

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**VAKUMLU DEVRE KESİCİSİ İÇİN FARKLI KONTAK
YAPILARININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
CENGİZ ÇEÇEN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet SALİH MAMIŞ

Kasım-2022

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**VAKUMLU DEVRE KESİCİSİ İÇİN FARKLI KONTAK
YAPILARININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CENGİZ ÇEÇEN

(36203615019)

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet SALİH MAMIŞ

Kasım-2022

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalıőmasının her aőamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemededen beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. M. Salih MAMIŞ'e, Jüri üyeleri Prof. Dr. Ömer Faruk ERTUŐRUL ve Dr. Öğr. Üyesi Cemal KELEŐ'e,

Çalıőmalarımda ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalıőmalarım süresince benden her türlü desteklerini esirgemeyen aileme,

Ayrıca İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümündeki tüm öğretim elemanlarına

teşekkür ederim.



ONUR SÖZÜ

Doktora veya yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Vakumlu Devre Kesicisi İçin Farklı Kontak Yapılarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Optimizasyonu” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Cengiz ÇEÇEN



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ.....	i
ONUR SÖZÜ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
GRAFİK DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	VIII
1.GİRİŞ.....	1
2.2.1 Vakumlu devre kesici.....	9
2.2.2 SF6 havalı kesiciler	10
2.2.3 Basınçlı havalı kesiciler.....	11
2.2.4 Yağlı kesiciler.....	12
3.VAKUM DEVRE KESİCİSİ	13
3.1 Vakumlu Devre Kesicisinin Tarihçesi.....	13
3.2 Vakumlu Devre Kesicisinin Özellikleri.....	14
3.3 Vakumlu Devre Kesicisinin Avantajları.....	15
3.4 Vakumlu Devre Kesicisinin Uygulama Alanları	16
3.5 Vakumlu Devre Kesicisinin Yapısı	16
4. VCB FARKLI TİP KONTAK YAPILARININ İNCELENMESİ	21
4.1 Düz Kontak, Spiral Tip Kontak ve Eğik Oluklu Kap Tipi Kontak yapıları.....	21
4.2 VCB Çalışma Prensibi ve Ark Söndürme işlemi.....	21
4.3 Ark Enerjisi.....	26
4.4 Elektriksel Ark ta Gerilim Düşümü.....	26
4.5 Manyetik Alan ile Ark Kontrolü.....	28
5. ELEKTROSTATİK ANALİZ.....	32
5.1 Elektrik Alanın Hesaplanması ve Analizi.....	32
5.2 Elektrik Alan Modelleme.....	32
5.3 Ansys Maxwell ile Elektrostatik Analiz.....	34
5.4 AMF ve RMF kontak tip kesicisinin Elektrik Alan simülasyonu.....	36
5.4.1 Model tasarımı.....	36
5.4.2 Elektrik alan simülasyonu	37

5.5 Düz Kontak, Spiral Tip Kontak ve Eğik Oluklu Kap Tipi Kontaklar ve Elektrik Alan Simülasyonu.....	40
5.5.1 Düz tip kontak	40
5.5.2 Spiral tip kontak	44
5.5.3 Eğik oluklu kap tipi kontak	48
6.TARTIŞMA VE SONUÇ	54
ÖZGEÇMİŞ	60



GRAFİK DİZİNİ

Gafik 5.9: düz tip kontağın 2-10 mm mesafelerde elektrik alan değerinin grafiksel gösterimi.	44
Grafik 5.12: Spiral tip kontağın 2-10 mm mesafelerde elektrik alan değerlerinin grafiksel gösterimi.	48
Grafik 5.15: Eğik oluklu tip kontağın 2-10 mm mesafelerde elektrik alan değerlerinin grafiksel gösterimi.	52
Grafik 5.16: Düz- spiral-eğik oluklu tip kontakların farklı mesafelerde (2-10) elektrik alan değerlerinin grafiksel gösterimi.	53

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Vakumlu devre kesicisi	9
Şekil 2.2: SF6 gazlı kesicisinin ark söndürme prensibi	10
Şekil 2.3: Hava üfleme yönü: (a) aksenal yön, (b) çapraz yön	11
Şekil 2.4: Basınçlı hava kesicinin kontak yapısı.	11
Şekil 2.5: Yağlı kesici kontak yapısı ve ark söndürme hücresi	12
Şekil 3.1: Kesicilerin gelişim süreçleri	14
Şekil 3.2: Sabit temas tarafında buhar kalkanı olan bir vakum kesicinin kesiti	16
Şekil 3.3: Vakum devre kesicisinin içyapısı	17
Şekil 3.4: Vakum devre kesicisinin kontak yapısı	18
Şekil 3.5: Farklı malzemeler için akımın bir fonksiyonu olarak kesinti frekansı	20
Şekil 4.1: Düz kontak, spiral tip kontak ve eğik oluklu kap tipi kontaklar	21
Şekil 4.2: Vakum devre kesicinin kesme prensibi	22
Şekil 4.3: Ark oluşumu	23
Şekil 4.4: Akımın sinüzoidal dalgası	23
Şekil 4.4:Yayılmış ark	24
Şekil 4.5: Döner ark	25
Şekil 4.6: Paschen eğrisi	25
Şekil 4.7: Ark gerilimi	27
Şekil 4.8: Radial Manyetik alan (RMA)	29
Şekil 4.9: Aksenal manyetik alan (EMA)	30
Şekil 4.10: Üç segmentli bobin tipi EMA kontağı	30
Şekil 4.11: Yuva (slot) Tipi EMAKontağı	31
Şekil 5.1: Ansys maxwell problem çözüm tipleri.	34
Şekil 5.2:Ansys maxwell gerilim uyarımı.	35
Şekil 5.3: Ansys maxwell malzeme atama.	35
a-Radial manyetik alan (RMF).	36
b- Aksenal manyetik alan (AMF).	36
Şekil 5.4: RMF ve AMF kontaklarının 3D tasarımları (a-b).	36
a-RMF Elektrik alan vektörel dağılımı.	37
b-RMF elektrik alan dağılımı.	38
Şekil 5.5: RMF kontak elektrikriksel alan dağılımı ve vektörel gösterimi (a-b).	38
a-AMF Elektrik alan vektörel dağılımı.	39
b-AMF elektrik alan dağılımı.	39
Şekil 5.6: AMF kontak elektrikriksel alan dağılımı ve vektörel gösterimi (a-b).	39
Şekil 5.7: Düz kontak 3D modeli.	41
a. Düz kontağın kontaklar arasındaki mesafe 2 mm iken elektrik alan dağılımı.	41
b. Kontaklar arasındaki mesafe 4 mm iken elektrik alan dağılımı.	42
c. Kontaklar arasındaki mesafe 6 mm iken elektrik alan dağılımı.	42
d. Kontaklar arasındaki mesafe 8 mm iken elektrik alan dağılımı.	43
e. Kontaklar arasındaki mesafe 10 mm iken elektrik alan dağılımı.	43
Şekil 5.8: Düz tip Kontakın 2-10 mm mesafelerde elektrik alan dağılımları (a-e).	43
Şekil 5.10: Spiral tipi kontak 3D modeli.	45
b. Temas yüzeyleri arasındaki mesafe 4 mm iken elektrik alan dağılımı.	46
c. Temas yüzeyleri arasındaki mesafe 6 mm iken elektrik alan dağılımı.	46
d. Temas yüzeyleri arasındaki mesafe 8 mm iken elektrik alan dağılımı.	47
e. Temas yüzeyleri arasındaki mesafe 10 mm iken elektrik alan dağılımı.	47

Şekil 5.11: Spiral tip kontağın kontaklar arasındaki farklı mesafelerin (2-10 mm) elektrik alan dağılımları (a-e).	47
Şekil 5.13: Eğik oluklu kap tipi kontağın 3D modeli.	49
a. Temas yüzeyleri arasındaki mesafe 2 mm iken elektrik alan dağılımı.	49
b. Temas yüzeyleri arasındaki mesafe 4 mm iken elektrik alan dağılımı.	50
c. Temas yüzeyleri arasındaki mesafe 6 mm iken elektrik alan dağılımı.	50
d. Temas yüzeyleri arasındaki mesafe 8 mm iken elektrik alan dağılımı.	51
e. Temas yüzeyleri arasındaki mesafe 10 mm iken elektrik alan dağılımı.	51
Şekil 5.14: Eğik oluklu tip kontağın 2-10 mm mesafelerde elektrik alan dağılımları (a-e).	51



SEMBOLLER VE KISALTMALAR

AMF	Eksenel manyetik alan prensibi
EMA	Eksenel Manyetik Alan
CB	Devre kesici
OG	Orta gerilim
RMF	Radyal manyetik alan prensibi
RMA	Radyal Manyetik Alan
SF6	Kükürt heksaflorür
TRV	Geçici kurtarma voltajı
VCB	Vakum devre kesici
E_A	Ark enerjisi
U_A	Ark esnasında değişen gerilim
I	Kesilen akımın şiddeti
T	ark süresi
U_S	Ark sütunundaki gerilim düşümü
$\sigma(E,T)$	Elektrotlar arasındaki ortamın elektriksel iletkenliği
E	Elektrik alan şiddeti
V	Elektrik potansiyelinin
σ	Elektrik ark iletkenliği
n	Elektron yoğunluğu
m_e	Elektron kütlesi
v_m	Yük akış hızı
μ_e	Elektron hareketliliği
e	Temel elektron yükü
v_d	Boşaltma sıcaklığına bağlı sürüklenme hızı

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

VAKUMLU DEVRE KESİCİSİ İÇİN FARKLI KONTAK YAPILARININ SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU

CENGİZ ÇEÇEN

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

60+X sayfa

2022

Danışman: Prof. Dr. M. Salih MAMIŞ

Teknolojik gelişmeler ve rekabetin artmasına paralel olarak geçmişten günümüze birçok kesici türü geliştirilmiştir. Vakum devre kesicisi orta gerilim güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan kesici türlerinden biridir.

Kısa devre veya elektriksel manevralarda açma-kapama esnasında meydana gelen ark, zamanla kontak temas yüzeylerinde aşınmaya neden olmaktadır. Meydana gelen bu istenmeyen durumu en aza indirmek için Radyal Manyetik Alan ve Eksenel Manyetik Alan üreten kontak çeşitleri kullanılarak manyetik alan ile ark kontrolü yapılabilmektedir.

Devre kesicilerinden daha iyi verim alabilmek için bazı yöntemler geliştirilerek anahtarlama kapasitesi artırılabilir. Bu yöntemlerden biri kontak yapımında kullanılacak malzeme seçimi, diğeri ise uygun kontak geometrisini kullanmaktır. Geliştirilmiş olan kontak yapılarından bazıları; düz kontak, spiral tip kontak ve eğik oluklu kontak çeşitleridir.

Bu çalışmada vakum devre kesicisi için kullanılan farklı kontak yapılarının incelenmesi ve Ansys Maxwell yazılımı ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elektrostatik analizleri gerçekleştirmektir. Yapılan elektrostatik analizde elde edilen sonuçlar farklı kontak yapılarının elektrik alan dağılımı üzerinde önemli etkisinin bulunduğunu göstermiş ve bu alanda yapılacak çalışmalar, anahtarlama kapasitesinin geliştirilmesinde önemli bir etken olacağı değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Vakum devre kesicisi, Elektrostatik Analiz, ANSYS Maxwell 3D.

ABSTRACT

Master Thesis

OPTIMIZATION OF DIFFERENT CONTACT STRUCTURES FOR VACUUM CIRCUIT BREAKERS WITH FINITE ELEMENT METHOD

CENGİZ ÇEÇEN

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

60+X pages

2022

Supervisor: Prof. Dr. M. Salih MAİŞ

With the development of the technology and the increase in competition, many breaker types have been developed from past to present. Vacuum circuit breaker is widely used in medium voltage power systems.

The arc that occurs during short circuit or electrical switching causes coating on the contact surfaces over time. In order to minimize this undesirable affect, arc control can be made with magnetic field by using contact types that generate Radial Magnetic Field and Axial Magnetic Field.

In order to get better efficiency from circuit breakers, some methods can be developed to increase the switching capacity. One of these methods is to choose appropriate material to be used in contact, and the other is to develop the appropriate contact geometry. Some of the developed contact structures are; flat contact, spiral type contact and skew slotted cup contact structures.

In this study, different contact structures used for the vacuum circuit breakers are examined and electrostatic analyzes using the finite element method with Ansys Maxwell software is performed. The results obtained in the electrostatic analysis showed that different contact structures have a significant effect on the electric field distribution, and it was evaluated that the studies to be carried out in this area would be an important factor in the development of the switching capacity.

Keywords: Vacuum circuit breaker, Electrostatic analysis, ANSYS Maxwell 3D.

1.GİRİŞ

Vakum devre kesicisi iyi kesme kapasitesi, güvenli ve güvenilirliği sayesinde orta gerilim güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer kesici türlerine nazaran kurulumu kolay, bakım gerektirmemesi ve çevre dostu olması gibi özellikleri bu kesici türünü daha avantajlı kılmıştır.

Bu kesici türünde ark söndürme işlemi için herhangi bir harici madde kullanılmaz. Adından da anlaşılacağı gibi bu ark söndürme işlemi havası tamamen alınmış bir vakum tüpü içinde, akımın sinüzoidal dalgası ve ortam basıncından yararlanılarak gerçekleşir. Bu özelliği sayesinde patlama veya yangın tehlikesi yoktur.

Güç sistemlerinde kullanılan kesicilerin en önemli ve büyük sorunlarından bir tanesi, açma-kapanma esnasında meydana gelen ark davranışını kontrol etmektir. Çünkü meydana gelen ark kontak yüzeylerine ciddi zarar vermekte ve kesici ömrünü kısaltmaktadır. Arkın kontak yüzeylerine mümkün olduğunca daha az zarar vermesi için her kesici türü için farklı yöntemler geliştirilmiştir. SF6 kesici türünde gazı söndürmek için ark üzerine özel bir gaz püskürtülerek, yağlı kesicilerde ark söndürme işlemi bir yağ hücresi içinde, vakumlu devre kesicilerinde ise bu işlem, havası tamamen boşaltılmış bir vakum tüpünün içinde yapılmaktadır. Bu kesici türünde arkı kontrol etmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan ilki, kullanılacak malzeme seçimidir. Kullanılacak malzeme, çok sayıda anahtarlama işleminde düşük erozyon kayıpları, düşük kesme akımları, HF geçişleri oluşturma eğiliminin düşük olması ve aynı zamanda tatmin edici bir söndürme kapasitesi gereksinimlerini karşılamalıdır [1]. Genellikle CuCr, WCu, MoCu, WCAg gibi refrakter bileşenlere dayalı malzemeler kullanılır, ancak yapılan çalışmalar neticesinde bunlar içinde en uygun olan CuCr malzemesidir. Anahtarlama kapasitesini iyileştirmenin bir diğer yolu, kontak geometrisini değiştirmektir. Elektrot geometrisi manyetik alanlar oluşturur, bu nedenle bu tür değişiklikler arkın davranışını önemli derecede etkiler. Arkın kontak yüzeylerine zarar vermemesi için mümkün olduğunca daha kısa sürede söndürülmesi ve ark daralmasını önlemek gerekir. Yüksek akımda kontaklar arasındaki ark daralmasını

önlemenin iki yolu vardır. Bunlar; Radyal Manyetik Alan (Radial magnetic fields-RMF) ve Eksenel Manyetik Alan (Axial magnetic field-AMF) üreten kontakların kullanılmasıdır. RMF kontak teknolojisi; lorentz kuvvetinin etkisi altında kontakların yüzeyi üzerinde arkın dönmesi için yapıldığı radyal manyetik alan olarak adlandırılır. Arkın temas yüzeyindeki hareket hızı, arkın başarılı bir şekilde kesilmesi için çok önemlidir [2]. Yakın zamana kadar firmalar, devre kesiciler için vakum kesicilerinde her zaman spiral kontaklar kullanmıştır. Bu kontaklar bir radyal manyetik alan oluşturur, bu da azimutal bir elektromanyetik kuvvetin büzülmüş vakum arkına etki etmesine neden olur. Daralan ark, temasın yüzeyi üzerinde hızla hareket eder. Bu yüksek hız, daha az temas erozyonu olmasını sağlar ve ayrıca mevcut kesme kapasitesini önemli ölçüde artırır [3]. AMF kontak teknolojisinde manyetik alan ise kontak sistemine ilave edilmiş bir bobin tarafından oluşturulan ekseneldir. Arktaki akımın akışına paralel bir manyetik akı yoğunluğu uygulandığında, akışa dik yük taşıyıcıların hareketliliği önemli ölçüde azalır. Bu, özellikle iyonlardan daha küçük bir kütleyle sahip elektronlar için geçerlidir. Elektronlar manyetik kuvvet çizgileri etrafında dönerler, böylece arkın daralması daha yüksek akımlara doğru kaydırılır. Bu yöntemde ark, manyetik alanın belirli bir minimum eşik değerinin üzerinde yayılım modunda olacak ve dağınık arkı söndürmek kolay olacaktır [3].

Vakum devre kesicisi için geçmişten günümüze birçok kontak çeşidi geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları; düz kontak, spiral tip kontak ve eğik oluklu kap tipi kontaklardır. Düz kontak, düşük akımlı dağınık ark için kullanılır. Spiral tip kontak, aha az erozyon için arkın temas yüzeyleri arasında hızlı bir şekilde dönmesini sağlayan kontak çeşididir. Eğik oluklu kap tipi kontak ise arkın temas yüzeyleri arasında geniş ve düzgün bir şekilde yayılmasını sağlayan kontak çeşididir [4].

1.1 Literatör Araştırması

Miao vd. (2009) çalışmalarında, ark söndürme odasındaki elektrik alanı yüksek gerilim SF6 devre kesici sonlu elemanlar metodu kullanılarak hesaplanmıştır. ANSYS programı ile kontakların ve memenin şekilleri optimizasyon değişkenleri olarak seçilip eşit elektrik potansiyel hattı ve elektrik alan şiddeti dağılımları analiz edilmiş ve odanın iç yalıtımını etkileyen ana faktörler değerlendirilmiştir [5].

MAMUK (2019) çalışmasında, alternatif gerilimin/akımın düşük değerlerinde (özellikle sıfır geçiş noktalarında veya bu noktalara yakın bölgelerde) açma veya kesme işlemlerini gerçekleştirerek arkın tahribat etkisi azaltılmış olduğu değerlendirilmiştir [4].

Robin-Jouan ve Yousfi (2007) çalışmalarında, yeni bir elektrik alan hesabı kullanılarak SF6 gazının ark sönmelenmesi sonrasında SF6 dielektriğinde ayrılmış olan sıcak gazın uygun olmayan gaz kırılmalarına çözüm aranmıştır. Böylece yeni arıza alan hesapları denenerek bu elektrik devre kesicisinin performans artışına yönelik önemli sonuçlar alınmıştır [6].

Iturregi vd. (2011) çalışmalarında, düşük voltaj devre kesicisi (Low Voltage Circuit Breaker-LVCB) ark olgusunu ve ayrıca modelleme ve simülasyonu için matematiksel, fiziksel ve yazılım ihtiyaçlarının özelliklerini açıklanmıştır. Çalışmada ANSYS programı kullanılarak ince ve kalın ağ örgüsü ile iki farklı ark söndürme odası tasarlanmış ve bunların farklı sıcaklık dağılımları gözlemlenmiş; kaba ağ, sıcaklığın oldukça muntazam olduğu bir çözüme yol açarken, ince ağ örgüsü daha fazla sıcaklığa yol açtığı değerlendirilmiştir [7].

Li vd. (2019) çalışmalarında, ansys maxwell programı ile bir 12 kV iki durumlu kalıcı mıknatıslı vakumlu devre kesicisi tasarlanmıştır. Tasarımdaki parametrelerin seçiminin teorik bir analizini yapılmış ve ardından kalıcı manyetik çalıştırma mekanizmasının iki boyutlu modeli statik ve dinamik olarak analiz edilmiş, dinamik analizde, bu faktörlerin dinamik sonuçlar üzerindeki etkisi, optimizasyon sonuçları için teorik bir temel sağlayan kapasitans voltajı ve kapasitesinin değişimi simüle edilerek değerlendirilmiştir [8].

Iturregi vd. (2009) çalışmalarında, mevcut yüksek gerilim (High Voltage-HV) devre kesicileri gözden geçirilmiş, bunların içinde en çok kullanılan vakum ve SF6 devre kesicileri karşılaştırılmış ve birbirlerine göre Avantaj ve dezavantajları incelenmiştir. Yapılan bu çalışmada vakum devre kesicisinin daha çok çevre dostu olması, yapısının daha basit olması ve uzun ömürlü olması gibi avantajlara sahip iken SF6 devre kesicinin ise daha ekonomik olması ve daha iyi bir dielektrik kuvvetine sahip olması gibi avantaja sahip olduğu değerlendirilmiştir [9].

Ullah vd. (2017) çalışmalarında, geri kazanım voltajında yüksek artış oranı (High Rate of Rise of Recovery Voltage-RRRV)'nin geliştirilmiş değerleri, önerilen kesici ark modeli ile yüksek sıcaklık süper iletkeni (High-Temperature Superconductor-HTS) ekipmanının korunması için iyi bir olasılık göstermektedir. Elde edilen değerler, HTS kesici ark modelinin ark ve tasarım modeli parametrelerini optimize ederek RRRV üzerinde daha düşük etki (%70'e kadar) sağlayabildiğini göstermiştir. HTS kesici için kapsamlı ark modeli, bu çalışmada kesinti verimliliğini ve bunun mevcut kesinti çalışması üzerindeki etkisini değerlendirmek için önemli bir rol oynadığı değerlendirilmiştir [10].

Yu vd. (2019) çalışmalarında, seri ve paralel yapıya sahip yeni bir 363 kV/5000 A/63 kA SF6 gaz izolasyonlu vakum devre kesicisi (Gas Insulate-Vacuum Circuit Breaker ,GI-VCB) önerilmiştir. Sıcaklık artışını analiz etmek için, gerçek boyuta dayalı olarak bir 3D bağlı elektromanyetik-termal-akışkan modeli kuruldu ve nominal koşul altında sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplandı. Hesaplamaya göre, elektromanyetik alan profili her bir iletim yolundaki akım yoğunluğu dağılımı hakkında fikir verdi. Akım yoğunluğunun ve manyetik alanın dağılımları ansys maxwell ile gösterilmiştir. Simülasyon sonuçları, sıcak noktanın 102,2 K sıcaklığa sahip vakum devre kesicisi kontakları olduğunu, baraların sıcaklığı ise 92,3 K'ye ulaştığını göstermektedir. Ayrıca kontak direncinin, kısa devre akımının sıcaklık artışı üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Son olarak simülasyon sonuçları prototip üzerinde sıcaklık artışı deneyi ile doğrulandı. Önerilen model kullanarak, sıcaklık artışı ve sıcak nokta alanı önceden tahmin edilebilir, bu da sonuçta 363 kV GI-VCB'nin tasarımını ve performansı değerlendirilmiştir [11].

Mateev vd. (2014) çalışmalarında, yüksek voltajlı vakum odasının elektrik alan ve termal alan dağılımlarının 3D modeli geliştirilmiştir. Birleştirilmiş elektrik-termal alan problemi formüle edilmiş ve vakum odasındaki elektrik alan ve sıcaklık dağılımlarını hesaplamak için sonlu elemanlar yöntemi uygulanmıştır. Elektrik alan ve elektrik alan şiddeti, vakum kesici odasının tam kesit görünümü olarak sunulmuştur. Sonuçlar, kontak parçaları (1-8 mm) arasındaki farklı mesafeler içindir, gerilim tepe değeri 12 kV'dir. Modeldeki elektrik ark deşarj iletkenliği, elektrik alan yoğunluğu ve ark sıcaklığı ile doğrusal olmayan bir şekilde ilişkilidir [12].

Fink vd. (2000) çalışmalarında, dört kutuplu bir alan düzenlemesine dayanan yeni bir eksenel manyetik alan (EMA) kontak tasarımı ve özellikleri sunulmuştur. Sonlu Eleman programı yardımıyla gerçekleştirilen üç boyutlu alan simülasyonları yapılmıştır. Eksenel manyetik akı yoğunluğunun büyüklüğü ve ark sırasındaki akım ve manyetik akı yoğunluğu arasındaki faz kayması ve kontak plaka içindeki akım akışı incelenmiştir. Dört kutuplu EMA'nın yüksek akım fazı sırasında ark davranışı üzerindeki etkisi, yüksek hızlı filmler ve ark sonrası temas yüzeyi analiz edilmiştir. Kesinti performansı 12 kV'tan 63 kA'e kadar kısa devre testleri ile değerlendirilmiştir [13].

Fischer vd. (2021) çalışmalarında, kesiciler için farklı ortak temas malzemesi bileşimleri üzerindeki eksenel manyetik alanların etkisi araştırılmıştır. Diğer yayınlarda kullanılan sentetik test devrelerinin aksine yüksek besleme voltajları ile bu katkıya basit bir dirençli yük devresi eklenmiştir. Ölçümler, düşük manyetik akı yoğunluklarının kesme akımlarını %20 ile %30 oranında azaltabildiği değerlendirilmiştir [14].

Xue vd. (2018) çalışmalarında, 126 kV vakum kesicinin kontak yapısının manyetik alanı ve arkı incelenmiş ve test edilmiştir. Kontak yapısının manyetik alan değerleri ölçülüp simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Kontak yapısının vakum arkının davranışları ark deneyi ile incelenmiş, 126 kV vakum kesici bu kontak yapısı ile üretilmiş ve 40 kA kısa devre akım kesme testi yapılmıştır. Test ve doğrulamadan sonra, vakum kesici 40 kA'lık 20 kısa devre akımını kestiği ve testten sonra vakum kesicinin durumunu analiz edilmiştir. Bir dizi araştırma ve doğrulama yoluyla, bu vakum kesici temas yapısının 126 kV vakum kesicinin kesme performans gereksinimlerini tamamlayabildiği değerlendirilmiştir [15].

Liu vd. (2006) çalışmalarında, yarık tipi EMA vakum kesiciler için yeni bir kesme kapasitesi modelini tanıtmaktadır. Bu, EMAMI slot tipi kesme kapasitesinin, EMA gücündeki temas alanı süreleri ile orantılı olduğu anlamına gelir. Temas aralığı arttığında EMA zayıflar. Dolayısıyla modele göre kontak aralığının artması ile kesme kapasitesi azalmaktadır. Model, 48 mm, 58 mm ve 66 mm kontak çaplarında ve 8 mm, 11 mm ve 14 mm kontak aralıklarında kısa devre akım kesintisi testleri ile doğrulanmıştır. Model tahminleri ile deneysel sonuçlar arasında bir miktar fark olmasına rağmen, model tahminleri, 8 mm'lik kontak aralığında test edilen vakum kesicilerin anma kısa devre kesme kapasitesine yakındır. Yeni modeli desteklemek için

daha fazla test sonucuna ihtiyaç vardır ve modeli geliştirmek için EMA dağılımı dikkate alınması değerlendirilmiştir [16].

Yu vd. (2012) çalışmalarında, 126 kV'luk bir vakum devre kesicilerinde temas darbe fenomenini araştırmaktır. PVDF (polivinilden florür) piezoelektrik sensörler, 126 kV'luk bir vakumlu devre kesicinin darbe kuvvetini 1,5 m/s'lik bir kapanma hızında ölçmek için kullanıldı. Ayrıca, ANSYS / LS-DYNA yazılımı kullanılarak 126 kV'luk bir vakum kesicide kontak etkisinin sonlu eleman analizi simülasyon modeli kurulmuştur. Deneysel sonuçlar, 126 kV'luk bir vakumlu devre kesicinin maksimum temas darbe kuvvetinin 1.5 m/s kapama hızında yaklaşık 105 N olduğunu göstermiştir ki bu simülasyon sonuçlarıyla iyi bir uyum içindedir. Simülasyon sonuçları ayrıca maksimum darbe kuvvetinin, temas sıçrama sürelerinin ve maksimum temas gerilmelerinin, temas şekli, temas malzemesinin elastik modülü, çarpma hızı ve temas yayı kuvveti gibi bazı vakum kesici parametreleriyle ilişkili olduğunu göstermektedir [17].

Krasuski vd. (2019) çalışmalarında, hareketli ve sabit kontakların karşılıklı yönelimleri (dönüşü) incelenmiştir. Bu yönelim, aksel manyetik alan dağılımı üzerinde bir etkiye sahip olabilir. Bu, sonlu elemanlar yöntemine dayalı maxwell (ANSYS) yazılım paketi kullanılarak sayısal olarak analiz edilmiştir. Analizde kendi (patentli) kontak tasarımı dikkate alınmaktadır. Bununla birlikte, EMA'nın ark davranışı üzerindeki faydalı etkisi, vakum devre kesicisi tasarımcıları için iyi bilinmektedir, bu fenomenin açıklaması (literatürde) oldukça nadiren ve çok gelişigüzel bir şekilde açıklanmıştır. Bu nedenle, EMA'nın vakum ark difüzyonunda rolünü açıklayan basitleştirilmiş bir model bu çalışmanın başında kısaca değerlendirilmiştir [18].

Krasuski vd. (2018) çalışmalarında, bir yüksek gerilim (High Voltage-HV) devre kesici için bir vakum odası modeli sunulmuştur. Vakumlu devre kesici üreticileri, akım kesme işlemi sırasında elektrik ark difüzyonunu stabilize etmek için aksel manyetik alan uygulanmıştır. Model, mekanik ve elektriksel dayanıklılığını sağlamak için analiz edildi ve kısmen test edildi. Kısa devre koşullarında vakum odasının termal davranışının ön hesaplamalarının sonuçları, temas plakaları arasındaki manyetik alan dağılımının yanı sıra temas boşluğu ve vakum odasının içindeki dielektrik gerilme gösterilmektedir. Bipolar kontaklar sökülebilir bir vakum odasında test edildi ve sonuçlar değerlendirildi [19].

Zhang vd. (2019) çalışmalarında, sıralı arıza tespiti ve konumu için kullanılan yeni bir darbe kapamalı vakum anahtarı (Pulse Closing Vacuum Switch-PCVS) sunmaktadır. İlk olarak, PCVS'nin uygulama arka planı olarak, arıza tespit ve tespit sisteminin temel teorisi kısaca tanıtılmaktadır. Ardından, PCVS, çalışma süreci ve prensibinin ayrıntılı analizine dayalı olarak analiz edilmiş ve tasarlanmıştır. Tasarlanan PCVS'nin performansını doğrulamak için, ANSYS Maxwell ve ANSYS Simplorer kullanılarak çok fiziksel alanlı ortak simülasyon sayısal modeli uygulandı. Son olarak, simülasyon sonuçlarını doğrulamak için kalıcı mıknatıs kapatma ve itme kuvveti açma ile bir PCVS prototipi geliştirildi. Simülasyonlar ve deneyler, hareketli temas ile statik temas arasındaki temas süresinin <6 ms olarak kontrol edilebileceğini onaylandı. Bu, arıza tespit ve tespit sistemi için darbe kapama teknolojisi gereksinimini karşılayacağı değerlendirildi [20].

Ding vd. (2017) çalışmalarında, anma kısa devrenin açılması durumunda devre kesicinin elektrik itmesini analiz etmek için elektromanyetik simülasyon yazılımı Ansoft Maxwell kullanıldı. Kırılma akımı CREO tarafından oluşturulan 3D model ADAMS'a aktarılarak Ansoft Maxwell'de analiz edilen kısıtlamalar, temas kuvveti ve elektrik itme kuvveti 3D modele eklendi. Daha sonra açık devre anma kısa devre kesme akımı durumunda vakumlu devre kesicinin açma performansı elde edildi. Simülasyon sonuçları, açık devre anma kısa devre kesme akımı durumunda devre kesicinin performans gereksinimlerini hala karşılayabileceği değerlendirildi [21].

2. DEVRE KESİCİLER

2.1 Kesicinin tanımı

Devre kesicileri, orta ve yüksek gerilim güç sistemlerinde kullanılan, boşta ve yükte açma kapama yapabilen, kısa devre veya aşırı akım gibi durumlarda ise devreyi otomatik olarak kesmeye yarayan bir koruma elemanıdır. Bir kesicinin en büyük görevi, kapalı durumda güç akışını sağlamak ve açık durumda ise güç akışını keserek can ve mal güvenliğini sağlamaktır. Bir devre kesicisi, kapalı konumda iyi bir iletken, açık konumda iyi bir yalıtkan özelliği olmalı, kısa sürede kapalı pozisyondan açık pozisyona geçmeli, anahtarlama sırasında aşırı gerilim oluşturmamalı ve çalışma sırasında yüksek güvenilirlikte olması gibi temel özelliklere sahip olmalıdır [34].

Anahtarlama cihazı olarak da tanımlanabilecek devre kesicilerin en önemli görevi kullanıldığı elektrik güç sistemindeki kontrolü sağlamasıdır. Sistemi kontrol etmek ve korumak için kullanılacak olan cihazların iki farklı çalışma modu bulunur. Hem manuel hem de otomatik olarak çalışan devre kesiciler, farklı sistemlerdeki elektrik arkının sorunsuz ve güvenli bir şekilde kesilmesi için kullanılır.

2.2 Kesici Çeşitleri

Elektrik güç sistemlerinin büyüklüğüne ve kullanım alanlarına göre farklı devre kesicileri tercih edilmektedir. Ark söndürme uygulaması için tercih edilebilecek dört adet devre kesici türü vardır. Bunlar;

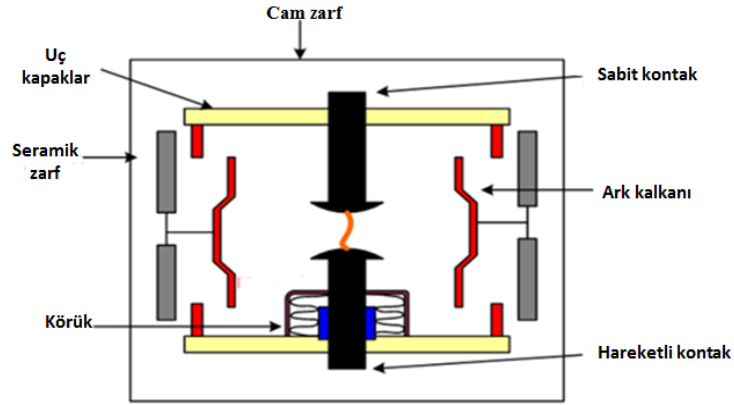
- Vakumlu Kesiciler
- SF6 Gazlı kesiciler
- Havalı Kesiciler
- Yağlı Kesiciler

olarak sınıflandırılırlar.

2.2.1 Vakumlu devre kesici

Vakum devre kesici, anahtarlama sırasında meydana gelen arkı söndürmek için hava veya gaz kullanılmaz. Bu kesici türünde, ark söndürme hücresi havası tamamen boşaltılmış bir vakumdan oluşur. Ortam basıncından dolayı, akım sıfır olduğunda iyonlaşan buhar hızlı bir şekilde kontak yüzeylerine yapışarak bir yalıtım tabakası oluşturur ve ark bu şekilde söner. Bir vakumlu devre kesicide, ark söndürme ortamı olarak 10^{-5} ila 10^{-7} torr mertebesindeki vakum kullanılır. Temel olarak vakum, gazın bulunmadığı atmosferik basıncın altındaki bir basınçtır [38]. Vakum devre kesici, 1970'lerde yağlı devre kesicilerin ve ardından 1980'lerde ise SF6 devre kesicilerin yerini almıştır. Bu kesiciler, diğer tüm ortamlardan daha yüksek yalıtım gücüne sahiptir. Vakum devre kesici akımın kesilmesini ilk sıfır akımda yapar. Yarım döngüde akımı kestiği anlamına gelir.

Vakum devre kesicileri yapı olarak Şekil 2.1'de gösterildiği gibi uç kapaklarla birleştirilmiş camdan yapılmış bir dış zarfa sahiptir. Bu cam koruyucu, kesiciyi gözlemlemek için kullanılır, eğer renk süt beyazına dönerse, kesicinin vakumunu kaybettiğini gösterir. Sabit kontak ve hareketli kontak olarak adlandırılan iki kontak şekilde görüldüğü gibi yerleştirilir. Ana ark işlemi bu iki kontak arasında gerçekleşir.

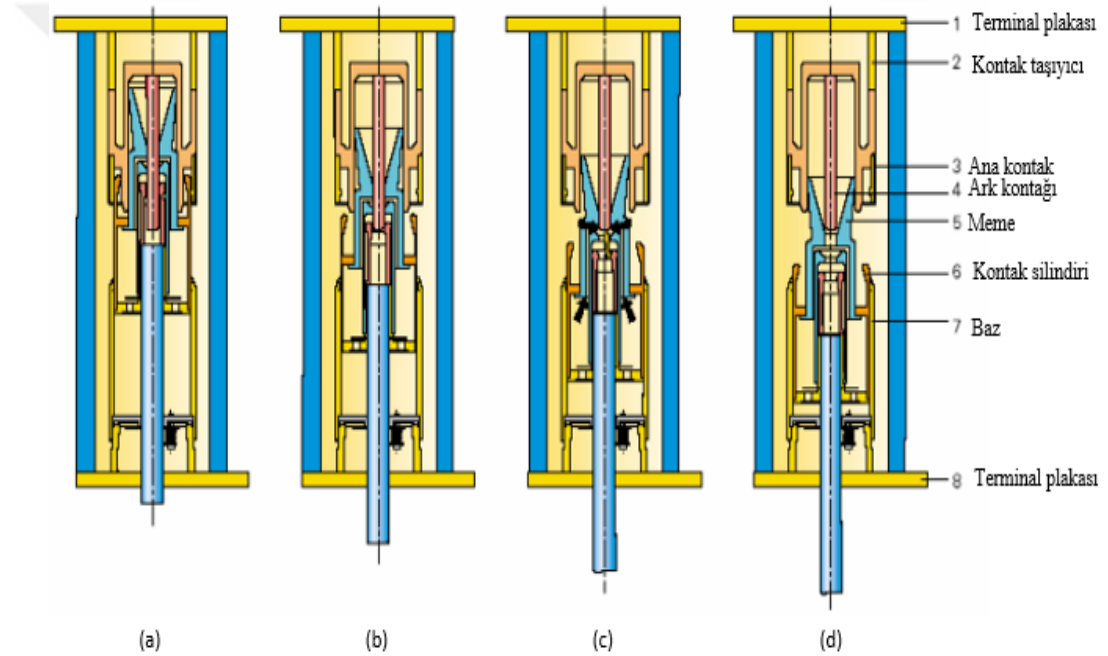


Şekil 2.1: Vakumlu devre kesicisi [38].

Hareketli kontak, paslanmaz çelikten yapılmış metal körüklerle bağlanır. Bu körükler, hareketli elemanı yukarı ve aşağı hareket ettirmek için kullanılır ve bunları çalıştırmak için körüklere bir yay mekanizması bağlanır. Metal buharının dış zarfa ulaşmasını önlemek için paslanmaz çelikten yapılmış püskürtme kalkanı ve odayı yalıtım için seramik zarf da mevcuttur.

2.2.2 SF6 havalı kesiciler

Hareketli kontakın konik yapısı sayesinde, kontaklar ayrılmaya başladığı andan itibaren arka tarafta sıkışan sülfür hekzaflorür gazı (Sulphur hexafluoride gas-SF6) oluşan arkın üzerine hızlı bir şekilde püskürtülür. SF6 gazının içerisinde kükürt ve florla birlikte elektron iyonu da yayar. Bu sırada negatif flor iyonları ortamdaki elektronları yakalayarak ark oluşumunu sınırlayacak şekilde sıcaklığın düşmesini sağlar ve bunun sonucunda ark söner. SF6 gazı yalıtkan olduğu için kontaklar arası mesafe azdır. Bu da kesiciye hızlı açma kapama olanağı sağlar. 10000 açma kapamaya kadar sorunsuz bir şekilde çalışır. 12 kV-500 kV arası gerilimlerde kullanılmaktadır [35]. Bir SF6 devre kesicisinin kesme prensibi ve yapısı Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

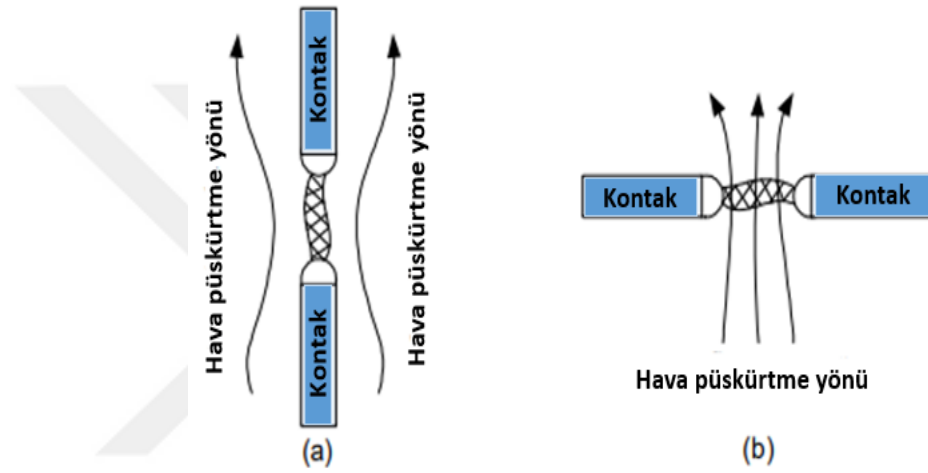


Şekil 2.2: SF6 gazlı kesicisinin ark söndürme prensibi [34].

SF6 devre kesicisi sabit ve hareketli kontaklardan oluşur. Bu kontakların her ikisi de içi boş silindirlere sahiptir. Ana ark işlemi, şekil’de gösterildiği gibi ark odasında yapılır. Bir SF6 gaz deposu, bağlı bir valf ile ark odasına bağlanır. Şekil 2.2.a’da kontaklar kapalı konumda, b ve c’de kontaklar birbirlerinden ayrılmaya başladığında SF6 gaz tankına bağlı valf açılacak ve artık basınçlı gaz ark odasına gelerek ark boyunca akacak ve Şekil 2.2.d’de ark söndürme işlemi gerçekleşmiştir.

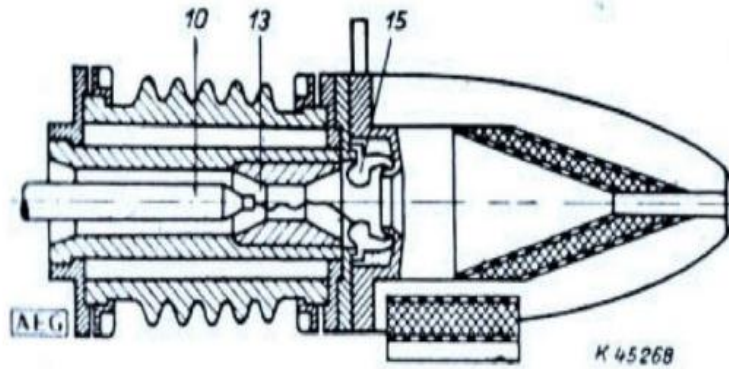
2.2.3 Basınçlı havalı kesiciler

Arıza durumunda açma-kapanma esnasında kontak yüzeylerinde oluşan arkı söndürmek için basınçlı bir hava kullanılan kesici türüdür. 630 A ile 5000 A'e kadar kullanılırlar [36]. Hava üfleme devre kesicilerin ark kesintisi, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi aksel veya çapraz yönlerde yüksek basınçlı hava akışının verilmesiyle gerçekleştirilir. Aksel tipte ark, iyonizasyon sıfır seviyesine inene kadar aksel yönde soğutulur. Akım daha sonra bu noktada kesilir. Aksel tipin aksine, çapraz tip havayı sıkıştırarak ve ark oluşu bölmesine üfler [35].



Şekil 2.3: Hava üfleme yönü: (a) aksel yön, (b) çapraz yön [35].

Şekil 2.4'te bir basınçlı havalı kesicinin kontak yapısı görülmektedir.



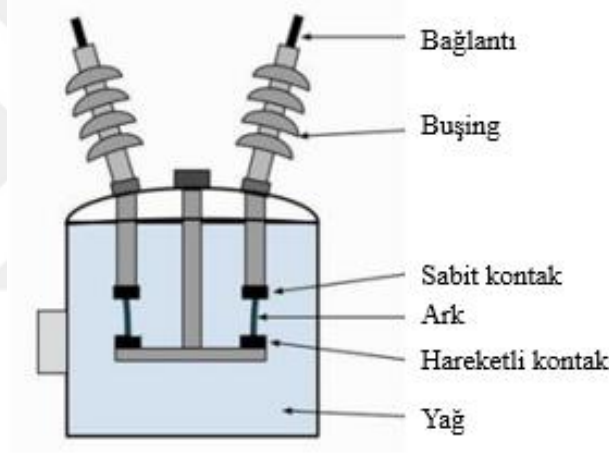
Şekil 2.4: Basınçlı hava kesicinin kontak yapısı [35].

2.2.4 Yağlı kesiciler

Şekil 2.5'te görüldüğü gibi ark söndürme hücresi içerisinde yağ bulunmaktadır. Açma esnasında kontaklar arasında oluşan ark ısıyı yağı gaz haline getirerek bir balon şeklinde boşluk oluşur ve kontakların açılmasıyla birlikte bu gaz balonu büyüyerek üst kapağa doğru hareket eder ve bunun sonucunda oluşan basınç arkı söndürür [35].

İki çeşit yağlı kesici mevcuttur. Bunlar; tam yağlı kesici ve az yağlı kesicilerdir.

Yağlı kesiciler olası bir patlama sonrasında çevresel sorunlara sebep olabileceği için daha düşük voltajlarda tercih edilirler [34]. Sürekli açma kapanmadan sonra oluşan ark yağın özeliğini belli bir süreden sonra kaybettirir. Bu nedenle manevranın az olduğu yerlerde tercih edilirler.



Şekil 2.5: Yağlı kesici kontak yapısı ve ark söndürme hücresi [35].

3.VAKUM DEVRE KESİCİSİ

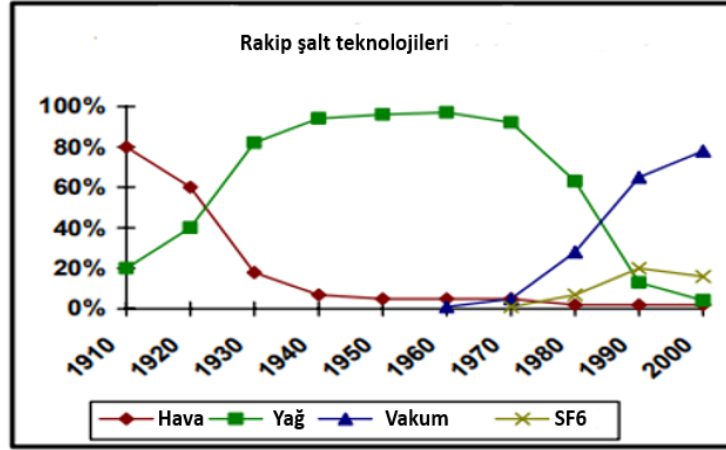
Ark söndürme ortamı olarak havası tamamen boşaltılmış vakum kullanan bir kesiciye vakumlu devre kesicisi (Vakuum Circuit Breaker-VCB) denir. Bu kesicide, hareketli ve sabit kontak, kalıcı olarak sızdırmaz olan bir vakum içine alınır. Kontaklar yüksek vakumda ayrıldığı için ark söner. Ark yalıtımı diğer kesici türleri gibi fiziksel değil, ısınma sonucunda oluşan iyonlaşma buharının metal yüzeylerine hızlı bir şekilde yoğunlaşarak gerçekleşir [24].

Genelde 11 kV ile 33 kV arasında değişen orta gerilim şebekelerinde kullanılır.

3.1 Vakumlu Devre Kesicisinin Tarihçesi

Geçtiğimiz son yüzyıl boyunca devre kesicileri, yüzlerce amperi kesen basit bıçaklı anahtarların olduğu bir elektrik panosundan on binlerce amperi kesebilen modern devre kesicilerine kadar evrim geçirdi. Orta gerilim şalt sistemi 1 kV ile 38 kV arasında değişmekte ve teknolojinin gelişimiyle beraber ark için tercih edilen ortamda değişmektedir [22].

Başlangıçta ark söndürme işlemi hava ile yapılıyordu, 1920'lerde bu işlem yağ ile yapılmaya başlandı ve 1970'lerde Vakum 'un ortaya çıkmasına kadar böyle devam etti. 1980'lerde ve 1990'larda başka bir teknoloji olan SF6 gazlı kesici geliştirildi. Her iki teknoloji de şuan mevcuttur, ancak vakum daha çok tercih edilmektedir [23]. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi havalı, yağlı, SF6 ve vakumlu devre kesicilerin 1910-2000 yılları arasındaki kullanım oranları görülmektedir.



Şekil 3.1: Kesicilerin gelişim süreçleri [23].

Şekil 3.1’de gösterildiği gibi vakumlu devre kesicisi diğer kesici türlerine göre daha geç keşfedilmesine rağmen bugün en çok kullanılan kesici türü olduğu görülmektedir.

3.2 Vakumlu Devre Kesicisinin Özellikleri

Orta gerilimde ark söndürme yöntemleri içerisinde en güvenilir metot olarak bilinen vakum ortamında ark söndürme yöntemi, kullanım alanı gün geçtikçe daha yaygın hale gelmektedir. Vakum, ark söndürme ortamı olarak tartışmasız bir üstünlüğe sahiptir. Malzeme teknolojisinin gelişimiyle, bugün kesicilerde 126 kV gerilim seviyelerine kadar vakum tüpleri kullanılmaktadır. Yakın gelecekte bu hedef olarak 170 kV ve üzerinde vakumlu devre kesicilerin geliştirilmesi planlanmaktadır [25].

Vakumlu devre kesicisi, diğer devre kesicilerine kıyasla ark söndürme işlemi için yüksek bir yalıtım ortamına sahiptir. Kesici içindeki hava basıncı yaklaşık 10^{-4} seldir ve bu basınçta kesicide çok az molekül bulundurulur. Bu devre kesicinin başlıca iki çok önemli özelliği vardır.

1-Yüksek yalıtım gücü: Devre kesicilerde kullanılan diğer çeşitli yalıtım ortamlarına nazaran vakum daha üstün bir dielektrik ortamına sahiptir. Yüksek basınçta kullanılan hava ve SF6 dışındaki tüm ortamlardan daha iyidir.

2-Bir vakumda kontaklar birbirinden ayrılmaya başladığı esnada ark meydana geldiğinde, ilk akım sıfırında bir kesinti oluşur. Ark kesintisi ile dielektrik dayanımları diğer kesici türlerine göre çok daha iyidir.

3.3 Vakumlu Devre Kesicisinin Avantajları

Bu devre kesicisinin diğer kesici türlerine nazaran birçok avantajlara ve dezavantajlara sahiptir. Bunlardan bazı avantajları;

- İlave yağ veya gaz dolumu gerektirmez ve periyodik yeniden doldurmaya gerek duymazlar.
- Ark söndürme hücresi içinde yanıcı veya parlayıcı herhangi bir madde bulunmadığı için angın tehlikesi veya yangın riski yoktur.
- Ark enerjisi diğer kesici türlerine göre daha düşüktür.
- Uygun kontak ayrılmasından sonra sadece yarım döngü veya daha az ark meydana gelen akım kesintilerinde yüksek dielektrik mukavemetinin hızlı geri kazanımı vardır.
- Çalışma esnasında gürültü çıkarmama özelliği vardır.
- Yıldırım darbelerine karşı dayanıklıdır.
- Yapısından dolayı neredeyse hiç bakım gerektirmez ve bakımları kolaydır.
- Boyutları küçüktür.
- Kesici ünitesi kompakt ve bağımsızdır. Gerekli herhangi bir yönde kurulabilir.

Yukarıdaki özelliklerden dolayı, ekonomik avantajla birlikte, vakumlu devre kesiciler diğer kesicilere göre daha avantajlı kabul görülmektedirler.

Dezavantajları;

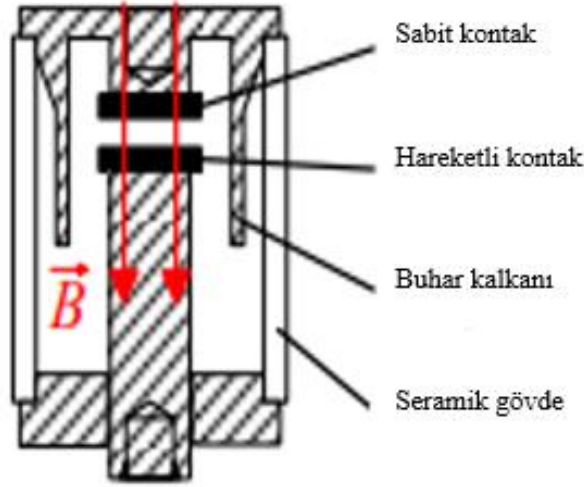
- Vakum kesicilerin üretimi için yüksek teknoloji gereksinimine ihtiyaç vardır.
- Düşük mıknatıslanma akımlarının belirli bir aralıkta kesilmesi için ek aşırı gerilim baskılayıcılara ihtiyaç duyar.
- Geçici hasar veya arıza nedeniyle vakum kaybı meydana gelmesi durumunda, tüm kesiciyi işe yaramaz hale getirir.
- Voltaj aralığı sınırlı olduğundan, SF6 devre kesici gibi daha yüksek voltaj seviyeleri için kullanılamazlar.
- 36kV'dan daha yüksek voltaj seviyeleri için kullanılırlarsa, bazı ünitelerin seri bağlanması karmaşıklığı meydana getirir ve maliyeti arttırır.

3.4 Vakumlu Devre Kesicisinin Uygulama Alanları

Vakum devre kesicinin kısa aralığı ve mükemmel geri kazanımı nedeniyle, birçok endüstriyel uygulamada çok yüksek hızlı anahtarlar olarak çok kullanışlıdır. En az bakım gereksinimi nedeniyle, bu kesiciler 11 ila 33 kV arasında voltaj gerektiren sistemler için çok uygundur.

3.5 Vakumlu Devre Kesicisinin Yapısı

Diğer elektrikli devre kesicilere nazaran yapımı oldukça basittir. Temel olarak şekil 3.2’de görüldüğü gibi sabit kontak, hareketli kontak, yalıtkan seramik muhafaza ve ark söndürme odası içine yerleştirilmiş ark kalkanından oluşur. Vakum kesicinin yalıtım gücünün tasarımı, esas olarak iç bileşenlerini makul bir şekilde düzenlemektir, böylece elektrik alanı dağılımı daha düzgün olur, kontaklar arasındaki elektrik alan kuvveti azalır ve ark söndürme odasının yalıtım seviyesi daha iyi olur [26].



Şekil 3.2: Sabit temas tarafında buhar kalkanı olan bir vakum kesicinin kesiti [14].

Vakumlu devre kesicinin dışardan incelenebilmesi için dış zarfı camdan yapılmıştır. Cam, gümüşü aynanın orijinal yüzeyinden sütlü hale gelmişse kesicinin vakum kaybettiğini gösterir. Kesicinin sabit ve hareketli kontakları ark kalkanının içine yerleştirilmiştir. Sızdırmazlık sırasında bir vakum kesicideki basınç yaklaşık 10^{-6} torr'da tutulur. Devre kesicinin hareketli kontakları, çalışma voltajına bağlı olarak 5 ile 10 mm'lik bir mesafe boyunca hareket eder. Paslanmaz çelikten yapılmış metal körükler hareketli kontakları hareket ettirmek için kullanılır.

Metalik körüklerin tasarımı çok önemlidir çünkü vakumlu devre kesicinin ömrü, bileşenin tekrarlanan işlemleri tatmin edici bir şekilde gerçekleştirme yeteneğine bağlıdır. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi bir vakum devre kesicinin iç yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Vakum devre kesicinin iç yapısı [35].

3.6 Vakum Devre Kesicinin Kontak Yapısı

Vakum kesicinin kesme kapasitesi, elektrik ömrü, basınç dayanımı, dayanım akımı, yük akımı kapasitesi ve diğer performanslar, formun kontak yapısı ve malzemenin tipi ile belirlenir. Bu nedenle ark odası tasarlanırken kontak yapı tasarımı ve malzeme seçimi çok önemlidir. Analize göre, çanak şeklindeki uzunlamasına manyetik kontak seçimi en uygun olanıdır [29].

Şekil 3.4'te bir vakumlu devre kesicisinin kontak yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.4: Vakum devre kesicisinin kontak yapısı [23].

Vakumlu Devre Kesicisinin Kontak yapımında kullanılan Malzemelerin Temel Özellikleri;

- Temas direnci mümkün olduğunca az olmalı
- Yoğunluğu yüksek olmalı
- Erken ark tahribatının oluşması için termiyonik fonksiyon yüksek olmalı
- Elektrik iletkenliği yüksek olmalı
- Isıl iletkenlik, ark boyunca üretilen büyük ısıyı hızla dağıtmak için yüksek olmalı
- Kaynak eğilimi düşük olmalı
- Akım doğrulama seviyesi az olmalı
- Yüksek ark direnci özelliği olmalı
- Ark erozyonunu azaltmak için kaynama noktası yüksek olmalı
- Daha uzun ömürlü olması için gaz içeriği düşük olmalı
- Düşük buhar basıncı, bölme içindeki bölünemeyen metal buharı miktarını azaltmak için yeterli olmalıdır.

3.7 Vakum Devre Kesicisinin Kontak Yapımında Kullanılan Malzemeler

Anahtarlama kapasitesini arttırmanın en önemli yollarından biriside kontak yapımında kullanılan malzeme seçimidir.

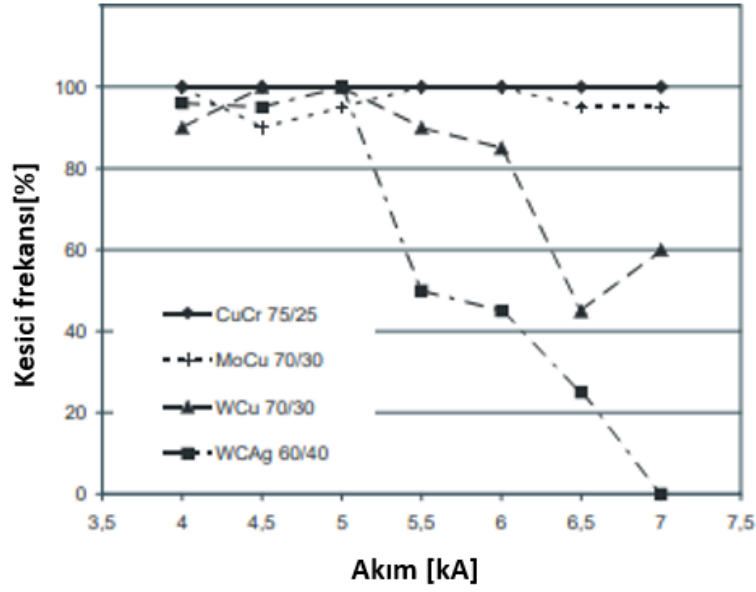
Devre kesicileri elektrik devrelerini istenen zamanda sorunsuz bir şekilde açma–kapama yapmak zorundadırlar. Şebekelerdeki endüktif veya kapasitif empedanslar faz açısını ve açma kapama şartlarını etkileyebilirler. Kontaklar mümkün olduğunca iyi elektrik iletkenliğine sahip olmalıdırlar. Uzun açma kapama periyotlarından sonra bile kontaklara açma-kapama komutu verildiğinde çok kısa tepki süresine sahip olmalıdırlar. Bazıları hizmet süreleri boyunca yüz binlerce kez hatta milyonlarca kez açma-kapama yapmaları gerekir [27].

Vakum ilkesine dayalı devre kesicilerin geliştirilmesinde, en iyi kontak malzemesi için yalnızca çok bileşenli çok fazlı malzemelerle tatmin edici bir şekilde karşılanabileceği tespit edildi [28]. Genellikle 3 sınıf malzeme kullanılır ve üretilir;

- Tungsten bazlı ve molibden bazlı malzemeler
- Bakır-demir malzemeler
- Bakır-krom malzemeleri

Kullanılacak malzeme, çok sayıda anahtarlama işleminde düşük erozyon kayıpları, düşük kesme akımları, HF geçişleri oluşturma eğiliminin düşük olması ve aynı zamanda tatmin edici bir söndürme kapasitesi gereksinimlerini karşılamalıdır. Genellikle CuCr, WCu, MoCu, WCAg gibi refrakter bileşenlere dayalı malzemeler kullanılır, ancak yapılan çalışmalar neticesinde bunlar içinde en uygun olan CuCr malzemesidir. Kontak malzemesi olarak termik emisyonu olan madenler, yeteri kadar maden buharı verdiklerinden, arkın varlığını sürdürebilmesi için uygundur. Bu tür kontaklar ile elde edilen kopma akımı değerleri, istenildiği gibi düşüktür. Fakat yüksek buhar basıncı çıkardıklarından dolayı arkın sönmesi zorlaşır ve tekrar parlama tehlikesi meydana gelir. Bu alandaki teknolojik gelişmeler sonucunda sinterlenmiş Cr-Cu kontaklar ile kopma akımı 1 A seviyelerine kadar düşürülebilmektedir [1].

Şekil 3.5'te bazı kontak malzemeleri karşılaştırılmıştır. Bu kontaklar, 4 kA'de 25 ardışık açma işleminden oluşan bir test dizisine ve ardından 500 A'lık adımlarla her biri 4,5 kA ila 7 kA arası akımlara sahip 10 işleminden oluşan bir test dizisine tabi tutulmuşlardır.



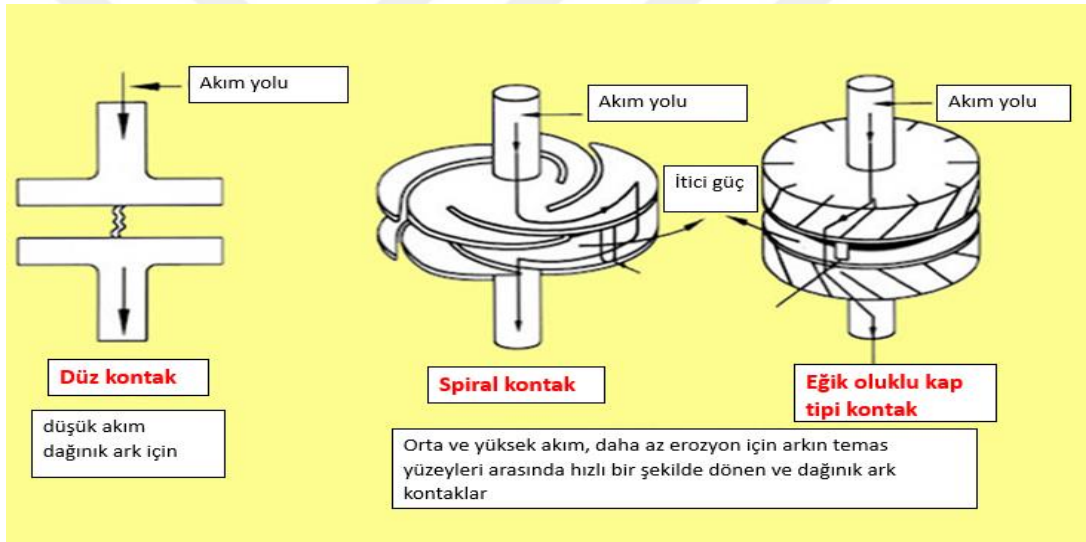
Şekil 3.5: Farklı malzemeler için akımın bir fonksiyonu olarak kesinti frekansı [30].

Şekil 3.5'te kullanılan malzemeler için bir değer düzenlemesini göstermektedir [30]. CuCr 25, mükemmel anahtarlama kabiliyetini gösterir. Akımın tüm değerleri için kesinti frekansı %100'dür. MoCu 30 için hemen hemen aynı kesinti frekansı bulunabilir. WCu 30, MoCu gibi 6 kA'ya kadar benzer yüksek bir kesinti frekansına sahiptir. 6 kA değerinin düştüğü bir sınır gibi görünüyor. WCAg 40'ın eğrisi benzerdir, ancak 5 kA'da sınıra zaten ulaşılmıştır. 5,5 kA'dan itibaren kesme kabiliyeti %50 veya altındadır. Sadece kırılma kabiliyeti göz önüne alındığında CuCr veya MoCu en iyi malzemelerdir.

4. VCB FARKLI TİP KONTAK YAPILARININ İNCELENMESİ

4.1 Düz Kontak, Spiral Tip Kontak ve Eğik Oluklu Kap Tipi Kontak yapıları

Vakum devre kesicisi Şekil 4.1’de görüldüğü gibi düz Kontak, spiral tip kontak ve eğik oluklu kap tipi kontak çeşitlerine sahiptir. Düz kontak, düşük akımlı dağınık ark için kullanılır. Spiral tip kontak, daha az erozyon için arkın temas yüzeyleri arasında hızlı bir şekilde dönmesini sağlayan kontak çeşididir. Eğik oluklu kap tipi kontak ise arkın temas yüzeyleri arasında geniş ve düzgün bir şekilde yayılmasını sağlayan kontak çeşididir.



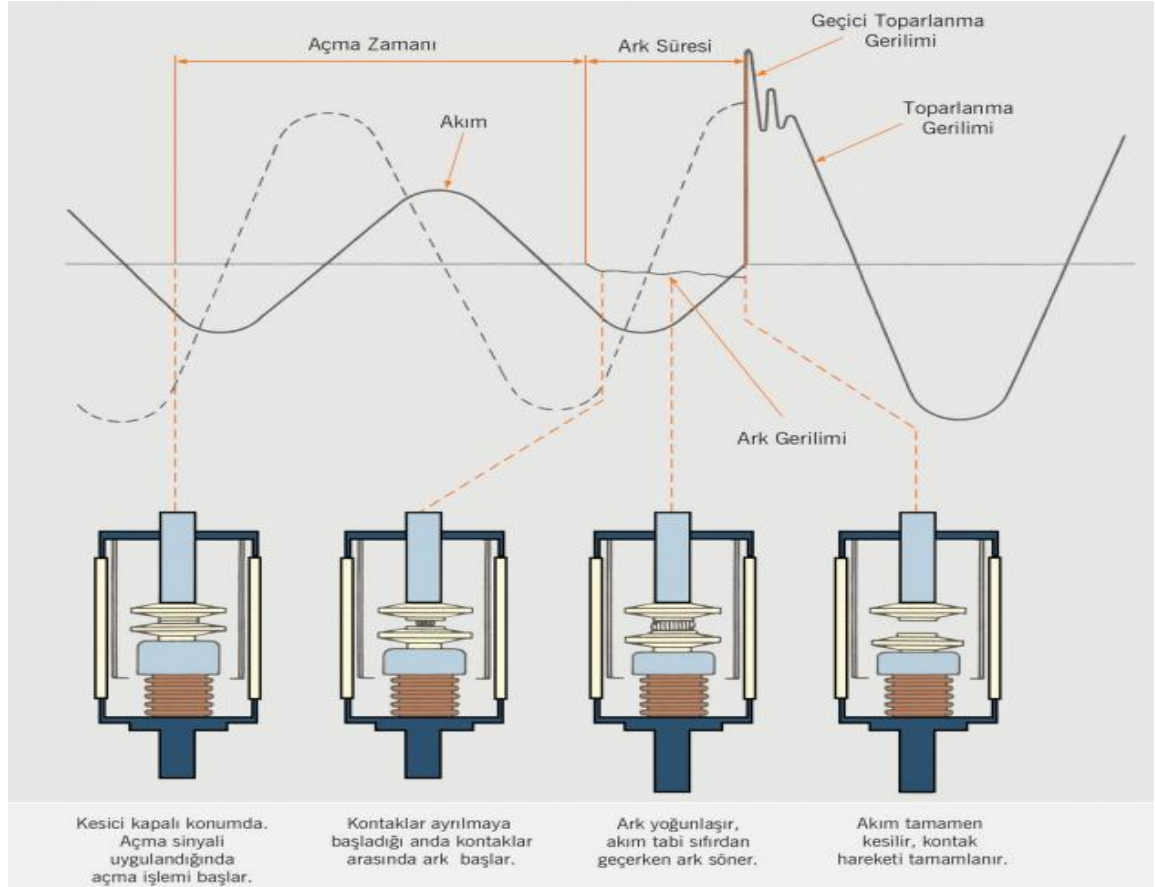
Şekil 4.1: Düz kontak, spiral tip kontak ve eğik oluklu kap tipi kontaklar [37].

4.2 VCB Çalışma Prensibi ve Ark Söndürme İşlemi

Elektrik güç sistemlerinde kullanılan devre kesicisi türlerinin en büyük sorunlarından bir tanesi ark söndürme olayıdır. SF6 kesicilerde ark söndürme SF6 gazı ile yapılmakta, yağlı kesicilerde bu işlem yağ ile yapılmaktadır. Vakum devre kesicilerde ise ark söndürme işlemi için herhangi bir yağ veya gaz kullanılmaz. Bu işlem havası tamamen boşaltılmış bir vakum tüpünün içinde yapılmaktadır. Bundan dolayı vakum devre kesicilerde yangın riski olmaz ve aynı zamanda mükemmel bir çevre dostu olmasını

sağlar. Bu özelliklerden dolayı vakum devre kesicisi günümüzde en çok tercih edilen kesici türüdür.

Kesici kontakları kapalı konumda iken açma sinyali gönderildiği andan itibaren, akım tamamen kesilip kontak hareketi tamamlanana kadar olan basamaklar Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

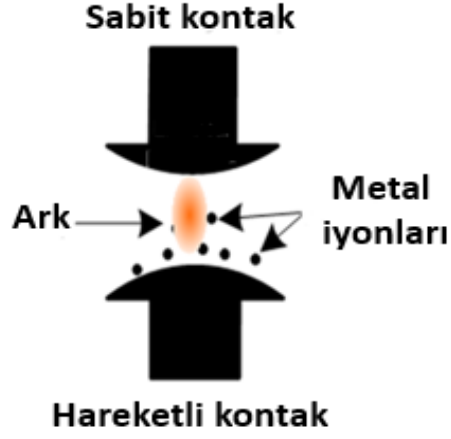


Şekil 4.2: Vakum devre kesicinin kesme prensibi [25].

Kesicinin bağlı olduğu hatta meydana gelen kısa devre ve aşırı yüklenmeler veya manevra durumunda üzerinde bulundurduğu mekanik ve elektronik ısı sensörü yardımı ile komutu algılayarak yaylı mekanizması ile kesici hemen kontaklarını ayırarak devreyi açar.

Kontaklar birbirinden ayrılırken yüksek ısıdan dolayı iyonlaşma meydana gelir. Bu iyonlar iki kontağın arasına girdiğinde, akıma bir yol sağlarlar ve bir yay olarak gördüğümüz akım akmaya başlar ve bu şekilde ark meydana gelir. Aynı zamanda arktaki akıma bağlı olarak Şekil 4.3’te görüldüğü gibi bir buhar kalkanı oluşmuş olur. Aşırı ısınma nedeniyle metal iyonları temas yüzeyinden buharlaşmaya başlar.

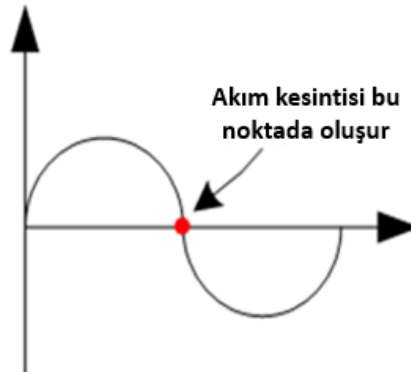
Bu iyonlar iki kontağın arasına girdiğinde akıma giden bir yol sağlarlar ve ark olarak gördüğümüz akım akmaya başlar. Bu kesicilerde ark böyle oluşur.



Şekil 4.3: Ark oluşumu [37].

Vakum devre kesicilerde ark söndürme işlemi:

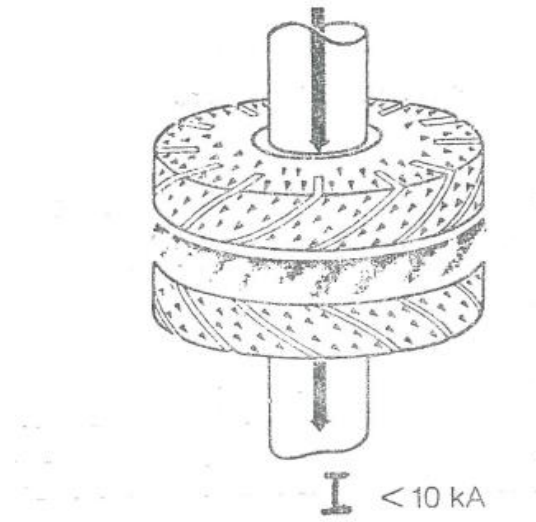
Bildiği gibi AC gerilimin sinüzoidal bir doğası vardır. Dolayısıyla, mevcut dalganın bir döngüde iki sıfır noktası vardır. Bu ark akımı ilk sıfıra (yarı döngüde) ulaştığında, vakumun dielektrik gücü hızla artar ve ilk yarı döngüde akımı keser. Vakumun çok yüksek yalıtım gücü nedeniyle ark yeniden oluşmaz. Şekil 4.4'te akımın sinüzoidal dalgası gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Akımın sinüzoidal dalgası [31].

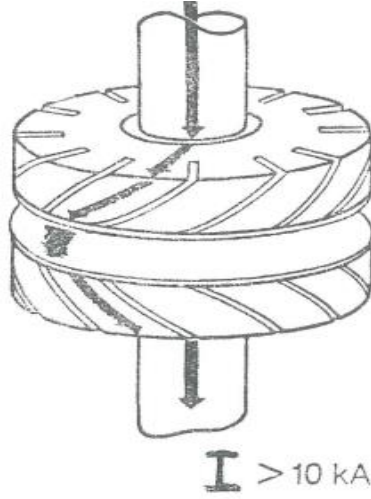
Ark bölgesi dışındaki kısımlarda yüksek vakum bulunduğundan maden buharı metal yüzeylerde mikro saniye içinde yoğunlaşarak dielektrik alan oluşturur. Vakumun çok yüksek yalıtım gücünden dolayı ark yeniden parlamaz. Bu sayede bir vakumlu devre kesicide ark ve söndürme ve akım kesilmesi yapılır [31].

Ark boşalması 10 kA'den küçük akımlarda birkaç ark üzerinden gerçekleşerek ark bütün kontak yüzeylerine Şekil 4.4'te ki gibi yayılmış olarak oluşur. Bu yüzden kontak yüzeyi ısı bakımından az zorlanır [1].



Şekil 4.4:Yayılmış ark [1].

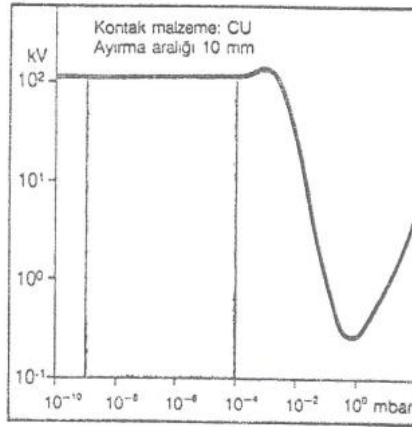
10 kA'den daha büyük akımlarda ise ark kendi manyetik alanının oluşturduğu basınç etkisi ile ince bir silindir şeklini alarak arkın yüzey üzerindeki çıkış noktasındaki akım yoğunluğu çok yüksek olur. Bundan dolayı kontak malzemesi daha çok buharlaşacak ve ark sönmeye işlemi gerçekleşemeyebilir. Bunun önlemek için kontaklara özel bir şekil verilerek akım yolu Şekil 4.5'te görüldüğü gibi değiştirilir ve oluşacak manyetik alan etkisi ile ark elektrot çevresinde dönmeye başlar. Böylece kontak yüzeylerinde sadece bir noktada ısınmanın önüne geçilir.



Şekil 4.5: Döner ark [1].

İlk akım sıfırına yakın değerlerde ark yayılmış durumda olacaktır. Bu yöntem ile aşırı ısınma ve kontakların daha çok aşınmasının önüne geçilmiş ve kesicinin kesme yeteneği yükseltilmiş olunur [1].

Bir kesici Şekil 4.6'deki Paschen eğrisinden görüldüğü gibi 10^{-9} ile 10^{-4} mbar basınç aralığında çalışmaktadır. Kontaklar arasındaki delinme gerilimi bu aralıkta sabit kalmaktadır.



Şekil 4.6: Paschen eğrisi [1].

Delinme gerilimi 10^{-2} mbar civarında aniden düşmeye başlar ve 1 mbar'da minimum değerini alır. Vakumun düşmesi, vakum hücresine atmosferden hidrojen moleküllerin sızması sonucu meydana gelir. Vakum hücresinin basıncı 10^{-2} mbarın üstüne çıkarsa da kesme aralığında çarpma iyonizasyonu başlayacağından delinme geriliminin düşmesine neden olur ve kesme hücresinin elektriksel ömrü bitmiş olur.

Açma-kapanma esnasında meydana gelen ark enerjisi diğer kesici türlerine göre daha az olduğu için, vakum devre kesicisi çok daha fazla açma kapanma yapabilmektedir.

4.3 Ark Enerjisi

Ark enerjisi;

$$E_A = U_A \cdot I \cdot t \quad (4.1)$$

şeklinde formüle edilir. Burada;

E_A ; ark enerjisi

U_A ; ark esnasında değişen gerilim

I ; kesilen akımın şiddeti

t ; ark süresidir.

Formülden de anlaşılacağı üzere, akım belli olduğu için, ark enerjisini küçük tutmak için U_A ve t değerini küçük tutmak gerekir.

Vakumlu devre kesicilerde, yüksek vakum ortamının dielektrik dayanıklılığının büyük olması ark süresi (t) en geç 15 ms dir.

Ark esnasında değişen gerilim (U_A) ise;

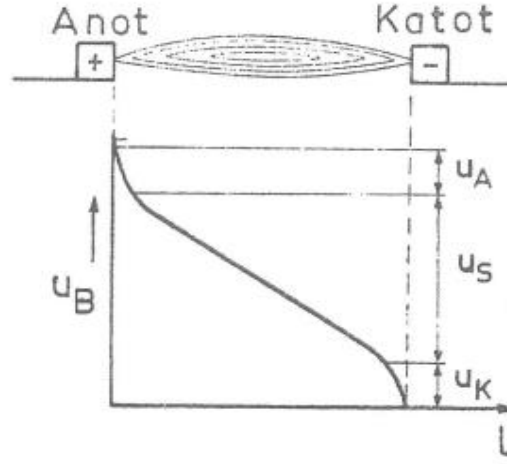
$$U_A = R_A \cdot I_A \quad (4.2)$$

olarak bulunur.

Burada R_A ark direnci, I_A ise ark uzunluğunu ifade eder.

4.4 Elektriksel ark ta gerilim düşümü

Bir kesicinin kontakları arasında oluşan ark, devre için ilave bir direnç oluşmasına sebep olur. İçinde akım geçen her dirençte olduğu gibi ark üzerinde de bir gerilim düşümü meydana gelmekte ve buna ark gerilimi denilmektedir. İki elektrot arasındaki bu gerilimin yol boyunca meydana gelen değişim Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7: Ark gerilimi [1].

U_B nin ark boyunca değişimi lineer olmayıp üç bölüme ayrılır;

U_A :Anot düşümü

U_K :Katot düşümü

U_S :Ark sütunundaki gerilim düşümünü ifade eder.

Katottan çıkıp ark sütunundan geçerek anoda geçmek isteyen elektronlar anoda giderken anot önünde bir yığıntı meydana getirir. Bu elektron yığını ile anot arasında bir potansiyel fark oluşur. Burada pozitif iyon yoktur, buna anot düşümü denilir. Aynı şekilde katot a girmek isteyen pozitif iyonlar katot önünde bir yığıntı ve bir potansiyel fark oluşturur, buna da katot düşümü denir. Ark sütünü içinde ise pozitif ve negatif iyonlar eşit şekilde dengededir. Ark sütünü iletkeni az olan bir metal gibi düşünülebilir. Bunun için ark içindeki gerilim lineerdir [1]. Anot düşümü (U_A) ve katot düşümü (U_K) toplanırsa ark gerilimi;

$$U_B=(U_A+U_K) + \beta l \quad (4.3)$$

$$U_B=\alpha + \beta l \quad (4.4)$$

bulunur. Burada;

α : Anot ve katot düşümü toplamı

β :Ark sütununun birim boyu üzerindeki gerilim düşümünü ifade eder.

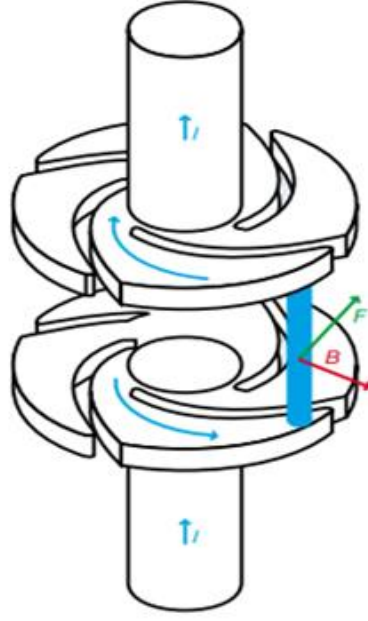
4.5 Manyetik Alan ile Ark Kontrolü

Vakum arkını soğutmanın mekanik bir yolu yoktur ve ark sütununu (veya dizilerini) etkilemenin tek yolu bir manyetik alanla etkileşimdir. Böylece bir manyetik alan, kontak konfigürasyonu boyunca akımın yolunu oluşturan kontak geometrisi aracılığıyla gerçekleştirilebilir [22].

Anahtarlama kapasitesini iyileştirmenin bir yolu, kontak geometrisini değiştirmektir. Elektrot geometrisi manyetik alanlar oluşturur, bu nedenle bu tür değişiklikler arkın davranışını önemli derecede etkiler. Yüksek akımda kontaklar arasındaki ark daralmasını önlemenin iki yolu vardır.

4.5.1 Radyal manyetik alan kontak (RMA) ile ark kontrolü

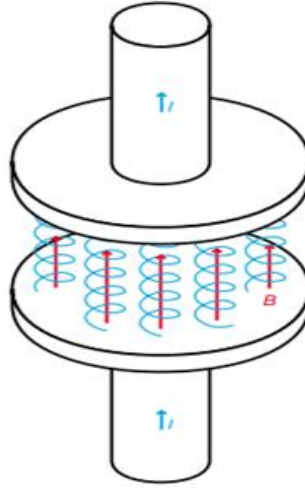
Bu kontak teknoloji, lorentz kuvvetinin etkisi altında kontakların yüzeyi üzerinde arkın dönmesi için yapıldığı radyal manyetik alan olarak adlandırılır. Arkın temas yüzeyindeki hareket hızı, arkın başarılı bir şekilde kesilmesi için çok önemlidir [2]. Yakın zamana kadar firmalar, devre kesiciler için vakum kesicilerinde her zaman spiral kontaklar kullanmıştır. Bu kontaklar bir radyal manyetik alan oluşturur, bu da Şekil 4.8'de gösterildiği gibi azimutal bir elektromanyetik kuvvetin (F) büzülmüş vakum arkına etki etmesine neden olur. Daralan ark, temasın yüzeyi üzerinde hızla hareket eder. Bu yüksek hız, daha az temas erozyonu olmasını sağlar ve ayrıca mevcut kesme kapasitesini önemli ölçüde artırır [32]. RMA kontak sisteminin avantajı basit fiziksel yapısında yatmaktadır. Kapalı durumda akımın doğrudan gövde aracılığıyla kontaklardan akar, böylece nominal akımda vakum kesici için daha düşük güç kayıpları sağlanır.



Şekil 4.8: Radial Manyetik alan (RMA) [22].

4.5.2 Eksenel manyetik alan (EMA) kontağı

Bu kontak türünde manyetik alan, kontak sistemine dahil edilmiş bir bobin tarafından oluşturulan ekseneldir. Arktaki akımın akışına paralel bir manyetik akı yoğunluğu uygulandığında, akışa dik yük taşıyıcıların hareketliliği önemli ölçüde azalır. Bu, özellikle iyonlardan daha küçük bir kütleye sahip elektronlar için geçerlidir. Elektronlar, Şekil 4.9’da gösterildiği gibi manyetik kuvvet çizgileri etrafında dönerler, böylece arkın daralması daha yüksek akımlara doğru kaydırılır. Bu yöntemde ark, manyetik alanın belirli bir minimum eşik değerinin üzerinde yayılım modunda olacaktır ve dağınkı arkı söndürmek kolaydır. Eksenel manyetik alan kontaklı yeni geliştirilen kesiciler, 63 kA ve daha yüksek kısa devre akımlarının güvenilir bir şekilde kesilmesini sağlar [32].

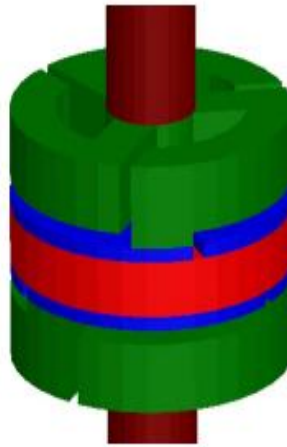


Şekil 4.9: Eksenel manyetik alan (EMA) [22].

EMA kontağı, zaman içinde geliştirilerek yüksek voltajlarda da kullanılabilir. Günümüzde çok çeşitli EMA kontakları geliştirilmiştir. Bunlardan en önemli iki tanesi bobin (coil) tipi ve yuva (slot) tipi EMA kontaklarıdır.

4.5.2.1 Bobin tipi EMA kontağı

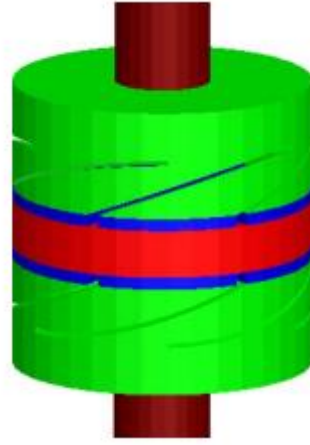
Bobin tipi EMA kontağı, Şekil 4.10'da gösterilen Toshiba tarafından geliştirilen iyi bilinen bir kontak çeşididir. Bu tür EMA kontağı, orta gerilim vakum kesicilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.10: Üç segmentli bobin tipi EMA kontağı [22].

3.5.2.2 Yuva (slot) tipi EMA kontağı

Slot tipi EMA kontağı aynı zamanda Siemens tarafından önerilen ve Şekil 4.11'de gösterilen iyi bilinen bir EMA kontağıdır. Ayrıca OG vakum kesicilerinde de yaygın olarak kullanılır [22].



Şekil 4.11: Yuva (slot) Tipi EMAKontağı [22].

5. ELEKTROSTATİK ANALİZ

5.1 Elektrik Alanın Hesaplanması ve Analizi

Vakum kesicinin dahili elektrik alan dağılımı, yalıtım seviyesini etkiler ve elektrik alanının düzgün dağılımı, vakum kesicinin daha yüksek voltaj seviyeleri için birincil çözümdür. Elektrik alan dağılımı eşit değilse, yerel bozulma meydana gelebilir. Vakum kesicinin kırılma noktası, esas olarak yalıtım kabuğunda veya belirli bir yalıtım gücü ile temas boşluğunda görülür. Bu nedenle, vakum kesicinin içindeki bileşenlerin uygun şekilde düzenlenmesi özellikle önemlidir [26].

Fiziksel ark modelleri, akışkanlar dinamiği denklemlerine dayanır ve Maxwell denklemleriyle birlikte termodinamik yasalarına uyar. Vakum kesicinin elektriksel ve termal alanının modellenmesi, kesicilerin tasarımını, işlevselliğini optimize etmek ve vakum kesicinin geliştirme ve üretim süresini azaltmak için kullanılabilir [12].

5.2 Elektrik Alan Modelleme

Elektrik alan dağılımını Laplace denklemi tarafından hesaplanabilir;

$$\nabla(\sigma(E, T) \nabla V) = 0 \quad (5.1)$$

burada $\sigma(E, T)$, elektrotlar arasındaki ortamın elektriksel iletkenliği, yani elektrik ark iletkenliği ve V , elektrik potansiyelin skaler büyüklüğü,

Elektrik alan şiddeti E ,

$$E = -\nabla V \quad (5.2)$$

ile belirlenir.

Elektrik potansiyelinin V denklemi kullanılarak belirlenmesi, vakum kesici akımının (I) hesaplanmasını sağlar.

Bu, elektrik potansiyeli dağılımı V 'nin sabit kontakta $V = 0$ sabit değeri ve U 'nun toplam voltaj düşüşü olduğu vakum odasının kontak sistemindeki hareketli kontakta $V_{HV} = U$ ile ayarlanmasıyla yapılır [12].

Elektrik ark iletkenliği σ şu şekilde tanımlanır:

$$\sigma = ne\mu_e = \frac{ne^2}{m_e v_m}, \quad (5.3)$$

n : elektron yoğunluğu,

m_e : elektron kütlesi,

v_m : yük akış hızı,

μ_e : elektron hareketliliği

e : temel elektron yüküdür.

Fiziksel sabitler SI birimlerindedir;

$$n \leq 10^{19} m^{-3},$$

$$m_e = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg},$$

$$e = 1.602 \times 10^{-19}$$

ifade eder.

Şarj akış hızı şu şekilde belirlenir:

$$v_m = - \frac{e}{m_e v_d} E, \quad (5.3)$$

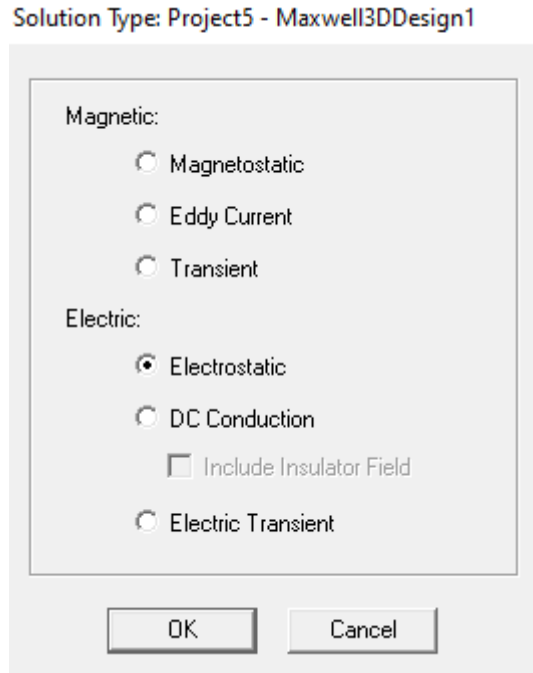
burada v_d , boşaltma sıcaklığına bağlı sürüklenme hızı olarak adlandırılan termal hızdır. Elektrik ark deşarj iletkenliği, elektrik alan yoğunluğu ve ark sıcaklığı ile doğrusal olmayan bir şekilde ilişkilidir [12].

5.3 Ansys Maxwell ile Elektrostatik Analiz

Ansys Maxwell, elektrik ya da manyetik alan hesaplamak için sonlu elemanlar yöntemini (finite element analysis) kullanan bir yazılım türüdür. Ansys Maxwell programı uzayın belirli bir bölgesinde yer alan elektromanyetik alan problem veya denklemlerini kullanıcı tarafından belirli sınır koşulları ve başlangıç şartlarını belirleyerek Maxwell denklemleri yardımı ile çözüme imkân sağlar [33].

Ansys Maxwell'de üç çeşit tasarım tipi bulunur. Bunlar; Maxwell 3D, Maxwell 2D ve RMXprt'tür. RMXprt(Rotation Machinery Expert), elektrik makinalarının tasarımı ve analizi için kullanılmaktadır. Maxwell 2D, XY veya RZ ortamında; Maxwell 3D ise sonlu elemanlar yöntemini ile elektromanyetik alan yöntemlerini üç boyutlu olarak çözer [33].

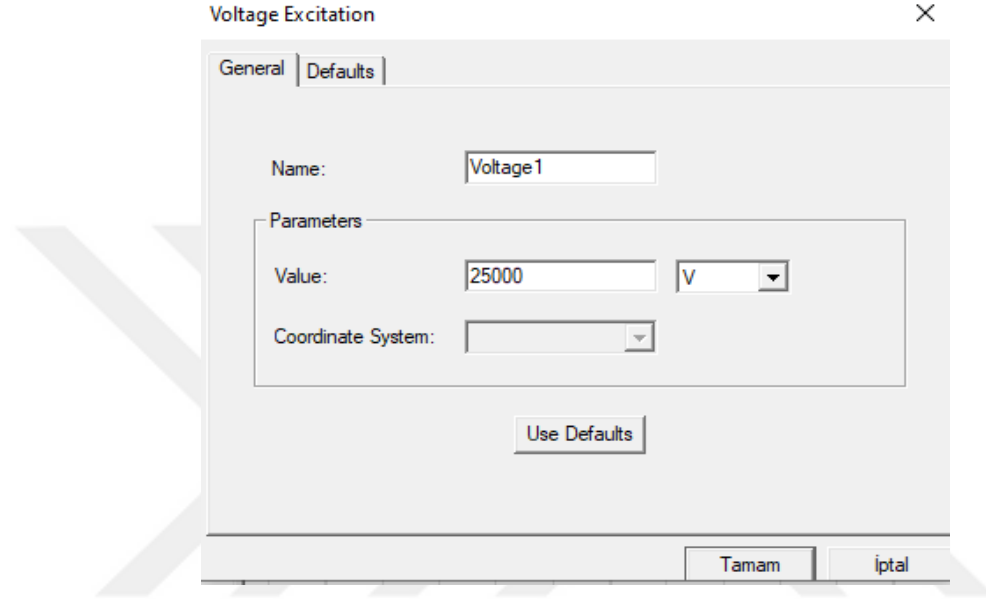
Ansys Maxwell programında problem çözümleri (solver) Şekil 5.1' de görüldüğü gibi iki ana başlık altında incelenir; manyetik ve elektrik çözümleri. Manyetik çözümler; Magnetostatik, Eddy Akımı ve Geçici Manyetik (Transient Magnetic) olarak üç alt başlık altında toplanır. Elektrik çözümleri ise Elektrostatik, DC İletim (DC Conduction), AC İletim (AC Conduction) ve Geçici Elektrik (Transient Electric) olmak üzere dört alt başlık altında toplanır.



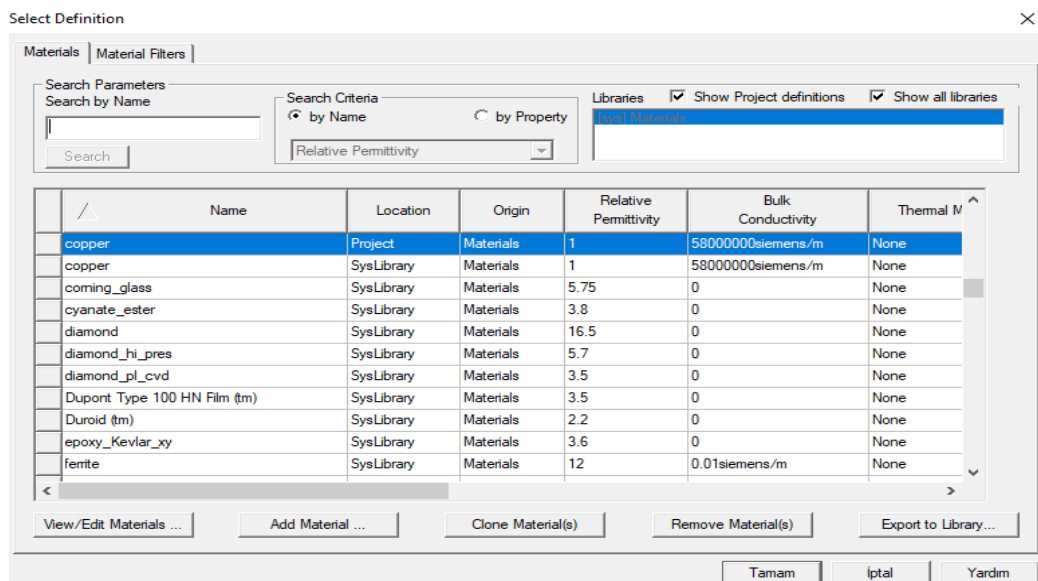
Şekil 5.1: Ansys maxwell problem çözüm tipleri.

Biz bu çalışmada vakum devre kesicisi için modellediğimiz üç farklı kontak tipi için elektrostatik analiz yöntemini kullanarak elektrik alan simülasyonunu gerçekleştirdik.

Geliştirilen Ansys Maxwell 3D modeline Şekil 5.2'deki gibi önce parametre ve Şekil 5.3'te malzeme seçimi yapıldıktan sonra gerekli analizler yapılmıştır.



Şekil 5.2: Ansys maxwell gerilim uyarımı.

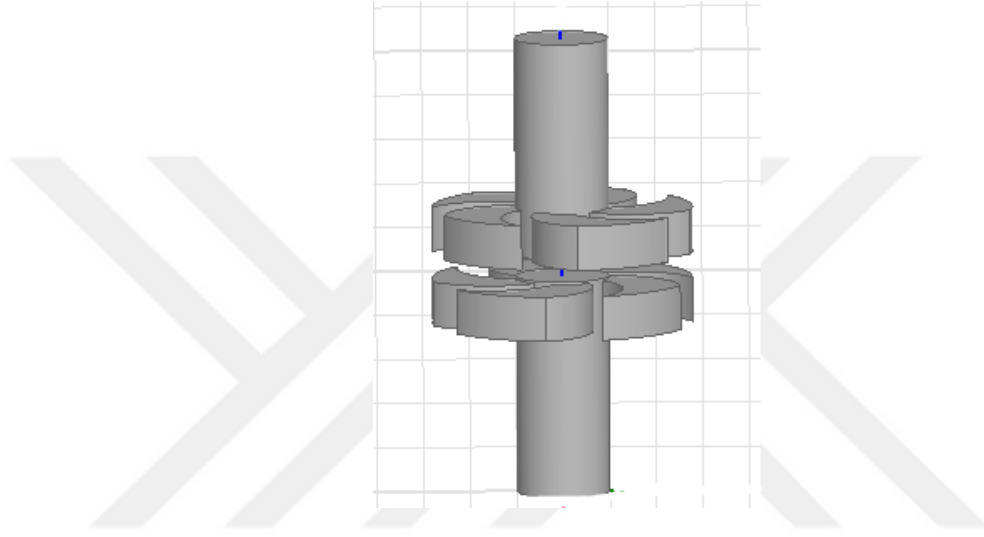


Şekil 5.3: Ansys maxwell malzeme atama.

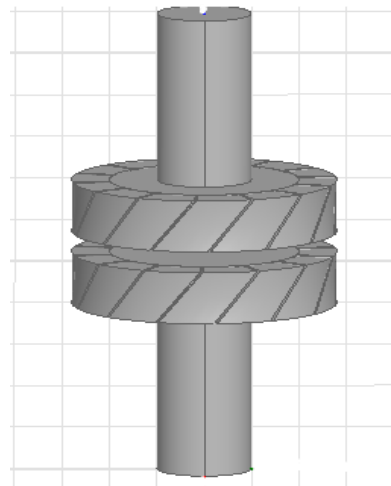
5.4 AMF ve RMF kontak tip kesicisinin Elektrik Alan simülasyonu

5.4.1 Model tasarımı

Model tasarımı sırasında Autocad ve Ansys Maxwell yazılımlarından faydalanılmıştır. Autocad 3D de çizilen kontak yapıları Ansys maxwell 3D'ye Şekil 5.4'te gösterilen şekiller import edilerek geliştirilmiştir. Malzeme tipi olarak bakır kullanılmıştır.



a- Radial manyetik alan (RMF).

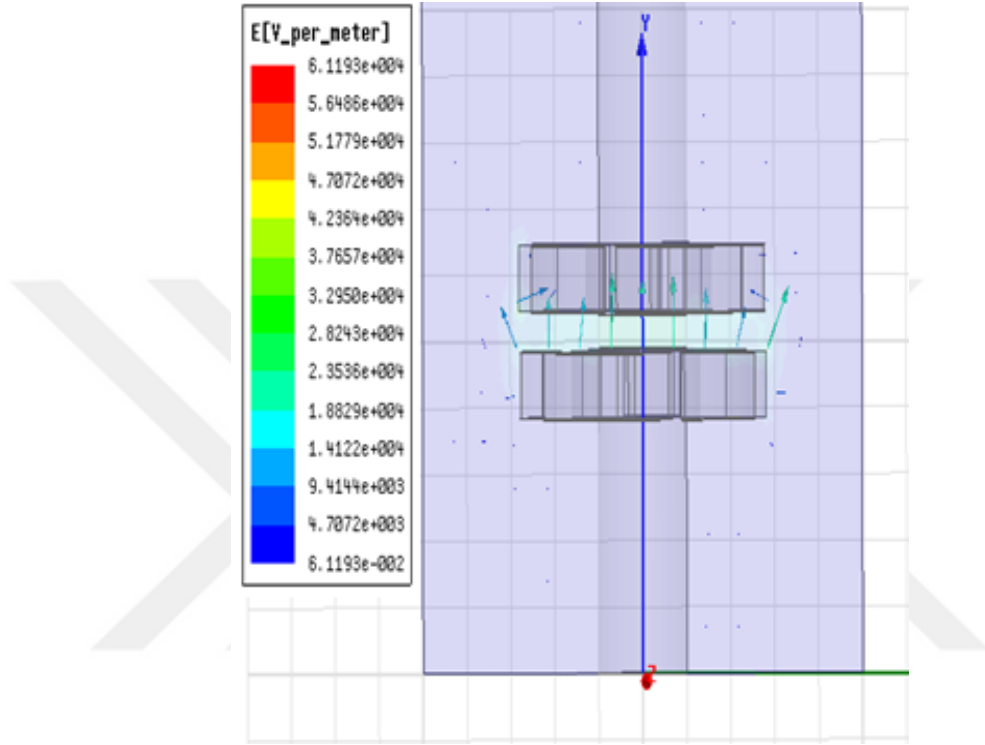


b- Eksenel manyetik alan (AMF).

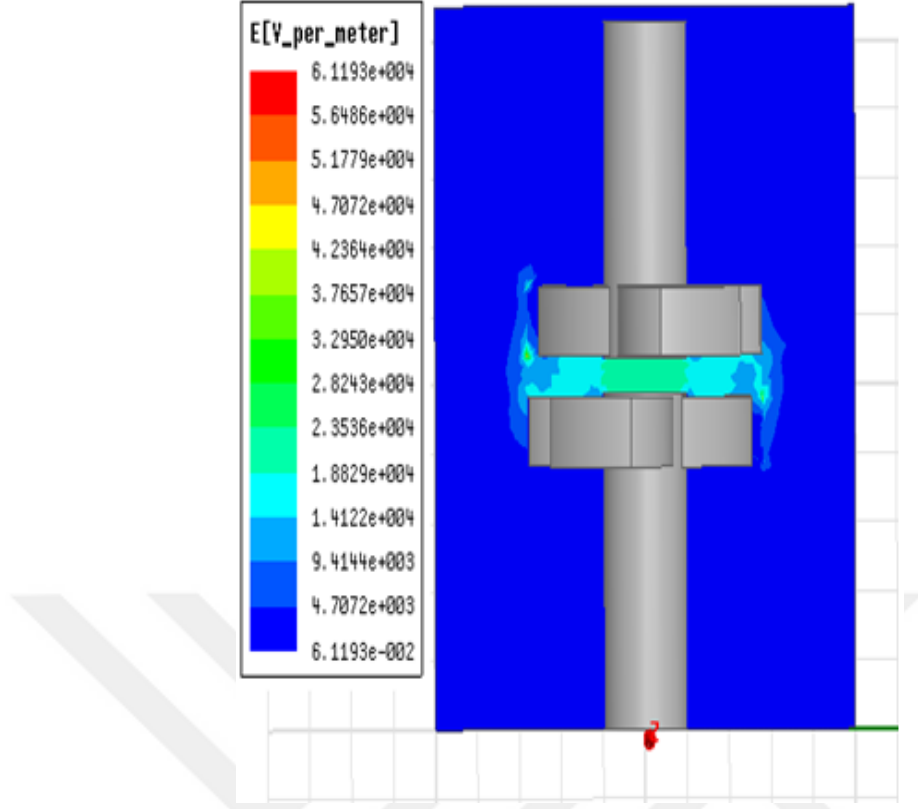
Şekil 5.4: RMF ve AMF kontaklarının 3D tasarımları (a-b).

5.4.2 Elektrik alan simülasyonu

Sonlu elemanlar metodu kullanılarak RMF ve AMF kontak tiplerinin 3D modeli geliştirildi ve elektrostatik analiz yapılarak ark odasında meydana gelen elektrik alan simülasyonu yapılarak Şekil 5.5 (a-b)'de gösterilmiştir.



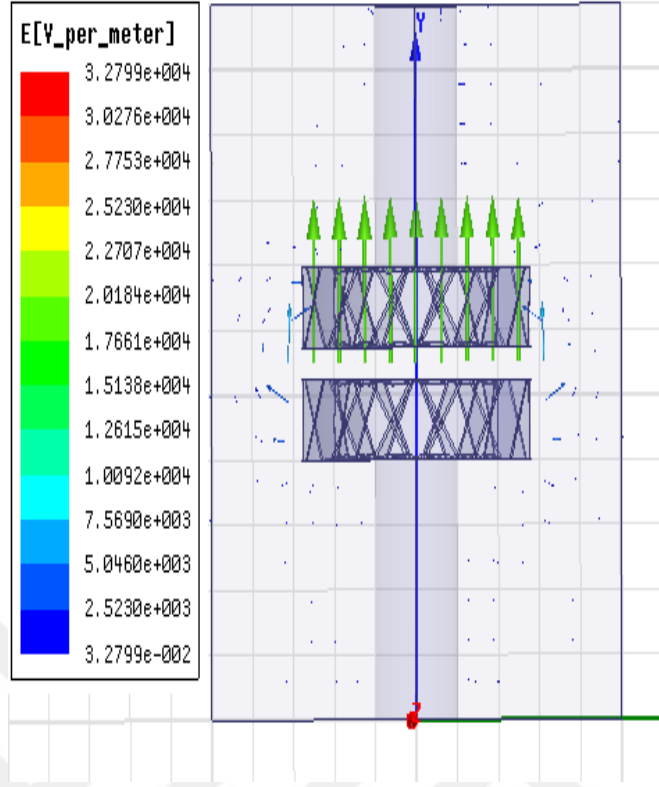
a-RMF Elektrik alan vektörel dağılımı.



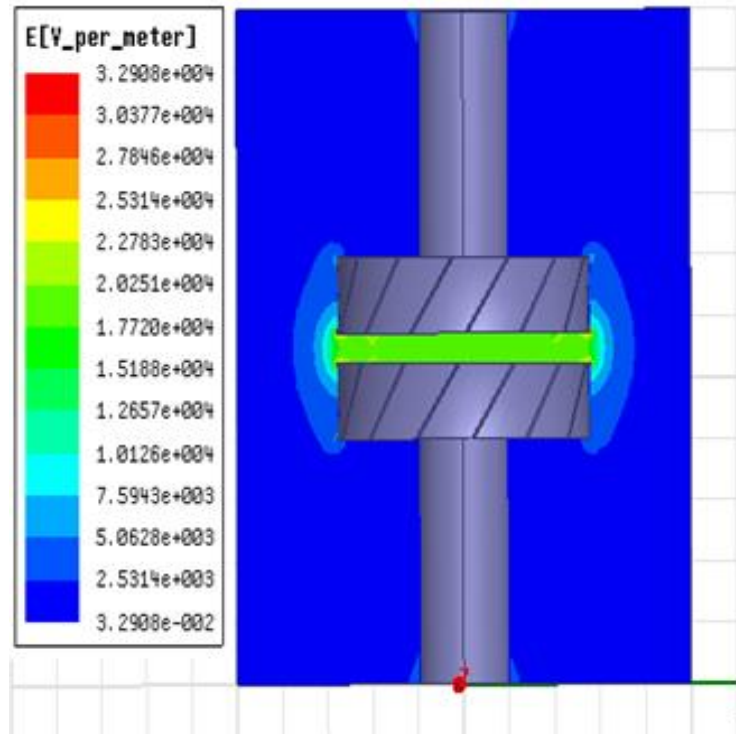
b-RMF elektrik alan dağılımı.

Şekil 5.5: RMF kontak elektriksel alan dağılımı ve vektörel gösterimi (a-b).

Şekil 5.6-a' da görüldüğü gibi AMF kantağın Elektrik alan vektörleri y ekseni boyunca daha düzgün iken, Şekil 5.5-a'daki RMF kantağının elektriksel alan vektörleri daha dağınıktır. Yine Şekil 5.6-b'de AMF kantağında görüldüğü gibi elektrik alan dağılımı, Şekil 5.5-b'deki RMF kantağının elektriksel alan dağılımına göre daha düzgün olduğu görülmektedir.



a-AMF Elektrik alan vektörel dağılımı.



b-AMF elektrik alan dağılımı.

Şekil 5.6: AMF kontak elektrikriksel alan dağılımı ve vektörel gösterimi (a-b).

Analiz sonucunda AMF kontak tipinin RMF kontak tipine göre daha az ve daha düzgün elektrik alan yaydığı gözlemlendi.

Eksenel ve Radyal manyetik alan üreten RMF ve AMF kontak tipli vakum kesicisinin ark söndürme odası içindeki elektrik alanını hesaplamak ve analiz etmek için sonlu elemanlar analiz yazılımı ANSYS Maxwell kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları, kontakların geometrik yapısının elektrik ve manyetik alan üzerine önemli etkileri olduğu ve ark odalarında meydana gelen elektriksel alan dağılımı, AMF kontak tipinde daha düzgün ve daha az olduğu şekillerde görülmektedir. Sonuçlar, kontak yapılarını geliştirerek daha düzgün elektrik alanı elde edebileceğimizi göstermiştir.

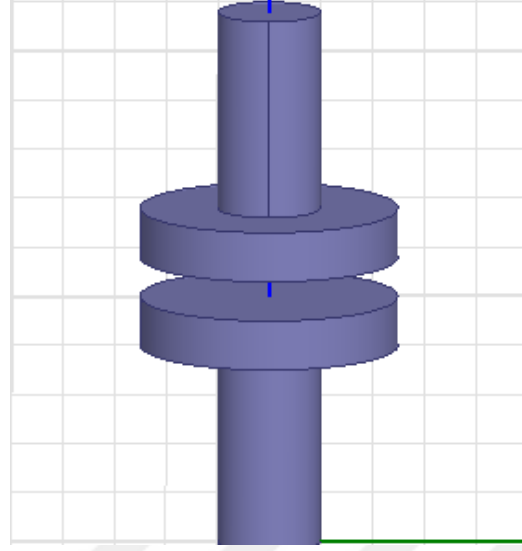
5.5 Düz Kontak, Spiral Tip Kontak ve Eğik Oluklu Kap Tipi Kontaklar ve Elektrik Alan Simülasyonu

Elektrik alan simülasyonu, ANSYS Maxwell sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Kesici kontak tasarımının 3D modeli için, autocad programından yararlanılmıştır. Ansys maxwell 3D programına import edilen modeller burada geliştirildikten sonra elektrostatik analiz yapılmıştır. Kontak malzemesi olarak bakır (copper) ve voltaj değeri için 25 kV seçilmiştir.

5.5.1 Düz tip kontak

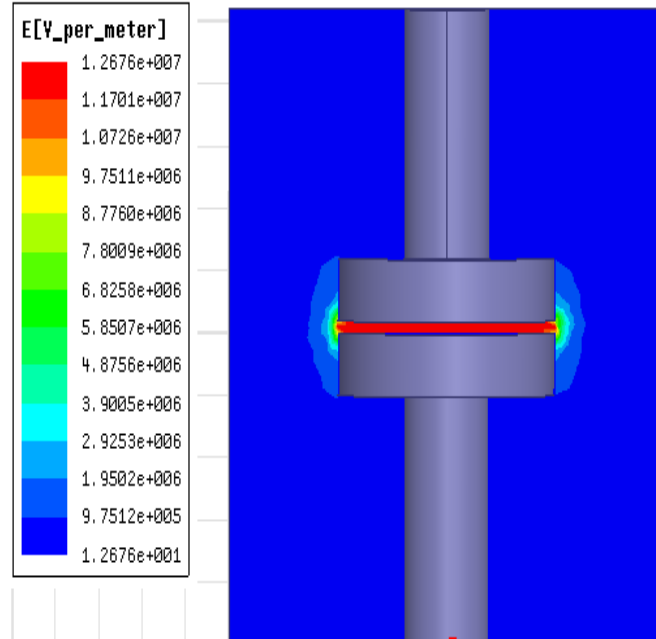
Düz kontak, temas yüzeyinin geometrik yapısından dolayı açma kapama esnasında meydana gelen ark sabit (hareketsiz) olduğundan, temas yüzeyleri çok fazla ısınır ve aşınmasına sebep olunur. Bunun için bu kontak tipi, düşük akımlı dağılık ark için kullanılır.

Şekil 5.7’de Vakum devre kesicisi için kullanılan düz tip kontağın 3D modeli gösterilmiştir

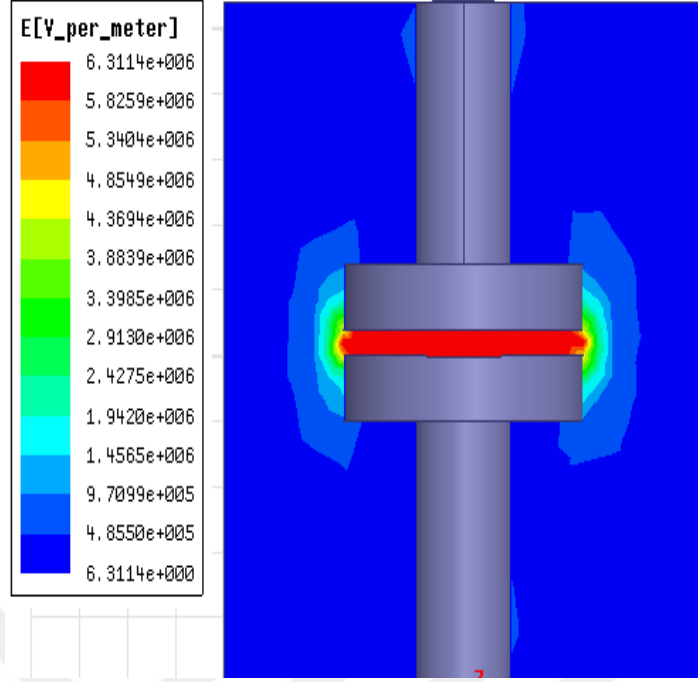


Şekil 5.7: Düz kontak 3D modeli.

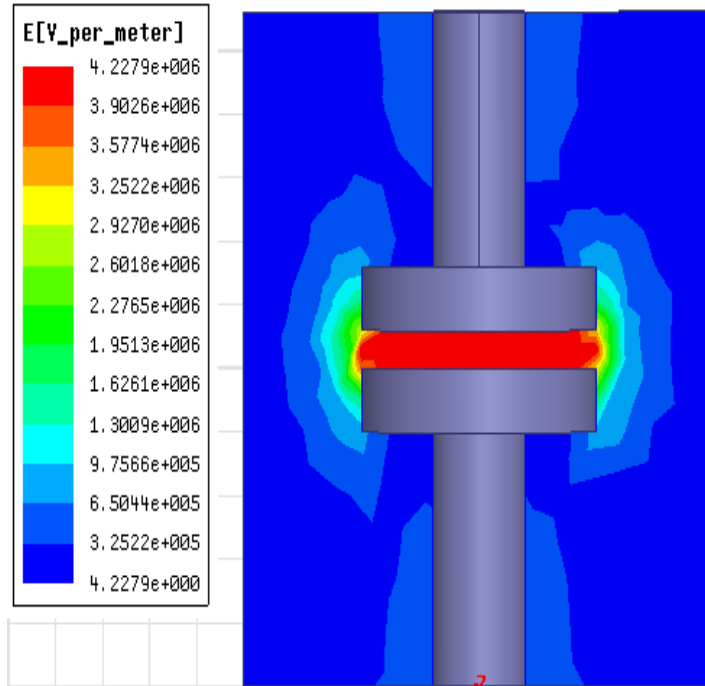
Şekil 5.8 (a-e)’de iki kontak arasındaki mesafenin 2-10 mm arasında olduğu durumlarda elektrik alan dağılımları gösterilmiştir. Şekil 5.8-a’da anlaşılacağı gibi kontaklar arasındaki elektrik alan rengi kırmızı ve çok yoğun olduğu, kontaklar arasındaki mesafe 10 mm ye doğru açıldıkça renk kırmızıdan turuncuya değişmekte ancak kırmızı renk oranı hala fazla olduğu görülmektedir.



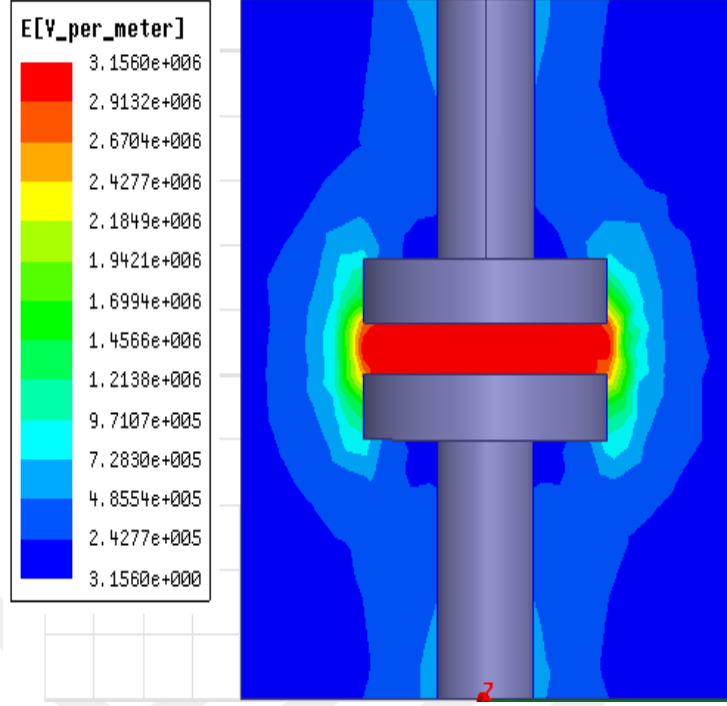
a. Düz kontakın kontaklar arasındaki mesafe 2 mm iken elektrik alan dağılımı.



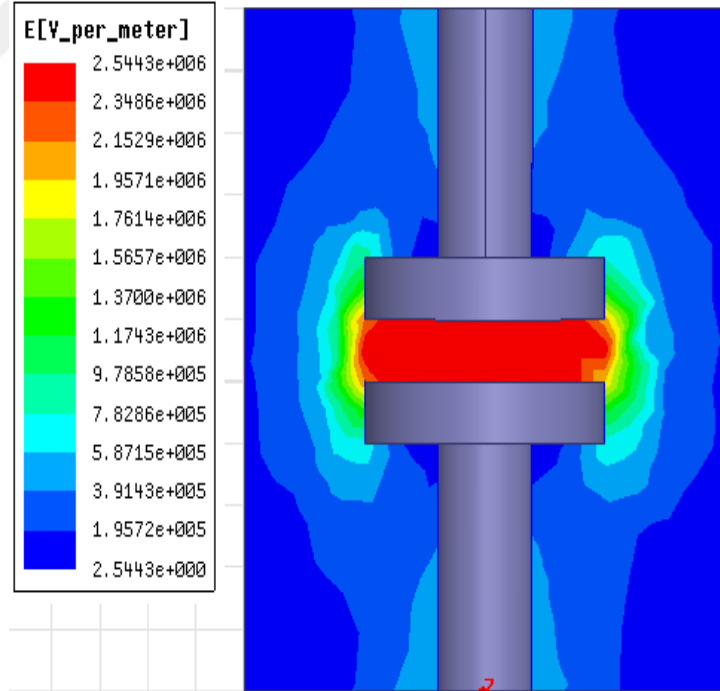
b. Kontaklar arasındaki mesafe 4 mm iken elektrik alan dağılımı.



c. Kontaklar arasındaki mesafe 6 mm iken elektrik alan dağılımı.



d. Kontaklar arasındaki mesafe 8 mm iken elektrik alan dağılımı.

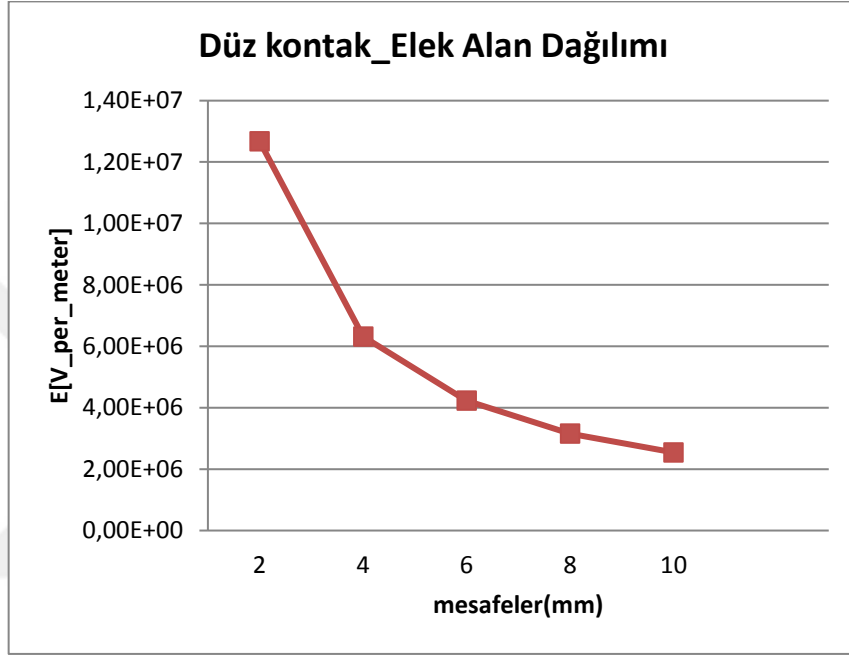


e. Kontaklar arasındaki mesafe 10 mm iken elektrik alan dağılımı.

Şekil 5.8: Düz tip Kontakın 2-10 mm mesafelerde elektrik alan dağılımları (a-e).

Simülasyon sonuçları bu kontak tipinin yüksek akımda kullanmaya uygun olmadığını desteklemektedir.

Kontaklar arasındaki mesafe 2 mm iken elektrik alan dağılımının sayısal değeri $1.27E+07$, 4mm de $6.31E+06$, 6 mm de $4.23E+06$, 8 mm de $3.16E+06$ ve 10 mm de ise $2.54E+06$ olduğu görülmüş ve sonuçlar Grafik 5.9'da gösterilmiştir.

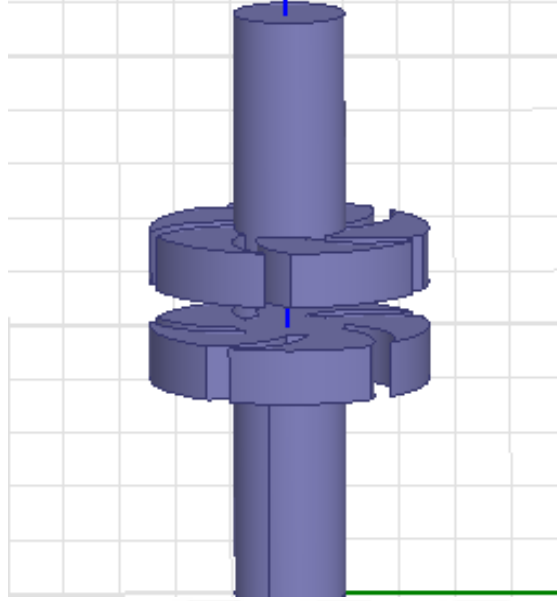


Grafik 5.9: Düz tip kontakın 2-10 mm mesafelerde elektrik alan değerinin grafiksel gösterimi.

4.5.2 Spiral tip kontak

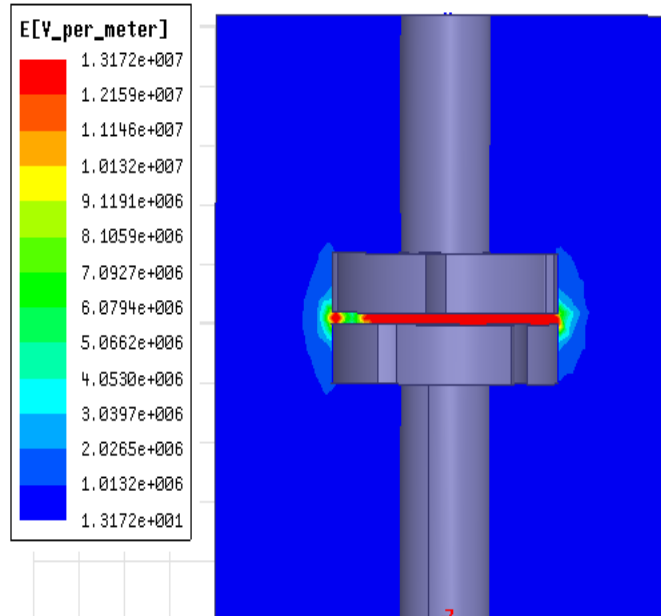
Bu tip kontaklar kapasitesini geliştirmek için kontak temas yüzeylerine özel bir şekil verilmiş böylece açma-kapanma esnasında oluşacak ark manyetik alan etkisiyle kontak yüzeyleri arasında bir dönme hareketi meydana gelir ve arkın temas noktası sürekli değiştiğinden kontaklar daha az ısınır ve böylece daha az aşınması sağlanmış olur.

Spiral tip kontakın Ansys Maxwell 3D programında geliştirilen modeli Şekil 5.10'da gösterilmiştir.

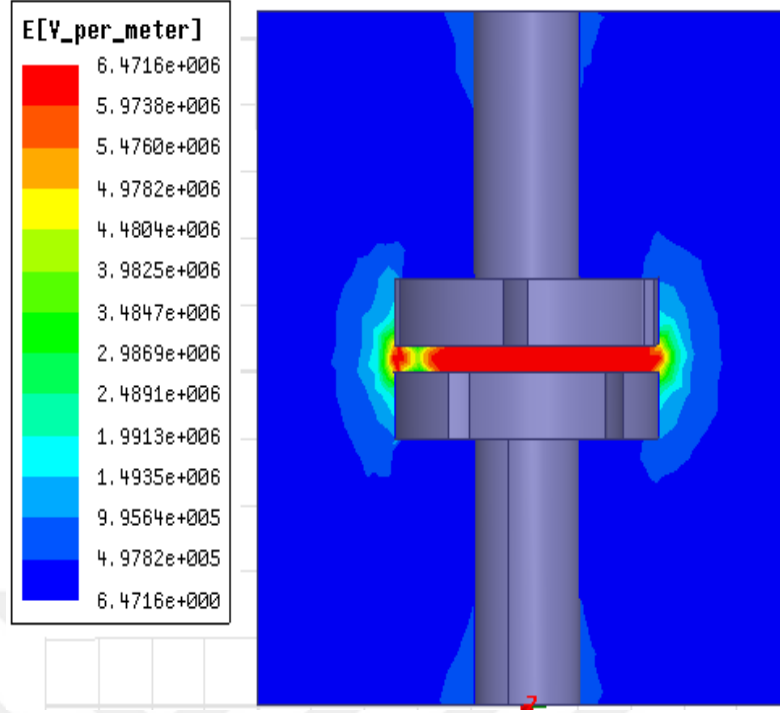


Şekil 5.10: Spiral tipi kontak 3D modeli.

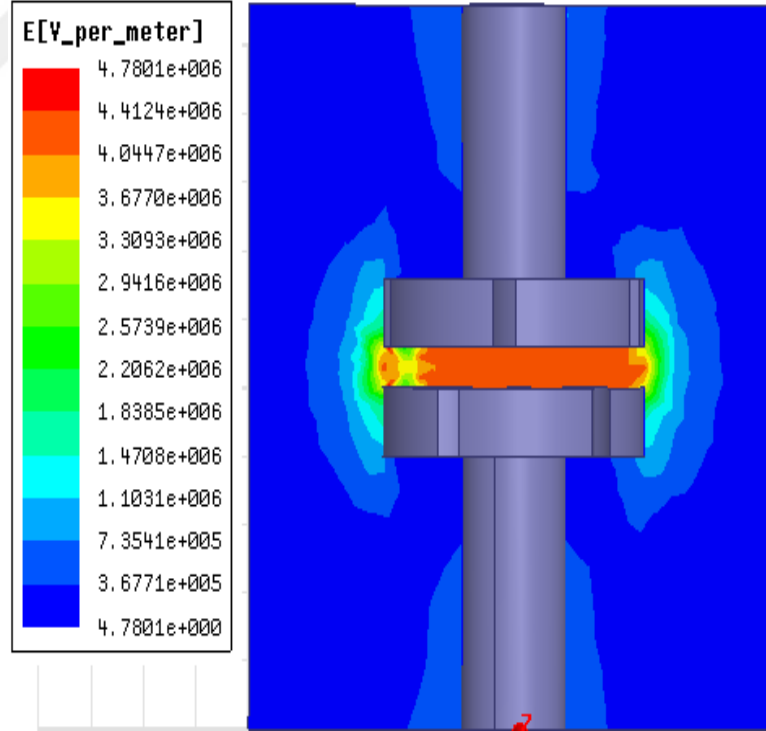
İki kontak arasındaki mesafenin 2-10 mm arasında olduğu durumlarda elektrik alan dağılımları Şekil 5.11 (a-e)'de gösterilmiştir. Şekil 5.11- a'da anlaşılacağı gibi kontaklar arasındaki elektrik alan rengi kırmızı ve çok az yoğun olduğu, kontaklar arasındaki mesafe 10 mm ye doğru açıldıkça renk kırmızıdan turuncuya değişmekte ve turuncu renk oranı hala fazla olduğu görülmektedir.



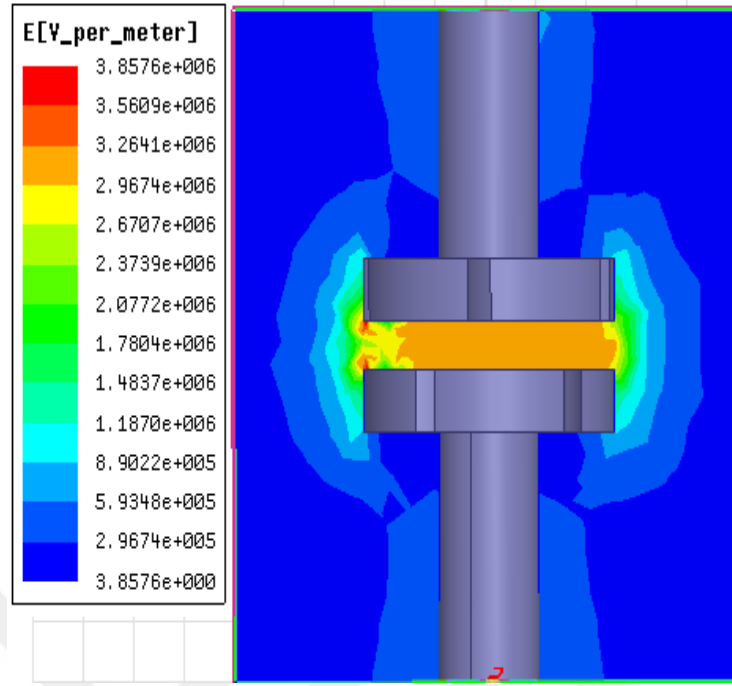
a. Temas yüzeyleri arasındaki mesafe 2 mm iken elektrik alan dağılımı.



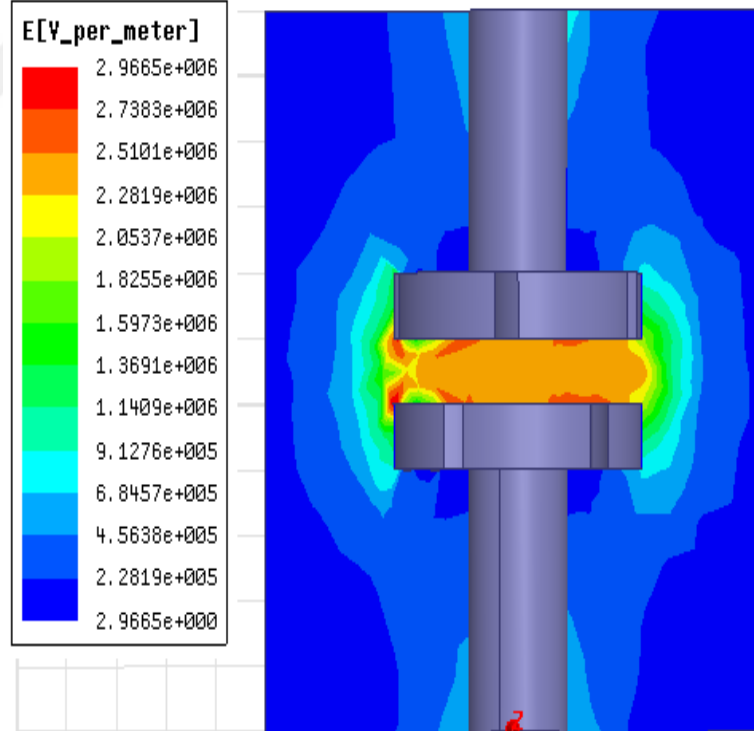
b. Temas yüzeyleri arasındaki mesafe 4 mm iken elektrik alan dağılımı.



c. Temas yüzeyleri arasındaki mesafe 6 mm iken elektrik alan dağılımı.



d. Temas yüzeyleri arasındaki mesafe 8 mm iken elektrik alan dağılımı.

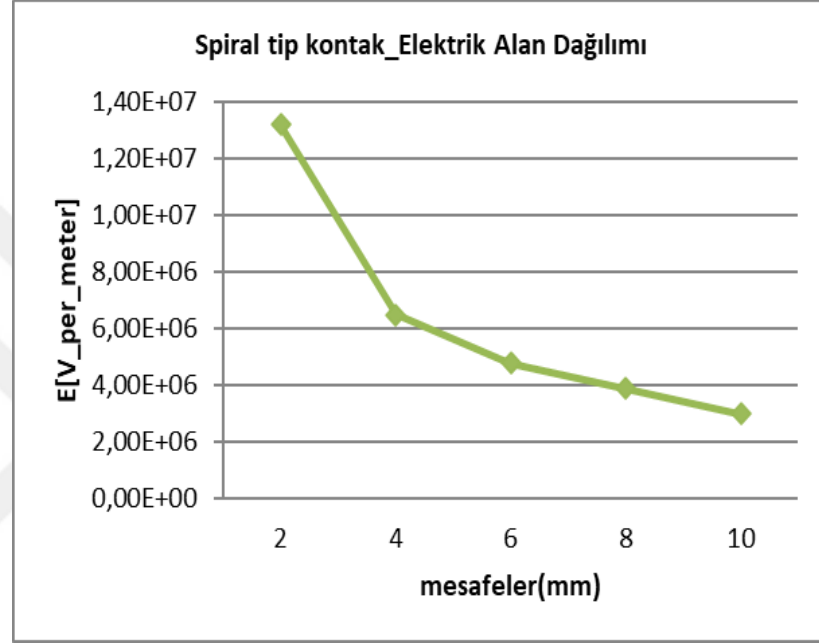


e. Temas yüzeyleri arasındaki mesafe 10 mm iken elektrik alan dağılımı.

Şekil 5.11: Spiral tip kontağın 2-10 mm mesafelerde elektrik alan dağılımları (a-e).

Simülasyon sonuçları bu kontak tipinin orta gerilim güç sistemlerinde kullanmaya uygun olduğunu desteklemektedir.

Kontaklar arasındaki mesafe 2 mm iken elektrik alan dağılımının sayısal değeri $1.32E+07$, 4mm de $6.05E+07$, 6 mm de $4.78E+06$, 8 mm de $3.86E+06$ ve 10 mm de ise $2.97E+06$ olduğu görülmüş ve sonuçlar Grafik 5.12 'de gösterilmiştir.

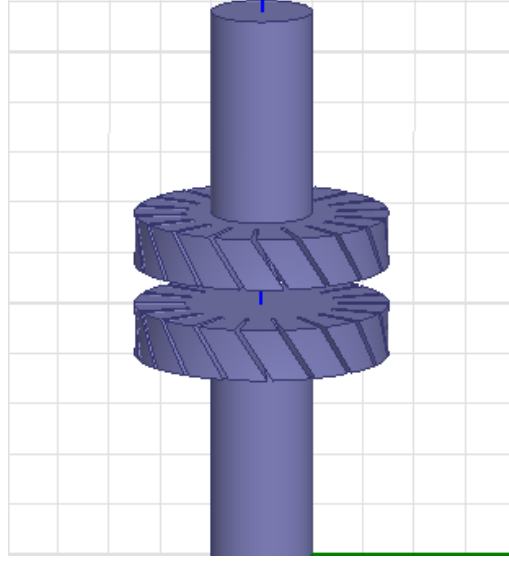


Grafik 5.12: Spiral tip kontakın 2-10 mm mesafelerde elektrik alan değerlerinin grafiksel gösterimi.

5.5.3 Eğik oluklu kap tipi kontak

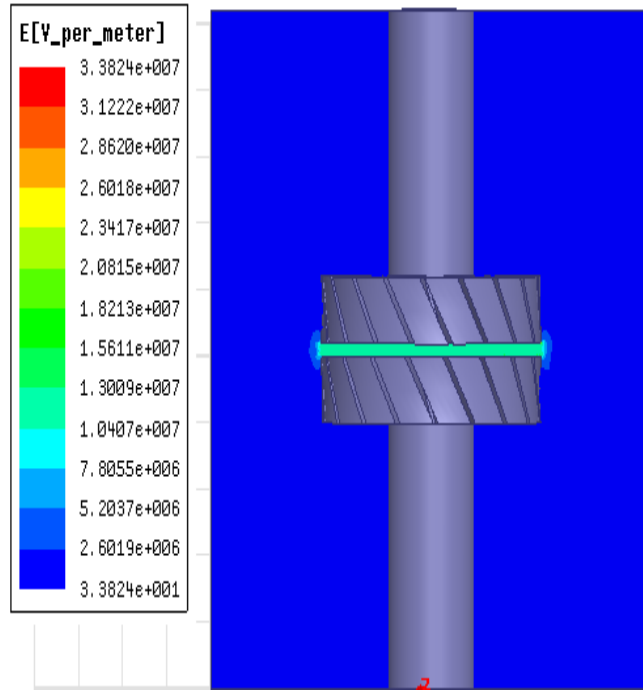
Bu tip kontak tipi ise kontak geometrisine eğik şeklinde oluk verilerek aksel bir manyetik alan oluşturulmuştur. Kontakların açılmasıyla beraber temas yüzeyleri arasında aksel dağınık bir manyetik alan oluşur ve oluşan ark dağınık olur. Dağınık ark daha kolay ve çabuk söner. Böylece kontak temas yüzeylerine daha az zarar verilmiş olur.

Eğik oluklu tip kontakın Ansys Maxwell 3D programında geliştirilen modeli Şekil 5.13'te gösterilmiştir.

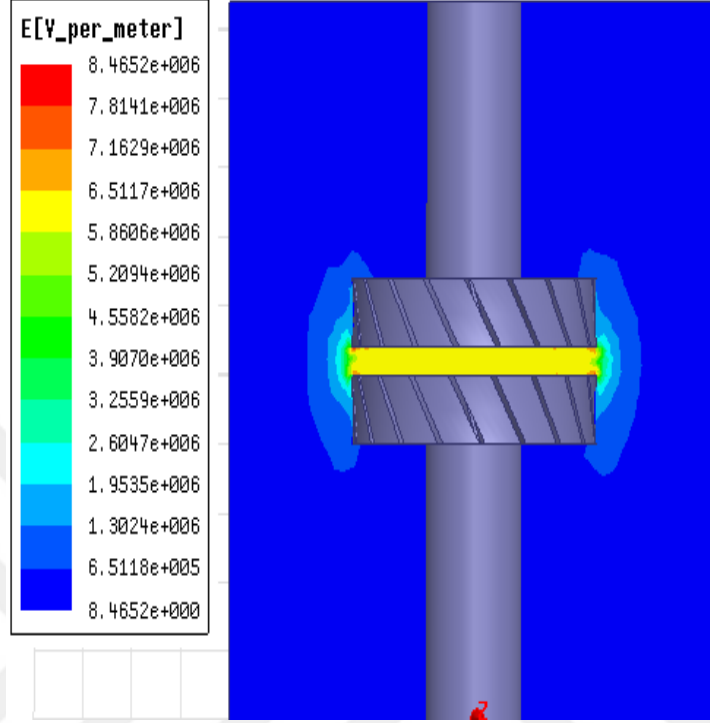


Şekil 5.13: Eğik oluklu kap tipi kontağın 3D modeli.

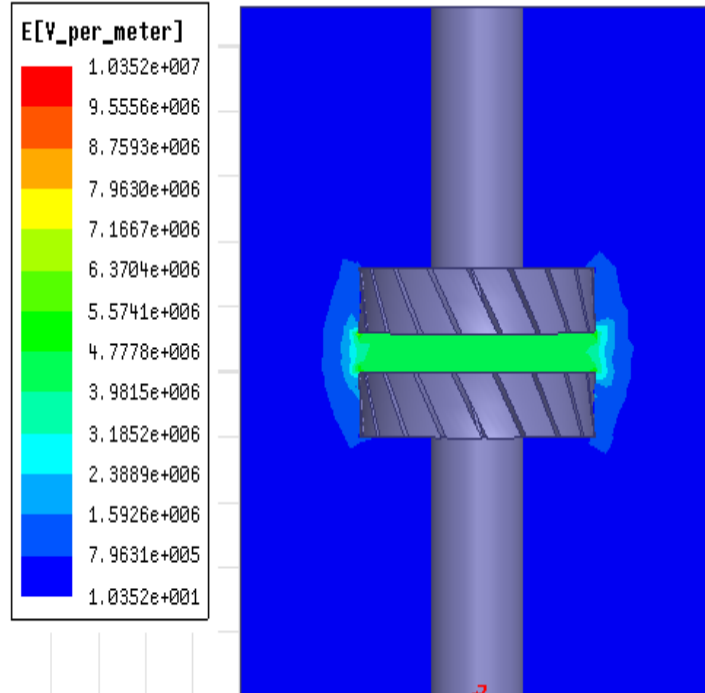
Şekil 5.14 (a-e)'de iki kontak arasındaki mesafenin 2-10 mm arasında olduğu durumlarda elektrik alan dağılımları gösterilmiştir. Şekil 5.14-a'da görüldüğü gibi kontaklar arasındaki elektrik alan rengi açık yeşil olduğu, kontaklar arasındaki mesafe 10 mm ye doğru açıldıkça renk kısmen sarı olmakta, genel olarak açık yeşil rengin daha fazla olduğu görülmektedir.



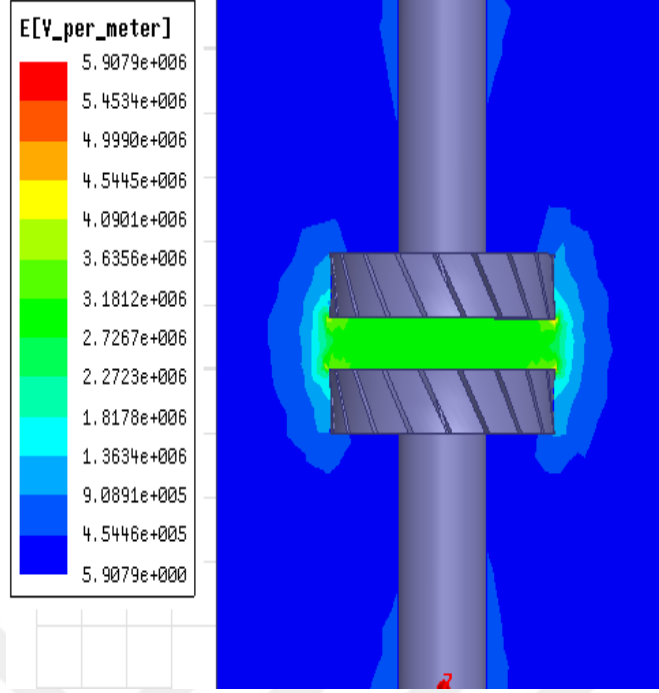
a. Temas yüzeyleri arasındaki mesafe 2 mm iken elektrik alan dağılımı.



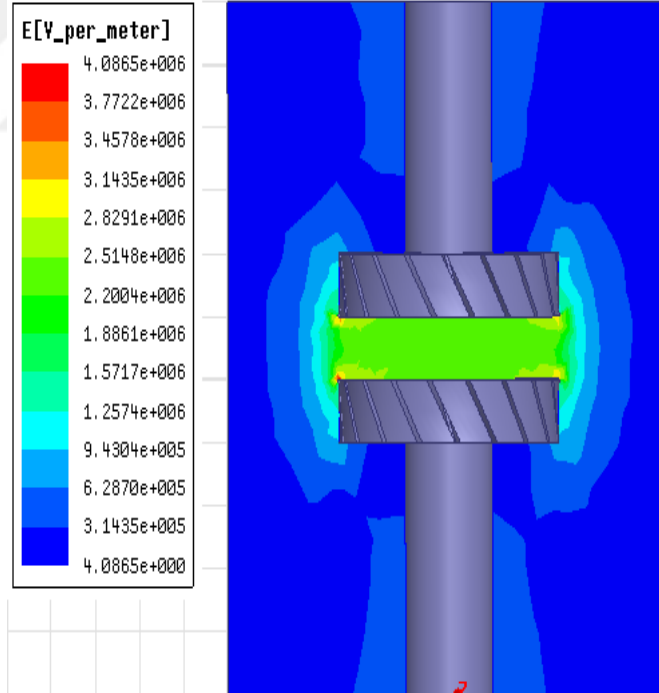
b. Temas yüzeyleri arasındaki mesafe 4 mm iken elektrik alan dağılımı.



c. Temas yüzeyleri arasındaki mesafe 6 mm iken elektrik alan dağılımı.



d. Temas yüzeyleri arasındaki mesafe 8 mm iken elektrik alan dağılımı.

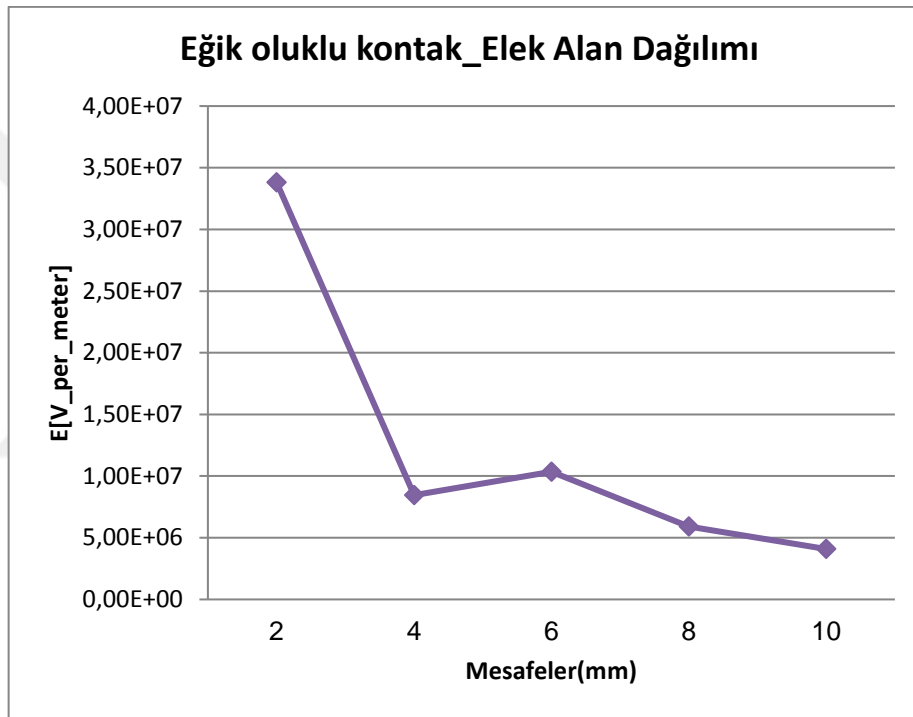


e. Temas yüzeyleri arasındaki mesafe 10 mm iken elektrik alan dağılımı.

Şekil 5.14: Eğik oluklu tip kontağın 2-10 mm mesafelerde elektrik alan dağılımları (a-e).

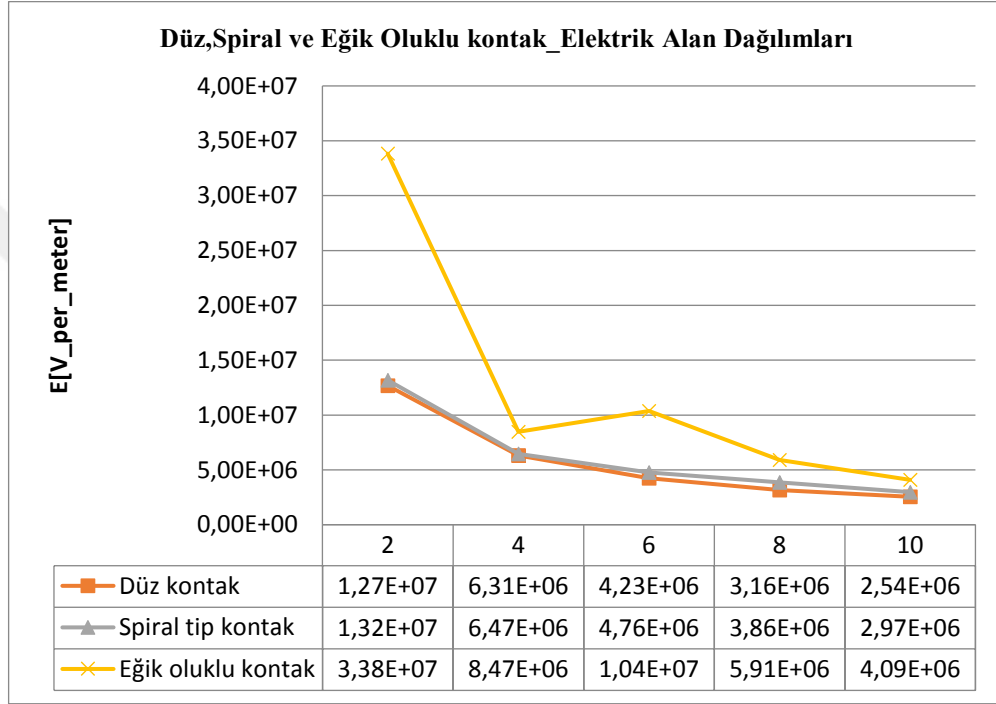
Simülasyon sonuçları bu kontak tipinin orta ve daha yüksek voltajlı güç sistemlerinde kullanmaya uygun olduğunu desteklemektedir. Bu tip kontak yapısı en çok kullanılan kontak tipidir.

Kontaklar arasındaki mesafe 2 mm iken elektrik alan dağılımının sayısal değeri $3,38E+07$, 4mm de $8,47E+07$, 6 mm de $1,04E+07$, 8 mm de $5,91E+06$ ve 10 mm de ise $4,09E+06$ olduğu görülmüş ve sonuçlar Grafik 5.15'te gösterilmiştir.



Grafik 5.15: Eğik oluklu tip kontakın 2-10 mm mesafelerde elektrik alan değerlerinin grafiksel gösterimi.

Elektrostatik analiz sonucunda elde edilen bu üç farklı kontak çeşidinin elektrik alan sayısal değerleri Grafik 5.16’da karşılaştırılmıştır. Düz tip kontakta 2 mm’den 10 mm’ye doğru kontaklar açıldıkça elektrik alan değerleri $1.27E+07$ ’den $2.54E+06$ ’ya kadar değişmektedir. Spiral tip kontakta 2 mm’den 10 mm’ye doğru kontaklar açıldıkça elektrik alan değerleri $1.32E+07$ ’den $2.97E+06$ ’ya ve eğik oluklu kontak çeşidinde 2 mm’den 10 mm’ye doğru kontaklar açıldıkça elektrik alan değerleri $3.38E+07$ ’den $4.09E+06$ ’ya doğru değiştiği görülmektedir.



Grafik 5.16: Düz- spiral-eğik oluklu tip kontakların farklı mesafelerde (2-10) elektrik alan değerlerinin grafiksel gösterimi.

Üç farklı kontak tipi modellenerek elektrostatik analiz yöntemi ile elektrik alan simülasyonları yapılmıştır. Şekil 5.8, 5.11 ve 5.14 incelendiğinde, kontak temas yüzeyleri arasındaki renk değişimleri; düz kontakta renk genel olarak kırmızı, spiral kontakta sarı renk ve eğik oluklu kontakta ise yeşil renk olduğu görülmektedir. Sonuçlar; düz kantağın düşük voltajlı güç sistemlerinde, spiral kantağın orta gerilimli güç sistemlerinde ve eğik oluklu kontak tipinin ise orta ve yüksek gerilimli güç sistemlerinde kullanılmaya uygun oldukları desteklemektedir.

Elde edilen sonuçlar farklı kontak yapılarının geliştirilmesi ve malzeme seçimi, anahtarlama kapasitesinin artırılması üzerinde önemli etkisinin bulunduğunu göstermiştir.

6.TARTIŞMA VE SONUÇ

Teknolojinin hızla geliştiği günümüzde artan rekabete ayak uydurmak için geliştirilen ürünlerin dayanıklılığı, kalitesi ve uzun ömürlü olması gibi özellikler oldukça önem arz etmektedir. Güç sistemlerinin verimli bir şekilde çalışması için devreyi koruyan kesicilerin seçimi hayati önem kazanmaktadır. Bu alanda firmalar geçmişten günümüze SF6, vakumlu, basınçlı, yağlı ve manyetik üflemlerli kesiciler geliştirdiler.

Bilindiği gibi vakumlu devre kesicilerde arkı söndürmek için diğer kesici türlerinde olduğu gibi harici bir madde kullanılmaz. Burada ark söndürme işlemi havası tamamen boşaltılmış bir vakum tüpünün içinde, akımın sinüzoidal dalgasından yararlanarak, ortam basıncı yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Bu özellik bu kesici türünü oldukça avantajlı kılmıştır.

Devre kesicilerin devreyi açması veya kapatması esnasında yüksek akım ve ısıdan dolayı ark meydana gelmektedir. Oluşan ark kontak yüzeylerine ciddi zarar vermekte ve kesici ömrünü kısaltmaktadır. Güç sistemlerinde enerjinin verimliliği ve sürekliliği için bu istenmeyen bir durumdur.

Ark olayını kontrol etmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan en önemlisi Manyetik alan ile ark söndürme işlemidir. Bunun için geometrisi değiştirilmiş özel kontaklar kullanılır. Bu kontaklardan ilki aksel manyetik alan kontakıdır. Burada manyetik alan, kontak sistemine dahil edilmiş bir bobin tarafından oluşturulan akseldir. Bu yöntemde ark, manyetik alanın belirli bir minimum eşik değerinin üzerinde yayılım modunda olacaktır ve dağınık arkı söndürmek kolaydır. İkinci kontak teknoloji ise, lorentz kuvvetinin etkisi altında kontakların yüzeyi üzerinde arkın dönmesi için yapıldığı radyal manyetik alan olarak adlandırılır. Burada ark kontak yüzeyleri üzerinde hızlı bir şekilde döndüğu için tek bir noktaya zarar vermemiş olur.

Devre kesicilerden en iyi verim almak için anahtarlama kapasitesini arttırmak gerekir. Anahtarlama kapasitesini arttırmanın iki yolu vardır. Bunlardan ilki kontak yüzeyleri için kullanılan malzeme seçimidir. Genellikle CuCr, WCu, MoCu, WAg gibi refrakter bileşenlere dayalı malzemeler kullanılır, ancak yapılan çalışmalar neticesinde bunlar

içinde en uygun olan CuCr malzemesidir. Yapılan çalışmalar sonucunda %25 Cu, %75 Cr için en iyi verimim alındığı görülmüştür. Anahtarlama kapasitesini arttırmanın bir başka yolu da kontak geometrisini değiştirmektir. Bu aşamada geçmişten günümüze birçok kontak çeşidi geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları; düz kontak, spiral tip kontak ve eğik oluklu kap tipi kontaklardır. Ansys Maxwell sonlu elemanlar yöntemi ile yaptığımız elektrostatik analizlerin sonucu; düz tip kantağın daha çok düşük ve orta gerilimlerde, spital tip kantağın daha çok orta gerilim şebekelerinde ve eğik oluklu tip kantağın ise hem orta hemde yüksek gerilim şebekelerinde kullanılmaya uygun olduğu değerlendirilmiştir.



7.KAYNAKLAR

- [1] **Özkan, Y.** (1994). Yüksek Gerilim Güç kesicileri Teori. *Tasarım ve Deney, İstanbul teknik Üniversitesi Matbaası Gümüşsuyu, 1*, 20.
- [2] **Vaze, M., Kulkarni, S., Hemachander, M., Acharya, V. K., Rayudu, S. R., & Andrews, L.** (2014, September). Estimation of the velocity of arc motion in vacuum interrupters with radial magnetic field type of contacts. In *2014 International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)* (pp. 173-176). IEEE.
- [3] **Fink, H., Heimbach, M., & Shang, W.** (2000). Vacuum interrupters with axial magnetic field contacts. *ABB review*, (1), 59-64.
- [4] **Mamuk, S.** (2019). *Elektrik devre kesicilerinin anahtarlamasında oluşan arklarının azaltılmasına yönelik yeni bir model tasarımı* (Yüksek lisans tezi). Siirt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Siirt.
- [5] **Miao, H., Wang, H., & Xu, Y.** (2009, April). The numerical calculation and optimization design of electric field for the high voltage SF 6 circuit breaker arc-quenching chamber. In *2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply* (pp. 1-5). IEEE.
- [6] **Robin-Jouan, P., & Yousfi, M.** (2007). New breakdown electric field calculation for SF6 high voltage circuit breaker applications. *Plasma Science and Technology*, 9(6), 690.
- [7] **Iturregi, A., Torres, E., & Zamora, I.** (2011, April). Analysis of the electric arc in low voltage circuit breakers. In *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*.
- [8] **Li, W. H., Hu, Q. L., & Guan, C.** (2019, July). Design of Bistable Permanent Magnet Mechanism for 12KV Vacuum Circuit Breaker. In *2nd International Conference on Electrical and Electronic Engineering (EEE 2019)* (pp. 118-123). Atlantis Press.
- [9] **Iturregi, A., Torres, E., Zamora, I., & Abarrategui, O.** (2009, April). High voltage circuit breakers: SF6 vs. vacuum. In *Proc. the 7nd Int. Conf. Renewable Energies and Power Quality* (pp. 1-6).
- [10] **Ullah, A., Lie, T. T., Gunawardane, K., & Nair, N. K. C.** (2017, June). The improvement of Rate of Rise of Recovery Voltage (RRRV) for an HTS breaker. In *2017 IEEE Manchester PowerTech* (pp. 1-6). IEEE.

- [11] **Yu, X., Yang, F., Bing, G., Liu, H., Li, X., Ai, S., & Wu, X.** (2019). Investigation on the thermal performance of a 363 kV vacuum circuit breaker using a 3D coupled model. *IEEE Access*, 7, 128606-128616.
- [12] **Mateev, V., Tanev, R., & Marinova, I.** (2014, May). Simulation of electric and thermal fields of high voltage interrupter vacuum chamber. In *2014 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)* (pp. 1-4). IEEE.
- [13] **Fink, H., Heimbach, M., & Shang, W.** (2000). A new contact design based on a quadrupolar axial magnetic field and its characteristics. *European transactions on electrical power*, 10(2), 75-80.
- [14] **Fischer, M., Christl, D., Beltle, M., Tenbohlen, S., Gentsch, D., & Ebbinghaus, W.** (2021). Influences of axial magnetic fields and different contact materials in vacuum interrupters on the chopping behaviour of switching arcs.-14
- [15] **Xue, C., Li, X., Liu, C., Liu, S., Zhao, F., & Pu, L.** (2018, September). Research and Experimental Verification of the 126kV Vacuum Interrupter Contact Structure. In *2018 7th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2018)* (pp. 1071-1076). Atlantis Press.
- [16] **Liu, Z., Cheng, S., Zhang, X., Wang, J., Wang, Q., & He, G.** (2006, September). An interrupting capacity model of axial magnetic field vacuum interrupters with slot type contacts. In *2006 International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum* (Vol. 1, pp. 297-300). IEEE.
- [17] **Yu, L., Liu, Z., Wang, J., Geng, Y., Sun, L., Yu, R., & Xue, X.** (2012, September). Contacts impact phenomena in a 126 kV vacuum circuit breaker. In *2012 25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)* (pp. 473-476). IEEE.
- [18] **Krasuski, K., Krajewski, W., & Błażejczyk, T.** (2019). Influence of contacts' orientation on the AMF distribution in inter-contact gaps of VCBs. *IET Science, Measurement & Technology*, 13(3), 346-353.
- [19] **Krasuski, K., Sibilski, H., Błażejczyk, T., Kozak, S., Dzierżyński, A., & Hejduk, K.** (2018). Vacuum chamber design for HV circuit breakers. *Prace Instytutu Elektrotechniki*.
- [20] **Zhang, M., Wang, Y., Wen, H., Li, P., & Wang, S.** (2019). Analysis and design of a pulse-closing vacuum switch for catenary fault detection. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13(13), 2646-2651.
- [21] **Ding, X., Wang, Z., Yin, Q., Chen, P., Zhou, S., & Yang, Y.** (2017). Simulation Analysis for Opening Performance of Medium Voltage Vacuum Circuit Breaker Based on ADAMS and Maxwell. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 95, p. 15007). EDP Sciences.

- [22] **Liu, Z., Wang, Z., Zheng, Y., & Wang, J.** (2009). Critical radius of axial magnetic-field contacts in vacuum interrupters. *IEEE transactions on power delivery*, 24(2), 672
- [23] **Falkingham, L. T., & Montillet, G. F.** (2004, June). A history of fifty years of vacuum interrupter development-(the English connection). In *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004.* (pp. 706-711). IEEE.
- [24] **Van der Sluis, L.** (2001). *Transients in power systems.* John Wiley & Sons Ltd.
- [25] Url-1<<http://www.elimsan.com/urunler/kesiciler/onden-mekanizmalı-vakumlu-kesici/>>,date retrieved 03.05.2022.
- [26] **Yunying, R. E. N., Ning, W. A. N. G., Huajun, D., & Liting, M.** (2019). Electric Field Simulation Analysis of 126kV Vacuum Interrupter. *Electrical Engineering and Computer Science (EECS)*, 3, 160-163
- [27] **GÜLER, Ö.** (2006). Oksit takviyeli bakır kompozitin mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilmesi ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi/Investigation of electrical properties of oxide reinforced copper composite produced by mechanical alloying (Yüksek lisans tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [28] **Heitzinger, F., Kippenberg, H., Saeger, K. E., & Schroder, K. H.** (1993). Contact materials for vacuum switching devices. *IEEE transactions on plasma science*, 21(5), 447-453.
- [29] **Zhan, X., Liu, X., Li, L., Zhu, G., & Li, P.** (2019). Experimental research on arc characteristics for a 40.5-kV vacuum circuit breaker. *The Journal of Engineering*, 2019 (16), 2777-2780.
- [30] **Temborius, S., Lindmayer, M., & Gentsch, D.** (2000, September). Switching behavior of different contact materials for vacuum interrupters under load switching conditions. In *Proceedings ISDEIV. 19th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (Cat. No. 00CH37041)* (Vol. 2, pp. 519-523). IEEE.
- [31] **Shemshadi, A., Bathaee, S. M. T., & Kashani, S. J.** (2012, August). Life time enhancement of a Vacuum Interrupter for AC Smart Grid Applications. *vacuum*, 3, 4.
- [32] **Fink, H., Heimbach, M., & Shang, W.** (2000). Vacuum interrupters with axial magnetic field contacts. *ABB review*, (1), 59-64
- [33] **Çoramık, M.** (2018). Detailed solution suggestions to the challenges using ansys maxwell on a sample analysis. papers full text book proceeding book (Örnek bir analiz üzerinden ansys maxwell kullanımında karşılaşılan güçlüklerle detaylı çözüm önerileri. bildiri tam metin kitabı proceeding book), 78.
- [34] **Choonhapran, P.** (2007). *Applications of high voltage circuit-breakers and development of aging models* (Doctoral dissertation, Technische Universität).

- [35] **Sağlam, M.** (2019). *Uzaktan akıllı kesici kontrolü için yeni bir yaklaşım* (Yüksek lisans tezi). Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- [36] **Kürün,E.**(2006). *Dinamik ark modelleri ve devre kesicilerin bilgisayar simülasyonu* (Yüksek lisans tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [37]Url-2<<https://electricianworld.net/vacuum-circuit-breakers>>, date retrieved 01.05.2022.
- [38]Url-3<<https://www.electricalpaathshala.com/2020/07/vacuum-circuit-breaker-and-its-working/>>, date retrieved 15.06.2022.



ÖZGEÇMİŞ

Cengiz ÇEÇEN, İlk ve ortaokulu Elâzığ'da tamamladı. Liseyi Malatya Darende Çok Programlı Lisesinde okudu. 2010 yılında Batman Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği Bölümünden, 2020 Yılında İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2007 yılından itibaren TCDD'de çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

- Çeçen, C., Mamiş, M. S. (2022). Electric field simulation of amf and rmf contact type vacuum circuit breakers. E. Uzunali, (Ed.), 2. *International Siirt Conference On Scientific Research*, Conference Proceedings Book, (560). Siirt University, March 21-23.
- Çeçen, C., Mamiş, M. S. (2022). Investigation of different contact structures developed to increase the vacuum circuit breaker switching capacity. A. Ünsal, (Ed.), 2. *International Cappadocia Scientific Research Congress*, (pp. 1525-1540). Cappadocia-Nevşehir, June 17-19. <https://www.cappadociacongress.org/>