



**Termoelektrik Soğutucuların Yağlı Tip Dağıtım
Transformatörlerinin Faydalı Ömürlerine Etkisinin İncelenmesi**

Program Kodu:1002

Proje No:121E010

Proje Yürütücüsü:

MURAT TÖREN

Araştırmacı(lar)

HAKKI MOLLAHASANOĞLU

MART 2022

ANKARA



Termoelektrik Soğutucuların Yağlı Tip Dağıtım Transformatörlerinin Faydalı Ömürlerine Etkisinin İncelenmesi

Önsöz

Proje kapsamında, yağlı tip dağıtım transformatörlerinin soğutulması için kullanılan sisteme alternatif bir soğutma sistemi tasarımı yapılmıştır. Uluslararası standartlarla belirlenen transformatörlerin soğutulma sistemleri, transformatörlerin faydalı ömürlerini de etkilemektedir. Bu soğuma sürecinde sıcaklık değerleri termokupllar, termal kamera ve lazer termometre ile ölçülmüştür. Projenin ikinci aşamasında ise naftanik/ parafinik yağdan daha iyi ısı transferi sağlama özellikleri olan ester bazlı trafo yağı konularak aynı ölçüm aletleri ile transformatör soğutulması sağlanarak sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Projenin son aşamasında ise termoelektrik soğutucularla (TEC-Thermoelectric Cooler) oluşturulan soğutucu sistem yağlı transformatörün mahfazasına entegre edilerek sistemin soğutulmaya çalışılmıştır. Bu soğutma sürecinde yine sıcaklık değerleri termokupllar, termal kamera ve lazer termometre ile ölçülmüştür.

Bu çalışmada yağ ile soğutulan dağıtım türü transformatörlerin soğutulmasında yenilenebilir enerji teknolojisi ürünü Termoelektrik soğutucu modüllerden oluşturulan bir soğutma sistemi tasarımı kullanılarak transformatörün özgün olarak tasarlanan soğutma sistemi ile soğutulabileceği belirlenmiştir.

Yukarıda bahsedilen “Termoelektrik Soğutucuların Yağlı Tip Dağıtım Transformatörlerinin Faydalı Ömürlerine Etkisinin İncelenmesi “ projesi TÜBİTAK tarafından 121E010 proje numarası ile 10 ay süre ile desteklenmiştir.

Bu çalışmanın desteklenmesinde başta TÜBİTAK olmak üzere, çalışmada emeği geçen Arş. Gör. Hakkı MOLLAHASANOĞLU’na, danışmanlığını esirgemeyen değerli Doç. Dr. Övgü Ceyda YELGEL hocamıza, bursiyerlik dönemlerinde Murat TAĞIL, Zeynep OLGUN, Mücahit KINA ve Emrullah KOÇ adlı öğrencilerimize teşekkür ederim.

Şubat 2022

Dr. Öğr. Üyesi Murat TÖREN

İçindekiler

Önsöz.....	i
İçindekiler	ii
Tablo Dizini	ii
Şekiller Dizini.....	ii
Özet	iiiv
Abstract.....	v
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Transformatörlerin yapısı ve çalışma prensibi	1
1.2 Transformatörlerin sınıflandırılması ve yağlı tip transformatörler	9
1.3 Termoelektrik Soğutucular (TEC)	11
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	14
3. GEREÇ VE YÖNTEM	16
4. BULGULAR.....	21
4.1 YTT Soğutma Sistemi Deney Düzeneği	21
4.2 YTT 'nin Naftanik Yağ ile Soğutulması ve Sonuçlar.....	22
4.3 YTT 'nin Ester Bazlı Yağ ile Soğutulması ve Sonuçlar.....	23
4.4 YTT 'nin TEC Modül ile Soğutulması ve Sonuçlar	25
5. TARTIŞMA.....	27
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	28

Tablo Dizini

Tablo 1.1. IEC 60085 standardına göre elektrik cihazlarının sıcaklık ve yalıtım sınırları	7
Tablo 1.2. Transformatör izolasyon faydalı ömründeki % 0.0133 değerine ulaşım süreleri	8
Tablo 3.1. Çalışmada kullanılan YTT özellikleri	17
Tablo 3.2. Çalışmada kullanılan yağların özellikleri	17
Tablo 3.3. TEC1-12706 Peltier teknik özellikleri.....	19
Tablo 3.4. Termal kamera özellikleri	20
Tablo 4.1. Naftanik yağ soğutmalı YTT sıcaklıkları	23
Tablo 4.2. Ester bazlı yağ soğutmalı YTT sıcaklıkları	24
Tablo 4.3. TEC modül soğutma sistemli YTT sıcaklıkları	26

Şekil Dizini

Şekil 1.1. Transformatörün güç sistemindeki yerini gösteren şema (Del Vecchio et al. 2010)	1
Şekil 1.2. Transformatörün yapısı	1
Şekil 1.3. Yükte transformatör eşdeğer devresi (Lee 2008)	3
Şekil 1.4. Trafo gücüne göre demir kayıpları grafiği (Çelebi 2009).....	3
Şekil 1.5. Histerezis çevrimi oluşumu (a) Başlangıç eğrisi (b) başlangıç eğrisinden sonra eğrinin yönü (c) Histerezis çevrimleri (d) küçük histerezis çevrimleri (Del Vecchio vd. 2010).	4
Şekil 1.6. Girdap akımlarının yönleri (Aşkın 2011)	5
Şekil 1.7. Transformatör gücüne göre bakır kayıpları grafiği (Çelebi 2009).....	6
Şekil 1.8. IEEE C57.91-1995 standardına göre transformatörün yalıtım ömrü ve ısıya göre deforme hızı	7
Şekil 1.9. Transformatörlerin sınıflandırması	9
Şekil 1.10. Yağlı tip dağıtım transformatörünün genel görünümü.....	10
Şekil 1.11. Termoelektrik üreteç iç yapısı	11
Şekil 1.12. Termoelektrik üreteç kullanım tipleri.....	13
Şekil 3.1 Projede Kullanılan 5kVA YTDT Prototipi	16
Şekil 3.2. Deney Düzeneği Blok Şeması	16
Şekil 3.3. YTT'nin yağ ile soğutulması deney düzeneği	17
Şekil 3.4. YTT'nin TEC modül ile soğutulması deney düzeneği	18
Şekil 3.5. Soğutucu bloğun genel görünümü	18
Şekil 3.6. TEC1-12706 Modül Görünüşü (a) ve Termoelektrik soğutucu iç yapısı (b)	19
Şekil 3.7. TEC1-12706 COP grafiği (Sıcaklık farkı: 0-30 °C).....	20
Şekil 4.1. YTT'nin yağ ile soğutulması Blok şeması	21
Şekil 4.2. YTT'nin TEC ile soğutulması Blok şeması	21
Şekil 4.3. Naftanik yağ soğutmalı YTT kabin gövde sıcaklık termal kamera görüntüleri	22
Şekil 4.4. Naftanik yağ soğutmalı YTT sıcaklık değişimleri grafiği.....	23
Şekil 4.5. Ester bazlı yağ soğutmalı YTT kabin gövde sıcaklık termal kamera görüntüleri	24
Şekil 4.6. Ester bazlı yağ soğutmalı YTT sıcaklık değişimleri grafiği	25
Şekil 4.7. TEC modül soğutmalı YTT kabin gövde sıcaklık termal kamera görüntüleri	25
Şekil 4.8. TEC modül soğutmalı YTT sıcaklık değişimleri grafiği.....	26
Şekil 4.9. TEC modülün YTT kabin gövde üzerindeki sıcaklık görüntüleri.....	26
Şekil 5.1. Farklı soğutma sistemleri için YTT sargı sıcaklıkları	27
Şekil 5.2. Farklı soğutma sistemleri için YTT nüve sıcaklıkları	27
Şekil 5.3. Farklı soğutma sistemleri için YTT kabin gövde sıcaklıkları.....	28

Özet

Elektrik enerjisinin iletim ve dağıtım sistemleri içerisinde aktif rol alan transformatörlerin, endüstriyel sahada sayıca fazla kullanım alanına sahip türü, dağıtım transformatörleridir. Bu transformatörler 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, yenilikçi yaklaşımlarla geliştirilen naftanik ya da parafinik trafo yağlarına göre 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.

Abstract

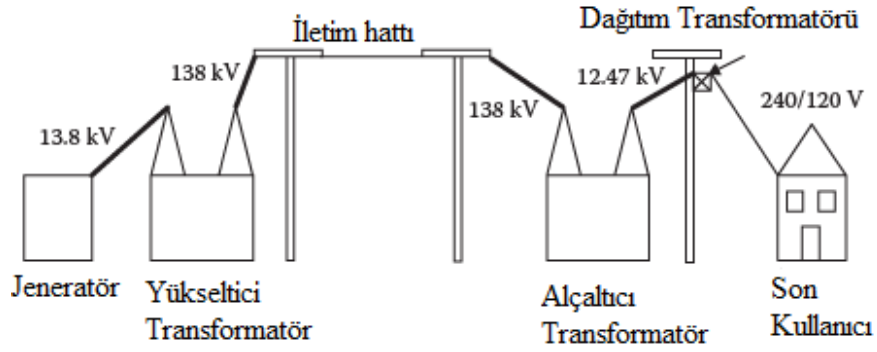
The type of transformers that take an active role in the transmission and distribution systems of electrical energy is distribution transformers which have a large number of uses in the industrial field. These transformers are cooled by different cooling systems according to the places in which they are used, and they are named oil-type and dry-type transformers according to this cooling type. In the cooling of oil-type transformers, naphthenic 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 combustion degree and dielectric strength of these oils have been increasing in recent years. In these studies, ester-based oils with better properties than naphthenic or paraffinic transformer oils developed with innovative approaches were used instead of conventional transformer oils, resulting in increased performance and useful life 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 are 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 provided 15-20% better cooling than naphthenic 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, Naphthenic-based oils, Thermoelectric cooler, TEC, Cooling systems.

1. GİRİŞ

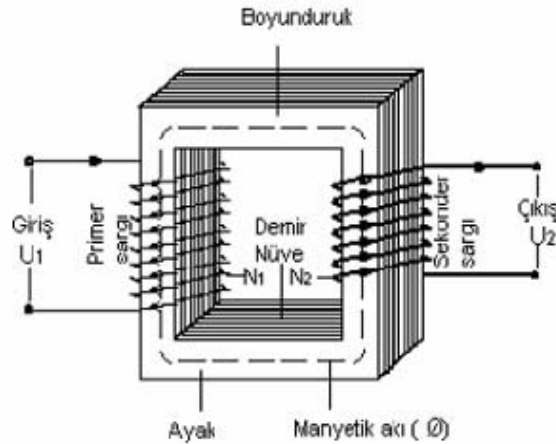
1.1 Transformatörlerin yapısı ve çalışma prensibi

Transformatörler, elektrik enerjisinin iletim ve dağıtımında yaygın olarak kullanılan elektromanyetik indüksiyonla elektrik akımını ve gerilim seviyesini değiştirebilerek taşınmaya ve tüketime uygun hale getiren statik elektrik makinalarıdır. Güç sistemi içerisindeki yeri önemli olan transformatörlerin sistem içerisindeki konumu Şekil 1.1'de görüldüğü gibidir.



Şekil 1.1. Transformatörün güç sistemindeki yerini gösteren şema (Del Vecchio vd. 2010)

Şekil 1.1'de transformatörlerin elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtım sürecinde aktif bir işleve sahip olduğu gözlemlenmektedir. Güç sistemi içerisinde aktif olarak yer alan transformatörlerin yapısı ise Şekil 1.2'de görüldüğü gibi çekirdek (nüve) adı verilen silisyum ince saçların bir araya getirdiği demir kısım ve bu kısma sarılan ve elektrik akımının dolaştığı bakır sargılardan oluşmaktadır. Transformatörlerde çekirdek kısmının enine bileşenlerine boyunduruk, boyuna bileşenlerine ise ayak denilmektedir.



Şekil 1.2. Transformatörün yapısı

Şekil 1.2'de görülen transformatör yapısına göre elektrik akımı girişte verilen U_1 gerilimi ile elde edilmekte ve buradan birincil sargı da denilen primer sargılara verilmektedir. Burada

sargıdaki akım çekirdekte birinci denklemde verilen manyetik akıyı meydana getirmektedir. Sargı direnç değerleri sıfır kabul edilirse, bu durumda $U_1 = e_1$ olur. Bu durumda U_1 (birincil sargı anlık gerilim değeri) sinüzoidal bir şekilde değiştiği için \emptyset_m değeri de frekansa göre değişken olur.

$$\emptyset_m = \emptyset_{max} \sin wt \quad (1.1)$$

Ayrıca primer sargıda denklem 2 ile verilen gerilim indüklenmektedir. Sargılarda indüklenen gerilim değeri Faraday kanununa göre;

$$e_1 = N_1 \frac{d\emptyset}{dt} \quad (1.2)$$

Burada, \emptyset_{max} toplam manyetik akının tepe değeri olup, $w = 2\pi f$ rad/sec. \emptyset_m değerini, Faraday kanununda yerine koyulursa;

$$e_1 = N_1 2\pi f \emptyset_{max} \cos wt \quad (1.3)$$

Birincil sargıda indüklenen emk'nin etkin (rms) değeri olan e_1 , Eşitlik 1.4'te tepe değerini $\sqrt{2}$ 'ye bölerek elde edilmektedir.

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} N_1 2\pi f \emptyset_{max} \cos wt = 4,44 N_1 f \emptyset_{max} \cos wt \quad (1.4)$$

Bu akı sayesinde verilen elektrik akımı ikincil sargıda denilen sekonder sargıya iletilmek ve ikincil gerilimi indüklemektedir. İkincil sargıda indüklenen emk ise,

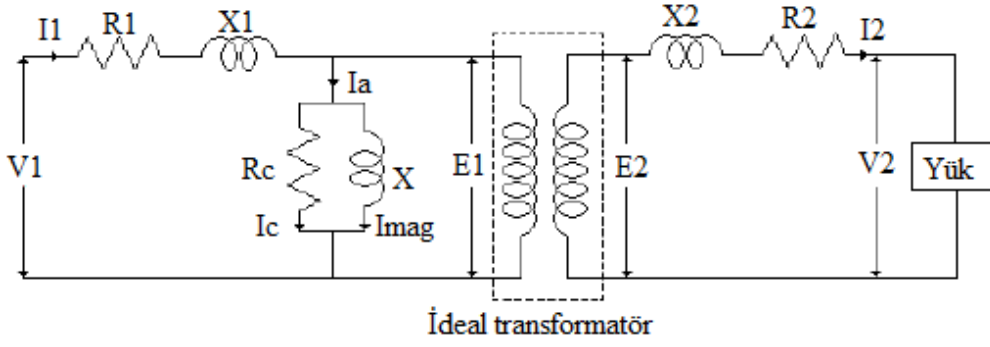
$$e_2 = N_2 \frac{d\emptyset}{dt} \quad (1.5)$$

Sekonder sargıya iletilen akı, sargıda elektrik akımına dönüşmekte ve çıkış noktasında bu akım çıkış gerilimi olan U_2 değerini oluşturmaktadır. Böylece elektriksel gerilim, akım bir noktadan başka bir noktaya sargıların sarım sayısı oranı da denilen, dönüştürme oranına (α) dönüştürülerek, manyetik etki dolayısıyla aktarılmaktadır.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = \alpha \quad (1.6)$$

Burada N_1 ve N_2 sarım sayısı ve \emptyset ise her iki sargıda manyetik etki oluşturan manyetik akının ani değeridir.

Transformatörlerde sekonder sargısının çıkışına yük bağlanması durumunda transformatörün elektriksel eşdeğer devresi Şekil 1.3'teki gibidir.



Şekil 1.3. Yükte transformatör eşdeğer devresi (Lee, 2008)

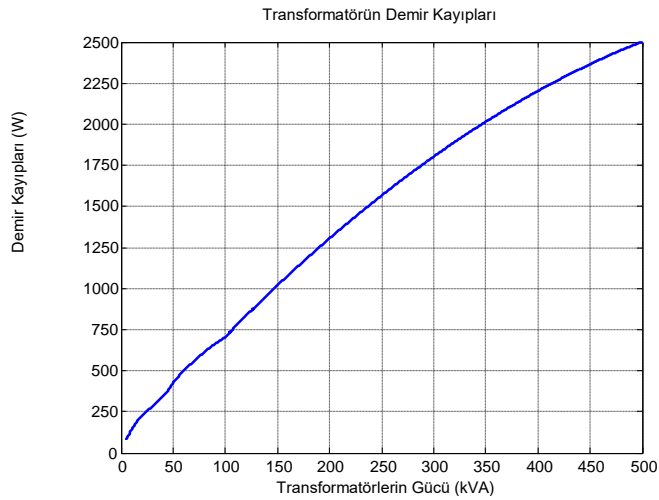
Burada R_1 ve X_1 değerleri sırasıyla birincil sargı direnci ve reaktansı, R_2 ve X_2 de ikincil sargı direnç ve reaktanslarıdır. I_c ve I_{mag} ise nüve kayıpları akımı ve mıknatıslanma kayıpları akımlarıdır.

Transformatörlerde sıcaklığın artışı yükle çalışan transformatörlerde meydana gelen bu nüve demir kayıpları ve sargılardaki bakır kayıplarıdır.

Transformatörlerde demir kayıpları;

- Histerezis kayıpları
- Girdap akım kayıpları (Foucault kaybı)

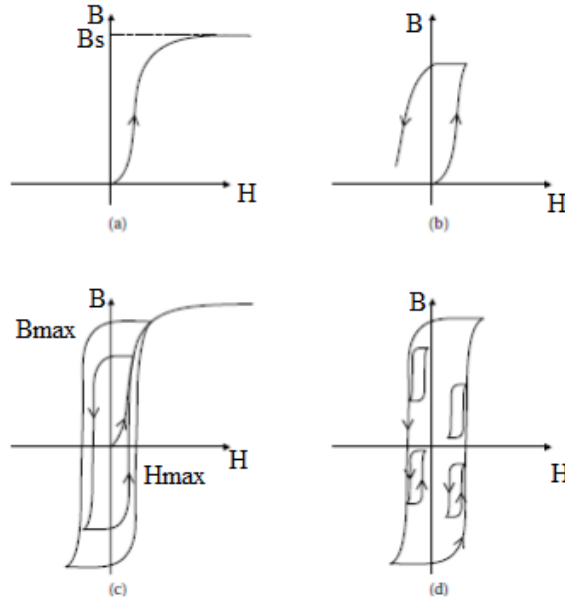
olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Demir kayıpları yükten bağımsız, frekans, gerilim sabit değerlerde iken değişmeyen değerlerde elde edilen kayıplardır. Bu kayıpların transformatörlerin gücüne göre değişim grafiği Şekil 1.4'te verilmektedir.



Şekil 1.4. Trafo gücüne göre demir kayıpları grafiği (Çelebi, 2009)

Histerezis kaybı: Transformatörlerde sargıya alternatif gerilim uygulandığında sargıdan geçen akımın yönüne göre nüvedeki belirli bir yöndeki manyetik dipollerin yönü değişir. Manyetik

dipollerin malzeme içerisinde yön değiştirmesi ve mıknatıslanmalar enerji kaybına sebep olur. Bu kayıpları Şekil 1.5'te görülen B-H ve histerezis eğrilerinden görülebilir.



Şekil 1.5. Histerezis çevrimi oluşumu; (a) Başlangıç eğrisi (b) başlangıç eğrisinden sonra eğrinin yönü (c) Histerezis çevrimleri (d) küçük histerezis çevrimleri (Del Vecchio vd. 2010)

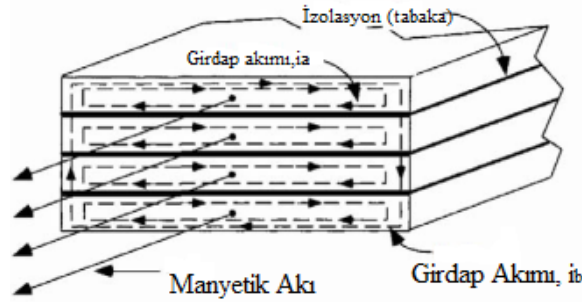
H manyetik alan şiddeti maksimum değerinden itibaren akım azaltıldığında manyetik alanında azaldığı gözlemlenir. Mıknatıslanmadan önce malzemenin yapısında bulunan düzensiz moleküller akımın artması ile enerji kazanarak manyetik alan yönünde dizilirler (Büyükbıçakçı, 2006). Daha sonra akımın sıfır olduğunda moleküllerin çoğunluğu eski yapılarına döner. $H = 0$ olmasına rağmen demirde artık bir akı kalır. Çünkü arka arkaya dizilmiş olan moleküllerden bazıları eski haline dönemezler. Bu olaya kalıcı mıknatıslık denir. Bunun anlamı artık demirde kalıcı bir mıknatıslanmanın oluştuğudur. Demirdeki bu artık akı yoğunluğuna Remanans akı denir. Remanansı yok etmek için gerekli olan alan şiddetine de "Koersif Kuvvet" denir. Manyetik bakımdan yumuşak ve sert malzemelerin histerezis kayıpları birbirinden farklıdır (Büyükbıçakçı, 2006).

$$P_h = \sigma_h f B_m^n G_{fe} \quad (1.7)$$

Denklem 1.7'de f , B_m , G_{fe} , σ_h ve P_h sırasıyla frekans (Hz), Akı yoğunluğunun maksimum değeri (T), Demir çekirdek kütlesi(kg), Histerezis kayıp faktörü ve Histerezis kaybı (W) ifade etmektedir. Denklem 1.7'deki n değeri Steinmetz sabiti olmak üzere çekirdek sacının haddelenme şekline göre farklı değerler alır. Sıcakta haddelenmiş saclarda 1,6-2 ve soğukta

haddelenmiş saclarda ise 2 değeri alınır. Kayıp faktörü ise akı yoğunluğuna bağlı bir sabittir (Karsai vd. 1987).

Çekirdekte meydana gelen girdap akım kayıpları (Foucault kaybı) : Transformatörlerin çekirdekleri demir alaşımlı bir malzemedir ve iyi bir elektriksel iletken olduğundan dolayı manyetik alan, çekirdek materyalinin içerisinde kendiliğinden Şekil 6'da görülen girdap akımlarının akmasına neden olacaktır ve burada oluşacak kayıplar joule kaybı meydana getirecektir. Buna girdap akım kaybı (Foucault-Fuko) adı verilir (Erickson ve Maksimovic, 2004).



Şekil 1.6. Girdap akımlarının yönleri (Aşkın, 2011)

Girdap akım kayıplarında, ferromanyetik malzemedeki sacın kalınlığı arttığında levhanın direnci azalacağından, sacda dolaşan girdap akımı artacak ve buna bağlı olarak demir kaybı da artacaktır. Bunun sonucunda nüve saçı ısınacak ve üzerindeki sargıların izolasyonu zarar görecektir. Girdap akım kayıplarının azaltılmasında çekirdek materyalinin direncinin artırılması ve materyal içerisine az bir yüzde ile silisyum katılması etkili olmaktadır. Bir başka yöntem de materyali sac levhalardan oluşmuş bir sac paketi halinde (laminyasyon) arka akaya dizilmiş şekilde imal etmektir. Girdap akımlarının neden olduğu kayıp şu şekilde elde edilir:

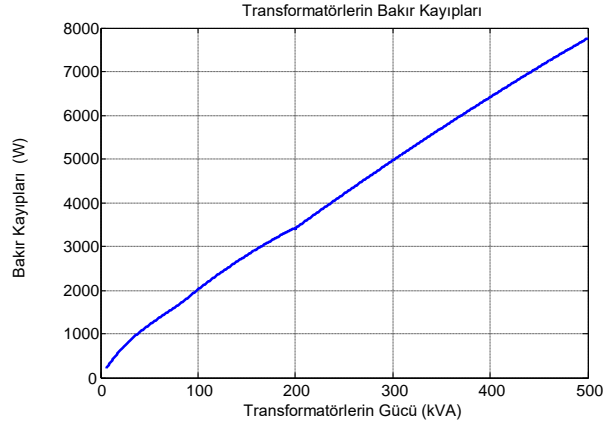
$$P_e = \sigma_e (f B_m t)^2 G_{fe} \quad (1.8)$$

Burada, σ_e girdap akım malzemesi sabiti ($m^2/\Omega kg$), P_e , Girdap akım kaybı (W), t ise, sac levha kalınlığını (m) ifade etmektedir. Transformatörlerde oluşan bu demir kayıplarının genel denklemi ise, Denklem 1.9'da gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

$$P_{fe} = P_h + P_e \text{ (W)} \quad (1.9)$$

Transformatörlerde bakır kayıpları, sargılardaki doğru akımın ve elektriksel direncin bağlı olduğu I^2R kayıpları olarak ve alternatif akımdan dolayı kaçak manyetik akının bakır

iletkenlerde oluşturduğu girdap akımlarından kaynaklanan girdap akım kayıpları olarak incelenmektedir. Bakır kayıplarının transformatör gücüne göre değişim grafiği ise Şekil 1.7'de verilmektedir.



Şekil 1.7. Transformatör gücüne göre bakır kayıpları grafiği (Çelebi, 2009)

Faz başına düşen bakır kayıpları aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$P_{cu1} = I_1^2 R_1 \text{ (Watt)} \quad (1.10)$$

$$P_{cu2} = I_2^2 R_2 \text{ (Watt)} \quad (1.11)$$

$$P_{cu} = P_{cu1} + P_{cu2} \text{ (Watt)} \quad (1.12)$$

Burada I_1 ve I_2 birincil ve ikincil sargıdan geçen akımları, R_1 ve R_2 ise birincil ve ikincil sargılardaki direnç değerlerini ifade etmektedir. Transformatörlerde işletme sırasında yükün artmasıyla birlikte kayıpların artması ısınmada artışına neden olur. Ayrıca sabit bir yük altında belirli bir süre transformatörün çalışması sonucu sıcaklığın arttığı ve güce göre değişen sürelerde sabitlendiği deneysel olarak belirlenmiştir (Boduroğlu, 1982).

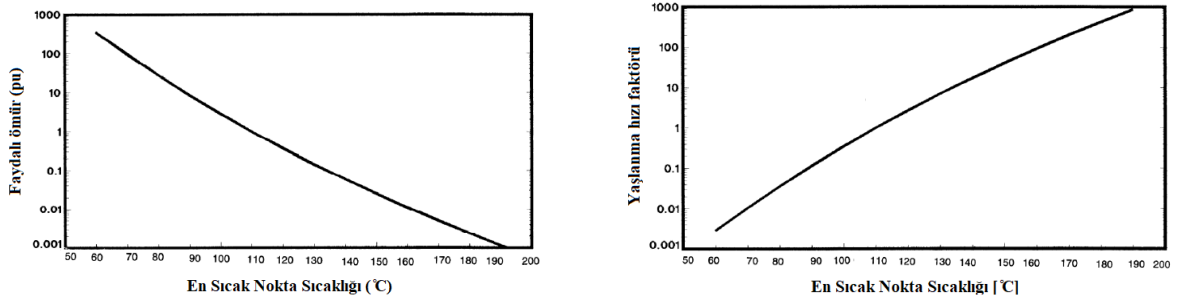
Transformatörlerin güç yoğunluklarına göre kayıpları artmaktadır. Buna göre transformatörlerin çalışma esnasındaki sıcaklık değerleri de artmaktadır. Bu sıcaklık artışlarına göre standartlarla belirlenen ve transformatörlerin tasarımında yalıtkan olarak kullanılan yalıtım malzemeleri de değişiklik göstermektedir. Bu yalıtım malzemelerinin sınıflandırılması Tablo 1.1'de verilmektedir.

Tablo 1.1. IEC 60085 standardına göre elektrik cihazlarının sıcaklık ve yalıtım sınırları

Yalıtkan sınıfı	Yalıtkan madde	İşlem	İzin verilen en büyük sıcaklık sınırları
Y	Kuru Kağıt ,pamuk,ipek vb.	-	90 °C
A	Organik maddeler; pamuk, ipek, kağıt gibi lifli maddeler	Yalıtkan madde emdirilmiş	105 °C
E	Sıcaklığa dayanıklı polivinil asetat, poliüretan, epoksit bazında tel lakları, kağıt, dokunma malzemeleri.	Yalıtkan madde emdirilmiş	120 °C
B	Anorganik maddeler; Mika, asbest fiberleri, cam elyafı malz.	Yalıtkan madde emdirilmiş	130 °C
F		Organik suni maddeler karıştırılmış silikon ile emdirilmiş	155 °C
H		Saf silikon ile emdirilmiş	180 °C
C	Mika, asbest, seramik vb. kompozit malzemeler	Organik suni maddeler karıştırılmış silikon ile emdirilmiş	200 °C 220 °C 250 °C

Tablo 1.1’de transformatörlerde yalıtım malzemesi olarak kullanılan yağ emdirilmiş kağıt malzemelerin sıcaklık sınırlarının da 105 °C -120 °C arasında olduğu incelenmektedir.

Transformatörlerdeki faydalı ömür için standartlaştırılmış değerlerin yer aldığı IEEE C57.91-1995 standardına göre transformatörün yalıtım ömrü ve ısıya göre deforme hızları Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 1.8. IEEE C57.91-1995 standardına göre transformatörün yalıtım ömrü ve ısıya göre deforme hızı: (a) Faydalı Ömrün En Sıcak Nokta Sıcaklığı ile değişimi. (b) Yaşlanma hızının en sıcak nokta sıcaklığı ile değişimi

IEEE Std C57.91-1995 standardında, Tablo 1.1'de sıcaklık değerlerine göre yaşlanma ivme faktörleri verilmektedir. Bu yaşlanma ivme faktörleri standardın içerisindeki Denklem 1.13'te verilen formül ile transformatörün normal izolasyonunun kullanım ömrü hesaplanmaktadır.

$$\text{Birim İzolasyon Ömrü} = A \exp\left[\frac{B}{\theta_H + 273}\right] \quad (1.13)$$

Burada, θ_H (°C) sargılardaki en sıcak nokta sıcaklığı, A ve B sabit sayılardır. Bu formül göz önüne alınarak ve genellikle toplam zaman periyodu olarak da 24 saat alınarak transformatörlerin yalıtımlarının kullanım şartlarına göre faydalı ömürlerindeki yüzdelik kayıp Denklem 1.14 ile elde edilmektedir.

$$\% \text{ Faydalı Ömür Kaybı} = \frac{F_{EQA} \times t \times 100}{\text{Normal İzolasyon Ömrü}} \quad (1.14)$$

Bu ifadede, F_{EQA} toplam çalışma periyodundaki ortalama yaşlanma faktörü, t ise (saat) zamandır. Bu ifadeler kullanılarak oluşturulan 110 °C referans sıcaklığında iyi kurutulmuş, oksijensiz ve 65 °C ortalama sargı sıcaklığındaki bir transformatörün yalıtım ömrü 180.000 saat olarak hesaplanmıştır.

Aynı standartta yer alan değerlere göre ise 110 °C referans sıcaklığında ömrü hesaplanan izolasyon malzemesinin farklı sıcaklarda tahmini faydalı ömründeki % kayıp değerleri verilmiştir. Burada da 110 °C 'deki bir izolasyon malzemesinin 24 saat çalışma periyodundaki faydalı ömründen kaybı % 0.0133 olduğu hesaplanmıştır. Tablolarla elde edilen bu verilere göre, yapılan ön çalışmada elde edilen transformatör izolasyon faydalı ömründeki % 0.0133 değerine ulaşım süreleri Tablo 1.2'de verilmektedir.

Tablo 1.2. Transformatör izolasyon faydalı ömründeki % 0.0133 değerine ulaşım süreleri

En sıcak Nokta sıcaklığı	Yaşlanma İvme Faktörü	% 0.0133 lük Kayba Ulaşılan Zaman (Saat)	Transformatörün Sıcaklık Ölçülen Noktası
129	6,366	3,77	Hava Soğutmalı Nüve
137	13,1856	2,04	Hava Soğutmalı Sargı
97,1	0,2526	95,01	Termoelektrik Soğutmalı Nüve
119	2,4576	9,76	Termoelektrik Soğutmalı Sargı

Tablo 1.2'ye göre bir transformatörün nüvesinde 129 °C de faydalı ömründen % 0.0133 'ünü kaybetmesi için 3,77 saat çalışması yeterli iken bu zaman değeri sargı için 2,04 saattir. Ancak termoelektrik soğutucu kullanılarak soğutulan transformatörün nüvesinde %0.0133 'ünü kaybetmesi için 95,01 saat çalışması gerekmekte bu değer sargısında ise 9,76 saat olmaktadır. Bu değerlere göz önünde bulundurulduğunda termoelektrik soğutucular ile

soğuyan transformatörün yalıtım malzemesi hava ile soğuyan transformatör yalıtım malzemesine göre standartlardaki kıstasların sargı sıcaklıklarına göre olması dolayısıyla ortalama 7 saat daha fazla çalışacak bir kullanım süresine sahip olabilmektedir. Bu kazanımdan yola çıkılarak yapılacak proje ile elektrik enerjisinin dağıtım aşamasında kullanım oranı güç transformatörlerine göre fazla olan yağlı tip dağıtım transformatörü (YDT) için kullanım ömürleri de bu ön çalışma verilerinden elde edilen değerlerle ele alındığında %15-20 daha fazla kullanım ömürlü transformatörler için bir soğutma sistemi oluşturulması amaçlanmıştır.

1.2 Transformatörlerin sınıflandırılması ve yağlı tip transformatörler

Dağıtım transformatörlerinin gücü 400 kVA'nın altında ise transformatör direk üzerine, 400 kVA'nın üzerinde ise kabin (trafo binası ya da köşk) içerisine konurlar. Bu transformatörler Tablo 1.3'te verilen sınıflandırma çeşitlerine göre sınıflandırılabilirler. Soğutma şekline göre de soğutulmalarında kullanılan malzemelerden dolayı yağlı tip ve kuru tip dağıtım transformatörleri olarak da ayrılırlar.

Sargı Durumuna Göre Transformatörler	<ul style="list-style-type: none"> • Yalıtılmış sargılı • Oto Transformatörler
Soğutma Şekline Göre Transformatörler	<ul style="list-style-type: none"> • Yağlı Tip Transformatörler • Kuru Tip Transformatörler
Manyetik Nüvenin Tipine Göre Transformatörler	<ul style="list-style-type: none"> • Çekirdek tipi nüveli • Dağıtılmış tip nüveli • Mantel tip nüveli
Faz Sayısına Göre Transformatörler	<ul style="list-style-type: none"> • Primer ve sekonder akımı aynı sayıda faza sahip olanlar • Primer ve sekonder akımı farklı sayıda faza sahip olanlar
Kuruluş Yerine Göre Transformatörler	<ul style="list-style-type: none"> • Dahili tip transformatörler • Harici tip transformatörler
Sargı Tiplerine Göre Transformatörler	<ul style="list-style-type: none"> • Silindirik sargılı • Dilimli sargılı • Basit bobin sargılı
Çalışma Prensibine Göre Transformatörler	<ul style="list-style-type: none"> • Sabit akımlı transformatörler • Sabit gerilimli transformatörler • Hava ile soğutmalı transformatörler
Soğutucu Tipine Göre Transformatörler	<ul style="list-style-type: none"> • Yağ ile soğutmalı • Su ile soğutmalı • Gaz ile soğutmalı
Kullanış Amacına Göre Transformatörler	<ul style="list-style-type: none"> • Güç Transformatörleri • Ölçü transformatörleri • Özel Transformatörler

Şekil 1.9. Transformatörlerin sınıflandırılması

Dağıtım transformatörlerinin yoğun kullanıma sahip soğutulma tipine göre çeşidi yağlı tip dağıtım transformatörleridir. Bu transformatörler bakım-onarım maliyetlerinin fazlalığı, çevresel kirlilik oluşturması (yağ atığı nedeniyle) ve patlama riski (yağ kaynaklı) gibi dezavantajlar içermelerine rağmen maliyetlerinin muadil türe (kuru tip dağıtım transformatörleri) göre az olması dolayısıyla daha çok tercih edilmektedir. Şekil 1.10'da verilen yağlı tip bir transformatörün soğutulması hem hava hem de yağ ile farklı şekillerde sağlanmaktadır.



Şekil 1.10. Yağlı tip dağıtım transformatörünün genel görünümü

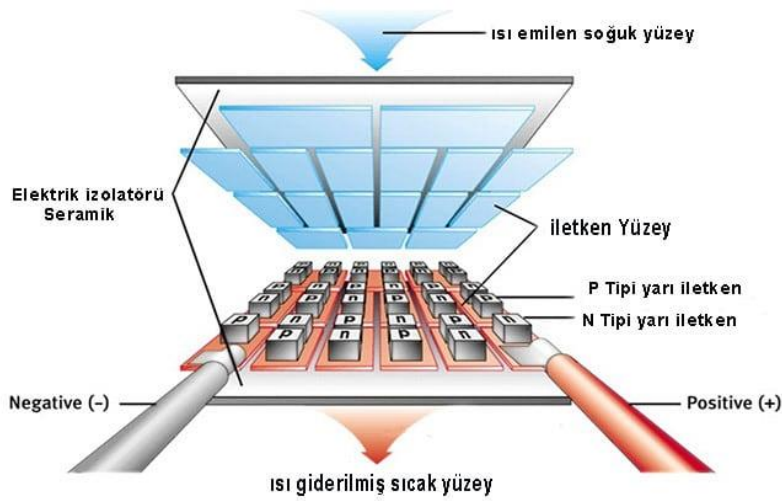
Bu soğutma şekilleri, IEEE C57.91-1995 ve IEC 60354 standartlarına göre aşağıda sıralanmaktadır (Kaymaz vd, 2015):

- 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 YDT'nin soğutma türlerine ek olarak yenilenebilir enerji teknolojisinde yerini alan termoelektrik soğutucularla da tasarlanabilecek soğutma sistemi transformatörün soğutulmasında etkili olabilecektir.

1.3 Termoelektrik Soğutucular (TEC)

Termoelektrik üreteçler, sıcaklık farkından kaynaklı olarak karşılıklı iki yüzey arasında doğru akım (DA) enerjisi üretebilen yapılardır. İç yapısı Şekil 1.11 'de görülen bu üreteçler, termoelektrik üretece uygulanan doğru akım enerjisi sayesinde, üretken kısmında sıcaklık farkı oluşturarak, ısıtma veya soğutma yapabilmektedir.



Şekil 1.11. Termoelektrik üreteç iç yapısı

Isı ve elektrik enerjisinin birbirine dönüşümünü sağlayan termoelektrik üreteçlerde iki farklı etki bulunmaktadır. Bunlar Seebeck ve Peltier etkisi olarak adlandırılmaktadır. Bu etkilerin ikisi de projede yağlı tip transformatörün soğutulmasında kullanılacaktır.

Seebeck etkisi, sıcaklık farklarının, bir potansiyel fark oluşturmasıyla doğrudan elektrik enerjisine dönüşümüdür. Termoelektrik soğutuculardaki verimin hesaplandığı Seebeck metodu Alman fizikçi Thomas Johann Seebeck tarafından bulunmuştur. Seebeck 1821 yılında, farklı metallere yapılmış iki iletkenin uçları birleştirilerek oluşturulan ve termokupl olarak adlandırılan kapalı bir termoelektrik devrede; iletkenler arası sıcaklık farkıyla doğru orantılı bir gerilim meydana geldiğini bulmuştur. Bu durum Denklem 1.15'te ifade edilmiştir.

$$V = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT \quad (1.15)$$

Burada S_A ve S_B , A ve B metallerinin sıcaklık fonksiyonuna bağlı ısı güçleri (Seebeck katsayıları); T_1 ve T_2 ise iki birleşme noktasının sıcaklıklarını göstermektedir. Genel tanımlamada ise Seebeck katsayısı her malzeme için özel bir değer alır. Seebeck katsayısı:

$$\alpha = \frac{dV}{dT} \quad (1.16)$$

Burada V malzeme içi gerilim, T ise zamandır. Malzemede bir termoelektrik etki oluşturabilmek için Seebeck katsayısının mümkün olduğunca büyük olması istenir.

Peltier etkisi ise, Seebeck etkisinin tersi şekilde bu sefer termoelektrik üreteçlere elektrik akımı uyguladığında, üreteçlerin bir tarafının ısınması diğer tarafının ise soğumasıdır. Hangi yüzeyin ısınıp soğuyacağı ise elektrik akımının yönüyle ayarlanabilmektedir. Peltier katsayısı ise uygulanan akımda ne kadar ısıtma ya da soğutma elde edildiğinin bir ölçüsüdür. Akım uygulandığında bir bağlantıdan diğer bağlantıya elektronlar transfer edilecek ve bu elektronlar sahip oldukları enerjiyi bir bağlantıdan diğerine taşımış olacaklar elektronların ayrıldığı bağlantı soğuyacak ve elektronların gittiği bağlantı ise ısınacaktır. Peltier katsayısı:

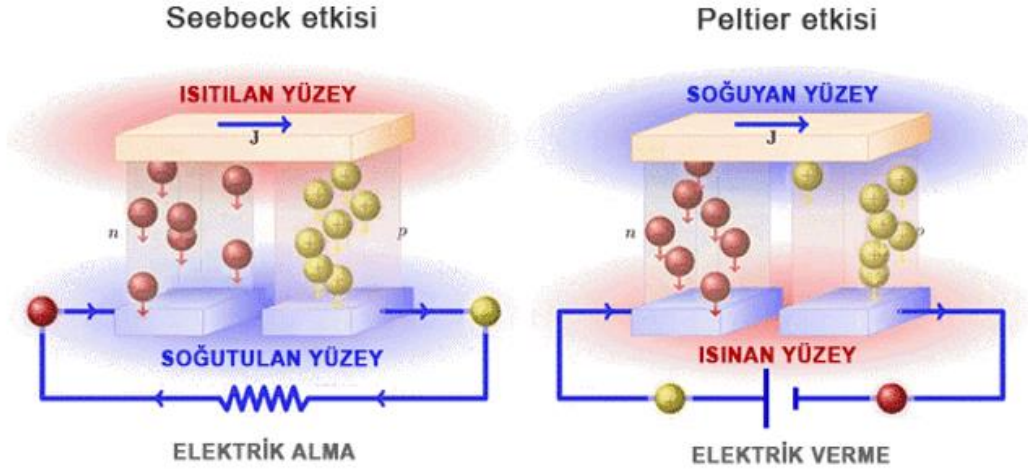
$$\pi_{AB} = \frac{q}{I} \quad (1.17)$$

Burada q ısınma ya da soğuma hızı, I ise akımdır. Peltier etkisinin kullanıldığı sistemlerde soğutma sağlanması için peltier katsayısının da yüksek olması beklenmektedir. Peltier soğutmada etkili olan diğer etkenler olan ısı iletimi ve joule ısıtması etkisi ile sistemlerde genel soğutma gücü şu şekilde ifade edilir.

$$q = (\alpha_p - \alpha_n)IT_1 - \frac{(T_2 - T_1)}{(K_p - K_n)} - \frac{I^2 (R_p + R_n)}{2} \quad (1.18)$$

Burada K_p ve K_n yarı iletkenlerin ısı iletme kapasitesini R_p ve R_n ise elektriksel dirençlerini ifade eder.

Termoelektrik üreteçlerdeki bu etkilerin gösterimi Şekil1.12 'de görüldüğü gibidir. Burada Seebeck etkisi ile elektrik enerjisi üretimi sağlandığı, Peltier etki ile ise elektrik enerjisi ile soğutma yapıldığı görülmektedir.



Şekil 1.12. Termoelektrik üreteç kullanım tipleri

Peltier soğutucular için dikkate alınan bir diğer önemli özellik ise soğutucunun performans katsayısı (COP) değeridir. COP soğutma gücünün elektrik tüketimine oranıdır.

$$COP = \frac{q}{W} \quad (1.19)$$

Burada W elektrik tüketimidir. COP'un maksimum olduğu değer, o malzeme ile elde edilecek maksimum soğutma anlamına gelir.

YTT'deki soğutmanın daha yenilenebilir bir tasarım ile sağlanması, bakım-onarım ve çevresel kirlilik gibi dezavantajların ortadan kaldırılması maliyetin de azalmanın yanı sıra kullanım (faydalı) ömrüne de katkı sağlayacaktır.

Bunun sağlanması içinde transformatörün ısınmasının azaltılması için kullanılan soğutma malzemesi olan yağ yerine daha yenilenebilir bir teknoloji olan termoelektrik üreteçlerle soğutulması, yoğun kullanıma sahip YTT'lerin çevre kirliliği, patlama riski gibi çevresel tehlikelerinin azaltılıp, bakım-onarım maliyetlerinin ve kullanım (faydalı) ömrün artmasına bağlı işletme maliyetlerinin de azalmasını sağlayabilecektir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu projenin konusu üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde; transformatörlerin sınıflandırılmalarının çok geniş bir çerçevede ele alındığı, sınıflamada da transformatörler soğutulma şekline göre, kuru tip transformatörler (hava ile soğutulan) ve yağlı tip transformatörler (yağ ile soğutulan) olarak iki ana başlığa ayrıldıkları belirlenmiştir. Sonraki dönemlerde ise transformatörlerin soğutulma türünde farklı yöntemlerin de (SF6 gazlı soğutma, su ile soğutma vb.) kullanıldığı görülmüştür. Kuru tip transformatörlerin soğutulmaları doğal ve zorlanmış olarak iki şekilde yapılırken, yağlı tip transformatörlerde ise transformatörler bir yağ tankı içerisine yerleştirilerek transformatör soğutma yağı ile soğutma işlemi gerçekleştirilmektedir (Sun vd., 2020; Tören ve Çelebi, 2016; Yaman vd., 2019).

Transformatörlerdeki soğutma sistemleri transformatörün gücüne ve kullanıldığı yere göre değişiklik gösterecek şekilde sınıflandırılmıştır (Tören, 2018). Ancak yapılan sınıflamalar ve soğutmada kullanılan malzemeler ile sadece geleneksel malzemeler üzerinden sonuçlar elde edilmiştir. Gelişen teknolojik verilere dayalı bir soğutma sınıflaması ve soğutma malzemesi, standardı oluşturulamamıştır. Bu elektrik makinelerinin, soğutulması ve dolayısıyla faydalı ömürlerindeki değişim için yapılan çalışmalarda, transformatörlerin ömür kaybı analizi yapılarak, kullanım ömürlerinin uzun olabilmesi için en sıcak noktalar belirlenerek bu sıcaklık değerlerinin faydalı ömürdeki yüzdelik kayıpları ve kullanım (faydalı) ömrünün değerlendirilmesi yapılmıştır (Rahimpour vd., 2007; Swift vd., 1996; Zhou vd., 2016). Transformatörlerdeki kullanım ömrünün uzun olması işletme maliyeti açısından önem taşımaktadır. Nitekim yapılan bu çalışmalarda endüstride en çok kullanılan izolasyon malzemesine göre 110°C de YTT faydalı ömrü 180.000 saat hesaplanmıştır. Buna göre de 1 saatte transformatörün ömrü % 0,0136 azalmaktadır. Çalıştığı sıcaklık değeri artan transformatörün ömründeki azalma % 0,0136'dan daha da büyük olabilmektedir. Bu sayısal değerlere bakılarak sıcaklığın transformatör faydalı ömrünü nasıl etkilediği incelenebilmektedir. Bu yönüyle bu çalışma yağlı tip transformatör mevcut izolasyon malzemesi ile daha iyi soğutulması üzerine yapılmaktadır.

Yağlı tip transformatörlerde sıcaklığa bağlı olarak bozulan izolasyon malzemesi, kullanım ömrüne doğrudan etki edeceği için bu transformatörlerde kullanılan iletken türüne göre en üst nokta sıcaklığı tespiti için termal kapasitans hesaplama denklem modeli oluşturulan bir çalışma ile transformatör en sıcak nokta sıcaklığı belirlenmeye çalışılmıştır (Mamizadeh ve İskender, 2010).

Yağlı tip soğutmanın olduğu güç transformatörlerinde IEC (International Electrotechnical Commission-Uluslararası Elektroteknik Komisyonu) ve IEEE (The Institute of Electrical and

Electronics Engineers-Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü) standartlarına göre önerilen tahmin yöntemlerinin eksik kaldığı yönler giderildiğinde, bu yöntemleri kullanarak geliştirilebilecek olan cihazlar sayesinde, transformatörlerin yüklenme kapasitelerine göre üst yağ ve sıcak nokta sıcaklık değerlerinin önceden tahmin edilebilmesinin mümkün olabileceğini gösteren farklı bir yaklaşımda incelenmiştir (Azizian vd., 2010; Haliloğlu vd., 2017).

Son yıllarda yapılan çalışmalarda ise, transformatör soğutma radyatörlerinde akışkan ve ısı transferinin farklı yağ tipleri kullanılarak incelenmesi yapılmış, en az basınç kaybı ve en yüksek ısı akısına sahip olmasına karşın, çevreye olan zararlı etkilerinden dolayı; mineral yağlara alternatif olarak ester bazlı yağların kullanımının uygunluğu değerlendirilmiştir [Kaymaz vd., 2015; Rouabeh vd. 2019; Dombek vd., 2017; Garelli vd., 2021; Rao vd., 2018; Hasan vd., 2020).

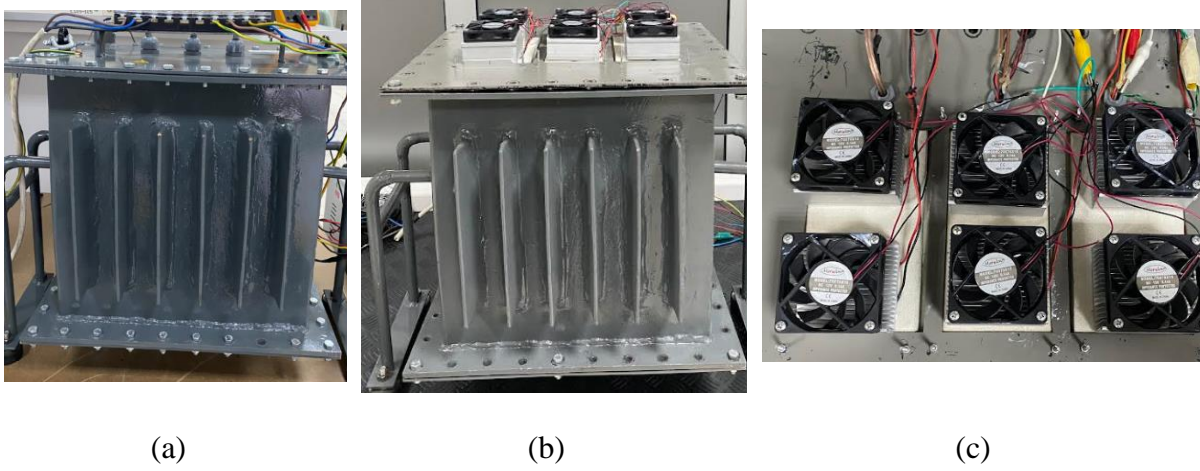
Bu çalışmada kullanılacak olan termoelektrik üreteçlerle yapılan çalışmalarında ise, Soğuk Zincir Kutularında Peltier ile Soğutma Tasarımı ve Analizi yapmış ve profesyonel olarak kullanılan ilaç veya organ taşıma kutularında soğutucu olarak peltier modüllerin etkili olduğu belirlenmiştir (Çakmaz, 2019). Farklı bir çalışmada ise peltier modülü kullanılarak araç içi havanın soğutulması sağlanmaya çalışılmıştır. Termoelektrik soğutma sistemi kullanılarak bir ortamın sıcaklığını düşürülebilmesi için yapılan çalışmada ortam sıcaklığının 9 °C düşürülmesi sağlanmıştır (Şimşek, 2015). Aynı şekilde tıbbi soğutucularda kullanılan termoelektrik modülün parametrelerinin elde edilmesi için yeni bir yöntem kullanılmıştır (Ahıska vd., 2009). Sağlık alanında Arcus Aourt adı verilen ameliyatlarda, beyin sağlığını koruyabilmek adına, beynin dışarıdan soğutulmasını sağlamak için termoelektrik beyin soğutucu üzerinde durulan bir tez çalışması dahi yapılmıştır (Yavuz, 2009).

Termoelektrik üreteçlerin elektrik makinelerinde kullanıldığı çalışmalara bakıldığında ise, termoelektrik üreticinin peltier etkisi kullanılarak transformatör nüve ve sargıları arasında mikro denetleyici tabanlı başarılı bir soğutma gerçekleştirilmiştir (Dalcalı vd., 2016). Farklı bir çalışmada da yağlı tip güç transformatörlerinin soğutma tankının içerisine yerleştirilen termoelektrik üretece soğutucu özelliğe sahip boru kanallarıyla termoelektrik peltier etkisi ile ek bir soğutma yapılmıştır (Dmitriev vd., 2017). Termoelektrik üreticinin Seebeck etkisinden faydalanılan başka bir çalışmada ise, güç transformatörünün bir yüzeyinden termoelektrik üreteç sayesinde DA enerjisi üretilip, kullanılması amaçlanmıştır (Olekshii vd., 2014).

3. GEREÇ VE YÖNTEM

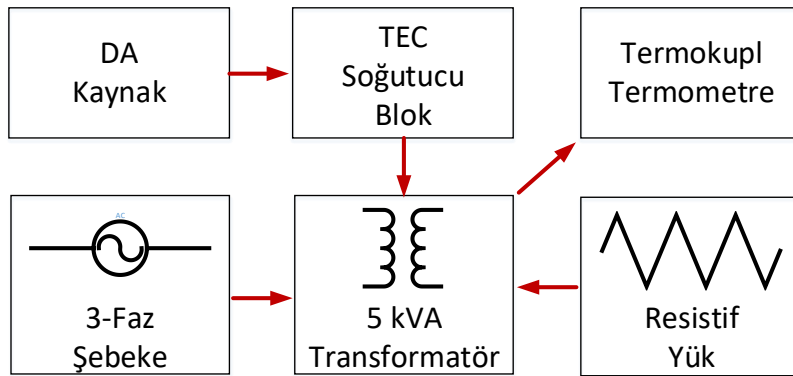
Bu projede yağlı tip dağıtım transformatörünün soğutulması için, alternatif bir yöntem olarak termoelektrik soğutucular kullanılarak, deneysel ölçümler elde edilecektir. Bu çalışmada elde edilen deneysel veriler yapılan ön çalışma verileri ile karşılaştırılarak doğrulukları değerlendirilecektir.

Çalışmada 5 kVA gücünde yağlı tip bir dağıtım transformatörünün (YTT) prototipi Şekil 3.1'de görüldüğü gibi imal edilmektedir. Projedeki bu YTT, IEC ve IEEE standartlarına uygun olarak üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1 Projede Kullanılan 5 kVA YTT Prototipi: (a) Yağ ile soğutma, (b) TEC ile soğutma, (c) TEC soğutma blokları

Şekil 3.1 'de görüldüğü gibi tasarlanıp üretilen YTT'nin Şekil 3.2'de görülen blok şemaya göre deney düzeneği kurulumu yapılmaktadır. Burada blok şemada kullanılan güç kaynağından YTT'nin çalışacağı nominal akım ve üç faz şebeke gerilimi sağlanmıştır.



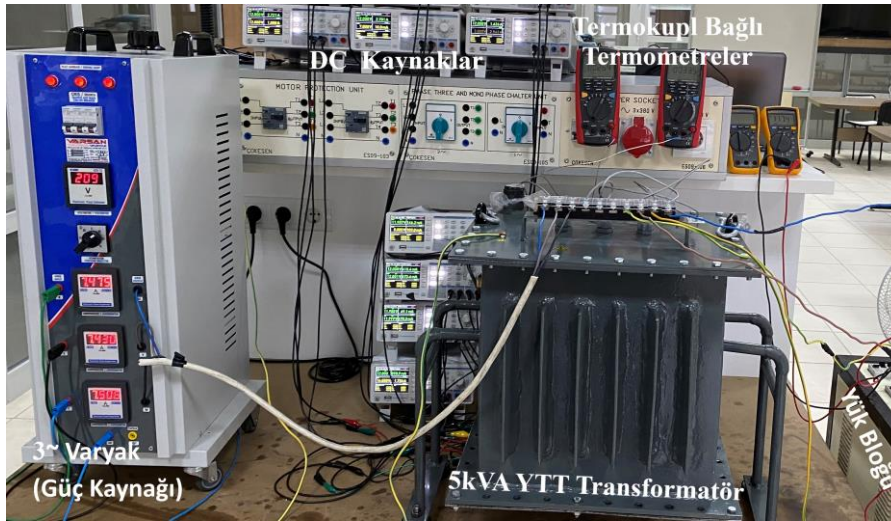
Şekil 3.2. Deney Düzeneği Blok Şeması

Deney düzeneğindeki 5 kVA gücündeki, özgün YTT teknik özellikleri Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1. 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

Deneyisel çalışmada ilk olarak YTT 'nin standart transformatör yağı olan naftanik yağ ve ester bazlı yağ ile soğutulması çalışması yapılmıştır. Bu çalışmanın blok şemaya göre oluşturulan ve ölçümlerin elde edildiği deney düzeneği Şekil 3.3'te verilmektedir.



Şekil 3.3. YTT'nin yağ ile soğutulması deney düzeneği

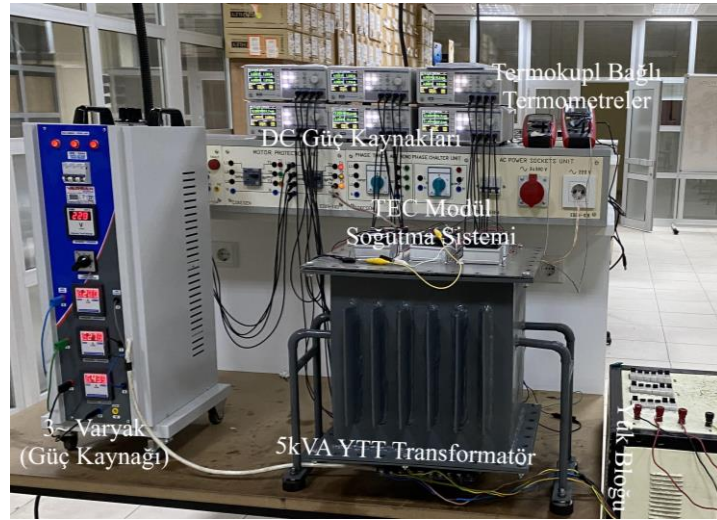
Bu durumda elde edilen değerler hem termal kamera hem de termokupllar vasıtasıyla elde edilmiş ve lazer termometre ile de deney düzeneğindeki sıcaklık değerleri doğrulanmıştır. Deneyisel çalışmanın ilki olan naftanik yağ (klasik trafo yağı) ve ester bazlı yağların özellikleri Tablo 3.2'de verilmektedir.

Tablo 3.2. Çalışmada kullanılan yağların özellikleri (Shell, 2022 ve Speedol, 2022)

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

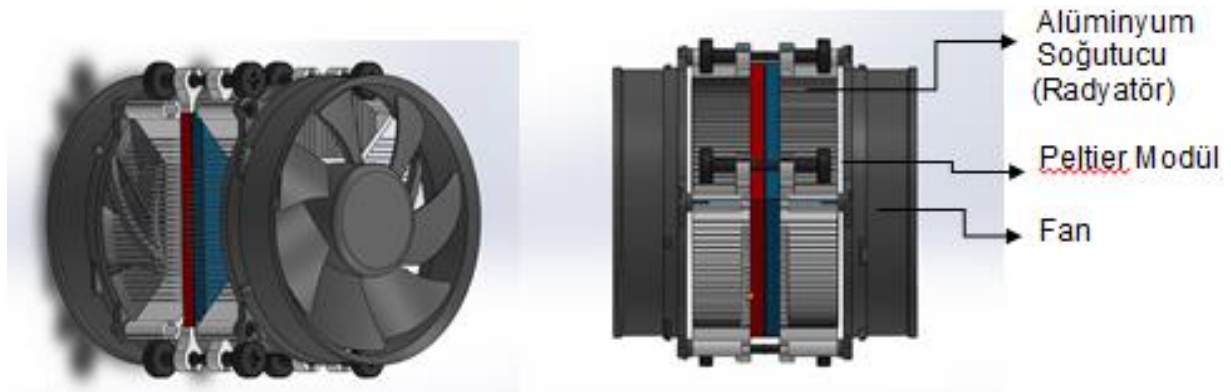
Bozulma Gerilimi-İşlem Öncesi, Kv	IEC 60156	Min. 30	Min. 70
Bozulma Gerilimi-İşlem Sonrası, Kv	IEC 60156	Min. 70	Min. 78
Çamur, Wt% - @ 120°C, 164 Sa	IEC 61125	Max. 0,8	Max. 0,001
Ddf/90°C - @ 120°C, 164 Sa	IEC 61125	Max. 0,5	Max. 0,5
Alevlenme Noktası, Pm, °C	ISO 2719	Min. 135	Min. 191

Deney çalışmasında son aşamada ise Şekil 3.4'te verilen deney düzeneği oluşturulmuş ve ölçümler elde edilmiştir.



Şekil 3.4. YTT'nin TEC modül ile soğutulması deney düzeneği

Bu deney düzeneğindeki termoelektrik soğutucu modüller, Peltier etkisi ile soğutma etkileri kullanılarak tasarlanan Şekil 3.5'te görülen soğutucu bloklar ile bir soğutma sistemi oluşturulacaktır. Bu soğutma bloklarında termoelektrik soğutucu modüllerin TEC1-12706 tipi peltier modülleri kullanılmaktadır.



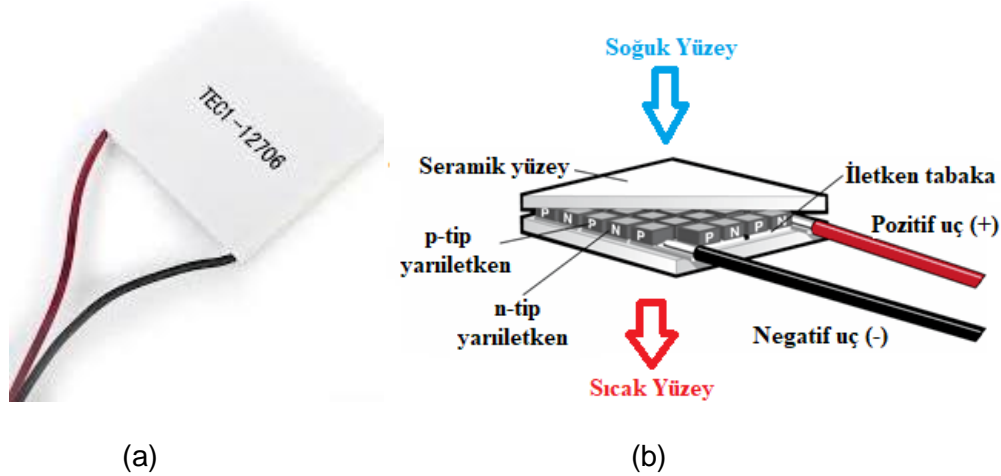
Şekil 3.5. Soğutucu bloğun genel görünümü

Bu soğutucu bloklarda kullanılan TEC1-12706 Peltier modüllerin teknik özellikleri ise Tablo 3 de verilmektedir.

Tablo 3.3. TEC1-12706 Peltier teknik özellikleri

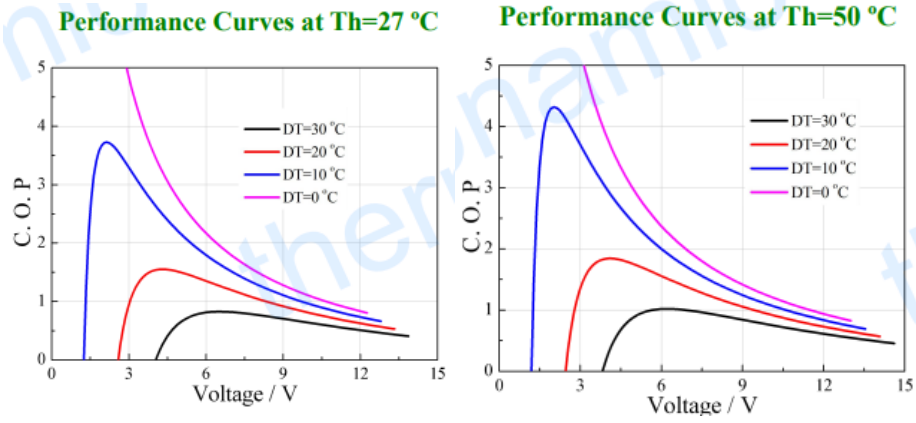
Parametre	Değer	
Sıcak Yüzey Sıcaklığı. (°C)	27	50
Q_{max} (Watt)	61.4	66.7
ΔT_{max} (°C)	70	79
I_{max} (A)	6.1	6.1
V_{max} (V)	16	17.2
Resistance (Ω)	2	2.2
Tolerans	±10	

Bu TEC1-12706 peltier modüllerin görünüşü ve soğutucu özellik sağlayan iç yapıları Şekil 3.6'da verildiği gibidir.



Şekil 3.6. TEC1-12706 Modül Görünüşü (a) ve Termoelektrik soğutucu iç yapısı (b)

TEC 1-12706 termoelektrik soğutucu modüllerin performansını belirlemek için kullanılan bazı büyüklükler vardır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı Denklem 1.19'da verilen COP değeridir. Bu değer, önemli bir karşılaştırma büyüklüğü olup, soğutma gücünün elektrik tüketimine oranı olarak ifade edilmektedir. COP değeri ne kadar fazla olursa, soğutma o kadar artacaktır (Koh vd, 2014). Buna göre TEC1-12706 termoelektrik soğutucu modüllerin soğutmada kullanımları esnada hangi gerilim aralığında daha iyi performans verdikleri Şekil 3.7'de verilen COP grafiği ile belirlenebilmektedir. Proje çalışmasında ortam sıcaklık değerleri 0 °C – 30 °C aralığında olmasından dolayı bu sıcaklık aralığındaki TEC1-12706 COP grafikleri incelenmektedir.



Şekil 3.7. TEC1-12706 COP grafiği (Sıcaklık farkı: 0-30 °C)

Deneyisel çalışmamızda elde edilecek sıcaklık değerleri YTT içerisine yerleştirilen termokupllardan elde edilecektir. Ayrıca bu değerlere paralel dış yüzey sıcaklık değerleri termal kamera ile de ölçülecektir. Ölçümlerin alınacağı termal kamera özellikleri ise Tablo 4 'de verilmektedir.

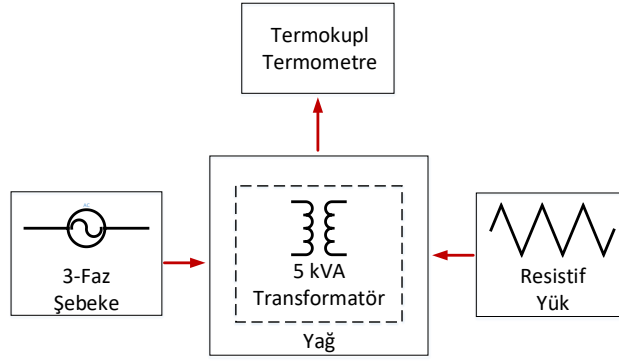
Tablo 3.4. Termal kamera özellikleri

Karakteristik	Özellik
Dedektör Tipi	Soğutmasız mikrobilite
Görüş Alanı (FOV)	45° * 34°
IR Çözünürlüğü	160*120 piksel
Nesne Sıcaklık Aralığı	-20° - 250°
Doğruluk	± 2°

4. BULGULAR

4.1 YTT Soğutma Sistemi Deney Düzenegi

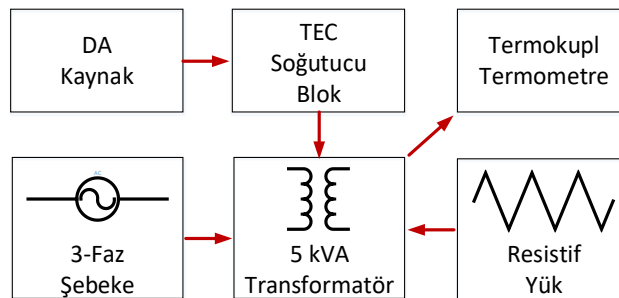
5 kVA gücündeki YTT'nin nominal çalışma koşullarında, soğutulması için farklı yalıtım materyallerine göre hazırlanan blok şeması Şekil 4.1 gösterilmiştir. Deney düzenegi ise Şekil 3.3 te gösterildiği gibi blok şemaya uygun olarak düzenlenmiştir. Deney ortamındaki ortam sıcaklığı, IEEE C57.91-1995 standardı 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.



Şekil 4.1. YTT'nin yağ ile soğutulması Blok şeması

Şekil 4.1. YTT'nin soğutulması için naftanik yağ ve ester bazlı yağın kullanıldığı deney düzeneginin Şekil 3.3 te verildiği blok şemayı göstermektedir. Bu blok şema ile deney düzenegi kullanarak, 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 transformatör kabin gövdesinde ise termal kamera kullanılmıştır.

Şekil 4.2'de verilen blok şemada 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.



Şekil 4.2. YTT'nin TEC ile soğutulması Blok şeması

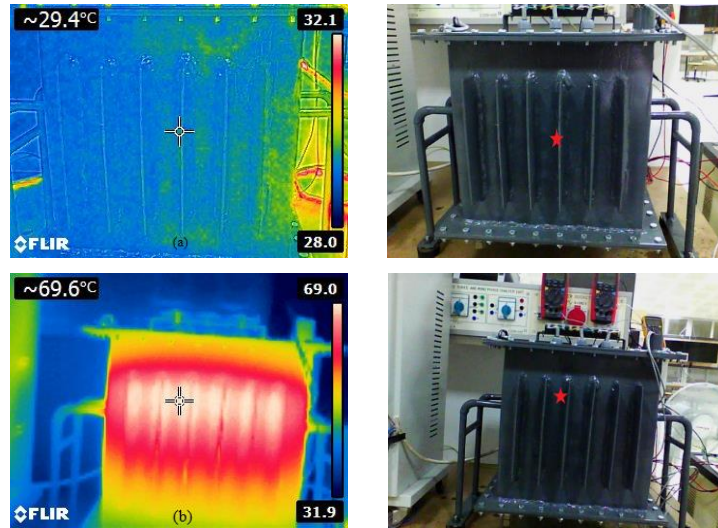
Şekil 4.2 'de blok şeması verilen deneyin düzeneği işe Şekil 3.4 'de verilen deney düzeneği ile gösterilmiştir.

Naftanik yağ ve ester bazlı yağın kullanıldığı deney düzeneğinde olduğu gibi, TEC soğutuculu deney düzeneği 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 4.2'de görüldüğü üzere üst konuma yerleştirilmektedir (Bu soğutma sistemi YTT için ızgaralı mahfaza ile korunacaktır).

4.2 YTT 'nin Naftanik Yağ ile Soğutulması ve Sonuçlar

Şekil 4.1'de verilen deney düzeneği kurularak, YTT 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 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Naftanik yağ soğutmalı YTT kabin gövde sıcaklık termal kamera görüntüleri

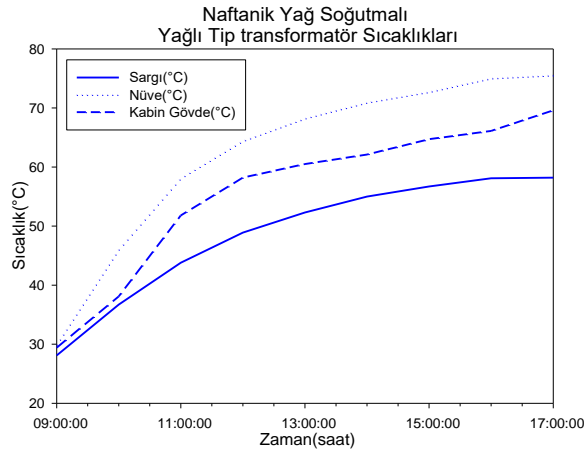
YTT'nin nüve ve sargılarında meydana gelen ısıyı ölçmek için ilgili yerlere termokulp bağlanarak termometre ile ölçümler kaydedilmiş olup, tüm ölçümler Tablo 4.1'de verilmektedir.

Tablo 4.1. Naftanik yağ soğutmalı YTT sıcaklıkları

Naftanik Yağ Soğutmalı Yağlı Tip Transformator		
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 kabin gövdesinde ise 69,6 °C olmaktadır.

YTT'nin naftanik yağ ile soğutulmasıyla, transformatorün sargı, nüve ve kabin gövdesinde ölçülen sıcaklık değerlerinin değişim grafiği Şekil 4.4'te verilmektedir.

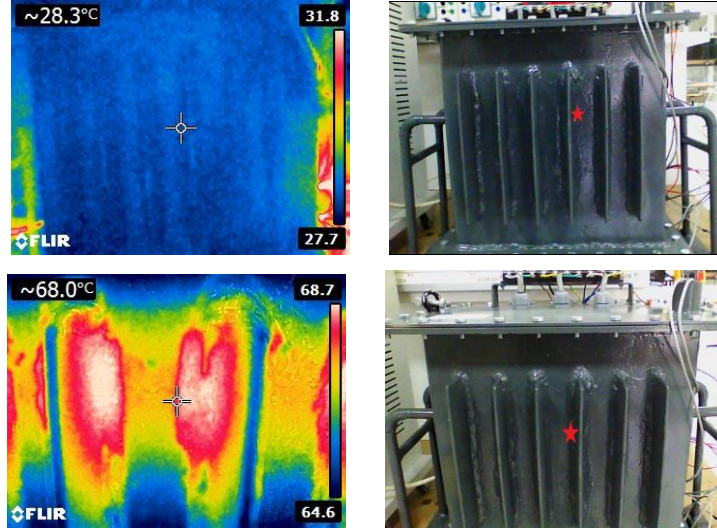


Şekil 4.4. Naftanik yağ soğutmalı YTT sıcaklık değişimleri grafiği

Şekil 4.4. incelendiğinde, nüve sıcaklık değerlerinin sargı ve kabin gövde sıcaklık değerlerine göre daha yüksek sıcaklık değerinde olduğu belirlenmektedir.

4.3 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 transformator yağlarına göre daha iyi performans gösteren yağları kullanarak, karşılaştırma yapmaktır. Şekil 4.5'ta, Ester bazlı yağ kullanılarak soğutulan YTT'nin kabin gövdesinden elde edilen termal kamera görüntüleri verilmektedir. Bu görüntüler transformatorün çalışma süresince alınan ilk sıcaklık değerleri ile en yüksek sıcaklık değerleridir.



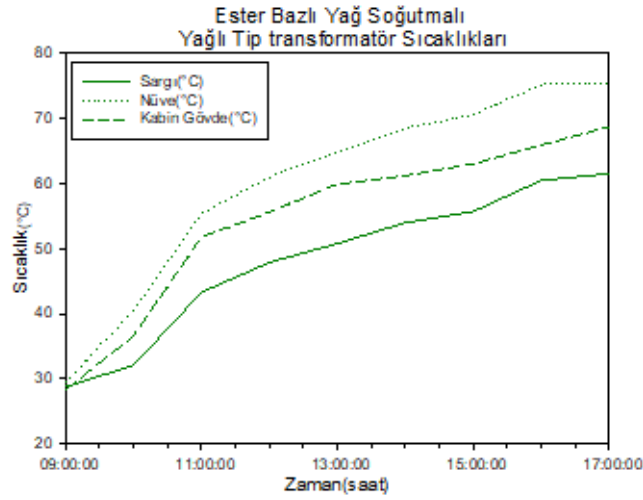
Şekil 4.5. Ester bazlı yağ soğutmalı YTT kabin gövde sıcaklık termal kamera görüntüleri

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 4.2'de verilmektedir.

Tablo 4.2. Ester bazlı yağ soğutmalı YTT sıcaklıkları

Ester Bazlı Yağ Soğutmalı Yağlı Tip Transformatör		
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 4.2. incelendiğinde, elde edilen sonuçların naftanik yağ ile soğutulan transformatöre göre daha düşük sıcaklık değerleri olduğu, dolayısıyla ester bazlı yağın, naftanik yağla göre daha iyi soğutma sağladığı görülmektedir. YTT'nin ester bazlı yağ ile soğutulmasıyla, transformatörün sargı, nüve ve kabin gövdesinde ölçülen sıcaklık değerlerinin değişim grafiği ise Şekil 4.6'da verilmektedir.

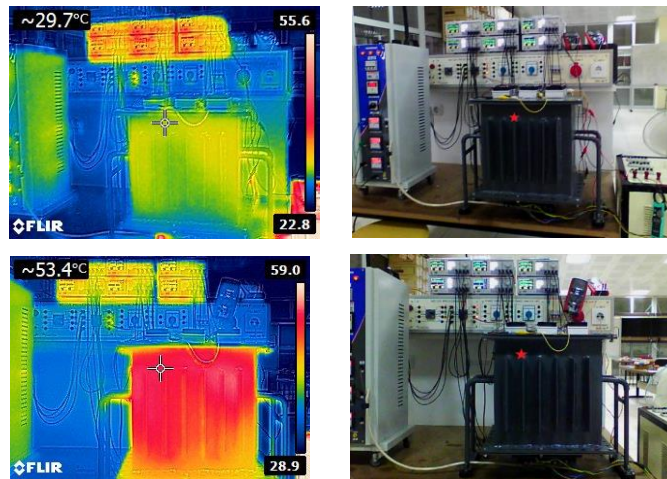


Şekil 4.6. Ester bazlı yağ soğutmalı YTT sıcaklık değişimleri grafiği

4.4 YTT 'nin TEC Modül ile Soğutulması ve Sonuçlar

Yağlı tip transformatörlerin; 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 kullanarak oluşturulan TEC soğutucu blok YTT kabininin üst konumuna yerleştirilmiştir. Böylece daha iyi hava transferi yapılması amaçlanmıştır.

Şekil 4.7'de, TEC soğutucu blok 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.



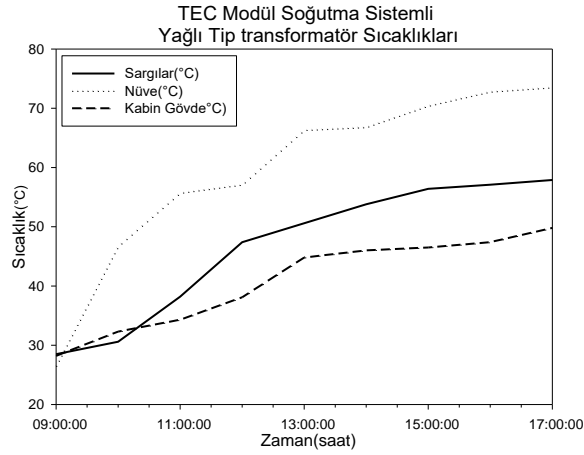
Şekil 4.7. TEC modül soğutmalı YTT kabin gövde sıcaklık termal kamera görüntüleri

Tablo 4.3'te ise, YTT'nin 8 saatlik çalışma süresinde nüve, sargı ve kabin gövdesinde oluşan sıcaklık değerleri verilmektedir.

Tablo 4.3. TEC modül soğutma sistemli YTT sıcaklıkları

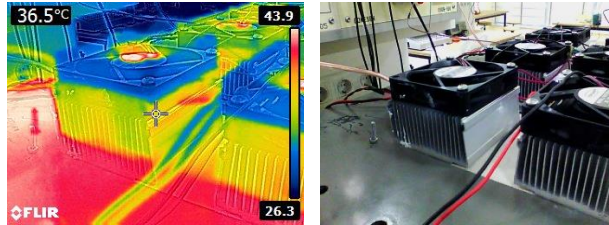
TEC Modül Soğutmalı Yağlı tip Transformatör		
Sargılar (°C)	Nüve (°C)	Kabin Gövde (°C)
28,5	26,5	29,7
30,6	46,7	32,3
38,2	55,7	34,3
47,4	57,1	38,1
50,6	66,3	44,8
53,8	66,8	46
56,4	70,4	46,5
57,1	72,8	47,4
57,9	73,5	53,4

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 transformatöre göre daha düşük sıcaklık değerleri olduğu, dolayısıyla daha iyi soğutma sağlandığı görülmektedir. YTT'nin TEC soğutucu blok ile soğutulmasıyla, transformatörün sargı, nüve ve kabin gövdesinde ölçülen sıcaklık değerlerinin değişim grafiği Şekil 4.8'de verilmektedir.



Şekil 4.8. TEC modül soğutmalı YTT sıcaklık değişimleri grafiği

YTT'nin soğutulmasında kullanılan TEC modüllerin transfer ettikleri ve üzerlerinde ölçülen sıcaklık değeri ise Şekil 4.9 'da görülmektedir.



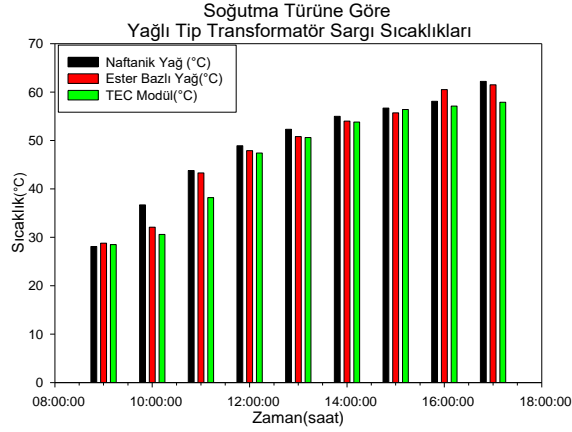
Şekil 4.9. TEC modülün YTT kabin gövde üzerindeki sıcaklık görüntüleri

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

5. TARTIŞMA

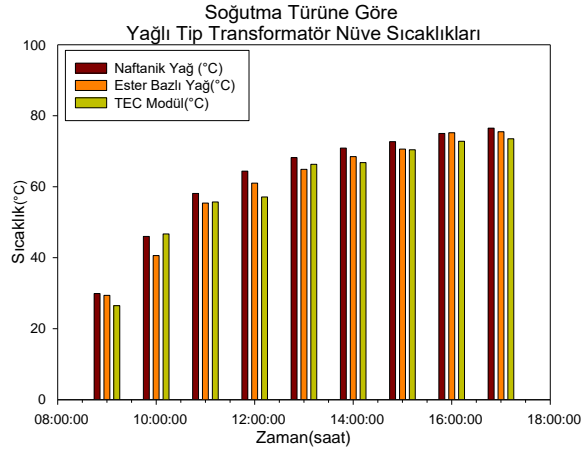
Bu çalışmada, YTT'nin soğutulması için kullanılan naftanik yağ, ester bazlı yağ ve TEC soğutma sistemlerinin transformatör üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bunun için deneysel çalışması gerçekleştirilen soğutma türlerinin, transformatörün sargı, nüve ve kabin gövdesindeki sıcaklık değerleri karşılaştırılmıştır.

Farklı soğutma sistemleri için, YTT'nin 8 saatlik çalışma süresi sonunda, sargılarında ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 5.1'de verilmektedir.



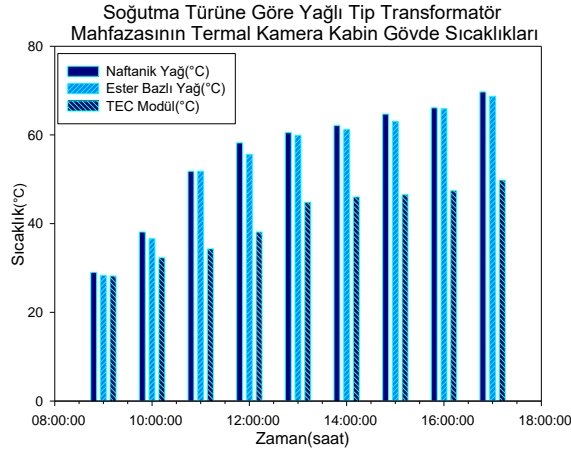
Şekil 5.1. Farklı soğutma sistemleri için YTT sargı sıcaklıkları

Şekil 5.1 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 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. 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 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Farklı soğutma sistemleri için YTT kabin gövde sıcaklıkları

Şekil 5.3'te TEC soğutuculu sistem kullanılarak kabin gövdesinde elde edilen sıcaklık değerlerinin, diğer soğutma türlerine göre % 15-20 oranında daha düşük olduğu, dolayısıyla daha iyi soğutma yaptığı görülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

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 prototip naftanik ve ester bazlı soğutma sistemlerinin yanı sıra termoelektrik soğutucu sistem ile de soğutulmuş, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Termoelektrik soğutuculu 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.

ÖNERİ:

Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda,

- Yağlı tip dağıtım transformatörlerinin soğutma sistemlerinin yağ olmayan termoelektrik soğutucu modüllerle tasarlanan soğutma sistemleri ile soğutulabileceği yeni tasarımlar üretilebilir.
- Yağlı tip transformatör soğutulmasında çevre kirliliği oluşturan yağ etkisinin azaltılabileceği farklı soğutma teknikleri farklı yenilenebilir teknolojik ürünler ve teknolojik farklı materyallerle geliştirilebilir.
- Transformatörlerin soğutulmasında geliştirilen bu yöntemler standartlaştırılarak uluslararası bir kimlik belirlemede geniş bir çalışma yapılabilir.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	MURAT TÖREN
Proje No:	121E010
Proje Başlığı:	Termoelektrik Soğutucuların Yağlı Tip Dağıtım Transformatörlerinin Faydalı Ömürlerine Etkisinin İncelenmesi
Proje Türü:	1002 - Hızlı Destek
Proje Süresi:	10
Araştırmacılar:	HAKKI MOLLAHASANOĞLU
Danışmanlar:	ÖVGÜ CEYDA YELGEL
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	RECEP TAYYİP ERDOĞAN Ü.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/04/2021 - 01/02/2022
Onaylanan Bütçe:	36656.0
Harcanan Bütçe:	36535.4
Öz:	<p>Elektrik enerjisinin iletim ve dağıtım sistemleri içerisinde aktif rol alan transformatörlerin, endüstriyel sahada sayıca fazla kullanım alanına sahip türü, dağıtım transformatörleridir. Bu transformatörler kullandıkları 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, yenilikçi yaklaşımlarla geliştirilen naftanik ya da parafinik trafo yağlarına göre daha iyi özelliklere sahip ester bazlı yağlar, klasik transformatör yağlarının yerine kullanılarak transformatörlerin performansını ve faydalı ömrünü artıran 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.</p>
Abstract:	<p>The type of transformers that take an active role in the transmission and distribution systems of electrical energy is distribution transformers which have a large number of uses in the industrial field. These 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, naphtanic 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 combustion degree and dielectric strength of these oils have been increasing in recent years. In these studies, ester-based oils with better properties than naphtanic or paraffinic transformer oils developed with innovative approaches were used instead of conventional transformer oils, resulting in increased performance and useful life 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 are 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 provided 15-20% better cooling than naphtanic 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.</p>
Anahtar Kelimeler:	Yağlı tip trafo, Ester bazlı yağ, Naftanik Yağ, Termoelektrik soğutma, TEC

Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu
Mu?:

Evet

TÜBİTAK