

Matlab Simulink ile Elektrik Ark Fırın Sistemleri için Statik Var Kompanzasyon Sisteminin Modellenmesi ve Benzetimi

The Modelling and Simulation of Static VAR Compensator (SVC) System for Electric Arc Furnace with Matlab/Simulink

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(EAF) güç sistemlerinin kalitesinde birçok probleme neden olan dengesiz, lineer olmayan ve zamanla değişen yüklerdir. EAF' larının neden olduğu bu problemlerdeki başlıca etken hızlı değişen yüksek akım ve reaktif güç bağımlılığıdır. . Bu çalışma Sivas Demir Çelik işletmeleri A.Ş.(SIDEMİR) tesisinde bulunan 60 MVA' lık Elektrik ark fırını besleyen sistemin 3 faz sistem modeli Matlab Simulink kullanılarak modellenmiştir. Modellemede Elektriksel ark, arkın akım-gerilim karakteristiklerinden faydalanılarak zamana bağlı üstel-hiperbolik bir fonksiyon olarak modellenmiştir. Sistemde oluşacak Kırpışma etkisinin rastgele kırpışma modeli oluşturularak tanımlanmıştır. Ayrıca Reaktif Güç etkisinin incelenmesi için Statik Var Kompanzasyon tasarlanmıştır. Statik Var Kompanzatorün tristörlerinin tetikleme açılarının çekilen reaktif güce bağlı olarak otomatik ayarlanması için kontrol devresi geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen incelemeler bu modelin elektrik ark fırın yüklerinin neden olduğu güç kalitesi problemlerinin analizinde kullanılabileceğini göstermektedir.

Abstract

Electric Arc Furnaces (EAF) are nonlinear and time-varying loads caused to many electrical power quality problems in electrical grids. Nonlinear secondary current and reactive power are the mainly effect of EAF loads for these power quality problems In this study, three phase electrical arc furnace system which is feeding the 60 MVA EAF located in Sivas Iron and Steel Inc.(SIDEMİR) has been modelled with Matlab/Simulink. Electrical arc are modelled as exponatianl-hyperbolik function and random flicker effect are used for the determination od the Flicker effect. In addition to Static VAR Compensator system has been modelled for the inverstigation the reactive power copmpansation. Trigger control system has been created for the adjusting the CVS triger angle automaticaly. Performed studies suggest that it may be used in the analysis of power quality problems caused by the electric arc furnace load of this model

1. Giriş

Elektrik ark fırınları(EAF) elektrik enerjisini termal enerjiye dönüştürürler ve demir çelik endüstrisinde metallerin eritilmesi işleminde yaygın olarak kullanılırlar[1]. EAF ları elektrik enerjisini endüstride en fazla kullanan yükler olmakla birlikte kullanımı günden güne artış göstermektedir. Günümüzde üretilen çeliğin yaklaşık %40' ı EAF tesislerinde üretilirken, 2050 yılına kadar bu oranın %50 olması beklenmektedir[2,3].

Elektrik ark fırınları lineer olmayan çalışması ve stokastik çalışma yapısı nedeniyle gerilim kırpışması, harmonik, ara harmonik gibi güç kalitesi problemlerine neden olurlar[4,5,6,7]. Başlangıçta küçük kapasitelere sahip olan elektrik ark fırınları gelişen teknolojiye paralel olarak hızlı bir gelişim göstermiştir ve yüksek eritme kapasitelerine ulaşmıştır. Kapasitelerinin artması ile birlikte başlangıçta ihmal edilen güç kalitesi problemleri ihmal edilemez boyutlara ulaşarak önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir.

Günümüzde EAF' larının neden olduğu güç kalitesi problemlerinin incelenmesinde gelişmiş simülasyon programları kullanılmaktadır. Bu programlar elektrik ark fırın yüklerinin neden olduğu güç kalitesi problemlerinin incelenmesinde ve iyileştirme yöntemlerinin uygulamalarında bizlere kolaylık sunmaktadır. Böylece yüksek maliyetli uygulamaların bilgisayar ortamında analizi sağlanmaktadır.

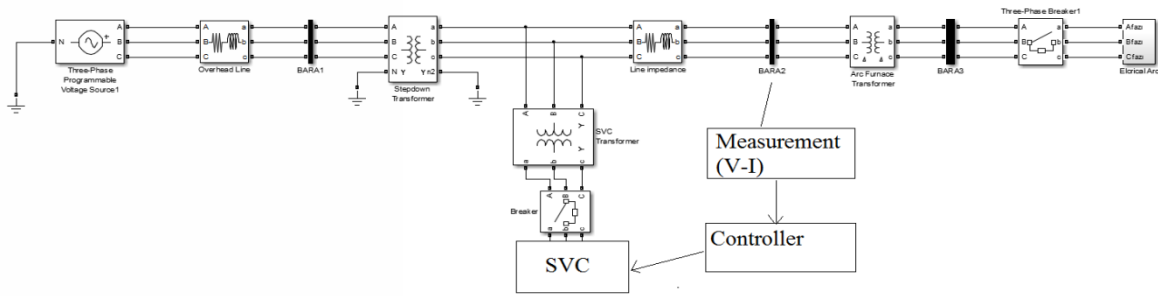
EAF yüklerinin incelenmesinde en önemli konu elektriksel arkın davranışının tanımlanmasıdır. Fakat elektrik ark fırınının stokastik yapısından dolayı elektriksel arkın davranışını tanımlamak oldukça zordur. Elektriksel arkın davranışının modellenmesi için kullanılan çok sayıda yöntem bulunmaktadır. Cassie-Mary diferansiyel denklemini temel alan zaman domeni metotları[5, 8, 9], flicker incelemelerinde kullanılan EAF yükünün stokastik karakteristikleri[10, 11], lineer olmayan yüklerin lineerleştirilmesi için kullanılan lineerleştirme metotları[12, 13], elektriksel arkın zaman ve frekans domeni metotları[14] ve akım-gerilim karakteristikleri gibi çok sayıda yöntem elektriksel arkın

modellenmesinde kullanılmaktadır.

EAF yüklerinin modellenmesinde diğer önemli konulardan biride zamanla değişen yüksek akımın neden olduğu yüksek reaktif güç bağımlılığının azaltılmasıdır. EAF' larında Pasif filtreler, seri indüktör uygulamaları[15], Statik Var kompanzasyonları gibi uygulamaları[16, 17, 18, 19] reaktif güç kompanzasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Böylece EAF' larının neden olduğu güç kalitesi problemleri minimize edilmeye çalışılır. Pasif filtreler elektrik ark fırınlarında meydana gelen hızlı değişimlere hızlı bir şekilde cevap veremediği için kullanışlı değildir. Seri reaktör uygulamalarında şebeke kısa devre gücü artırılarak flicker etkisinin azaltılmasına olanak sağlasa da fırın performansını düşürdüğü için kullanışlı değildir. Bu yöntemler içerisinde en faydalı olanı Static var kompanzasyon(SVC) kullanımındır. Bu nedenle EAF yüklerinin kompanzasyonunda SVC ler yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada Sivas Demir Çelik İşletmeleri A.Ş.

bünyesinde bulunan elektrik ark fırını besleyen sistemin 3 faz devre modeli Matlab/Simulink kullanılarak modellenmiştir. Modellemede elektriksel ark matematiksel üstel-hiperbolik bir fonksiyon ve gerilim kontrollü kaynak kullanılarak oluşturulmuştur. Kırpışma etkisinin tanımlanabilmesi için rastgele kırpışma etkisi tanımlanmıştır. Ayrıca reaktif güç kompanzasyonu için SVC kompanzasyon Matlab/Simulink yardımı ile modellenmiştir. SVC kompanzasyonunda tristörlerin tetikleme açılarının hesaplanması için kontrol algoritmaları kullanılarak tetikleme devrelerinin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalara ilave olarak EAF besleyen sistemin ortak bağlantı noktasından CA 8332 Güç Analizörü yardımı ile elde edilen deneysel analizler ile simülasyon sonuçları karşılaştırılarak uygulanan simülasyon modelinin uygunluğu test edilmiştir. modellemede kullanılan Matlab simulink sistem modeli Şekil 1. de sunulmuştur.



Şekil 1. Elektrik ark fırını besleyen sistemin 3 faz Matlab/Simulink devre modeli

2. Elektrik Ark Fırını Besleyen Elektriksel Sistemin Eşdeğer Devresinin Modellenmesi

Sistemin üç faz elektriksel eşdeğeri için direnç(R) ve endüktans(L) değerleri Tablo 1' de sunulan devre parametreleri ve referans [20-23]' de sunulan kabuller kullanılarak hesaplanmıştır.

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

Şebeke	Kısa devre gücü=7250 MVA Şebeke gerilimi=380 kV
İndirici(TEİAŞ) Transformatör	Transformatör gerilimi=380kV/34,5Kv Y/Y bağlantı Transformatör gücü=100 MVA $\%U_k=15$
EAF Transformatörü	Transformatör gerilimi=34,5kV/719V Transformatör gücü=60 MVA Δ/Δ bağlantı $\%U_k=4,9$
SVC Transformatör	Transformatör gerilimi=34,5 kV/19,5 kV Transformatör gücü=20 MVA Y/Y bağlantı $\%U_k=6$

Çizelge 2. Modellemede kullanılan Transformatörlerin hesaplanan devre parametreleri

Parametre	Stesdown Transformatör	Furnace Transformatör	SVC Transformatör
Nominal Güç	100 MVA	60 MVA	20 MVA
Frekans	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Primer Gerilimi	380 kV	34,5 Kv	34,5 kV
Skonder gerilimi	34,5 kV	0.719 kV	19,5 kV
Primer Direnci (R)	26.88 ohm	0.120 ohm	0.443 ohm
Primer İndüktans değeri (L)	0.684 H	3.07 mH	0.0112 H
Sekonder Direnci (R)	0.221 ohm	0.532×10^{-6}	0.141 ohm
Sekonder İndüktans değeri (L)	5.64 mH	1.33×10^{-6}	3.601 mH

Çizelge 1’ de belirtilen kabuller kullanılarak İndirici transformatör, EAF transformatörü ve SVC Transformatörü için hesaplanan devre parametrelerine ilişkin parametreler Çizelge 2’ de sunulmuştur.

2.1. Elektriksel Arkın Modellenmesi

Elektriksel arkın modellenmesi için gerçek zamanlı ölçülmüş olan Elektriksel arkın statik akım-gerilim(V-I) karakteristiğinden faydalanılır.

Elektriksel ark üstel-hiperbolik bir fonksiyon ile gerilim kontrollü kaynak olarak modellenmiştir. Elektriksel arkın modellenmesinde akım gerilim karakteristiği zamana bağlı üstel ve hiperbolik fonksiyonların toplamı olarak verilmiştir. Bu modelin üstel model ve hiperbolik model ile karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar verdiği bilinmektedir. Ayrıca kırışma etkisinin analizinde sinüzoidal kırışma etkisinin ark fırınında meydana gelen etkiyi tam olarak tanımlamadığı ve flicker etkisinin incelenmesi için rastgele kırışma etkisi ile modellenmesi gerektiği tanımlanmıştır[24].

Her faza ait üstel-Hiperbolik modelin tanımlanmasında kullanılan matematiksel Denklem 1’ deki ifade ile tanımlanmaktadır;

$$V(i) = \begin{cases} \left[V_{at} + \frac{C_{i,d}}{D_{i,d} + |i|} \right] \cdot \text{signum}(i), & \frac{di}{dt} \geq 0, \quad i > 0 \\ V_{at} \left(1 - e^{-\frac{|i|}{i_0}} \right) \cdot \text{signum}(i), & \frac{di}{dt} < 0, \quad i < 0 \end{cases} \quad (1)$$

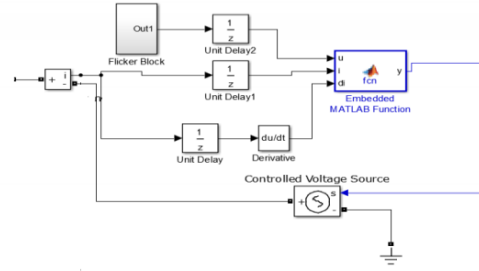
Bu ifadeye $C_{i,d}$ ve $D_{i,d}$ sırası ile akımın artması ve azalması durumunda ark gücünü temsil eder. Hesaplamalarda $C_i=190\text{kW}$, $C_d=39\text{ kW}$ ve $D_{i,d}=5000\text{ A}$ olarak kabul edilmiştir. V_{at} ifadesi ark uzunluğuna bağlı olarak ark gerilimidir. V_{at} geriliminin ark uzunluğuna bağlı olarak değişimini tanımlayan matematiksel ifade denklem 2 deki gibidir.

$$V_{at} = A + B.l \dots\dots\dots(2)$$

Denklem 2’de sunulan A değeri akımın oluşabilmesi için anot ve katot arasında oluşan gerilim çökmesinin eşik değeridir ve yaklaşık olarak 40 V ’ tur. Bu gerilim değeri oluşmadan elektriksel ark oluşmaz. Denklemdeki l ifadesi ark uzunluğunu B ifadesi ise ark uzunluğuna bağlı gerilim çökmesi olarak tanımlanır ve yaklaşık olarak $B=10\text{ V/cm}$ ’ dir.

Elektriksel arkın modellenmesinde kullanılan Matlab/Simulink devre modeli Şekil 2’ de gösterilmektedir.

Birim gecikme bloğu akımın başlangıç durumunda türev ifadesinin hatasını ortadan kaldırmak için kullanılmıştır. Flicker bloğu bölüm 2.2. de sunulan kırışma etkisinin modellenmesinde kullanılmıştır. Elektriksel arkın modellenmesinde kullanılan Matlab/Simulink sistem modeli ve $V(i)$ ifadesini tanımlamak için kullanılan Embedded Matlab Function içerisinde gömülü olarak kullanılan Matlab algoritması sırası ile Şekil 2 ve Şekil 3’ de sunulmuştur.



Şekil 2. Bir faz için Elektriksel arkın modellenmesinde kullanılan Matlab/Simulink sistem modeli

```
function y = fcn(u,i,di)
% This block supports the Embedded MATLAB subset.
% See the help menu for details.
Vat=u;
ci=190000;
cd=39000;
d=5000;
if di>=0
    y=(Vat+(ci/(d+abs(i))))*sign(i);
else
    y = Vat*(1-exp(-abs(i)/5000))*sign(i);
end
```

Şekil 3. Elektriksel arkın modellenmesinde kullanılan Üstel-Hiperbolik modelin Matlab algoritması

2.2. Kırışma Etkisinin Modellenmesi

Rastgele kırışma etkisi 0-12 Hz frekans bandı aralığında sıfır ortalamaya sahip bir sinyal olarak modüle edilir. Rastgele kırışma etkisinin matematiksel ifadesi Denklem 3’ de sunulmuştur.

$$Vat(t) = Vat.(1 + m.N(t)) \quad (3)$$

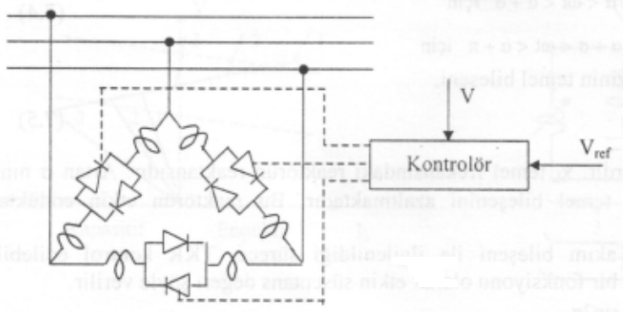
Bu ifadeye V_{at} ark uzunluğuna bağlı eşik gerilimi, m modülasyon indeksi ve $N(t)$ bant sınırlı beyaz gürültü sinylidir.

2.3. Statik VAR Kompansatörün(SVC) Modellenmesi ve Tristörlerin Kontrolü

Elektrik ark fırınları özellikle eritme anında yüksek reaktif güç ile çalışmaktadır. Reaktif güce neden olan reaktif akımının azaltılması hatların ve transformatörlerin kayıplarını azaltacağı gibi güç faktörünü de düzeltecektir. Ark ocaklarında reaktif güç kompanzasyonu için;

- Senkron kompanzatörler
- Doymulu reaktörler
- Statik VAR Kompanzatörler kullanılmaktadır.

Senkron kompanzatörler bakımları zor olacağından uygulamalarda zorluklar oluşturmaktadır. Ayrıca makine kayıpları oldukça büyüktür. Doymulu reaktörlerde gerilim değişimleri ocağın reaktif gücüne göre daha az değişir bu nedenle reaktif güç denetimi tam olarak gerçekleştirilemez. Statik VAR Kompanzatörler yukarıd belirtilen diğer yöntemlerin yetersizliklerini giderdiğinden ve tristörlerin kontrolü ile birlikte kompanzasyon miktarının değişimini denetleme olanağı sağladığı için daha elverişlidirler. Bu nedenle SVC sistemler elektrik ark fırınlarının kompanzasyonunda yaygın olarak kullanılır. Şekil 7’ de elektrik ark fırınlarının kompanzasyonunda kullanılan 6 darbeli SVC modeli gösterilmektedir.



Şekil 4. 6 darbeli Tristör kontrollü SVC modeli

SVC ni temel yapısı şekilden de görüldüğü gibi tristörlere seri bağlı reaktörlerden oluşmaktadır. Tristörlerin iletim açısı σ ile tetikleme açısı α arasındaki bağıntı;

$$\sigma = 2.(\pi - \alpha) \dots \dots \dots (4)$$

İfadesi ile tanımlanır. Ani akım i denklem 5' deki ifade edilmiştir.

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{X_L} \cdot V(\cos\alpha - \cos\omega t) & : \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0 & : \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \dots \dots \dots (5)$$

Akım dalgasının fourier analizinin temel bileşeni;

$$I_1 = \frac{V(\sigma - \sin\sigma)}{X_L \cdot \pi} \dots \dots \dots (6)$$

İle ifade edilir. burada I_1 ve V etkin değerlerdir ve ifade sinüzoidal olduğundan $B(\alpha)$ ifadesi 0-180 derece aralığında değişir. Tetikleme açısına bağlı olarak $B(\alpha)$ ifadesi denklem 7' deki gibidir,

$$B(\alpha) = \frac{I_1}{V} = \frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi \cdot X_L} = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi \cdot X_L} \dots \dots \dots (7)$$

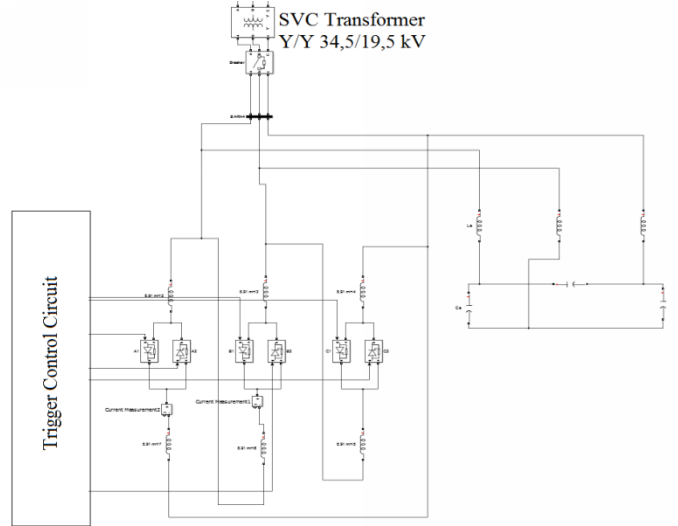
Tristörlerin tetiklenmesi için Şekil 5' de sunulan gösterimde olduğu gibi kontrol devresine ihtiyaç duyulur. Elektrik Ark Fırınının mevcut durumda kompanzasyonu için toplam 36 MVar kurulu gücüne sahip SVC sistem kullanılmaktadır. Tristörlere seri olarak bağlanan bobin değerleri birbirine eşit ve 8,91 mH' dir. SVC sistemin neden olacağı harmonik etkilerin azaltılması sistemde tristörlere paralel 18 MVar gücünde ve 150 Hz' de filtre grubu bağlanmıştır.

Bu sistemde paralel filtrede kullanılacak olan kapasite değeri aşağıdaki şekilde belirlenmektedir;

$$p = \frac{f^2}{f_0^2} = \frac{50^2}{150^2} = 0.111 \dots \dots \dots (8)$$

$$X_{Filter} = \frac{V_s^2}{Q_{Filter}} = \frac{9500^2}{6 \times 10^6} = 15,04 \dots \dots \dots (9)$$

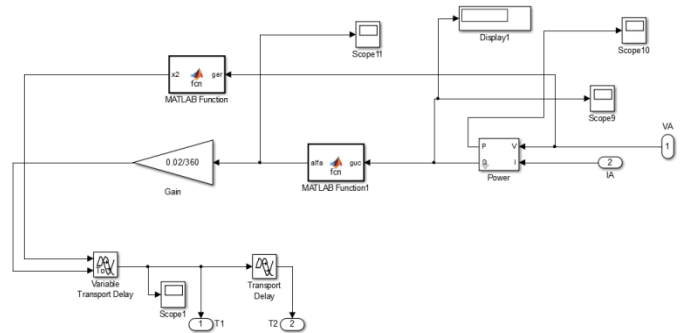
$$X_C = \frac{X_{Filter}}{1 - p} = \frac{15,04}{1 - 0.111} = 16,91 \text{ ohm} \quad (10)$$



Şekil 5. Modellemede kullanılan Tristör kontrollü Statik VAR Kompanzatorün sistem modeli

bu ifadeden yola çıkarak $X_C = 1/2.\pi.f.C$ bağıntısından bağlanılması gereken C değeri 0,627 μF olarak hesaplanır. Tristörlerin tetikleme açılarının ayarlanması için kontrol devresi Şekil 6' da sunulan Matlab/Simulink devre modeli oluşturularak gerçekleştirilmiştir.

Bu devrede ark fırının girişindeki çekilen akım ve gerilim değerine bağlı olarak Aktif ve reaktif güç değişimleri ve Matlab/Function1 bloğu içerisindeki algoritma yardımı ile tetikleme açısı hesaplanmaktadır. Gain kazanç bloğu ile dakika dönüşümünü tanımlamak için kullanılmıştır. Zaman geciktirme bloğu Tristörlerin pozitif ve negatif yarım periyottaki iletimleri sağlamak için tanımlanmıştır. Böylece reaktif güç değişimine bağlı olarak açı değeri anlık hesaplanacak ve bu açı değerine bağlı olarak transistörler iletimde olacaktır ve kompanzasyon işlemi gerçekleştirilecektir.



Şekil 6. Tristör tetikleme açısının ayarlanması için tasarlanan kontrol bloğunun Matlab/Simulink devre modeli

Tetikleme açısının hesaplanması için kullanılan Matlab Fonsiyon bloğu içerisinde tanımlanan hesaplama algoritması,

```

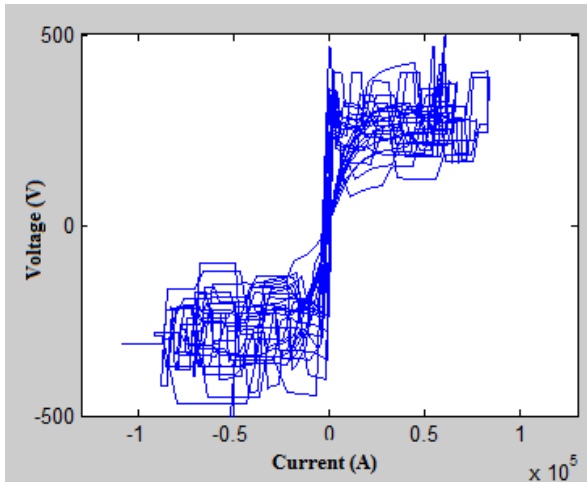
Kontrol Devresi C4/MATLAB Function1 x
1 function alfa = fcn(guc)
2 %codegen
3 guc=abs(guc);
4 Vetkin=19942;
5 B=guc/Vetkin^2;
6 alfa=pi/2; %% ilk koşul
7 epsilon=0.001; max1=3; x1=pi/2; y=0;
8 XL=0.972;
9
10 for k=1:max1
11 a=2*cos(2*alfa);
12 x1=alfa-(B*pi*XL-(2*(pi-alfa)+sin(2*alfa)))/a;
13 alfa=x1;
14 y=B*pi*XL-(2*(pi-alfa)+sin(2*alfa));
15 if abs(y)<epsilon
16 break
17 end
18 end
19 alfa=alfa*180/pi;
20 if alfa<0;
21 alfa=90;
22 else
23 end
24 if alfa>180;
25 alfa=180;
26 else
27 end

```

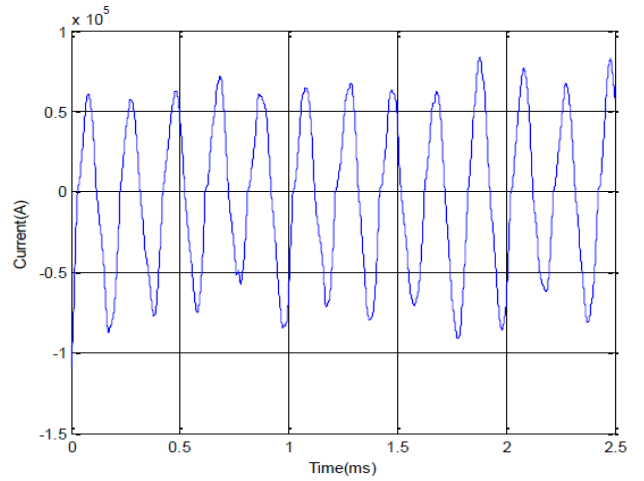
3. Simülasyon Sonuçları ve Simülasyon sonuçları ile Gerçek zamanlı ölçümlerin karşılaştırılması

Elektrik ark fırının Ortak Bağlantı Noktasına bağlanan CA 8332 güç kalitesi analizörü yardımı ile elektriksel sisteme ait parametreler 5-7 Mayıs 2012 tarihinde 1 ms' lik örneklemelerle birer dakikalık ortalamalar olarak kayıt altına alınmıştır. Simülasyon devresinde parametreler 1 ms örneklemeler ile hesaplanarak elde edilen simülasyon sonuçlarının 1 er dakikalık ortalamaları oluşturulmuştur. Gerçek zamanlı ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları excel ortamına aktarılmıştır. Modellenen üç faz devre modeli ile elde edilen simülasyon sonuçları ile gerçek zamanlı deneysel veriler karşılaştırılarak uygulanan simülasyon modelinin uygunluğu test edilmiştir.

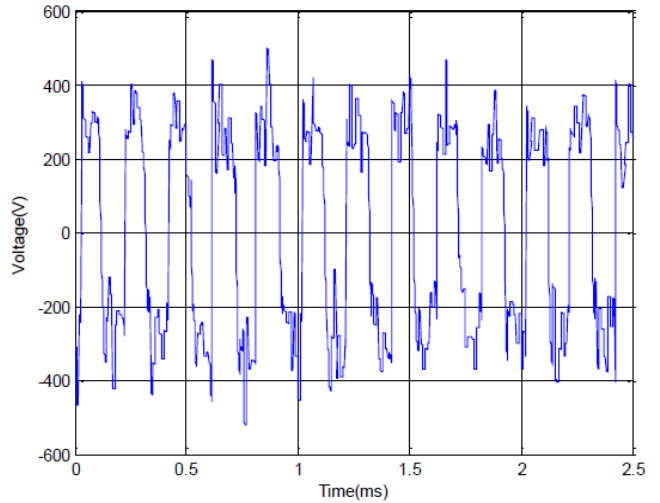
Simülasyon sonucunda modellenen elektriksel arkın V-I eğrisi ve akım gerilim dalga formu değişimleri sırası ile Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9' de gösterilmiştir.



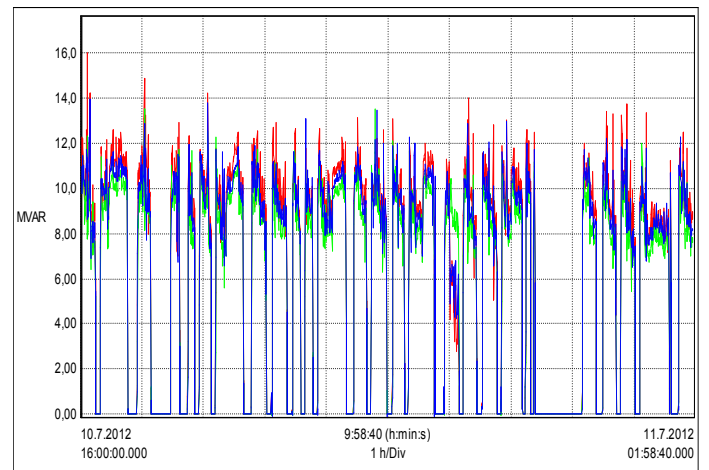
Şekil 7. Üstel-Hiperbolik model kullanılarak Simülasyon sonucunda elde edilen elektriksel arkın V-I eğrisi



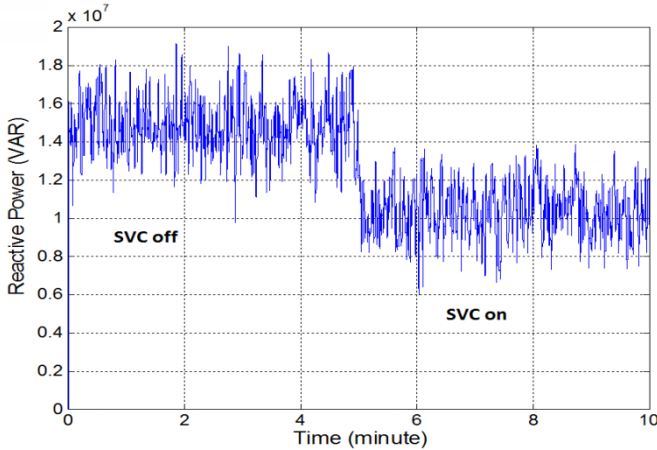
Şekil 8. Üstel-Hiperbolik model kullanılarak Simülasyon sonucunda elde edilen elektriksel arkın akım değişimi



Şekil 9. Üstel-Hiperbolik model kullanılarak Simülasyon sonucunda elde edilen elektriksel arkın V-I eğrisi



Şekil 10. Elektrik ark fırın transformatörünün primer devresinden ölçülen Ark Ocağı Girişi 3 Faz Reaktif Güç Değişimi (Kırmızı: A Fazı, Yeşil: B Fazı, Mavi: C fazı)



Şekil 11. Simülasyon sonucunda SVC sistemin devrede olmadığı durumda ve devrede olduğu durumda reaktif güç değişimi.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada EAF yükünün üç fazlı sistem modeli elektriksel arkın Üstel-Hiperbolik matematiksel ifadesi kullanılarak modellenmiştir. Simülasyon sonuçları elektrik ark fırın yüklerinin lineer olmayan karakteristiklerini tanımlamada üstel-hiperbolik modelin kullanılabilirliğini göstermektedir. Rastgele kırpışma etkisi elektrik ark fırınlarının neden olduğu kırpışma etkisini tanımlamaktadır ve simülasyonda kullanılan Statik Var Kompanzasyon modeli ile gerçek zamanlı ölçümlerin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Statik var kompanzasyon ile birlikte uygulanan bu üç fazlı EAF sistem modeli EAF yüklerinin karakteristiklerinin modellenmesinde ve güç kalitesi analizlerinin incelenmesinde kullanılabilir.

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., Albayacı, 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] Joint India/OEDC Workshop, „ Globalisation and Consolidation in the Steel Industry", New Delhi, 16-17 May 2006, p.17
- [3] Schau, H., Stade, D., "Mathematical Modeling of Three-Phase Arc Furnace", Proceedings IEEE ICHPS VI, September 1994
- [4] Hooshmand, R., Banejad, M., Estefani, M.T., "A New

- Time Domain Model for Electric Arc Furnace", Journal of Electrical Engineering, Vol. 59, No. 4, 2008, pp. 195-202.
- [5] A.A. Gomez, J.J.M., Durango ve A.E., Mejia, "New Time Domain Model for Electric Arc Furnace", Journal of Electric Engineering, Vol 59, No:4, 2008, pp. 195-202
- [6] A. Memmedov, "Effect of arc furnaces working in groups on grid voltage". S. Electric, 215, 142-145, 2007
- [7] M. Şeker, A. Memmedov, Elektrik Ark Fırını Besleyen Elektrik Şebekelerinde Gerilim Sapmalarının Deneysel İncelenmesi, ELECO'12 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, Türkiye, 2012.
- [8] Ache, E., et all, " A Harmonic Domain Computation Package for Nonlinear Problems and Its Application to Electric Arc", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, July 1990
- [9] E.A. Cano Plat, and H.E. Tacca, " Arc Furnac Modelling in ATP-EMTP", International Conference on Power System Transient(IPST" 05), Montreal, Canada, June 19-23, 2005
- [10] Fenghua, W., Zhijian, J., " Application of Extended Kalman Filter to The Modeling of Electric Arc Furnace for Power Quality Issues", IEEE Transactions on Power Delivery 10, No. 4(2005), p. 991-996
- [11] Pak, L.F., Dinavachi, V., " Real Time Digital Time-Varying Harmonic Modeling and Simulation Techniques", IEEE Transactions on Power Delivery 22, No. 2(2007), 1218-1227
- [12] Zhang, T.,Makram, E.B., Girgis, A., "Effect of Different Arc Furnace Model on Voltage Distortion", IEEE Conference on Harmonics and Power Quality of Power", P. 1079-1085, 14-18 October 1998
- [13] Varadan, S., Makram, E.B., Girgis, A., " A New Time Domain Model Voltage Source for an Arc Furnace Using EMTP", IEEE Transactions on Power Delivery 11, No. 3, 1685-1996
- [14] D. Grabowski and J. Walczak, " Neural Approach to Time-Frequency Signal Decomposition", in Lecture Notes in artificial intelligence, L. Rurkowski, Y., Siekman, R. Tadausiewicz and L.A. Zadeh, Eds. Berlin Heidelberg New York; Physica-Verlag, pp. 118-1123, 2004
- [15] W. M. Grandy, M. J. Samottj, A. H. Noyola, "Survey of active power line conditioninh methodologies", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 5., No. 3., pp. 1536-1542, July 1990
- [16] L., Gyugi and A. A. Otto., "Static shunt compensation for voltage flicker reduction on Power power factor correction", in proc, American Power Conference, pp. 1271-1286, USA, 1976
- [17] I. HosONO, M. Yano, M. Tekeda, S. Yuya and S. Sueda, "Suppression and Measurement of arc furnace flicker with a large Static Var compensator", IEEE Transaction on Power App. And Syst., Vol. PAS-08, No. 6,
- [18] A. Wolf and M. Thamodharan, "Reactive Power Reduction in three phase arc furnace", IEEE Transaction Ind. Electron., Vol. 47, pp. 729-733, August 2000
- [19] C. Surapong, C.Y. Yu, D.Thukaram, T. Nipon and K.

- Damrong, “ Minimization of the effect of harmonics and voltage dip caused by electric arc furnace”, in Proc. IEEE PES Winter Meeting, pp. 2568-2576, Singapore, 2000
- [20] Bello, J.R., “Fundamental of The Electric Arc Furnace”, Electric Furnace Proceedings 29, 1971, p 219
- [21] Borrebach, E.J., “Maximum Power Operation of Electric Arc Furnaces”, Iron and Steel Engineering, May 1969, p. 74
- [22] Pelfrey, D.L., “Specifying Arc Furnace Transformers”, Electric Furnace Conference Pittsburg, Pa, 1980
- [23] L. Di Stasi, Electric Furnaces (in Italia), Patron ed., Padova, Italy, 1976
- [24] M. Şeker, A. Memmedov, “Investigation of Voltage Quality in Electric Arc Furnace with Matlab/Simulink”, International Journal of Engineering and Technical Research(IJERT), ISSN:2321-0869, Volume-2, Issue-11, November 2014