

ELEKTRİKSEL AĞAÇLANMA MEKANİZMALARI VE DENEY YÖNTEMLERİ

E. Onel, Ö. Kalendarlı

İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi
Yüksek Gerilim Laboratuvarı, İstanbul

ÖZET

Bu çalışmada, katı yalıtkanlardaki elektriksel ağaçlanma konusuna bir giriş sağlamak ve devam edecek çalışmalara kaynak oluşturmak amacıyla, literatürde verilen bilgilerden yararlanılarak ağaçlanma mekanizmaları, deneyleri ve ağaçlanmanın önlenmesine ilişkin bilgiler verilmiştir.

1. Giriş

Elektriksel katı yalıtkanların delinme dayanımına etkiyen pekçok etken vardır. Bu tür etkenlerden birisi de yüksek gerilim yalıtıcı kablo yalıtkanlarında sıkça karşılaşılan elektriksel ağaçlanma olayıdır. Gerek kablolar gerekse ayrı olarak katı yalıtkanlar üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda, boşalma sırasında, gelişimi ağaca benzeyen dallanmış oyuk ve kenalların oluşumu, "elektriksel ağaçlanma" kavramını ortaya çıkarmıştır.

Ağaçlanma, yalıtkanlarda elektriksel zorlanmanın yüksek olduğu boşluk, yabancı parçacık, yarık, çatlak gibi yerlerde sıcaklık, basınç ve nem gibi pekçok etkenin sonucu olup gelişen bir elektriksel kısmi boşalma olayıdır. Genelde alternatif ve darbe gerilimlerinde daha etkin olan bu olay, zamanla gelişerek yalıtımın bozulmasına ve delinmesine yol açabilir. Bu da sistem güvenliği açısından istenmeyen bir durum olur.

Ağaçlanma, başlangıç koşullarına bağlı olarak değişik şekillerde oluşup gelişir. Bu bakımdan oluşumlarına ve görünümüne göre ağaçlanma şekillerine değişik adlar verilmektedir. Yalıtkan maddelerde gözlenen ağaçlanma şekilleri, elektriksel /1-4/ ve sulu ağaçlanma /5-9/ olarak iki ana başlık altında toplanabilir. Bunlar da yalıtkanın oluştukları yere göre iç ve dış (yüzeyel) ağaçlanma veya gelişme yönüne göre bir yöne gelişen ve iki yöne gelişen ağaçlanma gibi değişik sınıflara ayrılabilir.

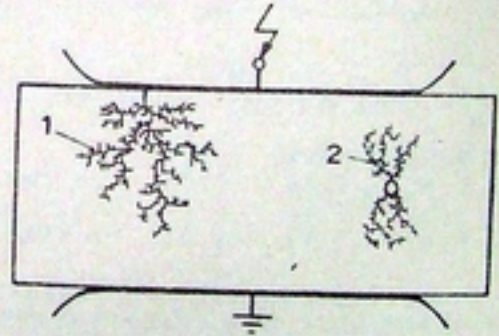
Ağaçlanma davranışını incelemeye yönelik araştırmalarda, üzerinde en çok çalışılan yalıtkan, kablo yalıtımında yaygın olarak

kullanılan polietilendir. Bu bakımdan literatürde ve burada verilen bilgilerin çoğu bu malzeme ile ilgilidir.

Bu çalışmada, ağaçlanma mekanizmaları, deney yöntemleri ve ağaçlanmayı önleme yolları ana hatları ile açıklanarak, olayın önemi ve sorunları ortaya konulmaya çalışılmıştır.

2. Ağaçlanma Mekanizmaları

Bu bölümde, iki temel ağaçlanma türü olan elektriksel ve sulu ağaçlanma mekanizmaları kısaca açıklanacaktır. Ağaçlanma, yalıtkanın delinmenin başlangıcını belirleyen bir boşalma olayıdır. Bu olay, yalıtkanın iç yada dış yüzeyinde veya içinde başlayabilir ve başlangıç koşullarına bağlı olarak bir yöne veya iki yöne doğru yayılan bir gelişme gösterir (Şekil-1). Örneğin bir yöne yoğun ve kısa (çalı biçimi) ağaçlanma veya daha seyrek fakat açılan (yelpaze biçimi) ağaçlanma veya iki yöne (papyon biçimi) ağaçlanma gibi adlarla tanımlanır.



Şekil-1. İki ağaçlanma örnekleri
(1) Tek yöne gelişen ağaç
(2) İki yöne gelişen ağaç

iki yöne gelişen ağaçlar, genelde yalıtkan içindeki boşluk veya yabancı parçacıklardan başlar. Bir yöne gelişen ağaçlar ise yalıtkanın batan veya girinti yapan iletken parçacıklardan veya yalıtkan üzerindeki yarık, çatlak ve pürüzler gibi yapısal kusurların bulunduğu yerlerden başlar. Sözü edilen tüm bu durumlarda yerel elektriksel zorlanmanın ve başlangıç koşullarının etkisi büyüktür. Dış (yüzeyel)

ağaçların gelişimi, iç ağaçlara göre daha hızlı olur.

Elektriksel ağaçlanma mekanizması üzerine bugüne kadar yapılan araştırmalar sonucunda birçok teori öne sürülmüştür. Bu teorilerin ortak noktası ağaçlanmanın başlayabilmesi için yüksek alan şiddetine gereksinim duyulmasıdır. Ayrıca, ısınma, sıcaklık değişimi, mekanik kusurlar, kutbiyet değişimi, küçük boşluklar, yabancı parçacık ve kirler, elektron alışverişi, gerilim türü ve uygulama süresi gibi daha pek çok etkene bağlı açıklamalar yapılmaktadır. Örneğin katı yalıtkanlarda sivri uç-düzlem elektrot sistemi ile yapılan deneylerden, ağaçlanmanın boşluklara gerek olmaksızın alan şiddetinin yükseltilmesi ile başlatılabileceği görülmüştür. Herhangi bir yüksek yerel zorlanma, henüz başlangıç yada gelişim aşamasında olan bir ağacı delinme olayına dönüştürebilir. Bunun yanında, elektriksel ağaçların düzenli tekrarlanan kısmi boşalmalar sonucunda ve zamanla (üç boyutlu) yayılan kanallar şeklinde ortaya çıktıkları bilinmektedir. Kısmi boşalma seviyesi ne kadar küçük olursa ağaçlanma süresi o kadar uzun olur. Kabloalarda ağaçlanma ise, düzgün olmayan yalıtken bölümlerinde yüksek yerel zorlanmalar sonucu başlar. Bu ağaçlanmanın gelişme olasılığı kabloların faydalanma faktörüne bağlıdır. Elektriksel ağaçların uygulanan gerilimin frekansı ile olan ilişkisini araştırmaya yönelik çalışmalardan frekans azaldıkça ağaçlanma başlangıç geriliminde önemli bir yükselme olduğu yani ağaçlanmanın frekans ile ters orantılı olduğu görülmüştür. Bu çalışmalardan, ağaçlanmanın başlaması için geçen süre ile ağaç yayılma süresi arasında herhangi bir ilişki olmadığı gözlenmiştir.

Sulu ağaçlanmaların, katı yalıtkanlarda elektriksel alanın varlığında ve nemin (suyun) etkisiyle oluşan boşalmalar olduğu bilinmektedir. Bunlar, daha alçak gerilimlerde ortaya çıkan ve daha dar bir bölge içinde yayılan ağaçlanmalardır. Su ağaçları, yayılan ve kalıcı olmayan bir yapıya sahiptir. Bu tür ağaçlanmada, alan ve suyun etkisi kalktığında ağaçların görünümü kaybolur. Ancak tekrar su ile temas ettiklerinde ya da boyama, lekeleme gibi çeşitli yöntemlerle görünürlük kazanırlar. Su ağaçlarını incelemenin zorluğu, bunları elektriksel ölçme yöntemleriyle araştırmının olanaksız olduğundandır. Yapılan araştırmalar nemin ve sıcaklığın yalıtım sistemi üzerinde gözardı edilemeyecek etkileri olduğunu göstermiştir.

Anlaşıldığı gibi, sulu ağaçlanma oluşumunu etkileyen üç etken, elektrik alanı, nem (su) ve yalıtkanındaki kusurlardır. Yalıtkanındaki yerel birikimleri veya nem, alan şiddetindeki yükselme, dielektroforezis ve difüzyon etkisiyle sulu ağaçlanma-

nın başlamasına neden olur. Ağaçlanmanın bundan sonraki oluşumu ve gelişimi, elektromekanik ve elektrokimyasal olaylara bağlıdır. Örneğin elektromekanik etkiler sonucu, yalıtkan içine su sızması, doyma, buharlaşma gibi olaylar ve bunun sonucu da yalıtkanın küçük yarı ve çatlakların oluşumu sulu ağaçların başlamasına ve gelişmesine yol açar. Sulu ağaçlanma daha ileri aşamalarda zamanla elektriksel ağaçlanmaya ve sonunda da elektriksel delinmeye dönüşür. Elektrokimyasal etkilerden, örneğin yalıtkan içindeki boşluklarda suyun hidrojen ve oksijene ayrışarak gaz oluşumu, dolayısı ile bunun yalıtkanı bozan yüksek gaz basıncına ve genleşmelere yol açması, kimyasal tepkimeler ve oksidasyon gibi olaylar anlaşılır. Bu olaylar da sulu ağaçlanmanın oluşmasına ve gelişmesine, sonunda da elektriksel ağaçlanmaya ve elektriksel delinmeye dönüşmesine yardımcı olur.

Düzgün elektrik alanında nemin etkisi önemsiz olmakla birlikte nemin yüksek yerel alanların bulunduğu noktalarda toplanmasına yol açar. Bu da su ağaçlarının görünürlüğünü sağlar. Su miktarındaki artış, su ağaçlarının başlaması için gereken gerilimi düşürür. Ayrıca, sudaki tuz miktarı ve mineraller ve yalıtkan içindeki oksitlenmeler ve sıcaklık artışları da ağaçlanmayı arttırıcı etkenlerdendir.

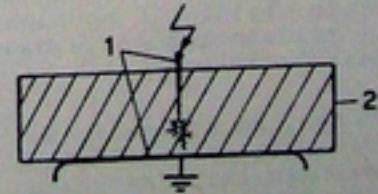
Buraya kadar ağaçlanma mekanizmaları özetlenmeye çalışılmıştır. Verilen bu kısa bilgilerin sınırlı fakat temel olduğu, ancak olayların ayrıntısını açıklamak için yetersiz olduğu açıktır.

3. Ağaçlanma Deneyleri

Ağaçlanma deneyleri, hem yalıtkanlar hem de yalıtkanların kullanıldığı sistem ile birlikte, örneğin kablo üzerinde yapılmaktadır. Deneyler, yalıtkanın veya kabloların ağaçlanma davranışı ve kalitesi hakkında bilgi edinme olanağını verir. Burada yalnızca yalıtkanlara uygulanan ağaçlanma deneylerinden söz edilecektir.

3.1 Elektriksel Ağaçlanma Deneyleri

Bu tür ağaçlanmayı incelemeye yönelik deneyler, genellikle bir sivri uç-düzlem, bazen de sivri uç-sivri uç elektrot sistemleri ile gerçekleştirilmektedir.



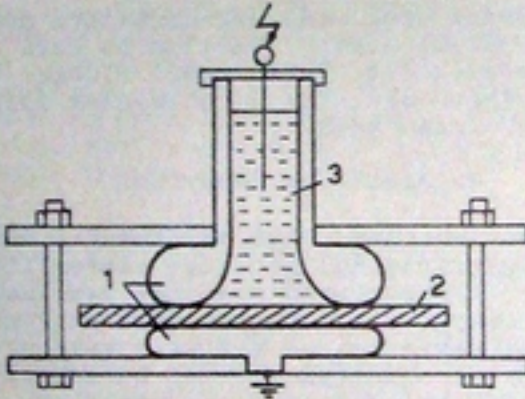
Şekil-2.

Sekil-2 de görüldüğü gibi, sıvri uç-düzlem elektrot sisteminde yalıtkan içine gömme veya batırma gibi yöntemlerle bir sıvri uçlu elektrot (iğne) yerleştirilir. Elektrot açıklığı, yalıtkanın kısa sürede delinme olmayacak kadar büyük ağaçlanma gözlenebilecek kadar küçük seçilir. Deney süresi, yalıtkanın özelliklerine bağlı olarak belirlenir. Genellikle bu süre saatler mertebesinde dir. Bu deneyde, sıvri uçun ucundan başlayan ağacın boyutları ve gelişimi incelenir.

3.2. Sulu Ağaçlanma Deneyleri

Burada yalıtkanlar üzerinde uygulanmakta olan ve standartlaştırmaya doğru gidilen sulu ağaçlanma deney yöntemlerinden üçü açıklanacaktır. Bu yöntemler A, B ve C olarak adlandırılarak verilecektir. Bu deneylerde deney örnekleri tabaka biçiminde alınmakta; deney eriyiği olarak içinde % 0.01 oranında NaCl bulunan damıtık su kullanılmaktadır.

3.2.1 A yöntemi: Bu yöntemle yalıtkanların yüzeyel ağaçlara karşı davranışı incelenir (Sekil-3). Bu amaçla yalıtkan üzerine yapay olarak çentikler açılır ve buralara dolan elektrolitin de etkisi ile oluşan ağaçlara karşı yalıtkanın davranışı belirlenir. Bu deneylerde ölçüt, oluşan ağaçların uzunluğudur.



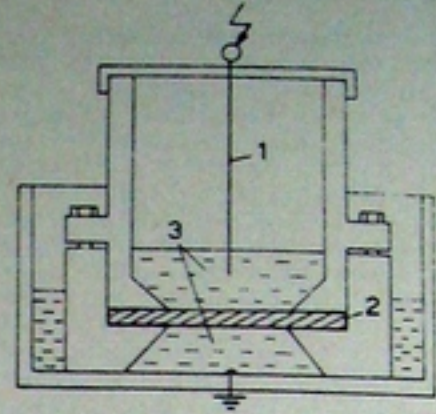
Sekil-3. A yöntemine ilişkin deney düzeneği

- (1) Elektrotlar,
- (2) Yalıtkan,
- (3) Elektrolit

3.2.2. B yöntemi: Bu yöntemle, yalıtkan içinde ortaya çıkan ağaçların davranışı incelenir (Sekil-4). Bu deneyden amaç, yalıtkan içinde, belli bir uzunluktan büyük iki yöne gelişen ağaçların uzunluğunu ve yoğunluğunu belirlemektir.

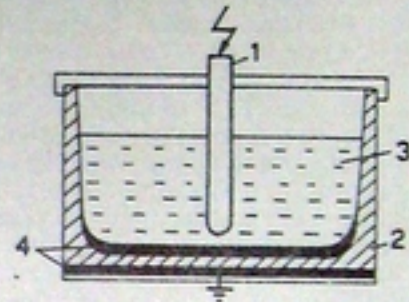
3.2.3. C yöntemi: Bu yöntemle ise, hem yalıtkan içindeki hem de yarıiletken tabakalar üzerindeki ağaçların davranışı incelenir (Sekil-5). Böylece, sulu ağacın gelişmesinden sonra yalıtkanın delinme dayanımındaki azalma ve yarıiletken tabakalarla

yalıtkan arasındaki uygunluk görülebilmektedir.



Sekil-4. B yöntemine ilişkin deney düzeneği

- (1) Elektrot,
- (2) Yalıtkan,
- (3) Elektrolit



Sekil-5. C yöntemine ilişkin deney düzeneği

- (1) Elektrot,
- (2) Yalıtkan,
- (3) Elektrolit,
- (4) Yarıiletken tabakalar

Kısaca açıklanan bu deneylerin ortak yanı, genelde denenecek yalıtkanlara uzun süreli ısıtma, kurutma gibi ön koşullandırma işlemlerinin uygulanması ve sonuçların (ağaçlanmanın) mikroskop altında değerlendirilmesidir. Ağaçlanmanın gözlenebilmesi için katı yalıtkanın en azından yarı saydam olması gereklidir. Değerlendirmede, ağaç boyu, genişliği, yoğunluğu (birim hacimdeki ağaç sayısı), ağaçlanmanın başlangıç gerilimi, zamanı, başlangıcından delinmeye kadar geçen süre, gelişim şekli ve bunlara etki eden etkenler gibi büyüklükler gözönüne alınmaktadır.

4. Ağaçlanmanın Önlenmesi

Ağaçlanmanın önlenmesi için yapılan araştırmalar öncelikle ağaçlanmaya yol açan etkenlerin giderilmesi yönünde olmuştur. Bu amaçla, yapısal kusurları en aza indiren elektriksel, mekanik ve kimyasal özellikleri elverişli yalıtkan üretimi çalışmaları yapılmaktadır. Ayrıca katkı maddeleri

rinin kullanımı ile ağaçlanmaya dayanıklı yalıtkan yapımı ve yalıtkan içindeki boşlukların önlenmesi veya doldurulması gibi önlemler de gözönüne alınmaktadır.

5. Sonuç

Bu çalışmada, kısaca elektriksel ve sulu ağaçlanma mekanizmaları, deney yöntemleri ve önlenmelerine ilişkin bilgiler verilmiştir. Bu bilgiler, ülkemizde de konunun biraz daha tanınmasına ve anlaşılmasına yardımcı olması amacıyla ele alınmıştır.

Görüldüğü gibi elektriksel ağaçlanma, yalıtımı bozan, sayıflatan dolayısıyla sistem güvenliğini tehdit eden etkenlerden biridir. Bu bakımdan ağaçlanma, koşullarının bilinmesi, önlenmesi ve standart deneyler geliştirilmesi için üzerinde daha fazla deneysel ve kuramsal çalışma yapmaya uygun bir konudur.

6. Kaynaklar

- /1/ BAHDER, G., DAKIN, T.M., LAWSON, J.H., Analysis of Treeing Type Breakdown, CIGRE, Report 15-05, 1974.
- /2/ EICHHORN, R.M., Treeing In Solid Extruded Electrical Insulation, IEEE Trans. on Electr. Insul., Vol. EI-12, No.1, Feb. 1976, pp. 2-15.
- /3/ STOICA, M., TANASESCO, FI. T., GIURGIU, G., IFRIM, A., The Treeing Phenomenon In Synthetic Dielectric Materials For Power Cable Insulation, CIGRE, Vol. I, Report 15-11, 1978.

- /4/ MCMAHON, E.J., A Tutorial on Treeing, IEEE Trans. on Electr. Insul., IE-13, No. 4, Aug. 1978, pp. 277-288.
- /5/ NUSES, S.L., SHAW, M.T., Water Treeing In Polyethylene A Review Of Mechanisms, IEEE Trans. on Electr. Insul., Vol. EI-15, No. 6, Dec. 1980, pp. 437-450.
- /6/ SAURE, M., KALKNER, W., FAREMO, H., On Water Tree Testing Of Materials And Systems, CIGRE Symp., 15/21-03, 1990.
- /7/ FREDRICH, D., KALKNER, W., On The Examination Of The Water Treeing Behaviour Of XLPE-Insulated Cables, Fifth Int. Symp. on High Voltage Engineering, Paper 21.04, Braunschweig, 1987.
- /8/ STEENNIS, E.F., KREUGER, F.H., Water Treeing in Polyethylene Cables, IEEE Trans. on Electr. Insul., Vol. 25, Oct. 1990, pp. 989-1028.
- /9/ SHAW, M.T., SHAW, S.H., Water Treeing in Solid Dielectrics, IEEE Trans. on Electr. Insul., EI-19, 1984, pp. 419-452.