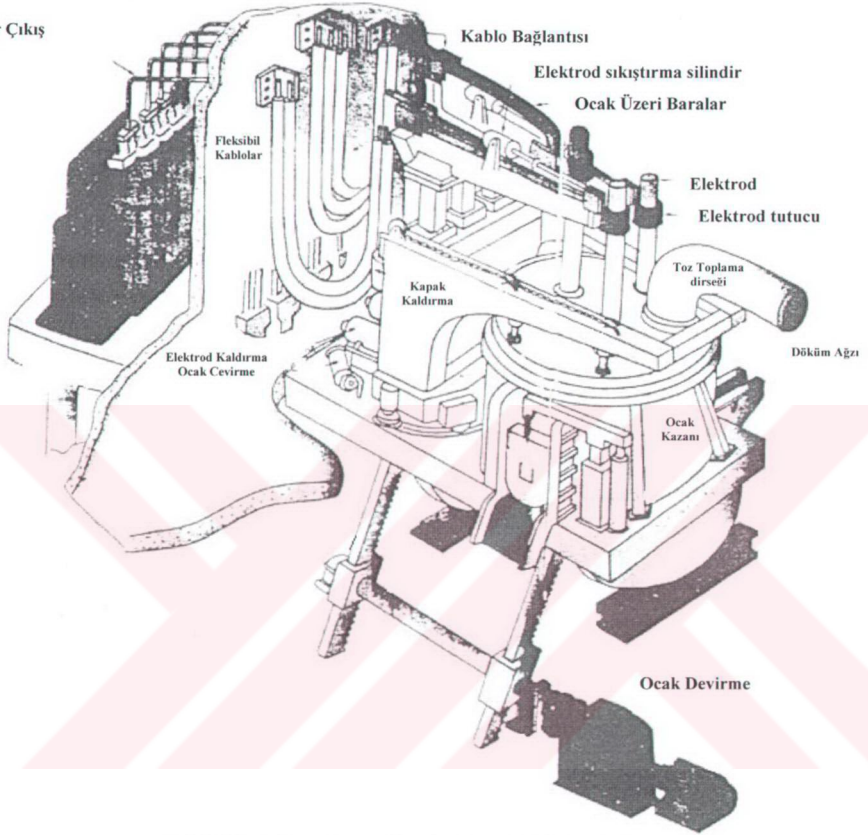
## 2.9 Sekonder Devre

Bir elektrik ark ocağında sekonder devre Şekil 2.5'de görüldüğü gibi şu kısımlardan oluşmuştur.

- Sekonder çıkış baraları [Bus-bars]
- Fleksibl kablolar
- Ocak üzeri akım taşıyıcı baralar
- Elektrod tutucular
- Elektrodlar
- Elektrik arkı

Sekonder devrenin çok yüksek akımları nedeni ile her fazın kendi ve ortak reaktansları, akım iletim düzeni ve iletkenlerin yüzeyindeki relatif permeabilite ile sınırlanır. Böylece sekonder devrenin geometrik yapısı ve iletim biçiminin seçimi ocağa verilebilir gücün büyüklüğünde ve üç faz simetrliliğinde kesin bir rol oynar. Asimetrik nedenlerle oluşan kuvvetli ve zayıf [ölü] fazlar, şebeke ve ocak transformatörü üzerinde olumsuz etki yaparlar.

er Çıkış



Şekil 2.5 Ark ocağı ve sekonder devresi. (Orhon,1986)

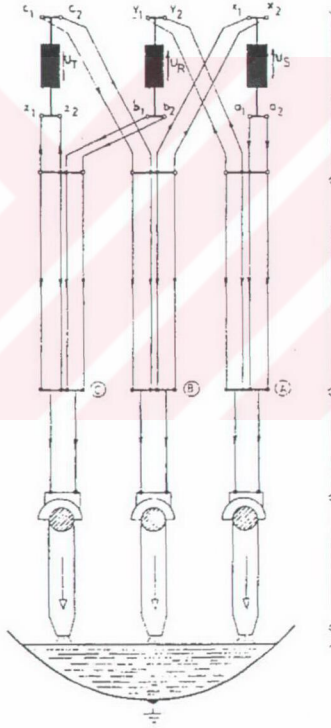
Sekonder devrenin tam bir etüdünü yapmak ve en uygun bir çözümü bulmak oldukça zor ve karmaşık bir hesap yoludur. Şurası gerçek ki, bir ark ocağında en önemli konulardan biride; Sekonder devrede çok iyi bir empedans dengesi sağlamak, endüksiyon ısıtmayı önlemek ve elektromagnetik indüksiyon kayıplarını en aza indirmektir. Bütün bu faktörler, özellikle UHP ocakları için oldukça önemlidir.

### 2.9.1 Sekonder Çıkış Baraları

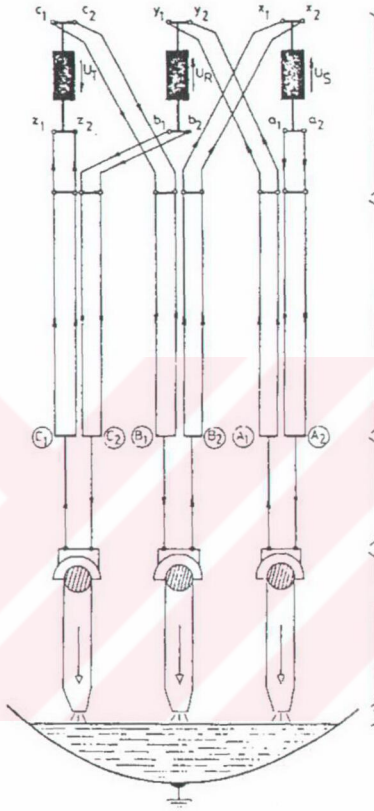
Sekonder çıkış baraları, transformatörün sekonder terminallerini fleksibil kablolarla bağlayan iletkenlerdir. Büyük ocaklarda, su soğutmalı boru şeklinde olurlar. Transformatör sekonder sargı düzenine bağlı olarak çok değişik biçimlerde dizayn edilirler.Örneğin, transformatör

sekonder açık üçgeninin, transformatör dışında ve fleksibl kablo başında kapanması ile ilgili bir sekonder çıkış bara düzenlemesi Şekil: 2.5' de gösterilmiştir.

Üç fazlı ocak transformatörlerinin sekonder sargıları, genellikle açık üçgen olarak düzenlenir. Küçük transformatörlerde üçgen, daha çok transformatör yanında kapanır. Sekonder devrenin empedansını en aza indirmek için, bu kapanma olabildiği kadar elektrodların yakınında yapılır. Ancak elektrod kollarının aşağı-yukarı hareketli olması 'nedeni ile üçgen bağlantının elektrod tutucularında yapılması, mekanik yapıyı oldukça zorlaştırır.



Şekil 2.6 Sekonder Çıkış Bara Düzenlemesi. (Orhon, 1986)



Şekil 2.7 Farklı bir Sekonder Çıkış Bara Düzenlemesi . (Orhon, 1986)

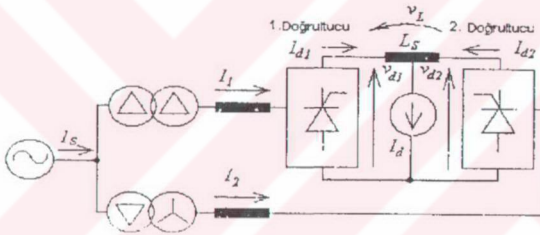
Şekil.: 2.7'deki düzenlemede iletkenlerin bitişik çiftleri birbirlerine zıt yarım akım taşırlar, öyle ki bu olay ortak indüktans etkisini yok etmeye çalışır. Bu düzenleme ile elektrodlardaki gerilim düşümü minimum olur ve ocağa daha çok güç verilir.

### 2.9.2 Fleksibl Kablolar

Transformatörün sekonder barası ile ocak elektrod kolları arasında akım taşıma görevi yapan fleksibl kablolar, genellikle asbest kaplı kauçuk hortum içinde su soğutmalı olur. Empedansı

düşürmek için, mümkün mertebe bitişik üçlü demet halinde düzenlenmiştir. Bir kablo demeti diğerinden izole edilmeli ve dış darbelerden korumak içinde fleksibl asbest örtü v.b. kullanılarak tüm demet kaplanmalıdır. Bu kabloların su ile soğutulmaları nedeni ile kablo kesit ve sayısında oldukça düşme olmaktadır. Genellikle akım yoğunluğu 4-5 A/mm Soğutma suyu öyle ayarlanmalıdır ki sıcaklığı hiçbir zaman max. 50-60 C° yi geçmemeli Büyük akımlar, fleksibl kablolar yöresinde çok kuvvetli magnetik alanlar oluştururlar. Benzer faz akımını taşıyan kablolar arasında magnetik çekme olayı, değişik faz akımları taşıyan kablolar arasında itme olayı vardır. (Orhon, 1986)

## 2.10 Oniki Darbeli Paralel Bağlı Tristörlü Doğrultucu



Şekil 2.8 Orta uçlu reaktör üzerinden paralel bağlı oniki darbeleri doğrultucu

Şekil-2.8' de orta uçlu bir bobin üzerinden paralel bağlı olan oniki darbeleri doğrultucu seması görülmektedir. Doğrultucunun biri, üç fazlı  $\Delta - \Delta$  bağlı transformator üzerinden, diğeri de üç fazlı  $\Delta - Y$  transformator üzerinden  $\Delta - \Delta$  kaynağına bağlanmaktadır, {ki adet faz kaydırılmış 6 fazlı tristörlü doğrultucunun DA haraları orta uçlu bir  $L_s$  endüktansı üzerinden paralel bağlanarak 12 darbeleri tristörlü doğrultucu meydana getirilmiştir, incelemeleri basitleştirmek için DA yük tarafında, büyük değerli bir endüktansın bulunduğu düşüncesiyle  $I_d$  yük akımı sabit kabul edilmiştir .

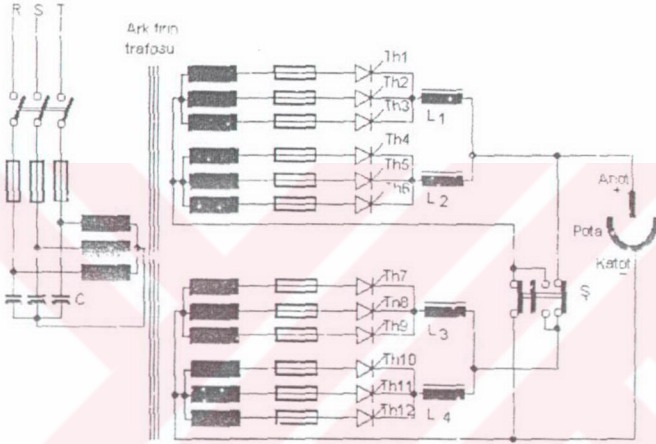
Şekil 2.8' deki s indisleri kaynak tarafını, 1 ve 2 indisleri ise birinci ve ikinci doğrultucuya ait değerleri ifade etmektedir. Burada büyük reaktans değerine sahip klasik orta uçlu bir reaktör kullanılmaktadır

Her bir çift yıldız doğrultucu 60 voltluk doğru gerilim ve 2000 amperlik doğru akımı verebilecek şekilde tasarlanmıştır.

2000A 6 333.333 amperlik akıma dayanabilen tristörün soğutucusu iyi bir soğutma imkanı sağladığından zorunlu olarak kapsül tipi tristorler seçilmiştir.

Bu amaçla, V/estcode Semiconductors Dizayn Katoloğundan bu amaçla N275CHx tipi kapsül tipi faz kontrol tristörleri seçilmiştir.

Doğrultucu da her yıldız bağlı grup çıkışında  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $L_4$ , şokları ile pasif akım filtresi sağlanmıştır. DA ark fırın güç kaynağının elektrik devre seması Şekil-2.9'de gösterilmiştir.



Şekil 2.9 DA ark fırını güç kaynağının elektriksel şeması. (Birbir, 1999)

Bu doğrultucunun DA tarafının filtre edilmesi için  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $L_4$ , filtrelerinin değerleri 23 mH olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada, DA ark ocağının şebekeden çektiği akım ve şebeke gerilimi üzerindeki bozucu etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla Kroman Çelik Sanayiinde 75 MVA gücündeki ark fırın trafosu ve elektrotlarından 90 KA civarında doğru akımın geçtiği trafo merkezi ile ocak kontrol merkezi ve civarında bulunan çok kuvvetli manyetik alanlar nedeni ile gerekli ölçümleri doğrudan yapmanın imkansız olduğu görülmüştür.

Vidalanarak birbirine eklenebilen elektrotlar, su soğutmalıdır. Anot (+)potansiyelli elektrot, aşağı ve yukarı yönde hareketlidir. Katot (-) potansiyelli elektrot ise, pota içinde sabitleştirilmiştir. Şarj ile dolu fırındaki üst elektrodun aşınma hızı, melalin banyoda toplanma hızından daha yüksektir. Bu nedenle elektrodun sürekli aşağı itilmesini, ergimemiş faz oluşumu ise elektrodun arada bir yukarıya çekilmesini gerektirmektedir. Ayrıca arkın,

elektrodu yanlardan değil uçtan aşındırması, çoğunlukla elektrotun aşağı yönde hareketini gerektirmektedir. Fotoselli elektronik algılayıcılar ile üst elektrodun hareketleri ölçülüp hareketin kontrolü otomatikleştirilebilir.

Ölçülen akım ve gerilim değerleri ve ark fırın potasına sokulan termokuplardan ölçülebilen sıcaklık değerleri, veri toplama sistemi ile bilgisayara aktarılarak değerlendirilir. Bunun sonucunda da bu değerler, elektrot hareketi ve tristörlerin tetiklenmesinde kullanılarak sistemi otomatikleştirilebilir. Ayrıca elektrot kolu PLC veya mikroişlemcilerle otomatik olarak kontrol edilebilir.

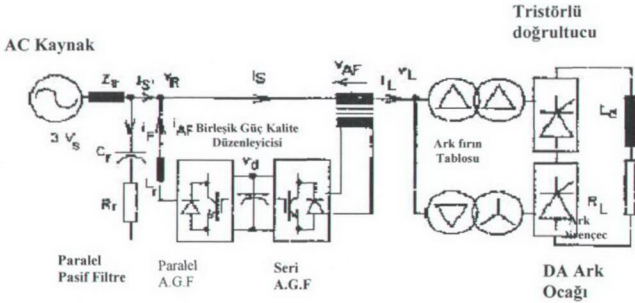
### 2.11. Güç Kalite Düzenleyicileri

Çelik endüstrisinde kullanılan, DA ark fırınlarında MVA' ler mertebesindeki güçler, 12 darbeli tristörlü doğrultuculardan birkaç yüz volt seviyeli düşük doğru gerilim ve kiloamper seviyelerinde yüksek doğru akım kararlı olarak harcanmaktadır. DA tarafındaki akım dalgalanmalarından tristörlü doğrultucuyu korumak için AA tarafının kondansatör ve bobinlerden oluşan bir filtre ile donatılması gerekmektedir. Günümüzde DA fırınlarının AA taraflarına konulan pasif filtreler ile bu ihtiyaç giderilmeye çalışılmaktadır. Bu filtreler ile AA/DA dönüşümü sonucu ortaya çıkan karakteristik harmonik etkileri kolayca giderilebilmektedir. Ancak kaynaktaki karakteristik olmayan 1 ile 20 Hz arasında değişen düşük frekanslı harmonik kırışımlarının önlenemediği belirlenmiştir. Bu durum DA ark fırınlarının yerleşim sistemleri ile aynı şebekeden beslenmelerini engellemektedir. Bu da fırınların uzun mesafelerden özel bir hattan beslenmelerini zorunlu kılmaktadır. Yine de bağlı oldukları şebekeye bu gibi zararlı etkilerinin giderilebilmesi için seri aktif ve paralel aktif güç filtrelerinden oluşan Birleşik Güç Kalite Düzenleyicileri (BGKD) ile donatılması gerekmektedir.

Seri Aktif Güç Filtresi (SAGF). Kullanımının amacı, şebeke ile fırın arasında hem harmonik yalıtımı sağlamak hem de ark fırını besleyen kaynaktaki kırışıma etkisini gidermektir. Paralel Aktif Güç Filtresi (PAGF) kullanımının amacı ise, akım harmoniklerinin giderilerek, reaktif güç ve negatif bileşen akımını düzenlemektir. Ayrıca her iki aktif güç filtresinin bağlandığı doğru gerilim barasındaki regülasyon sağlandığından, DA kondansatör kapasite ihtiyacında önemli miktarda azalma sağlamaktadır, SAGF devresi. Yalıtılmış Kapılı Transistorlu (IGBT) ve Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonlu (SPWM) gerilim kaynağı invertöründen oluşmaktadır.

SAGF nin çalışması ile tristörlü doğrultucunun meydana getirdiği şönt, pasif filtreye giden akım harmoniklerini büyük miktarda azaltarak, şönt pasif filtre ile şebeke arasında paralel rezonans tehlikesi ihtimalini zayıflatmaktadır.

PAGF devresi, üç fazlı gerilim kaynağı eviricinin, gerilim yükseltici transformatör üzerinden şebekeye paralel bağlanmasından oluşmaktadır. PAGF' nin esas görevi, fliker (kırılma) kompanzasyonu anında seri aktif filtreden büyük değerde aktif güç akarken bile her iki filtrenin beslendiği DA barasının regülasyonunu sağlamaktır. Şönt aktif güç filtresinin reaktif güç kompanzasyonu yapabilme yeteneği olduğu bilinmektedir. Bu filtre BGKD' da gerekli şönt filtre ihtiyacını artırmak için, reaktif güç kompanzasyonu amacı ile kullanılmamalıdır. BGKD' nin yanında DA ark fırını besleyen 12 darbeli tristörlü doğrultucunun meydana getirdiği önemli miktardaki 5. ve 7. harmonik akımlarına ayarlı bir pasif filtre konulması gerekmektedir. Eğer 1. ve 7. harmonik filtreleri iyi ayarlanmamışlar ise şebeke ile filtre arasında oluşabilecek rezonans sonucu bu harmonik akımlar kuvvetlendirilebilir. PAGF ayrıca bağlı olduğu şebekeden beslenen diğer nonlineer yüklerin harmonik akımlarını kompanse etmektedir. Bu yüzden PAGF harmonik akımlarına yüksek direnç gibi davranan SAGF' den önce şebekeye bağlanmalıdır. BGKD' e PAGF' i şebekeden firma veya fırından şebekeye doğru düşük frekanslı aktif güç dalgalanmalarını kaynağa güç verecek şekilde ayarlamaktadır. PAGF ile pasif paralel güç filtresi arasında etkileşimi önlemek için araya SAGF bağlanmaktadır. Şekil-2.10 'da uygulama seması gösterilmektedir . (Birbir, 1999)



Şekil 2.10 Birleşik Güç Kalite Düzenleyici olarak pasif filtrelerle paralel ve seri aktif güç filtresinin DA ark fırınında kullanılması. (Birbir, 1999)

## 2.12 Örnek Olarak Bir Ark Fırını Tesisinin İncelenmesi

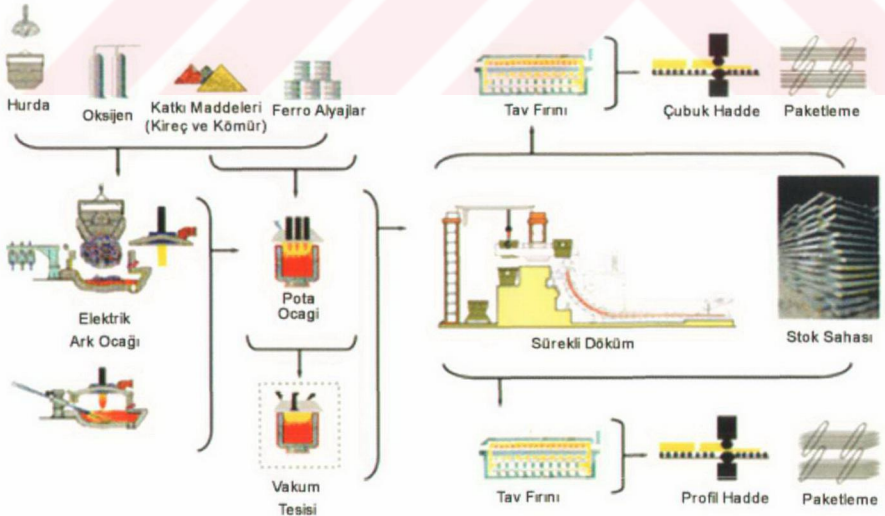
### 2.12.1 Firma Bilgileri

Kroman Çelik Sanayi A.Ş. Demir Çelik yarı mamül ve mamüllerini üretmek ve ticaretini yapmak amacı ile 25 Haziran 1966 tarihinde kurulmuştur.

Kroman Çelik Sanayii A.Ş. 90 MVA gücünde 100 ton DC ve 36 MVA gücünde 50 ton kapasiteli 2 adet elektrik ark ocağı, 15 MVA gücündeki 90 ton kapasiteli pota ocağı ve iki adet altı yollu sürekli döküm makinası ile üretim yapmakta olup toplam yıllık kapasitesi 1.100.000 tonu bulmaktadır.

Profil Haddehanesi tesislerinde 80 - 160 NPU, 100 - 160 NPI ve 90 - 120 mm. eş kenar köşebentler imal edilmekte olup yıllık kapasite yaklaşık 100.000 tondur. Çubuk Haddehanesi tesislerinde 8 mm ile 32 mm arası düz ve 8 mm ile 20 mm arası nervürlü çubuklar imal edilmektedir. Yıllık kapasite yaklaşık 200.000 tondur.

### 2.12.2 Üretim Akışı



Şekil 2.11. Kroman Çelik Fabrikası Üretim Akışı.

Üretim akışına kısaca bakılacak olursa; hurda, oksijen katkı maddeleri (kireç ve kömür) ve ferro alyajlar girdi olarak kabul edilir. Bunların büyük bir kısmı şekildende anlaşılacağı üzere Elektrik Ark ocağına ve bir kısımda pota ocağına girdi olarak girerler. Bun döngüde elektrik ark ocağı ve pota ocağı arasında yine alt bir döngü vardır. Elektrik ark ocağındaki çıktılar; pota ocağına girdi olarak girerler ve pota ocağı çıktıları ise vakum tesisine girdi olarak kabul edilirler. Pota ocağı ve vakum tesisi çıktıları; sürekli döküm döngüsüne girdi olarak girerler. Sürekli döküm tesisinden stok sahasına çıktılar alınır. Ayrıca iki ayrı tav fırını; profil ve çubuk haddeleme işlemleri için çalışırlar. Bunları girdileri yine sürekli döküm prosesinden gelmektedir. Çubuk ve profil haddeleme işlemlerinden sonra çıkan ürünler ayrı ayrı paketleme işlemine tabi tutulurlar.



### 2.3 Kroman Çelik Fabrikasından Ark Fırını Resimleri



ekil 2.12 Ergitme İşleminin başlaması.



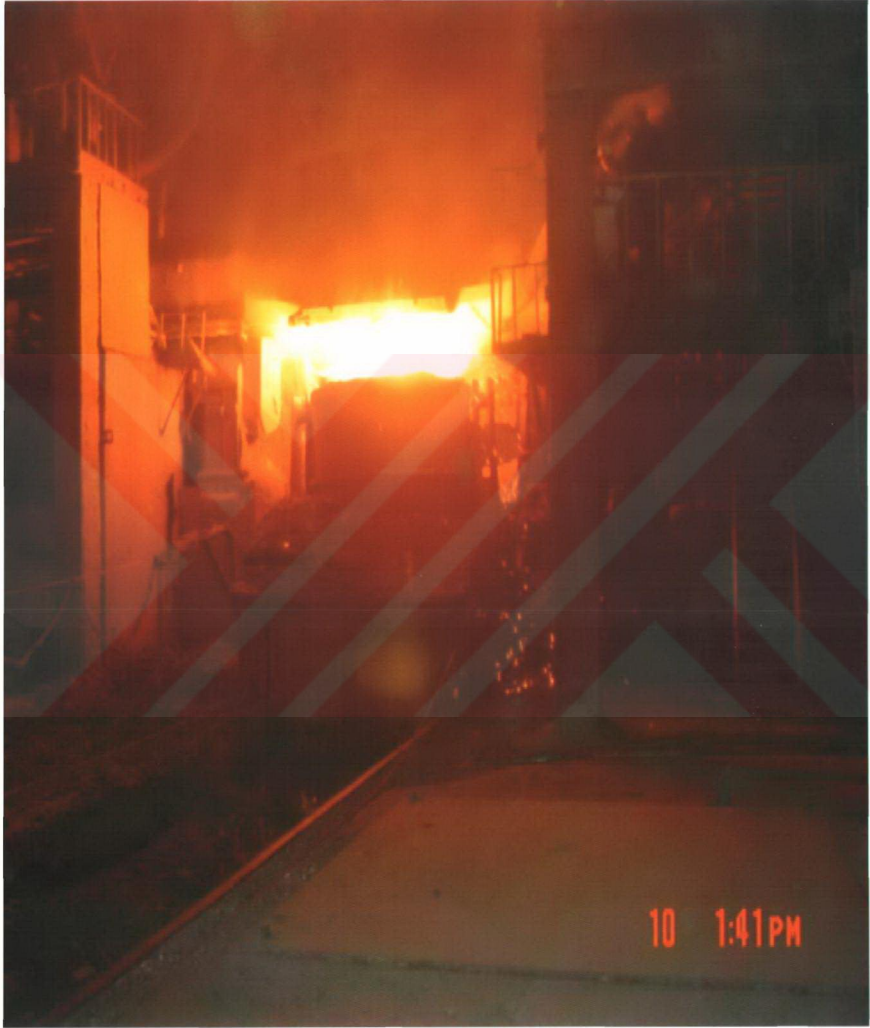
Şekil 2.13 Fırın kapağının açılması.



Şekil 2.14 Kapağın açılmasından sonra devam eden ergitme işlemi.



Şil 2.15 Ark Fırınının kapağının kapatılması.



2.16 Pota Fırınının kararlı hale gelmesi.



Şil 2.17 Fırında Ergitme İşleminin tamamlanması.



il 2.18 Ark Fırınının kapağının açılması.



Şekil 2.19 Potanın taşınması .



ekil 2.20 Hurdaların taşınması.

(Kroman Çelik)

## BÖLÜM 3 HARMONİKLERLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR

### 3.1 Harmonikli Devrelerde Efektif Değer

#### 3.1.1 RMS – Efektif Değer Ölçümü

Devre kesicilerde meydana gelen beklenmedik açılmalar ticari ve endüstriyel tesislerin çoğu için önemli problem kaynağıdır. Açıklanamayan ve rastgele ortaya çıkan bu açılmaların her zaman için bir nedeni olması gerekir. Problemin en çok karşılaşılan iki nedeni vardır. Birinci muhtemel neden, özellikle kişisel bilgisayarlar ve diğer elektronik cihazlar gibi bazı yüklerin devreye girmesi sırasında ortaya çıkan aşırı akımlardır. İkinci muhtemel neden ise devreden geçen akımın çok daha yüksek olan gerçek değerinden farklı ölçülmesidir.

Gerçek akım değerinin düşük ölçülmesi modern tesislerde bile sık sık meydana gelen bir olaydır sağlıklı ölçüm yapan güvenilir dijital test aletlerine rağmen neden yanlış ölçümler yapılmaktadır? Kullanılan ölçü aletlerinin, çoğunlukla, dalga şekli bozulmuş akımların ölçülmesi için uygun olmaması bu sorunun cevabı olmaktadır ve günümüzdeki akımların çoğu dalga şekli bozulmuş akımlardır.

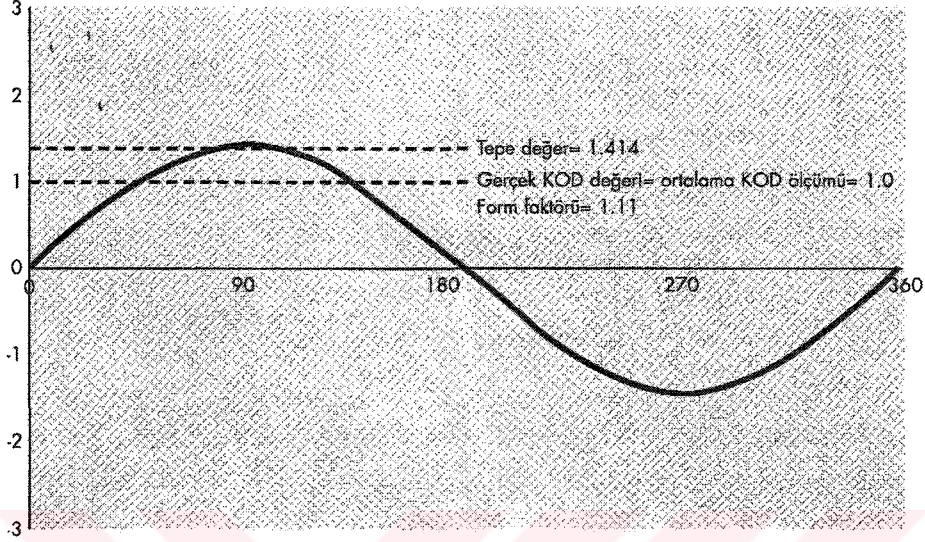
Dalga şekli bozulmuş akım, özellikle kişisel bilgisayarlar, elektronik balastlı flüoresan lambalar ve değişken hızlı sürücüler gibi doğrusal olmayan yükler tarafından çekilen harmonik akımlardan kaynaklanmaktadır. Şekil 3.1.2'de, bir bilgisayarın çektiği tipik bir akım dalga şekli görülmektedir. Açıkça görüldüğü gibi bu bir sinüs eğrisi değildir ve sinüs eğrisi ölçen aletler kullanılarak ölçüm ve hesaplama yapılamaz. Bu nedenle, güç sistemlerinin performans analizi ve problem çözümlerinde sinüzoid dışı akım ve gerilim ölçümlerinde uygun, doğru cihazların kullanılması son derece önemlidir.

#### 3.1.2 RMS-Gerçek Değer Nedir ?

Bir alternatif akımın Karesel Ortalama Değeri (Root Mean Square), belli bir direnç şeklindeki yükte aynı miktarda ısı meydana getiren doğru akımın değeridir. Alternatif akımın bir dirençte meydana getirdiği ısı miktarı, dalga şeklinin tam bir devrindeki akım ortalamasının karesi ile orantılıdır. Diğer bir ifade ile; oluşan ısı, karesel ortalama ile orantılıdır, dolayısıyla akım değeri karesel ortalamanın karekökü ile yani RMS ile orantılı olmaktadır. (Kare alındığı için sonuç daima pozitiftir, bu nedenle polarite sözkonusu olmaz.) Şekil 3.1.1'de görülen ideal bir sinüs eğrisi için RMS değeri, tepe değerin 0.707 katıdır ( 1.414 çarpı RMS değeridir). Diğer bir ifade ile, RMS değeri 1 Amper olan ideal sinüs eğrisi akımının tepe değeri 1.414 Amper olacaktır. Bir dalga formunun bütününün ortalaması (negatif yarım devir ters çevrilerek) alındığında ortalama değer, tepe değerin 0.636 katı, veya RMS değerinin 0.9 katı olur. Şekil 3.1.1'de iki önemli oran vardır:

$$\text{Tepe faktörü} = \text{Tepe değeri} \div \text{RMS değeri} = 1.414 \quad (3.1.1)$$

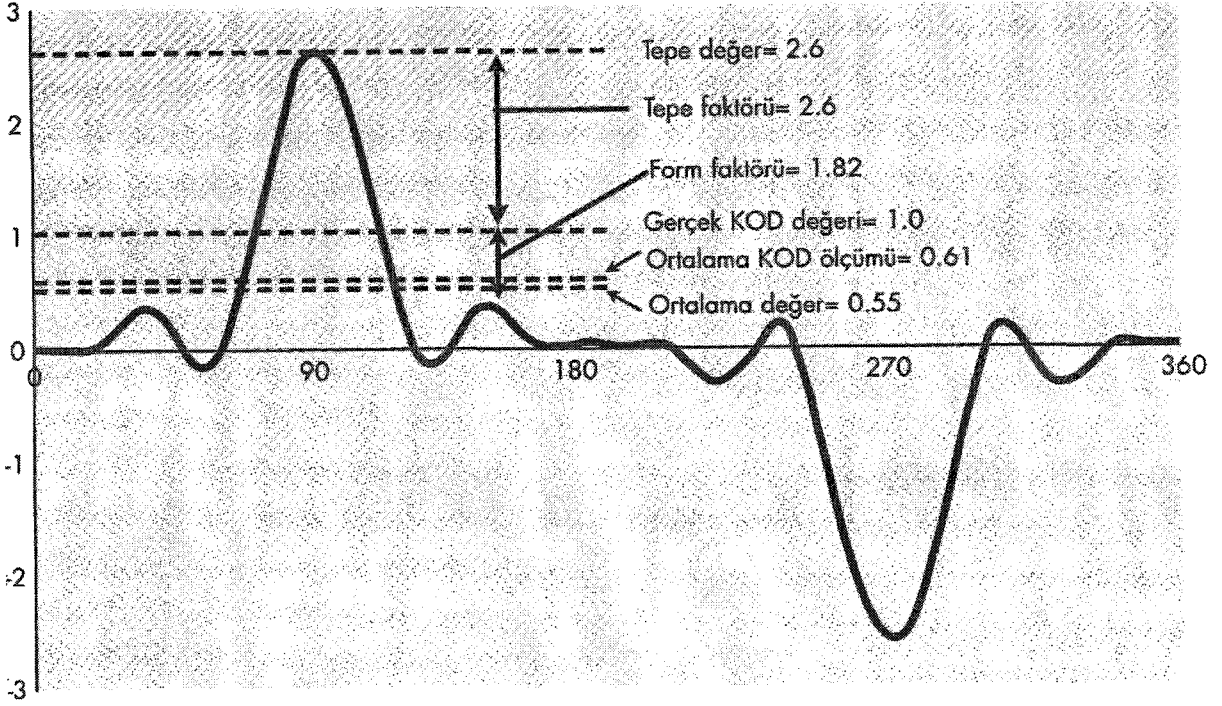
$$\text{Form faktörü} = \text{RMS değeri} \div \text{Ortalama değeri} = 1.111 \quad (3.1.2)$$



Şekil 3.1.1 İdeal Sinüs eğrisi

İdeal sinüs eğrisinin ölçülmesinde - sadece ideal bir sinüs eğrisi için- basit bir ölçüm yapılarak ortalama değer ( $0.636 \times \text{tepe}$ ) bulunur ve form faktörü (1.111) ile çarpılarak (tepe değerinin  $0.707$  ile çarpımı demektir) RMS değeri elde edilir. Tüm analog (ortalama, sargı hareketinin ataleti ile belirlenmektedir) ölçü aletlerinde, eski ve yeni dijital multimetrelerin çoğunda bu yaklaşım esas alınır. Bu teknik, 'RMS kalibreli ortalama ölçüm' tekniği olarak tanımlanmaktadır.

Söz konusu yaklaşım, sadece ideal sinüs formu için geçerlidir. Ancak gerçek uygulamalarda ideal sinüs eğrisi yoktur. Şekil 3.1.2'de verilen akım dalga formu bilgisayarda çizilmiştir. Buradaki gerçek RMS değeri 1 Amper'dir, ancak tepe değeri çok daha yüksek ( $2.6$  Amper) civarındadır ortalama değeri ise çok daha düşüktür ( $0.55$  Amper).






Şekil 3.1.2 Bir bilgisayarın çektiği akımın tipik dalga şekli.

Bu dalga şekli için ölçüm bir RMS kalibreli ortalama ölçüm cihazı ile yapıldığında, 1 Amper olan gerçek değer yerine 0.61 Amper civarında yaklaşık %40 kadar daha düşük bir değer okunacaktır. Farklı dalga şekillerinin iki farklı tip ölçü aleti ile yapılan ölçümlerine ait örnekler Çizelge 3.1.1'de verilmektedir. Gerçek RMS ölçen bir alet ölçüm anındaki akım değerinin karesini ve zamana göre ortalamasını alır ve bu ortalamanın karekökünü ekranda gösterir. Güvenilirliği tam olmak kaydıyla, dalga şekli ne olursa olsun aletin gösterdiği sonuç kesinlikle doğrudur. Güvenilirlik hiçbir zaman mükemmel olmayacağından iki faktörün gözönünde tutulması gerekir. Bunlardan biri frekans diğeri de tepe faktörüdür. Güç sistemlerinde, genel olarak 50'nci harmoniklere, örneğin 2500 Hz frekansa kadar ölçüm yapmak yeterli olmaktadır. Tepe değer ile RMS değeri arasındaki oranı gösteren tepe faktörü, kullanılacak ölçüm aletinin seçimi açısından önemlidir; tepe faktörünün yüksek olması halinde dinamik aralığı geniş ve dolayısıyla çevrim devre hassasiyeti yüksek bir aletin kullanılması gerekir. Tepe faktörü büyüklüğü en az üç olmalıdır.

İki tip ölçü aleti, bozuk dalga şekillerinin ölçümünde farklı sonuçlar vermelerine karşın ideal sinüs şekli ölçümlerinde aynı sonucu verirler. Aslında ölçü aletleri bu şekilde kalibre edilmektedir ve her ölçü aletinin kalibrasyon onaylı - ancak sadece sinüs şekilleri için kullanılmak üzere olması gerekir. Gerçek RMS ölçüm aletleri yaklaşık 30 yıldır kullanılmaktadır, başlangıçta özel ve pahalı olan bu aletler elektronikteki gelişmeler paralelinde, gerçek RMS değerini sağlıklı ölçebilen taşınabilir multimetreler olarak

geliştirilmiştir. Geliştirilmiş kaliteli aletler sadece belli başlı firmalar tarafından imal edilmekle birlikte her zaman herkes tarafından ucuz bir fiyatla temin edilebilir.

Multimetre tipi	Sinüs eğrisine cevap	Kare dalgaya cevap	Tek faz diyot redresöre cevap	3Ø diyot redresöre cevap
				
Ortalama cevaplı	Doğru	Yüzde 10 yüksek	Yüzde 40 düşük	Yüzde 5-30 düşük
Gerçek KOD	Doğru	Doğru	Doğru	Doğru

Çizelge 3.1.1 Ortalama ve gerçek RMS değer karşılaştırılması.

### 3.1.3 Düşük Ölçümlerin Yol Açtığı Sonuçlar

Elektrik devre elemanları, genellikle, aşırı ısınma öncesindeki ısı kayıplarına göre sınıflandırılırlar. Örneğin; kablolar, kullanılacakları tesisattaki özel koşullar ve maksimum çalışma sıcaklığı dikkate alınarak sınıflandırılmakta ve seçilmektedir. Harmoniklerle kirlenmiş akımların RMS değeri, ortalamayı gösteren bir aletle ölçülen değerden daha yüksek olacağından, gereğinden daha küçük kablo seçimi yapılacak ve kullanım sırasında kabloda aşırı ısınma meydana gelecektir. Doğal olarak kablo izolasyonu zarar görecektir, kablonun ömrü kısılacak ve yangın riski ortaya çıkacaktır. Benzer şekilde; busbarlar, baralardan konveksiyon ve radyasyon yoluyla yayılıp kaybolan ısı ile baraların direnci nedeniyle oluşan ısı hesaplanarak ölçülenebilir. Bu ısı transferi ile ısınmanın birbirine eşit olduğu sıcaklık busbarların çalışma sıcaklığıdır. Bu şekilde yapılan hesaplama ve ölçülendirme neticesinde izolasyon ve diğer destek malzemelerinin erken arıza yapmaları önlenmektedir. Aynen kablolarda olduğu gibi, gerçek RMS değerinin hatalı ölçülmesi daha yüksek çalışma sıcaklıklarına yol açacaktır. Öte yandan, kablolara kıyasla busbarların fiziksel ölçüleri daha büyük olduğundan deri olayı (skin effect) kendini daha çok gösterecek ve çalışma sıcaklıklarında ilave yükselmeye neden olacaktır. (European COPPER Institute,2001)

Sigortalar ve devre kesicilerin termal elemanları gibi elektrik güç sistemlerinde yer alan diğer komponentler de ısı transfer özelliklerine göre sınıflandırıldıklarından bunların seçiminde de RMS akımı esas alınmaktadır. Beklenmedik devre açılmalarının temel nedeni burada yatmaktadır akım beklenilenden daha yüksektir, böyle bir ortamda uzun zaman çalışan bir devre kesicisinin açılması doğal karşılanmalıdır. Zira, devre kesiciler ısıya karşı hassastırlar ve ne zaman açılacakları önceden bilinemez. Neticede; karşı karşıya kalınan maddi kayıplar çok yüksek olabilir, bilgisayar sistemlerinde veri kayıpları meydana gelir, işlemler kontrol dışı kalır,vs.

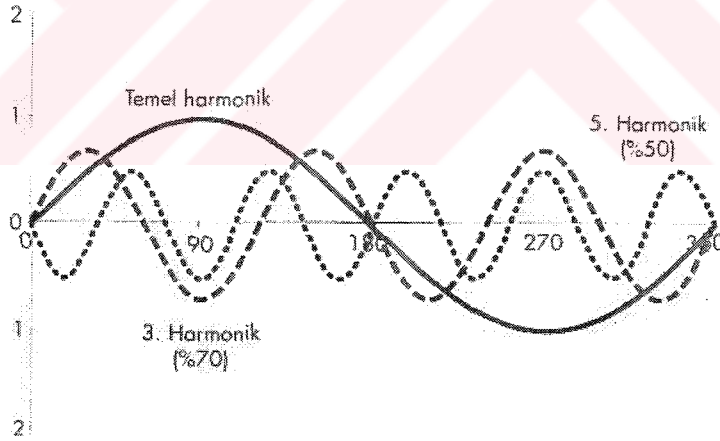
### 3.1.4 RMS Ölçümünün Yorumlanması

Önemli sayıda doğrusal olmayan yüklerin (PC'ler, elektronik balastlar, kompakt flüoresan lambalar, vs) bulunduğu bir tesisatta gerçek RMS ölçümü yapmak şarttır. Ortalama değeri gösteren aletler % 40'a varan bir oranda daha düşük değerler verir ve kabloların, devre kesicilerin yanlış seçimine, dolayısıyla da riskli sonuçların ve devre açılmalarının meydana gelmesine neden olur.

### 3.2 Harmonikler

Elektrik sistemlerinde harmonik akımların ortaya çıkması yıllar öncesine dayanır. Harmonikler, ilk kez, demiryollarının elektrikli donanımı sırasında alternatif akımın doğru akıma çevriminde kullanılan cıvalı ark redresörlerinde ve değişken hızlı DA sürücülerinde görülmüştür.

Harmonik frekanslar, şebeke frekansının integral katları şeklindedir. Örneğin, 50Hz temel harmonik için üçüncü harmonik 150Hz, beşinci harmonik ise 250Hz'dir. Şekil 3.2.1'de sinüs eğrisi üçüncü ve beşinci harmoniklerle birlikte gösterilmektedir.



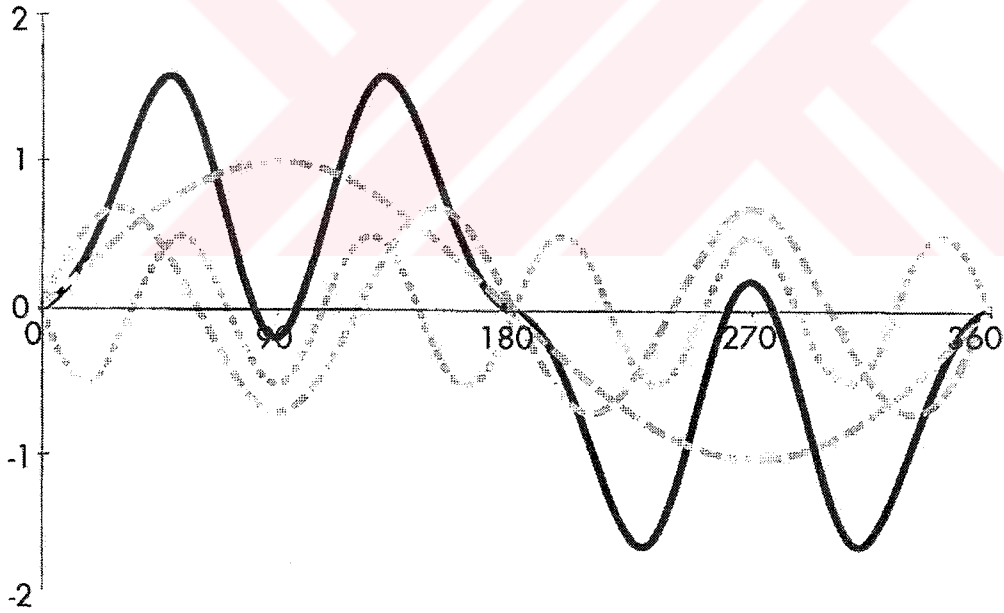
Şekil 3.2.1. Temel harmonikle 3. ve 5. harmonikler

Şekil 3.2.1'de, %70 üçüncü harmonik ve % 50 beşinci harmoniklerin ilave edildiği bir şebeke görülmektedir. Dikkat edilirse uygulamalarda karşılaşılan bozulmuş akım dalga şekilleri bu gösterilenden çok daha karmaşıktır ve daha çok sayıda harmonikler ile daha karmaşık faz ilişkileri içerirler.

Açıkça görüldüğü gibi bu dalga şekli bir sinüs eğrisi değildir ve dolayısıyla etkin değer-kalibreli multimetreler gibi normal ölçü aletleri ile yapılan ve ortalama değeri gösteren ölçümler yanlış olmaktadır. Her bir devirde iki değil altı adet sıfır noktası bulunur, bu nedenle

referans olarak sıfır noktasını alan cihazlarla yapılan ölçümler hatalı sonuçlar verecektir. Dalga şekli, şebeke frekansından farklı frekanslar içermektedir ve değerlendirmelerin de buna göre yapılması gerekir.

Harmonikler akım harmonikleri olarak oluşur ve olumsuzlukların çoğu da bu akımların etkisi ile ortaya çıkmaktadır; bu nedenle, enerji tesislerinde harmonikler söz konusu edildiğinde akım harmonikleri anlaşılmalıdır. Akım harmonikleri spektrumu hakkında bilgi edinmeden doğru sonuçlara ulaşmak mümkün değildir, buna rağmen toplam harmonik bozulmalarını (total Harmonic Distortion –THD) gösteren rakamlar hala kullanılmaya devam edilmektedir. Bir dağıtım sistemine yayılan harmonik akımlar, bu akımların taşınması ile alakalı olmayan alt devrelerde gerilim harmonikleri olarak taşınırlar. Ölçülen gerilim ve akım değerlerinin ayrı ayrı net bir şekilde tanımlanarak kullanılması son derece önemlidir. Alışlagelen şekilde; akım sapması ölçümleri 'I' sembolü ile (%35 THDI gibi), gerilim sapması ölçümleri de 'V' sembolü ile (% 4 THDV gibi) gösterilmektedir .



Şekil 3.2.2 Bozuk akım dalga şekli.

Şekil 3.2.2'de, % 70 üçüncü harmonik ve % 50 beşinci harmoniklerin ilave edildiği bir şebeke görülmektedir.

Yakın zamanlarda, harmonik üreten ekipmanların tiplerinde ve sayılarında hızlı artış olmuştur ve artış devam edecektir. Bu nedenle, tasarımcılar ve proje uzmanları tarafından harmoniklerin ve yan etkilerinin üzerinde önemle durulması gerekmektedir.

Bu bölümde, harmoniklerin neden ve nasıl oluştuğu, elektrik sistem ve donanımlarını nasıl etkiledikleri ve en düşük değerlere indirilebilecekleri açıklanmaktadır.

### 3.2.1 Harmonik Kaynakları

Doğrusal olmayan yüklerin hepsi harmonik yük akımları oluşturur. Bu kapsama giren yükler:

Tek fazlı yükler, örnek;

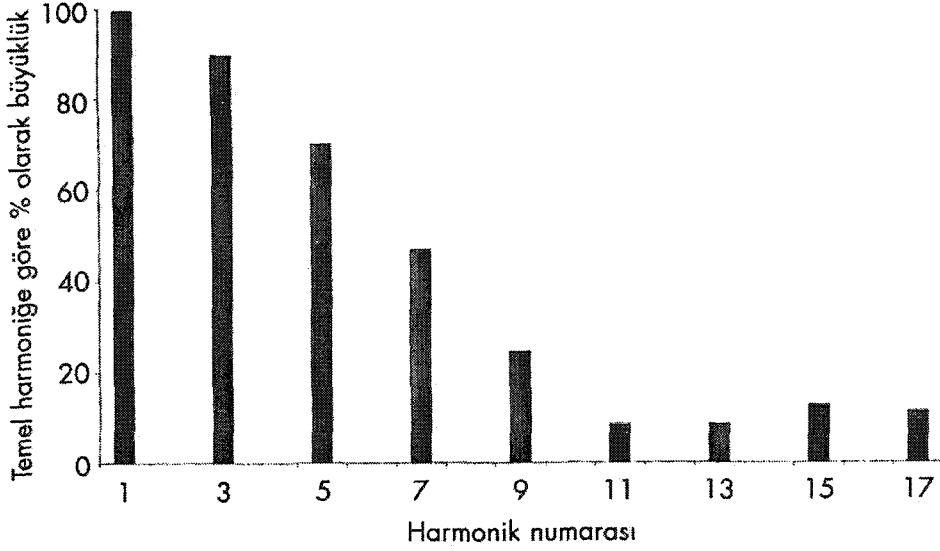
- Anahtarlabilir güç kaynakları (Switched mode power supplies-SMPS)
- Elektronik flüoresan aydınlatma balastları
- Küçük tip UPS (kesintisiz güç kaynağı) üniteleri

Üç fazlı yükler, örnek;

- Değişken hızlı sürücüler
- Büyük tip UPS üniteleridir.

Tek fazlı yükler: Anahtarlabilir güç kaynakları (Switched mode power supplies: SMPS): Modern elektronik ünitelerin çoğunda anahtarlabilir güç kaynakları (SMPS) kullanılmaktadır. Modern elektronik ünitelerinde, eski ünitelerden farklı olarak, geleneksel indirici transformatör ve redresör yerine bir kapasitör bataryasını doldurarak istenilen çıkış gerilim ve akım değerlerine uygun gücü üreten bir doğrultucu bulunmaktadır. Boyut, maliyet ve ağırlıkların önemli ölçüde azaltılması yanında hemen hemen istenilen her formda imal edilebilmeleri bu ünitelerin avantajları olarak ifade edilebilir.

Bu sistemlerin dezavantajı ise; elektrik kaynağından sürekli akım çekmek yerine, darbeler halinde büyük miktarlarda yüksek frekans bileşenli, üçüncü ve beşinci harmonikler içeren akım çekilmesidir. Hatlarda ve nötr-toprak bağlantılarındaki yüksek frekans bileşenleri süzmek üzere besleme girişinde basit bir filtre kullanılmaktadır. Ancak, girişe geri dönen harmonik akımlara karşı bu filtrenin etkinliği söz konusu olmaz.



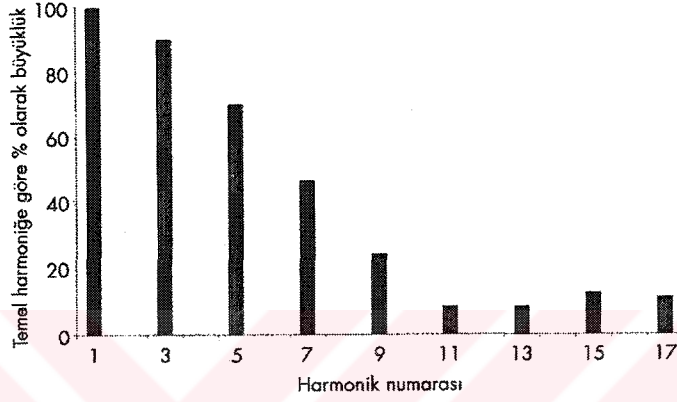
Şekil 3.2.3 Tipik bir PC’de harmonik spektrumu.

Tek fazlı UPS üniteleri, anahtarlanabilir güç kaynaklarına (SMPS) çok yakın özellikler taşımaktadır.

Yakın zamanlarda, büyük güç kullanılan tesislerde ‘düzeltilmiş güç faktörü’ konusuna gittikçe artan bir ilgi gösterilmektedir. Yaklaşımın amacı; besleme yüküne direnç niteliği kazandırarak giriş akımını, sinüs eğrisi şekline ve uygulanan gerilim ile aynı faza getirmektir. Bu yaklaşım, girişe yerleştirilen bir filtre yardımı ile sinüs eğrisine yakın bir şekilde ve yüksek frekanslı üçgen dalga şeklinde akım elde edilerek gerçekleştirilmektedir. Bir hayli karmaşık olması nedeniyle bu yaklaşım, endüstriyel ve ticari tesislerin büyük bölümünde kullanılan nispeten ucuz ünitelere henüz uygulanamamaktadır. Bu teknolojinin geniş kapsamlı uygulanmasından doğabilecek sorunların öğrenilmesi zaman alacaktır.

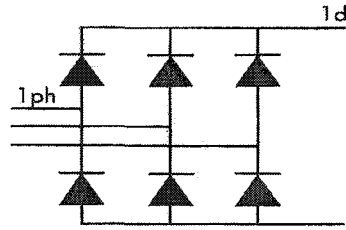
Flüoresan aydınlatma balastları: Elektronik aydınlatma balastları, verimliliklerinin daha yüksek olduğu düşünülerek son yıllarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Elektronik balastların verimliliği iyi kaliteli magnetik balasttan çok az daha yüksektir. Aslında, flüoresan lambaların verimliliği kullanılan elektronik balasttan değil, yüksek frekanstan kaynaklanmaktadır. Lambadaki akımın geri besleme kontrolü nedeniyle ışık seviyesinin uzun süre devam etmesi önemli bir avantaj gibi görülmekle birlikte bu uygulama lambanın toplam kullanım verimliliğini artırmaz, tam tersine azaltır. Akım harmoniklerinin oluşması bu lambaların en büyük dezavantajıdır. 'Güç-faktörü düzeltilmiş' olarak nitelenen tipler harmonik problemleri azaltılmış güçlü lambalardır, fakat fiyatları daha yüksektir. Küçük tip lambalar ise genel olarak “düzeltilmiş” özelliğine sahip değildirler.

Tungsten filamanlı lambalar yerine kullanılmak üzere piyasada satılmakta olan kompakt flüoresan lambalarda (CFL), 8 mm çaplı bükülmüş bir flüoresan tüpünü kontrol eden bağlantı kutusunun içine yerleştirilmiş minyatür bir balast bulunmaktadır. Örneğin, 60 wattlık bir filaman lambanın yerine kullanılan 11 wattlık bir CFL lambanın ömrü yaklaşık 8000 saattir. Böyle bir lambanın tipik harmonik akım spektrumu Şekil 3.2.4'de gösterilmektedir. Bu lambaların meskenlerde ve özellikle otellerde yaygın olarak kullanılmasıyla birlikte çok ciddi harmonik problemleri de ortaya çıkmaya başlamıştır.



Şekil 3.2.4 Tipik bir CFL harmonik spektrumu.

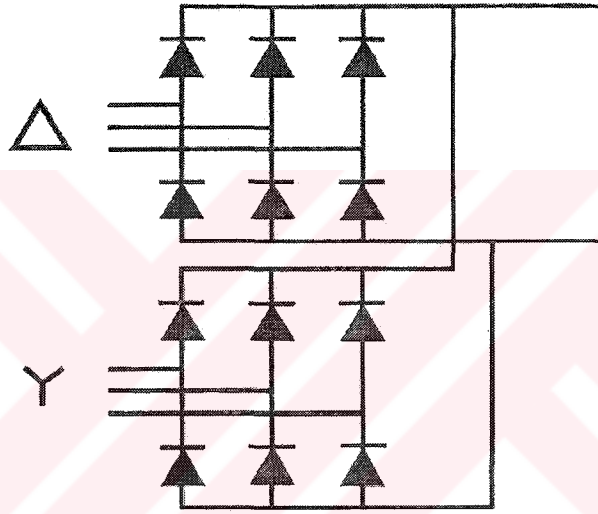
Üç fazlı yükler: Değişken hız kontrolörü, UPS üniteleri ve DA dönüştürücülerinde genellikle üç-faz köprü sistemi esas alınır ve DA çıkışında, her bir yarı periyotta (her fazın yarı devir sürecinde) altı darbe olduğundan bu sistemler “altı-darbeleri köprü” olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.2.5 Üç fazlı veya altı darbeleri köprü

Altı darbeleri köprü, altının katlarının her birinde bir fazla ve bir eksik olmak üzere  $6n \pm 1$  harmonikler üretir. Teorik olarak, her bir harmoniğin genliği harmonik numarasının tersidir; örneğin, beşinci harmonik % 20, onbirinci harmonik % 9, v.b. olacaktır.

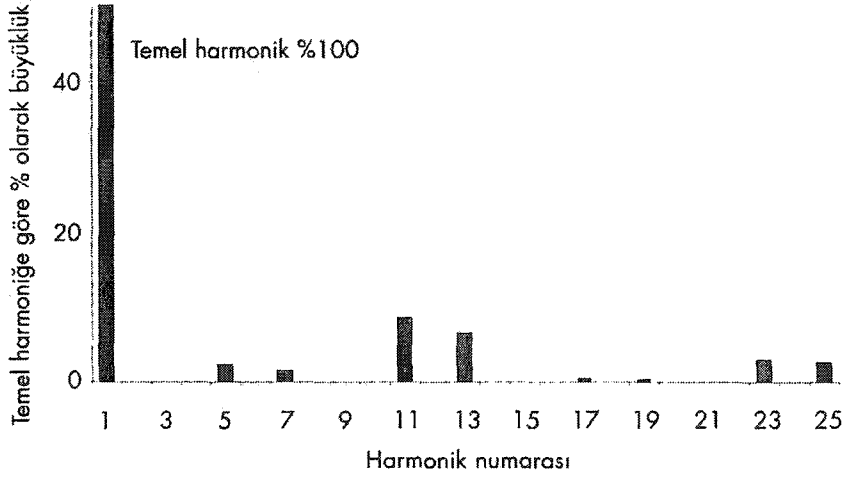
Tipik bir altı darbeleri köprü bağlantısı Şekil 3.2.5'de görülmektedir. Harmoniklerin genliği oniki-darbeleri bir köprü kullanılarak önemli ölçüde azaltılabilir. Bu, aralarında 30 derece faz farkı olan bir yıldız ve bir üçgen transformator sargısından beslenen iki adet altı-faz köprü demektir. 6n harmoniklerin ortadan kaldırılması teorik bazda mümkün olmakla birlikte, uygulamada harmoniklerin önlenmesi veya hangi ölçüde önenebileceği, dönüştürücülerin tipik olarak 20 ile 50 arasında bir faktör kullanılarak uygun duruma getirilmesine bağlı olmaktadır. 12n harmoniklerde değişiklik olmaz. Bu şekilde, toplam harmonik akım azaltılmakta ve aynı zamanda kalan yüksek harmonikler de kolaylıkla filtre edilebilmektedir.



Şekil 3.2.6 Oniki darbeleri köprü

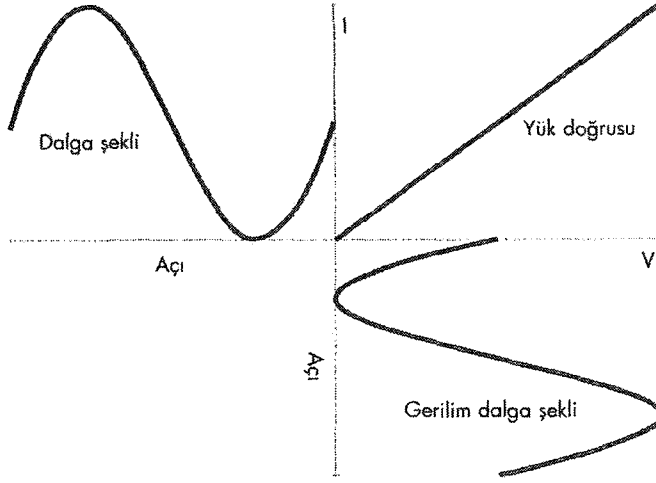
Donanım imalatçıları, örneğin filtre veya şok bobinleri kullanarak harmonik akım şiddetini azaltma yönünde çalışmalar yapmaktadırlar. Geçmişte, bazı imalatçıların bu çalışmalara dayanarak 'G5/3' standardına uyumlu donanımlar ürettikleri bilinmektedir. Ancak; G5/3 standardı, tesisatın tümüne uygulanan bir planlama standardıdır ve tesisatta yer alan her türlü donanıma ait bilgilere dayandırılmadıkça standard uyumundan söz edilemez. Daha ileri aşamada, faz farkı 15 derece olan paralel bağlı 12 darbeleri iki ünite ile darbe sayısı 24'e yükseltilecek, toplam harmonik akım yaklaşık

% 4.5'e kadar düşürülebilir. Oldukça karmaşık olan bu kontrol sisteminin maliyeti de yüksek olacağından ancak zorunlu hallerde kullanılması söz konusudur.



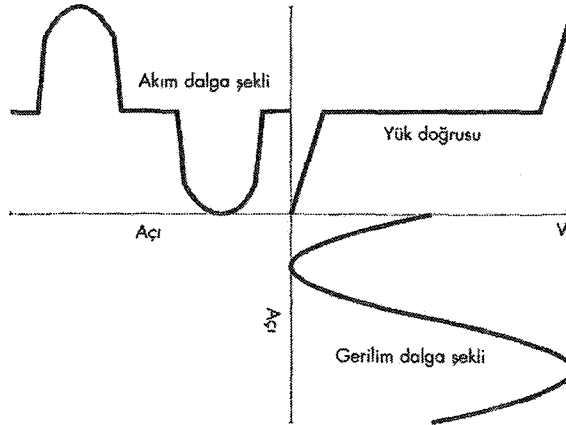
Şekil 3.2.7 Tipik bir 12 darbeli köprü harmonik spektrumu.

Teorik esaslar olarak harmoniklerin oluşumu: İdeal, temiz bir sistemde akım ve gerilim Dalgaları sinüs eğrisi şeklindedir. Uygulamada, tatbik edilen gerilim ile devredeki akım ilişkisi doğrusal olmadığı zaman sinüs eğrisi şekline uymayan akımlar oluşur. Sadece doğrusal devre elemanlarının - direnç, endüktans ve kapasite yer aldığı basit bir devreden geçen akım ile tatbik edilen gerilim (belirli bir frekansta) arasında belli bir oran vardır. Dolayısıyla, tatbik edilen gerilim sinüs eğrisi şeklinde ise, Şekil 1.19'da gösterildiği gibi, evreden sinüs eğrisi şeklinde bir akım geçecektir. Tatbik edilen gerilim ile meydana gelen akım arasındaki ilişki yük-doğrusu şeklindedir ve Şekil 3.2.8'da doğrusal yük olarak görülmektedir. Görülebileceği gibi reaktif eleman içeren bir devrede gerilim ve akım dalga şekilleri arasında bir faz kayması olur, güç faktörü düşer, fakat devre doğrusal olarak kalır. Şekil 1.20'de, tipik bir anahtarlanabilir güç kaynağının giriş aşamasına benzer şekilde, yükün basit bir tam dalga redresör ve kapasitör olduğu durum görülmektedir. Bu durumda; sadece, tatbik edilen gerilim, kapasite bataryasındaki gerilimin üzerine çıktığı zaman devreden akım geçer, diğer bir ifade ile, şekilde görüldüğü gibi gerilim, sinüs eğrisinin tepe noktasına yakın olduğunda akım geçmeye başlayacaktır. (European COPPER İnstitute,2001)



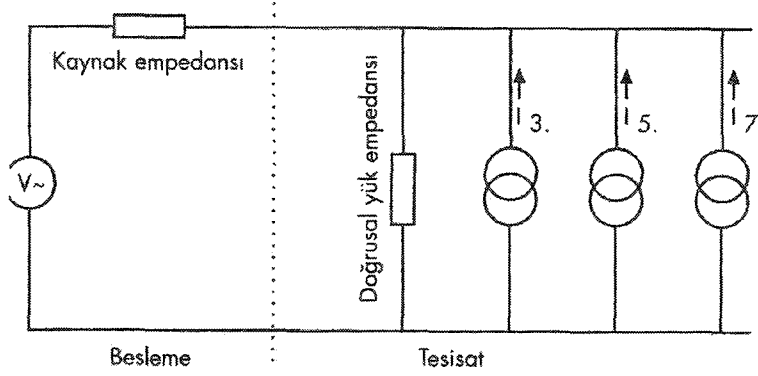
Şekil 3.2.8 Doğrusal bir yükte akım dalga şekli.

Uygulamada yük doğrusu (ve bu durumda akım dalga şekli) örnekte gösterilenden çok daha karmaşıktır; simetrisizlik, histerezis ve yüke bağlı olarak kırılma noktalarında ve eğimlerde değişiklikler olabilir. Herhangi bir periyodik dalga şekli, harmonik frekanslarda bir miktar sinüs eğrileri ile birlikte temel harmonik sinüs eğrisi şekline dönüştürülebilir. Böylece; Şekil 3.2.9'da görülen bozulmuş akım dalga şekli, temel harmonik yanında belli oranda ikinci harmonik artı belli oranda üçüncü harmonik (otuzuncu harmoniğe kadar) ile birlikte gösterilebilir. Pozitif ve negatif yarı periyotlarda aynı şekil ve büyüklükte olan simetrik dalga şekillerinde tüm çift sayılı harmonikler sıfırdır. Yarım dalgalı redresörlerin yaygın olarak kullanıldığı dönemlerde sık karşılaşılan çift harmoniklere günümüzde oldukça ender rastlanılmaktadır.



Şekil 3.2.9 Doğrusal olmayan yükte akım dalga şekli.

Doğrusal olmayan yüke ait eşdeğer bir devre Şekil 3.2.10 'da gösterilmektedir. Her bir harmonik frekans için bir akım kaynağı olacak şekilde çok sayıda akım kaynakları ile yük paralel bağlanarak lineer bir yük devresi modeli oluşturulabilir.



Şekil 3.2.10 Doğrusal olmayan yük eşdeğer devresi.

Yükten kaynaklanan harmonik akımların daha doğru bir ifade ile; yük tarafından şebeke akımından harmonik akıma dönüştürülen akımların- kaynak empedansı ve tüm paralel bağlantılardan geçerek devrenin her tarafında dolaşmaları gerekir. Neticede, besleme empedansında ve tesisatın her tarafında harmonik gerilimler ortaya çıkar. Harmonik kaynakları zaman zaman gerilim kaynakları olarak gösterilmektedir; şayet bu doğru olsaydı kaynak empedansının kaynaktaki harmonik gerilim şiddeti üzerinde hiçbir etkisinin olmaması gerekirdi. Gerçekte, harmonik gerilim şiddeti ile kaynak empedansı arasında (belli sınırlar dahilinde) oransal bir ilişki mevcuttur ve kaynak, bir akım kaynağı niteliğindedir.

Kaynak empedansları çok düşük olduğu için harmonik akımın yol açtığı harmonik gerilim bozulması da az olur ve ender durumlarda tesisteki değerin üzerine çıkar. Ancak, bu açıklama, yüksek harmonik akımların gerçekten mevcut olmasına rağmen harmonik problemi yokmuş gibi bir yanlış algılamaya yol açmamalıdır. Bu durum, toprağa geçen akımın bir voltmetre ile aranmasına benzer. Harmonik ihtimalinin söz konusu olması, veya olmadığının doğrulanması gerektiğinde akımın ölçülmesi şarttır.

Harmoniklerin yol açtığı problemler: Harmonik akımlar hem besleme sisteminde ve hem de tesisatta problemler yaratır. Etkiler ve çözümler farklı olup ayrı ayrı ele alınması gerekir; harmoniklerin tesisat içindeki etkilerinin kontrol altına alınmasına dönük önlemler, besleme sistemindeki bozukluklara karşı etkin olmayabilir ve bunun tersi de doğrudur.

Tesisat içindeki harmonik problemler:

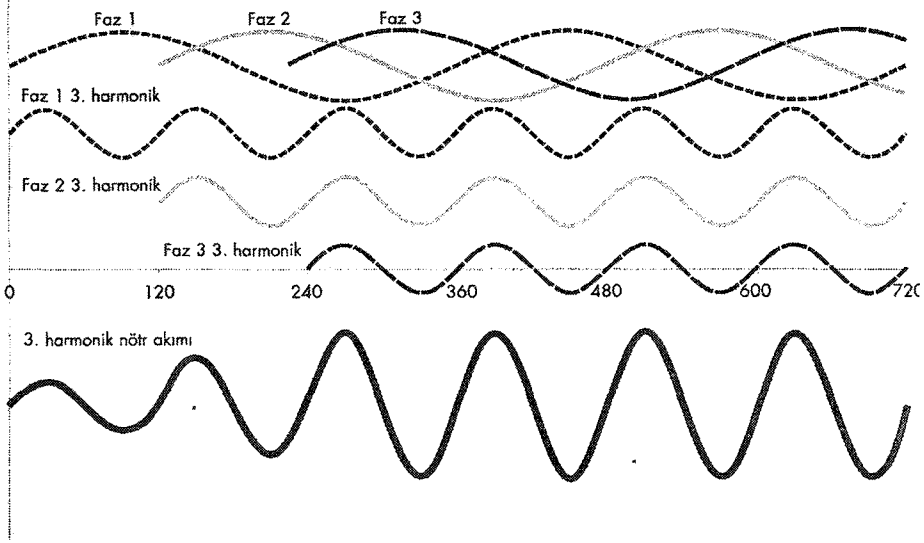
Harmoniklerin neden olduğu problem alanları:

- Harmonik akımların neden olduğu problemler:
- Nötrlerin aşırı yüklenmesi
- Transformatörlerin aşırı ısınması
- Devre kesicilerde istenilmeyen açılma (nuisance tripping)
- Güç faktörü düzeltme kapasitörlerinde aşırı gerilim
- Deri olayı
- Harmonik gerilimlerin neden olduğu problemler:
- Gerilim bozulması
- Asenkron motorlar
- Sıfır-kesme gürültüsü
- Harmonik akımlar besleme sistemine ulaştığında ortaya çıkan problemler

Bu alanlar ayrı ayrı aşağıdaki Bölümler'de özet olarak incelenmiştir.

Harmonik akımların neden olduğu problemler:

Nötr iletkeninde aşırı ısınma: Üç-fazlı bir sistemde gerilim dalga şekli her bir fazdan nötr yıldız noktasına  $120^\circ$ lik açı değişimi yapar ve her faz eşit olarak yüklendiğinde nötrdeki akım bileşkesi sıfır olur. Fazlar dengeli olarak yüklenmediği takdirde nötrden sadece denge dışı kadar net akım geçer. Eskiden, tesisatçılar (standartlara dayanarak) yarım-ölçüde nötr iletken kullanarak bu olgudan avantaj sağlıyorlardı. Ancak, şebeke akımlarının birbirini dengelemesine rağmen harmonik akımlar birbirini dengelememekte ve hatta temel harmoniğin üç katının tek sayılı çarpanları olan harmonik akımlar 'üçlü-N' harmonikleri halinde nötrde birleşmektedir. Bu etki Şekil 3.2.11'de görülmektedir. Diyagramın üst kısmındaki faz akımlarının aralıkları  $120^\circ$ 'dir. Her fazın üçüncü harmoniği, frekansın üç katı ve bir periyodun üçte biri olacak şekilde birbirinin benzeridir. Etkin olan üçüncü harmonik nötr akımı diyagramın en altında gösterilmiştir. Bu durumda, her fazdaki % 70 üçüncü harmonik akım nötrde % 210 şeklinde bir akım olarak sonuçlanmaktadır.



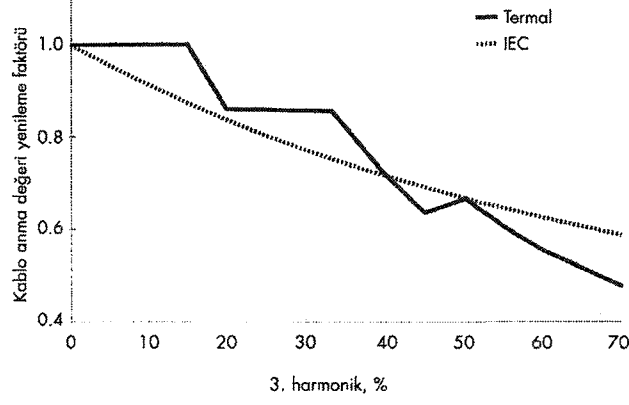
Şekil 3.2.11 Nötrde birleşen üçlü N akımları.

Ticari binalarda yapılan durum araştırmaları, yarım-ölçüdeki iletkenlerde, genel olarak nötr akımların, faz akımlarının % 150 ile % 210'u arasında olduğunu göstermiştir.

Proje tasarımcılarının bu konu ile ilgili yaklaşımlarında bazı karışıklıklar vardır. Tek-damarlı kabloların kullanıldığı durumlarda getirilecek en basit çözüm, ya iki ayrı iletken veya iki katı ölçüde geniş kesitli tek bir iletken oluşmuş bir nötr kullanmaktır. Çok-damarlı kabloların kullanılması durumunda çözüm bu kadar kolay olmaz. Çok-damarlı kablo seçilirken (örneğin, IEC 60364-5-523 standartları kullanılabilir.) yükün dengeli olduğu ve nötr iletkenin akım taşımayacağı kabul edilir, diğer bir ifade ile dört veya beş damardan sadece üç tanesinin akım taşıyacağı ve sadece bunlarda ısınma meydana geleceği kabul edilir. Bir kablonun akım taşıma kapasitesinin, izin verilen en yüksek sıcaklıkta kablonun tolere edebileceği ısı miktarına göre belirlenmesi nedeniyle üçlü-N akımları taşıyan kabloların tekrar ölçülendirilmesi gerekir. Yukarıda verilen örnekteki kablo, fazlarda üç ve nötrde iki olmak üzere beş birim akım taşımaktadır, halbuki seçim üç birim üzerinden yapılmıştır. Dolayısıyla bu kablonun seçiminde, kapasitenin (ileteceği akımın anma değerinin) yaklaşık % 60'ı dikkate alınarak tekrar hesap yapılmalıdır. (European COPPER Institute, 2001)

Bir üçlü-N kablo için, harmonik akımlar nedeniyle tavsiye edilen seçim faktörleri IEC 60364-5-523 bulunabilir. Yukarıda belirtilen termal yöntem ve IEC 60364-5-523 'deki tanımlamaya göre, üçlü-N harmonik içeriği ile kablo seçim faktörü ilişkisi Şekil 3.2.12'te gösterilmiştir.

Konunun yasal çerçevesi halen tartışılmakta olup bir kısım yeni gereksinim ve yardımcı bilgilerin yakın zamanda ulusal tesisat standartları kapsamına alınması beklenmektedir.



Şekil 3.2.12 Üçlü N harmonikleri için kablo anma değeri yenilenmesi.

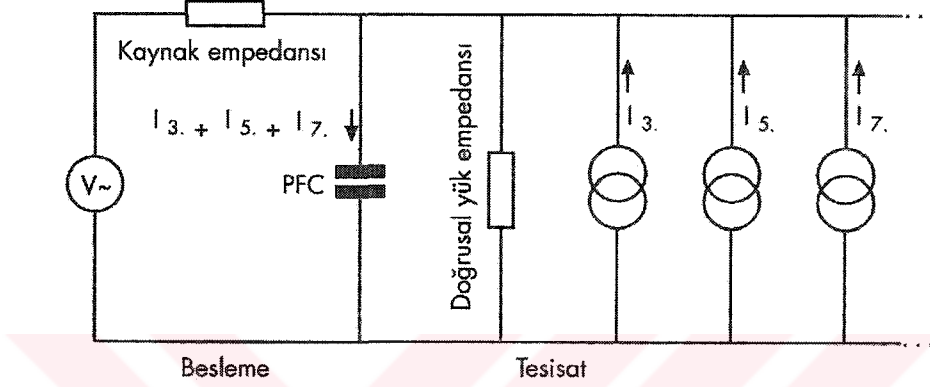
Transformatörlerdeki etkiler: Transformatörler harmoniklerden iki şekilde etkilenir. Birincisi, girdap akımı kayıplarıdır, normal olarak tam yükte % 10 olan kayıplar harmonik numarasının karesi ile orantılı olarak artar. Uygulamada, İT donanımların besleyen tam yükteki bir transformatörün toplam kayıpları, eşdeğerdeki doğrusal yüklerin beslenmesinde meydana gelen toplam kayıplardan iki kat daha fazladır. Bu durum çok daha yüksek çalışma sıcaklığı ve daha kısa bir ömürle sonuçlanır. Hatta, sözkonusu şartlar altında çalışan bir transformatörün yaklaşık 40 yıl civarında olan kullanım ömrü 40 güne düşebilir! Neyse ki, tam yükte çalışan transformatör çok azdır, yine de tesis seçiminde bu konunun dikkate alınması son derece önemlidir.

İkinci etki üçlü-N harmonikleri ile ilgilidir. Üçlü-N harmonikleri üçgen sargıya geldiklerinde hepsi aynı fazda oldukları için sargı içinde dolanırlar, etkin bir şekilde absorbe olmuşlardır ve besleme devresine ulaşmazlar. Bu nedenle, üçgen sargılı transformatörler izole özellikli transformatörler olarak yararlıdır.

Ancak, üçlü-N özelliği taşımayan diğer tüm harmonikler için durum farklıdır, bunlar devreye yayılırlar. Transformatörlerin anma değerlerinin belirlenmesinde, sirkülasyon akımlarının dikkate alınması gerekir.

Devre kesicilerinde istenilmeyen açılmalar: Artık miknatisiyet akım devre kesicileri (Residual current circuit breakers: RCCB), faz ve nötr iletkenlerdeki akımları toplayarak sonucun anma değerinin üzerine çıkması halinde harekete geçerek gücü yükten ayırırlar. Harmoniklerin mevcut olduğu sistemlerde “istenilmeyen devre açılmaları” iki nedenden kaynaklanır. Birincisi; elektromekanik olarak çalışan bir RCCB cihazında yüksek frekanslı bileşenlerin hatalı toplanması halinde cihaz devreyi kesebilir. İkincisi; harmonik üreten bir cihaz aynı zamanda gürültü üretir ve bu sesin cihazın güç kaynağı ile bağlantı noktasında filtre edilmesi

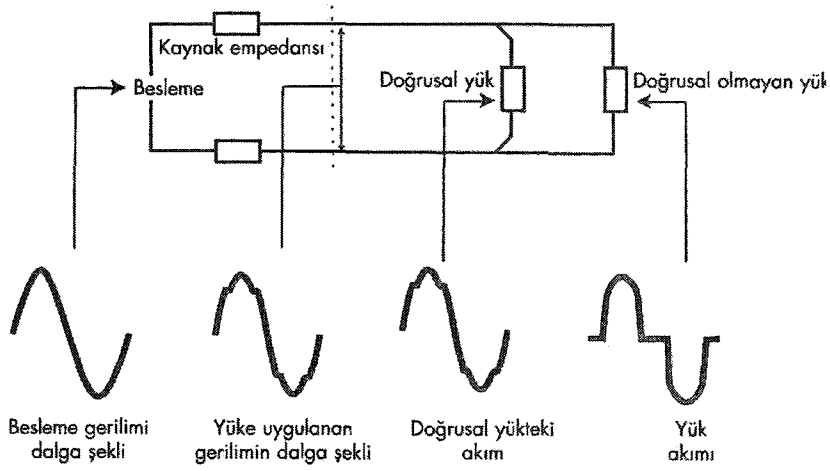
gerekir. Bu maksatla kullanılan filtrelerde normal olarak faz ve nötrden toprağa bağlı bir kondansatör bulunur ve bir miktar akım toprağa geçer. Toprağa kaçan bu akımın, standartlara göre 3.5mA'den az olması gerekir ve genellikle de çok daha düşüktür. Söz konusu cihazın başka bir devreye bağlı olması halinde kaçak akım miktarı yeterli düzeye yükselerek RCCB'yi açabilir. Bu sorunun en kolay çözümü, her biri daha az yükleri besleyen daha çok sayıda devreler kullanmaktır.



Şekil 3.2.13 PFC kapasitörlü doğrusal olmayan yüke ait eşdeğer devre.

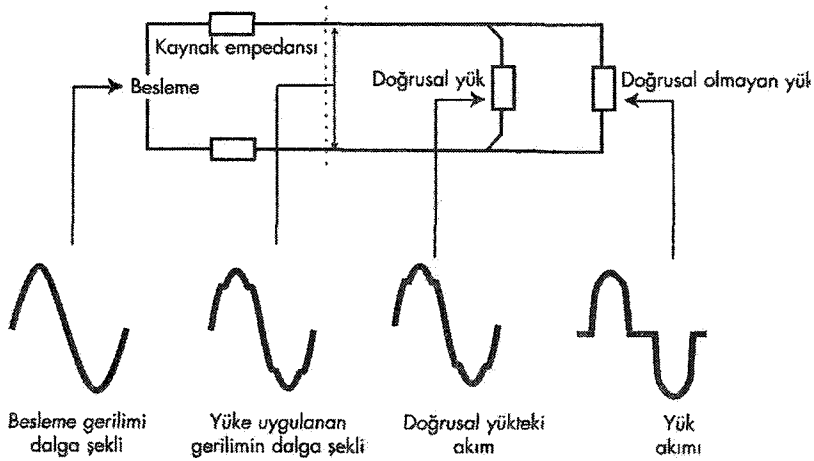
Minyatür devre kesicilerindeki (Miniature circuit breakers: MCB) 'istenilmeyen devre açılmaları' genellikle, harmonik akımları hesaba katmadan yapılan akım hesaplamaları veya basit ölçümler nedeniyle gerçekte devrelerden daha fazla akım geçtiği için ortaya çıkmaktadır. Portatif ölçü aletlerinin çoğu gerçek etkin değerleri ölçmez ve sinüs eğrisi şeklinde olmayan akımları % 40 daha farklı gösterebilirler.

Güç faktörü düzeltme kondansatörlerinin aşırı yüklenmesi: Endüksiyon motorları gibi endüktif yükler tarafından çekilen geri fazlı (lagging) akımı dengelemek için kapasitif - ileri fazlı (leading) faz açısında akım çekmek üzere güç faktörü düzeltme (PFC) kondansatörleri kullanılmaktadır. Şekil 3.2.13'de PFC kondansatörlü doğrusal olmayan yükteki bir eşdeğer devre görülmektedir. Frekans yükseldikçe PFC kondansatör empedansı düşmekte, genellikle endüktif olan kaynak empedansı yükselmektedir. Dolayısıyla, kondansatörün çok yüksek harmonik akımlar taşımaya kaçınılmazdır ve tasarımda harmonikler için özel önlemler alınmamışsa olumsuz sonuçlar ortaya çıkabilir.



Şekil 3.2.14 Doğrusal olmayan yükün neden olduğu gerilim bozulması.

Çok daha ciddi potansiyel bir problem ise; kondansatör ile besleme sistemindeki kaçak empedansın, harmonik frekansların birinde veya birine yakın olarak rezonansa geçmesidir (pek tabii ki, bu olay 100 Hz aralıklarda meydana gelecektir). Böyle bir durumda, kapasitör sisteminin çökmesine yol açabilecek kadar yüksek gerilim ve akımlar oluşabilir. Devreye, bileşimi en küçük harmonikte endüktif olacak şekilde, bir endüktans ile kondansatör bağlanarak rezonans önlenir. Bu şekilde, kondansatörden geçebilecek harmonik akım da sınırlanmış olur. Endüktörün fiziksel boyutları, özellikle düşük düzeydeki harmoniklerin mevcut olması halinde problem oluşturabilir.



Şekil 3.2.15 Doğrusal ve doğrusal olmayan yüklerin ayrımı.

Deri olayı: Alternatif akım, iletkenlerin dış yüzeyinden geçme eğilimindedir. Yüzey etkisi olarak bilinen bu özellik, yüksek frekanslarda daha belirgin olarak kendini gösterir. Güç besleme frekanslarında yüzey etkisi çok zayıf olduğundan normal olarak ihmal edilmektedir, fakat frekans yaklaşık 350 Hz üzerine çıktığında (yedinci harmonik ve üstü) önemli olmaya başlar, daha fazla kayıp ve ısınmaya neden olur. Harmonik akımların mevcut olduğu durumlarda, tasarımcıların deri olayını dikkate almaları ve buna göre kablo değerlendirmeleri yapmaları gerekmektedir. Problemin önlenmesine yardımcı olmak üzere çok damarlı kablolar veya izole edilmiş haralar kullanılabilir. Harmonik frekanslarda, haraların tespit düzenlerinde mekanik rezonans meydana gelmemesi için tasarımcıların bu konu üzerinde önemle durmaları gerekir.

Harmonik gerilimlerin yol açtığı problemler: Besleme sisteminin kaynak empedansı olması nedeniyle harmonik yük akımları, gerilim dalga şeklindeki harmonik gerilim bozulmalarının artmasına neden olur ("düz tepe" oluşmasının kaynağı da budur). Burada empedansın iki elemanı bulunmaktadır; bunlardan biri ortak birleşme noktasından (point of common coupling: PCC) gelen dahili kablo devresine aittir, diğeri ise ortak birleşme noktasında bulunan beslemeye ait eleman, yani lokal besleme transformatörüdür. Birincisi Şekil 3.2.14'te gösterilmektedir.

Doğrusal olmayan yükün çektiği bozulmuş akım, kablo empedansında bozulmuş bir gerilim düşümü meydana getirir. Ortaya çıkan bozulmuş gerilim dalga şekli aynı devreye bağlı doğrusal olanlar dahil diğer yüklerin hepsine yayılmakta ve sistemde harmonik akımların dolaşmasına neden olmaktadır.

Çözüm için, Şekil 3.2.15'da gösterildiği gibi, harmonik üreten yükleri besleyen devrelerin, harmoniklere karşı hassas olan yüklerin beslendiği devrelerden ayrılması gerekir. Burada, ortak birleşme noktasından gelen ayrı ayrı devreler, doğrusal ve doğrusal olmayan yükleri beslemekte, dolayısıyla doğrusal olmayan yükün yol açtığı gerilim bozulması, doğrusal yük devresini etkilememektedir.

Enerji kesilmesi halinde, bir UPS veya bir yedek generatör devreye girdiği zaman elektrik kaynağına ait empedanstan kaynaklanan gerilim bozulma şiddetinin çok daha büyük olacağı göz önünde tutulmalıdır.

Transformatör seçiminde çıkış empedansının yeteri kadar düşük tutulmasına ve kapasitesinin fazla ısınmalara karşı daha büyük seçilmesine dikkat edilmelidir. Transformatör tasarımı ve

seçimi konusunda bir önemli nokta da soğutma ile ilgilidir; cebri soğutma etkisine dayanarak transformatör kapasitesinin yüksek tutulması doğru bir yaklaşım değildir, aksi takdirde transformatördeki iç ısınma daha fazla olacak ve servis ömrü azalacaktır. Cebri soğutma sadece acil durumlarda kullanılmalı, transformatörün normal faaliyeti sırasında cebri soğutma yapılmamalıdır.

Asenkron motorlar:Harmonik gerilim bozulması, transformatörlerde olduğu gibi motorlarda da girdap akım kayıplarının yükselmesine neden olur. Ayrıca, statorda oluşan harmonik alanlar ilave kayıpların meydana gelmesine yol açar ve bu alanların herbiri motoru ileri veya geri farklı hızda dönmeye zorlar. Kayıpların yükselmesinin diğer bir nedeni de rotorda oluşan yüksek frekanslı akımlardır.

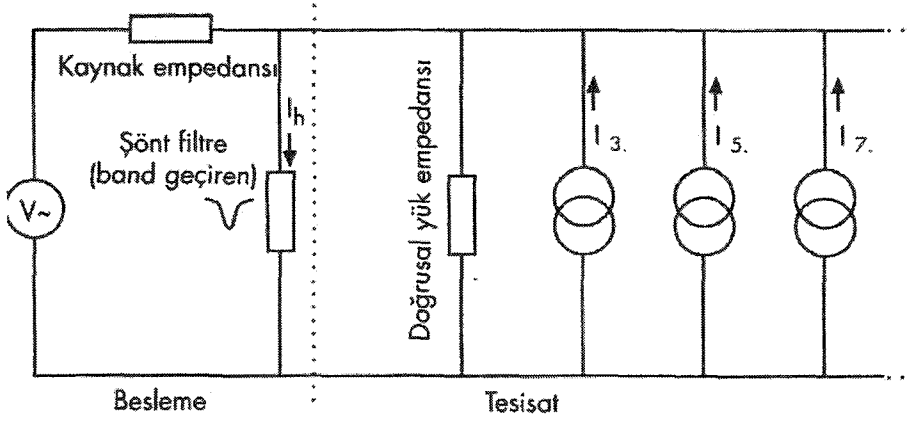
Harmonik gerilim bozulmasının mevcut olduğu durumlarda ilave kayıpları göz önüne almak üzere, anma değerleri yeniden belirlenmelidir.

Sıfırlama sorunu:Elektronik kontrolörlerin birçoğunda gerilimin sıfır volt olduğu an tesbit edilerek sistemin devreye alınması sağlanmaktadır. Bunun nedeni, sıfır gerilimde endüktif yüklerin devreye alınması sırasında geçici etkilerin (transients) oluşmamasıdır. Bu şekilde, elektromagnetik gürültü, bozucu etki (EMİ) ve yarı iletken anahtarlama aygıtlarındaki zorlanmalar azaltılabilmektedir. Besleme devresinde harmoniklerin ve geçici etkilerin mevcut olması halinde sıfırlama sırasında gerilim değişmesi hızlanmakta, sıfırlamanın tesbiti zorlaşmakta ve hatalı operasyonlar meydana gelmektedir. Herbir yarım periyottaki gerilim sıfırlaması birden fazla olabilir.

Besleme devresini etkileyen harmonik problemler: Besleme devresinden harmonik akım çekilmesi halinde akım ve kaynak empedansı ile orantılı olarak ortak birleşme noktasında (PCC) harmonik gerilim düşümünde bir artış meydana gelir. Genel olarak besleme devresi endüktif özellik taşıdığından frekans yükseldikçe kaynak empedansı da yükselir.

Doğal olarak, sistemden beslenen başka kullanıcıların çektiği harmonik akımlar ve bu kullanıcılara ait transformatörlerin de etkisi ile PCC noktasındaki gerilimde bozulma meydana gelecektir, diğer bir ifade ile herbir kullanıcıdan kaynaklanan ilave bir katkı söz konusudur.

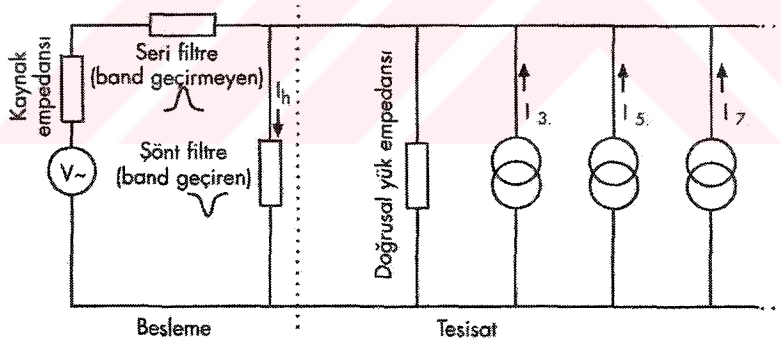
Kullanıcıların sistemi kirletmelerine ve birbirlerine zarar verecek etki yaratmalarına izin verilmesi düşünülemez, bu nedenle ülkelerin çoğunda elektrik dağıtımını yapan kuruluşlar çekilecek harmonik akım miktarını sınırlayan kurallar koymuşlardır. Bu kodların birçoğunda, yakın zamanda G5/4 (2001) ile değiştirilen ve 1995 yılında yayımlanmış olan UK Electricity Association'ın G5/3 kodu esas alınmıştır. (SARKUYSAN, European COPPER İnstitute,2002)



Şekil 3.2.16 Pasif harmonik şönt filtre.

Harmonikleri azaltıcı önlemler: Harmonik azaltma yöntemleri genel olarak üç gruba ayrılır; pasif filtreler, izolasyon ve harmonik azaltıcı transformatörler ve aktif çözümler.

Her yaklaşımın avantaj ve dezavantajları olup, ideal tek bir çözüm söz konusu değildir. Uygun olmayan ve etkinlikten uzak bir çözüm için masraf yapmak kolaydır; esas olan geniş kapsamlı bir araştırma yapmaktır.

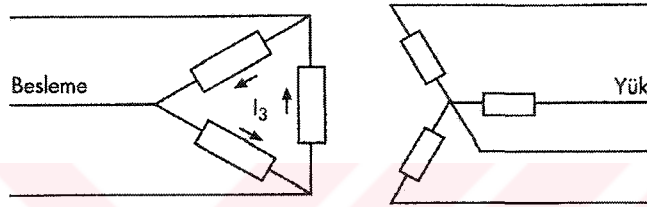


Şekil 3.2.17 Pasif seri ve şönt filtreler.

Pasif filtreler: Pasif filtreler, harmonik akımlar için düşük empedanslı devreler olarak kullanılırlar, harmonik akımlar besleme sisteminde değil filtre içinde dolaşmaktadır (Şekil 3.2.16). İhtiyaçlar doğrultusunda tek bir harmonik için veya geniş bir harmonik band aralığı için filtre tasarımı yapılabilir. Bazı hallerde, Şekil 3.2.17'de görüldüğü gibi, besleme sistemine geri dönebilecek akım oranını azaltmak üzere daha çok sayıda seri empedansların kullanıldığı komplike filtrelere ihtiyaç duyulabilir.

Zaman zaman, faz veya nötrde seri olarak bağlanan durdurucu filtrelerin kullanılması düşünülebilir. Seri bağlı filtrede, harmonik akımların kontrol altında tutulacağı ayrı bir devre yerine harmonik akımların bloke edilmesi amaçlanmıştır ve filtredeki harmonik gerilim düşümü yüksektir. Bu harmonik gerilim, besleme devresinin yük tarafında kendini gösterir. Besleme gerilimi, önemli ölçüde bozulmaya uğradığı için cihaz, tasarım ve garanti standartlarında belirtilen değerlerin dışındadır. Bazı cihazlar bu bozulmaya karşı nisbeten duyarsız, bazıları ise çok duyarlıdır.

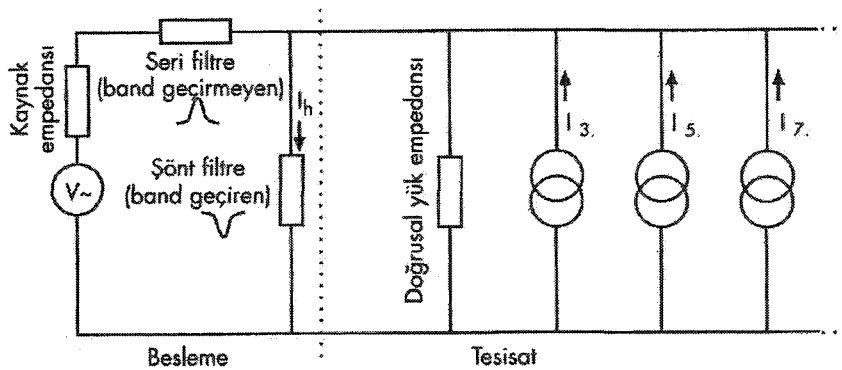
Seri filtreler özel durumlarda faydalı olabilir, uygulamaların dikkatli yapılması gerekir, genel maksatlı bir çözüm için önerilemez.



Şekil 3.2.18 Yıldız üçgen izolasyon transformatörü.

İzolasyon transformatörleri: Daha önce ifade edildiği gibi, üçlü-N akımları transformatörlerin üçgen sargılarında dolanırlar ve transformatör imalatçıları veya tasarımcıları açısından bir problem (ki fazlardan bir yük olarak her zaman göz önünde tutulmaları gerekir) olan bu özellik, üçlü-N harmoniklerin besleme devresine yayılmasını önlediği için sistem tasarımcıları açısından bir avantaj niteliğindedir.

Üçlü-N harmoniklerinin besleme devresinden izole edilmesi için 'zik-zak' sargılı bir transformatör de kullanılabilir. Zik-zak transformatörler, sargılararası özel faz ilişkisi olan yıldız bağlantılı oto transformatörler olup sargılar besleme sistemi ile şönt bağlantılıdır.



Şekil 3.2.19 Aktif harmonik şartlandırıcı.

Aktif filtreler: Yukarıda ifade edilen çözümler sadece belli harmoniklere uygulanır; izolasyon transformatörleri sadece üçlü-Nharmonikleri için, pasif filtreler ise kendi tasarımındaki harmonik frekans için geçerlidir. Bazı tesisatların içerdiği harmonikler yeterli derecede belirgin değildir. Örneğin, İT tesisatlarının çoğunda cihazların nicelikleri ve buldukları yerler ve dolayısıyla harmonik kültürü sürekli değişmektedir. Uygun bir çözüm aktif filtre veya aktif şartlandırıcıdır.

Aktif filtre bir şönt cihazıdır. Bir akım transformatörü, yük akımındaki harmonik miktarını ölçer ve bir akım generatörünü kontrol ederek bir sonraki devirde şişleme geri beslenen akımın aynısının üretilmesini sağlar. Harmonik akım aktif şartlandırıcı tarafından üretildiği için besleme devresinden sadece temel akım geçmektedir. Uygulamada, harmonik akım şiddeti % 90 oranında azaltılmakta ve harmonik frekanslardaki kaynak empedansı azaldığı için gerilim bozulması da azalmış olmaktadır.

Elde Edilen Gerçekler: Yaklaşık tüm modern elektrik ve elektronik donanımlar, anahtarlanabilir güç kaynağı (SMPS) veya belli bir güç kontrol ünitesi ve dolayısıyla da doğrusal olmayan bir yük ihtiva ederler. Doğrusal yükler nispeten, azdır ve parlak filamanlı ampuller ile kontrolsüz ısıtıcılar ifade edilebilecek belli başlı örneklerdir.

Donanım standartları, PC'ler gibi elektronik cihazların ürettiği harmonik kirlenmelerin önlenmesi açısından, bugüne kadar henüz etkin olarak yürürlüğe konulmuş değildir. Endüstriyel ve ticari alanlarda karşılaşılan harmonik problemlerin kaynağı olan bu tür cihazların yarattığı sorunlar devam etmektedir.

Yaptırımlar ile desteklenmiş güçlü Standartlar olmadan kullanımları gittikçe yaygınlaşan bu cihazların yarattığı harmonik kirlenmeler de artmaya devam edecektir. İş dünyası için risk kaynağı olan bu konunun

- yüksek tasarım uygulamaları yapılarak,
- doğru seçilmiş elektrik cihazları kullanılarak,
- uygun bakım prosedürleri geliştirilerek
- gerekli yatırımlar yapılarak

kontrol altında tutulması ve iyileştirilmesi gerekmektedir.

(SARKUYSAN, European COPPER İnstitute,2002)

### 3.3 3 Fazlı Sistemler İçin Güç Tanımları

Literatürde birçok güç tanımından bahsedilmiştir, ama bunlardan bazıları seçilmiştir. Eğer tek fazlı sistem sinüsoidal olmayan durumda ise, gerilim ve akım değerleri,

$$v(t) = V_o + \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cos(h\omega t + \varphi_h) \quad (3.3.1)$$

$$i(t) = I_o + \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} I_h \cos(h\omega t + \Phi_h) \quad (3.3.2)$$

Burada  $\omega$  temel bileşenin açısal frekansıdır.  $V_o$  ve  $I_o$  DC bileşenler,  $V_h$  ve  $I_h$  ise  $h$  inci harmonik gerilim ve akımın efektif değerleri,  $\varphi_h$  ve  $\Phi_h$  faz açılarıdır. Gerilim ve akımın efektif değerleri,

$$V = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} V_h^2}, \quad (3.3.3)$$

$$I = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} I_h^2}, \quad (3.3.4)$$

Her harmoniğin aktif gücü ve (Budeanu'nun) reaktif gücü, (Fu, T-H., and Wu, C-J; 2002)

$$P_h = V_h \cdot I_h \cdot \cos \theta_h \quad (3.3.5)$$

$$Q_h = V_h \cdot I_h \cdot \sin \theta_h \quad (3.3.6)$$

Olur. Burada  $\theta_h$  gerilim ve akım arasındaki açı farkıdır.

3 fazlı 4 telli sistem için, eşdeğer gerilim ve akımın RMS (efektif) değerleri şu şekilde tanımlanabilir. (Fu, T-H., and Wu, C-J; 2002)

$$V = [(Va^2 + Vb^2 + Vc^2)/3]^{1/2} \quad (3.3.7)$$

$$I = [(Ia^2 + Ib^2 + Ic^2)/3]^{1/2} \quad (3.3.8)$$

Böylece eşdeğer görünen güç  $S$

$$S = 3VI \quad (3.3.9)$$

olur. Eşdeğer gerilim ve akımın temel bileşenleri aşağıdaki gibi açıklanabilir.

$$V_1 = \left[ \frac{V_{a_1}^2 + V_{b_1}^2 + V_{c_1}^2}{3} \right]^{1/2} \quad (3.3.10)$$

$$I_1 = \left[ \frac{I_{a_1}^2 + I_{b_1}^2 + I_{c_1}^2}{3} \right]^{1/2} \quad (3.3.11)$$

Ve harmonik bileşenleri, (Fu, T-H., and Wu, C-J; 2002)

$$V_h = \left[ \sum_{h \neq 1} \left( \frac{V_{a_h}^2 + V_{b_h}^2 + V_{c_h}^2}{3} \right) \right]^{1/2} \quad (3.3.12)$$

$$I_h = \left[ \sum_{h \neq 1} \left( \frac{I_{a_h}^2 + I_{b_h}^2 + I_{c_h}^2}{3} \right) \right]^{1/2} \quad (3.3.13)$$

Temel görünen güç ise,

$$S_1 = 3 V_1 I_1 \quad (3.3.14)$$

Olur ve temel olmayan görünen güç ise,

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2} \quad (3.3.15)$$

$S_N$ , yük gücünün distorsiyon derecesini belirtmek ve kullanmak için verilmiştir.

Sinüsoidal olmayan koşullar için bir başka etkili yol ise

$$S_2 = P^2 + Q^2 + D^2. \quad (3.3.16)$$

(3.3.16) eşitliğindeki son bileşen D distorsiyon gücü olarak geçer. Böylece

$$P = P_1 + P_H \quad (3.3.17)$$

$$Q = Q_1 + Q_H \quad (3.3.18)$$

Temel ve harmonik bileşenleri, aşağıdaki gibi olurlar.

$$P_1 = P_{a1} + P_{b1} + P_{c1} \quad (3.3.19)$$

$$P_h = \sum_{h=1} (P_{ah} + P_{bh} + P_{ch}) \quad (3.3.20)$$

$$Q_1 = Q_{a1} + Q_{b1} + Q_{c1} \quad (3.3.21)$$

$$Q_h = \sum_{h=1} (Q_{ah} + Q_{bh} + Q_{ch}) \quad (3.3.22)$$

Bu durumda üç fazlı dengesiz bir durum ortaya çıkar, Temel pozitif bileşene ait aktif güç aşağıdaki gibi tanımlanır. (Fu, T-H., and Wu, C-J; 2002)

$$P_1^+ = 3V_1^+ \cdot I_1^+ \cdot \cos \theta_1^+ \quad (3.3.23)$$

Burada  $V_1^+$  ve  $I_1^+$  Temel frekanstaki pozitif bileşen gerilim ve akımdır. Temel pozitif bileşen görünen gücü ise

$S_1^+$  aşağıdaki gibi olur,

$$S_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \quad (3.3.24)$$

Bu yüzden dengesiz temel görünen güç  $S_{u1}$  aşağıdaki gibi tanımlanır,

$$S_{u1} = \sqrt{(S_1^2 - S_1^{+2})} \quad (3.3.25)$$

Toplam güç faktörü PF;

$$P_F = P / S \quad (3.3.26)$$

Deplasman güç faktörü, sadece temel bileşenleri içeren;

$$dP_F = P_1 / S_1 \quad (3.3.27)$$

Pozitif bileşen deplasman güç faktörü;

$$dP_{F+} = P_1^+ / S_1^+ \quad (3.3.28)$$

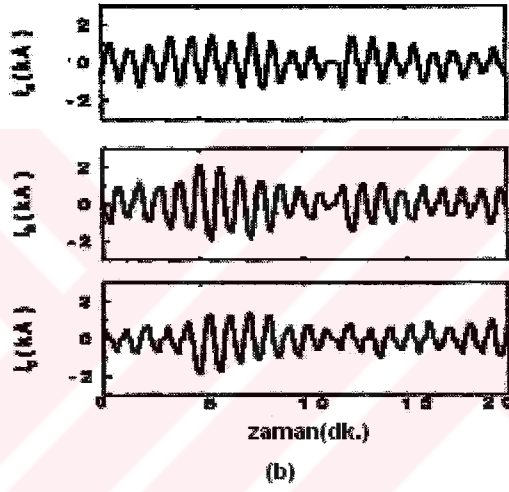
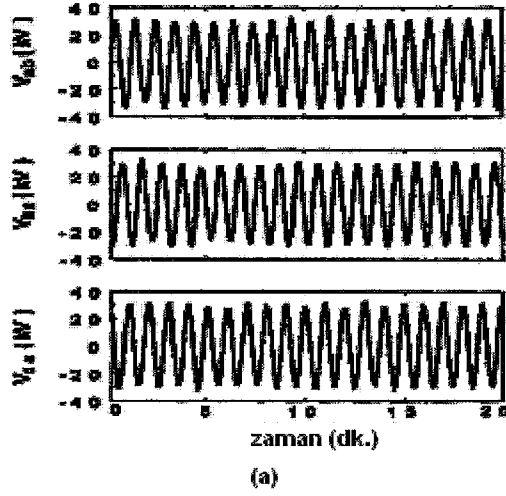
Harmonik akımları için transformatörün yüklenme limitlerini anlamak için K faktörü parametresi kullanılır.

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} (hI_h)^2}{\sum_{h=1}^{\infty} (I_h)^2} \quad (3.3.29)$$

### 3.4 Ark Fırınları için Güç Tanımlamaları , Akım Gerilim Dalga Şekilleri

Grafik 3.4.1 (a) ve (b) erime sırasındaki DC ve AC ark fırınlarının 20 dakika içindeki voltaj ve akım dalga formlarını gösterir. Dalgalanma olayı, yarı periyot, distorsiyon, ve dengesizlik akım dalga formunda rahatça gözlenebilmektedir. Bu görülüyor ki DC fırın beslemesindeki 3 fazlı doğrultucu akımlar kararlıdır, sinüsoidaldir ve dengelidir. Bunun yanında tek doğrultuculu DC fırın beslemesinin akımları bozulmuştur.





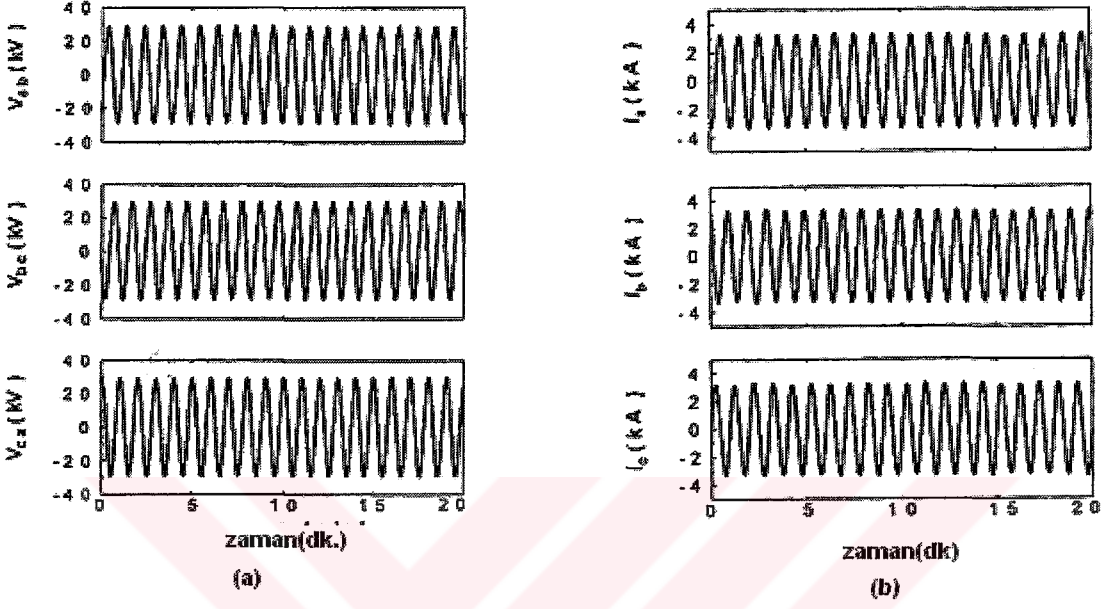
Şekil 3.4.1 20 dakikalık periyot içindeki AC ark fırını beslemesi dalga formları.  
(a) Voltaj. (b) Akım

### 3.4.1 Güç Büyüklüğü

Çizelge 3.4.1, 20 dakikalık süre içindeki istatistiksel güç büyüklüklerinin ölçüm bilgilerini içermektedir. AC fırın için, S, P, Q ve D değerlerinin maksimum ve minimumları arasındaki fark büyüktür. Buda yük dalgalanmasının şiddetli olduğu anlamına gelir. Bu nedenle ana değer, tamamıyla yük karakteristiklerini temsil etmez. DC ark fırını bilgilerine dayanarak, AC ark fırınında olduğundan daha az yük dalgalanması vardır ve maksimum ve minimum değerler arasındaki fark daha küçüktür. Tek doğrultucu DC ark fırını 5. , 7. , 11. , 13. harmonik akımlarını ürettiği için distorsiyon gücü D ve temel olmayan görünen güç  $S_N$  3 doğrultuculu DC fırında olduğundan daha büyüktür.

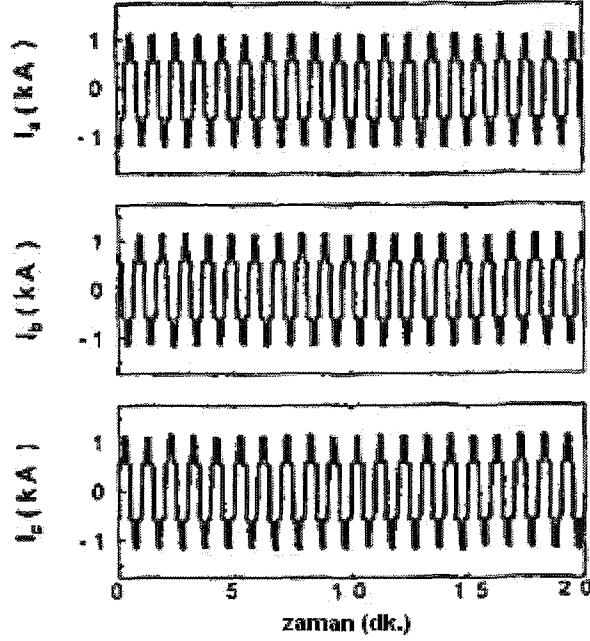
Temel olmayan görünen güç  $S_N$  harmonik distorsiyonun derecesini gösterebilir.  $S_N / S$  değerleri (Tek rektifierli DC fırın için) 0.239 dan 0.249 kadardır. Ama üç rektifierli DC fırının

SN / S değerleri yaklaşık olarak sıfırdır. Üç altı – darbeleri rektifierların 18 – darbeleri bağlantısı harmonik üretimini azaltabilir. AC fırın için, SN / S oranı 0.221 dir. Ama maksimum değeri minimum değerinin yaklaşık altı katıdır, buda geçici harmonik probleminin ortaya çıkması demektir.



Şekil 3.4.2 20 dakikalık süre içinde AC ark fırınının beslemesinin dalga formları(3 rektifierlı) (a) Voltaj (b) Akım.

AC fırın için,  $Q1 / N$ 'in anlamı 0.844 tür ve bu değer tek rektifierlı DC fırın için 0.928 dir. Böylece konvensiyonel ölçme metodu, sadece temel reaktif gücü için olan, güç hattı kaybını ve güç oranı kaybını karşılamamaktadır. Üç rektifierlı AC fırın için,  $Q1 / N$  değeri yaklaşık olarak birdir, bu aynı zamanda düşük harmonik distorsiyonunu karşılar. Fakat DC fırın için (tek rektifierlı),  $Q1 / N$  değeri 0.919 dan 0.935 kadardır. Bu da harmoniklerin etkilerinin bir sonucudur.



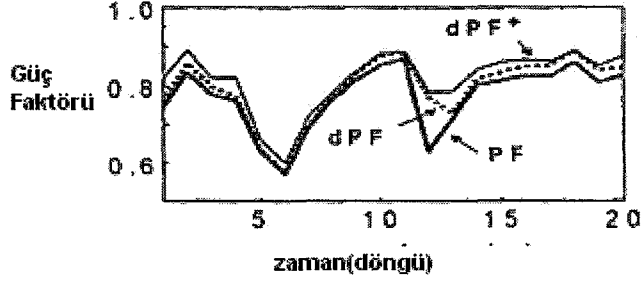
Şekil 3.4.3 20 dakikalık periyot içindeki DC ark fırını beslemesinin (tek rektifierlı) akım dalga formları. (Fu, T-H., and Wu, C-J; 2002)

### 3.4.2 Güç Faktörü

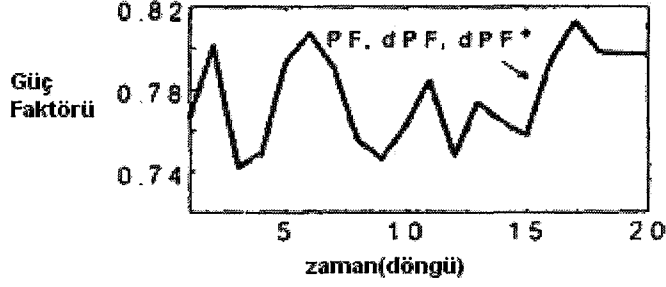
Şekil 3.4.4 20 dakikalık süre içindeki güç faktörü değerlerini göstermektedir. Çizelge 3.4.2 AC ark fırınının beslemesinin dalga formları göstermektedir. AC ark fırını için,  $dPF+ > dPF > PF$  eşitsizliği vardır. Bu sadece üç fazlı dengesizliğin olmadığını, aynı zamanda harmonik kirlenmesinin de olduğunu gösterir. Minimum ve maksimum değerler arasındaki fark fazladır. Yük dalgalanmaktadır.

Üç doğrultuculu DC ark fırın beslemesi için, üç güç faktörü de pratik olarak aynıdır. Harmonikler ve dengesizlikler göz ardı edilebilir. Bunun yanında, bir tane altı darbeli DC fırın varsa  $dPF +$

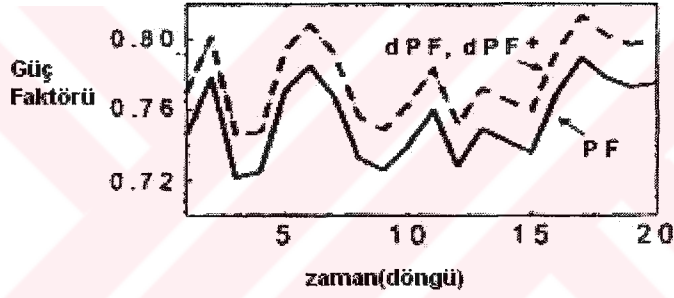
$\approx dPF > PF$  denklemi ortaya çıkar. Bunun nedeni büyük 5., 7., 11. ve 13. harmonik akım bileşenlerinin var olmasıdır. Maksimum ve minimum değerler arasında küçük bir fark vardır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.4.4. Güç faktörü değerlerinin karşılaştırılması. (a) AC ark fırını beslemesi. (b) 3 rektifierlı ark fırını beslemesi. (c) tek rektifierlı ark fırını beslemesi. (Fu, T-H., and Wu, C-J; 2002)

### 3.4.3 Ark Fırınlarında Harmonikler

18- Darbeli bağlantıya sahip DC fırın için harmonik üretimi iyice azalmıştır. (Ama eğer sadece bir veya iki doğrultucu kullanılmış ise)

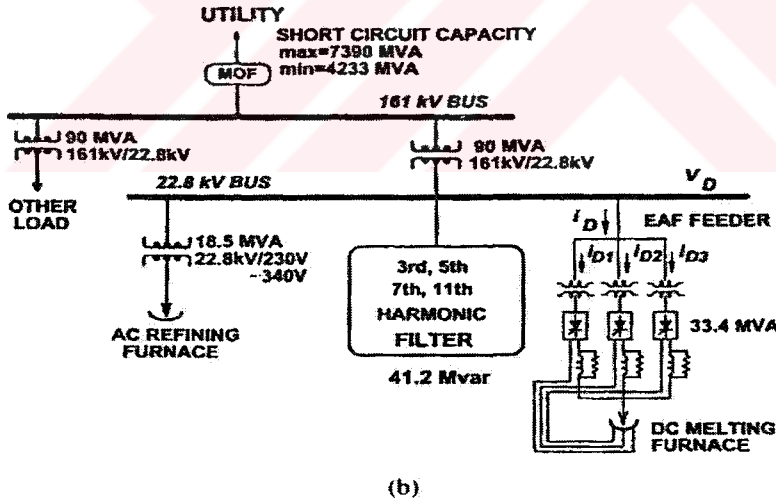
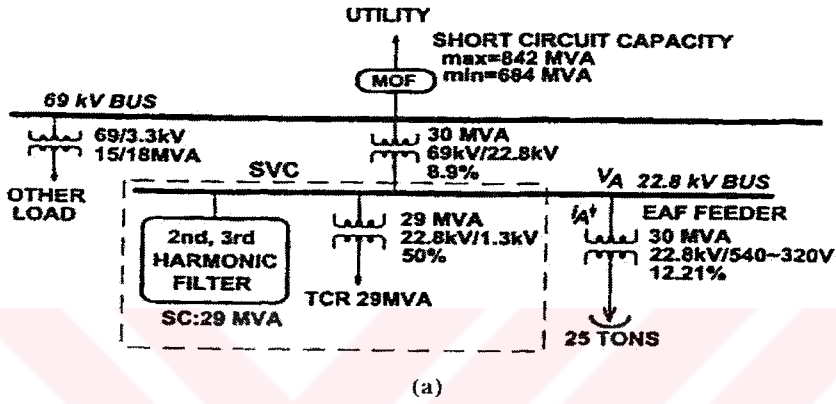
Harmonik gürültü hala araştırılması gereken bir konudur. Öte yandan, bir SC ark fırınının çalışması dikkate alındığında, geçici harmoniklerin oluşması kaçınılmaz olur.

Şu rahatça görülebilir ki tek doğrultuculu DC ark fırınının K-faktörü en büyüktür ve üç doğrultuculu DC fırının değeri ise, en küçüktür.

### 3.5 AA(AC) ve DA(DC) Ark Fırımlarının Harmonikler Açısından Karşılaştırılması

#### 3.5.1 Sistemin Açıklanması

Şekil 3.5.1(a)'da 69-kV'luk AC elektrik ark fırını çelik tesisinin tek hat diyagramı verilmiştir. Fırın boyutu 25 tondur. Statik var kompanzasyonu (SVC), tristör kontrollü reaktörden (TCR) ve ikinci ve üçüncü sıra harmonik filtrelerinden oluşur. SVC, voltaj dalgalanmaları için reaktif güç kompanzasyonu sağlar.



Şekil 3.5.1 Elektrik ark fırını çelik tesisinin tek hat diyagramı (a) AC ark fırını (b) DC ark fırını. (Fu, T-H., and Wu, C-J; 2002)

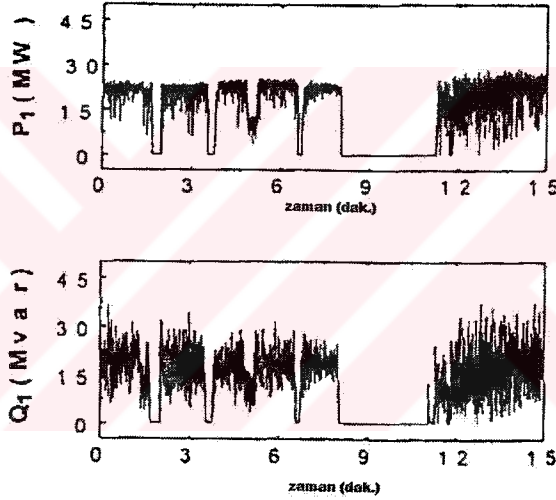
Düşük sıralı harmonik filtre seçiminin nedeni, paralel rezonansı ve harmonik amplifikasyonu önlemektir.

DC ark fırınlı 161- kV'luk çelik tesisinin tek hat diyagramı Şekil 3.5.1(b)'de gösterilmiştir. 100MVA 18- darbeleri konvertör, 3 fazlı 6 darbeleri rektifier'dan meydana gelmiştir. Rektifierler

arasındaki faz farkı  $20^\circ$  dir. Genellikle 3 rektifier, aynı yük üzerinde çalışarak harmonik akımlarının üretimini azaltmaya çalışırlar. Ama bazı özel periyotlarda, sadece bir ya da iki rektifier, hurda metallerin kazana düşmeleri için kullanılır. Ayrıca rafine işleminde kullanılmak üzere küçük bir AC fırın da kullanılır. DC ve AC fırınların kombinasyonu, çelik üretimi verimliliğini artıracaktır. Şu belirtilmelidir ki bu tesiste SVC kurulmamıştır. Çünkü DC fırın sabit akım modunda çalışırken yük dalgalanmasını azalttığı kabul edilir.

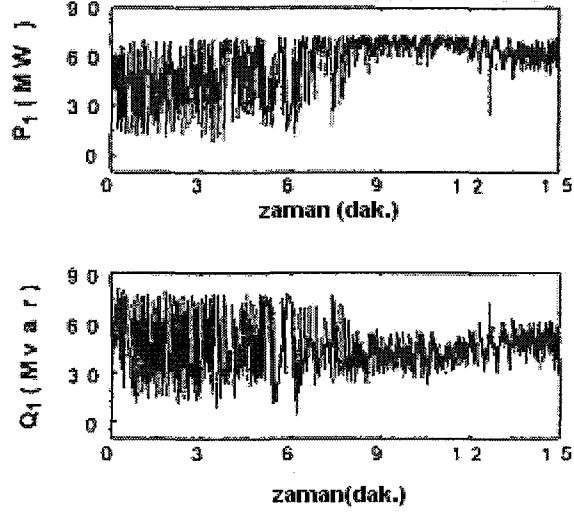
Bu bölümün ana fikri AC ve DC ark fırınlarının yük karakteristiklerini karşılaştırmak ve analiz etmektir. Sadece Şekil 3.5.1(a)'daki AC fırın beslemesinin ölçüm bilgileri kullanılmıştır. SVC ve harmonik filtrelerin ayrıntılı etkileri üzerinde durulmamıştır.

### 3.5.2 Ark Fırınlarının Karakteristiklerinin Karşılaştırılması



Şekil 3.5.2.1 15 dakikalık süre içindeki AC ark fırını beslemesinin sonucu

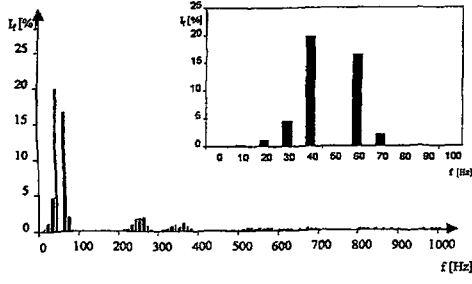
Şekil 3.5.2.1'de AC ark fırınının beslenmesi sonucunda aktif ve reaktif güçlerin zamana göre değişimi görülmektedir. 9.dakikaya kadar süren kararsızlık ertitme işleminin tamamlanması sonrasında kararlı hale geçmiştir ve bunun içinde aktif ve reaktif güçler 0 düzeyine inmiştir. Sonra tekrar ark fırını kararsızlığından kaynaklanan dalgalanmalar 12. dakikadan sonra tekrar belirmeye başlamıştır.



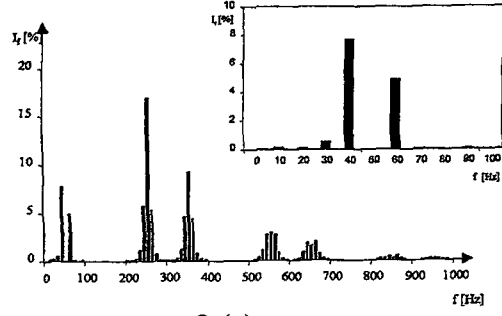
Şekil 3.5.2.2 15 dakikalık süre içindeki 3 doğrultuculu DC ark fırını beslemesinin sonucu

Şekil 3.5.2.2'de ise, aktif ve reaktif güçler 3 doğrultuculu DC ark fırını için incelenmiştir. Başta kısa devre arkı olduğu ve ergitme olayının gerçekleşmesi nedeniyle dalgalanmalar 9. dakikaya kadar sürmüştür. 9. dakikadan sonra bu ergitme olayı sona erdiği için 15. dakikanın sonuna kadar dalgalanma olayları azalmıştır ki buda DC ark fırınının kararlı hale geçmesindedir.

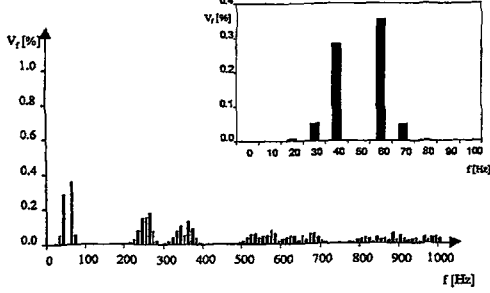
(Fu, T-H., and Wu, C-J; 2002)



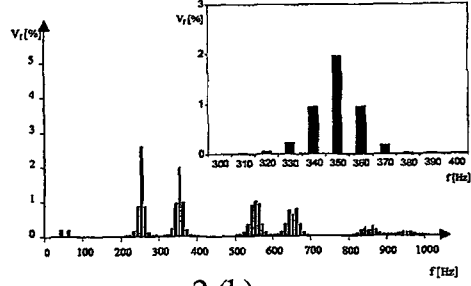
1.(a)



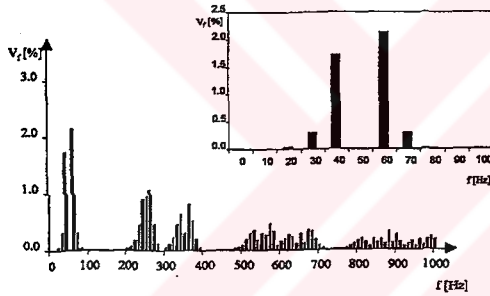
2.(a)



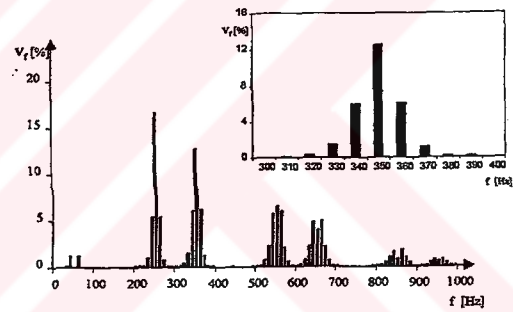
1.(b)



2.(b)



1.(c)



2.(c)

Şekil 3.5.2.3 AC ve DC ark fırınlarının V-I harmonik spektrumlarının karşılaştırılması.

(1.(a)-(b)-(c) AC Ark fırını karakteristikleri.)

(2.(a)-(b)-(c) DC Ark fırını karakteristikleri.)

Şekil 3.5.2.3'de AC ve DC ark fırını karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Açıkça görülmektedir ki gerilim ve akım harmonikleri spektrumları AC ve DC ark fırınları açısından farklı özellikler göstermektedir. AC ark fırınları 40 ve 60 Hz frekanslarında kararsızlık gösterirken , DC ark fırınları 350 ve 380 Hz frekanslarda kararsızlık göstermektedir.

(Carpinelli, G., Di Manno, M., Verde, / P., Tironi, E., Zaninelli, D., 1999)

## LİTERATÜRDE ARK FIRINLARININ HARMONİK ETKİNLİĞİ KONUSUNDA YAPILMIŞ ÇALIŞMALARIN İNCELENMESİ

Bu bölümde, ark fırınlarının oluşturduğu harmonikler ve ark fırınlarının modellenmesi konusunda literatürde kabul görmüş çalışmaların çevirilerine geniş özeti ve yorumuna yer verilmiştir.

### 4.1 Yeni Ark Fırını Modeli ile Dalgalanma Çalışmaları\*

#### 4.1.1.Çalışmanın Açıklanması

Ark fırınları, metallerin eritilmesi ve yeniden kazandırılması için kullanılır. Ark fırınlarının çoğunlukla tercih edilmeleri ve ark fırını yükleri, endüstride fırınların kullanımında bir artışa neden olmuştur. Sonuçta da güç kalitesi sorunları baş göstermiştir. Voltaj dalgalanması ve harmonik yük akımlarının varlığı, etkilerin örnekleri şeklinde ark fırınlarında açıklanmıştır. Bu sorunların çözümü için, bu etkilerin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Güç sisteminin tümü, yüksek nonlineeriteye sahip zaman değerli yükler ve güç kalitesi için araştırılmalıdır. Zaman cevabı, elektrik ark fırınları davranışları için önem taşır. Kullanışlı ve basit bir ark fırını modeli, hem yukarıda belirtilen sorunlar hem de bu alanda çalışan araştırmacılar için önemli bir konudur. Bu model nonlineer olup, ark fırınının belirsiz karakteristiklerini yansıtır. Bu modeli oluşturmak için birçok çalışma yapılmış olmasına karşın, henüz bu karakteristikleri yansıtan basit bir ark fırını modeli mevcut değildir.

Tarihte, bu konuya iki farklı yaklaşım vardır. Sonraki davranışlar ve başlangıç şartlarındaki davranışlar olmak üzere bu yaklaşımlar ikiye ayrılır. Birçok farklı yaklaşımın yanında ilk yaklaşım için periyodik olmayan, nonlineer zamana bağlı bir ark fırını modeli zaten oluşturulmuştur. Bu model, “frekans modülasyonunu (FM) besleme voltajından sağlar ve % 0.5 ten az ise voltaj dalgalanmasına neden olur” ve modülasyon sinyali, 6 ila 10 Hz arasında değerler alır. Bu gerçek ışığında, beyaz gürültünün oluşması, frekans aralığının önemini artırır ve ark voltajının davranışını ön plana çıkarır ve ark fırını voltajının incelenmesi ortak bir görüş olarak ortaya çıkar. Ark voltajı, basit bir v-i karakteristiğinin ark fırın yükünden elde edileceği gibi, karışık formülasyonlarla da elde edilebilir.

---

\* Abur, A., and Ozgun, O., (2002), “Flicker Study Using a Novel Arc Furnace Model

Ark fırın yükü modellenerek voltaj kaynağı oluşturulur ve model  $v-i$  karakteristiğine dayanır, ark direncinin sinüsoidal varyasyonunun denenmesi sırasında ark direnci ve bant aralığı beyaz gürültü varyasyonları için incelenir. Diğer tarafta ise sistem tanımlama teknikleri ile son durumdaki karakteristikleri için genel bir model çıkarılır.  $v-i$  karakteristiği için olan ayrıntılı model üzerinde yoğunlaşmak yerine, basitleştirilmiş karakteristiklerden yola çıkarak zamana bağlı elektrik ark voltajı üzerine başka bir model yapılır. Başka bir model ise nonlineer özellikteki yük direnci hem sinüsoidal hem de son durumdaki varyasyonlar için açıklanmaktadır.

Kaos teorisinin kullanıma sunulmasında, ark fırını modelinin son durumdaki sonuçlarla doğrudan karşılaştırılması gerekir. Gerçekte kaos teorisi ark fırınları için genel bir model oluştursa da ark fırınındaki voltajlardaki elektriksel dalgalanmalar son durumu en iyi şekilde açıklar.

Bu bölümde, ark voltajı karşılıklı denklemlerin çözümü ile bulunmuştur ve ark fırını yükünün değişen  $v-i$  karakteristikleri dinamik şekilde incelenmiştir. Diğer taraftan da Chua'nın iyi bilinen chaotik devresi, düşük frekans kaotik sinyali için simule edilmiştir. Bu iki sinyal simule edilerek ana ark fırını terminal voltajını oluştururlar. Belirlenen model sisteme bağlanır ve voltaj kaynağı kontrol edilir. Model geliştirilerek sonuçlar belirlenir. Ark fırınındaki voltajın dalgalanmasının simle edilmesi ile IEC dalga ölçeri Matlab ortamında IEC 1000-4-15 standartlarına göre belirli zaman dilimi için modellenmiştir. Bu bölümde, dalgalanma çalışmaları analiz edilerek ark fırını ve IEC dalgalanma ölçeri modelleri oluşturulmuştur.

#### 4.1.2 Başlangıç Şartlarındaki Ani Bağımlılık

Kaos, aynı zamanda yabancı uyarıcı olarak ta bilinir ve genelde matematiksel olarak açıklanması zordur. Genellikle pratik bakış açısı olarak sınırlı durum davranışı olarak açıklanabilir. Bu davranış diğer üç davranış gibi ( sınır noktaları, periyodik çözümler ve kuasi periyodik çözümler ...) belirli kurallara uymaz. Eşitlik sınırındaki noktalar sıfır boyutlu ise ve periyodik çözümler tek boyutlu ise, tek boyutlu yabancı uyarımlı kompleks bir durum söz konusudur ve de bu boyut kesirlidir. Kaotik sistem, kararlı bir sistemdir ve ortalama harekete sahiptir ve non lineer sistemden hassasiyet bakımından ayrılır. Başlangıç koşullarına da bağımlıdır. İki farklı giriş durumu için bu yaklaşımlar birbirine bağlanır ve bundan çıkarılacak sonuç, ortalamanın üstel olarak arttığıdır.

Araştırmacılar, ark fırınlarının yük akımlarının kaotik davranışlar sonucu nasıl oluştuğunu uzun uzun araştırmışlardır. İlk olarak, U.S. Bureau of Mines (USBM); Amerika'daki madenler bürosu; elektrik ark fırınlarındaki dalgalanmalar kaotik koşulların doğal bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır, görüşünde birleşirler. USBM tarafından hazırlanan başka bir projede ise, akım ve voltaj dalga formlarını araştırdıktan sonra, deneysel bir elektrik ark fırını elde edilmiştir. Böylece bu kanıtlanmıştır ki elektrikselsel dalgalanmalar, kaotik sistemin bir sonucudur.

Elektrik ark fırınlarındaki kaotik davranışlar anlaşıldıktan sonra, ilk model kaotik dinamikler üzerine tasarlanmıştır. Bu model kaos için anahtar eleman olarak kaotik bir cevap davranışı sergileyerek ana bilgiye ulaşılmayı sağlamıştır.

Bu kaotik modelin temel kısmı, kendi kendini ayarlayabilen model parametrelerin ortaklığına dayanır. Bu model parametreleri, model çıkışı ile ilgilidir. Zaman skalalı Lorenz sistemi, elektrik ark fırınlarındaki akımların yüksek değerli davranışlarını açıklar. Skalalı Lorenz sistemi, ayarlanarak bir zaman serisi oluşturmayı amaçlar. Böylece verilen seride belirli dataların eşleştirilmesi mümkün olduğu kadar gerçeğe yakınlaştırılır. Özetle, simülasyonun sonunda, ark akımı datası belirlenen zaman periyodu için üretilir, ark akımı datası ark fırını barasına enjekte edilir ve böylece ideal bir akım kaynağı oluşturulur. Bu model insan eliyle yapılan datayı çok iyi bir şekilde kopyalar. Böylece bilgi gerçek bir ark fırını gibi davranır. Birçok harmonik spektrumu için, network'te değişimlerin hassas olmasına neden olur. Ayrıca şu da not edilmelidir ki herhangi bir ark fırını tesisinden gerçek bilgiyi almak çok zordur. Bu yüzden, bir model oluşturmak gerekliliği doğmuştur. Böylece bu model ağ sistemindeki (yani network'teki) bir baraya bağlanarak devre bileşenlerini gerçekleyebilir ve de ark fırınları için önemli bilgiler sağlar.

### 4.1.3 Ark Fırını Modeli

Belirlenen ark fırını modeli iki adımda açıklanabilir; elektrik arkının dinamik ve çok değerli voltaj – akım karakteristikleri, birinci modelden çıkar, aynı zamanda düşük frekans kaotik sinyali Chua'nın simülasyonunda açıklanır. Bu Chua'nın simülasyonunda, kaotik devre için ark fırını voltajı dalgalanmaları ikinci, modelden çıkarılır.

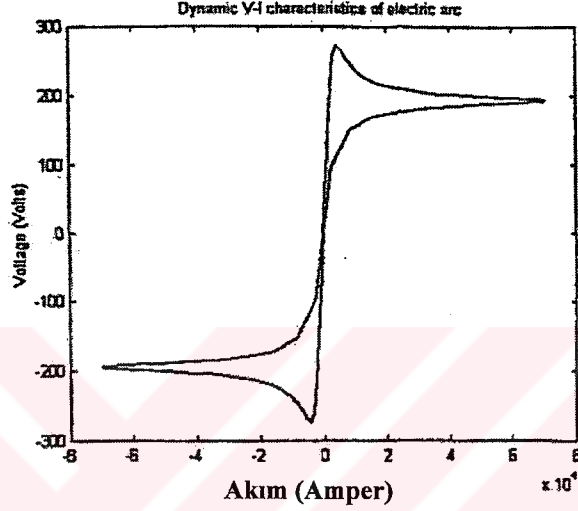
#### 4.1.3.1 Elektrik Arklarının Dinamik Davranışları

Dinamik, çok değerli ark fırını yüklerinin v-i karakteristikleri, diferansiyel eşitliklerin düzenlenmesi sonucu genel bir dinamik ark fırını modeli oluşturulur. Bu yaklaşım ile diğerleri arasında temel farklılıklar vardır. Elektrik arkı statik bir v-i karakteristiği ile açıklanır veya farklı ilişkiler ile belirlenir. Dinamik ark fırınının modelinin kullanılma nedeni v-i

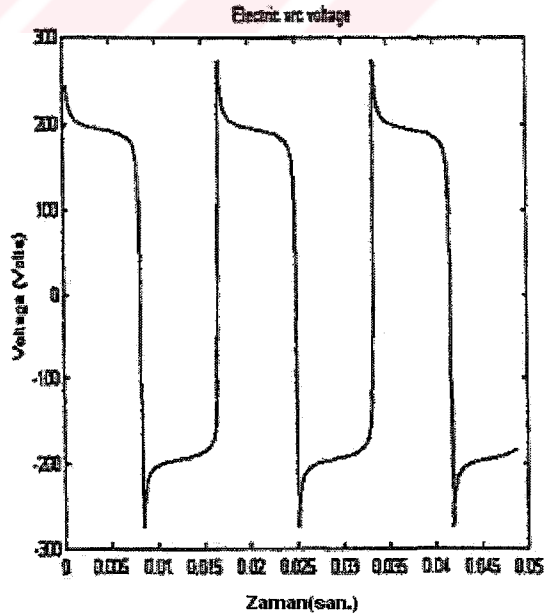
karakteristiğindeki değişiklikleri belirleyerek operasyon koşullarındaki değişikliklerin güç sistemine uygulanmasından oluşur.

Ark fırınının dinamiklerini belirten diferansiyel eşitlikleri, enerji dönüşümlerinin temel prensiplerini içerir. Bu yüzden de, elektrik arkının güç dengesi eşitliklerinden başlanarak aşağıdaki diferansiyel eşitlik elde edilir.

$$k_1 r^n + k_2 r \left( \frac{dr}{dt} \right) = k_3 / (r^{m+2}) i^2 \quad (4.1.1)$$



Şekil 4.1.1 Elektrik arkının dinamik v-i karakteristikleri.



Şekil 4.1.2 Elektrik arkının tipik voltaj dalga formu.



#### 4.1.3.2 Kaotik Zaman Varyasyonu

Ark fırını voltajının kaotik bileşenleri için, Chua'da açıklanan devrelere göz atılmalıdır. Chua'nın devresi, MATLAB – Simulink ortamında, yeni bir güç sistemi blok diyagramlarından Matlab ile elde edilir.

Bu göstermiştir ki dirençler, kapasiteler ve endüktanslardan oluşan bir devrede kaos şu şekilde açıklanır;

- 1) En az bir yerel aktif direnç olmalı,
- 2) En az bir nonlinear eleman olmalı,
- 3) En az üç tane enerji – depolama elemanları olmalı.

Chua'nın devresi, belirtilen koşulları açıklayan basit bir devreden oluşur. Bu koşullar şu şekilde sıralanabilir: Fiziksel sistemin kaos için beklenen davranışı göstererek bu modeli kanıtlaması. Bu devrenin bu iki özelliği kaos generatörünün çalışması için geçerlidir. Bu devre için daha fazla bilgi Chua devresinde mevcuttur. Chua'nın devresi Şekil 4.1.3'de yeni bir güç sistemi blok diyagramı ile matlab'te açıklanmıştır.

Bu devre için bir kullanışlı bilgi daha: Enerji depolayan elemanların, ayarlı değerler için herhangi bir frekansta kaotik bir sinyal yaratabilmesidir.

#### 4.1.3.3 Ark Fırını Modeli

Elektrik ark voltajı, düşük frekans değerindeki kaotik sinyal ile yapılır. Bu da Chua'nın kaotik devresini simule etmeyi sağlar. Bu iki sinyalin modülasyonu sonucu, ana ark fırını voltajı oluşur ki bu voltaj belirlenmiş modelin çıkışıdır. Güç sisteminin barasından elde edilen akım, modelin girişine enjekte edilir. Model, kontrol edilebilen bir kaynak gibi davranarak, sistem akımını girişe iletir ve terminal voltaj değerini her zaman adımı için gerçekler. Şekil 4.1.3, Matlab – simulink ortamında belirlenen ark fırını modeli için bu işlemin yürütülmesini sağlar. Bunun yanında kaos üretilerek şeklin üst kesrini oluşturur ve böylece düşük kesir için cevap elde edilmiş olur.

#### 4.1.4 IEC Dalga Ölçer

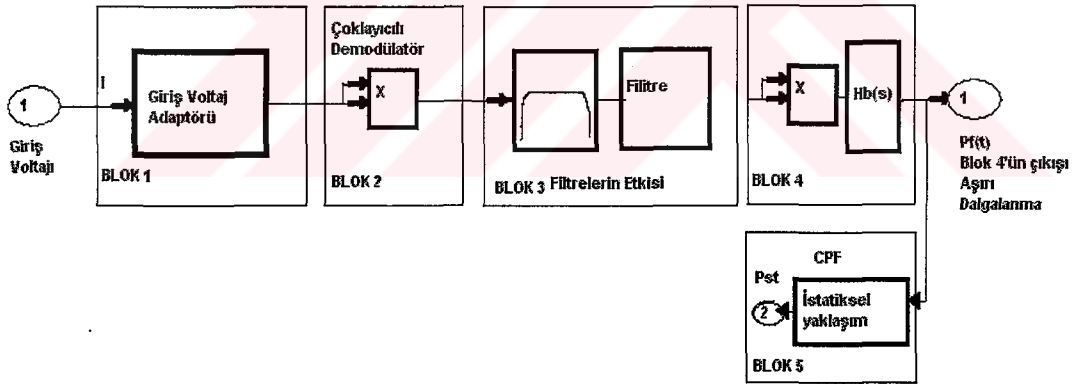
Burada, IEC dalgaölçer, IEC 1000- 4 –15 uluslar arası standartta belirtilmiş ve modellenmiştir. IEC dalgaölçer modeli matlab ortamında dijital olarak modellenmiş ve de temel olarak Şekil 4.1.2'de beş blok olarak diyagrama dökülmüştür.

Dalgaölçerin girişine sistem voltajı uygulanır. Blok 1 basitçe voltaj adaptasyonu devresi ile kök – kare RMS değeri ile giriş voltajının referans seviyesini oluşturur. Bu yuzdende dalgalanmalar oluşur.( bağımsız ana giriş voltaj seviyesi...)

Blok 2’de ise temel olarak kare demulatörü ile voltaj dalgalanması oluşturulur. Ana hatları ile blok 2 sinyalleri ayırarak modüle eder ve bu sinyalleri taşıyarak sanki bir lamba gibi davranılmasını sağlar.

Blok 3 ise iki filtreden oluşur. Bunlardan biri bir filtrelili olarak DC düzeltir ve ikincisi ise artık bileşenlerin demodülatör çıkışını yapar ve aynı zamanda ikinci filtre frekans cevabını, lambanın sinüsoidal voltaj dalgalanması olarak gösterir ki böylece insan gözü için uygun koşulları sağlar.

Blok 4 ise kare çoklayıcısının, non-lineer elemanları ve ilk sıradaki düşük geçiren filtre için 0.3s’lik bir zaman sabitinin kazanılmasını sağlar. Bu da beyinde bir oluşum sürecini başlatır. Bu bloğun çıkış kısmı ise, dalgalanmaya karşı hassas özelliği doğurur.



Şekil 4.1.4 IEC dalgaölçerin blok diyagramı.

Ve son olarak ta blok 5 çalışan statiksel analizin dalgalanma seviyesini kontrol eder. Dalgalanma seviyesi kısa ve uzun terimler için bir bir hesaplanır ve sonuç ekrana aktarılır. Bu bloğun çıkışı uygun şekilde bölünerek 64 alt sınıfa ayrılır. Bu da dalgalanma seviyesini oluşturur. İlk olarak olasılık dağılımı fonksiyonu (PDF – probability distribution function) oluşturulur. Dalgalanmanın her hangi bir seviyesinde kümülatif olasılık hesabı yapılır. (CPF – cumulative probability function) Kısa terimdeki dalgalanma seviyesi Pst ile hesaplanır bu ifade aşağıda verilmiştir.

$$P_{st} = \sqrt{\sum (n_i P_i)} \quad (4.1.5)$$

Burada  $k_i$  ağırlığı temsil eder,  $P_i$  gözlenme sırasında oluşan dalgalanma seviyesini belirtir. Bu  $P_i$  değerleri kümülatif dağılım eğrisi ile gözlenir.

$$P_i = CPF(\eta_i) \quad (4.1.6)$$

$\eta_i$  , gözlenme periyodunun kısmi yüzdesini oluşturur.

CPF'nin en az beş noktası kısa terimli dalgalanma seviyesinin belirlenmesinde geçerlidir. Bütün ağırlık katsayıları ve zaman kesişimi yüzdeleri hesaplanmalıdır.

Özetle dalgaölçer modeli iki kısımdan oluşur:

- Lamba – göz – beyin zincirinin simülasyon cevabı
- Dalgalanma sinyalinin çalışır durumdaki statik analizi ve sonuçların ekranda görülmesi,

İlk işlemleri blok 2,3 ve 4 yapar sonra ikinci kısımdaki operasyonları blok 5 gerçekleştirir. Daha ayrıntılı bilgi IEC dalgaölçerde bulunabilir.

Herhangi bir dalga analizi için dalgaölçer modeli standart dalga formları ile IEC standartlarında açıklamıştır. Bu standartlar, büyüklük ve frekans olarak altı tane dikdörtgensel voltaj değişimleri ile ilgilidir. Dalgalanma seviyesini Pst belirler.

(Pst: 1.00(+ , - ) 0.05'tir. Test sinyalleri, Pst değerleri ile elde edilerek dalgalanma modeli Çizelge 4.1.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1.1 Performans Testleri

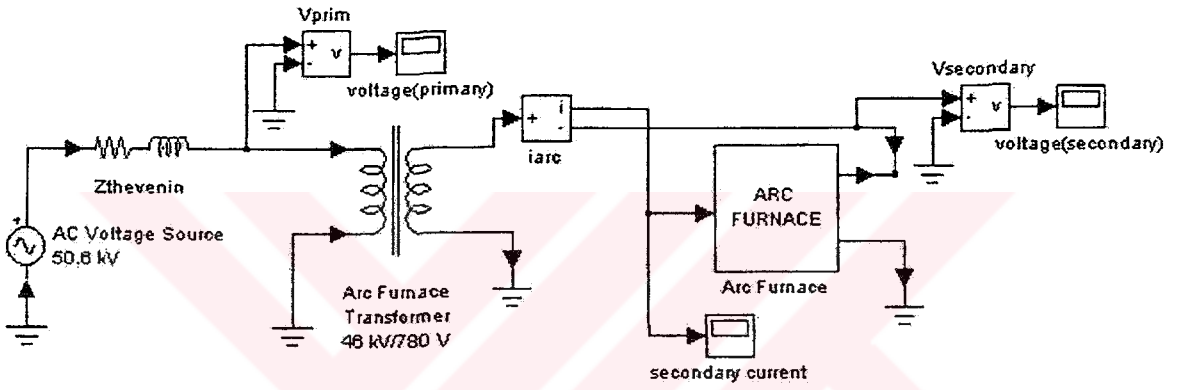
Dakika başına değişimler	Voltaj değişiklikleri dV / V %	Pst
1	2.72	1.0155
2	2.21	1.0157
7	1.46	1.0148
39	0.905	1.0144
110	0.725	1.0035
1620	0.402	0.9961

Şu açıklanmalıdır ki Çizelge 4.1.1'de tüm Pst değerleri dalgaölçer ile algılanır ve üretilir ayrıca bunların hataları IEC standartlarının bir parçasıdır.

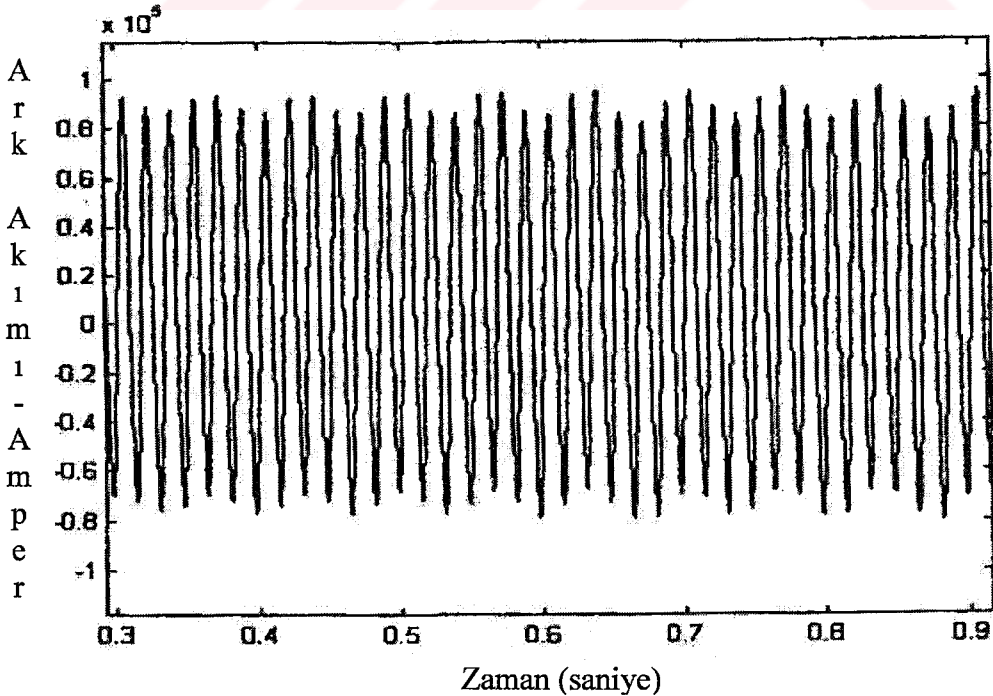
#### 4.1.5 Simülasyon Sonuçları

Açıklanan ark fırını modeli, güç sistem modeli olarak ark fırını transformatörü ile bağlantılıdır. Bu bağlantının ortak noktaları (The point of common coupling – PCC) ark fırını transformatörü ile ilgilidir.

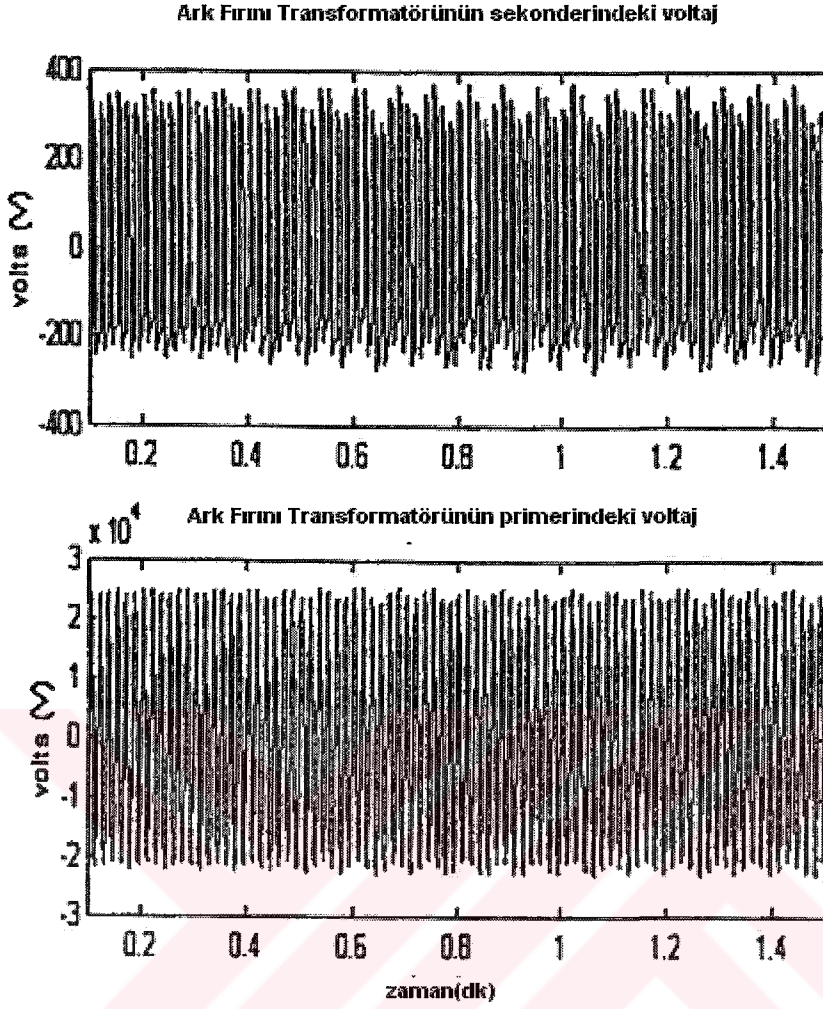
Sonuç olarak ark fırınının oluşturduğu dalgalanma nedeniyle açığa çıkan harmonikler, ark fırını matlab – simulink'teki model ile iyice anlaşılıp dinamik diferansiyel eşitlikler ile pekiştirilmiştir. Böylece, harmonik akım ve gerilimleri model sayısında filtre edilerek aşırı akımlar ve voltajlar; ayrıca sistemdeki kararsızlık daha iyi bir şekilde giderilebilir.



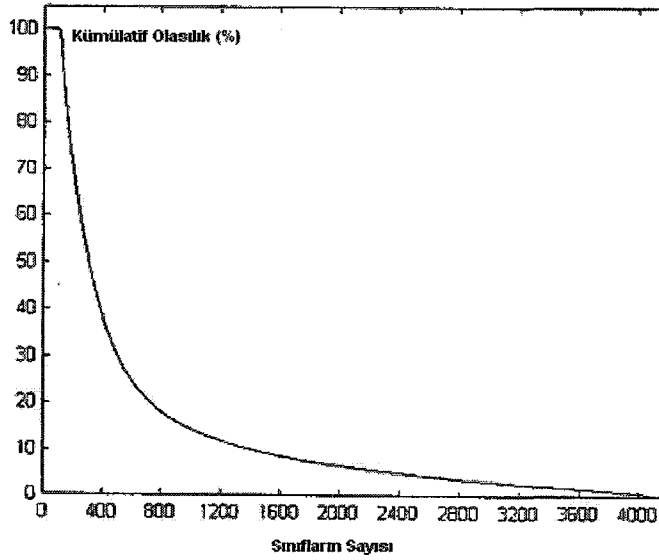
Şekil 4.1.5 Örnek güç sistemine göre MATLAB Simulink için ark fırını modeli.  
(Abur,A.,andOzgun,O.,2002)



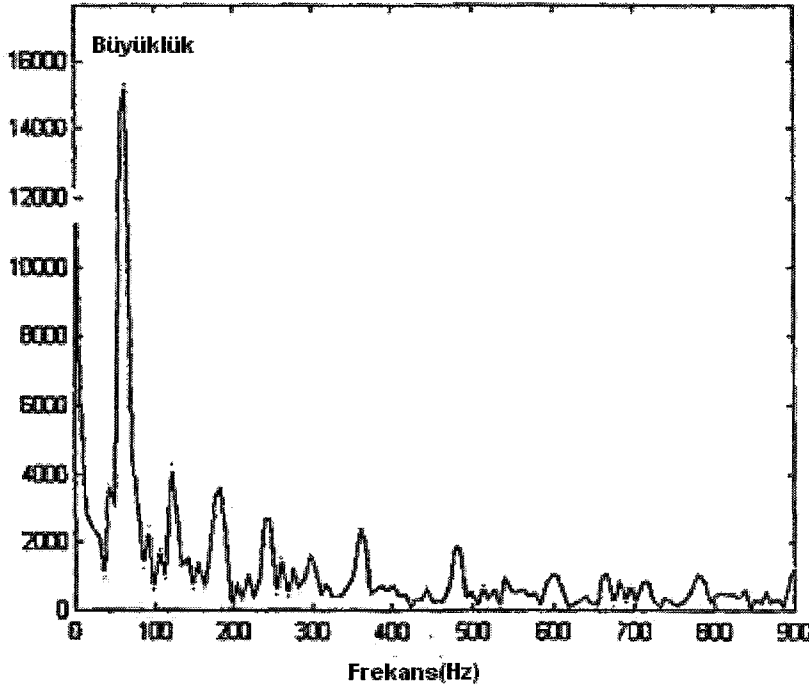
Şekil 4.1.6 Simülasyonla elde edilen ark akımı



Şekil 4.1.7. Ark fırını transformatörünün sekonderinde ve primerindeki voltaj.



Şekil 4.1.8. Sınıf 1 den 4096'ya kadar CPF sinyalleri.



Şekil 4.1.9. Simüle edilmiş voltaj dalga formunun harmonik analizi.  
(Abur,A.,and Ozgun,O.,2002)

Harmoniklerin oluşturulması, ark fırınlarının güç sistemlerine tanıtılması için ana problemdir. Bahsedilen model, aynı zamanda harmonik spektrumun terimlerini de test eder. Bunun yanında önceki modeller tek bileşenli harmonikleri yakalayabilmekteydi, fakat çiftlerini yakalamakta zorluklar yaşanmaktaydı. Şekil 4.1.9'da simüle edilen voltaj dalga formlarının harmonik spektrumlarının anlık görüntüleri verilmiştir. Harmoniklerin büyüklükleri döngüden döngüye simülasyona göre değişmektedir. Bahsedilen model, aynı zamanda çift harmonikleri de yakalayabilmektedir.

#### 4.1.6 Çalışmanın Yorumlanması

Ark fırını operasyonlarını göstermek için, yeni bir model açıklanmıştır. Model, harmonik spektrumu ile birlikte ark akımını sağlamaktadır ve bu da ölçülen spektrumdan sağlanmaktadır. Bu zaman domeninde yapılmıştır ve bir devre komponenti olarak bir baraya bağlanabilmektedir. Bu sistem akımını giriş olarak alır ve her zaman adımı için bir voltaj oluşturur. (Ör. kontrollü bir voltaj kaynağı gibi davranır.)

Dinamik ve çok değerli v-i karakteristikleri, kesişen diferansiyel eşitlikler ile çözülebilmektedir. Dalgalanma efektini canlandırmak için, düşük – frekans kaotik sinyali, ark

voltajı ile simüle edilmiştir. v-i karakteristiğinin simetrik arki yok edilmiştir, çift harmoniklerde olduğu kadar tek harmoniklerde de bu işe yaramıştır.

Simüle edilen bilginin dalgalanma seviyesinin azaltılması için, IEC dijital dalga metre modeli Matlab ortamında yaratılmıştır. Simüle edilmiş ark dalga formunun dalgalanma oluşumu , dalga-metre modeli ile gerçekleştirilmiştir.

#### 4.1.7 Çalışmada Kullanılan Değerler

Şekil 2.1’de verilen çalışan sistemin parametreleri,

Kaynak: İdeal AC sinüsoidal voltaj kaynağı, genliği = 50.6 kV ve sıfır fazı ile.

Zthevenin: rezistans,  $R = 0.346\text{ohm}$  ve edüktans,  $L = 9.8\text{mH}$ .

Transformatör: Üç sarımlı lineer tek – fazlı transformatör .

Nominal güç:  $P_n = 60\text{MVA}$  .

Sarım 1 parametreleri:  $V_1 (V_{rms}) = 46\text{ kV}$ ,  $R_1(\text{pu}) = 0.002$ ,  $L_1(\text{pu}) = 0.55$ .

Sarım 2 parametreleri:  $V_2 (V_{rms}) = 770\text{ V}$ ,  $R_2 (\text{pu}) = 0.002$ ,  $L_2(\text{pu}) = 0.55$ .

Manyetizma rezistansı ve reaktansı:  $R_{m(\text{pu})} = 500$  ,  $L_{m(\text{pu})} = 500$ .

Ark fırını : (diferansiyel eşitliklere göre olan parametreler)  $k_1 = 3000.0$ ,  $k_2 = 1.0$ ,

$k_3 = 12.5$ ,  $m = 0$ ,  $n = 2$ .

(Chua ‘nın devresi )  $C_1 = 200\text{ nF}$ ,  $C_2 = 0.2\text{ }\mu\text{F}$ ,  $L = 3.6\text{ H}$ , seri dirençlerle birlikte

$R_0 = 12.5\text{ ohm}$   $G = 5.442\text{ E} - 4\text{ ohm}$ .

(Abur,A.,andOzgun,O.,2002)

## 4.2 DC Ark Fırını Tesislerinde İnterharmoniklerin Analizi \*

### 4.2.1 Çalışmanın Açıklanması

Bu bölüm DC ark fırını tesislerindeki interharmonik kirlenmesini içermektedir. Kirlenme gibi dalgalanmanın oluşmasının ana sebebi, tristör konvertörlerinin AC ve DC tarafları arasındaki harmonik olaylarıdır. Birçok parametrenin etkilerini analiz etmek için, tesisin frekans cevabının çıkarılması gerekir. Bu yaklaşım, harmonik uygulamalarının analizinin, hat empedansı ve rezonansı için dikkate alınmasını sağlar. Hat empedansı ve rezonansı; harmonik filtreleri, akım regülatörleri ve senkronizasyon tarafında oluşturulur. Bu analize dayanarak uygun öngörüler, 125Hz’lik voltaj distorsiyonları için yapılabilir.

Tesisin EMTP modeli ile etkili bir biçimde teorik analiz gerçekleştirilmiştir. Ölçümler; DC ark fırınlarında farklı kontrol ve filtre parametreleri kullanılarak öngörüler ışığında gösterilmiştir.

Yüksek güçlü doğrultmadan itibaren, DC ark fırınları beslemesi için kullanılan tristör kontrollü rektifierların uygulaması, büyük bir hız kazanmıştır. Bu da güç elektroniği teknolojisine bağlıdır. Yakın gelecekte DC ark fırınları, tipik AC ark fırınları gibi olacaktır yani elektrotlar doğrudan AC voltaj beslemesine transformatör üzerinden bağlanacaktır. Bunun yanında, DC ark fırınlarının özelliklerinin temel avantajları, geleneksel AC ark fırını özellikleri ile karşılaştırılırsa; en önemlisi karbon elektrotların düşük tüketimi ve voltaj dalgalanmasının azlığıdır. Karbon elektrot tüketiminin azalması, pozitif ark kutupları düzenlemesi ile sağlanabilir. Burada enerji tüketimi, demir hurdasından daha fazladır. Bu çözüm, kesinlikle AC fırınlar için imkânsızdır. Burada ark voltajı ve akım alternatifidir.

Voltaj dalgalanmasının azalması, ark akımı kontrolünün elde edilmesinin dışında, ark oluşumunun kısa devrelerinde oluşan sabit değer ile elde edilir. Aynı zamanda AC ark fırınları için bu akım sınırlanmıştır ki sadece transformatörler, besleme empedansları ve olası anti – dalgalanma endüktansları için geçerlidir. Bu nedenle, DC ark fırını tarafından üretilen dalgalanma tipik olarak AC ark fırını tarafından üretileninin yarısından daha azdır. Bu da nominal gücün daha az olması demektir. Ayrıca bu olay, erime fazında maksimum güçte gerçekleşmesi için geçerlidir. Dahası, asimetrik kontrolün kullanımı ve serbest-dönen diyotların sağlanması, bazı DC tesisler için büyük reaktif güç tasarrufunu ve daha az dalgalanmayı gerçekleştirir. Böylece, etkili bir biçimde Dinamik Statik Var kompanzasyonu oranı azaltılmış olur.

Akım kontrollü yüksek güçlü rektifikasyon, akım harmonikleri ve inter harmonikleri oluşturan sistemlerde kullanılırlar. Bazen bu harmonikler AC ark fırınlarında daha da büyük olur. Bunun yanında bu büyük dönüştürücü sistemler, sadece karakteristik harmonikleri ideal konvertör operasyonları için üretmezler aynı zamanda harmonik olmayan karakteristikleri ve inter harmonikleri de üretirler. Buda güç besleme voltajının kalitesini etkiler ve dalgalanma gibi problemlerin oluşmasına neden olur.

Yüksek seviyedeki inter harmoniklerin varlığı, 140MVA'lık DC ark fırını tesisinin kurulması sırasında karşılaşılabilecek ilk problemlerdendir. Bu da yüksek inter harmonik voltaj

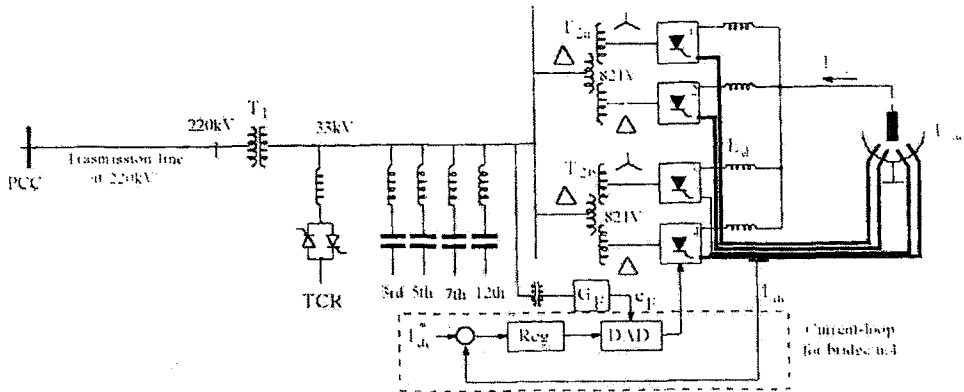
---

\* Matavelli, P., Fellin, L., Department of Electrical Engineering - University of Padova Via Gradenigo 6/a , 35131 Padova , Bordignon, P., Pema, M., Ansaldo Sistemi Industriali S.p.a. Power Electronics Operation -Viale Sarca 336. 20126 Milano , “ Analysis Of Interharmonics in DC Arc Furnace Installations ”

distorsiyonu tarafından (yaklaşık 125Hz ve 25Hz arasında) oluşturulur. Bu fenomenon, besleme empedansı ve harmonik ve reaktif kompanzasyon sistemi arasında oluşan AC/DC harmonik etkileşimini doğurur. Akım kontrollü regülatör ve senkronizasyon konusu, aynı zamanda zararlı etkileşimlerin amplifikasyonunda da büyük rol oynar. Buna benzer birçok problem, HVDC yüksek gerilimli DC çalışmalarda bulunmaktadır. AC / DC harmonik etkileşimi çok iyi bilinen bir problemdir ve harmonik dengesine dayanır. Şu belirtilmelidir ki DC ark fırını kurulduğunda DC taraf empedansında rezonans olmaz.

Bu konuyu etkili bir biçimde incelemek için, HVDC (yüksek gerilimli DC) çalışmaları incelemek gerekir. Bazı tekniklerde frekans domeni yaklaşımı kullanılır ve birçok harmonik ilişkisini çözmek içinde yardımcı prosedürler kullanılır. Diğer yaklaşım ise zaman domenini kullanır (örnek olarak Elektro manyetik Geçici program EMTP- ElectroMagnetic Transient Program) burada diferansiyel eşitlikler kullanılır, buna bağlı olarak ta nümerik integrasyon çözüm için uygundur. Her iki yaklaşım da, ateşleme açısı hatalarını da kapsayarak pratik konvertör operasyonu için karşılıklı harmonik konvertörü hesaplamalarını içerir. Bunlar: komütasyon bozulması ve DC atlama, konvertör transformatörünün doyması, AC ve DC sistem empedanslarının karakteristikleri, negatif dengesiz voltajlar ve kontrol hareketinin etkileridir. Bunun yanında, sonuçlar oldukça açıktır. Bu yaklaşımlar, harmonik üretiminin mekanizmasına herhangi bir bakış getirmezler ve optimal sistem dizaynı için amplifikasyon gereklidir.

Böyle sistemlerin frekans cevabının daha iyi anlaşılması için frekans domenindeki transfer fonksiyonu yaklaşımı izlenir. Konvertör etkileşimi modellenerek birçok önemli faktör Nyquist plot'un üretimini anlamak amacıyla sistemin kararlılığını analiz etmekte kullanılır.



Şekil 4.2.1 . DC ark fırını şeması.

Fonksiyon yaklaşımı kullanılarak ta benzer sonuçlar elde edilebilir. Larsen, üç – girişli network ile harmonik transferinin nümerik simülasyonunu açıklamıştır. Böylece üç – girişli

network yaklaşımı, fonksiyonu iyice açıklamıştır. Ateşleme açısı modülasyonunu da içererek konvertör kontrolü ve iletişim periyodu varyasyonları belirlenmiştir. Farklı derecelerdeki yaklaşımlar, ilişkinin transfer fonksiyonunun çıkarılmasını sağlamıştır. Örneğin: Ateşleme açısı, DC akım, DC taraf empedansı ve AC taraf empedansı (kapalı çevrim koşulları altında).

Biz bu yaklaşımı, sistemin tüm transfer fonksiyonlarını hesaplamak için kullanıyoruz. Frekans domeni sonuçları, analitik çıkarmaya dayalı olan, EMTP simülasyonu ile değerlendirilmiştir. Birçok değişik ilişki boyunca, ateşleme açısı ve DC akım arasındaki transfer fonksiyonu bu bölümde belirtilmiştir. Değişik senkronizasyon şemaları ve filtreleri kullanılarak, inter harmonik zararlı etkilerinin amplifikasyonundan kaçınmak için nasıl akım–kontrol parametrelerinin ayarlanacağı açıklanmıştır. Bu sonuçlar etkili bir biçimde harmonik filtrelerin dizaynını, akım regülatörü parametrelerini ve ateşleme şeması senkronizasyonu için kullanılan filtreleri etkilemektedir.

Sonuç olarak, birçok farklı ayar konfigürasyonları gerçek tesiste hazırlanmış ve test edilmiş olur. DC ark fırını tesisindeki yapılan ölçümler etkili ön izlenimler doğurmuştur.

#### 4.2.2 Tesisin Açıklanması

Şekil 4.2.1 DC ark fırını tesisinin diyagramını göstermektedir. 220kV / 50 Hz deki güç beslemesi sisteminde kısa – devre gücü 5000MVA (ortak bağlantı noktasında)'dır. (Point of Common Coupling – PPC ) Bu 30km'lik bir iletim hattı boyunca ve HV / MV transformatörü (T1) (220/33kV) boyunca tesise güç sağlamaktadır. Bu güç 140MVA civarındadır ve kısa – devre voltajının % 12.5'i kadardır. AC / DC tristör rektifierleri, iki tane MV / LV transformatörü ile beslenmektedir. (T2 ve T3 – 33/ 821V) Buradaki güç 110MVA civarındadır ve kısa devre voltajının % 10'u kadardır. Bu transformatörlerin her biri yıldız ve üçgen bağlantı ile 12-darbeleri operasyonu sağlayacak şekilde ikincil sargılara sahiptirler. Fırın elektrotları, dört paralel tristör rektifieri ile beslenir. Bunların DC akımı geri besleme çevrimi ile regüle edilir.

Harmonik akım kompanzasyonu ve ayarlanmış kapasitelerle reaktif güç kompanzasyonu, harmonik filtreler yardımıyla gerçekleştirilir. Değişken reaktif güç kompanzasyonu tristör kontrollü reaktörler (Thyristor Controlled Reactors – TCR) ile 110MVA için gerçekleştirilirken, güç faktörü ve dalgalanma düzenlenmiş olur. Hem pasif filtreler hem de TCR, MV barasına bağlanırlar.(33kV)

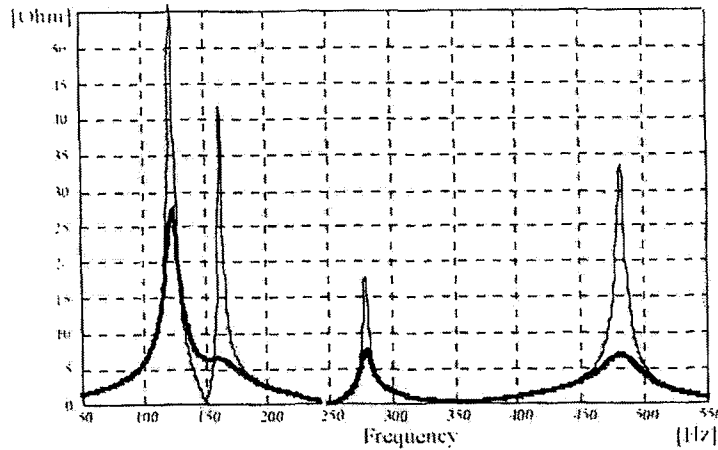
Şekil 4.2.2, ilk paralel rezonans nedeniyle karşılaşılan potansiyel probleminin sonucu olan konvertörlerin toplam empedansını göstermektedir. Bu nedenle dikkatlice dizayn edilmiş dirençler üçüncü ve yedinci harmonik filtreleri için kullanılırlar. Şekil 4.2.2’deki ince çizgi ise bu dirençlerin devreye alındığı zamandaki halini göstermektedir.

Ark gücü, kesişen ark voltajları  $U_{arc}$  ve fırın akımı  $I_{arc}$  ile kontrol edilir. Ark voltajı, elektrodun yükseklik seviyesini değiştirerek kontrol edilir. Çünkü büyük ölçüde ark uzunluğuna bağlıdır. Elektrodun yüksek duyarlılığına bağlı olarak bu kontrol yavaştır ve birkaç saniye gibi bir cevap süresine sahiptir. Bu nedenle harmonik ve inter harmonik çalışmalar için ihmal edilebilir.

Fırın akımı  $I_{arc}$ , geri besleme çevrimindeki dört tristör rektifierlerinin akımlarını kontrol ederek düzenlenir. Nominal ark akımı, 120kA civarındadır. Her köprü doğrultucusunun akım referansı  $I_{dc}$  30kA ayarlanır.

Ateşleme darbeleri, senkronizasyon voltajları ile üretilirler. ( $e_F$ ) Bunlar A.C. MV barası boyunca filtre yardımı ile oluşturulurlar. ( $G_F$ ) Bu da gecikme açısı belirlemesindeki (Delay-Angle Determination – DAD) bara voltajının distorsiyon dalgalanmasını azaltır.

Hem akım regülatör parametreleri hem de senkronizasyon prosedürü, DC ark fırın operasyonlarında sistem performansını büyük ölçüde etkiler.



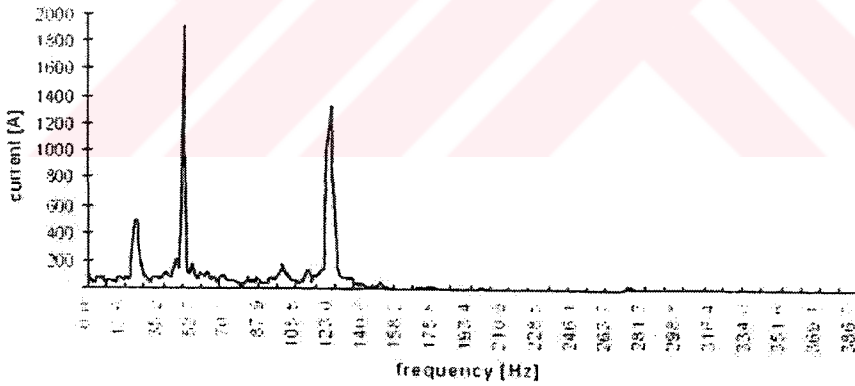
Şekil 4.2.2 . 33kV'luk konvertörler tarafından görülen upstream empedansı  $Z_L$ . İnce ve kalın çizgiler dirençsiz ve dirençli pasif filtreleri temsil etmektedir.

Akım regülatörüne bağlı olarak, çok yüksek akım bant genişliği aşırı akımları sınırlandırmak için önemlidir. Bunlar kısa devre arkalarında oluşurlar. Tristör ve sigorta hatalarına neden

olurlar. Bu akım değeri  $I_d$  limiti kısa devre akımına ve regülatör cevap zamanına bağlıdır. Fakat ark kısa devresinde oluşan ana tepe değeri, akım regülatörünün hızına bağlıdır.

Senkronizasyon filtresine bağlı olarak  $G_F$  için voltaj distorsiyonu göz önüne alınmalıdır. Bunun yanında dalgalanan voltajın istenen değere ulaşması gecikme açısının çok fazla gecikmemesine bağlıdır. Equidistant Pulse Control (EPC); darbe kontrol sistemi tesisin ilk adımlarında o kadar da önemli değildir. Fakat şimdilerde Ansaldo DC ark fırınlarında çoğunlukla kullanılmaktadır. Ayrıca ilk olarak ön izleme analizine tutulan kısımlardan bir tanesidir.

Şekil 4.2.3, Tesisin çalıştırılması sırasında T1 tranformatörünün sekonderinden çekilen hat akımının spektrumunu göstermektedir. Akım regülatörü 45 Hz civarında bir bant genişliğine sahiptir ve  $G_F$  filtresi için dördüncü bileşen düşük geçiren transfer fonksiyonu kullanılır. Sistem açık kararsız bir durum sergiler. Bu da açıklanan HVDC sistemlerde görülen kararsız durumlara benzerdir. Şekil açıkça gösterir ki hat akımı spektrumu 25Hz'te bileşenin % 25'ine sahiptir ve 125 Hz'te % 69'una sahiptir. Tabii tüm bu değerler temel bileşen değerine ek olarak gösterilmiştir. Tabii ki sistem davranışı, tahmin edilemez ve kararsızdır.



Şekil 4.2.3 T1 tranformatörünün 33kV'luk tarafında ölçülen hat akımının spektrumu.

Bu tip gürültülerin doğasını anlamak ve tasarım modifikasyonlarını yapmak için frekans yaklaşım domeni çıkartılmalıdır.

#### 4.2.3 Transfer Fonksiyonu Yaklaşımı

AC / DC konvertörlerdeki harmonik transferi, modülasyon teorisi ile hesaplanabilir. Konvertör modülatör ve harmonik transferi olarak görülür ve AC voltaj ve DC voltaj arasındaki ilişki elde edilir. Bu da aşağıdaki genel formda gösterilmiştir.

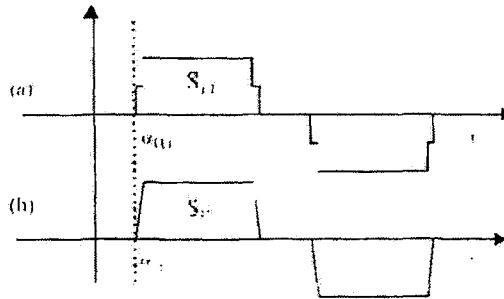
$$u_{dc}(t) = \sum_{k=1}^3 S_{u_k}(t) u_k(t) \quad k = 1,2,3 \quad (4.2.1)$$

Burada  $S_{u_k}$ ; voltaj modülasyonu için her fazın anahtarlama fonksiyonlarını temsil eder ve  $u_k(t)$  ( $k = 1,2,3$ ) ise konvertör girişindeki üç faz voltajlarıdır. Karşılıklı olarak DC akım ve AC akım arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir:

$$i_k(t) = S_{i_k}(t) i_{dc}(t) \quad k=1,2,3 \quad (4.2.2)$$

Burada  $S_{i_k}$  ( $k=1,2,3$ ), akım modülasyonu için anahtarlama fonksiyonlarını ifade eder. Bu fonksiyonların değerleri tristör iletkenliğinin durumuna bağlıdır. Hem voltaj hem de akım anahtarlama fonksiyonları verilen Şekil 4.2.4a ve şekil 4.2.4b deki gibi davranır.  $S_{u_k}$  ve  $S_{i_k}$  ( $k=1,2,3$ ) fonksiyonlarının fourier serisi açılımları yapılabilir. Ayrıca bu anahtarlama fonksiyonları kendi kendilerini modüle ederler. Temel olarak ateşleme açısına bağlı olarak her komütasyon periyodunun başlangıcı, bu anahtarlama fonksiyonlarına bağlıdır. Bunun yanında komütasyon periyodunun dinamik varyasyonu da önemli bir faktördür.

Üç portlu ağlar gösterir ki karakteristikli olmayan frekansların büyüklüğü boyunca, üç frekans etkilidir ve bunlar AC taraftaki pozitif ve negatif frekanslardan oluşmuştur. Bu frekanslar, temel frekansın iki katı ile ayrılırlar ve DC taraftaki tek frekansı oluştururlar ve sonuç olarak iki AC taraftaki frekansların arası merkezlenmiş olur. Bu yaklaşım, harmonik davranış fenomeninin küçük sinyal oluşturmasına dayanır.



Şekil 4.2.4. Altı darbeli konvertörün anahtarlama fonksiyonu (Faz 1)  
(a) Voltaj modülasyonu için. (b) akım modülasyonu için.

Bu yaklaşımı kullanarak ve  $U_{dc}$  ve  $I_{dc}$  DC taraftaki voltaj ve akım ( $k$  frekans) için,  $U_p$ ,  $I_p$ ; tristör rektifierinin girişindeki pozitif sekuans voltaj ve akımları için ( $k+1$  frekans) ve  $U_n$ ,  $I_n$  karşılıklı negatif sekuans büyüklükleri ( $k-1$  frekans) için (formül 4.2.1)  $s$  domeninde yazılırsa;

$$U_{dc}(s) = R_p U_p(s) + R_n U_n(s) + Z_R I_{dc}(s) + U_{-k_\alpha} \alpha(s) \quad (4.2.3)$$

Ve (4.2) de aynı şekilde s domeninde yazılırsa;

$$I_p(s) = K_{I_{Np}} I_{dc}(s) + G_{pp} U_p(s) + G_{pn} U_n(s) + I_{-k_{p\alpha}} \alpha(s)$$

$$I_n(s) = K_{I_{Nn}} I_{dc}(s) + G_{np} U_p(s) + G_{nn} U_n(s) + I_{-k_{n\alpha}} \alpha(s) \quad (4.2.4)$$

Katsayılar  $R_x$ ,  $G_{px}$ ,  $G_{nx}$ ,  $K_{I_{Nx}}$ ,  $I_{-k_{x\alpha}}$  ( $x=p,n$ ) ve  $Z_R$ ,  $U_{-k_\alpha}$  frekansa bağılıdır. Fakat bu (4.2.3) ve (4.2.4) ün basitleştirilmesinde kullanılmaz. Bu katsayılar kolayca çıkarılabilirler ve komütasyon aşırı zamanının dinamik varyasyonunda böylece hesaba katılmış olur. S domeni modelini tamamlamak için AC ve DC voltaj – akımları arasındaki ilişkiye ihtiyacımız var:

$$U_{dc}(s) = Z_{dc} I_{dc}(s)$$

$$U_p(s) = Z_{Lp} I_p(s) \quad U_n(s) = Z_{Ln} I_n(s) \quad (4.2.5)$$

Burada  $Z_{Lp}$  ve  $Z_{Ln}$  Grafik 4.2.2’de gösterilen empedanslardır. Bu empedanslar pozitif ve negatif sekuans frekanslar için geçerlidir. Kontrol aksiyonu ve senkronizasyon devresi  $\alpha(s)$  varyasyonunu aşağıdaki gibi etkiler:

$$\begin{aligned} \alpha(s) &= \alpha_1(s) + \alpha_s(s) = \\ &= G_{reg} I_{dc}(s) + K_{Sp} U_p(s) + K_{Sn} U_n(s) \end{aligned} \quad (4.2.6)$$

Burada ilk terim, akım kontrol çevriminden gelmektedir; ikinci ve üçüncü terim senkronizasyon devresine aittir. EPC senkronizasyonu için  $K_{sp}$  ve  $K_{sn}$ ; sıfırdır, çünkü kontrol darbesi, MV bara voltajının distorsiyonundan bağımsızdır. Konfigürasyon ile ateşleme açısı ve MV bara distorsiyonu arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir:

$$K_{Sp} = G_{Fp} / (U_1 G_F(j\omega_s)); \quad K_{Sn} = - G_{Fn} / (U_1 G_F(j\omega_s)) \quad (4.2.7)$$

Burada  $U_1$  konvertör girişindeki rms(efektif) voltajdır,  $\omega_s$  ise hat açısal frekansıdır ve  $G_{Fp}$  ve  $G_{Fn}$ ;  $G_F$  filtresinin çeşitli frekanslardaki durumunu belirtir.

(Formüller 4.2.3 – 4.2.7) Tekrar düzenlenirse, tüm transfer fonksiyonunun oranını elde etmek mümkün olacaktır. Burada DC empedans ve AC empedans hem açık hemde kapalı çevrim içindir. Kontrol dizayn kriterleri için ateşleme açısı  $\alpha_1(s)$  ve DC akım  $I_{dc}(s)$  arasındaki transfer fonksiyonunun gözden geçirilmesi gerekir.

Şekil 4.2.5, bu sistem için transfer fonksiyonunun faz ve modülünü göstermektedir. Çünkü dört akım çevrimi de altı darbeleri köprüye aittir. Diyagram 150 Hz ile sınırlandırılmıştır. Analiz kriterleri için, aşağıdaki konfigürasyon incelenmiştir: köprülenmemiş harmonik

filtreleri, EPC senkronizasyonu, dört köprünün her biri için nominal DC akım  $I_{dc}$ ; 30kA'e eşittir, normal ateşleme açısı  $\alpha$ , % 53'e eşittir, yük ise eşdeğer bir direnç ile belirtilmiştir. TCR ise bu hesaplamalar için sabit bir endüktans şeklinde kabul edilmiştir. Şu not edilmelidir ki hem modül hem de faz kesinlikle AC sistem empedansının  $Z_L$  rezonans piklerinin karşılıklı frekanslarındaki ideal durumdan ayrı tutulmalıdır.

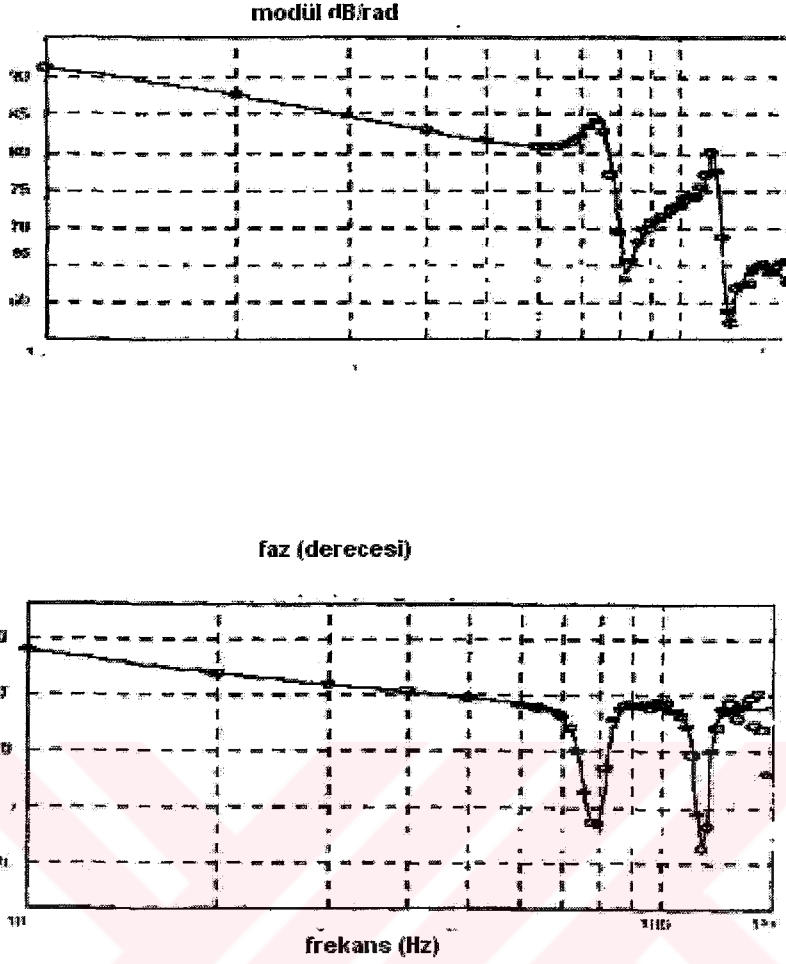
Gerçek olmayan direnç yükünün kullanılma sebebi, açık çevrim koşulları altındaki ayrıntılı EMTP simülasyonlarının karşılaştırılmasından ileri gelmektedir. Ateşleme açısının küçük bir kısmı kullanılmıştır ve bu kısım çeşitli frekanslardaki ve hesaplanmış karşılıklı DC akımının modülasyonunun çalışma noktası çevresindedir. "o" sembolleri EMTP simülasyonuna karşılık gelir.

Voltaj çevrim amplifikasyonunu açıklamak ve değerlendirmek için senkronizasyon şeması tekrar incelenmiştir. İki farklı konfigürasyon kullanılarak (4.2.6)'yı düzenleyip yeni bir transfer fonksiyonu elde edilmiştir.

- a) 50 Hz bant genişliğinde dördüncü sıra düşük geçiren filtre (ilk adımdaki tesisin gerçek konfigürasyonu)
- b) 50Hz de aşağıdaki ifade için geçerli olan filtre

$$G_F(s) = (\xi / \omega_s) (s / (1 + 2 \xi s / \omega_s + s^2 / \omega_s^2)) \quad (4.2.8)$$

Burada  $\xi = 0,5$ , bu değer standart pratikte olduğundan biraz fazla olmakla beraber (4.2.6)'nın analizi için yararlı bir değerdir.



Şekil 4.2.5. DC akım ve ateşleme açısı arasındaki transfer fonksiyonunun diyagramı: Frekans domeni modelinin eğrisi. Burada “o” sembolleri EMTP simülasyonu ile elde edilen sonuçları göstermektedir. Kullanılan konfigürasyon: köprülenmemiş harmonik filtre. EPC senkronizasyonu. Rezistif ark davranışı  $I_{dc} = 30\text{kA}$ ,  $\alpha = \% 53$ .

Şekil 4.2.6. Bu grafikteki ilk şekil a) konfigürasyonu için ve ikinci şekil ise b) konfigürasyonu içindir. Burada 75 Hz’lik güçlü bir amplifikasyon söz konusudur ve ZL empedansının ilk paralel rezonansı 125 Hz civarındadır. Güçlü amplifikasyonun olmasının nedeni akım çevrim bant genişliğinin düşük tutularak 0 dB seviyesinin olası çoklu geçirgenliğinden kaynaklanan kararsızlığın önlenmesidir.

#### 4.2.4 Adapte Edilmiş Öngörüler İçin Dizayn Kriterleri

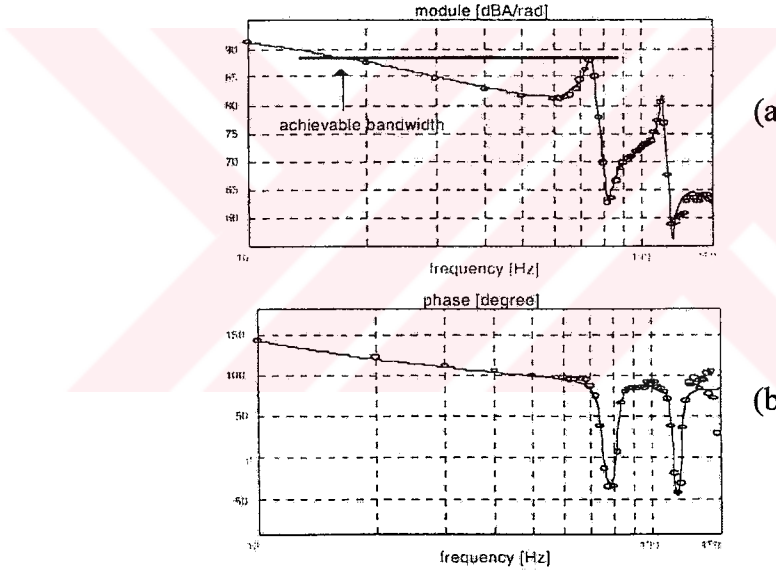
Bahsedilen yaklaşım temel alınarak, bu bölümde interharmonik gürültülerini önlemek için gerekli olan öngörüler açıklanacaktır. Bu öngörüler harmonik filtrelerdeki değişimler, senkronizasyon prosedüründeki değişim ve akım regülatörü parametrelerindeki değişimlerle ilgilidir.

Burada bazı tesis parametrelerinin varyasyonlarının sistem performansını hesaplamak için bazı kriterler kullanılmıştır. Bunlar akım – kontrolünün Grafik 4.2.2’de gösterilen kararsızlık

seviyesine çıkmasını önler. Bu gerçekten sistemin performansının dalgalanma ve tristör stresleri açısından hesaplanması için iyi bir göstergedir. Şekiller 4.2.5, 4.2.6 ve 4.2.7'ya bakılırsa erişilebilecek maksimum bant genişliği 0dB faktörü ile belirlenir ki bundan kaçınılmalıdır. Genel olarak kullanılan PI kontrolör dikkate alınırsa pratik olarak daha karmaşık bir kontrolör yapısı elde edilmiş olur. Şekil 4.2.6'de erişilebilen bant genişliği görülmektedir. Şekiller 4.2.5 ve 4.2.7 da ise transfer fonksiyonu için alınabilecek maksimum değer gösterilmiştir. Bu eğrinin daha önce bahsedilen transfer fonksiyonu ile kesişimi maksimum erişilebilen bant genişliğini verir.

#### 4.2.4.1 Harmoniklerin filtreler ile söndürülmesi

Şekil 4.2.5 ve 4.2.7'dan da anlaşılacağı gibi ana problemlerden bir tanesi ilk paralel rezonans empedansı olan  $Z_L$ 'dir.



Şekil 4.2.6. DC akım ile ateşleme açısı arasındaki transfer fonksiyonunun işaret diyagramı; frekans domeni modeli için birleştirilmiş eğri. Burada ki her “o” sembolü EMTP simülasyonları tarafından elde edilen sonuçlara göre belirtilmiştir. Kullanılan Konfigürasyon : Söndürülmemiş harmonik filtre. GF filtre senkronizasyonu için  $S = 0.5$  50Hz de Notch filtresi, Rezisif ark davranışı  $I_{dc} = 30kA$ ,  $\alpha = 53^\circ$ .

Açık bir koşul olarak bazı harmonik filtrelerin söndürülmesi gerekir. Değişik çözümler göz önünde bulundurularak  $R_{3m}$  söndürme direnci 3. harmonik filtresinin indikatörü olarak yerleştirilmiştir. Şekil 4.2.6, söndürme direncinin bir fonksiyonu olarak ulaşılabilen bant genişliğini göstermektedir. Bu da düşük geçiren filtre GF için kullanıldığında geçerlidir. İnce eğri 7. harmonik filtresinin söndürülmesi durumu için geçerlidir. Kalın olan ise söndürülmemiş koşullar için geçerlidir. Açıkçası, iki koşul arasında çok büyük bir fark yoktur çünkü 7. harmonik filtresinin söndürülmesi, ilk paralel rezonansı etkilemez. 7. harmonik

filtresinin söndürülmesi, 275Hz ve 575Hz civarındaki rezonanslar için geçerlidir. Şekil 4.2.8 den ve sistem performansı ve güç kayıpları dikkate alınarak R3m 180 ohm seçilmiştir. Şu dikkate alınmalıdır ki bu durumda erişilebilen bant genişliği (24Hz'den biraz fazla olarak) istenen sistem performansı ile karşılaştırıldığında biraz küçüktür.

#### 4.2.4.2 Senkronizasyon Şeması

Şekil 4.2.5 ve 4.2.7'dan anlaşılacağı üzere, senkronizasyon şeması kuvvetli bir biçimde sistem performansını etkilemektedir. EPC kontrolü ilk konfigürasyonda mümkün değildir. GF filtresi 50Hz'lik notch filtresine dönüştürülmüştür. Böylece en iyi sonuç elde edilmiş olur. Çok dar bir notch EPC kontrolü ile aynı performansı sağlayacaktır. Fakat daha yavaş dinamik bir davranışı vardır ve küçük te olsa temel bileşen için kabul edilemeyecek ve çok tehlikeli faz kayması olasılığına sahiptir. Bu problemler, kısmi olarak filtrenin S'nin yükselmesini engeller. Fakat harmonik hareketliliği daha da kuvvetlenir. Bu davranışın ana noktaları verilirse Şekil 4.2.9 deki (a) eğrisi filtrenin S değerinin fonksiyonu için ulaşılabilecek bant genişliğini gösterir. Tüm pasif filtreler söndürüldüğünde aynı koşullarda (b) eğrisi elde edilir. Fakat bu rezonans tepesinin % 20'sini güvenlik sınırı olarak kabul etmek gerekir. Bunun içinde 0.2'nin iyi bir çözüm olacağı düşünülmüştür. EPC performansına yakın olarak (a) durumu için 53Hz'lik maksimum bant genişliği verir. Böylece, EPC'li devreye göre senkronizasyon şemasının değiştirilmesinde sağlam bir gelişme beklenmez, buda 2Hz'lik bir bant genişliğinde artmaya neden olur. Sonuç olarak şu belirtilmelidir ki sistem dinamiği, notch'tan düşük geçiren filtreye doğru, GF filtresindeki değişiklik ile gerçekleştirilmiş olur. Çünkü ulaşılabilen bant genişliği , 26Hz den 51Hz'e kadar aynı filtre konfigürasyonlarında geçerlidir.

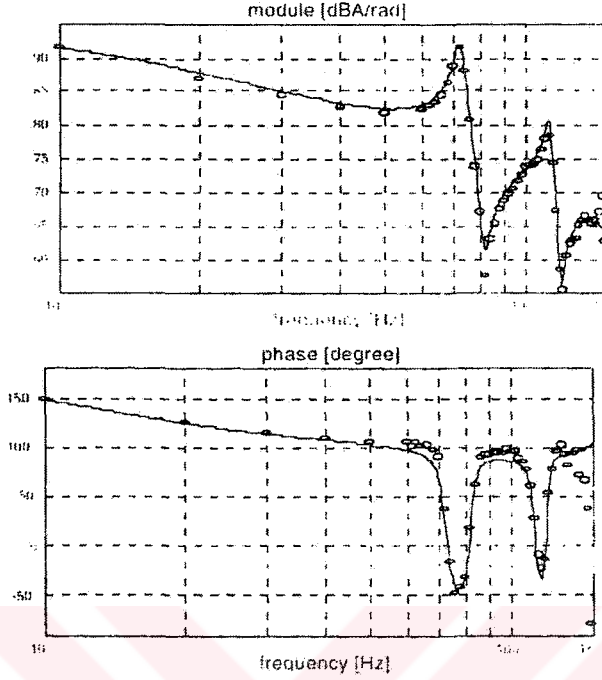
#### 4.2.4.3 Akım Çevrimindeki Notch Filtresi

Bahsedilen transfer fonksiyonunun güçlü amplifikasyonu 75Hz civarında oluşur ve tam değeri, TCR'nin çalışma noktasına bağlıdır. Akım çevrimindeki 75Hz civarında notch filtresi azaltılarak teorik olarak amplifikasyon için kullanılır.

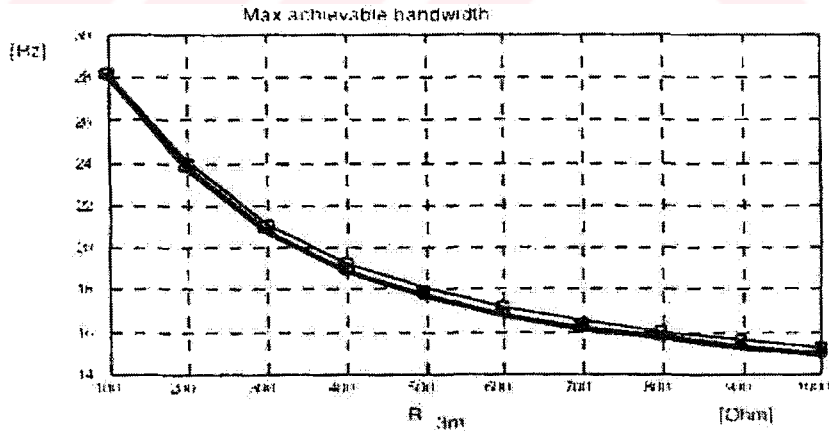
#### 4.2.4.4 Akım Çevrimi Bant Genişliği

Akım Çevrimi parametreleri Şekiller 4.2.5 – 4.2.7 ve Şekiller 4.2.8 – 4.2.9'den seçilebilir ve ana tesis konfigürasyonuna göre hesaplanabilir. Şu belirtilmelidir ki kontrol performansı, kapalı çevrim koşullarındaki ark fırınının DC empedansı göz önüne alınarak ta hesaplanabilir. (Bant genişliği ve faz hesaplanması)'na ek olarak bu da bir başka uygun kriterdir. Böylece

sistem performansı, 75Hz rezonansında oluşan kapalı çevrim ve söndürme faktörü de göz önüne alınarak, daha iyi açıklanmış olur.



Şekil 4.2.7. Ateşleme açısı ve DC akım arasındaki transfer fonksiyonunun nokta diyagramı; frekans domeni modeli için çizilen grafik. buradaki her “o” sembolü EMTP simülasyonundan elde edilen sonuçlar doğrultusunda belirtilmiştir. Söndürülmemiş harmonik filtresi için kullanılan konfigürasyon; GF filtre senkronizasyonun dördüncü harmonik bileşeni için 50Hz civarındaki düşük geçiren filtrenin bant genişliği. Rezisif ark davranışı,  $I_{dc} = 30kA$ ,  $\alpha = 53^\circ$ .



Şekil 4.2.8. Söndürme direncinin erişilebilir bant genişliği varyasyonu için belirlenen fonksiyonunun grafiği 3. harmonik filtresinin indikatörüne paralel olarak yerleştirilmiştir. Konfigürasyon: Dördüncü bileşen düşük geçiren filtre, GF filtresi olarak voltaj generatör ark modeli olarak kullanılmıştır.

Şekil 4.2.10.'da Kullanılan iki farklı regülatör için geçerli olan daha önce bahsedilmiş empedansı göstermektedir. Bundan sonra bu regülatörlere  $REG_1$  ve  $REG_2$  denilecektir (bunlar

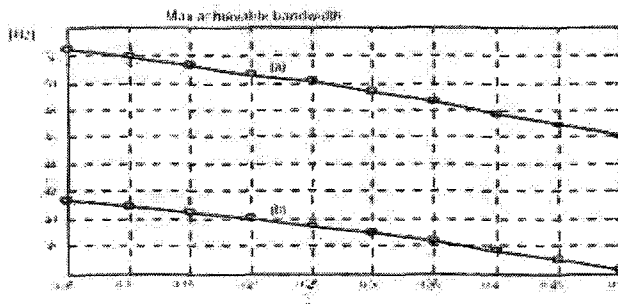
tesiste test edilmiş regülatörlerdir.)  $REG_1$  daha yüksek bir bant genişliğine sahiptir. Bunun yanında her iki regülatörde düşük frekanslarda DC empedanslar için daha iyi bir artış sağlarlar. Buda dalgalanma açısından önemli avantajlar sağlar. Ayrıca  $REG_1$ , empedansta önemli bir düşüşe neden olur ki (düşük bir söndürme faktörü ile ) buda belirli frekanslardaki sistemin ark voltajlarında bir kötüleşmeye neden olur.  $REG_2$  rezonans frekanslarında daha iyi bir davranışa sahiptir, (75Hz civarında) Düşük frekanslarda ise performansında azda olsa bir düşme gözlenir. Bu, bu bölümde ölçüm için kullanılan regülatördür.

Gerçek tesisin ayrıntılı EMTP modeli ile ayrıntılı analiz ve sağlama gerçekleştirilmiştir. İnter harmonik dalgalanmaları kopyalanmıştır. Bu işlem deneysel ölçümler ve bölüm III'ün analitik metotlarını içerir. Ayrıca Şekil 4.2.8 ve 4.2.9'de de iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu simülasyonlar sistem parametrelerinin ana konfigürasyonu için oldukça önemlidir.

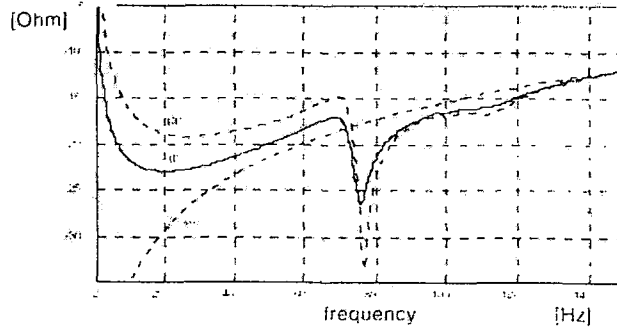
#### 4.2.5 Değişik Konfigürasyonlar için Deneysel Ölçümler

Tesisin ilk bölümünde gerçek tesiste birçok konfigürasyon test edilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda aşağıdaki durumlar kaydedilmiştir.

- Durum 1 :  $G_F$  için düşük geçiren dördüncü bileşen filtresi  
75Hz'lik notch filtresi olmadan  $REG_2$  akım regülatörü
- Durum 2 :  $G_F$  için düşük geçiren dördüncü bileşen filtresi  
75Hz'lik notch filtresi ile  $REG_2$  akım regülatörü
- Durum 3 :  $G_F$  için  $S=0.2$  ve 50Hz'deki notch filtresi ile  
75Hz'lik notch filtresi ile  $REG_2$  akım regülatörü
- Durum 4 :  $G_F$  için  $S=0.2$  ve 50Hz'deki notch filtresi ile  
75Hz'lik notch filtresi olmadan  $REG_2$  akım regülatörü



Şekil 4.2.9.  $G_F$  filtresinin  $\xi$  fonksiyonunun erişilebilir bant genişliğinin varyasyonu. Konfigürasyon:  $G_F$  için notch filtresi, voltaj generatörü ark modeli. (b) eğrisi rezonans tepesinin % 20 güvenlik faktörü ile hesaplanması ile elde edilir.



Şekil 4.2.10. Kapalı çevrim operasyonu altında ark fırını tarafından görülen DC empedans. (a) REG1'e ve (b) ise REG2'ye, (c) ise (kesikli çizgi) DC kesme empedansı  $L_d$ 'ye aittir. Akım regülatörü REG2 75Hz'lik notch filtresi olmadan kullanılır.

Şekiller 4.2.11 – 4.2.17, köprü rektifierinin  $I_{dc}$  DC akımının spektrumunu ve 33 kV'luk baranın bahsedilen 4.durum için spektrumunu gösterir. Durum 1 için, DC değere % 4 ile bağlı olan yüksek 73.2 Hz'lik bileşen kullanılır. Buda 146 Hz'lik bileşene eklenerek değerlendirilir. Birçok ölçüm 40 dakika boyunca yapılmıştır. Üst tarafta kalan eğriler maksimumu gösterir ve aşağıdaki eğriler ise ortalama olanları gösterir. Bu bileşenlere karşılık olarak % 6 voltaj distorsiyonu MV barasında ölçülür. Bu sonuçlar yapılan analizle örtüşür, çünkü  $Z_{dc}$ , küçük bir söndürme faktörüne sahiptir. Bu o frekansta kararsız durum için geçerlidir.

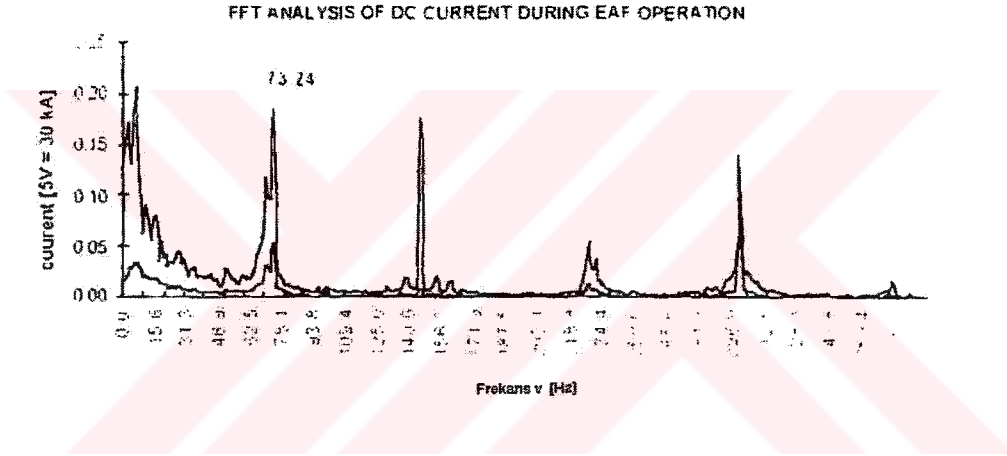
Şekil 4.2.13 gösterir ki kullanılan 75 Hz'lik notch filtresi içsel reaksiyonları azaltmak için kullanılan geri besleme çevrimi için kullanılır. Bunun yanında, DC rezonans 69.3 Hz'e kaymıştır ve sadece biraz azalmıştır. Bununla örtüşerek, AC voltaj interharmonikleri 120Hz'e kaymıştır, şekil 4.2.15'te gösterildiği gibi ve yine sadece bir önceki duruma bağlı olarak biraz azalmıştır. Şunu belirtmekte fayda vardır ki ölçümler devamlı değildir ve bu nedenle zamana bağlı ark fırını davranışı nedeniyle bazı farklılıklar görülebilir. Bunun yanında, ölçümlerin yapılabilmesi için, karşılaştırmalar yapılmış ve tüm ölçümler aynı ark fırını koşulları altında alınmaya çalışılmıştır. Bu yüzden sadece birkaç grafik raporlanabilmiştir. Şekiller 4.2.11 – 4.2.17'da farklı ölçümler için birçok farklı davranışı içermektedir.

Şekil 4.2.15, senkronizasyon şeması için kullanılan yeni filtrenin yararlılığını gösterir. Bu yüzdede inter harmonik distorsiyonu gözle görülen bir biçimde azalmıştır. Bu bölüm 4'ünde aynı zamanda bir analizdir. Yeni senkronizasyon altındaki kapalı çevrim notch filtresinin etkisinin görülmesi için, akım regülatörü REG<sub>2</sub> 75 Hz'lik uyum olmadan kullanılmıştır ve Şekiller 4.2.16 ve 4.2.17'da sonuçları göstermektedir. Şekil 4.2.15 ve 4.2.16 karşılaştırılırsa bu koşul için öngörünün etkisi yararlı değildir sonucu elde edilir. Bu son konfigürasyonda

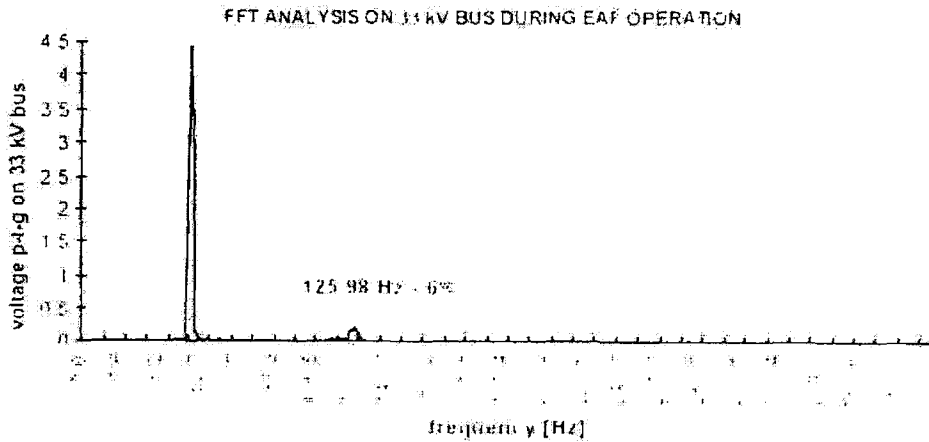
bahsedilen inter harmoniklerdeki voltaj distorsiyonu gözle görülen bir biçimde düşerek % 0.8'ler civarına inmiştir. Buda Şekil 4.2.18'de gösterilmiştir. Burada temel bileşen yükselmiştir.

Bunun yanında düşük frekanslardaki (40Hz altı) harmonik spektrumu notch filtresi akım çevrimi etkisi ile iyice azalmıştır. Bu farkı bir çok farklı ölçümde olduğu gibi Şekil 4.2.15 ve 4.2.16'de de görülüyor. Bu sonuçlardan kullanılan notch filtresinin akım çevrim fazınının marjini azalttığı görülür ve böylece ark voltajı varyasyonları altında davranışlar incelenmiş olur.

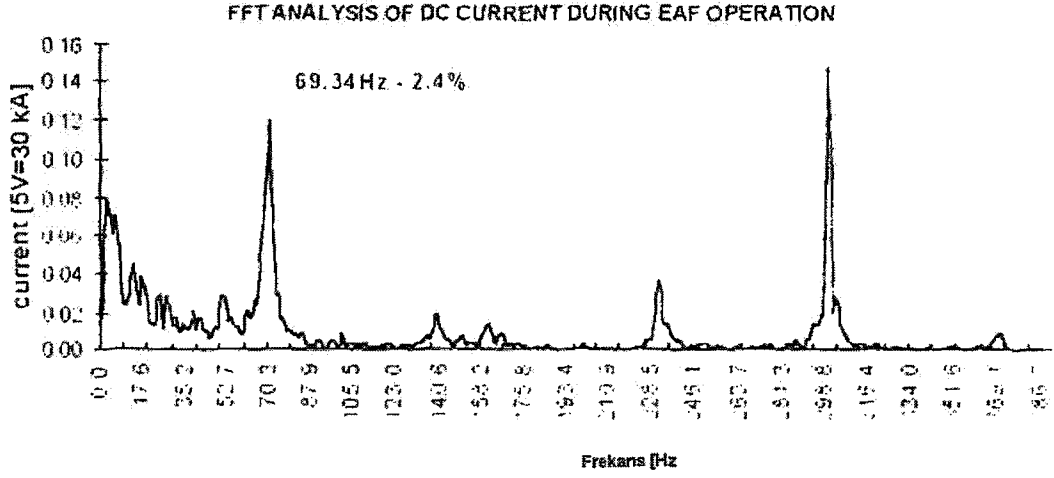
Sonuç olarak, Şekil 4.2.18'de gösterilen öngörülerin etkinliğinin hesaplanması için Pst ve Pst (% 99) ölçülerek PCC'deki ana koşullara ulaşılmış olur. Tesis IEC868 standartları ile uyumludur. Durum 1 için, ortalama Pst (% 99) değeri 1.1 – 1.2 civarında ölçülür.



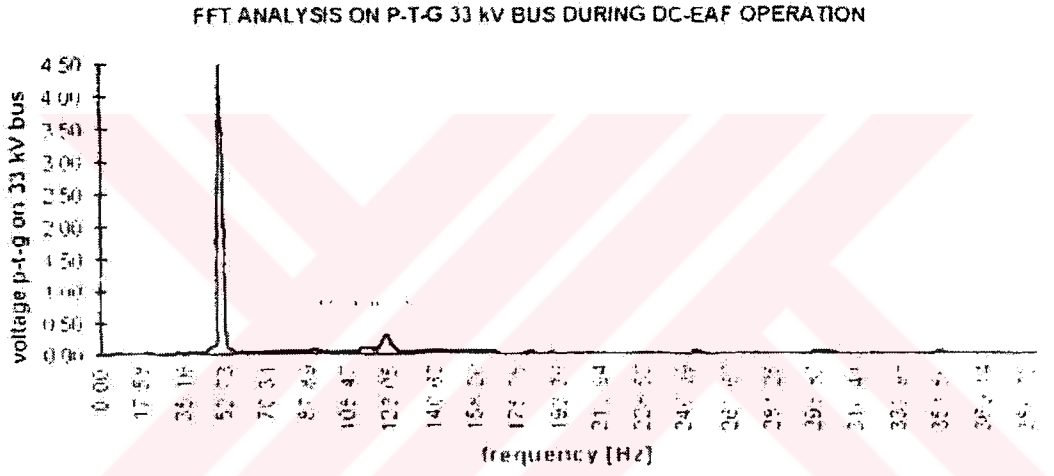
Şekil 4.2.11. Durum 1 için tek köprüdeki DC akımın IDC spektrumu.



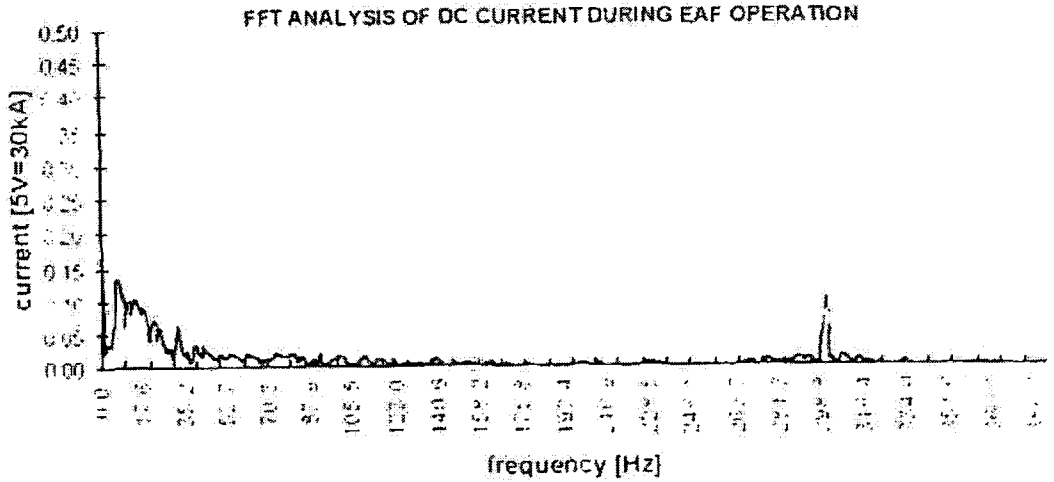
Şekil 4.2.12. Durum 1 için 33kV'luk bara voltajının spektrumu.(10\*kV olarak açıklanmıştır)



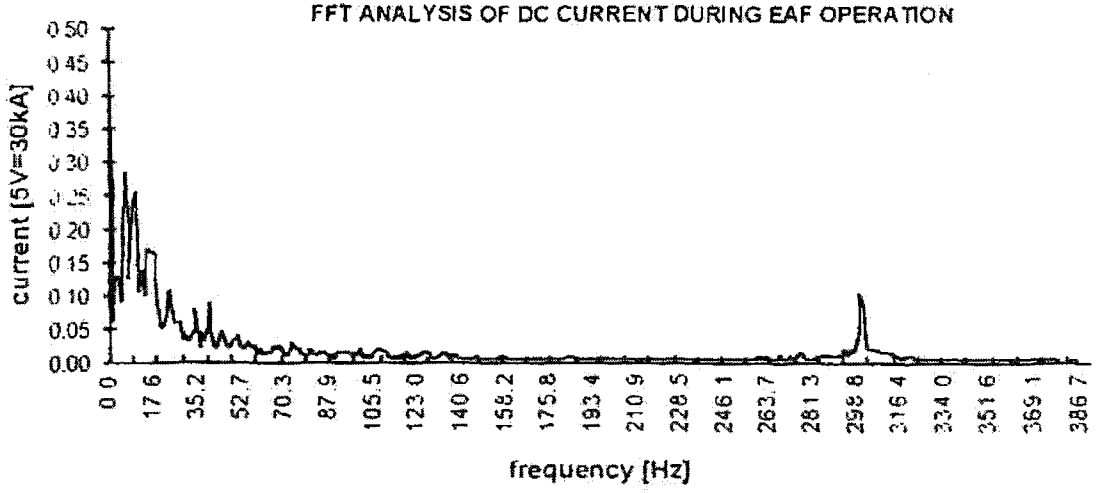
Şekil 4.2.13. Durum 2 için bir köprüdeki IDC akımın spektrumu.



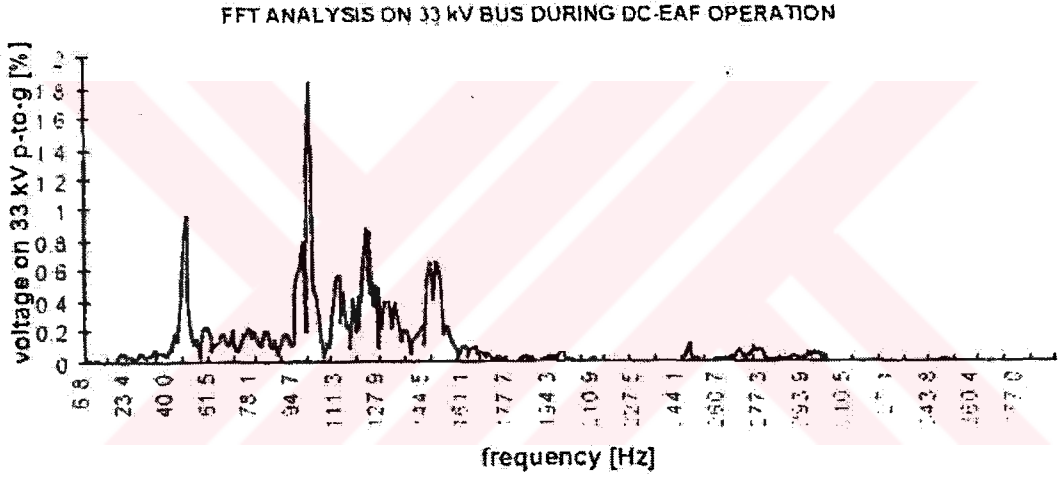
Şekil 4.2.14. Durum 2 için 33kV'luk bara voltajının spektrumu. (10\*kV olarak açıklanmıştır.)



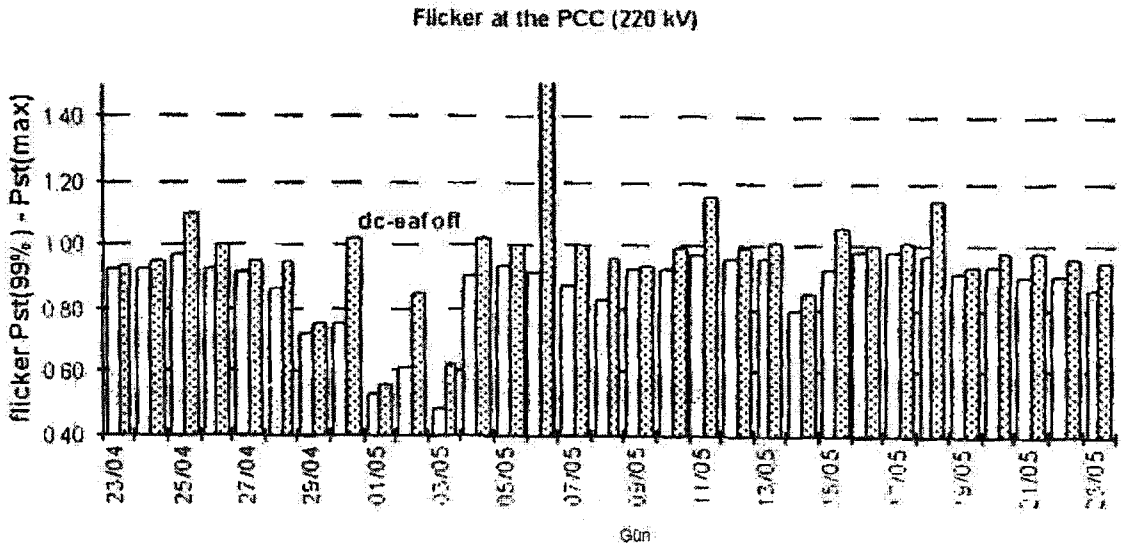
Şekil 4.2.15. Durum 3 için tek köprüdeki akım IDC spektrumu.



Şekil 4.2.16. Durum 4 için bir köprüdeki IDC akımın spektrumu.



Şekil 4.2.17. Durum 4 için 33 kV'luk bara voltajının spektrumu. (% olarak temel bileşen).



Şekil 4.2.18. 220 kV'teki Pst (% 99) ve Pst (maks.) dalgalanma ölçümleri.

#### 4.2.6 Çalışmanın Yorumlanması

Bu bölümde DC ark fırınının çalışması sırasındaki bazı interharmonik bozulmalar analiz edilmiştir ve bunların açıklanması için öngörüler oluşturulmuştur. Dalgalanmanın ana nedeni gürültüler gibi tristör konvertörlerinin AC ve DC taraflar arasındaki içsel olaylardır. Bu da transfer fonksiyonu yaklaşımı ile açıklanır ve tesisin ayrıntılı EMTP modeli çözülür. Her iki metot ta öngörülerin tasarımı için yararlıdır. Bu da akım regülatörünün parametrelerindeki değişimi, harmonik filtre tasarımındaki değişimi ve senkronizasyon prosedüründeki değişimi içermektedir.

Gerçek tesisten alınan birçok ölçümler, adapte edilen çözümün yararlılığını göstermektedir.

(Matavelli, P., Fellin, L.)

#### 4.3 DC Ark Fırın Çalışmasının Analizi ve 187 HZ'lik Voltaj Distorsiyonu Nedeniyle Oluşan Dalgalanmalar \*

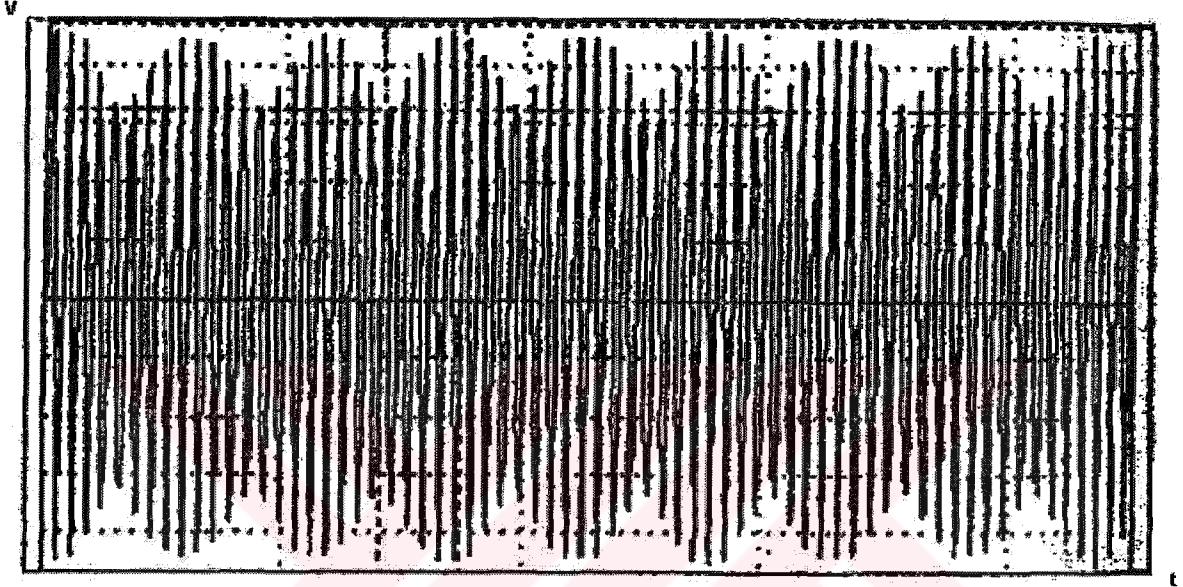
##### 4.3.1 Çalışmanın Açıklanması

Bu bölümde, DC ark fırınlarının çalışması sırasında oluşan beklenmeyen dalgalanmalar analiz edilmiştir. Gürültünün ana nedeni, harmonik rezonansı olup bu da karakterize edilememiş konvertör akım harmoniklerinden kaynaklanmaktadır. Bu fenomen, Elektro magnetik Transient (geçici) programı sayesinde incelenmiştir. Simülasyon modeli ve sonuçlar açıklanmıştır. Normal ve anormal konvertör koşulları altında karakterize edilemeyen konvertör akım harmonikleri gerçekleştirilmiştir. Beklenmeyen 187 Hz'lik gürültü ve dalgalanma nedeniyle oluşan koşullardan bahsedilmiştir.

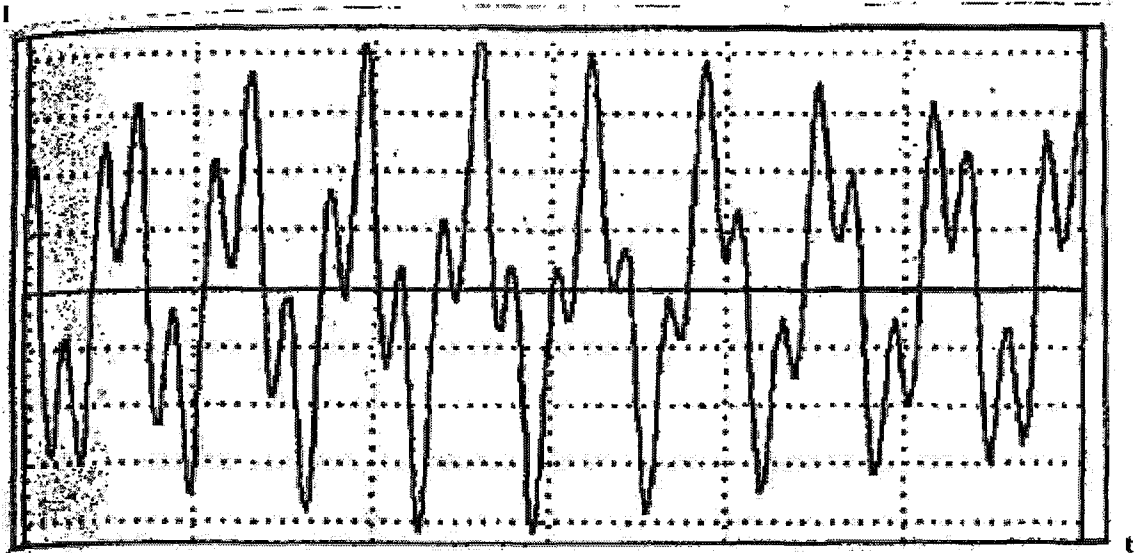
Güç elektroniği teknolojisindeki hızlı gelişmeler yüksek, güçlü rektifikasyonu, uygulamalar için olanaklı kılmıştır. Böylece, DC ark fırını tesislerinin sayısı son yıllarda tek bir ünite için 200MW'lara ulaşarak artmıştır. DC ark fırınları, geleneksel AC ark fırınlarına göre oldukça belirgin avantajlara sahiptirler. DC ark fırınları, AC ark fırınlarında olan dalgalanmanın yarısından daha az bir dalgalanmaya sahiptirler.

Yeni bir 30MW'lık DC ark fırınının, 2400MVA'lık bir sistemin kısa devre kapasitesinde kayda değer bir gürültü yaratmayacağı beklenir. Fakat fırın çalışmaya başlamasından kısa bir süre sonra, birçok kullanıcı, voltaj dalgalanmalarından şikâyetçi olmaktadır.

Çelik tesisi ve çalışanları dalgalanma şikâyetleri doğrultusunda düzeltici bazı önlemler almışlardır. Şekil 4.3.1 ve 4.3.2 çelik tesisinde 26,4 kV'luk bara voltajını ve gürültü sırasında ölçülen akımı göstermektedir. Yapılan testler gösterir ki dalgalanma problemi fırın harmonik filtresi bağlantıdan kesildiğinde ortadan kaybolmaktadır. Sonuçta, harmonik filtre tasarımı değişmiştir ve fırın kontrolleri güçlendirilmiştir. Bu adımlar izlendikten sonra, problemler bir daha ortaya çıkmamıştır.



Şekil 4.3.1. 26. 4kV baradaki DC ark fırınında kaydedilen gerilim değişimi.



Şekil 4.3.2. 26.4kV baradaki DC ark fırınında kaydedilen akım değişimi.

\* Tang, L., Mueller, D., Members, IEEE - Electrotek Concepts, Inc., Knoxville, Tennessee; Hall, D., Member, IEEE - Wisconsin Electric Power Co. - Milwaukee, Wisconsin; Samotyji, M., Electric Power Research Institute - Palo Alto, California; Randolph, J., Non-Member, IEEE - Charter Steel - Saukville, Wisconsin, "Analysis Of DC Arc Furnace Operation And Flicker Caused By 187Hz Voltage Distortion"

Bunun yanında bu güçlendirmeler voltaj dalgalanmasını ortadan kaldırmakla beraber kaynağı belirsiz duruma gelmiştir. Bu çalışmanın ana nedeni, gerçekte ne olduğunu anlamak ve sistem koşullarını gürültü açısından daha iyi analiz etmektir. Böylece, çözümün etkinliği anlaşılmış olacaktır. Çalışma, alan ölçümlerini, teorik analizi ve bilgisayar simülasyonlarını içermektedir.

#### 4.3.2 187 HZ'lik Gürültü Dalgalanması

Şekil 4.3.1'deki voltaj dalga formu 60Hz'lik tepe büyüklüğünün değişimini bir periyotta yaklaşık 0.133 saniye için veya 7,5 Hz'lik frekans aralıklarında göstermektedir. Dalgalanmadaki rms değişimleri için olan etkiler üzerine yapılan çalışmalar göstermiştir ki 187 Hz en fazla gözlenen frekans değeridir. Şekil 4.3.2'deki akım dalga formu ise, fenomenin kaynağını göstermektedir. Buda gösterir ki sabit büyüklükteki yüksek frekanslı akım devamlı olarak 60 Hz'lik temel akım ile faz ilişkisine sahiptir. Bu gözlem, önemli bir sonuca dayanmaktadır ki yüksek frekans fenomen için integral olmayan bir çarpım ile temel frekansa bağımlıdır. Aksi takdirde, her iki bileşeninde süperpoze edilmesi, içsel döngülerde ek gürültülere neden olacaktır.

Yaklaşık 7 Hz olan frekans aralığı görünen voltaj dalgalanmasını oluşturur. Bu frekans yaklaşık olarak 60 Hz'lik güç frekansı ile 187 Hz'lik bileşenin toplamından oluşur. Burada fenomen için, iki frekansın genel ifadesi karakterize edilmiştir:

Varsayalım ki zaman fonksiyonu  $f(t)$  iki frekans bileşeninden oluşsun, bu bileşenlerin büyüklükleri  $A$  ve  $B$  olsun ve bu bileşenlerin frekansları  $w_1$  ve  $w_2$  olsun. Burada  $A > B$  ve  $w_1 < w_2$  olursa,  $f(t)$  aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} f(t) &= A \sin(w_1 t) + B \sin(w_2 t) \\ &= A \sin(w_1 t) + B \sin(nw_1 + \Delta w)t \\ &= A \sin(w_1 t) + B \cos(\Delta w t) \sin(n \Delta w_1 t) + B \sin(\Delta w t) \cos(nw_1 t) \end{aligned} \quad (4.3.1)$$

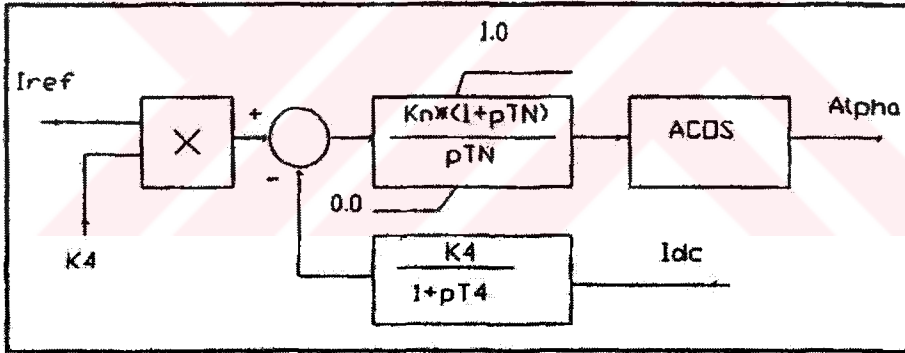
$w_2 > w_1$  için,  $n$  tamsayı olsun, (0, 1, 2, 3, .....)

Bu ifade gösterir ki  $w_2 = nw_1$  ( $\Delta w = 0$ ) olduğunda,  $f(t)$  fonksiyonunun periyodu temel bileşenin açısal frekansıdır  $w_1$ . Eğer  $w_2 = nw_1 + \Delta w$  ve  $\Delta w > 0$  ise,  $n$ . Harmoniğin bileşenlerinin büyüklükleri  $\Delta w$  frekansı ile orantılı oluşacaktır. Böylece  $w_1$  ve  $w_2$  frekans bileşenleri birlikte bulunurlar. Frekans aralığı, aynı zamanda  $f(t)$  fonksiyonunun periyodu, alt – senkronizasyon açısal frekansı olarak tanımlanır  $\Delta w$ .



Şekil 4.3.4 ark fırını rektifierını göstermektedir. 12 pulse çalışması, üçgen – üçgen ve üçgen – yıldız bağlantı ile 6 pulse'lık konvertörler ile sağlanmaktadır. Bu çalışma için, 26.4kV barasından gelen 5. ve 7. harmonik akımlarının büyük bir bölümü konvertörler tarafından üretilir. Herhangi bir artık 5. ve 7. harmonik akımları 5. ve 7. filtreler tarafından kompanse edilir. Karakteristik 11. ve 13. harmonik akımları, yüksek geçiren filtre yardımıyla azaltılır. Normal konvertör çalışmasının, sisteme önemli miktarda harmonik vermesi beklenmemektedir.

DC ark fırınları, sabit bir DC akım ile çalışırlar. Sabit DC akımı, SCR ateşleme açısını kontrol eden rektifier kontrol eder. Ateşleme açısı, SCR anahtarlanması kapatıldığında, doğal komutasyon noktasından gecikme zamanını oluşturur. Sıfır dereceleri doğal komutasyonla örtüşür. Şekil 4.3.5, tipik bir kapalı DC akım kontrol çevriminin devresini göstermektedir. Bu kontrolün girişi akımın ayar noktasıdır, bu kontrolün blok diyagramının çıkışı ise ateşleme açısıdır ve geri besleme sinyali ise, gerçek DC akımdır.



Şekil 4.3.5. Sabit Akım Kontrolü Blok Diyagramı.

Bu simülasyonlarda model için kullanılan parametreler :

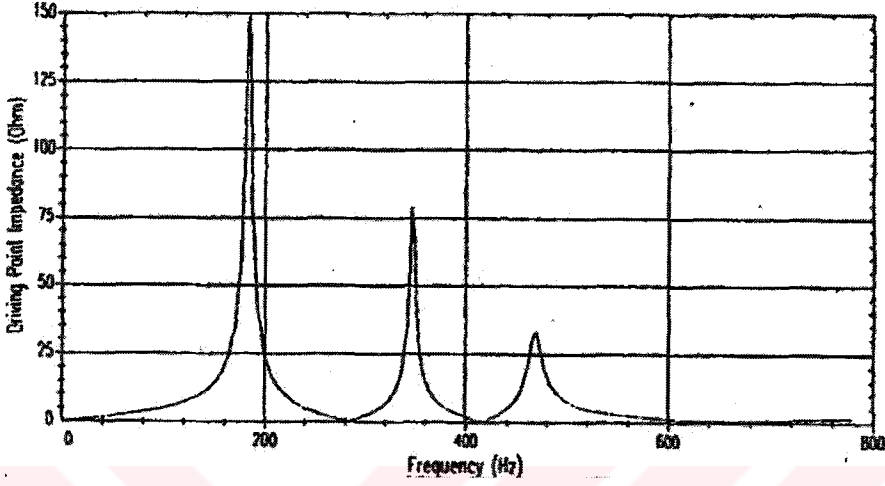
$$K_n=2.0 \quad T_N=0.02 \text{ saniye}$$

$$K_4=1.4E-5 \quad T_4=0.00276 \text{ saniye}$$

Bu alternatif sistemin modeli, SCR ateşleme kontrolünü de içererek, Elektromagnetik Geçici(Transient) Programını (EMTP) kullanarak geliştirilmiştir. Konvertörlerin ve dinamik akım kontrol mantığının çalışması, modele Kontrol sistemlerinin EMTP Transient Analizi ile uyarlanmıştır ve burada önemli olan (TACS) yeteneğidir.

#### 4.3.4 Sistem Frekansının Cevap Karakteristiği

5., 7. ve 11. harmonik filtreleri, karakteristik konvertör harmonikleri için tasarlanmıştır. Sistem empedansı, transformatörün ikincil tarafında 138 / 26,4 kV noktasında, transformatör kısa devre empedansı ve harmonik filtreleri ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.3.6. Çelik Tesisinin 26,4 kV tarafındaki Sürücü noktasındaki empedans.

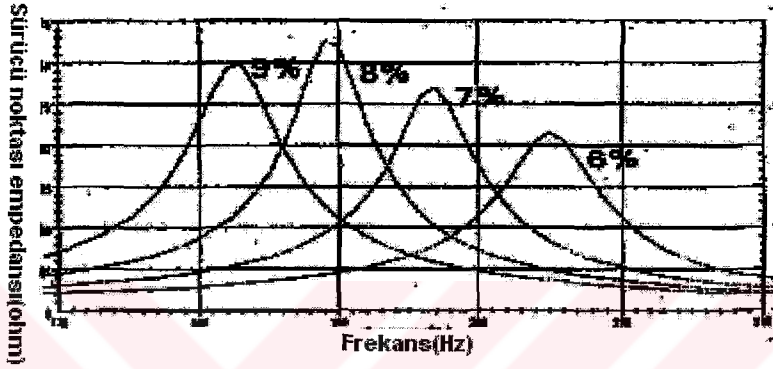
Şekil 4.3.6, kurulmuş filtre ve sistem için frekans cevabını göstermektedir. 3. harmonik frekans civarındaki ilk tepe rezonansı, 187 Hz Voltaj gürültüsü için ölçülen en önemli ölçümdür. Şekil 4.3.1 ve 4.3.2’de gösterilen ölçümler sırasında sistem, ilk tepe 187 Hz olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Sistemin frekans cevabı karakteristikleri, değişik güç sistem konfigürasyonlarının etkilerini gerçekleştirmek için değişik koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Sistem modeline, konvertör transformatörünün primer barasından birim akım enjekte edilmiştir. Sürücü noktasının empedans cevabı, 1 Hz ile 780Hz arasında hesaplanmıştır. Sürücü noktası empedansı, örtüşen birim akım enjeksiyonu tarafından sonuçlandırılan harmonik voltaj büyüklüğüdür. Bu frekans cevabı hesaplamaları, admitans matrisi çözüm tekniği ile gerçekleştirilir.

Üzerinde çalışılan sistem için, belirsizliklerden bir tanesi yük değişimleridir. Bunun yanında, harmonik filtresi 187 Hz civarındaki frekans cevabını gerçekleştirir, böylece diğer yükler frekans cevabı üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmazlar. Sistem yüküne eklenerek, rezonans frekansları biraz azalır ve rezonans devresinin Q faktörü azaltılmış olur. Şirketin tesisinin kapasitör bloklarının birçok kombinasyonu servis içinde ve dışında incelenmiştir. Bu kapasitör bloklarının etkileri; tesisin yerleşimine, kapasitör bloğunun boyutlarına, sistem konfigürasyonuna ve diğer sistem çalışma koşullarına bağlıdır. Bunun yanında, uzaktan

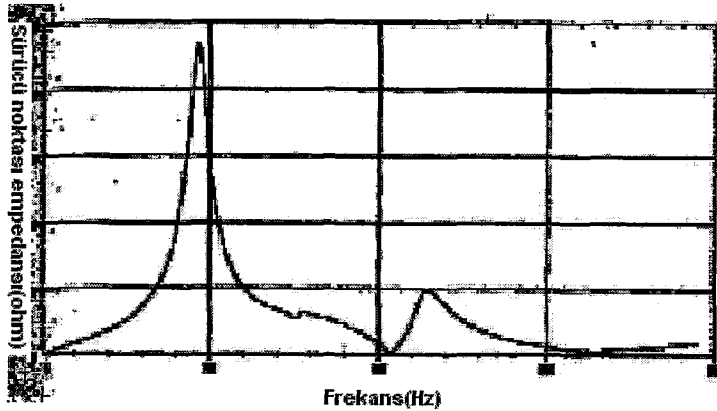
kontrol edilen kapasitör blokları sadece 6. harmoniğin üstündeki frekanslarda sistem cevap karakteristiklerini etkilemektedir ve 187 Hz'lik gürültünün gözlenmesi beklenmemektedir.

187 Hz'lik rezonans civarında frekans cevabını etkileyen bir sistem parametresi ise 138 / 26.4 kV'luk transformatör kısa devre empedansıdır. Bu empedans, kullanılan transformatörün özelliğine göre % 6'dan % 9'a kadar değerler alır. Şekil 4.3.7, bu farklı transformatör empedanslarına göre rezonansın nasıl değer aldığını göstermektedir. Kısacası, ölçümler sırasındaki kullanılan elektriksel bağlantı yaklaşık % 8'lik bir empedansa neden olur.



Şekil 4.3.7. Alt istasyondaki transformatör empedansı = 6, 7, 8, ve % 9 için sürücü noktasındaki empedans.

5. harmonik filtresine  $25\Omega$ 'luk direncinde eklenmesiyle sistemin frekans cevabı tamamen değişecektir. Şekil 4.3.8'de geliştirilmiş frekans cevabını göstermektedir. Bunun yanında 187 Hz civarındaki rezonans hala giderilememiştir ki bu da tepe değerinin büyüklüğünü % 75 azaltmıştır.



Şekil 4.3.8 . 26.4kV Bara sürücü noktası empedansı.

### 4.3.5 İdeal Konvertör Çalışması

İdeal çalışma koşulları altında sabit bir DC yük akımı ile  $I_a$  ve ateşleme gecikme açısı  $\alpha$ , ile rektifiern transformatör ikincil hat akımı, güç frekansını, 120 derecelik simetrik iletkenlik ile iki katına çıkartarak polariteyi oluşturur.

Bu akım Fourier serileri ile tanımlanabilir:

$$i(t) = \left( \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \right) \sqrt{2} I_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (4.3.2)$$

$$\Phi_n = -n\alpha$$

Girişin n. Harmonik akımının rms(efektif) değeri

$$I_n = (2\sqrt{2} I_a / n \pi) \times (\sin(n \pi / 3)) \quad (4.3.3)$$

Bu son eşitlik, ideleştirilmiş 6-pulseli (darbeli) konvertörün sadece tek AC hat harmoniklerini ürettiğini göstermektedir. İdeal konvertör tarafından üretilen harmonikler karakteristik harmonikler olarak adlandırılırlar.

### 4.3.6 Pratik Konvertör Çalışması

Pratikte, yukarıda açıklanan ideal çalışma; tristör ve anahtarlama sinyali karakteristikleri, üç fazlı voltajlardaki dengesizlikler veya zamanlama sinyali hataları nedeniyle gerçekleşmemektedir. Bu olayların hepsi dengesiz koşullar altında konvertör çalışması sırasında oluşur ve bazı karakterize edilemeyen harmonikler oluştururlar.

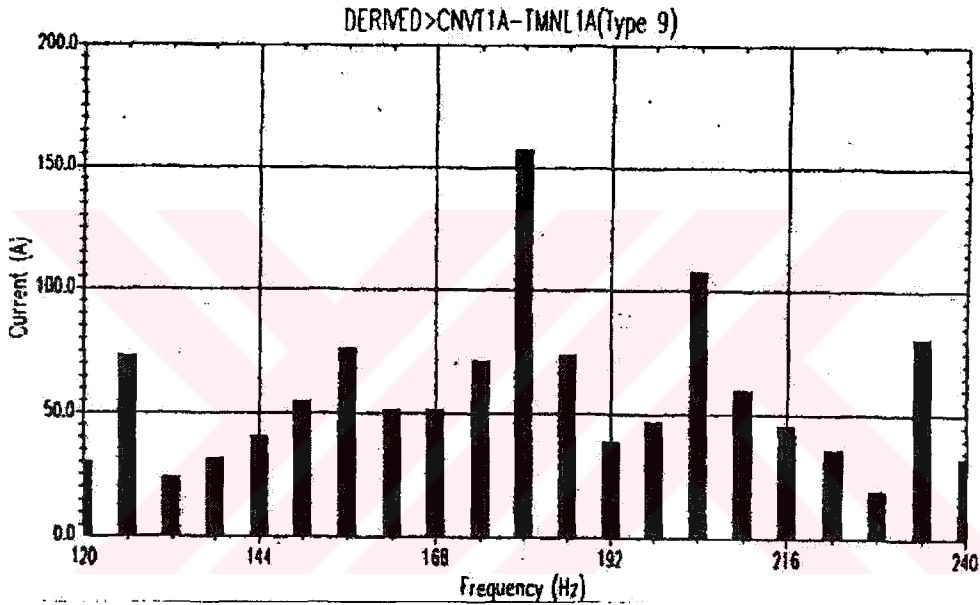
Karakteristik olmayan harmonikler, çift veya tamsayı olmayan her hangi bir sırada olabilirler. temel frekansın katları şeklinde. Genellikle, karakteristik olmayan harmonikler içeren dalga formu, karakteristik harmonik bileşenlerinin frekans spektrumuna yakın bir davranış sergiler.

Karakteristik olmayan harmoniklerin oluşumu rasgeledir, çünkü sistem ve kontrolleri tarafından dinamik olarak etkilenmektedir. Bunun yanında, diğer DC ark fırını tesislerinde karakteristik olmayan harmoniklerin büyüklükleri, genellikle temel bileşenden yüzde bir daha küçüktür. Karakteristik olmayan harmonikler, bu düzeyde ciddi sorunlara neden olmazlar fakat sistem rezonansını etkilerler.

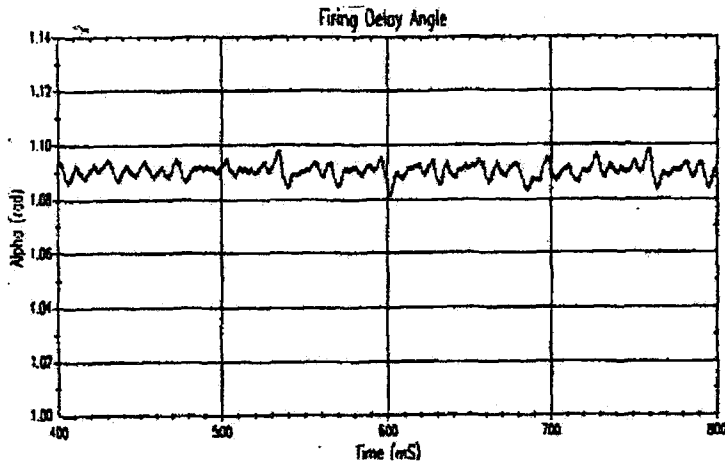
Bu araştırmada kullanılan EMTP modelleri SCR cihazlarını ideal olarak temsil etmektedir. Cihaz modelleri; anahtarlama kapandığında ve pozitif polarite olduğunda iletken hale gelirler. İletkenlik sırasında, cihazın direnci sıfırdır. Cihaz muhafazası, sıfır akım iletkenliği ile çalışır.

Pratikte, zaman adımı çözüm aralığı dikkatlice seçilerek  $45\mu$  saniye ayarlanmıştır. Bu değer otomatik olarak cihazın açılıp – kapanma karakteristiklerinin diverjansı olarak seçilir. Anahtarlama devrelerinin ve diğer koşulların etkileri modellenmiştir. Bu sadece simülasyonu daha pratik hale getirmez, aynı zamanda numerik kararlılığı da sağlamış olur.

Pratik koşulların EMTP simülasyonları gösterir ki ölçülmüş bir koşula ilişkin bir veri bulunamamıştır. Her konvertör yaklaşık olarak 5. ve 7. akım harmoniğinin % 22 ve % 15'ini ve 3.akım harmoniğinin etrafında % .7'lik bir üretim yapar. Şekil 4.3.9, 1. konvertörün frekans spektrumunu akım için üçüncü harmonik etrafında göstermektedir. SCR ateşleme gecikme açısının değişimi Şekil 4.3.10'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3.9 . Üçüncü Akım harmoniği civarındaki Frekans spektrumu.



Şekil 4.3.10. SCR Ateşleme gecikme Açısı.

Harmonik filtreler ve oniki pulse (darbeli) çalışma modu yüzünden 26.4kV'luk alt istasyon barasından sisteme verilen akım 5. ve 7. harmonikleri içerir. Bunun yanında, çalışma sırasında 3.harmonik frekansı civarında akımlar oluşmaktadır. Bunun nedeni ise simülasyonda açıklanan konvertördeki dengesizliklerdir. 26.4kV'luk alt istasyon barasına verilen 3. harmonik civarındaki akım yaklaşık % 4,4 civarındadır. Buna karşılık gelen voltaj harmoniği ise, yaklaşık % 0,8 civarındadır.

#### **4.3.7 Normal Olmayan Konvertör Çalışma Koşulları**

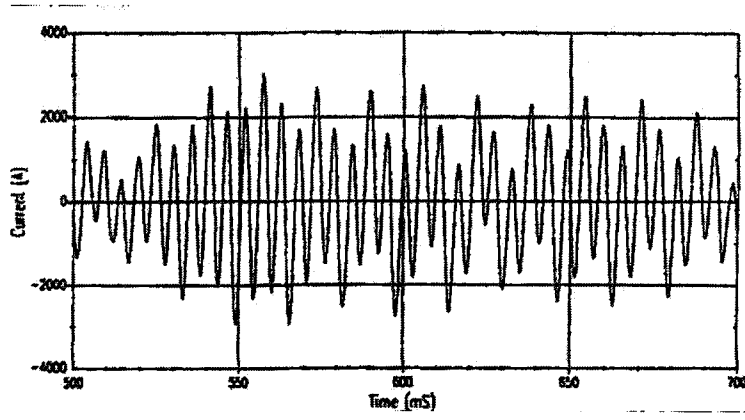
##### **4.3.7.1 Bozulmuş referans sinyali ile olan çalışma**

Mantık devreleri, SCR ateşleme darbelerini tetiklerler. Bu olay, faz voltajının pozitif veya negatif olduğu zaman gerçekleşir. Beklenmeyen SCR ateşlemesi, karakterize olmamış harmoniklerin büyük ölçüde üretilmesine neden olur. Bu, eğer referans voltaj sinyali matik devresine girerken dengesizlik veya gürültü oluşursa olur ve düzenli sinyal koşulları kontrol altından çıkar.

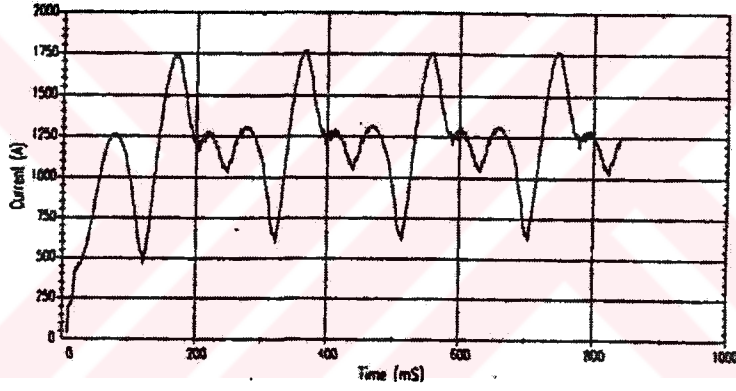
Konvertör çalışmasının neden olduğu zamanlama referans sinyalinin harmonik bozulma içermesi, sistemin doğal bir sonucudur. Üçüncü harmonik frekansı civarındaki sistemin keskin rezonansı, karakterize edilemeyen bir akımın oluşmasına neden olur ki bu da kayda değer olumsuz etkilere sahip olan bir voltaj bozulmasına neden olur. Voltaj bozulması, SCR zamanlamasında hatalara neden olur. Bu nedenle, SCR ateşlemesi karakterize edilemeyen akım harmonikleri oluşturur. Pozitif geri besleme ile, voltaj ve akım bozulmaları yayılır. Bu yayılma, güç kaynağının sistemine ve akım kontrol devresine bağlıdır.

EMTP simülasyonlarında zamanlama sinyalinin bozulması, SCR ateşleme açıları ve DC çıkış arasında osilasyonun bozulmasına neden olur. Ayrıca, iki paralel konvertör arasında (karakteristik modeller ile) akım paylaşımı oluşur; biri yaklaşık 11,700 amper iletirken diğeri 32,000 amper taşır. Her iki konvertörde 3.harmonik akımı civarında büyük genliğe sahip harmonikler üretirler.(temel bileşenin yaklaşık % 17'si kadar.) Diğer taraftan, 5. ve 7. harmonik akımları normal çalışma ile karşılaştırıldıklarında temel bileşene göre % 22 → % 8 ve % 15 → % 6'lara kadar düşmektedir.

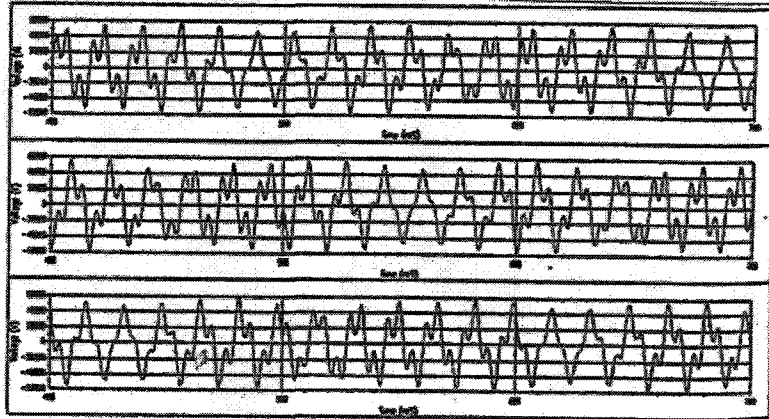
Şekil 4.3.11. gösterir ki 24.6kV baradan sisteme bir akım verilmektedir. Harmonik filtreleme bütün karakteristik harmonikleri yok etmektedir. Bunun yanında 26.4kV'luk alt istasyon barasının akımı yüksek derecede 3.harmonik distorsiyonu içerir.



Şekil 4.3.11. Sisteme verilen akım dalga formu.



Şekil 4.3.12.Üçüncü harmonik civarındaki zaman ve değişim.



Şekil 4.3.13 26.4kV'luk bara voltajlarındaki bozulmanın dalga formları.

Şekil 4.3.12'da 3.harmonik bileşeni civarındaki zamanın değişimini göstermektedir. Üçüncü harmonik akımı civarındaki artış başlama zamanından tekrar noktasına gelene kadar artış göstermektedir. Şekil 4.3.13 üç faz – toprak voltajlarını tesisin alt istasyonundaki 26.4kV'luk tarafı için göstermektedir.

Faz – toprak voltajının dalga formu aynı periyot içinde Şekil 4.3.12'da gösterildiği gibi, her üç faz için düzenli bir sekuans içinde tekrar etmektedir.

Bu simülasyon sonuçları, bu tip kontrol hatalarının oluşmasını genel bozulma olarak açıklamaktadır. Fakat bu genel bozulmanın kaydedilmesi, görüldüğünden daha karmaşıktır ve erken ölçümlerin düzenli yapılmasına dayanır. Üçüncü harmonik akımı civarındaki değişim periyodiktir, ama yapılan ölçümlerle aynı doğrultuda değildir.

#### 4.3.7.2 Voltajla Birlikte Faz Dışındaki Zamanlama Sinyali ile Olan Çalışma

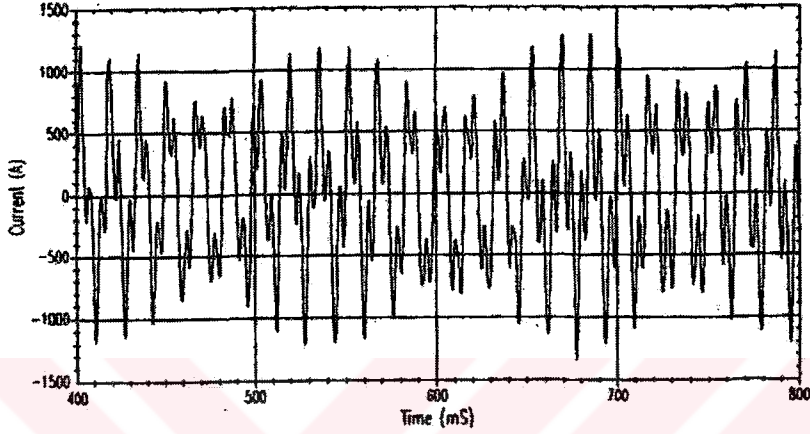
Daha önce belirtilmiş ateşleme kontrol problemleri ile karşılaştırıldığında, ölçülen dalga formları hata vermektedir. Bu da SCR zamanlama sinyalinin fazdan kaynaklanan olası hatasından kaynaklanmaktadır. SCR zamanlama sinyalinin simülasyonları, 30 derece ileri olarak ayarlanır. Eğer 30 derece geri olarak ayarlanırsa, harmonikler açısından sorunlar çıkabilir. Burada belirlenen hata, üçgen-yıldız transformatör bağlantısından kaynaklanmaktadır. Buna benzer bir hata kontrol kısmının düzenli çalışmamasından kaynaklanır. Şekiller 4.3.14, 4.3.15 ve 4.3.16 sistemin 26.4kV'luk alt istasyon barasından tesise akan akımın dalga formlarını göstermektedir. Aynı zamanda baradaki voltajın ve konvertör ateşleme gecikme açısının bu koşullar altında EMTP simülasyonu ile nasıl değiştiğini de göstermektedir. Bu da dalga formalarının başarılı bir şekilde görüntülenmesini sağlamıştır.

Faz referansının dışında, ateşleme gecikme açısı bu nedenle oluşur ve daha düşük bir limite ulaşarak DC akım çalışmasının sabit kalmasını sağlar. Bu çalışma SCR ateşlemesini ve karakteristik olmayan frekans akımı bileşenlerinin oluşmasına neden olur. 183 ve 189Hz arasındaki keskin sistem rezonansının varlığı nedeniyle 3.harmonik frekansı civarındaki bileşenlerin büyüklükleri de artmaktadır. Bundan önceki bozulmuş referans sinyali koşullarından farklı olarak, şimdi darbe üretim kontrolü tamamen sistem voltaj bozulmasından izole edilmiştir. Sabit akım kontrol çevrimi ve sistem arasında herhangi bir pozitif geri besleme yoktur ve üçüncü harmonik civarındaki büyüklük bağıl olarak sabittir.

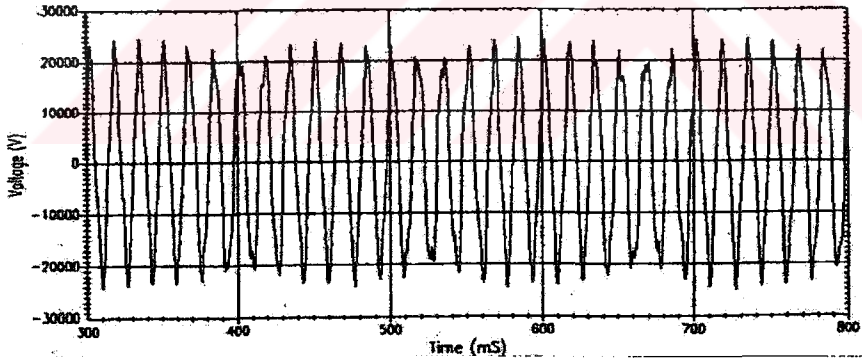
Konvertör akımlarının frekans spektrumu gösterir ki 5. harmonik % 22, 7.harmonik % 15 ve 3.harmonik civarındaki frekans akımı % 2'ler civarında kalmaktadır. Rezonansa bağlı olarak

26.4kV'luk tesisin alt istasyon barası yaklaşık olarak 3.harmonik civarında % 58'lik bir frekans bileşenlerine sahiptir ve 3.harmonik voltajı barada yaklaşık % 12 civarındadır.

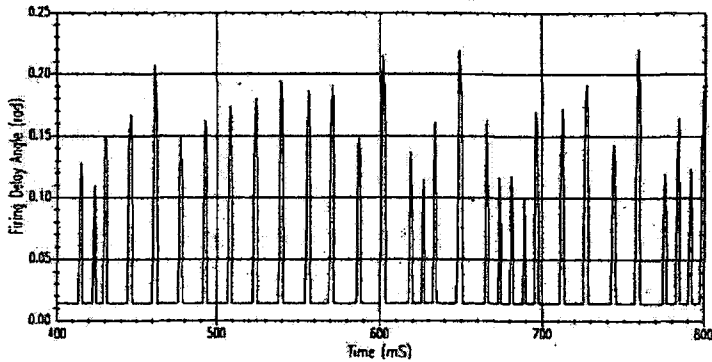
7.5Hz'lik voltaj söndürülebilir ve akım bozulması problemleri sadece faz dışındaki zamanlama sinyali etkilediği zaman dinamik çalışma aralığının limitleri altında kalır. Düşük faz açısı limiti yüksek DC çıkış koşullarına bağlıdır ve bu nedenle faz dışındaki zamanlama sinyali çalışmayı etkiler ve yük koşullarını zorlaştırır.



Şekil 4.3.14. 26.4kV'luk baranın akım dalga formu.



Şekil 4.3.15. 26.4kV'luk baranın voltaj dalga formu



Şekil 4.3.16. Ateşleme gecikme açısı.

Diğer simülasyon sonuçları gösterir ki eğer faz dışındaki zamanlama açısı düzeltilmemiş ise 25 ohm'luk bir söndürme direnci 5.harmonik filtresine eklenmelidir ve bundan önce gözlenen 187Hz'lik frekans azalmış olacaktır, fakat tamamen elimine edilemeyecektir.

#### 4.3.8 Çalışmanın Yorumlanması

Eğer AC ark fırını ile tesis edilmiş aynı koşullarda çalışan bir sistem düşünülürse DC Ark fırınının voltaj dalgalanmasını azaltması beklenir. Bu çalışmada DC fırında yapılan ölçümler büyük voltaj değişimlerini tesis için göstermektedir. Bunun yanında 60Hz'lik dalgalanma konvensiyel olarak gerçekleşir. Bu sistemin frekans cevabının beklentiler dışında gerçekleşmesinin bir sonucudur ve kritik frekanslarda karakteristik olmayan harmonik akımlarının üretimi ile açıklanır.

Söndürme fenomeninin açıklanması, 187Hz'den kaynaklanan elektrik sisteminin doğal rezonansının bir sonucu olarak yapılır ve SCR ateşlemesinin olası zamanlama hatasına bağlıdır.

Aynı sorun, AC ark fırınlarında ve statik Var kompanzasyonunda da bulunmaktadır. Statik var sisteminin filtreleri harmonik olmayan tarafta bant frekansları gözlenmiştir. Orijinal harmoniklerin ark fırını tarafından üretildiği belirlenmiştir. Burada ki harmonik olmayan frekanslar, sisteme girmekte ve bazı baralarda yerel harmoniklerin ve flouresan dalgalanmalarını söndürücü etkilere neden olmaktadır. Böylece, önemli olanın filtre tasarımında SVC veya DC çevrimini dikkate alarak yapılması gerektiği gerçeği çıkar. Dalgalanma problemi, beşinci harmonik filtresine 25 ohm'luk direnç eklenmesiyle azaltılabilir ve dirençle söndürme yapılmış olur.

Burada dalgalanma sadece yük baralarında araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar dalgalanmaların uzaktaki sistemlerden de kaynaklanabileceğini göstermiştir, örneğin tesiste kurulmuş olan şönt kapasiteleri gibi. Bunun içinde filtre 187Hz'de sürücü noktası empedansı oluşacak şekilde tasarlanır ki buda Şekil 4.3.6 ve 4.3.13'da gösterilen frekanslarda akımlarda yükselmeye neden olur.

Böylece bu frekans akımlarının filtre tasarımı nedeniyle oluştuğu kesinleşmiş olur ve 187Hz'lik frekans akımları, uzaktaki sistemlerde uygun bir uygulama ile yerel üçüncü harmonikler civarındaki dalgalanmalardan kurtulmak mümkün olur.

Bu bölümde, genellikle karşılaşılmayan güç kalitesi problemleri üzerinde durulmuştur. Buradaki semptomlar, sistem şebekesine bağlanmış elektrik ışıklarının ve lambalarının

oluşturduğu dalgalanmalar sonucunda oluşan voltaj bozulmalarıdır. Aynı belirtileri DC elektrik ark fırını da göstermektedir ve 187Hz civarında elektrik sisteminin rezonansının kombinasyonu ile açıklanır. Voltaj bozulmasının nedeni, düşük seviyedeki karakteristik olmayan üçüncü harmonik akımlarının ark fırınının güç konvertöründe oluşmasıdır. Burada fırınların alternatif veya doğrudan akım arkları ile çalışması dalgalanma problemini doğrudan etkilemektedir.

S.C.R.(Short Circuit Ratio – kısa devre oranı)'nın uygulama kolaylığını sağlamak açısından kullanılması, pratik bir uygulamadır. PCC (point of Common Coupling – ortak çift noktası)'daki 2400MVA kısa devre kapasitesi ile tesisin sistemine bağlanan 30MW'lık ark fırını oranı 80'lik S.C.R değeri sağlamaktadır. Bu genellikle DC ark fırınları için geçerlidir. Bazen sistem tasarımında yapılan basit bir kontrol ile S.C.R açısından kaynaklanan potansiyel rezonans problemi çözülebilmektedir.

Bu sistemde, ilk paralel rezonansa karşılaşılan sorunlar üçüncü harmonik civarında karşılaşılan sorunlarla benzerlik taşımaktadır. Tesis beslemesindeki dört kapasitör bloğu ve 3 bölümden oluşan ayarlı kapasitörler endüstri tesisinin problem faktörlerini etkiler. Burada esas üzerinde durulması gereken konu Cedarsauk barasındaki 98Mvar'lık kapasitenin 187Hz'lik rezonansa etkisinin ne olduğudur. Eğer sistem şebekesine bağlanmış olan büyük kapasitör blokların varlığının problemden sorumlu olduğu kabul edilirse, bunun sistemin doğal bir sonucu olduğu da kabul edilmelidir.

Çelik üretiminde DC elektrik ark fırınlarının kullanılması, AC ark fırınlarının kullanılmasına alternatif bir seçenek sunmaktadır. Teknoloji olarak DC ark fırınları daha eski olsa da birçok nedenden dolayı sistem şebekesine AC ark fırınlarına göre daha az zarar vermektedir. Burada iki bozulma söz konusudur, voltaj ve güç bozulmaları. Güç bozulmaları, sistemin güç üretiminden kaynaklanmaktadır. Ark fırınlarının ve tesisin generatörleri yakınında dönen millerin oluşturduğu bozulmalar olarak özetlenebilir.

Burada bahsedilen dalgalanma veya voltaj dalgalanması, ışık dalgalanma voltaj koşullarına bağlıdır. Dalgalanma, ışığın lambasındaki şiddetin azalıp artması olarak kullanılır. Fakat buradaki dalgalanma frekansa bağlı olarak voltajdaki bozulmalar anlamında kullanılmaktadır. Bu da ark fırınından kaynaklanan güç kalitesi problemini faz kayması veya faz atlaması şeklinde açıklar. Bu fenomen, anahtarlama sırasında oluşan ve güç şebekesinin, bağlanmış yüklerde ve güç kaynaklarında iletim açısının değişimi olarak tanımlanır. Ayrıca burada UPS sisteminin etkisi de dikkate alınmalıdır.

DC ark fırınları da dalgalanma problemlerine sebep olabilmektedir. Fakat bunun yanında AC ark fırınlarında karşılaşılan problemlere göre oldukça azdır. Problemler sadece 187Hz'lik filtre tasarımı nedeniyle oluşmaz, aynı zamanda 187Hz'lik sistem rezonansı nedeniyle düzenli olmayan ateşleme kontrolü nedeniyle büyük değerlerde 187Hz'lik karakteristik olmayan harmoniklerin üretimine de bağlıdır. Eğer konvertörler düzgün şekilde ateşlenirse, aynı güç sistemi koşullarında bu problem oluşmayacaktır ve tesisin sisteminin tüm özellikleri dikkate alınarak tasarlanan bir filtre, bu sorunları minimuma indirecektir.

25 Ohm'luk direncin eklenmesiyle ve ateşleme kontrolü modifikasyonu ile bu tür problemler çözülebilmektedir. Bu çalışmada direncin eklenmesi ile rezonans tepesinin efektif bir şekilde azaldığı görülmektedir. Böylece dirençsel söndürme ile karakteristik olmayan harmoniklerin üretimi de kontrol altına alınmış olur.

Şekil 4.3.13'da bozulmuş dalga formlarının voltaj, ateşleme sinyal üretimi ve referans voltaj barası için değişimi gösterilmiştir. 187Hz'lik sistem rezonansı tarafından oluşturulan kısmi gürültü, fırın kontrol karakteristiklerine bağlıdır. Böylece voltaj ve akım harmonikleri sistemde üretilmektedir. Bu çalışmada, sistemin her yerindeki akım ve voltaj bozulmaları görüntülenmemiş ve simüle edilmemiştir. Sadece özel yerlerde inceleme yapılmıştır. Seçilen yerlerde yerel rezonansın oluştuğuna dair bir kanıt bulunamamıştır, fakat bu diğer sistemlerde oluşmayacağı anlamına gelmemektedir.

Bu çalışmada belirlenen sistem belirsizliklerinden bir tanesi de kapasitör uygulamalarından kaynaklanan sorunlardır. Çizelge 4.3.1 sistemdeki beş var kaynağını özetlemektedir. Şu not edilmelidir ki Cedarsauk barasındaki 98Mvar'lık değer aslında 9.6Mvar'dır.

Çizelge 4.3.1. Sistemde var olan VAR kaynakları

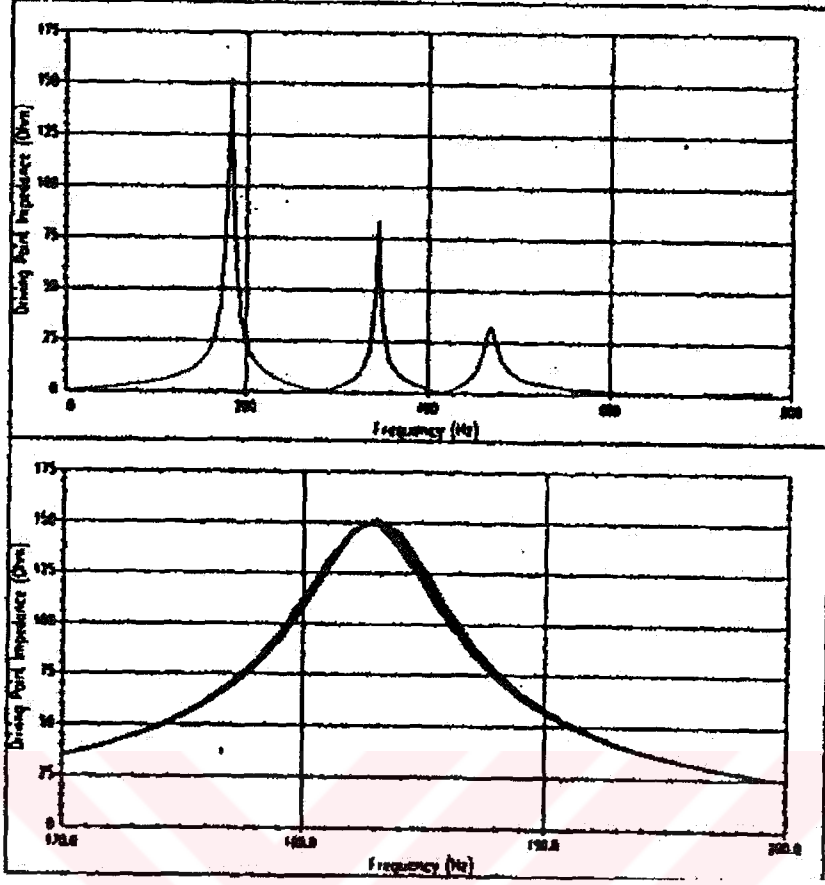
<b>SİSTEMDE BULUNAN VAR KAYNAKLARI</b>			
<b>Connection Bus</b>	<b>Voltaj (kV)</b>	<b>Mvar</b>	<b>Not</b>
Cedarsauk	26.4	9.6	C0-Cap.
Cedarsauk	26.4	2.0	C1-Syn
Barton	26.4	9.9	C2-Cap
St. Lawrence	26.4	12.6	C3-Cap
St. Lawrence	138	26.4	C4-Cap

Çizelge 4.3.2, bu on farklı var kaynağının kombinasyonlarını listelemektedir. Charter Steel barasındaki bu on farklı koşullarla örtüşen karakteristik empedansın sürücü noktası Şekil 4.3.16'de açıklanmıştır. Charter Steel ve Cedarsauk arasındaki transfer empedansının etkisi Şekil 4.3.17'de açıklanmıştır.

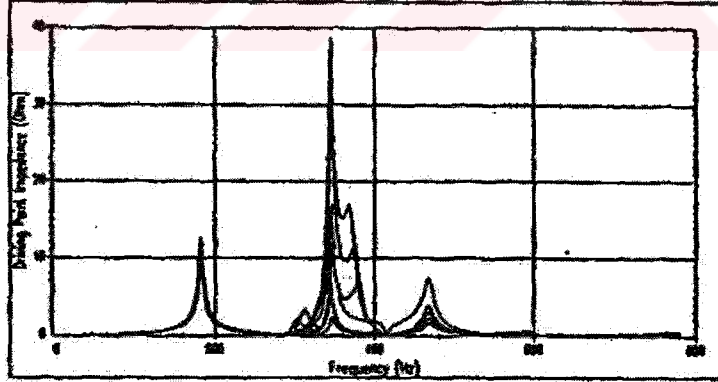
Kapasitörlerin eklenmesi, yüksek frekanslardaki komponentler için ekstra düşük empedans sağlamaktadır. Bu nedenle, sürücü noktasının ve transfer empedansının oranlarını değiştirebilmektedir. Bu iletim alt istasyon kapasitelerinin bloklarının etkileri, tesis yerleşiminden, kapasitör bloğu boyutundan, sistem konfigürasyonundan ve diğer sistem çalışma koşullarından bağımsızdır. Charter barasına ayarlanan filtrelerin varlığına bağlı olarak kapasitör blokları transfer empedanslarının yüksek frekans karakteristiklerini etkilemektedir. Fakat elektriksel olarak uzaklık sürücü noktası empedansı bu etkiden muaf kalmaktadır.

Çizelge 4.3.2. Farklı VAR kaynaklarının listelenmesi.

<b>FARKLI VAR KAYNAKLARININ LİSTELENMESİ</b>			
<b>Case</b>	<b>Cedarsauk (C0+C1)</b>	<b>Barton (C2)</b>	<b>St. Lawrence (C3+C4)</b>
CS1	ON	ON	ON
CS2	ON	OFF	ON
CS3	ON	ON	OFF
CS4	OFF	ON	ON
CS5	ON	OFF	OFF
CS6	OFF	ON	OFF
CS7	OFF	OFF	ON
CS8	OFF	OFF	OFF
CS9	C1-ON, C0-OFF	OFF	OFF
CS10	C-1OFF, C0-ON	OFF	OFF



Şekil 4.3.17. Farklı güç kapasitesi bloğu uygulamaları ile 26.4kV'luk Charter barasındaki sürücü noktası empedansı.



Şekil 4.3.18. Farklı alt istasyon güç kapasitesi blokları uygulamaları ile 26.4kV'luk Charter barasından 26.4kV'luk Cedarsauk barasına olan transfer empedansı.

Bu çalışmanın birinci amacı, Charter Steel'da neler olduğunu açıklamaktır. Araştırma, temel olarak sistemin basitçe analizine dayanmaktadır. Ark fırınlarından veya tesisin generatörleri yakınında dönen millerden kaynaklanan güç bozulmalarının etkileri üzerinde durulmamıştır.

Burada bahsedilen dalgalanma veya voltaj dalgalanması, ölçülen voltaj bozulmasıdır ve bu da ışığın dalgalanması ve normal olmayan güç transformatörünün gürültüsü için kullanılmıştır. Işığın dalgalanması, periyodik voltaj büyüklüklerinin besleme voltajına bağlı olarak faz kayması veya faz atlaması şeklinde açıklanmıştır.

(Tang, L., Mueller, D., 1994)

#### 4.4 Elektrik Şebekelerinde Titreşme Telafisinin İncelenmesi için Ark Fırını Modeli \*

##### 4.4.1 Çalışmanın Açıklanması

Bu makalede, iki farklı ark uzunluğu zaman varyasyonu yasasının ele alındığı nonlineer, zamanla değişen dirençten oluşan bir ark fırını modeli sunulmaktadır. Bunlardan biri periyodik, sinüzoidal bir yasadandır, diğeri ise bantla sınırlı beyaz gürültü yasasıdır. Ark fırını modeli, gerçek elektrik santrali konfigürasyonları kullanılarak, EMTP ile gerçekleştirilmiştir. Titreşme hassaslığı ve kısa süreli titreşme sertliği,  $P_{ST}$ , değerlerinin UIE talimatnamelerine göre belirlendiği simülasyonların sonuçları bildirilmektedir. Sonuçlara göre, sinüzoidal zaman varyasyonu yasasına dayanan model, en kötü durum yaklaşımları için yararlı olabileceken; beyaz gürültü yasasını kullanan model, ark fırını besleyen elektrik santrallerinde gerçekleştirilen titreşme ölçümlerine uyabilmektedir. Modeller, fırın transformatörünün besleme tarafındaki etkiyi araştırmak için kullanılmaktadır. Sabit fırın aktif gücünde seri indüktör tesisatı ile ortak kuplak noktasında  $P_{ST}$ 'nin oldukça azalmasını sağlandığı gösterilmektedir.

Çelik üretimi için kullanılan ark fırınları, elektrik şebekelerinde titreşme etkisine neden olabilecek gerilim dalgalanmalarının ana sebeplerinden biridir. Artıkların eritilmesi sırasında ortaya çıkan rastgele ark uzunluğu değişimlerinden dolayı görülen titreşmelerin 0.5-25Hz aralığında tipik frekansları vardır.

Titreşme, lambalardaki, frekanslarına ve şiddetlerine bağlı olarak insan görsel sistemi üzerinde etki yaratabilecek parlaklık değişikliklerinden oluşur. Örneğin, 10 Hz'lik bir frekanstaki %0.3'lük gerilim genliği değişimleri ortalama insan algılama eşiğinin üzerine çıkmaya yeterlidir .

\* Montanari, G.C.,<sup>1</sup> Loggini, M.,<sup>1</sup> Cavallini, A.,<sup>1</sup> Pitti, L.,<sup>1</sup> Zaninelli, P.,<sup>2</sup> , “ Arc-furnace Model For The Study Of Flicker Compensation In Electrical Networks ”

Gerilim dalgalanmaları, sadece ark fırınlarını besleyen elektrik santralleriyle sınırlı olmadığından ve HV şebekesini büyük bir oranda etkileyebileceğinden dolayı, bazı MV ve LV müşterileri de bundan etkilenebilirler ve elektrik tedarik eden şirketlerin bu sorunu halletmeleri egerekir. Genelde, titreşmeyi azaltacak çözümler

- i) fırın gücünü azaltmak,
- ii) ortak kuplaj noktasındaki (PCC) kısa devre gücünü arttırmak,
- iii) titreşme telafisi için aletler yerleştirmektir.

Açıktır ki, çözüm i) kısa dönemler harici ekonomik olarak geçerli değilken, ii) şebeke yönetimine bağlıdır.

Çözüm iii), ark fırını müşterisi için daha kolay elde edilebilir ve elektrik tedarikçisi için daha tercih edilir bir çözümdür. Sıklıkla, hem gerilim dalgalanmalarını hem de gerilim distorsiyonlarını telafi etmek için ark fırını besleyen santrallere statik var sistemleri (SVS) kurulur. Ancak, bu çözüm santralin büyüklüğüne göre oldukça pahalı olabilir ve dahası, SVS şebeke etkileşmelerinde floresan ışık titreşmesi görülmektedir.

Bilgisayar simülasyonlarının yanısıra, saha deneyimleri de fırın transformatörünün besleme tarafına seri indüktör yerleştirmenin etkinliğini ispatlamıştır, ancak bu konuda derin araştırmalar hâlâ bulunmamaktadır.

Titreşme telafisi için en uygun çözüm seçimi, kesin ark fırını modellerinin mevcudiyetini gerektirir. Bu ark fırını besleyen elektrik santralini simüle etmeyi ve telafi sistemlerinin gerilim ve akım distorsiyon faktörü, güç faktörü, fırın aktif ve aktif olmayan gücü üzerinde olduğu kadar, ark ve titreşme üzerindeki etkilerini de incelemeyi gerektirir. Hali hazırda, elektrik arkı genellikle, genlikleri ark uzunluğu değişikliklerini ve dolayısıyla şebeke gerilimi dalgalanmalarını tanımlamak için zaman modülasyonlu temel ve harmonik gerilimler sağlayan gerilim üreteçleriyle modellenmektedir. Modülasyon yasası, titreşmenin tipik frekanslarında sinüzoidal olabilir. Ancak bu çözümün, nonlinear bir fenomenin elektrik santrali konfigürasyonundaki değişikliklerin elektrik arkı etkisini (örneğin seri indüktör veya tali devre filtrelerinden kaynaklanan) göz önüne almayan lineer bir çözümü olduğu için çok tatmin edici olmadığı gösterilmiştir.

Bu makalede, fırın transformatörünün besleme tarafına seri indüktör yerleştirilmesinin titreşme telafisi üzerindeki etkisi bir EMTP simülasyonu kullanılarak incelenmektedir. Elektrik arkı bir nonlinear direnç ile tanımlanmaktadır ve iki farklı (sinüzoidal ve beyaz

gürültü fonksiyonuna dayanan) zamanla değişim yasası göz önüne alınmaktadır. Önerilen modellerin Kuzey İtalya'daki santrallerde yapılan ölçümlerle karşılaştırılmasının sonuçları verilmektedir.

#### 4.4.2 Nonlineer Zamanla Değişen Ark Modelleri

Bir ark fırını besleyen bir elektrik santralinin tipik bir devre diyagramı, Şekil 4.4.1'de gösterilmektedir. Fırın bir HV/MV (T1) transformatörüyle dağıtma çubuğu bara 1'e, PCC'ye bağlıdır ve bir MV/LV transformatörüyle (T2) beslenir. Bu transformatörün fırın tarafının genellikle, fırın gücünü değiştirmek için ayarlanabilir bir gerilimi vardır.  $X_{LSC}$ , PCC'deki kısa devre reaktansı,  $X_P$  titreşme telafisi için yerleştirilmiş seri reaktanstır (hem  $X_{LSC}$  hem de  $X_P$  simülasyonlarda değiştirilir; PCC'deki kısa devre gücünün referans değeri 3500 MVA'dır).  $X_C$  ve  $R_C$ , genelde ark fırınının gördüğü toplam empedansa önemli bir katkıda bulunan fırın elektrotları ile MV/LV transformatörü arasındaki bağlantı hattının reaktansı ve direncidir.

Bu makalede sunulan EMTP simülasyonlarında santral parametrelerine verilen değerler, Kuzey İtalya'da kurulu ark fırını santrallerinin tipik değerleridir. HV/MV ve MV/LV transformatörleri (220/21 kV ve 21/0.9 ÷ 0.6 kV), kısa devre gerilimi ve kayıplarının yüzde değerleri %12.5 ve %0.5 (HV/MV) ve %10 ve %0.5 (MV/LV) olmak üzere, sırasıyla 95 MVA ve 60 MVA güçtedir. Kurşun reaktans ve direncin değerleri  $X_C = 3 \times 10^{-3}$  Ohm ve  $R_C = 3 \times 10^{-4}$  Ohmdur.

Yukarıda bahsedildiği şekilde, elektrik arkının simülasyonu bir nonlineer model tarafından gerçekleştirilmektedir. Ark gerilim-akım karakteristikleri,

$$V_a = V_a(I_a) \quad (4.4.1)$$

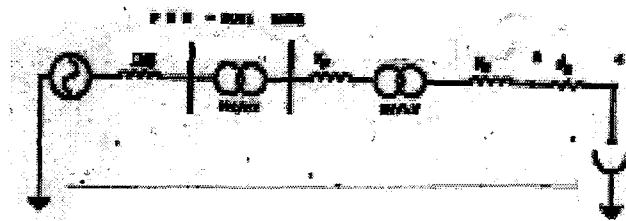
aşağıdaki bağıntıyla tanımlanabilir:

$$V_a = V_{at} + \frac{C}{D + I_a} \quad (4.4.2)$$

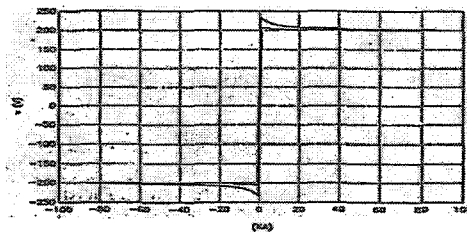
Burada,  $V_a$ ,  $I_a$  ark gerilimi ve akımı,  $V_{at}$  akım arttığında gerilimin gittiği eşik değeri,  $C$  ve  $D$  değerleri ( $C_a$ ,  $D_a$  ve  $C_b$ ,  $D_b$ ) gerilim-akım karakteristiklerinin artan ve azalan akım kısımları arasındaki farkı belirleyen sabitlerdir (Denklem (4.4.2)  $I_a > 0$  için yazılmıştır, ama kolayca  $I_a < 0$  için de düzenlenebilir). Grafik 4.4.2, Denklem 4.4.2'deki modelden elde edilen ve  $V_a = 200$  V,  $C_a \approx 190000$ W,  $C_b \approx 39000$  W,  $D_a = D_b = 5000$  A veren bir ark uzunluğunda göre, EMTP'nin TACS (Geçiş Elemanı Analiz Kontrol Sistemi) kısmında hesaplanmış olan ark gerilim-akım karakteristiklerini göstermektedir.

Ark uzunluğu  $l$ 'nin zamanla değişmemesi durumunda ( $l = l_0$ ), aek gerilim karakteristikleri zaman değişmezleri olacaktır. Bu durumda, fırın PCC'de titreşmeye değil, ark karakteristiğinin özündeki nonlineerlikten dolayı, gerilim ve akım harmoniklerine neden olacaktır. Farklı ark uzunlukları için ark elektrik arkının ve ark fırını besleyen elektrik santralinin EMTP ile simülasyonunda (Denklemler 4.4.2'ye göre), ark fırınının karakteristik eğrileri hem tek fazlı, hem de üç fazlı santral konfigürasyonlarına göre çizdirilebilir. Karakteristik eğriler, genelde  $S/S_{SC}$ ,  $P/S_{SC}$ ,  $P_{arc}/S_{SC}$ ,  $Q/S_{SC}$ ,  $PF$  gibi boyutsuz büyüklüklerin  $I/I_{SC}$ 'nin bir fonksiyonu olarak çizilmiş grafiklerinden oluşmaktadır.  $S$ ,  $P$  ve  $Q$  sırasıyla görünen, aktif ve aktif olmayan güçtür ;  $P_{arc}$  aktif güç,  $PF$  güç faktörü,  $S_{SC}$  ve  $I_{SC}$  de Şekil 4.4.1'deki bağlantı çubuğu Bara 2'de, fırının kısa devre konumunda çalıştığı durumdaki görünen güç ve akım;  $I$  belirlenmiş yükleme akımıdır.

Bu bölümde, tek fazlı araştırmalar gerçekleştirilmiştir, çünkü ana amacı seri indüktörlerin titreşme telafisinin incelenmesi için uygun ark fırını modelleri sunmaktır. Ancak, EMTP simülasyonlarının gerçekleştirildiği  $I/I_{SC}$  değerleri aralığı hem tek fazlı, hem de üç fazlı konfigürasyonlarda sürekli iletim sağlar. Bu, gerilim dalgalanmalarının kantitatif tahminlerinin  $P/S_{SC}$  ve  $Q/S_{SC}$  eğrilerinin tek fazlı ve üç fazlı konfigürasyonlarda biraz farklı olmalarından (boyutsuz görünür gücün aksine) etkilenmesine rağmen, tek faz sonuçlarının üç faz hesaplamaları yerine kullanılabilmesine izin verir. Gerilim dalgalanmalarının tek faz modellerine dayanan üç fazlı tahminleri, genelde esas işletim durumu olmayan üstü kapalı, dengeli yük varsayımından da etkilenir.



Şekil 4.4.1. Referans elektrik santralinin seması



Şekil 4.4.1. EMTP ile hesaplanan önerilen modellemeden elde edilen ocak elektrik arkının dinamik gerilim-akım karakteristiği.

Şekil 4.4.3, değerleri daha önceki santral parametreleri (MV/LV transformatör oranı 21/0.6 kV) olan Şekil 4.4.1'deki devreyle beslenen ve bir elektrik arkının karakteristik eğrilerini göstermektedir.

Durağan ark modelini gerilim dalgalanmalarına ve titreşmeye neden olacak hale getirmek için, gerilim-akım eğrileri, ark uzunluğunun zamana bağımlılığına karşılık gelen zaman değişmelerinden geçmelidir.

Bu denklem (6.1)'i,

$$V_a = k V_{a0}(I_a) \quad (4.4.3)$$

şeklinde yazarak gerçekleştirilebilir. Burada  $V_{a0}$  referans uzunluğu  $l_0$ 'a karşılık gelen ark gerilimidir.  $k$  parametresi bir  $l$  uzunluğuna karşılık gelen eşik ark gerilimi  $V_{at}(l)$ 'nin referans uzunluğuna karşılık gelen gerilim  $V_{at}(l_0)$ a oranıdır. Şok gerilimi ile ark uzunluğu arasındaki bağıntı,  $l$  ark uzunluğu (santimetre olarak),  $A$  anot ve katot gerilim düşümlerini hesaba katan sabit ( $A \approx 40$  V),  $B$  de birim ark uzunluğu başına gerilimin düşümüne karşılık gelen sabit ( $B \approx 10$  V/cm) olmak üzere,

$$V_{at} = A + B l \quad (4.4.4)$$

olarak açıklanabileceğinden dolayı,  $k$

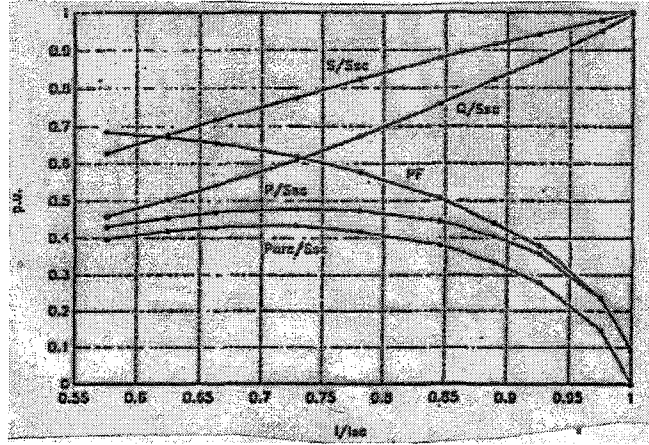
$$k = \frac{V_{at}(I)}{V_{at}(l_0)} = \frac{A + B l}{A + B l_0} \quad (4.4.5)$$

ile verilir.

EMTP'nin TACS bölümünde,  $k$ , uygun zaman değişim yasaları seçildikten sonra, simülasyonları ark uzunluğu ya sabit ya da zamanla değişken olarak gerçekleştirecek şekilde ayarlanmıştır.

#### 4.4.3. Titreşme Simülasyonu için Zaman Değişimi Yasaları

Erime zamanı sırasında bir ark fırını tarafından soğurulan akımın süratli değişimleri, esas olarak metal talaşı ayarlamalarından, elektrodinamik kuvvetlerden ve ark elektrodunun değişken yerleştirmesinden kaynaklanan ark uzunluğu değişimleriyle bağlantılıdır.



Şekil 4.4.3. Nonlineer ark dirençli EMTP simülasyonundan elde edilen tek fazlı ark fırınının karakteristik eğrileri.

Bu fenomenin karmaşık doğası, ark uzunluğu değişiminin incelenmesine fiziksel bir yaklaşımı kabul etmez. Bundan dolayı, titreşme araştırmaları zamanla değişim yasaının deterministik veya stokastik varsayımları üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Deterministik yaklaşım, ark uzunluğunun sinüzoidal zaman değişimlerine tabi olduğunu kabul eder; frekans aralığı titreşimin tipik aralığında (yani, 0.5-25 Hz) uygun şekilde seçilir. Bu varsayım, fırınların normal çalışma koşullarını temsil etmez, ancak bilgisayar simülasyonlarında kolaylık sağlama avantajı vardır ve yasanın periyodikliği sebebiyle kısa süreli simülasyonlar gerektirir.

Stokastik yaklaşım, ark uzunluğu değişiminin rastgele bir fenomen olarak ele alınabileceği gözlemiyle desteklenmektedir. Aslında, ark ocağı besleyen santrallerdeki aktif ve reaktif gücün, gerilim akımın geniş çaptaki ölçümleri PCC ve fırın bağlama çubuklarında reaktif güç değişimleri gibi gerilim dalgalanmalarının da genliği zamanla değişen, bantla sınırlanmış beyaz gürültü gibi davrandıklarını göstermiştir. Dolayısıyla, ark uzunluğuna rastgele değişim yasalarıyla yaklaşılmalıdır. Simülasyon süreleri, sinyalin periyodik olmamasından dolayı daha önceki durumdan daha uzundur. Öte yandan, standartlar, titreşme şiddetinin hesaplanması için, kayıt zamanının 10 veya daha fazla dakikasına dayanan  $P_{ST}$  ve  $P_{LT}$  gibi ağırlıklandırılmış stokastik indisler ortaya koyar.

Yukarıda önerilen nonlineer model (Denklem (4.4.2)-(4.4.5)), ark uzunluğuna,  $l = l(t)$ , uygun yasalar atandığında, hem deterministik hem de stokastik yaklaşımlara uyum sağlayabilmektedir.

#### 4.4.3.1 Zamanla Değişim için Sinüsoidal Yasa

Periyodik titreşme davranışında yaklaşıklıkta bulunmak için, ark uzunluğuna frekansı titreşme algılayışına en hassas frekansa yakın olan bir sinüzoidal yasa atanarak simülasyonlar yapılabilir. Örneğin, 10 Hz'lik bir frekans seçilebilir; bu sinüzoidal gerilim dalgalanmaları için titreşme algılama eşik eğrisinin minimumuna yakındır.

(4.4.2)-(4.4.5) denklemleri kullanılarak, ark uzunluğu zaman değişim yasası

$$l(t) = l_0 - (Dl/2) (1 + \sin \omega t) \quad (4.4.6)$$

olarak ifade edilebilir. Burada  $Dl$  ark uzunluğun maksimum değişimidir. Böylece, ark gerilim-akım karakteristikleri, denklem (4.4.3), (4.4.5) ve (4.4.6)'dan

$$V_a(I_a) = k(t) V_{a0}(I_a) \quad (4.4.7)$$

halini alır.  $k(t)$ ,

$$k(t) = \frac{A + bl(t)}{A + Bl_0} = 1 - \frac{(B Dl/2)(1 + \sin \omega t)}{A + Bl_0} \quad (4.4.8)$$

ile verilir.

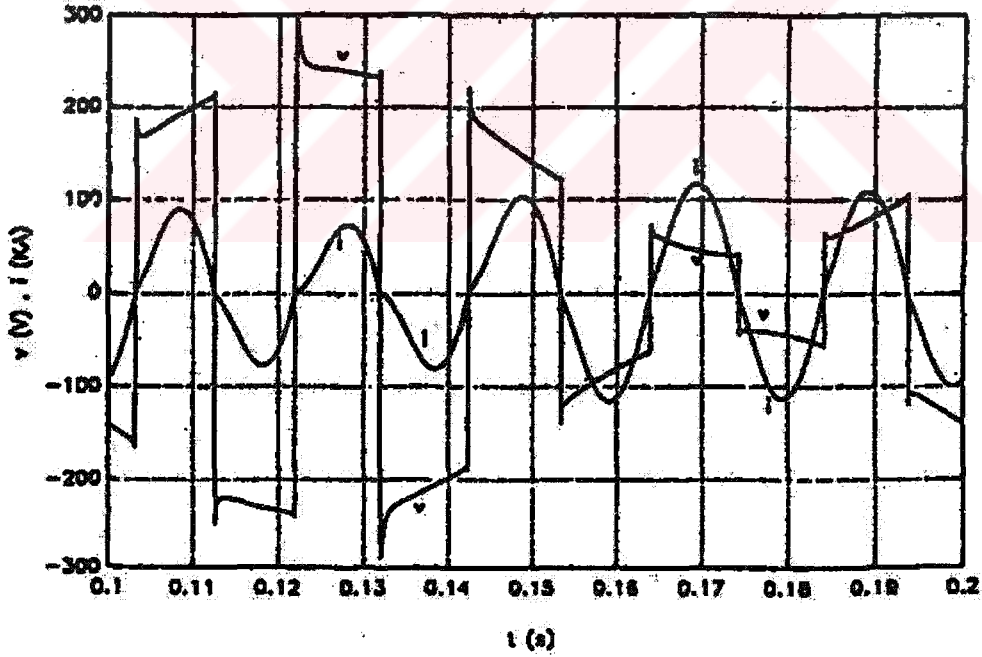
Zamanla değişen sinüzoidal yasalı nonlineer ark direncinin ATP modelizasyonun bütün prosedürü, EMTP'nin TACS bölümünde yürütülebilir. Şekil 4.4.4, ark fırını bağlantı çubuğundaki, önerilen modele dayanan EMTP simülasyonundan 10 Hz'lik frekanstaki sinüzoidal zaman değişim yasası ile elde edilen gerilim ve akım dalga biçimlerini göstermektedir. Ark uzunluğu, ark eşik gerilimi  $40 \text{ V} \leq V_{at} \leq 240 \text{ V}$  değerlerine ve sürekli iletkenliğe karşılık gelen geniş bir aralıkta değişir. Fırın transformatörünün sekonder gerilimi 600 V'dir. Bu koşullar altında PCC'deki gerilim değişimi,  $DV/V$ , %1.35'dir.

Aslında, UIE titreşmeölçerinin, titreşme duyarlılığı  $S(t)$ 'nin temsilcisi olan bir çıktısı vardır. Bu büyüklük, akkor lambalar tarafından yayılan ışığa karşı gözün maksimum duyarlılığına yakın olan 8.8 Hz frekansında bir minimum azalması olan bir ağırlıklandırma filtresi aracılığıyla, eşik algılama eğrisine gerilim dalgalanmaları atanarak elde edilir. Bir çıktı birimi titreşme oluşumun görsel algılama eşikine karşılık gelir.

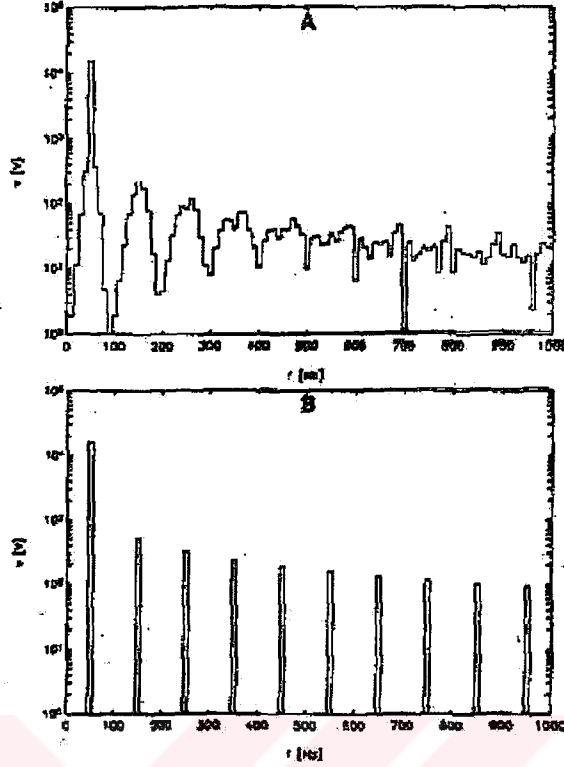
Önerilen modele dayanan deterministik sinüzoidal zaman değişimli yüklü bilgisayar simülasyonlarının, doğrudan UIE titreşmeölçerinin verdiği değerlerle karşılaştırılabilen titreşme yaklaşıklıkları sağlaması gerekir. Bu amaçla, titreşmeölçer, EMTP ile

hesaplanabilir, böylece 8.8 Hz'lik eşdeğer gerilim değişimi,  $DV_{eq}/V$  elde edilebilir. Şekil 4.4.4'ü veren simülasyona bakıldığında,  $DV_{eq}/V$ 'nin %1.29'u değeri bu şekilde elde edilmiştir (yukarıda verilen  $DV/V$  değeri ile arasındaki ufak fark sinüzoidal yasanın, 8.8'e çok yakın olan frekansının seçiminden dolayıdır).

Şekil 4.4.5a ve 4.4.5b gerilimin bağlantı çubuğu Bara 2'deki gerilimin (Şekil 4.4.1), zamanla değişen (sinüzoidal yasanın frekansı 10 Hz) ve sabit ark uzunluğundaki simülasyonlardan elde edilen harmonik analizini göstermektedir. Grafikler karşılaştırıldığında görüleceği üzere, modelin nonlinearlığı karakteristik ve kararkteristik olmayan harmoniklerin varlığını gösterirken /Şekil 4.4.5b), sinüzoidal zamanla değişim yasası ele alındığında interharmonikler (yani, çoklu olmayan harmonikler) üretilmektedir (Şekil 4.4.5a). Ark uzunluğunun zamanla değişiminden dolayı ortaya çıkan gerilim modülasyonunun varlığında çoklu harnmoniklerin bu yan bandı her zaman beklenen bir olgudur. Titreşme etkisinden sorumlu interharmonikler esas olarak temel frekansın, yani 50 hz'in yan bantlarında bulunanlardır (öte yandan, UIE titreşme ölçeri temel gerilim dalgalanmalarını göz önüne alır).



Şekil 4.4.4. Nonlinear, zamanla değişen dirençle gerçekleştirilen ark firmı simülasyonundan elde edilen ark firmı noktasındaki (Şekil 4.4.1'deki 4 noktası) gerilim ve akım dalga biçimleri.



Şekil 4.4.5. Zamanla sinüzoidal olarak değişen ark uzunluğu (a) ve sabit ark uzunluğu (b) için, Şekil 4.4.1'deki Bara 2 bağlantı çubuğunun harmonik analizi.

#### 4.4.3.2 Beyaz gürültülü zamanla değişim

Önerilen modele bakıldığında, ark uzunluğunun zamana bağımlılığı

$$l(t) = l_0 - r(t) \quad (4.4.10)$$

olarak ifade edilebilir. Burada  $l_0$  sürekli iletişimle uyumlu maksimum ark uzunluğu,  $r(t)$  ise  $l_0$  referans durumuna göre ark uzunluğu değişimi yasasıdır.  $r(t)$  sinyali, bandı gerilim dalgalanmalarının titreşme oluşturduğu aralıkta bulunan bir beyaz gürültüdür.

Ark gerilim-akım karakteristiğinin zamanla değişiminin ifadesi yine (4.4.7) denklemiyle verilir, bu sefer  $k(t)$ , Denklem (6.9)'un beyaz gürültülü zamanla değişim karşılığı olacak şekilde

$$k(t) = \frac{A + Bl(t)}{A + Bl_0} = 1 - \frac{Br(t)}{A + Bl_0} \quad (4.4.11)$$

ile verilmektedir.

Bu durumda bile, değişken ark uzunluğunun EMTP simülasyonu prosedürü, üç blok, yani bir rastgele sayı üretici, üst ve alt kesim frekansları 4 Hz ve 14 Hz olan bir geçiş bandı filtresi ile denklem (4.4.9)'un çıkış sinyali olarak  $k(t)$ 'yi verdiği bir üçüncü blok kullanılarak TACS bölümünde gerçekleştirilebilir.

Periyodik zaman değişim yasaları durumuna göre (örneğin daha önce gerçekleştirilen sinüzoidal yasa), burada ele alınan rastgele ark uzunluğu zaman yasası için oldukça uzun simülasyon zamanları gerekmektedir. Dahası, titreşme duyarlılığının,  $S(t)$ , UIE titreşmeölçerinin çıktısından mevcut olan ve kısa süreli titreşme şiddeti adı verilen  $P_{ST}$  büyüklüğünü elde etmek için işlemden geçirilmesi gerekir.  $S(t)$ 'nin kümülatif olasılık dağılımının persentillerinin ağırlıklandırılmış bir toplamından oluşur ve amacı titreşmenin türü, zaman yasası ve ilerlemesinden bağımsız bir şekilde titreşme şiddeti hakkında tarafsız bilgi sağlamaktır. Bu sebeple,  $P_{ST}$

$$P_{ST} = (0.0314 S_{\%99.9} + 0.0525 S_{\%99} + 0.0657 S_{\%97} + 0.38 S_{\%90} + 0.08 S_{\%50})^{1/2} \quad (4.4.12)$$

olarak tanımlanır. Burada  $S(t)$ 'nin %50, %90, %97, %99 ve %99.9 persentilleri göz önüne alınmaktadır.

UIE tavsiyelerine göre,  $P_{ST}$  tahminleri 10 dakikalık (Yani iki saatlik gözlemlere karşılık gelen uzun süreli titreşme şiddeti  $P_{LT}$  önerilmektedir) gözlemlere dayanmaktadır, ancak burada sunulan sonuçlar hesaplama zamanından tasarruf etme amacıyla bir dakikalık simülasyonlara dayanmaktadır.

Şekil 4.4.6a ve 4.4.6b aktif olmayan gücün davranışı (yani,  $Q = (S^2 - P^2)^{0.5}$ ) ve buna karşılık gelen ve ark uzunlupunun beyaz gürültülü zamanla değişimbe dayanan bilgisayar simülasyonu ile elde edilen PCC'deki titreşme duyarlılığı  $S(t)$ 'yi göstermektedir. Santral paramtereleri daha önce sinüzoidal zaman yasasında kullanılanlarla aynıdır; ark eşiği gerilimi,  $V_{at}$  40-240 V aralığında değişmektedir. Bu aralıkta, geniş ark uzunluğu değişimleri kadar sürekli iletme de izin verilir. Bir dakikalık simülasyon için hesaplanan  $P_{ST}$  değeri 1.6'dır (1'i aşan  $P_{ST}$  değerleri titreşme düzensizliğini belli eder).

Bu simülasyonların sonuçları hem titreşme hem de gerilim distorsiyon faktörü hesaplamaları için oldukça iyi gerçek durumlar yarattılar (aynı zamanda tek fazlı simülasyondan doğan yaklaşımlar da hesaba katılarak). Gerçekten de, simülasyonda kullanılanlara oldukça yakın karakteristikleri olan bir santralde yapılan ölçümler, başlangıç erime noktasında 1.6'ya yaklaşan  $P_{ST}$  değerleri sağladılar. Bir dakikadan daha uzun simülasyonlarda, genelde eritilen

metalin miktarı arttırıldığında oluşan gerilim dalgalanmasını tanımlayabilmek için ark uzunluğu değişimi zamanla değiştirilebilir.

#### 4.4.3.3 Modelin yorumlanması

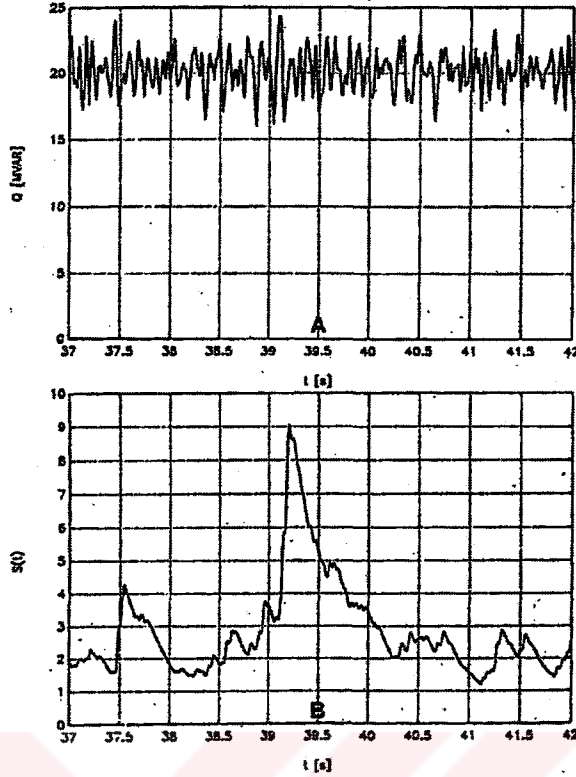
Sinüzoidal yasadan yasadan elde edilen sonuçların, yani  $DV_{eq}/V$ 'nin  $P_{ST}$ 'ye döndürülmesinden sonra, yukarıda sunulan iki çeşit ark uzunluğu değişimi yasaının doğrudan bir karşılaştırması gerçekleştirilebilir. Aslında, deterministik bir sinyal için  $P_{ST}$  hesaplaması anlamsızdır ve dahası, periyodik sinyaller için titreşme etkisini hesaplayabilmek için 1 veya 10 dakikadan daha kısa süreler gereklidir. Ancak, karşılaştırma amacıyla, deterministik, sinüzoidal bir sinyalin olasılık dağılımının adım fonksiyonunu andırdığı gözlenebilir, dolayısıyla (6.11) denkleminde,

$$P_{ST} \approx (0.5096 S_{MAX})^{1/2} \quad (4.4.13)$$

bulunur. Burada  $S_{MAX}$  titreşim duyarlılığının maksimum değeridir. Bu yaklaşıklık altında, Şekil 4.4.4 ve 4.4.5 ile ilgili sinüzoidal zamanla değişim yasasıyla yapılan simülasyonlardan ( $DV_{eq}/V = \%1.29$  verir) elde edilen  $P_{ST}$  değeri 3.7' dir.

Yani, aynı santral ve fırın çalışma koşulları için, beyaz gürültülü zaman değişim yasasından elde edilen  $P_{ST}$  değeri (1.6) sinüzoidal yasadan çıkarıldan (3.7) çok daha düşüktür.

Sinüzoidal yasaının fırın çalışması için limit koşulları, yani PCC'de karakteristikleri bilinmeyen bir fırın tarafından yaratılan maksimum titreşme duyarlılığının belirlenmesini sağlayan bir en kötü durum senaryosunu sağladığı öne sürebilir (dikdörtgen yasayla modülasyon yapıldığında da benzer sonuçlar beklenir). Bu yaklaşım,  $DV/V$ 'nin beslenmeyen fırın ve kısa devre durumları gibi limit durumlarda hesaplandığında kullanılan kriterlerden daha etkin görünmektedir. Dahası, önerilen model titreşim telafi sistemlerinin etkilerinin en kötü durumlarda incelenmelerine izin verir ve ortaya çıkan titreşim hesaplamalarını UIE teçhizatına göre,  $S(t)$  veya  $P_{ST}$  cinsinden sağlar.



Şekil 4.4.6. Ark uzunluğunun beyaz gürültülü zamanla değişimine dayanan bilgisayar simülasyonlarından elde edilen PCC'deki aktif olmayan gücün zaman davranışı (a) ve buna karşılık gelen birim başına titreşme hassaslığı (b).

Ark uzunluğu için beyaz gürültülü zamanla değişim yasası kullanıldığında, gerçek çalışma koşullarına yaklaşılabilmekte ve incelenen santral için bir tür ortalama  $P_{ST}$  hesaplanmaktadır. Bu analiz, ark fırınlarını besleyen elektrik santrallerinin tasarlanma aşamasında veya ölçümlerin titreşme telafi sistemlerine geçilmesi gerektiğini gösterdiği mevcut santrallerde, titreşme telafi stratejilerinin belirlenmesi için yararlı olabilir.

#### 4.4.4 Seri İndüktörlerle Titreşme Telafisi

Bu noktaya kadar bildirilen hesaplamalar, seri indüktör olmadan (yani, Şekil 1'de  $X_p = 0$ ) ve PCC'deki kısa devre oranı (SCR) (kısa devre oranı, kısa devre gücünün yükün gerektirdiği ortalama görünür güce oranı olarak tanımlanır) 58'e eşitken, 600 V'luk MV/LV transformatörünün sekonder gerilimine aittir.

Fırını besleyen santrale seri indüktörlerin kurulmasının etkilerini canlandırmak için, Şekil 4.4.1'de gösterildiği gibi MV/LV fırın transformatörünün besleme tarafında bir  $X_p$  seri reaktansı olduğu varsayılabilir (eşdeğer reaktör direnci ihmal edilmektedir). Ancak, seri indüktörlerin yerleştirilmesi, fırın verimliliğinde önemli düşmelerden kaçınılması için müdahale edilmesini gerektirecek şekilde fırın gücünde bir düşüşe sebep olur. Esas olarak,

ayarlanabilir sekonder gerilimden (simülasyonlarımızda 600V ila 900V arasında 60 V'luk adımlarla değişmektedir) yararlanılarak MV/LV transformatörünün , transformatör dönüş sayısı değiştirilebilir. Bu da ark uzunluğu değişimlerine neden olur.

Seri indüktörlerin davranışına ayrıntılı şekilde bakmak için burada iki tasarım kriteri karşılaştırılmaktadır. Birisi, kısa devreli elektrodlu bir reaktans-transformatör-fırını sistemi tarafından soğurulan gücü sabit tutmaktan oluşmaktadır (böylece PCC'deki SCR indüktörlerin yerleştirilmesiyle önemli derecede değişmez). Fırın veriminin yukarıdaki gerekliliklerine daha iyi uyan diğeri, fırın tarafından soğurulan ortalama aktif gücü sabit tutmaktır. Her iki durumda da, tasarım kriterlerine göre MV/LV transformatörünün fırın tarafı gerilimi değiştirilerek, birkaç seri reaktans değeri için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Varsayılan ark fırını modelinin bir sonucu olarak, seri indüktörlerin yerleştirilmesinden dolayı oluşan fırın tarafı gerilimindeki bir artış arkın uzamasına neden olur. Saha gözlemlerine göre, maksimum ark uzunluğu değişimleri,  $DI$ , simülasyon için kullanılan değer aralığında (yani, sürekli iletme karşılık gelen) ark uzunluğundan bağımsız varsayılmıştır. Dolayısıyla, daha uzun arklar daha ufak rölatif uzunluk  $DI/l$  sağlarlar. Ark uzunluğu değişimi için hem sinüzoidal hem de beyaz gürültü yasaları simülasyonlarda ele alınmıştır (sinüzoidalde 10 Hz'lik frekans kullanılmıştır).

Çizelge 4.4.1 ve 4.4.2, yukarıda tanımlanan karakteristiklerdeki santrale fırının transformatörünün sekonder gerilimi, yani iki tasarım kriteri için eşdeğer gerilim değişimi,  $DV_{eq}/V$  ve buna karşılık gelen  $P_{ST}$  birlikte yerleştirilmiş olan seri reaktansın değerlerini göstermektedir. Seri reaktansın ark fırını elektrotlarının yukarı tarafında görülen toplan reaktans,  $X_t'$ ye oranı da verilmektedir. Şekil 4.4.7'de, Çizelge 4.4.2'nin verilene göre çizilmiş olan gerilim değişiminin  $X_p/X_t$  oranına karşı grafiği görülmektedir.

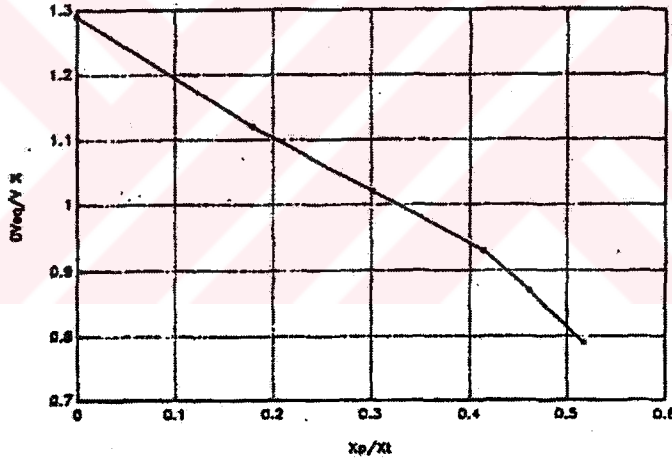
Simülasyon sonuçları, iki tasarım kriteri için de fırın transformatörünün besleme tarafına seri indüktörlerin yerleştirilmesinin gerilim dalgalanmalarını ve dolayısıyla PCC'deki titreşmeyi önemli derecede azalttığını göstermektedir. Fırın transformatörünün sekonder tarafında izin verilen maksimum gerilim ayarlamasından yararlanarak, PCC'deki gerilim değişimi seri reaktansın bulunmadığı zaman hesaplanan değerlere göre sırasıyla % 80 ve % 690 azalmıştır. Bundan dolayı, fırın tarafından soğurulan sabit ortalama gücün tasarım kriterleri tarafından önemli telafi olasılıkları sağlanır (Çizelge 4.4.2), ama aynı zamanda Şekil 4.4.1'deki bağlantı çubuğunun kısa devre gücünün pratik olarak sabit tutulduğu diğer kriter de ihmal edilemez

titreşim telafisi sağlar. Ancak, ilk durumda, aynı transformatör gerilimi için daha yüksek seri reaktans değerleri gerekmektedir.

Seri reaktans telafi etkisinin kısa devre oranına bağımlılığı, sabit fırın gücü ve sinüzoidal modülasyona karşılık gelen Şekil 4.4.7’de belirtilmektedir. Yüzey, SCR’nin (SCR = 58, 3500 MVA’lık kısa devre gücü  $S_{SC}$ ’ye karşılık gelir) arttırılmasıyla,  $P_{ST}$ ’nin, beklenileceği üzere, herhangi bir seri reaktans değeri için azalacağını gösterir. Aslında, kısa devre gücü değiştirildiğinde fırın akımının önemli derecede değişmeyeceği ( $X_{LSC}$  fırını besleyen hattın toplam reaktansına göre çok küçüktür) gibi yaklaşık bir varsayım altında türetilmiş olan basit bir bağıntı gerilim değişimi (ya da  $P_{ST}$ ) ile kısa devre gücü arasındaki, ters orantıyı ortaya koyar:

$$(DV_{eq}/V)_2 = (DV_{eq}/V)_1 (S_{SC2}/S_{SC1}) \quad (4.4.14)$$

Burada  $(DV_{eq}/V)_2$  ve  $(DV_{eq}/V)_1$  sırasıyla  $S_{SC2}$  ve  $S_{SC1}$ ’e karşılık gelir.



Şekil 4.4.7. Kısa devreli elektrotlu reaktans-transformatör-fırın sistemi tarafından soğurulan sabit güç kriterine dayanan bir tasarım için, seri reaktans ile toplam reaktans arasındaki oranın bir fonksiyonu olarak yüzde gerilim değişimi,  $\%DV_{eq}/V$ .

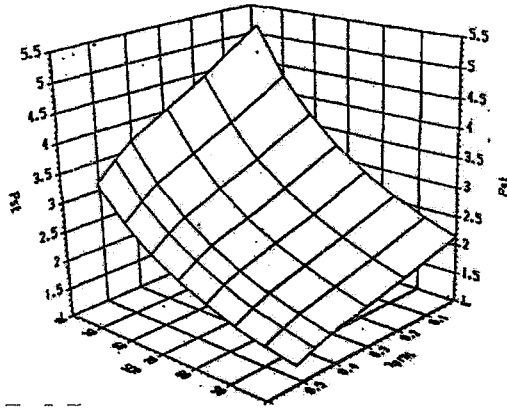
$P_{ST}$  değerleri Çizelge 4.4.1 ve 4.4.2’de ( $k_i$ , sinüzoidal yasa için geçerlidirler) bildirilenlerden ufak olsa da, ark uzunluğunun beyaz gürültülü zamanla değişim yasası için de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin, fırın tarafından soğurulan sabit ortalama aktif güç için, seri indüktör bulunmadığı zaman,  $X_P/X_I = 3.29$  değeri için,  $P_{ST}$  1.67’den 1.8’e değişir.

Bu sonuçların saha ölçümleriyle karşılaştırmaları literatür verilerine bakıldığında, kolayca gerçekleştirilemez. Ark fırınlarını besleyen elektrik santralleri, genelde benzer konfigürasyonlar, ancak değişik parametre değerleri gösterir ve dahası, titreşme ölçümleri her

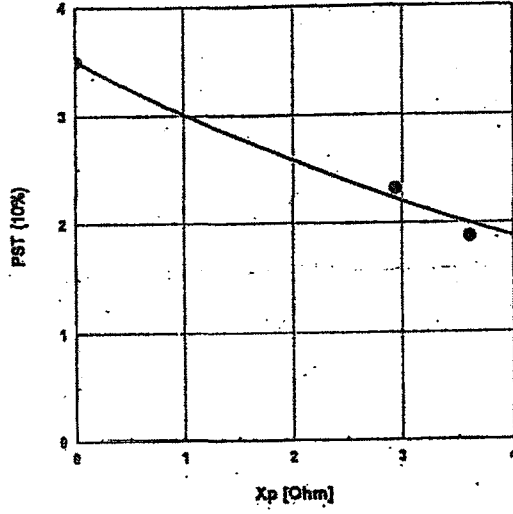
zaman ölçüm zamanı ve birimi, erime prosesi gibi karşılaştırılabilir durumlarda bildirilmez veya tam tersi, ölçüm koşulları hakkında eksik bilgi verilir.

Ancak, parametreleri simülasyonumuzda kullandıklarımıza benzer santrallerde yapılan  $P_{ST}$  ölçümlerinin bazı sonuçları verilmektedir. Aslında, titreşme şiddeti, bir santralde farklı işletim koşulları altında birkaç kere ölçülmüş ve % 10'luk bir olasılık farklılığı gösteren (yani  $P_{ST}$  değerleri pikinin dağılımının kümülatif olasılığının % 90'ı)  $P_{ST}$ 'nin maksimum değerleri cinsinden verilmiştir. Fazla olasılık % 10'la ilgili maksimum  $P_{ST}$ 'nin davranışını seri reaktansın ve kısa devre gücün değerlerinin fonksiyonu olarak verilmektedir. İki Şekil de, Şekil 4.4.7 ve 4.4.8'de özetlenen simülasyonlarımızın sonuçlarıyla niteliksel bir uyum sağlamaktadır. Niceliksel hesaplamalara gelince, karşılaştırma problemi konusunda, yukarıdaki koşullar altında Grafik 4.4.8'in  $P_{ST}$ 'nin  $X_p$ 'ye göre değişimlerini Çizelge 4.4.2 ve Şekil 4.4.7'deki bildirilenlere çok yakın olduğunu gösterdiği görülebilir. Diğer taraftan,  $P_{ST}$ 'nin maksimum değerlerinin dağılımı, daha önce bahsedildiği gibi en kötü duru hesaplamalarını veren sinüzoidal zaman yasasına ait simülasyon sonuçlarıyla oldukça uyumludur. Aynı şekilde,  $X_p/X_t = 0$  ve  $X_p/X_t = 0.52$  için Şekil 4.4.7 'da verilen yüzeylerin kesişimlerinden fazla değişiklik göstermemektedir.

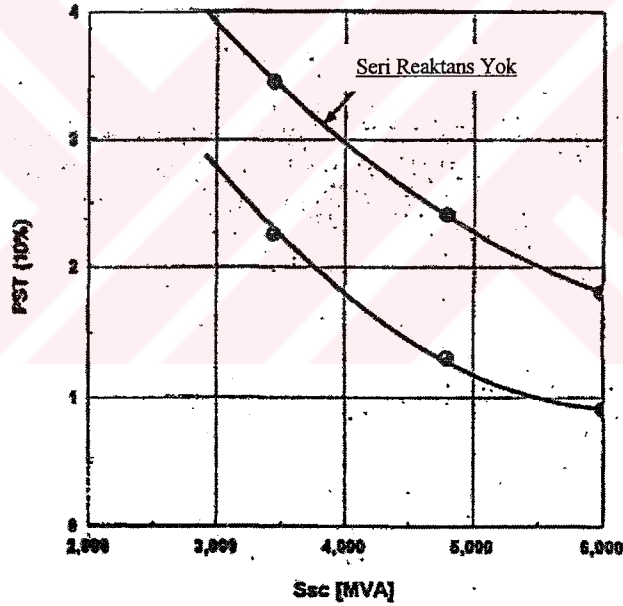
Dolayısıyla, seri indüktörlerin yerleştirilmesinin titreşme telafisi üzerinde önemli etkileri olduğu ve burada önerilen modellerin bu etkinin yaklaşık, ama anlamlı hesaplamalarını sağladığı sonucuna varılabilir.



Şekil 4.4.8. Fırın tarafından soğurulan sabit ortalama güç kriterine dayanan bir tasarım için, seri reaktansın toplam reaktansa oranının ve kısa devre oranı, SCR'nin bir fonksiyonu olarak kısa süreli titreşme şiddeti.



Şekil 4.4.9. Seri reaktans değerlerinin bir fonksiyonu olarak %10'luk bir olasılıkla aşılan maksimum  $P_{ST}$ 'nin davranışı.



Şekil 4.4.10. Seri reaktans varken ve yokken, PCC'deki kısa devre gücünün bir fonksiyonu olarak %10'luk bir olasılıkla aşılan maksimum  $P_{ST}$ 'nin davranışı.

Çizelge 4.4.1. Reaktans-transformatör-fırın sistemi tarafından soğurulan sabit güçte gerçekleştirilmiş tasarım için seri reaktans değerleri ( $X_p$ ), seri reaktans ile toplam besleme hattı reaktansı arasındaki oran ( $X_p/X_l$ ), fırın transformatörünün sekonder gerilimleri ( $V_2$ ), gerilim değişimi ( $DV_{eq}/V$ ) ve PCC'deki kısa süreli titreşim şiddeti ( $P_{SST}$ ). Ark uzunluğunun zamanla sinüzoidal değişim yasası.

$X_p$ (Ohm)	$X_p/X_t$	$V_2$ (kV)	$DV_{eq}/V$	$P_{ST}$
0	0	0.60	1.29	3.68
0.63	0.12	0.66	1.21	3.45
1.12	0.22	0.72	1.15	3.28
1.50	0.29	0.78	1.10	3.14
1.79	0.35	0.84	1.06	3.03
2.04	0.40	0.90	1.02	2.91

Çizelge 4.4.2. Fırın tarafından soğurulan ortalama sabit güçte gerçekleştirilmiş tasarım için seri reaktans değerleri ( $X_p$ ), seri reaktans ile toplam besleme hattı reaktansı arasındaki oran ( $X_p/X_t$ ), fırın transformatörünün sekonder gerilimleri ( $V_2$ ), gerilim değişimi ( $DV_{eq}/V$ ) ve PCC'deki kısa süreli titreşim şiddeti ( $P_{SST}$ ). Ark uzunluğunun zamanla sinüzoidal değişim yasası.

$X_p$ (Ohm)	$X_p/X_t$	$V_2$ (kV)	$DV_{eq}/V$	$P_{ST}$
0	0	0.60	1.29	3.68
0.98	0.18	0.66	1.12	3.20
1.73	0.30	0.72	1.02	2.91
2.37	0.41	0.78	0.93	2.66
2.86	0.46	0.84	0.87	2.48
3.29	0.52	0.90	0.79	2.26

#### 4.4.5 Seri İndüktörler ve Akım – Gerilim Distorsiyonu

Ark fırınları, nonlinear karakteristiklerinden dolayı iyi bilinen harmonik gerilim ve akım kaynaklarıdır. Ark uzunluğunun zamanla değişiminden kaynaklanan çoklu olmayan harmoniklerin, yani interharmoniklerin yanısıra, sinüzoidal çerçeveye göre dalga şekli distorsiyonundan dolayı, beslenen fırına çoklu harmonikler sokulmaktadır. Sinüzoidal modülasyona ait Şekil 4.4.5a ve beyaz gürültülü zamanla değişimine ait olan Şekil 4.4.11, ark fırınlarını besleyen santraallerdeki gerilim ve akımların neredeyse sürekli bir spektruma sahip olduklarını göstermektedir (Şekil 4.4.1'in harmonik analizi, bir dakikalık bütün bir simülasyona karşılık gelir).

Ancak, distorsiyon faktörünün hesaplanmasının, titreşme ölçüleriyle hesaplanan dağa şekillerinin sinüzoidal biçimden sapması yüzünden interharmoniklerin üretilmesi etkisini ayrıştırması gerekir. Sinüzoidal biçimden sapma, IEEE 519 tarafından tavsiye edilen toplam harmonik distorsiyonu (THD) hesaplamalarının alışlageldik ifadesinde hesaba katılır:

$$\text{THD} = \frac{\left( \sum_{h=2}^N A_f^2 \right)^{1/2}}{A_1} \%100 \quad (4.4.15)$$

Burada  $A_f$  çoklu harmonik gerilimleri veya akımlarının genliği,  $A_1$  temel frekanstaki (50 veya 60 Hz) genliği temsil eder ve  $N$  de normalde 50'nin altındadır.

Statik güç dönüştürücülerini besleyen elektrik santrallerine koruma reaktanslarının yerleştirilmesinin genelde besleme bağlantı çubuğundaki gerilim distorsiyonunun azalmasına neden olduğu bilinmektedir. Ark fırınları durumunda, iki tasarım kriteri için de (Çizelge 4.4.1 ve 4.4.2'de gösterildiği üzere) tam tersi olmaktadır. Seri reaktansların yerleştirilmesi ark uzunluğunu arttırır (besleme gerilimi düzenlemelerinden dolayı), böylece THD akımı ( $\text{THD}_I$ ) artar. Bunun sonucu olarak, bağlantı çubuğu bara 2'deki ve sonra da PCC'deki THD gerilimi ( $\text{THD}_V$ ) seri reaktans değeri yükseldikçe artar. Ancak, sabit fırın gücü kriteri için sadece ufak bir artış gözlenmiştir, ki bu da muhtemelen bariz ekonomik nedenlerden dolayı aranan koşuldur (Çizelge 4.4.3). THD akımının tasarım kriterlerine değil de, sadece fırın geriliminin değeri tarafından belirlenen ark uzunluğunun değişim aralığına bağlı olduğunu gözlemlemek ilginçtir (aslında, Çizelge 4.4.3 ve Çizelge 4.4.4'te  $V_2 = 900$  V için aynı  $\text{THD}_I$  değerleri elde edilmiştir).

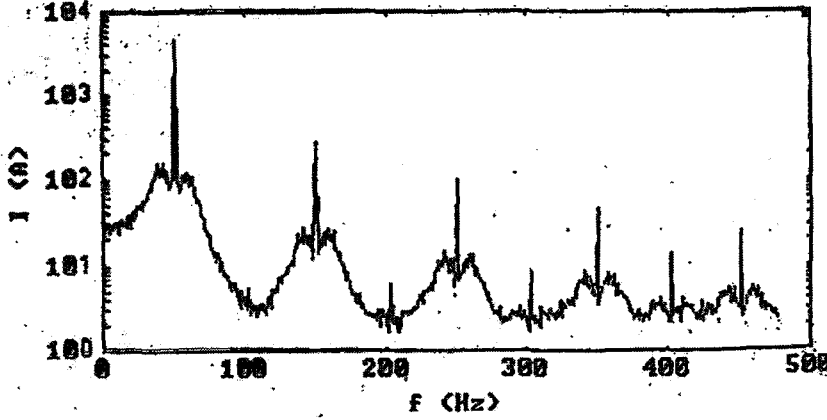
Diğer taraftan, kapasitörlerin ve/veya paralel devre filtrelerinin eklenmesi reaktif ve distorsiyon güçlerinden kaynaklanan aktif olamayan gücü telafi edebilirken, titreşme azaltılmasına belirgin bir katkıda bulunmazlar. Filtrelerin kullanılan kapasitör kümeleri kullanıldığında oluşabilecek tehlikeli ve kontrolsüz rezonanslardan kaçınmak ve ek olarak, distorsiyon telafisine katkıda bulunmaları için tavsiye edilir. Ancak, gerilim ve akımın neredeyse sürekli harmonik spektrumlarından dolayı, filtrelerin kullanımı bile dikkatli ele alınmalıdır.

#### 4.4.6 Çalışmanın Yorumlanması

Ark fırını besleyen elektrik santrallerindeki titreşimin bu makalede önerilen modellerle tanımlanması, oldukça tatmin edici görünmektedir. Nonlineer ark modeli, gerçek santrallerde gözlenenlere benzer gerilim ve akım dalga biçimleri kadar ark karakteristiklerini de sağlamaktadır.

Ark uzunluğuna uygulanan uygun zamanla değişim yasaları sayesinde, fırın transformatörünün besleme tarafına yerleştirilen seri indüktörlerin etkileri üzerinde oldukça

kesin hesaplamalar yapılmış ve kısa dönem titreşiminin, yan, gerilim değişimlerinden kaynaklanan titreşimin, oldukça azaltılabileceği gösterilmiştir. Ark kararlılığı, indüktör büyüklüğü üzerinde bir limit değer, yani sürekli iletim aralığı konulmasını gerektirmektedir.



Şekil 4.4.11. Ark uzunluğunun beyaz gürültülü zamanla değişim yasası için, fırın transformatörünün besleme tarafındaki ark fırını akımının harmonik analizi.  $X_p = 3.29$  Ohm, transformatör sekonder gerilimi 900 V (ölçüm verileri için bant genişliği 1 Hz).

Dolayısıyla, aktif olmayan güç telafisi için kapasitör ve/veya filtrelerde birlikte seri indüktörlerin kullanımı, belirli santral koşullarında ve teknik-ekonomik hesaplamalardan sonra, statik var sistemlerinin kurulmasına alternatif bir çözüm gibi görünmektedir.

Uygun fırın karakteristik eğrileriyle birlikte ark fırını çalışmasının dengesizliklerinin de göz önüne alınabildiği üç fazlı simülasyonlarla modelleme kesinliği daha iyi duruma getirilebilir ve uygun filtre etkinliği araştırmaları gerçekleştirilebilir.

Çizelge 4.4.3. Reaktans-transformatör-fırın sistemi tarafından soğurulan sabit güçte gerçekleştirilen tasarım için seri reaktans değerleri ( $X_p$ ), seri reaktans ile toplan besleme hattı reaktansı arasında oran değerleri ( $X_p/X_t$ ), fırın transformatörünün sekonder gerilimleri ( $V_2$ ), Şekil 4.4.1'deki bağlantı çubuğu 2'deki yüzde gerilim ve akım toplam harmonik distorsiyonu (sırasıyla %THD<sub>1</sub> ve %THD<sub>V</sub>). THD hesaplaması için toplamın üst sınırı  $N = 20$ . Ark uzunluğu için sinüzoidal zamanla değişim yasası.

$X_p$ (Ohm)	$X_p/X_t$	$V_2$ (kV)	% THD <sub>1</sub>	% THD <sub>2</sub>
0	0	0.60	3.99	1.61
0.63	0.12	0.66	4.34	1.74
1.12	0.22	0.72	4.72	1.85
1.50	0.35	0.78	5.07	1.98
1.79	0.35	0.84	5.41	2.10
2.04	0.40	0.90	5.72	2.21

Çizelge 4.4.4. Fırın tarafından soğurulan ortalama sabit güçte gerçekleştirilen tasarım için seri reaktans değerleri ( $X_p$ ), seri reaktans ile toplam besleme hattı reaktansı arasında oran değerleri ( $X_p/X_t$ ), fırın transformatörünün sekonder gerilimleri ( $V_2$ ), Şekil 4.4.1'deki bağlantı çubuğu 2'deki yüzde gerilim ve akım toplam harmonik distorsiyonu (sırasıyla %THD<sub>I</sub> ve %THD<sub>V</sub>). THD hesaplaması için toplamın üst sınırı  $N = 20$ . Ark uzunluğu için sinüzoidal zamanla değişim yasası.

$X_p$ (Ohm)	$X_p/X_t$	$V_2$ (kV)	% THD <sub>I</sub>	% THD <sub>V</sub>
0	0	0.60	3.99	1.61
0.98	0.18	0.66	4.34	1.62
1.73	0.30	0.72	4.71	1.64
2.37	0.41	0.78	5.05	1.68
2.86	0.46	0.84	5.39	1.72
3.29	0.52	0.90	5.72	1.74

(Montanari, G.C., 1994)

## 4.5 Elektrik Arkı Ocaklarından Gelen Titreşim Hesaplama için Bir Model Geliştirilmesi \*

### 4.5.1 Çalışmanın Açıklanması

Elektrik arkı fenomeninin karakteristiklerinden dolayı, elektrik arkı ocağı yükleri bir güç sisteminde ciddi elektriksel karışıklıklara neden olabilir. Kaynak geriliminin % 0.5'ten az düşük seviyeli frekans modülasyonları, lambalarda rahatsız edici titreşmeye neden olur ve frekans 6-10 Hz arasındayken halktan şikayetler gelir. Dolayısıyla, tek ve çoklu ark ocağı yüklerinden gelen titreşme etkilerini ve kompanse etme planlarının etkilerini belirlemek için daha iyi yöntemler geliştirmeye ihtiyaç vardır. Bu bölümde, ark ocağı yüklerinin yapısı tartışılmakta ve bir ark ocağı modeli geliştirmek için gereken aletleri, saha ölçümlerini ve sinyal analizi teknikleri tanımlanmaktadır. EMTP gibi dijital simülasyon programlarıyla veya başka uygun ticari yazılım simülasyon programlarıyla kullanıma uygun tek fazlı bir ocak modeli ileleri sürdürülmektedir. Modelin geçerliliğini göstermek üzere, gerçek ocak girdi verilerine dayanan temsili sonuçlar da eklenmiştir.

Elektrik arkı ocağı yükleri, genellikle bir elektrik tesisi kaynak sisteminin tek büyük müşterisini temsil eder. Örneğin, Ontario Hydro trafo sınıflamaları 100 MVA'yı geçen ark ocağı tesislerine güç sağlamaktadır.

Çeliğin ark ocaklarıyla üretilmesi sürekli bir şekilde genişlerken, miktar, büyüklük ve güç yoğunluğu seviyeleri de genişlemektedir. Bu da bu tür yüklerle ilişkilendirilen problemlerle ilgili daha fazla çalışma yapılması gereğini doğurmuştur.

Elektrik arki ocaklarının, yükün erimesi sırasındaki rastgele ark davranışından dolayı 0.5 ila 30 Hz aralığında gerilim dalgalanmaları veya “titreşmeler” ürettiği bilinmektedir. Güç seviyeleri eritme sırasında genellikle önemli derecede değişirken, ocak sıcaklığının büyük bir kısmı için, daha küçük değişimler neredeyse sürekli olarak gerçekleşmektedir. Elektrik arki ocakları üzerine yapılan geniş çalışmalar 6-10 Hz aralığındaki %0.5 kadar gerilim değişikliklerinin sıradan akkor lambalarda itiraz edilebilecek bir ışık “titreşmesine” neden olduğunu göstermiştir.

\*

Titreşme sorunlarından kaçınmak için, birçok tesis miktarı belirlenebilecek titreşme limitleri belirleme, titreşme büyüklüğünü ölçecek aletler geliştirme ve yeni veya ek ark ocağı yükleri eklemek için önceden belirleyici geliştirme gereksiminini kabul etmiştir.

Bugüne kadar, karşılıklılık sınırlarını geliştirme ve ayarlama ve standartlaştırılmış talimatnamelerle gerilim titreşmesi ölçerleri geliştirmede hatırı sayılır ilerleme kaydedilmiştir. Kurulmuş ocak yükü, sistem kısa devre seviyesi ve gözlemlenen titreşme seviyelerinin birbirleriyle nasıl ilişkili olduklarını araştırmak için sayısız denemede bulunduğu halde, tatmin edici, önceden belirleyici yöntemler geliştirilememiştir.

Bu düşünceler, 1980’lerin başında, bir ark ocağı modelinin geliştirilebilmesi için , titreşmenin temel yapısı hakkında daha fazla bilgiye gerek olduğu sonucuna varılmasına neden oldu. Bu tür bir model elektrik arki ocaklarındaki gerilim dalgalanmalarını değerlendirmek için yapılacak simülasyon çalışmalarında ve farklı kompanse edici planlar üzerindeki çalışmalarda kullanılabilirdi. Bu tür bir modeli geliştirmek için, ilk önce ocak girdi verilerini toplamak ve bir analiz yöntemi geliştirmek gerekliydi.

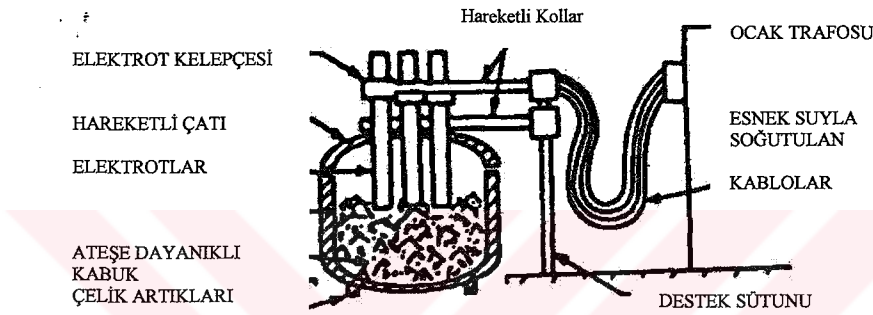
1980’den itibaren, Ontario Hydro, Kanada’daki bazı değişik kurulu ocaklardan gerçek girdi dalga şekli verilerini toplamak ve bu verileri model geliştirilmesi ve denemesi için bir temel sağlayacak şekilde analiz etmek üzere bir sistem geliştirmek için, Canadian Electrical Association (CEA) tarafından desteklenen bir projeye başladı. 1985 yılında, ark ocaklarındaki titreşme için bir model geliştirilmek üzere yine CEA tarafından desteklenen ikinci bir projeye başladı. Bu makale de elektrik arki ocaklarının elektriksel

\* Manchur, G., Erven, C.C. , “ Development Of A Model For Predicting Flicker From Electric Arc Furnaces ”

karakteristiklerinin, ham ocak verilerinin toplanmasının ve önerilen bir model yapısını desteklemek için kullanılan özel analiz yöntemlerinin altını çizmektedir.

#### 4.5.2 Elektrik Arkı Ocaklarının Karakteristikleri

Bir elektrik arkı ocağı (Şekil 4.5.1) genellikle hurda metalden yükü tutan bir sığağa dayanıklı, çizgili kabuktan oluşur. Genellikle grafitten yapılan üç büyük elektrot, yükleme için bir kenara çekilebilen ve her elektrodun kontrol sisteminin çıktısına göre yükseltilip alçaltılmasına izin veren bir sallanan destek yapısına özel kelepçelerle tutturulmuştur.



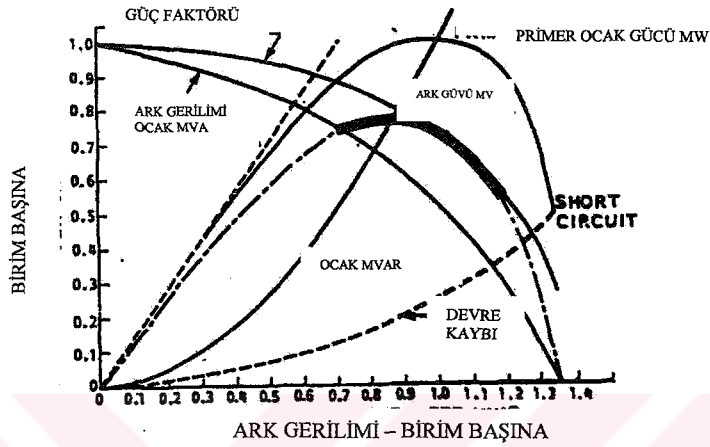
Şekil 4.5.1. Elektrik Ark Ocağı

Ocak hurdalarla yüklendikten sonra, elektrotları, elektrotlarla hurdalar arasında elektrik arkı oluşturacak şekilde alçaltılarak çalışma başlatılır. Üç elektrik arkı tarafından yaratılan ısı, hurdanın eritilip rafine edilmesi için gereken ısıyı sağlar. Bir elektrik arkı ocağında, açığa çıkan enerjinin 60.000 amperi aşan akımlarda ark hacminin  $200 \text{ MJ/cm}^3$ 'ü olduğu tahmin edilmektedir. Bu da ark merkezinde  $10.000^\circ\text{C}$ 'dan yüksek sıcaklıklara neden olur.

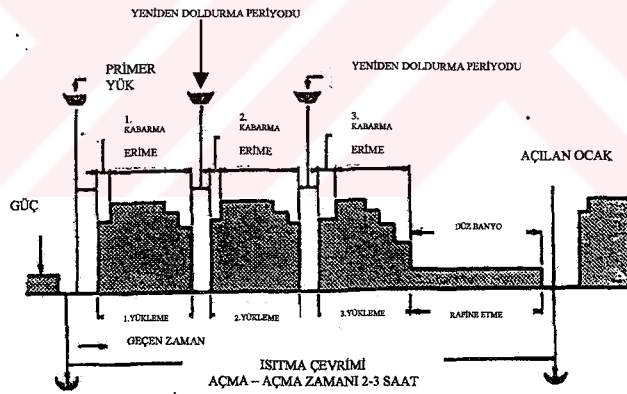
Akım büyüklüğünden rölatif olarak bağımsız olan bir elektrik arkının üzerindeki gerilim, üç bileşenden oluşur: anot düşüşü ( $\approx 30$  volt), katot düşüşü ( $\approx 10$  V) ve ark uzunluğunun  $\approx 12$  volt/cm'asına karşılık gelen bir ark sütunu bileşeni. Ark gerilimlerinin tipik değerleri 150-500 V aralığındadır. Ark sıfır akımda söndüğünden dolayı, güç faktörü arkın yeniden tutuşturulmasında önemli bir rol oynar. Dolayısıyla, kararlı bir çalışma sağlamak, en azından kabarma sırasında oldukça düşük bir güç faktörü anlamına gelir.

Şekil 4.5.2. gerilimin, güç faktörünün, giriş gücünün, ark gücünün ve rekatif gücün ocak trafosu üzerinde belirli bir kapan ayarı için ark akımıyla nasıl değiştiğini göstermektedir. Ocak normalde, % 70'lik bir güç faktörüne karşılık gelen maksimum ark gücü yakınında çalıştırılır.

Elektrik arki ocaklarında çelik yapımı, arkasından ısının oldukça düşük kesilmeleri bir başkası gelen dizi tipi bir operasyondur. Şekil 4.5.6., tipik bir ocak ısıtması sırasında, ocağın güç seviyelerindeki oynamaları göstermektedir. Belirtildiği üzere, ilk kabarma ve erime periyodundan sonra, ocak ısıtma sırasında kabarma mantksız derecede büyük ocak hacimlerinden kaçınmak amacıyla bir veya daha fazla kere yeniden doldurulur.



Şekil 4.5.2. Bir Ark Ocağının Elektriksel Karakteristikleri



Şekil 4.5.3. Bir Ocak Isınması Sırasında Tipik Güç Seviyeleri

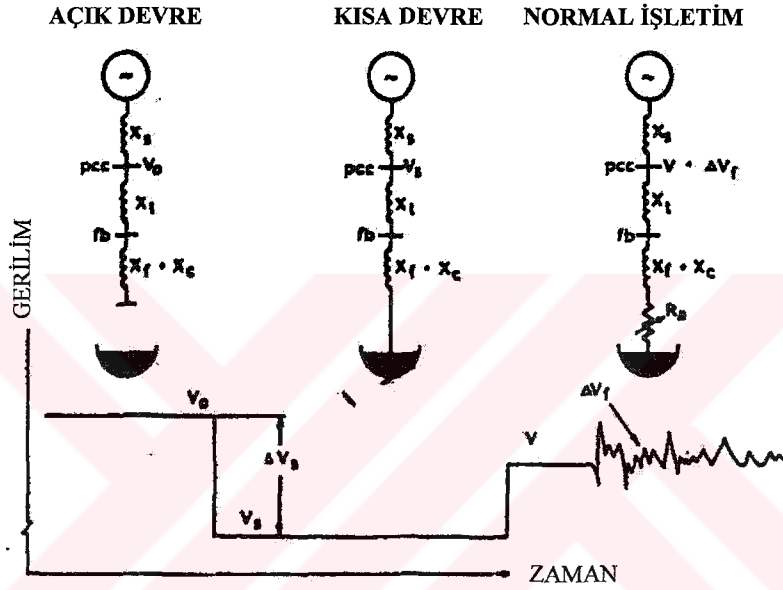
Her ocak ısınması sırasında, ocak gücünün artık çökmeleri, kayan elektrotları, güç talebi sınırları, bakım veya rafine etme sırasında örnekleme testleri nedeniyle birkaç kere açılıp kapanması az rastlanan bir durum değildir. Yeniden doldurma için, gücün kapalı olduğu periyoda ek olarak, bu yük çevrimi operasyonları da gereklidir.

Elektrik arkının rastgele hareketi ve bunun sonucu olarak ortaya çıkan ark uzunluğundaki değişikliklerden dolayı akımda rastgele dalgalanmalara neden olur ve bu da ölçüm noktasındaki ortak kaynak empedansına orantılı olarak ocağın akış yönündeki geriliminde

dalgalanmalara neden olur.

#### 4.5.2.1 Ark Ocaklarında Gerilim Titreşmesi

Bir elektrik arkı ocağının işletim aşamalarındaki, bir güç sisteminde ayırt edilebilir gerilim oynamaları oluşturabilecek üç temel değişiklik, Şekil 4.5.3’de gösterilmektedir. Ekstrem olarak, bir ocak ısınması sırasında, ocak yükü birkaç kere tam bir açık çevrimden tam bir 3 fazlı kısa devre durumuna geçebilir. Normal işletim sırasında, ark hareketinin bir sonucu olarak düzensiz gerilim dalgalanmaları veya gerilim titreşmesi oluşacaktır.



Şekil 4.5.4 Bir Elektrik Arkı Ocağının İşletim Durumundan Dolayı Gerilim Değişiklikleri

Kaynak gerilimi 30 Hz'in altındaki frekanslarda modüle edildiğinde, insan gözünün titreşen ışık kaynaklarına özellikle duyarlılık gösterdiği iyi bilinmektedir. Gözün gerilim titreşmesine gösterdiği duyarlılık gerçekte 6-10 Hz aralığında bir maksimuma ulaşır. Algılanabilirlik eşiği, ışık çıkışındaki değişikliğin toplumun çoğunluğu tarafından fark edilebilen en düşük titreşme geriliminde tanımlanır. Rahatsızlığın sınırı genelde, ışık çıktısındaki değişimin rahatsız edici olduğu titreşme gerilimi seviyesi olarak tanımlanır. Gerilim titreşmesi seviyeleri birçok araştırmaya konu olmuştur ve bazı esaslar kurmak için değişik çabalara yol açmıştır. Çizelge 4.5.1’de, dünyadaki elektrik arkı ocakları için rahatsızlık limitlerini tanımlamakta kullanılan yöntemlerden bazıları sıralanmaktadır.

Kanada ve Birleşik Devletler’deki güç tesisleri ortak bir yöntem üzerinde anlaşamamış gibi görünseler de, kaba bir kılavuz olarak kısa devre durgunluk oranını kullanma eğilimindedirler.

Bu yöntemde, ocak açık devreden tam bir üç fazlı kısa devreye geçerken ortak kuplaj noktası (pcc) bağlantısında oluşan gerilim düşüşü ( $\Delta V_s$ ) açık devre gerilimi ( $\Delta V_o$ ) ile karşılaştırılır. Şekil 4.5.2'teki erminoloji kullanılarak, kısa devre gerilim durgunluk oranı

$$\frac{\Delta V_s}{V_o} = \frac{X_s}{X_s + X_t + X_f + X_c} \quad (4.5.1)$$

veya

$$\frac{\Delta V_s}{V_o} = \frac{S_{scf}}{S_{sc}} \quad (4.5.2)$$

olarak bulunur. Burada  $S_{sc}$  eletrot uçlarındaki kısa devre gücü ve  $S_{sc}$  de ortak kuplaj noktası (pcc) bağlantısındaki hata seviyesidir. Ne yazık ki, çoklu ocak işletimlerinin ve kompanse edici cihazların etkileri bu iki denklemden biri tek başına kullanılarak tahmin edilemez. Yanıtı belirlemek için yük modellerinin geliştirilmesi ve simülasyon çalışmalarının yürütülebilmesi için, elektrik arkı ocaklarının dalgalanan yük karakteristiklerinin daha iyi anlaşılması gerektiği açıktır.

Çizelge 4.5.1. Mevcut Bozulma Limiti Tanımlama Yöntemleri

Tür	Ülke	Limit	Yorumlar
Kısa Devre Gerilim Durgunluğu Oranı	Büyük Britanya	%2.0	132 kV'nin üzerinde %1.6
	İsveç	%2.5	%2.0-2.5 şüpheli
	Hollanda	%1.75	2 ocak için %2
	Yugoslavya	%2.5	110kV'un üzerinde
$\Delta V_f$ 'nin Dalgalanma Gerilimi İstatistiksel Değerlendirmesi	Büyük Britanya	%0.25	132 kV ve altı
		%0.20	275 kV ve üstü
Gerilim Dalgalanmaları saniyede 3-8	Almanya	%0.4 ila 0.5	
10 Hz'e Eşdeğer Titreşme	Norveç	%0.5	-
	İtalya	%0.3	-
	Japonya	%0.45	maksimum
	Fransa	%0.32	1 saatlik ortalama
		Titreşme dozu	

#### 4.5.2.2 Ark Ocağı Yüklerini Karakterize Etme

Şekil 4.5.4'te gösterilen gibi bir eşdeğer devre veya Şekil 4.5.2'de gösterilen gibi bir güç çevrimi diyagramı kullanılarak elektrik arkı ocağının genel yüklenme farklılıklarını hesaplamak mümkün olduğu halde, bu modellerden ikisi de titreşmenin veya kompanse etmenin etkisini belirlemeye uygun değildir.

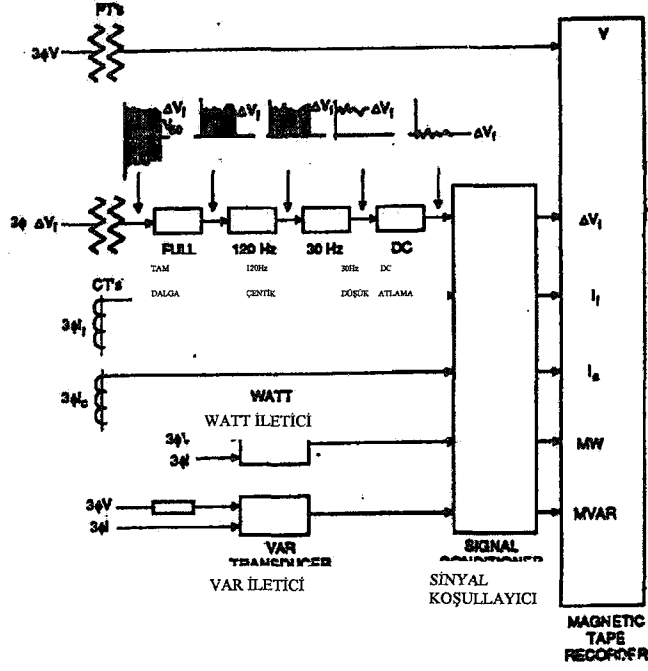
Bugüne kadar, gerçek zamanlı elektriksel girdi miktarlarının gerçek ölçümlerine dayanan pek fazla araştırmaya rastlanmamaktadır. Çabaların çoğu, gerilim titreşmesinin şikayet boyutlarının değerlendirilmesi ve standartlaştırılmış titreşme ölçerlerin ve kabul edilebilir titreşme limitlerinin geliştirilmesiyle sınırlı olduğu görülmektedir.

Dolayısıyla, bir ark ocağı modeli geliştirmek için bilgi sağlamadaki ilk amaç, aletleri geliştirmek ve ikincisi de seçilmiş bir sayıda ocaktaki girdi gerçek elektrik miktarlarını kaydetmektir.

#### 4.5.2.3 Ocak Girdi Verilerinin Ölçülmesi

Bir elektrik arkı ocağı yükünün ilgilenilen ölçülebilir verileri, aşağıdaki üç fazlı büyüklükleri içerir: kaynak gerilimi, akım, gerçek ve reaktif güç ve gerçek titreşme gerilimi. Söz konusu olan çok sayıdaki büyüklük ve verileri depolama gereksinimi nedeniyle, cihaz paketini 14 kanallı manyetik bir kaset kaydedici üzerine yerleştirme kararı alındı. Bu yöntem girdi verilerinin analog biçimde toplanıp saklanmasına olanak verdi ve off-line sinyal prosesini sağladı.

60 Hz'lik taşıyıcıdan küçük genlikli titreşme sinyalinin kesin bir kaydını gerçekleştirebilmek için özel bir devre geliştirildi. 60 Hz'lik taşıyıcı frekansı, 10001/1'lik rölatif genlikli 0.5 ile 30 Hz arasındaki modüle bir edici sinyal frekansına yakın olduğundan dolayı, bu açık olmayan bir işidir. Gerilim titreşmesi sinyalini demodüle etmek için kullanılan prosedür, peşinden seçilmiş frekanslarda bir dizi aktif filtrenin geldiği tam dalga rektifikasyonu dayanmaktadır. Frekansı 0.5 ila 0.30 Hz aralığında değişen ve genliği 60 Hz'lik taşıyıcının % 0.05'i kadar düşük olan gerilim titreşmesi sinyalinin ( $V_f$ ) tatmin edici bir demodülasyonu bu sistemle gerçekleştirilmiştir. Tüm ölçme sisteminin blok diyagramı Şekil 4.5.5'te gösterilmektedir. Kanada'daki birkaç tesisle yapılan anlaşmalara uygun olarak, dört farklı tesiste bunu izleyen testler planlanmış ve gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.5.5. Elektrik Arkı Ocaklarındaki Elektrik Girdilerini Kaydetmek için Ölçme Sistemi

#### 4.5.3 Manyetik Kaset Kaydedici Verilerinin Dijitalleşmesi

Ark ocağı modelinin geliştirilmesi için öngörülen anlaşılır veri analizinin yapısı ve karmaşıklığı, büyük hacimdeki ocak verilerinin daha izlenebilir bir şekilde ulşılabilmesini gerektiriyordu. Bu amaçla, dijital veri dönüşümünü ve 39 saatlik kasete (kaset başına 14 kanallık bilgi olmak üzere) kaydedilmiş verinin depolanmasını sağlamak üzere bir yerleşik bir analog-dijital dönüşüm programı yazıldı. Sinyallerin tekrarlanmayan yapısından dolayı, titreşme spektrumunun en hassas aralığında ortaya çıkan frekansla için çevrim başına 5-10 örnek kadar toplamanın uygun olduğu düşünöldü. Bu da 50 Hz'lik seçilmiş Nyquist frekansını veya 100 Hz'lik bir örnekleme oranını gösteriyordu. Dahası, geliştirilmiş performans karakteristiklerini gerçekleştirmek üzere veri koşullandırması için amaçlanmış olan alternatif frekans bölgesi ortalaması yöntemlerinin incelenmesinin esnekliğini sağlamak için 0.1 Hz civarında bir frekans çözünürlüğü gerekiyordu. Bu da 1024 noktalık veya uzunluğu 10.24 saniyelik veri pencerelerine yol açtı. Veriler, her bir disketi 20 Mbayt alabilen bir Bernoulli kutusunda depolandı.

#### 4.5.4 Dijital Sinyal Analizi Programı

Elektrik ocağının davranışının, farklı kaydedilmiş büyüklükler arasındaki iç ilişkilerin ayrıntılı bir analizi ve bunların daha sonra uygun bir ark ocağı modeli geliştirmede

kullanılması için gerekli araçları sağlamak üzere, geniş bir analiz rutini karışımını içeren geniş bir yerleşik dijital sinyal analizi programı yazıldı. Paketin analizde geniş olarak kullanılan daha önemli özelliklerinden bazıları, aşağıdaki gibidir:

- \* Pencere fonksiyonları: Hamming, Hanning, Welch, Perzon, Dikdörtgen
- \* Fourier Transformu:
- \* Güç Spektrumu:
- \* Geçiş Spektrumu:
- \* Transfer Fonksiyonu:
- \* Tutarlılık Fonksiyonu:
- \* Ağırlıklandırma Fonksiyonu: Kullanıcı tarafından tanımlanan bir frekans ağırlıklandırma fonksiyonunun üretilmesine olanak tanır
- \* Geçiş Aritmetiği: Çıktı=Girdi 1 (İşlem) Girdi 2 “İşlem”i tanımlayın, +, -, \*, /
- \* Karekök:
- \* Büyüklük Ortalamaları: Belirlenen sayıda birbirini izleyen frekans pencerelerinin ortalama büyüklüklerini hesaplar
- \* Frekans Aralığı Ortalaması: Belirlenen frekanslar arasındaki frekans pencerelerinin ortalama büyüklüğünü hesaplar. Birden fazla varsa, birbirini izleyen pencereleri hesaplar
- \* Büyüklük Olasılıkları: Zaman pencereleri veya belirlenmiş frekanslar arasındaki frekans pencerelerinin yoğunluklarını kümülatif olasılıkları hesaplar
- \* ASCII: Kullanıcının isteği üzerine ASCII dosyaları hazırlar

#### 4.5.5 Bantla Sınırlandırılmış Beyaz Gürültü ile Denemeler

Rastgele gürültü sinyalleri ile bunları karakterize eden farklı yöntemlerin farklı özellikleri, özellikle de ark ocağı titreşme simülasyonlarındaki potansiyel rolleri hakkında bilgi edinmek üzere, akkor bir lambayı süren bir frekans sintisayzır/güç amplifikatörü modüle etmek için bir bantla sınırlandırılmış beyaz gürültü üretici kullanan bir dizi deney gerçekleştirildi. Gerçek saha verileri üzerinde kullanılan analiz yöntemlerine doğrudan etki eden bulguların bazıları aşağıda sunulmaktadır:

#### 4.5.5.1 Güç Spektrumuna Ortalamanın Etkisi

Rastgele beyaz gürültünün güç spektrumunun ortalamasının alınmasının tek tek spektrumların dalgalanma bandını daraltma etkisi olduğu fark edildi; ancak bunlara karşılık gelen Fourier transformunun ortalama karenin karekökü (RMS) genliği ortalamayla değişmedi. Bu da, bir frekans aralığında hesaplanan rastgele türde bir sinyalin RMS genliğinin sinyal gücünün kararlı bir ölçümünü sağlayacağını belirtir.

#### 4.5.5.2 Güç Spektrumuna Bant Aralığının Etkisi

Fourier transformunun genliğinin,  $V_{rms}$  Fourier transformunun genliği ve BW de bant genişliği olmak üzere  $V_{rms}/\sqrt{BW}$  birimlerinde (bundan sonra normalize spektrum genliği olarak bahsedilecektir) ifade edildiğinde, sabit kaldığı, yani bant genişliğinden bağımsız olduğu görülmüştür. Bu da, bu özelliğe sahip sinyaller için, tek bir bant genişliği için elde edilen sonuçların diğer bant genişliklerinin sonuçlarını elde etmek üzere genişletilebileceğini belirtmektedir.

#### 4.5.5.3 Transfer Fonksiyonunun Belirlenmesi

Burada ele alınan beyaz gürültü sinyalleri için, hem çıktı güç spektrumlarının girdi güç spektrumlarına oranının karekökü olarak ehm de geçiş spektrumun girdi güç spektrumuna oranı olarak transfer fonksiyonun belirlenmesi, aynı derecede iyi sonuç verdi. Faz, bazen olabileceği gibi, önemli bir sorun değilse, ilk yöntemin çok daha az hesaplama zamanı gerektirmesinden dolayı, bu yararlı bir sonuçtur.

#### 4.5.5 Dijitalleştirilmiş Ocak Verilerinin Analize Hazırlanması

Dijital sinyal analizi programı, tipik olarak 20-30 dakikalık gerçek zamanlı ocak çalışmasını kapsayabilecek belirli bir veri kaydı gerektirmektedir ve her birinin uzunluğu 10.24 saniyelik bir zaman penceresi dizisi yaratır (örneğin yirmi dakikalık bir sürenin kaydı 117 pencereye dönüştürülecektir). Bu pencereler artık farklı yönlerden çalıştırılabilir. Örneğin, yoğunluk/olasılık dağılım fonksiyonları ya tek bir pencere bazında ya da birbirini izleyen pencere grupları üzerinden, belirlenebilir, sinyallerin zaman aralığı ortalamaları belirlenebilir veya ek bir analiz rutini serisinin bulunduğu Güç Spektrumu, Transfer Fonksiyonu, vs. gibi farklı frekans aralığı işlemleri gerçekleştirilebilir.

#### 4.5.6 Temel Analiz Yaklaşımı

Denemelerdeki bulgular incelendiğinde, farklı rastgele sinyal türlerini karakterize etmek için saha verilerini bir Spektral Pencere yaklaşımı kullanarak analiz etmeye karar verildi. Burada,

Spektral Pencere Genliği, sinyalin, aksi belirtilmedikçe 4-14 Hz olarak kabul edilen (ölçüm bant genişliğinin kareköküne bölüldüğünde bu değerden Normalize Spektral Pencere Genliği olarak bahsedilecektir) belirlenmiş bir ölçme bant genişliği üzerinden alınmış Fourier Transformunun RMS değeri olarak tanımlanmaktadır. 4-14 Hz aralığı, kritik titreşme aralığını her iki taraftan da yaklaşık 6-10 Hz kadar uzaktan sınırladığı için seçilmiştir. Özel olarak, ne titreşme spektrumunun düşük tarafında fazlasıyla bulunan harici etkilerden, ne de rezonans veya titreşim spektrumunun yüksek frekans ucunda bulunabilecek olası kontrol sistemi dinamiklerinden etkilenmeyen bir aralıktır. Oldukça durağan olan rastgele türde sinyaller için, başka veya daha geniş bant aralıkları kolaylıkla hesaplanabilir.

#### 4.5.6.1 Analizin Yorumlanması

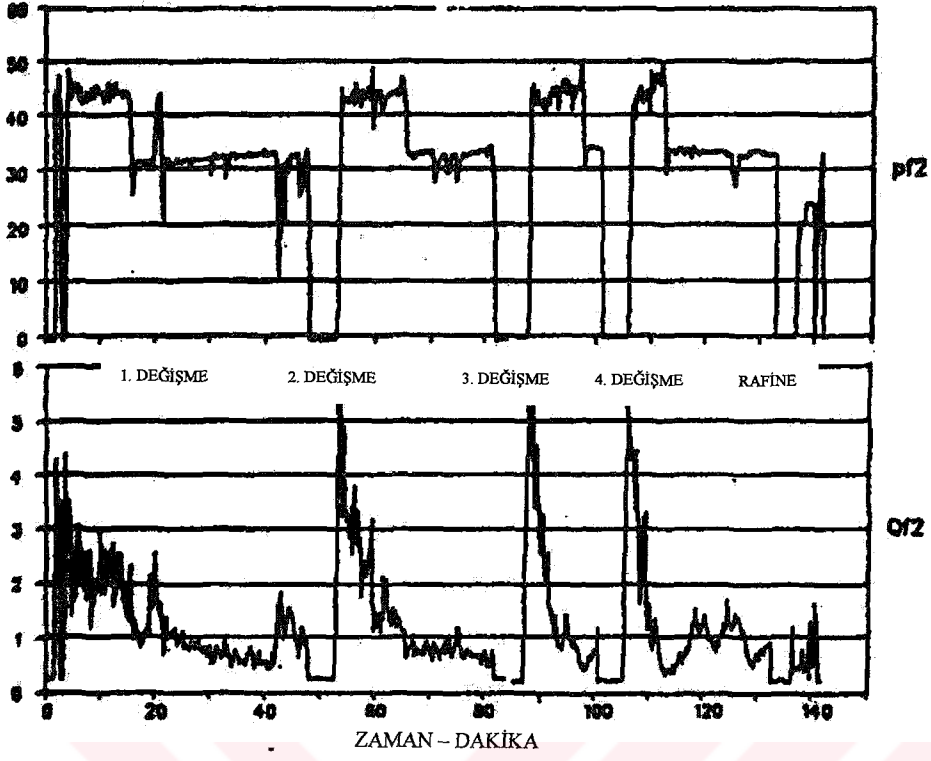
Yer kısıtlamalarından dolayı, gerçekleştirilen değişik veri analizi sonuçlarından sadece ufak bir bölümünü sunmamız mümkün olmaktadır. Sunulanlar, önerilen ark ocağı modelinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynayan anahtar sonuç alanlarını belirtmektedir.

Not: Bazı şekillerde bulunan açıklamalar farklı eğitimleri tanımlamakta kullanılmıştır. İlk harfin küçük veya büyük yazılması sırasıyla zaman ve frekans bölgeleri arasında ayırım yapmak içindir. Birbirini izleyen alfanümerik karakterler genelde sinyal kaynağını belirlemek için kullanılmaktadır; örneğin,  $Q_{f1}$ ,  $Q_{f2}$  ve  $Q_{f12}$  1, 2 ocaklarını ve,  $q$ 'lar ocak reaktif güç zaman bölgesi sinyalleri olmak üzere,  $q_{f12} = q_{f1} + q_{f2}$ 'den elde edilen birleşik ocağın frekans bölgesi reaktif güçlerine karşılık gelmektedir. Kullanıldığı yerlerde, NF söz konusu frekans abnt genişliğindeki veri örneklerinin sayısına karşılık gelir.

#### 4.5.6.2 Global Gerçekler

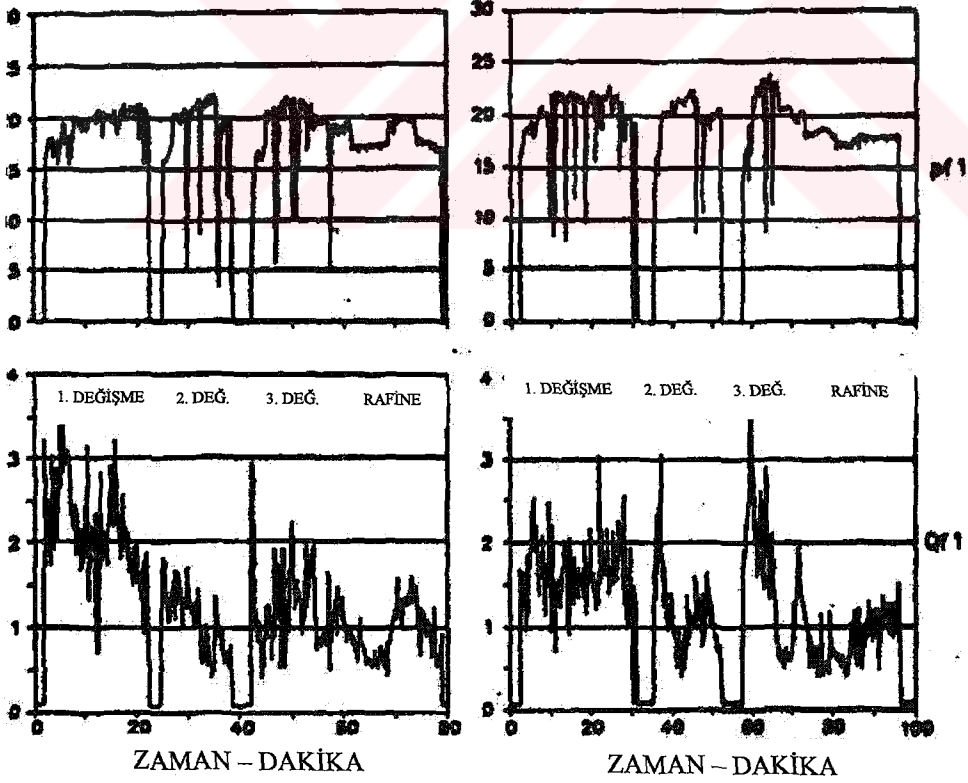
Grafik 4.5.6. (a – b – c ), üç tesisteki dört farklı ocağın tam ısınmalarının sonuçlarını sunmaktadır. Şekil, ocak gücü ve ocak üç fazlı reaktif gücünün spektral pencere genliğini göstermektedir. Analiz edilen birçok testin sonucunda, bu sonuncu modelleme amacıyla titreşme üretici kaynağı temsil etmeye en uygun tek sinyal olarak tanımlanmıştır. Grafik ayrıca ark kaynağı işleyişiyle ilgili daha önemli karakteristiklerin bazılarını, yani spektral pencerenin maksimum genliğini ve süresini, bir ısınmadaki farklı yükler ve farklı ısınlanmalar için spektral pencere genliğindeki değişimleri ve farklı ocaklar için spektral pencere tepkisinin yapısının değişimini de göstermektedir.

REAKTİF GÜÇ SPEKTRAL PENCERE OCAK GÜCÜ- YÜZDE  
GENLİĞİ - YÜZDE



(a) 60MVA

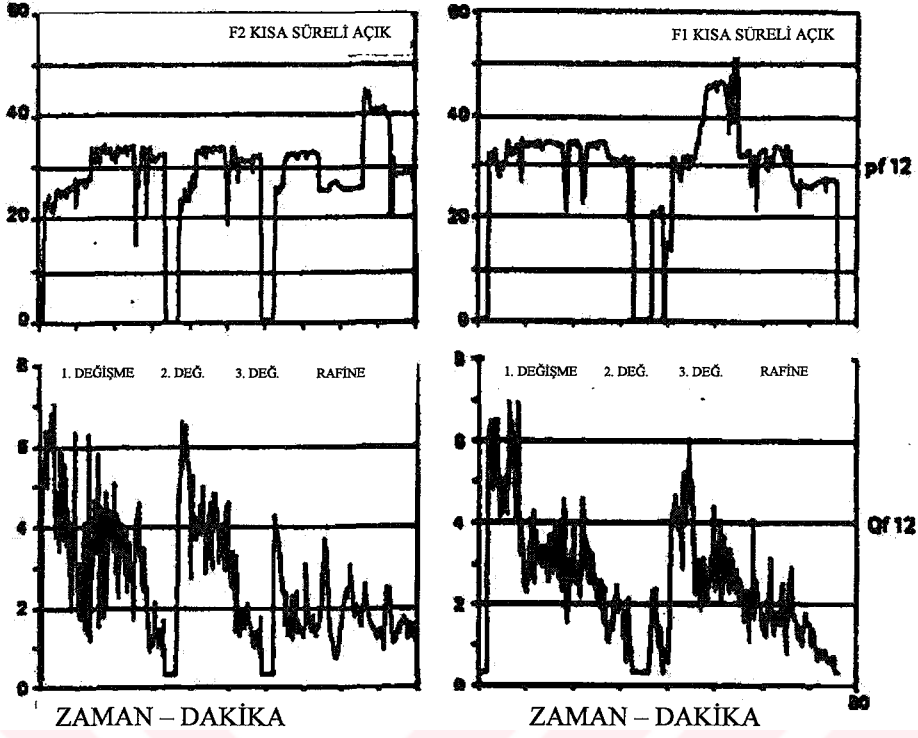
REAKTİF GÜÇ SPEKTRAL PENCERE OCAK GÜCÜ- YÜZDE  
GENLİĞİ - YÜZDE



(b) 20 MVA

OCAK GÜCÜ - YÜZDE

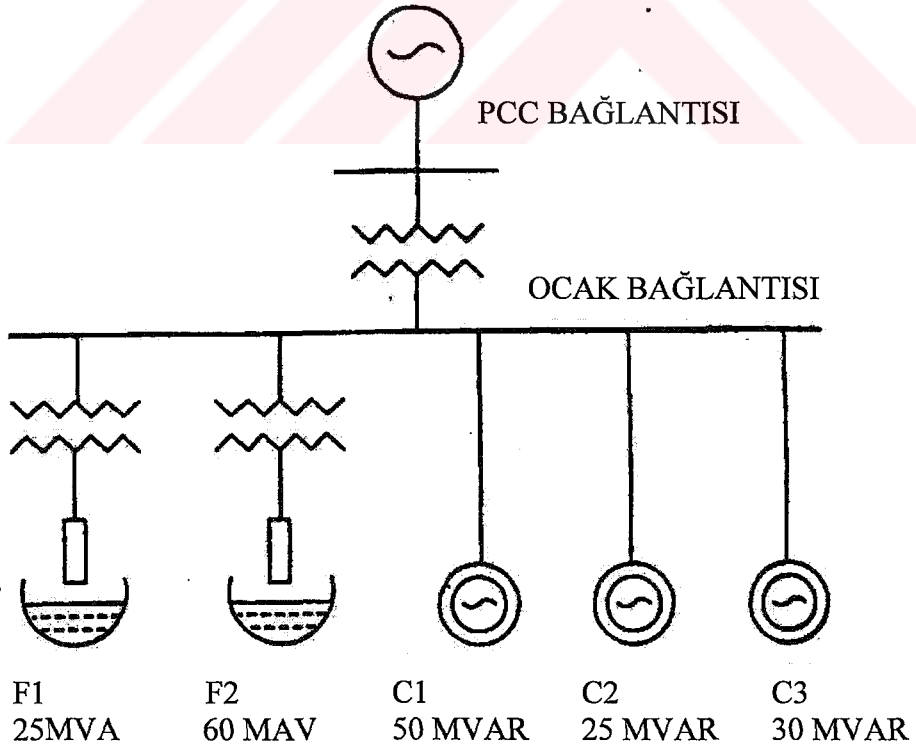
REAKTİF GÜÇ SPEKTRAL PENCERE GENLİĞİ - YÜZDE



(c1) 40MVA

(c2) 40 MVA

Şekil 4.5.6. a – b – c. Üç farklı tesisteki ocak üç fazlı güç ve reaktif gücünün zaman ve spektral pencere tepkileri. Ocak MVA kapasitesi de belirtilmiştir.



Şekil 4.5.7. Ocak Tesislerinden Birinin Basitleştirilmiş Çizgi Diyagramı.

#### 4.5.7 İki Ocak İşletimi Örneği

Gerçekleştirilen ayrıntılı analiz türlerini farklı sinyaller arasında var olduğu anlaşılan iç ilişkileri göstermek için, ocak tesislerinden birindeki kısa bir periyodun sonuçları verilecektir. Bu tesisin basitleştirilmiş bir çizgi diyagramı Şekil 4.5.7’de gösterilmektedir.

##### 4.5.7.1 Zaman Bölgesi ve Sprektal Pencere Tepkileri

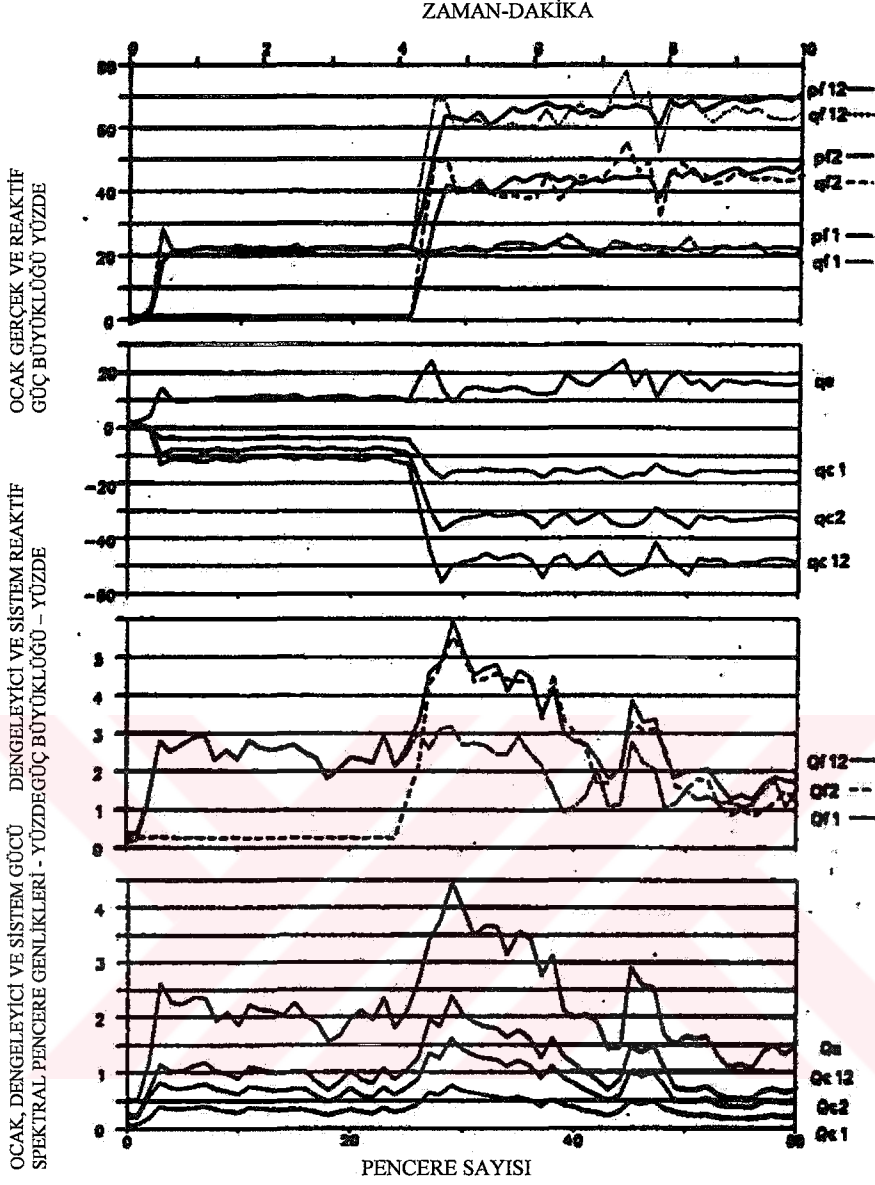
Grafik 4.5.3, iki ocağın yeni bir yüke başladıkları (sıra halinde) 10 dakikalık bir ark ocağı işletimini resmetmektedir. Yukarıdaki iki grafik ocak gerçek ve reaktif güçlerinin, dengeleyicinin ve sistem reaktif güçlerinin ortalama zaman tepkilerini gösterirken, alt iki eğri de bunlara karşılık gelen üç fazlı reaktif güç spektral pencere tepkilerini göstermektedir.

##### 4.5.7.2 Reaktif Güç Sprektal Pencere Arasındaki İlişkiler

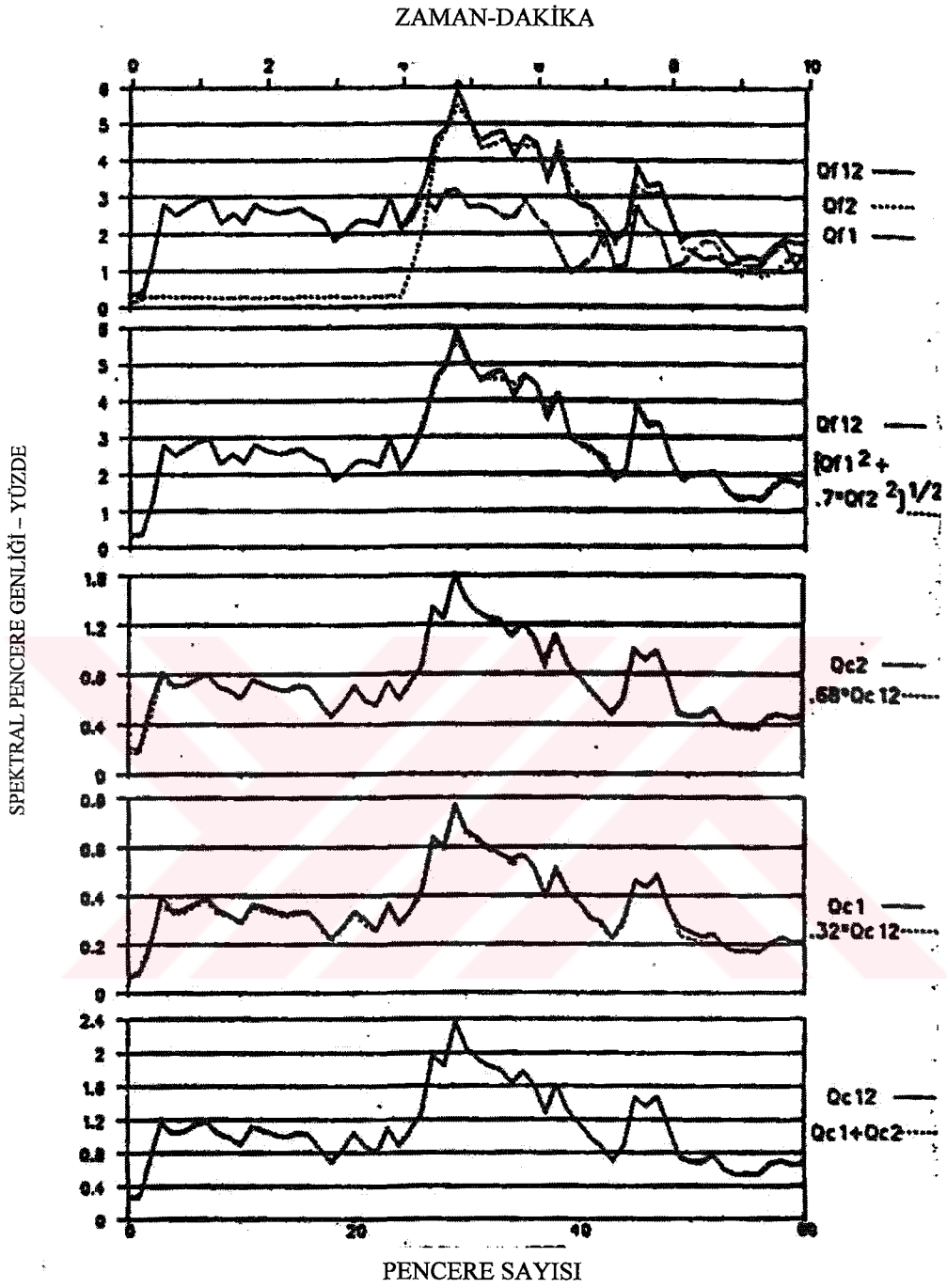
Şekil 4.5.9, 10 dakikalık ocak çalışmasının tümü boyunca farklı sinyallerin spraktral pencere tepkileri arasında bulunan yüksek korelasyon derecesini göstermektedir. Özel olarak ilgi çeken, farklı sinyallerin kombine olma şeklidir. Alttaki üç eğriden, kullanılan iki dengeleyicinin (tipleri aynı, ama büyüklükleri farklı) lineer büyüklükte bileşik tepkiyi oluşturmak üzere birleşirlerken, iki ocağın (ikinci eğriler) daha karesi alınmış bir büyüklük şeklinde birleştikleri görülmektedir. Ancak sonucusu bu olayda bir çeşit yaklaşıklık, çünkü iki ocak da büyüklük olarak birbirinden farklıdır ve bu nedenle, büyük ocak bileşik spektrumda hakim olur ve ocak birleşme ilişkisinin kesin bir belirlenmesi daha zor hale gelir.

##### 4.5.7.3 Farklı Ölçüm Bant Genişlikli Bağlantı Gerilimlerinin Normalize Spektral Pencere Tepkileri

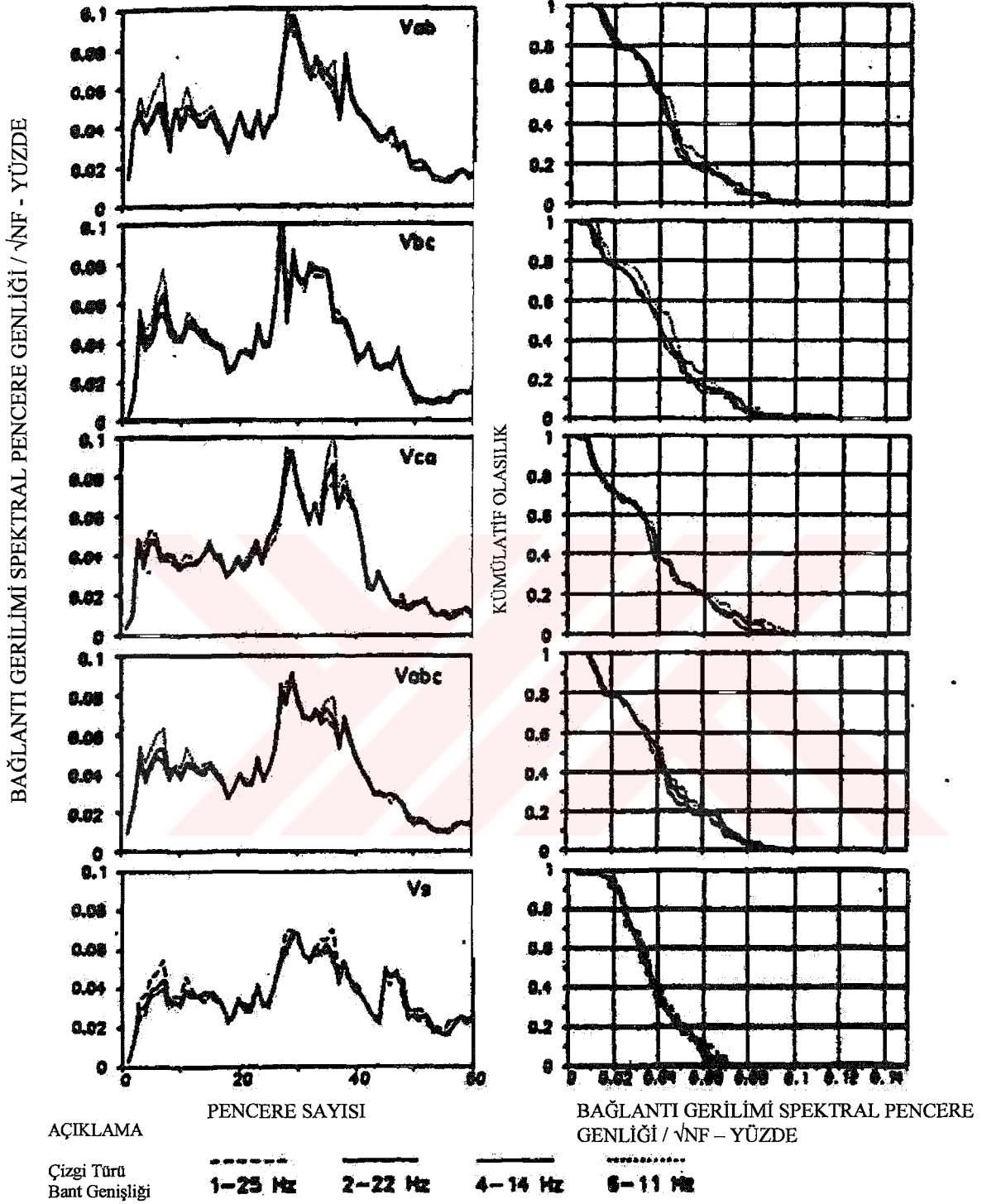
Şekil 4.5.10., 6-11 Hz ile 1-25 Hz arasında değişen ölçüm bant genişlikleri için faz-faz bağlantı gerilimlerinin normalize spektral pencere genliği ve kümülatif olasılık eğrilerini, faz-faz bağlantı gerilimlerinin RMS ortalamasını ve faz-faz bağlantısı gerilimlerinin zaman ortalamasını göstermektedir. Üç fazların tepkilerinin oldukça iyi bir denge gösterdikleri ve ölçüm bant genişliğine oldukça duyarsız oldukları belirlenmiştir, bu da üç faz tepkisinin beyaz özelliklerine sahip bir tek faz tepkisiyle temsil edilebileceğini göstermektedir. Ayrıca, üç faz bağlantı gerilimlerinin zaman ortalamasının spektral pencere genliğinin (alttaki eğri) karşılık gelen üç faz bağlantı gerilimlerinin RMS ortalamasının spektral pencere genliğinden çok daha küçük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, ocak akımının güç bileşeninin ikinci durumda faz-faz bağlantı gerilimi ifadelerine girmesi, ancak birinci durumda birbirini yoketmesidir. Şekil 4.5.11, hem tek pencereler hem de altı pencere ortalaması için, farklı ölçüm bant genişliklerinde bu ilişkiyi göstermektedir. Bu durumda farkın yüzde 20 civarında görünmesine rağmen, diğerlerinde yüzde 35 ila 40 kadar yüksek olarak ölçülmüştür.



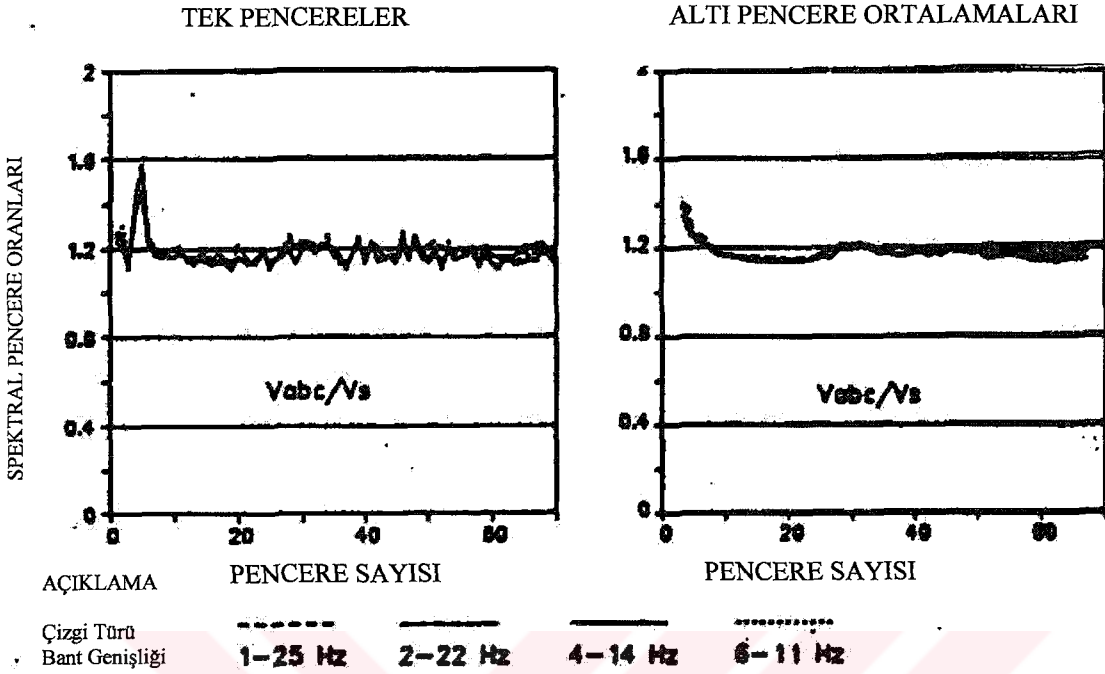
Şekil 4.5.8. Ocağın gücü ve reaktif gücünün, dengeleyici ve sistem reaktif gücünün iki ocağın işletimi periyodu boyunca zaman ve spektral pencere yanıtları



Şekil 4.5.9. Reaktif güç spektral pencere tepkileri arasındaki korelasyonlar



Şekil 4.5.10. Ocak bağlantı gerilimlerinin normalize spektral pencere genlikleri (sol) ve bunların kümülatif olasılık dağılımı (sağ)



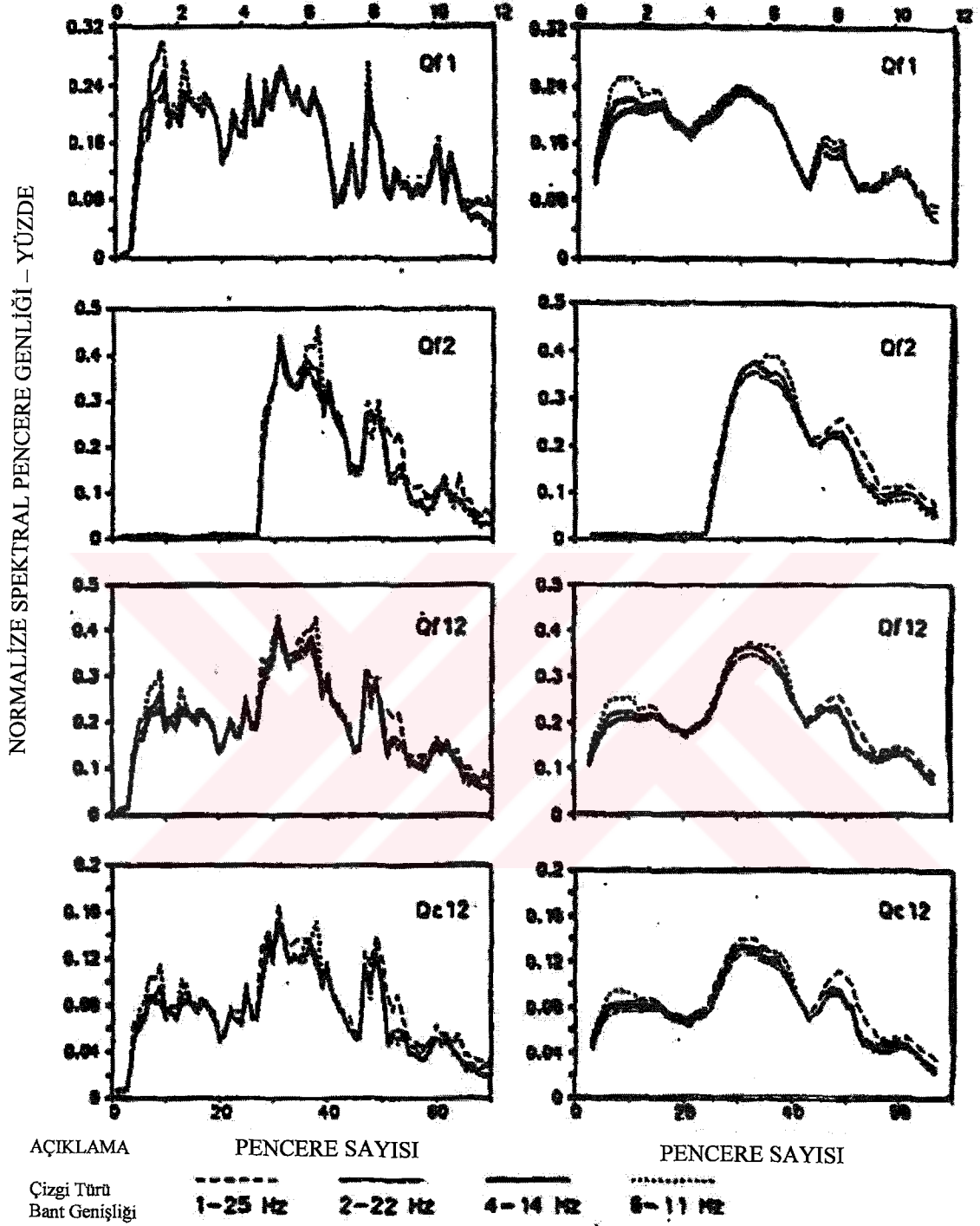
Şekil 4.5.11. Ocak bağlantı geriliminin RMS ortalaması ile ocak bağlantı geriliminin zaman ortalaması arasındaki spektral pencere genişliği oranı

#### 4.5.7.4 Farklı Ölçüm Bant Genişlikli Ocak ve Dengeleyici Reaktif Güçlerinin Normalize Spektral Pencere Tepkileri ve Pencere Ortalamasının Alınması

Şekil 4.5.12, hem tek pencereler hem de altı pencere (yaklaşık 1 dakika) ortalaması için, 6-11 Hz ile 1-25 Hz arasında değişen farklı ölçüm bant genişliklerinde, ocak ve dengeleyici üç fazlı reaktif güçlerinin normalize spektral pencere tepkilerini göstermektedir. Özel olarak, ocak reaktif güç spektral penceresi tepkilerinin bant genişliğine gösterdikleri duyarsızlık, bu sinyallerin beyaz gürültü özelliği gösteren bir rastgele kaynakla uygun şekilde temsil edilebileceğini göstermektedir.

TEK PENCERELER  
ZAMAN - DAKİKA

ALTI PENCERE ORTALAMALARI  
ZAMAN - DAKİKA

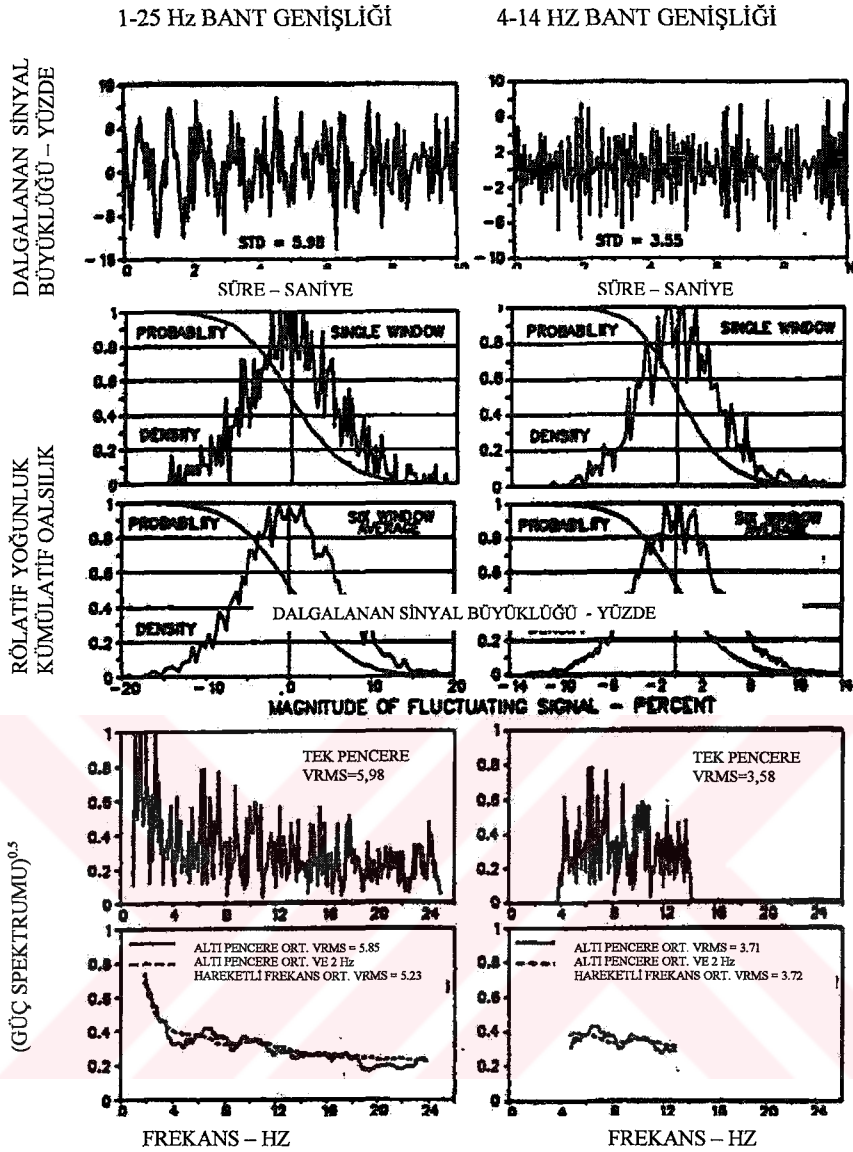


Şekil 4.5.12. Farklı ölçüm bant genişliklerinde ocak ve dengeleyici reaktör güçlerinin normalize spektral pencere genlikleri

#### 4.5.7.5 4-14 Hz ile 1-25 Hz'lik Ölçüm Bant Genişliklerinde Ocak Reaktif Güç Sinyalinin Farklı Karakteristiklerinin Resmedilmesi

Şekil 4.5.13, iki farklı ölçüm bant genişliğinde ocak reaktif güç sinyalinin bazı tipik özelliklerini göstermektedir. Üstteki eğriler, bu durumda zaman sinyalinin RMS değerlerinde de eşit olan standart sapma değerleriyle birlikte zaman penceresi karakteristiklerini göstermektedir. İkinci ve üçüncü eğriler tek pencereler ve altı pencere ortalamaları için yoğunluk/olasılık dağılımı çizimlerini göstermektedir. Bu eğrilerin iki ölçüm bant genişliği için de normal bir dağılıma yakın benzerliği açıktır. Dördüncü eğriler, karşılık gelen zaman sinyallerinin standart sapmalarıyla aynı olduğu görülen (frekans ve zaman bölgelerinin dualite prensibinden dolayı bekleneceği şekilde) hesaplanmış RMS değerleriyle birlikte zaman sinyallerinin Fourier transformlarını göstermektedir. Alttaki eğriler güç spektrumu bölgesindeki hem pencere hem de frekans ortalamalarının alınmasının etkisini göstermektedir. Hemen yukarıdaki eğrilerle karşılaştırıldığında, verilerin oldukça düzleştiği fark edilmiştir.

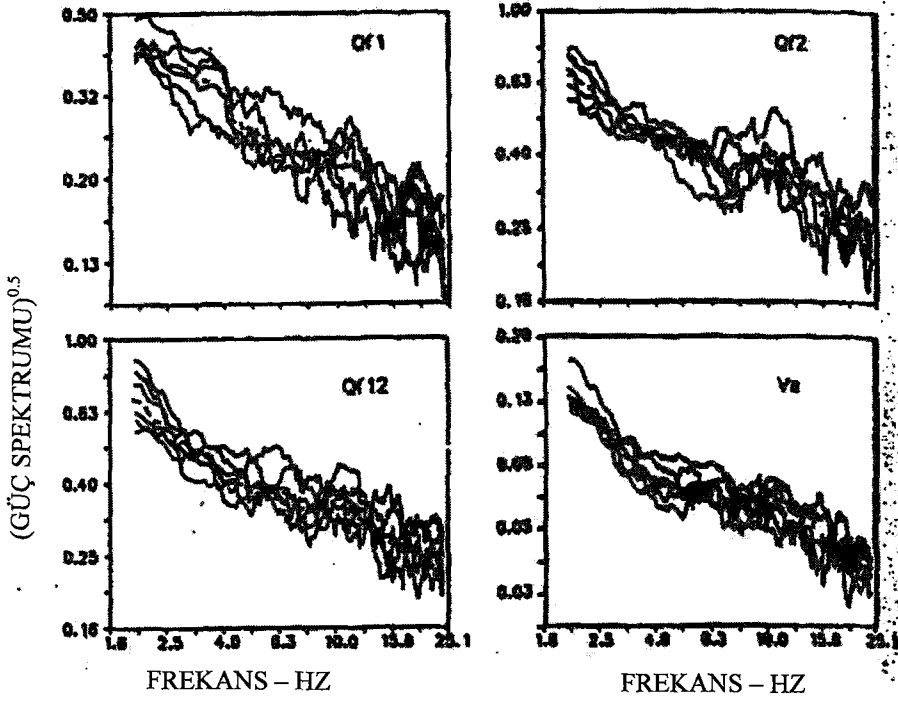




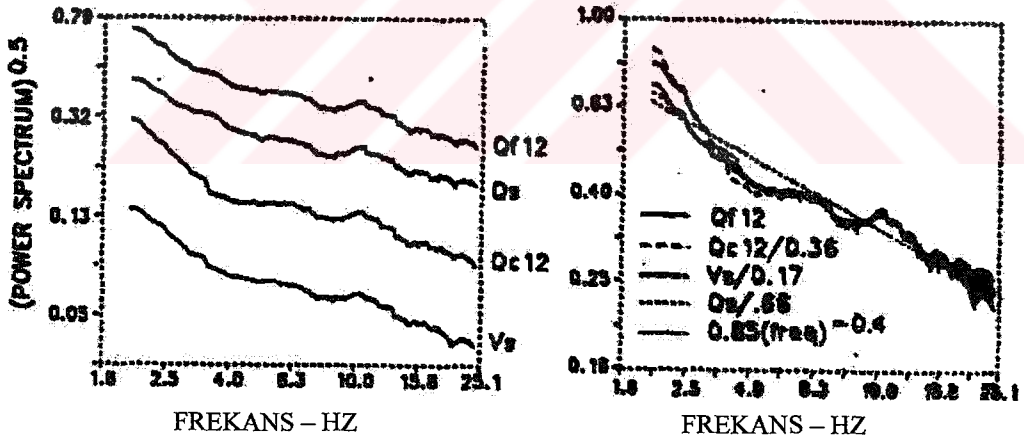
Şekil 4.5.13. İki farklı ölçme bant genişliğinde ocak reaktif güç sinyalinin farklı karakteristikleri

#### 4.5.7.6 Hareketli Frekans ve Pencere Ortalamasıyla Veri Yumuşatma.

Şekil 4.5.14. , Ocak reaktif gücünün ve bağlama geriliminin, log-log koordinatlarda 2 Hz'lik ilerleyen frekanlarla alınmış birbirini izleyen altı Fourier transformu penceresinin sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.5.15 sol tarafındaki eğriler benzer sonuçları göstermektedir, ancak altı pencere güç spektrumu bölgesinde ortalananmıştır. Sinyallerin kalitesindeki olağanüstü düzelme belirgindir. Şekil 4.5.15'in sağ tarafındaki eğriler, uygun bir ters kuvvet yasası ilişkisiyle belirlenen bir yaklaşımla birlikte sinyaller arasında bulunan ilişkileri göstermektedir.



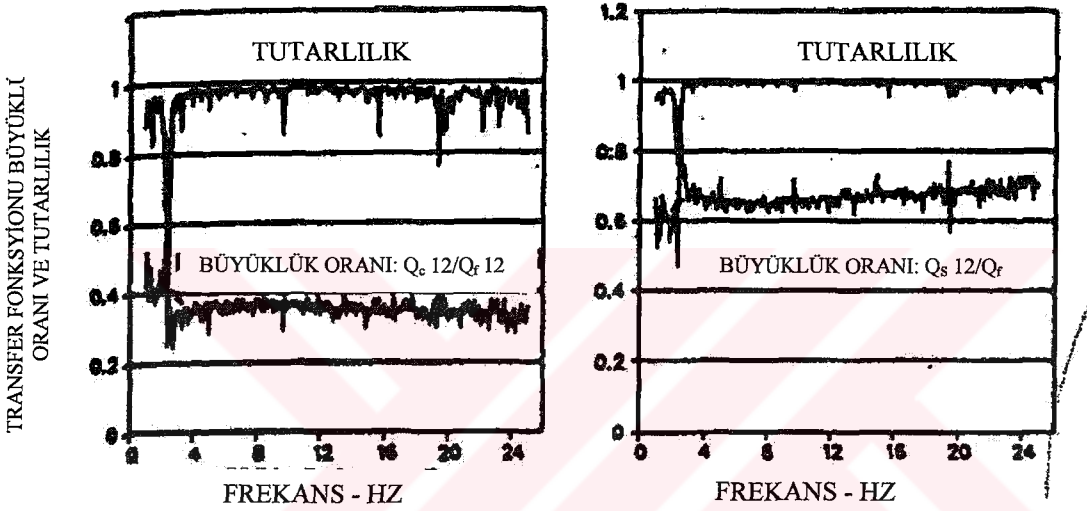
Şekil 4.5.14. 2 Hz'lik ilerleyen frekanslar kullanılarak ocak reaktif gücünün ve bağlama geriliminin birbirini izleyen altı frekans penceresinin Log-Log çizimleri



Şekil 4.5.15 . Frekansın bileşik etkisini ve pencere ortalamasının etkisini (Sol) ve büyüklükler arasındaki ilişkileri (sağ) gösteren ocak reaktif gücü ve bağlama gerilimi frekans pencereleri

#### 4.5.7.6 Transfer Fonksiyonu İlişkileri

Grafik 4.5.11 , farklı hesaplama yöntemleri kullanılarak test verilerinden belirlenen tipik transfer fonksiyonu ve tutarlılık fonksiyonu ilişkisini göstermektedir. Sonuçlar birbirlerine grafiklerde anlaşılamayacak kadar uymaktadır; bu sonuç bütün frekans aralığı üzerindeki giriş ve çıkış sinyallerindeki yüksek tutarlılıktan kaynaklanmaktadır. Sonuçların ayrıca Şekil 4.5.15 'dakilerle (sağ) uyduğu da görülmektedir.



Açıklama:

- Transfer fonksiyonu =  $G12/G11$  6 Pencerenin ilerleyen bir toplamı kullanılarak  
 Transfer fonksiyonu =  $[G12/G11]^{0.5}$  6 Pencerenin ortalaması kullanılarak  
 Transfer fonksiyonu =  $[G12/G11]^{0.5}$  6 Pencerenin ortalaması ve 6 Pencerenin ilerleyen bir toplamı kullanılarak
- G11 = Girdinin Güç Spektrumu  
 G22 = Çıktının Güç Spektrumu  
 G12 = Girdi ve Çıktı Arasındaki Çarpaz Spektrum

Şekil 4.5.16. Ocak ile dengeleyici reaktif güçleri arasındaki ve ocak ile sistem reaktif güçleri arasındaki ilişkiler

#### 4.5.8 Ocak Reaktif Güç Spektral Penceresinin Ocak Elektrot Uçlarındaki Kısa Devre MVA'sına Tepkisinin Maksimum Genlik İlişkisi

Ocak reaktif gücü penceresi tepkisinin maksimum genliği farklı test sonuçlarından ve  $S_{scf}$ 'nin yüzdesi olarak ifade edilen aşağıdaki tabloda özetlenen değerlerden çıkarılmıştır. Tabloda listelenen değerler analiz edilen yüklerin ve sıcaklıkların her birinde maksimum olarak elde edilmişlerdir ve maksimum değerlerdeki testten teste değişmesi beklenebilecek varyansları gösterecek şekilde ele alınmışlardır.  $Q_F$ 'nin (tabloda \* işareti ile gösterilmiştir)  $S_{scf}$ 'nin yüzdesi olarak ifade edilen maksimum değerlerinin, daha dar olan yüzde 9-11 aralığına düşen

bir tanesi hariç, yüzde 7-11 aralığına düşmekte olduğu görülmektedir.

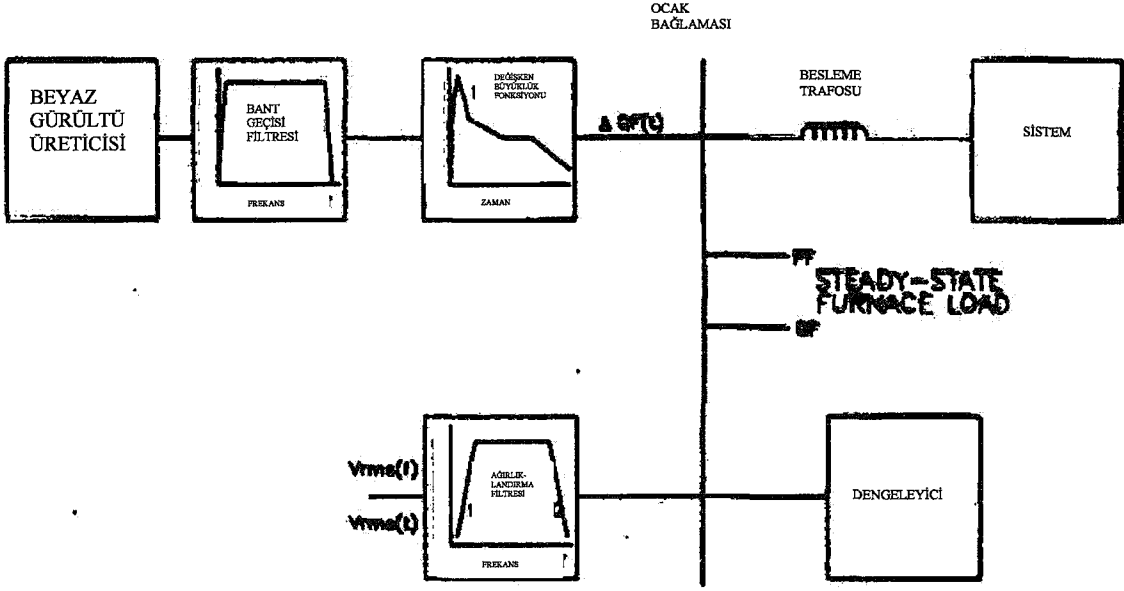
#### 4.5.9 Önerilen Ark Ocağı Modeli

Bütün analizlerin sonuçları, üç fazlı ark ocağı titreşme davranışına, ocak üç fazlı reaktif güç dalgalanmalarını, zamanın sürekli değişen bir fonksiyonu olan bir büyüklüğe sahip beyaz gürültü özelliklerine sahip bir tek fazlı titreşim üretici kaynak şeklinde temsil ederek yüksek bir kesinlik derecesinde benzetmede bulunulabilir. Titreşim kaynağının maksimum büyüklüğü, ocak elektrodu uçlarındaki üç fazlı kısa devre MVA'sına yakın bir benzerlik göstermektedir. Diğer taraftan, zamana bağlı büyüklük karakteristiği çok değişkendir ve herhangi düzgün bir temsille ifade edilemez.

Çizelge 4.5.2 .Ocak Reaktif Gücünün Maksimum Spektrum Büyüklüğü

Tesis	Yük No	$Q_{Fmax}$ Ocak F1		$Q_{Fmax}$ Ocak F2	
		$S_{scf}$ 'in yüzdesi		$S_{scf}$ 'in yüzdesi	
No 1	1	9.2	10.3*	8.8	10.4*
	2	8.6	8.4	7.4	8.89
	3	5.5			
No 2	1	9.1*	7.0		
	2	7.2	5.9		
	3	6.5			
No 3	1	8.9	6.9	4.3.	11.2*
	2	4.7	8.3	6.1	
	3	8.1	10.0*		
No 4	1	9.5*		4.8	4.9
	2	6.6		6.1	7.1*
	3	8.0		6.2	

Burada temsil edilen titreşim üretici kaynağın büyüklüğü, zaman sinyalinin 4-14 Hz'lik bir ölçüm bant genişliğindeki güç spektrumu genliğinin karekökü olarak ifade edilmektedir. Önerilen titreşim kaynağı bantla sınırlandırılmış beyaz gürültü olduğu için, kabul edilebilir aralık içindeki başka herhangi bir ölçüm bant genişliğindeki genliği de kolayca belirlenebilir. Önerilen ark ocağı modelinin basitleştirilmiş blok diyagramı Şekil 4.5.17'de gösterilmektedir.



Şekil 4.5.17. Ark Ocağı Modeli

Çalıştırma amacı için, bantla sınırlandırılmış beyaz gürültünün bir geçici kararlılıkta programla, bir EMTTP programıyla veya diğer uygun bir mevcut ticari hazır yazılım programıyla bir ocak bağlantısı ile arayüz oluşturulması tavsiye edilir. Ocak bağlantısı ile ortak kuplaj noktası arasında bir besleme trafosu sayesinde genellikle var olan büyük dekuplaj yüzünden güç sisteminin büyük bir ayrıntıyla temsil edilmesi gerekmez. Ocak bağlantısına bağlı farklı dengeleyici ekipmanlar istenildiği kadar ayrıntılı temsil edilebilir. İstenirse, statik ocak yükü, P-Q diyagramındaki nominal ocak işletim noktasına karşılık gelen sabit bir empedansla temsil edilebilir. Gerilim titreşmesi birçok yolla belirlenebilir; örneğin, ister tam bant genişliği, ister bant geçişi filtresinde ayrıştırıldıktan sonra gerilim dalgalanmalarının RMS değerinin zaman ortalamasıyla, seçilmiş bir bant genişliğinde gerilim dalgalanmalarının güç spektrumunun büyüklüğüyle veya farklı titreşme tepkilerinin herhangi birini temsil edecek algoritmalar yazarak.

#### 4.5.10 Çalışmanın Yorumlanması

Bir elektrik arkı ocağının 60 Hz'lik besleme geriliminde oluşan ufak, fakat önemli gerilim titreşmelerini kesin olarak demodüle etmek için tatmin edici bir yol sağlayan bir titreşim ölçme devresi geliştirilmiştir.

Çok kanallı manyetik bir kaset kaydedicisi, off-line analizi için analog formda ocak girdi verilerini kaydetmek ve depolamak için uygun bir yöntem sağlamaktadır.

Güçlü yerleşik dijital yazılım analizi programının yardımıyla, daha önce incelenmesi kolay olmayan ark ocağı davranışının ayrıntılı olarak çalışılmasını sağlayan bir metodoloji geliştirilmiştir.

Bu çalışmada gözlenen ocakların genlik frekansı spektrumlarının analizi, gerilim titreşme sinyali genliğinin yaklaşık 30 Hz'e kadar frekansla ters orantılı bir fonksiyon olduğunu göstermektedir.

Yapısı oldukça kararsız olduğu halde, ark ocağı yükü sallanmasından kaynaklanan dalgalanmalar, sürekli bir rastgele değişkenin daha istenen özelliklerinin bazılarını taşımaktadır.

Test sonuçları, modelleme amaçları için en uygun olan tek bir sinyal ark ocağını temsil edecek şekilde, ocak reaktif gücü dalgalanmalarının otogüç spektrumunun RMS büyüklüğünün seçilmesine destek olarak sunulmuştur. Bunlar seçilen sinyal ile bağlantı gerilimi arasında elde edilen mükemmel korelasyonları da içermektedir.

Ocakların paralel çalışmasından elde edilen sınırlı verilerin incelenmesi, paralel ocakların korele olmayan rastgele sinyal kaynakları olarak davranacak şekilde ele alınabileceklerini göstermiştir; yani, titreşme üzerindeki birleşik etkileri tek tek etkilerinin toplanmasının bir kare yasası formunu izliyor gibi görünmektedir.

Özel bir işletme durumu sırasında birkaç dakika üzerinden ortalaması alındığında, tek bir ark ocağının titreşim geriliminin RMS değeri doğrudan kısa devre gerilim durgunluğu oranına ilişkili gibi görünmektedir. Titreşim üretme kaynağının maksimum RMS değerinin de ocak elektrot uçlarındaki kısa devre MVA'sına yakın bir benzerlik taşıdığı görülmüştür.

EMTP gibi bir geçici program veya geçici kararlılık programı veya dinamik zaman ve frekans bölgesi simülasyonu becerisi sunan herhangi uygun bir paket programla hesaplanmaya uygun tek fazlı bir ark ocağı modeli önerilmektedir.

Test sonuçları, üç fazlı devrenin gerilim titreşmesi davranışını temsil etmek üzere tek fazlı bir ark ocağı modelinin kullanımını desteklemektedir.

(Manchur, G., Erven, C.C., 1992)

## **BÖLÜM 5 SAYISAL UYGULAMA**

Ark fırını harmoniklerinin analizine yönelik gerçekleştirilen sayısal uygulamada Gebze'de bulunan Kroman Çelik A.Ş. tesislerine ait veriler kullanılmıştır. Tesisin tekhat şeması Ek-1'de verilmiştir.

Kroman Çelik A.Ş. 90 ton malzeme işleme kapasitesine sahip Ark fırınına sahip, 154kV nominal gerilim ile Tuzla ve Çolakoğlu merkezleri üzerinden Y.G. şebekesinden beslenen bir tesistir.

Aşağıda Bölüm 5.1-5.3.'de bu tesiste daha önceden yapılmış harmonik ölçümleri, bunlarla ilgili rapor, analizler ve grafikler verilmiştir.MATLAB Simulink ile tesisin harmonik simülasyonunun gerçekleştirilmek amacıyla Ek-1'de verilen tesisin tek hat şeması simülasyon programına uygun olarak ark fırınları ve temel elemanları içerecek şekilde basitleştirilmiştir. Bölüm 5.4 ve 5.5'de elde edilen bu örnek sisteme ait tek hat şeması, bununla ilgili dönüşüm hesaplamaları, simulink devresi ve simülasyon sonuçları verilmiştir.

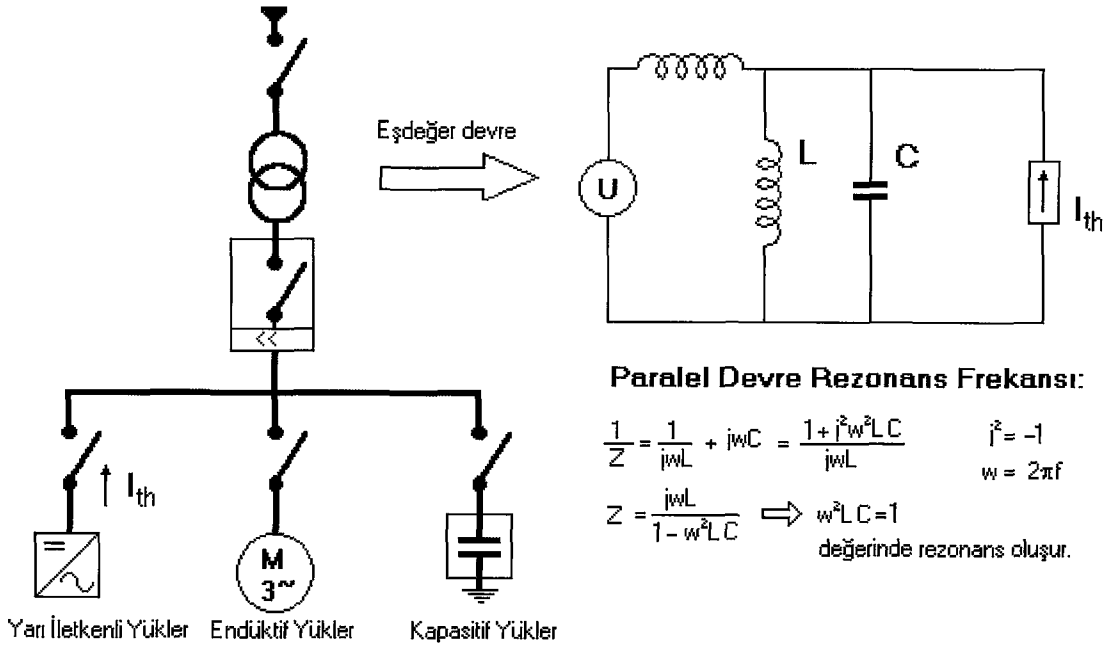
Gebze'de Kroman Çelik Çubuk Haddehanesinde 1992 tarihinde kompanzasyon için yapılan ölçümler aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

### **5.1 İncelenen Örnek Tesiste Yapılmış Harmonik Ölçümlerine Ait Rapor**

Ayrıca Ek-2'de Kroman Çelik Tesisinin tek hat diyagramı verilmiştir.

1992 tarihinde Kroman Çelik AŞ.'nin Gebze'de kurulu tesisinin enerji sisteminde gerçekleştirilen ölçüm sonuçları incelenmiş, gerekli analizler yapılarak ölçüm raporunda sonuçlar sunulmuştur.

Ölçüm yapılan 5 adet trafoda son derece yüksek akım ve gerilim harmonikleri tespit edilmiştir. Yüksek harmonikler mevcut harmonik kaynakları ile kondansatör ünitelerinin rezonansa girmesi nedeniyle oluşmaktadır.Bu trafoların mevcut kompanzasyonlarının revize edilerek veya tümünden yenilenerek Harmonik Filtreli Kompanzasyon tesislerine dönüştürülmesi gereklidir.



**Şekil 5.1.** Ark fırını tesisinde oluşabilecek rezonans olayı.

## 5.2 Ölçüm Sonuçları

### 1. 2700 KVA TR Ölçüm Sonuçları

- Ölçüm esnasında 500-1000 KW civarı güç çekilmektedir.
- Gerilim 220 V-226 V arasındadır.
- Şebekeden 900-1750 A arası akım çekilmektedir.
- Kompanzasyon devrede iken Akım Bazlı Total Harmonik Distorsiyon % 50, Gerilim Bazlı Total Harmonik Distorsiyon % 18 civarındadır.
- 250 Hz ve 350 Hz. Frekanslı Harmonikler yüksektir.

### 2. 1400 KVA TR Ölçüm Sonuçları

- 700-1650 KW arası güç çekilmektedir.
- Gerilim 213 V-224 V arasındadır.
- Şebekeden 1250-2750 A arası akım çekilmektedir.
- Normal çalışma koşullarında kompanzasyon devrede iken Akım Bazlı Total Harmonik Distorsiyon % 20-45, Gerilim Bazlı Total Harmonik Distorsiyon %12-15 seviyelerindedir.
- 250 Hz. Frekanslı Harmonik yüksektir.

### 3. 1000 KVA TR Ölçüm Sonuçları

- Ölçüm esnasında 300 KW güç çekilmektedir.
- Gerilim 220 V –227 V arasındadır.
- Şebekeden 300-500 A arası akım çekilmektedir.
- Normal çalışma koşullarında Akım Bazlı Total Harmonik Distorsiyon % 30-40 arası , Gerilim Bazlı Total Harmonik Distorsiyon %15 seviyelerindedir.
- 250 Hz. Frekanslı Harmonik yüksektir.

### 4. 800 KVA TR Ölçüm Sonuçları

- Ölçüm esnasında 200-450 KW güç çekmektedir.
- Gerilim 232 V-235 V arasındadır.
- Şebekeden 400-750 A arası akım çekilmektedir.
- Normal çalışma koşullarında Akım Bazlı Total Harmonik Distorsiyon % 50 civarı, Gerilim Bazlı Total Harmonik Distorsiyon % 10-15 seviyelerindedir.
- 250 Hz. Frekanslı Harmonik yüksektir.

## 5. 1000 KVA Servis TR Ölçüm Sonuçları

- Ölçüm esnasında 200-300 KW arası güç çekilmektedir.
- 223 V-229 V arasındadır.
- Şebekeden 350-475 A arası akım çekilmektedir.
- Normal çalışma koşullarında Akım Bazlı Total Harmonik Distorsiyon % 25-30 civarı, Gerilim Bazlı Total Harmonik Distorsiyon % 3-7 seviyelerindedir.
- 250 Hz. ve 350 Hz. Frekanslı harmonikler yüksektir.

### 5.3. Ölçüm Analizi

Ölçüm sonuçlarında ve grafiklerinde görebileceğiniz gibi ölçüm yapılan 5 transformatörde de son derece yüksek akım ve gerilim harmonikleri mevcuttur. Trafolarda % 50 akım bazlı ve %15 gerilim bazlı toplam harmonik distorsiyon seviyeleri ölçülmüştür.

Mevcut harmonik kaynakları ile kondansatör ünitelerinin rezonansa girmesi nedeniyle harmonik seviyeleri yüksektir. Nitekim tesiste yapılan ölçümlerde kompanzasyon devre dışı bırakıldığında harmonik seviyelerinin belirgin şekilde düştüğü görülmüştür.

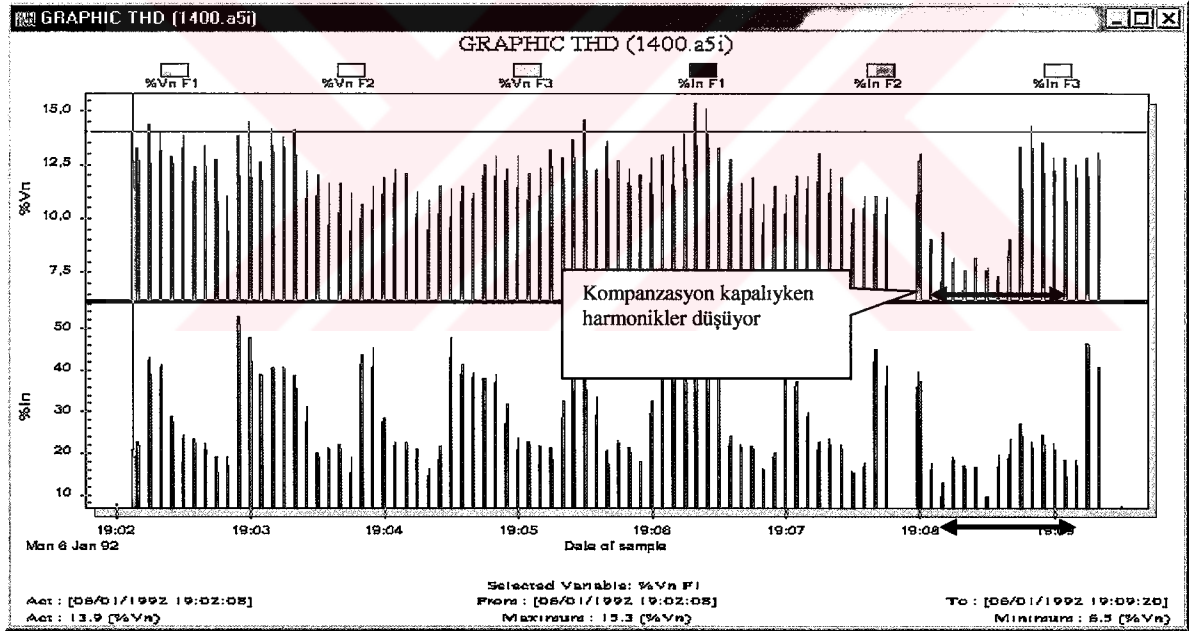
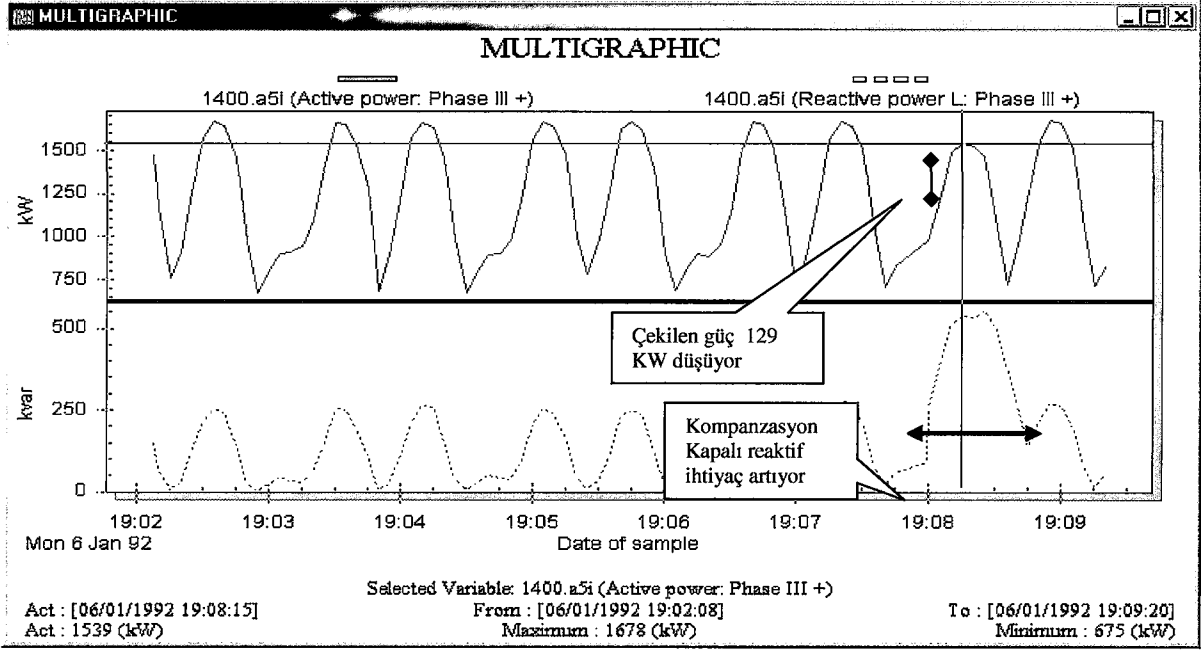
Ölçüm esnasında 140 A nominal akım geçmesi gereken 100 kvar kondansatör üzerinden yüksek harmonik akımları nedeniyle 210 A akım akmakta olduğu görülmüştür. Bu aşırı akım nedeniyle kondansatörler sık sık tahrip olmaktadır.

Çözüm olarak, mevcut kompanzasyon Harmonik Filtreli olarak tesis edilebilir. Böylece hem harmoniklerin kondansatör ünitelerinin etkisiyle yükselmesi hem de kondansatör ünitelerinin yüksek harmoniklere karşı korunarak ömürlerinin kısılması engellenebilir.

Sistemde değişik frekanslarda harmonik akımlar oluşması durumunda,

$$P_{cu(tot)} = I^2 \times R + I_{3th}^2 \times R + I_{5th}^2 \times R + I_{7th}^2 \times R + \dots + I_{nth}^2 \times R . \quad (5.1)$$

Şayet ölçülen yük stabil ve değişken olmayan bir yük ise ölçüm esnasında kompanzasyon kapatıldığında harmonik seviyelerinde meydana gelen düşüşle güçte sağlanan tasarrufun fotoğrafını çekmek mümkündür. Tesiste yapılan ölçümlerde özellikle 1400 kva trafonun yükü oldukça stabildir ve kompanzasyonun bir kısmı kapatıldığında harmoniklerde yaşanan düşüşe paralel olarak çekilen güçte de bir miktar düşüş görülmektedir. Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



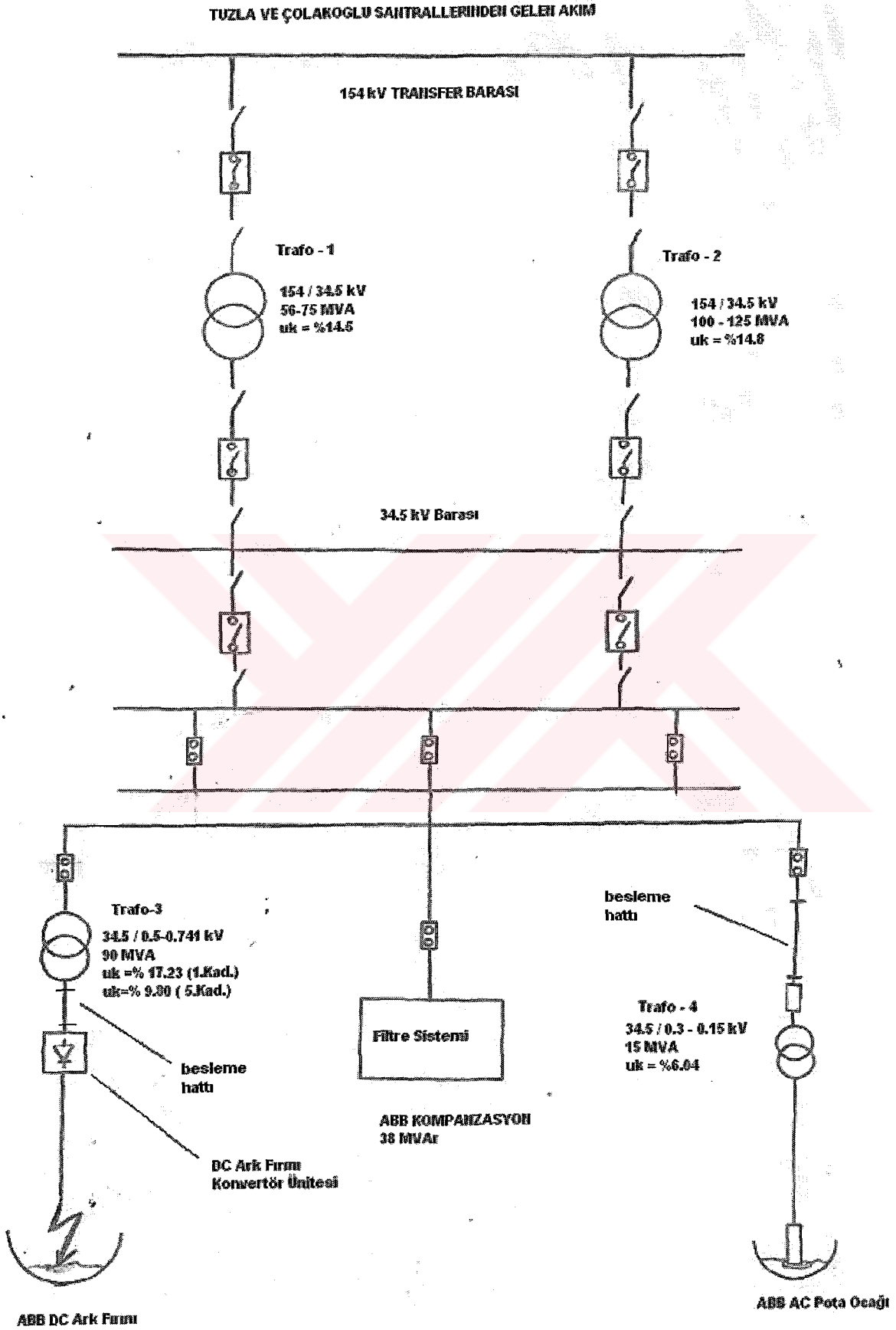
Şekil 5.2. Kroman Çelik Fabrikasında yapılan ölçümlerin, ölçüm cihazından alınma görüntüleri.

Şekil 5.2’de 1400 KVA transformatöre ait ölçüm grafiklerinde de görüleceği gibi stabil yük 1668-1678 kW tepe değerlerinde stabil olarak devam ederken, kompanzasyonun kapatılması sonucu harmonik bozulmadaki azalmaya paralel çekilen güç 1539 kW değerine düşmektedir. 129 kW lık bir düşüş söz konusudur. Sadece bu transformatörde % 7 –8 enerji tasarrufu mümkündür.

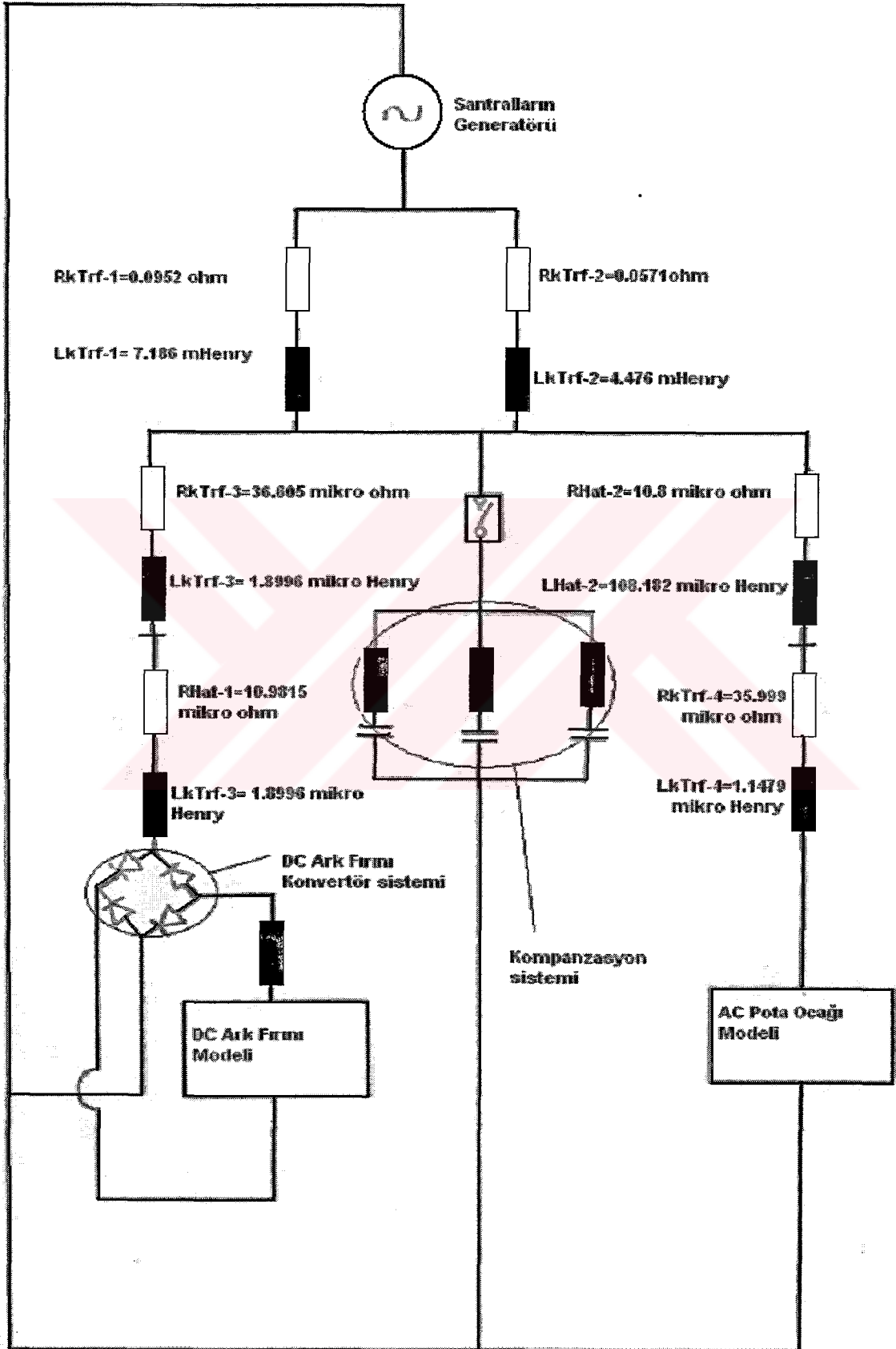
Kondansatörlerin tahribatı: Paralel rezonans olayı en yaygın problemlerden biridir. Kondansatör üniteleri ile sistem empedansı arasında oluşur. Rezonans frekansında empedans çok büyük değerler alır. Bu büyük empedans nedeniyle harmonik akımları, gerilim harmoniklerine neden olurlar. Bu gerilim harmonikleri hem kondansatör ünitesinde hem de sistem reaktansında yüksek harmonik akımlarına neden olur. Böylece paralel rezonans, lineer olmayan yükün oluşturduğu harmonik akımlarını büyütmüş olur. Kondansatör ünitelerinin varlığında, harmonik problemlerinin artmasının en önemli nedeni paralel rezonans olayıdır. Paralel rezonans sırasında kondansatör uçlarındaki gerilim aşırı yükseldiği için kondansatör zarar görebilir. Bu endüstriyel yüklerde ve sistemlerde yaygın olarak görülen bir olaydır. Güç sisteminde kondansatörlerin oluşturduğu diğer bir rezonans şeklide seri rezonansdır. Rezonans frekansında empedans çok küçük değerler alır. Yani rezonans frekansıyla uyuşan harmonik akımları küçük bir empedans görürler. Dolayısıyla harmonik akımlarında büyüme söz konusu değildir. Ancak harmonik akımları devrelerin istenmeyen bölümlerinde akabilirler. Bunun iki önemli etkisi vardır: Eğer hat boyunca rezonans devresi ile seri iletişim devreleri varsa önemli ölçüde parazit oluşabilir. Kondansatör ünitesindeki gerilim harmonikleri, rezonans kolundaki harmonik akımlarının yoğunluğu nedeniyle aşırı olabilir ve kondansatörler tahrip olur.

(Panel Endüstri,2002)

## 5.4 Örnek Sistemin İncelenmesi



Şekil 5.3 Örnek Sistemin Tek Hat Şeması.



Şekil 5.4 Örnek Sistemin bir faz eşdeğer devresi.

### 5.5 Kroman Çelik Tek Hat Diyagramının Formüle Edilmesi

Tek hat diyagramındaki elemanların direnç ve endüktans değerlerin hesaplanması için aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır.

$$R_{K(Cu)} = \frac{P_K}{3I_n^2} \quad (5.5.1)$$

(5.5.1) eşitliğinde  $P_K$  transformatörün bakır kayıplarını;  $I_n$ , nominal akımı;  $R_{K(Cu)}$  ise kısa devre eşdeğer direncini göstermektedir.

$$Z_K = \frac{u_K \cdot U_n^2}{S_n} \quad (5.5.2)$$

(5.5.2) eşitliğine  $u_k$ , transformatörlerin kısa devre gerilim yüzdesini;  $U_n$ , nominal transformatör gerilimini (indirici transformatör olarak kabul edilmiştir.);  $S_n$ , nominal transformatör görünür gücünü;  $Z_k$ , ise transformatörün kısa devre empedansını göstermektedir.

$$L_{tf} = \frac{X_K}{2\pi f} \quad (5.5.3)$$

(5.5.3) eşitliğinde  $X_K$ , transformatörün kısa devre endüktif reaktansını belirtmektedir.  $f$ , ise sistemin frekansını tanımlamaktadır.  $L_{tf}$ , ise transformatörün kısa devre self değerini belirtmektedir.

$$z = \frac{Z \cdot S_B}{U_B^2} \quad (5.5.4)$$

(5.5.4) eşitliğinde  $Z$ , empedansı göstermektedir.  $S_B$ , sistemde baz alınan görünen gücü göstermektedir.  $U_B$ , ise sistemde baz alınan fazlar arası gerilim değerini göstermektedir.  $z$  ise per-unit (p.u.) empedansı göstermektedir.

$$z_1 = z_2 \left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2 \cdot \frac{S_2}{S_1} \quad (5.5.5)$$

$S_1$  ve  $U_1$  baz değerlerinde p.u. empedansı  $z_1$  olan bir elemanın  $S_2$  ve  $U_2$  baz değerlerindeki  $z_2$  p.u. empedansı 5.5.5 eşitliği ile hesaplanabilir.

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n} \quad (5.5.6)$$

(5.5.6) eşitliğinde  $S_n$ , nominal görünür gücü;  $U_n$ , nominal faz-faz gerilim değerini belirtir;  $I_n$ , ise nominal hat akımıdır.

$$Z_K = R_K + jX_K \quad (5.5.7)$$

(5.5.7) eşitliğinde;  $R_K$ , kısa devre direncini belirtmektedir.  $X_K$ , kısa devre endüktans değerini göstermektedir.  $Z_K$  'da kısa devre empedans değerini göstermektedir.

### 5.5.1 Hesaplamalar

Bu bölümde Kroman Çelik Tesisinin Ark Fırını Prosesi ile ilgili olan basitleştirilmiş tek hat diyagramındaki transformatör ve enerji iletim hatlarının direnç ve self değerleri hesaplanmıştır.

İlk olarak transformatör hesaplarına yer verilmiştir. Transformatör hesapları için gerekli olan değerler Çizelge 5.1 'de özetlenerek verilmiştir.

Çizelge 5.1 Transformatörlerin etiket değerleri.

	Tr 1	Tr 2	Tr 3	Tr 4
$U_{1n} / U_{2n}$	154 / 34.5 kV	154 / 34.5 kV	34.5 / 0.5-0.741 k V	34.5 / 0.3-0.15kV
$S_n$	56-75MVA	100-125MVA	90MVA	15MVA
$U_k$	%14.5	%14.8	1.KAD. %17.23 5.KAD. % 9.80	% 6.04

Trafoların Cu kayıpları Çizelge 5.2'deki gibi verilmiştir. Trafoların R(direnç) ve L(self) değerlerinin hesaplanmasında bu değerler referans alınmıştır.

Çizelge 5.2 Trafoların Bakır kayıpları.

$P_{Cu Tr1} = 450kW$
$P_{Cu Tr2} = 750kW$
$P_{Cu Tr3} = 540kW$
$P_{Cu Tr4} = 90kW$

**Transformatör 1 hesapları:**

Çizelge 5.1'deki Transofamtör 1 ile ilgili değerler kullanılarak aşağıdaki hesaplamalar yapılmıştır.

Transformatörün  $L_{K Trf}$  değerinin hesaplanabilmesi için öncelikle  $Z_{K Trf}$  bir değerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu da aşağıda gösterildiği gibidir. Bu değer hesaplanmasında eşitlik (5.5.4) kullanılmıştır.

$$Z_{K Trf1} = 0.145 * (34.5)^2 * / 75 = 2.3012 \Omega$$

$Z_{K Trf1} = 2.3012 \Omega$  olarak hesaplanmıştır.

$$P_{KTrf1} = P_{CuTrf1} = 450kW = 3 * R_{K Trf1} * I_{nTrf1}^2$$

$$I_{n Trf1} = 75 * 10^6 / (\sqrt{3} * 34.5 * 10^3) = 1255.1093A$$

Burada,  $I_{n Trf1}$ ; Transformatör 1'in nominal akımıdır. Bu akımın değeri aşağıda belirtilmiştir. Bu değer hesaplanmasında eşitlik (5.5.6) kullanılmıştır.

$$I_{n Trf1} = 1.255kA \text{ 'dir.}$$

Çizelge 5.2'deki Transformatör 1 ile ilgili bakır kayıpları kullanılarak kısa devre empedansı için transformatör 1'in kısa devre direnci aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Bu kısa devre direncinin hesaplanmasında (5.5.1) eşitliği kullanılmıştır.

$$R_{K Trf1} = 450 000 / [3 * (1255.1093)^2] = 0.0952 \Omega$$

$$R_{K Trf1} = 95.2m \Omega \text{ olarak hesaplanmıştır. (741V göre indirgenirse) } \rightarrow R_{K Trf1(741V)} = 49.49 \mu\Omega.$$

Artık  $R_{K Trf1}$  ve  $Z_{K Trf1}$  değerleri bilindiği için  $L_{K Trf}$  değerinin hesaplanması yapılabilir. Bu değer hesaplanmasında eşitlik (5.5.3) hesaplanmıştır.

$$L_{K Trf1} = \sqrt{[(2.3012)^2 - (0.0952)^2]} / (2 * \Pi * 50) = 7.186 mH$$

$$L_{K Trf1} = 7.186 mH \text{ olarak hesaplanmıştır. (741V göre indirgenirse) } \rightarrow L_{K Trf1(741V)} = 3.74 \mu H$$

**Transformatör 2 hesapları :**

Çizelge 5.1'deki Transofamtör 2 ile ilgili değerler kullanılarak aşağıdaki hesaplamalar yapılmıştı.

Transformatörün  $L_{K\ Tf}$  değerinin hesaplanabilmesi için öncelikle  $Z_{K\ Tf}$  bir değerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu da aşağıda gösterildiği gibidir. Bu değer hesaplanmasında eşitlik (5.5.4) kullanılmıştır.

$$Z_{K\ Tf2} = 0.148 * (34.5)^2 * / 125 = 1.4093 \Omega$$

$Z_{K\ Tf2} = 1.4093 \Omega$  olarak hesaplanmıştır.

$$P_{K\ Tf2} = P_{Cu\ Tf2} = 450kW = 3 * R_{K\ Tf2} * I_{n\ Tf2}^2$$

$$I_{n\ Tf2} = 125 * 10^6 / (\sqrt{3} * 34.5 * 10^3) = 2091.8488 \text{ A}$$

Burada,  $I_{n\ Tf2}$ ; Transformatör 2'nin nominal akımıdır. Bu akımın değeri aşağıda belirtilmiştir. Bu değer hesaplanmasında eşitlik (5.5.6) kullanılmıştır.

$$I_{n\ Tf2} = 2.092kA \text{ 'dir.}$$

Tablo 5.2'deki Transformatör 2 ile ilgili bakır kayıpları kullanılarak kısa devre empedansı için transformatör 2'in kısa devre direnci aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Bu kısa devre direncinin hesaplanmasında (5.5.1) eşitliği kullanılmıştır.

$$R_{K\ Tf2} = 750\ 000 / [3 * (2091.8488)^2] = 0.0571 \Omega$$

$R_{K\ Tf2} = 57.1m \Omega$  olarak hesaplanmıştır. (741V göre indirgenirse)  $\rightarrow R_{K\ Tf2(741V)} = 29.68 \mu\Omega$ .

Artık  $R_{K\ Tf2}$  ve  $Z_{K\ Tf2}$  değerleri bilindiği için  $L_{K\ Tf}$  değerinin hesaplanması yapılabilir. Bu değer hesaplanmasında eşitlik (5.5.3) hesaplanmıştır.

$$L_{K\ Tf2} = \sqrt{[(1.4093)^2 - (0.0571)^2] / (2 * \Pi * 50)} = 4.476 \text{ mH}$$

$L_{K\ Tf2} = 4.476 \text{ mH}$  olarak hesaplanmıştır. (741V göre indirgenirse)  $\rightarrow L_{K\ Tf2(741V)} = 2.33 \mu\text{H}$ .

Transformatör 1 ve 2 'nin  $R_K$  ve  $L_K$  değerleri MATLAB Simulink modellemesi için 741 V'a göre indirgenmiştir.

### **Transformatör 3 hesapları :**

Tablo 5.1'deki Transofamtör 3 ile ilgili değerler kullanılarak aşağıdaki hesaplamalar yapılmıştı.

Transformatörün  $L_{K\ Tf}$  değerinin hesaplanabilmesi için öncelikle  $Z_{K\ Tf}$  bir değerinin

hesaplanması gerekmektedir. Bu da aşağıda gösterildiği gibidir. Bu değer hesaplanmasında eşitlik (5.5.4) kullanılmıştır.

$$Z_{K \text{ Trf3}} = 0.098 * (0.741)^2 * / 90 = 597.888 \mu\Omega$$

$Z_{K \text{ Trf3}} = 597.888 \mu\Omega$  olarak hesaplanmıştır.

$$P_{K \text{ Trf3}} = P_{Cu \text{ Trf3}} = 540 \text{ kW} = 3 * R_{K \text{ Trf3}} * I_{n \text{ Trf3}}^2$$

$$I_{n \text{ Trf3}} = 90 * 10^6 / (\sqrt{3} * 741) = 70124 \text{ A}$$

Burada,  $I_{n \text{ Trf3}}$ ; Transformatör 3'ün nominal akımıdır. Bu akımın değeri aşağıda belirtilmiştir. Bu değer hesaplanmasında eşitlik (5.5.6) kullanılmıştır.

$$I_{n \text{ Trf3}} = 70.124 \text{ kA 'dir.}$$

Çizelge 5.2'deki Transformatör 3 ile ilgili bakır kayıpları kullanılarak kısa devre empedansı için transformatör 3'in kısa devre direnci aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Bu kısa devre direncinin hesaplanmasında (5.5.1) eşitliği kullanılmıştır.

$$R_{K \text{ Trf3}} = 540 000 / [3 * (70124)^2] = 36.605 \mu\Omega$$

$R_{K \text{ Trf3}} = 36.605 \mu\Omega$  olarak hesaplanmıştır.

Artık  $R_{K \text{ Trf3}}$  ve  $Z_{K \text{ Trf3}}$  değerleri bilindiği için  $L_{K \text{ Trf3}}$  değerinin hesaplanması yapılabilir. Bu değer hesaplanmasında eşitlik (5.5.3) hesaplanmıştır.

$$L_{K \text{ Trf3}} = \sqrt{[(597.888 * 10^{-6})^2 - (36.605 * 10^{-6})^2]} / (2 * \Pi * 50) = 1.8996 \mu\text{H}$$

$L_{K \text{ Trf3}} = 1.8996 \mu\text{H}$  olarak hesaplanmıştır.

#### **Transformatör 4 hesapları :**

Çizelge 5.1'deki Transofamtör 4 ile ilgili değerler kullanılarak aşağıdaki hesaplamalar yapılmıştır.

Transformatörün  $L_{K \text{ Trf4}}$  değerinin hesaplanabilmesi için öncelikle  $Z_{K \text{ Trf4}}$  bir değerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu da aşağıda gösterildiği gibidir. Bu değer hesaplanmasında eşitlik (5.5.4) kullanılmıştır.

$$Z_{K \text{ Trf4}} = 0.604 * (0.3)^2 * / 15 = 362.4 \mu\Omega$$

$Z_{K \text{ Trf4}} = 362.4 \mu\Omega$  olarak hesaplanmıştır.

$$I_{n \text{ Trf4}} = 15 * 10^6 / (\sqrt{3} * 300) = 28867.5 \text{ A}$$

Burada,  $I_{n \text{ Trf4}}$ ; Transformatör 4'ün nominal akımıdır. Bu akımın değeri aşağıda belirtilmiştir. Bu değerın hesaplanmasında eşitlik (5.5.6) kullanılmıştır.

$$I_{n \text{ Trf4}} = 28.867 \text{ kA 'dir.}$$

Çizelge 5.2'deki Transformatör 4 ile ilgili bakır kayıpları kullanılarak kısa devre empedansı için transformatör 4'in kısa devre direnci aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Bu kısa devre direncinin hesaplanmasında (5.5.1) eşitliği kullanılmıştır.

$$R_{K \text{ Trf4}} = 90 \text{ 000} / [3 * (28868)^2] = 35.999 \text{ } \mu\Omega$$

$$R_{K \text{ Trf4}} = 35.999 \text{ } \mu\Omega \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Artık  $R_{K \text{ Trf4}}$  ve  $Z_{K \text{ Trf4}}$  değerleri bilindiği için  $L_{K \text{ Trf4}}$  değerinin hesaplanması yapılabilir. Bu değerın hesaplanmasında eşitlik (5.5.3) hesaplanmıştır.

$$L_{K \text{ Trf4}} = \sqrt{[(362.4 * 10^{-6})^2 - (35.999 * 10^{-6})^2]} / (2 * \Pi * 50) = 1.1479 \text{ } \mu\text{H}$$

$$L_{K \text{ Trf4}} = 1.1479 \text{ } \mu\text{H} \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

### **Hatların hesaplanması :**

**Kabul:** Hattın direnç ve reaktansı bağlı olduğu transformatör empedansı yaklaşık %30'u kadardır.

#### **Hat-1:**

$$R_{\text{Hat-1}} = 0.3 * 36.605 * 10^{-6} = 10.9815 \text{ } \mu\Omega$$

$$L_{\text{Hat-1}} = 0.3 * 1.8996 * 10^{-6} = 0.570 \text{ } \mu\text{H}$$

#### **Hat-2:**

$$R_{\text{Hat-2}} = 0.3 * 35.999 * 10^{-6} = 10.8 \text{ } \mu\Omega$$

$$L_{\text{Hat-2}} = 0.3 * 360.608 * 10^{-6} = 108.182 \text{ } \mu\text{H}$$

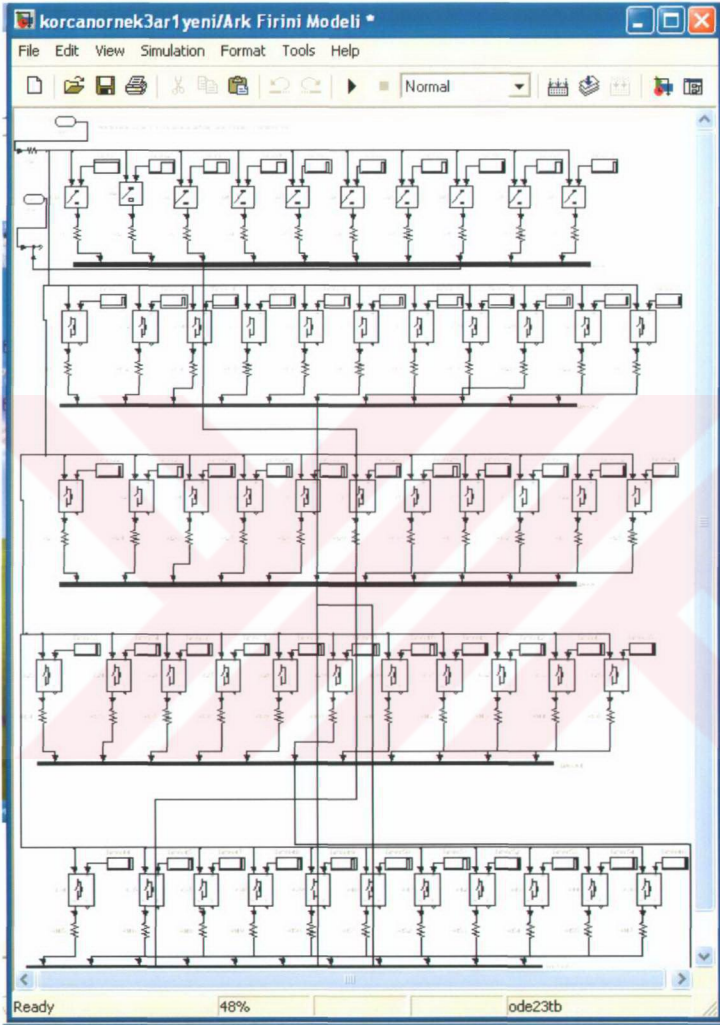
Kroman Çelik fabrikasının tek hat diyagramı sadeleştirildikten sonra ve MatLAB Simulink programında simule edilmek amacıyla tasarlandıktan sonra transformatörler ve hatlar için hesaplanan R ve L değerleri, MatLAB Simulink modellemesinde kullanılmıştır.

Bu değerler aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

Çizelge 5.3 Matlab Simulink Kroman elik Ark fırını prosesinin modellenmesinde kullanılan R ve L değerleri.

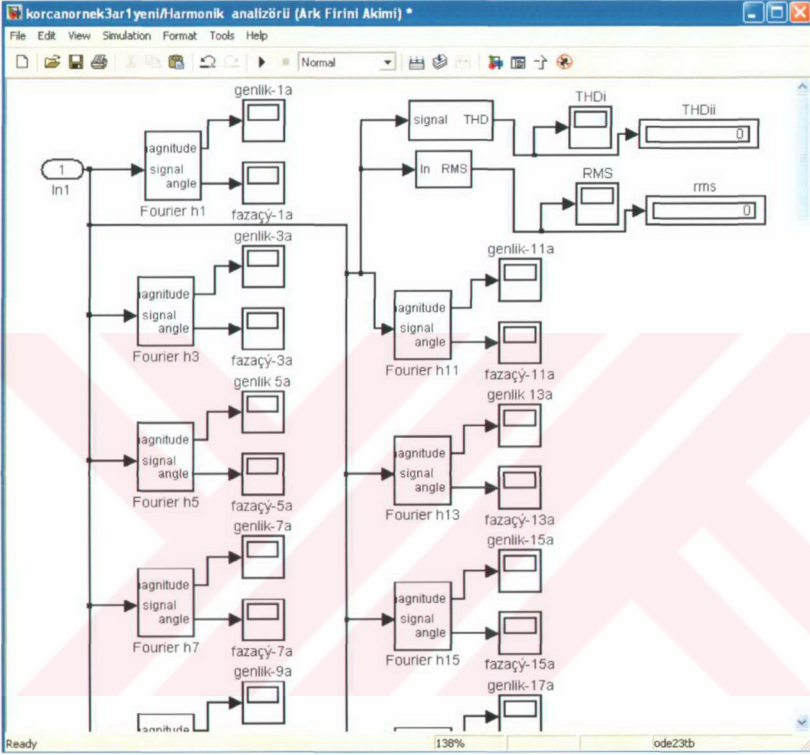
$R_{K\ Trf1(741V)} = 49.49\ \mu\Omega$
$L_{K\ Trf1(741V)} = 3.74\ \mu H$
$R_{K\ Trf2(741V)} = 29.68\ \mu\Omega$
$L_{K\ Trf2(741V)} = 2.33\ \mu H$
$R_{K\ Trf3} = 36.605\ \mu\Omega$
$L_{K\ Trf3} = 1.8996\ \mu H$
$R_{K\ Trf4} = 35.999\ \mu\Omega$
$L_{K\ Trf4} = 1.1479\ \mu H$
$R_{Hat-1} = 10.9815\ \mu\Omega$
$L_{Hat-1} = 0.570\ \mu H$
$R_{Hat-2} = 10.8\ \mu\Omega$
$L_{Hat-2} = 108.182\ \mu H$

şekil 5.5 'de MatLAB Simulink programında ark fırını çalışma prensibini simüle etmek amacıyla bir model oluşturulmuştur. Bu model zamanlayıcı fonksiyonu olan anahtarlama ünitelerinin ayrı ayrı dirençlerle değerleri; ark fırınında oluşan ark öncesi durumları, ark sırasında yani ergime olaylarını; simüle edilecek şekilde ayrıca kararlı hale geçtiği zamanı araştırmak amacıyla uygun şekilde değerleri girilmiştir. Böylece ark fırını değişken direnç yaklaşım ile modellenmiştir.



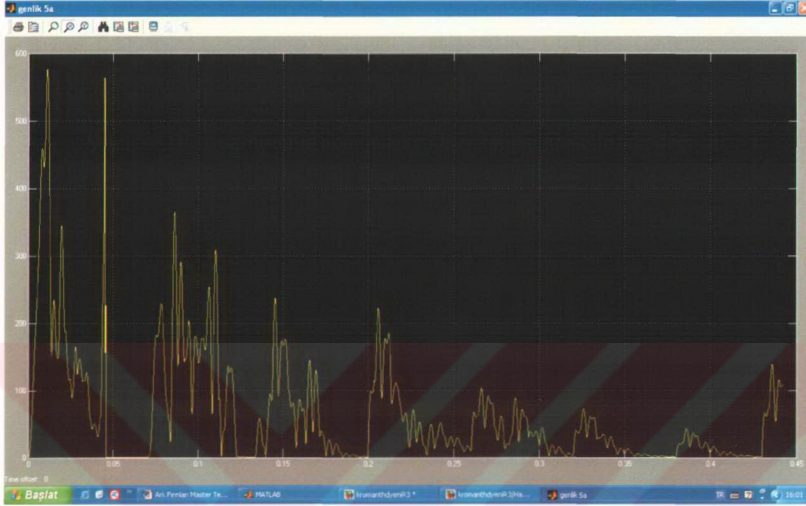
Şekil 5.5 Ark Fırını Modeli.

Şekil 5.5'te dirençler anahtarlar ile devreye girmektedir. Zamanlayıcılar ise bu dirençlerin ark fırınının akımının akım-zaman eğrisine uygun biçimde devreye girmesini sağlamaktadır. Böylece ark ve ısıtma olaylarının simüle edilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 5.6 Ark fırını prosesinde harmonik Analiz devresi .

Harmonik analiz devresi ile Ark fırınından çekilen akımın genliğindeki değişim 50. harmonik seviyesine kadar izlenebilmektedir. Ayrıca akımın Toplam Harmonik Distorsiyonu ve RMS gerçek değeri de ölçülebilmektedir.



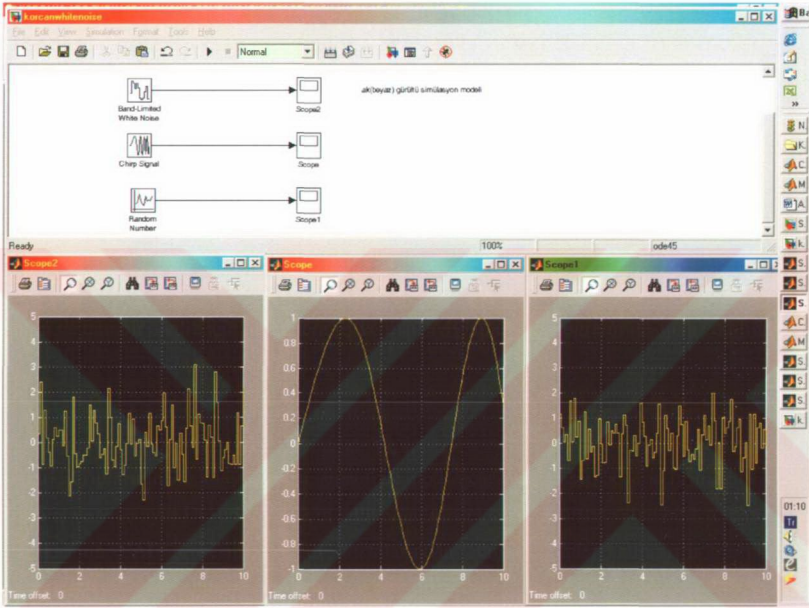
Şekil 5.7 DC Ark Fırınının akımındaki 5.harmonikğin genliğindeki değişim.

Harmonik Analizörü devresi ile DC Ark Fırınındaki akımın 5. harmonikğinin genliğindeki değişim incelenmiştir. Ark olayı sırasında oluşan kısa devre akımının meydana getirdiği harmonikler genlikte başlarda büyük dalgalanmalara neden olsada zaman ilerledikçe ergitme işlemi sona ermesine yakın harmonikteki dalgalanmalar kararlı hale gelme eğilimindedir.

Bu sonuç literatürde verilen çalışmalarla uyum içindedir. Özellikle DC Ark fırınlarında 5.harmonikte oldukça fazla dalgalanma olduğu görülmüştür. Bu özellik frekansın 250Hz olduğu seviyelerde harmoniklerin daha etkili olduğunu göstermektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda özellikle 183Hz frekansı civarındaki dalgalanmalarda harmoniklerin etkili olduğu gösterilmiştir.

Bu bölümde Ark fırını prosesinde arkin oluşumu ve kararlı halden kararsız hale geçişlere ilişkin MATLAB Simulink ekran görüntüleri verilmiştir. Harmonik analizinin 50 harmoniğe kadar yapılmaktadır. Genlik ve faz açıları değişimi 50 dereceye kadar izlenebilmektedir. Ayrıca üsteki grafik ise harmonikğin oluşturduğu değişimleri göstermektedir. Anahtarlama zamanlayıcıları yarım periyodun bitimine doğru dirençleri devreye soktuğu için ark olayı ve EAF davranışları çok daha iyi analiz edilebilmektedir.

Sadece ark fırını modellenmemiş , aynı zamanda Kroman çelik tesisinin ark fırını prosesinde doğru ve tam bir analiz için modellenmiş ve matLAB simulink programı ile analiz edilmiştir.

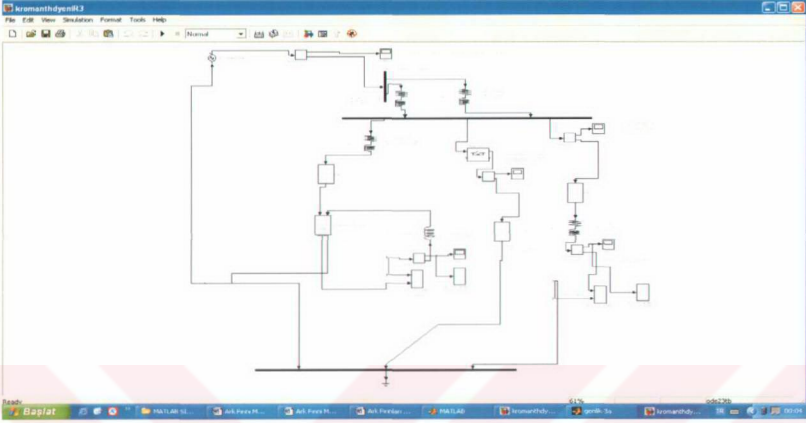


Şekil 5.8 Dalga şekilleri ve beyaz gürültü dalga formuna ilişkin ekran görüntüsü.

Dikkat edilirse hep elde edilen EAF harmonikli akımları yukarıda gösterilen şekillerde olmaktadır. Bu ise beyaz (ak) gürültü olarak açıklanmaktadır. Beyaz gürültü ile ilgili bilgi ekte ayrıntılı olarak açıklanmıştır.<sup>1</sup>

Aşağıdaki şekilde Kroman Çelik Fabrikasının EAF prosesinin basitleştirilmiş bir elektrikselsel tek hat diyagramını matLAB Simulink programında çizildiğini görmekteyiz . Burada ac ve dc ark fırınlarının karşılaştırılması amacı ile pota ocağı sanki bir ac ark fırını gibi kabul edilmiş ve yine aynı DC ark fırını için kullanılan model kullanılmıştır. Yine bu Kroman Çelik fabrikasının EAF prosesinin çeşitli noktalarından akım ölçümleri alınmıştır ve böylece harmoniklerin nasıl etkiler yarattığı simüle edilmiştir.

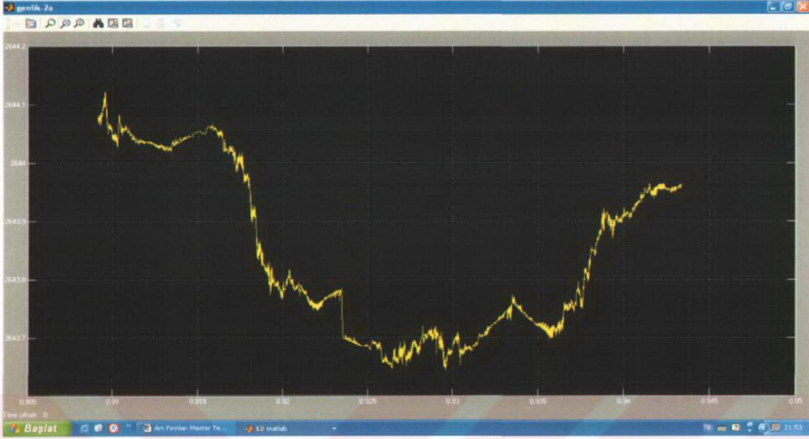
<sup>1</sup> Kısaca ak gürültü devamlı değişen ve kararsızlığı gösteren bir stoastik yani değişken bir durumu açıklar. Bu ak gürültü ile ilgili ayrıntılı bilgi ek-1'deki açıklamada daha ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



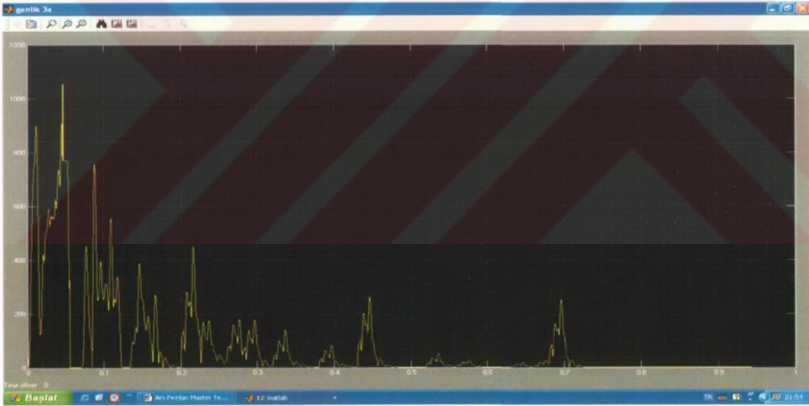
Şekil 5.9 Kroman Çelik tek hat diyagramının Simulink tasarım modeli.

Burada kroman çelik tek hat diyagramının DC ark fırını ve AC pota ocağı ile ilgili olan kısmı basitleştirilerek modelleme yoluna gidilmiştir. Kroman çelik fabrikasının tek hat diyagramı ek-2'de verilmiştir.

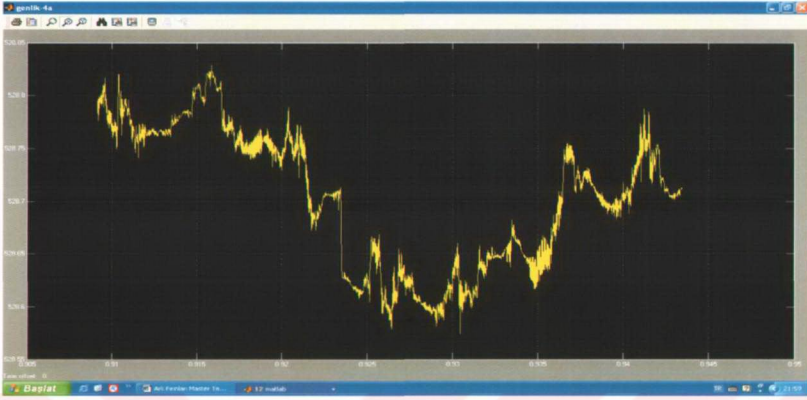
MATLAB Simulink programı ile DC Ark Fırınının ve AC Pota Ocağının harmonik bileşenlerinin analizi yapılmıştır.



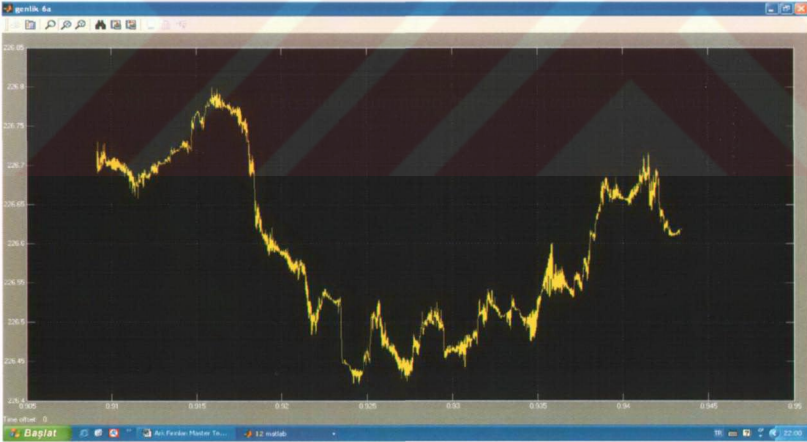
Şekil 5.10 DC Ark Fırınının akımının 2. bileşeninin zamanla değişimi.



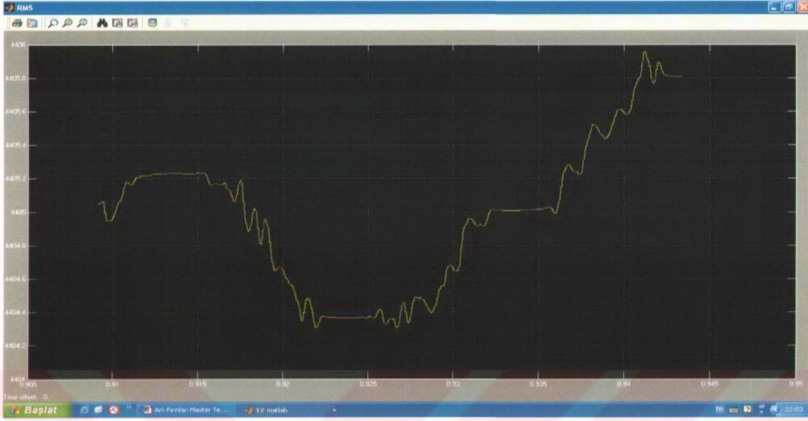
Şekil 5.11 DC Ark Fırınının akımının 3. bileşeninin zamanla değişimi.



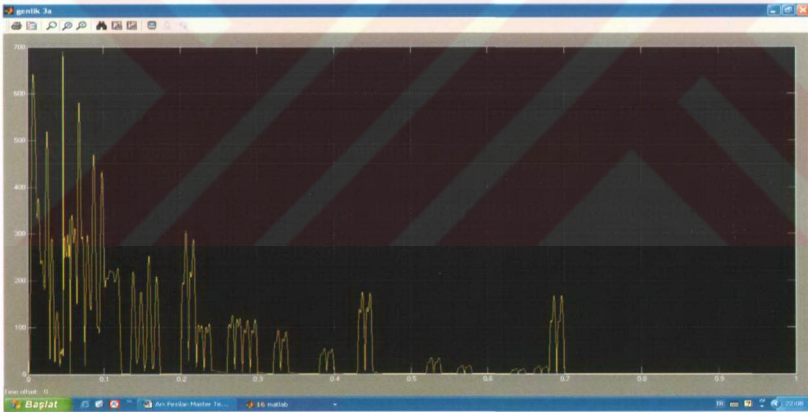
Şekil 5.12 DC Ark Fırınının akımının 4. bileşeninin zamanla değişimi.



Şekil 5.13 DC Ark Fırınının akımının 6. bileşeninin zamanla değişimi.



Şekil 5.14 DC Ark Fırınının akımının RMS değerinin zamanla değişimi.



Şekil 5.15 AC Pota Ocağının akımının 3. bileşeninin zamanla değişimi.

Bu bölümde MATLAB Simulink programı ile yapılan simülasyonun DC Ark Fırını ve AC Pota Ocağı için gerekli olan grafikler verilmiştir.

Kroman Çelik Tesisinin sadece akımı değil diğer elektriksel parametrelerinin değişimi incelenmek istenirse, bununla ilgili grafikler Ek-2'de verilmiştir.

## BÖLÜM 6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Ark Fırınları incelenmiş, harmoniklerle ilgili temel kavramlar açıklanmıştır. Literatürde yapılmış çalışmalara ayrıntılı olarak değinilmiştir.Yeni Ark Fırını Modeli ile Dalgalanma Çalışmaları, DC Ark Fırını Tesislerinde İnterharmoniklerin Analizi, DC Ark Fırını Çalışmasının Analizi ve 187Hz'lik Voltaj Distorsiyonu nedeniyle oluşan Dalgalanmalar, Elektrik Şebekelerinde Titreşme telafisinin incelenmesi için Ark Fırını Modeli, Elektrik Arkı Ocaklarından gelen Titreşim Hesaplama için bir Model Geliştirilmesi konularına ağırlık verilmiştir.

Güç sistem harmonikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir.Güç sistemlerinde enerji kalitesizliğine yol açan başlıca nedenlerden birinin ark fırınları olduğu açıkça görülmektedir.Bir gerçek ark fırını tesisinin MATLAB Simulink ile basitleştirilmiş simülasyonu yapılmıştır.Simülasyon devresinde AC ark fırını ve DC ark fırını bulunmaktadır.Böylece AC ark fırını ve DC ark fırını tarafından üretilen harmonikleri karşılaştırmak mümkün olabilmektedir.

AC pota ocağı da sanki bir AC EAF olarak ele alınarak simülasyonda AC – DC ark fırınlarının karşılaştırılması mümkün olmuştur.Günümüzde artık DC ark fırınları teknolojinin gelişmesi ile daha az harmonikli akım üreten fırın çeşitleri arasında yer almaktadır.Bu gelişmede güç elektroniğinde kat edilen gelişmenin büyük katkısı vardır.Söz konusu harmoniklerin kompanze edilmesi için öncelikle çok iyi bir model oluşturulup sistemin analiz edilmesi gerekmektedir.Bu model oluşturulurken ark fırınının ark olayı çok iyi simüle edilmesi gerekmektedir.Çünkü burada olay çok basit gibi gözüksede aslında oldukça karmaşık ve simüle edilmesi oldukça zor bir durumdur. Kısa devrelerin ark fırını prosesinde olması bunların en büyük nedenlerindedir.

MATLAB Simulink modellerinden elde edilen grafikler, gerek Kroman Çelik tesisinden alınan ölçümlerle gerekse önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında uyumluluk göstermektedir.

Bu model geliştirilmek istenirse, öncelikle bu konu üzerinde yapılmış çalışmalar ayrıntılı olarak incelenmelidir. Özellikle çıkacak akımın dalga şekli beyaz gürültü dalga şeklinde ve stoastik özellikte olmalıdır.Model buna göre revize edilip daha iyi bir simülasyon yapılabilir. Ayrıca fırın prosesi basitleştirilmeden transfer barası ve kesiciler oluşturularak ark fırını modelleme devresine eklendiğinde, daha ayrıntılı grafikler elde edilebilir.

## EK-1 BEYAZ GÜRÜLTÜNÜN İSTATİKSEL AÇIDAN AÇIKLANMASI

İstatistikçiler, durağan olmayan serilerin varlığını uzun yıllar boyunca farkında olmuşlar ve sonunda Box ve Jenkins durağan olmayan serilerin art arda farkları alınarak durağan hale getirilebileceğini göstermiştir. Dolayısıyla fark alma işlemi hem tek değişken hem de çok değişkenli modelleme için neredeyse önceden yapılması gereken zorunluluk haline getirmiştir.

Gözlemlerin zamana karşı grafiği çizildiğinde, birçok makro-ekonomik serinin artan bir trend gösterdiği görülmektedir. Bazı nedenlerden dolayı, serilerin trendten bağımsız değerleriyle çalışmak kullanışlı ve geleneksel bir yoldur. Genellikle çoğu araştırmacı trendten bağımsız olan bu serileri deterministik trend  $(\alpha_0 + \alpha_1 t)$  etkisi altında ve serilerin logaritmasını alarak işlemleri yapar. Bu durumda  $\alpha_1$ , serinin periyoda göre büyüme oranının ölçüsü olmaktadır.  $y_t$ , temel seri;  $\varepsilon_t$ , akgürültü olmak üzere,

$$y_t = \alpha_0 + \alpha_1 t + \gamma(L) \varepsilon_t \quad E(1.1)$$

denkleminde  $\alpha_0 + \alpha_1 t$ , trend bileşeni,  $\gamma(L) \varepsilon_t$  ise durağan stokastik süreç olup ortalaması  $E(\gamma(L) \varepsilon_t)^2$  zamandan bağımsız olmaktadır. Aynı şekilde  $y_t$ , trend durağan değişkeni olup trend bileşenine sahip olabilir ama  $y_t$ 'nin deterministik trendten sapmaları durağan olmalıdır.

1982 yılına kadar birçok araştırmacı (1.1) numaralı formülü kullanırken 1982 yılından sonra,

$$\Delta y_t = \beta + A(L) \varepsilon_t \quad E(1.2)$$

Formülü kullanılmaya başlanmıştır. Burada  $A(L) \varepsilon_t$ , durağan bileşen ve  $\beta$  ise  $y_t$  serisinin  $t$  domenindeki değişim miktarı olmaktadır. Bu formülde  $y_t$ , fark durağan değişkenidir; yani fark durağan zaman serilerinden üretilmektedir. Bu tip seriler genellikle deterministik trend yok edilerek durağan yapılamazlar, bunun yerine serilerin birinci farklarının alınması gerekmektedir.

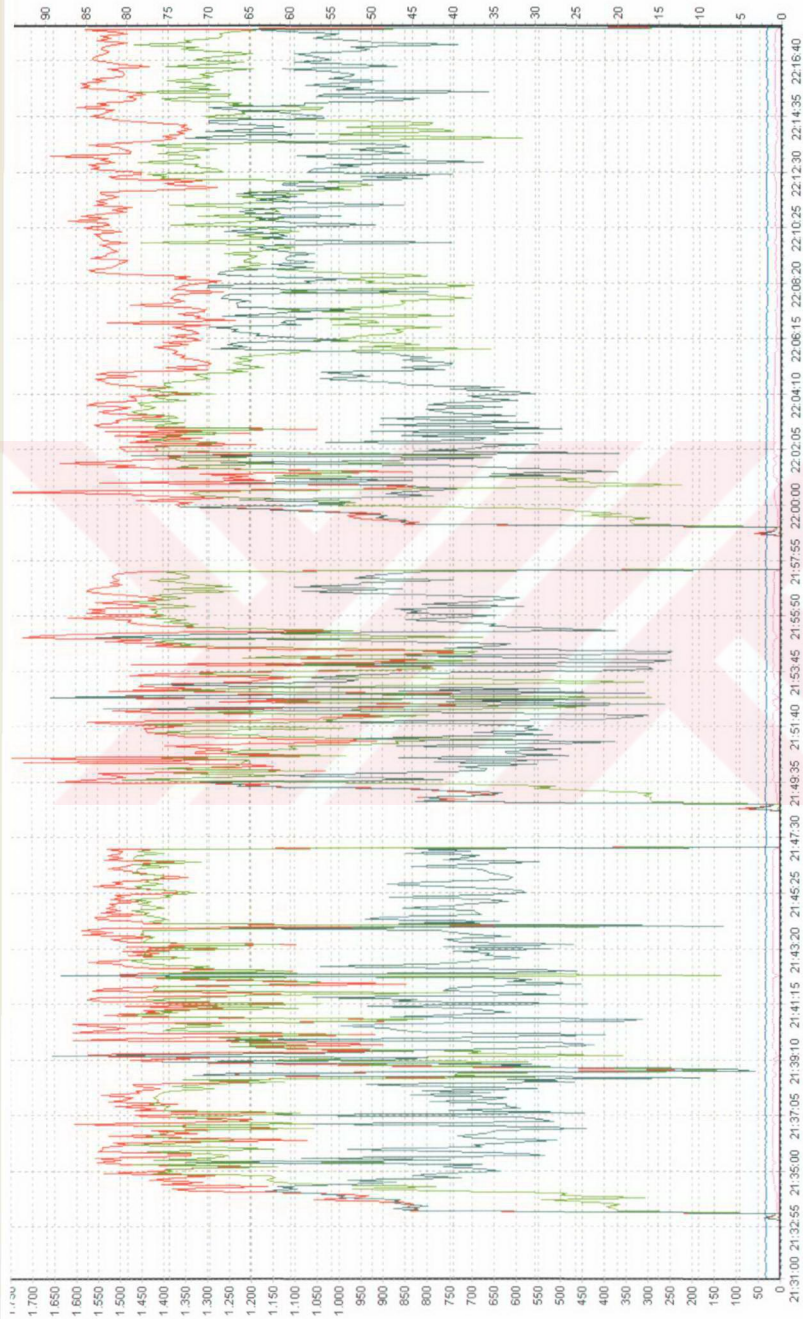
Trend durağan ile fark durağan değişkenleri arasındaki en önemli fark, trend durağan değişkenin sabit deterministik trend fonksiyonuna dönme eğilimi varken fark durağan değişkenin böyle bir eğilime sahip olmamasıdır. (1.1) numaralı formülde  $\gamma(L) \varepsilon_t$ , trendten ayrılmış bileşen, 0 ortalamaya sahip ve durağan olduğu için  $y_t$  serisinin  $\alpha_0 + \alpha_1 t$  sabit trend fonksiyonu etrafında dalgalanma eğilimi vardır. (1.2) numaralı formülde ise bunun tam tersine  $y_t$  serisinin eğilimi o andaki durumdan  $\beta$  büyüme yönündedir. Özel durumlar haricinde burada  $y_t$ 'nin hiçbir sabit trente dönme eğilimi yoktur.

**EK-2 KROMAN ÇELİK DÖKÜMANLARI**

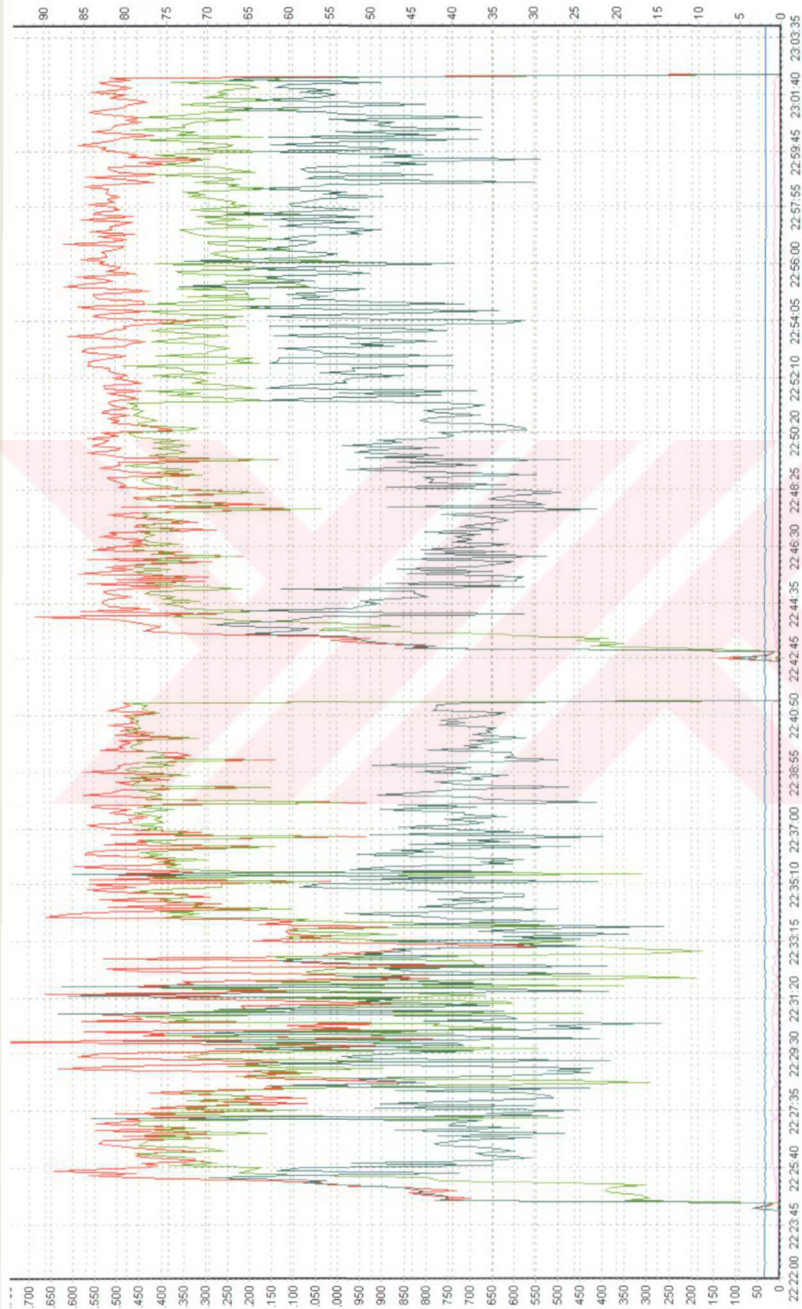
Bu ekte Kroman Çelik Tesisinin tek hat diyagramı ve kendi otomasyon sistemi ile yapılan ölçümler verilmiştir.







Çalışın ve okulu tarih: 29/07  
 Başın tarih: 31.07.2004 / 10.56:03



## **KAYNAKLAR**

Abur, A., and Ozgun, O., (2002), "Flicker Study Using a Novel Arc Furnace Model", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol.7, No.4, October 2002, 1158-1163  
0885-8977/02\$17.00 c 2002 IEEE

Adak, S.(Öğr.Gör.Dr.) Elektrik Yüksek Mühendisi Dicle Üniversitesi Mardin Meslek Yüksekokulu Teknik Programlar Bölüm Başkanı - (suleymanadak@hotmail.com) ,(2004), "Bir Fazlı A.C. Kıyıcısının Harmonik Analizi", 3e Electrotech Aylık Enerji, Elektrik, Elektronik Teknoloji Dergisi, Mart 2004, Harmonik, 138 – 143

Birbir, Y.(Hazırlayan), Kasapoğlu, A.(Prof.) – (Tez Danışmanı), (1999), Doğru Akım Ark Fırınlarının Simülasyonu ve Çalışma Şartlarının İyileştirilmesi ,T.C.Marmara Üniversitesi – Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Eğitim-Doktora Tezi, 1999, İstanbul, Marmara Üniversitesi, Kütüphane ve Dokümantasyon Daire Başkanlığı, T05722, 47-48.

Boduroğlu, T., Elektrik Makinaları Transformator Hesapları, Cilt- II, Beta Yayınevi.

Çakır, H., (Prof.),(1989), Elektrik Güç Sistemleri Analizi, Y.T.Ü.

Çakır, H.,(Prof.),(1985), Enerji İletimi(Elektrik Hesaplar), Y.T.Ü.

Çorapsız, M.H.(Elk.Müh.)-(Hilkar Ltd.), "Pasif Harmonik Filtrelemede Pratik Yaklaşımlar", (2004), ETMD Elektrik Tesisat Mühendisleri Derneği, ETMD Bizden haberler, Haziran 2004, Sayı 17, 8 – 10  
ISSN 1304 – 2556

European COPPER İnstitute, "Harmonikler - Gerçek KOD – Tek Gerçek Ölçü", Güç Kalitesi Uygulama Kılavuzu 3.22, Leonardo Power Quality Initiative, Sarkuysan Elektrolitik Bakır Sanayi ve Ticaret A.Ş.

European COPPER İnstitute, "Harmonikler ve Etkileri 3.1", Güç Kalitesi Uygulama Kılavuzu, Education and Culture, Leonardo da Vinci, Sarkuysan

Fu, T-H., and Wu, C-J, (2002), "Load Characteristics Analysis of ac and dc Arc Furnaces Using Various Power Definitions and Statistic Method ", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol.1, No.4, October 2002, 1099 – 1105  
0885-8977/02\$ 17.00 c 2002 IEEE

Carpinelli, G., Di Manno, M., Verde, P., Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università delgi Studi di Cassino, Via G.De Biasio, 43 03043 Cassino (FR) – Italy;  
Tironi, E., Zaninelli, D., Dipartimento di Milano, Piazza Leonardo da Vinci 32 20133 Milano – Italy, "AC and DC arc furnaces: a comparison on some power quality aspects", 0-7803-5569-5/99\$ 10.00 © 1999 IEEE, s.505.

Matavelli, P., Fellin, L., Department of Electrical Engineering - University of Padova Via Gradenigo 6/a, 35131 Padova, Bordignon, P., Pema, M., Ansaldo Sistemi Industriali S.p.a. Power Electronics Operation -Viale Sarca 336. 20126 Milano, "Analysis Of Interharmonics in DC Arc Furnace Installations", Italy.

Manchur, G., Erven, C.C., (1992), "Development Of A Model For Predicting Flicker From Electric Arc Furnaces", IEEE Transactions on Power Delivery , Vol. 7 No. 1, January 1992, 416 – 426, Ontario Hydro, Research Division 800 Kipling Avenue, Toronto, Canada M8Z 5S4  
0885-8977/91/\$3.00c 1992 IEEE

Montanari, G.C.,<sup>1</sup> Loggini, M.,<sup>1</sup> Cavallini, A.,<sup>1</sup> Pitti, L.,<sup>1</sup> Zaninelli, P.,<sup>2</sup> (1994), "Arc-furnace Model For The Study Of Flicker Compensation In Electrical Networks", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, October 1994, 2026 – 2037  
0885-8977/94/\$04.00 c 1994 IEEE

Mulcahy, J.A., Ludbrook, A., (1967), "A New Flicker Correcting System For Arc furnaces", April 1967, Journal Of Metals\_63.

Odabaşı, T.( Elektrik Mühendisi – Botaş BTC Proje Direktörlüğü CMT İnşaatı),(2004), "Üçüncü Harmoniğin Getirdiği Problem", ETMD Elektrik Tesisat Mühendisleri Derneği ETMD Bizden haberler, Tübitak Ulusal Metroloji Enstitüsü, Tubitak National Metrology Institute, Türkiye'de Ölçümün Referansı, Nisan 2004, Sayı.16, 58 – 62  
ISSN 1304 – 2556

Orhon, K.M.(Elektrik Yüks.Müh.), (1986), AsilÇelik Sanayi ve Ticaret A.Ş, Teknik Yayın, Ark Ocakları Elektriği, 36-41.

Özdamar, K.,(1997), Paket Programlar ile İstatistiksel Veri Analizi –I, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.

Tang, L., Mueller, D., Members , IEEE - Electrotek Concepts , Inc., Knoxville, Tennessee; Hall, D., Member, IEEE - Wisconsin Electric Power Co. - Milwaukee, Wisconsin; Samotyji, M., Electric Power Research Institute - Palo Alto, California; Randolph, J., Non-Member, IEEE - Charter Steel -Saukville , Wisconsin, (1994), "Analysis Of DC Arc Furnace Operation And Flicker Caused By 187Hz Voltage Distortion", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, No. 2 ,April 1994, 1098 – 1107,  
0885-8977/94/\$04.00 c 1993 IEEE

Uzunoğlu, M., (Yrd.Doç.Dr.), Kızıl, A., Onar, Ö.Ç.,(2003), Her Yönüyle MatLAB , Türkmen Kitabevi, (Genişletilmiş 2.Baskı) , İstanbul.

[www.hatch.ca](http://www.hatch.ca)

Electric Arc Furnace Steelmaking –

<http://www.steel.org/learning/howmade/eaf.htm>

Interharmonic Levels at a DC Arc Furnace Installation

<http://www.grouper.ieee.org/groups/harmonic/docs/sm99hwg.ppt>

UF Division of Continuing Education : Conferences and Seminars

<http://www.doce-conferences.ufl.edu/ic3/print.asp?.day=ALL>

<http://www.matrislab.com>

<http://www.cemtas.com.tr>

<http://www.vonar.com.tr/isdemir.htm>

<http://www.isdemir.com.tr>



## ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi : 27.05.1979

Doğum Yeri: Ankara

Lise	1994-1997	Özel Kültür Fen Lisesi
Lisans	1997-2001	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği
Yüksek Lisans	2002-2005	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans programı

### Çalıştığı kurumlar

2000-2000	SIEMENS-SİMKO AŞ
2003-2004	ENERJİ ÇÖZÜMLERİ – SEM GROUP
2004-2004	ENEL ENERJİ SAN. VE TİC. AŞ.
2005-Devam ed.	AMERICAN POWER CONVERSION