

GÜC TRANSFORMATORLARIN NASAZLIQLARI VƏ ƏSAS DIAQNOSTİKA ÜSULLARI

^{1,2}T.K. NURUBƏYLİ

1. Azərbaycan Respublikasının Elm və Təhsil Nazirliyi, Fizika İnstitutu,
Azərbaycan, Bakı, Az-1073, H. Cavid pr. 131.

2. Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Azerbaijan, Bakı, AZ-1010, Azadlıq pr. 20.
e-mail: t.nurubeyli@physics.science.az

Bu məqalə transformator yağına əsas diqqət yetirməklə, transformator izolyasiya sistemlərinin vəziyyətini və potensial nasazlıqlarını qiymətləndirmək üçün qabaqcıl diaqnostika üsullarını araşdırır. Tədqiqatın məqsədi temperaturun, elektrik gərginliyinin və dielektrik itki əmsali ($tg\delta$) kimi xüsusi elektrik parametrlərinin köhnəlmə proseslərinin və mümkün deqradasiyanın göstəricisinə təsirinə əsaslanır. Orada, aşağı temperaturda nəm bağlayaraq və daha yüksək temperaturda yükü tutmaqla parçalanma gərginliyini yaxşılaşdırmaqda nanodoldurucuların faydalarından bəhs edilir. Qismi boşalma (PD) ölçmələri, tezlik reaksiya analizi (FRA) və dielektrik tezlik analizi (DTA) kimi üsullar nasazlığın erkən aşkarlanmasında effektivliyi üçün qiymətləndirilir. Tədqiqat həmçinin transformator yağının fazalararası gərginliyinin (IFT) dəqiq qiymətləndirməsi üçün ultra- bənövşəyi spektroskopiyanın və süni neyron şəbəkələrinin (SNŞ) istifadəsini araşdırır. Bundan əlavə, Raman spektroskopiyasından istifadə edərək furfural kimi maddələrin aşkarlanması transformator sistemlərinin köhnəlməsi və uzunömürlülüyü haqqında təsvir yaradır. Diaqnostikadakı bu irəliləyişlər transformatorların etibarlılığını və uzunömürlülüyünü artırır, eyni zamanda texniki xidmət xərclərini azaltmaq və nasazlıqların erkən qarşısını almaq üçün həllər təklif edir. Nəticədə əməliyyat xərclərini azaldır və sistemin səmərəliliyini artırır.

Açar sözlər: transformator yağı, furfural maddələr, nasazlıqlar, süni neyron şəbəkələri.
DOI:10.70784/azip.2.2024338

1. GİRİŞ.

Transformatorlar elektrik enerjisinin ötürülməsi və paylanması şəbəkələrinin mühüm komponentləridir. Transformatorlar böyük həcmdə elektrik enerjisini (məqavətlə ölçülür) uzun məsafələrə istehsal məntəqələrindən istehlak məntəqələrinə səmərəli şəkildə ötürməyə imkan verir. Müasir transformatorların əsas hissələri dolaqlar, izolyasiya materialları, girimlər və soyutma sistemləridir. Güc transformatorlarında bir içlikdən maqnitlə birləşdirilən iki və ya daha çox sarğıdan ibarətdir. Sarğılardakı növbələrin sayına əsasən, güc transformatorları gücləndirici (ilkin sarğıdan ikinciyə qədər artım) və aşağı salınan (ilkin sarğıdan ikinciyə qədər azalma) transformatorlara bölünə bilər. Əksər güc transformatorlarında izolyasiya materialları yağ və kağızdan və ya sellüloza şəklində kartondan ibarətdir. İzolyasiya materialları dielektrik kimi çıxış edir və kifayət qədər dielektrik gücü və soyutma təmin etməklə elektrik komponentlərinin təhlükəsizliyini artırmaq üçün istifadə olunur. Transformator yağı transformatorlarda izolyator kimi mühüm rol oynayır [1].

Transformatorların həyati əhəmiyyətini nəzərə alaraq, onların təhlükəsizliyini təmin etmək çox vacibdir. Mümkün nasazlıqların qarşısını almaq üçün transformatorlar istehsal edilərkən müvafiq dizayn standartları nəzərə alınmalıdır. Transformatorların layihələndirilməsi zamanı elektrik sahəsinin gərginliyi, maqnit sahəsinin gərginliyi, mexaniki gərginlik və istilik gərginliyi kimi nəzəri cəhətdən müvafiq amilləri nəzərə almaq lazımdır [2]. Beləliklə, transformatorların nəzarətsiz buraxılması onların zədələnməsi və ya hətta işləməsi kimi fəlakətli nəticələrə gətirib çıxara bilər. Nəticədə bu problemlər arzuolunmaz xərclərə səbəb olur.

Transformatorlarda ən çox rast gəlinən problemlər izolyasiya materiallarında olan qüsurlardan qaynaqlanır. Tədqiqatçılar izolyasiya sisteminin vəziyyətini təhlil edərək transformatorun ümumi vəziyyətini müəyyən edə bilirlər [3]. Buna görə də, transformator izolyasiya edən yağ nümunələrinin təhlili transformatorda yaranan nasazlıqların müəyyən edilməsində mühüm əhəmiyyət kəsb edə bilər [4]. Transformatorlarda istilik (piroliz), rütubət (hidroliz) və havanın (oksidləşmə) görünməsi transformatorun izolyasiya sisteminin zamanla deqradasiyasının səbəblərindən biridir [5, 6]. Bu mənfi təsirlər izolyasiya yağında elektrik boşalmalarına (qövs, korona, qismi, səth) gətirib çıxarır. Elektrik boşalmaları isə izolyasiya yağının keyfiyyətini və transformatorun işini azaldan (H_2), metan izləri (CH_4), asetilen izləri (C_2H_2) [7, 8], karbon monoksit (CO), karbon qazı (CO_2) [9], etanın birləşməsinə (C_2H_6), etilenin (C_2H_4) [10] yaranmasına səbəb olur.

Transformatorların elektrik enerjisinin ötürülməsi və paylanması sistemlərində geniş tətbiqi ilə əlaqədar alimlər və tədqiqatçılar daim mümkün nasazlıqları aşkar etmək üçün daha ucuz, vaxta qənaət edən və daha səmərəli analiz və diaqnostik üsullar axtarırlar. Onlar fəlakətli zədələnmələrin qarşısını almaq və avadanlığın etibarlılığını artırmaq üçün transformator nasazlıqlarının erkən aşkarlanması üçün etibarlı monitoring və diaqnostika üsullarını inkişaf etdirməyə çalışırlar [11, 12]. Transformator yağının izolyasiyasını qiymətləndirmək üçün diaqnostik üsullara izolyator yağının həm fiziki, həm də kimyəvi xassələrinin tədqiqi, yağda həll olunan qazların təhlili, furan törəmələrinin səviyyəsinin qiymətləndirilməsi, spektrometrik analiz texnologiyalarının tətbiqi [13, 14] və s. daxildir. Bu məqalədə güc transformatorlarının diaqnostikası və təhlili təqdim olunur. Bu nəticələrə əsasən, hər bir metodun müsbət və mənfi tərəfləri qiymətləndirilir.

2. EKSPERİMENTAL HİSSƏ

Bu bölmədə istifadə olunan hər bir cihaz və komponentin xarakteristikası təqdim olunur.

2.1 X-ray difraktometri.

Rentgen difraktometri, ümumiyyətlə rentgen cihazı kimi tanınan, müxtəlif materialların atom və molekulyar quruluşunu təhlil etmək üçün bir cihazdır. Tədqiqatçılar ZrO₂-nin kristal quruluşunu və ölçüsünü öyrənmək üçün rentgen difraktometrindən istifadə ediblər. Sonra analiz edilən sirkonium (ZrO₂) əsas yağa əlavə edilir. Ölçmə dəqiqliyini artırmaq üçün bir neçə üsul yerinə yetirildikdən sonra əsas və nano-doldurulmuş yağ üçün transformator yağının keyfiyyəti müxtəlif konsentrasiyalarda, deşilmə gərginliyi ehtimalları və temperaturalarda tətbiq olunan dəyişən cərəyanın deşilmə gərginliyini ölçməklə qiymətləndirilir [15].

2.2 Qismi boşalmanın ölçülməsi, tezlik reaksiyasının ölçülməsi, dielektrik reaksiyanın ölçülməsi.

Qismi boşalmanın ölçülməsi. Qismi boşalma izolyasiya materialının zəif bölgəsində elektriklə parçalanmasıdır [2]. Qismi boşalmanın ölçülməsi metodunun iş prinsipi qismən boşalma qüsuru sahəsinin aşkarlanması və müəyyən edilməsinə əsaslanır. Qismi boşalmalarla əlaqəli siqnalları tutmaq və təhlil etmək üçün elektrik və ultrasəs üsulları kimi müxtəlif ölçmə üsullarından istifadə olunur [16].

Tezlik reaksiyasının ölçülməsi. Tezlik sahəsində tezlik reaksiyasının ölçülməsi transformatorun aktiv hissəsinin xarakterik tezlik reaksiyasını aşkar etmək üçün istifadə olunur. Tədqiqatçılar TRA nəticələrini (1) ölçmüş və istinad rezonansları və qütblərindəki fərqləri, (2) eyni transformatorun üç fazasının cavabları arasındakı fərqləri və (3) eyni dizaynı transformatorun cavabları arasındakı fərqləri araşdıraraq təhlil etmişlər.

Dielektrik reaksiyanın ölçülməsi. Dielektrik reaksiya ölçmələri yağ və sellüloza komponentlərinin dielektrik xüsusiyyətlərinə əsaslanaraq zaman və ya tezlik sahəsində ölçülmüş dəyərlərini hesablamağa imkan verir. Tədqiqatçılar simulyasiya modelinə hesablamaların tətbiq etməklə, transformator qütb komponentlərinin, eləcə də rütubət və ya qütb yaşlanması məhsullarının miqdarını təxmin edə bilirlər [2].

2.3. Konfokal lazer Raman spektroskopiyası.

Lazer Raman spektroskopiyası molekulların vibrasiya və fırlanma rejimlərini təhlil etmək üçün Raman effektlərindən və lazer işığından istifadə edən və maddələrin kimyəvi quruluşu və tərkibi haqqında müvafiq məlumat verən diaqnostik üsuldur. Tədqiqatçılar lazer Raman spektroskopiyasının aşkarlama həssaslığını və həyəcanlanma intensivliyini yaxşılaşdırmaq üçün konfokal lazer Raman spektroskopiyası texnikasını inkişaf etdirdilər. Bundan əlavə, CLRS aşkarlama limitini təkmilləşdirmək və digər amillərin təsirini azaltmaq üçün hasilat texnologiyasından istifadə edir. CLRS (Konfokal Lazer Raman Spektroskopiyası) metodu transformator mayenin izlərini aşkar etmək üçün effektiv məlumat verir. CLRS metodundan istifadə edərək tədqiqatçılar transformator yağında furfural kimi dağıcı

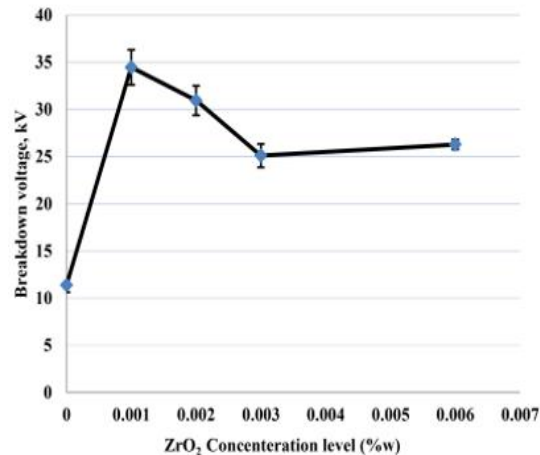
maddələri yoxlaya və transformatorun deqradasiyasının qarşısını ala bilər [17].

2.4. İnfraqırmızı spektroskopiya

İnfraqırmızı spektroskopiyaya maddələrin infraqırmızı işıqla qarşılıqlı təsirini öyrənməklə onların kimyəvi tərkibi və molekulyar quruluşu haqqında məlumat verir. Tədqiqatçılar transformator yağını 115°C-də termal yaşlandırır və udma pikləri üçün infraqırmızı spektrometrdən istifadə edərək təhlil edirlər [1].

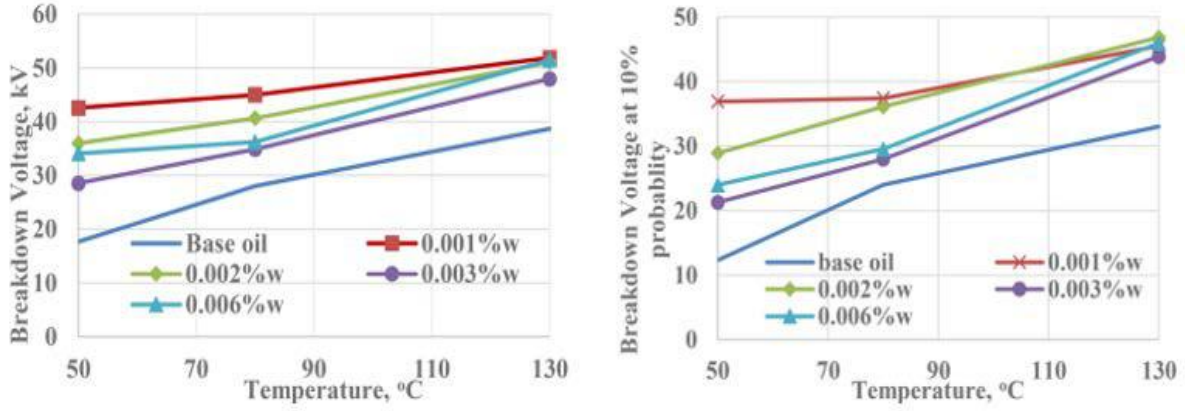
3. NƏTİCƏLƏR VƏ ONLARIN MÜZAKİRƏSİ

[15]-də tədqiqatçılar 0,001, 0,002, 0,003 və 0,006 wt% konsentrasiyası ilə əsas yağ və nanodoldurulmuş (ZrO₂) neft nümunələrinin parçalanma gərginliyini ölçmüşdülər. Ölçmələr iki parçalanma ehtimalı (ən aşağı: 10% və ən yüksək: 50%) və otaq temperaturunda (31 °C) aparılmışdır. Əsas yağın deşilmə gərginliyi (XX) şəklə görə 11,39 kV-dir. Maksimum parçalanma gərginliyi 0,001% konsentrasiyası olan nanodoldurulmuş yağda müşahidə olunur. Tədqiqatçılar daha sonra qeyd edirlər ki, nanodoldurulmuş neftin konsentrasiyası artdıqca deşilmə gərginliyi azalır. Nəticədə, 10% və 50% ehtimalı ilə kiçik miqdarda nanoölçülü ZrO₂ istifadə edərək, parçalanma gərginliyini artırmaq olar (şəkil 1).



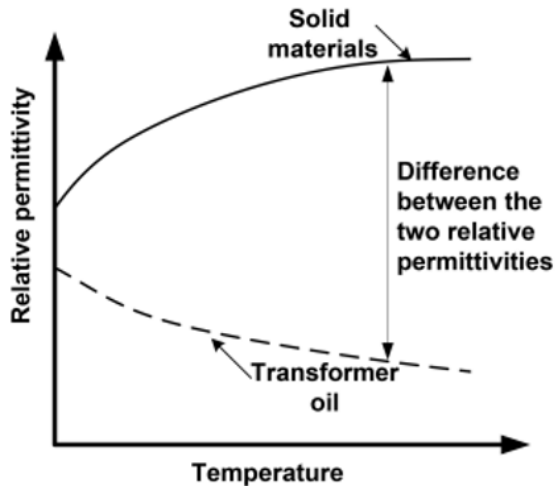
Şəkil 1. ZrO₂ konsentrasiyasının yağın deşilmə gərginliyindən asılılığı

Transformator yağının parçalanma gərginliyinə təsir edən başqa bir şərt temperaturdur. Tədqiqatlar nəticəsində tədqiqatçılar müəyyən ediblər ki, yağın temperaturunun artırılması həm də əsas neft nümunəsində parçalanma gərginliyinin artmasına gətirib çıxarır. Bütün temperaturalarda deşilmə gərginliyində maksimum artım yenidən 0,001% w konsentrasiyası olan nümunədə baş verir [15]. Bununla belə, vurğulamaq lazım olan bir vəziyyət var. Temperaturun artması əsas yağın parçalanma gərginliyinin artmasına səbəb olsa da, Şəkil 2-də göstərilirdiyi kimi, deşilmə gərginliyinin faiz artımının azalmasına gətirib çıxarır. Beləliklə, deşilmə gərginliyinin faiz artımı, [15]-də göstərilirdiyi kimi, aşağı temperaturlarla müqayisədə yüksək temperaturda nanohissəciklərin konsentrasiyasından nəzərə çarpacaq dərəcədə asılılığı göstərir.



Şəkil 2. Transformator yağının deşilmə gərginliyinin temperaturdan asılılığı.

İzolyasiya yağına nanodoldurucuların əlavə edilməsi zamanı deşilmə gərginliyinin artmasının səbəbi nədir? Tədqiqatçılar müəyyən ediblər ki, deşilmə gərginliyinin artmasına səbəb nanohissəciklərdə səth yüklərinin əmələ gəlməsidir. Müvafiq olaraq, hər bir nanohissəciyin xarici elektrik sahəsinin təsiri altında qütbləşmə effekti nanohissəciklər üzərində səth yüklərinin əmələ gəlməsinə səbəb olan strimer yüklərinin tutulması prosesinə başlayır [15]. Tədqiqatçılar həmçinin deşilmə gərginliyinin artmasına səbəb olan iki əsas amili qeyd edirlər: nəm bağlama və yük tutma. Aşağı temperaturda, nəm bağlaması, deşilmə gərginliyini artıran dominant amildir. Neftə nanohissəciklərin əlavə edilməsi yağın (MC) daxilində rütubətin dispersiyasını azaldır ki, bu da parçalanma gərginliyinin artmasına səbəb olur. Lakin daha yüksək temperaturda yağın nəmliyi azalır. Beləliklə, deşilmə gərginliyinin artmasının səbəbi daha yüksək temperaturda yük tutulmasıdır.



Şəkil 3. Dielektrik nüfuzluğunun temperaturdan asılılığı.

Nanomayelərin iki fazası olur: 1. Bərk (nanohissəciklər) 2. Maye (transformator yağı). Nano-mayenin temperaturu artdıqca nanohissəciklərin nisbi dielektrik sabitləri ilə əsas neft arasındakı fərq də artır (şəkil 3) [18,19]. Bu fərq elektrik sahəsinin olması səbəbindən daha yüksək tətbiq olunan qüvvənin ($F = qE$) yaranması ilə nəticələnir. Nəticədə, temperaturun artması elektronların enerjisinin artmasına və onların nanohissəcik-

dən çıxarılmasına səbəb olur. Buna görə də, nanohissəciklərdən elektronların tükənməsi hissəciklərin tuta biləcəyi yükün miqdarını azaldır və deşilmə gərginliyində faiz artımını azaldır.

Qismi boşalmanın ölçülməsi üsulu qismi boşalma təsirləri nəticəsində yaranan nasazlıqların müəyyən edilməsi üçün ən effektiv analiz üsullarından biri hesab olunur. O, adətən, yerli elektrik sahəsi E , qırılma sahəsinin gücü E_0 həddlərindən artıq olduqda baş verən elektrik qəzasını aşkar etmək üçün istifadə olunur [2]. PD fəaliyyətini müşahidə etməklə alimlər PD qüsurunun növünü müəyyən edə bilirlər.

Qismi boşalmanın (PD) ölçülməsi

Müəllif həmçinin qeyd etdi ki, PD ölçmək üçün bu xüsusiyyətləri qiymətləndirmək lazımdır:

1. PD siqnallarının faza vəziyyəti
2. Müsbət və mənfi sinusoidlərdə siqnalların simmetriyası
3. Dövr başına siqnalların sayı
4. PD nümunəsinin təkrar istehsalı

Tezlik Cavab Ölçüsü (FRA)
Tezliyə cavab ölçmələri giriş və çıxış siqnalları arasındakı əlaqənin təhlilinə əsaslanır. Alimlər FRA-nı tezlik və ya zaman sahəsində həyata keçirə bilirlər [2].

Dielektrik Siqnal Ölçüsü (DRA)
Dielektrik reaksiyanın ölçülməsi polarizasiyaya məruz qalan dielektrik materialların xassələrinin təhlilidir [2]. Materialın polarizasiyası $P(t)$ düsturla hesablanıla bilər:

$$D(t) = \epsilon_0 E(t) + P(t)$$

burada $\epsilon_0 E(t)$ vakuum polarizasiyası, $D(t)$ isə elektrik yerdəyişməsidir.

Elektrik sahəsinin $t=0$ -da açıqdan sonra hər bir dielektrik materialın xüsusi reaksiya müddətini xarakterizə edən yaddaş effekti yaranacaq [2]. DRA metodu bu yaddaş effektinin kəşfinə əsaslanır. Tədqiqatçılar DRA ölçmələrini simulyasiya edərək dielektrikdə qütb komponentlərinin miqdarını (rütubət və qütb yaşlanması) təyin edə bilirlər.

[4]-də tədqiqatçılar neft nümunələrinin ultra-bənövşəyi spektroskopiyaya ilə spektral parametrləri (pik udma, dalğa uzunluğu) arasındakı korrelyasiyanı qiymətləndirmək üçün müxtəlif üsullardan (süni neyron

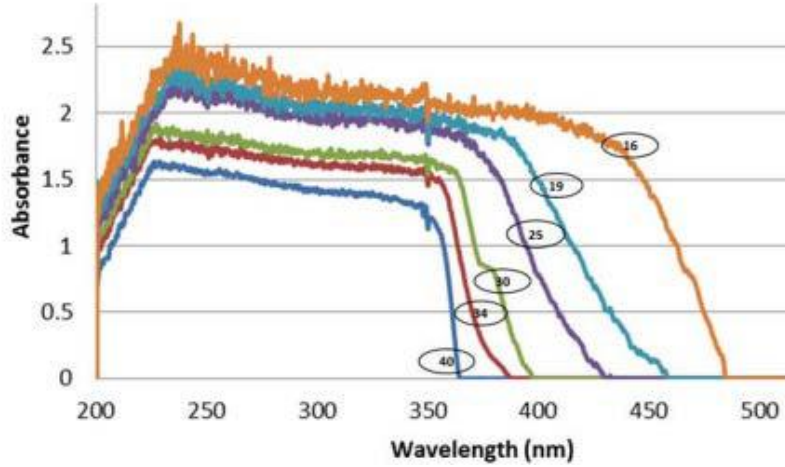
GÜC TRANSFORMATORLARIN NASAZLIQLARI VƏ ƏSAS DIAQNOSTİKA ÜSULLARI

şəbəkəsi istifadə edirlər. İzolyasiya sisteminin IFT dəyərinin müəyyən edilməsində əsas məqsəd odur ki, transformator yağının IFT dəyəri transformatorun vəziyyətinin yaxşı göstəricisidir. Standartlara görə, daha çox sayda IFT (istismar edilə bilən transformator üçün: 40-50 mN/m, kritik vəziyyət < 25 mN/m) yeni və ya işlək transformator deməkdir [20].

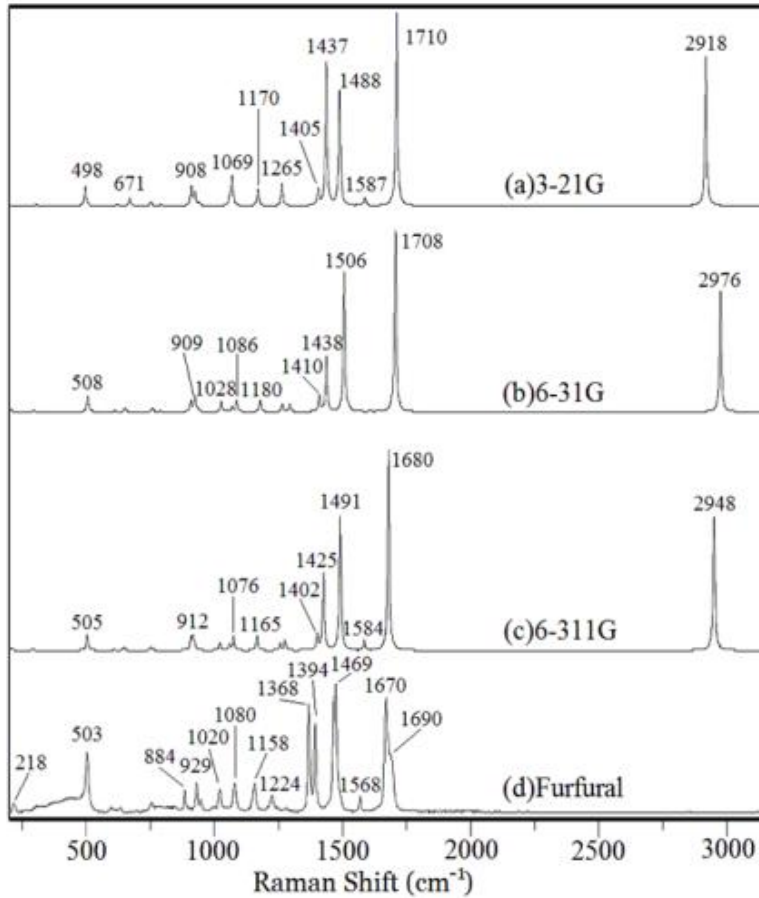
Tədqiqatçılar həm köhnə IFT metodundan (ASTM D971), həm də ultra-bənövşəyi spektroskopiyasından istifadə edərək müxtəlif şəraitdə 55 transformatorada ölçmə aparıblar. Onlar üç fərqli parametrlər təyin etdilər:

1. İstinad spektri (boş hüceyrə)
2. Ölçülmüş spektr (kyuvetdə yerləşdirilmiş yağ nümunəsi)
3. Yağ nümunəsi spektri (ölçülmüş spektr və istinad spektri arasındakı fərq)

Daha sonra IFT dəyəri ilə birləşdirilmiş spektral parametrlər şəkil 4-də göstərilmişdir. Nəticələrə əsasən, tədqiqatçılar spektral reaksiya ilə IFT dəyəri arasında yaxşı korrelyasiya olduğu qənaətinə gəldilər. Ən yaxşı IFT dəyərinə malik olan yağ nümunəsi ən aşağı udma pikinə və ən qısa ötürmə diapazonuna malikdir [4].



Şəkil 4. Birləşdirilmiş spektral parametrlər.



Şəkil 5. Furfurol maddələrinin Raman spektrometriyası ilə ölçülməsi.

Tədqiqatçılar həmçinin spektral reaksiyalar və digər neft nümunəsi parametrləri (dağılma gərginliyi [21], suyun tərkibi [22] və turşuluq [23]) arasındakı əlaqəni araşdırdılar. Nəticələr göstərir ki, tədqiq olunan transformator yağının digər xüsusiyyətləri ilə yağın spektral reaksiya parametrləri arasında ardıcıl korrelyasiya yoxdur.

Transformatorun izolyasiya sistemindəki köhnəlmə və nasazlıqlar furfural (furan-2-karbaldehid) kimi yad maddələrin əmələ gəlməsinə səbəb ola bilər [17]. Bu materiallar aşkar edildikdən sonra transformatorların vəziyyətini təhlil etmək olar. Furfural konsentrasiyası izolyasiya sisteminin köhnəlmə prosesinin birbaşa göstəricisidir. [17]-də tədqiqatçılar konfokal lazer Raman spektroskopiyasından (CLRS) istifadə edərək transformator yağında həll olunan furfuralı araşdırdılar və nəticələri yüksək performanslı maye xromatografiyasının (HPLC) nəticələri ilə müqayisə etdilər.

Raman spektroskopiyasından istifadə edərək tədqiqatçılar furfuralın Raman spektrini hesabladılar və onu üç əsas dəstlə (3-21G, 6-31G, 6-311G) müqayisə etdilər. Minimal Raman pik sürüşmələrinə görə ideal dəst kimi 6-311G seçildi (şəkil 5).

Tədqiqatçılar aşağıdakı prinsiplərə əsaslanaraq təhlil üçün dəstdən bir Raman zirvəsini seçdilər [17]:

1) Pik spektrometrin diapazonu daxilində olmalıdır.

2) Piklər yaxınlıqdakı zirvələrdən daha yüksək intensivliyə malik olmalıdır.

3) Pik digər Raman zirvələrindən müstəqil olmalıdır.

Əlavə təhlil üçün 1677 sm^{-1} hündürlüyündə zirvə seçilmişdir.

Transformator izolyasiya sisteminin xidmət müddəti müxtəlif amillərdən təsirlənə bilər. [1]-də tədqiqatçılar transformator yağının köhnəlməsinin dielektrik itki bucağı ($tg\delta$) və izolyasiyanın ömrünə təsirini araşdırdılar. Transformator yağı 115°C temperaturda sabit gərginlikdə izolyasiya materialının parçalanmasına qədər yaşlandı [1]. Tədqiqatçılar infraqırmızı spektroskopiyadan istifadə etməklə transformator yağının spektral nəticələrini təhlil edərək müəyyən ediblər ki, köhnəlmə prosesi transformator yağında aldehidlərin və turşu

birleşmələrinin əmələ gəlməsinə səbəb olur [1]. Turşu sayı və dielektrik itki faktoru ($tg\delta$) arasındakı əlaqəni tapmaq üçün tədqiqatçılar 115°C -də köhnəlmə zamanı hər 72 saatdan bir parametrləri ölçdülər. Nəticələr göstərdi ki, yağın köhnəlmə prosesi davam etdikcə dielektrik itki əmsalı ($tg\delta$) və turşu sayı artır [1].

Tədqiqatçılar həmçinin aşkar ediblər ki, $tg\delta$ -nı artıran başqa bir amil transformator yağının köhnəlməsi elektrik gərginliyinin artmasıdır [1]. Elektrik gərginliyinin artması transformator yağında qismi boşalmaların meydana gəlməsinə səbəb olur. Qismi boşalmaların əmələ gəlməsi nəticəsində su qazları mikro qabarcıqlara çevrilir. Nəhayət, mikro qabarcıqların əmələ gəlməsi dielektrik itki əmsalının ($tg\delta$) artmasına və elektrik deşilməsinə səbəb olur.

4. NƏTİCƏ

Bu məqalədə müxtəlif analiz üsulları, izolyasiya sisteminin xidmət müddətinə təsir edən amillər və transformator yağı ilə bağlı qabaqcıl tədqiqatlar tədqiq edilmişdir. Transformator izolyasiya sistemlərində, əsasən də transformator yağında mümkün zədələnmələri aşkar etmək üçün yeni üsulların işlənib hazırlanması böyük əhəmiyyət kəsb edir. Ultra bənövşəyi spektroskopiyası və süni neyron şəbəkələri (ANN) kimi qabaqcıl diaqnostika üsulları transformator yağının vəziyyətinin dəqiq və vaxtında qiymətləndirilməsini təmin edir, potensial problemləri böyük nasazlıqlara gətirib çıxarmazdan əvvəl müəyyən edir. Qismi boşalma (PD), tezlik reaksiya analizi (FRA) və dielektrik signal analizi (DRA) kimi üsullar transformatorlara yerləşdirilən elektrik, mexaniki və istilik gərginlikləri haqqında ətraflı məlumat verir. Bu üsullar nasazlığın aşkarlanmasının dəqiqliyini artırır, erkən müdaxilə və texniki xidmət göstərməyə imkan verir. Transformator yağında nanodoldurucuların istifadəsi transformatorların istismar müddətini daha da artıraraq, deşilmə gərginliyini yaxşılaşdırdığı göstərilmişdir. Bundan əlavə, bu innovativ diaqnostika vasitələrinin inteqrasiyası texniki xidmət xərclərini əhəmiyyətli dərəcədə azaldır, fəlakətli nasazlıqların və gözlənilməz fasilələrin qarşısını alır.

-
- [1] Y. Du, Y. Lv, C. Li, et al. Effect of electron shallow trap on breakdown performance of transformer oil-based nanofluids. *J. Appl. Phys.*, 2011, 110, p. 104.
- [2] V. Segal, Hjortsberg A., Rabinovich A. et al. AC (60 Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on transformer oil and magnetite nanoparticles. *IEEE Int. Symp. Electrical Insulation*, 1998, Vol 2, pp. 619–622.
- [3] J. Liu, L.J. Zhou, G.N. Wu, et al. Dielectric frequency response of oilpaper composite insulation modified by nanoparticles, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2012, 19, (2), pp. 510–520.
- [4] Y.X. Zhou, Y.S. Wang, J.H. Tian et al. Breakdown characteristics in transformer oil modified by nanoparticles. *High Volt. Eng.*, 2010, 36, (5), pp. 1155–1159 (in Chinese).
- [5] S. Vladimir, H. Arne, R. Arnold. et al. AC (60 Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on transformer oil and magnetite nanoparticles. *IEEE Int. Symp. Electrical Insulation*, Arlington, Virginia, USA, 1998, pp. 619–622.
- [6] P.P.C. Sartoratto, A.V.S. Neto, E.C.D. Lima et al. Preparation and electrical properties of oil-based magnetic fluids. *J. Appl. Phys.*, 2005, 97, (10), p. 10Q917.
- [7] S.C. Pugazhendhi. Experimental evaluation on dielectric and thermal characteristics of nano filler added transformer oil, *Int. Conf. High Voltage Engineering and Application*, Shanghai, China, September 17–20, 2012.
- [8] E.G. Atiya, D.E.A. Mansour, R.M. Khattab et al. Dispersion behavior and breakdown strength of transformer oil filled with TiO_2 nanoparticles,

- IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2015, 22, (5), pp. 2463–2472.
- [9] *A.M. Abd-Elhady, M.E. Ibrahim, T.A. Taha et al.* “Dielectric and thermal properties of transformer oil modified by semiconductive CdS quantum dots”, *J. Electron. Mater.*, 2016, 45, (10), pp. 4755–4761
- [10] *G.D. Peppas, V.P. Charalampakos, E.C. Pyrgioti et al.* Statistical investigation of AC breakdown voltage of nanofluids compared with mineral and natural ester oil, *IET Sci. Meas. Technol.*, 2016, 10, (6), pp. 644–652.
- [11] *Yue-fan D., Yv-zhen L., Chengrong L. et al.*: Effect of semiconductive nanoparticles on insulating performances of transformer oil, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2012, 19, (3), pp. 770–776.
- [12] *Z. Zhaotao, L. Jian, Z. Pin Z., et al.* Electrical properties of nano-modified insulating vegetable oil. *IEEE Conf. Electrical, Insulation Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2010, pp. 1–4.
- [13] *D.A. Mansour, E.D. Atiya, R.M. Khattab et al.* Effect of titania nanoparticles on the dielectric properties of transformer oil-based nanofluids. *IEEE CEIDP 2012 in Montreal, Québec, Canada*, 2012, pp. 295–298.
- [14] *H. Jin, T. Andritsch, P.H.F. Morshuis, et al.* AC breakdown voltage and viscosity of mineral oil based SiO₂ nanofluids. *IEEE Conf. Electrical Insulation Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Canada, 2012, pp. 902–905.
- [15] *A. Katiyar, P. Dhar, T. Nandi, et al.* Effects of nanostructure permittivity and dimensions on the increased dielectric strength of nano insulating oils, *Colloids Surf. A*, 2016, 509, pp. 235–243.
- [16] *A. Guinier.* X-ray diffraction in crystals, imperfect crystals and amorphous Bodies. (W.H. Freeman, San Francisco, CA, 1963), p. 124.
- [17] *D. Martin, Z.D. Wang.* Statistical analysis of the AC breakdown voltages of ester based transformer oils, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2008, 15, (4), pp. 1044–1050.

T.K. Nurubeyli

FAULTS OF POWER TRANSFORMERS AND BASIC DIAGNOSTIC METHODS

This article examines advanced diagnostic techniques for assessing the condition and potential faults of transformer insulation systems, with a primary focus on transformer oil. The purpose of the study is based on the effect of temperature, electrical voltage and specific electrical parameters such as dielectric loss coefficient ($\tan\delta$) on the indicator of wear processes and possible degradation. It discusses the benefits of nanofillers in improving breakdown voltage by binding moisture at low temperatures and trapping charge at higher temperatures. Techniques such as partial discharge (PD) measurements, frequency response analysis (FRA) and dielectric frequency analysis (DTA) are evaluated for their effectiveness in early fault detection. The study also explores the use of ultraviolet spectroscopy and artificial neural networks (ANNs) to accurately estimate the interphase voltage (IFT) of transformer oil. In addition, the detection of substances such as furfural using Raman spectroscopy provides insight into the aging and longevity of transformer systems. These advances in diagnostics increase the reliability and longevity of transformers and offer solutions to reduce maintenance costs and prevent faults early, ultimately reducing operating costs and increasing system efficiency.

Qəbul olunma tarixi: 27.09.2024