

PRIMENA TERMOGRAFIJE U DIJAGNOSTICI TOPLITNIH STANJA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

Ljubiša Čičkarić
Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd

Kratak sadržaj: Termografija je danas, zajedno sa analizom vibracija, jedna od dominantnih metoda u dijagnostici kvarova u industriji i elektroprivredi. Prednost ove metode je što se sprovodi u toku normalnog rada postrojenja bez zaustavljanja ili ometanja funkcionisanja elemenata ili aparata. Iako stepen zagrejanosti nije uvek idealan indikator problema u elementima električnog sistema, izraženo grejanje usled povećanog električnog otpora često prethodi kvarovima.

U elektroprivrednim objektima se dijagnostika termičkog stanja postrojenja i opreme ostvaruje kroz sistematska termografska ispitivanja u sklopu programa preventivnog održavanja. Time se omogućava plansko obavljanje remonata i smanjenje troškova ukupnog održavanja. Termografsko praćenje termičkog stanja u potpunosti zadovoljava zahteve savremenih tehnoloških rešenja i eksploracije opreme.

U radu su prezentovani primjeri ispitivanja i kontrola energetskih transformatorima, gde je termografija uvedena kao dijagnostička metoda ili kao pomoćna metoda, koja dalje inicira ispitivanja drugim metodama. Primena termografije je proizašla iz dugogodišnjeg rada na ovom polju, koristeći se bogatim iskustvima i zapažanjima korisnika tokom praćenja stanja opreme u eksploraciji.

Ključne reči: termografija/termovizija, temperatura, dijagnostika, preventivno održavanje, energetski transformator

1. UVOD

Zagrevanje je fizička pojava čiji su parametri od velike važnosti pri praćenju stanja i ocenjivanju rada opreme, instalacija i tehnoloških procesa u postrojenjima različitih namena. Odstupanja od normalnih vrednosti stepena zagrejanosti nekog tela govore o promeni nekog svojstva, pa nedostatak kontrole nad tom promenom može ugroziti siguran rad aparata i opreme u postrojenjima i poremetiti tehnološki proces, smanjujući ukupnu pouzdanost sistema. Da bi se izbegle neželjene posledice takvih dešavanja, u upotrebi su instrumenti i merni sistemi, koji brzo, tačno i pravovremeno mere zagrevanje tačaka ili površina od interesa.

Vrednost temperature - njena visina, raspodela ili odstupanje od normalne vrednosti, daje elemente za procenu stanja. Otkrivanje promena u provođenju topote kroz ili van nekog aparata, izazvane neispravnim radom samog aparata ili stvaranja barijera u provodnim delovima su jedan od ciljeva praćenja temperature.

Praćenjem temperature se dobija ocena termičkog stanja, koja omogućava blagovremeno pronalaženje neispravnih elemenata u opremi, instalacijama i u

sprečavanju težih kvarova. Istovremeno se dobijaju podaci za statističku analizu i procenu kvaliteta aparata, trajnosti opreme i periodičnosti akcija održavanja.

Merenje temperature se uslovno može podeliti na dve kategorije: kontaktno i beskontaktno. Kontaktni uređaji za merenje temperature poput termoparova, termistora i termometara različitih konstrukcija su široko primjenjeni u različitim oblastima ljudskih delatnosti. Zasnovani su na principu topotne ravnoteže između mernog tela i mernog uredaja, zbog čega je za tačno merenje temperature neophodno imati dobro ostvaren kontakt mernog uredaja sa telom, čija se temperatura meri. Za njih je karakterističan sporiji odziv, ali, i njihove cene su niže. Beskontaktni termički senzori mere energiju topotnog zračenja, koja se emituje sa posmatranog objekta. Njih karakteriše daleko brži odziv (reda ms). Reč je o pasivnim uređajima, čija primena ne zahteva prekid niti ometanje normalnog rada postrojenja ili sistema.

2. OSNOVNI PRINCIPI BESKONTAKTNOG MERENJA TEMPERATURE

2.1. Pojam termografije

Infracrvena termografija je nauka o prikupljanju i analizi informacija dobijenih uz pomoć uređaja za beskontaktno snimanje termičkih slika. Poput fotografije, koja se definiše kao „pisanje svetлом“, termografija znači „pisanje topotom“. Formirana slika se naziva termogramom. Pojam termografije kao nauke znači potrebu za poznavanjem načina izrade i analize termičke slike, što podrazumeva poznavanje termografskog uređaja, konstrukcije i funkcionalnosti objekata posmatranja, razumevanje zakona prenošenja topline.

Osnovne prednosti termografije u odnosu na druge metode merenja temperature su:

1. temperatura se registruje kao temperaturna raspodela u realnom vremenu, koja se prikazuje kao vizuelna informacija, što omogućava relativno upoređivanje pojedinih tačaka i površina, doprinoseći sagledavanju šire slike problema koji se prati ili analizira,
2. mogućnost merenja temperature objekata u pokretu, objekata sa složenim geometrijskim oblicima, objekata u vakuumu ili objekata koji su fizički nedostupni iz razloga bezbednosti ili iz drugih razloga
3. mogućnost merenja temperature mikroskopskih objekata bez uticaja na tok i rezultat merenja,
4. mogućnost merenje temperature objekata čija se temperatura drastično menja ili fenomena koji se dešavaju u kratkim vremenskim intervalima.

Infracrvena termografija se zbog svojih komparativnih prednosti redovno koristi za održavanje po stanju, čime se postiže optimizacija sistema održavanja odn. bolji i sigurniji rad opreme sa najmanjim mogućim troškovima.

Termografija najčešće razmatra objekte u stacionarnom stanju. Razlike u iznosima infracrvenog zračenja, koje dolaze s površine objekta, su ili posledica razlika u temperaturi ili razlika u svojstvima posmatrane površine. Naknadna obrada snimljenih termičkih slika na računaru može bili kvalitativna, što podrazumijeva samo uočavanje mesta različitosti, ili kvantitativna, što uključuje utvrđivanje iznosa temperature, temperaturnih razlika ili faktora emisije po pojedinim lokacijama na termogramu.

2.2. Termografske tehnike merenja i analize

Osnovna strategija u primenama infracrvene tehnologije se zasniva na tehnicu komparativne termografije. Reč je o jednostavnom upoređivanju sličnih komponenata ili uzoraka, koji se nalaze pod približno istim uslovima. Kada se komparativna tehnika koristi korektno, razlika između dva ili više uzorka (ili komponenata) može biti indikativna po pitanju njihovog stanja. Primer takve primene je kontrola trofaznog električnog sistema, gde se može vršiti upoređivanje elemenata ili aparata na sve tri faze. Uslov korektnog merenja je da opterećenje bude simetrično odnosno približno jednak na sve tri faze, što je najčešće slučaj. U tim uslovima posmatrane faze bi trebalo da imaju sličnu termičku sliku. U slučaju nesimetričnog opterećenja bi faza sa najvećim opterećenjem trebala izgledati toplijie. Kod ove tehnike je izuzetno važno imati informacije o kontrolisanom uzorku ili komponenti kao što su konstrukcija, način funkcionisanja, mogući mehanizmi nastanka kvara, putevi prenosa toplote, istorija rada itd.

Jedna od varijacija tehnike komparativne termografije je termičko mapiranje. Raspodela temperature na određenoj površini posmatranog uzorka se upoređuje sa odgovarajućim prethodno načinjenim snimkom, koji predstavlja termičku signaturu uzorka. Ova se tehnika vrlo često koristi kod uzorka sa kompleksnijom termičkom slikom i u slučajevima kada je priroda kvara takva da se on razvija jako sporo. Tehnika je primenljiva kod sistema, čije održavanje se odvija u striktno utvrđenim vremenskim intervalima, kada se poređenjem termičkih slika može pratiti trend razvoja kvara ili promena termičkog stanja izazvana promenom nekog svojstva ili karakteristike sistema.

Mnoge tehnike termografskog snimanja su bazirane na razlici kondukcije materijala, toplotnog kapaciteta i difuzivnosti. Naime, izražene razlike kod različitih materijala ili razlike u istom materijalu u pogledu reljefa površine, pukotina ili drugih diskontinuiteta, postaju očigledne na termičkoj slici.

Interpretacija rezultata primene infracrvene termografije zahteva analizu, koja podrazumeva puno promenljivih parametara, čije je vrednosti nekada teško proceniti ili kvantifikovati. Postoje tri grupe parametara, koji se odnose na (1) objekat posmatranja, (2) ambijentalne uslove sistema u kome se objekat nalazi i (3) instrument odn. termografski uređaj.

Parametri koji se odnose na objekat su emisivitet, spektralne karakteristike, temperatura, odnosi prenosa toplote unutar i oko objekta, termički kapacitet, difuzivnost.

Ozbiljnost problema i zaključak o vrsti i stepenu neispravnosti nije uvek očigledan ukoliko se zna samo temperatura komponente koja se posmatra. Primer niskog emisiviteta ili velikog termičkog gradijenta unutar oklopljenog elementa, koji je istovremeno izložen vetru odn. hlađenju usled konvekcije, smanjeno opterećenje i drugo, su mogući izvori greške u procenjivanju stanja. Ipak, neke generalizacije se mogu načiniti poznajući primenjene materijale i njihove dozvoljene granične temperature.

3. PRIMENA TERMOGRAFIJE U DIJAGNOSTICI STANJA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

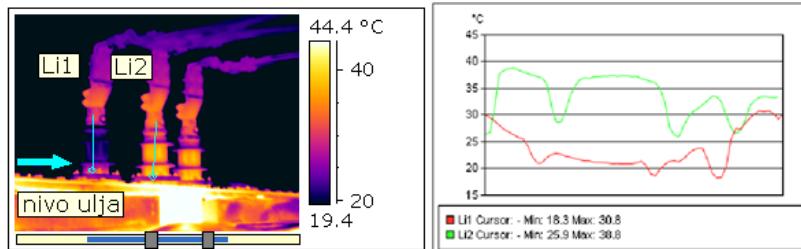
U nastavku teksta su prezentovani ilustrovani primeri otkrivanja neregularnih toplotnih stanja na energetskim transformatorima. Dati su prikazi kontrole priključnih

veza transformatora u unutrašnjosti provodnih izolatora, zatim, magnetnog kola transformatora, transformatorskog suda, sklopova i prateće opreme na transformatoru itd.

3.1. Kontrola nivoa ulja u provodnim izolatorima velikih snaga

Izolaciono ulje u provodnim izolatorima energetskih transformatora ima funkciju izolovanja delova pod naponom i odvođenja toplice. Nivo ulja u izolatorima se, po pravilu, vrlo lako vizuelno kontroliše ali, iskustvo je pokazalo da se mogu dobiti pogrešne informacije zbog zaprljanosti uljokaznog stakla ili iz drugih razloga.

U okviru redovnih termovizijskih kontrola postrojenja je izvršeno snimanje blok-transformatora prenosnog odnosa 10,5/110 kV u jednoj hidro-elektrani. Zapažena je oštra granica u stepenu zagrejanosti između gornjih i donjih članaka na jednom od tri provodna izolatora na niženaponskoj strani (slika broj 1). Merenje otpora namotaja i druge sprovedene metode ispitivanja (hemijska analiza ulja i merenje faktora dielektričnih gubitaka) nisu ukazale na postojanje mogućeg kvara na transformatoru. Sa termograma (slika broj 1) bi se moglo zaključiti da se dva izolatora (srednji i desni na slici) više greju zbog postojanja kvara u unutrašnjosti priključnih veza ka namotu. Ipak, približno jednakе temperature na spoljašnjim priključcima na sve tri faze, koji su izvedeni pomoću masivnih stezaljki, „zastavica“, navode na zaključak da ne postoje izvori neispravnosti i eventualnih grejanja na strujnim vezama u unutrašnjosti provodnih izolatora. Istovremeno se uočava jasna razlika u pogledu zagrejanosti susednih članaka na levom provodnom izolatoru (strelica pokazuje graničnu liniju). Temperaturni profili provodnih izolatora susednih faza, jedne sa sniženim i druge sa regularnim nivoom ulja, idu u prilog zaključku o odsustvu izolacionog ulja u provodnom izolatoru. Naknadne provere remontnih ekipa su potvrdile ovaj zaključak. Naime, nakon zamene provodnog izolatora na višenaponskoj strani zbog kvara koji je uočen prilikom prethodne termovizijske kontrole, došlo je do formiranja „vazdušnog jastuka“ u jednom od tri izolatora na niženaponskoj strani. Reč je o propustu ekipi koja je izvodila radove i koja nije izvršila eliminisanje vazduha odn. „odzračivanje“ u jednom od tri provodna izolatora.

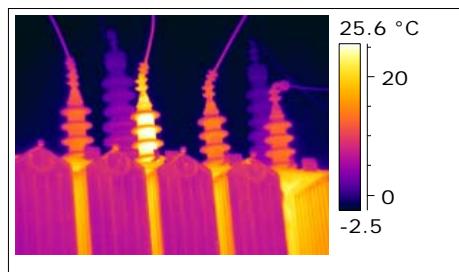


Slika broj 1. Termogram provodnih izolatora bok-transformatora na strani 10,5 kV i temperaturni profili provodnih izolatora susednih faza - sa nižim i regularnim nivoom izolacionog ulja

„Vazdušni jastuk“, koji je postojao unutar tela provodnog izolatora, je bio dobar toplotni izolator. Istovremeno je njegov toplotni kapacitet relativno mali, što znači da se pod uticajem okoline njegova temperatura brže menja nego kod transformatorskog ulja, zbog čega je temperatura vazduha u izolatoru daleko niža od temperature izolacionog ulja, koja je u vreme merenja bila blizu 40°C. Snimanje je obavljen u zimskim uslovima pri temperaturi atmosfere ispod 0°C. Razlika u toplotnom kapacitetu vazduha i ulja je prevashodni razlog efikasnog otkrivanja ove vrste kvara primenom termografije.

3.2. Kontrola donjih priključaka provodnih izolatora

Kvarovi u unutrašnjosti transformatora odn. na strujnim vezama od priključaka ka namotajima nisu tako česti, ali, kada se dese, zahtevaju posebnu pažnju, naročito kod transformatorskih jedinica većih snaga. Pravovremeno otkrivanje ove vrste neispravnosti daje mogućnost planiranja isključenja za najpovoljniji trenutak po elektroenergetski sistem. U međuvremenu se opterećenje transformatora smanjuje do nivoa koji dozvoljava sistem i pooštreno prati stanje transformatora, kako bi se utvrdio trend razvoja kvara.



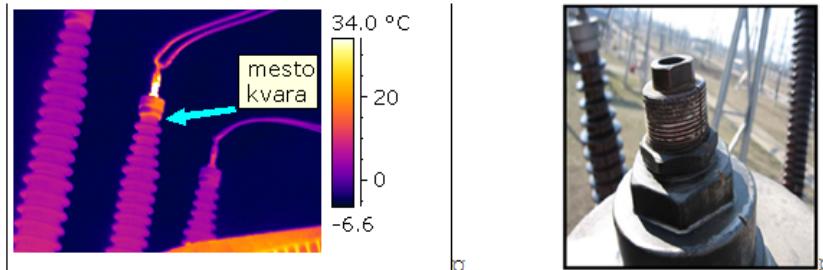
Slika 2. Termogram provodnog izolatora čije su neispravnosti na donjem priključku

Izložen je slučaj pregrevanja tela provodnog izolatora transformatora snage, kod kojeg je termovizijom pronadena neispravnost, koja je praćena u dužem vremenskom intervalu. S obzirom da se radilo o značajnoj transformatorskoj jedinici, ova neispravnost je pooštreno praćena termovizijom i gasnom hromatografijom (Slika broj 2).

Na transformatoru se nije ništa preduzimalo sve dok nisu registrovane vrednosti temperaturu, koje su ukazivale na intenziviranje razvoja kvara.

Transformator je podvrgnut remontu u najpogodnijem trenutku za elektroenergetski sistem. Pronađeni su nedovoljno pritegnuti spojni elementi provodnog izolatora sa namotajima faza, ostvarenih preko zavrtnjeva.

U nastavku je prezentovan primer grejanja spoljašnjeg priključka uvodnog izolatora 220 kV blok transformatora 220/400 kV. Neispravnost je nakon otkrivanja, praćena u periodu od dve godine. Ovakve kvarove je moguće otkriti merenjem otpora namota i analizom gasova rastvorenih u ulju. U trenutku neposredno pre remonta i sanacije kvara je razlika u stepenu zagrejanosti oštećenog spoljašnjeg priključka srednje faze u odnosu na susedne faze bila veća od 60°C. Uzrok grejanja je bio u unutrašnjosti uvodnog izolatora, na donjem kraju provodnog bolcna. U pogodnom trenutku se pristupilo isključivanju transformatora sa mreže i demontaži provodnog izolatora, tokom koje je utvrđen jako oštećen navoj i oslabljen kontakt na donjem priključku spoljašnjeg bolcna (Slika broj 3). Dosta veliko grejanje u dužem vremenskom toku je rezultovalo takvim spojem, koji onemogućava jednostavnu demontažu, već se moralo pristupiti zasecanju spoljašnjeg bolcna i izradi novog priključka.



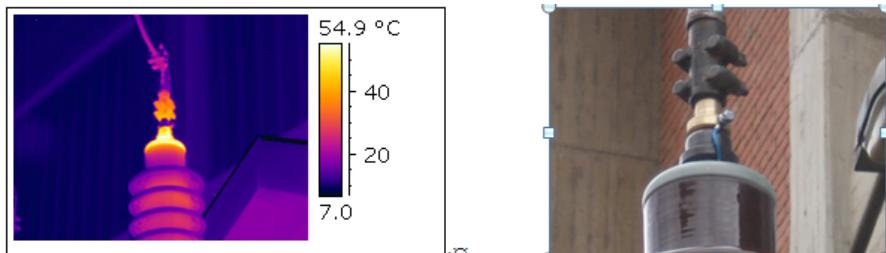
Slika broj 3. Termogram provodnog izolatora 220 kV čije su neispravnosti na donjem priključku provodnog bolcna; Snimak oštećenog navoja koji je uzrok oslabljenog kontakta i povećanog grejanja

Navedeni primjeri daju jasnu sliku o mogućnostima termografije u otkrivanju i analizi kvarova na spoljašnjim i unutrašnjim priključcima uvodnih izolatora transformatora snage. U svim slučajevima je u manjoj ili većoj meri izražen gradijent temperature duž puta provođenja topoteke. Ipak, na osnovu samo jedne termovizionske kontrole se često ne mogu jasno utvrditi svi relevantni elementi za zaključivanje o tačnoj lokaciji, veličini i stepenu progresije neispravnosti. Ponekad je jako korisno sprovođenje kontrolovi pri raznim opterećenjima transformatora i komparativnim pristupom utvrđivanje eventualnih razlika i zavisnosti od opterećenja. Isto tako, učešće drugih metoda je u većini slučajeva neophodno radi potpunijeg praćenja razvoja kvara. Rezultati gasnochromatografske analize gasova rastvorenih u transformatorskom ulju pomazuju utvrđivanje toka i vrste neispravnosti.

Dodatna ispitivanja, poput merenja prelaznih otpora, odnosno otpornosti namotaja, međusobno poređenje i praćenje u vremenu, i konsultacije sa proizvođačem transformatora o konstruktivnim rešenjima primenjenim u konkretnim slučajevima omogućavaju potpunije sagledavanje problema i pouzdano zaključivanje o mogućim neispravnostima.

3.3. Primer grejanja usled dielektričnih gubitaka

Do sada su pomenuti slučajevi neispravnosti na spojevima, koje karakteriše povećanje električnog otpora. Sledi primer grejanja na provodnom izolatoru 110 kV nastalog usled dielektričnih gubitaka.



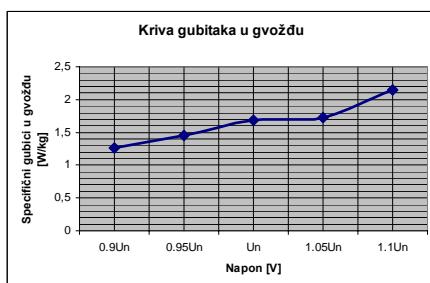
Slika broj 4 Termo- i foto-prikaz grejanja na provodnom izolatoru 110 kV uslovljenog dielektričnim gubicima

Neispravnost je bila registrovana tokom višestrukih termovizionskih kontrola, obavljenih u periodu od godinu i po dana. Termografski snimci nisu ukazivali na postojanje lošeg spoja kako na spoljašnjem priključku provodnog izolatora, tako ni na

kompresionom spoju bolcna i pletenice unutar tela provodnog izolatora. Reč je bila o električnom pražnjenu između mesinganog spoljašnjeg bolcna i flanšne od Al legure, koje je posledica postojanja razlike potencijala između njih. Sprovedeno je galvansko povezivanje bolcna i flanšne i potvrđena početna pretpostavka o uzroku povećanog grejanja. Na prikazima na slici broj 4 se jasno vide mesta povećanog grejanja.

3.4. Kontrola magnetnog kola transformatora

Kontrola magnetnog kola transformatora uz upotrebu termografskog uređaja se sprovodi u toku gradnje i montaže transformatora ili reparacije, uslovljene kvarom koji zahteva otvaranje transformatorskog suda. Merenje se sprovodi u visokonaponskoj laboratoriji pri ogledu indukcionog zagrevanja magnetnog kola transformatora, sa ciljem otkrivanja mesta sa povećanim zagrevanjima kao rezultat oštećene izolacije između limova ili mehaničkih oštećenja. Zavisno od mogućnosti napajanja u visokonaponskoj laboratoriji i izračunate vrednosti napona po navoju, potrebne za ostvarenje nominalnog režima mагнећења, izračunavaju se parametri ispitnog kola. Poželjno je da magnetno kolo bude bez faznih namotaja da bi svi značajni delovi za termoviziju kontrolu bili dostupni.



Slika broj 5 Grafički prikaz specifičnih gubitaka u gvožđu magnetnog kola transformatora

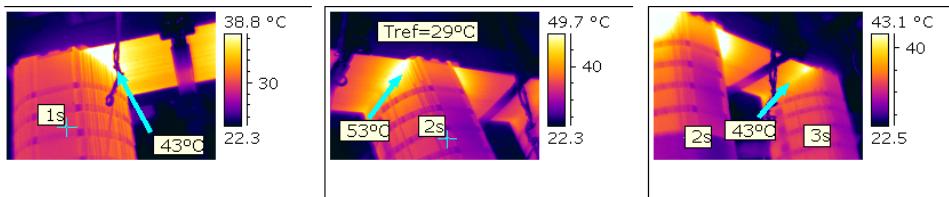
Sledi primer termografske kontrole magnetnog kola transformatora 15.75/6.3 kV/kV, 25 MVA, koji se koristi za sopstvenu potrošnju u jednoj od termoelektrana.

Po uključenju je napon povećavan u koracima od 0.05 Un i to od vrednosti 0.9 Un do 1.1 Un radi snimanja krive gubitaka u gvožđu (Slika broj 5).

Sledi prikaz nekoliko karakterističnih mesta na magnetnom kolu transformatora.

Referentne temperature odražavaju prosečnu vrednost zagrejanosti magnetnog kola u nekom trenutku ogleda zagrevanja. Maksimalne temperature se odnose na najtoplje tačke zagrevanja u zonama posmatranja.

Na termogramima na slikama broj 6 i 8 su prikazani fragmenti mesta sastava stubova magnetnog kola sa gornjim jarmom i gornja površina gornjeg jarma. Snimci su bili načinjeni pri kraju ogleda zagrevanja.

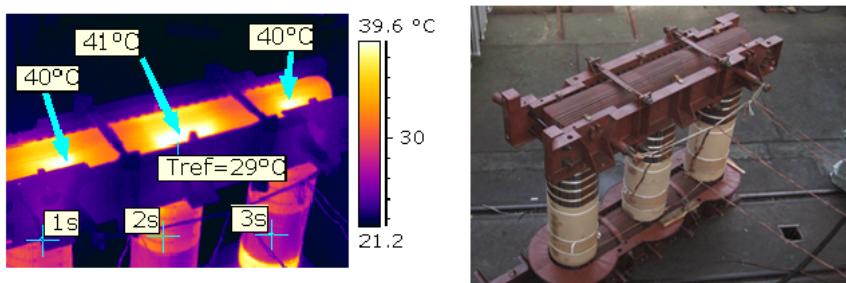


Slika broj 6 Termografski prikaz sastava stubova sa gornjim jarmom sa VN strane



Slika broj 7 Foto-snimak magnetnog kola transformatora sa VN strane

Uočeno je najveće grejanje na sastavu srednjeg, faznog stuba sa gornjim jarmom i to sa obe strane. Grejanje na kraju ogleda je bilo 53°C , što je ujedno i najveće izmereno grejanje na celom magnetnom kolu. Primećuje se simetričnost grejanja u odnosu na osu srednjeg stuba transformatora. Na oba spoljna stuba su izmerene temperature na sastavima od 43°C . Referentna temperatura magnetnih limova je iznosila 29°C .



Slika broj 8 Termo- i foto- prikaz gornje površine gornjeg jarma magnetnog kola transformatora 25 MVA

U transformatoru, koji je bio predmetom ispitivanja, su u toku rada u postrojenju registrovani gasovi u ulju, koji su ukazivali na pojavu jako visokih temperatura - većih od 1000°C . Prethodna ispitivanja su u velikoj meri ukazivala na mogućnost oštećenja izolacije magnetnih limova, što je imalo za posledicu lokalna grejanja visokog intenziteta. Magnetno kolo je bilo rastavljeno u fabriki transformatora i nakon toga ponovo formirano. Zapažanja stručnog osoblja, koje je radilo reparaciju, nisu ukazivala na takva mehanička oštećenja limova ili oštećenja izolacije, koja bi odgovarala lokalnim grejanjima sa izuzetno visokim temperaturama. Ogled indukcionog zagrevanja, prezentovan u ovom tekstu, ide u prilog zaključku da nedostaci i oštećenja magnetnog kola nisu mogla biti uzrok procesa u ulju sa pojavom gasova, koji ukazuju na ekstremno visoke temperature.

3.5. Termografsko snimanje stanja površine suda transformatora

Kontrola nivoa zagrejanosti površine transformatorskog suda i svih dostupnih delova i pratećih sklopova transformatora je uvedena u praksi zbog mogućnosti detekcije unutrašnjih kvarova i praćenja toplotnih procesa u različitim režimima rada transformatora.

Snimanjem slike temperaturnog polja na površini transformatorskog suda se dobija kompleksna informacija o visini i raspodeli temperature u trenutnom režimu opterećenja transformatora. Na osnovu dobijenih podataka se može odrediti odzračena snaga sa površine suda i procenjivati stepen simetričnosti temperaturnog polja u odnosu na ose simetrije transformatora. Značajnije odstupanje simetričnosti može ukazati na anomalije u funkcionisanju rashladnog sistema ili neadekvatnu raspodelu magnetnog polja, a time i mogućnost prekomernog zagrevanja na neadekvatnim mestima.

Snimanjem rashladnog sistema transformatora i njegovih delova se dobija informaciona osnova, prema kojoj se može sprovesti analiza funkcionisanja ovog sistema, ili dela sistema u trenutku snimanja.

Povećano grejanje može biti rezultat povećanih gubitaka transformatora. Ukoliko je to povećanje malo, rashladni sistem transformatora je obično dovoljan da anulira efekte povećanih gubitaka. U slučaju povećanog grejanja koncentrisanog na jednom mestu ili u ograničenoj zoni, postoji realna opasnost od pregrevanja, koje podstiče degradativne hemijske procese u papiru i ulju, usled kojih, dolazi do pogoršanja njihovih mehaničkih i električnih svojstava.

Pojava rasutih flukseva, zagrevanja putem indukcije, pojava vrtložnih struja u sudu od izvoda namotaja visokog napona itd. – imaju efekat na gubitke u transformatoru. To ukazuje na potrebu poznavanja konstruktivnih detalja ne samo transformatorskog suda, već i transformatora u celini, što svakako doprinosi poboljšanju zaključivanja o prirodi pojave zagrevanja na transformatorskom sudu.

Za donošenje valjanog zaključka o efektima zagrevanja transformatorskog suda je vrlo korisno vršiti termovizionsko snimanje na više transformatora istog tipa. Poređenje termičkih slika površine sude ili pojedinih sklopova i elementa transformatora može ukazati na postojanje neregularnih grejanja.

Termovizionska snimanja na transformatoru u pogonu pri različitim režimima opterećenja (prazan hod, nominalno opterećenje, ...) i praćenje zagrevanja u vremenu mogu, takođe, dati doprinos boljem zaključivanju.

U laboratorijskim uslovima se sprovodi ogled kratkog spoja transformatora prema definisanim procedurama. U tim uslovima je poželjno da vizuelna pristupačnost transformatorskog suda bude što veća. To podrazumeva demontažu hladnjaka, a ukoliko to nije izvodljivo za potrebe merenja, rashladni sistem bi trebao da bude u mirovanju jer rad uljnih pumpi i cirkulisanje ulja remeti termičku sliku površine suda. Istovremeno, potrebno je voditi računa da ne dođe do pregrevanja transformatora.

Bitan uticaj na korektno merenje temperature termografskom metodom ima stanje površina. U slučaju transformatorskog suda je reč o stepenu zaprljanosti uljem i uticajima atmosfere i okolne sredine, te o vrsti boje, kojom je sud prefarban. Adekvatna priprema površina za termovizionska snimanja podrazumeva čišćenje površina, primenu odgovarajućih premaza ili folija radi postizanja ujednačenog i poznatog emisiviteta površine. Ukoliko to nije izvodljivo, potrebno je kontaktnim termometrom (termoparam) izmeriti temperaturu dela površine od interesa i onda preračunati vrednost emisiviteta na osnovu dobijenog izlaznog signala termografske kamere.

Slede primeri koji ilustruju primenu termografske metode na energetskim transformatorima.

a) Transformatorski sud

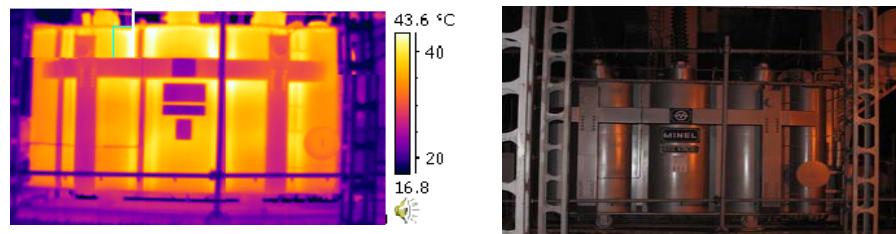
Termovizionska kontrola površina transformatorskog suda podrazumeva suksesivno snimanje termičkih slika po obodu i visini suda. Ukoliko je moguće, snima se i gornja strana odn. poklopac suda. Posebna se pažnja posvećuje zonama sastava suda sa poklopcem.

Obrada rezultata podrazumeva poređenje zagrevanja krajnjih faza odn. razmatranje simetričnosti termičkog polja. Lokalna zagrevanja većeg intenziteta se analiziraju

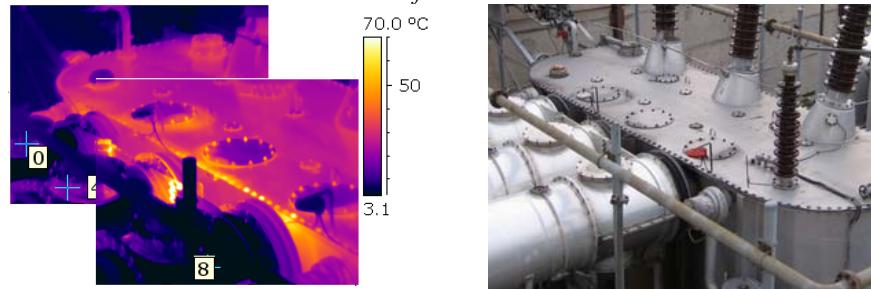
uzimajući u obzir položaj delova aktivnog sistema transformatora (magnetnog kola i namota), kao i ostalih sklopova.

Opterećenje transformatora i rad sistema za hlađenje moraju biti u dužem vremenskom periodu pre snimanja u nepromjenjenom režimu radi ostvarivanja stacionarnog stanja u pogledu zagrejanosti.

Slede ilustracije delova površine transformatorskog suda blok-transformatora 15,65/220 kV i to površina visokonaponske strane (slika broj 9) i sastava transformatorskog suda sa poklopcem (slika broj 10).



Slika broj 9. Termo- i foto- prikaz VN stane transformatorskog suda blok-transformatora



Slika broj 10. Termo- i foto- prikaz sastava transformatorskog suda sa poklopcem na NN strani

U navedenom slučaju je raspodela temperature po površini suda transformatora uglavnom tipičnog karaktera za transformatore sa sistemom hlađenja OFWF. Nisu detektovane zone neregularnog grejanja, koje bi ukazivale na defekte termičkog karaktera. Lokalne zone neznatno povećanog zagrevanja na sudu transformatora su uslovljene specifičnostima u radu sistema za hlađenje i konstrukcijom transformatora.

Na slici broj 10 je prezentovano povećano grejanje na sastavu transformatorskog suda sa poklopcem, koje je, najverovatnije, uzrokovano cirkulacijom vrtložnih struja usled rasipnih flukseva u lokalnim zonama. Izraženo pregrevanje zavrtnjeva dovodi do ubrzanih razaranja gumenih zaptivki, što ima za posledicu loše zaptivanje odn. poremećenu hermetičnost suda i prodor provodnih čestica i vlage u transformatorsko ulje.

b) Sistem za hlađenje ulja i druga oprema transformatora

Sistem za hlađenje i čišćenje ulja, koji se kontroliše termografskom metodom, čine hladnjaci i uljne pumpe. Ocena efikasnosti rada sistema hlađenja sa prinudnom cirkulacijom ulja se vrši na osnovu temperaturnih promena po visini hladnjaka.

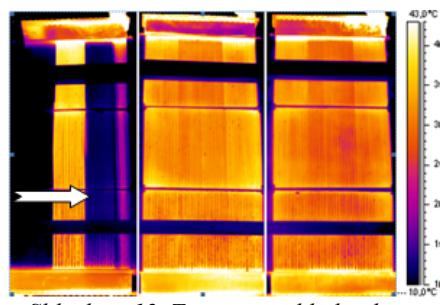
Ocenjuje se karakter zagrevanja razmenjivača topline, koji zavisi od čistoće spoljašnjih i unutrašnjih površina cevi, kao i od brzine obrtanja ventilatora za hlađenje i od uljnih pumpi. Zagrevanje uljnih pumpi se upoređuje sa tipičnim zagrevanjem pumpi analognog tipa.



Slika broj 11 Termo- i foto slika i temperaturni profil uljne pumpe

Na slici broj 11 je data ilustracija termograma i temperaturnog profila uljne pumpe, na kojoj nisu registrovana neregularna grejanja.

Na slici broj 12 je prikazan primer hladnjaka sa otežanim protokom ulja. Pored znatne zaprljanosti površine hladnjaka, čime je oslabljena njihova efikasnost hlađenja, utvrđena je jako oslabljena protočnost u delu hladnjaka, koji je strelicom označen na termogramu. Reč je o ozbiljnom propustu, koji datira još od izrade i montaže hladnjaka, kada je pogrešnom montažom unutrašnjih pregrada i usmerivača ulja bitno redukovana efikasnost hlađenja na svega 30%.



Slika broj 12 Termogram hladnjaka transformatora

4. ZAKLJUČAK

U radu je dat prikaz primene termografije u otkrivanju i analizi neregularnih topotoplinskih stanja na elementima i sklopovima energetskih transformatora.

Efikasno praćenje temperaturnih režima energetskih transformatora se stvara podloga za upravljanje ovim režimima. Rezultat toga može biti smanjenje trajanja zastoja i troškova reparacija, odnosno produženje veka eksplotacije transformatora. Generalno, rezultati mogu imati značaj i za konstruktore transformatora sa stanovišta modelovanja transformatora i proračuna gubitaka i kao dokaz o valjanosti konstrukcije transformatora.

LITERATURA

- [1] Senčanić M., Čičkarić Lj. „Primena termografskih kontrola u dijagnostici stanja elektro i termoenergetske opreme u postrojenjima“, Elektroprivreda, br. 1, 2000. Pregledni rad UDK: 621.362.1, str 43-48
- [2] Sencanic M., Cickaric Lj. „Application of thermovision tests in the Preventive Maintenance of Transformers“ Proceedings of the third international power systems conference, TIMISOARA, november 18-20, 1999, vol. II, str. 72-77

- [3] Sencanic M., Cickaric Lj. „Regular Thermovision Controls and Feedback Information on Power Installation Equipment“, Proceedings of the fourth international power systems conference, TIMISOARA, november 8-9, 2001, str. 375-378
- [4] Senčanić M., Čičkarić Lj „Primena termovizijskih ispitivanja u preventivnom održavanju transformatora“, Savetovanje, „Transformatori u energetici“, april 1996 Beograd, str. 309- 316
- [5] Izveštaji ETI Nikola Tesla o termovizijskim ispitivanjima u postrojenjima EPS-a
- [6] Flir Systems Technical Documentation
- [7] ASTM E1934 - 99a(2005)e1 Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography
- [8] Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems & Rotating Equipment, Infraspection Institute, 2008
- [9] C.J.Hunter „Handbook of Nondestructive Evaluation“, McGraw-Hill, 2003.

Abstract: Thermography is one of the most powerful tools available for electrical power system maintenance. Real-time infrared image acquisition and processing allows implementation of advanced thermographic test methods. The detailed infrared analysis in the most cases can quickly determine the origin of the function-related problem causing.

Systematic thermovision control was introduced into regular maintenance of installed equipment in order to enable the regular detection of faults. Long-term experience was gained in diagnostics of external as well as internal faults on power system elements and devices.

The paper presents examples of irregularities in power transformers. This diagnosis is made on the basis of irregularities manifested on the surface of device. Because of that, analysis required a complex methodology and different criteria for the fault estimate. Each case is described in details and illustrated with data and thermographs.

Key words: Thermography/thermovision, temperature, diagnostics, preventive maintenance, power transformer

APPLICATIONS OF INFRARED THERMOGRAPHY IN DIAGNOSTICS OF POWER TRANSFORMER THERMAL IRREGULARITIES

Ljubisa Cickaric
Electrical Engineering Institute "Nikola Tesla"