



**MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ELEKTRİK ARK OCAKLARINDA  
ENERJİ MALİYETLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**KEREM ERENŞOY**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ANTAKYA**

**ŞUBAT-2007**

Mustafa Kemal Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne,

Prof. Dr. Gürel ÇAM danışmanlığında, Kerem ERENŞOY tarafından hazırlanan bu çalışma 07 / 02 / 2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof Dr. Gürel ÇAM	İmza .....
Üye : Yrd. Doç. Dr. Selçuk MİSTİKOĞLU	İmza .....
Üye : Yrd. Doç. Dr. Ersin ÖZDEMİR	İmza .....

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylıyorum.

Kod No:

İmza  
07 / 02 / 2007  
Prof. Dr. Necat AĞCA  
Enstitü Müdürü

**Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.**

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	III
ABSTRACT .....	IV
ÖNSÖZ .....	V
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	XI
1. GİRİŞ .....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	2
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	5
3.1. Elektrik Ark Ocaklarında Üretim .....	5
3.2. Ocağa Şarj.....	6
3.3. Ergitme .....	7
3.4. Saflaştırma .....	10
3.5. Cüruf Giderme .....	13
3.6. Döküm Devirme.....	16
3.7. Ocağın Yeni Döküme Hazırlanması .....	16
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	18
4.1. Elektrik Ark Ocaklarının Elektrik Sistemi .....	18
4.1.1. Ortak Bağlantı Noktası .....	19
4.1.2. Ara Trafo.....	20
4.1.3. Ocak Şalteri .....	21
4.1.4. Ocak Trafosu .....	21
4.1.5. Şok Bobini.....	23
4.1.6. İkincil Çıkış Baraları.....	23
4.1.7. Yüksek Akım Kabloları .....	25
4.1.8. Akım İletken Kollar .....	26
4.2. Empedans ve Reaktans Kavramları.....	26
4.3. Elektrik Güç Formülleri.....	50
4.4. Elektrik Ark Ocaklarında Enerji Gereksinimi .....	52

4.5. Elektrik Arkının Oluşturulması.....	55
4.6. Reaktansın Artırılması.....	62
4.7. Güç Artırımı.....	64
4.8. Ark Ocağı Regülasyonu .....	64
4.8.1. Sabit Empedans Kontrolü .....	67
4.8.2. Sabit Ark Gerilimi Kontrolü .....	67
4.8.3. Sabit Ark Direnci Kontrolü.....	67
4.8.4. Sabit Aktif Güç Kontrolü.....	68
4.9. Ark Kararlılığı.....	71
4.10. Ark Ocaklarında Elektriksel Düzeltme İşlemi.....	72
4.10.1. Statik Volt Amper Reaktif (VAR) Düzeltmesi .....	72
4.11. Refrakter Simetrisi Üzerine Etkiler.....	80
4.12. Elektrot Tüketimi Üzerine Etkiler.....	82
4.13. Ocakta Çelik Mayası Bırakma .....	86
4.14. Cüruf Köpürtme Pratiği .....	86
4.15. Kimyasal Gücün Artırılması .....	89
4.16. Brülörler .....	92
4.17. Kimyasal Enerji Girdisi .....	94
4.18. Banyonun Karıştırılması .....	98
4.19. Enerji Geri Kazanım Sistemleri .....	99
4.19.1. İleri Yanma Sistemi .....	101
4.19.2. Hurda Ön Isıtma Sistemleri.....	109
4.20. Enerjisiz Sürenin Azaltılması .....	112
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	114
KAYNAKLAR.....	117
ÖZGEÇMİŞ.....	119

## ÖZET

**MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**  
**ELEKTRİK ARK OCAKLARINDA ENERJİ MALİYETLERİNİN**  
**ARAŞTIRILMASI**

Bu çalışmada, elektrik ark ocaklarının sıvı çelik üretimi sırasında önemli maliyet kalemi olan elektrik enerjisi tüketiminin azaltılabilmesi ve üretimin artırılabilmesi için yapılabilecek iyileştirmeler ve kullanılabilen yeni sistemler araştırılmıştır. Araştırma kapsamında güç girdisinin artırılıp, düzenli ve etkin hale getirilmesi, üretimin hızlandırılarak kayıpların azaltılması, kimyasal enerji kullanımının elektrik enerjisi üzerindeki etkileri ve enerji geri kazanım sistemlerinin kullanılabilirlikleri incelenmiştir.

Çalışma hazırlanırken bazı sistemler birbir uygulanıp ve elde edilen sonuçlar irdelenebilmiştir. Bazı sistemler ise yatırım maliyetlerinin yüksekliği nedeniyle deneysel olarak uygulanma fırsatı bulunamamış, bu sistemlerin dünya üzerindeki uygulamalarından değerler alınarak inceleme yapılabilmıştır.

Çalışma sonucunda ocaklarda elektrik arkının oluşturulması, ark kararlılığının sürdürülebilmesi ve elektrik enerjisi gücünün mümkün olan en yüksek seviyede ocağa verilebilmesi, ayrıca ocağa toplamda verilmesi gereken enerjinin bir bölümünün kimyasal enerji kaynaklarından karşılanabilmesi ve enerji geri dönüşüm sistemlerinin kullanımının etkileri noktalarında sonuçlar elde edilmiştir. Bunların yanı sıra elektrik ark ocaklarının diğer maliyet kalemlerinden sayılan elektrot ve refrakter tüketimi üzerinde de tasarruf gerçekleştirilmesi yönünde bulgular elde edilmiştir.

2007, 134 sayfa

**Anahtar Kelimeler:** Elektrik ark ocağı, çelik üretimi, üretimin artırılması, enerji tasarrufu

## ABSTRACT

### A STUDY ON THE ENERGY COSTS IN ELECTRIC ARC FURNACES

In this study, amendments that can be done and new systems that can be used in order to increase the production and decrease the consumption of electrical energy which is an important cost factor in the process of liquid steel production of electrical arc furnaces have been searched. In this work, increasing the power input and making it regular and active, accelerating the production in order to decrease losses, the effects of using chemical energy on electrical energy consumption and utility of energy regaining systems have been examined.

While preparing the study, some systems have been directly applied and the outcomes have been examined. However, some systems could not be applied because of the high level of investment costs; so, examination could be done by taking results from the applications of these systems.

At the end of the study, outcomes like formation of electrical arc in the furnaces, continuation of arc stability and giving electrical energy power to the furnace at the highest level possible; moreover, results like providing some of the total energy given to the furnace from chemical energy sources and points about effects of using energy recycling systems were obtained. In addition to these, findings were acquired proposing that there should be saving in the consumption of electrode and refractory which are other important cost factors of electrical arc furnaces.

2007, 134 pages

**Key Words:** Electric arc furnace, production of steel, increasing of production, saving of energy

## ÖNSÖZ

Günümüz teknolojik şartlarında sıvı çelik üretimi iki ana proses yardımıyla gerçekleştirilebilmektedir:

- Yüksek Fırın Prosesi
- Elektrik Ark Ocağı Prosesi

Yüksek fırın proseslerinin ilk yatırım maliyetinin yüksek ve proseslerinin karmaşık oluşu, son yıllarda elektrik ark ocağı prosesine olan ilgiyi artırmıştır. Elektrik ark ocağı prosesleriyle sıvı çelik üretiminde ana maliyet kalemleri olarak, hurda temini ve elektrik enerjisi tüketimi ilk iki sırayı almaktadır. Dünyadaki tüm ark ocaklarında tüketilen toplam elektrik enerjisi miktarı, dünya elektrik enerjisi üretiminin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Ekonomik ve çevresel sebeplerden dolayı, bu enerjinin tasarrufu yönünde önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bu tez, bu amaçla yapılmış çalışmaların ve geliştirilmiş sistemlerin etkinliklerinin araştırılmasını hedeflemiştir.

Tez konumun belirlenmesi ve çalışmalarımın yürütülmesi aşamasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Gürel ÇAM' a (Mustafa Kemal Üniversitesi, Müh. Mim. Fak. Dekanı), özellikle elektrik sistemleri üzerindeki araştırmalarımda yardımlarını gördüğüm Sayın Elek. Müh. Mehmet NALÇABASMAZ' a teşekkürlerimi sunarım.

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A:	Amper
AC:	Alternatif Akım
Al:	Alüminyum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :	Alümina oksit
B:	Oksidasyon Katsayısı
c:	Ek Kapasitör Grubu Volt Amper Reaktif Değeri
C:	Karbon
C:	Sığa
C <sub>Oks</sub> :	Elektrot Oksitlenme Tüketimi
C <sub>Uç</sub> :	Elektrot Uç Tüketimi
°C:	Derece Santigrat
CaF <sub>2</sub> :	Kalsiyumflorür
CaO:	Kalsiyumoksit
CO:	Karbonmonoksit
CO <sub>2</sub> :	Karbondioksit
CosΦ:	Güç Faktörü
D:	Elektrot Çapı
DC:	Doğru Akım
EAO:	Elektrik Ark Ocağı
f:	Frekans
F:	Elektrot Sayısı
Fe:	Demir
FeO:	Demiroksit
G <sub>D</sub> :	Döküm Ağırlığı
G <sub>Dgm</sub> :	Değirmen Hurda Miktarı
G <sub>DRI/HBI</sub> :	Direct Reduced Iron (DRI) ve Hot Briquetted Iron (HBI) Miktarı
G <sub>H</sub> :	Hurda Miktarı
G <sub>HM</sub> :	Sıcak Metal Şarj Miktarı
G <sub>Z</sub> :	Cüruf Yapıcı Malzemelerin Miktarı
H <sub>2</sub> :	Hidrojen



H <sub>2</sub> O:	Su
Hz:	Hertz
Q:	Reaktif Güç
I(t):	Akım (Zamanın Fonksiyonu Olarak)
I <sub>o</sub> :	Optimum Ark Akımı
I <sub>s</sub> :	İkincil Akım
ID:	Akım Yoğunluğu
k:	Akım Trafosu Oranı
kA:	Kiloamper
kcal:	Kilokalori
kg:	Kilogram
kj:	Kilojoule
kV:	Kilovolt
kWh:	Kilowattsaat
L:	Endüktans
L <sub>ark</sub> :	Ark Boyu
L <sub>oks</sub> :	Oksijen Üfleme Mesafesi
LPG:	Likit Petrol Gazı
m:	Metre
mm <sup>2</sup> :	Milimetrekare
m <sup>3</sup> :	Metreküp
MgO:	Magnezyumoksit
Mn:	Mangan
MnO:	Manganoksit
mOhm:	Miliohm
M <sub>CH4</sub> :	Doğalgaz Miktarı
M <sub>L</sub> :	Lans Oksijen Miktarı
M <sub>N</sub> :	İleri Yanma Sistemi Oksijen Miktarı
MVA:	Megavoltamper
MW:	Megawatt
MWh:	Megawattsaat
Nm <sup>3</sup> :	Normal Metreküp

## VIII

O:	Oksijen
P:	Fosfor
P:	Aktif Güç
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :	Difosfatpentaoksit
P(t):	Aktif Güç (Zamanın Fonksiyonu Olarak)
P <sub>a</sub> :	Ark Gücü
P <sub>3a</sub> :	3 Faz Ark Gücü
P <sub>ortrez</sub> :	Rezistif Ortalama Güç
ppm:	Parts per Million (Milyonda Parçacık Miktarı)
R:	Direnç
R <sub>a</sub> :	Ark Direnci
R <sub>O</sub> :	Trafo + Ocak Direnci
R <sub>f</sub> :	Ocak Direnci
R <sub>t</sub> :	Trafo Direnci
R <sub>T</sub> :	Ortak Bağlantı Noktası ile Ocak Trafosu Arası Direnç
RE:	Radyasyon Şiddeti
RI:	Relatif Refrakter İndeksi
RMS:	Root Mean Square
S:	Görünür Güç
S <sub>k</sub> :	Elektrik Ark Ocağı Barasının Kısa Devre Kapasitesi
SF <sub>6</sub> :	SülfürhegzafloRID
Si:	Silisyum
SiO <sub>2</sub> :	Silisyumdioksit
SVC:	Statik Volt-Amper Reaktif Düzelticisi
t:	Ton
t <sub>şç</sub> :	Ton Sıvı Çelik
T <sub>D</sub> :	Döküm Sıcaklığı
t <sub>tap</sub> :	Dökümden Döküme Süre
TCR:	Tristör Kontrollü Reaktör
TSC:	Tristör Anahtarlmalı Kapasitör
TU:	Enerjili Sürenin Dökümden Döküme Süreye Oranı
U:	Faz-Faz Gerilimi

$U_a$ :	Ark Gerilimi
$U_e$ :	Ortak Bağlantı Noktasındaki Faz-Faz Gerilimi
UHP:	Ultra High Power (Ultra Yüksek Güç)
X:	Reaktans
$X_C$ :	Kapasitif Reaktans
$X_L$ :	Endüktif Reaktans
$X_O$ :	Trafo + Ocak Reaktansı
$X_f$ :	Ocak Reaktansı
$X_s$ :	Operasyon Reaktansı
$X_t$ :	Trafo Reaktansı
$X_T$ :	Ortak Bağlantı Noktası ile Ocak Trafosu Arası Reaktans
V:	Volt
V:	Faz-Nötr Gerilimi
$V_{ef}$ :	Efektif Gerilim Değeri
V(t):	Gerilim (Zamanın Fonksiyonu Olarak)
VA:	Volt-Amper
VAR:	Volt-Amper Reaktif
$W_R$ :	Elektrik Enerjisi İhtiyacı
$\omega$ :	Açısal Frekans
Z:	Empedans
$Z_C$ :	Kapasitör Empedansı
$Z_L$ :	Bobin Empedansı
$Z_R$ :	Direnç Empedansı
$\Omega$ :	Ohm
$\Delta U$ :	Reaktif Güç Nedeni ile Gerilim Düşümü
$\Delta Q$ :	Elektrik Ark Ocağının Reaktif Güç Yüklerindeki Değişim
$\Delta P$ (%):	Yüzde Olarak Güç Artışı
$\Delta U$ (%):	Yüzde Olarak Reaktif Güç Nedeni ile Gerilim Düşümü

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Elektrik ark ocaklarının maliyet kalemleri .....	2
Çizelge 3.1. Elektrik ark ocağı cürufunun tipik bileşimi .....	15
Çizelge 4.1. Elektrik ark ocaklarında süreç parametrelerinin değişimlerinin, ark ocağı performans değerlerine etkileri (PFEIFER ve KIRSCHEN, 2002) .....	54
Çizelge 4.2. Regülasyon kontrol tiplerinin karşılaştırmaları .....	69
Çizelge 4.3. Elektrik ark ocağı performans değerleri .....	79
Çizelge 4.4. Akım yoğunluğu değerleri .....	83
Çizelge 4.5. Oksidasyon katsayısı değerleri.....	84
Çizelge 4.6. Oksitlenme reaksiyonları ve açığa çıkan enerjiler .....	90
Çizelge 4.7. Jet brülör kullanım süresi.....	94
Çizelge 4.8. Hurda ve sıvı çelik içerisindeki element miktarları .....	95
Çizelge 4.9. Karbon ve hidrojenin 1650 °C’ deki reaksiyon enerjileri.....	102
Çizelge 4.10. İleri yanma sistemli elektrik ark ocaklarında operasyon değerleri .....	108
Çizelge 5.1. Elektrik ark ocaklarında uygulanabilecek operasyonların, sistem parametreleri üzerindeki etkileri .....	116

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Elektrik ark ocaklarının tarihsel gelişimi (PFEIFER ve KIRSCHEN, 2002) ..3	
Şekil 3.1. Elektrik ark ocağı çalışma periyodu (RAISZ, 2000) .....8	
Şekil 3.2. Elementlerin oksijen eğilimleri..... 11	
Şekil 4.1. Elektrik ark ocaklarının elektrik sistemi prensip şeması..... 19	
Şekil 4.2. Ocak sayısı ile ortak bağlantı noktası arasındaki ilişki .....20	
Şekil 4.3. Üçgen bağlantı devre şeması .....22	
Şekil 4.4. Trafo dışında üçgen kapama devre şeması .....24	
Şekil 4.5. Trafo içinde üçgen kapama devre şeması.....25	
Şekil 4.6. Sadece direnç bağlı bir sistem .....35	
Şekil 4.7. Sadece bobin bağlı bir sistem .....38	
Şekil 4.8. Güç üçgeni .....48	
Şekil 4.9. Örnek bir ark ocağı için elektrik enerjisi karşılaştırma grafiği .....55	
Şekil 4.10. Ark gerilimi ve akımının temel davranışları ( $\cos\Phi=0,95$ ) .....56	
Şekil 4.11. Ark gerilimi ve akımının temel davranışları ( $\cos\Phi=0,707$ ).....56	
Şekil 4.12. Elektrik ark ocağı prensip şeması .....57	
Şekil 4.13. Elektrik ark ocağı eşdeğer devresi .....58	
Şekil 4.14. Elektrik ark ocaklarında $R_a$ direncine göre güç değişimleri.....60	
Şekil 4.15. Reaktansın ocak kararlılığına etkisi .....63	

Şekil 4.16. Elektrik ark ocağı regülasyon sistemi histogram diyagramı (BANDIN, 2001).....	65
Şekil 4.17. Elektrik ark ocağı regülasyon sistemi girdi ve çıktıları.....	70
Şekil 4.18. Statik VAR düzelticisi devre şeması.....	74
Şekil 4.19. Statik VAR düzelticisiz sistemde birincil gerilim-zaman grafiği .....	75
Şekil 4.20. Statik VAR düzelticisiz sistemde aktif güç-zaman grafiği.....	76
Şekil 4.21. Statik VAR düzelticisiz sistemde reaktif güç-zaman grafiği.....	76
Şekil 4.22. Statik VAR düzelticisiz sistemin karakteristikleri .....	77
Şekil 4.23. Statik VAR düzelticili sistemin karakteristikleri .....	78
Şekil 4.24. Örnek bir elektrik ark ocağının cüruf köpürtme pratikleri öncesi çalışma grafikleri.....	85
Şekil 4.25. Örnek bir elektrik ark ocağının cüruf köpürtme pratikleri sonrası çalışma grafikleri.....	85
Şekil 4.26. Köpüklü cürufta ark yanması (BOWMAN, 1993).....	87
Şekil 4.27. Cüruf seviyesi ile radyasyon yoğunluğu arasındaki ilişki (BANDIN, 2001).....	88
Şekil 4.28. Cüruf köpürtme pratiğinin aşamaları (ANONYMOUS,2006) .....	89
Şekil 4.29. Elektrik enerjisi tüketiminin oksijen ile değişimi (INEGAKI, 1988) .....	91
Şekil 4.30. Örnek bir ark ocağı için oksijen kullanımının etkisi .....	92
Şekil 4.31. Yeni nesil jet brülör sistemleri (ANONYMOUS, 2003).....	93
Şekil 4.32. Elektrik ark ocakları için Sankey Diyagramı.....	100

Şekil 4.33. İleri yanma sisteminin enjektör yerleşimi .....	104
Şekil 4.34. Atık gaz ölçüm probu yerleşimi.....	106
Şekil 4.35. Örnek bir elektrik ark ocağı için atık gaz ölçümü.....	107
Şekil 4.36. İleri yanma için gerekli oksijen miktarı.....	107
Şekil 4.37. FUCHS şaft ocağı .....	110
Şekil 4.38. CONSTEEL sürekli besleme sistemi (SCHMITT, 1997).....	111
Şekil 4.39. Ark ocağı alttan döküm alma sistemi genel görünüşü .....	113

## 1. GİRİŞ

Dünyada üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık %12' sinin Demir-Çelik sektöründe tüketilmesi, bu sektörde kullanılan enerjinin büyüklüğünü ortaya koymaktadır. Bununla birlikte günümüzde çelik üretiminin artması nedeniyle, birim ürün başına harcanan enerji miktarının azaltılması çalışmaları, sektörde harcanan enerjinin büyüklüğü göz önüne alındığında hayli önem kazanmaktadır (ÇAMDALI, 1998).

Hurdanın çeliğe geri dönüşümü için günümüzde kullanılan proses, Elektrik Ark Ocağı (EAO) prosesidir. Gelişen teknolojiler ile birlikte, ilk yatırım maliyetlerinin çok düşük ve daha basit bir işletme prosesine sahip olmalarından dolayı dünya çelik üretiminde EAO' lar, %30' lara ulaşan bir pay elde etmiştir. Türkiye' de ise bu oran %70' lerin üzerindedir (ANONİM, 2006). Bu nedenle ark ocaklarındaki enerji iyileştirme çalışmaları gün geçtikçe hız kazanmıştır. Yapılan araştırmalar göstermiştir ki EAO' larda çelik üretiminde kullanılan enerjinin yaklaşık %40' ı çeşitli nedenler ile kaybolmaktadır. Bu kayıpların azaltılması için yapılacak çalışmalar sonucunda tasarruf edilecek enerji miktarı da doğal olarak oldukça yüksek olacaktır.

Elektrik ark ocaklarında enerji tasarrufu için başlıca şart üretimin hızlandırılmasıdır. Bu, ocağın elektrik arkının oluştuğu ve oluşmadığı sürelerinin azaltılması sonucunda gerçekleşebilecektir. Bu sürelerin azaltılabilmesiyle, birim ürün başına düşen elektrik enerjisi tüketiminin azalması hedeflenmektedir. Çünkü ocağa verilen toplam enerjinin sıvı çeliğe aktarılamayan kısmı yani kayıp enerji, güçlü bir şekilde zamanın fonksiyonudur ve dökümden döküme olan sürenin azaltılması bu kayıpların da azaltılması anlamına gelecektir.

Çalışmada görüleceği üzere yapılmak istenen bazı değişiklikler, bir takım problemlere neden olabilmektedir. Bu nedenle uygulanmak istenilen yöntem, ortaya çıkarttığı problemin çözümü içinde çalışılmasına neden olmuştur.

Bu tez çalışmasında, EAO' larda özellikle enerji tasarrufu ve üretim artışları üzerindeki gelişmeler ve yapılan çalışmalar hakkında bilgilendirme verilmesi amaçlanmıştır.



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Elektrik ark ocaklarının, sahip oldukları yüksek enerji verimleri ve daha düşük maliyetli sıvı çelik üretimleri nedeniyle, yüzyılın son çeyreğinde çelik üretimindeki yeri önemli ölçüde artmıştır. İlk ticari ark ocağı 1906 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde kurulduktan sonra özellikle 2. Dünya Savaşı sırasında artan çelik ihtiyacına paralel olarak ark ocaklarının sıvı çelik üretimindeki payı sürekli olarak artmış, 1906 yılında 8,4 milyon ton, 1995' de 42,4 milyon ton, 2005 yılında ise 359 milyon ton seviyesine ulaşmıştır (SCHMITT, 1997; EMİROĞLU, 2005). Ham çelik üretiminde EAO' ların üretim miktarındaki bu hızlı ve sürekli artışın nedenleri olarak aşağıdaki faktörler gösterilmektedir (EMİROĞLU, 2005):

- Birim kapasite için yatırım tutarı, yüksek fırın prosesine göre daha düşüktür.
- Yatırım süresi daha kısadır.
- Teknolojik gelişmeler sonucu üretim maliyetleri azalmıştır.
- Küçük ve esnek üretim özelliği vardır.

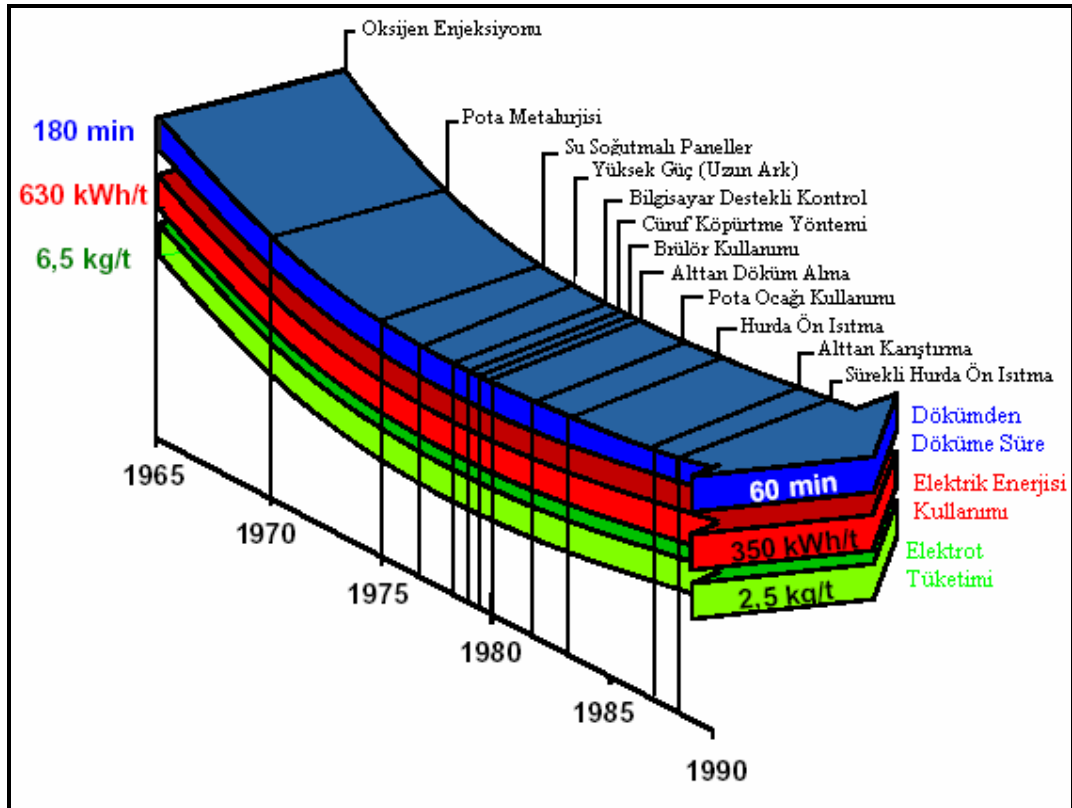
Elektrik ark ocaklarında çelik üretimi için maliyet kalemleri Çizelge 2.1.' de verilmektedir.

Çizelge 2.1. Elektrik ark ocaklarının maliyet kalemleri

<b>Maliyet Kalemi</b>	<b>Oran</b>
Hammadde (Hurda) Maliyeti	%65
Elektrik Enerjisi Maliyeti	%9
İşçilik Maliyeti	%6
Refrakter Maliyeti	%5
Elektrot Maliyeti	%3
Atık Toz Bertaraf Maliyeti	%1,4
Oksijen Tüketimi Maliyeti	%1,3
Bakım Maliyetleri	%1,2
Diğer	%8,1

Görüldüğü üzere elektrik enerjisi tüketimi, ikinci sırayı alan maliyet kalemidir. Bu büyük maliyetten tasarruf edilebilmesi için özellikle son 35 yıldır EAO' lar üzerinde çalışmalar sürdürülmektedir. 1943 yılının modern sayılan 70 ton döküm kapasiteli bir ark ocağında, trafo gücü 12–15 MVA, trafo ikincil gerilimi ise 200–300 V civarındaydı. Bunlardan dolayı da, ergitme süresi çok uzun, düşük güç girdisi ve uzun ergitme süresi sonucu olarak da ocağın enerji kayıpları çok yüksek, verimlilik düşüktü.

Ocaklarda elektrik enerjisi kullanımının azaltılabilmesi için, elektriksel sistem tasarımı, operasyon pratikleri ve ocağa enerji girdisi için gerekli sistemler üzerinde çalışılmıştır. Elektrik enerji girdisinin iyileştirilmesi, oksijen tüketimi ve kimyasal enerji girişinin artırılması, hurda ön ısıtma ve ileri yanma sistemlerinin kullanılmasıyla elektrik enerjisi tüketiminde ciddi azalmalar sağlamıştır. (BLISS, 2002). Şekil 2.1' de, EAO' larda yapılmış olan iyileştirmeler ve bunların etkileri gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Elektrik ark ocaklarının tarihsel gelişimi (PFEIFER ve KIRSCHEN, 2002)

Görüldüğü üzere ark ocaklarının sıvı ham çelik üretiminde payının artmaya başladığı 1965 yılında, 180 dakika olan dökümden döküme süre ve 630 kWh/tsç olan elektrik enerjisi kullanımı, çeşitli sistemlerin devreye girmesiyle birlikte günümüzde, 60 dakikalık döküm süresine ve 350 kWh/tsç civarında elektrik enerjisi kullanımına kadar iyileştirilmiştir. Bu iyileştirmelerin bir faydası da elektrot tüketiminde olmuş ve tüketim miktarı 6,5 kg/tsç' den 2,5 kg/tsç seviyelerine gerilemiştir. Ark ocaklarında yapılan iyileştirmeler şu şekilde sıralanabilir (SCHMITT, 1997):

- Dekarbürizasyon ve hurda kesimi için oksijen enjeksiyonu yapıldı.
- Alaşımlama işlemleri için potaların kullanımı sağlandı.
- Su soğutmalı panellerin kullanılmasıyla refrakter tüketimi azaltıldı.
- 600–1000 kVA/tsç güce ve 900 V. üzeri ikincil çıkış gerilimine sahip, yüksek güçlü trafolar kullanılmaya başlandı.
- Güç isteğine ve ocak şartlarına bağlı olarak, otomatik kademe değişimi ve elektrik güç programının optimizasyonu için bilgisayar kontrollü sistemler kullanılmaya başlandı.
- Su soğutmalı panellerin kullanıldığı gövde ve kapakta, ark radyasyonunun etkilerini azaltabilmek için cüruf köpürtme pratikleri geliştirildi.
- Enerji girişinin desteklenmesi ve ergitme veriminin artırılması için brülörler kullanılmaya başlandı.
- Döküm süresini ve sıcaklık kayıplarını azaltmak, potalardaki cüruf birikimini engellemek için alttan döküm alma sistemleri geliştirildi.
- Pota ocaklarının kullanımıyla, saflaştırma ve alaşımlama işlemlerinin bir kısmı ocak dışında yapılarak, dökümden döküme süreler kısaltıldı.
- Atık gazlardan enerji geri kazanımı için hurda ön ısıtma sistemleri geliştirildi.
- Hurda ergimesini hızlandırmak ve sıcaklık dağılımını homojen hale getirmek için ocak tabanından asal gaz üflenmesi yoluyla banyonun karıştırılması sağlandı.
- Elektrik enerjisi kullanımının mümkün olmadığı şarj alma periyodunun yerine sürekli beslemeli hurda ön ısıtma sistemleri geliştirildi.
- Ark kararlılığının sağlanabilmesi için gerilim dalgalanmalarını dengeleyecek sistemler kullanılmaya başlandı.

### **3. MATERYAL VE YÖNTEM**

Bu tez çalışmasında, özellikle elektrik ark ocaklarında elektrik enerjisi tüketiminin azaltılabilmesi için kimyasal enerji kullanımı üzerine yapılabilecek iyileştirmelere, güç girdisinin artırılması amacıyla da elektrik sistemi üzerine yapılan çalışma ve araştırmalara yer verilmektedir. Son yıllarda kullanılmaya başlayan jet brülör sistemlerinin kimyasal enerji üzerindeki etkisi ve statik volt-amper reaktif düzelticisi sistemlerinin güç girdisine olan etkileri, sistemlerin devreye alınıp devre dışı bırakılmaları ve her iki durum esnasında ocak çalışma değerlerinin mevcut ölçüm sistemlerinden alınması suretiyle değerlendirilmiştir. Bunun yanında, yatırım maliyetlerinin yüksekliği nedeniyle deneysel çalışma şansı bulunamayan, ancak günümüz modern ocaklarında uygulanan farklı yöntemlerinde teknik değerlendirmeleri tezde sunulmaktadır.

Elektrik ark ocaklarında dökümden döküme sürenin kısaltılarak üretimin artırılması hedeflenmiş, bunun içinde ocakların dökümden döküme olan süresini belirleyen iki dönem üzerinde çalışmıştır:

- Elektrik arkının oluşturulduğu dönemler (enerjili süreler)
- Elektrik arkının oluşturulmadığı dönemler (enerjisiz süreler)

Enerjili süreler içerisinde ergitme, saflaştırma ve numune alma işlemleri gerçekleştirilmektedir. Enerjisiz süreler içerisinde ise, şarj alma, döküm devirme, ocağın yeni döküme hazırlanması, elektrot ekleme ve uzatma işlemleri yer almaktadır.

#### **3.1. Elektrik Ark Ocaklarında Üretim**

Elektrik ark ocaklarında, hurdadan sıvı çelik üretimine kadar olan süreç sırasıyla şu bölümlere ayrılabilir:

- Ocağa şarj
- Ergitme
- Saflaştırma
- Cüruf giderme
- Döküm devirme
- Ocağın yeni döküme hazırlanması

### 3.2. Ocağa Şarj

Bu süreç hurda şarjının hazırlanmasıyla başlar. Şarjın hazırlanması sırasında hurdayı, sadece kimyasal olarak ergimenin gerçekleşip sıvı çeliğe dönüşecek hammadde olarak düşünmemek gerekir. Ocak şartlarına uygun olarak hazırlanmış bir hurda şarjı şu etkilere sahiptir:

- Ocak regülasyonunun düzgün bir şekilde çalışması,
- Kararlı bir ark için gerekli olan sıvı çelik oluşumunun hızlanması,
- Ocak gövde ve kapağının radyasyondan korunması,
- Hurda çökmelerinin azaltılması ve bu sayede elektrot kırılmalarının engellenmesi,
- Büyük hurda parçalarının jet brülörlerin önüne gelip, gaz akışını kesmesinin önlenmesi.

Kullanılacak hurdalar, kimyasal kompozisyon ve geometri olarak iki ana sınıfa ayrılabilir. Kimyasal kompozisyon olarak yüksek alaşımlı çeliklerden, karbon çeliklerine kadar geniş bir aralık bulunurken, geometri olarak da kıyılmış değirmen tür hurdadan, büyük boyutlu hurdalara kadar geniş bir çeşitlilikte hurda bulunmaktadır.

Hurda şarjının yapılabilmesi için ocak kapağı ve elektrotlar, hidrolik silindirler vasıtasıyla kaldırılarak yana döndürülür. Şarj vinciyle hurda arabasından alınarak ocağın üzerine getirilen hurda sepetlerinin alt bölümü, iki yana doğru açılır ve hurda ocağa boşaltılır. Şarj vinci, boşaltılan sepeti tekrar hurda arabasının üzerine koyar. Ocak

kapağı ve elektrotlar, ocak üzerindeki yerine geri döndürülüp ark oluşumunun başlatılabilmesi için aşağıya indirilir.

Ocaklarının tasarımında, minimum şarj sayısı hedeflenmektedir. Çünkü şarj anı, sıvı çelik üretimi için ölü zamandır. Bu esnada ocakta ark oluşturulmamakta ve ergitme yapılamamaktadır. Bu zamanın azaltılabilmesi, ocağın veriminin artırılmasını ve dökümden döküme olan sürenin azaltılmasını sağlar. Ocağın yapısal boyutları hesaplanırken, sadece sıvı çelik kapasitesi değil, kullanılacak hurda yoğunluğu ve yapılacak şarj sayısı da dikkate alınmalıdır. Standart tip ocaklarda hedeflenen şarj sayısı ikidir. Bazı operasyonlarda bu sayısı tek şarj ile sınırlanmıştır. Sürekli şarj yapılan ocaklarda ise şarj sırasında ocak çalışmasına devam eder ve herhangi bir kayıp söz konusu olmaz.

Şarj esnasında ocak kapağının açılması, doğal olarak bir miktar enerji kaybına neden olmaktadır. Bu kayıp her işlemde yaklaşık olarak 10–20 kWh/ton sıvı çelik (tsç) olarak hesaplanmaktadır.

Hurda sepetlerinin içerisine, ergitme sırasında yapılacak olan kireç ve karbon ilavesini desteklemek için hurda ile birlikte kireç ve karbonda koyulabilmektedir.

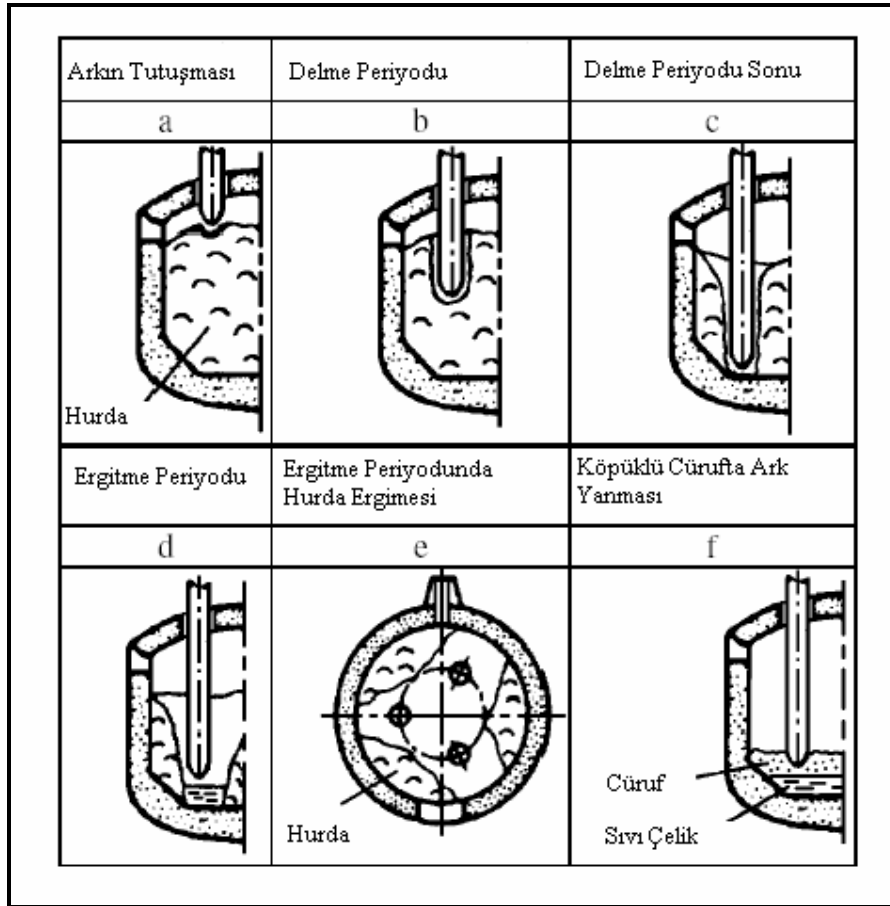
### **3.3. Ergitme**

Elektrik ark ocaklarında hurdanın ergitilmesi işlemi temel olarak grafit elektrotlar ile hurda arasında oluşturulan elektrik arkı sayesinde gerçekleştirilir. Normal kapasitedeki ark ocaklarının elektrik güçleri, ocağın büyüklüğüne bağlı olarak 50–120 MW arasındadır. Hurdanın ergitme sıcaklığı, kullanılan hurdanın kimyasal kompozisyonuna bağlı olmak şartıyla 1500–1550 °C arasında değişir.

Şarjı müteakip ilk çalışma esnasında, elektrotlara düşük kademede gerilim uygulanır ve elektrot izdüşümünde hurda delinerek bir oyuk açılmak istenir. Delme periyodu olarak adlandırılan bu işlemin nedeni, yüksek gerilim ile oluşacak güçlü ark radyasyonunun, ocak panellerine zarar verme riskinin bulunmasıdır. Elektrotlar hurdadaki bu oyukun içine girdikten sonra gerilim kademesi yükseltılarak uzun ark boyu ile çalışmaya geçilir. Gerilimin artırılması, ark radyasyonunun da artırılması

sonucunu doğuracaktır. Ark, hurdanın içerisinde tam güç ile oluşturulduğunda, etrafı hurda ile çevrili olduğundan öncelikle kendisini çevreleyen hurdayı ergitmek isteyecek, dolayısıyla gövde ve kapak ark radyasyonundan korunacaktır.

Ergitmenin hızlı olarak gerçekleştirilmesi için hafif hurdalar şarjın üzerine yerleştirilir. Yaklaşık %15' lik hurda bu giriş periyodunda ergitilir. Birkaç dakika içinde elektrotlar hurdanın oyulmuş kısmına daldırılarak, yüksek gerilim-uzun ark boyu mantığıyla çalışılmaya başlanır. Uzun ark boyu, ark radyasyonu değerini artırarak hurdaya olan güç transferini en büyük değere getirir ve ocak tabanında bir sıvı çelik havuzu oluşmasını sağlar. Şekil 3.1' de elektrik ark ocağının çalışma periyodu şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Elektrik ark ocağı çalışma periyodu (RAISZ, 2000)

Ergitmenin başlangıcında ark değişken ve karasızdır. Elektrot hareketleriyle birlikte akımın değişkenliği gözlenmelidir. Ocak atmosferinin ısınmasıyla ark, kararlı hale gelmeye başlar. Sıvı çelik havuzunun oluşması sonrasında ark kararlılığı artar ve ortalama güç girdisi yükselir.

Hurdanın ergitilmesine yardımcı olmak amacıyla ocağa ayrıca kimyasal enerji girişi de sağlanır. Bunun için brülörler ve oksijen lansları kullanılır. Brülörler, oksijen kullanarak LPG veya doğalgaz yakarlar. Açığa çıkan ısı, hurdaya alev radyasyonu ve konveksiyonu yollarıyla iletilir. Oksijen lanslarıysa hem büyük boyutlu hurda parçalarını kesebilmek, hem de saflaştırmayı sağlamak için ocağa saf oksijen verilmesinde kullanılır. Hurdanın kesilebilmesi için gerekli güçlü ısı, oksijenin sıcak hurda ve yanan demir ile tepkimeye girmesi sonucu elde edilir.

Ocakta sıvı çelik havuzu oluştuğu zaman oksijen, direkt banyonun içine üflenerek sıvı çelik havuzundaki alüminyum, silisyum, mangan, fosfor, karbon ve demir gibi elementler ile reaksiyona girmesi sağlanır. Bu reaksiyonların tamamı ekzotermiktir ve ocağa verilebilecek olan kimyasal enerjinin önemli bir bölümü bu reaksiyonlardan elde edilir. Reaksiyonlar sonucu metal oksitler oluşarak cüruf fazına geçerler. Bu cüruf, daha sonraki dönemde ocaktan uzaklaştırılır. Bunun yanında oksijenin karbon ile reaksiyonu sonucu karbonmonoksit (CO) gazı oluşur ki bu gaz, ya bazı modern ocaklarda olduğu gibi ocağa ilave oksijen verilmesiyle ocak içinde ya da ocak içinden emilerek yanma odası denilen ikinci bir bölümde yakılır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, ocağa gereğinden fazla miktarda oksijen üflenirse, fazla oksijenin sıvı çelik içerisine nüfuz ederek, çelik kalitesinde problemlere sebep olma riskidir. Eğer gereğinden az miktarda oksijen üflemesi olursa yanmamış karbonmonoksit gazı ocağın toz toplama sistemi tarafından emilir. Emilen gaz ya kontrolsüz bir yanmaya maruz kalır ya da toz toplama sistemi bacasından yakılmadan atılır. Her iki durumunda sakıncaları mevcuttur. Kontrolsüz bir biçimde yanacak gaz, toz toplama sisteminin torba filtrelerinin hasarlanmasına neden olabilir. Yanma gerçekleşmeyip, karbomonoksit gazı toz toplama sistemi bacasından atılırsa da çevresel sorunlar meydana gelecektir. Bu şartlar altında hassas ölçüm sistemine sahip olmayan ocaklarda bu riskler göze alınmaz ve ocak dışında oluşturulan yanma odasında, bu yanma işlemi kontrollü bir biçimde gerçekleştirilir.

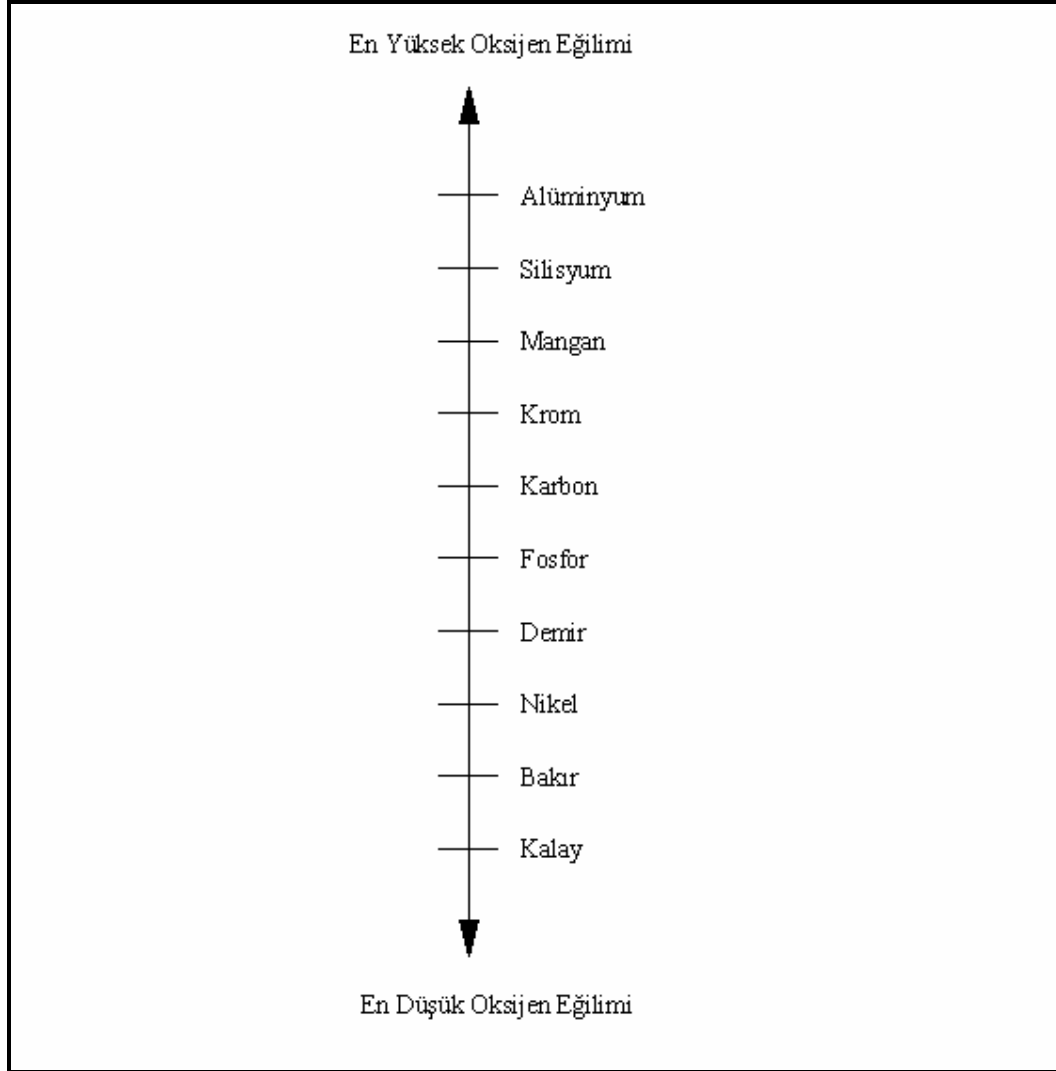


Ocağa ikinci şarjın yapılabilmesi için yeterli miktarda hurdanın ergitilmiş olması gerekmektedir. Şarj işlemi birinci şarjda olduğu gibi yapılır. Son şarj edilen hurdalar da ergitildiği zaman, gövde ve kapak yine radyasyona karşı korumasız hale gelir. Bu durumda eğer önlem alınmaz ise trafo ikincil gerilimi azaltılmak zorundadır. Bu da ocağa verilecek elektrik enerjisi gücünün azalmasına ve dökümden döküme sürenin uzamasına yol açacaktır. Bunun engellenmesi için ocak cürufunun köpürtülmesi pratiği geliştirilmiştir. Bu sayede ark, köpüklü cüruf içinde kalacak, kapak ve gövdenin ark radyasyondan etkilenmemesi sağlanacaktır.

### **3.4. Saflaştırma**

Elektrik ark ocaklarında saflaştırma operasyonları çelikten, karbon, mangan, silisyum, alüminyum, kükürt, fosfor gibi elementlerin uzaklaştırılmasını amaçlar. Saflaştırma işlemleri, ergitme işleminden sonra yapılır ve tamamen oksijenin mevcudiyetine bağlıdır. Sıvı çelik içerisinde bulunan elementlerin, hangi sıcaklıkta hangi sırayla okside çevrileceği bilgisi saflaştırma işlemi için önemlidir. Çünkü oksijene eğilimi demirden daha düşük olan elementler hurdada mevcut ise ve bu elementler hurdadan ayıklanmadan ocağa şarj edilirse, elde edilmek istenilen sıvı çelik analizinin yakalanması mümkün olmayacaktır (PUJADAS ve McCAULEY, 2004).

Sıvı çelik banyosuna enjekte edilen oksijen, öncelikle sıvı çelik içerisinde çözülmüş, oksijen eğilimi en yüksek olan elementi oksitler. Bu elementin sıvı banyo içerisindeki miktarı sınır değere ulaştınca, ikinci en yüksek oksijen eğilimi olan element oksitlenmeye başlar ve oksitlenme reaksiyonları bu şekilde devam eder. Çeşitli elementlerin oksijen eğilimleri sırasıyla Şekil 3.2.' de verilmiştir.



Şekil 3.2. Elementlerin oksijen eğilimleri

Görüldüğü üzere oksijen eğilimi en düşük element kalay, en yüksek element ise alüminyumdur. Bakır ve kalayın oksijen eğilimleri demirden daha düşük olduğu için ne kadar oksijen enjekte edilirse edilsin hiçbir zaman oksitlenemezler. Çünkü çelik bir demir alaşımıdır ve amaç çelik üretmektir. Bakır ve kalayı oksitleyebilmek için demirin tamamının oksitlenmiş olması gerekmektedir. Bu nedenle eğer bakır ve kalay miktarı sınırlı bir çelik üretilecek ise (tellik, elektrotluk, halatlık çelikler gibi) rafinasyon olanağı olmadığı için düşük bakır ve kalay içeren hurda kullanma zorunluluğu vardır.

Alüminyum, silisyum, mangan, krom ve demir, katı fazda oksitler oluştururken karbon, gaz fazında oksit oluşturur.

Fosfor ve kükürt, hurda çelikte izin verilen miktarlardan daha yüksek oranlarda bulduklarından dolayı uzaklaştırılmak zorundadırlar. En büyük problem, fosforun uzaklaştırılması için uygun olan şartların, kükürdün uzaklaştırılması için gerekli olanların zıttı olmasıdır. Cürufta tutulabilecek fosfor miktarı, banyo sıcaklığının, cüruf bazikliğinin ve cüruftaki demiroksit (FeO) seviyesinin bir fonksiyonudur. Yüksek sıcaklık veya düşük FeO seviyelerinde cüruf fazına ayrılmış olan fosfor, sıvı çelik banyosuna geri dönecektir. Bu nedenle fosfor, saflaştırma periyodunda mümkün olabildiğince erken ocaktan uzaklaştırılmalıdır. “Hot Heel” pratiği denen uygulama bunun için oldukça başarılıdır. Bu uygulamada oksijen, banyo sıcaklığı henüz düşükken banyoya üflenir. Isıtmadan önceki cürufun yüksek FeO seviyesine sahip olması, fosforun uzaklaştırılmasına kolaylaştırıcı etki yapar. Yüksek cüruf bazikliği de (yüksek kireç içeriği) fosforun uzaklaştırılmasına yardımcı olur. Ancak cürufun kireç ile doyurulmamasına dikkat edilmelidir. Bu durum cürufun viskozitesin yükselmesine sebep olur ki bu da akışkanlığı bozarak cürufun etkinliğini azaltır.

Cürufun sıvılaştırılması için banyonun içerisine fluşpat eklenebilir. İnert gaz ile banyonun karıştırılması da etkili bir yöntemdir. Bu sayede cüruf–metal ara yüzeyi sürekli olarak yenilenir ve bu da reaksiyon kinetiklerin artırılmasını sağlar.

Belirli bir çelik kalitesi için düşük fosfor seviyesine ihtiyaç var ise bu genellikle sarj edilecek olan hurdanın özel seçilmesi ile sağlanır. Çünkü fosfor seviyesinin EAO’ da indirgenme seviyesi %20–50 arasındadır.

Kükürt, cürufta sülfat çözeltisi olarak ayrıştırılabilir. Metal ve cüruf arasındaki kükürt ayrışması cüruf kimyasına bağlıdır ve çeliğin düşük oksidasyon seviyeleriyle desteklenir. EAO’ da kükürdün uzaklaştırılması, banyonun oksidasyon seviyesinin oldukça yüksek olduğu modern uygulamalarda çok zordur ve indirgenme seviyesi %3–5 arasındadır. Bu sebepten dolayı desülfürizasyon, çelik yapımının indirgeme fazında yani döküm sırasında ve pota ocağı operasyonları sırasında çok daha etkin biçimde gerçekleştirilir. Bu aşamalarda banyo çok düşük oksidasyon seviyelerine sahiptir ve kükürt indirgenmesi %20–100 arasında gerçekleşir.

Sıvı çelik içerisindeki mangan, FeO ile reaksiyona girerek banyoya yeniden demir dönüşümü sağlar (Eşitlik 3.1.). Bu, ocak verimliliğinin artmasını sağlayan bir reaksiyondur. Mangan, banyoda %0,06’ ya kadar azaltılabilmektedir.



Karbon ile oksijenin reaksiyona sokulmalarının başlıca sebebi karbonmonoksit üretiminin sağlanmasıdır. CO, banyoya daha düşük maliyetli kimyasal enerji girişi sağlar. EAO operasyonlarında C ile O' nun reaksiyonu ocağa net olarak %20–30 arasında kimyasal enerji girişi sağlamaktadır (ANDERSON, 2002).

Karbonmonoksit oluşumu, köpüklü cüruf içinde gereklidir. Cürufun köpürtülmesi sayesinde elektrik arkının saklanması, açık ark sonucu oluşabilecek azot oluşumunu engeller. Bu yapılmaz ise oluşan azot, çözünerek çeliğin içine girebilir. Eğer CO, çelik banyosunda oluşursa bu, azot ve hidrojenin çelikten ayrılmasına yardımcı olur. Çelikteki azot seviyesi ocakta 50 ppm' in altına kadar indirilebilir.

Altan döküm alma yöntemi de düşük azot seviyelerinin korunabilmesine yardımcı olan bir uygulamadır. Bu uygulamada döküm devirme sırasında ocaktan potaya olan sıvı çelik akışı hızlı ve kesintisizdir. Bu da atmosfer ile temas süresini ve temas yüzey alanını azaltıp, azot seviyesinin korunmasına yardımcı olur.

Saflaştırma operasyonu sonunda banyo sıcaklığı ölçülür ve banyodan numune alınır. Eğer sıcaklık düşük ise banyoya yeniden güç verilerek sıcaklığın istenilen seviyeye ulaştırılması sağlanır.

### 3.5. Cüruf Giderme

Genel olarak cüruflar asidik ve bazik karakterli olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır. Cüruf içerisinde bulunan CaO ve SiO<sub>2</sub> oranları, cürufun karakterinin belirlenmesi için kriterdir. Buna göre;

- $\frac{\%CaO}{\%SiO_2} < 2$  ise bu tür cüruflar asidik karakterli cüruf

- $\frac{\%CaO}{\%SiO_2} \geq 2$  ise bu tür cüruflar bazik karakterli cüruf olarak isimlendirilir.

Asidik cüruflar, rafinasyon yapılmayan ve yalnız eritmek amacıyla kullanılan sistemlerde bulunur. Buna örnek olarak dökümhaneler ve sürekli döküm cürufları gösterilebilir.

Bazik cüruflar ise, fosfor ve kükürt rafinasyonu yapılan sistemlerde bulunur. Ark ocaklarında çalışılması gereken cüruf bazik karakterli cüruftur. Bazik cürufu oluşturan fazlar şu şekilde sıralanabilir (ANONİM, 1991):

- Cüruf yapıcılardan geçen fazlar
- Sıvı metalin oksitlenmesi sonucu cürufa geçen fazlar
- Refrakter aşınması ile cürufa geçen fazlar
- Cüruf akışkanlığı için ocağa verilen malzemelerden geçen fazlar

Bazik cüruflar kendi içerisinde de kullanım amacına göre ikiye ayrılır:

- Bazik oksitleyici cüruflar
- Bazik indirgeyici cüruflar

Bazik cüruf içerisindeki  $\%FeO > \%10$  ise bazik oksitleyici cüruf olarak adlandırılır. Oksitleyici cürufta  $\%FeO = 10-45$  arasında değişmektedir. Bu tür cürufla çalışılan sistemlerde, silisyum ve mangan gibi elementler önce cüruf içerisindeki oksijen eğilimi daha zayıf olan FeO ile reaksiyona girmekte, bunun sonucunda da sıvı banyo içerisinde çözünen Si ve Mn miktarı daha az olmaktadır. Bu cüruflar alüminyum ve ferroalyajları oksitlediği için oksitleyici cüruf olarak adlandırılır. Fosfor rafinasyonu için bu tür cüruf kullanılmaktadır.

Bazik cüruf içerisindeki  $\%FeO + \%MnO < \%5$  ise bazik indirgeyici cüruf olarak adlandırılır. Fosfor rafinasyonu için EAO' dan cürufun çekilmesi sonrası yeni kireç ilavesiyle oluşturulan cüruf, indirgeyici cürufa iyi bir örnektir.

Ocağın refrakter cinsi ile cüruf cinsi arasında doğrudan ilişki vardır. Proses sırasında kullanılan cüruf cinsi ile bu cürufun temas ettiği refrakter cinsinin aynı karakterli olması gerekmektedir. EAO operasyonu bazik karakterli cüruf ile gerçekleştirildiğinden dolayı kullanılan refrakterinde, magnezit ve dolomit cinsi bazik karakterli olması gerekmektedir (ANONİM, 1991).

Fosforun, ısıtma operasyonu esnasında olabildiğince erken oksitlenerek cüruf fazına geçirilmesi gerekmektedir. Oluşan bu fosfor içerikli cüruf, ters reaksiyon gerçekleşmeden ocaktan alınmalıdır. Bunun için ocak geriye yatırılır ve cüruf, cüruf kapısından dışarı dökülür.

Çizelge 3.1. EAO cürufunun tipik bileşimini göstermektedir.

Çizelge 3.1. Elektrik ark ocağı cürufunun tipik bileşimi

Bileşim	Kaynak	Oran (%)
CaO	Şarj	40–60
SiO <sub>2</sub>	Oksit Üretimi	5–15
FeO	Oksit Üretimi	10–30
MgO	Refrakter Aşınması	3–8
MnO	Oksit Üretimi	2–5
CaF <sub>2</sub>	Şarj	<0,1
Kükürt	Çelikten Absorbe	<0,1
Fosfor	Oksit Üretimi	<0,1

Cüruf köpürtme operasyonu sırasında cürufa karbon enjekte edilir. Bu sayede hem cüruftaki FeO miktarı azalır ve sıvı çeliğe Fe döngüsü olur, hem de proste CO üretilir ki bu da cürufun köpürtülmesi için gereklidir (Eşitlik 3.2.).



### 3.6. Döküm Devirme

Elektrik ark ocaklarında hurda ergitildikten sonraki ikinci hedef çeliği belirli bir saflık derecesine ulaştırmaktır. Bu sağlandığı zaman döküm deliğinin açılması ve ocağın deliğin altında bulunan potaya doğru yatırılmasıyla sıvı çelik, potaya boşaltılır. Dökümün alınması sırasında ve sonrasında potaya, arzulanan çelik kalitesinin yakalanması için gerekli olan alaşım elementleri verilir. Ayrıca çelikteki oksijen seviyesini azaltabilmek için oksit gidericiler de ilave edilir. Genel oksit gidericiler ferrosilis formunda silisyum ve alüminyumdur.

Döküm periyodu sırasında olabildiğince az cürufun ocaktan potaya geçmesi istenir. Bu nedenle alttan döküm alma sistemli ocaklar, hem döküm devirme hızının yüksek olması hem de çelik akışının kesintisiz olması nedeniyle tercih edilmektedirler.

Potaya alınan çeliğin hava ile temasının önlenmesi için pota üzerinde bir koruyucu tabaka oluşturulması gerekmektedir. Pota ocağındaki operasyonlar için kalsiyumalüminat tabakası, sülfür kontrolü için de iyi bir uygulamadır.

### 3.7. Ocağın Yeni Döküme Hazırlanması

Ocağın yeni döküme hazırlanması, dökümün devrilmesini izleyen ve ocağın yeniden şarj almasına kadar geçen süreçtir. Bu süreçte kapak ve elektrotlar kaldırılır, ocak refrakteri hasarlanmalara karşı kontrol edilir. Eğer gerekirse refraktere tamir yapılır. Tamirler, tamir harçlarının basınçlı hava ile refrakter yüzeyine püskürtülmesi suretiyle gerçekleştirilir. Modern ocaklarda su soğutmalı panel kullanımının artırılmasıyla, ocağın refrakter kaplı yüzey alanının azaltılması sağlanmış ve bu sayede refrakter hasarlanma tehlikesi de azaltılmıştır.

Ocak tabanı yaklaşık 2–6 haftalık dönemlerde, yeni refrakter ile örülmüş ve döküme hazır hale getirilmiş yedek taban ile değiştirilerek, zorunlu olan refrakterin yenilenmesi işleminin çok daha kısa sürede yapılması sağlanır.

Ocağın yeni döküme hazırlanması sürecinde ayrıca döküm deliğine, yeni döküme hazırlık olarak döküm kumu doldurulur. Kumun bileşimi, olivin ve bir miktar karbon karışımıdır. Döküm alınırken döküm deliği açıldığında kumun kendiliğinde boşalıp, sıvı çelik akışının başlaması beklenir. Ancak bunun gerçekleşmediği ve kumun dökülemediği durumlarda olabilir. Bu durumda, döküm deliğine bir boru yardımıyla alttan oksijen üflenir. Kumun içindeki karbon, oksijenle reaksiyona girerek, yanar. Karbonun yanmasıyla oluşan boşluklar, kumun hareketlenip, boşalmasına neden olur ve döküm deliği açılır.



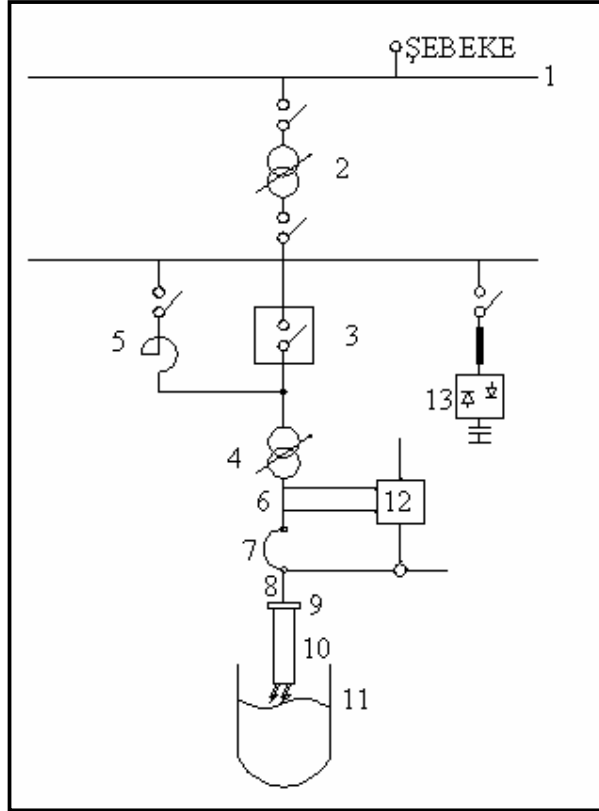
## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Elektrik Ark Ocaklarının Elektrik Sistemi

Elektrik ark ocaklarının elektrik sistemi, birincil ve ikincil devreler olarak iki ana bölüme ayrılmaktadır. Bu bölümlerin sınır çizgisi ocak trafosudur. Ulusal elektrik şebekesinden başlayıp, ocak trafosu girişine kadar olan bölüm birincil devre, ocak trafosundan itibaren başlayıp elektrotlara kadar olan bölüm ikincil devre olarak isimlendirilir. Genel uygulamalar göz önüne alındığında, devrelerin elemanları Őu şekilde sıralanabilir:

- Birincil Devre:
  - Ortak Bağlantı Noktası
  - Ara Trafo
  - Ocak Şalteri
  
- İkincil Devre:
  - Ocak Trafosu ve Kademe Şalteri
  - Şok Bobini
  - İkincil Çıkış Baraları
  - Yüksek Akım Kabloları
  - Akım İletken Kollar
  - Elektrot Tutucu Penseler
  - Elektrotlar

Şekil 4.1.' de elektrik ark ocaklarının prensip devre Şeması görölmektedir. Burada ocağın, kararlı bir ark oluşumu için ihtiyaç duyduğu sistemler gösterilmiştir.



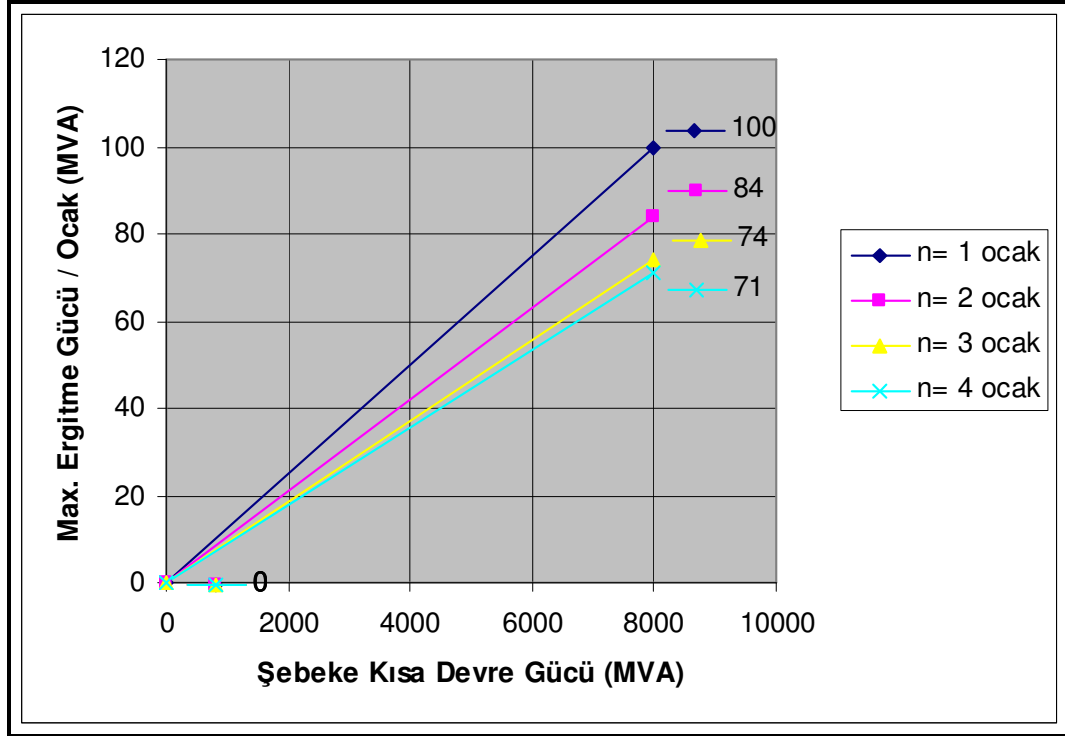
1. Ortak Bağlantı Noktası
2. Ara Trafo
3. Ocak Şalteri
4. Ocak Trafosu ve Kademe Şalteri
5. Şok Bobini
6. İkincil Çıkış Baraları
7. Yüksek Akım Kabloları
8. Akım İletken Kollar
9. Elektrot Tutucu Penseller
10. Elektrotlar
11. Elektrik Ark Ocağı
12. Regülasyon Sistemi
13. Düzeltici

Şekil 4.1. Elektrik ark ocaklarının elektrik sistemi prensip şeması

#### 4.1.1. Ortak Bağlantı Noktası

Ortak bağlantı noktası (OBN), elektrik ark ocaklarının ulusal şebekeye bağlandığı noktadır. Ark ocağının büyüklüğü ile bu nokta arasında yakın bir ilişki vardır. Bir bölgeye ark ocağı kurulması planlandığı zaman ilk araştırılması gereken konu, mevcut elektrik şebekesinin dayanıklılığının, yani elektriksel kısa devre gücünün yeterli olup olmadığıdır. Türkiye' nin de dâhil olduğu pek çok ülke, ark ocaklarıyla benzer darbeli ve düzensiz yükler çeken kuruluşları, aynı baraya bağlayarak, diğer darbesiz ve düzenli çalışan tüketicilerden ayırmışlardır. Darbeli ve düzensiz yük kullanıcılarının bağlandığı bu baraya "kirli bara" adı verilmektedir. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki, EAO' ların aynı baraya bağlı diğer tüketicileri etkilememesi için OBN' nin kısa devre gücünün, ocak trafosu gücünün 80–100 kat üzerinde olması

gerekmektedir. Şekil 4.2.' de birden fazla ark ocağının bağlandığı OBN için, ocak sayısı–ortak bağlantı noktası kısa devre gücü arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Ocak sayısı ile ortak bağlantı noktası arasındaki ilişki

Görüldüğü üzere, kısa devre gücü 8000 MVA olan baraya, 100 MVA gücünde bir ocak, 84 MVA gücünde iki ocak, 74 MVA gücünde üç ocak bağlanabilmektedir. Tersini söylemek gerekirse 100 MVA gücündeki bir ocak veya 84 MVA gücündeki iki ocak, 8000 MVA kısa devre gücüne sahip bir ortak bağlantı noktasına bağlanacak olursa, aynı baradan beslenen diğer tüketiciler, oluşacak gerilim dalgalanmalarından etkilenmeyecektir (ORHON, 1986).

#### 4.1.2. Ara Trafo

Ara trafo, yüksek gerilim şebekesine bağlanacak olan büyük güçlü ark ocaklarının birincil gerilimini elde etmek için, ortak bağlantı noktasında kurulur. Bu

trafo bir ya da daha çok ocağı besleyebilecek kapasitede olabilir. Ark ocaklarının dengesiz ve darbeli çalışmaları, ocak trafosu üzerinden bu trafoyu etkileyeceği için yapısı darbeleri karşılayabilecek şekilde olmalıdır. Ark ocağı trafoları gibi çok kademeli olarak imal edilirler ve yük altında kademe değiştirme özelliğine sahiptirler.

Ara trafolar, gerilim dalgalanmalarının yüksek gerilim şebekesine iletimini biraz olsun engelledikleri gibi, özellikle zayıf şebekelerde ve puant saatlerinde oluşan gerilim düşmelerini, kademe değiştirmek suretiyle karşılayarak, işletme gerilimini ocak nominal gerilimine tekrar yükseltir ve ark gücünün düşmesini önlerler.

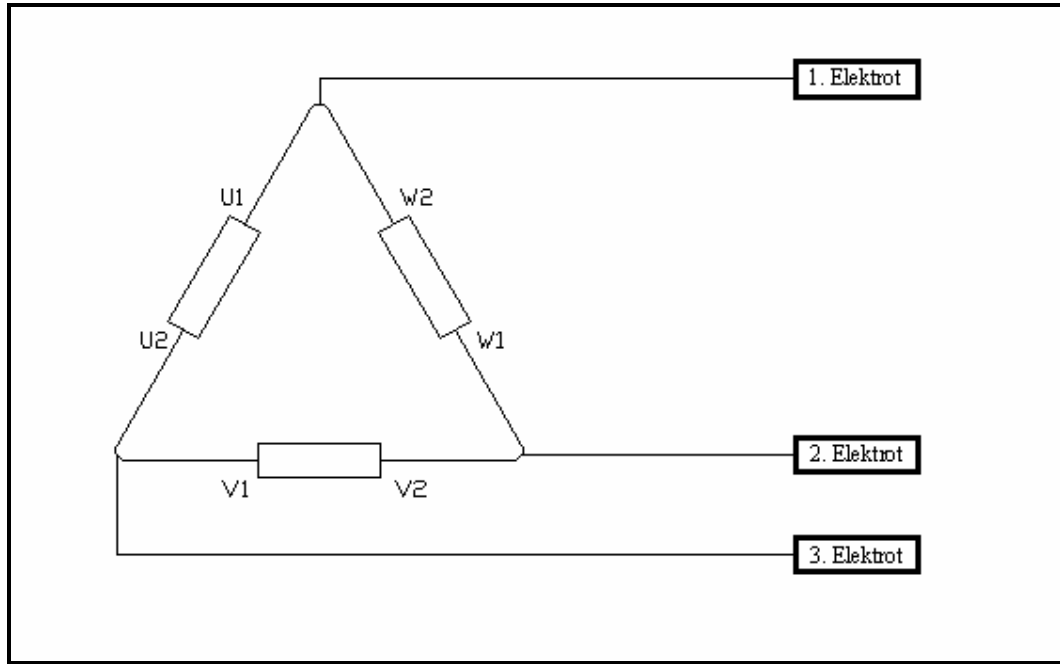
#### **4.1.3. Ocak Şalteri**

Ocak şalteri, proses gereği ve sistemi koruması açısından, ark ocaklarının en çok çalışan ve en kritik elemanlarından birisidir. Günde ortalama 70–80 kadar açma-kapama yapabilme yeteneğine sahiptir. Bu açma-kapamalarda, yüksek frekanslı, darbeli gerilimler oluşabildiği için, önlem alınmadığında tehlikeli durumlar meydana gelebilmektedir. Ultra yüksek güçlü (UHP) ocaklarda vakum tip ve SF<sub>6</sub> gazlı şalterlerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Özellikle elektrik kontaklarının ve mekanik parçalarının uzun ömürlü olmaları nedeniyle SF<sub>6</sub> gazlı tip şalterler tercih edilmektedirler. SF<sub>6</sub> gazlı şalterlerde ark söndürme hücresi SF<sub>6</sub> gazı ile doldurulmuştur. Açma başlayacağı zaman üfleme silindiri aşağı doğru iner ve kapalı alandaki SF<sub>6</sub> gazı sıkışır. Kontaklar ayrılınca basınçlı gaz, ark söndürücü nozullar boyunca deşarj edilir ve kontaklarda oluşan ark söndürülür.

#### **4.1.4. Ocak Trafosu**

Ocak trafosu, bir ark ocağının en önemli elemanıdır. Ark ocağından bahsederken ton sıvı çelik (tsç) olarak kapasitenin ardından çoğu kez ocak trafo gücünde belirtilir. Yani ocak büyüklüğünü, tsç/döküm miktarı ve trafo gücü birlikte tayin eder.

Elektrik ark ocaklarının çok ağır koşullarda çalışmalarından dolayı trafolarının da, normal güç trafolarına göre oldukça ağır görevleri ve değişik yapıları vardır. İkincil akımların büyük değerlere ulaşması nedeniyle (100 kA' e kadar), trafo sargıları çok kuvvetli darbelere dayanıklıdır ve genellikle sargılar güç trafolarına göre özel olarak sağlamlaştırılmış ve izole edilmişlerdir. Ark ocağı trafolarının birincil gerilim sargıları, normal yalıtım düzeyinin bir üst katına göre izole edilirler. Ark ocaklarında üçgen bağlantılı trafolar kullanılır (Şekil 4.3.). Bunun nedeni, kolay regülasyon yapılabilmesi ve insan hayatı açısından daha emniyetli kullanılabilmeleridir.



Şekil 4.3. Üçgen bağlantı devre şeması

Ark ocağı trafolarından genel olarak beklenen özellikler şu şekilde sıralanabilir:

- Yük altında ve geniş sınırlar içerisinde gerilim ayarlayabilme yeteneği
- İkincil devre tarafında ocak yapısına uygun, akım ve gerilim değerler
- Kademe şalterinin yüksek performans ile çok sık kademe değiştirme yeteneği
- Yüksek kısa devre güçlerine dayanabilme yeteneği
- Kısa süreli olarak %120' ye kadar aşırı yüklenebilme yeteneği
- 3 faz empedans dengesi

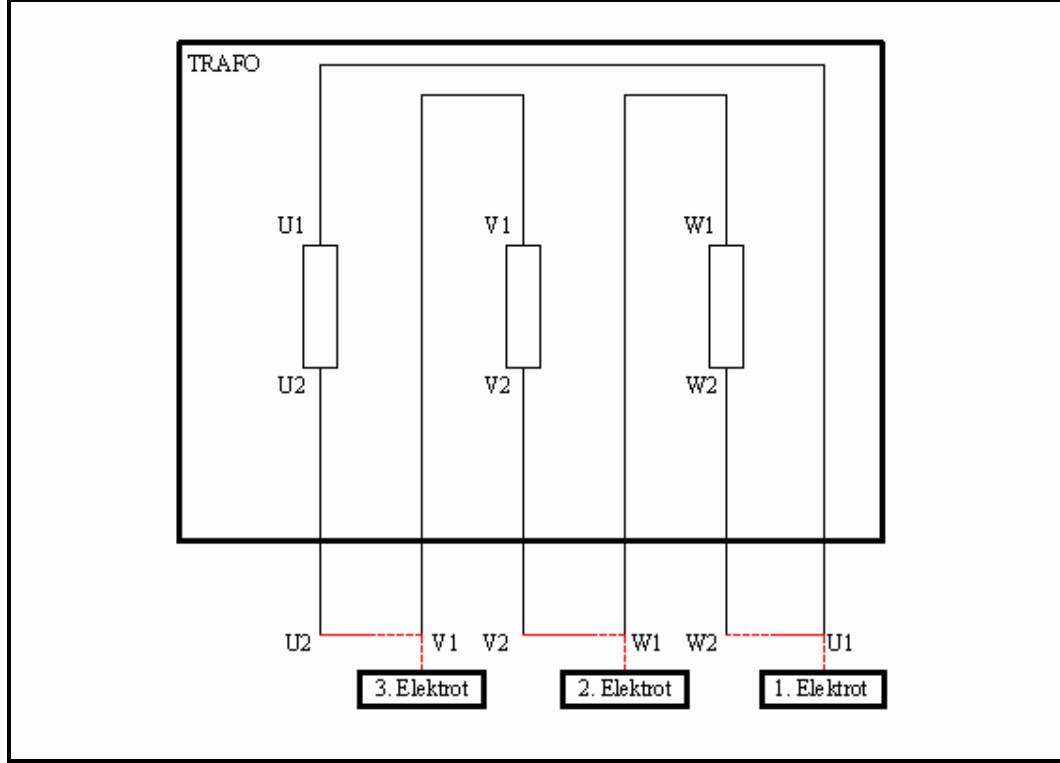
#### 4.1.5. Şok Bobini

Daha çok küçük ve orta büyüklükteki ocaklarda kullanılır. Bu bobin, devrenin empedansını yükselttiği için özellikle ergitme süresince oluşan aşırı akım darbelerini kısıtlar ve bu sayede besleme şebekesini korur. Ergitme işlemi bitince ya güç şalteriyle ya da kendi yapısında olan sıralı kademe şalteriyle devre dışı bırakılır.

#### 4.1.6. İkincil Çıkış Baraları

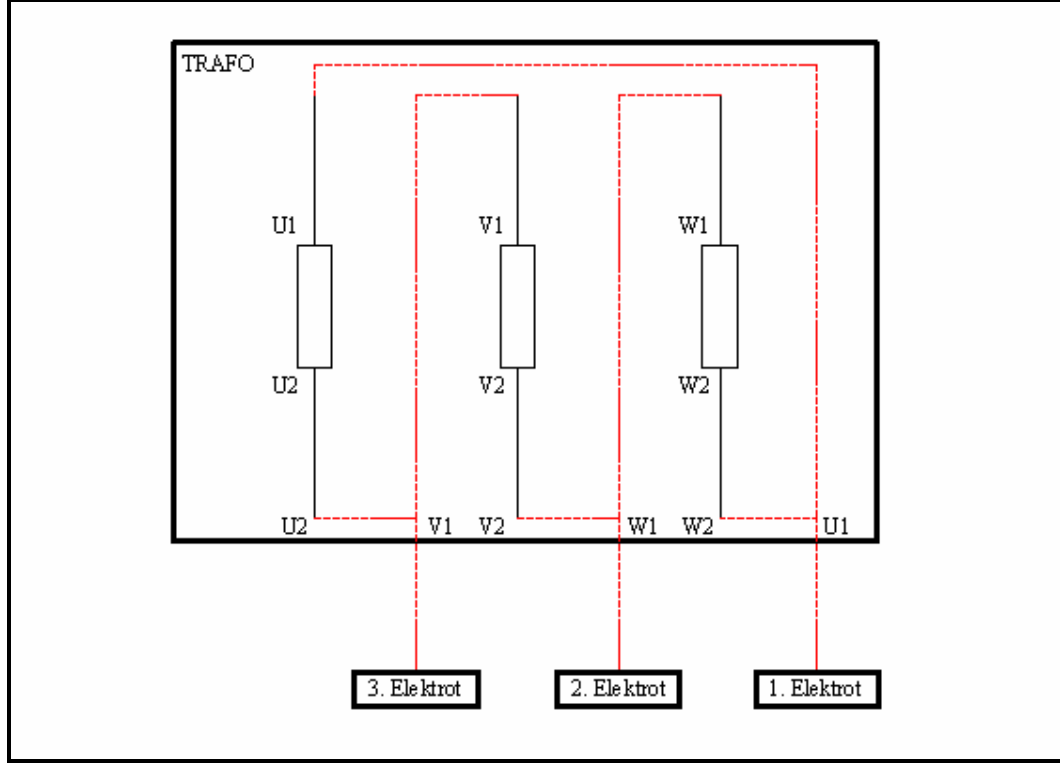
İkincil çıkış baraları, trafonun ikincil terminallerini yüksek akım kablolarına bağlayan iletkenlerdir. Günümüz sistemlerinde yüksek saflıkta su soğutmalı elektrolitik bakır borulardan imal edilirler. Yaklaşık olarak 4–5 A/mm<sup>2</sup> civarında akım taşıma kabiliyetine sahiptirler.

Ark ocağı trafosunun ikincil sargıları, eski tip trafolarda açık üçgen olarak düzenlenmiştir. Bunda amaç, üçgenin kapanmasının trafonun dışında ve olabildiği kadar elektrotlara yakın bölgede yapılması, bu sayede devre empedansının mümkün olduğunca en aza indirgenmesidir. Bu düzenleme ile elektrotlardaki gerilim düşümü azaltılarak, ocağa daha yüksek güç verilebilir (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. Trafo dışında üçgen kapama devre şeması

Son yıllarda yapılan ocak trafolarında ise kapalı üçgen sistemler tercih edilmeye başlamıştır. İkincil çıkışların üçgen devresi trafo içinde oluşturulup, trafo dışına her faz için bağımsız çıkışlar verilmektedir. Bu tercihte, sistemin daha az yer kaplayıp basit hale gelmesi, soğutmanın etkinleştirilmesi, mekanik titreşimlerin ve arıza ihtimalinin azaltılması gibi faktörler etkili olmuştur (Şekil 4.5.).



Şekil 4.5. Trafo içinde üçgen kapama devre şeması

#### 4.1.7. Yüksek Akım Kabloları

İkincil çıkış baraları ile elektrot kolları arasındaki akım taşıma görevini yapan kablolarıdır. Su soğutmalı olarak imal edilmişlerdir. Empedansı düşürmek için mümkün olduğunca üçlü demet halinde düzenlenmişlerdir. Su ile soğutulmuş, üzerinden geçebilecek olan akımın yoğunluğunun artırılması sağlanmış ve bu sayede kablo kesitlerinde küçülme elde edilmiştir. Yaklaşık akım yoğunluğu  $4-5 \text{ A/mm}^2$  dir.

Büyük ikincil akımlar, yüksek akım kabloları bölgesinde çok kuvvetli magnetik alanlar oluştururlar. Benzer faz akımını taşıyan kablolar arasında magnetik çekme, değişik faz akımlarını taşıyan kablolar arasında itme olayı vardır.



#### 4.1.8. Akım İletken Kollar

Yüksek akım kabloları ile elektrot tutucu penseler arasındaki sabit iletkenlerdir. Su soğutmalı çelik yapı üzerine bakır levhaların kaplanması yöntemiyle imal edilmişlerdir. Taşıyabilecekleri akımın yoğunluğu 8–16 A/mm<sup>2</sup>, dir. Ocak gövdesinden çok iyi şekilde yalıtılmışlardır.

#### 4.2. Empedans ve Reaktans Kavramları

Empedans, doğru akım (DC) devrelerindeki direncin, alternatif akım (AC) devrelerindeki kapasitör ve bobinleri de (endüktör) kapsayacak biçimde genelleştirilmiş halidir (ALTIN, 2002). Toplam direnci R olan bir DC devresine, V(t) doğru gerilimini sağlayan bir kaynağın bağlı olması halinde dolaşan akım;

$$I(t) = \frac{V(t)}{R} \quad (4.1.)$$

ifadesiyle verilir. Benzer olarak toplam empedansı Z olan bir AC devresine, V(t) alternatif gerilimini sağlayan bir kaynağın bağlı olması halinde dolaşan akımın genliği;

$$I(t) = \frac{V(t)}{Z} \quad (4.2.)$$

ifadesiyle verilir. İlk durumda R, V(t) gerilimine bağlı olan direncin, üzerinden geçen akıma karşı gösterdiği direnişin bir ölçüsüyken, ikinci durumda Z, V(t) alternatif

gerilimine bağılı olan elemanın, üzerinden geçen akıma karşı gösterdiği direnişin bir ölçüsüdür. Buradaki  $Z$ ' ye "empedans" denir. Sadece AC devreleri için tanımlıdır. Çünkü bir DC devresinde kapasitör, devreyi kesen bir yalıtkan, bobin ise basit bir iletken olarak davranır. Dolayısıyla bu iki eleman, sadece alternatif akım devrelerinde kullanılır. Böyle bir devrenin empedansı  $Z$ , kompleks bir sayı olarak hesaplanır. Alternatif gerilimin frekansı  $f$ , açısal frekansı  $2\pi f = \omega$  olsun.  $R$  ohm' luk bir direncin empedansı  $Z_R$ , frekanstan bağımsız olup,  $R$ ' ye eşit ve tümüyle gerçektir.

$$Z_R = R \quad (4.3.)$$

Endüktansı  $L$  henry olan bir bobinin empedansı;

$$Z_L = j\omega L \quad (4.4.)$$

sığası  $C$  olan bir kapasitörün empedansı;

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (4.5.)$$

dir. Her iki ifade de tümüyle sanaldır. AC devrelerinde empedanslar, DC devrelerindeki dirençlere benzer şekilde toplanır. Yani seri bağılı elemanların toplam empedansı, ayrı ayrı empedanslarının toplamına eşittir. Buna göre;

$$Z = Z_R + Z_L + Z_C = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (4.6.)$$

olarak hesaplanır. Empedansın sanal bileşenine “reaktans” denir,  $X$  ile gösterilir. Sanal bileşene bobinlerden gelen katkıya “endüktif reaktans”, kapasitörlerden gelene de “kapasitif reaktans” denir ve bunlar sırasıyla  $X_L$  ve  $X_C$  ile gösterilir. Dolayısıyla empedans için genel ifade çoğu zaman;

$$Z = R + j(X_L - X_C) = R + jX \quad (4.7.)$$

şeklinde yazılır. Hal böyle olunca empedans, kompleks düzlem üzerinde, gerçek ve sanal bileşenlere sahip bir vektörle de gösterilebilir. Bu vektörün büyüklüğü;

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (4.8.)$$

ile, gerçek olan yatay eksenle yaptığı açı  $\Phi$  ise;

$$\tan\Phi = \frac{X}{R} \quad \text{veya} \quad \cos\Phi = \frac{R}{|Z|} \quad (4.9.)$$

ile verilir. Bir direncin üzerinden geçen akım, DC ya da AC olsun fark etmez üzerindeki gerilimle aynı fazdadır. Fakat bir bobinin üzerinden geçen alternatif akım, üzerindeki alternatif gerilimi  $\pi/2$  faz farkıyla geriden izler. Bir kapasitörün üzerinden geçen akım ise, üzerindeki gerilimin  $\pi/2$  faz farkıyla önünden gider. Bu nedenle, bir DC devresinin her yerinde akımlar ile gerilimler aynı fazda iken, bir AC devresinde, üzerinde kapasitör veya bobin bulunan hatlarda, bu elemanların dirençten farklı davranışı nedeniyle, akımlar ile gerilimler arasında faz farkları oluşur. Dolayısıyla bir AC devrenin Ohm ve Kirchoff Yasalarını kullanarak analizini yaparken, bu faz farklarını da hesaba katmak gerekir.

$V_0 \cdot \cos \omega t$  gibi bir alternatif gerilim kaynağına bağlı bulunan ve doğrusal davranışlı elemanlardan oluşan bir AC devresindeki tüm gerilimler ile akımlar, devre denge durumuna ulaştıktan sonra hep  $\omega$  açısal frekansıyla salınacağından, frekans açısından bir sorun yoktur. Fakat faz farkları sorun oluşturur. Açıklamak gerekirse, devrede bir dizi hattın kesişme noktasına Kirchoff Yasası uygulanmak üzere, noktaya ulaşan akımların toplamı sıfıra eşitlenmek istensin. Hatlardaki akımların genlikleri  $I_1, I_2, \dots, I_m$  olsun. Frekansları aynı ve  $\omega$  olacağına göre, akımlar için,  $I_1 \cdot \cos \omega t, I_2 \cdot \cos \omega t, \dots, I_m \cdot \cos \omega t$  ifadeleri yazılmak istenebilir. Ancak, eğer ilgili hatlarda kapasitör veya bobinler varsa, bu akımlar ile kaynak gerilimi arasında faz farklarının bulunması gerekir.  $m$ . kol için bu faz farkı  $\Phi_m$  ise akım,  $I_m \cdot \cos(\omega t + \Phi_m)$  şeklinde yazılmak zorundadır. Bu yazım sonucunda Kirchoff Yasasının söz konusu noktadaki uygulaması;

$$\sum I_m \cdot \cos(\omega t + \Phi_m) = 0 \quad (4.10.)$$

halini alır. Bu yazım tarzı devre analiz denklemlerinin çözümünde karışıklık oluşturabilmektedir. Bu nedenle her akımı bir kompleks ifadeyle gösterip, akımın bu kompleks ifadenin gerçek kısmı olduğunu bilip işlem yapmak daha kolaydır. Örneğin  $I_m \cdot \cos(\omega t + \Phi_m)$  akımı,  $I_m \cdot e^{j(\omega t + \Phi_m)}$  ifadesinin gerçek kısmına eşittir. Buradaki  $j, \sqrt{-1}$  'i simgelemekte olup, saf sanaldır. Dolayısıyla yukarıdaki Kirchoff Yasası uygulaması bu gösterimle;

$$\sum I_m \cdot e^{j(\omega t + \Phi_m)} = 0 \quad (4.11.)$$

şeklinde yazılabilir.  $V_0 \cdot \cos \omega t$  gerilimi ise benzer şekilde,  $V_0 \cdot e^{j\omega t}$  kompleks ifadeyle gösterilebilir. Bu gösterimin sağladığı önemli bir kolaylık daha vardır.  $\omega t$  içeren terimler, devre analizi yapılırken işlemlerin dışında tutularak, gerçek akımların bilinmek istediği son anda işleme sokabilir. Örneğin yukarıdaki Kirchoff Kuralı uygulamasını,  $\sum I_m \cdot e^{j\Phi_m} = 0$  şeklinde yazmak, diğer devre denklemleriyle birlikte çözümü kolaylaştırır.

Çözüm sonucunda  $I_m$  ve  $\Phi_m$  değerleri bulunmuşsa, m. koldaki akımı elde etmek için  $I_m \cdot e^{j\Phi_m}$  ifadesini,  $e^{j\omega t}$  ifadesiyle çarpıp, elde edilen  $I_m \cdot e^{j(\omega t + \Phi_m)}$  ifadesinin gerçek kısmını yani  $I_m \cdot \cos(\omega t + \Phi_m)$ ' i almak yeterlidir.

Gerilimler ile akımlar için kompleks gösterimlerin kullanılması halinde, aralarındaki ilişkiyi belirleyen empedansların da kompleks olması gerekir.

Bir direncin, üzerinden geçen akıma karşı gösterdiği direniş, üzerindeki gerilimin frekansından bağımsızdır. Direnç değeri R ise, üzerindeki gerilim ile üzerinden geçen akım arasındaki ilişki Eşitlik 4.1.' de olduğu gibidir.

Üzerindeki gerilim kompleks olarak  $V_R \cdot e^{j\omega t}$  ile gösteriliyorsa, gerilimle aynı fazda olan kompleks akım;

$$I_{R(t)} = \frac{V_R}{R} \cdot e^{j\omega t} \quad (4.12.)$$

olur. Dolayısıyla direnç için  $I(t) = \frac{V(t)}{Z}$  ifadesinde kullanılması gereken Z değeri R' ye eşit olup, yalnızca gerçek bir bileşenden oluşur.

Bir bobinin, üzerinden geçen akıma karşı gösterdiği direniş, üzerindeki gerilimin frekansına bağlı olup büyüklüğü, açısız frekans  $\omega$  ve bobinin endüktansı L cinsinden,  $\omega \cdot L$ ' ye eşittir. Öte yandan üzerinden geçen akım, gerilimi  $\pi/2$  faz farkıyla geriden izlemektedir. Dolayısıyla bobinin üzerindeki gerilimin kompleks gösterimi  $V_L \cdot e^{j\omega t}$  ise, üzerinden geçen akımın kompleks gösterimi;

$$I_{L(t)} = \left( \frac{V_L}{\omega L} \right) \cdot e^{j(\omega t - \pi/2)} \quad (4.13.)$$

olur. Burada;

$$e^{j(\omega t - \pi/2)} = e^{j\omega t} \cdot e^{-j\pi/2} = e^{j\omega t} / e^{j\pi/2} \quad (4.14.)$$

şeklinde yazılabilir.

$$e^{j\pi/2} = \text{Cos}(\pi/2) + j\text{Sin}(\pi/2) = j \quad (4.15.)$$

olduğuna göre;

$$e^{j(\omega t - \pi/2)} = \left( \frac{1}{j} \right) \cdot e^{j\omega t} \quad (4.16.)$$

ve dolayısıyla;

$$I_{L(t)} = \left( \frac{V_L}{j\omega L} \right) \cdot e^{j\omega t} \quad (4.17.)$$

olur. Bu ifade, bir bobin üzerindeki gerilim ile akım arasındaki ilişkiyi verir. Sonuç olarak bobin için,  $I(t) = \frac{V(t)}{Z}$  ifadesinde kullanılması gereken Z değeri,  $j\omega L$ ' ye eşit olup, yalnızca sanal bir bileşenden oluşur.

Bir kapasitörün, üzerinden geçen akıma karşı gösterdiği direniş, üzerindeki gerilimin frekansına bağlı olup büyüklüğü, açısal frekans  $\omega$  ve kapasitörün sığası C cinsinden,  $1/(\omega.C)$ ' ye eşittir. Öte yandan üzerinden geçen akım, gerilimin  $\pi/2$  faz farkıyla önünden gitmektedir. Dolayısıyla kapasitörün üzerindeki gerilimin kompleks gösterimi  $V_C \cdot e^{j\omega t}$  ise, üzerinden geçen akımın kompleks gösterimi;

$$I_{C(t)} = \left( \frac{V_c}{1/\omega C} \right) \cdot e^{j(\omega t + \pi/2)} \quad (4.18.)$$

olur. Burada;

$$e^{j(\omega t + \pi/2)} = e^{j\omega t} \cdot e^{j\pi/2} = e^{j\omega t} / e^{-j\pi/2} \quad (4.19.)$$

şeklinde yazılabilir.

$$e^{-j\pi/2} = \text{Cos}(-\pi/2) + j\text{Sin}(-\pi/2) = -j \quad (4.20.)$$

olduğuna göre;

$$e^{j(\omega t + \pi/2)} = \left( \frac{1}{-j} \right) \cdot e^{j\omega t} \quad (4.21.)$$

ve dolayısıyla;

$$I_{C(t)} = \left( \frac{V_c}{-j/\omega C} \right) \cdot e^{j\omega t} \quad (4.22.)$$

olur. Bu ifade bir kapasitör üzerindeki gerilim ile akım arasındaki ilişkiyi verir. Sonuç olarak kapasitör için,  $I(t) = \frac{V(t)}{Z}$  ifadesinde kullanılması gereken Z değeri,  $-j/\omega C$  veya  $1/j\omega C$ ' ye eşit olup, yalnızca sanal bir bileşenden oluşur.

Akım, gerilim ve empedans için yazılan kompleks ifadelerle, faz farklarını açıkça gösterdikleri için "fazör" denir. Buradan anlaşılacağı gibi AC devresindeki gerilim ve akımlar kompleks ifadelerle gösterilebilir. Eğer elemanların empedansları, kompleks olarak tanımlanmışsa, üzerlerindeki gerilimler ile üzerlerinden geçen akımlar arasındaki ilişkide, Eşitlik 4.2. ile verilebilir. Bu yaklaşım, daha öncede dile getirildiği gibi, devre denklemlerinin yazılıp çözülmesini kolaylaştırır. Denklemler, Kirchoff Yasalarının uygulanmasıyla elde edilir. Bu yasalardan birincisi, elektrik yükünün korunumu ilkesine eşdeğer olup, devreyi oluşturan hatların kesişme noktalarının her biri için, o noktaya ulaşan ve o noktadan uzaklaşan akımların birbirine eşit, yani işaretleri ve fazları göz önüne alınmak kaydıyla, o noktadaki akımların toplamının sıfır olmasını gerektirir. İkincisi ise, devre üzerindeki bir noktadan yola çıkarak hatlar üzerinden gezinip tekrar aynı noktaya dönüldüğünde, başlangıçtaki gerilim düzeyine geri dönmüş olması gerektiğini yani devrenin içerdiği halkalardan herhangi birinin üzerindeki gerilimlerin toplamının sıfıra eşit olması gerektiğini ifade eder.

İkinci yasanın uygulanması sırasında halka üzerinde gezerken karşılaşılan devre elemanlarının  $V(t) = Z.I(t)$  şeklindeki gerilimlerini, toplamak gerekir. Bu da, aynı hat üzerinde bulunan elemanların üzerinden aynı akım geçtiğine göre, bu elemanların empedanslarının toplanmasını anlamına gelir.

$$V_1(t) = Z_1.I(t) \text{ ve } V_2(t) = Z_2.I(t) \quad \text{ise;}$$

$$V_1(t) + V_2(t) = (Z_1 + Z_2).I(t) \quad \text{olacaktır.}$$

Dolayısıyla denklemlerin yazılması sırasında devre elemanlarının empedanslarını toplamak gerekebilir. Bu işlem daha önce de belirtildiği gibi, DC devrelerindeki direnç toplamaya benzer şekilde yapılır. Seri bağlı elemanların toplam empedansı, empedanslarının toplamına ( $Z = Z_1 + Z_2 + \dots$ ), paralel bağlı olanların toplam empedansı, empedansların terslerinin toplamının tersine ( $1/Z = 1/Z_1 + 1/Z_2 + \dots$ ) eşittir.



Kısacası sonuca varmak için, devre elemanlarının empedanslarını kompleks olarak hesaplayıp, gerekenlerini paralel veya seri olarak toplayıp, gerilim ve akımları da kompleks ifadelerle (fazör) gösterdikten sonra, devre denklemlerini yazıp çözerek, gerilim ve akımlar için bulunan kompleks ifadelerin gerçek kısımlarını almak yeterlidir.

AC kaynaklarında gerilimin genliği genellikle, güç hesaplarını kolaylaştırmak amacıyla, kök altında karenin ortalama değeri (RMS, “root mean square”) olarak verilir ve “efektif değer” olarak adlandırılır. Asıl genlik bu değerın  $\sqrt{2}$  katıdır. Örneğin, konutlarda kullanılan alternatif gerilimin genliğinin 220 V olduğu söylenirken, bununla efektif değer kastedilir. Asıl genlik;

$$V_0 = \sqrt{2} \cdot V_{ef} \quad (4.23.)$$

olup yaklaşık 311,12 V' luk bir değere sahiptir.

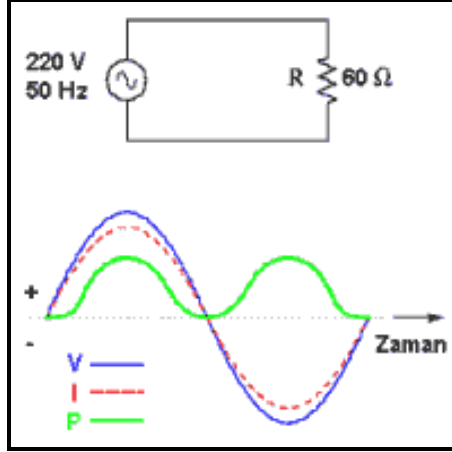
220 V' luk efektif gerilime ve 50 Hz frekansa sahip bir AC kaynağına sadece bir R direnci bağlanmış olsun.

Şekil 4.6.' da gösterilen bu durumda;

Gerilimin Fazörü:  $V(t) = V_0 \cdot e^{j\omega t}$

Empedans:  $Z = R + j0$  olduğuna göre;

Akımın Fazörü:  $I(t) = \frac{V(t)}{Z} = \frac{V_0}{R} \cdot e^{j\omega t}$  olur.



Şekil 4.6. Sadece direnç bağlı bir sistem

Bu aşamada, bir de anlık gücün zamanla seyrine bakılmak istenir ve  $P(t)=V(t).I(t)$  ilişkisini kullanarak, gerilimle akım fazörleri çarpılmaya çalışılırsa, yanlış yapılmış olunur. Çünkü fazörleri toplayıp çıkartmak serbest, fakat çarpmak yasaktır. Nedeni ise iki kompleks sayının toplam ya da farkının gerçek kısmı, sayıların gerçek kısımlarının toplam ya da farkına eşit, fakat çarpım veya bölümlerinin gerçek kısmı, gerçek kısımlarının çarpım veya bölümlerine eşit olmamasıdır. Örneğin;

$$z_1 = x_1 + jy_1 \text{ ve } z_2 = x_2 + jy_2 \quad \text{gibi iki kompleks sayı ele alınsın.}$$

$z = z_1 + z_2 = (x_1 + x_2) + j(y_1 + y_2)$ ' ye bakılırsa, toplamı oluşturan  $z$ ' nin gerçek kısmı,  $z_1$  ile  $z_2$ ' nin gerçek kısımlarının toplamına, yani  $(x_1+x_2)$ ' ye eşit olduğu görülebilir.

Çarpım,  $z = z_1.z_2 = (x_1 + jy_1).(x_2 + jy_2) = (x_1.x_2 - y_1.y_2) + j(x_1.y_2 + x_2.y_1)$  olduğundan, çarpımın gerçek kısmı, yalnızca  $z_1$  ve  $z_2$  sayılarının gerçek kısımlarının çarpımına, yani  $x_1.x_2$ ' ye eşit olmayıp,  $-y_1.y_2$ ' yi de içerir. Dolayısıyla, güç için  $P(t)=V(t).I(t)$  ifadesinde, gerilim ve akım fazörlerinin gerçek kısımlarını kullanmak gerekir. Bunlar;

$$V(t) = V_0.\cos\omega t$$

$$I(t) = \frac{V_o}{R} \cdot \text{Cos}\omega t \quad \text{olur ve aralarında faz farkı yoktur.}$$

Anlık güce bakılmak istenirse;

$$P(t) = V(t) \cdot I(t) = \left( \frac{V_o^2}{R} \right) \cdot \text{Cos}^2\omega t \quad (4.24.)$$

elde edilir.

$$\text{Cos}^2\omega t = \left( \frac{1}{2} \right) \cdot (1 + \text{Cos}2\omega t) \quad (4.25.)$$

eşitliği kullanılarak;

$$P(t) = \left( \frac{V_o^2}{2R} \right) \cdot (1 + \text{Cos}2\omega t) \rightarrow P(t) = \left( \frac{V_{ef}^2}{R} \right) \cdot (1 + \text{Cos}2\omega t) \quad (4.26.)$$

olarak yazılabilir. Şekil 4.6.'nın alt tarafındaki grafikten de görüleceği üzere anlık güç, hep pozitiftir ve zamanla salınmaktadır. Salınım frekansı  $2\omega$  olup, gerilim veya akımınkinin iki mislidir. Gücün, zaman üzerinden ortalama değeri ise,  $\text{Cos}2\omega t$ 'nin bir periyot üzerinden ortalama değeri sıfır olduğuna göre;

$$P_{\text{ort}} = \left( \frac{V_{\text{ef}}^2}{R} \right) \quad (4.27.)$$

olur. Sayısal değerler yerleştirilecek olursa;

$$V(t) = 220 \cdot \sqrt{2} \cdot \text{Cos}(100\pi t) = 311,12 \cdot \text{Cos}(314,16 \cdot t) \text{ V},$$

$$Z = 60 + 0j \Omega,$$

$$I(t) = \frac{V(t)}{R} = 5,18 \cdot \text{Cos}(314,16 \cdot t) \text{ A},$$

$$P(t) = \left( \frac{V_o^2}{2R} \right) \cdot (1 + \text{Cos}2\omega t) = 806,63 \cdot [1 + \text{Cos}(628,32 \cdot t)] \text{ watt},$$

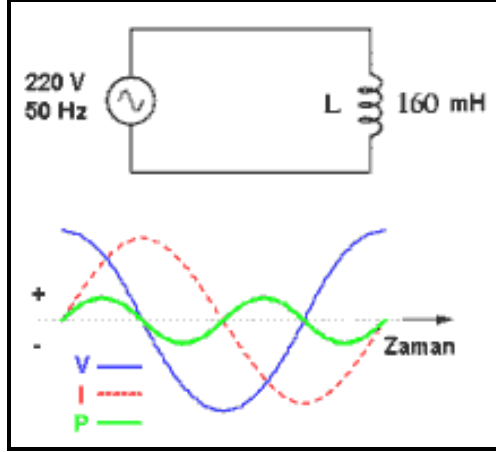
$$P_{\text{ort}} = \left( \frac{V_{\text{ef}}^2}{R} \right) = 806,66 \text{ watt bulunur.}$$

İkinci örnekte aynı gerilim kaynağına bu kez sadece, endüktansı L olan bir bobin bağlanmış olsun. Şekil 4.7.' de gösterilen bu durumda;

$$\text{Gerilimin Fazörü: } V(t) = V_o \cdot e^{j\omega t}$$

$$\text{Empedans: } Z = 0 + j\omega L \quad \text{olduğuna göre;}$$

$$\text{Akımın Fazörü: } I(t) = \frac{V(t)}{Z} = \left( \frac{V_o}{j\omega L} \right) \cdot e^{j\omega t} = \left( \frac{V_o}{\omega L} \right) \cdot e^{j(\omega t - \pi/2)} \quad \text{olur.}$$



Şekil 4.7. Sadece bobin bağlı bir sistem

Denklemlerden akımın, gerilimi  $\pi/2$  açıyla geriden izlediği görülmektedir. Anlık güç  $P(t)$ , gerilim ve akım fazörlerinin gerçek kısımlarının çarpımıyla;

$$P(t) = \left( \frac{V_o^2}{\omega L} \right) \cdot \text{Cos}(\omega t) \cdot \text{Cos}(\omega t - \pi/2) \quad (4.28.)$$

olarak elde edilir. İkinci çarpan;

$$\text{Cos}(\omega t - \pi/2) = \text{Cos}\omega t \cdot \text{Cos}(\pi/2) + \text{Sin}\omega t \cdot \text{Sin}(\pi/2) \quad (4.29.)$$

şeklinde açılacak olursa  $\text{Cos}(\pi/2) = 0$  ve  $\text{Sin}(\pi/2) = 1$  olduğundan;

$$\text{Cos}(\omega t - \pi/2) = \text{Sin}\omega t \quad (4.30.)$$

verir ve sonuçta;

$$P(t) = \left( \frac{V_o^2}{\omega L} \right) \cdot \text{Cos}\omega t \cdot \text{Sin}\omega t \quad (4.31.)$$

ifadesine indirgenir.

$$\text{Cos}\omega t \cdot \text{Sin}\omega t = \left( \frac{1}{2} \right) \cdot \text{Sin}2\omega t \quad (4.32.)$$

eşitliğinden hareketle;

$$P(t) = \left( \frac{V_o^2}{2\omega L} \right) \cdot \text{Sin}2\omega t = \left( \frac{V_{ef}^2}{\omega L} \right) \cdot \text{Sin}2\omega t \quad (4.33.)$$

bulunur. Şekil 4.7.' nin altındaki grafikten de görüleceği üzere anlık güç, pozitif ve negatif değerler arasında salınmakta olup, frekansı, gerilim ya da akımınkinin iki mislidir. Anlık gücün pozitif olduğu sırada, bobinin içinde bir manyetik alan oluşmaktadır. Dolayısıyla bobin, kaynaktan güç çekmekte ve oluşturduğu bu manyetik alanın enerjisi olarak depolamaktadır. Anlık gücün negatif olduğu sırada ise, bobindeki manyetik alan küçülmekte, içerdiği enerji kaynağa geri verilmektedir. Dolayısıyla bobin kaynaktan bazen güç çekmekte bazen de kaynağa güç vermektedir ve net olarak enerji tüketmemektedir.

$$\text{Anlık güç } P(t) = \left( \frac{V_{ef}^2}{\omega L} \right) \cdot \text{Sin}2\omega t \text{ 'nin zaman üzerinden ortalaması } P_{ort} = 0 \text{ ' dır.}$$

$L = 160 \text{ mH} = 0,16 \text{ Henry}$  ise:

$$\omega L = 100 \cdot \pi \cdot 0,16 = 50,27 \Omega,$$

$$V(t) = V_0 \cdot \cos \omega t = 220 \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(100 \cdot \pi \cdot t) = 311,12 \cdot \cos(314,16 \cdot t) \text{ V},$$

$$Z = 0 + j\omega L = j100 \cdot \pi \cdot 0,16 = j50,27 \Omega,$$

$$I(t) = \left( \frac{V_0}{\omega L} \right) \cdot \cos(\omega t - \pi/2) = 6,19 \cdot \cos(314,16 \cdot t - 1,57) \text{ A},$$

$$P(t) = \left( \frac{V_0^2}{2\omega L} \right) \cdot \sin 2\omega t = 962,75 \cdot \sin(628,32 \cdot t) \text{ watt},$$

$$P_{\text{ort}} = 0 \text{ watt}$$

Üçüncü örnekte, aynı gerilim kaynağına, bu kez sadece, sığası  $C$  olan bir kapasitör bağlanmış olsun. Bu durumda;

$$\text{Gerilimin Fazörü: } V(t) = V_0 \cdot e^{j\omega t}$$

$$\text{Empedans: } Z = 0 + \left( \frac{1}{j\omega C} \right) \quad \text{olduğuna göre;}$$

$$\text{Akımın Fazörü: } I(t) = \frac{V(t)}{Z} = (V_0 \cdot j\omega C) \cdot e^{j\omega t} = (V_0 \cdot \omega C) \cdot e^{j(\omega t + \pi/2)} \quad \text{olur.}$$

Denklemlerden akımın, gerilimi  $\pi/2$  açıyla ilerden izlediği görülmektedir. Anlık güç  $P(t)$ , gerilim ve akım fazörlerinin gerçek kısımlarının çarpımıyla;

$$P(t) = (V_0^2 \cdot \omega C) \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\omega t + \pi/2) \quad (4.34.)$$

olarak elde edilir. İkinci çarpan;

$$\cos(\omega t + \pi/2) = \cos\omega t \cdot \cos(\pi/2) - \sin\omega t \cdot \sin(\pi/2) \quad (4.35.)$$

şeklinde açılacak olursa  $\cos(\pi/2) = 0$  ve  $\sin(\pi/2) = 1$  olduğundan;

$$\cos(\omega t + \pi/2) = -\sin\omega t \quad (4.36.)$$

verir ve sonuçta;

$$P(t) = (V_0^2 \cdot \omega C) \cdot \cos\omega t \cdot (-\sin\omega t) \quad (4.37)$$

ifadesine indirgenir. 4.32. eşitliğinden hareketle;

$$P(t) = (-V_0^2 \cdot \omega C / 2) \cdot \sin 2\omega t = (-V_{ef}^2 \cdot \omega C) \cdot \sin 2\omega t \quad (4.38.)$$

bulunur. Anlık güç, pozitif ve negatif değerler arasında,  $2\omega$  frekansıyla salınmaktadır. Anlık gücün pozitif olduğu sırada, kapasitörün içinde bir elektriksel alan oluşmaktadır. Dolayısıyla, kapasitör kaynaktan güç çekmekte ve oluşturduğu bu elektriksel alanının enerjisi olarak depolamaktadır. Anlık gücün negatif olduğu sırada ise, kapasitördeki elektriksel alan küçülmekte, içerdiği enerji, kaynağa geri verilmektedir. Dolayısıyla



kapasitör kaynaktan bazen güç çekmekte bazen de kaynağa güç vermektedir ve net olarak enerji tüketmemektedir.

Anlık güç  $P(t) = (-V_{ef}^2 \cdot \omega C) \cdot \text{Sin}2\omega t$ ' nin zaman üzerinden ortalaması  $P_{ort}=0$ ' dır.

$C = 25 \times 10^{-6} \text{ F} = 25 \text{ } \mu\text{F}$  ise;

$$\frac{1}{\omega C} = 1 / 100 \cdot \pi \cdot 25 \times 10^{-6} = 127,32 \text{ } \Omega,$$

$$V(t) = V_0 \cdot \text{Cos}\omega t = 220 \cdot \sqrt{2} \cdot \text{Cos}(100 \cdot \pi \cdot t) = 311,12 \cdot \text{Cos}(314,16 \cdot t) \text{ V},$$

$$Z = \frac{-j}{\omega C} = -j / 100 \cdot \pi \cdot 25 \times 10^{-6} = -j127,32 \text{ } \Omega,$$

$$I(t) = (V_0 \cdot \omega C) \cdot \text{Cos}(\omega t + \pi/2) = 2,44 \cdot \text{Cos}(314,16 \cdot t + 1,57) \text{ A},$$

$$P(t) = (-V_0^2 \cdot \omega C / 2) \cdot \text{Sin}2\omega t = -380,13 \cdot \text{Sin}(628,32 \cdot t) \text{ watt},$$

$$P_{ort} = 0 \text{ watt}$$

Son olarak, aynı alternatif gerilim kaynağına seri olarak bağlı R, L, C üçlüsü incelenirse;

$$\text{Gerilimin Fazörü: } V(t) = V_0 \cdot e^{j\omega t}$$

$$\text{Empedans: } Z = R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$$

dir. (4.3.), (4.4.), (4.5.), (4.6.) Eşitlikleri hatırlanacak olursa;

$$X_L = \omega L$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$X = X_L - X_C$$

$$Z = R + j(X_L - X_C) = R + jX \quad \text{idi.}$$

$$Z = |Z| \cdot (\cos\Phi + j\sin\Phi) = |Z| \cdot e^{j\Phi} \quad (4.39.)$$

olduğundan;

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = |Z| \cdot e^{j\Phi} \quad (4.40.)$$

şeklinde yazılabilir.

$$|Z| = |(R + jX)| = \sqrt{(R^2 + X^2)} = \sqrt{[R^2 + (X_L - X_C)^2]}$$

$$\cos\Phi = \frac{R}{|Z|}, \quad \sin\Phi = \frac{X}{|Z|} \quad \text{veya} \quad \tan\Phi = \frac{X}{R}$$

Bu gösterimle akımın fazörü;

$$I(t) = \frac{V(t)}{Z} = \left( \frac{V_o}{|Z|} \right) \cdot e^{j(\omega t - \Phi)} \quad (4.41.)$$

olur. Denklemden akımla gerilim arasındaki faz farkının  $\Phi$  olduğu görülmektedir. Buna göre  $X_L > X_C$  ise, faz farkı  $\Phi$  pozitif olup, akım gerilimi izlemektedir. Devrenin endüktif bir devre olduğu söylenir. Aksi halde,  $X_L < X_C$  ise faz farkı negatif olup, akım gerilimin önünden gitmektedir. Devrenin kapasitif bir devre olduğu söylenir. Dolayısıyla, faz farkı  $\Phi$ ; endüktif devreler için pozitif, kapasitif devreler için negatif olup,  $-\pi/2$  ile  $+\pi/2$  arasında bir değere sahiptir. Güç faktörü  $\cos\Phi$ , buna bağlı olarak, -1 ile +1 değerleri arasında değişir.

Anlık güç  $P(t)$ , gerilim ve akım fazörlerinin gerçek kısımlarının çarpımıyla elde edilir.

$$P(t) = \left( \frac{V_o^2}{|Z|} \right) \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\omega t - \Phi) \quad (4.42.)$$

İkinci çarpan Eşitlik 4.29.' dan hatırlanacak olursa;

$$\cos(\omega t - \Phi) = \cos\omega t \cdot \cos\Phi + \sin\omega t \cdot \sin\Phi \quad \text{şeklinde açılabilir.}$$

Anlık güç;

$$P(t) = \left( \frac{V_o^2}{|Z|} \right) \cdot \cos\omega t \cdot (\cos\omega t \cdot \cos\Phi + \sin\omega t \cdot \sin\Phi)$$

ifadesine indirgenir.

(4.25.) ve (4.32.) Eşitliklerinden hareketle;

$$P(t) = \left( \frac{V_o^2}{2|Z|} \right) \cdot [(1 + \cos 2\omega t) \cdot \cos \Phi + \sin 2\omega t \cdot \sin \Phi]$$

$$P(t) = \left( \frac{V_{ef}^2}{|Z|} \right) \cdot [(1 + \cos 2\omega t) \cdot \cos \Phi + \sin 2\omega t \cdot \sin \Phi] \quad (4.43.)$$

elde edilir. Eşitlik 4.43.' te,  $\cos \Phi$  içeren terime, anlık rezistif ya da gerçek güç,  $\sin \Phi$  içeren terime de anlık reaktif güç denilir. Her ikisi de  $2\omega$  açısal frekansıyla salınmaktadır. Ancak, anlık rezistif gücün değeri daima pozitif olup, zaman üzerinden ortalaması;

$$P_{\text{ortez}} = \left( \frac{V_{ef}^2}{|Z|} \right) \cdot \cos \Phi \quad (4.44.)$$

olur.  $\cos \Phi = \frac{R}{|Z|}$  olduğu hatırlanacak olursa;

$$P_{\text{ortez}} = \left( \frac{V_{ef}^2}{|Z|^2} \right) \cdot R \quad (4.45.)$$

olur. Bu beklenen bir sonuçtur. Çünkü  $\left( \frac{V_{ef}}{|Z|} \right)$ , devrede dolaşan ve dolayısıyla direncinde üzerinden geçen akımın zaman üzerinden ortalama değeridir.

$$I^2 \cdot R = \left( \frac{V_{ef}^2}{|Z|^2} \right) \cdot R \quad (4.46.)$$

direncin çektiği güç bileşeninin zaman üzerinden ortalama değerini verir. Bir diğer bakış açısıyla;  $R \cdot \left( \frac{V_{ef}}{|Z|} \right)$ , direnç üzerindeki gerilim  $V_R$ ' nin ortalama değerini vermekte,

devrede dolaşan ve dolayısıyla direncinde üzerinden geçen akımın ortalama değeri de,

$I = \left( \frac{V_{ef}}{|Z|} \right)$  olduğuna ve aralarında faz farkı bulunmadığına göre bu ikisinin çarpımı;

$$V_R \cdot I = \left( \frac{V_{ef}^2}{|Z|^2} \right) \cdot R \quad (4.47.)$$

direncin çektiği güç bileşeninin ortalama değerine eşit olmaktadır. Ayrıca;

$$\frac{V_R^2}{R} = \frac{\left( \frac{V_{ef} \cdot R}{|Z|} \right)^2}{R} = \left( \frac{V_{ef}^2}{|Z|^2} \right) \cdot R \quad (4.48.)$$

de aynı sonucu verir. Yani direnç üzerindeki gücü hesaplamak için;  $R \cdot I^2$ ,  $V_R \cdot I$  veya  $V_R^2/R$  ifadelerinden herhangi birisi kullanılabilir. Dikkat edilmesi gereken husus, buradaki  $V_R$  ve  $I$  genliklerinin, direnç üzerindeki gerilim ve dirençten geçen akıma ait olması gerektiğidir. Elemanların seri bağlı olduğu bu durumda direnç üzerinden geçen akım, devrede dolaşan akıma eşittir. Fakat direnç üzerindeki gerilim, kaynak geriliminden düşük olabilir. Direncin çektiği güç bileşeni, direnç üzerinde ısıya dönüşmektedir. Bu yüzden, gerçek güç olarak nitelendirilir. Hâlbuki anlık reaktif güç,

pozitif ve negatif değerler arasında salınmakta olup, zaman üzerinden ortalaması sıfırdır. Bu da beklenen bir durumdur. Çünkü bobin ile kapasitör, net güç tüketmemekte, kaynaktan güç çekip kaynağa güç vermektedir. Devredeki bu reaktif bileşenler, kaynakla etkileşmekte, yani kaynağa karşı tepki göstermektedirler. Reaktif olarak adlandırılmalarının sebebi de budur. Bu arada, direncin tüketebileceği güçte azalmaya neden olurlar. Bunu daha açık bir şekilde görebilmek için Eşitlik 4.43.' teki güç bileşenlerinin, salınımları bir kenara bırakılıp, genlikleri incelenir:

Rezistif gücün genliği;

$$\left( \frac{V_{ef}^2}{|Z|} \right) \cdot \text{Cos}\Phi' \quad \text{ye eşittir ve P ile gösterir.} \quad (4.49.)$$

Reaktif gücün genliği ise;

$$\left( \frac{V_{ef}^2}{|Z|} \right) \cdot \text{Sin}\Phi' \quad \text{ye eşittir ve Q ile gösterilir.} \quad (4.50.)$$

Dikkat edilecek olursa P ile Q, bir dik üçgenin dik kenarları gibi gözüküyorlar.

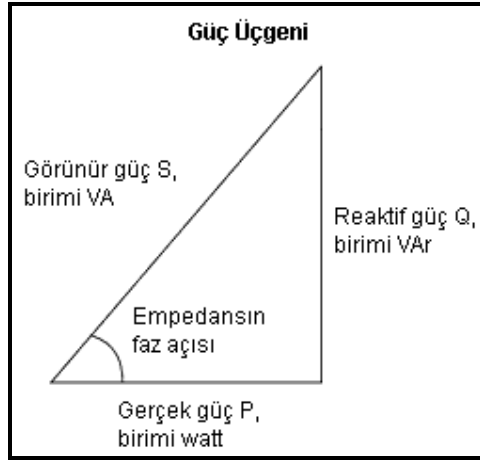
Nitekim uzunluğu  $S = \left( \frac{V_{ef}^2}{|Z|} \right)$  olup, yatayla  $\Phi$  açısı yapan hipotenüse sahip bir dik üçgenin dik kenarlarından yatay olanın uzunluğu  $S \cdot \text{Cos}\Phi = P$ , dikey olanınki ise  $S \cdot \text{Sin}\Phi = Q$  olur.

Rezistif gücün genliği olan P' nin volt-ampere eşit olan birimi watt olarak anılır. Reaktif gücün genliği Q' nun ise keza volt-ampere eşit olan birimi, net enerji tüketimi olmadığını hatırlatmak amacıyla, güç birimi watt ile anılmak yerine, volt-ampere reaktif anlamında VAR olarak yazılır.

$S = \left( \frac{V_{ef}^2}{|Z|} \right)$  ise kaynağın devreye sunduğu gerilimin ortalama değeri  $V_{ef}$  ile

devrede dolaşan akımın ortalama değeri  $\left( \frac{V_{ef}}{|Z|} \right)$ , nin çarpımına yani kaynağın, devrede

kullanılmak üzere sunduğu, fakat akımla gerilim arasındaki faz farkı nedeniyle tümüyle kullanılmayan gücün, görünürdeki ortalama değerine eşittir. Bu yüzden, “görünür güç” olarak adlandırılır. S, gerçek bir gücü yansıtmadığından keza volt-ampere eşit olan birimi, güç birimi watt’ a dönüştürülmeksizin, volt-ampere anlamında VA olarak yazılır. Kenarları S, P ve Q olan bu dik üçgene “güç üçgeni” (Şekil 4.8.),  $\cos\Phi$ ’ ye de “güç faktörü” denir.



Şekil 4.8. Güç üçgeni

Daha öncede belirtildiği üzere, akımla gerilim arasındaki faz farkını yani aralarındaki zamanlama farkını belirleyen  $\Phi$ , aynı zamanda empedans vektörünün yatay eksenle yaptığı açığa eşittir. Burada ise  $\Phi$ ’ nin ayrıca güç üçgenindeki görünür güçle gerçek güç arasındaki açığa eşit olduğu görülmektedir. Kullanılan kaynak eğer şebeke ise,  $\cos\Phi$ ’ nin 1’den küçük olması, şebeke işletimi açısından istenmeyen bir durumdur. Çünkü şebeke işleticisinin taahhüdü, devre girişine kadar standart bir  $V_0 = \sqrt{2} \cdot V_{ef}$  gerilimini getirmektir. Devre elemanlarının seçimi ve dolayısıyla  $\cos\Phi$ ’ nin değeri sistemin karakteristiğidir. Eğer yukarıdaki devre, reaktansı sıfır olacak şekilde

tasarlanmış olsaydı devrenin yaptığı gerçek işi, daha düşük bir akımla başarmak, dolayısıyla da şebekeden daha az güç talep etmek mümkün olurdu.

Reaktansı sıfırlamak için,  $X = X_L - X_C$  olduğuna göre, devreye uygun büyüklükte bir kapasitörün ilavesi yeterlidir. Kapasitörün mevcut elemanlara seri olarak bağlanması halinde, empedansın yeni değeri  $Z'$  azalır, devredeki akım artacağından, aynı gerçek iş miktarı için direncin düşürülmesi gerekir. Bunu görmek için, devrenin değiştirilip ve yeni direncin  $R'$  seçilip, seri bağlı bir kapasitör ilavesiyle yeni reaktansın sıfırlandığı, yani  $Z' = R'$  olduğu düşünülün ki yeni devrede  $\cos\Phi = 1$  olsun. Yapılan gerçek iş devrenin eski haliyle;

$$P = \left( \frac{V_{ef}^2}{|Z|} \right) \cos\Phi$$

Devrenin yeni hali işle ise;

$$P' = \left( \frac{V_{ef}^2}{R'} \right) \cdot 1$$

olduğuna göre, bu ikisinin eşit olması için;

$$P = P' \Rightarrow \left( \frac{V_{ef}^2}{|Z|} \right) \cos\Phi = \left( \frac{V_{ef}^2}{R'} \right) \cdot 1 \Rightarrow R' = \frac{|Z|}{\cos\Phi} \quad (4.51.)$$

olması gerekir.  $R'$  direnç değerine sahip yeni devredeki akım;



$$I' = \frac{V_{ef}}{R'} = \left( \frac{V_{ef}}{|Z|} \right) \cdot \text{Cos}\Phi \Rightarrow I' = I \cdot \text{Cos}\Phi \quad (4.52.)$$

olur ve azalır. Eşitlik 4.52.' de görüldüğü üzere aynı miktar gerçek iş, daha düşük bir akımla yapılmaktadır. Fakat devredeki direnci değiştirmek, mevcut donanımın özellikleriyle oynamak anlamına gelir ki bu tercih edilen bir yaklaşım değildir. Hâlbuki kapasitör devreye paralel olarak bağlanırsa, R-L hattı hala aynı gerilimi görecektir ve üzerindeki akım aynı kalırken, bu arada reaktans da sıfırlanmış olacaktır. Böylelikle, direnci değiştirmeksizin aynı gerçek işi başarmak mümkün olur. Tercih edilen yöntem budur.

Sıfır reaktansın şebeke işletimi açısından tercih edilme nedeni, iletim kayıplarının azaltılmasıdır. Aksi halde daha büyük bir akım, şebeke hatları üzerinden taşınıp devre girişine kadar getirilecek, sonra da bir kısmı geri götürülecektir. Bunun, yani devreye görünür güç kadar güç getirip, sonra da bu gücün tüketilmeyen, reaktif güç kadarki kısmını geri götürmenin, yoldaki direnç kayıpları kapsamında bir maliyeti vardır. Elektrik dağıtım şirketleri bu yüzden, tüketicilerin güç faktörlerini,  $\text{Cos}\Phi = 1$  olacak şekilde ayarlamasını ister. Bunu sağlamak için, özellikle büyük miktarda güç çeken tüketicilerin faturalarına, tüketilen gerçek gücün bedelinden başka, bir de güç faktörüne bağlı, ikinci bir maliyet unsuru daha ekler. Bu ek maliyetten kaçınabilmek için, güç faktörü düzeltilmesinin yapılması gerekebilir.

### 4.3. Elektrik Güç Formülleri

Doğru akım devrelerinde;

$$V = R * I \quad (4.53.)$$

$$P = V * I = R * I^2 = \frac{V^2}{R} \quad (4.54.)$$

Burada;

V: Gerilim [V]

I: Akım [A]

R: Direnç [ $\Omega$ ]

P: Güç [W]

Bir fazlı alternatif akım devrelerinde;

$$S = V * I \quad (4.55.)$$

$$P = S * \text{Cos}\Phi \quad P = V * I * \text{Cos}\Phi \quad (4.56.)$$

$$Q = S * \text{Sin}\Phi \quad Q = V * I * \text{Sin}\Phi \quad (4.57.)$$

Burada;

V: Faz-nötr gerilimi [V]

S: Görünür güç [VA]

P: Aktif güç [W]

Q: Reaktif güç [VAR]

Üç fazlı alternatif akım devrelerinde güç, bir fazlı alternatif akım devresinin üç katıdır. Buna göre yukarıdaki ifadelerin üç ile çarpılması gerekir.

$$S = 3 * V * I \quad (4.58.)$$

$$P = 3 * V * I * \text{Cos}\Phi \quad (4.59.)$$

$$Q = 3 * V * I * \text{Sin}\Phi \quad (4.60.)$$

Üç fazlı sistemlerde faz-nötr gerilimi yerine genelde fazlar arası gerilimler kullanılır. U, faz-faz gerilimi olmak üzere fazlar arası gerilim, faz-nötr geriliminin  $\sqrt{3}$  katıdır.

$$U = V * \sqrt{3} \quad V = \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (4.61.)$$

Güç formüllerinde faz-nötr gerilimleri yerine faz-faz gerilimlerini yazıp gerekli işlemleri yaptıktan sonra aşağıdaki formüller bulunur:

$$S = \sqrt{3} * U * I \quad (4.62.)$$

$$P = \sqrt{3} * U * I * \cos\Phi \quad (4.63.)$$

$$Q = \sqrt{3} * U * I * \sin\Phi \quad (4.64.)$$

#### 4.4. Elektrik Ark Ocaklarında Enerji Gereksinimi

Elektrik ark ocakları üzerine yapılan çalışmalarda, EAO' ların elektrik enerjisi ihtiyacının hesaplanabilmesi için, ocakların ortalama değerlerinin istatistiksel analizi metodu ile bir formül geliştirilmiştir. Bu formül, döküm sıcaklığı, döküm süresi ve tonajı, oksijen miktarları, brülör gazı kullanımı gibi çeşitli faktörleri göz önüne almaktadır (KOHLE, 1999). Geliştirilen formül, Eşitlik 4.65.' te verilmiştir.

$$W_R = 375 + 400 \left( \frac{G_H}{G_D} - 1 \right) + 80 \left( \frac{G_{DRI/HBI}}{G_D} \right) - 50 \left( \frac{G_{Dgm}}{G_D} \right) - 350 \left( \frac{G_{HM}}{G_D} \right) + 1000 \left( \frac{G_Z}{G_D} \right) + 0,3(T_D - 1600) + t_{tap} - 8M_{CH_4} - 4,3M_L - 2,8M_N \quad (4.65.)$$

Burada;

$W_R$ : Elektrik enerjisi ihtiyacı [kWh/tsç]

$G_H$ : Hurda miktarı [ton]

$G_D$ : Döküm ağırlığı [ton]

$G_{DRI/HBI}$ : Direct Reduced Iron (DRI) ve Hot Briquetted Iron (HBI) Miktarı [ton]

$G_{Dgm}$ : Değirmen hurda miktarı [ton]

$G_{HM}$ : Sıcak metal şarj miktarı [ton]

$G_Z$ : Cüruf yapıcı malzemelerin miktarı [ton]

$T_D$ : Döküm sıcaklığı [ $^{\circ}C$ ]

$t_{tap}$ : Dökümden döküme süre [dak]

$M_{CH_4}$ : Doğalgaz miktarı [ $Nm^3/tsç$ ]

$M_L$ : Lans oksijen miktarı [ $Nm^3/tsç$ ]

$M_N$ : İleri yanma sistemi oksijen miktarı [ $Nm^3/tsç$ ]

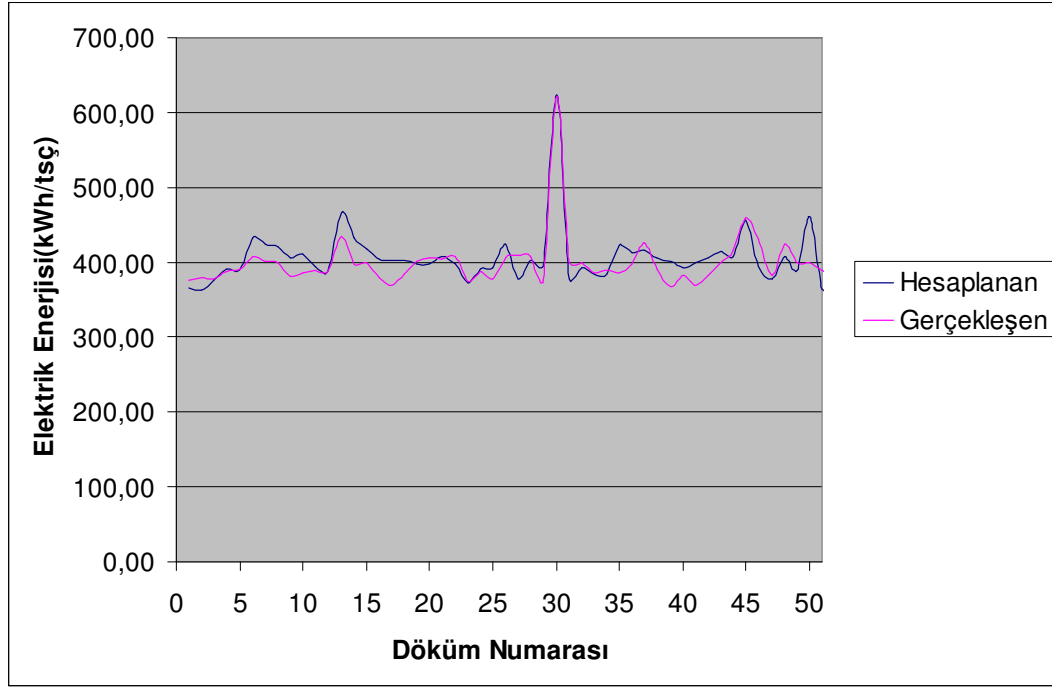
Eşitlik 4.65. incelendiği zaman, ark ocaklarında elektrik enerjisine etki eden faktörler belirlenebilmektedir. Kimyasal enerji girişinin artırılmasıyla elektrik enerjisi tüketiminin azalacağı bilinmektedir. Bunun yanında hurda verimi ve kirliliğinin de bir faktör olduğu eşitlikten anlaşılmaktadır. Ark ocağına şarj edilen hurdanın veriminin düşük olması ve kirliliğinin yüksek olması, elektrik enerjisi tüketimini artıran etkenlerdir. Aynı sıvı çelik kapasitesine ulaşmak için kullanılması gereken daha fazla hurda miktarı, hem ergime süresini artıracak, hem de hurdada bulunan istenmeyen elementlerin fazlalığı nedeniyle ocağa verilmesi gereken cüruf yapıcı malzeme miktarının artırılmasına neden olacaktır. Ocağa ilave edilen ortam sıcaklığındaki cüruf yapıcıların ergime sıcaklığına kadar yükselmeleri için gerekli olan ısı, sıvı çelikten çekileceği için elektrik enerjisi girdisinin artırılması gerekecektir.

Çizelge 4.1.' de elektrik ark ocaklarının süreç parametrelerinin, ocak performans değerlerine olan etkileri verilmektedir.

Çizelge 4.1. Elektrik ark ocaklarında süreç parametrelerinin değişimlerinin, ark ocağı performans değerlerine etkileri (PFEIFER ve KIRSCHEN, 2002)

	Cüruf yapıcılarının artırılması	Döküm sıcaklığının artırılması	Brülör kullanımının artırılması	Lans O <sub>2</sub> kullanımının artırılması	İleri yanma oksijeninin artırılması
Elektrik enerjisi	↑	↑	↓	↓	↓
Kimyasal enerji	→	→	↑	↑	↑
Elektrot tüketimi	↑	↑	↓	↓	↓
Üretim miktarı	↓	↓	↑	↑	↑
Döküm süresi	↑	↑	↓	↓	↓
Cüruf miktarı	↑	→	→	↑	→
Atık gaz enerjisi	→	↑	↑	→	↓
Soğutma enerjisi	→	↑	→	→	→

Şekil 4.9.' da Eşitlik 4.65.' in, 75 ton sıvı çelik kapasiteli 53 MVA trafoya sahip AC tip bir ark ocağında uygulanması sonucu elde edilen değerler, grafik olarak verilmektedir. Eşitlik ile hesaplanan elektrik enerjisi ihtiyacının, gerçekte tüketilen elektrik enerjisi miktarına yakın değerlerde olduğu bu grafikten görülebilmektedir. Bu sonuçla Eşitlik 4.65.' in kullanılabilir bir formül olduğu söylenilebilir.



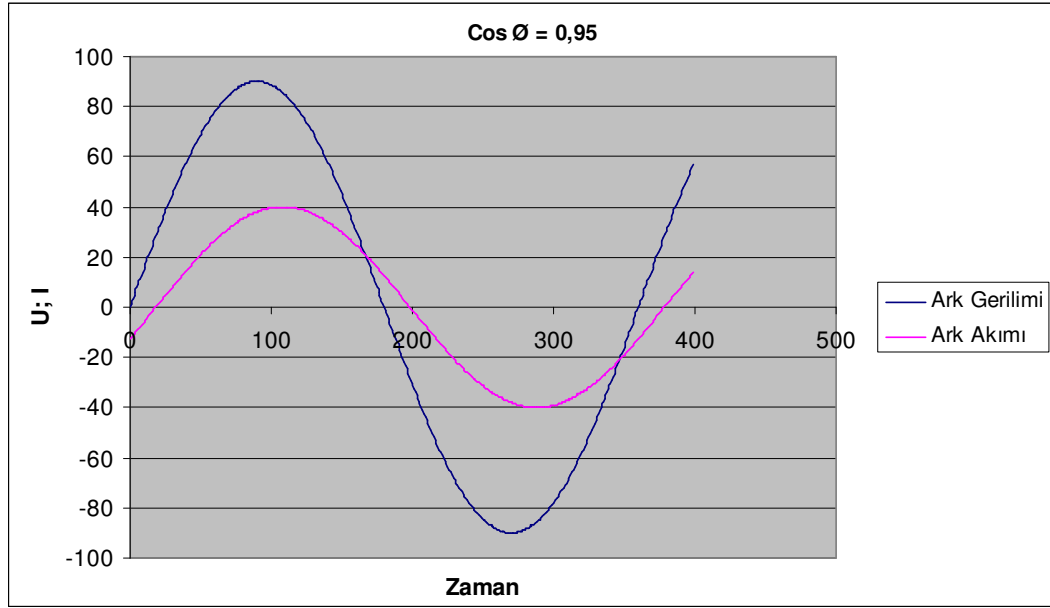
Şekil 4.9. Örnek bir ark ocağı için elektrik enerjisi karşılaştırma grafiği

#### 4.5. Elektrik Arkının Oluşturulması

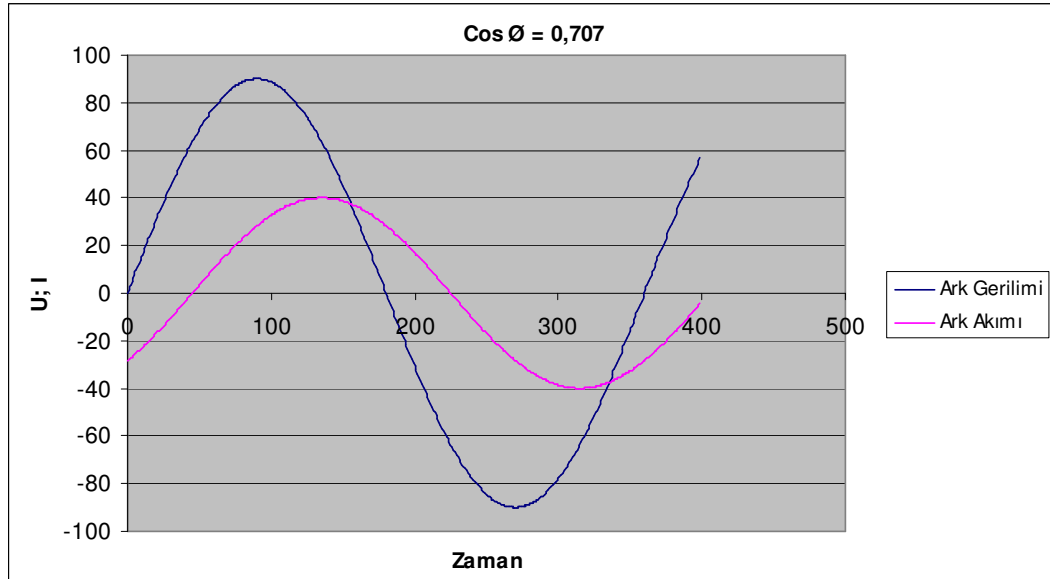
Elektrik ark ocaklarında ana amaç elektrotlar ile hurda metal arasında elektrik arkı oluşturmaktır. Bu ark, uygun gerilim ve akım değerleriyle iki nokta arasında çok kuvvetli ışık kolonu şeklindeki bir elektrik boşalmasıdır. Ocağa verilen gerçek güç, ark içinde oluşan ısı enerjisidir. Ark ocaklarının şebekeye olan olumsuz etkilerinin nedeni de lineer olmayan karakteristikteki arkın kendisidir (KLEIN ve PAUL, 1989). Yapı olarak oluştuğu iki sıcak noktadan biri elektrotun ucunda, diğeri hurda yüzeyinde bulunur. Bu noktalar, anot ve katot olarak isimlendirilebilir. Eğer alternatif akım kullanılıyorsa bu iki nokta, kullanılan frekansa denk bir sıklıkta elektriki polaritelerini değiştirir. Normal olarak 50 Hz' lik bir enerji ile beslendiğinde noktaların polariteleri, pozitif ve negatif olarak her saniyede elli kez yer değiştirir. Alternatif değişimde akım sıfır olduğu an ark söner, ark söndüğü an elektrot ucu ile metal arasındaki gerilim yaklaşık olarak ocak ikincil gerilimine eşit olur. Bu gerilimin, ark ateşlemesinde kesin

bir etkisi vardır. Arkı koruyabilmek için en az 40 V gerilime ve 4 kA akıma gereksinim vardır (ORHON, 1986).

Şekil 4.10. ve 4.11' de, eşit güç ve reaktanslarda, birinci grafikte güç faktörünün 0.95, ikinci grafikte ise güç faktörünün 0.707 olduğu durumlar için ark geriliminin ve akımının davranışları incelenmiştir.



Şekil 4.10. Ark gerilimi ve akımının temel davranışları ( $\text{Cos}\Phi=0,95$ )



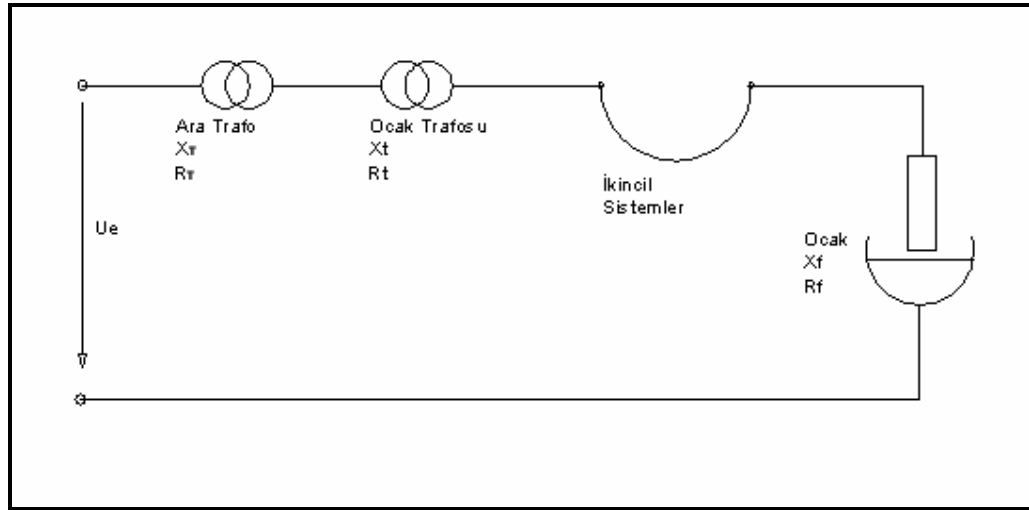
Şekil 4.11. Ark gerilimi ve akımının temel davranışları ( $\text{Cos}\Phi=0,707$ )

Bu grafikleri yorumlamak gerekirse;

- Birinci durumda, akım sıfıra geldiğinde gerilim, arkın hemen oluşması için yeterli değildir. Ark oluşumu için, akımın yükselmesiyle birlikte geriliminde belli bir değere kadar yükselmesi beklenecaktır.
- İkinci durumda ise gerilim, akımın sıfıra geldiği noktada birinci duruma nazaran daha yüksektir ve akımın yükselmesiyle birlikte ark oluşumu hemen gerçekleştirebilecek gerilim değeri mevcuttur.

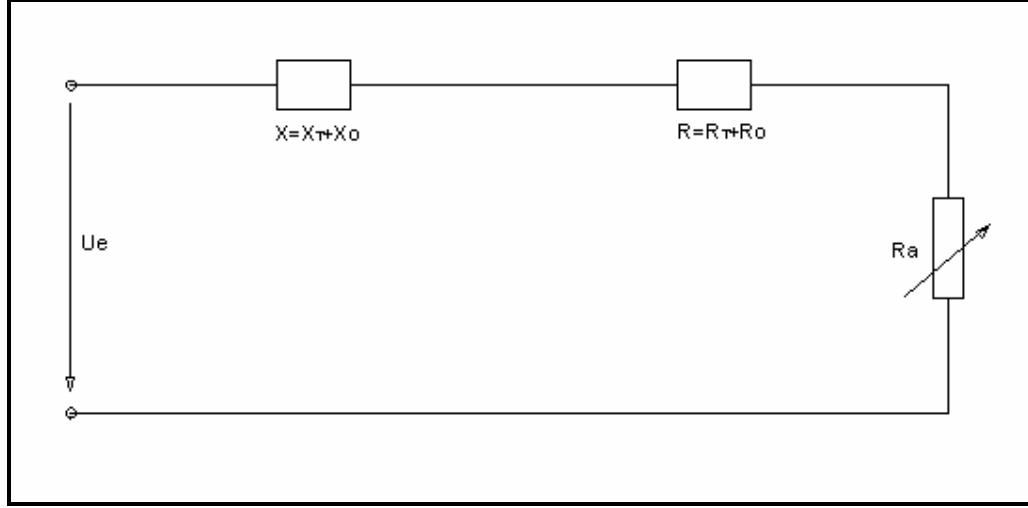
Bu yorumlar ışığında ark oluşumunun, güç faktörünün düşük olduğu durumda daha kolay ve hızlı gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle ark ocaklarında güç faktörünün 0,707 seviyesine yakın tutulması amaçlanmıştır. Bu durum, matematiksel olarak ispatlanmak istenirse, öncelikle ark ocakların devre şemasının oluşturulması gerekir.

Şekil 4.12. ve 4.13' de elektrik ark ocaklarının prensip şeması ve eşdeğer devresi gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Elektrik ark ocağı prensip şeması





Şekil 4.13. Elektrik ark ocağı eşdeğer devresi

Burada;

$U_e$ : Ortak bağlantı noktasındaki faz-faz gerilimi

$X$ : Tüm devre reaktansı  $X = X_T + X_O = X_T + X_t + X_f$

$R$ : Tüm devre direnci  $R = R_T + R_O = R_T + R_t + R_f$

$R_a$ : Ark Direnci

$X_T$ : Ortak bağlantı noktası ile ocak trafosu arası reaktans

$R_T$ : Ortak bağlantı noktası ile ocak trafosu arası direnç

$X_O$ : Trafo + Ocak reaktansı

$R_O$ : Trafo + Ocak direnci

Buna göre ark akımı:  $I = I_a$ ;

$$I_a = \frac{U_e}{Z} = \frac{U_e}{\sqrt{(R + R_a)^2 + X^2}} \quad (4.66.)$$

olarak bulunur. Ortak bağlantı noktasındaki toplam bir faz gücü;

$$P = I_a^2 * (R + R_a) = \frac{U_e^2 * (R + R_a)}{(R + R_a)^2 + X^2} \quad (4.67.)$$

olarak bulunur. Ark gücü ise;

$$P_a = I_a^2 * R_a = \frac{U_e^2 * R_a}{(R + R_a)^2 + X^2} \quad (4.68.)$$

olarak yazılabilir. Üç faz ark gücü;

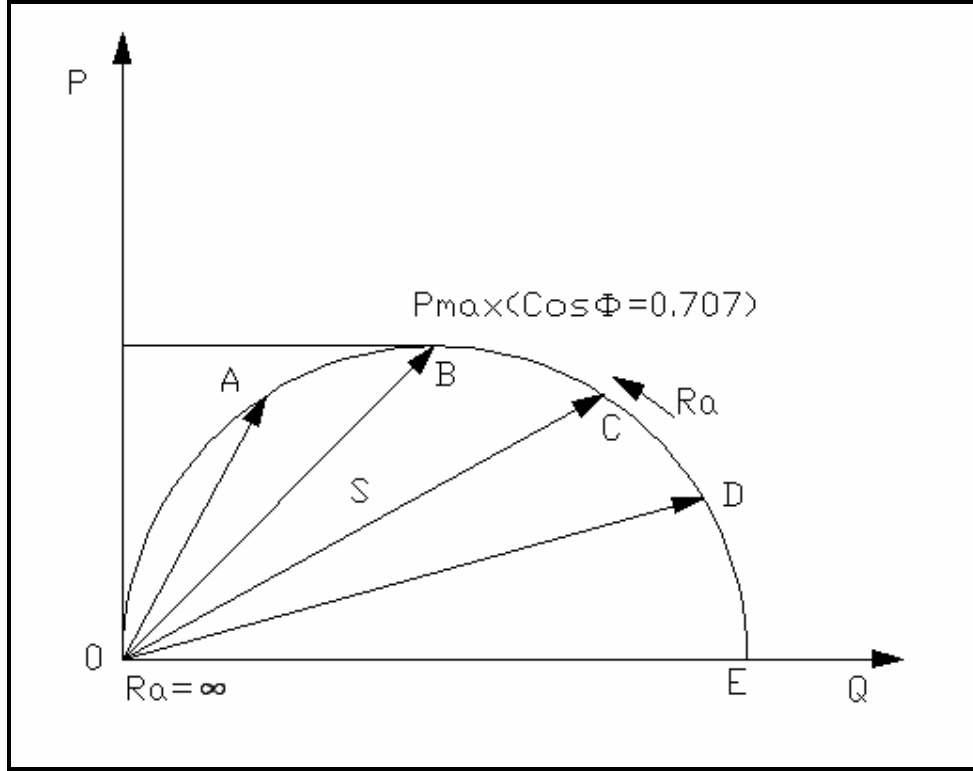
$$P_{3a} = 3 * I_a^2 * R_a \quad (4.69.)$$

olarak bulunur. Güç faktörü;

$$\text{Cos } \Phi = \frac{R_{top}}{Z_{top}} = \frac{R + R_a}{\sqrt{(R + R_a)^2 + X^2}} \quad (4.70.)$$

olarak bulunur.

Eşitlik 4.66.'daki  $R_a$  direnci değişkendir.  $R_a$ 'nın küçülmesiyle ark gücü dolayısıyla ocağa verilen enerji büyür. Belirli bir akım değeri için enerji maksimum değerine ulaşır. Direncin daha fazla küçülmesi ile akım büyür, ancak ark gücü minimum bir değer doğru yönelir.  $R_a = 0$  olursa ocak kısa devre olur. Şekil 4.14.'de  $R_a$  ark direncine göre P ve Q güçlerinin değişimi görülmektedir.



Şekil 4.14. Elektrik ark ocaklarında  $R_a$  direncine göre güç değişimleri

Ark ocaklarında, ark akımının büyüklüğünü sınırlayan bir empedans değeri vardır. Güç kaynağından gelen akım, bu empedans üzerinden geçer. Bu sınırlayıcı empedans, ocak trafosunun, yüksek akım kablolarının, ikincil çıkış baralarının, v.b. elemanların empedanslarıdır. Ark gerilimi, trafonun nominal geriliminden (açık devre durumu), sıfıra kadar (kısa devre durumu) değişir. Bu nedenle belirli bir empedansa sahip ark ocağının belirli bir maksimum akımı ve devre direnci tarafından sınırlanmış belirli bir kısa devre güç faktörü vardır.

Eşitlik 4.67.,  $R_a$ 'ya göre türev alınıp sıfıra eşitlenirse maksimum güç bulunur.

$$\frac{dP}{dR_a} = U_c^2 * \frac{X^2 - (R + R_a)^2}{[(R + R_a)^2 + X^2]^2} = 0 \quad (4.71.)$$

Buradan  $X = R + R_a$  koşulu bulunur. Bu demektir ki bir ark ocağında devre direnci, devre reaktansına eşit olduğu zaman, şebekeden çekilen güç maksimum olur.

4.67. Eşitliğinde  $X = R + R_a$  yerine koyulursa;

$$P_{\max} = \frac{U_e^2}{2X} \quad (4.72.)$$

bulunur.  $P_{\max}$  noktasındaki  $\cos \Phi$  ise;

$$\cos \Phi_{P_{\max}} = \frac{R + R_a}{\sqrt{(R + R_a)^2 + X^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707 \quad \text{bulunur.}$$

Buradan anlaşılacağı üzere maksimum güçte  $\cos \Phi = 0,707$ ' dir. Aynı zamanda;

$$P_{\max} = \frac{1}{2} Q_{\max} \quad (4.73.)$$

bulunur. Eşitlik 4.68.' in  $R_a$ ' ya göre türevi alınıp sifıra eşitlenirse, maksimum ark gücü bulunabilir.

$$\frac{dP_a}{dR_a} = 0 \rightarrow R_a^2 = R^2 + X^2 \quad \text{koşulu bulunur.}$$

Yani en büyük ark gücü için ark direnci, devre empedansına eşit olur. Bu koşul Eşitlik 4.66.' da yerine konulursa;

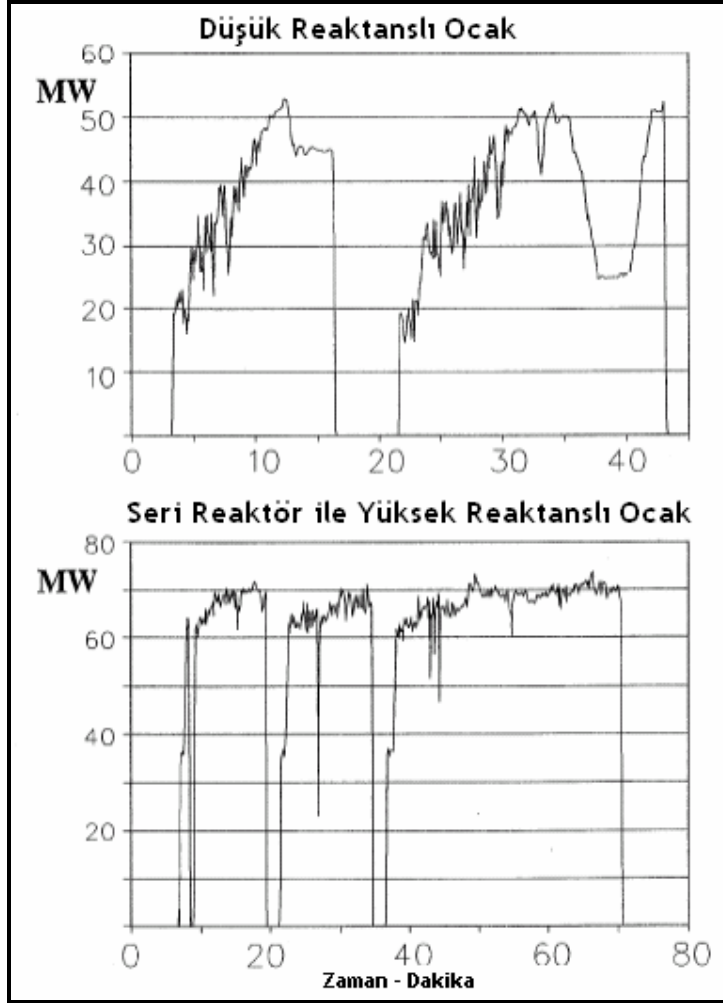
$$I_o = \frac{0,707 * U_e}{\sqrt{(R^2 + X^2) + R * \sqrt{R^2 + X^2}}} \quad (4.74.)$$

elde edilir. Bulunan bu  $I_o$  akımına, optimum ark akımı denir ve maksimum ark gücünün gerçekleştiği akım olarak belirtilir.

#### 4.6. Reaktansın Artırılması

Elektrik ark ocaklarında, güç faktörünün etkin limitler içerisinde sürdürülebilmesi için, toplam reaktansın yüksek tutulması gereklidir. Toplam reaktans düşük olduğu zaman, güç faktörü yüksek değerlere ulaşarak, elektrik operasyonun kararlılıktan uzaklaşmasına neden olur. Ayrıca ark geriliminin artırılabilmesi için de trafo geriliminin ve toplam reaktansın artırılması gereklidir (GRANT ve ark., 2005). Reaktans eşitliğinin,  $X = X_L - X_C$  olduğu hatırlanacak olursa, endüktif reaktans olan  $X_L$ ' nin büyütülmesiyle, reaktansın yükseleceği görülmektedir. Bunun sağlanabilmesi için, bobin etkisi yapan bir reaktörün, ocak elektrik devresinin birincil tarafına seri bağlantılı olacak şekilde eklenmesi gereklidir. Eklenen reaktör, ocağın güç sisteminin kaynak empedansını yükselterek, elektrik arkını kararlı hale getirir. Genel olarak reaktörler kademelidir ve toplamda maksimum endüktansın %40' ı ile %100' ü arasında bir aralığa sahiptirler.

Şekil 4.15.' te seri reaktör ilavesiyle reaktansın artırılıp, güç faktörünün düşürülmesinin, ocağa olan olumlu etkisi net bir şekilde görülebilmektedir. Birinci grafikte, düşük reaktansa sahip bir ark ocağının, aktif güç-zaman grafiği verilmiştir. İkinci grafikte ise aynı ocakta seri reaktör kullanılarak yüksek reaktans elde edilmesi sonrası, aktif güç-zaman grafiği verilmektedir.



Şekil 4.15. Reaktansın ocak kararlılığına etkisi

Düşük reaktanslı durumda, akım düşümünün dengelenebilmesi için yüksek güç faktörü ile çalışılma zorunluluğu ortaya çıkmış, bunun sonucunda da aktif güç değeri 30–50 MW arasında dalgalanmıştır. Ocağa seri reaktör ilavesi sonrasında ise elde edilen yüksek reaktans sayesinde daha düşük güç faktörü ile çalışılma imkânı elde edilmiştir. Böylece yüksek gerilim kademelerinde aktif güç dalgalanması azaltılmış ve ocağa verilen aktif güç 62–70 MW seviyelerine çıkmıştır. Aktif güç değerindeki bu artış, dökümden döküme olan süreyi azaltmakta, ayrıca ark oluşumundaki kararlılıktan dolayı da düşük fliker oluşumuna neden olmaktadır. Reaktör kullanımı sonrası bazı ocakların ikincil sistemlerindeki mekanik rezonansın da azaldığı tespit edilmiştir (MADUEL ve BOWMAN, 1992).

#### 4.7. Güç Artırımı

Sıvı çelik üretimi için gerekli olan elektrik enerjisinin daha kısa sürede ocağa verilebilmesi, ocağın enerjili süresinin azaltılması anlamına gelmektedir ki gerek ocaktan alınabilecek sıvı çelik miktarının artırılması, gerekse azalan döküm süreleri sonucu ocaktan olabilecek ısı kayıplarının azaltılması gibi faydalarıyla modern ark ocaklarının tasarım kriterini oluşturmuştur.

Ocağa verilecek olan ark gücü, ark gerilimi ve akımının fonksiyonlarıdır. Gücün artırılması için faktörlerden birinin veya her ikisinin birden artırılması gerekir. Özellikle son on yıldır ark geriliminin artırılmasının, elektrot tüketimini de azalttığı yönde etkileri görülmüştür. Bu nedenle daha yüksek gerilimler, dolayısıyla daha uzun ark boyları ile çalışabilmek için cüruf köpürtme pratikleri ve su soğutmalı paneller üzerindeki çalışmalar artırılmıştır (TIMM ve PFEILER, 1992). Bu çalışmalar yapılmadan gerçekleştirilecek olan gerilim artırımı, refrakter tüketiminde ve termal verimde önemli dezavantajlara neden olacaktır.

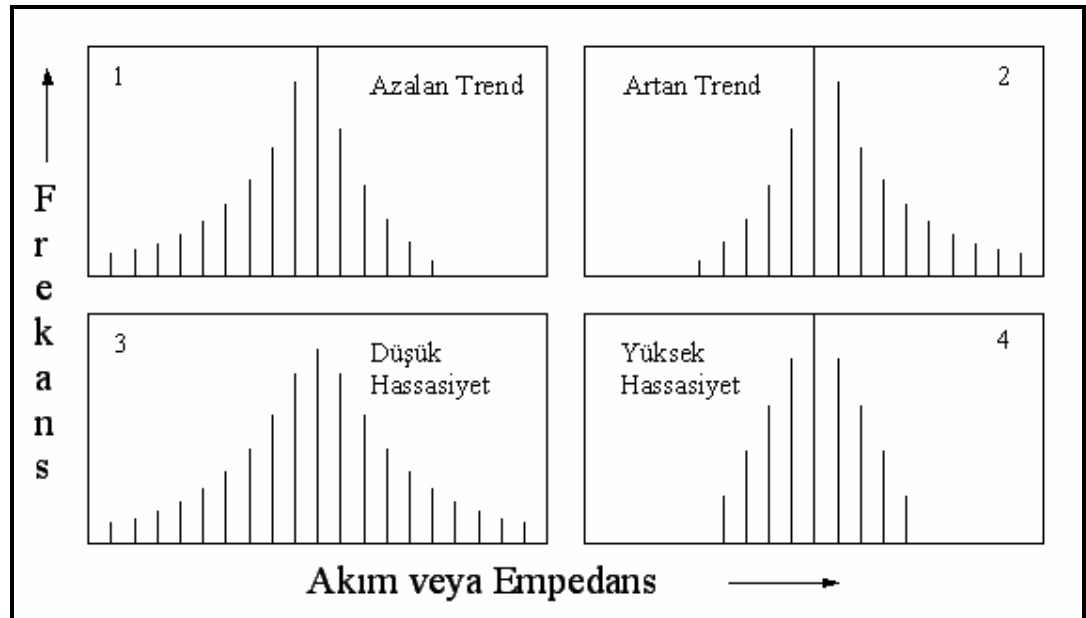
#### 4.8. Ark Ocağı Regülasyonu

Elektrik ark ocaklarında gerek enerjili gerekse enerjisiz sürelerin azaltılmasında, en önemli faktörlerden biri ocağın uygun bir regülasyon ile çalışmasıdır. İyi uygulanamayan bir regülasyon, ocağı ark oluşumunda kararlılıktan uzaklaştırarak, verilebilecek ortalama aktif gücün düşmesine ve dolayısıyla enerjili sürenin uzamasına neden olacaktır. Bunun yanında, sistem şartlarına uygun davranışı sağlamakta geciken bir ocak regülasyonu, başta elektrot kırılmaları ve refrakter aşınmaları gibi sebepler ile ocağın enerjisiz sürelerinin de artmasına neden olacaktır (MARTIG, 1996). Bu nedenlerden dolayı değişken sistem şartlarının göz önüne alındığı ve mevcut sistemlerin analiz edildiği en uygun regülasyon tipinin seçimi, günümüz ocak işletmelerinin en önemli karar kriterlerinden birini oluşturmaktadır.

Ark ocağı regülasyonunun temel hedefi, ocak operasyonunu belirlenen ihtiyaç noktalarında tutabilmek ve elektrik arkının, ocak yapısına uygun bir şekilde kararlı ve optimum şartlarda oluşturulmasını sağlamaktır. Bu sayede ocağa verilecek olan aktif gücün optimum değere getirilmesi ve ocağın enerjili süresinin azaltılması hedeflenmektedir.

Regülasyon için sistemden toplanan bilgiler, hazırlanmış bir bilgisayar yazılımı sayesinde değerlendirilerek, sistem şartlarının sağlanması amacıyla elektrot hareketlerinin kontrol edilebileceği sinyaller şeklinde çıktılara dönüştürülür. Bu sayede, sistemin referans şartlarının sağlanması ve sistemin korunması gibi amaçlarla, elektrotların aşağı–yukarı olan hareketleri, dolayısıyla elektrik arkının oluşumu kontrol edilir.

Regülasyon sisteminin çalışma performansının değerlendirilebilmesi için histogram adı verilen diyagramlar kullanılabilir. Bu histogramlarda, belirli bir zaman dilimi içerisinde ölçülen akım veya empedans değerlerinin değişim frekansı gözlenir. İyi bir regülasyon sisteminde, bu değişimlerin frekansının çok yüksek olması beklenir. Histogramların değerlendirilmesi sonucu regülasyon sisteminin ve ocağın mekaniksel sistemlerinin çalışmaları hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. Örnek bir histogram çalışması Şekil 4.16.' da verilmektedir.



Şekil 4.16. Elektrik ark ocağı regülasyon sistemi histogram diyagramı (BANDIN, 2001)



Birinci ve ikinci histogramlardaki simetrik olmayan davranışlar, ya mekaniksel bir sorunun ya da elektrot kolonlarının aşağı–yukarı hareket hızlarında farklı ayarlar olduğunun izlenimini vermektedir. Muhtemel mekaniksel sorunlar olarak;

- Kolon kılavuz makaralarındaki sürtünmeler,
- Kılavuz makara sistemlerindeki rulman hasarları,
- Hidrolik hatlardaki tıkanmalardan bahsedilebilmektedir.

Üçüncü histogramda ise mekaniksel olarak herhangi bir problem olmamasına rağmen, regülasyon sisteminin tepki hızının yavaş olduğundan bahsetmek mümkündür. Dördüncü histogram ise her şartı ile mükemmel çalışan bir ocak regülasyon sistemini ifade etmektedir.

Regülasyon, iki değeri dikkate alan bir programın çıktıları kullanılarak gerçekleştirilir. Bu değerler, gerilim kademeleri kullanılarak tanımlanan yüksüz şartlardaki gerilim değerleri ve regülasyonun ayar değeridir. Regülasyon, kullanılan gerilim kademesi değeri için operasyon noktasını, ayar değere getirmeye çalışır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta güç, akım, güç faktörü ve radyasyon şiddeti gibi faktörlerin, istenilen operasyon şartı değerini sağlamasıdır (BANDIN, 2001). Gerçekte, sistem karakteristiklerinin değişiklikleri nedeniyle teoriden farklı sonuçlar oluşur. Bu nedenle ana nokta olarak, güç geriliminin ve operasyon empedanslarının değişimleri göz önüne alınabilir. Güç gerilimindeki değişimler, yüksüz durumdaki gerilimde de değişimlere neden olur. Hattın empedans değişimleri ise çok dinamik ve önemlidir. Empedans değişimleri, akımın ve harmoniklerin etkilerinden kaynaklanır. Bahsedilen bu iki etki, elektrik devresinin karakteristiklerinde ve bunun doğal sonucu olarak operasyon noktasında, değişimlere neden olur.

Ark ocağı regülasyonu dört farklı kontrol tipinde çalıştırılabilir. Hangi kontrol tipinin seçileceği tamamen operasyon şartlarına bağlıdır. Her kontrol tipinin kendine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmakla birlikte hepsinde ana amaç, ocağa optimum noktada güç verebilmektir.

#### **4.8.1. Sabit Empedans Kontrolü**

Bu kontrol tipinde hat empedansının vektörel değeri sabit tutulmaya çalışılmaktadır. Sabit empedans kontrolü için güç geriliminin ve gücün değişimine ek olarak ilgili değerlerde akımın değişimi gereklidir. Hattın görünür empedansındaki değişimler, ark ve güç geriliminde değişimlere neden olurken, akım üzerinde etkili olmaz (akımın operasyon noktası civarında salınımlar yapması beklenir). Ark parametrelerinin göreceli olarak bu zayıf kontrolü, operasyona bir avantaj sağlar. Bu avantaj, ergime sırasında operasyonun, otomatik olarak kararlı durumunda olmasıdır. Çünkü ark gerilimi, hat empedansına kıyasla daha kolay değişim gösterir. Empedansın azalması ile ark gerilimi güçlü duruma gelecektir.

#### **4.8.2. Sabit Ark Gerilimi Kontrolü**

Ark geriliminin önemi işletmeler tarafından yeniden hatırlanmaktadır. Bu değere bağlı bir regülasyon, çeşitli dezavantajları göz ardı edilmek suretiyle, devrenin karakteristiklerine göre akımın yükseltilmesine izin verir. Avantajları olarak, fazlar arası mükemmel denge, ayar değerlerinin kolay belirlenebilmesi ve üç fazın empedans eşitliğinin yakın değerlerde sağlanabilmesi sayılabilir. Dezavantajları olarak ise hat empedansının ve güç geriliminin değişimleri sonucu güç ve akımda büyük değişimler olmasıdır.

#### **4.8.3. Sabit Ark Direnci Kontrolü**

Bu regülasyon tipinin avantajları olarak, aktif gücün ortalama değerinin yükselmesine katkıda bulunması, güç şebekesi üzerine olan olumsuz etkinin azaltılması, gerekli operasyon noktasına olan yaklaşımda kesinlik sayılabilir. Dezavantajıysa,

ergitmenin başlangıcında hat empedansındaki büyük değişimlerin, sabit empedans kontrolünde olduğu gibi güçte önemli dalgalanmalara neden olması söylenebilir.

#### 4.8.4. Sabit Aktif Güç Kontrolü

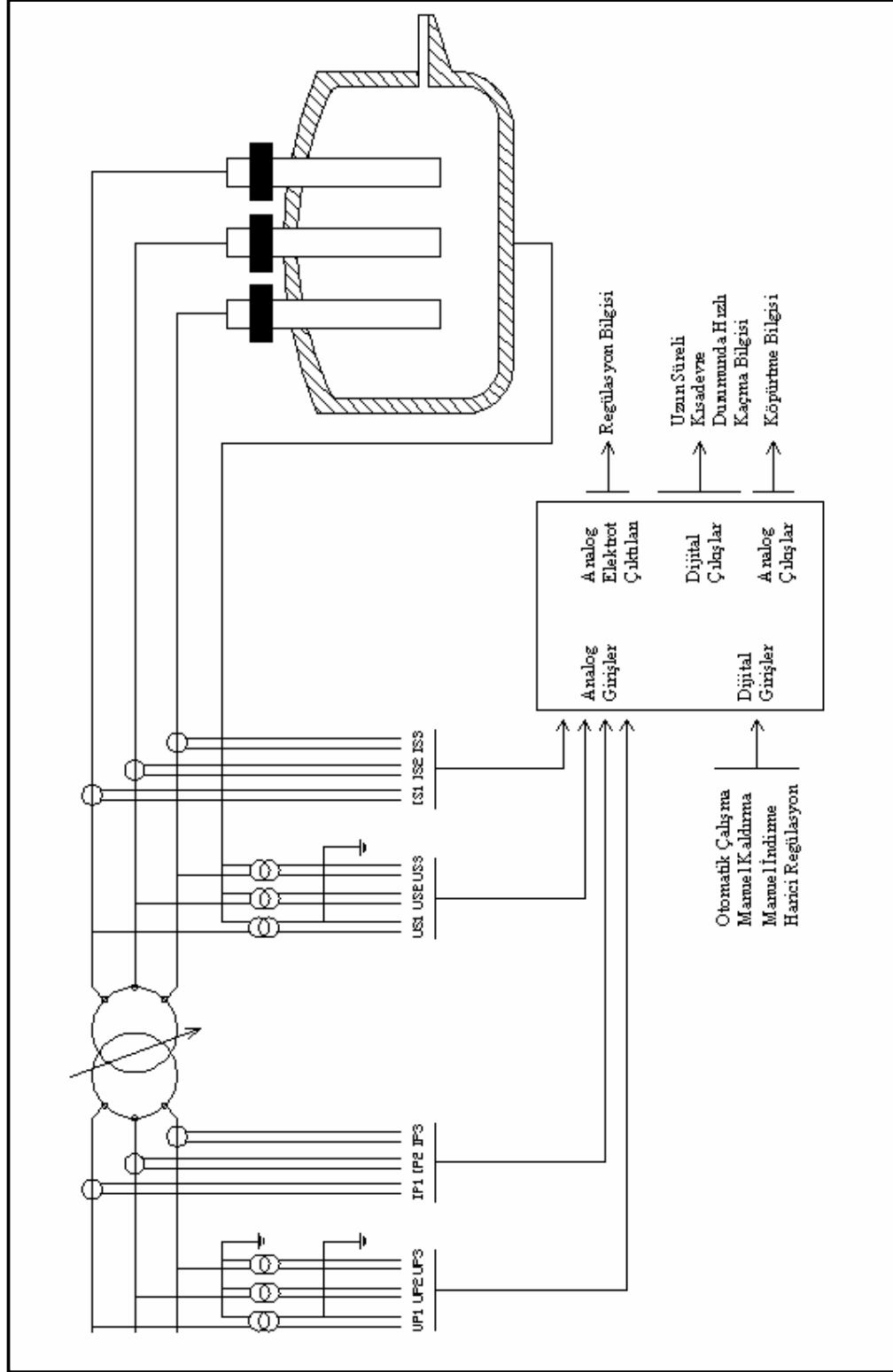
Bu kontrol şeklinde, herhangi bir zamandaki hat empedansı değeri için ark gerilimi en büyük, akım ise en küçük değerindedir. Bu noktadan sonra yüksek güç faktörü ile operasyon sürdürülür. Bu kontrolde, verilen bir güç için mümkün olan en yüksek güç faktörü değerine ulaşılacak istenir. Güç sabit olduğu zaman, akımın azalması ile termal güç artar. Bu kontrol tipinin kullanılmasıyla sistemin, şebeke geriliminin belirli limitler içerisindeki değişimlerine olan hassasiyeti azalır, daha büyük değişimlerinde ise klasik sistemler gibi davranır.

Çizelge 4.2' de, bahsi geçen kontrol tiplerinin avantaj ve dezavantajları bir tablo halinde verilmiştir. Ark ocağının karakteristikleri dikkate alınarak hangi kontrol tipinin seçilmesi gerektiği, ocak işletmecilerinin vereceği bir karardır. Bazı durumlar için, ocak operasyonunun değişik safhaları için farklı kontrol tipine geçmekte mümkün olabilmektedir.

Şekil 4.17.' de ise regülasyon sisteminin çalışması için gerekli, girdi ve çıktıların şematik gösterimi verilmiştir.

Çizelge 4.2. Regülasyon kontrol tiplerinin karşılaştırmaları

<b>Regülasyon Tipi</b>	<b>Dezavantajları</b>	<b>Avantajları</b>
Sabit Empedans Kontrolü	Ark direnci ve geriliminde meydana gelen değişimler nedeniyle operasyonda düzensizlikler	Gerilim ve akım ölçümündeki etkinlik nedeniyle kolay kullanım
	Fazlar arası ark geriliminin kontrol edilmemesi nedeniyle ocak duvarlarında hasarlanma riskinin artması	Kolay ark oluşturma
Sabit Ark Gerilimi Kontrolü	Akımda meydana gelen büyük değişimler nedeniyle operasyonda düzensizlikler	Sabit ark boyu nedeniyle radyasyon miktarında sınırlama
		Fazlar arasında mükemmel denge
Sabit Ark Direnci Kontrolü	Ark oluşumu sırasında, regülasyon ayar değerinin değişiminin gerekliliği	Ark gerilimi ve akımında dengeli değişimler
		Fazlar arası güç dengesinin sağlanması
Sabit Aktif Güç Kontrolü	Gerilim dalgalanması durumunda, kontrolün sağlanmasında problemler	Ark boyunun artması
		Ark akımının azalması
		Hat kayıplarının azalması
		Düzenli operasyon
		Trafonun maksimum gerilim ile kullanılabilmesi



Şekil 4.17. Elektrik ark ocağı regülasyon sistemi girdi ve çıktıları

#### 4.9. Ark Kararlılığı

Daha öncede bahsedildiği üzere, AC ve DC ocaklarda kararlı olmayan ark yanması, ocağa giren aktif gücün azalmasına, refrakter aşınmasının ve elektrik şebekesine olan olumsuz etkilerin ise artmasına neden olur. Kararlı bir ark yanması şu faktörlere bağlıdır:

- Arkın etrafını çevreleyen atmosferin durumu
- Ark boyu
- Hurda kompozisyonu

Ark ocaklarında uygulanan ileri cüruf köpürtme pratiklerinin tek faydası, arkı saklayarak ocak duvarına olan radyasyon etkisinin ve refrakter aşınmasının azaltılması değildir. Ark, bu cürufu bir tünel gibi kullanıp, içerisinde yüksek sıcaklıkta serbest olarak yanar. Bu olay, arkın etrafındaki atmosferin iletkenliğini yükselterek, kararlı bir ark yanmasını destekler. Bunun yanında, tamamen çevrelenmiş olan arkın, daha iyi olan iletkenliği nedeniyle, ark öz direnci düşmeye başlar ve ark boyu kısalmır.

Ark boyunun hesaplanabilmesi için Eşitlik 4.75. kullanılabilir.

$$L_a = U_a * \cos\Phi - 40 \quad (4.75.)$$

Burada;

$L_a$ : Ark boyu [mm]

$U_a$ : Ark gerilimi [V]

Yapılan çalışmalar göstermiştir ki ark kararlılığıyla ark direnci arasında çok kuvvetli bir ilişki vardır.

$$R_a = \frac{U_a}{I_s} \geq 7-8 \text{ mOhm olduğu takdirde ark kararlılığı bozulmaya}$$

başlamaktadır. İkincil akımın düşük değerlerinde (yüksek empedans) operasyon reaktansı  $X_s$ , hızla yükselir. Bunun sonucunda ark yanmasında kesiklikler meydana gelir ve çok daha fazla harmonik oluşumu gerçekleştirir. Bu nedenle trafonun her ikincil gerilim kademesi için kararlı bir ark yanmasını sağlayan minimum bir akım limit değeri vardır. Bu noktada güç faktörü de maksimum değerine ulaşabilir.

#### 4.10. Ark Ocaklarında Elektriksel Düzeltme İşlemi

Elektrik ark ocakları, çalışma sistemleri gereği ulusal elektrik sistemleri üzerinde çeşitli olumsuz etkilere yol açarlar. Bu olumsuzluklar olarak;

- Düşük güç faktörü yani yüksek reaktif güç tüketimi,
- Gerilim düşümleri,
- Gerilim dalgalanmaları (flikler),
- Harmonik oluşumu,
- Dengesiz yük oluşumları sayılabilir.

Bahsedilen bu olumsuzlukları engelleyebilmek veya belirli sınırlar içerisinde tutabilmek için sistemin, elektriksel düzeltme sistemleri tarafından desteklenmesi gerekmektedir (ORHON, 1986).

##### 4.10.1. Statik Volt Amper Reaktif (VAR) Düzeltmesi

Mevcut AC iletim sistemlerinin aşırı yüklenmeleri sonucu, güç sistemlerinde gerilim kararsızlığı ve gerilim dalgalanması gibi problemler oluşmakta ve önemli sorunlar teşkil etmektedir. Ayrıca yük tarafından talep edilen gerçek güç değişken

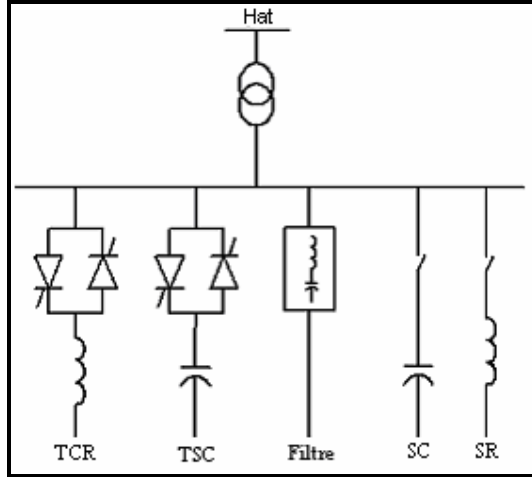
olduğundan, reaktif güç de sürekli değişebilmektedir. Dolayısıyla güç düzeltmesinin, dinamik bir şekilde yapılması gerekir (HOLM, 2003). Bu da genellikle, “Statik VAR Düzelticisi” (SVC) denilen bir sistemle yapılır. Elektriksel güç sisteminin parametrelerini kontrol edecek şekilde ayarlanabilen kapasitif veya endüktif akım çıkışlı, hatta paralel bağlı statik VAR üreticisi veya çekicileri, statik VAR düzelticisi olarak isimlendirilirler.

Statik VAR düzeltici sistemler, kapasitif reaktansları ikinin katları şeklinde seyreden ( $X_C = 1, 2, 4, 8, 16\dots$ ) ve istenen güç faktörüne ulaşmak üzere, devreden çıkartılıp devreye alınan kapasitör gruplarından oluşur. Ne kadar fazla kapasitör devreye alınmışsa, o kadar fazla kapasitif VAR oluşturulmuş olur. Yeni bir grup kapasitörün devreye alınmasına, bir röle karar verir. Röle akımını, ikincil bobininin uçları reaktif akımı gören bir akım trafosundan çeker. Rölenin karar kıstası, reaktif akım için seçilmiş olan bir eşik değerin ( $C/k$ ) aşılp aşılmadığıdır. Burada C, ek kapasitör grubunun VAR değeri, k ise akım trafosunun oranıdır.

Statik VAR düzeltici sistemler, gerilim kontrol çevrimlerinde, güç sistemi dalgalanmalarını etkili bir şekilde söndürebilir ve güç sistemlerinin kararlılığını artırabilirler. Son yıllarda birçok araştırmacı, güç sistemlerindeki elektromekanik dalgalanmaların söndürülmesi için, SVC sistemleriyle kararlılığın geliştirilmesi tekniğini önermektedirler (KARA ve YALÇINÖZ, 2005).

Şekil 4.18.’ de gösterildiği gibi SVC sisteminin yapısı, Tristör Kontrollü Reaktör (TCR) ve Tristör Anahtarlama Kapasitör (TSC)’ nin birleşiminden oluşmaktadır. Burada görülen filtre, TCR tarafından üretilen harmoniklerin süzülmesini sağlamaktadır. Bu filtrede kapasitif etki, endüktif etkiye oranla daha fazladır. Filtrenin reaktif gücü, TCR reaktif gücünün %10’ u ile %30’ u mertebesindedir. TSC yapılarının her biri yaklaşık olarak birbirlerine eşit güçte imal edilirler. Bu tür SVC yapılarında düzgün bir kontrol karakteristiği elde etmek için TCR akımı, TSC akımından çok az yukarıda seçilmelidir.





Şekil 4.18. Statik VAR düzelticisi devre şeması

Statik VAR düzeltici sistemler, reaktif güç dengelenmesi, yüksek sabit gerilim değerleri ve azaltılmış değişim seviyeleriyle son kullanıcılara büyük avantajlar sağlarlar. Üretimin artırılması, toplam güç kayıplarının azaltılması ve reaktif güç cezalarının engellenmesi gibi faydalar ile SVC yatırımı çok kısa zamanda kendini amorti edebilmektedir.

Statik VAR düzeltici sistemlerinin, diğer düzeltici sistemlere karşı avantajları olarak;

- Çok hassas düzeltme yapabilme,
- Devreye kısa sürede girip-çıkan sistemler için başarıyla uygulanabilme,
- Şebekede, dengesiz yüklerin neden olduğu asimetrisi engelleme,
- Gerilim regülasyonu yapabilme,
- Arıza yapma ihtimalinin az olması sayılabilmektedir.

Statik VAR düzeltme sisteminin etkisini görebilmek için DC tip bir ark ocağında çalışma yapılmıştır. Bu ocağa ergitme sırasındaki yaklaşık güç 78 MW civarında iken saflaştırma periyodunda bu güç 68,3 MW seviyelerine inmektedir. Bunun nedeni SVC' siz sistemdeki yüksek gerilim düşümlerinin dengelenememesi gösterilmektedir. Statik VAR düzeltme sistemleri, elektrik ark ocaklarında öncelikle birincil gerilimi sabitleyecektir. SVC sistemi olmayan bir ocak için gerilim düşümü;

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{S_k} \quad (4.76.)$$

eşitliği ile verilir. Burada;

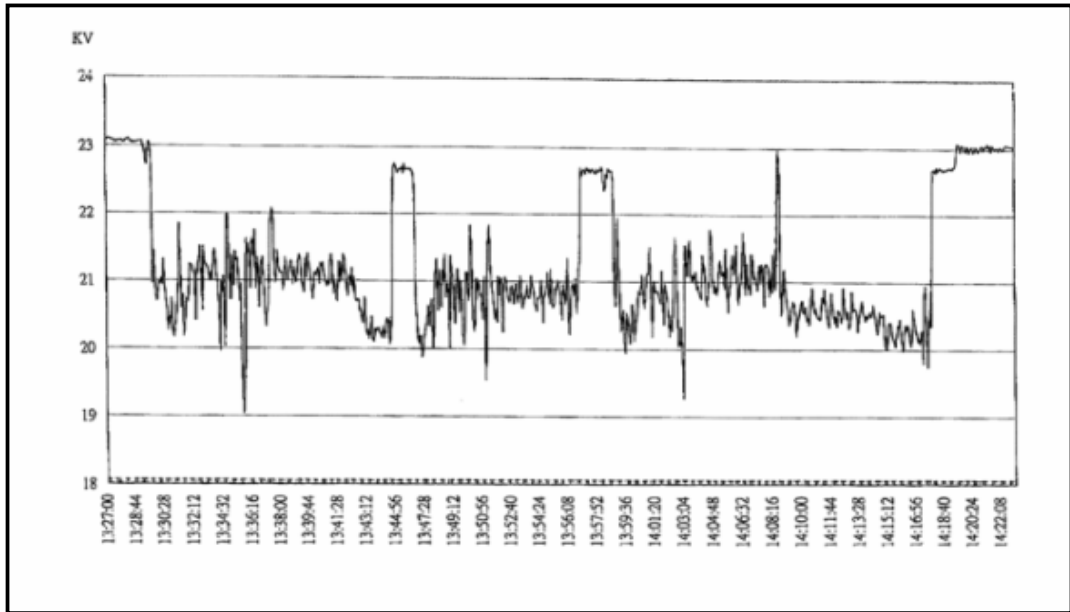
$\Delta U$ : Reaktif güç nedeni ile gerilim düşümü

$S_k$ : Elektrik ark ocağı barasının kısa devre kapasitesi

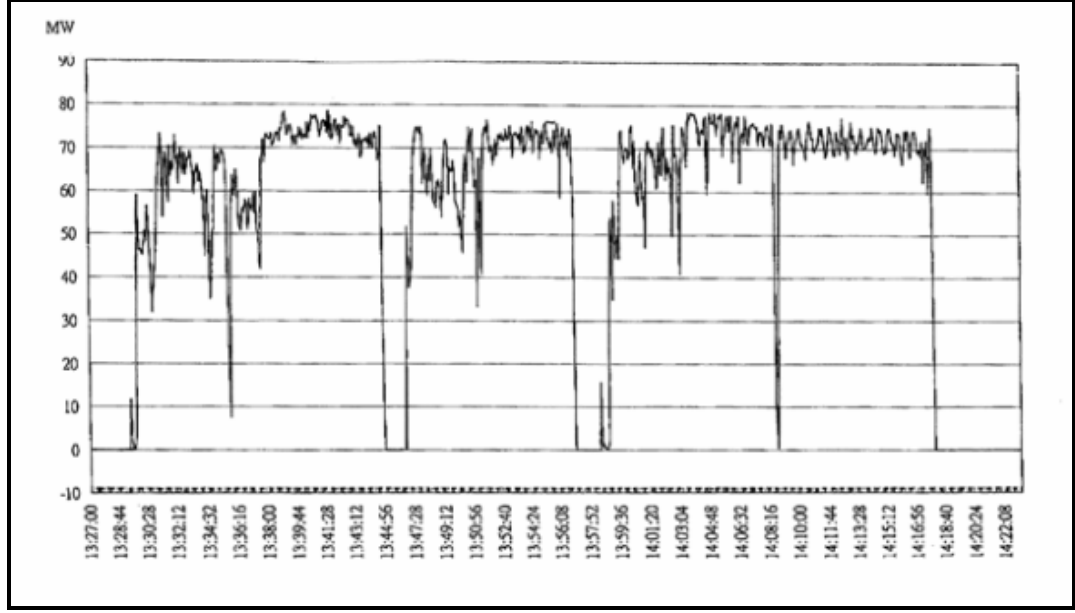
$\Delta Q$ : Elektrik ark ocağının reaktif güç yüklerindeki değişimdir.

Şekil 4.19., Şekil 4.20. ve Şekil 4.21.' de sırasıyla SVC systemsiz bir ark ocağının; birincil gerilim-zaman, aktif güç-zaman ve reaktif güç-zaman değişim grafikleri görülmektedir.

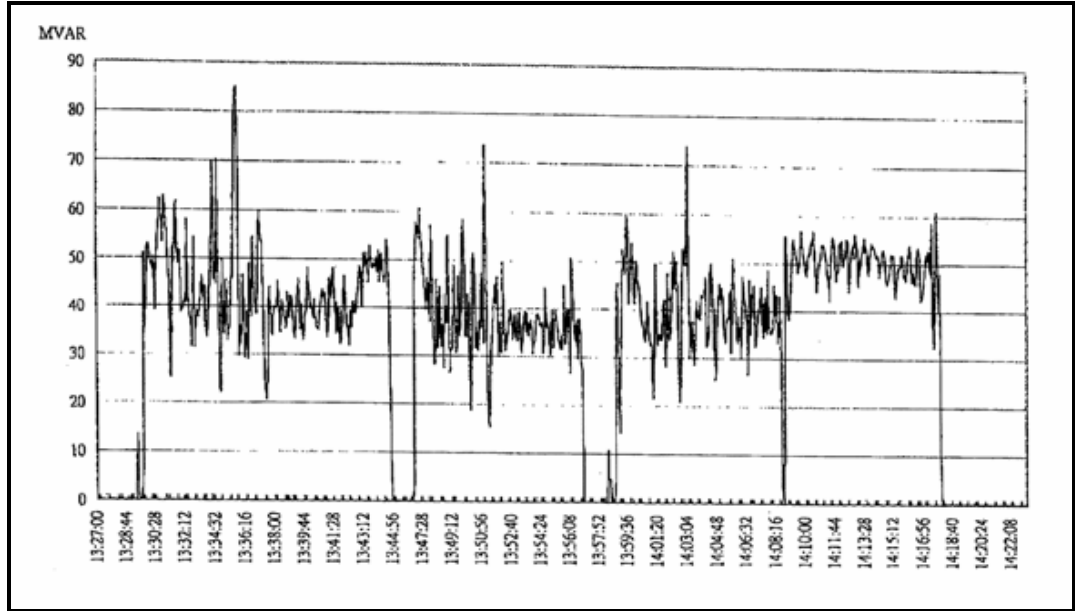
Şekil 4.19.' da görüldüğü üzere ocak birincil gerilimi 19–23,1 kV değerleri arasında değişmektedir. Birincil gerilimdeki bu dalgalanma, ocağın gerilim kontrolünde ciddi problemlere neden olmaktadır.



Şekil 4.19. Statik VAR düzelticisiz sistemde birincil gerilim-zaman grafiği



Şekil 4.20. Statik VAR düzelticisiz sistemde aktif güç-zaman grafiği



Şekil 4.21. Statik VAR düzelticisiz sistemde reaktif güç-zaman grafiği

Statik VAR düzeltici sistem sayesinde gerilim düşümü engellenerek, sabit bir birincil gerilim değeri elde edilir ve ocağa verilen aktif güç artar. Bu artış, Eşitlik 4.77. ile hesaplanabilir.

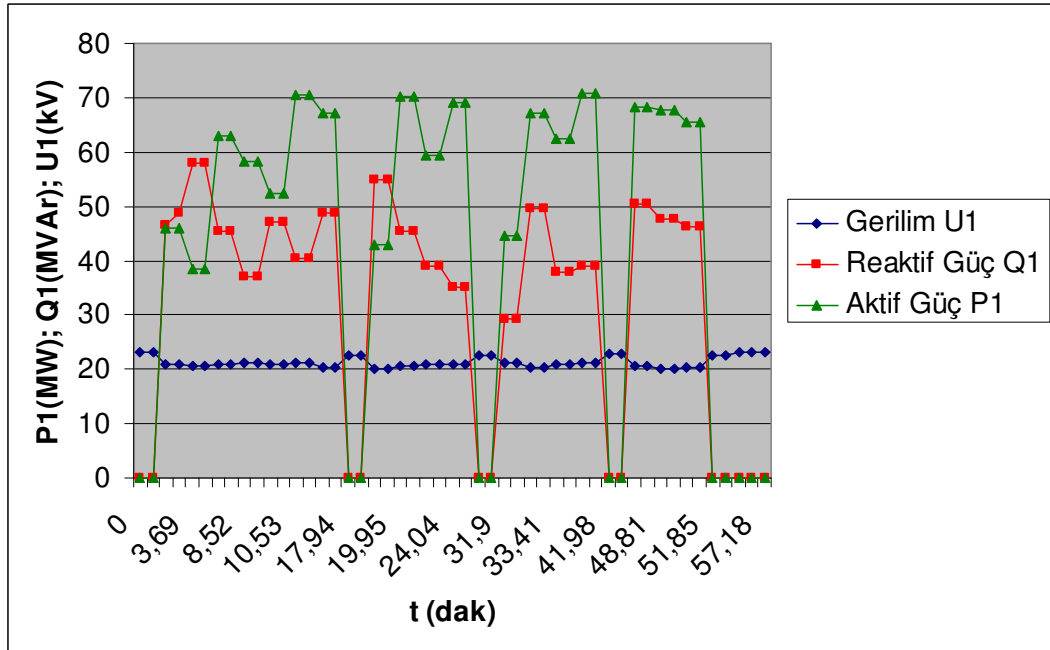
$$\Delta P (\%) = 100 * \left[ \frac{100}{100 - \Delta U (\%)} \right]^2 - 100 \quad (4.77.)$$

Burada;

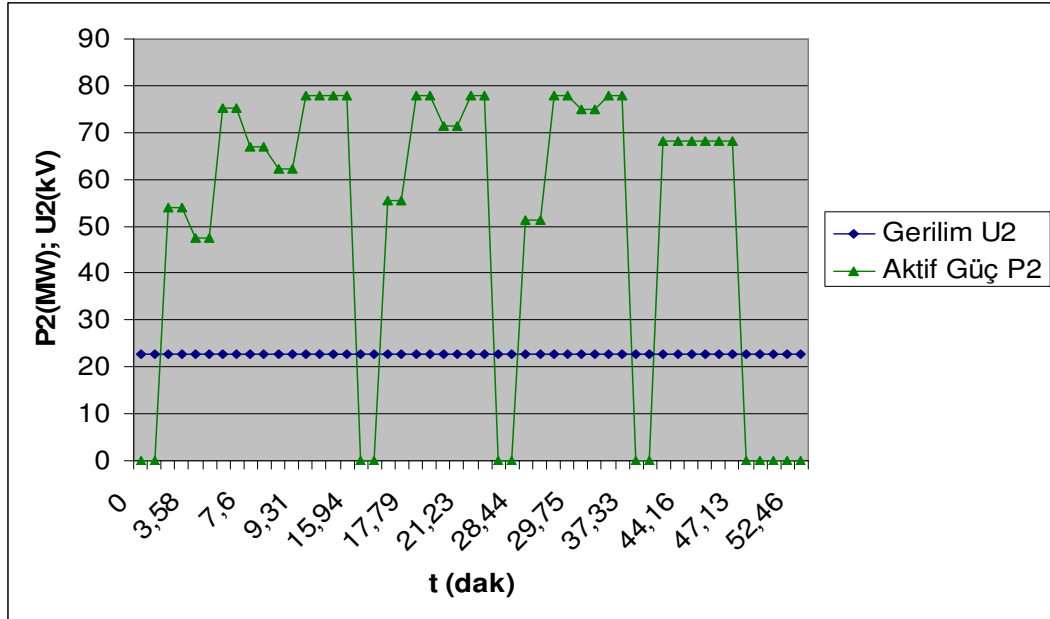
$\Delta P (\%)$ : Yüzde olarak güç artışı

$\Delta U (\%)$ : Yüzde olarak reaktif güç nedeni ile gerilim düşümü

Şekil 4.22. ve Şekil 4.23.' de SVC sistemi öncesi ve sonrası bir ocağın performans grafikleri verilmiştir. Görüldüğü üzere SVC sistemi sayesinde birincil gerilim 22,8 kV değerinde sabitlenebilmiştir. Birincil gerilimdeki dalgalanmanın engellenmesiyle ocağa verilen aktif gücün ortalaması yükselmiştir. Bu sayede toplam ergitme süresi 51,85 dakikadan 47,13 dakikaya indirilerek yaklaşık olarak %9,1 oranında bir zaman tasarrufu sağlanmıştır. Toplam enerjili süre ise 48,37 dakikadan 43,65 dakikaya indirilmiş ve yaklaşık olarak %9,8 oranında bir tasarruf sağlanmıştır.



Şekil 4.22. Statik VAR düzelticisiz sistemin karakteristikleri



Şekil 4.23. Statik VAR düzelticili sistemin karakteristikleri

Statik VAR düzelticili ve düzelticisiz her iki durumda da ocağın enerji tüketiminin 48,89 MWh olduğu Çizelge 4.3.' de görülebilmektedir. SVC' li durumda ergitme süresindeki azalma, sabit gerilim sayesinde ocağa verilebilen daha yüksek aktif güç nedeniyle. SVC' li sistemin faydaları incelenirken kısaldan zaman nedeniyle üretimdeki artış da dikkate alınmalıdır.

Ark ocaklarının yaklaşık enerji verimi %60–65 olarak verilmektedir. Geri kalan %35–40' lık enerji çeşitli şekillerde kayıp olarak değerlendirilmektedir. SVC sistemi sayesinde azalan ergitme süresi, bu kayıp enerjide de bir azalmaya neden olmaktadır. Hesaplanan kazanç yaklaşık olarak %3,2 civarındadır.

Statik VAR düzeltme sisteminin diğer faydaları olarak şunlar söylenebilir:

- Elektrot tüketimi ve refrakter aşınmaları azalır.
- Kararlı gerilim sayesinde ocak regülasyonunda hassasiyet sağlanır.
- Şebekeden çekilen reaktif güç, izin verilen limitler dâhilinde tutularak, muhtemel reaktif güç aşım cezaları engellenir.
- SVC sisteminin filtre devresi, tristör kontrollü reaktör tarafından üretilen harmonikleri absorbe ettiği gibi ayrıca diğer sistem kaynaklı harmoniklerin de absorbe edilmesinde etkilidir.

- Gerilimin kararlı hale getirilmesiyle sadece ark ocağının değil, tüm fabrikanın kontrol ve koruma sistemleri daha güvenli bir şekilde çalışır.
- Fliker seviyesi, şebeke tarafından izin verilen düzeye indirgenir.

Çizelge 4.3. Elektrik ark ocağı performans değerleri

	SVC Sistemi Devre Dışı					SVC Sistemi Devrede				Şarj Başına Enerji (MWh)
	t1 (dak)	U1 (kV)	Q1 (MVAR)	P1 (MW)	W1 (MWh)	t2 (dak)	U2 (kV)	P2 (MW)	W2 (MWh)	
1.Şarj	0	23,07	0	0		0	22,8	0		
	2,91	23,07	0	0	0	2,91	22,8	0	0	
Giriş Kademesi	2,92	21,04	46,5	46		2,92	22,8	54		
	3,68	21,04	48,8	46	0,58	3,57	22,8	54	0,58	
Delme Kademesi	3,69	20,49	58,1	38,5		3,58	22,8	47,6		
	4,32	20,49	58,1	38,5	0,4	4,08	22,8	47,6	0,4	
Ergitme	4,33	20,87	45,3	63,1		4,09	22,8	75,3		
	8,51	20,87	45,3	63,1	4,4	7,59	22,8	75,3	4,4	
Ergitme	8,52	21,25	37,2	58,2		7,6	22,8	67		
	9,09	21,25	37,2	58,2	0,56	8,1	22,8	67	0,56	
Ergitme	9,1	20,89	47,1	52,4		8,11	22,8	62,4		
	10,52	20,89	47,1	52,4	1,24	9,3	22,8	62,4	1,24	
Ergitme	10,53	21,14	40,4	70,5		9,31	22,8	78		
	16,27	21,14	40,4	70,5	6,75	14,5	22,8	78	6,75	
Ergitme Sonu	16,28	20,23	48,8	67,1		14,51	22,8	78		
	17,93	20,23	48,8	67,1	1,85	15,93	22,8	78	1,85	15,78
1. Şarj Sonu	17,94	22,67	0	0		15,94	22,8	0		
	19,22	22,67	0	0	0	17,22	22,8	0	0	
Giriş ve Delme Kademesi	19,23	20,09	54,9	43		17,23	22,8	55,4		
	19,94	20,09	54,9	43	0,51	17,78	22,8	55,4	0,51	
Ergitme	19,95	20,52	45,4	70,2		17,79	22,8	78		
	20,53	20,52	45,4	70,2	0,67	18,31	22,8	78	0,67	
Ergitme	20,54	20,78	38,9	59,3		18,32	22,8	71,4		
	24,03	20,78	38,9	59,3	3,45	21,2	22,8	71,4	3,45	
Ergitme	24,04	20,86	35,2	69		21,23	22,8	78		
	29,69	20,86	35,2	69	6,5	26,24	22,8	78	6,5	11,13
2. Şarj Sonu	29,7	22,67	0	0		26,25	22,8	0		
	31,89	22,67	0	0	0	28,43	22,8	0	0	

Çizelge 4.3. (Devam) Elektrik ark ocağı performans değerleri

Giriş Kademesi	31,9	21,27	29,3	44,7		28,44	22,8	51,4		
	32,51	21,27	29,3	44,7	0,45	28,97	22,8	51,4	0,45	
Delme Kademesi	32,52	20,3	49,7	67,1		28,98	22,8	78		
	33,4	20,3	49,7	67,1	0,99	29,74	22,8	78	0,99	
Ergitme	33,41	20,8	37,8	62,4		29,75	22,8	75		
	36,13	20,8	37,8	62,4	2,83	32,02	22,8	75	2,83	
Ergitme	36,14	21,12	38,9	70,8		32,03	22,8	78		
	41,97	21,12	38,9	70,8	6,88	37,32	22,8	78	6,88	
Ergitme	41,98	22,88	0	0		37,33	22,8	0		
	42,23	22,88	0	0	0	37,57	22,8	0	0	
Ergitme	42,24	20,58	50,5	68,3		37,58	22,8	68,3		
	48,8	20,58	50,5	68,3	7,47	44,15	22,8	68,3	7,47	
Ergitme Sonu	48,81	20,2	47,6	67,8		44,16	22,8	68,3		
	50,64	20,2	47,6	67,8	2,06	45,97	22,8	68,3	2,06	
Saflaştırma	50,65	20,37	46,2	65,4		45,98	22,8	68,3		
	51,84	20,37	46,2	65,4	1,3	47,12	22,8	68,3	1,3	21,98
3. Şarj Sonu	51,85	22,69	0	0		47,13	22,8	0		
TOPLAM	51,85					47,13				48,89

#### 4.11. Refrakter Simetrisi Üzerine Etkiler

Ark ocaklarında dikkat edilmesi gereken diğer bir önemli noktada refrakter aşınması ve bu aşınmanın dengeli olarak gerçekleştirilebilmesidir. Özellikle yüksek ikincil gerilime sahip trafoların kullanıldığı modern ocaklarda, ergitmenin başlangıcında yüksek gerilim kademelerinde uzun ark boylarıyla çalışmak avantajlıdır. Bu sayede arkın radyasyon etkisi kullanılarak, elektrotlara uzak bölgedeki hurdaların da çok daha hızlı bir biçimde ergitilmesi sağlanmaktadır. Ergitmenin bitip saflaştırma periyoduna geçildiği zaman bu çalışma metodu, arkı saklayabilecek hurda kalmadığından ve

cürufun belli oranda ark radyasyonunu engelleyebilmesinden dolayı, refrakter ve su soğutmalı paneller üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir. Bu olumsuzlukları önlemek için trafo kademesi düşürülerek daha kısa ark boylarıyla çalışılır.

Ocak refrakterinin aşınmasını hesaplayabilmek için iki değere ihtiyaç vardır:

- Ark gerilimi (Ark boyu)
- Ark gücü (Radyasyon yoğunluğu)

Refrakterinin ocağın her bölgesinde dengeli olarak aşınması, operasyonun başarılı olarak sürdürüldüğünün kanıtıdır. Her üç fazdaki ark gerilimi ve gücünün eşitliği, refrakter aşınmasının simetrisi için temel gerekliliktir. Pratikte her üç fazda eşit ark gerilimi ve gücü değerleri aynı akım değerinde bulunmaz. Bu nedenle her değerlerin etkisini içeren ve bir karşılaştırma olan relatif refrakter endeksi (RI) değeri kullanılır. Her üç faz için RI değerinin birbirlerine olan yakınlığı, refrakterin simetrik olarak aşınması için temel gerekliliktir.

$$1. \text{ Faz: } \quad RI_1 = \frac{U_{a1} * P_{a1}}{U_{a1} * P_{a1} + U_{a2} * P_{a2} + U_{a3} * P_{a3}} * \%100 \quad (4.78.)$$

$$2. \text{ Faz: } \quad RI_2 = \frac{U_{a2} * P_{a2}}{U_{a1} * P_{a1} + U_{a2} * P_{a2} + U_{a3} * P_{a3}} * \%100 \quad (4.79.)$$

$$3. \text{ Faz: } \quad RI_3 = \frac{U_{a3} * P_{a3}}{U_{a1} * P_{a1} + U_{a2} * P_{a2} + U_{a3} * P_{a3}} * \%100 \quad (4.80.)$$



Burada;

U: Ark gerilimi [V]

P: Ark gücü [MW]

RI: Relatif refrakter endeksi % cinsinden ifade edilir.

Refrakter aşınmasında, ark gerilimi ve gücünün etkilerinin yanında aşağıdaki olaylarında olumlu ya da olumsuz etkilerinin bulunduğu bilinmektedir:

- Cüruf yapma pratikleri
- Oksijen üfleme yöntemi
- Hurda şarjının çeşitliliği, alaşım şartları
- Elektrot ayarları
- Ocak tabanının geometrisi

#### 4.12. Elektrot Tüketimi Üzerine Etkiler

Günümüz rekabet koşullarında, elektrot tüketimleri üzerinde yapılabilecek iyileştirmeler büyük önem kazanmıştır. Elektrot tüketiminde akım seviyesi, enerjili süre, okside olan elektrot yüzey alanı, üretim miktarı gibi parametreler etkili olmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda elektrotların iki biçimde tükendiği belirlenmiştir. Bu iki biçimin toplamı, toplam elektrot tüketimi olarak verilmektedir.

- Uç tükenmeleri ( $C_{Uç}$ )
- Oksidasyon tükenmeleri ( $C_{Oks}$ )

Eşitlik 4.81. ve 4.82.' de bu tüketimlerin hesaplamaları verilmektedir (BANDIN, 2001).

$$C_{U\check{c}} = ID * \frac{I^2 * TU}{G_D} \quad [\text{kg/ts}\check{c}] \quad (4.81.)$$

$$C_{Oks} = F * B * \pi * D * \frac{L_{Oks}}{G_D} \quad [\text{kg/ts}\check{c}] \quad (4.82.)$$

Elektrottaki toplam tüketim her iki tüketimin toplanması ile elde edilir.

$$C_{Top} = C_{U\check{c}} + C_{Oks} \quad (4.83.)$$

Burada;

ID: Akım yoğunluğu [kg/kA<sup>2</sup>h] (Çizelge 4.4.)

I: Akım [kA]

TU: Enerjili sürenin dökümden döküme süreye oranı

G<sub>D</sub>: Sıvı ham çelik miktarı [Ton]

F: Elektrot sayısı

B: Oksidasyon katsayısı [kg/m<sup>2</sup>h] (Çizelge 4.5.)

D: Elektrot çapı [m]

L<sub>Oks</sub>: Oksijen üfleme mesafesi [m]

Çizelge 4.4. Akım yoğunluğu değerleri

Ocak Özelliği	ID [kg/kA <sup>2</sup> h]
DC	0,0124
AC, akım yoğunluğu > 27 A/cm <sup>2</sup>	0,056
AC, akım yoğunluğu 22–27 A/cm <sup>2</sup>	0,045
AC, akım yoğunluğu 17–22 A/cm <sup>2</sup>	0,041
AC, akım yoğunluğu < 17 A/cm <sup>2</sup>	0,036

Çizelge 4.5. Oksidasyon katsayısı değerleri

Ocağa Verilen Oksijen Miktarı [ $\text{Nm}^3/\text{ton}$ ]	B [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$ ]
< 5	3,0 – 4,0
5 – 15	5,0 – 6,0
25 – 45	6,0 – 8,0
25 – 45 ileri yanma sistemli	8,0 – 10,0

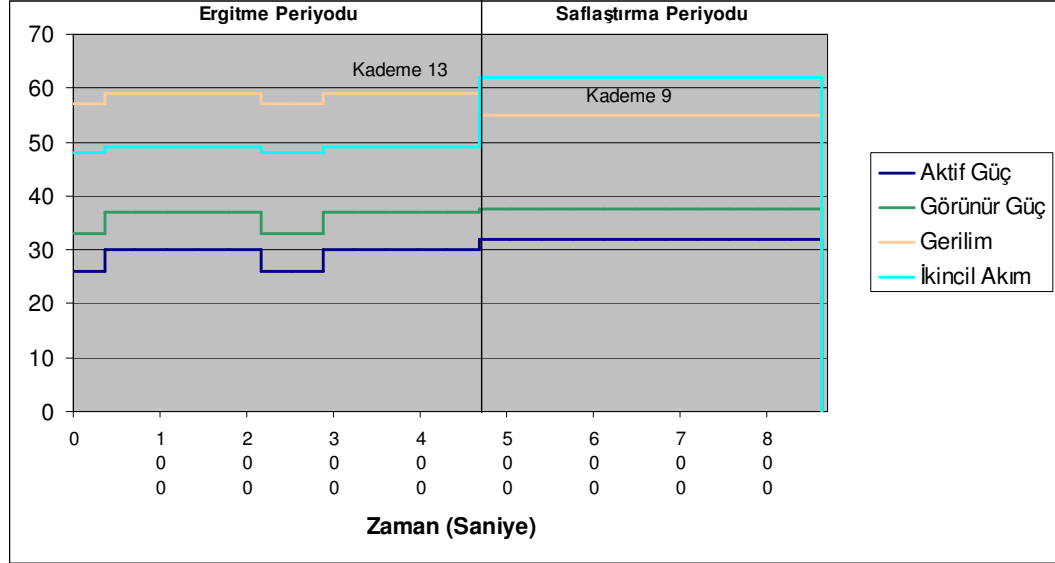
Elektrot tüketimiyle ilgili formüller incelendiği zaman görülmektedir ki oksidasyon ile meydana gelen tükenme, ocağın yapısal özelliklerinden kaynaklanan parametrelere bağlı olup bu bölümde bir tasarruf gerçekleştirmek kolay değildir. Uç aşınması sonucu meydana gelen tükenmeler ise, trafonun ikincil akımıyla doğru orantılı bir şekilde artmaktadır. Yani ikincil akımın azaltılmasıyla elektrot tüketiminde de azalma gerçekleşecektir. Ancak sadece ikincil akımın azaltılması, direkt olarak ocağa verilecek aktif gücün azaltılması anlamına gelecektir ki istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle aktif gücün korunması için ikincil gerilimin orantılı bir şekilde artırılması gereklidir. Dikkat edilmesi gereken şudur ki özellikle saflaştırma periyodunda, ocak refrakterini ve panellerini, yüksek gerilimin neden olacağı güçlü ark radyasyonundan koruyacak bir hurda örtüsü bulunmayacaktır. Bu nedenle uygulamanın başarılı olmasının temel şartı, güçlü cüruf köpürtme pratiği uygulamasının yapılmasıdır (BOWMAN, 1982).

Şekil 4.24. ve 4.25.’ te cüruf köpürtme pratiklerinin geliştirilmesi sonucu, saflaştırma periyodunda yüksek ikincil gerilim uygulamasına geçilen bir ocağın performans grafikleri görülmektedir.

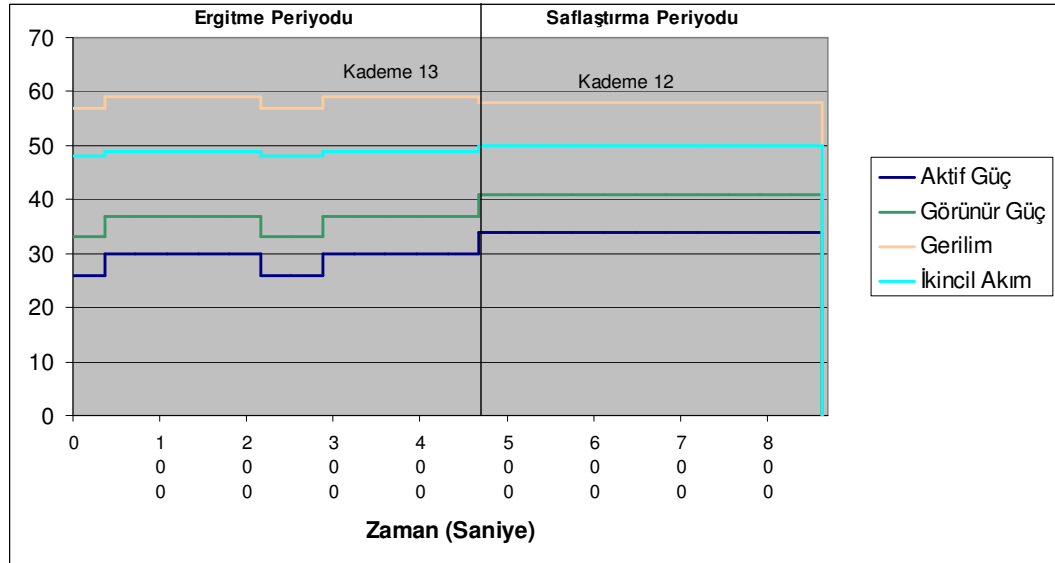
Şekil 4.24.’ deki grafikte görüldüğü üzere saflaştırma periyodunda, ark radyasyonun olumsuz etkisi nedeniyle trafo gerilim kademesi, 13’ ten 9’ a düşürülmüştür. Gerilimdeki azalmadan kaynaklanacak güç kaybını engelleyebilmek için ikincil akım değeri artırılmıştır. Bu metot elektrot tüketimini artırıcı yönde etkiye sahiptir.

Şekil 4.25.’ teki grafikte ise etkin cüruf köpürtme pratikleri sonucu aynı süreçte, trafo gerilim kademesi yaklaşık olarak sabit tutularak, ilk duruma göre daha yüksek ikincil gerilim değeriyle çalışıldığı görülmektedir. Aktif güç değerinde bir düşüş

gerçekleşmediğinden, ikincil akım değeri değiştirilmek zorunda kalmamış, göreceli olarak elektrot tüketiminde azalma gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.24. Örnek bir elektrik ark ocağının cüruf köpürtme pratikleri öncesi çalışma grafikleri



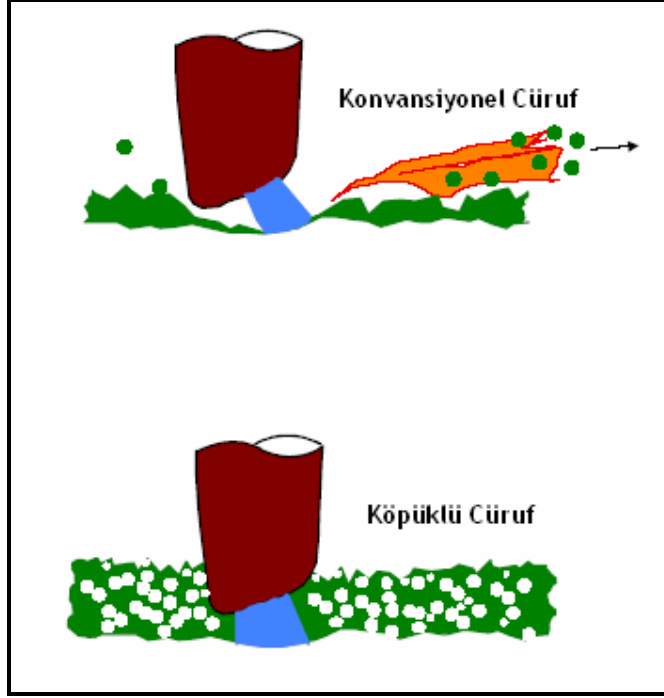
Şekil 4.25. Örnek bir elektrik ark ocağının cüruf köpürtme pratikleri sonrası çalışma grafikleri

#### **4.13. Ocakta Çelik Mayası Bırakma**

Ocakta dökümden sonra bir miktar sıvı çeliğin ocak içerisinde bırakılmasına “çelik mayası” adı verilir. İkincil metalurji işlemi için pota ocaklarının kullanılmaya başlamasından sonra uygulanma fırsatı bulunabilmiştir. Bırakılan bu sıvı çelik, yeni hurda şarjına yataklık yaparak, elektrotların hurda delme işleminden sonra çok daha kısa sürede sıvı çelik havuzuna ulaşmasını sağlar. Bu sayede kararlı bir ark oluşturma süresi azaltılarak, ocakta hızlı bir şekilde yüksek güç değerlerine ulaşılır ve ortalama şarj enerjisi artırılır. Bu olayın bir başka faydası da ocaktan cürufsuz döküm alınabilmesine olanak sağlamasıdır (BOWMAN, 1993).

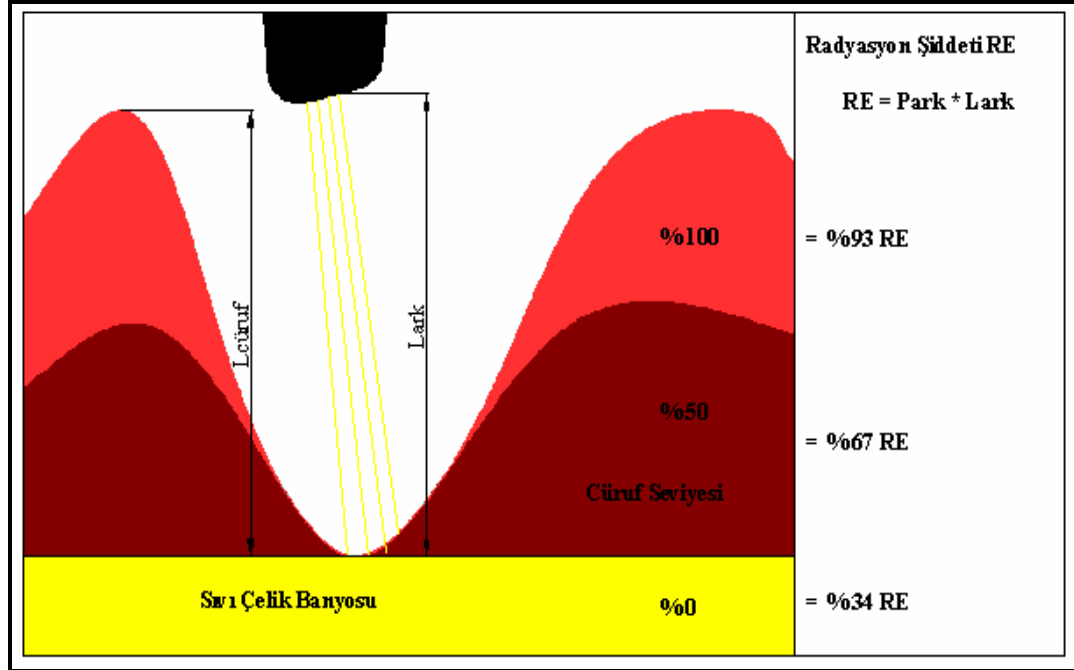
#### **4.14. Cüruf Köpürtme Pratiği**

Cüruf köpürtme pratiği, ergitme sonrasında yüksek gerilim–uzun ark değerleriyle çalışılırken, ocak panellerinin ve kapağının yüksek ark radyasyonundan etkilenmemesi için önemli bir uygulamadır. Yüksek gerilim sayesinde oluşturulacak olan uzun ark, köpüklü cüruf tarafından sarılarak (Şekil 4.26), hem ısı enerjisinin sıvı çeliğe geçmesi hızlanacak hem de su soğutmalı panellerin ve refrakterin kullanım ömürleri artırılmış olacaktır. Ayrıca cürufun köpürtülmesiyle gövde ve kapakta bir izolasyon tabakası oluşturularak, buralardan gerçekleşecek ısı kayıpları azaltılıp, enerji tasarrufu sağlanacaktır. Pratiğin bir diğer faydası da ocağın çevreye yaydığı yüksek gürültü seviyesinde azalma sağlamasıdır.



Şekil 4.26. Köpüklü cürufta ark yanması (BOWMAN, 1993)

Şekil 4.27' de ark radyasyonun ocak panellerine olan etkisinin cüruf seviyesiyle olan ilişkisi gösterilmektedir. Cüruf seviyesinin ilk % 50' lik bölümünde ark radyasyonunun %33' lük bölümü cüruf tarafından tutulmaktadır. Cüruf seviyesinin geri kalan % 50' lik bölümünde ise, cüruf yoğunluğunun gittikçe azalması nedeniyle ark radyasyonunun sadece %7' si tutulabilmektedir. Cüruf seviyesinin, yüksek radyasyon engelleme özelliği bulunan ilk %50'lik bölümünün cürufun köpürtülmesiyle artırılıp, elektrik arkının bu bölüm içerisinde kalması, radyasyon hasarı riskinin azaltılması için gereklidir.

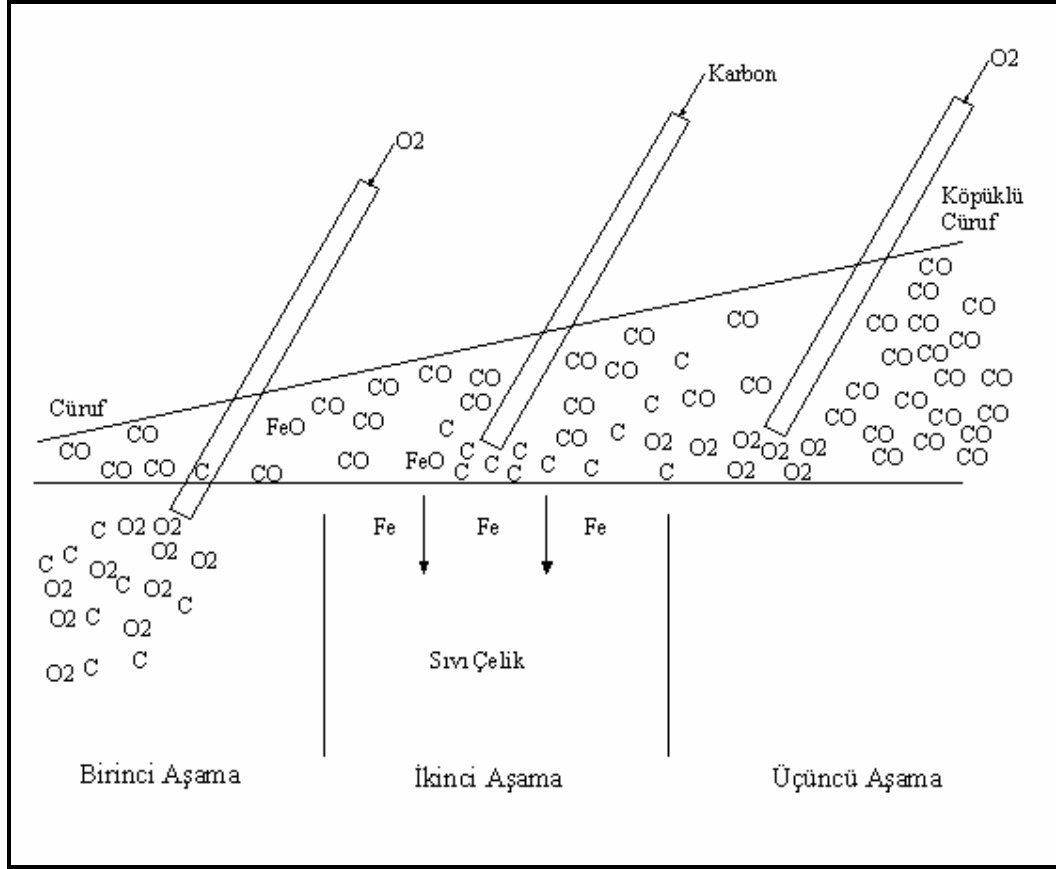


Şekil 4.27. Cüruf seviyesi ile radyasyon yoğunluğu arasındaki ilişki (BANDIN, 2001)

Elektrik ark ocaklarında jet brülörlerin kullanılmaya başlaması, hurdanın kesilmesi ve ergitmede rafinasyonun sağlanması gibi etkilerinin yanında, cürufun köpürtülmesinde de önemli rol oynamaktadır. Bu brülörlerin oksijen ve karbonu, yüksek etkinlik ile ocak yan panellerinde verebilmeleri, cüruf köpürtme pratiğinin başarılı bir şekilde uygulanabilmesine olanak sağlamıştır.

Cüruf köpürtme operasyonunun birinci aşamasında sıvı çelik içerisine üflenen oksijen, karbon ve demir ile reaksiyona girerek gaz fazında CO baloncukları ve katı fazda FeO oluşturur. Bu aşamadan sonra bir miktar köpürmüş olan cüruf içerisine karbon vermeye başlanır. Bu karbon, cüruf fazında bulunan FeO ile reaksiyona girer, hem sıvı çeliğe bir Fe dönüşü hem de ikinci bir CO oluşumu ile cürufun bir miktar daha köpürmesini sağlar. Cüruf içerisine üflenen karbonun herhangi bir reaksiyona giremeyen bölümünü tekrar değerlendirebilmek için üçüncü aşama olarak cüruf içerisine oksijen üflenir ve son CO oluşumu ile birlikte cürufun mümkün olan en büyük miktarda köpürtülmesi sağlanır (Şekil 4.28.).

Hurdanın ergitilmesi esnasında ocağa verilecek olan kireç, kireçtaşı ve karbon, köpürmenin gerçekleştirilmesi için gereklidir. Cüruf viskozitesinin artması ve yüzey geriliminin azalması, cürufun köpürtülmesini desteklemektedir.



Şekil 4.28. Cüruf köpürtme pratiğinin aşamaları (ANONYMOUS,2006)

#### 4.15. Kimyasal Gücün Artırılması

Genel olarak ocaklarda kullanılan kimyasal enerji, ocağa verilen oksijenin, ergimiş sıvı metal içerisindeki elementler ile girmiş olduğu ekzotermik reaksiyonlar sonucu elde edilir. Oksijenin reaksiyona girdiği başlıca elementler karbon, silisyum, mangan ve demirdir. Ark ocaklarında gerçekleşen önemli ekzotermik reaksiyonlar ve açığa çıkan enerjiler Çizelge 4.6.' da verilmiştir.

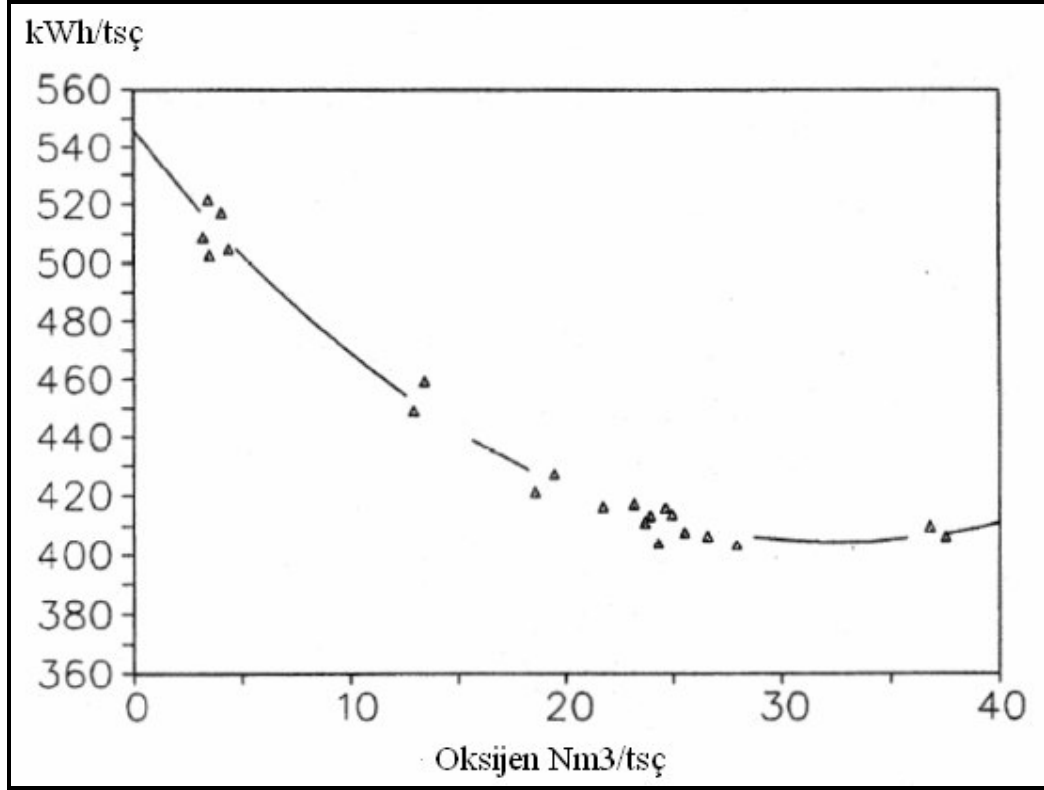


Çizelge 4.6. Oksitlenme reaksiyonları ve açığa çıkan enerjiler

Reaksiyon	Açığa Çıkan Enerji
$Mn + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow (MnO)$	-1297 kcal/kg MnO
$Si + O_2 \rightarrow (SiO_2)$	-3596 kcal/kg SiO <sub>2</sub>
$2P + \frac{5}{2}O_2 \rightarrow (P_2O_5)$	-2749 kcal/kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
$2Al + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow (Al_2O_3)$	-7400 kcal/kg Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
$Fe + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow (FeO)$	-888 kcal/kg FeO
$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow (CO)$	-943 kcal/kg CO
$C + O_2 \rightarrow (CO_2)$	-2137 kcal/kg CO <sub>2</sub>

Ark ocaklarında oksijen ile ilgili en önemli analiz Japon araştırmacı Inegaki tarafından yapılmıştır (INEGAKI, 1988). Inegaki Japonya' daki ark ocaklarında yaptığı çalışmasında, oksijen tüketimi ve elektrik enerjisi arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Şekil 4.29.' da, çalışması sonucu ortaya çıkardığı ilişkinin grafiği görülmektedir. Bu çalışmaya göre her m<sup>3</sup> oksijen kullanımı, harcanan elektrik enerjisi üzerinde ciddi azalmalar sağlamaktadır. Örnek vermek gerekirse 5 Nm<sup>3</sup>/tsç' den 15 Nm<sup>3</sup>/tsç' ye çıkartılan oksijen miktarı, elektrik enerjisinde 60 kWh/tsç civarında yani 6 kWh/m<sup>3</sup>O oranında düşüş sağlamıştır.

Inegaki' nin tezine göre en yüksek elektrik kazancı, köpüklü cüruf sayesinde, elektrik enerjisinin termal veriminin artmasıyla sağlanmıştır. Bunun yanında ocaklarda kullanılan pik demir yüksek enerji eşdeğeriyle, sadece karbon kullanımına nazaran kimyasal enerjiden daha fazla yararlanılmasını sağlamaktadır.

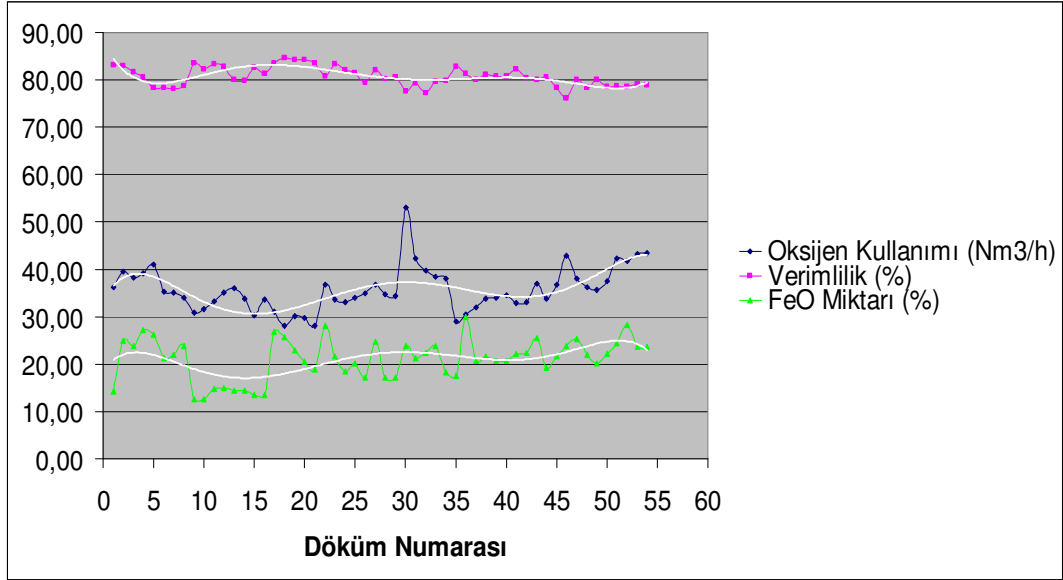


Şekil 4.29. Elektrik enerjisi tüketiminin oksijen ile değişimi (INEGAKI, 1988)

Şekil 4.29.' da ayrıca 33 Nm<sup>3</sup>/tsç' nin üzerinde oksijen kullanımında ki enerji artışı açıkça görülebilmektedir. Bunun nedeni olarak ürün kaybı gösterilmektedir. Yüksek oksijen kullanımında, oksitlenen Fe miktarı artmakta ve optimum değer üzerine çıkmaktadır. Örnek vermek gerekirse 36 m<sup>3</sup>/t oksijen tüketiminde FeO' nun cüruf içerisindeki değeri yükselmiş ve verim %95' ten %90' a düşmüştür.

Şekil 4.30.' da oksijen kullanımının cüruf içerisindeki demir oksit miktarına ve hurda verimine olan etkisi gösterilmektedir. Ocağa üflenen oksijen miktarının artırılması, cüruf içerisindeki FeO miktarının artmasına neden olmuş, buna bağlı olarak da verimlilik düşmüştür. Çünkü cüruf içerisindeki FeO' nun, karbon ile reaksiyona sokulup sıvı çelik banyosuna Fe geri dönüşümü sağlanamadan, cürufun ocaktan alınması gerekmiştir. Bu Inegaki' nin teziyle örtüşen bir durumdur. Ancak Inegaki' nin tezinde belirttiği, oksijen kullanımının, elektrik enerjisini artırdığı noktayı bulmak için her ocak için ayrı çalışma yapılması gerekmektedir. Çünkü ocağa saflaştırma periyodu sırasında verilebilecek karbonun anlık miktarı, cürufun ocaktan alınmadan içerisindeki

FeO seviyesini optimum noktaya çekebilmesinde etkindir. Ayrıca hurdanın karbon içeriğinin, oksijen kullanımının optimum noktası üzerinde etkili olduğu bilinmelidir.



Şekil 4.30. Örnek bir ark ocağı için oksijen kullanımının etkisi

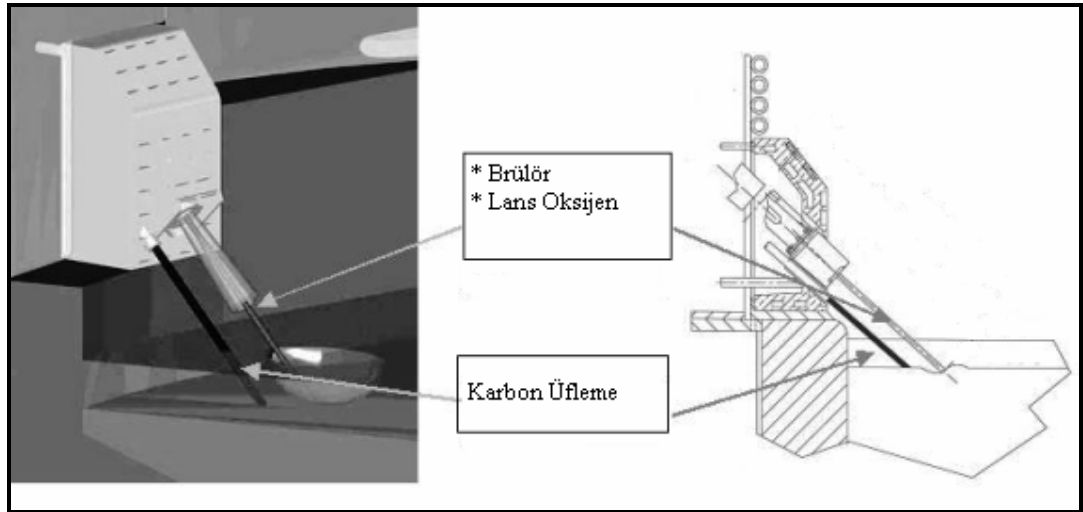
#### 4.16. Brülörler

Brülörler, EAO' larda soğuk bölgelerde kalan hurdanın ısıtılması ve ergitilmesi için kullanılırlar. Soğuk bölgeye ve cüruf kapısı yanına monte edilirler. Eski brülör sistemleri yakıt olarak motorin kullanırken yeni sistemlerde motorinin yerini LPG ve doğalgaz almıştır. LPG veya doğalgazın, stokiyometrik oranlarda oksijen ile brülör içerisinde karıştırılması sonucu oluşturulan alev, hem büyük hurda parçalarının kesilmesine hem de o bölgede bulunan hurdanın ergimesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca brülör kullanımı ile ani hurda düşmelerinin önüne geçilip, elektrot kırılması riski de azaltılmıştır.

Brülörler süre konusunda dikkatli kullanılmalıdır. Özellikle hurda şarjından sonraki ilk on dakikalık bölüm, en etkin kullanıldıkları zamandır. Bu süreçte yaklaşık 20–40 kWh/tuç enerji hurdaya aktarılır. Safaştırma periyoduna geçileceği zaman ocak içerisindeki hurdanın sıvı çeliğe dönüşümü tamamlanmak üzere olduğundan, brülör

kullanımının etkinliği kalmamaktadır. Bu noktadan sonra brülör sistemlerinin kapatılıp, saflaştırma için gerekli oksijenin üflenmesine geçilmesi gerekmektedir.

Brülör sistemlerinde yapılan çalışmalar sonucu, hem brülör hem lans olarak kullanılan jet brülör sistemleri geliştirilmiştir. Hurda şarjı sırasında, yakıt-oksijen karışımından elde ettiği alev ile bir brülör olarak çalışan sistem, operasyonun ileriki safhasında sadece oksijen üfleyerek güçlü bir lans olarak kullanılabilir. Lans modunda üflenen oksijenin hızı 2–2,5 Mach civarındadır. Bu sayede sıvı çelik havuzunun derinliklerine ulaşan oksijen, çok daha etkin olarak kullanılabilir (MOARES ve ark., 2001). Şekil 4.31.' de gösterildiği üzere bu yeni nesil brülör sistemleri, cüruf köpürtme için gerekli olan karbon verme işlemini de aynı gövde içerisinde gerçekleştirebilir.



Şekil 4.31. Yeni nesil jet brülör sistemleri (ANONYMOUS, 2003)

Yeni nesil jet brülör sistemlerinin faydaları şu şekilde sıralanabilir (ANONYMOUS, 2004):

- Sıvı çelik üretiminin artırılması, maliyetin düşürülmesi,
- Oksijen kullanımının artırılarak, dekarburizasyonun hızlandırılması,
- Daha etkin karbon kullanımı sayesinde cüruf köpürtmenin etkinleştirilmesi,
- Cüruf kapısının kapatılabilmesi nedeniyle ısı kayıplarının azaltılması,
- Brülör ve lans sisteminin birleştirilmesi sonucu, sistemin basitleştirilmesi.

#### 4.17. Kimyasal Enerji Girdisi

Jet brülör sistemlerinin iki modda kullanılabildiğinden bir önceki konuda bahsedilmişti. Brülör modundaki kullanım esnasında  $1 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2$  gazı yaklaşık olarak  $0,4 \text{ Nm}^3$  doğalgaz ile yakılmaktadır. Ortalama olarak iki şarj yapılacağı hesaplanan bir ark ocağı için jet brülör kullanım süresi Çizelge 4.7.' de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Jet brülör kullanım süresi

Çalışma Periyodu	Çalışma Modu	Çalışma Süresi (dak)
1. Şarj	Brülör	15
2. Şarj	Brülör	10
	Lans	15

Brülör modundaki çalışma esnasında ocağa verilen kimyasal güç hesaplanmak istenirse;

Jet brülör  $\text{CH}_4$  üfleme kapasitesi:  $300 \text{ Nm}^3/\text{h}$

$\text{CH}_4$  üst ısı değeri:  $9100 \text{ kcal/Nm}^3$

$$\frac{300 * 9100 * 25}{60} = 1137500 \text{ kcal/döküm} = 1322 \text{ kWh/döküm} \quad \text{bulunur.}$$

UHP ocaklar için kullanılan brülör miktarı beş adet olarak düşünülürse;

$1322 * 5 = 6610 \text{ kWh}$  enerji brülör modu sayesinde her dökümde ocağa verilmektedir.

Ocak kapasitesi 80 ton sıvı çelik olarak düşünülürse;

$$\frac{6610}{80} = 82,6 \text{ kWh/tsç enerji ocağa verilmektedir.}$$

Jet brülörlerin lans modu ile verdiği oksijen, sıvı çelik içerisindeki elementler ile reaksiyona girer ve bu elementleri oksitler. Bu reaksiyonlar ekzotermik reaksiyonlardır ve ocağa ikinci bir kimyasal enerji girdisi sağlamaktadır.

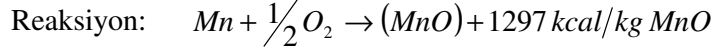
Oksitlenme reaksiyonları sonucu ocağa verilen kimyasal enerji miktarı yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir. Hurda veriminin %85 olarak alınması durumunda 1000 kg sıvı çelik eldesi için 1176 kg hurda çelik kullanılması gerekmektedir. Çizelge 4.8.' de hurda ve sıvı çelik içerisinde bulunabilecek elementlerin miktarları verilmektedir.

Çizelge 4.8. Hurda ve sıvı çelik içerisindeki element miktarları

Element	Hurda (1176 kg)		Sıvı Çelik (1000 kg)	
	%	Miktar (kg)	%	Miktar (kg)
Karbon	0,25	2,94	0,1	1
Mangan	0,95	11,172	0,05	0,5
Silisyum	0,4	4,704	0,02	0,2
Kükürt	0,04	0,47	0,03	0,3
Fosfor	0,04	0,47	0,02	0,2
Alüminyum	0,02	0,2352	0,0	0,0

Oksitlenme reaksiyonları sonucu açığa çıkan enerjiler tek tek hesaplanırsa;

- Mangan için:

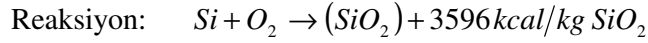


Mol Sayıları: Mn: 55      O<sub>2</sub>: 32      MnO: 71

Oksitlenen Mangan Miktarı: 11,172 – 0,5 = 10,672 kg

Verdiği Enerji:  $10,672 * \frac{71}{55} * 1297 = 17868 \text{ kcal/tsç}$

- Silisyum için:

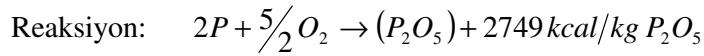


Mol Sayıları: Si: 28      O<sub>2</sub>: 32      SiO<sub>2</sub>: 60

Oksitlenen Silisyum Miktarı: 4,704 – 0,2 = 4,504 kg

Verdiği Enerji:  $4,504 * \frac{60}{28} * 3596 = 34706 \text{ kcal/tsç}$

- Fosfor için:

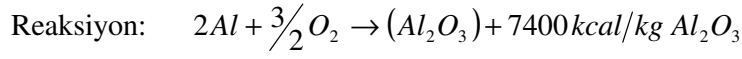


Mol Sayıları: P: 31      O<sub>2</sub>: 32      P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 142

Oksitlenen Fosfor Miktarı: 0,47 – 0,2 = 0,27 kg

Verdiği Enerji:  $0,27 * \frac{142}{31} * 2749 = 3400 \text{ kcal/tsç}$

- Alüminyum için:

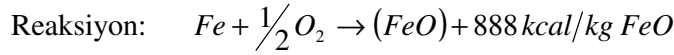


Mol Sayıları: Al: 27            O<sub>2</sub>: 32            Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 102

Oksitlenen Alüminyum Miktarı: 0,2352 kg

Verdiği Enerji:  $0,2352 * \frac{102}{27} * 7400 = 6575 \text{ kcal/tsç}$

- Demir için:



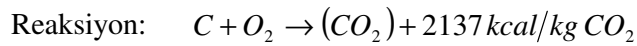
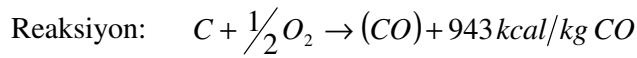
Cüruftaki FeO yüzdesi: %20

Ortalama Cüruf Ağırlığı: 45 kg/tsç

Cüruftaki FeO Miktarı: 9 kg

Verdiği Enerji:  $9 * 888 = 7992 \text{ kcal/tsç}$

- Karbon için:



Mol Sayıları: C: 12            O<sub>2</sub>: 32            CO: 28            CO<sub>2</sub>: 44

Oksitlenen Karbon Miktarı:  $2,94 - 1 = 1,94 \text{ kg/tsç}$

Elektrot Tüketiminden Gelen Karbon Miktarı: 2,27 kg/tsç

Karbon Enjeksiyonunda Verilen Karbon Miktarı: 2,5 kg/tsç

Toplam Karbon Miktarı: 6,71 kg/tsç



Karbonun %60' ı CO reaksiyonuna, % 40' ı CO<sub>2</sub> reaksiyonuna göre yakıldığı göz önüne alınırsa;

$$\text{Verdiği Enerji (CO): } 4,026 * \frac{28}{12} * 943 = 8858 \text{ kcal/tsç}$$

$$\text{Verdiği Enerji (CO}_2\text{): } 2,684 * \frac{44}{12} * 2137 = 21031 \text{ kcal/tsç}$$

Tüm oksitlenme reaksiyonları sonucu ocağa verilen kimyasal enerji;

$$100430 \text{ kcal/tsç} = 116,8 \text{ kWh/tsç}$$

Brülörler ile birlikte ocağa verilen kimyasal enerji;

$$82,6 + 116,8 = 199,4 \text{ kWh/tsç}$$

Birim tonajdaki sıvı çelik eldesi için gerekli toplam enerji yaklaşık olarak 590 kWh/tsç civarındadır. Kimyasal enerji kaynaklarının etkin olarak kullanılmasıyla yaklaşık 200 kWh/tsç enerji, bu yol ile karşılanabilmektedir. Elektrik enerjisinin pahalı, oksijen kullanımının ucuz olduğu ülkelerde, kimyasal enerjinin maksimum seviyede kullanılmasıyla elektrik enerjisinden % 25' lere varan oranlarda tasarruf edilebileceği açık bir şekilde görülebilmektedir.

#### **4.18. Banyonun Karıştırılması**

Ark ocağı tabanından inert gaz üfleme son zamanlarda yapılan başarılı uygulamalardan biridir. Ocak tabanına yerleştirilen gaz üfleme deliklerine sahip

refrakter tuğlalardan asal gaz üflenmesiyle sıvı çelik banyosunun karıştırılması sağlanır. Bu sayede hurda parçalarının ergimesi hızlandırılır, çelik ve cüruf sıcaklığı homojen hale getirilir. Kullanılan gaz genelde azot ve argondur. Sistemi kullanan ark ocaklarında, aşağıdaki etkiler tespit edilmiştir:

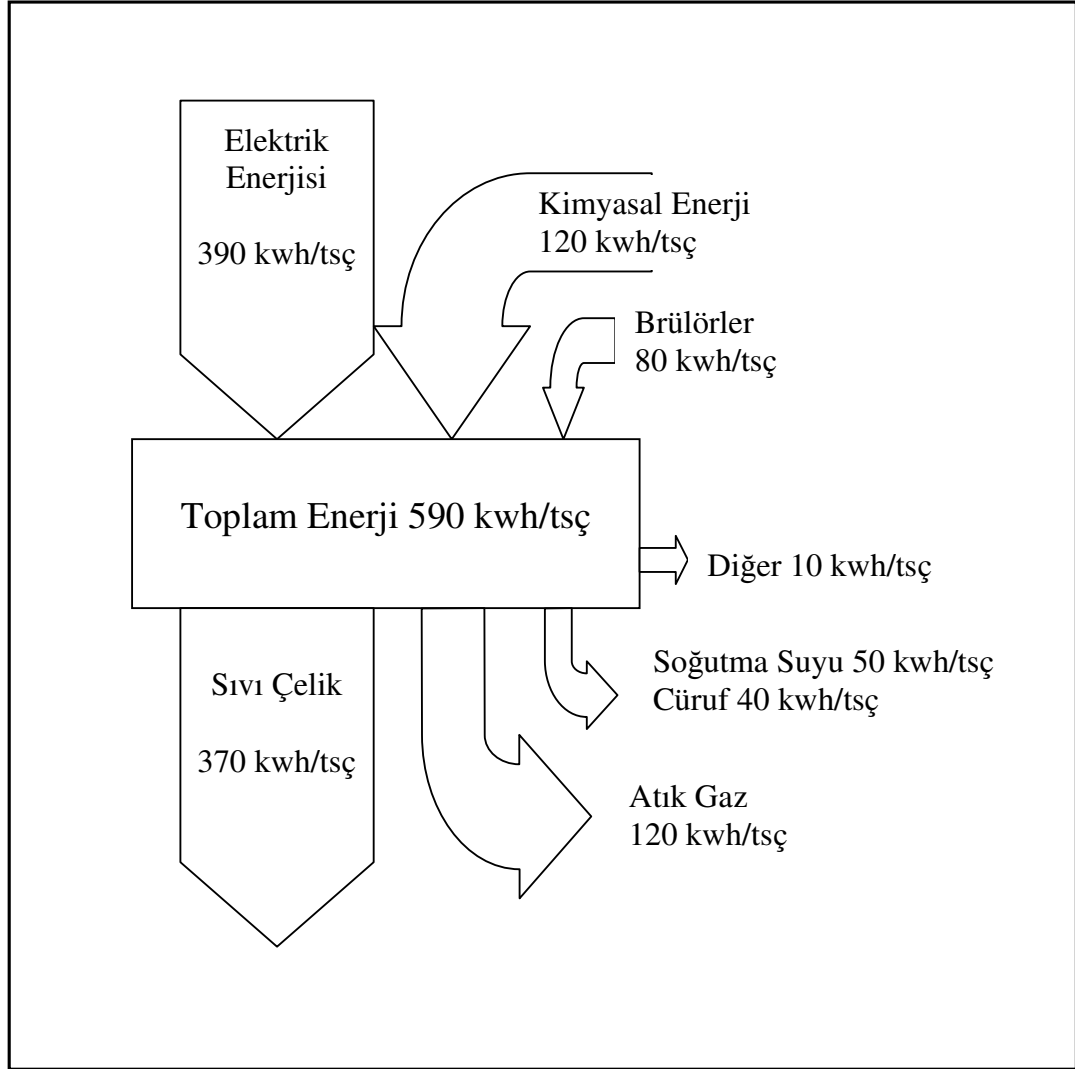
- Cüruf-metal ara yüzeyinin yenilenerek, reaksiyon kinetiklerinin artması,
- Daha hızlı hurda ergimesi, enerjili sürede birkaç dakikalık azalma,
- Enerji tüketiminde 10–20 kWh/tsç civarında azalma,
- Cürufta düşük FeO içeriği nedeniyle verimlilikte %0,5–0,7 arası artma.

#### 4.19. Enerji Geri Kazanım Sistemleri

Elektrik ark ocaklarında genel yapı çeliği üretimi için sıvı çeliğe verilmesi gereken enerji 370 kWh/tsç' dir. Bu enerjinin bir bölümü elektrik enerjisinden karşılanırken bir bölümü de kimyasal enerji girdisi olarak ocağa verilmektedir. EAO' ya giren enerjinin tamamı sıvı çeliğe aktarılamamakta ve bazı kayıplar gerçekleşmektedir. Bu kayıplar nedeniyle, kullanılan elektrik enerjisi miktarı artmaktadır. EAO' lar için enerji balansı yapıldığı zaman en büyük enerji kaybının, ocaktan çıkan gazların ihtiva ettiği enerji olduğu görülmektedir. Bu enerjinin geri kazanımı için iki farklı yöntem geliştirilmiştir.

- İleri yanma sistemi
- Hurda ön ısıtma sistemleri

Şekil 4.32.' de elektrik ark ocaklarının enerji balansının yapıldığı Sankey Diyagramı görülmektedir.



Şekil 4.32. Elektrik ark ocakları için Sankey Diyagramı

Elektrik ark ocaklarında atık gazlardan sonraki en önemli kayıp, gövde ve kapak panellerinin soğutulmasında kullanılan suya geçen ısıdır. Giren enerjinin %10' luk kısmı burada kaybedilir. Bu kaybın azaltılabilmesi için teorik olarak ısı iletim katsayısının düşürülmesi yani panellerin yalıtılması gerekmektedir. Bu yalıtımın sağlanmasında da cüruf tan yararlanılmaktadır. Panellerin iç yüzeylerine, cürufun panel yüzeyine yapışması ve bir cüruf tabakası oluşturması için cüruf tutucular kaynatılır. Bu sayede hem panellerin yüksek ark radyasyonundan korunması sağlanır, hem de panellerden olan ısı transferi azaltılmış olur.

#### 4.19.1. İleri Yanma Sistemi

İleri yanma sistemleri, hurdanın ergitilmesi esnasında açığa çıkan CO ve H<sub>2</sub>' nin, ergitme prosesine ek kimyasal enerji girdisi sağlayabilmek için ocak içerisinde yakılması esasına dayılıdır. EAO operasyonları sırasında bu gazlardan önemli bir oranda açığa çıkmaktadır. Klasik sistemlerde bu gaz, toz tutma sistemine giderken, ocak dışında yanma odası denilen bir bölümde yakılır. İleri yanma sistemlerinde ise amaç, ergitme prosesine yardımcı olabilmek için bu gazların oksidasyonu ile elde edilebilecek ısıyı ocağa verebilmektir. Herhangi bir ileri yanma sisteminin verimi, EAO' nun operasyon şartlarına direkt bağlıdır. Bu nedenle EAO' ya ileri yanma sisteminden önce ocak operasyonunun şartlarını eksiksiz olarak analiz edebilecek sistemlerin kurulması gerekmektedir (GRANT, 2000).

İleri yanma sisteminin gereksinimi olan CO ve H<sub>2</sub>' nin ocak içerisinde oluşmasının kaynakları şunlardır:

CO oluşma durumları:

- Hurdanın ergitilmesinden kaynaklanan hidrokarbonlar,
- Şarj ve cüruf köpürtme için kullanılan karbonun yanması,
- Lans modunda üflenen oksijen ile karbonun kısmi oksitlenmesi,
- Cüruf köpürtme sırasında FeO' nun indirgenmesi (Eşitlik 3.84.).



H<sub>2</sub> oluşma durumları:

- Hurdadan kaynaklanan hidrokarbonların parçalanması,
- Panellerdeki kaçaklardan, elektrotların soğutulmasından ve atmosferden kaynaklanan suyun indirgenmesi (Eşitlik 3.85. ve 3.86.).



Karbonun oksitlenmesi sırasında, CO' nun CO<sub>2</sub>'ye olan reaksiyonu, C' nin CO' ya olan reaksiyonuna oranla iki kattan daha fazla oranda enerji açığa çıkarır. Bu reaksiyonun gerçekleşmesi tamamen oksijenin varlığına bağlıdır. Çizelge 4.9.' da bu reaksiyonlar verilmektedir.

Çizelge 4.9. Karbon ve hidrojenin 1650 °C' deki reaksiyon enerjileri

Reaksiyon	Açığa Çıkan Enerji (kcal/Nm <sup>3</sup> O <sub>2</sub> )
$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$	-2400
$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	-5470
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-3950
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	-5075

Ergitme sırasında üretilen yanabilir gazların (CO ve H<sub>2</sub>) büyük çoğunluğu, çevresel problemleri engelleyebilmek amacıyla ocaktan çıktıktan sonra yanma odası denilen toz toplama sistemine ait bölümde yakılır. Bu yüzden, karbonun oksitlenmesinin tamamlanması sonucu oluşan büyük miktardaki kimyasal enerji, ocağa verilemeden atık gaz ile birlikte dışarı atılır. İleri yanma sistemleri, bu potansiyel kimyasal enerjinin önemli bir miktarının yakalanıp, prosese verilebilmesi için dizayn edilmişlerdir.

Aslında hemen hemen her EAO operasyonunda, ileri yanma sistemleri kurulu olmasa bile belli bir miktar ileri yanma işlemi gerçekleşir. Toz toplama sisteminin fanları tarafından ocakta oluşturulan hava akımı, CO ve H<sub>2</sub>' nin bir bölümünün yanması için gerekli oksijeni sağlar. Bu doğal ileri yanma enerjisinin bir kısmı ergitmede kullanılırken, yaklaşık %50' lik bölümü havanın içerisinde bulunan azot tarafından

absorbe edilir ve azotu ısıtır. Azot gazı inert bir gazdır ve herhangi bir reaksiyona girmez.

İleri yanma sistemleri, CO ve H<sub>2</sub>' nin yanması için saf oksijen kullanırlar. İleri yanmada kullanılan saf oksijen, azotun ısıtılmasını azaltır. Çünkü banyo yüzeyine verilmiş olan saf oksijen, ocağa giren soğuk havayı dolayısıyla ocaktaki azot miktarını azaltacaktır. Sonuç olarak yüksek yoğunluktaki oksijen, ocak gazlarının daha iyi yanmasını sağlayacak ve ocağa verilecek kimyasal enerji girişini artıracaktır.

Elektrik ark ocakları için dünya üzerinde pek çok farklı türde ileri yanma sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemlerin çoğu aynı temel prensipten türetilmiştir:

Ocakta henüz ergimemiş hurda varken, sıvı çelik banyosunun üzerinde CO ve H<sub>2</sub>' nin etkin olarak yakılması.

Bu yapılabildiği zaman, sıcak yanma gazlarıyla hurda arasındaki ısı transferi en verimli durum gelecektir. Çünkü bu durumda hurda hem soğuktur ve hem de ısı transferinin sağlanabileceği yüzey alanı fazladır. Hurda ergidiği zaman ise daha düşük bir yüzey alanı meydana gelecek ve sıcak gazlar ile hurda arasındaki sıcaklık farkı azalacaktır. Bu yüzden ısı transferinin itici güçleri azalacaktır. Bununla birlikte sıvı çelik banyosunda kullanılan ileri yanma sistemleri de mevcuttur. Bu sistemlerin başarısı, cüruf seviyesinin hassas kontrolüne, alttan karıştırma sisteminin gücüne ve ileri yanma oksijeninin ocağa üflenmiş pozisyon ve hızına bağlıdır.

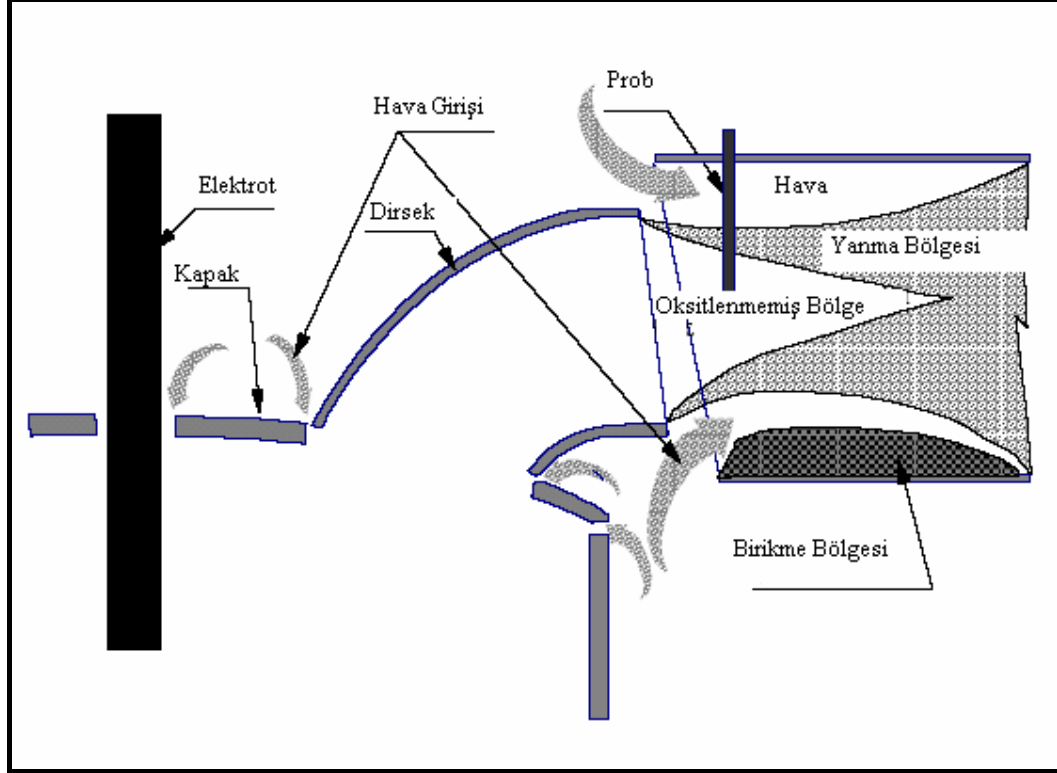
Çoğu EAO' larda mevcut brülör sistemleri, süper stokiyometrik oranda oksijen-yakıt karışımıyla çalıştırılarak ileri yanma işleminin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu yöntemin başarısı sınırlıdır. Çünkü brülör sistemlerinin maksimum performansı, stokiyometrik oksijen-yakıt karışım oranlarında yakalanabilmektedir. Bu nedenle ileri yanma sistemlerinin ve brülörlerin aynı anda tam güç ile çalıştırılmaları sonucu ileri yanma işlemi tam olarak gerçekleşebilmektedir. Sadece brülör sistemlerini kullanarak ileri yanmayı gerçekleştirmek tam olarak mümkün olmamaktadır. Ayrıca brülör sistemlerinde üflenen oksijenin hızı çok yüksektir. Bu yüksek hız nedeniyle de ocak atmosferiyle oksijen tam olarak karışmamakta ve ocak atmosferinde bulunan CO ve H<sub>2</sub>' nin yakılması sağlanamamaktadır. Diğer bir problemde, yüksek oksijen üfleme hızının elektrotlar ve ocak tabanı üzerinde yaratacağı olumsuzluklardır.



- Hurdanın Temizliđi: Hurda, hidrokarbonların kırılması nedeniyle ergitmenin erken devresinde önemli miktarda CO ve H<sub>2</sub> oluşturacak yağ ve gres içerebilir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken nokta artan yağ miktarıyla, sıvı çelik içerisindeki kükürt miktarının kontrolünün zorlaşmasıdır.
- Şarj ve Cüruf Köpürtme Karbonu Miktarı: Saflaştırma periyodunda şarj edilen karbonun çoğu ocak içerisinde oksitlenerek CO fazına dönüşecektir.
- Ergitme Hızı: Çelik üretiminin hızı, CO oluşumunun oranını ve bundan dolayı da ileri yanma sisteminin performansını etkileyecektir.

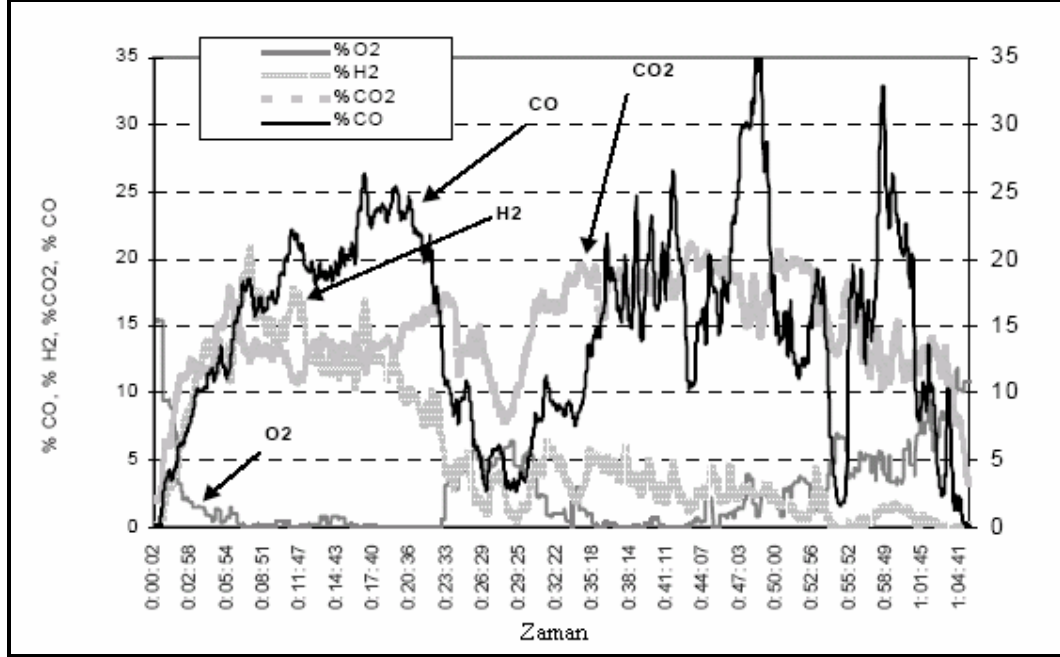
Şekil 4.34' te ocaktan çıkan gazların analizini yapmak için kullanılan probun EAO' ya yerleşimi şematik olarak gösterilmiştir. Özel olarak tasarlanmış su soğutmalı prob, mümkün olduğunca sızdırmaz bir şekilde ölçümü yapacağı yer olan yanma odası girişine yerleştirilmelidir. Ölçüm sırasında alınacak numune gaz, EAO atmosferini tam olarak yansıtmak zorunda olduğundan, probun yerleştirileceği noktanın çok dikkatli şekilde seçilmesi gereklidir. Çünkü ocaktan çıkan gaz, yanma odası girişinden itibaren atmosferden çekilen temiz hava ile karışmakta ve yanma gerçekleşmektedir. Eğer prob, bu yanan gazdan numune alırsa ileri yanma sisteminin etkin olarak kullanılabilmesi mümkün olmayacaktır.





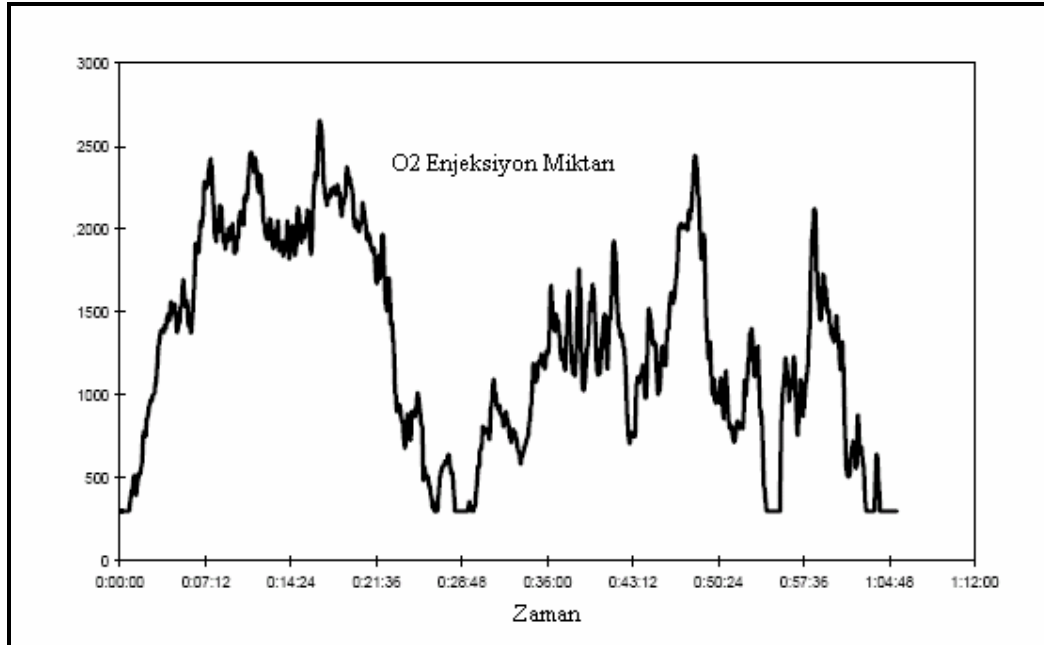
Şekil 4.34. Atık gaz ölçüm probu yerleşimi

Şekil 4.35' de ileri yanma sistemi uygulaması öncesi, örnek bir EAO' nun atık gaz ölçüm grafiği görülmektedir. Ölçüm sonucu elde edilen grafik yorumlandığı zaman ocaktan çıkan potansiyel yakılabilir gazların miktarı ve bu gazların yakılması için gerekli oksijen miktarları hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir.



Şekil 4.35. Örnek bir elektrik ark ocağı için atık gaz ölçümü

Şekil 4.36.' da ise Şekil 4.35.' de atık gaz ölçümü yapılmış olan ocakta, ileri yanma için gerekli oksijen miktarı zamanın fonksiyonu olarak grafik halinde verilmiştir.



Şekil 4.36. İleri yanma için gerekli oksijen miktarı

Şekil 4.35. ve Şekil 4.36.' daki grafikler incelendikleri zaman, atık gaz içerisindeki yanabilir gazlar olarak nitelendirilen CO ve H<sub>2</sub>' nin miktarına bağlı olarak ocağa verilecek oksijen miktarının hesaplanabildiği görülmektedir. Bu sayede, gereksiz oksijen tüketimi engellenerek, oksijenin verimi de artırılmış olacaktır.

Çizelge 4.10.' da ileri yanma sistemlerinin kullanıldığı altı farklı ocağın operasyon değerleri verilmektedir. Bu değerlerden faydalanarak ileri yanma sistemlerinin etkinliği çok daha iyi anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.10. İleri yanma sistemli elektrik ark ocaklarında operasyon değerleri

	Ocak 1	Ocak 2	Ocak 3	Ocak 4	Ocak 5	Ocak 6
Döküm ağırlığı (tsç)	78	70	70	95	80	65
Trafo gücü (MW)	50	45	36	45	63	35
<b>İleri Yanma Sistemi Devre Dışı</b>						
Enerjili süre (dak)	40,5	46	51,3	53,7	40,2	41,5
Dökümden döküme süre (dak)	51,5	64	64,5	85,6	56,6	54,6
Elektrik enerjisi (kWh/tsç)	372	447	398	515	414	393
O <sub>2</sub> tüketimi (Nm <sup>3</sup> /tsç)	35,6	14	26,3	28,3	36,3	57
<b>İleri Yanma Sistemi Devrede</b>						
Enerjili sürede azalma (dak)	3,7	6	3,9	7,1	3,9	2,3
Dökümden döküme sürede azalma (dak)	3,7	6	3,6	9,7	1,9	4,7
Elektrik enerjisinde azalma (kWh/t)	25	44	22	59	33	42
Günlük döküm artışı	2,1	2,3	1,4	2,2	0,9	3
O <sub>2</sub> tüketiminde artış (Nm <sup>3</sup> /tsç)	12	18	12,7	23,6	13	14,5

İleri yanma sistemlerini kullanan ocaklardan elde edilen bilgilere göre bu sistemlerden aşağıdaki faydalar sağlanmaktadır:

- Ocağa kimyasal enerji girişinin artırılması sonucu elektrik enerjisi tüketiminde 22–59 kWh/tsç arasında tasarruf,
- Dökümden döküme sürede 1,9–9,7 dakika arasında tasarruf,
- Ocak verimliliğinde 0,9–2,3 döküm/gün arasında artış,
- Toz toplama sisteminden çıkan CO gazı emisyonunda azalma.

#### 4.19.2. Hurda Ön Isıtma Sistemleri

İleri yanma sistemleri kullanılsa da elektrik ark ocaklarından yine belirli bir sıcaklıkta atık gaz çıkacaktır. Bu sıcak gazın ihtiva ettiği enerjiden faydalanılabilmesi için hurda ön ısıtma sistemleri geliştirilmiştir. Ocağa şarj edilecek hurdanın sıcak gaz ile ısıtılması prensibine dayalı bu sistemler ile büyük oranda enerji geri kazanımı sağlanmıştır. Hurda ön ısıtma sistemlerinin günümüzde kullanılan en önemlileri;

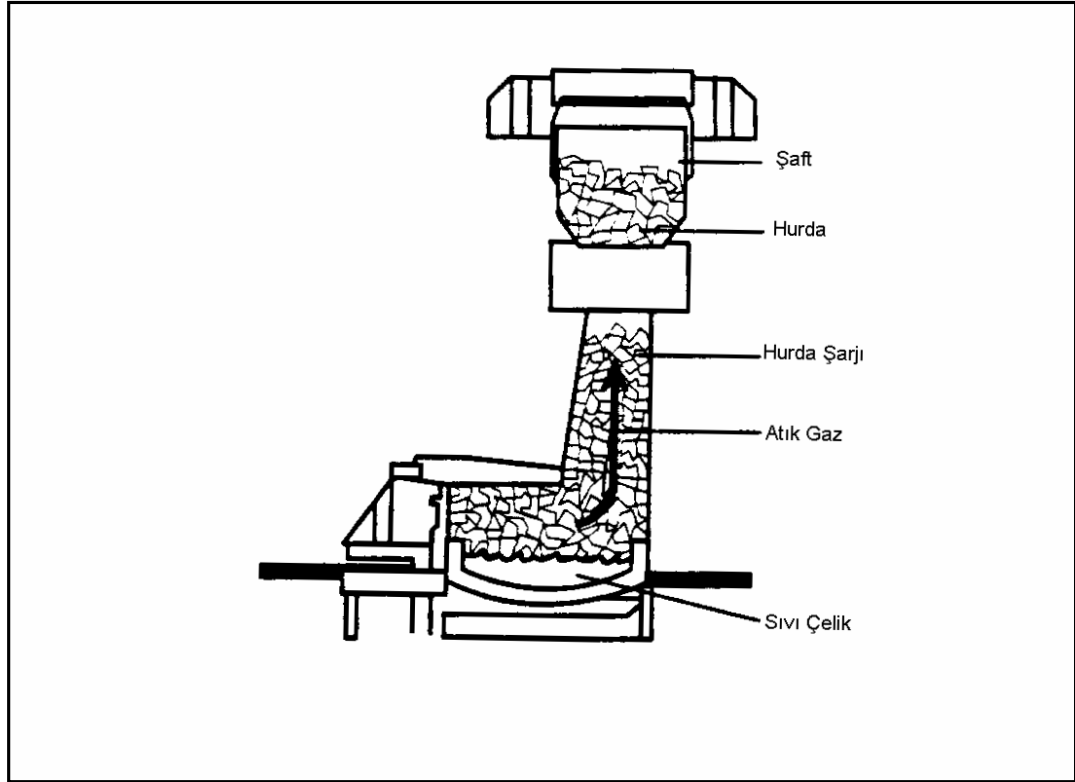
- FUCHS şaft ocakları
- CONSTEEL sürekli besleme sistemidir.

Şaftlı ocaklarda hurda şarjı, ocak kapağı üzerinde bulunan bir şafta yapılmaktadır. Şaft, su soğutmalı ve refrakter kaplı olarak dizayn edilmiştir ve yaklaşık olarak kapak yüzey alanının %35' ine oturtulmuştur. Ocak içerisindeki hurdanın ergime durumuna göre şaftın alt kapakları açılarak ocağa hurda şarjı gerçekleşmektedir. Kapaklar, ocaktan çıkan atık gazın geçmesine müsaade edebilecek yapıdadır. Atık gaz, hurda ile dolu olan şaftın içinden geçerken hurdayı ısıtır ve toz toplama sistemine gönderilir. Şaftın alt kapaklarının açılma pozisyonu farklı açılarda ayarlanabilmektedir. Bu sayede ocak içerisindeki hurdanın durumuna göre düzenli bir hurda beslemesi gerçekleştirilebilmektedir. Hurda şarj işlemi, hem şafta hem de şafttan ocağa, ocak enerjili durumda yapılabilmektedir. Ancak özellikle şafttan ocağa olan şarj esnasında

elektrotlara azami dikkat gösterilmesi gerekmektedir. Yöntemin dezavantajı, şaft yüksekliğinin çok fazla yapılmasından dolayı sadece 2–3 m.' lik bir bölümde hurdanın ısıtılmasıdır. Consteel sistemine göre çok daha az hareketli parça içermesi en büyük avantajıdır (CLAYTON ve ark., 1992).

Şaftlı ocakları kullanan prosesler şu faydaları bildirmektedir:

- Elektrik enerjisi tüketiminde %18 oranında azalma,
- Üretimde %17–20 arası artma,
- Kararlı bir operasyon sayesinde fliker seviyesinde ve harmoniklerde azalma,
- EAO' dan çıkan toz hurda ile karıştığından, EAO' nun toz miktarında azalma.



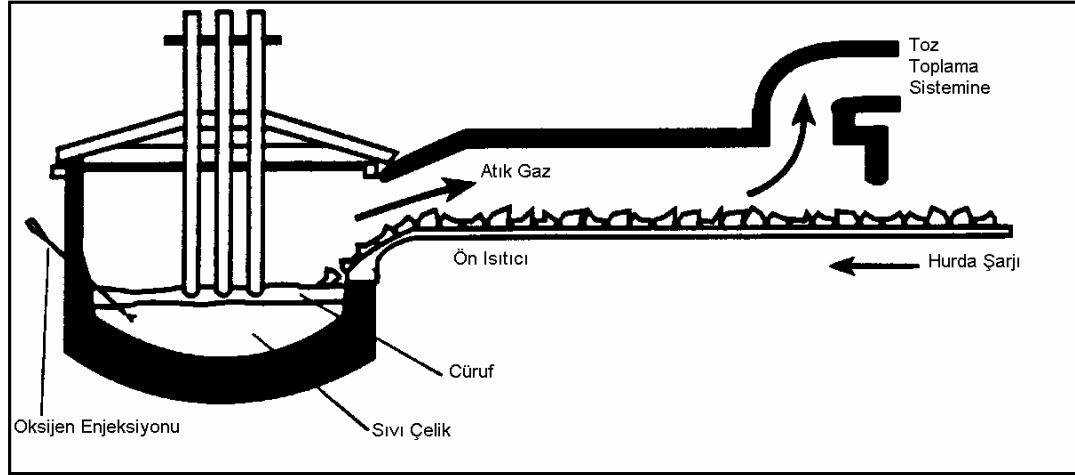
Şekil 4.37. FUCHS şaft ocağı

Sürekli beslemeli sistemde hurda şarjı, bir konveyör sistem ile ocak yan panelinde bulunan bir kapaktan ocağa sürekli olarak gerçekleşmektedir. Şarj hurdası, magnet yardımıyla konveyör sistemin üzerine yüklenir. Atık gazlar bu konveyör

sisteminin üzerini kapatmış olan bir tünelden geçtikten sonra toz toplama sistemine gönderilir. Tünelden geçen gaz, konveyör sisteminde hareket halinde bulunan hurdayı ısıtır (VALLOMY ve ark., 1992). Hurda sıcaklığının yaklaşık olarak 310 °C' ye kadar çıktığı bildirilmiştir (SCHMITT, 1997). Ocakta sıvı çelik havuzu sürekli olarak korunmakta ve gelen hurda, bu havuz içerisinde ergitilmektedir. Bu sayede ocak daima düz bir banyo seviyesine sahip olmakta ve sürekli rafinasyon yapılabilmektedir.

Sistemin çok fazla hareketli parça içermesi, arıza olasılığını artırdığı için dezavantaj olarak görülebilmektedir. Sistemin avantajları olarak ise;

- Daha düzenli ve kontrollü olarak şarjın gerçekleştirilmesi,
- Atık gazın enerjisinden maksimum yararlanma,
- Elektrot tüketiminde azalma,
- Çıkan toz miktarında azalma,
- Daha düşük fliker seviyesi ve harmonik oluşumu
- Gürültüde azalma sayılabilir.



Şekil 4.38. CONSTEEL sürekli besleme sistemi (SCHMITT, 1997)

Bu gelişmeler sonrası eski hurda ön ısıtma sistemleri geçerliliklerini kaybetmeye başlamıştır. Eski sistemler kontrol etme, taşıma ve çevreyi kirletme gibi problemlere sahipti. Ayrıca geri kazanılan enerjide daha sınırlı kalmaktaydı.

Hurda ön ısıtma sistemlerinin doğasında olan bazı kaçınılmaz dezavantajları vardır. Başlıca dezavantaj, sistemden geçen hurdanın büyüklüğünün sınırlandırılmış

olmasıdır. Ayrıca genel işletme maliyetleri, bakım zorlukları ve sistemlerin güvenilirlikleri de sorun oluşturmaktadır. Ancak sistemlerin sağladığı enerji geri kazanımı bu dezavantajları karşılamaya yetmektedir.

Yeni sistemler ile ocağa verilen hürdanın sıcaklığı 300–400 °C' ye kadar çıkabilmektedir. Geri kazanılan enerji miktarı 70–100 kWh/tsç olarak hesaplanmaktadır.

#### **4.20. Enerjisiz Sürenin Azaltılması**

Modern ark ocağı sistemlerinde dökümden döküme olan sürenin 45 dakikaların altına indirilmesi amaçlanmaktadır. Şu ana kadar değinilen gelişmeler hep enerjili sürede yapılabilecek iyileştirmeleri ele almaktaydı. Enerjisiz süreler üzerinde yapılacak iyileştirmelerde ocağın hızının artırılıp, verimliliğine olumlu etki sağlayacağı bir gerçektir. Ocağın enerjisiz süreleri içerisinde yapılan işlemler;

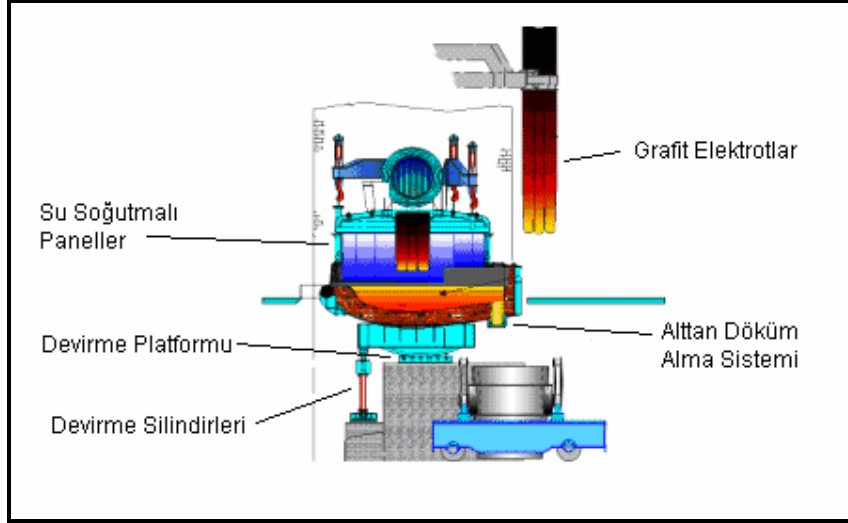
- Her Dökümde: Şarj alma, döküm,
- Ara Sıra: Tamirler, elektrot ekleme ve uzatmadır.

Tabî ki burada bahsedilen enerjisiz süreler teknik olarak gerçekleşmesi gereken sürelerdir. Bunun yanında arıza durumlarından doğan enerjisiz sürelerde mevcuttur. Genel olarak incelendiğinde ocakların gün içindeki enerjisiz süreleri 60 dakikanın altına pek inmemekte, 60–120 dakika arasında gerçekleşmektedir.

Günümüzdeki genel uygulamalarda özellikle tabanın yüzüncü dökümlerinden itibaren cüruf çizgisi bölümüne günde 2–3 kez tamir yapılma ihtiyacı vardır. Sıvı çelik sıcaklığının ve banyo analizlerinin ölçülmesi ise artık enerjili sürelerde yapılabilmektedir.

Ocağın döküm süresi, alttan döküm alma sisteminin kullanılmasıyla azaltılabilmektedir (Şekil 4.39.). Bu sistemin ilk amacı cürufu ocakta bırakıp, potada yüksek alaşım seviyelerine ulaşabilmektir. Bunun yanı sıra yüksek döküm hızı, düşük azot etkisi, düşük sıcaklık kaybı gibi önemli avantajlara da sahiptir.

Döküm alma işlemi sırasında ocak, devirme platformu üzerinde, devirme silindirleri yardımıyla ön tarafa doğru yatırılır. Yaklaşık devirme açısı  $3^{\circ}$  ile  $15^{\circ}$  arasındadır. Dökümün alınmasından sonra potaya en az miktarda cüruf kaçırılmak suretiyle ocak hızla geriye doğru kaldırılır ve sıvı çelik akışı kesilir.



Şekil 4.39. Ark ocağı alttan döküm alma sistemi genel görünüşü

Enerji geri kazanım sistemleri sırasında bahsedilen modern hurda ön ısıtma sistemlerinin diğer bir faydası da şarj alma işlemi sırasında ocağın enerjisiz süresinden tasarruf yapılmasına imkân sağlamalarıdır. Bu sistemlerde hem ocağa şarj yapılabilmekte hem de ocakta ark yanması devam edebilmektedir.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, elektrik ark ocaklarında birim miktarda sıvı çelik üretimi için gerekli olan elektrik enerjisi miktarının düşürülebilmesi için geliştirilmiş sistemlerin etkinlikleri incelenmiştir. Bu sistemler üç ana bölüme ayrılabilir.

- Elektrik enerjisi girdisinin etkinleştirilmesi için geliştirilen sistemler
- Kimyasal enerjisi girdisinin etkinleştirilmesi için geliştirilen sistemler
- Enerji geri kazanımı için geliştirilen sistemler

Elektrik enerjisi girdisinin etkinleştirilmesi kapsamında, ocakta kararlı bir ark oluşumu, bu arkın sürdürülebilmesi ve en yüksek ark gücü değerine ulaşabilmek için nelerin yapılabileceği araştırılmıştır. Buna göre;

- Güç faktörü değerinin 0,707 civarında tutulması, kararlı bir ark oluşumu için ilk şarttır. Ayrıca bu nokta, maksimum ark gücünün elde edilebildiği noktadır. Güç faktörünün bu noktaya düşürülebilmesi için ocakların elektrik sistemlerinin birincil devresine seri bağlı reaktör ilavesi etkili bir çözüm olmuştur. Bu sayede ocağa olan aktif güç girdisinde %20–40 arasında artış elde edilebilmiştir.
- Ark gücünün, ark akımı ve ark geriliminin fonksiyonu olduğu bilgisinden yararlanılarak yapılan çalışmada, özellikle ark geriliminin artırılmasıyla, ark radyasyonunun artacağı ve bu sayede elektrotlardan uzak bölgelerindeki hurdanın ergitilmesinin kolaylaşacağı tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra belirli bir ark gücü değeri için uygulanabilecek yüksek gerilim operasyonunun, aynı ark gücü değerine ulaşabilmek için uygulanabilecek yüksek akım operasyonuna kıyasla elektrot tüketiminde de iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir. Ancak burada ark kararlılığının korunabilmesi için gerilim-akım oranının belli bir değeri geçmemesine dikkat edilmesi gerekmektedir.
- Yüksek ark gerilimi nedeniyle oluşacak güçlü ark radyasyonunun, ocak refrakteri ve su soğutmalı paneller üzerindeki olumsuz etkilerini engelleyebilmek için, gövde panellerine yerleştirilen karbon ve oksijen üfleme

noktaları sayesinde gerçekleştirilebilen güçlü cüruf köpürtme pratiklerinden, olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

- Elektrik ark ocaklarının darbeli ve düzensiz çalışmaları nedeniyle sebep oldukları birincil sistemdeki gerilim düşümleri, güç girdisi üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır. Bu gerilim düşümünün engellenmesi için yapılan statik VAR düzeltici sistemler sayesinde ocağa olan aktif güç girdisinde ve günlük üretimde %10 oranında artış elde edilebilmiştir. Kısalan dökümden döküme süreler dolayısıyla ısı kayıpları da azaltılmış ve yaklaşık olarak %3.2' lik bir enerji kazancı sağlanmıştır.

Kimyasal enerji girdisinin etkinleştirilmesi için ocaklarda brülör sistemleri ve oksijen kullanımı üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Buna göre;

- Kullanılan güçlü brülör sistemleri ile sıvı çelik üretimi için gerekli enerjinin yaklaşık %15' lik bölümü buradan karşılanmıştır.
- Oksijen kullanımının etkinleştirilmesiyle de gerekli toplam enerjinin %20' lik bölümü ekzotermik reaksiyonlardan elde edilmiştir.

Enerji geri kazanım sistemleri üzerine yapılan çalışmalarda ise;

- Ocaktan yakılmadan atılan yanabilir gazların, ocak içerisinde etkin şekilde yakılmasını sağlayan ileri yanma sistemleri sayesinde sıvı çelik üretimi için gerekli enerjinin yaklaşık %5–10' luk miktarı bu sistemlerden karşılanabilmiştir. Ayrıca bu sistemler %10 civarında günlük üretim artışı da sağlamıştır.
- Atık gazların sıcaklığından faydalanıp hurdanın ısıtılması prensibine sahip modern hurda ön ısıtma sistemleri sayesinde elektrik enerjisi tüketiminde %18 oranında bir tasarruf sağlanırken, üretimde de %17–20 arasında artış elde edilebilmiştir.

Bunların yanı sıra ocakta sıvı çelik mayası bırakma, ocağın alttan asal gaz ile karıştırılması ve alttan döküm alma sistemli ocakların kullanımı da yararlı uygulamalar olarak öne çıkmıştır.

Çizelge 5.1. de, elektrik ark ocaklarında uygulanabilen sistemlerin, ocak parametreleri üzerindeki etkileri verilmiştir.

Çizelge 5.1. Elektrik ark ocaklarında uygulanabilecek operasyonların, sistem parametreleri üzerindeki etkileri

	Enerjili süre	Döküm süresi	Elektrik enerjisi	Döküm sayısı	Oksijen kullanımı	Elektrot tüketimi
Reaktans artırımı	↓	↓	↓	↑	→	↓
Yüksek gerilim operasyonu	↓	↓	↓	↑	→	↓
Statik VAR düzeltmesi	↓	↓	↓	↑	→	↓
Çelik mayası bırakma	↓	↓	↓	↑	→	↓
Cüruf köpürtme	↓	↓	↓	↑	↑	↑
Brülör kullanımı	↓	↓	↓	↑	↑	↓
Oksijen kullanımı	↓	↓	↓	↑	↑	↓
Banyonun karıştırılması	↓	↓	↓	↑	→	↓
İleri yanma sistemleri	↓	↓	↓	↑	↑	↓
Ön ısıtma sistemleri	↓	↓	↓	↑	→	↓
Alttan döküm alma sistemi	→	↓	→	↑	→	→

## KAYNAKLAR

- ALTIN, V., 2002. **Empedans Tam Olarak Nedir?**.Tübitak Bilim ve Teknik Dergisi, Ankara.
- ANDERSON, S., 2002. **DRI-The EAF Energy Source of the Future**. Steelmaking/Melting Midrex Direct Reduction Corporation, 16 s, USA.
- ANONİM, 1991. **Sivas Demir Çelik İşletmeleri A.Ş. Çelikhane Eğitimi Notları**. İzmir Demir Çelik Sanayi A.Ş. Foça Çelik Fabrikası,101 s, İzmir
- ANONİM, 2006. Türkiye Demir Çelik Üreticileri Derneği. Ankara.
- ANONYMOUS. **Operating and Maintenance Instructions Lance Manipulator**. Badische Sthal Engineering GmbH. 25 s, Germany
- ANONYMOUS, 2003. Chemical Energy System for Closed Door EAF Steelmaking. <http://www.airproducts.co.uk/metals>
- ANONYMOUS, 2004. Praxair's CoJet Gas Injection Technology for EAF's. <http://www.praxair.com/Praxair.nsf>
- BANDIN, E., 2001. **Yeşilyurt Electrical Measurement Report Arc Furnace**. SGL Carbon AG Technical Service, 45 s, Germany.
- BLISS, N.G., 2002. **Improvements in Arc Furnace Electrical Efficiency**. ISS 60. Electric Furnace Conference, Texas/USA.
- BOWMAN, B., 1982. **Optimum Use of Electrodes in Arc Furnaces**. Stahl und Eisen Vol 102, 1153 – 1157, Germany.
- BOWMAN, B., 1993. **Development of AC Arc Furnace**. Xi'an Symposium on Electric Steelmaking Installations, Germany.
- CLAYTON, J. EHLE, J., TWİSTLETON, J. and KNAPP, H., 1992. **The Sheerness Shaft Furnace**. 4th European Electric Steel Congress, 357 – 370, Madrid.
- ÇAMDALI, Ü., 1998. **Elektrik Ark Fırını Yöntemiyle Çelik Üreten Bir Tesiste Termodinamiğin İkinci Kanununun Analizi**. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Türkiye.
- EMİROĞLU, A.Y., 2005. **Çelik Sektör Raporu**. Deniz Portföy, 7 s, Türkiye.
- GRANT, M., 2000. **Principles and Strategy of EAF Post-Combustion**. 58. Electric Furnace Conference, 14 s, USA.
- GRANT, M., KAISER, K. and CANTACUZENE, S., 2005. **Optimization of Steelmaking in Non-Conventional EAF Operations**. AISTech2005 Proceedings, Vol 1, 559 s, USA.
- HOLM, H., 2003. **Benefits of Static VAR Compensator at DC-EAF Steel Plant**. Nokian Capacitors, 10 s, Finland.
- INEGAKI, K., 1988. **Development of EAF Steelmaking Technology in Japan – Past, Present, Future**. 6th Int. Iron and Steel Congress, ISIJ, 72 – 81, Nagoya.
- KARA, A. ve YALÇINÖZ, T., 2005. **Esnek AC iletim Sisteminde Kullanılan Cihazlar ve TCR, SVC, TSR Yapılı Paralel Kompanzatorların Yük Gerilimine Etkisinin Matlab Ortamında İncelenmesi**. 2. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi, 10 s, İstanbul.
- KLEIN, K. and PAUL, G., 1989. **Reflections on the Possibilities an Limitations of Cost Saving in Steel Productions in EAF**. Metallurgical Plant and Technology, Vol1, 125 s, England.
- KOHLE, S., 1999. **Improvements in EAF Operating Practices Over the Last Decades**, Electric Furnace Conference, 13 s, Pittsburgh.

- MADUEL, F. and BOWMAN, B., 1992. **Effect of Adding Reactance on Furnace Performance at CELSA.** 4th European Electric Steel Congress, Madrid.
- MARTIG, M., 1996. **Electric Ark Furnace Phase Balance.** Steel Works Session, 34 s, Spain.
- MOARES, G.C., FILHO, A.W., GRANT, M., and SHIFRIN, V., 2001. **Implementation of Pyrejet Technology in EAO at Siderurgica Barra Massa.** Brazil.
- ORHON, M.K., 1986. **Ark Ocakları Elektriği.** Asilçelik Teknik Yayını, 221 s, Türkiye
- PFEIFER, H. and KIRSCHEN, M. 2002. **Thermodynamic Analysis of EAF Energy Efficiency and Comparison with a Statistical Model of Electric Energy Demand.** Institute of Industrial Furnaces and Heat Engineering in Metallurgy, RWTH Aachen, 16 s, Germany.
- PUJADAS, A. and McCAULEY, J., 2004. **EAF Energy Optimization at Nucor-Yamato Steel.** Iron and Steel Technology, 111 s, Italy.
- RAISZ, D., 2000. **Recognition of the Operational States in Electric Arc Furnaces.** Department of Power Systems University of Technology and Economics Budapest, Hungary.
- SCHMITT, R., 1997. **Electric Arc Furnace Scrap Preheating.** Electric Power Research Institute, 4 s, USA.
- TIMM, K. and PFEILER, T., 1992. **Optimizing the operation of an AC Arc Furnace.** Elektrowarme International, Vol 50, 199 – 205, Germany.
- VALLOMY, J., FUSE, T. and NAKAMURA, S., 1992. **Consteel Process Successful in USA.** 4th European Electric Steel Congress, 39 – 48, Madrid.

## ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Trabzon' da doğdum. İlk, orta ve lise eğitimimi Trabzon' da tamamladıktan sonra 1994 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Müh. Mim. Fak. Makine Mühendisliği Bölümünü kazandım. 1998 yılında bu bölümden mezun oldum. 2000–2002 yılları arasında Antalya' da özel bir firmada İmalat Mühendisi, 2002–2004 yılları arasında İsdemir A.Ş./Hatay' da Vinç Bakım Mühendisi olarak çalıştım. 2004 yılı eylül ayından itibaren Nursan Metalurji Endüstrisi A.Ş./Hatay' da Makine Bakım Müdürü olarak görev yapmaktayım.