

GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNDE KULLANILAN SELÜLOZ BAZLI KATI İLE SIVI YALITIM MALZEMELERİNİN ÖZELLİKLERİ VE ETKİLEŞİMLERİ

Hasan Ali YILDIZ¹⁾, Hasbi İSMAİLOĞLU²⁾

¹⁾ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği A.B.D.
Kocaeli Üniversitesi
hasan.yildiz@alstom.com

²⁾ Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
Kocaeli Üniversitesi
hasbi@kocaeli.edu.tr

ÖZET

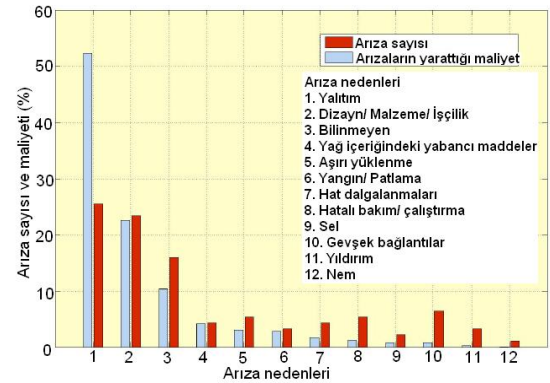
Güç transformatörleri enerji sistemlerinin en önemli ve en değerli elemanlarındanıdır. Transformatörlerde aşırı yüklenme, kısa devre ve benzeri nedenlerle arızalar oluşabilir. Katı ve sıvı yalıtım malzemelerinin birleşiminden oluşan yalıtım düzeni güç transformatörlerinde en sık kullanılan sistemdir. Yalıtım malzemeleri transformatör içerisinde sürekli olarak elektriksel/termal zorlanmalara maruz kalırlar. Bu zorlanmalar yalıtım malzemelerinin yaşlanmasına neden olur. Transformatör içerisinde kullanılan yalıtım malzemelerinin yaşlanması ile birlikte meydana gelebilecek herhangi bir arıza tüm sistemi etkileyen ve büyük güç kayıplarına yol açan olaylara neden olabilir. Bu nedenle bir transformatörü oluşturan unsurlardan yalıtım malzemesi, transformatörün ömrünü belirlemede hayati rol oynar. Bu çalışmada, güç transformatörlerinde kullanılan selüloz bazlı katı yalıtkanlar, mineral yağ ve ester yalıtkanların özellikleri ve bunların birbirleri ile etkileşimleri irdelenmiştir.

1. GİRİŞ

Güç transformatörlerinde ortaya çıkan arızalar, genel olarak yüksek maliyetli ve çoğu zaman tüm sistemi etkileyebilen arızalardır. ABD’de yapılan ve 1997–2001 arası yılları kapsayan bir araştırmaya göre transformatör arızalarının nedenleri ve bu arızaların yarattığı maliyetlerin yüzde olarak dağılımı Şekil 1’de gösterilmiştir [1]. Verilen grafikte, karşılaşılan transformatör arızalarının nedenleri arasında yalıtım hatalarının en büyük orana sahip olduğu görülmektedir. Arızaların, ortaya çıkardıkları maliyetler açısından karşılaştırılmasında da yalıtım kaynaklı arızaların toplam arıza maliyetleri arasında en büyük orana sahip olduğu görülmektedir.

Transformatörlerde kullanılan katı yalıtım malzemeleri temel olarak selüloz bazlıdır. Bu malzemelerin elektriksel ve fiziksel özellikleri transformatörün yapısına ya da transformatörde kullanılacakları yere (sargı

yalıtımı, YG ve AG sargıları arasındaki silindirler, baskı halkaları vb.) göre çeşitlilik gösterirler. Sıvı yalıtkan olarak mineral yağının yanı sıra, son zamanlarda çevre bilincinin de giderek



Şekil 1. Maliyet ve sayı yüzdesi olarak 25 kV’luk transformatörlerde arıza istatistiği (ABD: 1997–2001).

gelişmesi ile bazı uygulamalarda, doğada kaybolması daha kolay olan, fiziksel ve elektriksel olarak bazı artı ve eksileri bulunan esterin önemi giderek artmaktadır.

Çalışmada, güç transformatörlerinin yalıtımında temel olarak kullanılan bu malzemelerin özellikleri, birbirleri ile etkileşimleri ve bu etkileşimlerin transformatör yalıtım tasarımına etkileri üzerinde durulmuştur.

2. KATI YALITKANLAR

Kâğıt, katı yalıtkanlar içinde yaygın olarak kullanılan en ucuz ve en iyi elektriksel yalıtım sağlayan malzemedir. Kâğıdın elektriksel özellikleri, fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Önemli elektriksel özellikleri,

- Yalıtım dayanımının yüksek olması,
- Dielektrik sabitinin –yağ yalıtımlı transformatörlerde– transformatör yağıninkine oldukça yakın olması,
- Dielektrik kayıplarının düşük olması,
- İletken parçacıklar içermemesi

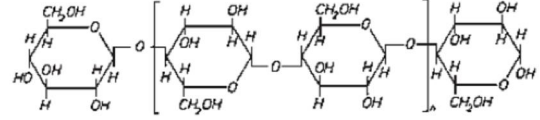
biçiminde sıralanabilir [2].

Kâğıt dahil, güç transformatörlerinde kullanılan katı yalıtkanların üretiminde hammadde olarak genellikle iki farklı tip selüloz malzeme kullanılır. Bunlardan biri sülfat selülozudur. Kozalaklı, yumuşak ağaçlardan elde edilen selüloz, elektriksel yalıtım için en uygun malzemedir. Bu ağaçlardan elde edilen selüloz lif boylarının uzun (1–4 mm arasında) olması, malzemeye yüksek bir mekanik dayanım kazandırır. Selülozun bileşimi şöyledir:

- Selüloz: % 76–86,
- Hemiselüloz: %10–15,
- Lignin: % 4–8,
- Mineral maddeler: %0,2–0,8.

Selüloz, bir polisakkarittir ve her molekülünde 1000–2000 kadar glukoz molekülü, bir zincir şeklinde birbirine bağlanır (Şekil 2). Polimerizasyon derecesi (PD) olarak da tanımlanan bu sayı, malzemenin yaşlanmasının değerlendirilmesinde referans bir değer olarak alınır. Hemiselüloz, 50–250 arasında bir polimerizasyon derecesine sahiptir ve tam anlamıyla selüloz değildir. Lignin, selüloz

lifleri arasında yapıştırıcı bir etki yaparak, malzemenin dayanımını yükseltir ve ağaca kahverengi görünüm verir. Kimyasal sülfat (ya da kısaca kraft) işlemi ile selüloz içinde bulunabilen, ancak istenmeyen bazı maddeler (lignin, reçine vb.) tamamen ya da önemli ölçüde yok edilir.



Şekil 2. Selülozun kimyasal yapısı.

İkinci olarak pamuk selülozundan bahsedilebilir. Pamuk selülozu, saf selülozun elde edilmesinde yararlanılabilecek bir başka maddedir. Pamuk selülozunun lif boyları daha uzun, ancak çapları daha küçük ve polimerizasyon derecesi de düzensizdir. Bu nedenle mekanik ve elektriksel özellikleri, kraft selülozunun özelliklerinden daha kötüdür [2, 3].

Aşağıda, güç transformatörlerinde kullanılan temel bazı katı yalıtkan türlerinin özellikleri açıklanmıştır.

2.1. PRESBOARD

Presboard, %100 sülfat selülozundan üretilir. Presboard üretiminde kullanılan sülfat selülozu, kuzey ülkelerinde (İskandinavya, Rusya, Kanada, ...) yetişen kozalaklı ağaçlardan elde edilir. Yavaş büyüyen kozalaklı ağaçlar, ılıman ve tropikal bölgelerde yetişen ve kışın yapraklarını döken ağaçlara göre daha fazla nem tutarlar. Diğer bölgelerden temin edilen ağaçların süngerimsi yapılarına karşın, İskandinavya ve Kanada'dan temin edilen keresteler daha sıkı örgülü yapıya ve kalın çeperli hücrelere sahiptirler [3].

Presboard malzeme, kendi içinde farklı gruplara ayrılır. Bu gruplara ilişkin ayrıntılara burada girilmeyecektir. Presboard malzemenin teknik özellikleri, ilgili standartlarda verilmiştir [4]. Malzemenin yoğunluğu, tip ve kalınlığına bağlı olarak,

0,85–1,25 gr/cm³ arasında değişir. 0,1–1 mm arasındaki kalınlıklarda rulo halinde, 1–8 mm arası kalınlıklarda ise plakalar halinde üretilir. Üretim aşamasında % 8 oranında nem içerir. Bu nem, transformatörün aktif kısmının kurutulması işleminde % 1'in altında bir değere düşürülür. Malzemenin yapısına bağlı olarak, %6–20 oranında yağ emdikten sonra delinme dayanımı 30–45 kV/mm arasında bir değere ulaşır. Malzemenin yüksek gerilim transformatörleri içindeki kullanım alanı oldukça geniştir [2].

2.2. ÖZEL UYGULAMALAR İÇİN KÂĞITLAR

Bu kâğıtlara ilişkin teknik özellikler ilgili standartlarda belirtilmiştir [5]. Aşağıda, özel uygulamalar için kullanılan kâğıt türlerinden, kullanımı yaygın olan bazıları kısaca tanımlanmıştır [2].

2.2.1. Kraft Kâğıdı

Kraft kâğıdı, %100 sülfat selülozundan üretilir. Özellikle sargı yalıtımında kullanılır. Genel olarak, 0,04–0,25 mm arasında kalınlıklarda üretilirler. Yağ içindeki delinme dayanımları 60–70 kV/mm civarındadır.

2.2.2. Krep Kâğıdı

Krep kâğıdının yüzeyi dalgalıdır ve esnek bir yapıya sahiptir. Kullanım alanları, genellikle elle sarım gerektiren çıkış üniteleri ya da elektrostatik alanı düzenleyen ve sargıların en sonunda bulunan stres halkaları olarak tanımlanabilir. Esnek bir yapıya sahip olduğundan, düzensiz geometrik yapıların yalıtılmasında rahatlıkla kullanılabilir. Ancak, krep kâğıdı yaşlanma ile birlikte elastik özelliğini kaybettiğinden, yalıtılmış kısımlar zamanla gevşeyebilmektedir. Bu nedenle kullanım yerinin önemine göre çeşitli kimyasal işlemlerle yırtılma, ayrılma gibi özellikleri geliştirilmiş, yüksek esnekliğe sahip kâğıtlar tercih edilebilmektedir.

2.2.3. Termal Olarak Güçlendirilmiş Kâğıt

Üretim aşamasında malzemeye bazı stabilizatörler eklenerek daha iyi bir termal kararlılık sağlanıp, yaşlanma miktarı azaltılabilir. Yalıtım malzemesinin yaşlanması sıcaklıkla doğrudan ilişkilidir. Yaşlanma, selüloz moleküllerindeki uzun zincirlerin birbirlerinden kopmasına yol açar. Güç transformatörleri için kabul edilebilir sıcaklık artış seviyesi, işletme sırasında erişilen ortalama Maksimum Sıcaklık Noktası (Hot Spot) sıcaklığına bağlıdır. Fakat bu sıcaklık seviyesinde, özellikle atmosfere açık genişleme depolu, nem alma düzenekleri basit ve bakımları seyrek olarak yapılan dağıtım transformatörlerinde görülen oksijen ve nemin etkisi ile katı yalıtım malzemesinin bozulması çok hızlı bir şekilde artar. Bu gibi durumlarda ve özellikle büyük güçlü yüksek gerilim transformatörlerinde, malzemenin yaşlanmasını geciktirmek için termal olarak güçlendirilmiş kâğıt kullanımı daha faydalı olmaktadır. Böylece, çalışma sıcaklığında bozulma derecesi düşürülebilmektedir.

2.2.4. Sentetik Reçine ile Yapıştırılmış ve Epoksi Emdirilmiş Kâğıtlar

Geçmişte, yüksek mekanik dayanıma sahip kâğıt elde etmek için kraft kâğıtlarından, sentetik reçine ile yapıştırılmış kâğıt (S.R.Y.K.) elde edilirdi. Ancak, S.R.Y.K. üretiminde kullanılan reçinenin transformatör yağı ile emprenye edilmesi zordu. İyi emprenye edilemeyen bölümler, zamanla delinme-lere yol açabilen, kısmi boşalma kaynakları oluşturmaktaydılar. Bu nedenle epoksi emdirilmiş kâğıt (E.E.K.) geliştirilmiştir. E.E.K., istenen mekanik dayanımı sağlayabilen ve aynı zamanda etkin bir şekilde emprenye edilebilen bir yapıya sahiptir. E.E.K., 0,06–0,25 mm kalınlığındaki kraft kâğıtlara ve rulo presboardlara baklava dilimi şeklinde epoksi reçine basılarak üretilir. Kâğıt üzerine basılan reçine, sargılar kurutma amacı ile ısıtıldığında eriyerek, kâğıt

üzerinde yapışkanlı, bir sonraki ısınma döngüsünden etkilenmeyen ve yüksek mekanik dayanıma sahip bir yüzey oluşturur.

2.3. LAMİNE PRESBOARD ve KONTRAPLAKLAR

Lamine presboard (LB), büyük güçlü transformatörlerde baskı halkaları, ekranlanmış sonlandırma halkaları vb. uygulamalarda kullanılır. Malzemenin teknik özellikleri ilgili standartlarda verilmiştir [6]. Kalınlıkları 2–5 mm kadar olan presboard plakaların özel tutkallar ile preslenerek yapıştırılmasından elde edilir. Kullanılacak tutkalın tipi, malzemenin transformatör içinde kullanılacağı yere göre değişiklik gösterebilir. Yağ içindeki delinme dayanımı 110–120 kV/mm kadar olabilmektedir.

Kontraplak (KP) malzemeler ise nispeten daha küçük güçlerde ya da daha küçük elektriksel zorlanmaya maruz kalan bölümlerde kullanılmaktadır. Yağ içindeki delinme dayanımları 60–70 kV/mm civarındadır. KP malzemeler ile ilgili teknik özellikler ilgili standartlarda belirtilmiştir [7].

Bu bölümde tanımlanan katı yalıtım malzemeleri, transformatör yağı ile birlikte kullanılmadıklarında çok iyi yalıtım özellikleri gösteremezler. Bu nedenle sıvı yalıtım malzemelerini de tanımak ve etkileşimlerini bilmek önem taşımaktadır.

3. SIVI YALITKANLAR

Sıvı yalıtkan malzemeler, güç transformatörlerinde genel olarak yalıtım, soğutma, ark söndürme, malzemeyi koruma gibi amaçlarla kullanılmaktadırlar. Sıvı yalıtkanlar, transformatörlerde kısmi boşalmalar, arklar gibi nedenlerle çözünen gazları da içlerinde barındırırlar. Çözünen bu gazların analizi ile oluşabilecek arızalar ve arızaların boyutları hakkında önceden bilgi edinilebilmektedir.

Transformatördeki nüve, bakır sargılar gibi bölümler başlıca kayıp kaynaklarıdır ve bu kayıplar ısı olarak ortaya çıkar. Bu ısının, transformatör içinde yerel ısınmalara yol açmaması, yani üretildiği yerden olabildiğince hızlı bir şekilde uzaklaştırılması ve bunun bir denge içinde yapılması gerekmektedir. Transformatörlerde ısı transferi büyük ölçüde konveksiyonla gerçekleşir. Konveksiyon doğal sirkülasyona dayalıdır ve bu işlem transformatör içinde, sıcaklık farkından doğan yoğunluk farkı ile gerçekleşmektedir. Bu bağlamda, sıvı yalıtkanın viskozitesi önem kazanmaktadır. Yüksek viskoziteli yağlar, soğutma görevini yeteri kadar yerine getiremediklerinden, transformatörlerin daha yüksek sıcaklıklarda çalışmalarına neden olurlar. Bu yüzden kullanılacak sıvı yalıtkanın viskozitesinin düşük olması istenir.

Yukarıda da belirtildiği üzere, yüksek sıcaklıklarda kâğıdın ve yağın bozulması hızlanmaktadır. Transformatör yağlarının yalıtıma katkıları önemlidir. Katı yalıtım malzemesinin içine işleyerek ve aralardaki boşlukları doldurarak yalıtım malzemesinin etkinliğini arttıırırlar. Böylece, viskozitesi düşük olan yağ, transformatör içindeki dar yağ kanallarına daha kolay erişebilir ve ulaşılması zor olan veya düşük akış oranına sahip bölgelerde kısmi sıcaklık artışlarını engeller.

İyi bir yalıtım yağında aranan özellikler özet olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Soğutma özelliğinin iyi olması yani, ısı transferini iyi yapabilmesi,
2. İyi bir yalıtım göstermesi,
3. Katı yalıtım malzemesi ile uyum sağlayabilmesi,
4. Kararlılığının (kimyasal ve elektriksel etkilere karşı gösterdiği direnç) iyi olması,
5. Çevreye zarar vermeyecek bir yapısının olması,
6. Fiyatının uygun olması.

3.1. MADENİ YAĞLAR

Mineral yağ, transformatör içinde yalıtkan soğutma sıvısı olarak ilk kez 1892 yılında General Electric tarafından kullanılmıştır. Mineral yağın yüksek parlama noktasına ve geniş bir üretim ağına sahip olması, o dönemlerde yaygın kullanımının ana nedeniydi. Günümüzde de petrol kökenli madeni yalıtım yağları, yapı malzemesiyle iyi uyum sağlamaları, iyi elektriksel özelliklere sahip olmaları, yaşlanma davranışları, düşük viskoziteleri ve diğerlerinden ucuz olmalarından dolayı, özellikle güç transformatörleri için hala önemli konumlarını korumaktadırlar. Ancak mineral yağın herhangi bir kaza sonucunda doğaya saçılması durumunda, doğada kaybolma yeteneği zayıftır. Toprağa ve suya karışarak çevreyi olumsuz yönde etkileyebilir [2, 8]. Mineral yağ ile ilgili temel özellikler, diğer yalıtkanların özellikleri ile birlikte, Çizelge 1’de

Özellikler	Birim	Mineral Yağ IEC 60296	Silikon Yağ IEC 60836	S. Ester IEC 61099
Yoğunluk (25 °C)	kg/m ³	860	960	970
Viskozite (20 °C)	mm ² /s	20	60	70
Yanma nok. (ASTM D 92)	°C	150..175	>350	322
Akma nok. (ASTM D 97)	°C	-40	-55	-50
Delinme Ger. 2,5 mm (IEC 60156)	kV	>70	50	>75
Bağ. dielektrik sabiti (ϵ_r)		2.2	2.7	3.0
Die.Kay.Fak. (δ , 90°C, 50 Hz)		<0.002	<0.001	<0.006
Su tutma (25°C)	ppm	50	200	2800

verilmiştir.

3.2. ESTERLER

Ester sözcüğü, kimyasal bağ düzenindeki alkol ve yağ asidinin oluşturduğu yapıdan gelmektedir. Esterler, asit ve alkolün organik bileşiklerinden oluşturulurlar. Genel olarak doğal (naturel) ve sentetik olmak üzere iki tür ester bulunur.

Doğal ester, yenilenebilir mahsullerden çıkarılan bitkisel yağların işlenmesi ile elde edilmektedir. Doğal esterler, birçok bitkiden elde edilebilmelerine rağmen,

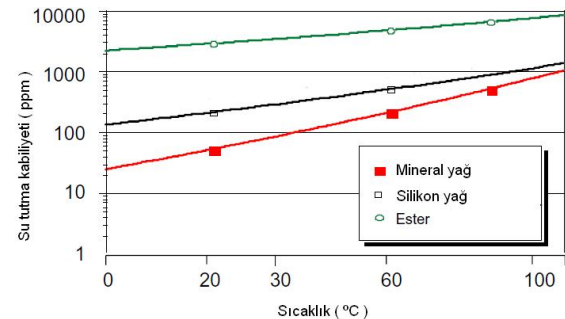
transformatör yağı olarak kullanılacak olanlar genellikle soya, kolza (kanola) ve ayçiçeği yağından üretilmektedirler. Esterler, çevresel duyarlılığın artması ile birlikte ilk olarak 1990’lı yıllarda geliştirilmeye başlanmış ve ticari olarak 1999’da kullanıma sunulmuşlardır. Esterlerin temel özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Sentetik esterler, birden fazla alkol grubu içeren ve kimyasallardan elde edilen ürünlerdir. Sentetik ester, ilk olarak mineral yağlı dağıtım transformatörlerinin yağlarının boşaltılıp, sentetik ester ile doldurulması şeklinde kullanılmıştır. Sentetik esterlerin oksidasyon ve termal kararlılıklarının yüksek olması, yangın güvenliğinin ve çevresel endişelerin kritik olduğu uygulamalarda güç transformatörlerinde de tercih sebebi olmalarını sağlamaktadır [11, 12].

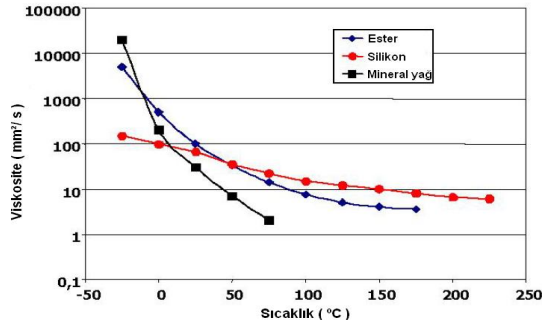
4. KARŞILAŞTIRMA ve ETKİLEŞİM

Güç transformatörlerinde yalıtım amacı ile mineral yağ ve ester dışında, silikon yağlar da kullanılmaktadır. Bu çalışmada, silikon yağlarla ilgili özellikler detaylı olarak incelenmemiştir. Ancak, bunların özellikleri, karşılaştırma amaçlı olarak, Çizelge 1 ve Şekil 3, 4 ve 5’te verilen grafiklere eklenmiştir [11].

Çizelge 1. Yalıtkan sıvıların temel özellikleri

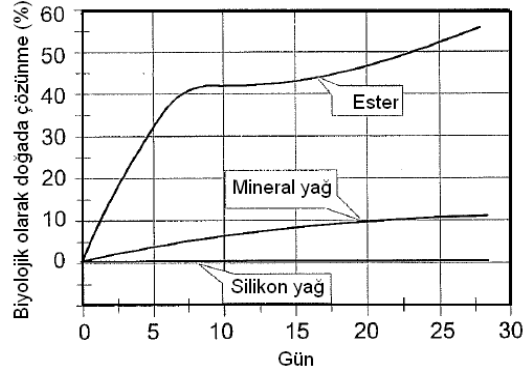


Şekil 3. Sıvı yalıtkanlarda suya doymanın sıcaklıkla değişimi [9].

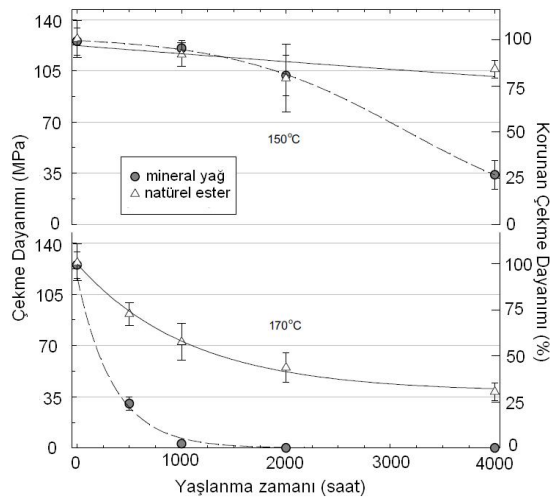


Şekil 4. Sıvı yalıtkanlarda viskozitenin sıcaklıkla değişimi [10].

Güç transformatöründe kullanılan katı yalıtkan bir malzemenin yaşlanma sonrası bozulma miktarı, çekme dayanımı ve polimerizasyon derecesi (PD) ölçümleri ile belirlenir [12]. Şekil 6 ve 7'deki grafiklerde, mineral yağ ve ester ile empenye edilen termal olarak güçlendirilmiş kraft kâğıdının hızlandırılmış yaşlanma deneyleri sırasında elde edilen çekme dayanımı ve PD ölçümleri görülmektedir.



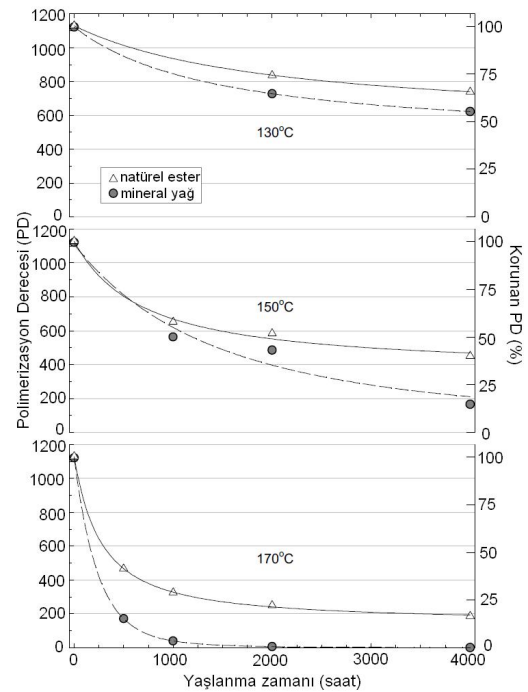
Şekil 5. Sıvı yalıtkanların doğada yok olmalarının karşılaştırılması.¹



Şekil 6. Deney süresince çekme dayanımının değişimi.

Şekil 6'da verilen eğrilerde, hızlandırılmış yaşlanma deneyi sonunda ester ile empenye edilmiş kâğıdın, mineral yağ ile empenye edilen kâğıda göre, çekme dayanımını büyük bir oranda koruduğu görülmektedir. Sıcaklık artışına bağlı olarak, bu oranlarda önemli düşüşler de ortaya çıkmaktadır.

Şekil 7'de, doğal ester ve mineral yağ ile empenye edilen termal olarak güçlendirilmiş kâğıt örneğinin farklı sıcaklıklarda PD değişimi görülmektedir. Üç farklı sıcaklık için verilen grafikler değerlendirildiğinde, ester ile empenye edilmiş kâğıdın, mineral yağ ile empenye edilmiş kâğıda göre, PD değerini daha büyük oranda koruduğu görülmektedir. Sıcaklık artışı ile bu oranlarda da düşme gözlenmektedir. Verilen deney sonuçlarından, ester ile empenye edilmiş kâğıdın, mineral yağ ile empenye edilen kâğıda oranla daha geç yaşlandığı görülmektedir. Bunun, önemli ölçüde, ester su tutma kabiliyetinin yüksekliğine bağlı olduğu söylenebilir.



Şekil 7. Deney süresince PD değişimi.

¹ Grafik OECD 301D testi verilerine göre hazırlanmıştır.

Yalıtkan malzemeler için önemli bir diğer büyüklük de dielektrik kayıp katsayısıdır. Dielektrik kayıp, yalıtkan malzemelere gerilim uygulandığında açığa çıkan güç kaybını belirler. Dielektrik kayıp katsayısı, alternatif akım yüksek gerilim sistemlerinde kullanılan yalıtkan malzemelerin, yaşlanma bakımından karşılaştırılmasını sağlayarak, elektriksel açıdan kullanılabilirliğini belirleyen önemli bir özelliktir. Çizelge 2, 3 ve 4'te, sırasıyla yalıtkan sıvıların, mineral yağ ile emprenye edilmiş katı yalıtkanların ve doğal ester ile emprenye edilmiş katı yalıtkanların dielektrik kayıp faktörlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri gösterilmiştir [13].

Çizelge 2. Yalıtkan sıvıların farklı sıcaklıklarda dielektrik kayıp katsayıları

Sıcaklık Sıvı yalıtkan	25 °C	90 °C	130 °C
Mineral Yağ	0.02%	0.09%	0.25%
Doğal Ester	0.08%	0.64%	3.92%

Çizelge 2'den görülebileceği gibi doğal esterde dielektrik kayıp katsayısı, mineral yağinkine göre sıcaklıkla çok daha hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu hızlı artış, malzemenin kullanılabilirliği önündeki en önemli engellerden birisidir.

Çizelge 3. Mineral yağ içindeki katı malzemelerin farklı sıcaklıklarda dielektrik kayıp katsayıları

Sıcaklık Katı yalıtkan	25 °C	90 °C	130 °C
E.E.K.	0.5%	0.8%	5.0%
D.Y.P.	0.3%	1.0%	4.5%
Y.Y.P.	0.4%	0.6%	2.8%

Çizelge 4. Ester içindeki katı malzemelerin farklı sıcaklıklarda dielektrik kayıp katsayıları

Sıcaklık Katı yalıtkan	25 °C	90 °C	130 °C
E.E.K.	0.6%	1.2%	6.2%
D.Y.P.	0.3%	1.0%	5.3%
Y.Y.P.	0.4%	1.0%	5.1%

Çizelge 4'ten görülebileceği gibi, esterin mineral yağa oranla sıcaklıkla büyük oranda değişen dielektrik kayıp katsayısı, katı yalıtım malzemelerinin dielektrik

kayıp katsayılarını da olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum, uzun işletme koşullarında yağ ve katı yalıtım malzemelerinin yaşlanma davranışlarını değiştirebilecektir.

Transformatör yalıtım tasarımını etkileyebilecek bir değer olan bağıl dielektrik sabitinin, epoksi emdirilmiş kağıt (E.E.K.), düşük yoğunluklu pressboard (D.Y.P.) ve yüksek yoğunluklu pressboard (Y.Y.P.) malzemeler için farklı sıcaklıklardaki değerleri Çizelge 5, 6 ve 7'de verilmiştir [13].

Çizelge 5. Sıvı yalıtkanların farklı sıcaklıklarda bağıl dielektrik sabitleri

Sıcaklık Sıvı yalıtkan	25 °C	90 °C	130 °C
Mineral Yağ	2.4	2.4	2.2
Doğal Ester	3.3	3.0	2.9

Çizelge 6. Mineral yağ içindeki katı malzemelerin farklı sıcaklıklarda bağıl dielektrik sabitleri

Sıcaklık Katı yalıtkan	25 °C	90 °C	130 °C
E.E.K.	3.9	4.3	4.7
D.Y.P.	3.9	3.9	4.1
Y.Y.P.	4.5	4.7	4.9

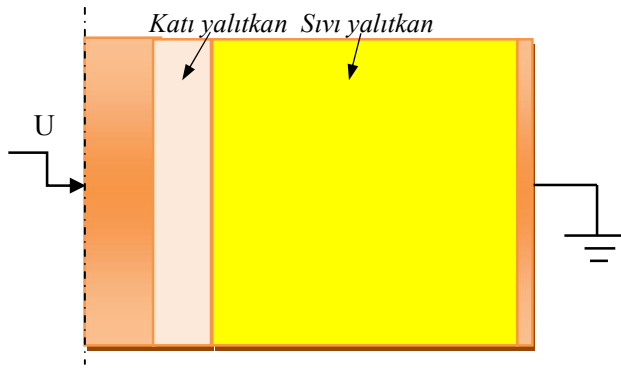
Çizelge 7. Ester içindeki katı malzemelerin farklı sıcaklıklarda bağıl dielektrik sabitleri

Sıcaklık Katı yalıtkan	25 °C	90 °C	130 °C
E.E.K.	4.6	4.8	5.2
D.Y.P.	4.4	4.4	4.5
Y.Y.P.	4.6	4.8	5.2

Güç transformatörlerinin yalıtım tasarımında elektrik alan dağılımı birincil derecede öneme sahiptir. Tasarım mühendisleri, güç transformatörlerinde, genel olarak katı yalıtım malzemesi ile mineral yağ kullanımına dayalı bir tasarım işlemi gerçekleştirmektedirler. Ancak tasarım işlemlerinde, yukarıda incelenen, katı-sıvı yalıtım malzemeleri arasındaki etkileşimlerin de göz önüne alınması gereği ortaya çıkmaktadır.

5. BENZETİM ÇALIŞMASI

Katı-sıvı yalıtım malzemeleri arasındaki etkileşimin, sistemde oluşan elektrik alan dağılımına etkilerini görmek üzere, transformatörlerde sıkça karşılaşılan ve iki farklı yalıtkan içeren bir elektrot sistemi ele alınmıştır. Şekil 8’de kesiti verilen bu elektrot sistemi, dairesel kesitli 6,5 mm yarıçaplı yüksek gerilim elektrodu, bunu kuşatan 5 mm kalınlığında katı yalıtkan, 30 mm’lik sıvı yalıtkan ve topraklanmış elektrottan oluşmaktadır. Bu elektrot sisteminin, nominal gerilimi 123 kV olan, yıldız bağlı bir yüksek gerilim transformatöründe ayar sargısından çıkıp kademe değiştiriciye giden iletkenle transformatör kazanı arasında ortaya çıktığı düşünülebilir. Elektrot sisteminde elektrik alan dağılımı, Sonlu Elemanlar Yöntemi (S.E.Y.) yardımı ile çözüm yapan bir program kullanılarak elde edilmiştir [14]. Ele alınan elektrot sisteminin aksel simetriye sahip olduğu göz önüne alınarak, alan incelemeleri, iki boyutlu silindrisel koordinat sisteminde gerçekleştirilmiştir.



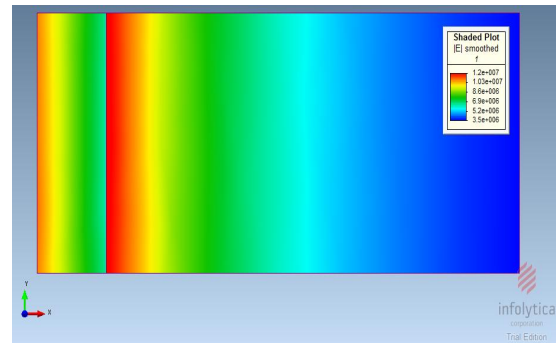
Şekil 8. Analizi yapılan örnek elektrot sisteminin kesiti.

İncelemelerde, ele alınan transformatörün tasarım yalıtım düzeyi (Design Insulation Level-DIL) göz önüne alınarak, elektrot sistemine 230 kV uygulandığı varsayılmıştır. Hesaplamalarda, Çizelge 5, 6 ve 7’de, 130°C sıcaklık için verilen bağıl dielektrik sabitleri kullanılmıştır.

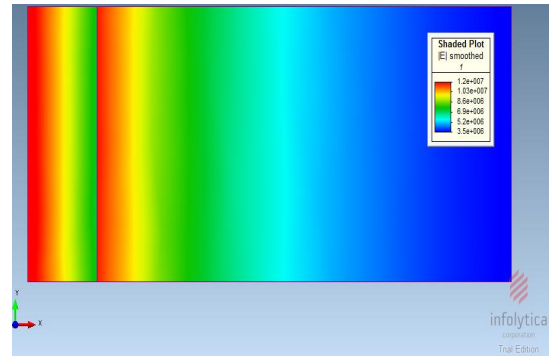
Ele alınan elektrot sisteminde, düşük yoğunluklu pressboard (D.Y.P.), mineral yağ ve doğal ester ile birlikte

kullanıldığında elde edilen elektrik alan dağılımları, renk skalaları halinde sırasıyla Şekil 9 ve Şekil 10’da verilmiştir. Her iki sistemde elde edilen elektrik alan şiddetlerinin değişimleri Şekil 11’de gösterilmiştir.

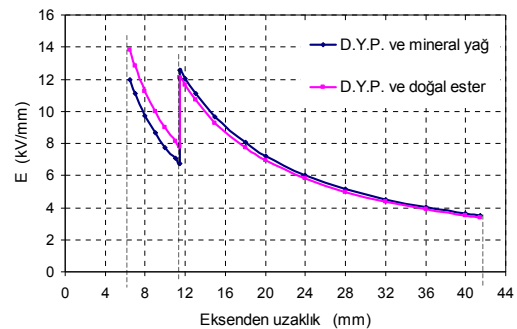
Analiz sonuçları, ester ile emprenye edilen katı yalıtkanın, mineral yağ ile emprenye edilen malzemeye göre daha büyük elektriksel zorlanmaya maruz kaldığını göstermektedir. Katı yalıtkanındaki elektrik alan şiddeti, 12 kV/mm’den, %15 gibi bir artışla 14 kV/mm’ye çıkmaktadır.



Şekil 9. Düşük yoğunluklu pressboard (D.Y.P.) ve mineral yağ yalıtımlı sistemde elektrik alan dağılımı (130°C).



Şekil 10. Düşük yoğunluklu pressboard (D.Y.P.) ve doğal ester yalıtımlı sistemde elektrik alan dağılımı (130°C).



Şekil 11. Düşük yoğunluklu pressboard (D.Y.P.) ile farklı sıvı yalıtkanların kullanılması halinde elektrik alan şiddetlerinin değişimleri.

Elektrik alan şiddetindeki bu artış, sıcaklıkla büyük oranda yükselen kayıp katsayısı ile birlikte malzemenin daha fazla ısınmasına yol açar. Isınma, uzun yıllar süren işletme koşullarında yaşlanmayı da hızlandırır. Bu nedenlerle pek çok üretici açısından standartlaşmış olan tasarım mesafelerinin yeniden gözden geçirilmesi gerekebilecektir. Dolayısıyla elektrik alan dağılımında ortaya çıkan bu değişimlerin göz önüne alınması ve uygun bir yöntemle elektrostatik alan analizlerinin ayrıntılı olarak yapılması gerekmektedir.

6. SONUÇLAR

Güç transformatörlerinde oluşacak arızaları ve bunların etkilerini en aza indirebilmek için yalıtımlarının, aşırı yüklenme, kısadevre gibi nedenlerle oluşan zorlanmalara dayanabilecek düzeyde olması gerekmektedir. Bu düzeyin sağlıklı olarak belirlenebilmesi için kullanılan malzemelerin yapılarının, özelliklerinin ve birbirleri ile etkileşimlerinin iyi bilinmesi zorunludur.

Yüzyılı aşkın bir süredir, katı yalıtım malzemeleri ile etkileşiminin istenen düzeyde olması, her yerde kolaylıkla bulunabilmesi ve fiyatının uygun olması gibi nedenlerle sıvı yalıtım malzemesi olarak mineral yağ kullanılagelmıştır. Ancak bir süredir, hem mineral yağın çevresel etkilerinden hem de fosil yakıt rezervlerinin kısıtlılığından dolayı alternatif sıvı yalıtım malzemeleri geliştirilmektedir. Bunlardan en önemlisi ve günümüzde üzerinde en çok durulana esterdir. Çalışmada değinildiği üzere esterler, katı yalıtkan malzeme ile etkileşime girdiğini ve malzemenin bazı özelliklerini iyileştirirken bazılarını da olumsuz yönde etkilediğini göz önüne almak gerekmektedir.

7. KAYNAKLAR

- [1] Bartley, W. H., "Analysis of Transformer Failures", International Association of Engineering Insurers, 36th Annual Conference, Stockholm, pp. 1-12, 2003.
- [2] Heathcote, M. J. "The J&P Transformer Book", CEng, FIEE, Twelfth edition, 1998.
- [3] Moser, H.P. "Transformerboard I", Weidmann, 1979.
- [4] IEC 60641-3-1, "Pressboard and presspaper for electrical purposes – Part 3", Edition 2.0, 2007-11.
- [5] IEC 60554-3-1, "Specification for cellulosic papers for electrical purposes – Part 3", Edition 1.0, 1979-01.
- [6] IEC 60763-3-1, "Laminated pressboard for electrical purposes – Part 3", Edition 2.0, 2010-8.
- [7] IEC 61061-3-1, "Non-impregnated densified laminated wood for electrical purposes" –Part 3: Edition 1.0, 2001-07.
- [8] Sezer, M. "Trafo Bakımı ve Yalıtım Yağı", BEST, 2009.
- [9] Borsi, H. Gockenbach E. "Properties of Ester Liquid Midel 7131 as an Alternative Liquid to Mineral Oil for Transformers", IEEE International Conference on Dielectric Liquids, pp. 377-380, 2005.

- [10] Borsi, H. Gockenbach E. *"Natural and Synthetic Ester Liquids as Alternative to Mineral Oil for Power Transformers"*, IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena, pp. 521-524, 2008.
- [11] Berger, N. Randoux, M. Ottmann, G. Vuarchex, P. *"Review of Insulation Liquids"*, Electra No:171, pp. 33-55, April 1997.
- [12] McShane, C.P. Rapp, K.J. Corkran, J.L. Gauger, G.A. Luksich, J. *"Aging of Paper Insulation in Natural Ester Dielectric Fluid"*, IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition, pp. 675-679, 2001.
- [13] Prevost, T.A., *"Dielectric Properties of Natural Esters and their Influence on Transformer Insulation System Design and Performance – An update"*, IEEE/PES Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-7, 2009.
- [14] ElecNet 2D/3D *Electric Field Simulation Software*, Infolytica Corporation Design and Analysis Software for Engineers.