

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DİNAMİK ARK MODELLERİ VE DEVRE
KESİCİLERİN
BİLGİSAYAR SİMÜLASYONU**

ERKAN KÜRÜN

**DANIŞMAN
Prof. Dr. M. SALİH MAMIŞ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MALATYA

2006

Tezin Başlığı: **Dinamik Ark Modelleri ve Devre Kesicilerin Bilgisayar
Simölasyonu**

Tezi Hazırlayan: **Erkan Kürün**

Sınav Tarihi: 13 Ekim 2006

Yukarıda adı geöen tez Jürimizce değeriendirilerek Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jürisi Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Müslüm ARKAN (İnönü Üniv.) _____

Prof. Dr. M. Salih MAMIŞ (İnönü Üniv.) _____

Yrd. Doç. Dr. Ö. Faruk ÖZGÜVEN (İnönü Üniv.) _____

Prof. Dr. M. Salih MAMIŞ

Tez Danışmanı

İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. Ali Şahin

Enstitü Müdürü

Onur Sözü

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Dinamik Ark Modelleri ve Devre Kesicilerin Bilgisayar Simülasyonu” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yönetime uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Erkan KÜRÜN

ÖZET
YÜKSEK LİSANS TEZİ

DİNAMİK ARK MODELLERİ VE DEVRE KESİCİLERİN
BİLGİSAYAR SİMÜLASYONU

ERKAN KÜRÜN

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

69+ viii sayfa

2006

Danışman: Prof. Dr. M. Salih. MAMİŞ

Bu tezin amacı yüksek ve orta gerilimde kullanılan kesicilerin açma-kapama işlemi sırasında meydana gelen arkların modellenmesi ve bilgisayar simülasyonları ile incelenmesidir.

Güç sistemlerinde kısa devre arızalarının meydana gelmesi durumunda enerjinin sorunsuz bir biçimde kesilmesi ve gerekli korumanın sağlanması büyük önem taşımaktadır. Güç sistemlerinde kısa devre olaylarının büyük bir bölümü ark şeklinde meydana gelmektedir. Ayrıca kısa devre durumları veya normal şartlar altında kesici açma işlemini gerçekleştirdiğinde kontaklar arasında yine bir elektrik arkı oluşabilmektedir. Bu gibi durumlarda sistemden geçen akımın ve gerilim dalgasının biçiminde meydana gelen değişimin bilinmesi gerek koruma açısından, gerekse devre kesicilerinin tasarımı açısından büyük önem taşımaktadır. Elektrik arkı sabit bir direnç olarak modellenmekle birlikte, doğru bir analiz için daha detaylı modellere gerek bulunmaktadır. Bu amaç için, sabit direnç yerine karakteristiği zamanla değişkenlik gösteren dinamik ark modelleri kullanılmaktadır. Ancak bu gibi detaylı modellerin simülasyonunda zorluklar çekilmektedir. Son zamanlarda geliştirilen bir durum uzayı tekniği ile doğrusal olmayan ve zamana bağlı değişkenlik gösteren elemanların kolaylıkla modellenebileceği görülmüştür.

Bu çalışmanın ilk aşamasında güç sistemlerinde kullanılacak devre kesicilerinin çeşitleri ve yapısı incelenerek elektrik arkının oluşumu ve çeşitleri hakkında gerekli bilgiler verilmiştir. Güç sistemi MATLAB bilgisayar programı ve durum uzayı tekniği kullanılarak modellenmiş ve simülasyon yoluyla kesici kontaklarının maruz kaldığı gerilim ile akım eğrileri elde edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Güç sistemi, ark, ark çeşitleri, MATLAB

ABSTRACT

Master Degree Thesis

DYNAMIC ARC MODELS AND COMPUTER SIMULATIONS OF CIRCUIT BREAKERS

Erkan Kürün

İnönü University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

69+viii pages

2006

Supervisor: Prof. Dr. M. Salih MAMİŞ

The purpose of this thesis is to investigate the dynamic models of the electric arcs and simulation of medium and high voltages circuit breakers.

In power systems, it is very important to switch the load and source without any problem and to provide a reliable protection in the case of short circuit faults. Most of the short circuit faults are in the form of electrical arcs. Also, electrical arcs occur between the contacts of the circuit breakers. Determination of current flowing in the system and changes in the voltage under these conditions is important for the protection process and for the design of the circuit breakers. Although an electrical arc can be modeled as a constant resistor, more accurate models are needed for a detailed analysis. To achieve this, dynamic arc models whose characteristics varying with time are used instead of constant resistance models. However, there are some difficulties in simulation of these models. With a recently developed state-space technique, it has been shown that non-linear and time-variant circuit elements can be modeled easily.

In this thesis, the structure and the types of the circuit breakers are investigated, and useful knowledge about the occurrence and the types of the electrical arcs is given. Various arc models are simulated using a benchmark power system in MATLAB and the state-space technique is also used for transient simulation of fault arcs. Arc current and voltage are obtained.

KEYWORDS: Power system, arc, arc models, MATLAB

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasını değerli fikirleri ve tecrübeleri ile yönlendiren değerli hocam Prof. Dr. M. Salih MAMİŞ'e göstermiş olduğu yakın ilgi ve yardımlarından dolayı teşekkürü bir borç bilir, şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışmasında bana vermiş olduğu desteklerinden dolayı Arş. Grv. Dr. Asım KAYGUSUZ'a ve Arş. Grv. Dr. S.Ethem HAMAMCI'ya teşekkür ederim.

Ayrıca İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümündeki tüm öğretim elemanlarına teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. ELEKTRİK DEVRE KESİCİLERİN YAPISI VE KARAKTERİSTİKLERİ.....	5
2.1. Kesicinin Tanımı.....	5
2.2. Kesicinin Tarihçesi.....	5
2.3. Kesicinin Görevleri.....	5
2.4. Kesici Çeşitleri.....	6
2.4.1. Havalı Kesiciler.....	6
2.4.2. Vakumlu Devre Kesicileri.....	7
2.4.3. Doğru Akım Güç Kesicileri.....	9
2.4.4. Az Yağlı Kesiciler.....	11
2.4.5. SF6 Gazlı Kesiciler.....	12
3. ELEKTRİKSEL ARK.....	15
3.1. Arkın Tanımı.....	15
3.2. Arkın Oluşumu.....	15
3.3. Elektriksel Ark.....	15
3.4. Ark Oluşma Nedenleri.....	15
3.5. Arkın Söndürülmesi.....	16
3.6. Ark Direncini Arttırma Yöntemleri.....	17
3.7. Ark Karakteristiklerinin Modellenmesi.....	19
3.7.1. Primer Ark Karakteristiğinin Modellenmesi.....	19
3.7.2. Sekonder Ark Karakteristiğinin Modellenmesi.....	19
4. DİNAMİK ARK MODELLERİ.....	22
4.1. Cassie Ark Modeli.....	22
4.2. Mayr Ark Modeli.....	24
4.3. Habedank Ark Modeli.....	26
4.4. Kema Ark Modeli.....	28
4.5. Schavemaker Ark Modeli.....	30
4.6. Schwarz Ark Modeli.....	31
5. ARK MODEL BLOK PAKETİ.....	33
5.1. Matlab Güç Sistem Blok Paketi.....	33
5.2. Devre Kesici Anahtarlama ve Ark Modelleme.....	33
5.3. Ark Model Blok Setinin Oluşturulması.....	34
6. DURUM UZAYI TEKNİĞİ İLE ANALİZ.....	38
6.1. Trapez Kuralıyla Sayısal Entegrasyon Yöntemi.....	38
6.2. LU Ayrışım Yöntemi.....	39
7. UYGULAMALAR.....	41
7.1. Örnek 1 Mayr Ark Modeli ile Simülasyon.....	41
7.2. Örnek 2 Habedank Ark Modeli ile Simülasyon.....	46
7.3. Örnek 3 Kema Ark Modeli ile Simülasyon.....	49
7.4. Örnek 4 Schwarz Ark Modeli ile Simülasyon.....	52
7.5. Örnek 5 Schavemaker Ark Modeli ile Simülasyon.....	54

7.6.	Örnek 6 Örnek Devrenin Mayr, Schavemaker, Habedank ve Schwarz Ark Modeli Kullanarak Karşılaştırılması	57
7.7.	Örnek 7 Durum Uzayı Tekniği ile Ark Modelinin İncelenmesi.....	61
8.	TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	64
	KAYNAKLAR.....	66
	ÖZGEÇMİŞ.....	69

.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Havalı Kesicinin İç Yapısı.....	6
Şekil 2.2.	Vakumlu Kesicinin İç Yapısı.....	7
Şekil 2.3.	Vakumlu Kesicilerin Kontak Yapısı.....	8
Şekil 2.4.	Komutasyon Devresi.....	10
Şekil 2.5.	Açma Anındaki Akım Zaman Eğrisi	10
Şekil 2.6.	Yağlı Kesicilerdeki Ark Durumu.....	11
Şekil 2.7.	SF6 Kesicisinin Bir Kutbunun İç yapısı	13
Şekil 2.8.	SF6 Gazlı Kesicinin Profilden Görünüşü	14
Şekil 2.9.	SF6 Gazlı Kesicinin Önden Görünüşü	14
Şekil 3.1.	Arkın Şekli	16
Şekil 3.2.	Kesitlere Göre Akım ve Direnç durumu	17
Şekil 3.3.	Arkın Dilimlenmesi	18
Şekil 3.4.	Deiyon Odacığı	18
Şekil 3.5.	Söndürme Odacıkları	18
Şekil 3.6.	Ark Modeli Test Devresi (Laboratuar Test Devresi)	20
Şekil 3.7.	Simülasyon ve Deneysel Sonuçlar	20
Şekil 3.8.	Simülasyon Olarak Ark Voltajı ve Ark Akımı	21
Şekil 4.1.	Cassie Ark Modelinin Oluşturulması	23
Şekil 4.2.	Cassie Ark Modeli Diyalog Kutusu	23
Şekil 4.3.	Mayr Ark Modelinin Oluşturulması	24
Şekil 4.4.	Mayr Ark Modeli Diyalog Kutusu	24
Şekil 4.5.	Modifiye edilmiş Mayr Ark Modelinin Oluşturulması	25
Şekil 4.6.	Modifiye Edilmiş Mayr Ark Modeli Diyalog Kutusu	26
Şekil 4.7.	Habedank Ark Modelinin Oluşturulması	27
Şekil 4.8.	Habedank Ark Modeli Diyalog Kutusu	27
Şekil 4.9.	KemaArk Modelinin Oluşturulması	29
Şekil 4.10.	Kema Ark Modeli Diyalog Kutusu	29
Şekil 4.11.	Schavemaker Ark Modelinin Oluşturulması	30
Şekil 4.12.	Schavemaker Ark Modeli Diyalog Kutusu	31
Şekil 4.13.	Schwarz Ark Modelinin Oluşturulması	32
Şekil 4.14.	Schwarz Ark Modeli Diyalog Kutusu	32
Şekil 5.1.	Ark Modelinin Oluşturulması.....	34
Şekil 5.2.	Simulink DEE Editöründe Mayr Denkleminin Yazılması.....	36
Şekil 5.3.	Mayr Ark Modeli Diyalog Kutusu	37
Şekil 7.1.	Simülasyonda Modellenerek Kullanılan Devre.....	41
Şekil 7.2.	Mayr Ark Modelinin Açma Anındaki Gerilim Eğrisi.....	42
Şekil 7.3.	Mayr Ark Modelinin Açma Anındaki Akım Eğrisi.....	43
Şekil 7.4.	Açma Anındaki Oluşan Gerilim ve Akım Eğrileri	44
Şekil 7.5.	t=9 ms Anındaki Gerilim ve Akım Eğrileri	46
Şekil 7.6.	t=0 ms Anındaki Gerilim Eğrisi.....	48
Şekil 7.7.	t=0 ms Anındaki Akım Eğrisi.....	49
Şekil 7.8.	t=0 ms Anındaki Gerilim Eğrisi.....	51
Şekil 7.9.	t=0 ms Anındaki Akım Eğrisi.....	52
Şekil 7.10.	t=0 ms Anındaki Gerilim ve Akım Eğrileri.....	54
Şekil 7.11.	t=0 ms Anındaki Gerilim Eğrileri	55
Şekil 7.12.	t=0 ms Anındaki Akım Eğrisi	56
Şekil 7.13.	Dört Ark Modeli Kullanılarak Yapılan Simülasyon Devresi.....	57

Şekil 7.14. Dört Ark Modelin t:0 ms Anındaki Gerilim Eğrileri.....	59
Şekil 7.15. Dört Ark Modelin t:0 ms Anındaki Akım Eğrileri.....	60
Şekil 7.16. Durum Uzayı Tekniği Uygulama Devresi.....	61
Şekil 7.17. Ark Gerilimi.....	62
Şekil 7.18. Ark Akımı.....	62
Şekil 7.19. Ark İletkenliği.....	63

SEMBOLLER

g	ark iletkeni
u	ark voltajı
i	ark akımı
τ	ark zaman sabiti
τ_c	Cassie zaman sabiti
τ_m	Mayr zaman sabiti
g_c	Cassie ark iletkeni
g_m	Mayr ark iletkeni
g_n	n'inci arkın iletkenliği
τ_n	n'inci arkın zaman sabiti
P_o	soğutucu güç
U_c	Cassie ark voltaj bileşeni
C_i	akım sabiti
U_{arc}	yüksek akımdaki ark voltajı
J	akım yoğunluğu
p	devre kesicinin doldurma basıncı
A_n	n'inci arkın (soğutma) sabiti
λ_n	n'inci arkın Cassie-Mayr kontrolü
k_n	serbest parametreler.
a	iletkene τ 'ya bağlı olarak etki eden parametre
P_o	soğutma sabiti
b	iletkene P 'ye bağlı olarak etki eden parametre

1.GİRİŞ

Son zamanlarda, simülasyon yoluyla yüksek voltaj devre kesicilerinin yeteneklerini geliştirmek için devre kesicilerinin modellenmesi alanında bazı çalışmalar yapılmıştır. Yapılan araştırmaların çoğu önceki veya sonraki (pre or post) sıfır akım periyotlarının nümerik modellenmesi gibi matematiksel modeller yardımı ile devre kesici davranışının tanımlanması üzerine yoğunlaşmıştır. Var olan modelleri gerçekleştirmekteki en temel problem, matematiksel modellerdeki bilinmeyen parametrelerin güvenilir bir şekilde elde edilmesidir.

Devre kesicilerin ark modellerinin incelenmesine son yüzyılda başlanmıştır. İlk testi 1930 yılında A. M. Cassie ve O. Mayr yapmıştır [1]. Bu çalışmada Mayr denklemi ile elektrik arkının dinamik rejimi incelenmiştir.

Bir yayında U. Habedank kısa devre kesim testleri için önerilen yeni bir ark modeli ile ilgili çalışmasında dört sabit parametrelili bir devre kesicisinin davranışını tanımlayan yeni bir ark modeli tanıtmıştır [2]. Ölçüm ve hesaplamalar arasında yaptığı karşılaştırmalar göstermiştir ki, önerilen model gerçeğe daha yakın sonuçlar vermektedir. Bu model vasıtasıyla anahtarlama testlerinden şimdiye kadar elde edilenlere göre, bir devre kesicinin ark söndürme kabiliyeti hakkında daha fazla bilgi elde edilebilmektedir. Bu yayında konu ile ilgili değişik örnekler verilmiştir.

L. Van der Sluis ve M.R. Rutgers ark modelleri kullanılarak test devrelerinin karşılaştırılmasını konu edinen çalışmalarında ark-devre etkileşiminin, yüksek voltaj devre kesicilerinin akım kesme işleminde önemli bir rol oynadığını, devre kesicilerini geliştirmek için yüksek güç laboratuvarında test işleminin zorunlu olduğunu, UHV (ultra high voltage) devre kesicileri için yeni test devreleri geliştirilmesi gerektiğini, yeni devrelerin tasarım ve geliştirilmesinde bilgisayar simülasyonlarının önemli rol oynadığını ve bir ark modeli vasıtasıyla devre kesicinin sıfır akım davranışının tam olarak ifade edilmesinin kesinlikle zorunluluk olduğu belirtilmiştir [3]. Bu yayında arkın modellemesi ve ayrıca yeni test devrelerinin geliştirilmesi tartışılmıştır. Bunun yanı sıra iki 7.2 kV SF6 güç devre kesicileri için ark voltaj ve ark akımlarına ait ölçümler verilmiştir.

Lionel R. Orama-Exclusa ve Bienvenido Rodriguez-Medina SF6 devre kesici simülasyonları için ark model parametrelerinin nümerik olarak çıkarılması çalışmasında hem EMTP (elektro - manyetik geçici rejim programı) ve hem de MATLAB kullanarak

modifiye edilmiş Cassie–Mayr modeli gerçekleştirmişlerdir. Aynı çalışmada EMTP simülasyonları ile akım ve gerilim dalga şekilleri elde edilmiştir [4]. Bu akım ve gerilimler daha sonra parametre elde etme prosedüründe kullanılmak üzere MATLAB’deki optimizasyon programında giriş verileri olarak göz önüne alınmıştır. Modifiye edilmiş Cassie–Mayr modelinin yüksek basınçlı gaz devre kesicilerinin ark kesme çalışmalarında güvenilir bir model olduğunu ispat etmişlerdir. Çünkü bu modelde sıfır akım için hem önceki (pre) ve hem de sonraki (post) şartları göz önüne almışlardır. Cassie–Mayr modelinin interrupter ve harici devre şartları ile değişen 4 sabit parametreye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Bu çalışmalarında, lineer olmayan en küçük kareler metodunu kullanan MATLAB optimizasyon fonksiyonuna dayalı daha iyi bir parametre ile rutini gerçekleştirmeyi amaçlamışlardır. Ayrıca bu çalışmalarında, test ve/veya simülasyon sonucu elde edilen akım ve gerilim dalga şekillerini kullanarak dört sabit parametrenin belirlenmesi için geliştirilen parametre elde etme rutininin sonuçlarını da vermişlerdir [4].

Bir başka yayında, P.H.Schavemaker ve Lou van der Sluis sıfır akım ölçümlerine dayalı düzeltilmiş bir MAYR ark modeli kullanarak Mayr tipi ark modellerinin ark davranışını tam olarak tanımlamak için kullanılabileceğini göstermişlerdir [5]. Bu analize dayalı olarak, farklı tiplerde modifiye edilmiş Mayr ark modellerini elde etmişlerdir. Önerilen teoremin bir sonucu olarak bu çalışmada sabit zaman parametrelili ve elektriksel güç girişine bağlı bir soğutucu güce sahip “düzeltilmiş bir Mayr tipi ark modelini” tanıtmışlar ve sıfır akım ölçümlerinin başarılı olarak elde edilmesi için bu modeli kullanmışlardır.

Yine P.H.Schavemaker, L.van der Sluis ve A.J.P.de Lange kritik hat uzunluğunun belirlenmesinde devre kesici ark model hesaplamaları çalışmasında bir devre kesicide kesme işlemi için en ciddi hataların iri kısa-hat arızası (short-line fault) olduğunu belirtmişlerdir [6]. Üç farklı devre kesicisi için devre kesiciyi en çok etkileyen ve yüzde kısa hat hatası olarak ifade edilen kritik hat uzunluğunu belirlemek için dijital test işlemini uygulamışlardır. Hesaplamalar için üç ark modeli kullanmışlar, kesici üzerine etkiyi belirlemek içinde üç farklı durum (farklı zaman aralıklarında aktif, sıfır akım öncesi, sıfır akım anı ve sonrası) uygulamışlardır. Ayrıntılı hesaplamalar sonucunda, % 90’dan büyük bir kısa hat hatasının devre kesicide kesme işlemi için oldukça ciddi bir değer olduğunu görmüşlerdir.

Bir yayında J. L. Guardado, S. G. Maximov, E. Melgoza, J. L. Naredo ve P. Moreno birleştirilmiş Mayr ve Cassie ark modellerine dayalı sıfır akım öncesi durumu

için düzeltilmiş bir ark modeli çalışmasında sıfır akım öncesi durumu için yüksek ve alçak akım bölgelerinde dinamik ark davranışını tanımlayan bir bilgisayar modeli önermişlerdir [7]. Model, akım ve gerilime dayalı dalga şeklini iki bölgeye ayırmaktadır. Genelleştirilmiş bir fonksiyon metodu vasıtasıyla, her iki bölge için akım ve voltajın türev terimlerini birleştiren bir diferansiyel denklem elde etmişlerdir.. Model tarafından bilgisayar yardımı ile elde edilen dalga şekillerinin, yüksek ve alçak bölgeleri için verilen ölçüm sonuçları ile iyi bir uyum sağladığını görmüşlerdir. Bununla birlikte akım ve gerilim şartlarının değişmesiyle tasarlanan farklı devre kesicilerinin test edilmesi için modelin herhangi bir kestirilebilirliğe sahip olmadığını belirlemek amacıyla, diğer test ölçümleri yardımıyla daha ileri karşılaştırma çalışmalarına ihtiyaç duyulduğunu ifade etmişlerdir.

Bir başka çalışmada Grigore A. Cıvıdjian, Natalia G. Silvis–Cıvıdjian Kema ark modeli parametrelerinin elde edilmesi çalışmasında maksimum gerilim öncesi ark voltajı için verilen bir analitik ifade kullanarak ve lineer olarak azalan bir akım göz önüne alınarak, model parametrelerinin elde edilmesi için bir metot önermişlerdir. [8]. Parametrelerin elde edilmesinde testlerden elde edilen dalga şekillerinden faydalanmışlardır. Dalga şekillerinden alınan başlangıç değerlerini ark akım eğimi ve sıfır voltaj durumundaki lineer akım, maksimum ark voltajı ve buna karşılık gelen zaman olduğunu ifade etmişlerdir. Önerilen metot ile elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlarla iyi bir uyum gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Bir başka yayında P.H.Schavemaker, L.van der Sluis ve A. Phramtrisantı gerçek devre kesici ölçümlerine dayalı ileri-ark akım yapılandırılması çalışmasında [9] 72.5 kV, 31.5 kA, 60 Hz’lik bir üflemleri (puffer) devre kesicisinin üç kutbu üzerinde yaptıkları kısa hat hatası testleri esnasında, dikkate değer bazı büyük ileri-ark akımları ölçmüşlerdir. Göz önüne alınan kesicinin üç kutbu üzerinde yapılan tüm ölçümler için iki durum haricinde fiziksel hiçbir ileri-ark akımı sezmemişlerdir. Her iki ileri-ark akımının bir devre kesici kutbunun en son başarılı kesme işlemi esnasında meydana geldiğini görmüşlerdir. Bu özel kesme işlemlerinden sonra, devre kutuplarında bozulmaların olduğunu ve gözlemlenen ileri-ark akımlarını doğrulamak için voltaj ölçümlerine dayalı daha kesin hesaplamalar yapmışlardır.

Bir çalışmada R E Blundell ve M T C Fang, bir SF6 gaz-balast devre kesicinin sıfır akım periyodu için basitleştirilmiş turbulent ark modeli çalışmasında bir SF6 gaz-balast devre kesicide meydana gelen ark yanmasının sıfır-akım periyodu için basitleştirilmiş bir model oluşturup sınır katman integral (boundary layer integral)

metodu kullanarak geliştirmişlerdir [10]. Tam bir model elde etmek için gerekli olan biçim faktörlerini (shape factor) elde etmek için sıfır akım öncesi iyi bilinen korelasyon parametre metodu kullanmışlardır. Biçim faktörlerini ve korelasyon parametresini, tam diferansiyel formda arkı ifade eden denklemlerin nümerik çözümlerini kullanılarak belirlemişlerdir. Uygun bir korelasyon parametresinin belirlenmesinde, diferansiyel metoda dayalı “benzerlik teoremi” kullanmışlardır. Sıfır akımdan sonra ekstra yarı deneysel bir denklemi (ohmik ısınma ve turbulence–gelişmiş ısı taşıma işlemleri) modele eklemişlerdir.

2. ELEKTRİK DEVRE KESİCİLERİN YAPISI VE KAREKTERİSTİKLERİ

2.1. Kesicinin Tanımı:

Kesici, normal işletme şartlarında devreyi kapamaya, açmaya ve bu devrenin akımını taşımaya, kısa devre ve aşırı akım gibi normal dışı şartlarda ise devreyi otomatik olarak kesmeye yarayan mekanik bir açma-kapama cihazıdır.

Kesiciler elektrik güç şebekelerinde kapalı devrenin oluşmasını sağlarlar. Boşta, yükte ve özellikle kısa devre durumlarında açma veya kapama yapabilirler. Bu işi hem el kumandasıyla hem de bir motor yardımı ile otomatik olarak yapabilirler. Bir kesicinin görevi kapalı konumda devreden güç akışını sağlamak ve açık konumda ise güç akışını engellemektir.

Kesiciler yapılarına ve kullanım alanlarına göre sınıflandırılırlar [21]. Sınıflandırma arkı söndürmek için kullanılan malzemelerin özelliğine göre yapılır.

2.2. Kesicinin Tarihçesi:

İlk yüksek gerilim güç kesicileri yağlı kesici olarak yapılmışlardır. Uzun yıllar yüksek gerilim tesislerinde en çok bu kesiciler kullanılmış ve bu vesile ile enerji naklinin gelişmesinde önemli bir yer almışlardır. Genel olarak Avrupa'da, özellikle Almanya'da daha 1930 ile 1940 yılları arasında bu kesicilerin yerini başka söndürme yöntemleri ile çalışan kesiciler almışlardır. Bunlar Havalı kesiciler, Vakumlu kesiciler, SF6 gazlı kesicileridir.

2.3. Kesicinin Görevleri:

Bilindiği üzere elektrik tesislerinde zaman zaman aşırı gerilimler oluşabilmektedir. Bu aşırı gerilimler, yıldırım düşmesi sonucunda veya transformatör, kondansatör, bobin v.b. gibi cihazların devreye girip çıkmaları gibi anahtarlama olarak adlandırılan durumlarda, çok kısa bir süre için ani darbe şeklinde oluşmaktadır. Zaman zaman meydana gelen bu tip geçici olaylar, fazlar arasında veya faz-toprak arasındaki bir atlama ile kısa devreye dönüşmektedir.

Yalıtkan muhafaza üzerindeki kir, toz ve nem atlamanın oluşmasını arttırmaktadır. Yüksek gerilim devre kesici bu tip olayların oluşmasını engellemek ve arkı söndürmek üzere tasarlanmış teçhizattır.

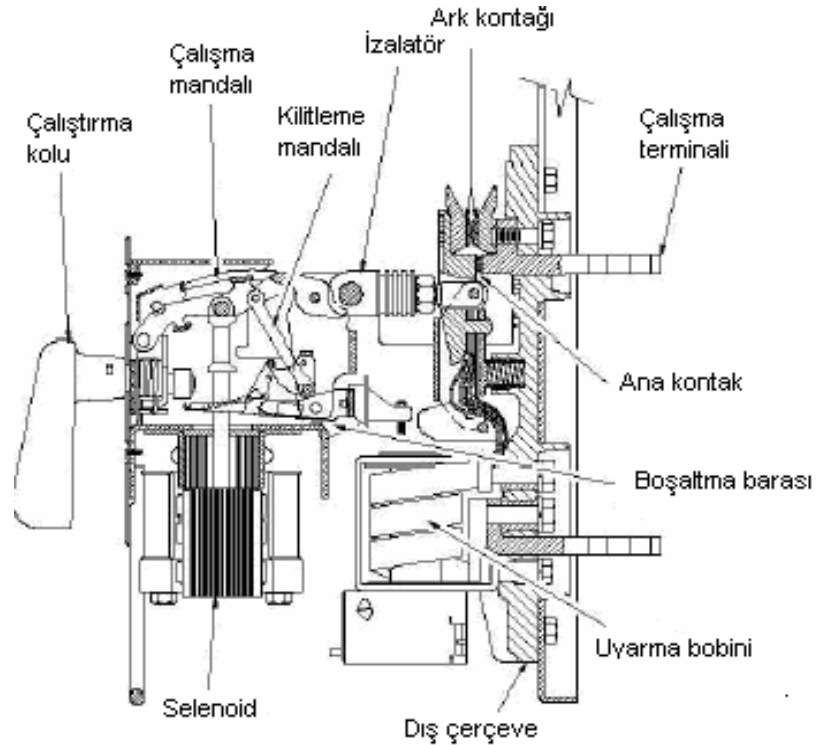
2.4. Kesici Çeşitleri:

- 1- Havalı Kesiciler
- 2- Vakumlu Kesiciler
- 3- Doğru Akım Kesicileri
- 4- Az Yağlı Kesiciler
- 5- SF6 Gazlı kesiciler

30 kV'a kadar olan güç kesicilerinde ark söndürme gazı olarak hava, 30 kV'tan daha büyük gerilimlerde yaygın olarak SF6 gazı kullanılır [22]. Bu kesicilerde arkı söndürmek için ark üzerine basınçlı gaz üflenir, böylece ark soğutulur ve istenen yalıtkan ortam elde edilir.

2.4.1. Havalı Kesiciler

Havalı kesiciler hata anında ark kesme ortamı olarak basınçlı havayı kullanan kesici tipidir. Havalı kesici güç sistemi hatasında gücü hızlı ve otomatik olarak keser. Aynı zamanda alçak gerilim gücünü iletme, izole etme ve dağıtma görevlerinde de kullanılırlar. Havalı kesicilerin pek çok çeşidi vardır. Bunlar 630 A'den 5000 A'e kadar olabilir. Havalı kesicilerin yapısı Şekil 2.1'de görülmektedir.



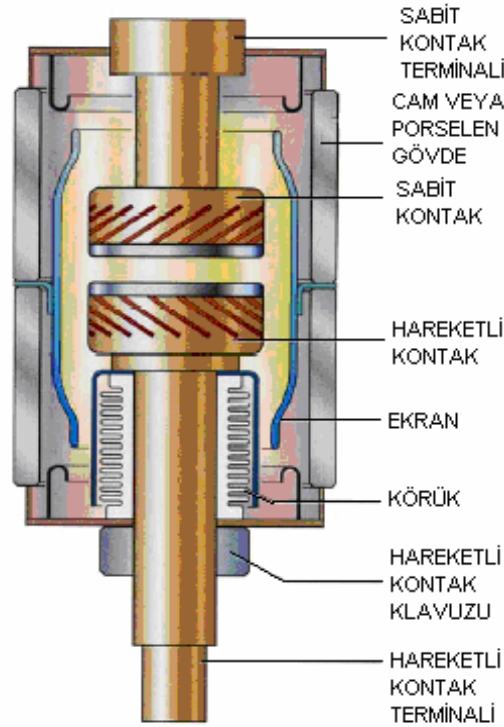
Şekil 2.1. Havalı kesicinin iç yapısı.

Basınçlı havalı kesicilerde yüksek basınçlı hava kontaklar arasında oluşan arka üfleme memeler yardımı ile belirli bir basınçla uygulanır. İyonize olmuş gazlar kontaklardan bu yüksek basınçlı hava yardımı ile uzaklaştırılır. Arkın sönmesi ile söndürme odası yüksek basınçlı hava ile dolar ve bu sayede arkın tekrar tutuşması engellenmiş olur. Bu olayı gerçekleştiren basınçlı hava kesicileri karmaşık yapıda oluşturulmuştur.

Şekil 2.1’de büyük tipte bir havalı kesicinin iç yapısı görülmektedir. Kapama yayları kesicinin ön tarafında bulunan işletme kolunun aşağı doğru itilmesiyle sıkıştırılır. Kesicinin elle kapatılması küçük kapama kaldıracına basmak sureti ile yapılabilir.

2.4.2. Vakumlu Devre Kesicileri

Orta gerilim devre kesicileri, elektrik dağıtım sisteminin, performansını ve güvenilirliğini belirleyen en önemli kısmını oluşturur. Orta gerilim kademesinde yaygın olarak kullanılanlardan biriside vakumlu kesicilerdir. Vakumlu kesicilerin iç yapısı Şekil 2.2’de görülmektedir.



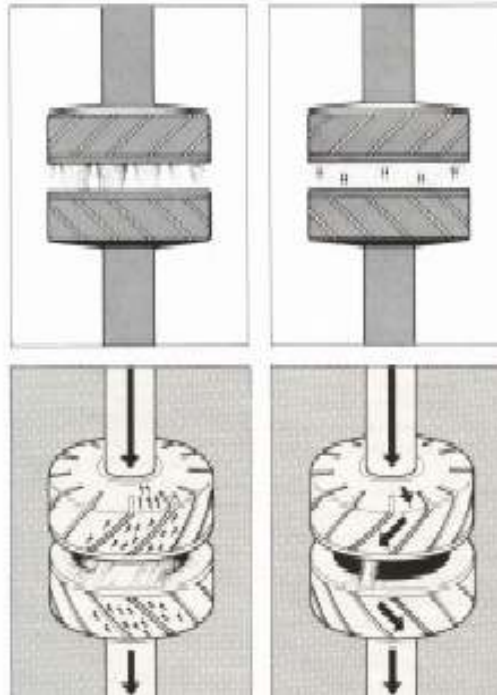
Şekil 2.2. Vakumlu kesicinin iç yapısı.

Bugün vakumlu kesiciler 6-36 kV gerilim kademeleriyle elektrik şebekelerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Vakumun ark söndürme özellikleri çok uzun zamandan beri bilinmesine rağmen vakumlu kesicilerin ilk imalatı ancak 1960'lı yılların sonunda gerçekleşmiştir.

Vakumlu Kesicilerin Çalışma Şekli

Kontaklar birbirinden ayrılırken oluşan ark üzerinden geçen akım ilk akım sıfırına kadar akar. Bu akım sıfırında ark söner ve maden buharı elektrotlar ile yoğunlaşma ekranı üzerinde yoğunlaşır. 10 kA den küçük akımlarda boşalma birkaç ark üzerinden gerçekleşerek bütün kontak üzerine yayılmış olarak oluşur. Kontak yüzeyi ısı bakımından az zorlanır. Ark 10 kA den yüksek ise ark kendi manyetik alanını oluşturduğu basınç etkisi ile ince bir silindirik biçimini alır ve arkın elektrot üzerindeki çıkış noktasında akım yoğunluğu artar ve ark sönmeye bilir.

Bunu önlemek için kontaklara özel bir biçim verilerek Şekil 2.3'de görüldüğü gibi akım yolu değiştirilir ve oluşacak manyetik alan etkisi ile ark elektrot çevresinde döner. Böylece kontak yüzeyinde sadece bir noktanın aşırı ısınmasının önüne geçilmiş olur. Akımın sıfıra yakın değerlerinde bu döner ark yayılmış ark biçimine geçer. Bu yöntemle kesicinin kesme yeteneği yükseltilmiş, kontakların az aşınması ve kesme aralığının süratle yalıtkan duruma geçmesi sağlanmış olur.



Şekil 2.3. Vakumlu kesicilerin kontak yapısı.

Kontak malzemesi mümkün olduğunca zor buharlaşan ve yüksek ısılarda kontakların birbirine kaynamasını engelleyebilecek alaşımlardan yapılmış olmalıdır. Bu özellikleri karşılayan ve en çok kullanılan alaşımlar:

- 1- Bakır - Krom alaşımları
- 2- Bakır - Bizmut alaşımları
- 3- Gümüş - Wolfram - Karbon alaşımları

Vakumda Ark Söndürme

Vakumlu kesicilerde ark söndürme ortamı 10⁻⁶-10⁻⁹ torr basıncında havadır. Bu değer çok küçük bir basınç olduğu için vakum olarak adlandırılmaktadır.

Basınç azaldıkça elektrot aralığında kalan moleküller iyonlaşarak birbirine çarpır. Ayrıca basınç azaldıkça, elektrot aralığında kalan moleküllerin ortalama yolu uzayacağından iyonlaştırıcı çarpışmalar azalır ve dolayısıyla dielektrik dayanım artar. Vakumlu kesici çalışma aralığında (10⁻⁶-10⁻⁹ torr) kontaklar arası delinme gerilimi sabit kalır. Vakum hücresinin basıncı 10⁻⁴ mbar'ın üstüne çıkarsa kesme aralığında çarpma iyonizasyonu başlayacağından delinme gerilimi değeri düşer ve kesme hücresinin elektriksel ömrü bitmiş olur.

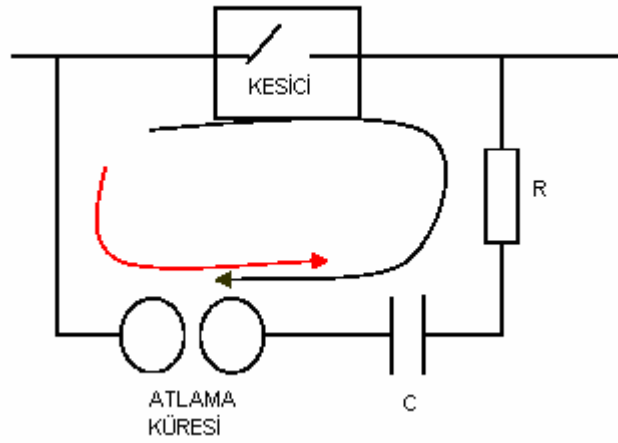
2.4.3.Doğru Akım Güç Kesicileri

Yüksek gerilimli iletim sistemlerinde doğru akımın kullanılması kayıpların azlığı ve manyetik alan oluşmaması gibi etkenlerden dolayı avantajlıdır ve 800 km'yi aşan mesafelerde kullanılmaktadır. Bu sistemlerde kullanılan kesiciler alternatif akımı kesmek için kullanılan kesicilerle aynı olup sadece kesme ilkelerinde farklılık bulunmaktadır. Bu işte kullanılabilecek birçok güç kesicilerinden bazıları tristörlü vakumlu kesiciler, SF₆'lı kesiciler, yağlı veya havalı kesiciler gibi türlü alternatif akım güç kesicileridir.

Alternatif akımda her periyotta akım iki kez doğal olarak sıfırdan geçer ve arkın yeniden oluşmasını önlemek sıfırdan geçiş sonrası kolay olur. Doğru akımda ise sıfır geçişi olmadığından kesicinin işi daha zordur. Buna ek olarak depolanan elektromanyetik enerjinin bir şekilde harcanması gerekir. Doğru akım güç kesicilerinde akımı sıfıra getirmek için komütasyon devresi kullanılır.

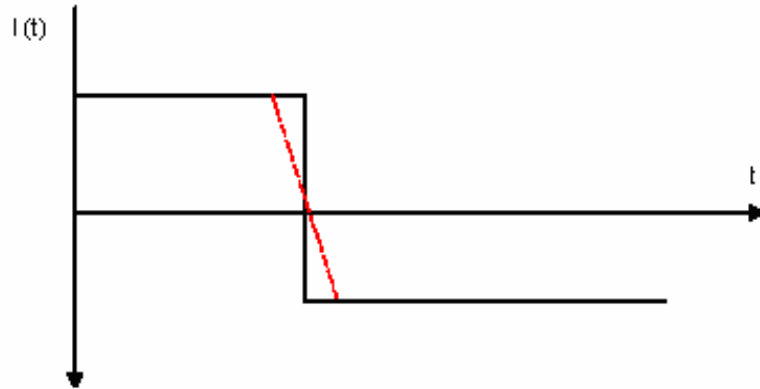
Komütasyon İlkesi

Doğal akımı sıfırı olmayan durumlarda kesicinin açılması için suni olarak akım sıfırı yaratılması gerekir. Bu işlem komütasyon ilkesi yardımıyla gerçekleşir. Şekil 2.4'deki komütasyon devresinde kesici kapalı iken sistem yüksek gerilim doğru akım kaynağından beslendiğinden C kondansatörü kesme işleminden önce dolu durumda bulunur.



Şekil 2.4. Komütasyon devresi.

Kesici açılmaya başladığında kırmızı ok yönünde boşalmaya başlar ve atlama küresi kısa devre olur. Bu arada da, Şekil 2.5'de görülebileceği gibi, akım ters döndüğünden akım sıfırdan geçer. Tam bu sırada kesici açılır. Teorikte bu şekilde olması istenmesine karşın, kesici mekanik bir yapı olduğundan belli bir gecikme ile açar.

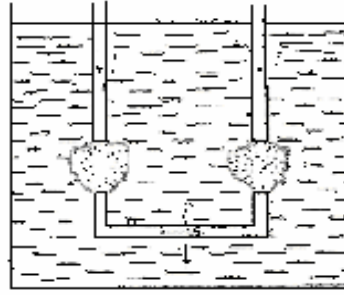


Şekil 2.5. Açma anındaki akım zaman eğrisi.

2.4.4. Az Yağlı Kesiciler

Az yağlı kesiciler tam yağlı kesicilerin gelişmiş modelleridir. Burada yağ sadece kontaklar arasında bulunur. Bu yüzden bu kesiciler az yağlı kesiciler olarak isimlendirilmektedir.

Yağlı kesici, içinde kesici kontakların bulunduğu yağ doldurulmuş bir çelik kaptan ibarettir. Şekil 2.6'da yağlı kesicilerdeki ark durumu görülmektedir. Yağ bir yandan yalıtımını sağlarken diğer yandan arkın söndürülmesine yardımcı olur. Küçük kesicilerde her üç kutup beraberce bir kazan içinde, büyük kesicilerde her kutup ayrı kazan içerisinde bulunur. Kontaklar açılınca ark meydana gelir, bu ark beraberinde yüksek sıcaklık oluşturur. Arkın çevresindeki yağ kısa zamanda buharlaşır ve kimyasal olarak parçalanır. Bu kimyasal parçalanma sonucunda patlayıcı gaz açığa çıkar. Ark yağı buharlaştırmak için gerekli enerjiyi yağa vermiş ve bu yüzden ark soğumuştur. Bunun sonucu da ark gerilimi yükseldiğinden artık ark söndürülmüştür.



Şekil 2.6. Yağlı kesicilerdeki ark durumu.

Dolayısıyla yalıtım için değil, oluşan arkı söndürmek için yağ kullanılır. Bu yüzden tam yağlı kesicilerdeki kadar bir yağ kütlesine ihtiyaç yoktur. Bu sayede kullanılmayan yağdan tasarruf edilmiş olunur.

Az yağlı kesicilerde, genelde açma-kapama mekanizmaları için motorlu yay kurma sistemi kullanılır.

Az yağlı kesiciler ekonomik yönden uygun oldukları için endüstride çok tercih edilen kesicilerdir. Avantajları arasında

- Boyutlarının küçük olması.
- Akım kesmedeki kolay uygulanmaları.
- Bakımlarının basit olması.
- Yalıtım testleri için farklı bir alete ihtiyacı olmamaları gösterilebilir.

Ancak bu avantajlarının yanında;

- Kesme ortamında bulunan yağın kaçak yaparak sızma problemi olması.
- Bakım için ayrı masraf oluşturması.

Bu tür kesicilerin dezavantajları olarak gösterilebilir.

Ayrıca patlayıcı ve yanıcı maddelerin bulunduğu ortamda kullanılmaları güvenlik açısından problem çıkarabilir.

2.4.5. SF6 Gazlı Kesiciler

SF6 gazı sahip olduğu karakteristik özellikler sayesinde elektrik gücü ile alakalı birçok uygulamada iyi bir yalıtkan olarak kullanılır. İlk SF6 gazlı kesici 230 kV'luk gerilimlerde çalışmak için ve 25 kA'lık akımları kesmek için 1959 yılında yapılmıştır. 1970'ten itibaren SF6 yüksek delinme dayanımı ve kimyasal kararlılığı nedeniyle gerek orta gerilimde gerekse yüksek gerilim güç kesicilerinde yağ ve basınçlı havanın yerini almıştır ve sanayinin birçok kullanım alanına girmiştir. Bugün 800 kV' a kadar uygulama alanına sahiptirler [22].

SF6 gazı

- Yüksek dielektrik dayanımına sahiptir.
- Isı yönünden dayanımı çok iyidir.
- Ark söndürme özelliği vardır.
- İyi bir ısıl iletkenidir.

Genelde kesicinin içinde kullanılan SF6 gazı 2-3 bar civarında bir basınç değerine sahiptir. Kesici ark sırasında kesme ortamındaki düşük basıncı devam ettirir ve SF6 gazının özelliğinden dolayı herhangi bir patlama veya gaz tutuşması söz konusu olmaz.

Kesiciye açma geldiğinde hareketli kontağın aşağı inmesi ile hareket eden piston sayesinde kontak altında sıkışan basınçlı SF6 gazı arkın üzerine püskürtülmesi ile ark söner.

SF6 Devre Kesicinin Çalışması

SF6 gazlı kesicinin yapısı Şekil 2.7'de görülmektedir. Önden ve profilden görünüşler Şekil 2.8 ve 2.9'da verilmiştir.

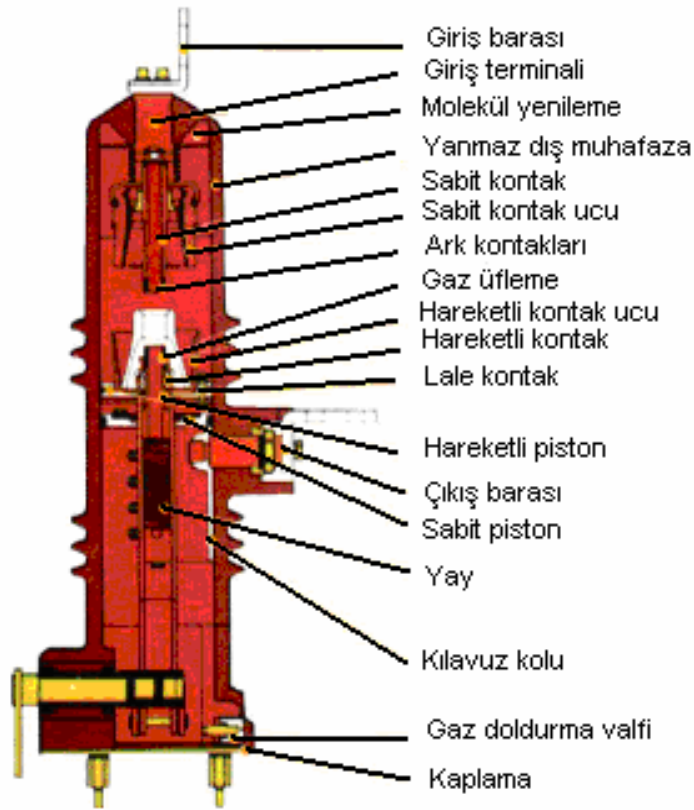
Genellikle kesiciler iki ana bölümden oluşurlar:

- Kontakların oluşturduğu kutuplar.
- Ark söndürme mekanizmasının bağlı bulunduğu ekipmanlar.

Kutuplar kontakların bulunduğu yerdir. Kontaklar burada açılıp kapanırlar. Kutuplarda bulunan kontaklar birbirleriyle aynı zamanda açılıp kapanırlar.

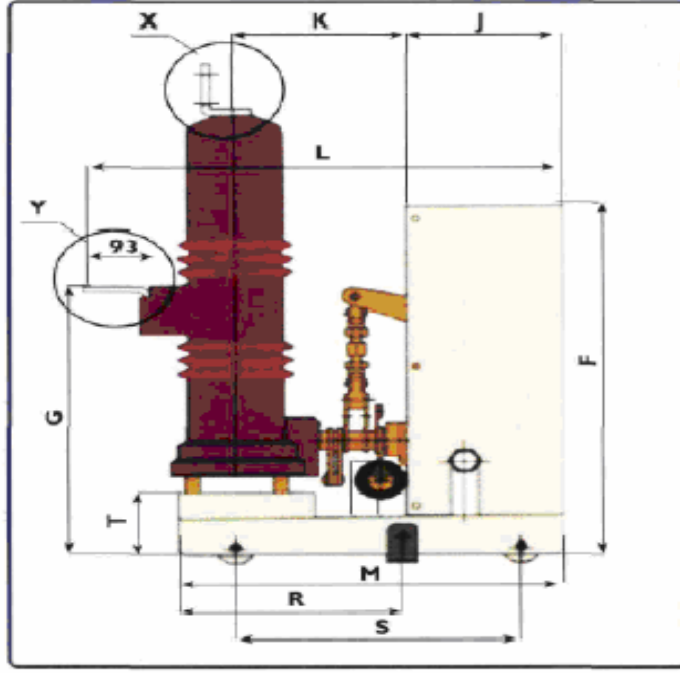
Mekanik Ömür

SF6 gazlı güç kesicileri genellikle hiçbir parçaları değişmeden 10000 açma kapama olarak belirlenebilir. Normal çalışma şartlarında her 1000 açma–kapamadan sonra yağlama yapılmalıdır. Sık kullanımlarda 3–6 ayda bir veya her 250–500 açma–kapama işlemi sonrası yağlama yapılabilir.

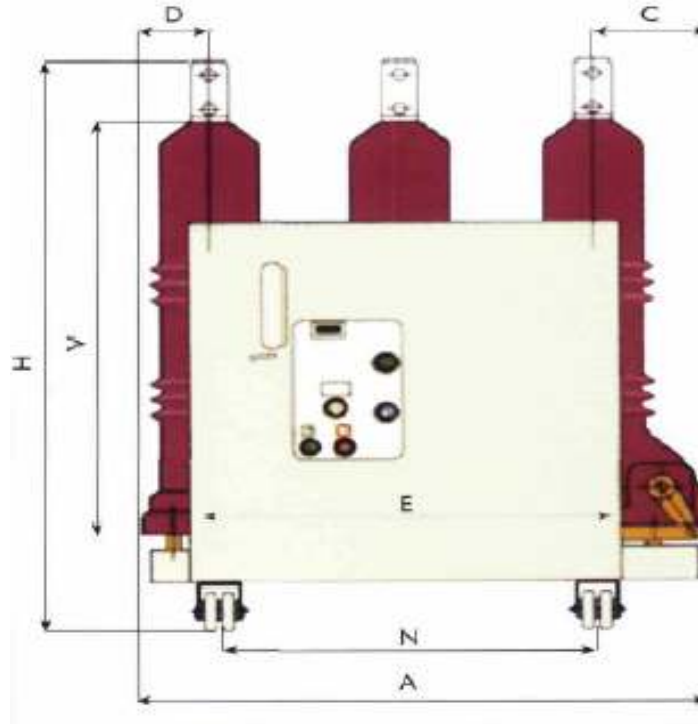


Şekil 2.7. SF6 Kesicisinin bir kutbunun iç yapısı.

Bakım sırasında yağlama işlemleri çok dikkatli ve uygun bir şekilde bakım için ehliyetli kişiler tarafından yapılmalıdır. Bakımda yalıtkan kısımlar temiz ve kuru bir bez ile özenle temizlenmelidir.



Şekil 2.8. SF6 Gazlı kesicinin profilden görünüşü.



Şekil 2.9. SF6 Gazlı kesicinin önden görünüşü.

3. ELEKTRİKSEL ARK

3.1. Arkın Tanımı

Endüktif bir akım devresinin kesilmesi esnasında çok yüksek aşırı gerilimler meydana gelebilir. Devreyi kesen kontaklar arasında meydana gelen ark bu aşırı gerilimi engeller. Alternatif akım devresinde ise akım sıfırdan geçerken devre açılmaya çalışır.

3.2. Arkın Oluşumu

Gazlarda elektrik akımı iletimi ancak içlerinde elektronlar ve iyonlar varsa mümkündür. Gaz deşarjı için katottan elektron kopar. Bu elektronun kopması içinde iletim elektronlarının enerjileşmesi gerekmektedir. Arkın şiddeti, diğer faktörlerin yanı sıra yükleme türü ve yüksekliğine, güç faktörüne ve şalt bağlantılarının ayrılma anına bağlıdır. Bir arkın içinde 10000° C' den 15000° C' ye kadar ulaşan sıcaklıklar ortaya çıkabilir. Bu durumda kontak malzemesinde buharlaşma olabilir. Ark, şalt bağlantılarının ömrünü doğrudan doğruya etkilediğinden, arkı kısa tutmak veya mümkün olduğunca hızlı bir şekilde söndürmek (deiyonizasyon) gibi tedbirlerin alınması zorunludur.

3.3. Elektriksel Ark

Elektriksel ark akım şiddeti 1A'den büyük olan ve kendi kendini besleyen bir gaz boşalmasıdır. Elektriksel arkın en büyük tanıtıcı işareti katotta yanan bir lekenin oluşumu olmasıdır.

3.4. Ark Oluşma Nedenleri

1. Bir kontağın açılmasında temasın mevcut olduğu son anda temas yüzeyi çok küçüktür.

Böylece;

$$J = \frac{I}{A} = \frac{AKIM}{ALAN} \quad \text{Akım Yoğunluğu} \quad (3.1)$$

olarak ifade edilebilir.

Akım yoğunluğu formülünden de görüldüğü üzere çok büyüktür. Temas noktasında yükselen sıcaklık burada yanan bir leke meydana getirir, bu olayda bu noktada elektron emisyonuna yol açar. Katodun ısınması o kadar çok artar ki katottan

metal parçacıklar buharlaşmaya başlar. Ark önce bu metal buharı içinde yanmaya başlar. Bu sırada henüz plazma oluşmamıştır. Kesicinin yük altında açılmasında daha çok bu tarz ark oluşumuna rastlanır.

2. Alan emisyonu da yanan bir leke oluşturabilir. Özellikle toz tanecikleri vasıtası ile katot yüzeyinde aşırı alan yükselmeleri olursa yanıcı leke oluşur.

3. Glimm boşalmasından (elektrotlara uygulanan gerilim yükseltirse elektrotlar arasındaki elektrik alanı yükselir, böylece katottan çıkan başlangıç elektronlarına da daha büyük kuvvet etki eder) da ark çıkabilir. İyonların katoda çarpması ile katot öyle ısınır ki katot yüzeyinde yanan bir leke oluşur.

3.5. Arkın Söndürülmesi

Alternatif ve doğru akımda farklı ark söndürme yöntemleri vardır: Doğal olarak ark söndürme yönteminde yüksek dirençli kesme yöntemi kullanılır. Bu yöntem de arkın direncinin arttırmak, dolayısıyla akımı küçültmek amaçlanmıştır.

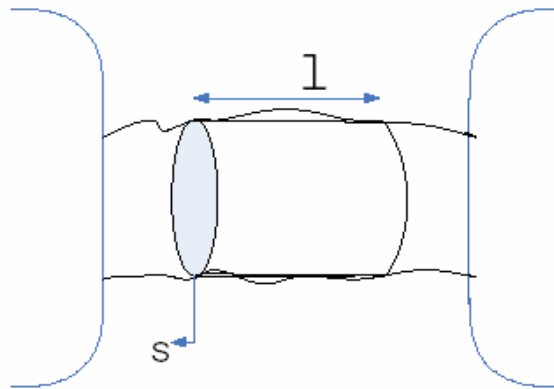
U gerilim, R arkın direnci ve I ark akımı olarak tanımlanırsa;

$$I = \frac{U}{R} \quad (3.2)$$

olduğundan;

$$R \uparrow \Rightarrow I \downarrow$$

$$R \rightarrow \infty \quad I = 0 \quad \text{olur.}$$



Şekil 3.1. Arkın şekli.

Şekil 3.1’de arkın şekli görülmektedir.

Burada;

$$R_{ark} = \frac{l}{S \cdot \sigma} \quad (3.3)$$

olarak bulunur.

3.6. Ark Direncini Arttırma Yöntemleri

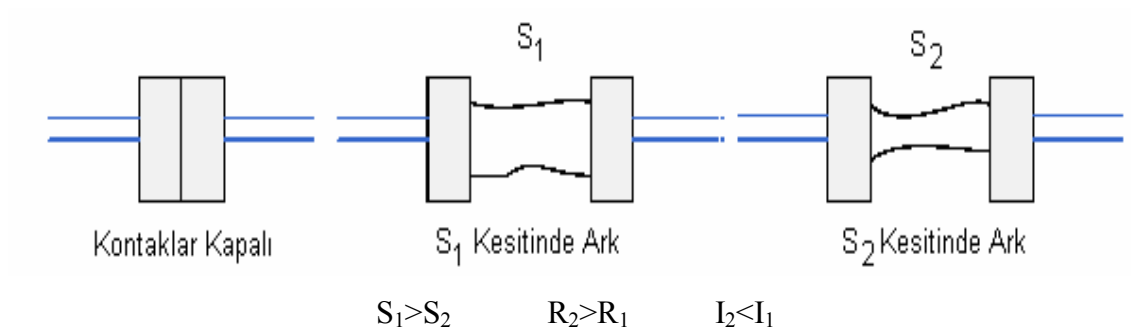
Şekil 3.2’de arkın kesitlere göre akım ve direnç durumu görülmektedir. Ark direncini arttırmak için aşağıdaki yöntemler uygulanır.

1. Arkın Boyunu Uzatmak

Arkın boyu uzarsa arkın sürmesi için gerilimin arttırılması gerekir. Gerilim artmadığı için ark süremez ve kesilir. Bu arada arkın direnci akımı kesecek değere ulaşır.

2. Arkın Kesitini Azaltmak

Kesit küçüldükçe direnç büyür, akım küçülür.



Şekil 3.2 Kesitlere göre akım ve direnç durumu.

3. Arkı Soğutmak

Ark soğudukça direnci büyür. Sıcaklık ile direnç ters orantılıdır.

Q : Sıcaklık

$Q \uparrow \Rightarrow R \downarrow$

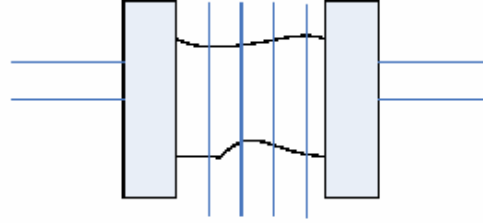
$Q \downarrow \Rightarrow R \uparrow$

- Arkı soğutmak için yağ ve gaz gibi arkın ısınısını alacak malzemeler kullanılır.
- Soğutucu Levhalar kullanılır.
- Üfleme veya püskürtme düzenekleri kullanılır.

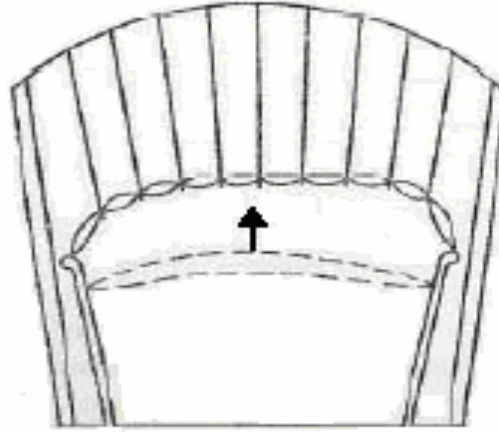
4. Arkı Dilimlemek

Ark 30 V’dan küçük gerilimlerde oluşmaz, sürmez. Deiyon odacığının geliştirilmesi bu gerçeğe dayanır. Toplam ark bakır kaplanmış demir sac levhalarla bir

çok parçalara bölünür. Her parçaya isabet eden gerilim 30 V'dan küçük olacak şekilde ayarlandığında ark hemen söner. Şekil 3.3'de arkın dilimlenmesi ve Şekil 3.4'de deiyon odacığı görülmektedir.



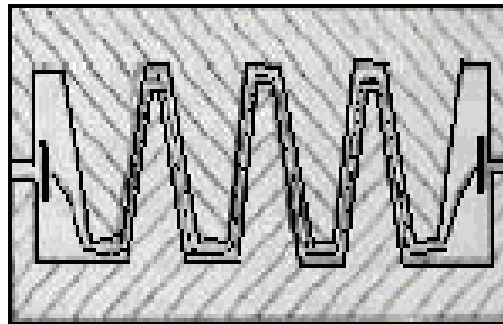
Şekil 3.3. Arkın dilimlenmesi.



Şekil 3.4. Deiyon odacığı.

5. Söndürme odacığına özel biçim vererek arkın uzatılması

Şekil 3.5'de söndürme odacıklarına özel şekiller verilerek arkın nasıl uzatıldığı gösterilmektedir. Burada amaç arkın yolunu uzatarak zayıflamasını sağlamaktır.



Şekil 3.5. Söndürme odacığı.

3.7. Ark Karakteristiklerinin Modellenmesi

Arıza arkının bir iletkenin kısa devre olması gibi durumlarda oluştuğu basit modellemelerde ark direnci, arkın üzerindeki gerilim düşümünü kısa devre akımı şeklinde ifade edilebilir. Fakat elektrot etkileri, atmosfer koşulları gibi faktörlerden etkilenen kompleks bir yapıya sahip olduğunda daha doğru bir çözüm için bu yaklaşım pratik olmamaktadır.

Kompleks yapıda iki tür arıza arkından bahsedilebilir; primer ark ve sekonder ark.

3.7.1. Primer Ark Karakteristiğinin Modellenmesi

Primer ark, “strong arc” diye de adlandırılan yüksek akım arkıdır ve tipik olarak birkaç metre uzunlukta kısa devreler oluşturur. Primer ark yüksek akım taşıdığından dış etkenlerden çok fazla etkilenmez. Primer ark, sistem akımının her sıfırdan geçtiği anda anahtarlama özelliği gösterir ve bu nedenle ark voltajı ani değişimler gösterir [13].

Jonhns ve ark [27] tarafından yapılan çalışmadan yararlanılarak primer ark karakteristiği şu denklemle ifade edilmiştir:

$$\frac{dg_p}{dt} = \frac{l_a}{2.85 \times 10^{-5} I_p} \left(\frac{|i_a|}{15l_a} - g_p \right) \quad (3.4)$$

Yukarıdaki denklemde l_a primer arkın uzunluğu (faz ile ağaç, kule, direk, vs arası mesafe), I_p primer arklar için deneysel sonuçlar sonucu elde edilen sabit bir tepe değeri, g_p primer arkın iletkenliğidir (tipik olarak 366A).

3.7.2. Sekonder Ark Karakteristiğinin Modellenmesi

Bu ark çeşidi ise “weak arc” diye de adlandırılan, küçük akım taşıyan ve bu yüzden rüzgar gibi dış etkenlerden önemli derecede etkilenen bir karakteristiğe sahiptir. Kısmen de olsa ark: bazen sönen, bazende akımın sıfırdan geçtiği anlarda ani değişim gösteren bir karakteristiğe sahiptir. Fakat primer arkten farklı olarak, fiziksel faktörler nedeni ile ark uzunluğunun artmasıyla, ark direnci zamanla artar.

Sekonder ark için Johns ve ark. [27-28] tarafından aşağıda verilen alternatif denklem türetilmiştir.

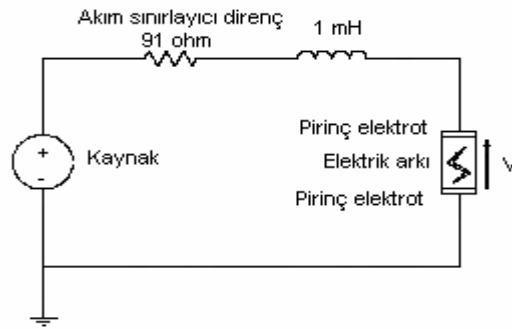
$$\frac{dg_s}{dt} = \frac{l_a(t)}{2.51 \times 10^{-3} I_s} \left(\frac{|i_a|}{75 I_s^{-0.4} l_a(t)} - g_s \right) \quad (3.5)$$

Bu denklemde I_s deneysel olarak elde edilen sabit bir tepe değeri (tipik olarak 47A), $I_a(t)$ Zamanla değişen ark uzunluğudur ve başlangıç değeri I_{a0} ’dır.

$$I_a(t)/I_{a0} = 1, \quad t < 0.1s \quad (3.6)$$

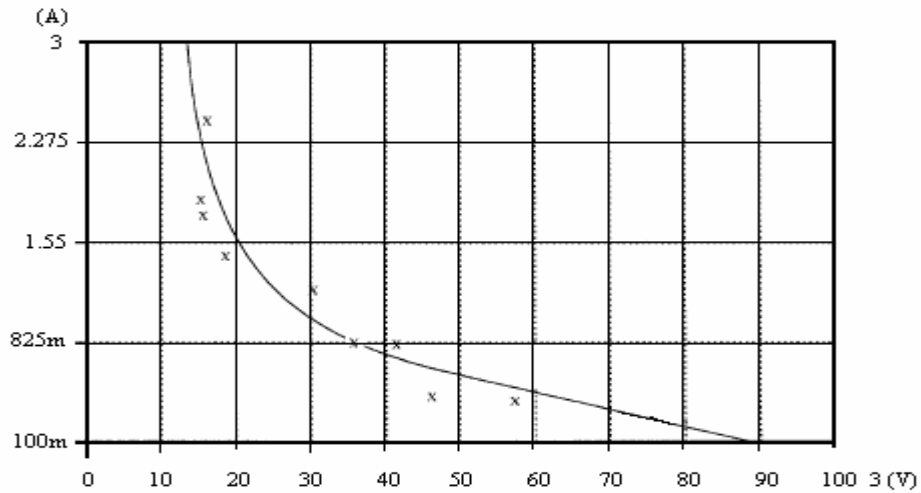
$$I_a(t)/I_{a0} = 10t, \quad t \geq 0.1s \quad (3.7)$$

Ark modeli aşağıdaki devre kullanılarak modellenenabilir. Burada önce iki adet 3 mm çapında pirinç elektrot birleştirilir, sonra ikisi birden 5 mm ayrılarak bir ark oluşturulur. Deneyde statik özellikte deneysel veriler elde etmek için ayarlanabilen DC güç kaynağı kullanılır [20]. Şekil 3.6’da ark modeli test devresi gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Ark modeli test devresi (laboratuar test devresi).

Bu devrede DC voltaj değeri her denemede kademeli olarak değiştirilerek ark sönene kadar arkın akım ve gerilim değerleri kaydedilir. Şekil 3.7’de simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar aynı tablo üzerine işaretlenmiştir [20].

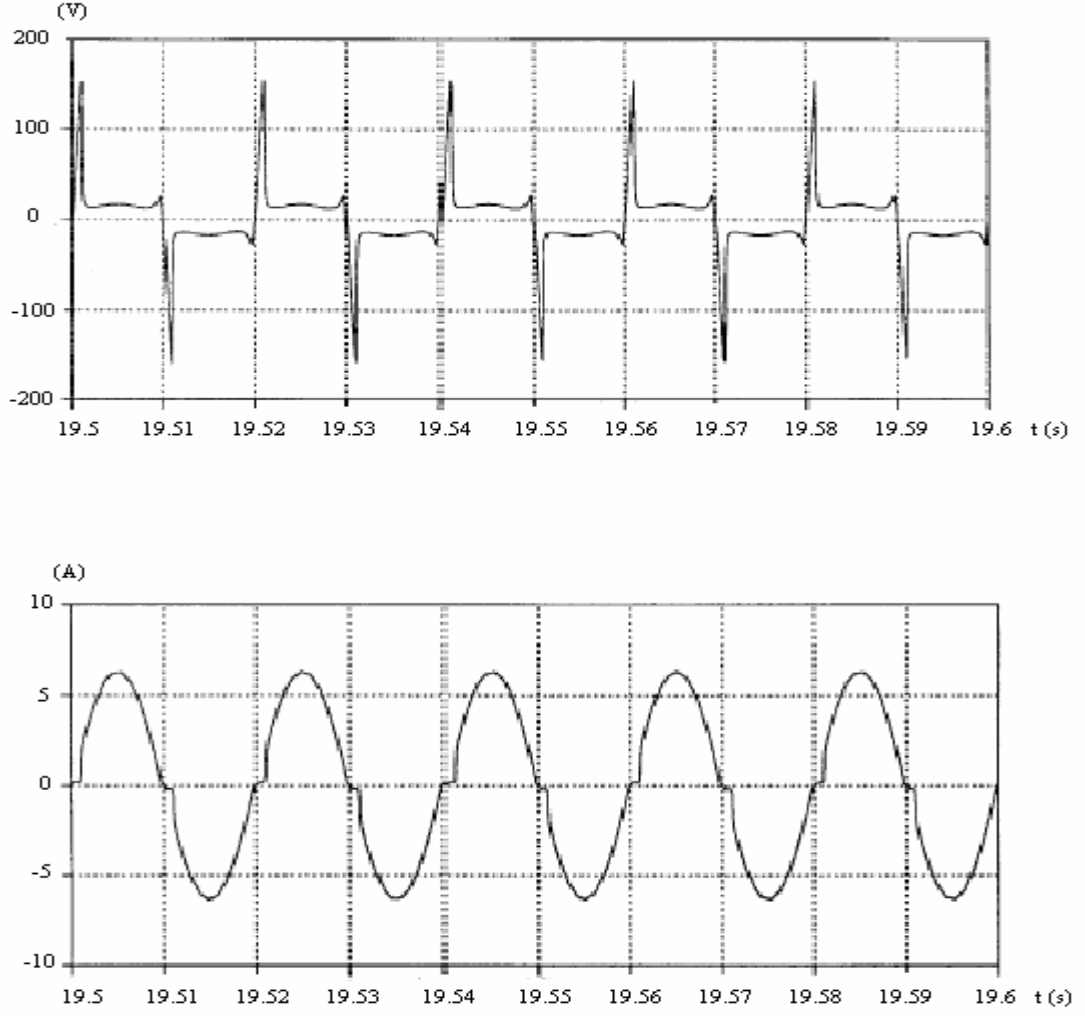


x- Deneysel sonuçlar

— Simülasyon

Şekil 3.7. Simülasyon ve deneysel sonuçlar.

Şekil 3.8'deki grafikler simülasyon olarak ark voltajı ve ark akımını göstermektedir. Buradaki eğrilerde ark oluştuğu zaman akım ve gerilimin nasıl bir karakteristik özelliğe sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 3.8. Simülasyon olarak ark voltajı ve ark akımı.

4. DİNAMİK ARK MODELLERİ

Devre kesicileri bölgesel veya uluslararası standartları sağlamak amacı ile üretilir ve test edilirler. Bu standartlar kesicilerin çok amaçlı kullanımlara uygun olmalarını sağlar. Fakat bazı durumlarda özel uygulamalara ihtiyaç duyulur [12]. Orta gerilimde standartlar göz önüne alınarak tipik uygulamaların haricinde özel durumlarda da imalatlar yapma lüzumuna ihtiyaç vardır. Bunun içindir ki kesicileri modelleyerek testler yapıp istenen koşullara uygun imalatlarda bulunmak hem zaman yönünden hem de maliyet açısından tasarruf sağlar.

Alternatif akım devre kesicilerinde elektrik arkının kesilmesi akım değeri sıfıra ulaşınca kadar devam eder. Devre kesicileri böyle sistemlerde ideal bir anahtar olarak tanımlanırlar. Voltaj ve akım gibi parametreler bu modellerde yeteri derecede geçici durumlara maruz kalırlar. Bu devre kesicisi ve sistem arasında bir etkileşim olduğunu gösterir.

Burada amaç devre kesici ark modellerinin kesinti anında belirli bir şekilde sistem ve devre kesicisi arasındaki etkileşimi tarif ederek kara kutuyu tarif edip diğer çalışmalarda kullanmaktır [27].

Ark model çeşitleri aşağıdaki gibidir.

- 1) Cassie ark modeli.
- 2) Mayr ark modeli.
- 3) Habedank ark modeli.
- 4) Kema ark modeli.
- 5) Schavemaker ark modeli.
- 6) Schwarz ark modeli.

4.1. Cassie Ark Modeli

Cassie ark modeli büyük ark akımlarında iyi sonuç veren bir modeldir [26]. Cassie ark modeli aşağıdaki türevsel denklem ile ifade edilir [18].

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2}{U_c^2} - 1 \right) \quad (4.1)$$

Bu denklemde;

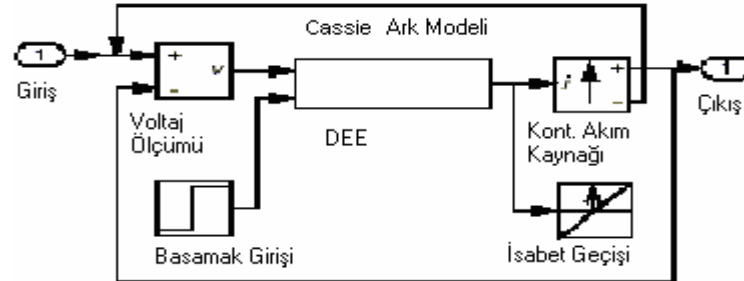
g : ark iletkeni

u : ark geçiş gerilimi

τ : ark zaman sabiti

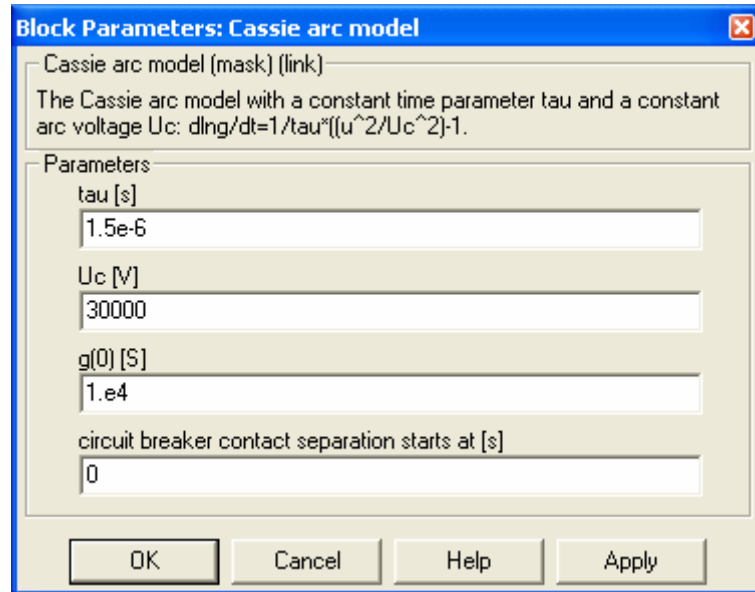
U_c : sabit ark voltajı

olarak tanımlanır. Şekil 4.1’de Cassie ark modelinin oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Cassie ark modelinin oluşumu.

Yukarıda verilen veya belirlenen serbest parametrelere ait değerler Şekil 4.2’deki diyalog kutusu yardımı ile belirlenir. Belirlenen bu değerler MATLAB Simulinkte ilgili kutudaki yerine yazılır.



Şekil 4.2. Cassie ark modeli diyalog kutusu.

Arkın başlangıç iletkeni $g(0)$ değiştirilebilir. Ayrıca devre kesicinin kontaklarının ayrışma zamanı da tayin edilebilir. Tayin edilen bu zaman değerine göre ark modeli $g(0)$ değerli bir iletken gibi davranır [14].

4.2. Mayr Ark Modeli

Mayr ark modelinde dinamik ark iletkenliği aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir [17]. Bu model sıfıra yakın akımlarda iyi sonuç verir [26].

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P} - 1 \right) \quad (4.2)$$

Bu denklemde;

g : ark iletkeni

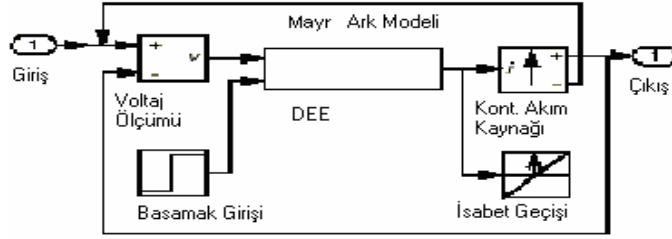
u : ark voltajı

i : ark akımı

τ : ark zaman bileşeni

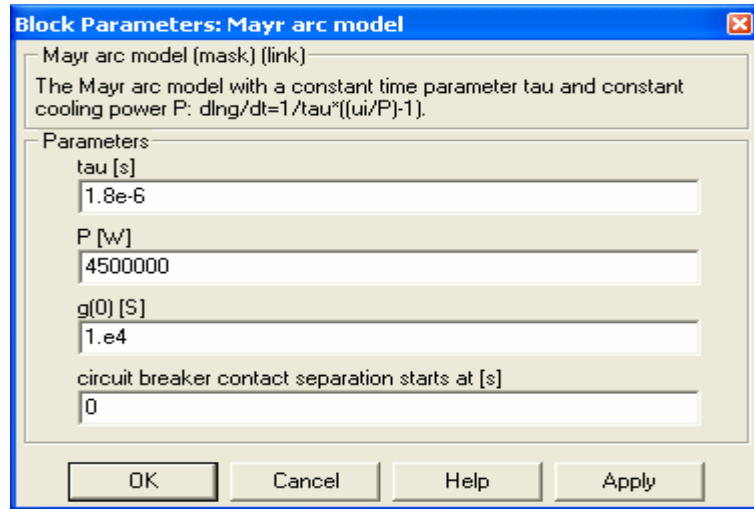
P : soğutma gücü olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 4.3’de Mayr ark modelinin oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Mayr ark modelinin oluşumu.

Yukarıda verilen serbest parametrelere ait değerler Şekil 4.4’deki diyalog kutusu yardımı ile belirlenebilir. Belirlenen bu değerler MATLAB Simulink’de yerine yazılır.



Şekil 4.4. Mayr ark modeli diyalog kutusu.

Mayr ark modeli diyalog kutusunda arkın başlangıç iletkeni $g(0)$ değiştirilebileceği gibi devre kesicinin kontaklarının ayrışma zamanı da tayin edilebilir. Tayin edilen bu zaman değerine göre ark modeli $g(0)$ değerli bir iletken gibi davranır [15].

Akım bağımlı soğutucu güce sahip modifiye edilmiş bir Mayr ark modeli aşağıdaki türevsel denklem ile ifade edilir.

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{p(P_0 + C_i|i|)} - 1 \right) \quad (4.3)$$

Bu denklemde;

g : ark iletkeni

u : ark voltajı

i : ark akımı

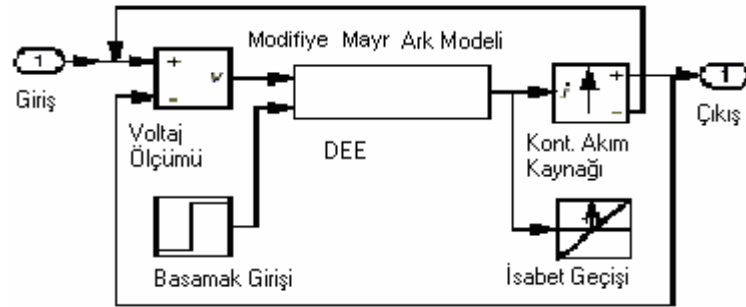
τ : ark zaman sabiti

p : devre kesicinin doldurma basıncı

P_0 : soğutma gücü

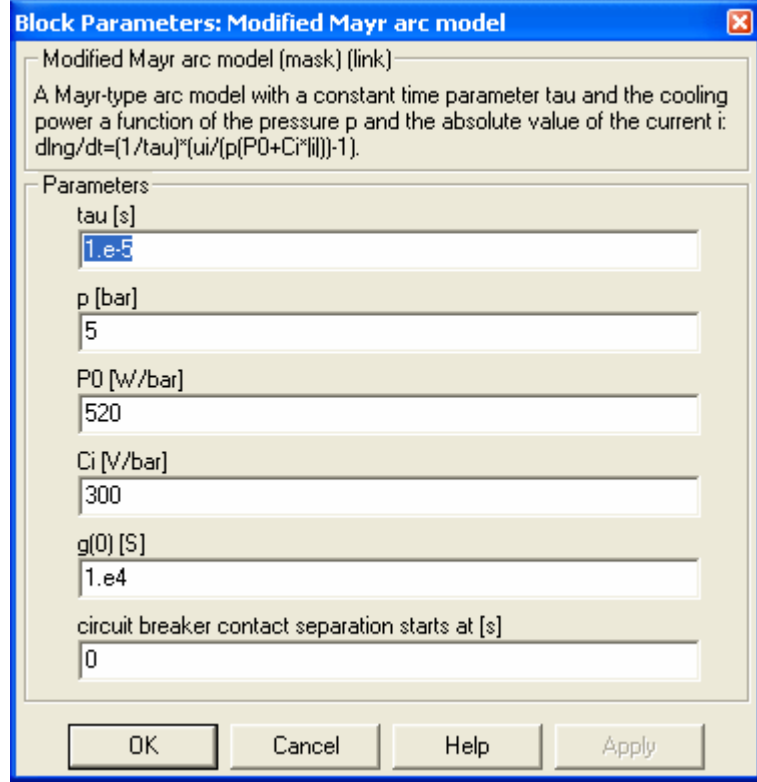
C_i : akım sabiti

olarak tanımlanmaktadır. Şekil 4.5’de modifiye edilmiş bir Mayr ark modelinin oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Modifiye edilmiş Mayr ark modelinin oluşumu.

Yukarıda verilen serbest parametrelere ait değerler Şekil 4.6’da görünen diyalog kutusu yardımı ile belirlenir. Belirlenen bu değerler MATLAB simulinkteki Modifiye edilmiş Mayr ark model diyalog kutusundaki yerine yazılarak simülasyon çalıştırılır.



Şekil 4.6. Modifiye edilmiş Mayr ark modeli diyalog kutusu.

Burada arkın başlangıç iletkeni $g(0)$ değiştirilebilir. Bundan başka devre kesicinin kontaklarının ayrılma zamanı da değiştirilebilir. Tayin edilen bu zaman değerine göre ark modeli $g(0)$ değerli bir iletken gibi davranır [16].

4.3. Habedank Ark Modeli

Bu model Cassie ve Mayr modellerinin seri bir kombinasyonudur. Bu modelin dinamik ark iletkenliği aşağıdaki gibi ifade edilir [17].

$$\frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{u^2 g^2}{U_c^2 g_c} - g_c \right) \dots\dots\dots \text{Cassie ark modeli} \quad (4.4)$$

$$\frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{u^2 g^2}{p_o} - g_m \right) \dots\dots\dots \text{Mayr ark modeli} \quad (4.5)$$

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_c} + \frac{1}{g_m} \dots\dots\dots \text{Habedank ark modeli} \quad (4.6)$$

Bu denklemde;

g : arkın toplam iletkenliği

u : ark karşı voltajı

τ_c : Cassie zaman sabiti

U_c : Cassie sabit ark gerilimi

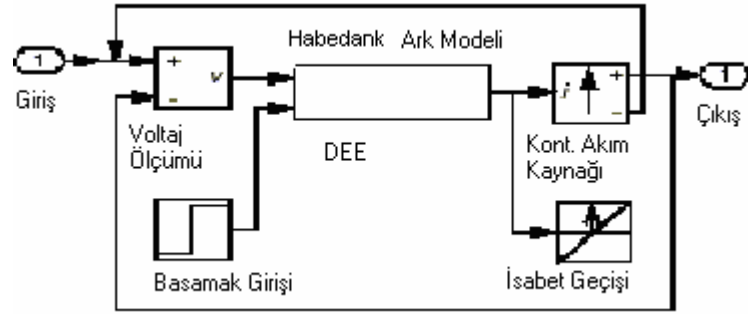
g_c : Cassie denklemi ile tanımlanan arkın iletkenliği

τ_m : Mayr zaman sabiti

P_0 : arka ait kalıcı-hal güç-kayıp Mayr sabiti

g_m : Mayr denklemi ile tanımlanan arkın iletkenliği

olarak tanımlanmaktadır. Şekil 4.7’de Habedank ark modelinin oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Habedank ark modelinin oluşumu.

Yukarıda verilen serbest parametrelere ait değerler Şekil 4.8’deki Habedank ark modeli parametreleri diyalog kutusu yardımı ile belirlenebilir. Belirlenen bu değerler kutudaki yerine yazılır.

Şekil 4.8. Habedank ark modeli diyalog kutusu.

Arkın başlangıç iletkeni $g(0)$ değiştirilebilir. Ayrıca devre kesicinin kontaklarının ayrışma zamanı da tayin edilebilir. Tayin edilen bu zaman değerine göre ark modeli $g(0)$ değerli bir iletken gibi davranır [17].

4.4. Kema Ark Modeli

Birbirine seri bağlanmış üç modifiye Mayr ark modelinden oluşur. Türevsel denklem olarak ifadesi aşağıdaki gibidir [18].

$$\begin{aligned}
 \frac{dg_1}{dt} &= \frac{A_1}{\tau_1} g_1^{\lambda_1} u_1^2 - \frac{1}{\tau_1} g_1 & \lambda_1 &= 1,4375 \\
 \frac{dg_2}{dt} &= \frac{A_2}{\tau_2} g_2^{\lambda_2} u_2^2 - \frac{1}{\tau_2} g_2 & \lambda_2 &= 1,9 & \tau_2 &= \frac{\tau_1}{k_1} \\
 \frac{dg_3}{dt} &= \frac{A_3}{\tau_3} g_3^{\lambda_3} u_3^2 - \frac{1}{\tau_3} g_3 & \lambda_3 &= 2 & \tau_3 &= \frac{\tau_2}{k_2} \\
 \frac{1}{g} &= \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} + \frac{1}{g_3} & A_2 &= \frac{A_3}{k_3}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

$$u = u_1 + u_2 + u_3$$

$$i = gu = \frac{g_1 g_2 g_3}{g_2 g_3 + g_1 g_3 + g_1 g_2} u$$

Bu denklemde;

g : arkın toplam iletkenliği

g_n : n'inci arkın iletkenliği

u : arkın toplam voltajı

u_n : n'inci arkın voltajı

i : ark akımı

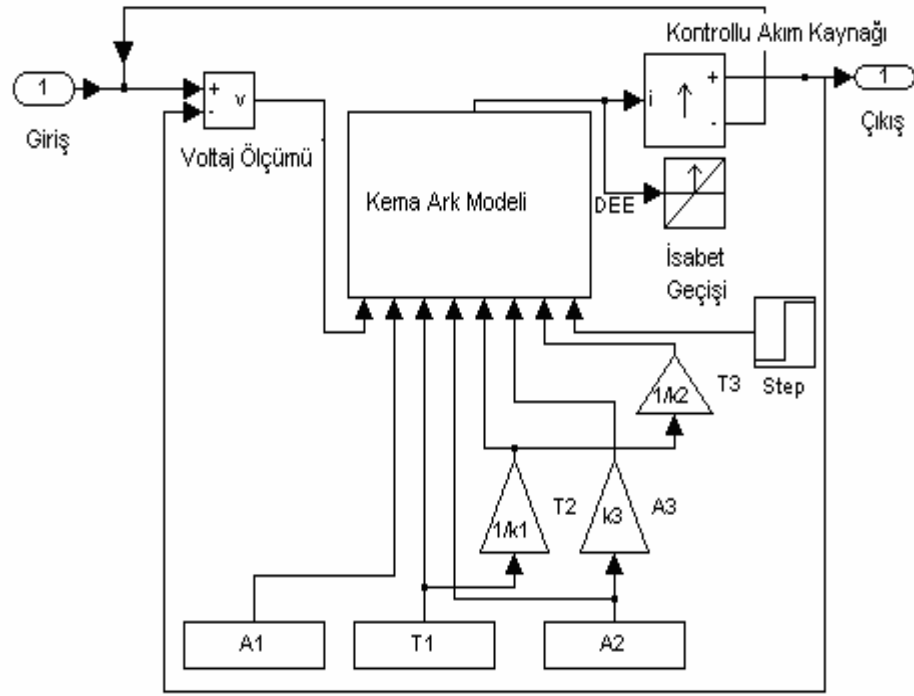
τ_n : n'inci arkın zaman sabiti

A_n : n'inci arkın (soğutma) sabiti

λ_n : n'inci arkın Cassie-Mayr kontrolü: $\lambda=1$ Cassie arkını sağlar , $\lambda=2$ Mayr arkını sağlar

k_n : serbest parametreler

olarak tanımlanmaktadır. Şekil 4.9'da Kema ark modelinin oluşumu ifade edilmiştir.



Şekil 4.9. Kema ark modelinin oluşumu.

Yukarıda verilen serbest parametrelere ait değerler Şekil 4.10'daki diyalog kutusu yardımı ile belirlenebilir. Belirlenen bu değerler kutudaki yerine yazılır.

Block Parameters: Kema arc model

Kema arc model (mask) (link)

The Kema arc model consists of three black box models in series. T1, A1 and A2 are the three free parameters of the arc model. The parameters k1, k2 and k3 are empirical constants depending on the actual circuit breaker.

Parameters

T1 [s]
2.3345227e-6

A1 [1/w]
0.5673398e-6

A2 [1/w]
12.0576e-6

k1
3.5

k2
6

k3
90

g(0) [S]
1.e4

circuit breaker contact separation starts at [s]
0

OK Cancel Help Apply

Şekil 4.10. Kema ark modeli diyalog kutusu.

Arkın başlangıç iletkeni $g(0)$ değiştirilebilir. Ayrıca devre kesicinin kontaklarının ayrışma zamanı da tayin edilebilir. Tayin edilen bu zaman değerine göre ark modeli $g(0)$ değerli bir iletken gibi davranır. Ark modelinin g iletkenliği, hesap hatalarından kaçınmak için 10^{-10} ile sınırlanır [18].

4.5. Schavemaker Ark Modeli

Sabit bir zaman parametresi τ 'ya sahip olan ve soğutma gücü elektriksel güç girişinin bir fonksiyonu olan modifiye edilmiş Mayr ark modelidir. U_{arc} parametresi yüksek akım aralığında sabit bir ark voltajına sahip olmak için kullanılabilir; bununla birlikte U_{arc} bu etkiyi önlemek için sıfıra eşitlenebilir.

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{\max(U_{arc}|i|, P_0 + P_1 ui)} - 1 \right) \quad (4.8)$$

Bu denklemde;

g : ark iletkeni

u : ark voltaji

i : ark akımı

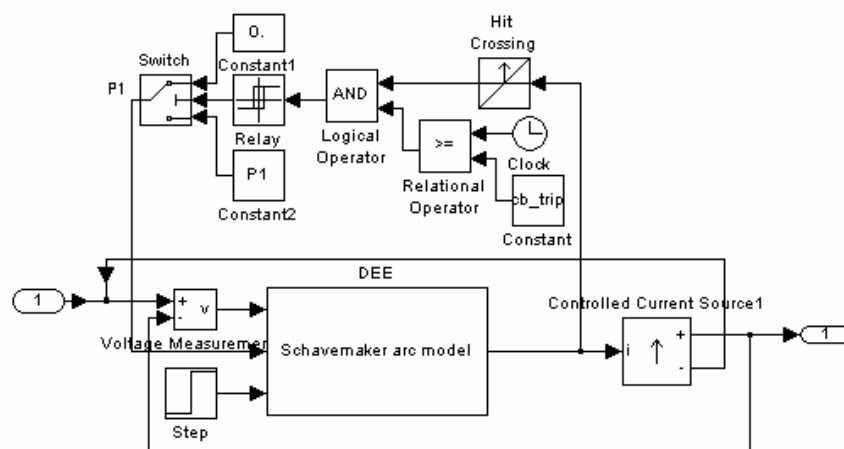
 τ : ark zaman sabiti

P_0 : soğutulan güç

P_1 : soğutulan bileşeni (P_1 akım sıfırdan geçtikten sonra sıfıra ayarlanır)

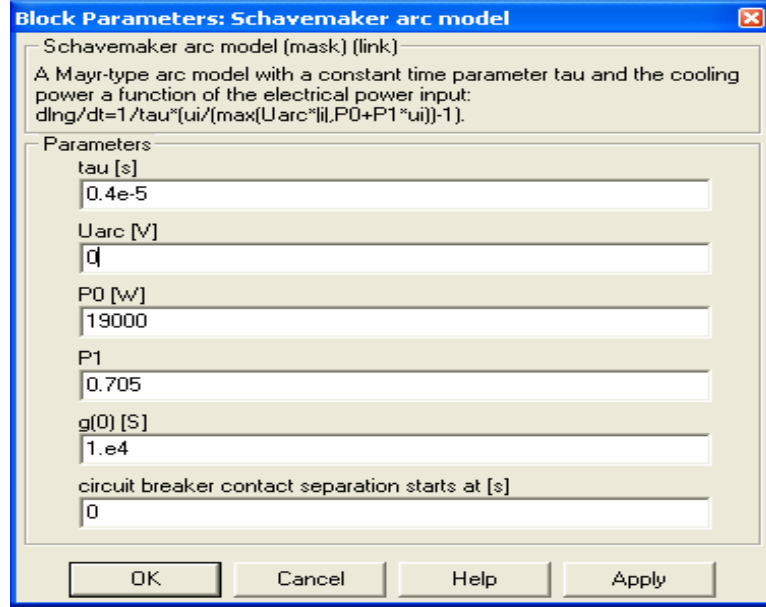
U_{arc} : yüksek akım alanındaki ark voltaj sabiti

olarak tanımlanır. Şekil 4.11’de Schavemaker ark modelinin oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Schavemaker ark modelinin oluşumu.

Yukarıda verilen serbest parametrelere ait değerler Şekil 4.12’de verilen diyalog kutusu yardımı ile belirlenebilir. Belirlenen bu değerler Schavemaker ark model parametrelerindeki yerine yazılarak simülasyon başlatılır.



Şekil 4.12. Schavemaker ark modeli diyalog kutusu.

Arkın başlangıç iletkeni $g(0)$ değiştirilebilir. Ayrıca devre kesicinin kontaklarının ayrışma zamanı da tayin edilebilir. Tayin edilen bu zaman değerine göre ark modeli $g(0)$ değerli bir iletken gibi davranır [15].

4.6. Schwarz Ark Modeli

Zaman sabiti ve soğutucu gücü ark iletkenine bağlı olan modifiye edilmiş bir Mayr ark modelidir.

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau g^a} \left(\frac{ui}{Pg^b} - 1 \right) \quad (4.9)$$

Bu denklemde;

g : ark iletkeni

u : ark voltajı

i : ark akımı

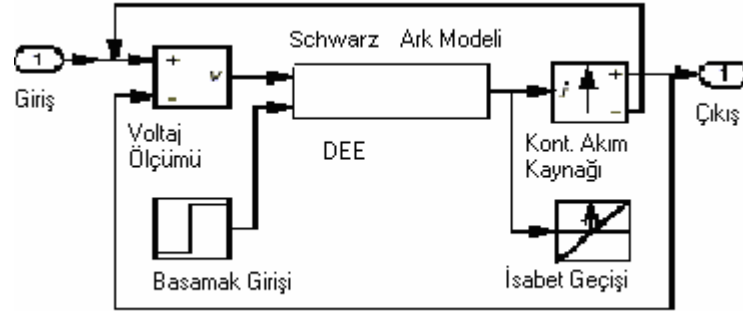
τ : ark zaman sabiti

a : iletken τ 'ya bağlı olarak etki eden parametre

P : soğutma sabiti

b : iletkene P'ye bağlı olarak etki eden parametre

olarak tanımlanır. Şekil 4.13'de Schwarz ark modelinin oluşumu verilmiştir.



Şekil 4.13. Schwarz ark modelinin oluşumu.

MATLAB simulinkte belirlenen Schwarz ark modeli serbest parametrelerine ait değerler Şekil 4.14'de verilen diyalog kutusu yardımı ile belirlenebilir. Belirlenen bu değerler kutudaki yerine yazılarak simülasyon başlatılır.

The dialog box titled 'Block Parameters: Schwarz arc model' contains the following parameters and values:

- tau [s]: 1.3e-5
- a: 0.21
- P [W]: 4.e5
- b: 0.72
- g(0) [S]: 1.e4
- circuit breaker contact separation starts at [s]: 0

Buttons at the bottom: OK, Cancel, Help, Apply.

Şekil 4.14. Schwarz ark modeli diyalog kutusu.

Arkın başlangıç iletkeni $g(0)$ değiştirilebilir. Ayrıca devre kesicinin kontaklarının ayrışma zamanı da tayin edilebilir. Tayin edilen bu zaman değerine göre ark modeli $g(0)$ değerli bir iletken gibi davranır [19].

5. ARK MODEL BLOK PAKETİ

Güç sistem blok paketinin tanıtılmasından beri güç sistemlerinin geçici durumlarını hesaplamak için MATLAB programı uygun bir araç haline gelmiştir.

Ark modelleri yüksek gerilim devre kesicilerinde akım kesme işleminin daha iyi anlaşılması ve kesme yataklarının daha iyi tasarlanabilmesi için geliştirilmiştir. Akım kesme işlemi esnasında meydana gelen fiziksel olay o kadar komplekstir ki, devre kesici tasarımı için ark modellerinin kullanımı hala yeterli değildir. Bununla birlikte ark devre etkileşim çalışması oldukça faydalı bir uygulamadır. Bunun için bir devre kesicisinde arkın lineer olmayan davranışı ark modeli tarafından simüle edilir. Lineer olmayan davranış ve çok kısa zaman sabitleri nedeniyle ark devre probleminin doğru bir şekilde nümerik olarak tespiti önemlidir.

MATLAB popüler ve iyi bilinen genel amaçlı bir matematik programıdır. Güç sistem blok paketi (GSBP)'nin tanıtılmasından beri, güç sistemlerinin geçici durumlarının hesaplanmasında MATLAB programı da uygun bir araç haline gelmiştir. Burada MATLAB güç sistemi blok paketi ile birlikte kullanılan ve bazı ark modellerini içeren Ark Model Blok Paketi (AMBP) tanıtılmaktadır. Böyle bir blok paketi ile ark-devre etkileşim çalışmaları için esnek bir araç elde edilmiştir.

5.1. MATLAB Güç Sistem Blok Paketi

MATLAB-Simulink dinamik sistemlerin modellenmesi, simülasyonu ve analizi için geliştirilen bir program paketidir. Simulink blok diyagramlar şeklinde modellerin oluşturulabilmesi amacıyla bir grafiksel kullanıcı ara yüzüne sahiptir. GSBP blok kütüphanesi, elektrik güç sistemlerine ait temel elemanlar ve devreleri temsil eden simulink bloklarını içerir. GSBP blok kütüphanesindeki kontrollü kaynaklar ve ölçme blokları, elektrik sinyalleri (elemanlar üzerindeki gerilimler ve elemanları birbirine bağlayan hatlar içinden akan akımlar) ve simulink blokları (transfer fonksiyonları) arasında bağlantı görevi görürler.

5.2. Devre Kesici Anahtarlama ve Ark Modelleme

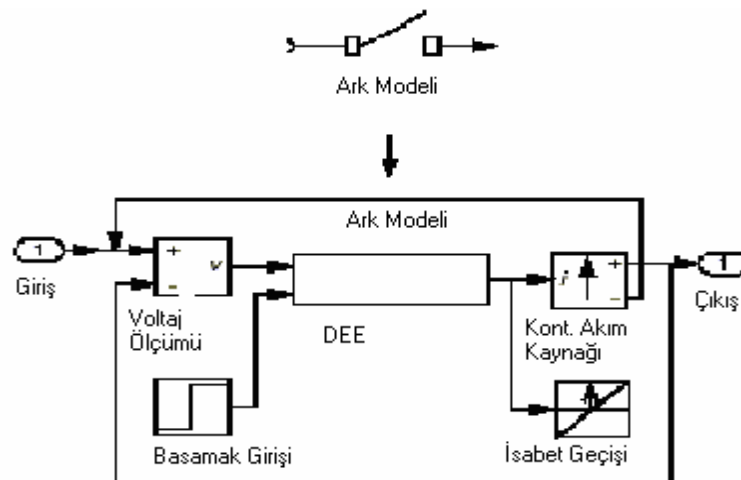
Devre kesicinin en temel fonksiyonu olan anahtarlama işlemi, belli bir gerilim seviyesinde iletken yalıtkana değişimi ifade eder. Akım kesme işleminden önce kesicinin kontakları arasında ark kanalının içinden hata akımı akar. Ark kanalının sıfır olmayan direnci nedeniyle, bu akım devre kesicinin kontakları arasında bir gerilim (ark

voltajı) oluşmasına sebep olur. Ark, lineer olmayan bir direnç gibi davranır. Böylece aynı zaman anında sıfır-değerli hem ark akımı ve hem de ark voltajı meydana gelir. Eğer ark yeterince soğutulursa, akım sıfıra gider ve ark kanalına elektriksel güç girişi sıfır olacağından devre kesici akımı kesebilir. Akım kesme işlemi esnasında ark direnci mikro saniyelerle ifade edilen bir süre içerisinde sıfırdan yaklaşık olarak sonsuz değere doğru artar. Akım kesme işleminin hemen ardından, devre kesici kontakları arasında geçici kurtarma voltajı (TRV) oluşur. Kesme yatağındaki sıcak gaz karışımı anında tam bir yalıtım durumuna geçemediğinden, ark direnci ölçülebilir bir değerdedir ve ark sonrası akım “post-arc current ” olarak adlandırılan küçük bir akım hala akmaya devam edebilir.

Ark modelleri, arkın elektriksel özelliklerinin matematiksel olarak tanımlanmasını ifade eder. Bu tip modeller devre kesicinin içerisinde meydana gelen karmaşık fiziksel işlemleri simüle etmekten ziyade devre kesicinin elektriksel davranışını tanımlamada kullanılırlar. Ölçülen akım ve gerilim değerleri daha özel ölçümler yapmak amacı ile elektriksel arkın lineer olmayan direncini tanımlayan diferansiyel denklemlere ait parametrelerin elde edilmesinde kullanılırlar.

5.3. Ark Model Blok Setinin Oluşturulması

Ark modelleri voltaj kontrollü akım kaynağı olarak modellenir. Bu yaklaşım aşağıdaki şekilde hem ark model bloğu ve hem de tüm sistem bağlantısı şeklinde verilmektedir. Şekil 5.1’de modeli oluşturan elemanlar aşağıda açıklanmaktadır. Örnek bir ark modeli olarak Mayr ark modelini seçip işlemlerimizi bu modele göre yapalım.



Şekil 5.1. Ark modelinin oluşturulması.

A. DEE :Diferansiyel Denklem Editörü

Ark modeline ait denklemler, Şekil 5.1’de görüldüğü gibi Simülink DEE devre bloğu yardımı ile sisteme dahil edilirler. Böylece aşağıda verilen sisteme ait denklemler çözülür.

$$\frac{dx(1)}{dt} = \frac{u(2)}{\tau} \left(\frac{e^{x(1)} u(1)^2}{P} - 1 \right) \quad \left| \quad \frac{d \ln g}{dt} = \frac{u(2)}{\tau} \left(\frac{gu^2}{P} - 1 \right) \right. \quad (5.1)$$

$$y = e^{x(1)} u(1) \quad (5.2)$$

$$i = gu \quad (5.3)$$

Bu denklemde;

x(1) : Diferansiyel denklemin durum değişkeni,

Bu değişken ark iletkeninin doğal logaritmasına karşılık gelir: $\ln(g)$

x(0) : Durum değişkeninin başlangıç değeri,

yani ark iletkenini başlangıç değeri $g(0)$

u(1) : DEE bloğunun ark voltajı (u)’ya karşılık gelen ilk girişi

u(2) : DEE bloğunun ikinci girişi.

Bu giriş devre kesicinin kontak ayrışma durumunu ifade eder. Kontaklar kapalı ise $u(2)=0$, kontaklar açık ise $u(2)=1$

y : DEE bloğunun ark akımı (i)’ye karşılık gelen çıkışı

g : ark iletkeni

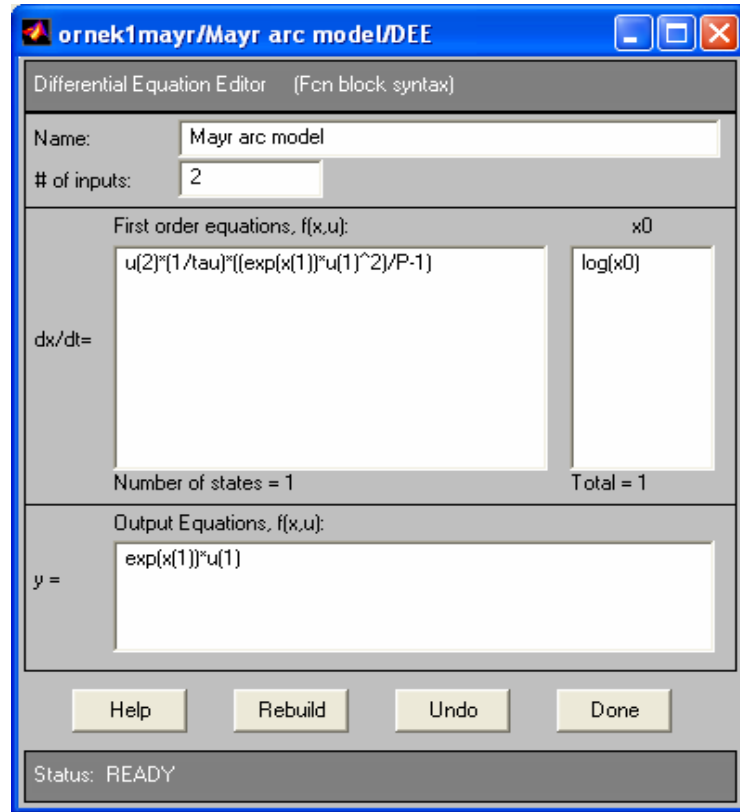
u : ark voltajı

i : ark akımı

τ : ark zaman sabiti

P: soğutucu güç

τ ve P parametreleri Mayr ark modelinin serbest parametreleridir. Deneysel sonuçlara dayanılarak belirlenen bu parametrelerin değeri Mayr ark modeli çift tıklandığında ekrana gelen ve Şekil 5.2’de görünen Simulink DEE editöründeki diyalog kutusundaki ilgili kısımlara yazılarak belirlenir.



Şekil 5.2. Simulink DEE editöründe Mayr denkleminin yazılması.

B. İsabet Geçiş (Hit Crossing):

Simulink ‘İsabet Geçiş’ bloğu girişindeki akımın sıfır değerinin geçme anını tespit eder. Böylece adım sayısı ayarlanarak sıfır geçiş noktasının bulunması sağlanır. Lineer olmayan bir direnç gibi davranan devre kesicide meydana gelen gerilim ve akım sıfır geçişleri, kesme işlemi sırasında doğru olarak ölçülmesi gereken çok önemli anlar olduğundan hassas ölçüm için bu bloğun kullanımı zorunludur.

C. Basamak Girişi:

Simulink step bloğu, devre kesicisinin kontak ayrışmasını kontrol etmek için kullanılır. Bir basamak işlemi, tayin edilen kontak ayrışma süresinde sıfır değerinden bir değerine geçme şeklinde yapılır. Kontaklar kapalı iken aşağıdaki diferansiyel denklem çözülür.

$$\frac{d \ln g}{dt} = 0 \quad (5.4)$$

Böylece ark modeli $g(0)$ değerine sabit bir iletken gibi davranır. Kontak ayrılma süresinden başlayarak, Mayr denklemi çözülür.

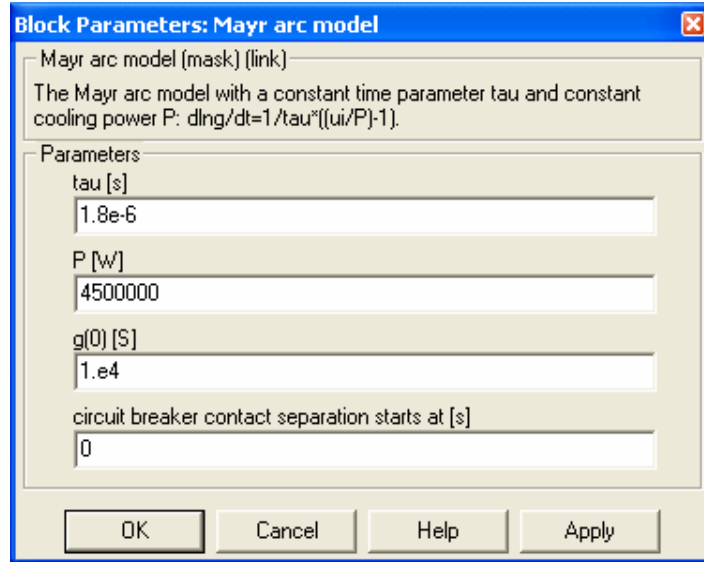
$$\frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{gu^2}{P} - 1 \right) \quad (5.5)$$

Devre kesicinin kontak ayrışması başlama anına ait zaman ve ark iletken başlangıç değeri $g(0)$, ark model diyalog kutusu vasıtası ile tayin edilir. Oluşturulan ark modelleri modellenen devre içine yerleştirilerek kullanılırlar.

MATLAB / Simulink / GSBS / AMB: Durum değişkenlerine dayalı bir metottur ve çoklu değişken adım büyüklüğü kullanan bir çözücüye sahiptir.

MATLAB değişken basamak adımli çözücülere sahip olduklarından lineer olmayan ark modellerinin kullanımında büyük bir avantaja sahiptir. Yüksek akım değerlerinde ark-devre etkileşimi çok hızlı bir şekilde değişmediğinden doğruluğu kaybetmeyecek kadar nispeten büyük hesaplama adımları kullanılabilir. Sıfır akım değeri civarında, ark iletkeni çok hızlı değişir. Bu nedenle hesaplamaları doğru yapabilmek için küçük zaman adımlarının kullanılması zorunludur. Bu şekilde hesaplardaki doğruluk garanti altına alınırken, hesaplama süresi de uygun bir değerde sağlanmış olur.

Ark modeli için belirlenen serbest parametre değerleri ve modellenen devredeki elemanların elektriksel değerleri aşağıda verilen diyalog kutusuna yazılır ve simülasyon çalıştırılır.



Şekil 5.3. Mayr ark model diyalog kutusu.

6. DURUM UZAYI TEKNİĞİ İLE ANALİZ

6.1 Trapez Kuralıyla Sayısal Entegrasyon Yöntemi

Bir “çok basamaklı entegrasyon yöntemi” olan trapez kuralıyla sayısal entegrasyonda durum değişkeninin $(k+1)$. adımdaki değerinin belirlenmesi için sadece $(k+1)$. adım türev hesaplaması $(f(t_{k+1} + x_{k+1}))$ ve önceki adımda hesaplanmış olan k . türev hesaplaması $(f(t_k + x_k))$ kullanılır. Bu ifade formüle edilirse;

$$x_{k+1} = x_k + \frac{h}{2} [f(t_k, x_k) + f(t_{k+1}, x_{k+1})] \quad (6.1)$$

şeklinde olur. (6.1) denkleminde f fonksiyonu açılırsa;

$$x_{k+1} = x_k + \frac{h}{2} [(Ax_k + Bu_k) + (Ax_{k+1} + Bu_{k+1})] \quad (6.2)$$

şeklinde yazılabilir. Dikkat edilirse (6.2) denkleminde A ve B değişken alınmamıştır. Oysa yukarıda söz edildiği gibi doğrusal olmayan ve/veya zamanla değişen güç sistemi devrelerinde bu matrislere ait parametreler zamanla değişmektedir. Örneğin parafudur veya ark gibi doğrusal olmayan bir elemanın bulunduğu devrede A matrisine ait parafudur direnci (R_a) parafudur üzerindeki gerilime bağlı olarak değişmektedir. Aynı şekilde ark oluşan devrede ark iletkenliği (g) zamana ve akıma bağlı olarak değişmektedir ve iletkenlik A matrisine ait bir parametredir. O halde (6.2) denklemi doğrusal olmayan ve zamana bağlı değişen sistemler için düzenlenirse;

$$x_{k+1} = x_k + \frac{h}{2} [(A_k x_k + B u_k) + (A_{k+1} x_{k+1} + B u_{k+1})] \quad (6.3)$$

bulunur ve bu denklemde ortak ifadeler düzenlenirse;

$$\left(I - \frac{h}{2} A_k\right) x_{k+1} = \left(I + \frac{h}{2} A_k\right) x_k + \frac{h}{2} B(u_k + u_{k+1}) \quad (6.4)$$

elde edilir. Bu denklemdeki terimlere

$$\left(I - \frac{h}{2} A_k\right) = a_k; \left(I + \frac{h}{2} A_k\right) = b1_k \quad (6.5)$$

$$b_k = b1_k x_k + \frac{h}{2} B(u_k + u_{k+1}) \quad (6.6)$$

şeklinde isimler verildiğinde,

$$a_k x_{k+1} = b_k \quad (6.7)$$

çözülecek genel denklem (6.7)' deki gibi olur ve bu denklem en basit çözümle,

$$x_{k+1} = a_k^{-1} b_k \quad (6.8)$$

denkleminde olduğu gibi a_k matrisinin tersinin alınması ile çözülebilir. Ancak önceki bölümlerden görüldüğü gibi a_k matrisi bir üç bant matrisidir. Bu nedenle (6.8)'deki gibi bir çözüm bu bant matrisinin “0” olan elemanlarını da boş yere hesaplamaya katacak ve buda hesaplama zamanını ve bilgisayar yükünü arttıracaktır. Bu nedenle böyle bir durumda (6.7) denkleminin çözümü için LU ayrışım yönteminin kullanılması hesaplama zamanı ve bilgisayar yükü açısından avantaj sağlayacaktır. Bu kısımdan sonra LU ayrışım yöntemi ayrıntılı bir şekilde incelenecektir.

6.2. LU Ayrışım Yöntemi

(6.7) denklemine göre çözülecek ifade;

$$ax = b \quad (6.9)$$

şeklinde. Bu ifadedeki a matrisinin LU ayrışımı yapılırsa (6.9) denklemi,

$$LUx = b \quad (6.10)$$

şekline dönüştürülür. a, L ve U matrisleri aşağıdaki gibidir.

$$a = \begin{bmatrix} e_1 & f_1 & & & & \\ d_2 & e_2 & f_2 & & & \\ & d_3 & e_3 & f_3 & & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & d_{n-1} & e_{n-1} & f_{n-1} \\ & & & & & d_n & e_n \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

$$L = \begin{bmatrix} p_1 & & & & & \\ d_2 & p_2 & & & & \\ & d_3 & p_3 & & & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & d_{n-1} & p_{n-1} \\ & & & & & d_n & p_n \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

$$U = \begin{bmatrix} 1 & q_1 & & & & \\ & 1 & q_2 & & & \\ & & 1 & q_3 & & \\ & & & \ddots & \ddots & \\ & & & & 1 & q_{n-1} \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

L ve U matrislerinin elemanları a matrisinin elemanları cinsinden aşağıdaki gibi bulunur:

$$p_1 = e_1, q_1 = \frac{f_1}{p_1}$$

$$p_j = e_j - q_{j-1}d_j, q_j = \frac{f_j}{p_j}; (j = 2, 3, \dots, n-1) \quad (6.14)$$

$$p_n = e_n - q_{n-1}d_n$$

L ve U matrislerinin elemanı bulunduktan sonra bu matrisler kullanılarak sırasıyla çözüm aşağıdaki gibi gerçekleştirilir;

$$Ly = b \text{ ve } Ux = y \quad (6.15)$$

Burada b , y ve x sütun vektörleri,

$$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ b_{n-1} \\ b_n \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ y_{n-1} \\ y_n \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

şeklinde dir. (6.16)'daki ifadeler ile p ve q elemanları kullanılarak çözüm yazılırsa;

$$y_1 = \frac{b_1}{p_1}, y_j = \frac{b_j - d_j y_{j-1}}{p_{j-1}}; (j = 2, 3, \dots, n) \quad (6.17)$$

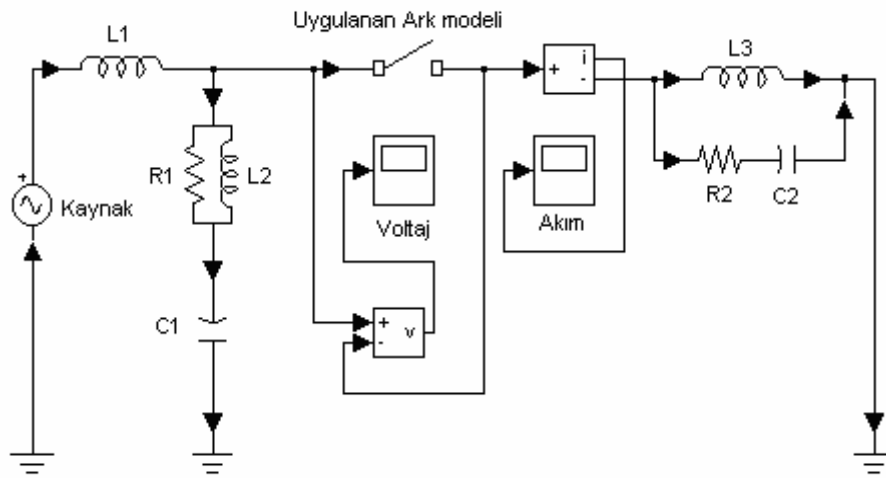
$$x_n = y_n, x_j = y_j - q_j x_{j+1}; (j = (n-1), \dots, 2, 1) \quad (6.18)$$

çözümleri bulunur. Sonuç olarak a matrisine ait sıfırlar hiç işleme katılmadan denklem (6.17) ve denklem (6.18)'deki gibi eleman elemana işlemlerde çözüme yani x sütun vektörüne ulaşılır.

7. UYGULAMALAR

Uygulama olarak Şekil 7.1'deki devre kullanılmıştır ve devre uyan eleman değerleri ile MATLAB programında modellenmiştir. Bu uygulamada amaç devre elemanlarının değerlerini değiştirmeden bütün ark modellerini kullanarak çıkacak akım ve gerilim eğrilerinin elde edilmesi ve kullanılan modeller arasındaki farkın belirlenmesidir.

Şekil 7.1'de simülasyonda modellenerek kullanılan örnek devre görülmektedir.



Şekil 7.1. Simülasyonda modellenerek kullanılan devre.

7.1. Örnek 1: Mayr ark modeli ile simülasyon

Bu örnekte Şekil 7.1'de verilen devrenin simülasyonu yapılmıştır. Dinamik ark modeli olarak Mayr ark modeli kullanılmıştır. Devreyi oluşturan elemanların değerleri aşağıdaki gibidir:

Kaynak: 59,196 kV

L1 : 3.52 mH

L2 : 5.28 mH

L3 : 0.6256 mH

R1 : 29.8 Ω

R2 : 450 Ω

C1 : 1.98 μ F

C2 : 1.93 nF

Kullanılan Mayr ark modelinin parametre değerleri aşağıdaki gibidir:

$t : 0.3 \times 10^{-6}$ ms

$P : 30.9$ kw

$g : 1 \times 10^4$ S

Devre kesicisi kontak ayrılma zamanı : 0 ms

Simülasyon parametre değerleri:

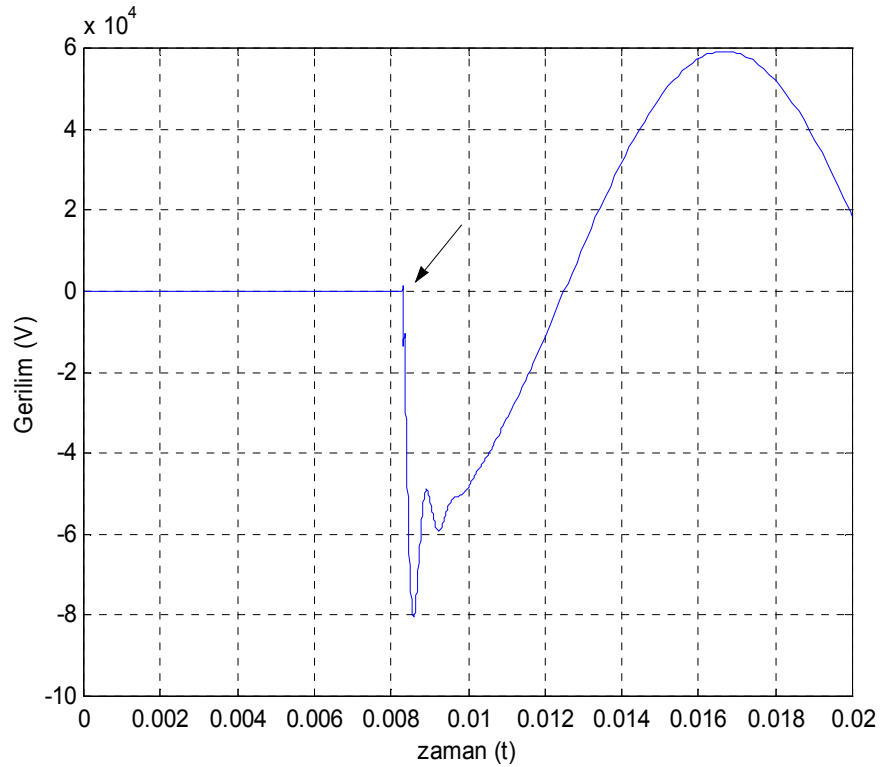
Başlama zamanı : 0.0 ms

Bitiş zamanı : 20×10^{-3} ms

Relatif tolerans : 1.5×10^{-4}

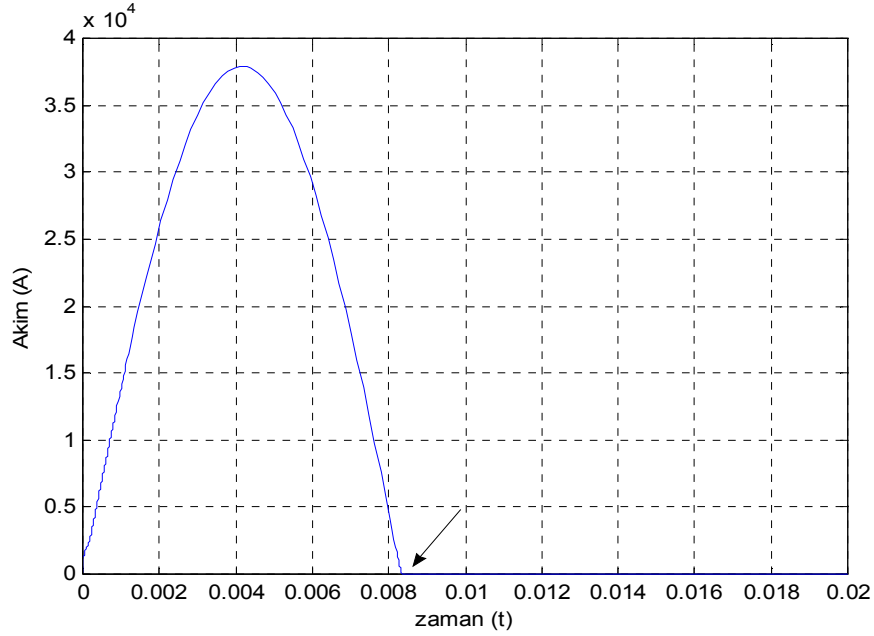
Mutlak tolerance : 1.5×10^{-4} olarak alınmıştır.

Simülasyon sonucunda Şekil 7.2'deki gerilim ve Şekil 7.3'deki akım eğrileri elde edilmiştir. Şekil 7.2'deki açma gerilim eğrisinde açma olana kadar kontaklar arasındaki gerilimin sıfır olduğu, açma gerçekleştikten sonra arkın geriliminin kaynak ile aynı hareketi yaptığı görülmüştür.



Şekil 7.2. Mayr ark modelinin açma anındaki gerilim eğrisi.

Şekil 7.3'deki akım eğrisinde akımın açma zamanı olan $t=0$ ms'den sonra 8.3 ms'ye kadar kaynak gibi sinüzoidal hareket yaptığı, açma anından sonra kontaklar arasından bir akım akmadığından akım değerinin sıfır olduğu görülmüştür.

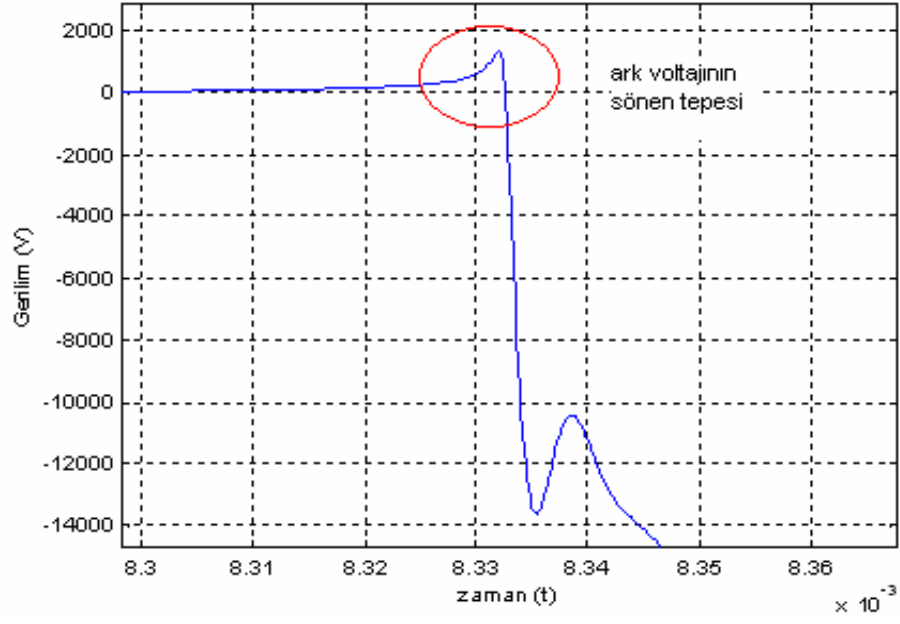


Şekil 7.3. Mayr ark modelinin açma anındaki akım eğrisi.

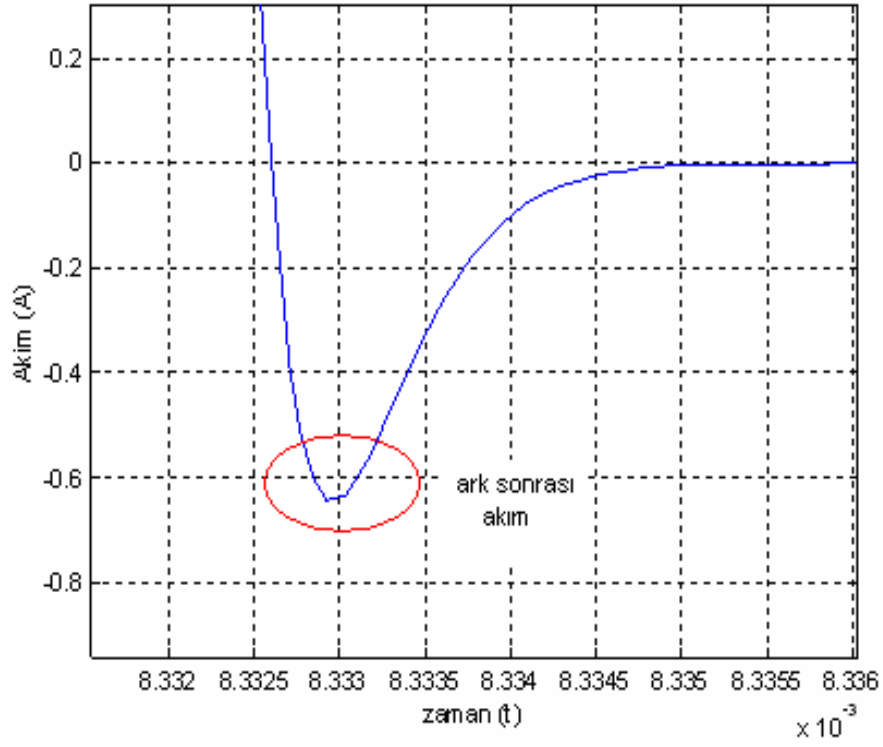
Ancak açma esnasında oluşan arkın bir gerilim ve akım değeri vardır. Bu değerler hafife alınmayacak kadar önemlidir. Akımın sıfır olduğu açma zamanından çok kısa bir süre içinde gerilim ve akımda değişik hareketler olmaktadır.

Mayr ark model diyalog kutusunda kesicinin kontaklarının açılma zamanı $t=0$ ms olarak belirlenmiştir. Kontakların açılmaya başlaması ile oluşan gerilim ve akım eğrileri ok ile gösterilen yerlerde daha detaylı bir şekilde incelenmiştir. Açmanın meydana gelmesi ile kontaklar arasından akan akım ve oluşan gerilim açma zamanından yaklaşık 8 ms sonra daha detaylı bir şekilde incelenerek Şekil 7.4'deki gerilim ve akım eğrileri elde edilmiştir.

Şekil 7.4'deki gerilim grafiğinde $t=0$ ms anında başlayan devre kesicisinin kontaklarının ayrılmaya başlamasından yaklaşık 8 ms sonra kontaklar arasındaki ark geriliminin 8.3 ms içinde +1000 V'da, 8.335 ms sonra -13000 V'da, 8.6 ms sonrada -80000 V'da ulaştığı ve kontaklar tam açıldıktan sonrada kaynak ile aynı sinüzoidal hareketi yaptığı görülmüştür.



a-Gerilim eğrisi (detay).



b- Akım eğrisi (detay).

Şekil 7.4. Açma anındaki oluşan gerilim ve akım eğrileri (a-b).

Ark akımı incelendiğinde, arktan sonra akım değerinin hemen sıfır olmayıp sinüzoidal harekete bağlı olarak çok küçük bir zaman aralığı içinde (8.33 ms) belli bir

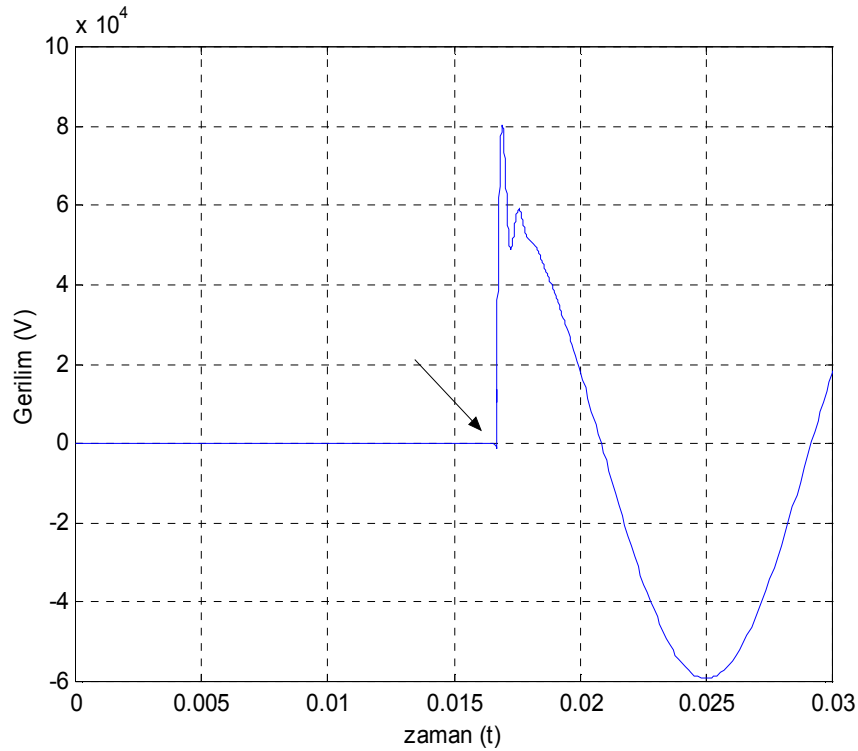
değere gelip (-0.65 A) sonunda tipik bir açma özelliği göstererek sıfır olduğu görülmüştür.

$t=0$ ms olan açma zamanının $t=9$ ms olarak değiştirilmesi;

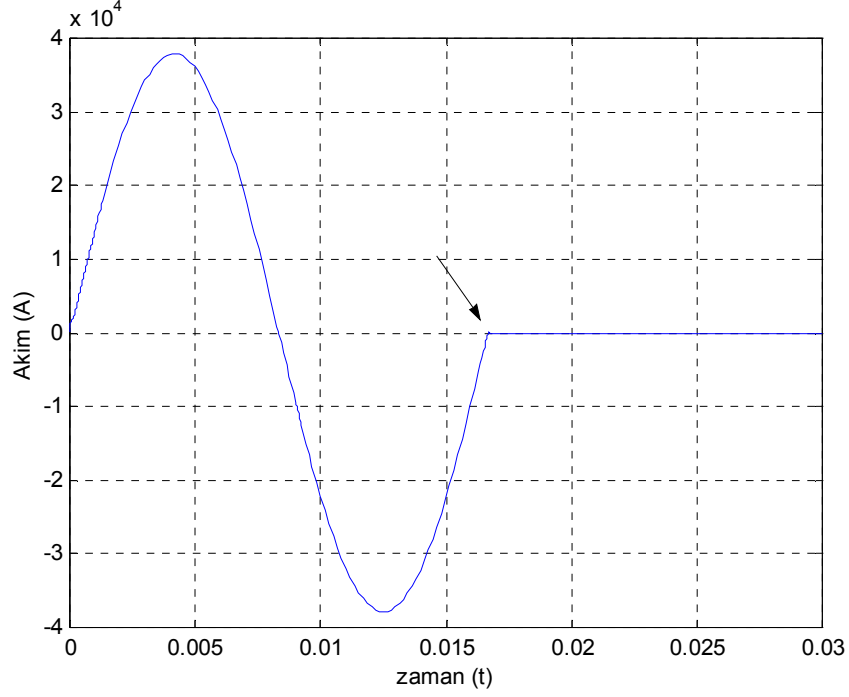
Örnek devremizde devreyi oluşturan elemanların değerleri aynı kalmak şartı ile $t:0$ ms olan kesici kontaklarının açma zamanını $t=9$ ms olarak değiştirip Mayr ark modeli ve simülasyon parametreleri diyalog kutusunda değiştirilip (simülasyon bitiş zamanı 18 ms olarak değiştirildi) Şekil 7.5'deki akım ve gerilim eğrilerini elde edilmiştir. Tek farkı sinüzoidal harekete bağlı olarak ark voltajının açma zamanı $t=0$ ms iken negatif bölgede, $t=9$ ms olduğu zaman pozitif bölgede çıkmıştır. Sadece açma zamanının 9 ms ötelendiği görülmüştür.

Bu uygulamada (Mayr modeli ile yapılan simülasyon) elde edilen sonuçlar kaynak [11]'deki sonuçlar ile benzerlik göstermektedir.

Bundan sonraki örneklerimizde değişik dinamik ark modellerini örnek devremize uygulayarak, gerilim ve akım eğrilerinin nasıl olduğu incelenmiştir.



a- Gerilim eğrisi.



b- Akım eğrisi.

Şekil 7.5. $t=9$ ms (kontak ayrılması) anındaki gerilim ve akım eğrileri

7.2. Örnek 2: Habedank ark modeli ile simülasyon

Örnek devremizi oluşturan devre elemanlarının değerleri aynı kalmak şartı ile devreye Habedank ark modeli uygulanmıştır. Habedank ark modeli ve simülasyon parametre değerleri aşağıdaki gibidir.

Habedank ark modeli parametre değerleri:

τ_c : 1.2×10^{-6} (s)

τ_m : 0.3×10^{-6} (s)

P : 30,9 (kW)

$g(0)$: 1×10^4 (S)

Devre kesicisi kontak ayrılma zamanı : 0 ms

Simülasyon parametre değerleri:

Başlama zamanı : 0.0 ms

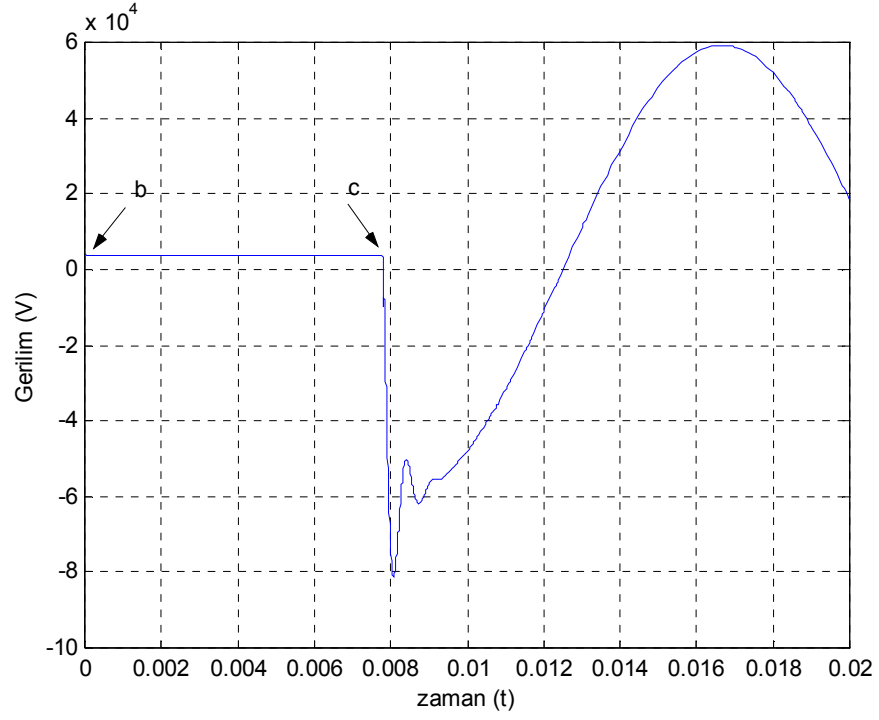
Bitiş zamanı : 20×10^{-3} ms

Relatif tolerans : 1.5×10^{-4}

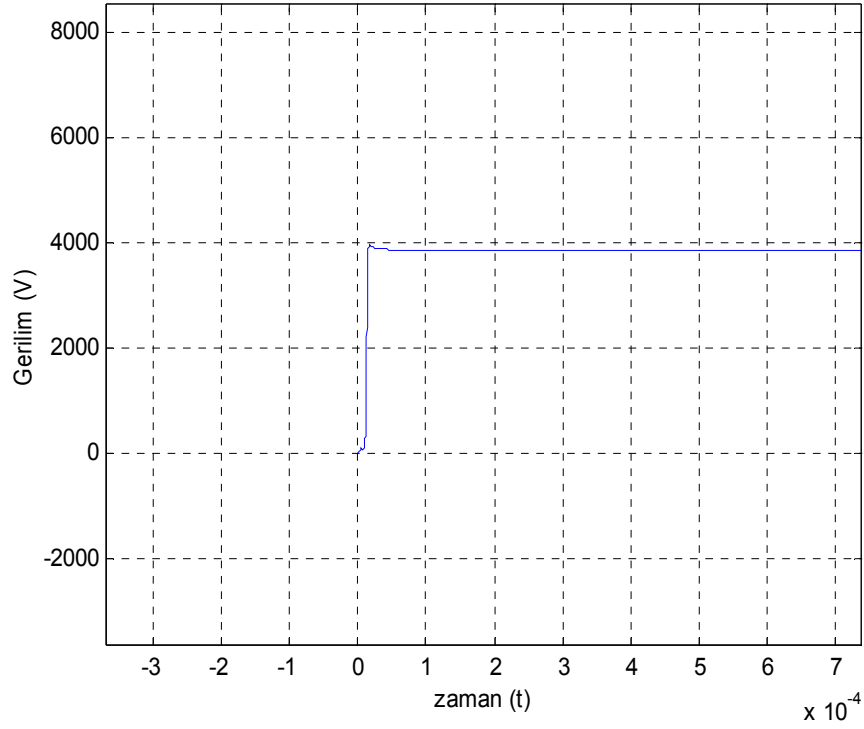
Mutlak tolerance : 1.5×10^{-4} olarak alınmıştır.

Şekil 7.6'da t:0 ms anında kontakların ayrılmasından bir süre sonra gerilimin hemen +4000 V'a çıktığı (b), 7.8 ms'ye kadar bu değerde kaldığı, çok kısa bir süre

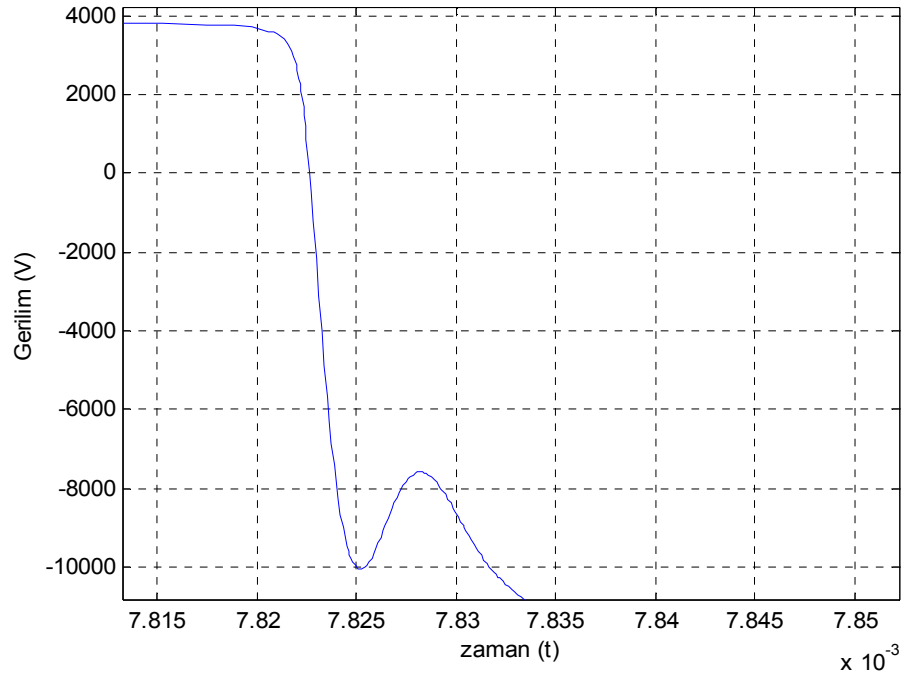
içinde -10000 V olduğu (c) ve en sonunda -80000 V'ta kadar yükseldiği, kontakların tam açılmasından sonrada kaynak ile aynı sinüzoidal hareketi yaptığı görülmüştür.



a- Gerilim eğrisi.



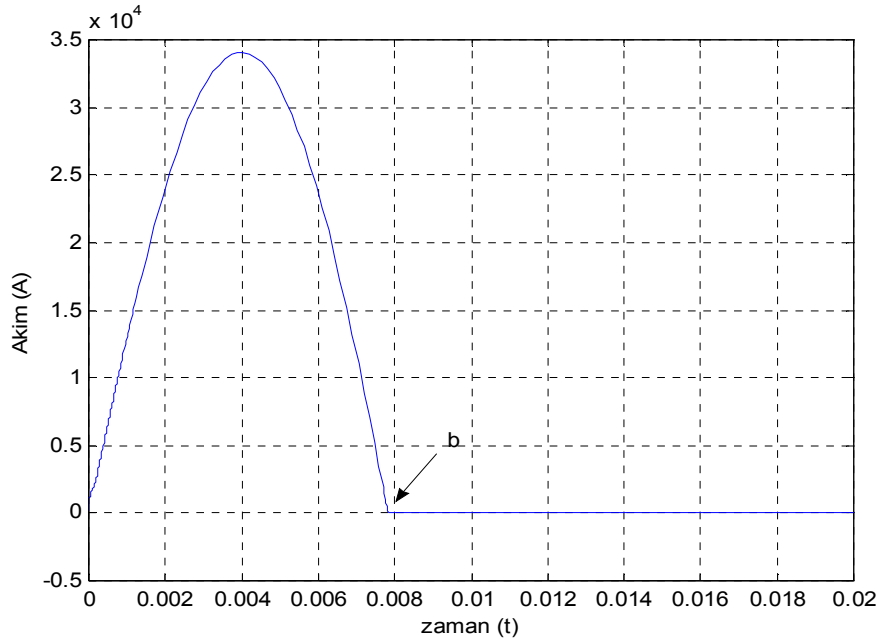
b- Gerilim eğrisi (detay).



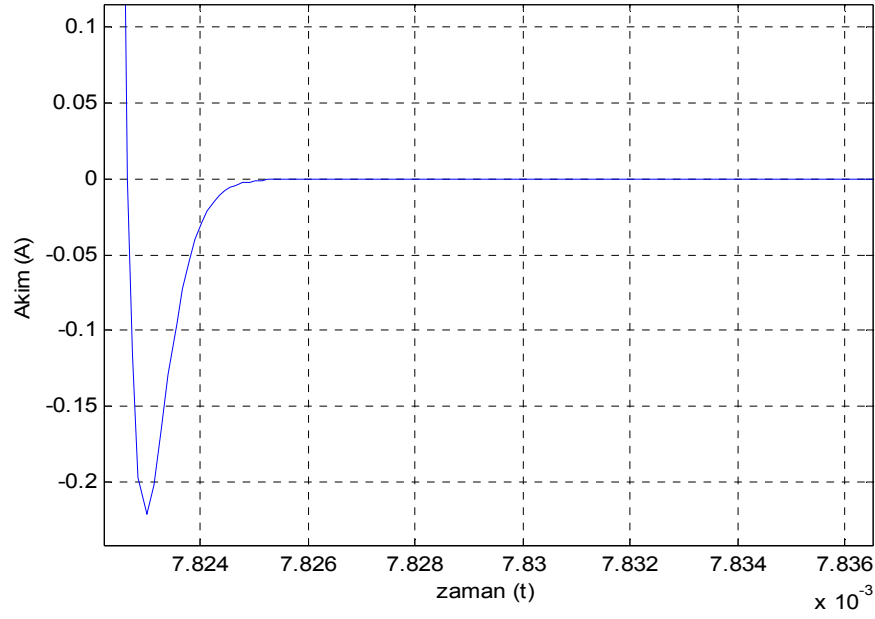
c- Gerilim eğrisi (detay).

Şekil 7.6. $t=0$ ms (kontak ayrılması) anındaki gerilim eğrisi (a-b-c).

Aynı simülasyonda Şekil 7.7’de ark akımı incelendiğinde, arktan sonra akımın hemen sıfır olmayıp sinüzoidal harekete bağlı olarak çok küçük bir zaman aralığı içinde (7.82 ms) belli bir akıma gelip (-0.22 A) sonunda (b) tipik bir açma özelliği gösterip sıfır olduğu görülmüştür.



a- Akım eğrisi.



b- Akım eğrisi (detay).

Şekil 7.7. $t=0$ ms (kontak ayrılması) anındaki akım eğrisi (a-b).

7.3. Örnek 3: Kema ark modeli ile simülasyon

Örnek devremizdeki devre elemanlarının değerleri aynı kalmak şartı ile devreye Kema ark modelini uyguladık. Kema ark modeli ve simülasyon parametre değerleri aşağıdaki gibidir.

Kema ark modeli parametre değerleri:

$T1 : 2.87894 \times 10^{-6}$ (s)

$A1 : 0.42369 \times 10^{-6}$ [1/w]

$k1 : 4.9$

$k2 : 5$

$k3 : 100$

$g(0) : 1.10^4$ (S)

Devre kesicisi kontak ayrılma zamanı: 0 ms

Simülasyon parametre değerleri:

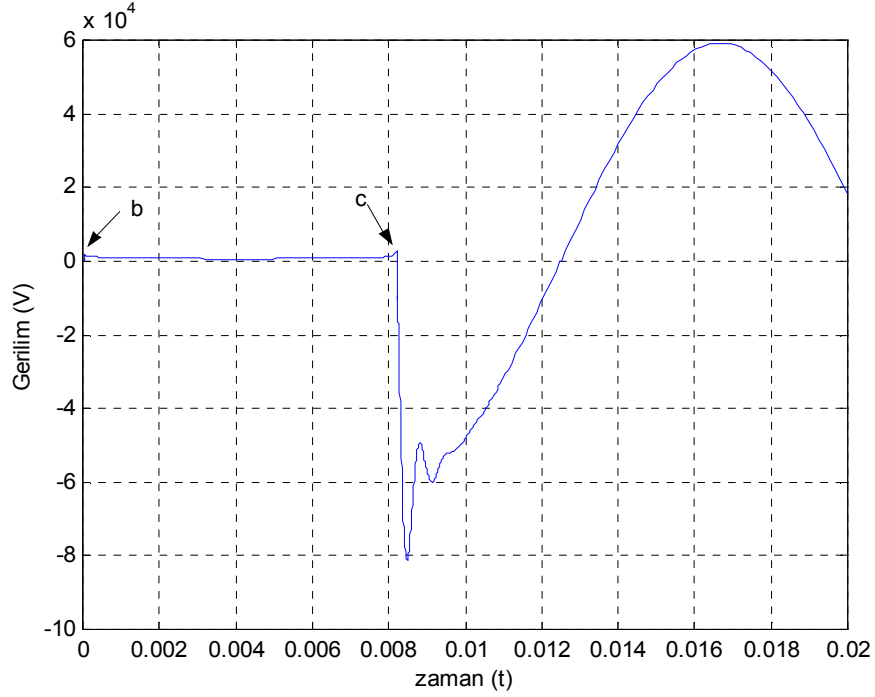
Başlama zamanı : 0.0 ms

Bitiş zamanı : 20×10^{-3} ms

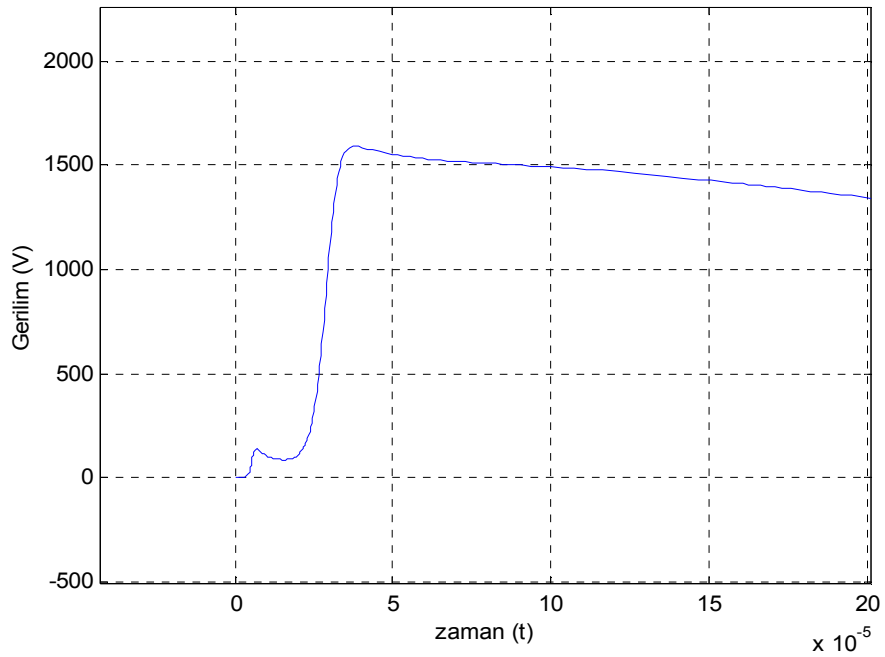
Relatif tolerans : 1.5×10^{-4} ms

Mutlak tolerance : 1.5×10^{-4} olarak alınmıştır.

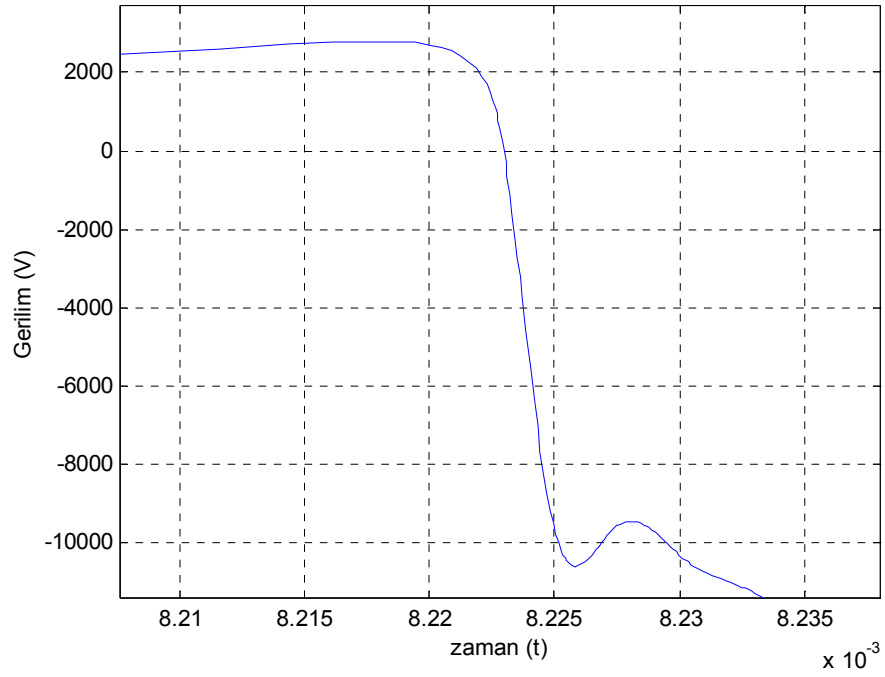
Şekil 7.8’de $t=0$ s anında başlayan kontakların ayrılmasından çok kısa bir süre sonra gerilimin hemen +1600 V ‘a yükseldiği (a), sonra bir azalma trendine girip 8 ms civarında +2800 V (b) olduğu, kısa bir süre içinde -10600 V’ta yükseldiği (c) görülmüştür. Diğer modellerde olduğu gibi kontaklar tam açıldıktan sonrada gerilimin kaynak ile aynı sinüzoidal hareketi yaptığı görülmüştür.



a- Gerilim eğrisi.



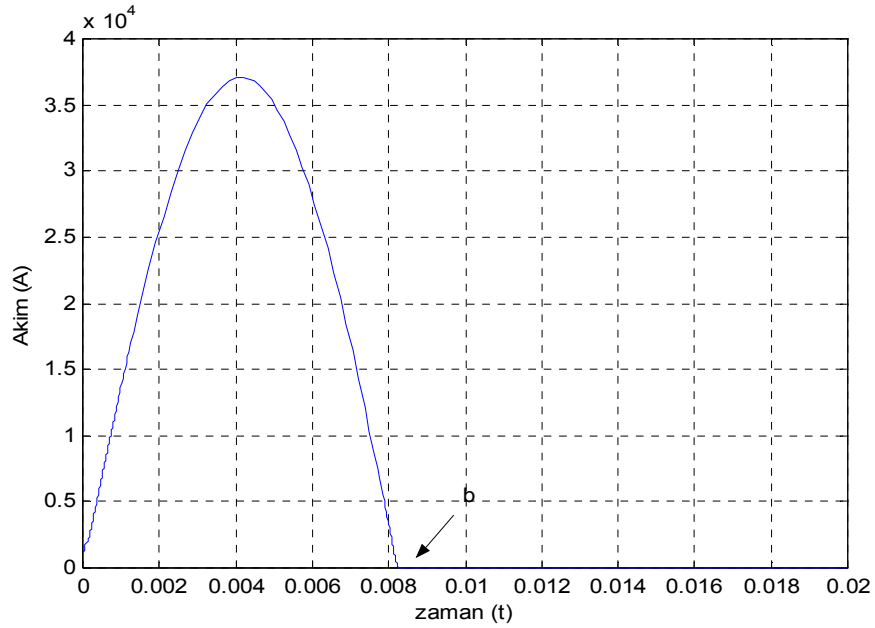
b- Gerilim eğrisi (detay).



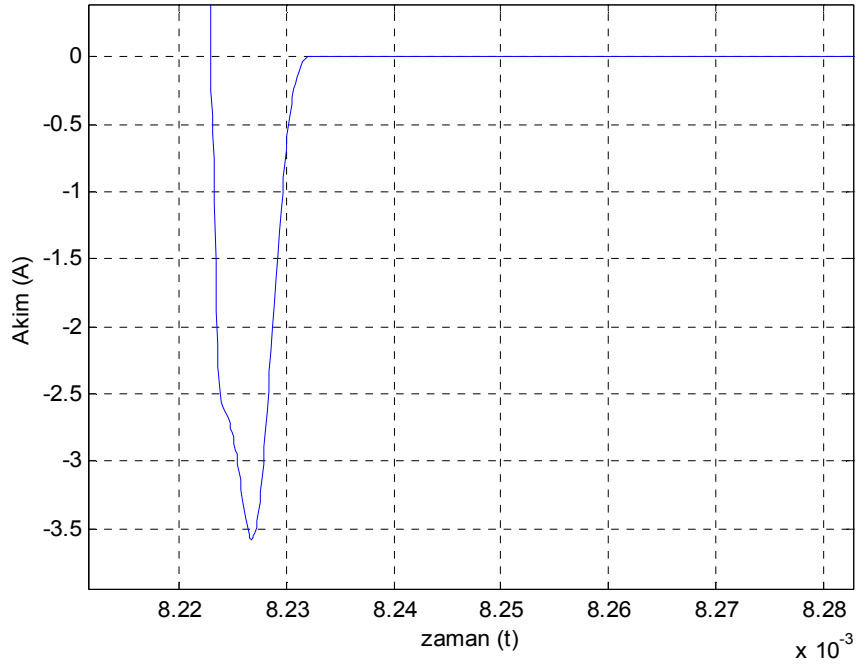
c- Gerilim eğrisi (detay).

Şekil 7.8. t:0 ms (kontak ayrılması) anındaki gerilim eğrisi (a-b-c).

Aynı simülasyonda ark akımı Şekil 7.9’da gösterilmiştir. Açma anındaki ark akımını incelendiğinde, arktan sonra akımın hemen sıfır olmayıp sinüzoidal harekete bağlı olarak çok küçük bir zaman aralığı içinde (8.225 ms) belli bir akıma gelip (-3.5 A) sonunda (b) tipik bir açma özelliği gösterip sıfır olduğu görülmüştür.



a- Akım eğrisi.



b- Akım eğrisi (detay).

Şekil 7.9. $t=0$ ms (kontak ayrılması) anındaki akım eğrisi (a-b).

7.4. Örnek 4: Schwarz ark modeli ile simülasyon

Uygulamada kullandığımız örnek devremizde devre elemanlarının değerlerini değiştirmeden devreye dinamik ark modeli olarak Schwarz ark modeli uygulanmıştır. Schwarz ark modeli ve simülasyon parametre değerleri aşağıdaki gibidir.

Schwarz ark modeli parametre değerleri:

τ : 6×10^{-6} (s)

a : 0.15

P : 100 (MW)

B : 0.6

$g(0)$: 1×10^4 (S)

Devre kesicisi kontak ayrılma zamanı : 0 ms

Simülasyon parametre değerleri:

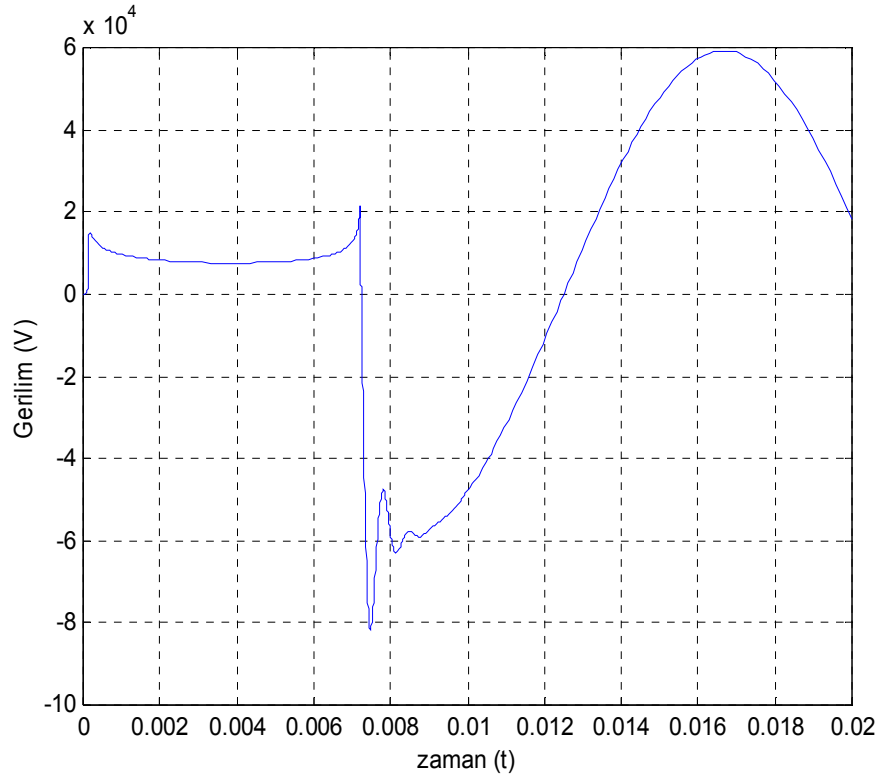
Başlama zamanı : 0.0 ms

Bitiş zamanı : 20×10^{-3} ms

Relatif tolerans : 1.5×10^{-4}

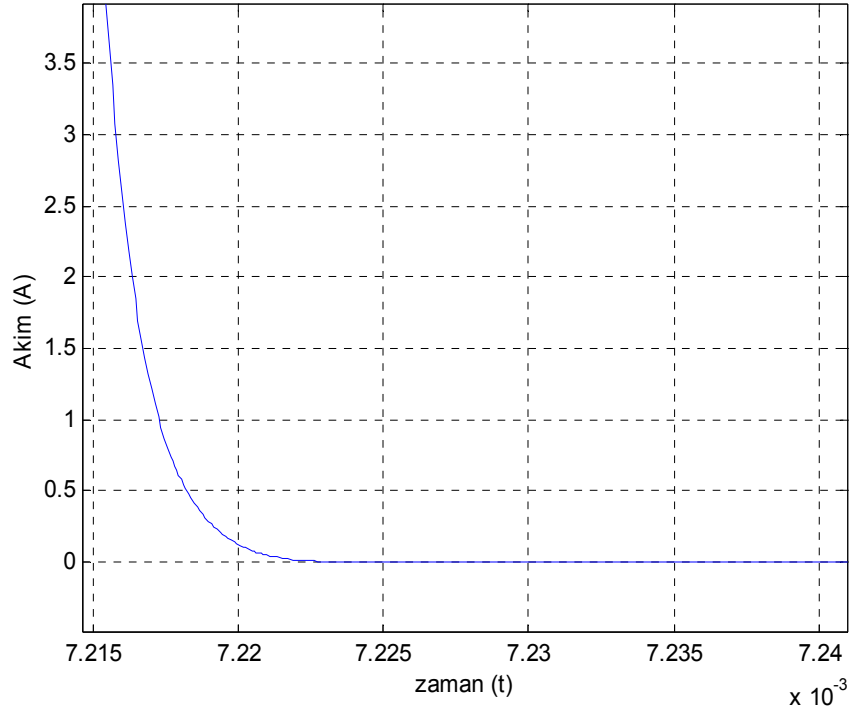
Mutlak tolerance : 1.5×10^{-4} olarak alınmıştır.

Şekil 7.10.a'da Schwarz ark modeli kullanılarak yapılan simülasyonda $t=0$ s anında başlayan kontakların ayrılmasından çok kısa bir süre sonra gerilimin hemen +1500 V 'a yükseldiği, sonra bir azalma trendine girip 7.2 ms civarında +2100 V civarında tepe yaptığı kısa bir süre içinde -82000 V olduğu kontaklar tam açıldıktan sonrada kaynak ile aynı sinüzoidal hareketi yaptığı görülmüştür.



a- Gerilim eğrisi.

Aynı uygulamada Şekil 7.10.b'de akımı da incelersek, arktan sonra akımın sinüzoidal hareketi tamamlayacak şekilde düzgün bir şekilde açma işlemi yaptığı görülmüştür.



b- Akım eğrisi (detay).

Şekil 7.10. $t=0$ ms (kontak ayrılması) anındaki gerilim ve akım eğrileri (a-b).

7.5. Örnek 5: Schavemaker ark modeli ile simülasyon

Örnek devremizde dinamik ark modeli olarak Schavemaker ark modelini kullandık. Schavemaker ark modeli ve simülasyon parametre değerleri aşağıdaki gibidir.

Schavemaker ark modeli parametre değerleri:

τ : 0.2×10^{-6} (s)

U_{arc} : 0 (V)

P_0 : 15 (kW)

P_1 : 0.995

$g(0)$: 1×10^4 (S)

Devre kesicisi kontak ayrılma zamanı: 0 ms

Simülasyon parametre değerleri:

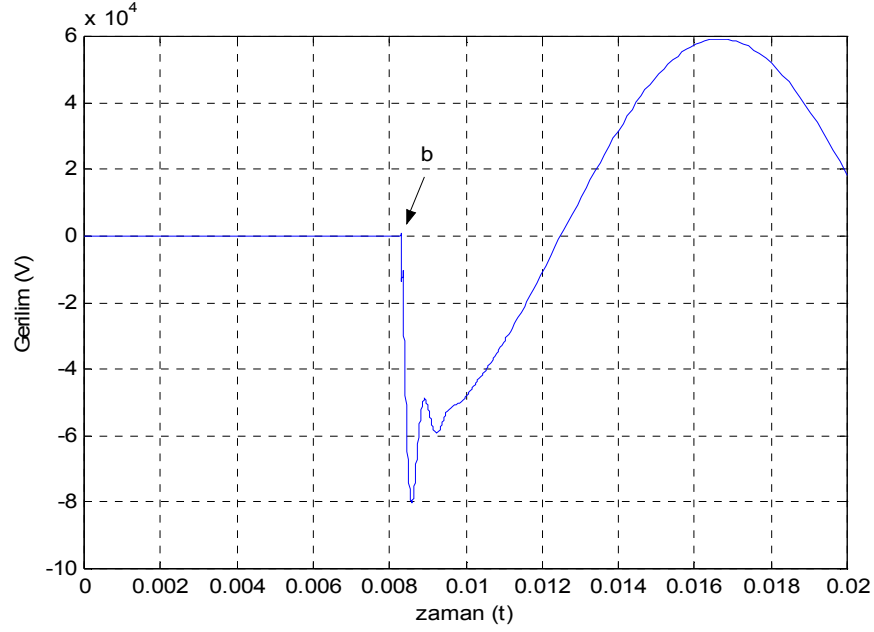
Başlama zamanı : 0.0 ms

Bitiş zamanı : 20×10^{-3} ms

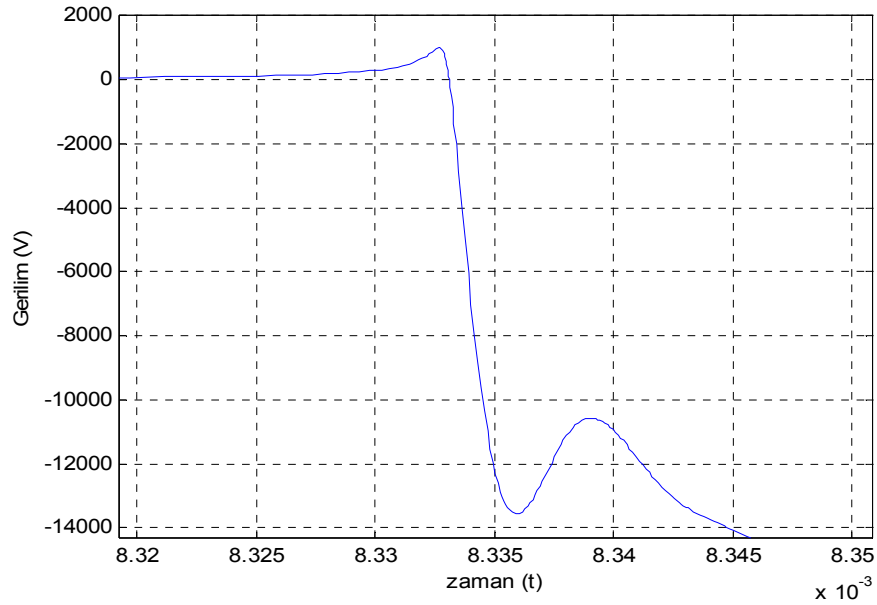
Relatif tolerans : 1.5×10^{-4}

Mutlak tolerance : 1.5×10^{-4} olarak alınmıştır.

Şekil 7.11’de görüldüğü gibi Schavemaker ark modeli kullanılarak yapılan simülasyonda $t=0$ ms anında başlayan kontak ayrılmasından bir süre sonra gerilimin 8.2 ms civarında +1000 V olduğu, çok kısa bir süre içinde +80000 V olduğu ve kontaklar tam açıldıktan sonrada kaynak ile aynı sinüzoidal hareketi yaptığı görülmüştür.



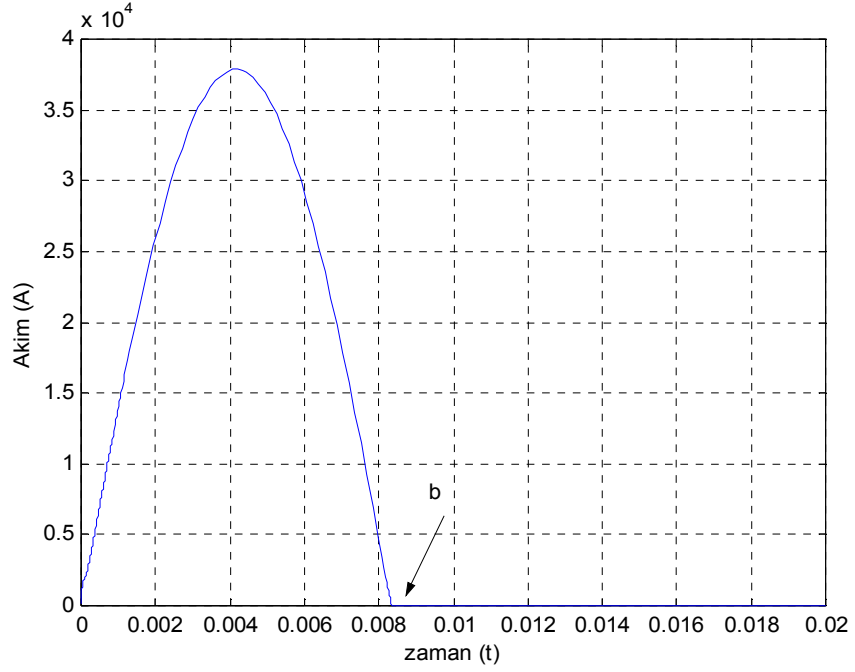
a- Gerilim eğrisi.



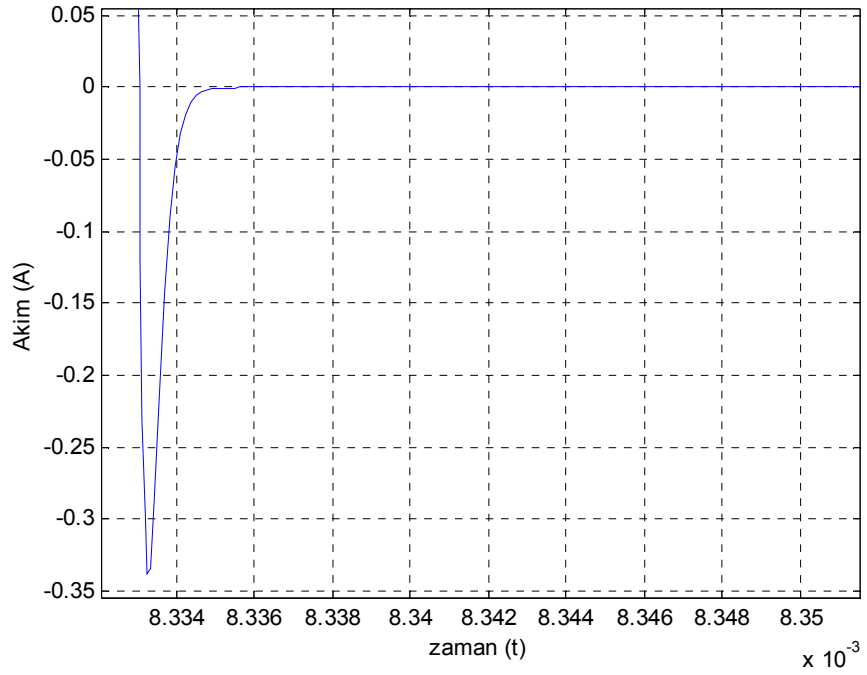
b- Gerilim eğrisi(detay).

Şekil 7.11. $t=0$ ms (kontak ayrılması) anındaki gerilim eğrileri (a-b).

Şekil 7.12’de görüldüğü gibi akımı da incelersek, arktan sonra akımın hemen sıfır olmayıp sinüzoidal harekete bağlı olarak bir zaman aralığı içinde (8.33 ms) belli bir akıma gelip (-0.35 A) sonunda tipik bir açma özelliği gösterip sıfır olduğu görülmüştür.



a- Akım eğrisi.



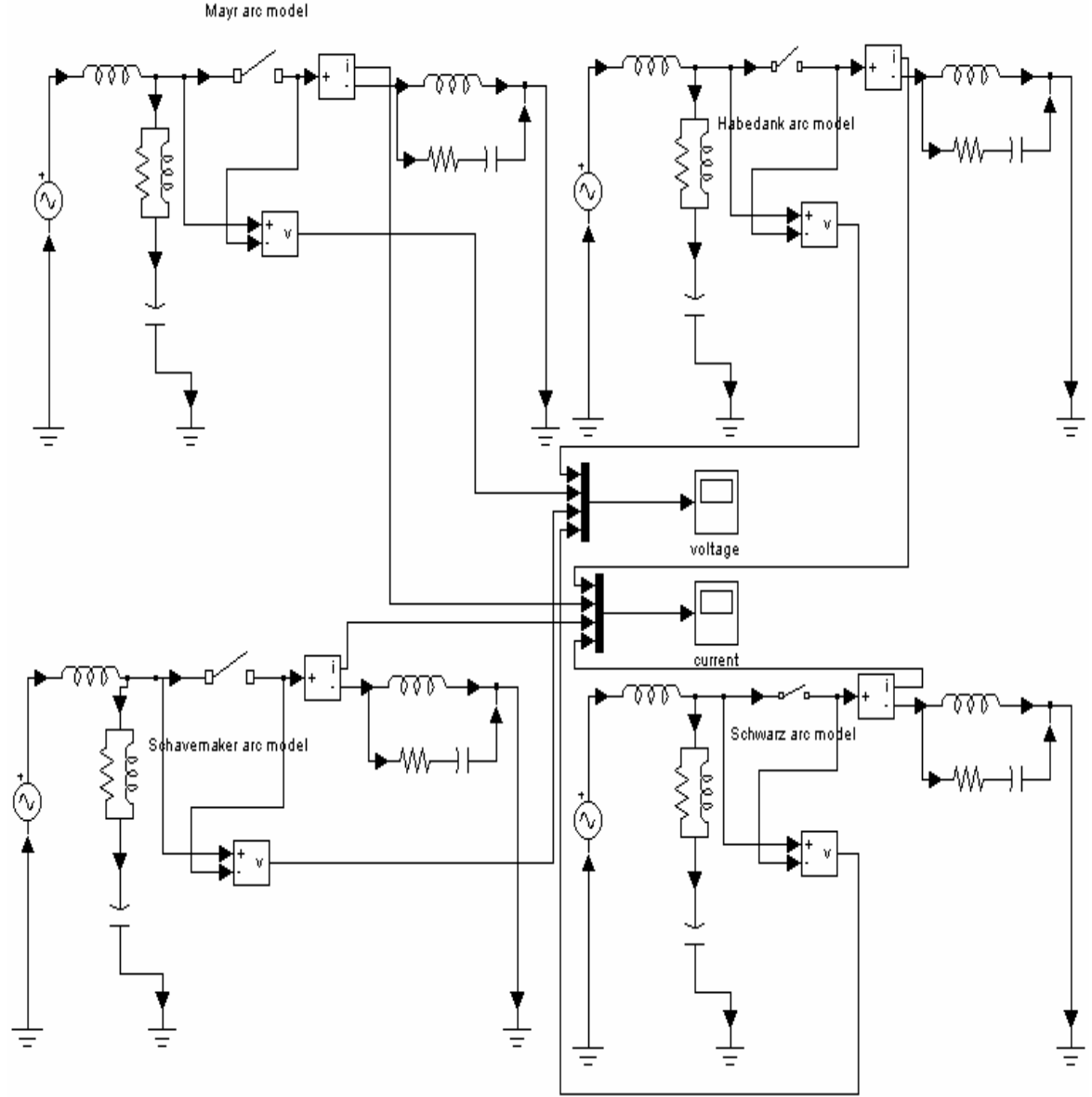
b- Akım eğrisi(detay).

Şekil 7.12. $t=0$ ms (kontakt ayrılması) anındaki akım eğrisi (a-b).

7.6. Örnek 6: Örnek Devrenin Mayr, Schavemaker,Habedank ve Schwarz Ark Modelleri Kullanılarak Karşılaştırılması

Örnek devremizdeki devreyi MATLAB simulinkte oluşturup Mayr, Schavemaker, Habedank ve Schwarz ark modellerini uyguladık. Bu modellerin simulink devresi Şekil 7.13’de detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

Bu dört adet ark modelin gerilim ve akım eğrileri birleştirilerek aynı osiloskop üzerinde incelenmiştir.



Şekil 7.13. Dört ark modeli kullanılarak yapılan simülasyon devresi.

Modellerdeki ortak parametrelere aynı değerler verilmiştir. Sadece zaman sabitleri serbest olarak alınmıştır. Simulinkte kullandığımız dinamik ark modellerinin parametre değerleri aşağıda belirtilmiştir.

Simülasyon parametre değerleri:

Başlama zamanı : 0.0 ms

Bitiş zamanı : 12×10^{-3} ms

Relatif tolerans : 1.5×10^{-4}

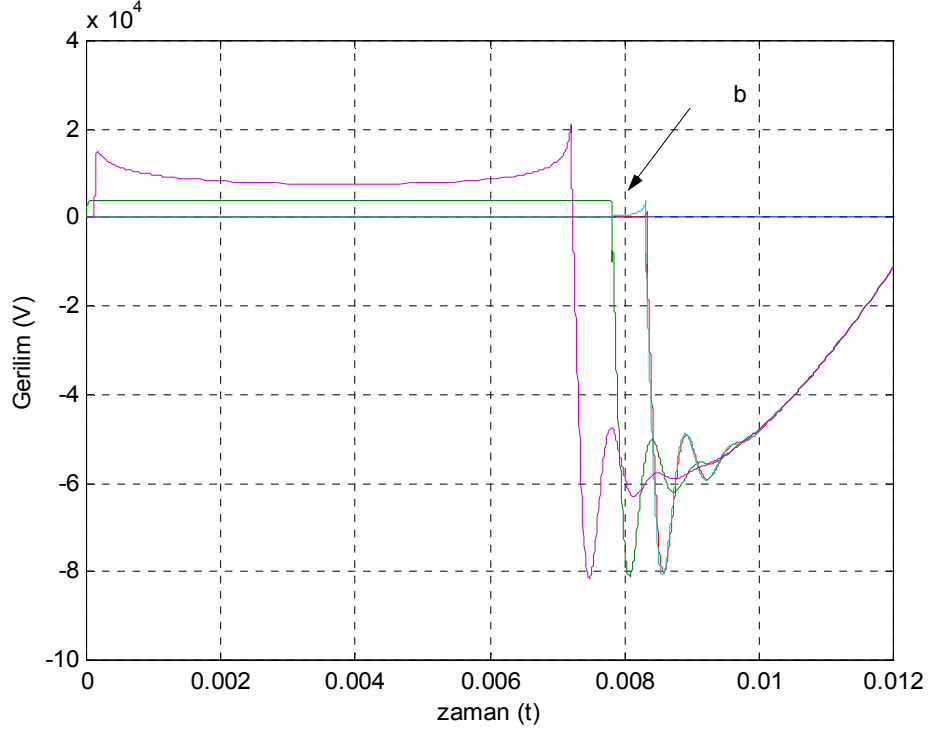
Mutlak tolerance : 1.5×10^{-4} olarak alınmıştır

Dört adet dinamik ark modeline ait kendi türevsel denklemlerinde kullanılan ifadelerin değerleri ise aşağıdaki gibidir.

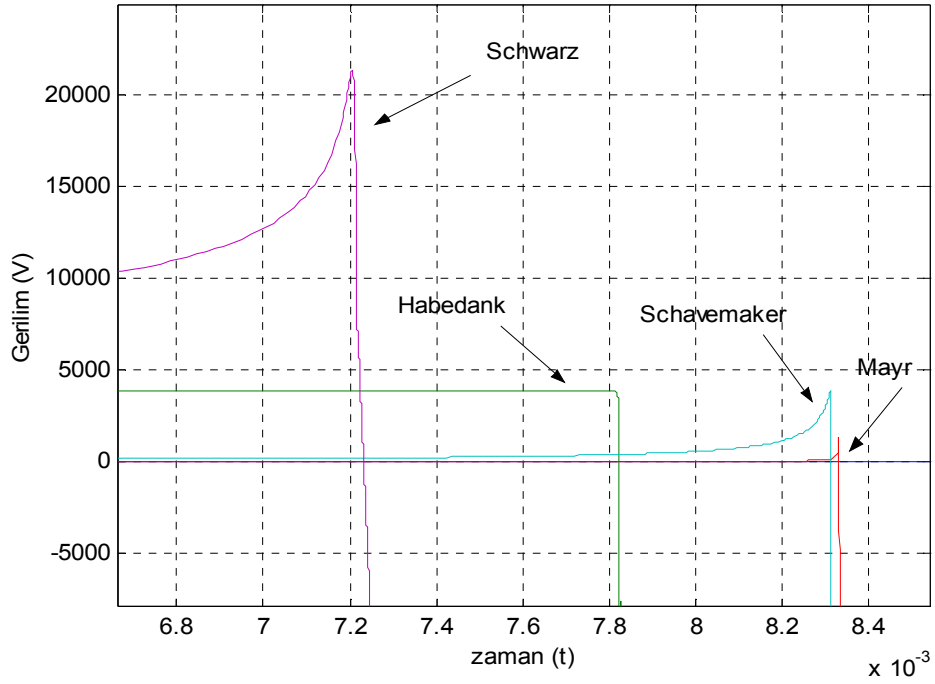
	Mayr	Schavemaker	Habedank	Schwarz
tau (s)	0.3e-6	0.2e-6	-	6.e-6
tau_c (s)	-	-	1.2e-6	-
tau_m (s)	-	-	0.3e-6	-
P (W)	30900	-	30900	100×10^6
P ₀ (W)	-	15000	-	-
P ₁	-	0.995	-	-
g(0) (S)	1.e4	1.e4	1.e4	1.e4
U _c (V)	-	-	3850	-
U _{arc} (V)	-	0	-	-
a	-	-	-	0.15
b	-	-	-	0.6

Dört adet dinamik ark modelinin kullanılması ile elde edilen devrenin simülasyonu yapılırken yukarıda belirtilen ve ark modelleri denklemlerinde kullanılan ifadeler kendi diyalog kutucuklarına yazılarak elde edilmiştir.

Kesicinin kontakların ayrılma zamanını $t=0$ ms olarak verdiğinde açmaya ait gerilim eğrisi Şekil 7.14’de, akım eğrisi ise Şekil 7.15’deki gibi elde edilmiştir.



a- Gerilim eğrileri.

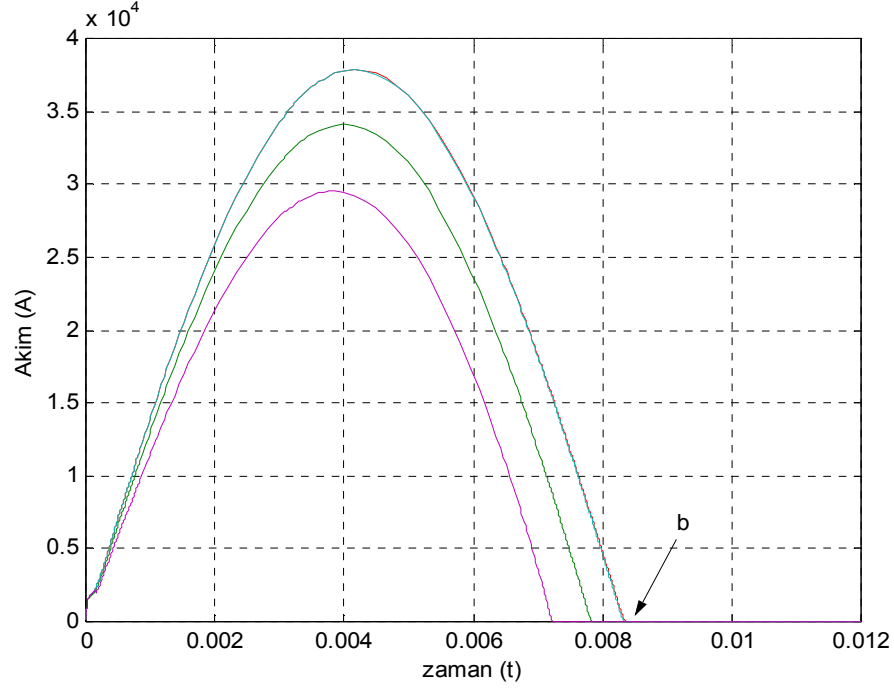


b- Gerilim eğrileri (detay).

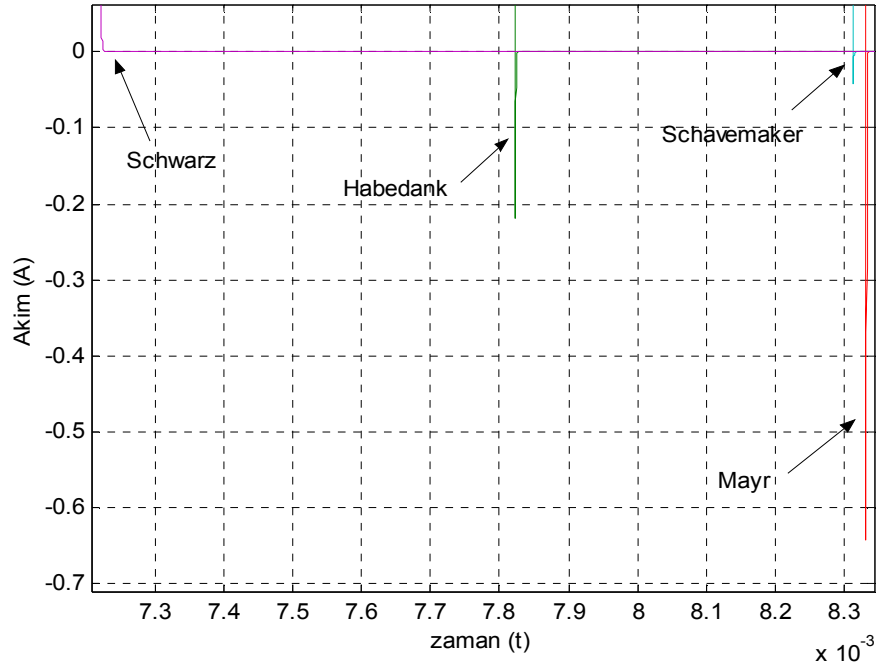
Şekil 7.14. Dört ark modelin $t=0$ ms (kontak ayrılması) anındaki gerilim eğrileri(a-b).

Çalışmamızda modellediğimiz dört adet dinamik ark modeline ait gerilim eğrilerinin kontakların ayrılmaya başlamasından itibaren gerilim grafikleri detaylı

olarak irdedeğinde (ok ile belirtilen kısım) Şekil 7.14'deki gerilim eğrileri elde edilmiştir. Gerilim eğrilerinin genel olarak benzerlik gösterdiği ancak tepe değerlerinde farklılıklar olduğu görülmüştür. Bu dört modelden sadece Schavemaker ve Mayr ark modelleri birbirine benzerlik göstermektedir.



a- Akım eğrileri.



b- Akım eğrileri (detay).

Şekil 7.15. Dört ark modelin $t=0$ s (kontak ayrılması) anındaki akım eğrileri (a-b).

Dört adet ark modeline ait akım eğrilerini de gerilim eğrileri gibi detaylı olarak irdelediğimizde (ok ile belirtilen kısım) Şekil 7.15'deki eğriler elde edilmiştir. Burada dört modelden açma olana kadar Schavemaker ve Mayr ark modellerinin tepe değerlerinin birbirine yakın olduğu, açma gerçekleştikten sonra bu iki modelinde farklılık gösterdiği görülmüştür.

Bu grafiklerdeki eğrilerin renklerinin hangi modele ait olduğu aşağıda verilmiştir.

Kırmızı: Mayr ark modeli

Yeşil: Habedank ark modeli

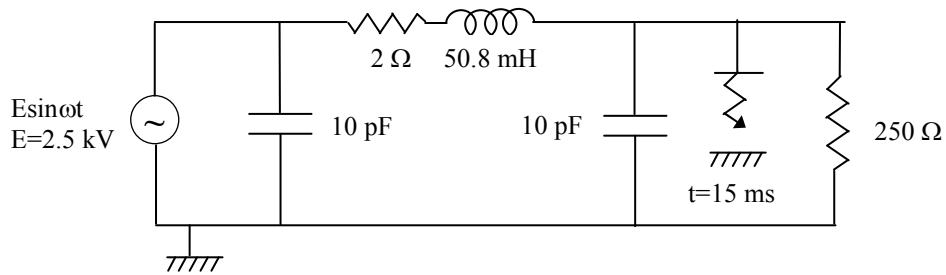
Bordo: Schwarz ark modeli

Mavi: Schavemaker ark modeli

Yukarıdaki şekilde Schwarz ark modelinde ideal bir açma olmuştur. Diğer ark modellerinde ise açmadan sonra bir akım değeri olduğu gözlenmiştir. Bu değerin Habedank ark modelinde 0.22 A, Schavemaker ark modelinde 0.05 A ve Mayr ark modelinde ise 0.65 A olduğu görülmüştür.

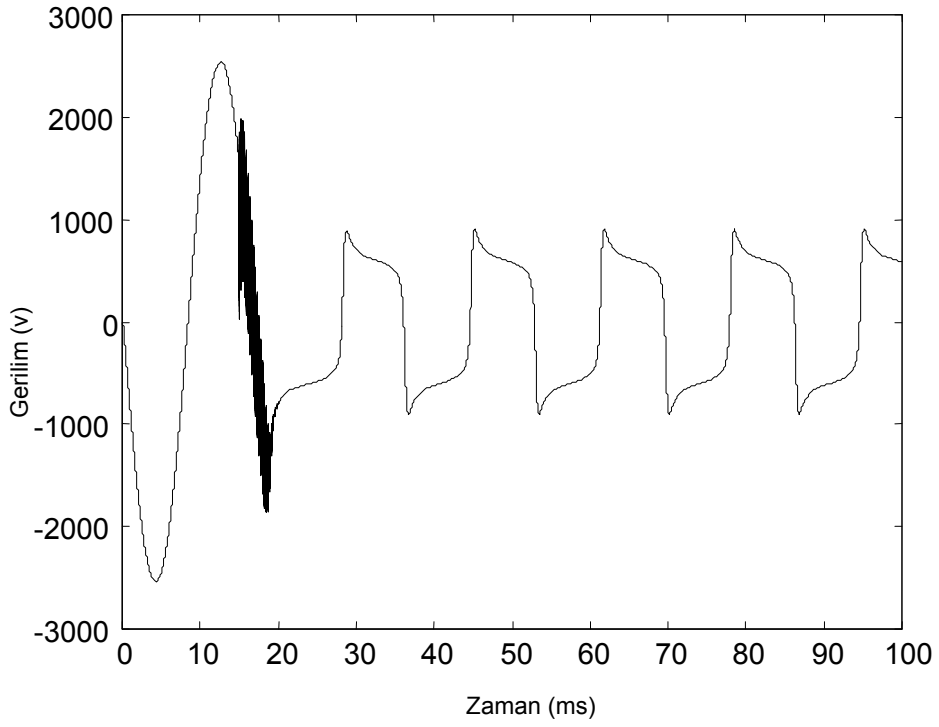
7.7. Örnek 7: Durum Uzayı Tekniği ile Ark Modelinin İncelenmesi

Durum uzayı tekniğini kullanarak ark modelini incelemek için modellenen uygulama devresi Şekil 7.16'da verilmiştir. Bu örnekte Bölüm 6'da verilen algoritmalar kullanılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi devre üzerinde 15 ms'de bir kısa devre oluşmuştur. Oluşan bu kısa devrede meydana gelen akım gerilim eğrisi Şekil 7.17'de, akım eğrisi Şekil 7.18'de ve arkın iletkenliği ise Şekil 7.19'da verilmiştir.



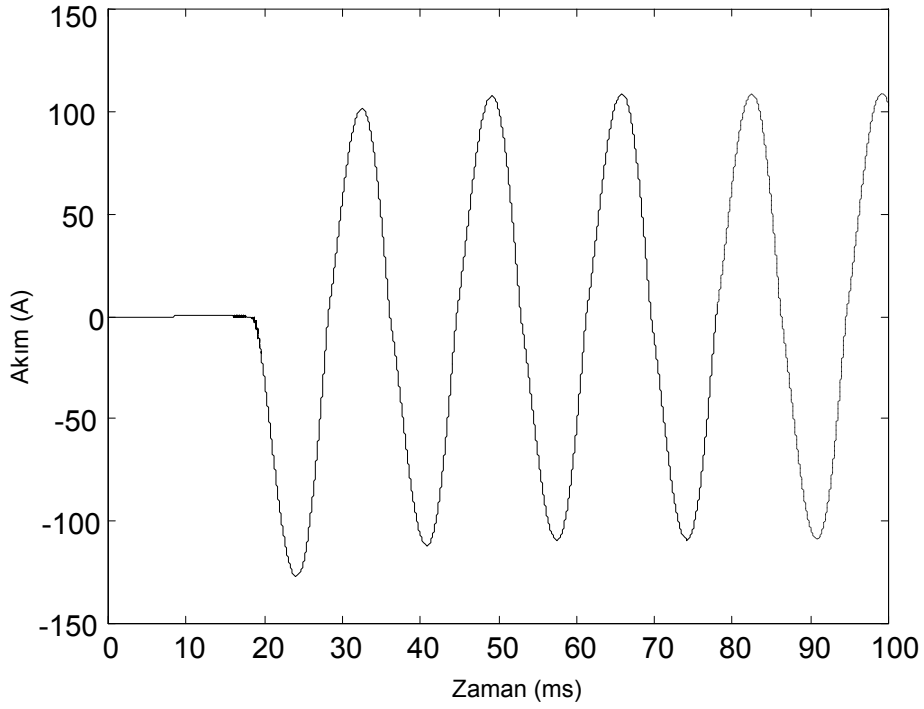
Şekil 7.16. Durum uzayı tekniği uygulama devresi.

Şekil 7.17'deki gerilim eğrisinde $t=15$ ms'de oluşan arka kadar kaynak ile aynı sinüzoidal hareketi yaptığı, $t=15$ ms'den sonrada meydana gelen ark geriliminin durumu görülmektedir.



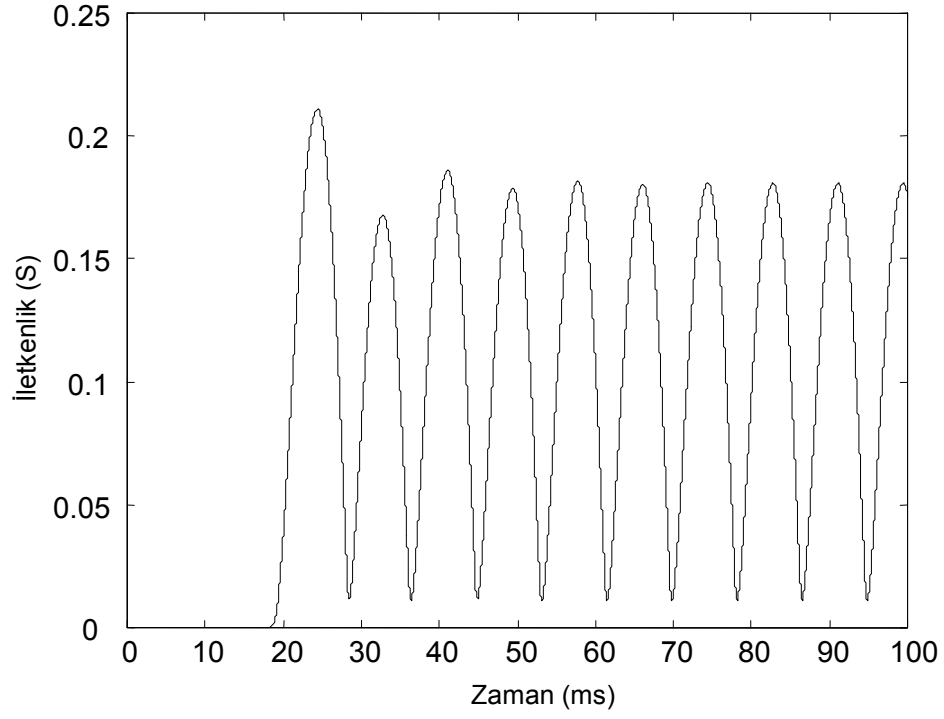
Şekil 7.17. Ark gerilimi.

Şekil 7.18’de $t=15$ ms’ye kadar ark akımının sıfır olduğu, kısa devreden sonrada kaynak ile aynı hareketi yaptığı görülmektedir.



Şekil 7.18. Ark akımı.

Şekil 7.19’da kısa devreye bağlı olarak ise arkın iletkenliğinin zamanla değiştiği görülmektedir.



Şekil 7.19. Ark iletkenliği.

8. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Dünyada elektrik enerjisine olan ihtiyaç hızla artmakta, üretilen elektrik enerjisinin ekonomik ve sınırlı doğal kaynaklar nedeniyle tüketim merkezlerine en az kayıpla ulaştırılması gerekmektedir. Bu durum elektrik enerjisinin iletiminde ve dağıtımında yüksek gerilim kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Bu nedenle yüksek ve orta gerilimlerde enerjiyi iletmek için anahtar vazifesi gören kesicileri kullanılmaktadır.

Kesicileri modelleyerek testler yapıp istenen koşullara uygun imalatlarda bulunmak hem maliyet hem de zaman açısından önemlidir. Kesicinin açması ve kapaması gibi hallerde voltaj ve akım gibi parametreler bu modellerde yeteri derecede geçici durumlara maruz kalırlar. Arkın modellenmesindeki gaye dinamik ark modellerinin kesinti anında belirli bir şekilde sistem ve devre kesicisi arasındaki etkileşimi tarif ederek kara kutuyu tarif edip diğer çalışmalarda kullanmaktır.

Bu çalışmanın başında daha önce yapılan çalışmalar ve uygulanan metotlar hakkında bilgi verilmiş ve neler yapıldığı kısaca anlatılmıştır. Sonraki kısımlarda elektrik kesicilerinin yapısı ve karakteristikleri hakkında teorik bilgiler verilip elektriksel ark yapısal olarak incelenmiştir. Çalışmalarda kullanılan ark modelleri birebir ele alınıp gerekli şekilde incelenip MATLAB programında nasıl kullanılacağı anlatılmıştır. Sonraki kısımda Mayr ark modeli örnek alınıp bu modele göre ark model blok paketinin nasıl oluşturulacağı anlatılmıştır. Çalışmanın uygulama kısmında bir devre modellenip, uygulamada olan ark modelleri bu devreye uygulanarak kesicinin açma esnasında akım ve gerilim eğrileri elde edilip incelenmiştir. Daha sonra gerilim ve akım eğrileri karşılaştırılmıştır.

Gerilim eğrilerinin genel olarak aynı karakterde olduğu fakat açma anındaki gerilim değerlerinde zaman açısından farklılıklar olduğu görülmüştür. Bütün modellerde açmaya kadar olan zamanda gerilimin olmadığı (hata akımından dolayı oluşan gerilimler hariç), açmadan sonrada gerilim eğrisinin kaynak ile aynı hareketi yaptığı görülmüştür.

Akım eğrileri de gerilim eğrileri gibi aynı karakterde görülse bile açmadan hemen sonra farklılıklar göstermektedir. Kesicinin kontaklarının ayrılmaya başlamasına kadar akım kaynak ile aynı hareketi yapmaktadır. Açmadan sonra kontaklar arasında bir akım akmadığından akımın sıfır olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak; bütün ark modelleri aynı devreye uygulanırsa ark sonrası oluşan gerilim ve akım eğrileri tamamen aynı sonucu vermemekle beraber benzerlik

göstermektedir. Ark sonrası oluşan gerilim ve akım eğrilerinde olan bu farklılıklar ark modellerindeki parametrelerin aynı olmayışından ve alınan serbest parametre değerlerinden kaynaklanmaktadır.

Gelecekte dinamik ark modellerinde kullanılan sabit parametrelerin belirlenmesinde deneysel sonuçlar ile daha iyi uyum sağlayan ark modelleri için çalışmalar yapılabilir. Deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar simülasyon sonuçları ile karşılaştırılarak değişik çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Smaranda Nitu, Constantin Nitu, Paula Anghelita “ Electric Arc Model, for Hight Power Interrupters” Eurocon Serbia & Montenegro, Belgrade, November 22-24, 2005
- [2] U. Habedank, “Application of a New Arc Model for the Evaluation of Short-Circuit Breaking Tests” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8 , No. 4, October 1993
- [3] L. Van der Sluis, W.R. Rutgers, “The Comparison of Test Circuits with Arc Models” 1994
- [4] Lionel R. Orama-Exclusa, Bienvenido Rodriguez-Medina, “Numerical Arc Model Parameter Extraction for SF6 Circuit Breaker Simulations” International Conference on Power Systems Transients-IPST 2003 in New Orleans, USA 2003
- [5] P.H.Schawemaker , Lou van der Sluis, “An Improved Mayr-Type Arc Model Based on Current-Zero Measurements” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 2, April 2000
- [6] P.H.Schawemaker , Lou van der Sluis, and A. J. P. de Lange “Circuit Breaker Arc Model Computations for Critical Line Lenght Determination” Power Systems Laboratory Delf University of Technology Delf,The Netherlands 2000
- [7] J.L.Guardado, S.G.Maximov, E.Melgoza, J. L. Naredo and P.Moreno, “An Improved Arc Model Before Current Zero Based on the Combined Mayr and Cassie Arc Models” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, January 2005
- [8] Grigore A.CIVIDJIAN , Natalia G.SILVIS – CIVIDJIAN “Kema Arc Model Parameters Evaluation” University of Craiova, Romania 1998
- [9] P.H.Schavemaker , L.van der Sluis ve A.Pharmatrisanti “Post-Arc Current Reconstruction Based on Actual Circuit Breaker Measurements” IEEE Proc-Sci. Meas.Technol., Vol. 149, No. 1, January 2002
- [10] R E Blundell ve M T C Fang “A Simplified Turbulent Arc Model For the Current-Zero Period of a SF6 Gas-Balast Circuit Breaker” Department of Electrical Engineering and Electronics,University of Liverpool. 1997

- [11] P.H.Schavemaker , L.van der Sluis “The Arc Model Blockset” Proceedings of the Second IASTED International Conference June25-28, 2002, Crete, Greece
- [12] Lucilius Carlos Pinto , Luiz Cera zanetta Jr. “Medium Voltage SF6 Circuit-Breaker Arc Model Application” Electric Power Systems Research 53 (2000) 67-71
- [13] M. Emin MERAL, M. Salih MAMIŞ, “Doğrusal Olmayan Güç Sistemi Devrelerinin Durum Uzayı Tekniğiyle Çözümü” Yüksek Lisans Tezi Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van 2003
- [14] Cassie, A.M. “Theorie Nouvelle des Arc de Repture et de la Rigidite des Circuits” , Cigre, Report 102, 1939, pp. 588-608
- [15] Mayr, O. “Beitrage zur Theorie des Statischen und des Dynamischen Lichtbogens” Band 37, Heft 12 pp.
- [16] Van der Sluis, I. Rutgers, W.R., and Koreman, C.G.A. “Physical Arc Model for the Simulation of Current Zero Behaviour of High-Voltage Circuit breakers” , IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No.2, 1992, pp. 1016-1022
- [17] Habedank, U. “On the Mathematical Description of Arc Behaviour in the Vicinity of Current Zero”, etz Archiv, Bd. 10, H. 11, pp. 339-343. 1988
- [18] Smeets, R.P.P. and Kertesz, V. “Evaluation of Hight-Voltage Circuit Breaker Performance with a New Validated Arc Model”, IEE Proc. Vol. 147, No. 2, March 2000
- [19] Schwarz, J. “Dynamisches Verhalten eines Gasbeblasenen, Turbulenzbestimten Schaltlichtbogens”, ETZ-A, Bd. 92(1971), pp. 389-391
- [20] King-Jet Tseng “An Exrerimentally Verified Hybrid Cassie-Mayr Electric Arc Model for Power Electronics Simulations ” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 12, No. 3, May 1997
- [21] İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları Dönem Ödevi “Yüksek Gerilim Doğru Akım Güç Kesicileri” 31, December 2004
- [22] II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi MBGAK 2005 İstanbul 17-19 Kasım 2005
- [23] M. Salih MAMIŞ, M. Emin MERAL “State – Space Modeling and Analysis of Fault Arcs” Electric Power Systems Research 2005

- [24] S. Y. Leung, Laurence A. Snider “SF6 Generator Circuit Breaker Modeling” International Conference on Power Systems Transients in Montreal, Canada on June 19-23, 2005
- [25] H. Knobloch and Habedank “Behaviour of SF6 High – Voltage Circuit Breakers with Different Arc – Extinguishing Systems at Short – Line Fault Switching” IEE Proc.- Sci. Meas. Technol. Vol. 148. No. 6, 2001
- [26] Niklas Gustavsson, Yüksek Lisans Tezi “Evaluation and Simulation of Black-box Arc Models for Hight Voltage Circuit- breakers” March 19, 2004
- [27] P.H.Schavemaker “Arc Model Blockset” for use with MATLAB Simulink and Power System Blockset, User’s Guide, Versiyon 2, Delf University of Technology, The Netherlands, 2001
- [28] Johns,A. T. Aggarwal, R. K. and Song, Y. H., 1994. Improved Techniques Fault Arcs on EHV Transmission Systems. IEE Proc. Gen.Transm.Dist., Vol. 141,No. 2, pages 148-154
- [29] Jons, A. T. and Al-Rawi, A.M., 1982. Digital Simulation of EHV Systems Under Secondary Arcing Conditions Associated with Single-pole Autoreclosure. IEE Proc., 129(2): 49-57

ÖZGEÇMİŞ

1970 yılında Malatya’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Malatya’da tamamladı.1987 yılında girdiği Yıldız Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümünden 1991 yılında mezun oldu.1991 yılında Karadeniz Bakır İşletmelerinde Elektrik Bakım Mühendisi olarak çalıştı.1993 yılından beri Turgut Özal Tıp Merkezi İnşaatında Elektrik Saha Mühendisi olarak çalışmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.