

Yüksek basınçta iyon çiftlerinin tekrar birleşmeleri mümkündür. Birleşmenin hızı pozitif ve negatif iyonların konsantrasyonuna bağlıdır. Pozitif (n_+) ve negatif (n_-) iyonların aynı miktarda olması halinde,

$$\frac{dn_+}{dt} = \frac{dn_-}{dt} = -\beta n_+ n_- \quad \beta: \text{tekrar bağlanma katsayısı}$$

$n_+ \sim n_- = n_i$ olduğu için $t=0$ anında $n_i = n_{i0}$ ve $t_{ni} = n_i(t)$

$$\frac{dn_i}{dt} = -\beta n_i^2$$

$$\frac{dn_i}{dt} = -\beta dt$$

$$n_i(t) = \frac{n_{i0}}{1 + n_{i0}\beta t}$$

İyon düzeyinin yarıya düşmesi için geçen zaman ise,

$$t_n = \frac{1}{n_{i0}\beta}$$

Tekrar birleşme olayı, yüksek basınçlarda, yayılmanın (difüzyon) önemli olmadığı durumlarda iyonizasyonu azaltan başlıca etkidir.

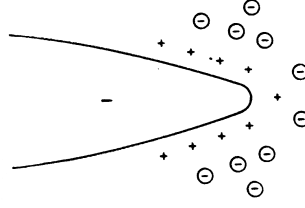
3.3.9 KORONA

Gaz yalıtkanlarda sivri noktalarda veya köşelerde gözlenen korona olayı delinmenin gerçekleşmesinden çok önce yüksek elektrik alanın olduğu bu bölgelerde hafif ışıltı şeklinde kendini belli eder. Genelde korona oluşumu sistem açısından çok zararlı olmamakla birlikte, yüksek gerilim hatlarında kayıplara yol açması, gürültü sinyalleri üretmesi veya sulfur hexaflorid (SF₆) kullanılan ortamlarda yalıtkanlığı azaltıcı bazı yan ürünlerin oluşmasını hızlandırması nedeniyle mümkün olduğunca engellenmeye çalışılır. Pozitif, negatif ve AC olmak üzere başlıca üç ayrı tipte incelenir.

3.3.9.1 NEGATİF KORONA

Negatif elektrodun bulunduğu bölgede Townsend boşalımları gözlenir. Sivri bölgeden elektronların çevreye yayılması sonucunda öncelikle pozitif elektriksel yükler oluşur (şekil 3.14).

Ancak biraz ileride elektronların oksijen moleküllerine yapışmaları sonucu negatif yüklerin oluşumu hızlanır ve bu sayede elektrodun sivri ucuna etkiyen elektriksel alanın şiddeti azalır.



Şekil 3.14 Negatif korona oluşumu

Yüklerin kısa zaman sonra elektrodun ucundan uzaklaşmasıyla birlikte, elektriksel alan yeniden güçlenir ve elektriksel boşalmalar başlar. Kendini tekrar eden bu daimi boşalım, elektromanyetik gürültüye ve dielektrik yalıtkanlarda kayba neden olur. Korona boşalmaların kısa mesafeli (Townsend) olduğu için, Paschen eğrisi kullanılarak ısıltılı zarın oluşması için gerekli gerilim seviyesi hesaplanabilir. Sivri nokta 'r' yarıçaplı bir küreye, yer ise sivri noktayla eşmerkezli 'R' çapındaki bir küreye benzetilirse (şekil 3.15), bu durumda gerilim sivri noktadan 'Δ' mesafesi uzaklıkta Paschen eğrisinde belirtilen seviyeye ulaşıncaya, elektrodun etrafında ısıltılı bir zarın oluştuğu gözlenir.

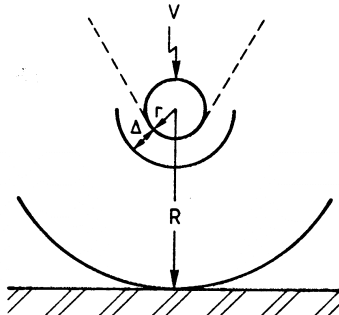
$$V = \frac{\text{kapasite}(r \rightarrow r + \Delta)}{\text{kapasite}(r \rightarrow R)} U_d$$

$$= \frac{\frac{1}{r} - \frac{1}{R}}{\frac{1}{r} - \frac{1}{r + \Delta}} U_d$$

Toprağa olan mesafe elektrodun yarıçapından çok daha büyük olduğu için ($R \gg r$)

$$V = \left(1 + \frac{r}{\Delta}\right) \cdot U_d$$

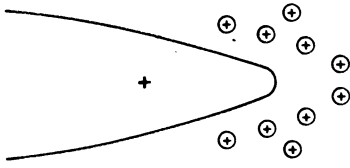
'Δ' mesafesi değiştirilerek Paschen eğrisinden uygun düşen delinme gerilimleri denkleme yerleştirilmek suretiyle, V'nin delinmeyi başlatacak minimum değeri hesaplanır. Burada dikkat edilecek nokta korona olayının elektriksel alana bağlı olmadan doğrudan uygulanan gerilimin bir fonksiyonu olarak değiştiğidir.



Şekil 3.15 Negatif koronave ısıltılı zarın oluşumu

3.3.9.2 POZİTİF KORONA

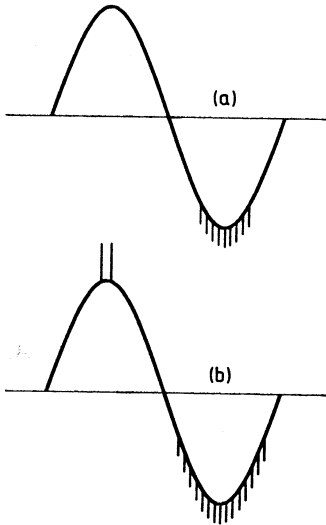
Delinme gerilimleri yaklaşık aynı olmakla birlikte, pozitif korona oluşum açısından negatif koronadan oldukça farklıdır (şekil 3.16). Yüksek elektrik alanda negatif yüklü bir katodun bulunmaması sebebiyle ısıtılı zar oluşumu daha yüksek gerilim seviyelerinde gerçekleşir. Anot kısmında oluşan pozitif elektriksel yükler, anod civarındaki yüksek elektriksel alanın etkisini azaltırlar. Yüklerin dağılmasıyla birlikte elektriksel alan yeniden güçlenir ve elektriksel boşalmalar başlar.



Şekil 3.16 Pozitif korona

3.3.9.3 AC KORONA

AC gerilimlerde sırasıyla pozitif ve negatif korona olayları gözlenir (şekil 3.17). Negatif korona daha düşük gerilim seviyelerinde Townsend boşalımları sonucu görülürken, kanal boşalımı sonucu oluşan pozitif korona daha büyük genliğe sahiptir ve düzensizdir. Korona kayıpların hava şartlarına (yağmur, kar, buz, vs.) doğrudan bağlıdır ve ekstrem durumlarda normalin 10-100 katı kadar olabilir. Kayıplar iletkenin çapı ile büyüdükleri için, özellikle yüksek gerilim seviyelerinde birkaç telden oluşan demet iletkenler kullanılır.



Şekil 3.17 AC gerilimde korona

3.3.10 DELİNME İÇİN ZAMAN GECİKMESİ

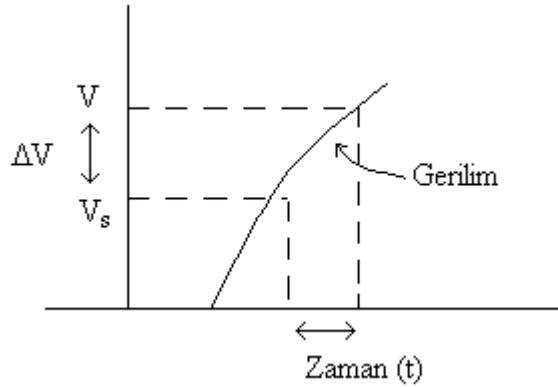
Daha önceki bölümlerde kıvılcım delinmesi düzgün alanlardaki iyonizasyon işlemi ile açıklanmıştı. Ancak pratikte gazlarda delinmeler hızlı olmakla birlikte ani değildir, delinmeye sebebiyet verecek gerilimin uygulanması ile delinmenin meydana gelmesi arasında belirli bir zaman aralığı vardır. Bu zaman farkı ‘zaman gecikmesi’ olarak adlandırılır.

Townsend delinme kriterinin oluşabilmesi için elektrodlar arasında ki açıklıkta en az bir elektronun bulunması gerekir. DC gerilimler yada düşük frekanslı (50 Hz) AC gerilimlerde bu koşul kolaylıkla yerine getirilebilir, ancak hızlı değişen kısa süreli gerilimlerde (yaklaşık 10^{-6} s) reaksiyonu başlatacak olan elektron elektrodlar arası boşlukta bulunmaya bilir ve bunun sonucu olarak da delinme meydana gelmez. Elektronun ortaya çıkışının istatistiksel dağılım göstermesi sebebiyle delinmeyi oluşturacak gerilimin uygulanması ile reaksiyonu başlatacak elektronun oluşumu arasında geçen zaman aralığının ‘*istatistiksel gecikme zamanı* (t_s)’ olarak belirlenir. Elektronun oluşumuyla birlikte, aralığın delinmesine sebebiyet verecek iyonizasyonun gerçekleşmesi arasında geçen zamana ise ‘*oluşum zaman gecikmesi* (t_l)’ adı verilir. Toplam gecikme ise

$$t = t_s + t_l$$

olarak belirlenmiştir.

Delinme meydana gelmesi için uygulanan gerilimin statik delinme geriliminden (V_s) büyük olması gerekir. Şekil 3.18’de t_l ’nin aşırı gerilimle değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.18 Delinme olayında gerilime bağlı zaman gecikmesi

4. KATI YALITKANLAR

4.1 İZOLATÖRLERDE BOZULMALAR

Katı izolatörlerde bozulma moleküler yapıya, izolatörün şekline, ortam sıcaklığına ve çevre koşullarına bağlıdır. Gazlar ve sıvıların aksine, katı izolatörler kendilerini onarma yeteneğine sahip değildirler, yani bir kez delinmeye uğradıktan sonra uygulanan gerilimin kesilip, bir kez daha uygulanmasına olanak vermezler. Bir kez delinmeye yada erozyona uğramış katı izolatör, kimyasal ve fiziksel özelliklerini yitirmiş yada değişime uğramıştır ve artık izolasyon özelliğini kaybetmiştir.

4.2 YAŞLANMA ETKİSİ

IEC yaşlanma etkisini izolatörlerin servis performansında geri dönüşü olmayan bir değişim şeklinde tanımlanmıştır. Genelde bu değişim zamana bağlı bozulma oranı şeklinde ifade edilir.

Çeşitli iç ve dış etkenler dielektrik bir izolasyon malzemesine zarar verebilirler. Elektriksel olaylar (kaçak sızıntı akımı, kuru band boşalmaları, vb.) izolatörün performansından direkt olarak sorumludurlar. Ayrıca nem, sıcaklık değişimi, ultra-viole radyasyon, mekanik yükler ve güneş ışığı gibi çevre kaynaklı etkenler de yaşlanma etkisini hızlandırarak izolatörün ömrünü kısaltabilirler. Ayrıca rüzgar faktörü de vibrasyona ve dolayısıyla mekanik yorgunluğa sebep olduğundan özellikle seramik olmayan izolatör kullanıldığında dikkate alınmalıdır. Yaşlanma ayrıca malzemenin moleküler seviyedeki yapılanması ile de ilgilidir. Yaşlanma, bu faktörlerin aynı anda, yada belirli bir sırayı takip etmesiyle değişebilir. Genelde elektriksel aşınma bağlı olan yaşlanma etkisi, ağaç oluşumu, boşalım ve dielektrik ısınma gibi etkenlerin sonucu oluşur.

4.3 ANİ DELİNME

Laboratuarda test edilen izolatörler 1–15 MV arasındaki oldukça yüksek gerilim seviyelerine dayanabilirler. Eğer bir malzemenin dayanma gücü sadece kimyasal yapısına ve dielektrik özelliklerine bağlı olarak ifade ediliyorsa buna *ani delinme gücü* adı verilir.

Ani delinme dayanımına yalıtkan içindeki elektronların uygulanan alandan kazandıkları enerjinin elektronların birleşme değerinden iletim bandına geçmelerini önleyen engeli aşmalarına yeterli olması durumunda erişildiği kabul edilir. Pratikte çok kısa süreli darbe gerilimi uygulamaları dışında, izolasyon malzemelerinin A.D.G. hesaplamak mümkün olmamıştır. Ani delinme elektronik bir yapıdadır, çok kısa bir süre içerisinde (10^{-8} s– 10^{-7} s) yaklaşık 10^8 V/m civarında alan değerleri elde edilir. Genelde, bir izolatörün bozulmasına sebep olan gerçek faktörler, elektronik yapı dışındaki mekanizmaların kombinasyonu şeklinde ifade edilirler.

4.4 ELEKTROMEKANİK DELİNME

Kırılmaksızın dikkate değer bir oranda şekil değişimine dayanabilen cisimler, statik elektrik basınç, mekanik basınca eşit veya ondan daha büyük olduğu takdirde kırılabilirler. Statik elektrik basınç yalıtkan gerilim uygulanması durumunda yüzlerden birinde pozitif diğerinde negatif yüzey yükleri oluşmasından ileri gelir. Alan şiddeti 10^8 V/m civarında ise elektrik basınç birkaç yüz N/m² mertebesine ulaşır ve bu değer birçok yumuşak polimerleri sıkıştırmaya ve daraltmaya yeterlidir.

Young Modülü Y olan a_0 (m) kalınlığındaki bir yalıtkan numuneye U gerilimi uygulandığı zaman, numunenin kalınlığı a 'ya iniyorsa, statik elektrik basıncın mekanik basınca eşit olması koşulundan

$$\frac{1}{2} \epsilon E^2 = \frac{1}{2} \epsilon \left(\frac{U}{a} \right)^2 = Y \ln \left(\frac{a_0}{a} \right)$$

$$U^2 = a^2 \frac{2Y}{\epsilon} \ln \left(\frac{a_0}{a} \right)$$

Burada 'a' değerine göre türev alınırsa $\frac{a}{a_0} = e^{-1/2} = 0.6$ olduğu an

$$a^2 \ln \left(\frac{a_0}{a} \right)$$

fonksiyonunun bir maksimumu olduğu anlaşılır. Bu denkleme göre U 'nun hiçbir gerçek değeri

$\left(\frac{a}{a_0} \right)$ 'ın 0.6'dan küçük kararlı bir değerini veremez.

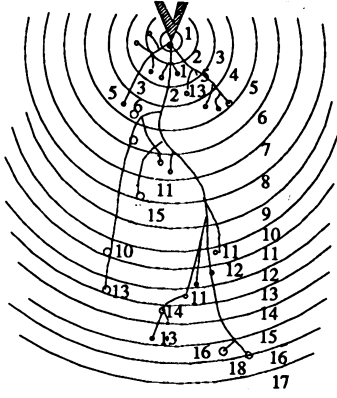
Eğer bu değerde ani delinme dayanımına erişilemezse U 'daki çok az bir artış, kalınlığı kararsız kılar ve numune kırılır. En yüksek delinme dayanımı

$$E_d = \frac{U}{a_0} = 0.6 \left(\frac{Y}{\epsilon} \right)^{1/2}$$

şeklinde verilmiş olup, burada Young Modülünün basınca ve zamana bağlılığı ihmal edilmiştir.

4.5 ELEKTRİKSEL VEYA KANAL DELİNMESİ

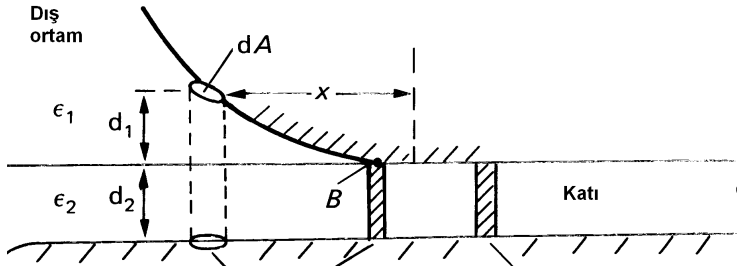
Bir katı yalıtkan numune içine tam olarak gömülmüş elektrotlara bir gerilim uygulandığı zaman, katottan itibaren bir elektron çarpma suretiyle çoğalarak bir elektron çığı meydana getirebilir. Bu çığ belli bir kritik yolu aşınca kanala dönüşür ve sonuç olarak delinme meydana gelir. Delinme genel olarak tek bir boşalma kanalından ibaret değildir. Yalıtkan numune içine gömülmüş çubuk-düzlem elektrot sistemine bir darbe gerilimi uygulanırsa ağaca benzer delinme kanalları meydana gelir (şekil 4.1).



Şekil 4.1 Katı yalıtkanlarda kanal delinmesi

DC gerilimlerde ağaç oluşumu gerilimin kritik değeri aşması sonucu oluşur. AC gerilimlerde ise biriken yükler sebebiyle ağaç oluşumu düşük gerilim seviyelerinde gerçekleşir ve ağaçlar gözlenir hale gelmeden önce bir oluşum evresi geçirirler. Ağaç oluşumu 3 safhaya ayrılır.

1. Enerjinin dielektrik malzemenin belirli noktalarına iletildiği oluşum safhası.
2. Ağaç oluşumu safhası (Bu esnada iyonlar gaz halinde yüksek elektrik alanın etkili olduğu yerlerde yoğunlaşırlar).
3. Ağacın büyümesi (Uygulanan gerilimdeki enerji gaz halindeki iyonlara iletilir ve katı malzeme aşınmaya devam eder).



Şekil 4.2 Köşe delinimi

Elektrodlara bir U gerilimi uygulanınca, bunun U kadarı çevre üzerindedir. Elektrodun değme noktasından x açıklığındaki U_1 in yaklaşık değeri:

$$U_1 = \frac{a_1 U}{a_1 + \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right) a_2} \quad a_1: 1. \text{ ortam kalınlığı} \quad , \quad a_2: 2. \text{ ortam kalınlığı}$$

Gaz veya havadan oluşan çevrenin dielektrik katsayısı, katı yalıtkan numunenin dielektrik katsayısından çok daha küçük olduğundan, çevre ortam daha büyük bir elektriksel zorlanmaya maruz kalır. Sonuçta katı yalıtkanın ani delinme dayanımına erişilemeden önce çevre ortamı delinir. İzolatörün yüzeyinde boşalmanın olduğu yerde (A bölgesi) bir yük birikimi olur ve bu da bölgedeki alanı büyük ölçüde bozar. Çevre ortamın delinmesiyle ortaya çıkan bu aşırı yükler,

başlangıçta düzgün olarak (equipotential) nitelendirebileceğimiz alanın bozularak çubuk düzlem elektrot sisteminde gözlemlendiğimiz düzgün olmayan bir hal almasına sebep olurlar. Bir boşalma kanalının uçları arasındaki yük yığılması ani delinme alan şiddetinden (10^8V/m) çok daha yüksek olan bölgesel alanlara (1GV/m) sebep olabilir ve bu alanlar bölgesel delinmeler meydana getirirler. Yalıtkanın içinde bu şekilde delinme kanalları oluşması ve bütün kalınlık boyunca devam etmesi sonucu delinme olayı tamamlanır.

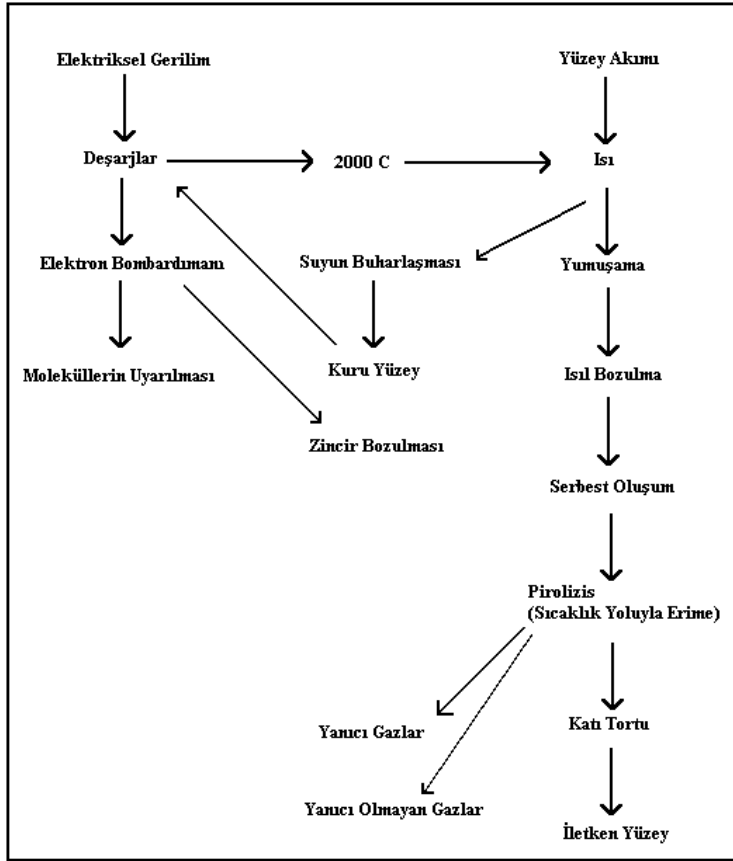
Bu konuda ‘Pais’ değişik sıcaklık derecelerinde ısıtılarak elde edilen termoset polimerlerin sertlik dereceleri ile elektriksel dayanımları arasında ilişki kurmuştur. Bu teze göre mekanik ve elektriksel özellikler, malzemenin moleküler yapısından kaynaklanmaktadır ve herbir reaksiyonda moleküler zincirin çeşitli parçaları yer alabilirler. Bu hipotez özellikle mekanik ve elektriksel kayıpları açıklamakta kabul görmektedir.

4.6 YÜZEY AŞINIMI

Yüksek elektrik alan malzeme boyunca lokal kıvılcımların ve boşalmaların oluşumuna sebep olur. Bu boşalmalar her ne kadar izolatörün tamamen delinmesine sebep olmasalar da izolatörün yüzeyinin aşınımını hızlandırırlar (*şekil 4.3*). Burada etken olan faktörler:

- a) Kıvılcım içerisindeki iyon bombardımanı sonucu aşınım (erozyon)
- b) Kimyasal aşınım
- c) Yüzeyin karbon haline dönüşümü

Karbonize olarak aşınım, boşalma başlangıcı, karbon oluşumu ve elektrod, uygulanan gerilim, boşalım yeri, boşalım enerjisi gibi çeşitli etkenlere bağımlı olan karbon yüzey yayılımı gibi çeşitli olayların birbirini takip eden bir kombinasyonu şeklinde gelişir. Esasında karbon esaslı bu aşınım günümüzde kullanılan pek çok modern, düşük kayıplı, elektriksel izolasyon malzemelerini tehdit eden başlıca etkenlerden biridir. Servis hayatı boyunca bir izolatörün yüzeyi daimi olarak kirlenmeye maruz kalır. Bu kir atmosferdeki nem vasıtasıyla izolatörün yüzeyine yapışır ve bu ıslak tabaka yüksek gerilim elektrodu ve toprak arasında iletken bir bölge meydana getirir. Yüzey direnci nem ve kirle birlikte azalmaya başlar ve bunun sonucu yüzeyden daha fazla akım geçer ve yüksek güç kaybına sebep olur. Yüksek güç kaybı sıcaklık artışını hızlandırır ve yüzeydeki nemin buharlaşmasına neden olur. Sonuç olarak iletken hale dönüşmüş bu kanallar kesilirler ve kuru bölgeler meydana getirirler. Neredeyse tüm gerilim bu bölgede yoğunlaşır ve oluşan boşalmalar erozyona ve karbon halinde aşınımlara sebebiyet verirler. Genelde, eğer bu karbon haline dönüşmüş kanallar belirli kritik bir değeri aşarlarsa izolatörün geri kalan kısmı artık uygulanan gerilime dayanamaz ve bozulma meydana gelir.



Şekil 4.3 Katı yalıtkanlarda bozulma mekanizmaları

Karbonize aşınım 3 safhadan oluşur:

1. Sentetik izolatorler yeni oldukları zaman yüzeyleri hidrofobik bir özellik gösterir. Yüzeydeki kaçak sızıntı akımlar sınırlıdır ve yüksek yüzey direnci gösterirler.
2. Zamanla yüzeyde nem ve kirin artması sonucu kaçak sızıntı akımları artış gösterir ve bu da geçici yada kalıcı bir biçimde hidrofobik özelliğin kaybına neden olur.
3. Bu özelliğin kaybıyla yüzeyde oldukça stabil kuru bölgeler ve yüzeysel boşalmalar meydana gelmeye başlar. Sonuç olarak oldukça önemli bir miktarda enerji sentetik izolatorün içine işler. Kaçak akımları arttıkça , oluşan boşalım bölgeleri hareketli bir hal alır ve belirli lokal bölgelere önemli miktarda enerji boşalımını azalır. Bu olay, izolator yüzeyi tamamen bozuluncaya kadar devam eder.

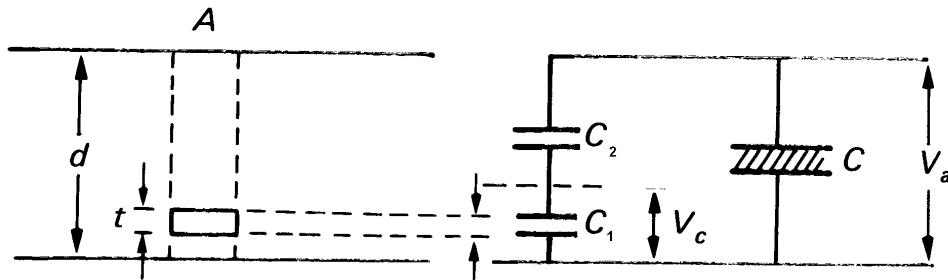
4.7 EROZYON AŞINIMI

Sentetik izolasyon malzemelerinin yüzeyinde meydana gelen yüzey boşalmaları moleküler bazda sıcaklık ve elektronik değişimler meydana getirirler. Bazı durumlarda karbon yapıda meydana gelen bu bozulma, geride artık karbon bırakmaz. Bu tip maddeler karbonize aşınımına pek meyilli değildir; aksine aşırı yüzey boşalmaları yüzeyin erozyona uğramasına sebep olur

Termogravimetrik Analiz (TGA) tekniği ile polimerin karbonize aşınma veya erozyona uğramaya meyli belirlenebilir. Bu deney esnasında izolator sabit bir sıcaklık artışı ile ısıtılır ve sürekli olarak ağırlığı takip edilir. Aşınma menşeli izolasyon malzemeleri elektriksel boşalımın sonucu hafif meyilli bir eğri şeklinde ağırlıklarını kaybederler. Karbon aşınım menşeli polimerler ise belirli bir seviyeden itibaren bir ara bölgeye sahiptirler. Bu bölge kısmen parçalanmış polimer artıklarının oluşumunu belirler.

4.8 BOŞLUK DELİNMESİ

İzolasyon sistemlerinde daima yalıtkan malzemenin içinde veya elektrod-yalıtkan malzeme arasında bazı boşluklar veya oyuklar bulunur. Bu boşluklar genellikle delinme dayanımı katı yalıtkanlardan daha düşük olan gaz veya sıvı yalıtkanlarla doludur. Bu dolgu malzemelerinin dielektrik katsayıları katı yalıtkanınkinden daha küçüktür. Dolayısıyla bu bölgelerde katı yalıtkanla oranla daha büyük bir alan şiddeti meydana gelir. Yalıtkanın normal şartlarda zorlanması durumunda bile boşluğun uçlarındaki gerilim delinme gerilimini aşabilir ve yalıtkan zamanla delinir (şekil 4.4).



Şekil 4.4 Boşluk delinmesi

Eşdeğer devrede C_1 boşluğun kapasitesini, C_2 ise C_1 'e seri bağlı olan yalıtkan malzemenin kapasitesini göstermektedir.

$$U_1 = \frac{c_2}{c_1 + c_2} u$$

olup, burada

$$c_1 = \frac{\epsilon_0 S}{a_1} \quad , \quad c_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{a - a_1}$$

$$U_1 = \frac{U}{1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left(\frac{a}{a_1} - 1 \right)} \quad , \quad a_1 \ll a$$

4.9 TERMİK DELİNME

Katı yalıtkanlarda termik delinme olayı genellikle AC gerilim altında bulunan malzemelerdeki dielektrik kayıplar veya DC gerilim altındaki resistif kayıplar nedeniyle meydana gelir. Normal şartlar altında oda sıcaklığında gerilim altında bulunan katı yalıtkanların üzerinden geçen akım miktarı ihmal edilecek seviyelerdedir, ancak sıcaklığın artması akımın da artmasına neden olacaktır. Akım tarafından üretilen ısı kısmen dışarı atılırken, bir kısmı da yalıtkanın içerisinde kalıp dielektrik malzemenin sıcaklığını ve dolayısıyla geçen akımın da miktarını yükseltir. Bu durum kararsızlığa sebep olur ve malzemede yanma sonucu ince ve dar iletken kanalların oluşumuyla termik açıdan delinme meydana gelir.

Bir yalıtkan termal delinmenin olduğu aşağıda belirtilen durumlardan anlaşılabilir:

- Yalıtkan termal delinmenin hemen sonrasında delinme bölgesinde normalden fazla sıcaklık
- Delinme kanalı düzdür ve yan dallar içermez
- Malzemenin fazla ısınması tipik bir yanık kokusu oluşturur (örneğin kağıt yalıtkanlarda karamel kokusu!)

Yalıtkan içinde birim hacimde üretilen ısı miktarı $p(W/cm^2)$ ise, $V(cm^3)$ hacminde üretilen ısı miktarı

$$\int_V p dV$$

olarak ifade edilir. Dışarıya atılan ısı miktarı ise ısı akış vektörü $I(W/cm^2)$ 'nin V hacmini sınırlayan S yüzeyinden çıkan kısmının hesaplanmasıyla elde edilir.

$$\int_S I dS$$

' I ' ısı akış vektörü sıcaklık cinsinden

$$I = -\lambda \text{grad} \theta$$

denklemleriyle ifade edilir. ($\text{grad} \theta (C^\circ / cm)$ ve $\lambda (W / cmC^\circ)$): ısı iletim katsayısı)

Yalıtkan içinde üretilen ısı miktarı ile dışarı atılan ısı miktarı arasındaki fark birim zamanda yalıtkan içinde kalan ısı miktarını verir

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho c \theta dV = \int_V p dV - \int_S I dS$$

ρ : yalıtkanın özgül kütlesi (gr/cm^3)

c : özgül ısı

θ : sıcaklık ($^\circ C$)

$$\int_S I dS = \int_V (\text{div} I) dV$$

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} + \text{div} I = p \quad I = -\lambda \cdot \text{grad} \theta$$

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} - \lambda \cdot \text{div}(\text{grad} \theta) = p$$

Değişken olmayan (stasyonel) hallerde $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$ olduğu için

$$\text{div}(\text{grad} \theta) = -\frac{p}{\lambda}$$

Kalınlığı 'a' olan bir yalıtkanın dış ortam sıcaklığı θ_d , ısı iletim katsayısı λ ve θ sıcaklığındaki kayıp sayısı da 'k' olursa, bu durumda p yerine kE^2 ve k yerine de $k=k_d e^{\beta(\theta-\theta_d)}$ konursa, denklem

$$\lambda \frac{d^2 \theta}{dx^2} + k_d e^{\beta(\theta-\theta_d)} E^2 = 0$$

halini alır. Bu denklemin çözümü belirli bir dış ortam sıcaklığı için elektrodla uygulanabilecek maksimum gerilimi verir.

$$\theta_i - \theta_d = \frac{1.19}{\beta} \quad \text{ve} \quad U_{kr} = Ea = 0.938 \sqrt{\frac{\lambda}{k_d \beta}}$$

Denklemden de görülebileceği gibi yalıtkanın ısıarak delinmesinde yalıtkanın kalınlığının önemi yoktur. Dielektrik kayıplar sonucunda yalıtkanlarda meydana gelen termik delinmeyi gerilime bağlı olarak

$$U_T^2 = \frac{4T_c}{\rho w \epsilon \tan \delta}$$

şeklinde ifade etmek mümkündür. (ρ : spesifik termal direnç, T: kritik sıcaklık)

Denklemden yalıtkan kalınlığını içeren bir ifade olmadığı için, delinme dayanımını arttırmak ancak pressboard-yağ içeren kablolarda olduğu gibi zorlamalı soğutma ile kısmen mümkün olabilmektedir. DC gerilimlerde ise dielektrik kayıplar olmadığı varsayılırsa bu durumda denklem

$$U_T^2 = \frac{4T_c}{\rho \sigma}$$

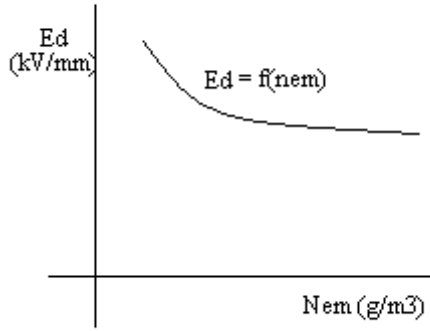
şeklini alır (σ : malzemenin iletkenlik katsayısı). Dielektrik histerezis kayıplarının ve dipol hareketlerinin olmaması delinme geriliminin AC'ye oranla DC gerilimlerde çok yüksek seviyelerde olmasına ve dolayısıyla da pratikte de hiç bir zaman bu tip bir delinmenin olmamasına yol açar.

5. SIVI YALITKANLAR

5.1 SIVI İZOLATÖRLERDE DELİNME GERİLİMİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER

5.1.1 NEM

Su damlacıkları içeren bir sıvı yalıtkanın delinme dayanımı, su damlacığı içermeyene oranla yaklaşık olarak aynı değerdedir. Ancak sıvı izolatör içerisinde az miktarda su buharı varsa, yalıtkanın delinme dayanımı küçülür. Örneğin %0.01 civarındaki su buharı delinme dayanımını 30 kV/mm'den 3 kV/mm'ye düşürebilir. Ayrıca sıvı yalıtkan içerisinde yabancı maddeler varsa, delinme dayanımı daha da düşer. Vakum içerisinde yağı alınmış bir yağın 1mm elektrod açıklığında delinme gerilimi ≈ 45 kV'dur. Uygulamada ise 5mm elektrod açıklığı için delinme gerilimleri 40-60 kV arasında değişir.



Şekil 5.1 Sıvılarda delinme dayanımının nem ile değişimi

5.1.2 TOZ İS VE ELYAFLI PARÇACIKLAR

Bir sıvı yalıtkanın yabancı maddelerden tamamen arınması hemen hemen olanaksızdır. Havanın toz ve nemi sıvının içine kolayca girdiği gibi, sıvının filtre edilmesi sırasında veya kağıt yalıtkindan da sıvıya elyafli parçacıklar girebilir. Bu parçacıklar özellikle nemli oldukları zaman dipol oluştururlar ve elektrik alanın maksimum olduğu bölgeye doğru hareket ederek orada iletken bir köprü meydana getirirler.

Dielektrik katsayısı büyük olan parçacıklar çok kez sıvı yalıtkan içinde pozitif elektrik yükleriyle yüklenirler ve bunların etrafında negatif birer iyon bulutu oluştururlar. Parçacıkların elektrik alanın maksimum olduğu bölgeye hareketi, ancak elektrik alanın çekme etkisinden ileri gelen parçacık hızına eşit veya ondan büyük olması ile olasıdır.

Sıvı içerisindeki yabancı parçacığın yarıçapı r , sıvının dielektrik katsayısı ϵ_0 ise, parçacığın E_{\max} 'a doğru hareketi

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + 2\varepsilon_0} \varepsilon_0 r^3 E^2 \geq \frac{1}{4} kT$$

denklemlerle bulunur. (E: elektrik alan, k: Boltzmann sabiti, T: sıvı yalıtkanın sıcaklığı)

Eğer $\varepsilon \gg \varepsilon_0$

$$\varepsilon_0 r^3 E^2 \geq \frac{1}{4} kT$$

Bu durumda

1. Çapı 10 Å° ve daha küçük olan yabancı maddeler sıvı içinde 20-25kV/mm'lik alan şiddetlerine kadar dağılmış durumda bulunurlar.
2. Dielektrik katsayısı küçük olan yabancı maddeler ($\varepsilon \gg \varepsilon_0$) küçük parçacıklar gibi sıvı içinde dağınık durumda bulunurlar.
3. Dielektrik katsayısı ve yarıçapı büyük olan parçacıklar, kolaylıkla köprü oluştururlar ve yoğun delinme gerilimini etkilerler. Eğer $\varepsilon_0=1$, $k=1.371 \cdot 10^{-23} / K^\circ$, $T=300K$ olursa:

Parçacık çapı (Å°)	15	25	50	60	75	100	300
E _d (kV/mm)	160	70	25	20	15	9	1.9

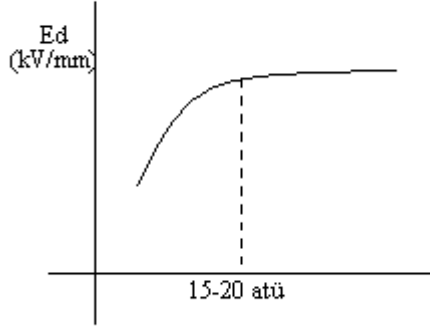
Piyasada bulunan temizlikteki sıvı yalıtkanların delinme dayanımları 9-20 kV/mm arasında değişir. Delinme dayanımı 20 kV/mm'den yukarı sıvı yalıtkan azdır. Delinme dayanımı titiz temizleme ve diğer yöntemlerle (havasını almak) yükseltilebilir.

5.1.3 GAZ KABARCIKLARI VE HAVA BOŞLUKLARI

Yağ içerisinde bulunan elektrotlara büyük bir gerilim uygulanırsa, yabancı maddeler elektrik alanının en büyük olduğu bölgede iletken bir köprü oluştururlar ve Joule yasasına göre ısınırlar. Eğer devrenin direnci çok büyük değilse, bu sırada iletken bölgesinden oldukça büyük akımlar geçebilir. Bu akım, yağın iletken köprü bölgesinde hızla ısınmasına ve dolayısıyla iletken köprünün parçalanmasına neden olur. Bu sırada yağ içerisinde gaz kabarcıkları meydana gelir ve bunlarda korona boşalması başlar. Korona boşalması, sıvının başlangıç sıcaklığına göre, bir ısıtılı boşalma veya ark boşalmasına dönüşür. Eğer sıvı başlangıçta soğuk ise (~300 K) bu durumda gaz kabarcığındaki boşalma ısıtılı, sıvı sıcak ise ark şeklinde olacaktır.

5.1.4 BASINÇ

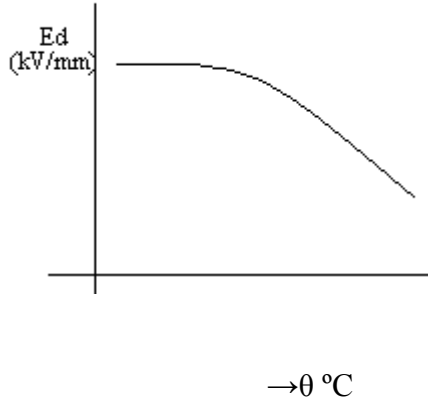
Doğru ve alternatif gerilimlerde sıvı yalıtkanın delinme dayanımı (şekil 5.2) basınçla artar. Darbe geriliminde ise delinme dayanımında değişiklik olmaz.



Şekil 5.2 Sıvıların delinme dayanımının basınca bağlı değişimi

5.1.5 SICAKLIK

Deneyler sıcaklığın sıvı yalıtkanların delinme dayanımına (şekil 5.3) büyük bir etkisi olmadığını göstermektedir.



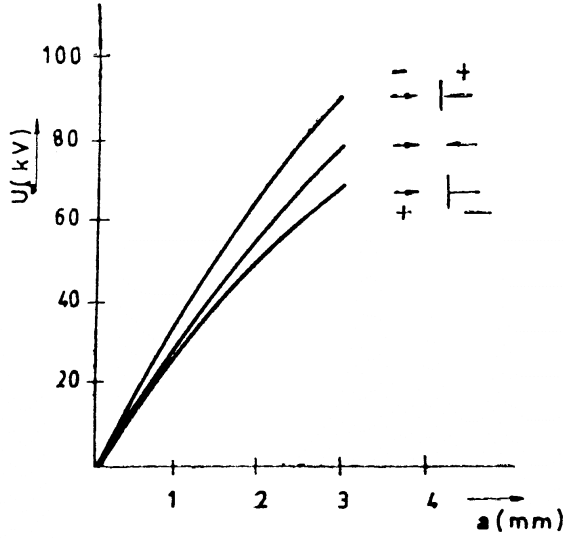
Şekil 5.3 Sıvıların delinme dayanımının sıcaklığa bağlı değişimi

5.1.6 ELEKTROD MALZEMESİ, TİPİ, YÜZEY DURUMU

Elektrod malzemesi ve bunların yüzey durumu da delinme dayanımını etkiler. Küçük elektrod açıklıklarında elektrod malzemesi ve yüzey durumuna göre delinme dayanımında %50 farklar meydana gelebilir. Demir elektrod durumunda delinme dayanımı küçük, gümüşte ise en büyüktür. (%25 fark)

5.1.7 ELEKTROD ŞEKİLLERİ VE ELEKTRODLAR ARASI AÇIKLIK

Genelde sıvıların delinme dayanımı, elektrod şekline ve elektrodlar arası açıklığa bağlıdır. Düzgün olmayan alanlarda delinme şekil 5.4'de görüldüğü gibi sivri elektrodun polaritesine göre değişir.



Şekil 5.4 Sıvı yalıtkanlarda delinme geriliminin elektrod şekli ve polaritesine bağlı değişimi

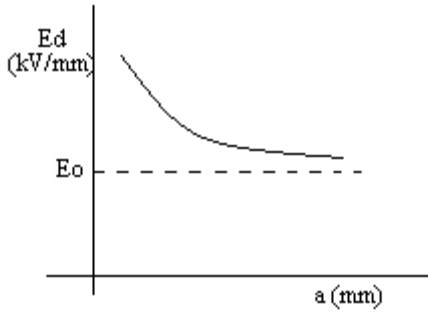
Düzgün olan durumda ise elektrodlar arası açıklık büyüdükçe sıvı yalıtkanın delinme dayanımı (şekil 5.5) küçülür. Açıklık birkaç mm veya daha büyükse, delinme dayanımı yaklaşık olarak sabit kalır.

$E_d = f(a)$ eğrisi

$$E_d = E_a + k \cdot a^{-n}$$

E_o : büyük açıklıkta delinme dayanımı

k, n : sabit

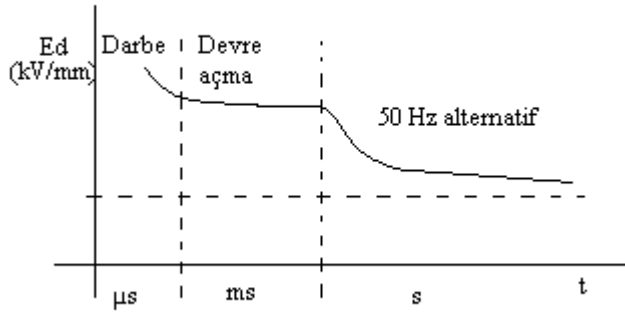


Şekil 5.5 Düzgün alanlarda sıvının delinme dayanımının elektrodlar arası açıklığa bağlı değişimi

5.1.8 GERİLİMİN UYGULANMA SÜRESİ

Sıvı yalıtkanların delinme dayanımı, gerilimin uygulanma süresine, şekline ve yağın daha önceki durumuna da bağlıdır. Kısa süreli darbe gerilimlerindeki delinme dayanımı, 50 Hz'lik alternatif gerilime oranla yaklaşık iki kat fazladır (şekil 5.6). Yapılan deneyler sonucunda gerilimin uygulanma süresi arttıkça delinme dayanımının $E = E^d \cdot t^{-\alpha}$ denkleminde ifade edildiği gibi azaldığı belirlenmiştir.

E_d : gerilimin çok kısa bir süre uygulanması durumunda delinme dayanımı, α : sabit, t : zaman, E : gerilimin geçen süre sonucundaki delinme dayanımı *şekil 5.6*'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6 Gerilime bağlı olarak delinme dayanımının değişimi

Yağın temiz olması durumunda, α katsayısı küçük olacağından, dayanma gerilimi 'E' büyük olacaktır. α ve E_d değerleri ayrıca elektrodlar arası açıklığa bağlı olarak ta değişirler.

5.2 SIVI İZOLATÖRLERDE DELİNME TÜRLERİ

Delinme gerilimine etki eden faktörler ve deney sonuçları incelendiğinde, sıvı yalıtkanlar için başlıca 3 tip delinme türü olduğu belirlenir.

5.2.1 TERMİK DELİNME

Sıvı yalıtkanların içerisinde genelde su buharı, is, toz partikülleri, elyaflar ve selüloz bazlı fiber malzemeler bulunurlar. Elektrik alan uygulandığı takdirde, bu parçacıklar polarize olarak, elektrik alanın büyük olduğu bölgeye iletken bir köprü oluştururlar. Bu olay kısa devreye sebebiyet verir ve yalıtkan kısa sürede delinmeye uğrar. Bu köprü boyunca oluşan akım ısınmaya ve dolayısıyla bozulmaya sebep olur. Küresel ve metalik partiküllerin bulunması halinde ise, partiküllerin yüzeyinde oluşan elektrik alan normalde çok daha fazla olacağından bozulma hızlanır. Doğru ve alternatif gerilimde sıvı yalıtkanın 1 dakikalık delinme dayanımlarının tayininde, en çok meydana gelen boşalma şekli termik delinmedir. Termik delinmede yağın kendi fiziksel özelliklerinden çok yabancı maddelerin cinsi, miktarı ve büyüklükleri de rol oynar. Buna karşın bu maddelerin delinme dayanımına tam olarak ne derece etki ettikleri henüz belirlenememiştir. Yabancı maddelere ek olarak suyun kendisi de yağın içinde bulunabilir. Genelde servisteki trafolarda yağın içindeki su miktarı 20 ppm ile sınırlandırılır. Bu değer 50 ppm olması durumunda, dayanma gerilimi %50 azalacaktır.

5.2.2. ELEKTROMEKANİK DELİNME

Sıvı yalıtkan içerisinde gaz kabarcıkları ve hava boşlukları olduğu zaman, boşalma olayı daha çok elektromekanik delinme şeklinde açıklanabilir. Elektrostatik kuvvetler sıvı içerisinde oluşan hava kabarcıklarını çekerek uzatırlar. Gazların delinme dayanımı sıvılardan daha düşük olduğu için,

kabarcıktaki elektrik alan dayanma sınırını aşar. Bu da kabarcığın içerisinde boşalmaya sebep olur ve sıvının kimyasal açıdan aşınımını hızlandırır. Sonuç olarak su buharı oluşumu artar ve kabarcıklar büyür. Elektrodla bir gerilim uygulandığı sürece, sıvı yalıtkan elektrodla p_D ve p_H basıncı etki eder. (p_D : dış basınç, p_H : gaz kabarcıklarının basıncı)

Sıvı yalıtkan elektrodla ayrıca bir p_A adhesion (yapışkan) basıncı ile de bağlıdır.

Toplam basınç elektrik uygulanmadığı sürece $p_D - p_H + p_A$ olur. Elektrodla bir gerilim uygulandığı zaman elektrodla arası çekme kuvvetinden ileri gelen basınç

$$p = \frac{1}{2} \epsilon E^2 \text{ 'dir.}$$

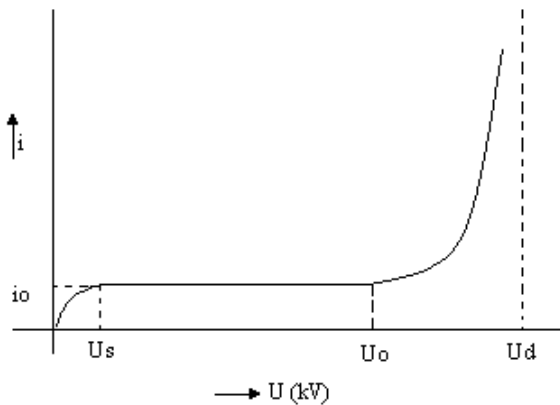
Bu basınç $p_D - p_H + p_A$ 'dan büyük veya ona eşitse, delinme meydana gelir. Bu durumda katoddan çıkan her elektron anında anoda varır ve kendisi için bir yedek elektron meydana getirir.

$$p = \frac{1}{2} \epsilon E^2 = p_D + p_A - p_H \text{ denkleminde delinme dayanımı için } Ed = \sqrt{\frac{2p}{\epsilon}} \text{ denklemi}$$

bulunur. (P : (N/m²), ϵ : (F/m), Ed : (V/m))

5.2.3 ELEKTRİKSEL DELİNME

Eğer sıvı yalıtkan çok temiz ise veya gerilim çok kısa süre için uygulanıyorsa, bu durumda boşalma olayı gazlarda olduğu gibi elektriksel boşalma teorisiyle açıklanır. Temiz bir sıvı yalıtkan içinde bulunan elektrodla bir doğru gerilim uygulanırsa $i=f(u)$ eğrisi gazlara benzer (şekil 5.7).



Şekil 5.7 Sıvılarda akım-gerilim değişimi

Küçük gerilimlerde akım gerilimle lineer olarak yükselir. Bu seviyeden sonra dayanma bölgesine erişilir. Bu bölgede gerilimin U_o değerine kadar yükselmesi, akımda değişiklik yapmaz. Bu sınırı aşınca akım non-lineer bir şekilde artar.

$$i = i_0.e^{ka(E-E_0)}$$

i: E elektrik alanındaki akım yoğunluğu

*i*₀: E₀ elektrik alanındaki akım yoğunluğu

a: elektrodlar arası açıklık

k: elektrodlar arası açıklık ve sıvı yalıtkan cinsine bağlı bir sabit

Burada *i*₀ doyma akımı elektrodların yüzey durumuna bağlıdır. Temiz elektrodlar ve madeni yağlar için *i*₀ ≈ 4.5 * 10⁻⁸ A/mm²'dir. Elektrodlar arası açıklık büyüdükçe *i*₀ küçülür. A=120mm için *i*₀=3*10⁻⁸ A/mm², iyonizasyonun başladığı U₀ gerilimine karşılık gelen E₀ elektrik alanı da E₀=10 kV/mm alınabilir. Gerilim-akım eğrisinin U₀'dan başlayarak eksponansiyel olarak artması, gazlarda olduğu gibi, çarpma suretiyle iyonizasyon olayı ile açıklanabilir.