



Termoelektrik Soğutma Sisteminin Alternatif Transformator Soğutma Sistemi Olarak Performansı

Murat Tören^{1*}, Hakkı Mollahasanoğlu²

^{1*} Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Rize, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-7012-7088), murat.toren@erdogan.edu.tr

² Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Rize, Türkiye (ORCID: 0000-0001-6233-9198), hakki.mollahasanoğlu@erdogan.edu.tr

(International Conference on Design, Research and Development (RDCONF) 2021 – 15-18 December 2021)

(DOI: 10.31590/ejosat.1039820)

ATIF/REFERENCE: Tören, M. & Mollahasanoğlu, H. (2021). Termoelektrik Soğutma Sisteminin Alternatif Transformator Soğutma Sistemi Olarak Performansı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (32), 498-507.

Öz

Dağıtım transformatörleri kullanıldıkları yerlere göre farklı soğutma sistemleri ile soğutulmakta olup, soğutma tipine göre yağlı tip ve kuru tip transformatörler olarak isimlendirilmektedir. Yağlı tip transformatörlerin soğutulmasında, klasik transformatör yağı olarak adlandırılan naftanik ve parafinik yağlar, yani parafin (mum) içerikli dielektriksel dayanımı yüksek yalıtım malzemeleri kullanılmaktadır. Bu yağların yanma dereceleri ve dielektriksel dayanımlarının artırılmasını amaçlayan yenilikçi yaklaşımlar son yıllarda artmaktadır. Bu çalışmalarda, daha iyi özelliklere sahip ester bazlı yağlar, klasik transformatör yağlarının yerine kullanılarak transformatörlerin performansını ve faydalı ömrünü arttıran sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, transformatör yağlarının özellikleri ne kadar iyi olsa da, çevre kirliliği oluşturması, yanma-patlama özelliği, bakım-onarım maliyetleri, transformatör yalıtımında dezavantaj oluşturmaktadır. Bu dezavantajların giderilmesi için, bu çalışmada, çevre dostu ve yenilenebilir enerji kaynaklarından olan termoelektrik soğutucular kullanılarak, yağlı tip transformatör soğutulmaktadır. Yapılan çalışma sonucunda termoelektrik soğutma sisteminin naftanik ve ester bazlı yağ soğutma tiplerine göre yaklaşık % 15-20 daha iyi soğutma sağladığı tespit edilmiştir. Bu soğutma sisteminin, transformatör soğutma sistemleri içerisinde yeni bir teknoloji ve tür olarak yer alacağı değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yağlı tip transformatör, Ester bazlı yağ, Naftanik Yağ, Termoelektrik soğutma, TEC, Soğutma sistemleri.

Performance of Thermoelectric Cooling System as an Alternative Transformer Cooling System

Abstract

Distribution transformers are cooled by different cooling systems according to the places in which they are used, and they are named oil-type and dry-type transformers according to this cooling type. In the cooling of oil-type transformers naphthanic and paraffinic oils, namely paraffin (wax)-containing insulating materials with high dielectric strength, called classical transformer oil, are used. Innovative approaches aiming to increase the degree of combustion and dielectric strength of these oils have been increasing in recent years. In these studies, higher quality oils such as ester-based oils have been used instead of conventional transformer oils, resulting in increased effects on the performance and life time of transformers. However, regardless of the characteristics of transformer oils, their features such as burning-explosive properties that cause environmental pollution and excess maintenance-repair costs create disadvantages in their use in transformer insulation. In this study conducted to eliminate such disadvantages, the oil-type transformers is cooled by using thermoelectric coolers, which are environmentally friendly and renewable energy sources. As a result of the study, it was determined that the thermoelectric cooling system provides 15-20% better cooling than naphthanic and ester based oil cooling types. It is considered that this will take place as a new technology and type in distribution transformer cooling systems.

Keywords: Oil-type transformers, Ester-based oils, Naphthanic-based oils, Thermoelectric cooler, TEC, Cooling systems.

* Sorumlu Yazar: murat.toren@erdogan.edu.tr

1. Giriş

Elektrik üretim, iletim ve dağıtım şebekesinin en önemli ekipmanlarından biri şüphesiz transformatörlerdir. Bu yüzden transformatörlerin güvenli ve verimli çalışması elektrik şebekesinin güvenliği için kritik bir öneme sahiptir. Transformatörlerin çalışması esnasında çekirdek ve sargılarında meydana gelen elektriksel kayıplar, transformatörde sıcaklığın artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla bu sıcaklık artışı transformatörün arızalanmasına, kullanım ömrünün azalmasına, verimsiz ve güvensiz çalışmasına sebep olmaktadır. Bu durumu önlemek için, çeşitli soğutma teknikleri kullanılmaktadır.

Uzun yıllardır, özellikle dağıtım transformatörlerinin soğutulması ve yalıtılması amacıyla naftanik yağlar kullanılmaktadır (Filho et al., 2019). Yapılan birçok çalışmada naftanik yağların, transformatörlerin çalışmasına etkisi, elektriksel özelliklerinin değişimi incelenmiştir (Lamarre et al., 1987; Xiaobo Wang et al., 2018). Bu çalışmalarda, transformatörün soğutulmasında kullanılan naftanik yağların, elektriksel iletkenlik ve dielektrik dayanımının doğrudan transformatör ömrüne etki ettiği gösterilmektedir. Ayrıca farklı tip naftanik yağlar kullanılarak, yağlı tip transformatörün performansına etkisinin karşılaştırmalı olarak incelendiği çalışmada, farklı birleşim oranlarına sahip mısır yağı ile karıştırılmış mineral yağ incelenmiştir (Manjang et al., 2019). Mineral yağa, mısır yağı karışımının eklenmesiyle viskozite, özgül ağırlık ve kırılma indisinde artış tespit edilmiştir.

Son yıllarda ise yağlı tip transformatörlerin soğutulmasında ester bazlı yağlar daha sıklıkla tercih edilmektedir (Rouabeh et al., 2019). Bunun başlıca nedenleri, ester bazlı yağların naftanik yağlara göre daha az yangın riski içermesi, daha uzun kullanım ömrü sağlaması ve biyolojik olarak parçalanabilmesi dolayısıyla çevreye daha faydalı olmasıdır (Dombek et al., 2017). Ester yağlar ile naftanik yağların karşılaştırıldığı çalışmalarda; ester yağların termal performans değerleri ile dielektrik dayanımının naftanik yağlara göre daha üstün olduğu, belirli konumlar arasında ester ile soğutulan transformatörün mineral yağ ile soğutulandan daha yüksek bir sıcaklık farkı gösterdiği gözlemlenmiştir (Garelli et al., 2021). Ayrıca, ester yağların, transformatörlerin yalıtım seviyesini iyileştirdiği, hatta yağın bozulma süresini geciktirdiği belirlenmiştir (Rao et al., 2018). Soğutma performansını arttırmak için, ester yağlara farklı konsantrasyona sahip katı nano parçacıklar eklenerek hibrit soğutma önerilmiştir (Hasan et al., 2020). Çalışma sonucunda, ester yağ ile en iyi soğutma yapan nanopartiküllerin Sic olduğu bulunmuş ve bunun nedeninin Sic'in diğer partiküllere göre daha yüksek ısı iletkenliğe sahip olduğu belirtilmiştir. Önerilen hibrit yağ sistemi ise, sıcaklığı 10 °C düşürmüştür.

Yağlı tip transformatörlerin soğutulması için ester yağlar hala daha yaygın olarak kullanılsa da, bazı dezavantajları vardır. Özellikle yüksek güç düzeylerinde kolay oksitlenebilme, yıldırıma karşı asgari direnç gösterme ve hidrolizi olabilmeleri, başlıca dezavantajları olarak gösterilebilir (X. Wang et al., 2008). Bu yüzden, bazı çalışmalarda ester bazlı yağlara katkı maddelerinin eklenmesi, yağın kimyasal yapısının değiştirilmesi ve yağlarla uyumlu transformatör tasarımlarının yapılması dâhil olmak üzere, farklı çalışmalar da yapılmıştır (Ab Ghani et al., 2018). Ancak, transformatörlerin soğutulması kullanılan yağların, tam olarak çevre dostu olmaması, bakım maliyetlerinin fazla olması nedeniyle, bu çalışmada yağlı tip transformatörün

soğutulmasında Termoelektrik soğutucuların (TEC) kullanılması önerilmektedir.

Termoelektrik soğutma, iki yarıiletken malzemenin elektriksel ve termal olarak bağlanmasıyla oluşan devreye, gerilim uygulandığında meydana gelen peltier etkisinden kaynaklanmaktadır. Termoelektrik soğutucular, uzun ömürlü olmaları, herhangi bir bakım gerektirmemeleri, küçük olmaları, zararlı çalışma sıvısı içermemeleri ve konvansiyonel sistemlerin kullanılmadıkları yerlerde çalışabilmelerinden dolayı soğutma alanında önemli bir yere sahip olmuşlardır (Cai et al., 2019; Sekiguchi et al., 2018). Ayrıca, Peltier etkisi sayesinde, herhangi bir mekanik güce gerek kalmadan soğutma yapabilmeleri, gürültüsüz çalışmalarını sağlamaktadır. Bununla birlikte, soğutma kapasitesini arttırmak için termoelektrik soğutuculara fan takılmalı ve fan hızı artırılarak, daha iyi bir soğutma sağlanabilmektedir (Jiang et al., 2019). Yapılan çalışmalarda, genellikle, termoelektrik soğutucuların performansı, verimlerinin artırılması, parametrelerinin iyileştirilmesi ve termoelektrik etkilerinden bahsedilmektedir (Ahiska et al., 2009; Hubbard et al., 2020). Yeni imal edilen bir termoelektrik cihazın özelliklerinin incelendiği çalışmada, Si elementi ile karşılaştırma yapılmış ve termoelektrik soğutucunun 5 kat daha iyi performans sağladığı belirlenmiştir (Hsin et al., 2019). (Ahiska et al., 2013), yaptıkları testlerde, iki fazlı termoelektrik CPU soğutucusu, fanlı sisteme kıyasla yaklaşık 5 kat daha fazla soğutma sağladığını göstermişlerdir. Ayrıca yapılan bir başka çalışmada, termoelektrik soğutuculara nano akışkan malzeme kullanılarak, soğutma gücünün artırıldığı, deneysel çalışma ile belirlenmiştir (Cuca et al., 2020). Başta yenilenebilir enerji uygulamaları olmak üzere, endüstriyel birçok alanda soğutma amaçlı kullanılan termoelektrik soğutucuların, çok az sayıda çalışmada (Dalcı et al., 2016; Dmitriev et al., 2017), elektrik makinalarının soğutulmasında kullanıldığı görülmüştür. Ancak, bu çalışmalarda da elektrik makinalarının soğutulmasında direkt olarak değil ek bir soğutma olarak tercih edilmişlerdir. (Toren et al., 2021)'de ise 3-fazlı asenkron motorun soğutulmasında direkt olarak termoelektrik soğutucular kullanılmış ve geleneksel hava soğutmaya göre yaklaşık %11 daha iyi soğutma sağlanmıştır. Ancak, Termoelektrik soğutucuların, statik elektrik makinesi olan ve sıcaklık standartları dikkate alınarak tasarlanan yağlı tip transformatörlerde yaygın bir kullanımı belirlenememiştir.

Bu çalışmada, 5 kVA yağlı tip transformatör, gerçekleştirilen özgün bir tasarım ile termoelektrik soğutucular ile soğutulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, aynı transformatörün soğutulmasında kullanılan naftanik ve ester yağlar ile karşılaştırılmaktadır. Böylece, yaygın olarak kullanılan yağlı tip transformatörlerin soğutulmasında çevre dostu, yenilenebilir enerji ürünü olan termoelektrik soğutucular kullanılarak, alternatif bir soğutma yöntemi önerilmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. YTT Soğutma Sistemleri

Yağlı tip transformatörler, çalışma esnasında, ısı çekirdek kayıpları, sargılarda meydana gelen bakır kayıpları ve kaçak akım kayıplarından kaynaklı bol miktarda ısı üretir. Bu kayıplardan, transformatördeki manyetik malzemenin histerisiz etkisinden dolayı meydana gelen kayıplar (P_h) Denklem 1'de ifade edilmektedir. Denklem 2'de ise, transformatörlerin ısınmasına neden olan bir diğer çekirdek kaybı olan fuko kayıpları (P_e) ifade edilmektedir. Bu kayıplar, bobin üzerinden değişken akım

akıtıldığında, gövde üzerinden endüklenen gerilimin, sebep olduğu akımlardır (Toren et al., 2016).

$$P_h = \sigma_h f B_m G_{fe} \quad (1)$$

Burada, σ_h, f, B_m ve G_{fe} sırasıyla, histerezis kayıp faktörü, frekans değeri, akı yoğunluğu ve demir çekirdek kütlesini ifade etmektedir.

$$P_e = \sigma_e f^2 B_m^2 G_{fe} \quad (2)$$

Denklem 2’de, σ_e , malzemeye bağlı olarak değişen Eddy sabitidir. Transformatörlerin sargılarından geçen akımın (I) meydana getirdiği kayıplar ise, bakır kayıpları olarak adlandırılıp, Denklem 3’te verilmektedir.

$$P_{cu} = I^2 R \quad (3)$$

Transformatörlerin çalışması esnasında, tüm bu kayıplardan dolayı meydana çıkan ısı, transformatörün yüksek bir sıcaklığa ulaşmasına izin verilmeden transfer edilmelidir. Bu nedenle, ısıyı transfer etmek için transformatörlerin soğutulması gerekmektedir. Yağlı tip transformatörlerin soğutulması ve buna uygun olarak tasarlanması, IEEE C57.91-1995 ve IEC 60354 endüstri standartları dikkate alınarak belirlenmektedir (Perez, 2010). Bu standartlara göre belirlenen başlıca soğutma türleri aşağıda sıralanmaktadır (Kaymaz et al., 2015):

- ONAN (Oil Natural Air Natural), doğal hava ile soğutulan sargılar ile ısınan yağın doğal sirkülasyonunu ifade etmektedir.
- ONAF (Oil Natural Air Forced), hava temasının fan ile, yağ dolaşımının konvansiyonel olarak sağlandığı soğutma türüdür.
- OFAF (Oil forced Air forced), konvansiyonel sisteme ilave olarak, yağın sirkülasyonu yağ pompaları ile de desteklenen soğutma türüdür. Ayrıca doğal hava için fanlar da kullanılır.
- OFWF (Oil forced Water forced), konvansiyonel olarak sağlanan yağ soğutma ile birlikte su soğutmanın da kullanılmasını ifade etmektedir.
- ODAF (Oil directed Air forced), direkt olarak yağın nüve ve bobine teması ile sağlanan, ayrıca fan ile havanın da soğutmaya katıldığı sistemi ifade etmektedir.
- ODWF (Oil directed Water forced), direkt olarak yağın nüve ve bobine teması ile sağlanan, ayrıca suyun da soğutmaya katıldığı sistemi ifade etmektedir.

Bu soğutma sistemleri, yağlı tip transformatörlerin kullanıldığı yere, tasarımına veya boyutuna göre değişmektedir. Ayrıca soğutma da kullanılan yağ türünün de soğutma sistemleri üzerinde etkisi vardır. Aynı şekilde kullanılan soğutma sistemlerinin de transformatör tasarımları üzerinde etkisi vardır. Bu yüzden, bu çalışmada, yağlı tip transformatörün soğutulması için önerilen yöntem için de özgün bir prototip tasarlanmıştır. Tasarlanan, özgün yağlı tip transformatörün teknik özellikleri Tablo 1’de verilmektedir. Tablo 2’de ise YTT’nin soğutulması için kullanılan naftanik ve ester bazlı yağların teknik özellikleri verilmektedir.

Tablo 1. Çalışmada Kullanılan YTT Özellikleri

Karakteristik		3 ~ 5 kVA YTT
Parametre	Birim	
Güç	VA	5000
Primer Sargı Gerilimi	V	380
Sekonder Sargı Gerilimi	V	220
Frekans	Hz	50
Sargı Grubu	-	Yzn-11
Standartlar	-	IEC 60076-11
Nominal gerilimdeki empedans	%	6.0
Soğutma	-	Yağ ve TEC
Sargı İletken Türleri	-	Bakır

Tablo 1’de özellikleri verilen YTT için tasarlanan özgün modelin fiziki görünümü Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. YTT'nin fiziki görünümü

Termoelektrik soğutucular ile YTT’nin soğutulmasını için transformatörün üst kısmına TEC modüller ile oluşturulan soğutucu blokların montajı yapılmıştır. Söz konusu TEC modüllerin görünümü Şekil 2’de verilmiştir.



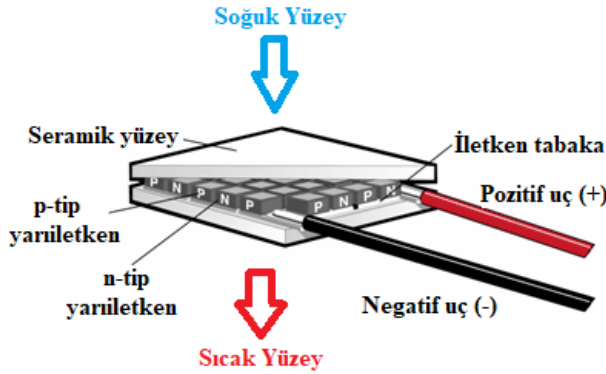
Şekil 2. TEC soğutucu modüller

Tablo 2. Çalışmada kullanılan yağların özellikleri (Shell Diala S4 ZX-I Trafo Yağı, n.d.; Trafo Yağı, n.d.)

Özellik	Standartlar	Naftanik Yağ	Ester Bazlı Yağ
Görünüş	IEC 60296	Temiz, tortusuz	Temiz, Berrak
Yoğunluk, 20°C Kg/Dm ³	ISO 12185	Max. 0,895	805
Vizkozite, 40°C Mm ² /S	ISO 3104	Max. 12	Max. 9,9
Vizkozite, -30°C Mm ² /S	ISO 3104	Max. 1800	Max. 523
Akma Noktası, °C	ISO 3016	Max. -40	Max. -42
Dielektrik Dağıtım Faktörü (Ddf) @ 90°C	IEC 60247	Max. 0,005	Max. 0,001
Bozulma Gerilimi-İşlem Öncesi, Kv	IEC 60156	Min. 30	Min. 70
Bozulma Gerilimi-İşlem Sonrası, Kv	IEC 60156	Min. 70	Min. 78
Çamur, Wt% - @ 120°C, 164 Sa	IEC 61125	Max. 0,8	Max. 0,001
Ddf/90°C - @ 120°C, 164 Sa	IEC 61125	Max. 0,5	Max. 0,5
Alevlenme Noktası, Pm, °C	ISO 2719	Min. 135	Min. 191

2.2. Termoelektrik Soğutucular

Termoelektrik soğutucular, iki farklı yarı iletken malzemenin elektriksel olarak seri ve termal olarak paralel bağlanmasıyla oluşturulur. Şekil 3'te gösterildiği gibi, p ve n tipi yarıiletken malzemeler ve ısıl iletkenliğe sahip seramik yüzeyler ile devre oluşturulmaktadır.



Şekil 3. Termoelektrik soğutucu yapısı

Şekil 3'te verilen termoelektrik soğutucu üzerine DA uygulandığında, Peltier etkisi ile ısı transferi gerçekleşir ve seramik yüzeyler arasında sıcaklık farkı meydana gelir. Böylece TEC modülün bir yüzü ortam sıcaklığının altına inerken diğer yüzü ise ortam sıcaklığının üzerine çıkar. Bu sıcaklık ve akım ilişkisi Denklem 4'te gösterilmektedir.

$$\pi = q/I \quad (4)$$

Bu eşitlikte π , q ve I sırasıyla, peltier katsayısını, Peltier ısısını ve devreye uygulanan akımı ifade etmektedir. Peltier etkisinin kullanıldığı sistemlerde soğutma sağlanması için peltier katsayısının yüksek olması beklenmektedir.

Termoelektrik soğutucuların performansını belirlemek için kullanılan bazı büyüklükler vardır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı COP değeridir. Bu değer, önemli bir karşılaştırma büyüklüğü olup, soğutma gücünün elektrik tüketimine oranı olarak ifade edilmektedir. Denklem 5'te COP değeri gösterilmektedir.

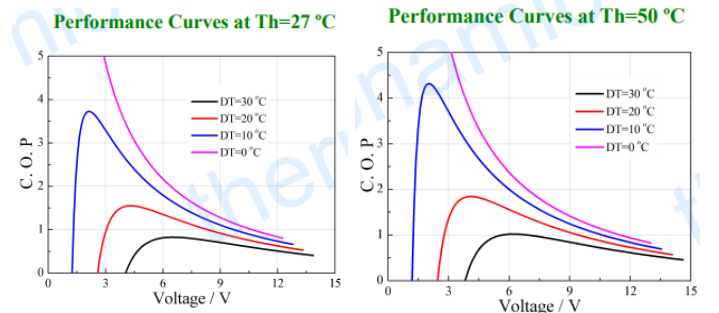
$$COP = q/W \quad (5)$$

W değeri elektrik tüketimidir. COP değeri ne kadar fazla olursa, soğutma o kadar artacaktır (Koh et al., 2014).

Bu çalışmada, termoelektrik soğutucu olarak, TEC1-12706 Peltier modülü kullanılmıştır. Tablo 3'te bu modülün teknik özellikleri ve Şekil 4'te COP performans grafiği verilmektedir (Specification of Thermoelectric Module, n.d.).

Tablo 3. TEC1-12706 peltier teknik özellikleri

Parametre	Değer	
Sıcak Yüzey Sıcaklığı. (°C)	27	50
Q_{max} (Watt)	61.4	66.7
ΔT_{max} (°C)	70	79
I_{max} (A)	6.1	6.1
V_{max} (V)	16	17.2
Resistance (Ω)	2	2.2
Tolerans	±10	

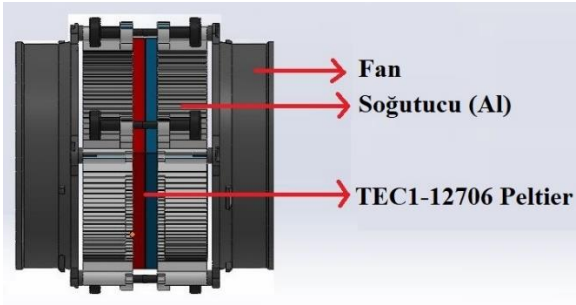


Şekil 4. TEC1-12706 COP grafiği (Sıcaklık farkı: 0-30 °C)

Termoelektrik soğutucunun optimum çalışma noktası, COP değerinin maksimum olduğu zamandır. Tasarlanacak sistemde iç ve dış yüzeyler arasındaki sıcaklık farkına göre optimum çalışma durumu belirlenir. Ayrıca, soğutulacak hacmin ısıl yüküne ve her bir soğutucu Peltier modülünden elde edilebilecek maksimum soğutma gücüne göre, tasarımda kullanılacak Peltier modülünün sayısı belirlenir.

Bu çalışmada, 5 kVA yağlı tip transformatörün soğutulması amacıyla 6 adet TEC1-12706 Peltier modülü kullanılmıştır. Her

bir Peltier, Şekil 5'te gösterildiği gibi iki alüminyum soğutucu radyatör ile fan arasında yerleştirilerek, soğutucu bloklar oluşturulmuştur.



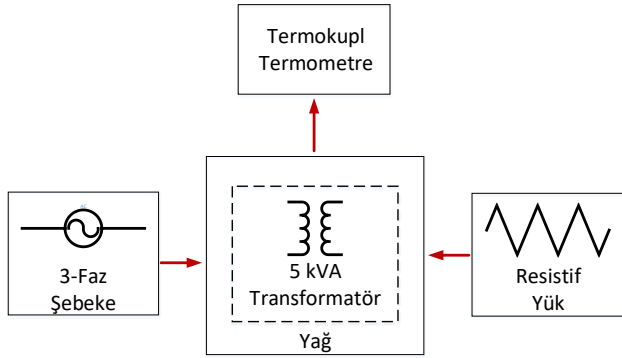
Şekil 5. Termoelektrik soğutucu blok yapısı

Bir modülün maksimum soğutma gücü ise modülün katalog (etiket) değeri olmayıp, atılan ısının uzaklaştırılma etkinliğine şiddetle bağlıdır. Bu nedenle bir Peltier modülün üzerinde yazan maksimum soğutma gücünün çok altında değerlerle pratikte karşılaşılabilmektedir.

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

3.1. YTT Soğutma Sistemi Deney Düzenegi

5 kVA gücündeki YTT'nin nominal çalışma koşullarında, soğutulması için farklı yalıtım materyallerine göre hazırlanan deney şeması Şekil 6 ve 7'de gösterilmiştir. Deney ortamındaki ortam sıcaklığı, IEEE C57.91-1995 standardı dikkate alınarak, 30 °C olarak sağlanmıştır. Bu deney düzeneginde, 5 kVA – 380/220 V YTT, her bir faz için, primer tarafında 7,5 A, sekonder tarafında ise 12,8 A nominal değerlerinde çalıştırılmaktadır.



(a)

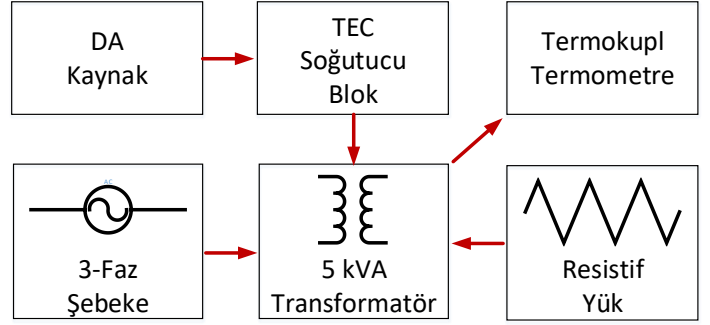


(b)

Şekil 5. YTT'nin yağ ile soğutulması: Blok şeması (a) ve deney düzenegi (b)

Şekil 5, YTT'nin soğutulması için naftanik yağ ve ester bazlı yağın kullanıldığı deney düzenegini göstermektedir. Bu deney düzenegi kullanılarak, 30 °C ortam sıcaklığında, 8 saatlik çalışma süresinde (09:00-17:00), YTT'nin; sargı, nüve ve kabin gövdesinde meydana gelen sıcaklık değerleri elde edilmektedir. Sıcaklık ölçümü için, sargı ve nüve de termokuplu termometre ve transformator kabin gövdesinde ise termal kamera kullanılmıştır.

Şekil 6'da verilen deney düzeneginde ise özgün olarak tasarımı gerçekleştirilen TEC modül soğutmalı sistem, YTT kabinine eklenmektedir. Bu sistem ile YTT'nin güçlendirilmiş hava soğutması ile soğutulması, yağlı soğutma sistemlerindeki aynı ortam sıcaklığı ve çalışma süresinde sargı, nüve ve kabin gövdesindeki sıcaklıklar ölçülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 6. YTT'nin TEC ile soğutulması: Blok şeması (a) ve deney düzenegi (b)

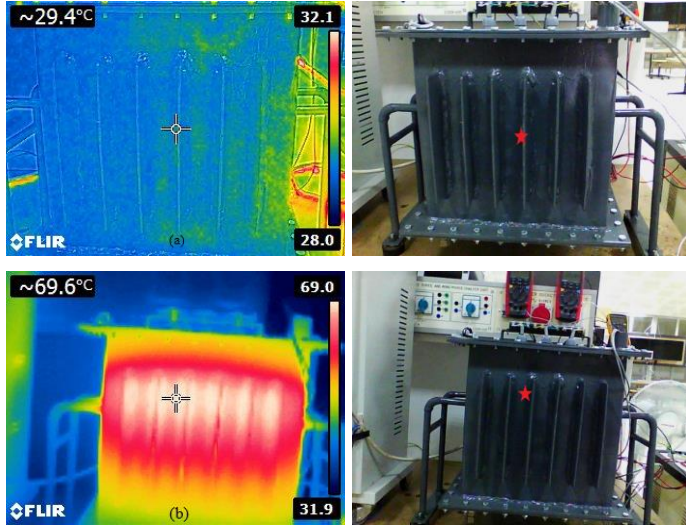
Naftanik yağ ve ester bazlı yağın kullanıldığı deney düzeneginde olduğu gibi, TEC soğutuculu deney düzenegi kullanılarak, 30 °C ortam sıcaklığında, 8 saatlik çalışma süresinde (09:00-17:00), YTT'nin; sargı, nüve ve kabin gövdesinde meydana gelen sıcaklık değerleri elde edilmektedir.

YTT'nin çalışması esnasında sargılarda oluşan sıcaklık kabin havasını ısıtmakta, ısınan hava da kabin içerisinde yukarı çıkmaktadır. Endüstride kullanılan YTT kabinlerinde hava akışı için yerleştirilen güçlendirilmiş hava sistemlerinin (fanlı sistem) kabin altında olduğu tasarımlar mevcuttur. Bu tasarımların aksine üst kısımda yükselen sıcak havayı soğutması ve genel olarak da kabin içerisinde daha iyi ısı transferi sağlaması için TEC modül soğutma sistemi özgün tasarımda ve Şekil 6'da görüldüğü üzere

üst konuma yerleştirilmektedir (Bu soğutma sistemi YTT ler için ızgaralı mahfaza ile korunacaktır).

3.1.1 YTT 'nin Naftanik Yağ ile Soğutulması ve Sonuçlar

Şekil 5'te verilen deney düzeneği kurularak, YTT'nin kabini içerisine yaklaşık 37 lt naftanik yağ konulmuştur. YTT'nin kabin gövdesinden termal kamera ile ölçümler alınmıştır. Çalışma süresinin başında ve sonunda alınan ölçümler Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. Naftanik yağ soğutmalı YTT kabin gövde sıcaklık termal kamera görüntüleri

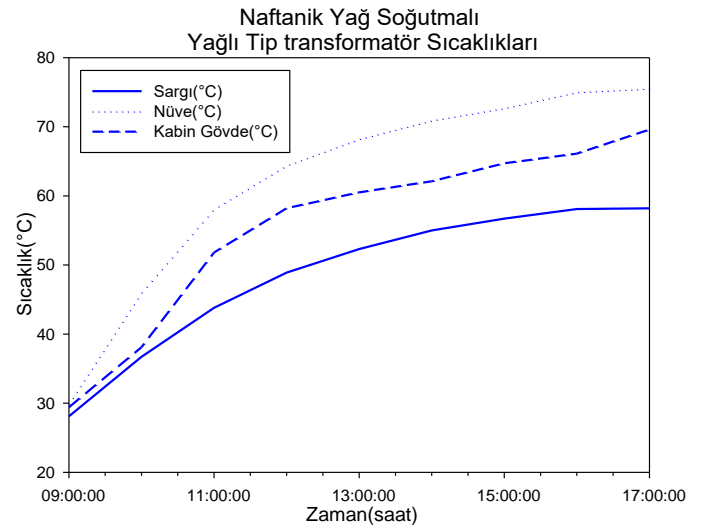
YTT'nin nüve ve sargılarında meydana gelen ısıyı ölçmek için ilgili yerlere termokulp bağlanarak termometre ile ölçümler kaydedilmiş olup, tüm ölçümler Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. Naftanik yağ soğutmalı YTT sıcaklıkları

Naftanik Yağ Soğutmalı Yağlı Tip Transformatör		
Sargılar (°C)	Nüve (°C)	Kabin Gövdesi (°C)
28,1	29,9	29,4
36,7	46	38,1
43,8	58,1	51,8
48,9	64,4	58,2
52,3	68,2	60,5
55	70,9	62,1
56,7	72,7	64,7
58,1	75	66,1
58,2	75,5	69,6

Burada, naftanik yağlı soğutmanın etkisiyle 8 saatlik çalışma süresinde, sargılardaki sıcaklık değeri en yüksek 58,3 °C, nüvede 75,5 °C ve YTT kabi gövdesinde ise 69,6 °C olmaktadır.

YTT'nin naftanik yağ ile soğutulmasıyla, transformatörün sargı, nüve ve kabin gövdesinde ölçülen sıcaklık değerlerinin değişim grafiği Şekil 8'de verilmektedir.



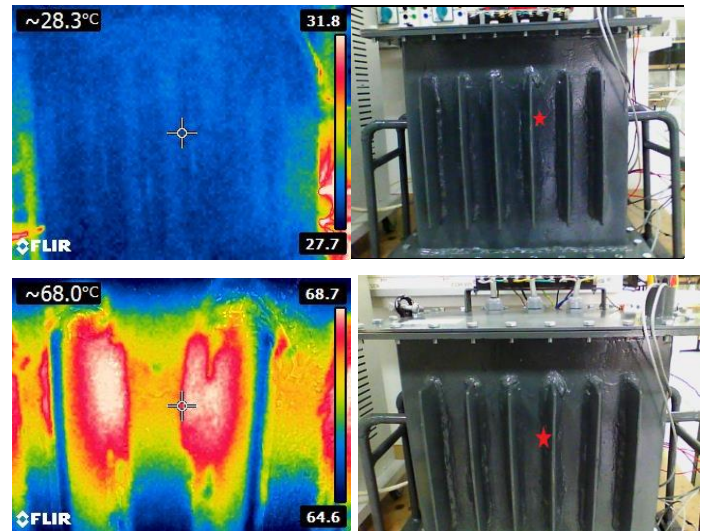
Şekil 8. Naftanik yağ soğutmalı YTT sıcaklık değişimleri grafiği

Şekil 8 incelendiğinde, nüve sıcaklık değerlerinin sargı ve kabin gövde sıcaklık değerlerine göre daha yüksek sıcaklık değerinde olduğu belirlenmektedir.

3.1.2 YTT 'nin Ester Bazlı Yağ ile Soğutulması ve Sonuçlar

Bu çalışmada, YTT'nin soğutulması için naftanik yağlardan daha iyi yalıtım gücüne sahip ve günümüzde yaygın olarak kullanılan Ester bazlı yağlar da kullanılmıştır. Bunun amacı klasik transformatör yağlarına göre daha iyi performans gösteren yağları kullanarak, karşılaştırma yapmaktır.

Şekil 9'da, Ester bazlı yağ kullanılarak soğutulan YTT'nin kabin gövdesinden elde edilen termal kamera görüntüleri verilmektedir. Bu görüntüler transformatörün çalışma süresince alınan ilk sıcaklık değerleri ile en yüksek sıcaklık değerleridir.



Şekil 9. Ester bazlı yağ soğutmalı YTT kabin gövde sıcaklık termal kamera görüntüleri

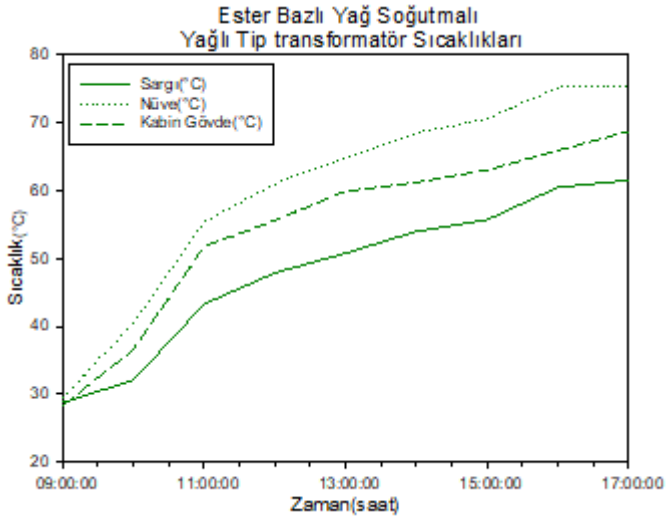
Ester bazlı yağ ile soğutulan YTT'nin nüve ve sargılarında meydana gelen ısıyı ölçmek için ilgili yerlere termokulp bağlanarak termometre ile elde edilen ölçümler ile termal kamera ile kabin gövdesinden elde edilen ölçümler Tablo 5'te verilmektedir.

Tablo 5. Ester bazlı yağ soğutmalı YTT sıcaklıkları

Ester Bazlı Yağ Soğutmalı Yağlı Tip Transformötör		
Sargılar (°C)	Nüve (°C)	Kabin Gövde (°C)
28,8	29,4	28,3
32,1	40,6	36,6
43,3	55,4	51,8
47,9	61	55,6
50,8	64,9	59,9
54	68,5	61,2
55,7	70,6	63
60,5	75,2	65,9
61,5	75,5	68

Tablo 5' incelendiğinde, elde edilen sonuçların naftanik yağ ile soğutulan transformötöre göre daha düşük sıcaklık değerleri olduğu, dolayısıyla ester bazlı yağın, naftanik yağa göre daha iyi soğutma sağladığı görülmektedir.

YTT'nin ester bazlı yağ ile soğutulmasıyla, transformötörün sargı, nüve ve kabin gövdesinde ölçülen sıcaklık değerlerinin değişim grafiği ise Şekil 10'da verilmektedir.



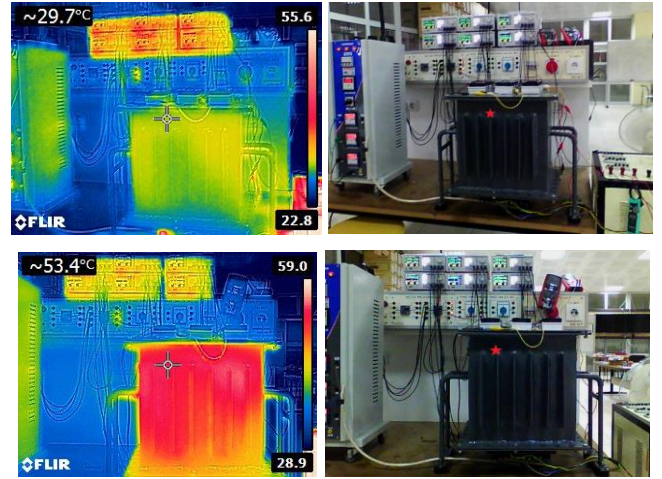
Şekil 10. Ester bazlı yağ soğutmalı YTT sıcaklık değişimleri grafiği

3.1.3 YTT 'nin TEC Modül ile Soğutulması ve Sonuçlar

Yağlı tip transformötörlerin; yağ, su ve hava soğutmalı sistemler dışında standartlarda belirlenen herhangi bir soğutma sistemi tanımlanmamaktadır. Termoelektrik soğutucular, mevcut soğutma sistemlerinin olumsuz etkilerini minimize edebilecek, yenilenebilir ve çevre dostu olarak alternatif bir soğutma sistemi olarak önerilmektedir. 6 adet TEC1-12706 Peltier modülü kullanılarak oluşturulan TEC soğutucu blok YTT kabininin üst konumuna yerleştirilmiştir. Böylece daha iyi hava transferi yapılması amaçlanmıştır.

Şekil 11'de, TEC soğutucu blok kullanılarak soğutulan YTT'nin kabin gövdesinden elde edilen termal kamera görüntüleri verilmektedir. Bu görüntüler transformötörün çalışma

süresince alınan ilk sıcaklık değerleri ile en yüksek sıcaklık değerleridir.



Şekil 11. TEC modül soğutmalı YTT kabin gövde sıcaklık termal kamera görüntüleri

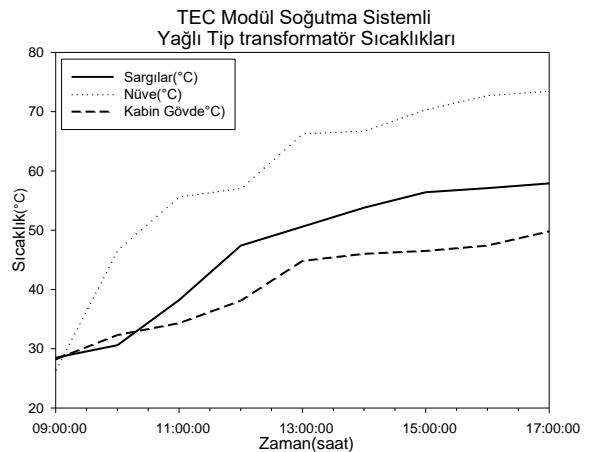
Tablo 6'da ise, YTT'nin 8 saatlik çalışma süresinde nüve, sargı ve kabin gövdesinde oluşan sıcaklık değerleri verilmektedir.

Tablo 6. TEC modül soğutma sistemli YTT sıcaklıkları

TEC Modül Soğutmalı Yağlı tip Transformötör		
Sargılar (°C)	Nüve (°C)	Kabin Gövde (°C)
28,5	26,5	29,7
30,6	46,7	32,3
38,2	55,7	34,3
47,4	57,1	38,1
50,6	66,3	44,8
53,8	66,8	46
56,4	70,4	46,5
57,1	72,8	47,4
57,9	73,5	53,4

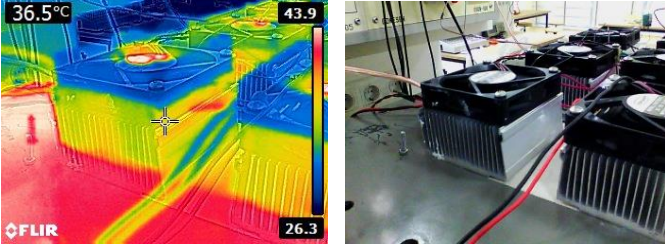
Burada, nüve için 73,5°C, sargı için 57,9 °C ve kabin gövdesi için 53,4°C sıcaklık değerlerinin naftanik ve ester bazlı yağ ile soğutulan transformötöre göre daha düşük sıcaklık değerleri olduğu, dolayısıyla daha iyi soğutma sağlandığı görülmektedir.

YTT'nin TEC soğutucu blok ile soğutulmasıyla, transformötörün sargı, nüve ve kabin gövdesinde ölçülen sıcaklık değerlerinin değişim grafiği Şekil 12'de verilmektedir.



Şekil 12. TEC modül soğutmalı YTT sıcaklık değişimleri grafiği

YTT'nin soğutulmasında kullanılan TEC modüllerin transfer ettikleri ve üzerlerinde ölçülen sıcaklık değeri ise Şekil 13 'te görülmektedir.

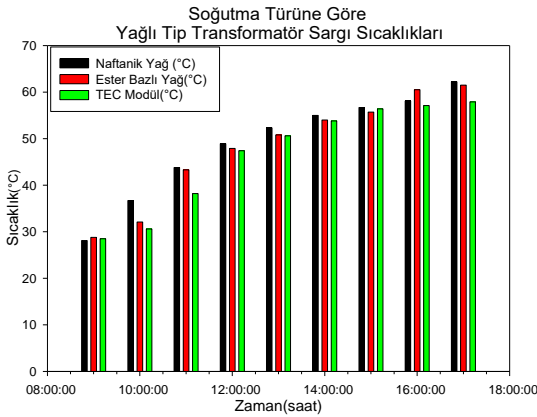


Şekil 13. TEC modülün YTT kabin gövde üzerindeki sıcaklığının termal kamera görüntüleri

Çalışma esnasında kabinde 53,4 °C sıcaklık ölçülürken aynı zamanda TEC lerden 36,5 °C sıcaklık ölçülmektedir. Dolayısıyla TEC modüllerin YTT kabinini soğutmada etkili olduğu belirlenmektedir.

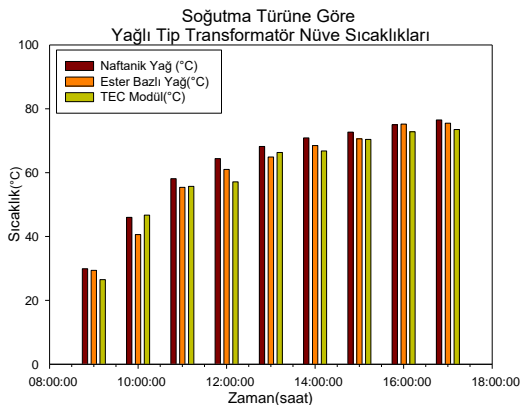
3.2. YTT Soğutma Sistemlerinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada, YTT'nin soğutulması için kullanılan naftanik yağ, ester bazlı yağ ve TEC soğutma sistemlerinin transformatör üzerindeki etkileri incelenmiştir. Farklı soğutma sistemleri için, YTT'nin 8 saatlik çalışma süresi sonunda, sargılarında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 14'te verilmektedir.



Şekil 14. Farklı soğutma sistemleri için YTT sargı sıcaklıkları

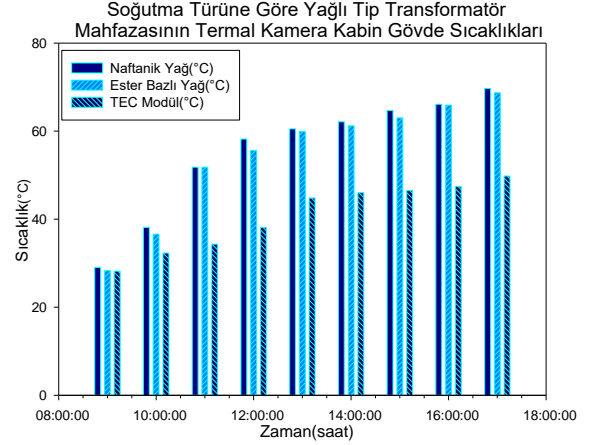
Şekil 14 incelendiğinde, YTT'nin sargılarında elde edilen en düşük sıcaklık değerinin TEC soğutma sistemi ile sağlandığı görülmektedir. Farklı soğutma sistemleri için, YTT'nin nüvesinde ölçülen sıcaklık değerleri ise Şekil 15'te gösterilmiştir.



Şekil 15. Farklı soğutma sistemleri için YTT nüve sıcaklıkları

YTT'nin nüvesinde elde edilen en düşük sıcaklık değerinin sargılarda olduğu gibi, TEC soğutma sistemi ile sağlandığı görülmektedir.

Farklı soğutma sistemleri için, YTT'nin kabin gövdesinden termal kamera ile ölçülen sıcaklık değerleri ise Şekil 16'da gösterilmiştir.



Şekil 16. Farklı soğutma sistemleri için YTT kabin gövde sıcaklıkları

Şekil 16'da TEC soğutucu sistem kullanılarak kabin gövdesinde elde edilen sıcaklık değerlerinin, diğer soğutma türlerine göre % 15-20 oranında daha düşük olduğu, dolayısıyla daha iyi soğutma yaptığı görülmektedir.

4. Sonuç

Elektrik üretim, iletim ve dağıtım şebekesinin en önemli ekipmanlarından biri olan yağlı tip transformatörlerin soğutulması, hem transformatörlerin faydalı ömürleri hem de elektrik şebekesinin güvenilirliği için çok önemlidir. Ancak soğutmada yaygın olarak kullanılan naftanik ve ester bazlı yağların, çevre dostu olmaması, bakım onarım maliyetlerinin fazla olmasından dolayı, bu çalışmada yağlı tip transformatörün soğutulması için alternatif bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemde Termoelektrik soğutucuların kullanıldığı, özgün bir yağlı tip transformatör prototipi tasarlanmıştır. Tasarlanan protoip naftanik ve ester bazlı soğutma sistemlerinin yanı sıra termoelektrik soğutucu sistem ile de soğutulmuş, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Termoelektrik soğutucu sistem kullanılarak kabin gövdesinde elde edilen sıcaklık değerlerinin, diğer soğutma türlerine göre % 15-20 oranında daha düşük olduğu, dolayısıyla daha iyi soğutma yaptığı görülmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışma ile yağlı tip transformatörlerin soğutulmasında geleneksel yöntemlerden farklı olarak, Termoelektrik soğutucu sistemlerin geliştirilerek kullanılabilmesi değerlendirilmektedir. Böylece transformatörler için çevre dostu ve yenilenebilir enerji ürünü olan yeni bir soğutma sınıfı oluşturulabilecektir.

5. Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK, 121E010 nolu, "Termoelektrik Soğutucuların Yağlı Tip Dağıtım Transformatörlerinin Faydalı Ömürlerine Etkisinin İncelenmesi" adlı projenin sağladığı destekle tamamlanmış olup yazarlar TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç bilirler.

Kaynakça

- Ab Ghani, S., Muhamad, N. A., Noorden, Z. A., Zainuddin, H., Abu Bakar, N., & Talib, M. A. (2018). Methods for improving the workability of natural ester insulating oils in power transformer applications: A review. *Electric Power Systems Research*, *163*, 655–667. doi: 10.1016/J.EPSR.2017.10.008
- Ahiska, R., Ahiska, G., & Ahiska, K. (2009). Analysis of a New Method for Measurement of Parameters of Real Thermoelectric Module Employed in Medical Cooler for Renal Hypothermia. *Instrumentation Science and Technology*, *37*(1), 102–123. doi: 10.1080/10739140802584772
- Ahiska, R., & Ahiska, K. (2013). Esnek İki Fazlı Termoelektrik CPU Soğutucusu. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, *22*(2), 347–351. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd/88383>
- Cai, Y., Wang, Y., Liu, D., & Zhao, F. Y. (2019). Thermoelectric cooling technology applied in the field of electronic devices: Updated review on the parametric investigations and model developments. *Applied Thermal Engineering*, *148*, 238–255. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.11.014
- Cuce, E., Guclu, T., & Cuce, P. M. (2020). Improving thermal performance of thermoelectric coolers (TECs) through a nanofluid driven water to air heat exchanger design: An experimental research. *Energy Conversion and Management*, *214*, 112893. doi: 10.1016/j.enconman.2020.112893
- Dalcali, A., & Demirel, H. (2016). Microcontroller-based cooling of a single-phase transformer with thermoelectric module. *The International Journal of Energy and Engineering Sciences*, *1*(2), 4–14. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/ijees/612249>
- Dmitriev, A. V., Dmitrieva, O. S., & Madyshev, I. N. (2017). Prospects for the Use of Additional Cooling System for the Oil-Immersed Transformers with Thermoelectric Transducers. *MATEC Web of Conferences*, *95*, 15012. doi: 10.1051/mateconf/20179515008
- Dombek, G., Goscinski, P., & Nadolny, Z. (2017). Comparison of mineral oil and esters as cooling liquids in high voltage transformer in aspect of environment protection. *E3S Web of Conferences*, *14*, 01053. doi: 10.1051/E3SCONF/20171401053
- Filho, A. A. P., Luna, F. M. T., & Cavalcante, C. L. (2019). Oxidative stability of mineral naphthenic insulating oils: Optimization of commercial antioxidants and metal passivators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, *26*(1), 240–246. doi: 10.1109/TDEI.2018.007513
- Garelli, L., Ríos Rodriguez, G. A., Kubiczek, K., Lasek, P., Stepien, M., Smolka, J., Storti, M., Pessolani, F., & Amadei, M. (2021). Thermo-magnetic-fluid dynamics analysis of an ONAN distribution transformer cooled with mineral oil and biodegradable esters. *Thermal Science and Engineering Progress*, *23*, 100861. doi: 10.1016/J.TSEP.2021.100861
- Hasan, M. I., Ugla, A. A., & Kadhim, H. S. (2020). Improving the thermal performance of electrical transformers using hybrid mixture of (transformer oil, nanoparticles, and PCM). *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences*, *13*(3), 175–182. doi: 10.30772/QJES.V13I3.704
- Hsin, C. L., Wu, M. H., & Wang, W. C. (2019). Thermoelectric Devices by Half-Millimeter-Long Silicon Nanowires Arrays. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, *18*, 921–924. doi: 10.1109/TNANO.2019.2938624
- Hubbard, W. A., Mecklenburg, M., Lodico, J. J., Chen, Y., Ling, X. Y., Patil, R., Kessel, W. A., Flatt, G. J. K., Chan, H. L., Vareskic, B., Bal, G., Zutter, B., & Regan, B. C. (2020). Electron-Transparent Thermoelectric Coolers Demonstrated with Nanoparticle and Condensation Thermometry. *ACS Nano*, *14*(9), 11510–11517. doi: 10.1021/acsnano.0c03958
- Jiang, L., Zhang, H., Li, J., & Xia, P. (2019). Thermal performance of a cylindrical battery module impregnated with PCM composite based on thermoelectric cooling. *Energy*, *188*, 116048. doi: 10.1016/J.ENERGY.2019.116048
- Kaymaz, O., Kalkan, G., & Erek, A. (2015). Flow and heat transfer characteristics of different transformer oils in one section of transformer radiator. *Mühendis ve Makina*, *56*(666), 53–63. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/muhendismakina/736101>
- Koh, Y. R., Yazawa, K., & Shakouri, A. (2014). Cooling heat flux, COP, and cost optimization of integrated thermoelectric microcoolers with variation of thermoelectric properties. *Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems - Proceedings of the Intersociety Conference*, 1412–1416. doi: 10.1109/ITHERM.2014.6892445
- Lamarre, C., Crine, J. P., & Duval, M. (1987). Influence of oxidation on the electrical properties of inhibited naphthenic and paraffinic transformer oils. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, *EI-22*(1), 57–62. doi: 10.1109/TEI.1987.298965
- Manjang, S., Kitta, I., & Ikhlas, A. (2019, October 1). Voltage Breakdown Characteristics of Transformer Mineral Oil with Varies the Composition of Corn Oil. *Proceedings of the 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems: Towards Sustainable and Reliable Power Delivery*, ICHVEPS 2019. doi: 10.1109/ICHVEPS47643.2019.9011119
- Perez, J. (2010). Fundamental principles of transformer thermal loading and protection. *63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers*. doi: 10.1109/CPRE.2010.5469518
- Rao, U. M., Pulluri, H., & Kumar, N. G. (2018). Performance analysis of transformer oil/paper insulation with ester and mixed dielectric fluids. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, *25*(5), 1853–1862. doi: 10.1109/TDEI.2018.007224
- Rouabeh, J., M'barki, L., Hammami, A., Jallouli, I., & Driss, A. (2019). Studies of different types of insulating oils and their mixtures as an alternative to mineral oil for cooling power transformers. *Heliyon*, *5*(3), e01159. doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01159

- Sekiguchi, R., Liu, Y., & Sano, Y. (2018). Thermal Equivalent Circuit of Peltier Device Considered Seebeck Effect and Driving Method Improving Cooling Efficiency of the Device. *Electronics and Communications in Japan*, 101(5), 73–83. doi: 10.1002/ecj.12065
- Shell Diala S4 ZX-I Trafo Yağı. (n.d.). Retrieved from https://solutions.shell.com/in/products/Diala_S4_ZX-I_001E8701
- Specification of Thermoelectric Module. (n.d.). Retrieved from <http://www.thermonamic.com/TEC1-12706-English-20201124.pdf>
- Toren, M., & Celebi, M. (2016). Impact on efficiency of core materials in dry type transformers. *2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering*, 170–173.
- Toren, M., & Mollahasanoglu, H. (2021). Investigation of thermoelectric cooler system effect on induction motor performance. *2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2021 - Proceedings*. doi: 10.1109/ELMA52514.2021.9503049
- Trafo Yağı. (n.d.). Retrieved from <http://speedol.com.tr/trafo-yagi/>
- Wang, X., & Wang, Z. D. (2008). Particle effect on breakdown voltage of mineral and ester based transformer oils. *Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP*, 598–602. doi: 10.1109/CEIDP.2008.4772859
- Wang, Xiaobo, Tang, C., Huang, B., Hao, J., & Chen, G. (2018). Review of Research Progress on the Electrical Properties and Modification of Mineral Insulating Oils Used in Power Transformers. *Energies*, 11(3), 487. doi: 10.3390/EN11030487