

Analiza kvalitete transformatorskog ulja

Belik, Stefani

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:985046>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni studij Elektrotehnika

**ANALIZA KVALITETE
TRANSFORMATORSKOG ULJA**

Diplomski rad

Stefani Belik

Osijek, 2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju****Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

| | |
|---|--|
| Ime i prezime pristupnika: | Stefani Belik |
| Studij, smjer: | Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika |
| Mat. br. pristupnika, god. | D-1438, 07.10.2022. |
| JMBAG: | 0165077017 |
| Mentor: | izv. prof. dr. sc. Goran Knežević |
| Sumentor: | |
| Sumentor iz tvrtke: | |
| Predsjednik Povjerenstva: | izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete |
| Član Povjerenstva 1: | izv. prof. dr. sc. Goran Knežević |
| Član Povjerenstva 2: | Ružica Kljajić, univ. mag. ing. el. |
| Naslov diplomskog rada: | Analiza kvalitete transformatorskog ulja |
| Znanstvena grana diplomskog rada: | Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika) |
| Zadatak diplomskog rada: | U diplomskom radu potrebno je objasniti osnovne pojmove i vezano za ulja koja se upotrebljavaju u transformatoru (sastav, sistematizacija) te zakonske i normativne propise vezane za primjenu ulja u transformatorima. Nadalje, potrebno je navesti parametre koji utječu na degradaciju ulja. Uz to, potrebno je opisati metodu ispitivanja dielektričnosti ulja. Na uzorcima ulja, potrebno je provesti ispitivanje dielektričnosti uz promjenu ispitnih uvjeta te utvrditi posljedice istih na dobivene rezultate. Tema rezervirana za studenta: Stefani Belik |
| Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora: | 06.09.2024. |
| Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora: | Izvrstan (5) |
| Datum obrane diplomskog rada: | 18.9.2024. |
| Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane): | Izvrstan (5) |
| Ukupna ocjena diplomskog rada: | Izvrstan (5) |
| Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij: | 18.09.2024. |



FERIT

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 18.09.2024.

Ime i prezime Pristupnika:

Stefani Belik

Studij:

Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika

Mat. br. Pristupnika, godina upisa:

D-1438, 07.10.2022.

Turnitin podudaranje [%]:

14

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Analiza kvalitete transformatorskog ulja**

izrađen pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Goran Knežević

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

| | |
|--|-----------|
| 1. UVOD | 1 |
| 1.1. Zadatak diplomskog rada | 2 |
| 2. PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA | 3 |
| 3. IZOLACIJSKI SUSTAV TRANSFORMATORA | 5 |
| 3.1. Izolacijska ulja | 5 |
| 3.2. Podjela transformatorskih izolacijskih tekućina | 8 |
| 3.2.1. Mineralno ulje..... | 8 |
| 3.2.2. Silikonsko ulje | 9 |
| 3.2.3. Estersko ulje | 10 |
| 4. DIJAGNOSTIKA I MOTRENJE TRANSFORMATORA | 11 |
| 4.1. Uvod u dijagnostiku transformatora | 11 |
| 4.2. Dijagnostička ispitivanja transformatora | 11 |
| 4.3. Pregled dijagnostičkih metoda | 12 |
| 4.3.1. Vizualni pregled transformatora..... | 12 |
| 4.3.2. Električne dijagnostičke metode | 12 |
| 4.3.3. Laboratorijske dijagnostičke metode..... | 13 |
| 5. ZAKONI I NORME KOJI SE ODOSE NA TRANSFORMATORSKA ULJA | 14 |
| 5.1. Zakoni | 14 |
| 5.2. Norme | 15 |
| 5.2.1. Međunarodna komisija za elektrotehniku | 16 |
| 6. EKSPERIMENTALNI DIO | 19 |
| 6.1. Ispitivanje dielektrične čvrstoće transformatorskog ulja | 19 |
| 6.2. Ispitni materijali | 21 |
| 6.2.1. Uzorak broj 1 | 21 |
| 6.2.2. Uzorak broj 2 i uzorak broj 3 | 22 |
| 6.3. Obrada rezultata općeg ispitivanja | 24 |
| 6.3.1. Prikaz numeričkih rezultata analize uzorka broj 1..... | 25 |
| 6.3.2. Prikaz numeričkih rezultata analize uzorka broj 2..... | 27 |
| 6.3.3. Prikaz numeričkih rezultata analize uzorka broj 3..... | 28 |
| 6.4. Obrada rezultata ispitivanja promjenom temperature ulja | 31 |

| | |
|--|-----------|
| 6.4.1. Numerički i grafički prikaz rezultata ispitivanja uzoraka ulja..... | 32 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 35 |
| 8. LITERATURA | 36 |
| 9. SAŽETAK..... | 39 |
| 10. ABSTRACT | 40 |
| 11. ŽIVOTOPIS..... | 41 |

1. UVOD

Povećanje zahtjeva za pouzdanim elektroenergetskim sustavom gdje pouzdanost predstavlja sposobnost mreže da kontinuirano i ispravno funkcionira bez prekida ili gubitaka, dovodi do većih očekivanja u pogledu performansi i pouzdanosti energetskih transformatora. U tom kontekstu, održavanje kvalitete transformatorskog ulja dobiva na važnosti kao preventivna mjera koja može značajno smanjiti rizik od otkaza opreme i omogućiti njezin dugotrajan i efikasan rad. Transformatorsko ulje predstavlja nezamjenjivu komponentu u radu transformatora, gdje ima dvostruku ulogu, djeluje kao izolator te kao medij za odvođenje topline generirane unutar transformatora. S obzirom na kritičnu ulogu koju transformatorsko ulje ima u održavanju funkcionalnosti i pouzdanosti transformatora, ključno je osigurati njegovu stalnu i pouzdanu kvalitetu. Loše stanje transformatorskog ulja može dovesti do smanjenja izolacijske sposobnosti, povećanja rizika od kvara pa čak i do katastrofalnih posljedica poput požara i eksplozija. Stoga, redovita analiza i praćenje kvalitete ulja nije samo preporučljiva, već i neophodna praksa u upravljanju energetskih transformatorima. Analiza transformatorskog ulja uključuje niz testova koji ocjenjuju njegove fizičke, kemijske i električne karakteristike, kako bi se osiguralo da ulje ostane unutar specificiranih parametara kvalitete koji su neophodni za siguran rad transformatora. U ovom diplomskom radu, fokus će biti na detaljnom pregledu sastava i sistematizaciji ulja koji se upotrebljavaju u transformatoru. Nakon sistematizacije ulja, proučavaju se parametri koji utječu na degradaciju kvalitete ulja te normativni i zakonski propisi vezani za primjenu. Na uzorcima dostupnih ulja provedeno je ispitivanje dielektrične čvrstoće ulja mjernim uređajem Megger OTS60PB. Obradom rezultata ispitivanja, ispitni uzorci ulja klasificirani su prema normi IEC 60156.

1.1. Zadatak diplomskog rada

U diplomskom radu potrebno je objasniti osnovne pojmove vezano za ulja koja se upotrebljavaju u transformatoru (sastav, sistematizacija) te zakonske i normativne propise vezane za primjenu ulja u transformatorima. Nadalje, potrebno je navesti parametre koji utječu na degradaciju ulja. Uz to, potrebno je opisati metodu ispitivanja dielektričnosti ulja. Na uzorcima ulja, potrebno je provesti ispitivanje dielektričnosti uz promjenu ispitnih uvjeta te utvrditi posljedice istih na dobivene rezultate.

2. PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

U literaturi [1] autor Anton Dolenc govori o osnovnim pojmovima i teoriji transformatora čije poznavanje je od iznimne važnosti za razumijevanje načina rada i djelovanja jednog od najvažnijih elemenata elektroenergetskog sustava. Knjiga „Transformatori I. i II. dio“ ima 8 poglavlja, no za ovaj rad su treće poglavlje u kojemu se govori o zagrijavanju i hlađenju transformatora te četvrto u kojemu se govori o samoj konstrukciji transformatora najznačajniji jer objašnjavaju temelje djelovanja na čijem razumijevanju se zasniva ovaj rad. Autori u literaturi [2] u 19 poglavlja knjige objašnjavaju transformatore u teoriji i praksi gdje je za izdvojiti poglavlje 7 pod nazivom „Izolacijski sustav transformatora i ispitni naponi“ u kojemu se sistematično objašnjavaju izolacijski materijali i izolacijske tekućine sa pratećim analizama i ispitivanjima za zadane parametre kvalitete. Osim objašnjenja za svaku karakteristiku izolacijskih tekućina autori pružaju i usporedbu karakteristika sekcijski prema fizikalno-kemijskim, toplinskim i električnim svojstvima prema IEC standardima. U članku [3] autori obrađuju pitanja starenja uljno-papirne izolacije u transformatorima te utjecaj različitih izolacijskih tekućina na bazi ulja i estera. Osim navedenoga, oni proučavaju i djelovanja novih izolacijskih tekućina na starenje izolacije i performanse transformatora u slučajevima slobodnog disanja i hermetičke zatvorenosti. Rezultati pokazuju da postoje razlike između tekućina i između dizajna transformatora kao što je brzina starenja papira i stvaranje markera starenja u izolacijskim tekućinama poput kiselina. Prema studiji [4] istražuju se značajke ostarjelog transformatorskog ulja i čistog transformatorskog ulja. Čisto transformatorsko ulje se zagrijava na određenu temperaturu i kruži kako bi se dobili uzorci starog transformatorskog ulja. Mjeri se intenzitet električnog polja transformatorskog ulja kako bi se procijenila dielektrična čvrstoća ostarjelog transformatorskog ulja. FEM analiza koristi se za određivanje intenziteta električnog polja. Na temperaturama starenja od 130°C i 150°C, istražene su dielektrične karakteristike transformatorskog ulja za tipove Shell Diala i Triapar. Kao rezultat toga, u ovoj studiji prikazana su ne samo električna svojstva, već i učinci toplinskog starenja na fizikalna i kemijska svojstva transformatorskog ulja. U literaturi [5] palmino ulje, kokosovo ulje i djevičansko kokosovo ulje ispitani su u jednofaznom silaznom transformatoru koji koristi napajanje od 220 V i frekvenciju od 50 Hz s indukcijskim motorom od 110 V. Navedena biljna ulja podvrgavaju eksperimentima mjerenja ulja kao što su ispitivanje probojnog napona, ispitivanje sadržaja vlage i ispitivanje viskoznosti. Prije i nakon korištenja ulja u energetskim transformatorima, uspoređuje se i pokazuje da djevičansko kokosovo ulje ima najveći probojni napon, najmanji sadržaj vlage i također najnižu viskoznost. Ovim istraživanjem zaključili su da je djevičansko kokosovo ulje bolje od palminog i običnog kokosovog ulja.

Autori članka [6] analizirali su uzorke transformatorskog ulja za transformatorski park koji se sastoji od više od 300 jedinica opreme koji su pet godina prikupljeni u dijagnostičkom laboratoriju poduzeća Tatneft PJSC. Za provođenje analize korišteni su sljedeći pokazatelji: klasa čistoće, sadržaj vlage, specifična težina, plamište u zatvorenom lončiću, vrijednost kiselosti, tangens dielektričnog gubitka, i probojni napon. Kako bi se identificirali glavni čimbenici povezani s probojnim naponom, konstruirana je matrica parnih korelacija, na temelju koje je otkrivena negativna korelacija između sadržaja vlage i probojnog napona. Dodatno je proučavan utjecaj sezonskih varijacija na karakteristike transformatorskog ulja. Statistička obrada podataka za hladnu i toplu sezonu pokazala je da je sadržaj vlage u toplom razdoblju za 26 % veći nego u hladnom razdoblju godine, a da je za probojni napon obrnut slučaj. Na temelju analize provedene za cijelu flotu transformatora kojima upravlja PJSC Tatneft, zaključak je da je udio vlage u ulju izravan čimbenik koji smanjuje probojni napon. Ostali čimbenici, uključujući prisutnost mehaničkih nečistoća; degradacija boja, lakova i čvrste izolacije; i oksidaciju ulja karakterizira zamršeniji mehanizam utjecaja na probojni napon.

3. IZOLACIJSKI SUSTAV TRANSFORMATORA

Životni vijek i sigurnost rada energetskih transformatora spojenih na elektroenergetsku mrežu u najvećoj mjeri ovisi od stanja njegovog izolacijskog sustava. Zbog toga se može ustvrditi daje životni vijek transformatora gotovo jednak životnom vijeku njegovog izolacijskog sustava za koji se najčešće kao izolacija koristi transformatorsko ulje (tekuća izolacija) koja čini oko 80 % dielektrične čvrstoće transformatora i tzv. trafo-papir (čvrsta izolacija). Autori u literaturi [7] navode kako većina kvarova na energetskim transformatorima čak oko 85% njih nastaje zbog degradacije izolacijskog sustava. Transformatorsko ulje djeluje kao učinkovit izolacijski materijal, a kada se koristi za impregnaciju papira, povećava njegovu dielektričnu otpornost. Niska viskoznost ulja omogućuje mu prodiranje u čvrste dijelove izolacije, čime se olakšava prijenos topline od jezgre prema hladnjacima, pa tako ulje također služi kao sredstvo za hlađenje. Dodatno, visoka otpornost transformatorskog ulja na oksidaciju omogućuje mu dugotrajan rad pri visokim temperaturama.

3.1. Izolacijska ulja

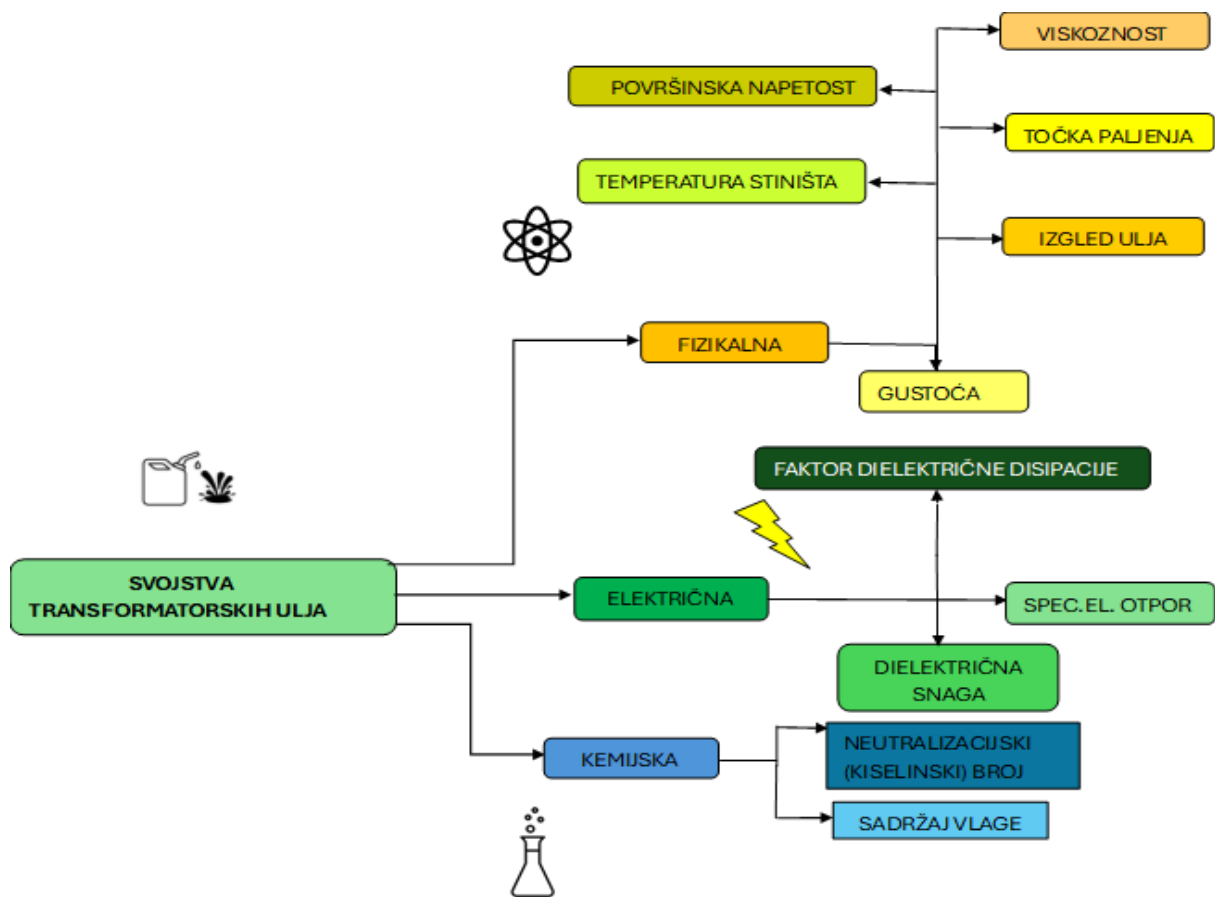
Prema autoru u izvoru [8], ulja su definirana kao „skupina neutralnih, nepolarnih i lipofilnih tekućina koje se ne miješaju s vodom. Dijele se na masna ulja, mineralna ulja i eterična ulja. Ne otapaju se u vodi, ali se otapaju u organskim otapalima“. Tri vrste ulja koriste se u industriji i elektrotehnici a to su mineralna, sintetička i prirodna ulja. Mineralna ulja proizvode se rafiniranjem nafte. Sintetička ulja također se proizvode iz nafte, ali su sintetizirana za specifičnu upotrebu. Prirodna (biljna) ulja uglavnom se proizvode prešanjem sjemenki biljaka (uljana repica, suncokret, kukuruz, soja, itd.). Iz ekoloških razloga, prirodna ulja ili biorazgradiva ulja postaju sve više prihvaćena kako bi se spriječile ekološke katastrofe uzrokovane curenjem ulja iz transformatora i drugih uređaja. Nakon što se dogodi kvar kod transformatora i velika količina ulja iscuri, problematično je i skupo zbrinuti ulje koje ima slabu biorazgradivost. Ulja koja se traže kao alternative moraju također zadovoljiti tehničke i kemijske zahtjeve te električne zahtjeve [9]. Postoji nekoliko vrsta transformatorskih izolacijskih tekućina, svaka s određenim svojstvima i namjenama. Podjela ovih tekućina može se izvršiti na temelju njihovog sastava i karakteristika. Izolacijska ulja su ključna u funkcionalnosti i sigurnosti transformatora, nudeći ne samo električnu izolaciju i odvod topline nego i omogućujući preglede koji pomažu u procjeni stanja i vijeka trajanja uređaja.

Kako bi se zadovoljili visoki standardi potrebni za efikasno funkcioniranje, izolacijsko ulje mora ispunjavati ove opće karakteristike:

- Dobra električna izolacija: Sposobnost da izdrži električni napon i da spriječi prolaz električne struje između dijelova transformatora.
- Oksidacijska stabilnost: Otpornost na kemijsko razlaganje uzrokovano izlaganjem zraku i toplini, što produžuje radni vijek ulja.
- Toplinska vodljivost: Učinkovito odvajanje topline s aktivnih dijelova transformatora kako bi se spriječilo pregrijavanje.
- Viskoznost: Održavanje optimalne gustoće koja osigurava dobru cirkulaciju ulja, čime se omogućuje efikasno hlađenje.
- Visoko plamište i nisko stinište: Visoko plamište smanjuje rizik od požara, dok nisko stinište osigurava pouzdanost ulja na niskim temperaturama.
- Transformatorska ulja ne smiju biti toksična i ne smiju kemijski reagirati s drugim elementima transformatora s kojima su u doticaju.

Osim navedenih općih karakteristika postoji još niz fizikalnih, električkih i kemijskih svojstava koji se moraju zadovoljiti (sažeti prikaz na slici 3.1.), unatoč tome upotreba izolacijskog ulja zbog svoje široke primjene, nosi određene rizike i nedostatke, uključujući potencijal za zapaljivost i korozivno djelovanje, što može dovesti do oštećenja opreme i okoliša u slučaju curenja ili požara. Osim svega navedenog, dodatna pozornost u današnje vrijeme se stavlja i na visok stupanj biorazgradivosti. Pojam biorazgradivosti odražava stupanj do kojeg tekućinu metaboliziraju prirodno prisutni mikrobi u tlu ili vodotocima u slučaju izlivanja ili curenja. Jasno je da je prednost ako se prolivena tekućina može brzo prirodno razgraditi bez potrebe za skupim mjerama čišćenja što se kod transformatorskih ulja nastoji postići što prije u budućnosti.

Na slici 3.1. prikazana su sistematizirana svojstva transformatorskog ulja.

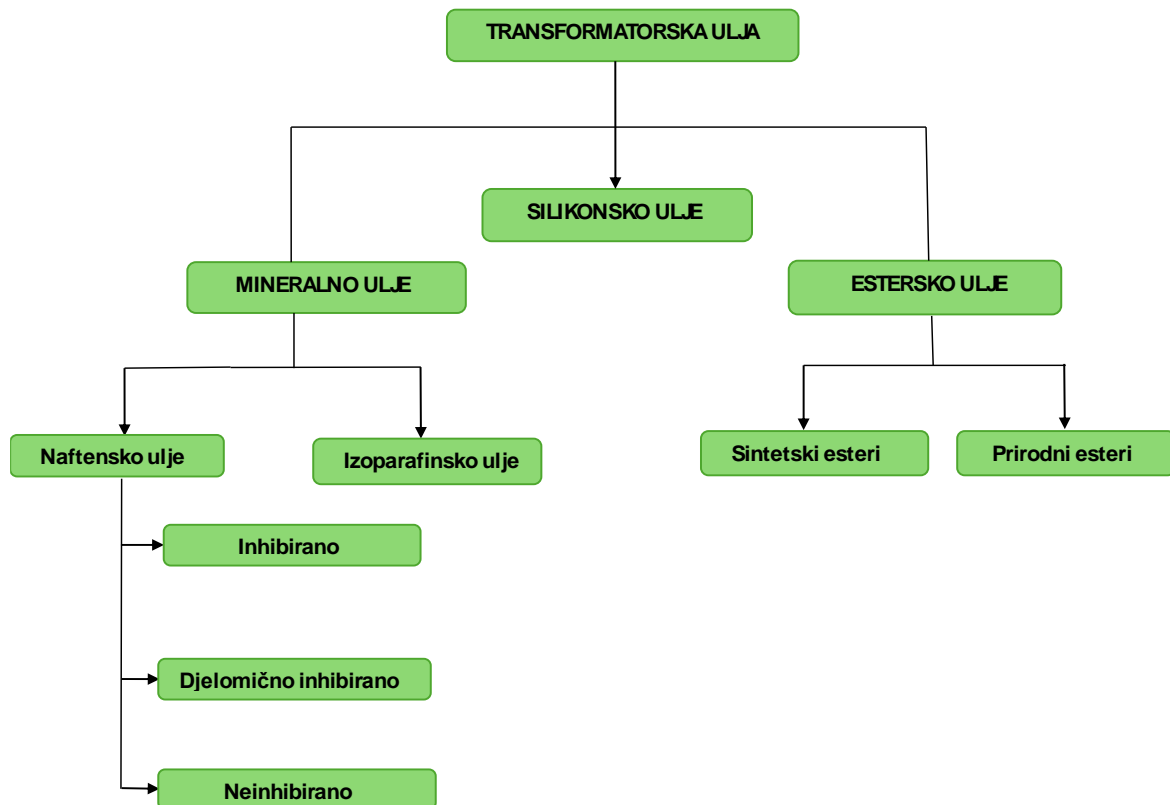


Slika 3.1. Sistematizirani prikaz svojstva transformatorskog ulja

Prema izvoru [2], „Fizikalno-kemijske i električne karakteristike ulja koriste se u dijagnostičke svrhe budući da se one mijenjaju s vremenom i odražavaju stanje u kojemu se ulje nalazi, a koje može biti rezultat normalnog procesa starenja ili kvarnih stanja kao što su pregrijavanja, izbijanja niske ili visoke energije, povećana vlaga i slično.“ Specifično električno svojstvo koje će biti praktično ispitano u okviru ovoga rada je dielektrična snaga odnosno čvrstoća. Prema izvoru [10], „Dielektrična čvrstoća pokazuje izdržljivost dielektrika na povećanje jakosti električnog polja. Kada jakost električnog polja naraste do određene vrijednosti, zbog zagrijavanja ili kemijskih promjena izazvanih električnim poljem, dolazi do električnog proboja., Povećanjem jakosti električnog polja do kritične vrijednosti dolazi do pojave izbijanja električnog luka odnosno probojnog napona. Izbijanje električnog luka ili probojni napon rezultira prolaskom struje kroz materijal, što može uzrokovati oštećenje ili kvar električne opreme. Stoga je važno osigurati da dielektrična čvrstoća materijala bude dovoljno visoka kako bi se spriječilo nepoželjno izbijanje.

3.2. Podjela transformatorskih izolacijskih tekućina

Na slici 3.2. je prikazana podjela različitih transformatorskih ulja prema sastavu odnosno podjela prema mineralnom, sintetskom i esterskom podrijetlu ulja.



Slika 3.2. Podjela transformatorskih ulja prema sastavu

3.2.1. Mineralno ulje

Mineralno ulje, koje se proizvodi iz nafte, desetljećima se koristi kao izolacijska tekućina u transformatorima. Gotovo svi transformatori u elektroenergetskim sustavima širom svijeta napunjeni su nekom vrstom ove tekućine. Mineralno ulje se dobiva rafinacijom, modificiranjem i/ili miješanjem naftnih proizvoda ili drugih ugljikovodika. Ovo ulje, koje se proizvodi rafiniranjem sirove nafte, sastoji se od različitih vrsta ugljikovodika, uključujući parafinske, naftenske i aromatske strukture. Izoparafinsko ulje, proizvedeno ukapljivanjem prirodnog plina metana (GTL - gas to liquid), inhibirano je transformatorsko ulje koje se dobiva Fischer-Tropsch metodom. Ovo ulje karakterizira visoka čistoća, izoparafinska struktura bez korozivnog sumpora, visoka oksidacijska stabilnost, te u potpunosti ispunjava zahtjeve IEC 60296 standarda za mineralna transformatorska ulja [11].

Također, autori u literaturama [11], [12] i [13] navode da su „prednosti nad ostalim mineralnim uljima i nešto viša točka plamišta i niža gustoća ulja, a nedostaci su i dalje nešto viša cijena i nedostatak iskustva iz prakse jer najstariji transformatori koji rade s ovom vrstom ulja su otprilike 5 godina u pogonu. Naftensko ulje je derivat nafte koji sadrži malo ili nimalo prirodnih n-parafina. Naftenska ulja imaju nisku točku staništa bez dodatnih aditiva. Naftenska ulja imaju bolju viskoznost i bolju oksidacijsku stabilnost. Iz tog razloga su danas u transformatorima korištena uglavnom naftenska mineralna ulja. Mineralna ulja sadrže antioksidanse tj. inhibitore. Antioksidansi usporavaju oksidaciju ulja te stvaranje taloga i kiselina. Ovi inhibitori mogu biti prirodni (neinhibirana ulja) i sintetski (inhibirana ulja).“

3.2.2. Silikonsko ulje

Silikonski proizvodi danas su neizostavni u svakodnevnom životu, od kućanstva do naprednih tehnologija. Silikoni su u potpunosti sintetički materijali. Proces započinje redukcijom kvarca (SiO_2) u silicij pomoću ugljena u električnim pećima. Zatim, reakcijom s metilkloridom na 300°C i uz upotrebu bakra kao katalizatora, nastaju klorometilsilani, pri čemu je di-klordimetilsilan najzastupljeniji spoj. Hidrolizom di-klordimetilsilana formiraju se di-hidroksidimetilsilan i solna kiselina. Nakon toga, poli-kondenzacijom se stvara osnovni materijal za proizvodnju silikonskog ulja. Međutim, visoka cijena ovih proizvoda do sada je ograničavala njihovu širu primjenu [14]. Prema izvoru [15], autor ističe poteškoće prilikom zamjene mineralnog ulja u transformatorima silikonskim uljem. Problemi nastaju zbog curenja mineralnog ulja iz jezgre transformatora, što može dovesti do pjenjenja mješavine tekućina. Metil-silikonska ulja karakterizira manja promjena viskoznosti s promjenom temperature. Zbog svoje niske kompresibilnosti, ova ulja često se koriste kao tekućine u kočionim sustavima i hidrauličnim sustavima.

3.2.3. Estersko ulje

Kako je navedeno u [11], „Esterske izolacijske tekućine imaju visoku točku paljenja i zapaljenja te su biorazgradive, što ih čini povoljnima u usporedbi s mineralnim ili silikonskim uljima. Iako su kemijski strukturno slični, prirodni i sintetski esteri se ipak razlikuju u nekim karakteristikama, prije svega po oksidacijskoj stabilnosti“. Treba napomenuti da, zbog veće polarizacije, esteri imaju drugačije ponašanje otapanja u odnosu na mineralno ulje. Prirodna esterska ulja dobivaju se iz sjemenki različitih kultura poput uljane repice, suncokreta i soje. Prirodna esterska ulja, koja se kemijski sastoje od mješavine triglicerida, relativno su polarni spojevi skloni stvaranju vodikovih veza zbog svoje strukture. Ove izolacijske tekućine su gušće i viskoznije od mineralnih ulja, te imaju prepoznatljiv miris. Odlikuju se visokom točkom paljenja i zapaljenja, što ih čini teško zapaljivima. Također imaju nizak tlak para, izvrsna su maziva, posjeduju visok indeks viskoznosti i dobra dielektrična svojstva. Osim toga, izrazito su higroskopna, što im omogućuje da apsorbiraju do 40 puta više vode u usporedbi s mineralnim uljima. Međutim, nedostatak ovih ulja je slaba oksidacijska stabilnost, što ih ograničava na uporabu isključivo u hermetički zatvorenim transformatorima gdje nema kontakta s zrakom. Još jedan izazov predstavlja njihova visoka točka zgušnjavanja, što može otežati rad transformatora u hladnim klimatskim uvjetima, posebno pri temperaturama ispod (ispod -30°C) [9].

Sintetski esteri dobivaju se procesom esterifikacije koji uključuje reakciju između polivalentnih alkohola i viših masnih kiselina. Njihove ključne karakteristike koje ih čine značajnim za primjenu su: visoka točka paljenja i zapaljenja, što ih čini teško zapaljivima, dobra biološka razgradivost, niska razina akutne i kronične toksičnosti, te izvrsna električna i termička svojstva. Također, imaju nizak tlak para u radnim uvjetima, pružaju izvrsna svojstva podmazivanja, te su otporni na električna izbijanja i električni luk. Dodatno, kompatibilni su s ugradbenim materijalima unutar transformatora.

Navedena vrsta estera koristi se već dugi niz godina te su našli široku primjenu u distributivnim, specijaliziranim (poput transformatora za vlakove) i energetskim transformatorima. Njihov glavni nedostatak u odnosu na mineralna ulja je još uvijek visoka cijena [16].

4. DIJAGNOSTIKA I MOTRENJE TRANSFORMATORA

4.1. Uvod u dijagnostiku transformatora

U osnovi, očekivano trajanje života energetskog transformatora prilično je dugo, poznato je da iznosi oko četrdeset godina službe prije nego što ga treba zamijeniti. Tijekom radnog vijeka energetskog transformatora, nužno je stalno ga održavati, uglavnom kako bi se omogućilo sigurno funkcioniranje transformatora što je duže moguće [17]. Prema literaturi [18], „Dijagnostika distribucijskih transformatora utječe na prevenciju kvarova i prekida napajanja potrošača. Ona omogućuje planiranje održavanja i pravodobnu zamjenu transformatora, te samim time smanjuje troškove pogona. S tim ciljem se u praksi primjenjuju brojne dijagnostičke metode kojima se provjeravaju, odnosno procjenjuju stanja praktički svih bitnih dijelova transformatora kao što su izolacija transformatora, namoti, jezgre, provodnici, regulacijska sklopka i slično“. Motrenje transformatora najčešće se odnosi na kontinuirano praćenje određenih parametara na opterećenom transformatoru u pogonu dok se dijagnostički postupci provode periodički i transformator u tu svrhu ne mora biti uključen a ispitivanja se mogu izvršiti i u laboratoriju na uzetim uzorcima [2].

4.2. Dijagnostička ispitivanja transformatora

Prema mjestu ispitivanja dijagnostika transformatora može se podijeliti na:

- „Ispitivanja na terenu koja upotrebljavaju prenosive uređaje za mjerenje električnih, ultrazvučnih i toplinskih veličina.“
- „Ispitivanja u laboratoriju koja upotrebljavaju uređaje predviđene za rad u laboratorijskim uvjetima, a najčešće su to ispitivanja na uzorcima izolacijskih materijala ili ulja iz transformatora.“ [2]

Dijagnostičke metode se mogu podijeliti na tri razine primjene s obzirom na cijenu, kompleksnost i trajanje:

- Standardni opseg dijagnostičkih mjerenja koji se primjenjuje na sve transformatore,
- Prošireni opseg dijagnostičkih mjerenja koji se primjenjuje prilikom prvog puštanja u pogon ili u okviru procjene vijeka trajanja transformatora,
- Specijalne dijagnostičke metode koje se odnose na analizu kvarova [2].

4.3. Pregled dijagnostičkih metoda

Dijagnostičke metode se mogu podijeliti na vizualni pregled transformatora, električke dijagnostičke metode i na laboratorijske dijagnostičke metode. U nastavku slijedi sistematizirani pregled metoda.

4.3.1. Vizualni pregled transformatora

Vizualni pregled transformatora predstavlja ključni i inicijalni korak u dijagnostici, s ciljem identificiranja vizualnih nedostataka poput curenja ulja, nečistoća na hladnjacima, oštećenja provodnika, nedostatka ulja u provodnicima ili konzervatoru, oštećenja antikorozivne zaštite, te istrošenosti pojedinih dijelova. Pažljivo obavljen vizualni pregled omogućuje prikupljanje informacija koje mogu biti korisne u utvrđivanju uzroka kvara. Kombinacija tih informacija s rezultatima električnih i laboratorijskih ispitivanja pomaže u procjeni posljedica kvara, stanju transformatora, metodama popravka te prevenciji budućih kvarova [18].

4.3.2. Električke dijagnostičke metode

Električne veličine koje se mjere periodično, svakih dvije do šest godina te su ključne za procjenu stanja i pouzdanosti transformatora. Ove metode obuhvaćaju različite testove koji se provode kako bi se identificirali potencijalni problemi i osiguralo optimalno funkcioniranje transformatora. Primjena električkih dijagnostičkih metoda omogućuje pravovremeno planiranje održavanja, čime se produžuje vijek trajanja transformatora i osigurava njegova sigurna i učinkovita operacija. Prema [18], „Glavne električke dijagnostičke metode uključuju:

- mjerenje otpora izolacije namota,
- kapacitet i faktor dielektričkih gubitaka izolacije namota,
- kapacitet i faktor dielektričkih gubitaka izolacije provodnika,
- mjerenje struja magnetiziranja kod niskog napona,
- mjerenje otpora namota,
- mjerenje rasipnog induktiviteta parova namota,
- mjerenje frekvencijskog odziva transformatora,
- termoviziju,
- mjerenje ovlaženosti izolacije metodom obnovljenog napona (RVM metoda),
- mjerenje ultrazvučne aktivnosti.“

4.3.3. Laboratorijske dijagnostičke metode

Laboratorijske dijagnostičke metode ključne su za dubinsku analizu i ocjenu stanja transformatora. Za razliku od terenskih ispitivanja, laboratorijske metode omogućuju detaljniju i precizniju analizu materijala i komponenata transformatora u kontroliranim uvjetima. Ove metode često uključuju analizu uzoraka transformatorskog ulja, papira i drugih izolacijskih materijala, čime se dobivaju važne informacije o kemijskim i fizičkim svojstvima tih materijala. Laboratorijske dijagnostičke metode pomažu u otkrivanju skrivenih kvarova, procjeni degradacije materijala i donošenju odluka o održavanju i zamjeni transformatora. Glavne laboratorijske dijagnostičke metode uključuju:

- kromatografsku analizu plinova otopljenih u ulju,
- analizu furana otopljenih u ulju,
- određivanje sadržaja vlage u papiru,
- utvrđivanje sadržaja čestica u ulju,
- određivanje vijeka trajanja transformatorskog papira – stupanj polimerizacije papira,
- određivanje preostalog vijeka trajanja transformatorskog ulja,
- analizu fizikalnih, kemijskih, toplinskih i električnih karakteristika ulja (izgled i boja, viskoznost, sadržaj taloga, površinska napetost, udio vlage, oksidacijska stabilnost, sadržaj inhibitora, neutralizacijski broj itd.) [18].

Osim dijagnostičkih metoda bitno je i spoznati parametre koji utječu na degradaciju ulja. Uvažavajući činjenicu kako ulje vremenom stari odnosno oksidira treba uzeti u obzir i ostale parametre degradacije kvalitete ulja poput degradacije pod utjecajem topline, degradacije pod utjecajem kisika i kiselina te degradacije zbog električnih izbijanja i stvaranja električnih lukova. Pravilnim projektiranjem i održavanjem sustava utjecaj nekih od ovih parametara može biti smanjen te potencijalno produljiti životni vijek transformatora.

5. ZAKONI I NORME KOJI SE ODNOSE NA TRANSFORMATORSKA ULJA

U Hrvatskoj, uporaba transformatorskog ulja regulirana je nizom zakona, propisa i normi kako bi se osigurala sigurnost, zaštita okoliša i učinkovitost transformatorskih sustava. Ovi zakoni i propisi uključuju nacionalne zakone koji se odnose na zaštitu okoliša, sigurnost na radu i industrijsku regulativu, kao i europske direktive i standarde koje Hrvatska kao članica Europske unije mora uskladiti. Važni aspekti koji se pokrivaju ovim zakonima i normama uključuju specifikacije za kvalitetu transformatorskog ulja, sigurnosne standarde za manipulaciju, skladištenje i transport, kao i propise o zbrinjavanju korištenog ulja radi zaštite okoliša. Također se mogu propisati testiranja, inspekcije i redovito održavanje transformatorskih sustava kako bi se osigurala njihova ispravna funkcionalnost i produžio njihov životni vijek. Zakone donosi zakonodavno tijelo te se isti moraju poštovati dok su norme dogovoreni dokumenti koji, osim ako nije drukčije propisano, nemaju snagu zakonske obveze. Mjerodavna tijela odobravaju norme, kojima se za opću uporabu postavljaju pravila, smjernice i karakteristike djelovanja, te time osigurava najviši stupanj opće usklađenosti za određene uvjete.

5.1. Zakoni

Transformatorska ulja podliježu različitim zakonima i propisima kako bi se osigurala sigurnost, zaštita okoliša i učinkovita uporaba transformatorskih sustava. Navedeni zakoni i propisi zajedno s drugim relevantnim dokumentima postavljaju okvir za uporabu i manipulaciju transformatorskim uljima u skladu s nacionalnim standardima i europskim direktivama. Sudionici u industriji transformatorskih sustava trebaju biti svjesni tih zakona i propisa te ih primjenjivati u svakodnevnom poslovanju kako bi se osigurala usklađenost s propisima i zaštita okoliša. Zbog same složenosti i sveobuhvatnosti upotrebe transformatora kao elementa elektroenergetskog sustava već pri samom planiranju i projektiranju proizvođači i kupci moraju uzeti u obzir rad prema sljedećim zakonima:“

- Zakon o prostornom uređenju (NN 153/2013),
- Zakon o zaštiti na radu (NN 071/2014),
- Zakon o zaštiti od požara (NN 092/2010),
- Zakon o zaštiti od buke (NN 030/2009),
- Zakon o zaštiti od neionizirajućeg zračenja (NN 091/2010)“ [19].

Transformatorska ulja imaju značajnu mogućnost utjecaja na okoliš i ljudsko zdravlje. Fizička ili pravna osoba koja rukuje transformatorskim uljima odgovorna je za minimiziranje tih utjecaja. Zbog toga je ključno poštivati propise kako bi se izbjegle opasnosti i osigurala zaštita okoliša i ljudskog zdravlja. U nastavku je dan pregled zakona i pravilnika koji reguliraju te odnose. U Republici Hrvatskoj, relevantni zakoni i pravilnici uključuju:

- „Zakon o zaštiti okoliša (NN 080/2013) – ovim zakonom pokrivaju se pitanja zaštite okoliša radi očuvanja okoliša, smanjivanje rizika za život i zdravlje ljudi, očuvanje prirodnih zajednica, racionalno korištenje prirodnih izvora i energije“ prema izvoru [20],
- „Pravilnik o gospodarenju otpadnih ulja (NN 124/2006) – propisuje postupanje s otpadom koji je odbačen ili odložen, koji se namjerava ili mora odložiti. Otpad se razvrstava ovisno o svojstvima i mjestu nastanka“ prema izvoru [21],
- „Pravilnik o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada (NN 114/2015) – ovim pravilnikom se definira vrsta otpada, ispitivanje fizikalno-kemijskih svojstava otpada, uzorkovanje, obrazac izvješća o otpadnom ulju (Katalog otpada)“ prema izvoru [22],
- „Pravilnik o električnoj opremi (NN 78/18) - Ovaj pravilnik propisuje tehničke zahtjeve i sigurnosne standarde za električnu opremu, uključujući transformatorske sustave i ulja koja se u njima koriste“ prema izvoru [23].

Prema članku 60. Pravilnika o tehničkim zahtjevima za elektroenergetska postrojenja nazivnih izmjeničnih napona iznad 1 kV, vlasnik elektroenergetskog postrojenja dužan je pri izradi glavnog i izvedbenog projekta u svrhu programa osiguranja i kontrole kvalitete izraditi program kojim se određuju uvjeti i zahtjevi za izvođenje, uporabu, pogon i održavanje elektroenergetskog postrojenja i električne opreme [24].

5.2. Norme

Norme su neizostavan dio svih znanstvenih područja, a posebno su ključne u tehničkim disciplinama. One predstavljaju sporazumno ustanovljene dokumente koji, osim ako nije drukčije propisano, nemaju snagu zakonske obveze. Mjerodavna tijela odobravaju norme, koje za opću uporabu postavljaju pravila, smjernice i karakteristike djelovanja, te time osiguravaju najviši stupanj opće usklađenosti za dane uvjete. Što se tiče tehničke primjene, norme se koriste za normiranje proizvoda, postupaka i usluga, pružajući jasne smjernice i standarde koji omogućuju konzistentnost i sigurnost u različitim tehničkim kontekstima. Norme također olakšavaju međunarodnu trgovinu, omogućujući proizvodima da budu prihvaćeni na globalnom tržištu.

Prema tijelima koja su donijela normu i područjima primjene, norme se dijele na međunarodne, europske i nacionalne norme [25].

1. Međunarodne norme (ISO) - Donose ih Međunarodna organizacija za standardizaciju (ISO) i primjenjive su globalno. One osiguravaju jedinstvene standarde i smjernice za proizvode, usluge i postupke kako bi se olakšala međunarodna trgovina i osigurala globalna kompatibilnost.
2. Europske norme (EN) - Europske norme donose se od strane Europskog odbora za standardizaciju (CEN) i Europskog odbora za elektrotehničku standardizaciju (CENELEC). Te norme harmoniziraju tehničke zahtjeve i standarde unutar Europske unije, osiguravajući kompatibilnost proizvoda i usluga na europskom tržištu.
3. Nacionalne norme - Nacionalne norme odražavaju specifične zahtjeve i regulative svake države. U Republici Hrvatskoj, nacionalne norme nazivaju se Hrvatske norme (HRN). Da bi norma postala hrvatska nacionalna norma, mora je prihvatiti Hrvatski zavod za norme, koji je nacionalno normirno tijelo odgovorno za normizaciju u Hrvatskoj. Znak za hrvatske nacionalne norme je HRN, a njezin naziv i znak su zaštićeni zakonom.

5.2.1. Međunarodna komisija za elektrotehniku

„Međunarodna elektrotehnička komisija (akr. IEC, od engl. *International Electrotechnical Commission*), nevladina međunarodna organizacija koja u svojim tehničkim odborima i pododborima priprema i izdaje norme te preporuke za proizvode, proizvodne postupke i usluge za elektrotehniku i elektroniku. Osnovana je 1906., danas okuplja 122 zemlje članice, od čega su 63 punopravne, a 59 u programu pristupanja“ [26]. Organizacija stvaranjem normi olakšava komunikaciju i razumijevanje u elektro struci diljem svijeta, što značajno doprinosi i lakšoj međunarodnoj trgovinskoj razmjeni elektro dobara. Međunarodna normna tijela, poput Međunarodne organizacije za standardizaciju (ISO) i Europskog odbora za standardizaciju (CEN), igraju ključnu ulogu u usklađivanju regionalnih i nacionalnih normi s međunarodnim standardima. Neke od normi koje su ključne za ovaj diplomski rad su nabrojane u nastavku uz dodatak normi koje se specifično odnose na izolacijske tekućine kod transformatora te su bitne za izdvojiti:

- „IEC 60156:2018, *Insulating liquids - Determination of the breakdown voltage at power frequency - Test method* – Test dielektrične snage.“

- „IEC 60422, *Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance Guidance* – Upute za nadzor i održavanje mineralnih ulja u električnoj opremi.“
- „IEC 60475, *Method of sampling liquid dielectrics* – Metoda za uzorkovanje ulja.“
- „IEC 61125:1992, *Unused hydrocarbon-based insulating liquids – Test methods for evaluating the oxidation stability* – Test za vrjednovanje oksidacijske stabilnosti nekorištenih mineralnih ulja. „
- „IEC 61619, *Insulating liquids – Contamination by polychlorinated biphenyls (PCBs) – Method of determination by capillary column gas chromatography* – Mjerenje razine onečišćenja ulja PCB spojevima (kromatografska analiza) .“
- „IEC 61868, *Mineral insulating oils – Determination of kinematic viscosity at very low Temperatures* – Određivanje kinematičke viskoznosti na niskim temperaturama.“
- „IEC 62021-1, *Insulating liquids – Determination of acidity – Part 1: Automatic potentiometric Titration* – Određivanje kiselosti izolacijskih ulja automatskom potenciometrijskom titracijom – dio 1. „
- „IEC 62021-2, *Insulating liquids – Determination of acidity – Part 2: Colourimetric titration* – Određivanje kiselosti izolacijskih ulja kolorimetrijom – dio 2. „
- „IEC 62535:2008, *Insulating liquids – Test method for detection of potentially corrosive sulphur* – Test za detekciju potencijalnih korozivskih djelovanja pokrenutih sumporom.“
- „ISO 3016, *Petroleum products – Determination of pour point* – Test za određivanje točke staništa.“
- „ISO 3675, *Crude petroleum and liquid petroleum products – Laboratory determination of Density* – Metoda za laboratorijsko određivanje gustoće sirove nafte i njenih tekućih proizvoda.“
- „IEC 60296, *Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear* - Tekućine za elektrotehničke primjene - Neiskorištena mineralna izolacijska ulja za transformatore i prekidače.“
- „IEC 60599, *Mineral oil-impregnated electrical equipment in service – Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis* - Električna oprema impregnirana mineralnim uljem u radu - Vodič za interpretaciju analize rastopljenih i slobodnih plinova.“

Prema normi IEC 60156 koja je korištena pri ispitivanjima u ovome radu vrijednosti minimalnog napona dielektričnog proboja opreme u radu prikazane su u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Vrijednosti minimalnog napona dielektričnog proboja ulja prema IEC 60156 [25]

| Napon opreme | $\leq 72.5\text{kV}$ | $>72.5\text{kV}$ $\leq 170\text{kV}$ | $>270\text{kV}$ |
|---------------------------------------|----------------------|---|-----------------|
| Napon proboja- Dobro [kV] | >40 | >50 | >60 |
| Napon proboja- Srednje [kV] | 30-40 | 40-50 | 50-60 |
| Napon proboja- Loše [kV] | <30 | <30 | <50 |

Prema navedenoj tablici može se odrediti klasifikacija ulja u tri razreda a to su dobro, srednje i loše prema kojima se ispitni uzorci ocjenjuju obzirom na napon opreme u radu.

6. EKSPERIMENTALNI DIO

6.1. Ispitivanje dielektrične čvrstoće transformatorskog ulja

Ispitivanje dielektrične čvrstoće ulja ispitati će se mjernim uređajem Megger OTS60PB. Mjerni uređaj je potpuno automatski, baterijski napajan, prijenosni set za ispitivanje ulja. Napon ispitivanja je elektronički kontroliran do maksimalno 60 kV. Za tri odabrana uzorka ulja koristiti će se standardna metoda opisana normom IEC 60156 prema kojoj će ispitivanja biti izvršena. U tom dokumentu detaljno je opisan postupak ispitivanja probojnog napona na frekvenciji napajanja. Postupak ispitivanja provodi se ispitnim uređajem prikazanim na slici 6.1. gdje se uzorak ulja izlaže rastućem izmjeničnom električnom polju sve dok ne dođe do probijanja. Metoda se može primijeniti na sve vrste izolacijskih tekućina nazivne viskoznosti do 350 mm²/s na 40 °C. Metoda ispitivanja je prikladna za ispitivanje nekorištenih tekućina te za ispitivanje i utvrđivanje stanja uzoraka uzetih u nadzoru i održavanju opreme. Postupak ispitivanja obuhvaća ulijevanje uzorka ulja u posebnu posudu volumena od 350 ml do 600 ml koja mora biti kemijski inertna u kojoj se nalaze dvije elektrode na razmaku 2,5 mm. Prilikom ispitivanja ulja napon se postepeno podiže, brzinom promjene od 2,0 kV s⁻¹ i vrši se šest proboja u vremenskim intervalima od 2 minute pri čemu se ulje miješa nakon svakog proboja. Temperatura uzoraka pri ispitivanju je 30 °C. Probojni napon određuje se kao srednja vrijednost šest uzastopnih mjerenja. Ispitivanje probijanja napona provodi se prema opisanom postupku kao rutinsko ispitivanje[2, 27]. Mjerenja su provedena u laboratoriju Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek u Osijeku.



Slika 6.1. Uređaj za mjerenje probojnog napona Megger OTS60PB

Na slici 6.2. prikazane su elektrode mjernog instrumenta sfernog oblika u razmaku od 2,5 mm koje se uranjaju u ispitni uzorak te se nakon uranjanja pokreće ispitni proces koji obuhvaća postupno dizanje iznosa napona između elektroda. Napon se podiže do iznosa kod kojega počinje iskrenje između elektroda. Napon proboja je u tom slučaju napon pri kojemu je slomljena dielektrična čvrstoća transformatorskog ulja između elektroda.



Slika 6.2. Prikaz elektroda mjernog instrumenta Megger OTS60PB na razmaku od 2,5 mm

6.2. Ispitni materijali

Ispitni materijali korišteni u ovome radu su tri uzorka mineralnih ulja ustupljenih od strane Hrvatskog operatora prijenosnog sustava d.d. u Osijeku.

6.2.1. Uzorak broj 1

Uzorak broj 1 je ulje proizvođača NYNAS pod nazivom Nytro 4000X. Inhibirani super razred, NYTRO 4000X, usklađen je s IEC 60296 izdanje 5.0 uključujući ispunjavanje specifičnih zahtjeva za posebne primjene. Razvijen i formuliran kako bi pružio maksimalnu otpornost na degradaciju ulja, NYTRO 4000X osigurava izvanrednu stabilnost na oksidaciju za dulji vijek trajanja transformatora uz manje održavanja. NYTRO 4000X posebno je razvijen za uporabu u električnoj opremi punjenoj uljem – uključujući energetske i distribucijske transformatore, ispravljače, prekidače i sklopne uređaje. Karakterizira ga izuzetno dobar prijenos topline. Zahvaljujući niskoj viskoznosti i indeksu viskoznosti, navedeno ulje nudi izuzetno dobre karakteristike prijenosa topline, osiguravajući učinkovito uklanjanje topline iz jezgre i namota. Uz spomenuto, karakteriziraju ga i izvanredna stabilnost na oksidaciju, visoka dielektrična čvrstoća i vrlo dobra svojstva na niskim temperaturama. Razvijen i formuliran kako bi pružio maksimalnu otpornost na degradaciju ulja, ovaj razred osigurava izvanrednu stabilnost na oksidaciju za produženi vijek trajanja transformatora i minimalno održavanje.

Izolacijsko ulje zadovoljava i premašuje najstrože zahtjeve za dielektričnu čvrstoću kada se pravilno skladišti i rukuje njime [28]. U tablici 6.1. prikazani su podatci o uzorku ulja broj 1.

Tablica 6.1. Podatci o ispitnom uzorku broj 1

| | Uzorak broj 1 |
|--|----------------------|
| Oznaka ulja | Nytro 4000X |
| Godina stavljanja ulja u pogon | 2008. |
| Naponska razina transformatora | 220/110 kV |
| Snaga transformatora | 150 MVA |
| Temperatura ulja pri uzorkovanju | 20 °C |
| Temperatura okoline pri uzorkovanju | 18 °C |

6.2.2. Uzorak broj 2 i uzorak broj 3

Uzorci broj 2 i broj 3 ulja su proizvođača Technol pod nazivom Y-3000. Inhibirano ulje visoke klase, Y3000, usklađeno je s IEC 60296 izdanje 4.0 uključujući ispunjavanje specifičnih zahtjeva za posebne primjene. Razvijeno i formulirano kako bi pružilo snažnu otpornost na degradaciju ulja, Y3000 pruža izvrsnu stabilnost na oksidaciju za dulji vijek trajanja transformatora uz manje održavanja. Ovo ulje odlikuju karakteristike poput visoke dielektrične čvrstoće, izvrsne stabilnosti na oksidaciju, vrlo dobre karakteristike pri niskim temperaturama te dobra odvodnja topline. Visokoučinkovito transformatorsko ulje Y3000 proizvedeno je od naftenske baze ulja s prirodnim niskim točkom točenja. Ovo mineralno ulje ne sadrži PCB niti PCT. To je provjereno plinskom kromatografijom prema IEC 61619 i certificirano je da konačni proizvod ne sadrži PCB [29]. U tablici 6.2. prikazani su podatci o uzorcima ulja broj 2 i broj 3.

Tablica 6.2. Podatci o ispitnim uzorcima broj 2 i broj 3

| | Uzorak broj 2 | Uzorak broj 3 |
|--|----------------------|----------------------|
| Oznaka ulja | Y-3000 | Y-3000 |
| Godina stavljanja ulja u pogon | 1987. | 1981. |
| Naponska razina transformatora | 110/35 kV | 110/35 kV |
| Snaga transformatora | 20 MVA | 40 MVA |
| Temperatura ulja pri uzorkovanju | 54 °C | 52 °C |
| Temperatura okoline pri uzorkovanju | 31 °C | 31 °C |

Na slici 6.3. prikazani su ispitni uzorci. Prvi uzorak predstavlja uzorak broj 1, sljedeći je uzorak broj 2 te zadnji je uzorak broj 3.



Slika 6.3. Ispitni uzorci

6.3. Obrada rezultata općeg ispitivanja

Nakon dobivenih rezultata ispitivanja, rezultate je potrebno obraditi. Obrada uključuje određivanje iznosa srednje vrijednosti napona proboja koja se određuje prema

$$x_{avg} = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i) \quad (6-1)$$

gdje su x_{avg} srednja vrijednost, x_i pojedinačna vrijednost napona a n broj vrijednosti.

Osim navedene srednje vrijednosti napona proboja potrebno je odrediti i standardnu devijaciju prema izrazu:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{avg})^2} \quad (6-2)$$

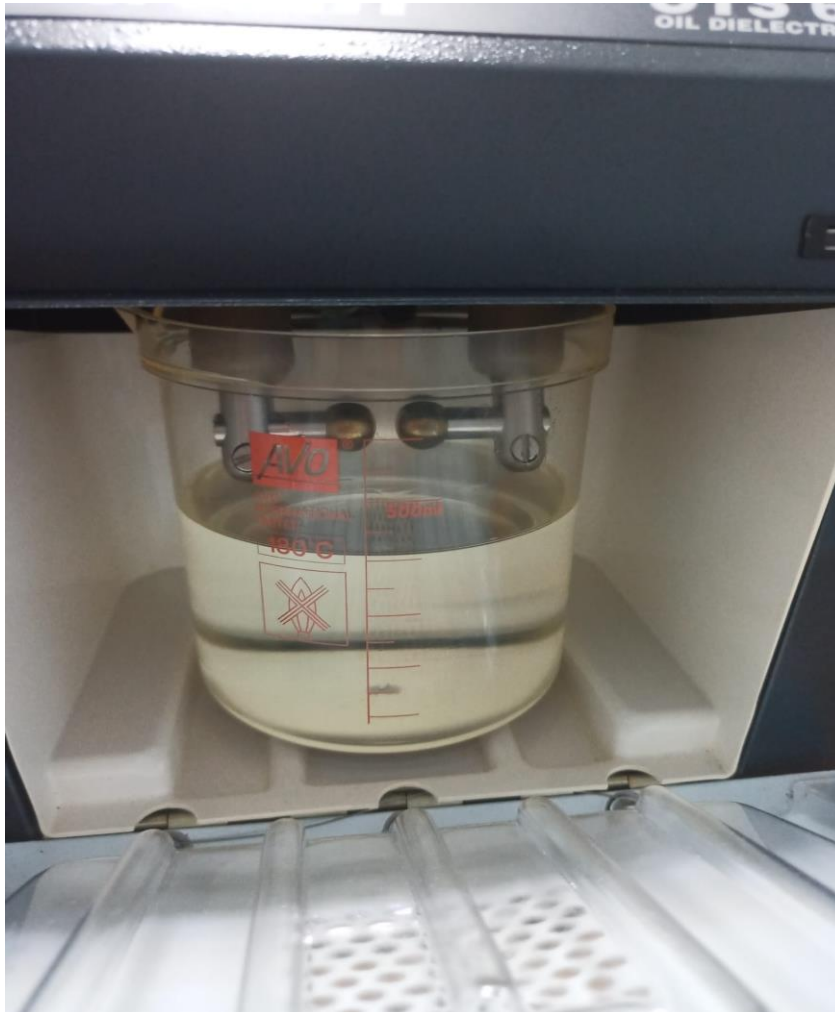
te koeficijent varijacije prema izrazu:

$$CV = \frac{s}{x_{avg}} \quad (6-3)$$

Određivanjem navedenih veličina, konzistentnost podataka i identifikacija nepravilnosti u ispitnim postupcima je znatno olakšana. Ako rezultati ispitivanja imaju visoku standardnu devijaciju ili koeficijent varijacije, to može ukazivati na probleme u metodologiji ispitivanja, instrumentaciji ili u samim uzorcima. Kroz praćenje promjena u koeficijentu varijacije i standardnoj devijaciji tijekom vremena, može se procijeniti kako se stanje ulja mijenja, što omogućava prediktivno održavanje i izbjegavanje neplaniranih zastoja.

6.3.1. Prikaz numeričkih rezultata analize uzorka broj 1

Za uzorak broj 1 proizvođača NYNAS pod nazivom Nytro 4000X provedeno je šest ispitivanja dielektrične čvrstoće ulja mjernim uređajem Megger OTS60PB. Na slici 6.4. vidljiv je uzorak broj 1 pripremljen za ispitivanje te smješten u unutrašnjost mjernog uređaja. Zatvaranjem vratašca uređaja elektrode se uranjaju u ulje dok se otvaranjem istih elektrode dižu u zrak iz ulja.



Slika 6.4. Uzorak broj 1 pripremljen za ispitivanje

U tablici 6.3. prikazani su rezultati ispitivanja te su prikazani rezultati matematičke obrade ispitnih rezultata.

Tablica 6.3. Prikaz numeričkih vrijednosti rezultata analize za uzorak broj 1

| Broj testa | Vrijednost napona proboja u kV | Srednja vrijednost napona proboja u kV | Standardna devijacija | Koeficijent varijacije u % |
|------------|--------------------------------|--|-----------------------|----------------------------|
| Test 1 | 58 | 58 | 3,65 | 6,29 |
| Test 2 | ≥ 60 | | | |
| Test 3 | ≥ 60 | | | |
| Test 4 | ≥ 60 | | | |
| Test 5 | 50 | | | |
| Test 6 | ≥ 60 | | | |

Na slici 6.5. vidljiv je prikaz iznosa srednjeg vrijednosti napona proboja koji je instrument izračunao nakon provedenih mjerenja. Taj rezultat je provjeren proračunom pomoću formule te je iznos od 58 kV točan iznos srednje vrijednosti napona proboja u slučaju uzorka broj 1.



Slika 6.5. Prikaz izračuna srednje vrijednosti napona proboja pomoću mjernog uređaja

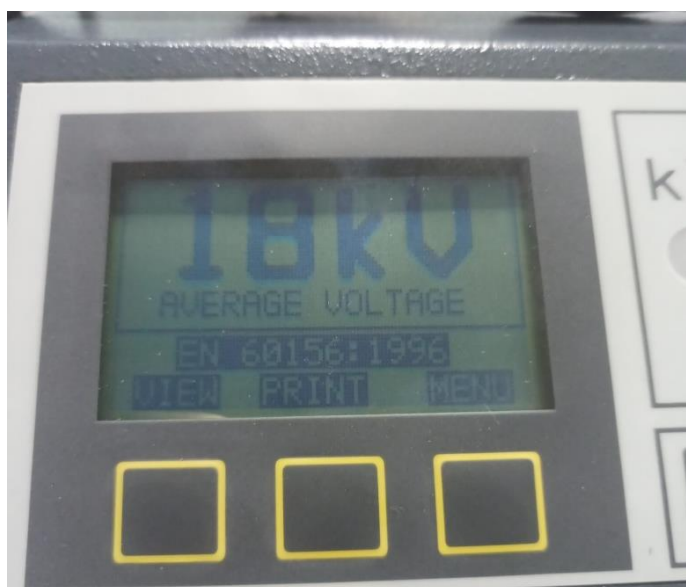
6.3.2. Prikaz numeričkih rezultata analize uzorka broj 2

Za uzorak broj 2 proizvođača Technol pod nazivom Y-3000 provedeno je šest ispitivanja dielektrične čvrstoće ulja mjernim uređajem Megger OTS60PB. U tablici 6.4. prikazani su rezultati ispitivanja te su prikazani rezultati matematičke obrade ispitnih rezultata.

Tablica 6.4. Prikaz numeričkih vrijednosti rezultata analize za uzorak broj 2

| Broj testa | Vrijednost napona proboja u kV | Srednja vrijednost napona proboja u kV | Standardna devijacija | Koeficijent varijacije u % |
|------------|--------------------------------|--|-----------------------|----------------------------|
| Test 1 | 20 | 17,83 | 5,01 | 28,11 |
| Test 2 | 16 | | | |
| Test 3 | 28 | | | |
| Test 4 | 15 | | | |
| Test 5 | 15 | | | |
| Test 6 | 13 | | | |

Na slici 6.6. vidljiv je prikaz iznosa srednje vrijednosti napona proboja koji je instrument izračunao nakon provedenih mjerenja. Taj rezultat je provjeren proračunom pomoću formule te je iznos od 17,83 kV točan iznos srednje vrijednosti napona proboja u slučaju uzorka broj 2 dok je mjerni uređaj taj iznos zaokružio na 18 kV .



Slika 6.6. Prikaz izračuna srednje vrijednosti napona proboja pomoću mjernog uređaja

6.3.3. Prikaz numeričkih rezultata analize uzorka broj 3

Za uzorak broj 3 proizvođača Technol pod nazivom Y-3000 provedeno je šest ispitivanja dielektrične čvrstoće ulja mjernim uređajem Megger OTS60PB. U tablici 6.5. prikazani su rezultati ispitivanja te su prikazani rezultati matematičke obrade ispitnih rezultata.

Tablica 6.5. Prikaz numeričkih vrijednosti rezultata analize za uzorak broj 3

| Broj testa | Vrijednost napona proboja u kV | Srednja vrijednost napona proboja u kV | Standardna devijacija | Koeficijent varijacije u % |
|------------|--------------------------------|--|-----------------------|----------------------------|
| Test 1 | 30 | 37,33 | 5,82 | 15,59 |
| Test 2 | 47 | | | |
| Test 3 | 39 | | | |
| Test 4 | 34 | | | |
| Test 5 | 35 | | | |
| Test 6 | 39 | | | |

Na slici 6.7. vidljiv je prikaz iznosa srednje vrijednosti napona proboja koji je instrument izračunao nakon provedenih mjerenja. Taj rezultat je provjeren proračunom pomoću formule te je iznos od 37,33 kV točan iznos srednje vrijednosti napona proboja u slučaju uzorka broj 3 dok je mjerni uređaj taj iznos zaokružio na 37 kV.



Slika 6.7. Prikaz izračuna srednje vrijednosti napona proboja pomoću mjernog uređaja

Na slici 6.8. prikazan je proces uranjanja elektroda mjernog instrumenta u ispitni uzorak broj 3. Zatvaranjem vratašca instrumenta, elektrode se uranjaju do kraja te ispitivanje započinje nakon odabira norme na zaslonu uređaja te pritiskom na tipku start.



Slika 6.8. Uranjanje elektroda u uzorak broj 3

Koristeći tablicu 5.1. koja se odnosi na klasifikaciju ulja prema vrijednosti minimalnog napona dielektričnog proboja ulja uvažavajući normu IEC 60156 ispitni uzorci su klasificirani kao sljedeći:

- Ispitni uzorak broj 1 sa srednjom vrijednošću napona proboja od 58 kV za napon opreme $>72,5$ kV i ≤ 170 kV pripada u razred „Dobro“ kvalitete uzimajući u obzir ovu ispitnu metodu.
- Ispitni uzorak broj 2 sa srednjom vrijednošću napona proboja od 18 kV za napon opreme $>72,5$ kV i ≤ 170 kV pripada u razred „Loše“ kvalitete uzimajući u obzir ovu ispitnu metodu. Minimalni naponi proboja transformatorskog ulja kod kojih se to ulje može sigurno koristiti u transformatoru iznose 30 kV.
- Ispitni uzorak broj 3 sa srednjom vrijednošću napona proboja od 37 kV za napone opreme $>72,5$ kV i ≤ 170 kV pripada u razred „Srednje“ kvalitete uzimajući u obzir ovu ispitnu metodu.

6.4. Obrada rezultata ispitivanja promjenom temperature ulja

U ovom dijelu rada analiziraju se rezultati ispitivanja probajnog napona transformatorskih ulja pod različitim temperaturnim uvjetima. Promjena temperature ulja značajno utječe na njegove izolacijske karakteristike te je stoga važno razumjeti kako se ponašanje ulja mijenja s promjenom temperature. Kroz obradu podataka prikupljenih tijekom ispitivanja, usporedit će se probajni naponi pri različitim temperaturama. Uzorci ulja su zagrijani na ± 5 °C od određene temperaturne razine nekoliko minuta prije nego što su stavljeni u instrument, kako bi tijekom ispitivanja naponom temperatura ostala unutar postavljenog temperaturnog raspona. Eksperiment je ponovljen s istim uzorkom ulja i temperaturom šest puta. Sva tri uzorka ulja testirani su u rasponu temperature samog ulja od 10 °C do 70 °C. Uzorci su ohlađeni u hladnjaku te testirani, zatim su pomoću prijenosne električne grijaće ploče i lončića zagrijavani u svakom ciklusu testiranja na sljedeću zadanu temperaturu. Temperatura se pri tome kontrolirala digitalnim termometrom CHY 502 K/J bazne točnosti od 0.05%. Na slici 6.9. prikazan je postupak zagrijavanja ispitnog uzorka broj 1 na zadanu temperaturu od 40 °C. Na slici su prikazani termometar, električna grijaća ploča te lončić za zagrijavanje uzoraka ulja.



Slika 6.9. Postupak zagrijavanja ispitnog uzorka na željenu temperaturu

6.4.1. Numerički i grafički prikaz rezultata ispitivanja uzoraka ulja

U tablici 6.6. prikazani su dobiveni rezultati za sva tri uzorka ulja. Sva tri uzorka ulja podvrgnuta su ispitivanju probojne čvrstoće pri različitim temperaturama nakon što uzorci ohlađeni u hladnjaku. Kao što je već spomenuto u uvodnome dijelu o mjernom instrumentu, mjerni instrument Megger OTS60PB mjeri napon proboja do 60 kV. Kada uređaj pokaže vrijednost od 60 kV, to znači da je napon proboja jednak ili veći od 60 kV. Dakle, stvarni napon proboja može biti upravo 60 kV ili viši, ali uređaj ne može izmjeriti točan iznos ako prelazi ovu granicu iz toga razloga je ta činjenica u tablicama naznačena kao vrijednost ≥ 60 kV.

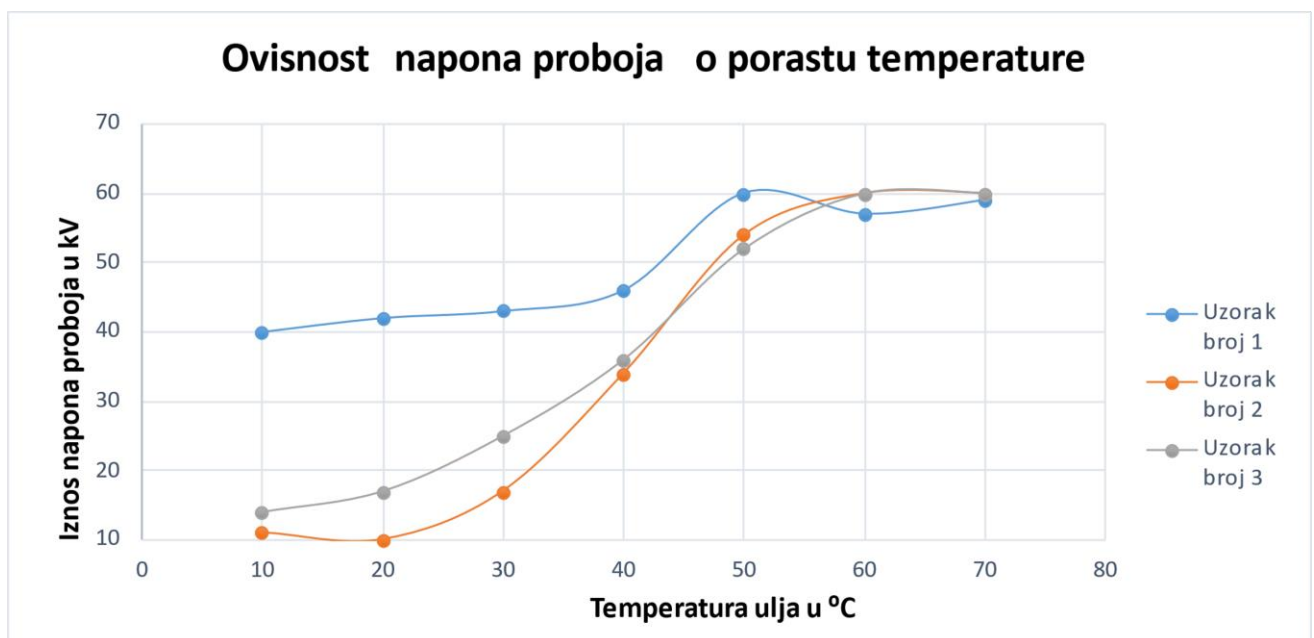
Tablica 6.6. Prikaz numeričkih vrijednosti rezultata analize za sva tri uzorka ulja

| Test pri temperaturi u °C | Vrijednost napona proboja u kV za uzorak broj 1 | Vrijednost napona proboja u kV za uzorak broj 2 | Vrijednost napona proboja u kV za uzorak broj 3 |
|---------------------------|---|---|---|
| Test pri 10 °C | 40 | 11 | 14 |
| Test pri 20 °C | 42 | 10 | 17 |
| Test pri 30 °C | 43 | 17 | 25 |
| Test pri 40 °C | 46 | 34 | 36 |
| Test pri 50 °C | ≥ 60 | 54 | 52 |
| Test pri 60 °C | 57 | ≥ 60 | ≥ 60 |
| Test pri 70 °C | 59 | ≥ 60 | ≥ 60 |

Analizirajući podatke dobivene ispitivanjem, vidljivo je kako porastom temperature ulja vrijednost napona proboja također raste. Ovakav jednostavan način ispitivanja može pripomoći u odlučivanju koja je vrsta ulja najbolja za korištenje s obzirom na promjenjive klimatske uvjete, budući da radna temperatura transformatora može značajno varirati. Na slici 6.10. grafičkom metodom su prikazani numerički podatci ispitivanja za sva tri uzorka ulja. Očitanjem grafa, vidljivo je da uzorak broj 1 na ispitnoj temperaturi od 10 °C ima najviši iznos napona proboja od čak 40 kV dok su ostala dva uzorka pokazala značajno slabija svojstva. Jedan od ključnih faktora utjecaja kod ovih uzoraka su svakako starost koja je kod uzorka broj 1 tek 16 godina, dok je to u slučaju uzorka broj 2 i uzorka broj 3 čak 37, odnosno 43 godine. Vizualnim pregledom uzoraka nakon hlađenja vidljivo je kako starija ulja karakterizira povećana viskoznost, ulja su bila vidljivo gušća, no kod uzorka broj 1 to nije uočeno u tolikoj mjeri. Osim starosti ulja, pri ovome ispitivanju uočene su i razlike u iznosima probojnog napona kod ispitnog uzorka broj 1, naime pri prvome testiranju koje je opisano u podglavlju 6.3.1., uzorak broj 1 pri temperaturi od 30 °C ima srednju vrijednost napona proboja u iznosu od 58 kV.

Iznos od 58 kV pri drugome testiranju kod kojega je obavljeno hlađenje pa ponovno zagrijavanje ulja biva smanjen na srednju vrijednost od 43 kV što predstavlja postotno odstupanje od 25,86 %. Proizvođač uzorka broj 1 navodi kako navedena vrsta ulja ima vrlo dobra svojstva na niskim temperaturama što je ovim ispitivanjem i potvrđeno jer ispitni uzorak broj 1 na temperaturi od samo 10 °C i dalje prema normi IEC 60156 zadovoljava minimalnu vrijednost napona proboja transformatorskog ulja koja iznosi 30 kV za sigurnu upotrebu u transformatoru. Međutim, razlika dobivena u vrijednostima probojnog napona u ova dva slučaja ne može sa sigurnošću biti pripisana samo utjecaju temperature na ulje već treba uzeti u obzir i utjecaj kisika, vlage te potencijalnih onečišćenja poput čestica papira, tkanine i slično te mogućnosti pogrešaka pri ispitivanju.

Kako bi tumačenje dobivenih rezultata bila olakšano, numerički podatci prikazani su grafičkom metodom, vidljivo na slici 6.10.



Slika 6.10. Grafički prikaz ovisnosti napona proboja o porastu temperature

Srednja vrijednost napona proboja uzorka broj 2 u prvome ispitivanju pri 30 °C iznosi 17,83 kV a u drugome ispitivanju ta vrijednost iznosi 17 kV što pokazuje da u tom slučaju gotovo da odstupanja nema te da se uzorak ponaša onako kako je i očekivano. U slučaju uzorka broj 3 uočena su odstupanja, naime u prvome dijelu testiranja srednja vrijednost napona proboja pri 30 °C iznosi 37,33 kV no u slučaju drugoga ispitivanja nakon hlađenja i ponovnog zagrijavanja na 30 °C ta vrijednost iznosi 25 kV što predstavlja pad srednje vrijednosti probojne čvrstoće ulja. Razliku u ova dva ispitivanja možemo pripisati nesavršenosti ispitnog procesa, utjecaju kisika i vlage na ispitni uzorak te nečistoćama u ulju.

Koristeći tablicu 5.1. koja se odnosi na klasifikaciju ulja prema vrijednosti minimalnog napona dielektričnog proboja ulja uvažavajući normu IEC 60156 ispitni uzorci u ovome ispitivanju su klasificirani kao sljedeći:

- Ispitni uzorak broj 1 sa srednjom vrijednošću napona proboja od 46 kV pri temperaturama do 40 °C za napon opreme $>72,5$ kV i ≤ 170 kV pripada u razred „Srednje“ kvalitete uzimajući u obzir ovu ispitnu metodu a za temperature više od 40 °C prelazi u razred „Dobro“.
- Ispitni uzorak broj 2 sa srednjom vrijednošću napona proboja od 17 kV pri temperaturama do 30 °C za napon opreme $>72,5$ kV i ≤ 170 kV pripada u razred „Loše“ kvalitete uzimajući u obzir ovu ispitnu metodu, za temperature od 40 °C prelazi u razred „Srednje“ dok za temperature iznad 40 °C pripada u razred „Dobro“. Minimalni naponi proboja transformatorskog ulja kod kojih se to ulje može sigurno koristiti u transformatoru iznose 30 kV.
- Ispitni uzorak broj 3 sa srednjom vrijednošću napona proboja od 25 kV pri temperaturama do 30 °C za napone opreme $>72,5$ kV i ≤ 170 kV pripada u razred „Loše“ kvalitete uzimajući u obzir ovu ispitnu metodu, za temperature od 40 °C i 50 °C prelazi u razred „Srednje“ dok za temperature iznad 50 °C pripada u razred „Dobro“.

Zaključno tome, probojna čvrstoća ulja opada s padom temperature odnosno porastom viskoznosti ulja što može ometati njegovo pravilno strujanje i disipaciju topline. U nekim slučajevima, pri niskim temperaturama, ulje može početi formirati kristalne ili voskaste strukture koje smanjuju homogenost ulja i stvaraju slabije točke unutar dielektričnog materijala, povećavajući rizik od proboja. Gušće ulje također može sadržavati više mikro-mjehurića zraka ili nečistoća koje mogu djelovati kao početne točke za proboj, što naglašava važnost održavanja ulja unutar optimalnih temperaturnih granica za pouzdanu izolaciju transformatora.

7. ZAKLJUČAK

U ovome radu izvršena je analiza kvalitete transformatorskog ulja pomoću dvije metode ispitivanja dielektrične čvrstoće transformatorskog ulja. Ispitivanja su provedena na tri uzorka koji su uzeti iz transformatora različitih starosti i naponskih razina. Prva metoda obuhvaća standardno ispitivanje dielektrične čvrstoće ulja pri temperaturi ulja od 30 °C pomoću mjernog instrumenta dok druga metoda obuhvaća hlađenje uzoraka ulja te zagrijavanje na zadane temperature te ispitivanje dielektrične čvrstoće potom. Sva tri uzorka klasificirani su prema normi IEC 60156 te su rezultati ispitivanja pokazala da, prema kriteriju minimalnog napona dielektričnog proboja ulja te obzirom na naponsku razinu opreme u radu, nisu svi u najvišem razredu kvalitete već su dva uzorka niže klase od kojih je jedan svrstan u klasu „Loše“ što znači da je srednja vrijednost napona proboja ulja prema normi $<30 \text{ kV}$ za napon opreme u radu $>72,5 \text{ kV}$ i $\leq 170 \text{ kV}$, pri prvoj metodi ispitivanja. Prema drugoj metodi ispitivanja probojne čvrstoće ulja, vidljivo je kako porastom temperature raste i vrijednost napona proboja, no svakako porastom temperature to nije jedino svojstvo ulja koje se mijenja. Vizualnim pregledom uočene su određene razlike u gustoći ulja koje mogu korelirati s rezultatima dobivenih ovom metodom ispitivanja, naravno uzevši u obzir i druge faktore utjecaja pri ispitivanjima. Povećana viskoznost ulja otežava cirkulaciju ulja i smanjuje njegovu sposobnost efikasnog provođenja topline, što može dovesti do lokaliziranih pregrijavanja i dodatnog stresa na izolacijski sustav. Osim toga, važno je da ulje ima visoku vrijednost napona proboja i pri niskim temperaturama. Kada se transformator pokreće, ulje je hladno i još nije postiglo radnu temperaturu. U takvim uvjetima, transformator je najosjetljiviji na proboj. Visoka probojna čvrstoća ulja pri niskim temperaturama osigurava da transformator bude zaštićen od proboja čak i u kritičnim fazama rada. Metoda ispitivanja dielektrične čvrstoće transformatorskog ulja omogućava identifikaciju prisutnosti vlage, čestica i drugih zagađivača u ulju, koji mogu značajno utjecati na performanse i dugovječnost transformatora. Međutim, ova metoda nije dovoljna sama po sebi kao jedina dijagnostička metoda, ona ne pruža detaljne informacije o vrsti i koncentraciji zagađivača te ne može precizno identificirati vrstu i uzrok kvara, već može samo ukazati na opće smanjenje dielektrične čvrstoće ulja. Iz toga razloga provođenje isključivo ovog testa ne omogućava opširne informacije poput informacija o ranim fazama kvarova kao što su pregrijavanje, djelomični izboji i električni lukovi, prije nego što nastanu ozbiljni problemi. Ispitni uzorci koji su klasificirani u niže kategorije kvalitete u ovome radu uzorci su iz transformatora kod kojih je nužna detaljna analiza pomoću svih ostalih dostupnih metoda.

8. LITERATURA

- [1] A. Dolenc, Transformatori I i II, Elektrotehnički fakultet, Sveučilišna naklada, Zagreb, 1991.
- [2] Žarko, D.; Ćučić, B., Transformatori u teoriji i praksi, Graphis, Zagreb, 2020.
- [3] T. Münster, P. Werle, K. Hämel, J. Preusel, Thermally Accelerated Aging of Insulation Paper for transformers with different insulating liquids, dostupno na:
[file:///C:/Users/Admin/Downloads/Thermally Accelerated Aging of Insulation Paper fo.pdf](file:///C:/Users/Admin/Downloads/Thermally%20Accelerated%20Aging%20of%20Insulation%20Paper%20fo.pdf)
pristupljeno 21.05.2024.
- [4] S. Saodah, B. Eliana, i Jakariya, Influence of thermal aging on dielectric characteristics of transformer insulating oils, dostupno na:
[https://www.researchgate.net/publication/377491581 Influence of thermal aging on dielectric characteristics of transformer insulating oils](https://www.researchgate.net/publication/377491581_Influence_of_thermal_aging_on_dielectric_characteristics_of_transformer_insulating_oils), pristupljeno 21.05.2024.
- [5] A.A.H. Zaidi, N. Hussin, M. K. Mohd Jamil, Experimental study on vegetable oils properties for power transformer, dostupno na:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7409567/authors#authors>, pristupljeno 24.05.2024.
- [6] N. V. Denisova, R. Gibadullin, L. V. Dolomanyuk, A. R. Safin, Transformer Diagnostics Based on transformer oil breakdown voltage measurements, dostupno na:
[https://www.researchgate.net/publication/317346558 Transformer Diagnostics Based on Transformer Oil Breakdown Voltage Measurements](https://www.researchgate.net/publication/317346558_Transformer_Diagnostics_Based_on_Transformer_Oil_Breakdown_Voltage_Measurements), pristupljeno 24.05.2024.
- [7] D. Pantić, J. Karneluti, R. Radosavljević, Obnova sustava uljno-papirne izolacije – Regeneracija transformatorskih ulja, VIMAP d.o.o. Beograd, 12. studeni 2014.
- [8] M. Obradović, M. Krsmanović, S. Đorđević, P. Todorović, D. Šepa, P. Bojović, K. Subotić, N. Radošević, J. Ćirić, S. Mladenović, V. Dražić, O. Tatić-Janjić, V. Valent, B. Đorđević, S. Šerbanović, Z. Dizdar, Hemijski i fizički podaci i veličine, Izdavačka radna organizacija „Rad“, Beograd, pp. 830-841,1987.
- [9] M. Spohner, Study of dielectric properties of mineral oils and natural oils and methyl esters of natural oils, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Brno University of Technology (BUT), Brno, Czech Republic.

[10] Dielektrik, Dielektrična čvrstoća, dostupno na:

<https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=15003>, pristupljeno 28.05.2024.

[11] I. Vilić, Ispitivanje smjese mineralnog i esterskog ulja električnim i toplinskim metodama, dostupno na:

<https://repozitorij.fkit.unizg.hr/en/islandora/object/fkit%3A717/datastream/PDF/view>, pristupljeno 27.05.2024.

[12] I. Radić, D. Trstoglavec, V. Matun, M. Mikulić, Pregled izolacijskih tekućina primjenjivih kao tekući dielektrik i sredstvo za odvođenje topline u distributivnim transformatorima, HO Cired, 2016.

[13] I. Uglešić, Tehnika visokog napona, FER, Zagreb, pp. 14-72, 2006.

[14] E. P. Pagger, Alternative isolierflüssigkeiten im vergleich zum klassischen mineralöl, Fakultät für elektrotechnik und informationstechnik an der technischen universität Graz, pp. 4-39, 2013.

[15] C. Burks, Retrofilling mineral oil transformers with Alpha-1 fluid, pp. 1-5, dostupno na:

<http://www.disfluids.com/Retrofill%20with%20Alpha-1.PDF>, pristupljeno 20.05.2024.

[16] A. Hadži-Skerlev, B. Musulin, A. Mareković, Biorazgradiva transformatorska ulja, HRO CIGRE, Cavtat, 2007. dostupno na: <https://www.croris.hr/crosbi/publikacija/prilog-skup/531015>, pristupljeno 22.05.2024.

[17] J.Sanchez, M.Banović, A general overview of power transformer diagnosis, Transformers Magazine Vol. 1 Issue1, pp. 38-42

[18] S.Gazivoda, A.Mikulecky, Dijagnostika distribucijskih transformatora, 1. savjetovanje HO CIREC, str. 1-10, Šibenik, 18-21. svibnja 2008.

[19] Objavljeni zakoni Republike Hrvatske, Narodne Novine, dostupno na:

<https://narodnenovine.nn.hr/search.aspx>, pristupljeno 20.05.2024.

[20] Zakon o zaštiti okoliša, dostupno na: <https://sredisnjikatalogrh.gov.hr/>, pristupljeno 21.05.2024.

[21] Pravilnik o gospodarenju otpadnim uljima, dostupno na: <https://sredisnjikatalogrh.gov.hr/> pristupljeno 21.05.2024.

[22] Pravilnik o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada, dostupno na: <https://sredisnjikatalogrh.gov.hr/>, pristupljeno 21.05.2024.

[23] Pravilnik o električnoj opremi, dostupno na: <https://sredisnjikatalogrh.gov.hr/>, pristupljeno 21.05.2024.

[24] Pravilnik o tehničkim zahtjevima za elektroenergetska postrojenja nazivnih izmjeničnih napona iznad 1 kV, dostupno na:

https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2010_09_105_2834.html,

pristupljeno 02.07.2024.

[25] Zakon o normizaciji, dostupno na:

https://www.zakon.hr/z/518/Zakon-o-normizaciji#google_vignette,

pristupljeno 27.05.2024.

[26] Međunarodna elektrotehnička komisija, dostupno na:

<https://tehnicki.lzmk.hr/clanak/medjunarodna-elektrotehnicka-komisija>,

pristupljeno 28.05.2024.

[27] IEC 60156, Insulating liquids - Determination of the breakdown voltage at power frequency - Test method, 2018.

[28] NYNAS, službena stranica, dostupno na: <https://www.nynas.com/en/products/transformer-oils/products/nytro-4000x>, pristupljeno 02.07.2024.

[29] Transformer Oil Y3000, službena stranica,

dostupno na: <https://www.scribd.com/document/200098489/Nynas-Y3000-10-ENG-PDS-pdf>, pristupljeno 02.07.2024.

9. SAŽETAK

U ovome diplomskome radu opisana je podjela izolacijskih tekućina kod transformatora, obrađene su dijagnostičke metode za analizu izolacijskih tekućina te su prikazani zakoni i norme za uporabu transformatorskih ulja. Navedene stavke potrebno je poznavati kako bi se razumjeli postupci rada transformatora te postupci dijagnostike i održavanja transformatora. Pomoću tri ispitna uzorka ulja u praktičnom dijelu rada napravljena je analiza kvalitete ulja metodom ispitivanja dielektrične čvrstoće ulja pri temperaturi uzoraka od 30 °C u prvom dijelu te pri hlađenju te ponovnom zagrijavanju uzoraka ulja na željene temperature, u drugome dijelu . Analizom rezultata dobivenih ispitivanjem pomoću mjernog uređaja Megger OTS60PB zaključeno je kako dva od tri ispitna uzorka ne pripadaju najvišem razredu kvalitete prema kriteriju minimalne vrijednosti napona dielektričnog proboja prema normi IEC 60156 koja je korištena u ovome radu te da vrijednost napona proboja snižavanjem temperature pada, odnosno da porastom temperature se ta vrijednost uvećava.

Ključne riječi: transformatorsko ulje, dielektrična čvrstoća, kvaliteta ulja.

10. ABSTRACT

In this thesis, the classification of insulating fluids in transformers is described, diagnostic methods for the analysis of insulating fluids are covered, and laws and standards for the use of transformer oils are presented. Understanding these elements is essential for comprehending the operational procedures of transformers as well as the diagnostic and maintenance procedures for transformers. In the practical part of the work, the quality of three oil samples was analyzed using the dielectric strength testing method. This analysis was conducted at an initial sample temperature of 30°C in the first part and involved cooling and reheating the oil samples to desired temperatures in the second part. Based on the results obtained from testing with the Megger OTS60PB device, it was concluded that two out of the three tested samples do not meet the highest quality grade according to the minimum dielectric breakdown voltage value criteria specified by the IEC 60156 standard used in this study. Additionally, it was observed that the breakdown voltage decreases with a reduction in temperature and increases with a rise in temperature.

Keywords: transformer oil, dielectric strength, oil quality.

11. ŽIVOTOPIS

Stefani Belik rođena je u Osijeku 06.08.1999. godine. Pohađala je osnovnu školu Dalj u Dalju. Srednju školu upisuje 2014. godine i odabire upis u I. Gimnaziju Osijek. Po završetku srednje škole 2018. godine upisuje Fakultet elektrotehnike računarstva i informacijskih tehnologija u Osijek smjer Elektrotehnika i informacijska tehnologija na drugoj godini odabire izborni blok Elektroenergetika. Nakon završetka preddiplomskog sveučilišnog studija nastavlja svoje obrazovanje 2022. godine upisom diplomskog studija elektrotehnike, smjer Elektroenergetika, izborni blok Elektroenergetski sustavi. Na drugoj godini diplomskog studija postaje stipendist HEP-ODS-a d.o.o., Elektroslavonija Osijek. Stručnu praksu odrađuje u Odjelu za upravljanje mrežom u Elektroslavoniji u Osijeku.

Potpis autora