

Edukacioni prilaz metoda ispitivanja kod strujnih transformatora

Aleksandar Todorović, Tomislav Rajić, Mileša Srećković, Dragan Pavlović

Apstrakt—Savremena civilizacija ima već odavno svoju bogatu tehničku heritologiju. Sa inženjerskim prilazom postoji bezbroj načina transformacija energije raznih vidova, što pripada i sa tehničke strane veoma složenoj problematici. Industrijske revolucije su na svoj način pratile i metode transformacije energije od fundamentalnih energetske vidova za opstanak civilizacije do savremenih masmedija delatnosti. Putevi su bili sa jedne strane ka minijaturizaciji savremenih sistema, a sa druge strane se radilo o kapitalnim industrijskim kompleksima. Menjani su i trendovi. Strujni transformator kao statički električni uređaj funkcioniše na principu elektromagnetne indukcije. U zadacima elektromagnetske sprege i prenosima energije sa niskonaponske na visokonaponsku stranu i obrnuto, nalazi se niz problema koji su rešavani na bazi Faradejevih zakona. U izboru mnogobrojnih razvijenih transformatora od mikroskopskih dimenzija, gde se pojavljuju problemi trimovanja, do makroskopskih uređaja (nekoliko tona), nalazili su se zadaci ne samo prirode rada i odabira materijala jezgra, i tipova namotaja, do mehaničkih termodinamičkih, akustičkih, ekoloških i drugih osobina, uključujući i njihovo uklapanje u ambijent, gde se nalaze. Za pitanja bezbednosti za osoblje koje radi sa njim i posetilaca postrojenja, sigurno da su nezaobilazne mere bezbednosti sa nekoliko aspekata zaštite. Gubici transformatora su posebno složena oblast s obzirom na njihovu prirodu ili drugi način podele. Metodi merenja koji kontrolišu razne režime rada transformatora i njihovo stanje od prvobitnog puštanja u pogon do kraja radnog veka su posebna oblast, koja je ujedinila razne vrste deskripcije karakteristika koje su po prirodi, uslovno električna, optička sa savremenom podelom na metode nekoherentne i koherentne tehnike.

Ovaj rad analizira savremenu aktuelnu problematiku u oblasti transformatora sa izabranim studijama slučaja i sa uključenjem različitog ugla gledanja na materijale za transformatore i na brze metode kojima se može posle modelovati dati eksperiment sa uključenjem raznih oblasti: veze transformatora sa laserskom tehnikom.

Ključne reči— strujni transformator, materijali, laserska tehnika.

U ovom delu treba dati isključivo podatke o afilijaciji. Molimo NE ušite ovde zahvalnice za finansiranje. Koristite specijalno nenumerisanu sekciju

Zahvalnica na kraju članka, neposredno pre liste referenci.

Kada navodite trenutnu afilijaciju autora, molimo dajte punu poštansku adresu i elektronsku poštu za sve autore kao i ORCID (Jedinstveni identifikator istraživača), kako sledi. Više o ORCID: <https://orcid.org>.

Aleksandar Todorović, Gimnazija Stevan Puzić, Ruma, Partizanska bb, 22400 Ruma, Srbija (e-mail:)

Tomislav Rajić, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: rajiic@etf.rs)

Mileša Srećković, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: Sreckov@etf.bg.ac)

Dragan Pavlović, Lola Institut, Beograd, Kneza višeslava 70a, 11030 Beograd, Srbija (e-mail: dragan.pavlovic@li.rs)

I. UVOD

Poslednjih nekoliko godina se čini da je ne samo u našoj državi već i u celom svetu postalo jasno da su problemi energetske prorode među najvažnijim problemima kojima se čovečanstvo treba da posveti. U stručnoj literaturi se već pojavljuju tematike kolonizacije Marsa a mnogobrojni časopisi i konferencije raznorodnih tematika razmatraju dalju budućnost planete. Krajem 19. veka su se pojavljivali radovi za koje se činilo da su futuristički, a ticalo se procene porasta temperature Zemlje zbog zagađene atmosfere ili brzinom rasta čovečije kose. Pre 50 godina praćenja Lajke, ekipe Luja Armstronga, puštanjem prvog satilita u Kini koji su naši dopisnici propratili počele su da se tematike sa kraja tog veka ozbiljnije shvataju i da se sa astronomskih gledišta procenjuje mogućnost boravka na ovoj planeti.

Sa druge strane, zavisno od srednjih škola i trenutnih programa, do master i doktorskih studija na raznim fakultetima (u zemlji ili u inostranstvu) postavlja se pitanje nivoa, formalizama i približavanja u edukacione svrhe: problemima energetike, pitanju transformacije energije, razvoj novih sistema dobijanja energije ali i realnom gledanju na postojeće sisteme koje treba održavati, modifikovati i popravljati. Poseban je zadatak i u probuditi interes za nove ideje ali izbeći proglašavanje nečeg kao novog nepoštovanjem potvrđenih puteva u elektrotehnici i metrologiji.

Transformator kao statički električni uređaj funkcioniše na principu zakona Majkla Faradeja (princip elektromagnetne indukcije). Podrazujeva se u svim prilazima koji transformišu električnu energiju u električnu energiju iste frekvencije, sa promenjenim parametrima. Prilikom transformisanja energije, bitno je da gubici budu što manji, da koeficijent korisnog dejstva bude što veći. Podrazumeva da se teži idealnim transformatorima. Transformatori kod kojih nema gubitaka energije se nazivaju savršenim transformatorima [1, 2].

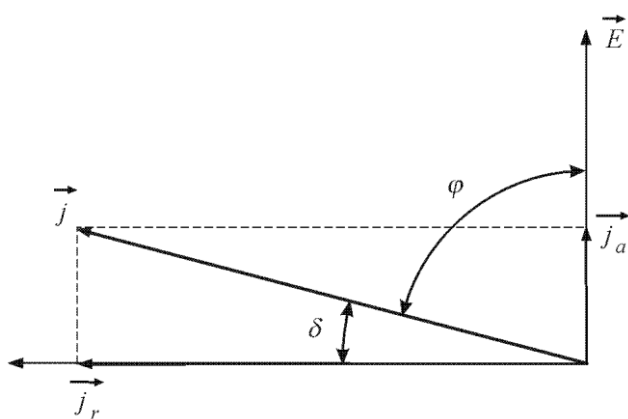
Pri nadzoru, upravljanju i zaštiti električnih postrojenja, mreža i uređaja potrebno je a i ostvaruje se redovno merenje raznih veličina, gde su osnovni merenje struje i napona. U ovom radu pažnja je usmerena ka strujnim mernim transformatorima. Premise koje se poštuju ponavljamo kroz: uloga strujnih transformatora je da primarne struje elemenata elektroenergetskog sistema transformišu na vrednosti koje su u skladu sa naznačenim strujama mernih i zaštitnih uređaja, i da te uređaje pouzdano odvoji od primarnih kola, zbog bezbednosti osoblja. Izolacija je sačinjena od ulja i neophodna je redovna provera stanja izolacije kako bi se odredila potreba za njenom zamenom [3].

Od mnogobrojnih merenja koja se rade u praksi, u ovom

radu će se govoriti o otpornosti izolacije i parcijalnim pražnjenjima u ulju. Vlaga i nečistoće najviše utiču na dielektrične osobine uljne izolacije. Uljno-papirnu izolaciju sa absorbovanom vlagom karakterišu niže vrednosti otpornosti izolacije i indeksa polarizacije [3, 4]. Starenje izolacije generalno dovodi do sniženja izolacione otpornosti, a u izvesnoj meri i do sniženja indeksa polarizacije, naročito ako usled starenja dolazi do izdvajanja taloga ulja po namotaju. Parcijalno pražnjenje predstavlja fenomen višestrukih električnih proboja ograničenih na neku lokalnu oblast izolacionog materijala. Prikazane su metode merenja otpornosti izolacije i parcijalnih pražnjenja kao i referentne vrednosti za procenu stanja izolacije na osnovu izmerenih vrednosti.

II. FAKTOR DIELEKTRIČNIH GUBITAKA

Dielektrični gubici kao važna karakteristika dielektričnih materijala, predmet su mnogobrojnih istraživanja polazeći od nauke o materijalima koje se konstatuje kao disciplina sa najvećim gradijentom rasta. Često se uključivanjem kompleksnog zapisa u glavne funkcije odziva materijala (ϵ , μ , σ) istražuje sa bogatom istorijom međusobna veza ove tri veličine. Jednostavnijim pristupom u odnosu na čestu podelu (provodnici, poluprovodnici i dielektrici uz mnogo međutipova) se kao najpogodnija veličina koristi faktor snage ($\text{tg}\delta$, Slika 1) [3, 4].



Sl. 1. Vektorski dijagram struja i uglova u dielektriku.

Treba se podsetiti da je ugao $\phi \approx \pi/2$, a za karakteristiku dielektričnih gubitaka uzima se ugao δ (ugao gubitaka), koji se definiše kao:

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \phi \quad (1)$$

odnosno tangens ovog ugla, koji predstavlja odnos gustine aktivne i reaktivne struje:

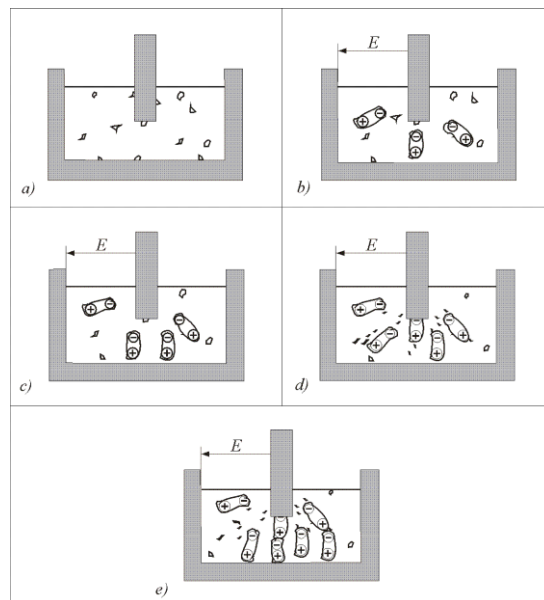
$$\text{tg } \delta = \frac{j_a}{j_r} \quad (2)$$

Faktor dielektričnih gubitaka ($\text{tg}\delta$) je makroskopska veličina, i njegova zavisnost od frekvencije, temperature i jačine električnog polja, značajna je za određivanje oblasti primene dielektričnih materijala. U realnom svetu potrošača, proizvođača i onih koji planiraju potrošnju energetskih resursa i trendove transformacija energije sa inženjerskim pristupom.

A. Erozioni proboj ulja

Proboj materijala pa i tečnosti i gasova i čvrstog tela je predmeto koji je i pre formiranja naučnih oblasti koji se bave vrstom proboja-električnog pražnjenja, bio prisutan na planeti od postanka. Bezbroj istraživanja sa ciljem da se problematika usmeri u pozitivnom smeru (u odnosu na primene energetskih odnosa pri procesima električnih pražnjenja), i učešćem razvoja tehnike u usmeravanju vremenskom i prostornom predupređivanja nemilih događaja. Istorijski razvojem gromobrana na raznim principima, mikrotalasnih zračenja kroz raketa koje izazivaju planirana pražnjenja, uključanjem laserskih tehnika itd. Bazični pristup pražnjenjima je modifikovan [3, 4].

Parcijalno pražnjenje kao fenomen višestrukih električnih proboja, ograničenih na neku lokalnu oblast izolacionog materijala, u zavisnosti od prirode tečnosti i gasa, kao i od lokalnih uslova je direktno povezano sa oblašću strujnih transformatora koji imaju uljnu izolaciju. Procesi u kojima se razvijaju gasni mehurovi unutar ulja multiplikativnim mehanizmom se mogu povećavati ili smanjivati. U tečnostima sa velikim koeficijentom apsorpcije parcijalno pražnjenje se brzo gasi dok je u suprotnom slučaju intenzivnije parcijalno pražnjenje. Uspostavljena povratna sprega između parcijalnog pražnjenja i dimenzija gasnih mehurova u tečnom dielektriku može dovesti do premošćenja međuelektrodnog prostora gasnom fazom, nakon čega dolazi do proboja klasičnim multiplikativnim mehanizmom. Parcijalna pražnjenja u tečnim dielektricima mogu da dovedu do razlaganja materijala elektroda, što vodi do nastajanja čestica nečistoća koje mogu prouzrokovati proboj premošćenjem [3].



Sl. 2. Faze erozionog proboja tečnog dielektrika.

Predmet istraživanja pražnjenja se praktično može da veže sa teoretske i praktične strane za oblasti koje se neguju na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Pojedine faze erozionog proboja su: a) gasni mehurovi, produkti razlaganja i strane čestice u tečnosti i na elektrodama; b) nastajanje unutrašnjih parcijalnih pražnjenja; c) mehanizam premošćenja, uz orijentaciju nastalih čestica u pravcu polja;

d) nastajanje parcijalnih mostova, potiskivanje polja i formiranje gasnih mehurova, kao i nastajanje procesa električnog pražnjenja u gasovima; e) nastajanje provodnog kanala sastavljenog od parcijalnih mostova [3] su predmet različitog modelovanja organizovanih eksperimenata i približavanja atmosferskog pražnjenja.

Erozioni mehanizam proboja tečnosti sevezuje za električni tip proboja. Delovanje spoljašnjih faktora bitno doprinosi promeni stanja tečnih dielektrika pogotovo temperature.

Sa povećanjem spoljašnjeg pritiska tečnog dielektrika dolazi do povećanja vrednosti probojnog napona, jer se tako povećava i pritisak u gasnoj fazi, odnosno otežava električno pražnjenje u njoj. Smanjenjem pritiska ispod atmosferskog može doći do izdvajanja gasova iz tečnosti, što rezultuje opadanjem njene dielektrične čvrstoće [3].

Postojanje primesa u tečnosti bitno utiče na njena dielektrična svojstva, bilo da su nekontrolisane i neželjene (nečistoće), bilo da su namenski dodavane (aditivi). Najveću ulogu od svih nečistoća ima voda, odnosno vlaga u ulju. Ona smanjuje dielektričnu čvrstoću ulja, koja još više opada ako osim prisustva vlage u ulju postoje higroskopne čestice, kao što su celulozna vlakna, pošto u tom slučaju mogu da se formiraju provodni mostovi unutar dielektrika. Neželjene primese mogu da se indukuju raznim procesima, od kojih je najčešći proces oksidacije u ulju. Proces oksidacije ulja vodi formiranju jedinjenja kao što su kiseline, aldehidi, peroksidi, hidroperoksidi, ketoni i alkoholi, koji ne samo da utiču na dielektričnu čvrstoću ulja, već bitno menjaju i njegova ostala dielektrična svojstva. U cilju popravljavanja stabilnosti ulja na uticaj oksidacije, dodaju im se antioksidansi i metalni deaktivatori (metalni deaktivatori sprečavaju katalitičko dejstvo metala na oksidaciju ulja).

III. ISPITIVANJE IZOLACIJE STRUJNIH MERNIH TRANSFORMATORA

Problematiku izolacije strujnih mernih transformatora danas treba sagledavati sa ugla najviših napona (750 kV) do najnižih nivoa transformacije. Niže vrednosti treba da budu prilagođene mernim instrumentima, brojilima, zaštitnim i kontrolnim uređajima. Za strujne transformatore važi da je sekundarna struja, u normalnim uslovima rada, proporcionalna primarnoj struji, a razlikuje se za ugao između fazora struja na primaru i sekundaru koji je približno jednak nuli. Nastupanje prodora metoda optike (koherentne optike), elektrooptike, optoelektronike, magnetooptike, Kerovog, Faradejevog i Pokelsovog efekta olakšava se odnosno povećava se stepen sigurnosti u metrologiji posvećenoj ovoj problematici.

Novi strujni transformatori moraju da prođu procese ispitivanja propisanih od strane nadležnih organa. Propisano je i periodično proveravanje oštećenja i da su svi relevantni parametri u dozvoljenim granicama, među kojima je jedan od najvažnijih faktor dielektričnih gubitaka [3, 4].

U grupu osnovnih ispitivanja vezanih za izolaciju su [3]:

- ispitivanje izolacije između sekcija primarnih i sekundarnih namotaja i između sekundarnih namotaja naponom mreže,
- ispitivanje izolacije između navoja,

- merenje otpornosti izolacije i određivanje indeksa polarizacije,
- merenje kapacitivnosti i faktora dielektričnih gubitaka,
- ispitivanje parcijalnih pražnjenja.

A. Merenje kapacitivnosti i faktora dielektričnih gubitaka

Merenje kapacitivnosti i faktora dielektričnih gubitaka primenjuje se samo kod transformatora sa primarnim namotajem uronjenim u tečnu izolaciju-ulje. Vrednost kapacitivnosti i faktora dielektričnih gubitaka $tg\delta$ moraju da se odnose na naznačenu frekvenciju i na naponski nivo koje su date u Tabeli 1 [2-4].

TABELA I
Referentne vrednosti ugla gubitaka [4]

U_n (kV)	tg δ (%) na 20°C		
	I grupa	II grupa	III grupa
≤ 35	-	-	-
110	$\leq 0,6$	$\leq 1,0$	> 1
220	$\leq 0,5$	$\leq 0,7$	$> 0,7$
380	$\leq 0,5$	$\leq 0,7$	$> 0,7$

Značenje podele po grupama su sledeća:

- I grupa - stanje transformatora je dobro,
- II grupa - stanje transformatora je loše, postoji sumnja na kvar – preporučuje se ponovna kontrola,
- III grupa – stanje transformatora nezadovoljavajuće – preporučuju se detaljnija ispitivanja i analiza.

Izmerene vrednosti se mogu preračunati na druge temperature, nižu ili višu temperaturu množenjem ili deljenjem sa koeficijentom K (Tabela 2) [4].

Za merenje faktora dielektričnih gubitaka i kapacitivnosti primenjuje se nekoliko mernih metoda [4]:

- Metoda Šeringovog mosta,
- Metoda transformatorskog (Glinovog) mosta ili
- Metoda vatmetra za mali $\cos\phi$.

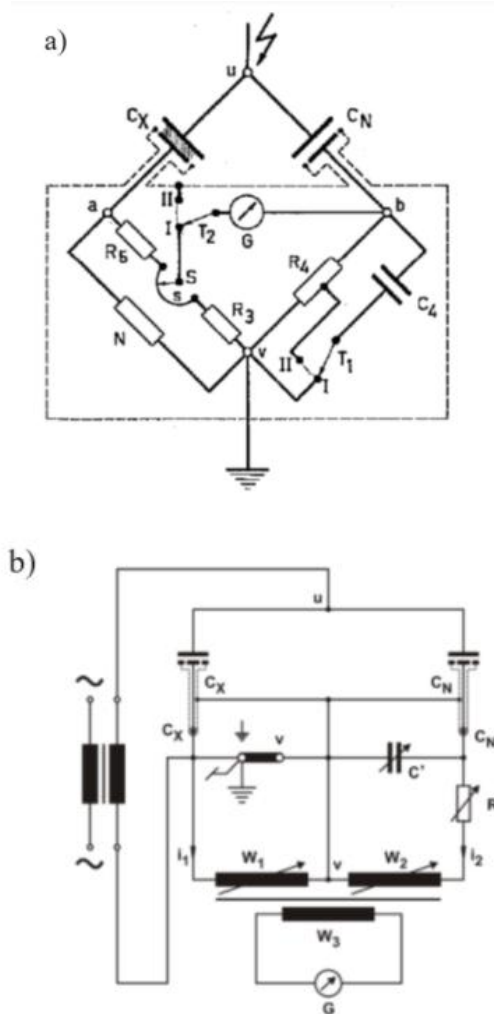
Kod mernih mostova tipa Šeringa i Glina metoda se zasniva na poređenju struja kroz dve visokonaponske grane mosta. Kroz jednu visokonaponsku granu zatvara se struja ispitivanog objekta (ispitivanog strujnog transformatora), a kroz drugu struja etalon-kondenzatora. Kod Šeringovog mosta ravnoteža se postiže promenom vrednosti otpornosti i kapacitivnosti niskonaponskih grana mosta, a ona se kontroliše selektivnim elektronskim indikatorom nule. Šema veza za merenja faktora dielektričnih gubitaka uz pomoć Šeringovog mosta, prikazana je na slici 3a [3, 4].

TABELA II

Različite vrednosti koeficijenta K za različite vrednosti ΔT

$ \Delta T $ (°C)	K
1	1,03
2	1,06
3	1,09

4	1,12
5	1,15
10	1,31
15	1,51
20	1,75
25	2,00
30	2,30



Sl. 3. Propisane metode za merenje kapacitivnosti i faktora dielektričnih gubitaka izolacije strujnih mernih transformatora: a) Šeringov most b) Glinov most [4].

Uslov ravnoteže Glinovog mosta je jednakost magnetnopoludnih sila namotaja koji obuhvataju zajedničko magnetno kolo. Uravnoteženje Glinovog mosta ostvaruje se promenom odnosa navojaka dva namotaja, kao i dodatnom odgovarajućom promenom otpornosti i kapacitivnosti kojom se podešava struja u namotaju. Na slici 3b prikazana je šema vezivanja aparature za merenja faktora dielektričnih gubitaka Glinovim mostom [3, 4].

B. Ispitivanje parcijalnih pražnjenja kod strujnih transformatora

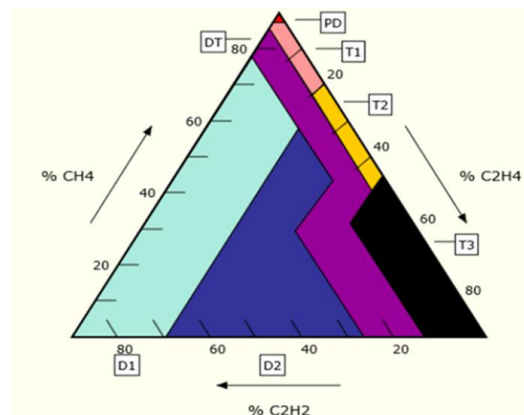
Vremenom dolazi do degradacije izolacije u strujnom transformatoru. Tada se u ulju pojavljuju gasni mehurovi i izolacija nije kompaktna. U takvim slučajevima, unutar mehurova dolazi do proboja gasa, odnosno parcijalnih pražnjenja. Sve to ubrzava propadanje izolacije i rana

detakcija je od velike važnosti. Sa današnjeg stepena merne tehnike razvijeni su i komercijalni uređaji za razne načine merenja. Neke od njih su merenje parcijalnog pražnjenja. Mogu postojati dva pristupa. Jedan je merenje dok je strujni transformator u pogonu, a drugi kad je isključen. Prednosti prvih su što se strujni transformator *ne isključuje*, ali su zato ove metode manje pouzdane. Prednosti drugih su sigurnost u proceni, ali je mana što se transformator mora *odvojiti od mreže*.

Generalno, postoji više pristupa za ispitivanje parcijalnog pražnjenja u ulju strujnog transformatora:

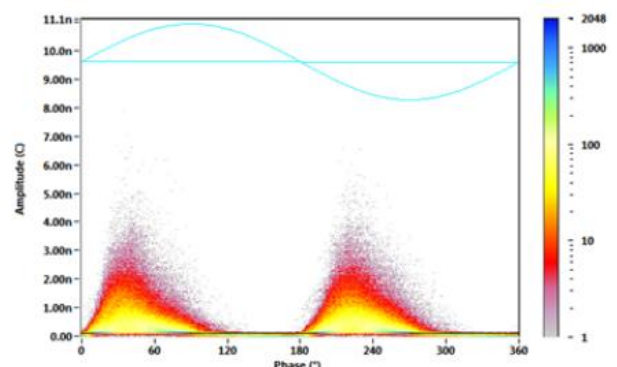
- gasna analiza,
- akustička metoda,
- naponski signali.

Među najpoznatijim gasnim analizama za ove svrhe je ispitivanje pomoću Duvalovog trougla, slika 4. Određivanjem procenta nekog gasa u ulju, zaključuje se u kakvom je stanju izolacija.



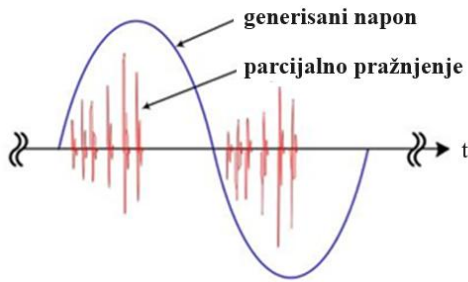
Sl. 4. Duvalov trougao.

Akustička metoda se koristi bez isključivanja transformatora sa mreže. Pomoću mikrofona, detektuju se zvučni talasi koji se emituju u transformatoru. Na osnovu analize zvučnog spektra, zaključuje se da li unutar transformatora postoji parcijalno pražnjenje. Jedan tipičan spektar je prikazan na slici 5.



Sl. 5. Detekcija parcijalnih pražnjenja UHF metodom.

Konačno, parcijalno pražnjenje se može detektovati i pomoću signala napona, koji se generiše na priključcima transformatora, slika 6.

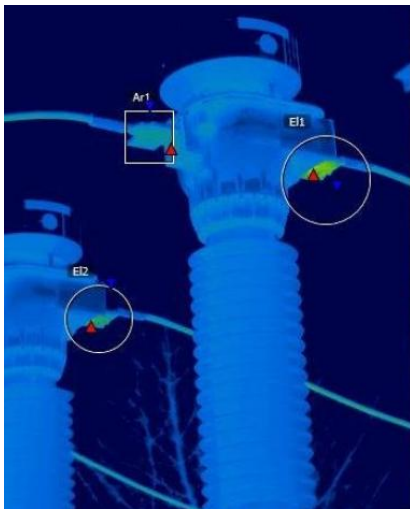


Sl. 6. Generisani napon i parcijalno pražnjenje.

IV. DRUGE METODE ISPITIVANJA STRUJNIH MERNIH TRANSFORMATORA-TERMOGRAFIJA

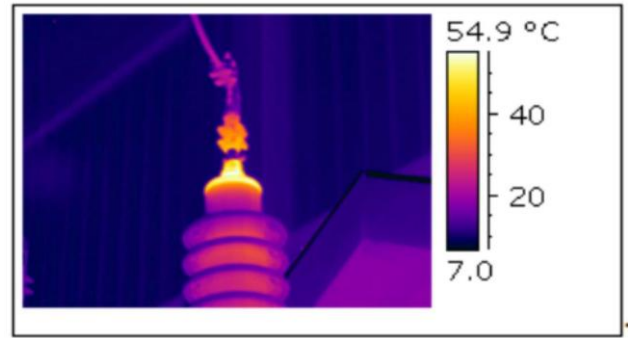
Infracrvena termografija kao nauka/tehnika o prikupljanju i analizi informacija dobijenih uz pomoć uređaja za beskontaktno dobijanje termičkih slika [6-8] od vremena Heršela do danas je ekonomski postala relativno pristupačna tehnika za mnogo oblasti od medicine, do praćenja oblekata u prostoru do najjednostavnijih električnih šema i kontrole njihovog rada. Pre gotovo pola veka u Kanadi su na predmetima gde su korišćene elektročne šeme paralelno postavljene termalne šeme pri redovnom radu uređaja snimljene termografskim tehnikama. I jedne i druge su podržane računarskim programima. Tako se metoda koja se koristila samo uz visokobudžetna istraživanja u vojsci, vazduhoplovstvu danas koristi u širokom krugu problema (ekoloških, šumarstvu do medicine i proveravanje rada električnih uređaja...).

U području rada transformatora može se pratiti generalna slika regularnog rada ili pratiti detalji stanja priključaka i njihova temperature, slika 7 [8, 9].



Sl. 7. Termografija strujnog transformatora.

Na slici 8 [8] je prikazan primer grejanja na provodnom izolatoru nastalog usled dielektričnih gubitaka.



Sl. 8. Grejanje usled dielektričnih gubitaka.

Neispravnost [9] je registrovana nakon višestrukih termovizijskih kontrola u periodu od godinu i po dana. Jasno se može videti mesto povećanja stepena zagrejanosti.

V. ZAKLJUČAK

Strujni transformatori su se potvrdili u višedecenijskoj upotrebi da imaju veliku i važnu ulogu u elektroenergetskim sistemima. Zadatak je da verno prenesu informaciju o struji prema uređajima za zaštitu ili obračun električne energije je složen. U ovom radu, akcentat je stavljen na strujne transformatore sa uljnom izolacijom i nadzor stanja uljne izolacije. Od mnogobrojnih merenja, koja se vrše u praksi, ovde su analizirani otpornosti izolacije, parcijalna pražnjenjima u ulju, odnosno o gasnoj analizi ulja. Vlaga i nečistoće, najviše utiču na dielektrične osobine uljne izolacije. Analizirane su metode merenja kapacitivnosti i faktora dielektričnih gubitaka kao i referentne vrednosti za procenu stanja izolacije na osnovu izmerenih vrednosti. Dat je pregled metoda koje se koriste za detekciju parcijalnog pražnjenja u ulju strujnog transformatora. Dat je pregled termografskog pristupa rada strujnog transformatora. Različiti metodi i načini za određivanje stanja izolacije se mogu vršiti na mnogo načina. Treba razlikovati metode koje dopuštaju propisi i potencijalno predlagati nove sa uključenjem savremenih trendova metrologije i ocene nesigurnosti merenja.

ZAHVALNICA

OVAJ RAD JE FINANSIJSKI PODRŽAN OD STRANE MINISTARSTVA NAUKE, TEHNOLOŠKOG RAZVOJA I INOVACIJA REPUBLIKE SRBIJE POD UGOVOROM BROJ: 451-03-65/2024-03/200103

LITERATURA

- [1] J. Nahman, V. Mijailović, „Razvodna postrojenja“, Drugo izdanja, Akademski misao, Beograd, 2015.
- [2] Diplomski rad o uljnim transformatorima - Milan Todorović
- [3] T. Rajić, K. Stanković, Đ. Čubrić, Ispitivanje induktivnih naponskih mernih transformatora-otpornost izolacije i parcijalna pražnjenja, CIGRE Srbija, Zlatibor, 2023.
- [4] Interni standard EMS AD, IS-EMS 413:2018, Ispitivanje strujnih mernih transformatora
- [5] Rezaei-Zare, A., Iravani, R., Sanaye-Pasand, M., Mohseni, H., Farhangi, S. (2008). An accurate hysteresis model for ferroresonance analysis of a transformer. IEEE transactions on power delivery, 23(3), 1448-1456.
- [6] Čičkarić, L. (2009). Primena termografije u dijagnostici toplotnih stanja energetskih transformatora. Zbornik radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla, 19, 249260.

[7] N. Hadžiefendić, Uticaj loših električnih kontakata na nastanak početnog požara i metoda za njihovo otkrivanje u niskonapondkim električnim instalacijama, doktorska teza, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 2019. godina.

[8] D. Knežević, Karakterizacija termovizijskih sistema sa panoramskim prikazom za nadzor pokretnih objekata, doktorska teza, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 2021. godina.

[9] A. Todorović, Modelovanje gubitaka energije u strujnom transformatoru, Centar za talente Beograd 2, 2024. godine.

[10] Kamerla, I. (2009). Utjecaj hrapavosti površine na vrijednost izmjerene tvrdoće (Doctoral dissertation, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje).

[11] Živković, S. M. (2018). Primena spektroskopije plazme indukovane impulsnim ugljendioksidnim laserskim zračenjem za kvalitativnu i kvantitativnu analizu čvrstih uzoraka (Doctoral dissertation, Univerzitet u Beogradu-Hemijski fakultet).

[12] Momcilovic, M., Zivkovic, S., Petrovic, J., Cvijovic-Alagic, I., Ciganovic, J. (2019). An original LIBS system based on TEA CO2 laser as a tool for determination of glass surface hardness. Applied Physics B, 125(11), 222.

ABSTRACT

Modern civilization has had its rich technical heritology. With an engineering approach, there are countless ways of transforming energy of various kinds, which also belong to a very complex issue from the technical side. The industrial revolutions (1-6?) followed in their own way the methods of energy transformation from the fundamental forms of energy for the survival of civilization to modern mass media activities. On the one hand, the roads were towards the miniaturization of modern systems, and on the other hand, it was about capital industrial complexes. Trends have also changed. Current transformer as a static electrical device, functions on the principle of electromagnetic induction. In the tasks of electromagnetic coupling and energy transfers from the low-voltage side to the high-voltage side and *vice versa*, there are a number of problems that are solved on the

basis of Faraday's laws. In the selection of numerous developed transformers from microscopic dimensions, where trimming problems appear, to macroscopic devices (several tons), there were tasks not only of the nature of work and the selection of core materials and types of windings, but also mechanical, thermodynamic, acoustic, ecological and other properties, including their fit into the environment where they are located. Safety issues for the people who serve it and the visitors of the plant, certainly are unavoidable safety measures with several aspects of protection. Transformer losses are a particularly complex area due to their nature or other way of dividing them. Measurement methods that control various modes of transformers and their condition from initial commissioning to the end of their working life are a special area that united various types of description of characteristics that are by nature, conditionally electrical, optical with a modern division into methods of incoherent and coherent techniques. This paper analyzes contemporary current problems in the field of transformers with selected case studies and with the inclusion of a different angle of view on materials for transformers and on fast methods that can be used to model a given experiment with the inclusion of various fields: the connection of transformers with laser technology.

Educational approach to testing methods for current transformers

Aleksandar Todorovic, Tomislav Rajic, Milesa Srećkovic,
Dragan Pavlovic