

Elektrik Ark Fırınlarında Çalışma Karakteristiklerinin İncelenmesi

Investigation of Characteristics of Electric Arc Furnace Operation

Mustafa ŞEKER¹, Arif MEMMEDOV², Rafael HÜSEYİNOV³

^{1,2} Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği
İnönü Üniversitesi,
mustafaseker@d-emi.com, arif.memmedov@inonu.edu.tr

³ Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği
Cumhuriyet Üniversitesi
huseyinov@cumhuriyet.edu.tr

Özet

Elektrik Ark Fırınları elektriksel şebekelerde güç kalitesi problemlerine neden olan lineer olmayan yüklerdir. Bu nedenle EAF yüklerinin çalışma karakteristiklerinin iyi anlaşılması gereklidir. Bu çalışmada Sivas Demir Çelik İşletmeleri A.Ş. (SIDEMİR) tesisinde bulunan 60 MVA gücündeki EAF yükünün çalışma karakteristikleri EAF transformatörünün farklı kademelerde çalışma durumu için incelenmiştir. Ayrıca CA 8332 güç analizörü yardımı ile EAF transformatörünün girişinden elde edilen güç parametreleri ile statik karakteristik eğrileri karşılaştırılarak fırının optimal çalışma koşulları için akım değerleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Abstract

Electric Arc Furnaces (EAF) are nonlinear loads which are occurred the power quality problems in electrical grids. Because of these reasons, the operational characteristic of EAF must be understood very well. In this paper, operation characteristics of MVA EAF which is located in Sivas Iron and Steel Inc. (SIDEMİR) has been examined for different EAF transformer taps. In addition to, CA 8332 power analyzer measurements obtained from the input power in EAF and static characteristics have been compared and current values and optimal operation conditions for EAF loads can be determined.

1. Giriş

Elektrik ark fırınları (EAF) bağlı oldukları elektriksel sistemlerde harmonik, gerilim dengesizlikleri ve yüksek reaktif güç gibi güç kalitesinin olumsuz olarak etkileyen birçok güç kalitesi problemine neden olurlar[1,3,4]. EAF yüklerinin neden olduğu bu güç kalitesi problemlerinin azaltılması günümüzde önemli bir araştırma konusudur. EAF yüklerinin güç kalitesi problemlerinin incelenilmesi için öncelikle çalışma karakteristiklerinin iyi anlaşılması gereklidir.

EAF yükünün devreye alındığı durumda veya belirli bir çalışma aralığında fırının performansını ve en uygun çalışma değerlerinin tespit edilmesi oldukça önemlidir. Bunun için fırın kısa devre testlerinin yapılması ve maksimum gerilim düşümü hesabı kullanılarak EAF yüklerinin statik karakteristik eğrilerinin tanımlanması gereklidir.

EAF' larında statik karakteristiklerin çıkartılabilmesi için belirli bir sekonder geriliminde değişken ark akımına bağlı olarak giriş gücü, ark gücü, $\cos\theta$ ve ark gerilimi gibi parametrelerin eğrileri incelenmelidir. EAF' larında gerçek güç ark içerisinde oluşan ısı enerjisidir. Tüm ark fırınlarında ark denetimleri $Z=U/I$ ark empedansının denetim bağı olarak ayarlanır. Elektrik ark fırınında gerilim anot çökmesi, katot çökmesi ve ark uzunluğuna bağlıdır. Alternatif gerilimde akım sıfır olduğunda ark söner, ark sönüğünde elektrot ucu ile matal arasındaki gerilim yaklaşık olarak ocak transformatörünün sekonder gerilimine eşit olur[2]. Ark uzunluğu ile ark gerilimi gerilimi arasındaki ilişki denklem 1' de verilen ifade ile açıklanabilir[5].

$$V_{ark} = A + B.I \quad (1)$$

Burada A anot ve katot gerilim çökmelerinin toplamı olarak değerlendirilen bir sabittir ve yaklaşık olarak 40 V' tur. B birim ark uzunluğuna bağlı gerilim çökmesi olarak tanımlanır ve empirik olarak $B=12 \text{ V/cm}$ kabul edilir[6].

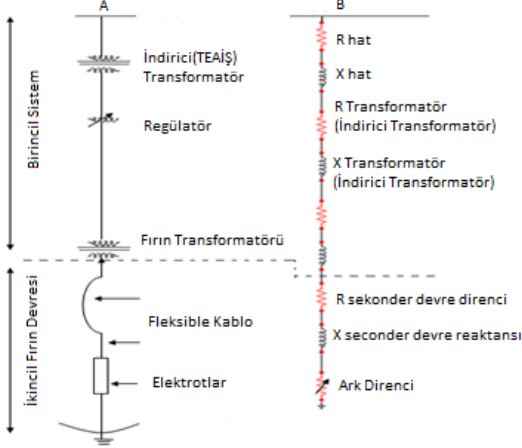
Elektrik ark fırınlarının çalışması genel olarak üç farklı durum ile karakterize edilir. Bu durumlar elektrik ark fırınının kısa devre koşulu, açık devre koşulu ve normal çalışma koşulu olarak tanımlanır. Elektriksel arkı koruyabilmek için en azından 40 V luk bir gerilime ve 4 kA lik bir akıma gereksinim vardır. Elektrik ark fırınlarında kararlı bir çalışma düşük güç faktörü ile olmaktadır. Bu nedenle elektrik ark fırınlarında yüksek reaktif enerji gereksinimi ortaya çıkmaktadır.

Elektrik ark fırınının güç girişinde gerilim düşük ise akım yüksek olur, ark boyunun büyümesi ile ark direncinde büyür ve akım düşer ve akım gerilim arasındaki faz değişir. Ark direncinin 0 a yaklaşması ocağın kısa devre olması, sonsuz olması ise arkın sönüğü anlamına gelir.

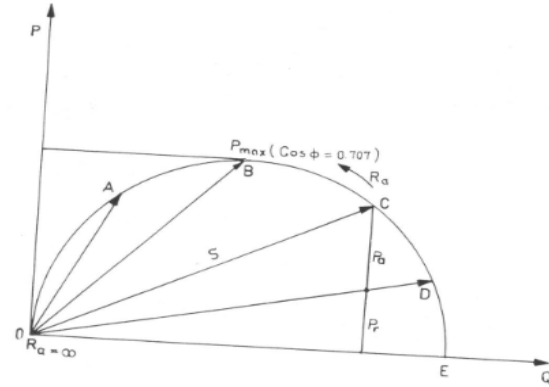
Bir elektrik ark ocağının bir faz eşdeğer devre modeli Şekil 1

de , ark ocağında ark direncine bağlı olarak meydana gelen güç değişimleri Şekil 2 de gösterilmektedir.

Bu çalışmada Sivas Demir Çelik İşletmeleri A.Ş. tesisinde bulunan 60 MVA' lık EAF yükünün statik çalışma karakteristikleri tanımlanmış ve deneysel ölçümlere bağlı olarak güç karakteristikleri incelenmiştir.



Şekil 1. Elektrik ark fırını besleyen sistemin bir faz eşdeğer elektriksel devre şeması.



Şekil 2. Ark ocağında ark direncine göre güç değişimleri (Pa-Ark gücü, Pr-Kayıp güç)

2. EAF' larında Güç Hesaplamaları

Elektrik ark fırınına ait devre parametrelerinin hesaplamasında bir faz eşdeğer devre modelinden faydalanılır. Genel olarak empedans Z formunda gösterilir ve R direnci ve jX reaktance bileşenini içerir. Elektrik ark fırını bulunan sistemlerde empedans hesabı gerçekleştirilirken hat empadansı için $X/R=10$ ve transformatörler için $X/R=8$ oranında olduğu kabul edilir[6].

Şebeke reaktansı denklem 2 de verilen matematiksel ifade, transformatör reaktansıda denklem 3 de verilen ifade ile tanımlanmaktadır;

$$Z = \frac{(E_{00})^2}{MVA} \quad (2)$$

Burada E_{00} fazlar arası gerilim ve MVA şebeke kısa devre gücüdür.

$$Z = \frac{\%Z.(E_{00})^2.10}{MVA.10^3} \quad (3)$$

Burada %Z yüzde olarak empedans değeri ve E_{00} fazlar arası gerilim değeri ve MVA transformatör gücünü temsil etmektedir.

EAF devre empedansı Şekil 1' de görüldüğü gibi beş kısımdan oluşur.

1. Şebeke empedansı ($R_L + X_L$)
2. İndirici transformatör empedansı ($R_t + X_t$)
3. Fırın transformatör empedansı ($R_f + X_f$)
4. Sekonder devre empedansı ($R_s + X_s$)
5. Ra ark direnci

$\cos\phi=0.707$ değerinde maksimum güç koşulu ile elektrik ark fırını çalışır. Elektrik ark fırının da meydana gelen güçler denklem 4,5 ve 6 ifadeleri ile tanımlanır[7-9].

$$S (\text{Görünür Güç}(MVA)) = \frac{3.I^2.Z_0}{10^6} / N \quad (4)$$

$$P (\text{Aktif Güç}(MW)) = \frac{3.I^2.R_0}{10^6} / N \quad (5)$$

$$Q (\text{Reaktif Güç}(MVAR)) = \frac{3.I^2.X_0}{10^6} / N \quad (6)$$

(3)

Veya devre parasetlerine bağlı olarak daha detaylı bir halde denklem 7,8 ve 9' deki gibi ifade edilebilir.

$$S = \frac{3.I^2.(R_f + R_s + R_a)^2 + J.(X_f + X_s)^2}{10^6} \quad (7)$$

$$P = \frac{3.I^2.(R_f + R_s + R_a)}{10^6} \quad (8)$$

$$Q = \frac{3.I^2.(X_f + X_s)}{10^6} \quad (9)$$

Burada I sekonder devredeki hat akımıdır ve denklem 5 ifadesi ile tanımlanır;

$$I_{hat} = \frac{E_{00}}{\sqrt{3}.Z_T} \quad (\text{Amper}) \quad (10)$$

burada Z_t toplam empedans değeridir.

Güç faktörü ise devre parametrelerine bağlı olarak denklem 11' deki ifade ile tanımlanabilir,

$$PF = \frac{(R_f + R_s + R_A)}{(R_f + R_s + R_A)^2 + (X_f + X_s)^2} \quad (11)$$

2.1. EAF yükünün devre parametrelerinin hesaplanması

Sivas Demir Çelik İşletmeleri tesisinde bulunan 60 MVA' LİK elektrik ark fırınına ait devre parametreleri Çizelge 1 ve Çizelge 2' de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Elektrik ark fırınına besleyen sisteme ait devre parametreleri.

Şebeke	Kısa devre gücü=7250 MVA Şebeke gerilimi=380 kV
İndirici(TEİAŞ) Transformatör	Transformatör gerilimi=380kV/34,5Kv Transformatör gücü=100 MVA %Z=15

Çizelge 2. EAF transformatörünün kademe değerlerine bağlı olarak parametre değerleri

Kademe	MVA	Ip/ A	Usek / kV	IseK / A	Oran	%Uk
1	49.30	825	0.450	63200	76.667	12.50
2	51.90	869	0.474	63200	72.785	11.55
3	54.70	916	0.500	63200	69.000	10.65
4	57.30	958	0.523	63200	65.966	9.97
5	60.00	1004	0.548	63200	62.956	9.30
6	60.00	1004	0.575	60200	60.000	8.29
7	60.00	1004	0.597	58000	57.789	7.58
8	60.00	1004	0.621	55800	55.556	6.91
9	60.00	1004	0.646	53600	53.406	6.30
10	60.00	1004	0.667	51900	51.724	5.84
11	60.00	1004	0.693	50000	49.784	5.34
12	60.00	1004	0.719	48200	47.983	4.90

Elektrik ark fırının devre parametrelerinin hesaplanmasında önceki bölümlerde verilen kabuller ve Tablo 1 ve tablo 2 deki parametreler kullanılarak EAF transformatörünün 12. kademesi için hesaplamaları gerçekleştirilerek hesaplanan değerler Usec referans gerilimi olan 719 volt için hesaplanarak Çizelge 3' de kaydedilmiştir.

Çizelge 3. 719 volt referans gerilimi için ark fırınına besleyen sistemin direnç ve indüktans değerleri.

	R(mohm)	X(mohm)
Şebeke	0.071	0.0713
İndirici transformatör	0.096	0.7754
EAF Transformatör	0.527	0.422
EAF reaktans	0.612	12.67

2.1.1. Fırın giriş gücünün Hesaplanması

a) Çalışma direnci

$$R_{op} = \sqrt{\frac{(PF)^2 \cdot (X_{toplam} + X_{şebeke} + X_{sek})^2}{1 - PF^2}} \quad (12)$$

b) Çalışma empedansı

$$Z_{OP} = \sqrt{R_{op}^2 + X_{top}^2} \quad (m\Omega) \quad (13)$$

c) Sekonder çalışma akımı

$$I_{op} = \frac{E_{\theta\theta}}{\sqrt{Z_{OP}}} \quad (kA) \quad (14)$$

d) Primer giriş gücü

$$P(MW) = \frac{3 \cdot [R_{op} - (R_{şebeke} - R_{sek})] \cdot I_{op}^2}{10^3} \quad (15)$$

e) Primer reaktif güç

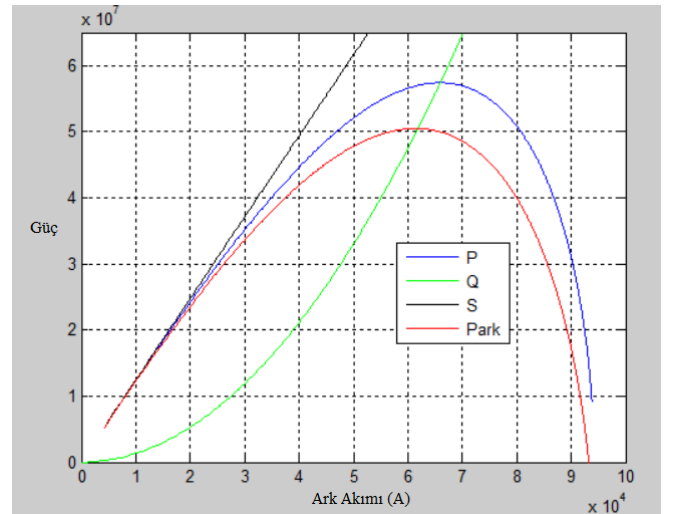
$$Q = \frac{3 \cdot (X_f + X_{sek}) \cdot I_{OP}^2}{10^3} \quad (16)$$

6. Primer görünür güç

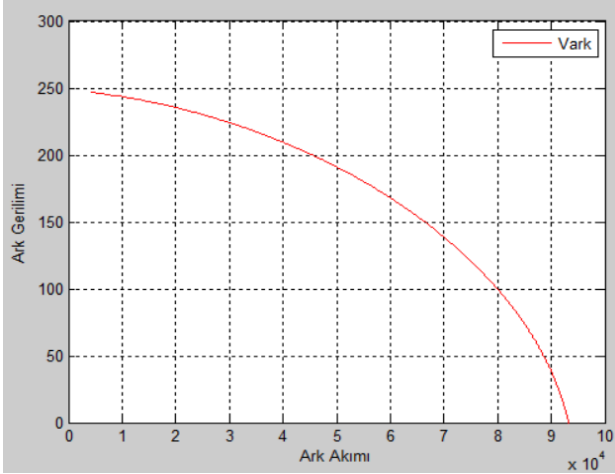
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (17)$$

3. 60 MVA EAF güç karakteristiğinin Hesaplanması

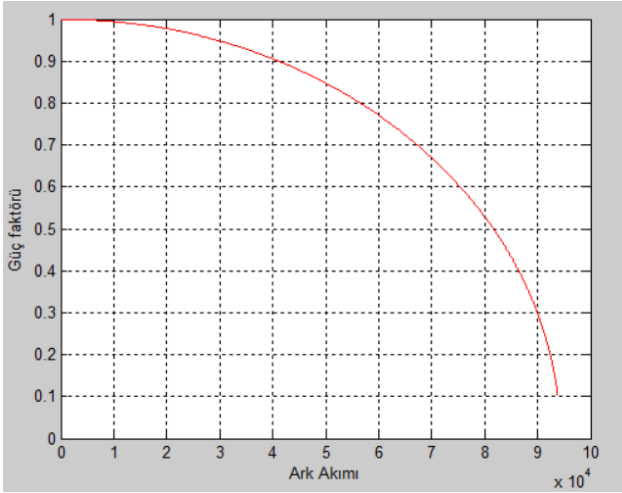
Bölüm 2 de verilen matematiksel ifadeler ve EAF ını besleyen sistemin parametreleri kullanılarak Matlab ortamında hesaplama algoritması oluşturulmuştur ve 60 MVA' lık EAF yükünü için güç karakteristik eğrileri tanımlanmıştır.



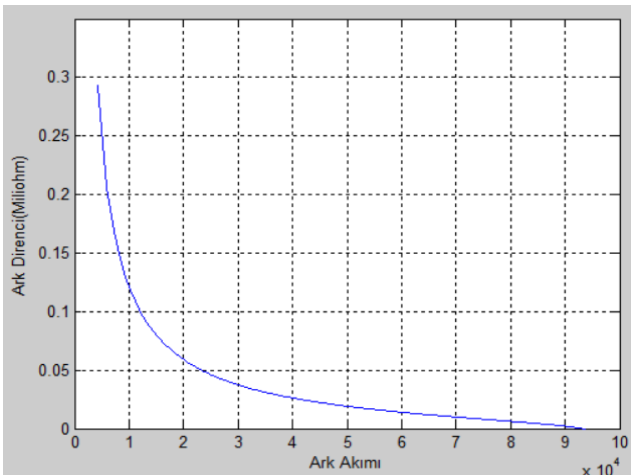
Şekil 3. 60 MVA EAF yükünün EAF transformatörünün 12. kademe değeri için güç karakteristik eğrileri



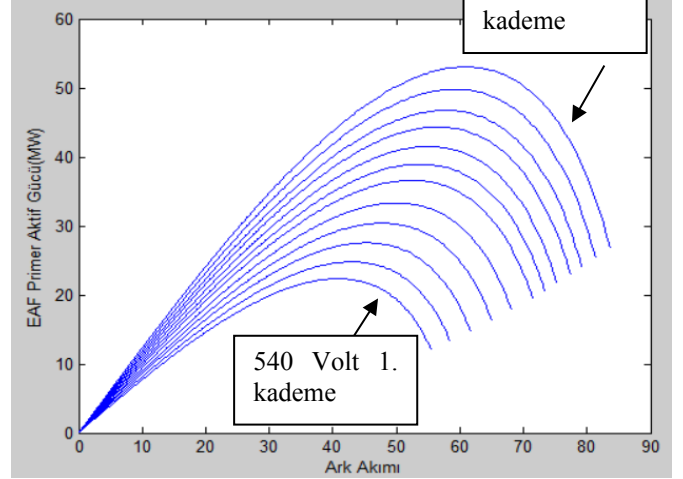
Şekil 4. Ark uzunluğuna bağlı olarak ark akımı ve ark geriliminin değişimi (Vark=0 maksimum kısa devre akımı)



Şekil 5. Ark uzunluğuna bağlı olarak güç katsayısının değişimi.



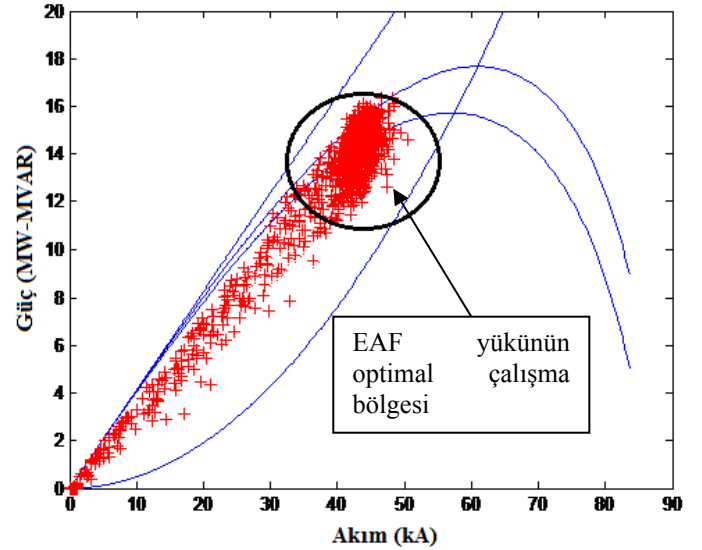
Şekil 6. Ark akımına bağlı olarak ark direnci 719 Volt 12. kademe



Şekil 7. EAF transformatörünün 12 kademe değerine bağlı olarak ark akımı ve giriş gücünün değişimi.

Elektrik ark fırın yüklerinin kademe değerine bağlı olarak güç karakteristik eğrisi Şekil 7' de sunulmuştur. Şekilden de görüleceği gibi EAF yüklerinin analizinde güç karakteristikleri farklı olacağı için farklı transformatör kademesi için farklı kontrol yapıları kullanılmalıdır.

Bu güç karakteristiklerinden faydalanılarak EAF yükünün gerçek zamanlı güç karakteristikleri karşılaştırıldığında EAF yükü için optimal çalışma bölgesi tanımlanabilir. SİDEMİR işletmesinden elde edilen ark fırın yükünün güç karakteristik eğrisi ile statik güç eğrilerinin karşılaştırılması Şekil 8' de gösterilmiştir.



Şekil 8. CA 8332 güç analizörü yardımı ile elde edilen aktif güç parametrelerinin EAF yükünün statik güç karakteristikliği ile karşılaştırılması.(A fazı için)

4. SONUÇLAR

EAF fırın yüklerinin güç kalitesi problemlerinin anlaşılabilmesi ve EAF yüklerinin neden olduğu kısa devre akımları ile birlikte optimal çalışma koşullarının tanımlanması gereklidir. Bu nedenle EAF' larının güç karakteristik eğrilerinin iyi anlaşılması gereklidir. Güç karakteristik eğrilerinden $\cos\theta$, $P_{giriş}$, P_{ark} ve ark gerilimi, ark direnci gibi parametre değerleri tanımlanabilir. EAF yüklerinin farklı transformatör kademelerinde çalışması durumunda her bir kademe için statik karakteristik eğrilerinin tanımlanmalıdır. Böylece güç kalitesinin iyileştirilmesinde kısa devre akımlarının neden olacağı etkilere karşı koruma önlemlerinin belirlenmesi ve EAF yükünün optimal çalışması için en uygun çalışma aralığı yük karakteristik eğrilerinden hesaplanabilir. Bu çalışmada CA8332B güç analizörü yardımı ile gerçek zamanlı güç kalitesi parametreleri ölçülmüştür ve statik çalışma eğrilerden 60 MVA EAF' ının optimal çalışma aralığı için akım değerlerinin 30-42 kA aralığında olması gerektiği belirlenmiştir. Optimum yük için $\cos\theta$ yaklaşık 0,707 olmalıdır. En verimli optimal çalışma aralığı $\cos\theta=0,90$ civarında seçilmelidir. Ayrıca eritme işleminin sonunda transformatör gerilim kademesi çalışılan kademe değerinin altında bir transformatör kademesi ile çalıştırılmamalıdır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (İÜBAP) kapsamında 2011-135 nolu proje numarası ile desteklenmiştir. Yazarlar İÜBAP' a katkılarından dolayı teşekkür etmektedir.

6. Referanslar

- [1] Göl, M., Solar, Ö., Alboyacı, B., Mutluer, B., Çadırcı, I., Ermiş, E., "A New Field-Data-Based EAF Model for Power Quality Studies", IEEE Transactions on Industry Applications", Vol. 46, No 3., May/June 2010
- [2] K.Mete Orhon, "Ark Ocakları Elektriği", Asil çelik Yayınları, Bursa, 1986
- [3] Joint India/OECD Workshop, ' Globalisation and Consolidation in the Steel Industry', New Delphi, 16-17 May 2006, p.17
- [4] Schau, H., Stade, D., "Mathematical Modeling of Three-Phase Arc Furnace", Proceedings IEEE ICHPS VI, September 1994
- [5] Gandhare, W.,Z., Lulekar, D.,D., " Analyzing Electric Power Quality in Arc Furnace", International conference on Renewable enegy and Power Quality Journal (ICREPQ' 7), Sevilla 28-30 March 2007, paper no-272,
- [6]Pelfrey, D.L., "Specifying Arc Furnace Transformers", Electric Furnace Conference Pittsburg, Pa, 1980
- [7] Montari, G.C., Loggini, M., Cavallini, A., Pitti, L., Zaninelli, D., " Arc Furnace Model for The Study of Flicker Compensation In Electrical Networks", IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 9, No. 4, October 1994
- [8] Bello, J.R., "Fundamental of The Electric Arc Furnace", Electric Furnace Proceedings 29, 1971, p 219
- [9] Borrebach, E.J., "Maximum Power Operation of Electric Arc Furnaces", Iron and Steel Engineering, May 1969, p. 74