

PROCENA TERMIČKOG STANJA ELEKTROENERGETSKE OPREME U PROCESNOJ INDUSTRIJI METODOM TERMOGRAFIJE

Božo Ilić¹, Živoslav Adamović², Branko Savić³, Nenad Stanković³
bozoilic66@gmail.com

¹Tehnički školski centar Zvornik, Republika Srpska, BiH

²Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet Mihajlo Pupin, 23000 Zrenjanin, Srbija

³Visoka tehnička škola strukovnih studija, 21000 Novi Sad, Srbija

Izvod

Tokom eksploatacije elektroenergetske opreme u procesnoj industriji mogu se pojaviti neispravnosti, koje ako se na vreme ne uoče i ne otklone, mogu dovesti do većih kvarova i havarija, a time i do neplaniranih zastoja celih proizvodnih linija, koji mogu uzrokovati velike troškove, ekološke štete i ugroziti sigurnost radnika. Zbog toga se u okviru programa preventivnog održavanja vrše termografska ispitivanja elektroenergetske opreme. Cilj ovog rada jeste da predloži novi pristup u utvrđivanju mesta neispravnosti primenom metode termografije, koji se zasniva na utvrđivanju načina, pravca i smera prostiranja toplote, kao i analizi profila temperatura. Ovaj pristup omogućava da se dokaže da mesta pregrevanja ne predstavljaju uvek i mesta neispravnosti. Rezultati dobijeni ovim pristupom verifikovani su rezultatima dobijenim električnom U-I metodom merenja prelaznih električnih otpornosti spojeva.

Ključne reči: termografska ispitivanja, elektroenergetska oprema, procena termičkog stanja, prenos toplote, mesta pregrevanja.

UVOD

U toku rada elektroenergetske opreme u procesnoj industriji mogu se pojaviti neispravnosti, koje ako se na vreme ne uoče i ne otklone, mogu dovesti do neplaniranih zastoja celih proizvodnih linija, a time i velikih troškova, ekoloških šteta i ugrožavanja sigurnosti radnika. Zbog toga je potrebno obezbediti pouzdan rad elektroenergetske opreme u procesnoj industriji što se između ostalog postiže i redovnim (sistematskim) termografskim ispitivanjima. Termografska ispitivanja se mogu koristiti u svim slučajevima kada se neispravnosti manifestuju odstupanjem temperature posmatranog objekta od normalne radne temperature.

Tako se stvaraju uslovi za otklanjanje neispravnosti u najpovoljnijem trenutku, čime se sprečavaju veći kvarovi i havarije, kao i neplanirani prekidi u procesu proizvodnje [1].

Posebna pogodnost ovakvih ispitivanja je u tome što se ona izvode bez neposrednog fizičkog kontakta sa elementima koji se ispituju odnosno sprovode se sa potpuno bezbedne udaljenosti. Tako da se ispitivanja izvode pod naponom, u toku normalnog rada postrojenja, bez ometanja i prekidanja normalnog rada postrojenja, čime je ostvaren jedan od preduslova za dobijanje pouzdanih rezultata merenja. Termografska ispitivanja spadaju u nedestruktivne metode ispitivanja, što znači da ona nemaju nikakav uticaj na posmatrane elemente, koji normalno rade u toku i nakon ispitivanja [2, 3].

U ovom radu su prikazani rezultati novog pristupa u utvrđivanju mesta neispravnosti elemenata elektroenergetskih postrojenja metodom termografije, zasnovanom na utvrđivanju načina, pravca i smera prostiranja toplote, kao i na analizi profila temperatura. Rezultati su između ostalog pokazali da mesta pregrevanja ne predstavljaju uvek i mesta neispravnosti, pri čemu su ispitivani spojevi završetka provodnog izolatora sa namotajima transformatora na 10 [kV] strani i priključne stezaljke provodnih izolatora u elektroenergetskom postrojenju 35/10 [kV].

KRITERIJUMI ZA PROCENU TERMIČKOG STANJA ELEKTROENERGETSKE OPREME

Da bi se moglo pravilno proceniti termičko stanje nekog elementa, odnosno proceniti da li je taj element pregrejan, potrebno je poznavati njegovu normalnu radnu temperaturu, njegovo opterećenje, temperaturu okoline i sl. Normalna radna temperatura elementa je apsolutna temperatura tog elementa, ona zavisi od opterećenja i temperature okoline i uvek je veća od temperatura okoline. Utvrđivanje mesta pregrevanja se uglavnom vrši komparativnom metodom, koja se zasniva na međusobnom poređenju temperatura elemenata, koji imaju iste karakteristike (od istog su materijala, istog stanja površina, iste boje i sl.) i koji su izloženi istom opterećenju i istim uslovima okoline, čime se izbegava uticaj okoline na rezultate merenja [4, 5]. Pri tome se obavezno određuje referentni element, a za referentni element se usvaja element koji ima najnižu temperaturu od svih tih elemenata odnosno za referentni element se usvaja ispravni element. Svaki element koji se zagreva više nego referentni element naziva se mesto pregrevanja, a razlika temperatura između tog i referentnog elementa naziva se pregrevanje. Kod trofaznih sistema se porede temperature istih elemenata koji se nalaze u različitim fazama, a koji su izloženi istom opterećenju [6, 7]. Pošto ne postoje međunarodni standardi prema kojima se na osnovu veličine pregrevanja može proceniti termičko stanje elemenata elektroenergetskih postrojenja u ovim ispitivanja primenjivani su kriterijumi koje je na osnovu iskustva utvrdio „Infrared Training Center“, najveća svetska kompanija za obuku u oblasti termografije.

Prema ovim kriterijumima se na osnovu veličine pregrevanja određuje klasa termičkog stanja elementa ("A", "B" ili "C"), a zatim se usvajaju dijagnostičke preporuke o aktivnostima održavanja koje je potrebno preduzeti, kao što je prikazano u tabeli 1 [1].

Tabela 1. Kriterijumi prema kojima se određuje klasa termičkog stanja elementa

Veličina pregrevanja ΔT [°C]	Klasa termičkog stanja elementa	Dijagnostičke preporuke o aktivnostima održavanja koje je potrebno preduzeti
$\Delta T > 30$ [°C] ili $T > 80$ [°C]	A	Potrebna je hitna intervencija
5 [°C] $\leq \Delta T < 30$ [°C]	B	Potrebna je intervencija prilikom prvog isključenja postrojenja
0 [°C] $\leq \Delta T < 5$ [°C]	C	Potrebno je pratiti stanje i planirati intervenciju

Navedeni kriterijumi se odnose za nominalno strujno opterećenje elemenata. Međutim, ako je strujno opterećenje u trenutku snimanja termografske slike manje od nominalnog onda su i izmerene veličine pregrevanja niže od onih koje bi bile pri nominalnom strujnom opterećenju. Zbog toga je u takvim slučajevima potrebno izračunati pregrevanje koje bi ti elementi imali pri nominalnom strujnom opterećenju, pa tek onda odrediti klasu termičkog stanja tog elementa, što se vrši prema relaciji [1]:

$$\Delta T_n = \Delta T_m \left(\frac{I_n}{I_m} \right)^2 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1)$$

gde je:

I_n [A] – nominalna struja elementa

I_m [A] – struja kroz element u trenutku snimanja termografske slike

ΔT_n [°C] – veličina pregrevanja koju bi posmatrani element imao pri nominalnom strujnom opterećenju

ΔT_m [°C] – veličina pregrevanja posmatranog elementa pri strujnom opterećenju koje je imao u trenutku snimanja termografske slike

Takođe, navedeni kriterijumi se odnose na otkrivene spojeve, kao što su: zatezne, viseće i noseće stezaljke, priključne stezaljke svih aparata (rastavljača, prekidača, mernih i energetskih transformatora, kablovskih glava i sl.) itd. Utvrđivanje mesta pregrevanja u unutrašnjosti aparata znatno je složenije, jer je tada potrebno poznavati niz faktora, kao što su konstrukcija aparata, mogući pravci prenosa toplote iz unutrašnjosti na površinu aparata itd [8, 9].

Prilikom utvrđivanja mesta pregrevanja treba znati da u nekim slučajevima mesta pregrevanja ne predstavljaju i mesta neispravnosti, jer do pregrevanja potpuno ispravnih mesta može doći zbog prenosa toplote (kondukcijom, konvekcijom ili zračenjem) na njih sa mesta pregrevanja koja predstavljaju i mesta neispravnosti. Bez obzira na to što mesta pregrevanja uvek ne predstavljaju i mesta neispravnosti sigurno je da postojanje pregrevanja ukazuje na to da postoje određene neispravnosti, koje je potrebno otkloniti [10].

Uzroci pojave pregrevanja elemenata elektroenergetskih postrojenja mogu biti različiti, kao što su: loši spojevi (kontaktne površine labave (npr. zbog nedovoljno pritegnutih zavrtnjeva), zatim mehanički oštećene (npr. naprsle), korodirale (npr. zbog spoja različitih metala), zaprljane, nagorele, prisutni tragovi zavarivanja između kontaktnih površina i sl.), preopterećenje, nesimetrično opterećenje, viši harmonici struje, vrtložne struje, kao i prenos toplote kondukcijom, konvekcijom ili zračenjem na te elemente sa objekata iz okruženja [11].

KORIŠĆENA OPREMA I OPIS ISPITIVANJA

Termografska ispitivanja su sprovedena u elektroenergetskom postrojenju preduzeća za proizvodnju nelakiranih, laminiranih i lakiranih folija od biaksijalno orijentisanog polipropilena „Lofolen“ iz Loznice. Termografska snimanja su vršena termografskom kamerom tipa FLIR ThermaCAM SC640, rezolucije 640×480 piksela, spektralnog opsega 7,5–13 [μm], temperaturnog opsega od -40 do $+1500$ [$^{\circ}\text{C}$] podeljenog u tri intervala, preciznosti ± 2 [$^{\circ}\text{C}$] od očitano, minimalnog fokusnog rastojanja $24^{\circ} \times 18^{\circ} / 0,3$ [m] i frekvencije slika 30 [Hz]. Pošto je deo ispitivanja vršen na otvorenom prostoru vođeno je računa o atmosferskim uslovima, jer oni mogu značajno da utiču na rezultate ispitivanja. Vetar, kiša i sneg značajno utiču na rashlađivanje elemenata elektroenergetskih postrojenja, a tokom vrelh letnjih dana elementi postrojenja se mogu zagrejati do veoma visokih temperatura zbog jakog sunčevog zračenja. Ispitivanja su vršena pri povoljnim atmosferskim uslovima, u proleće, pri suvom i oblačnom vremenu, temperaturi atmosfere od 4 odnosno 7 [$^{\circ}\text{C}$] i brzini vetra od 0,8 [m/s], čime je izbegnut njihov značajniji uticaj na tačnost rezultata merenja.

Da bi se utvrdilo da li je opterećenje u svim fazama simetrično vršeno je merenje struje pomoću ampermetara koji su priključivani preko strujnih mernih transformatora. Temperatura okolnih objekata i atmosfere merena je pomoću termometra, a brzina vetra pomoću anemometra, merenje prelaznih otpora spojeva priključnih stezaljki i užadi vršena su $U-I$ metodom pomoću ampermetra i voltmetra u beznaponskom stanju, prilikom otklanjanja utvrđenih neispravnosti u postrojenju. Da bi termografska kamera mogla da svede na minimum različite uticaje iz okruženja na rezultate merenja i da automatski izračuna tačnu visinu i raspodelu temperature na površini posmatranog elementa, pre snimanja u softveru kamere su podešene vrednosti sledeći parametara posmatranih elementa elektroenergetskog postrojenja i njegove okoline:

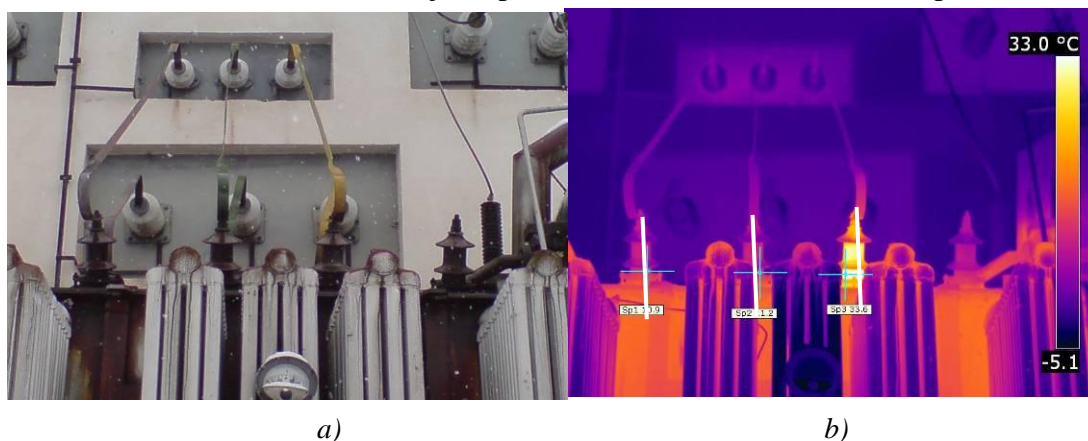
emisionog faktora (svojstva površine) posmatranog elementa, udaljenost kamere od posmatranog elementa, temperatura okolnih objekata, temperatura atmosfere i relativna vlažnost vazduha, kao što je prikazano u tabeli 2.

Tabela 2. Vrednosti parametara posmatranih elemenata elektroenergetskog postrojenja i njihove okoline koji su pre snimanja podešeni u softveru kamere

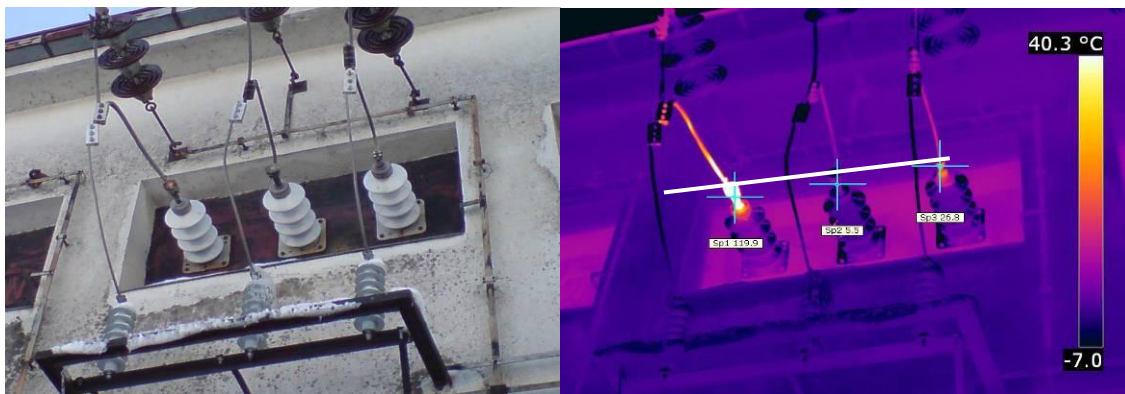
Snimani element	Emisioni faktor	Udaljenost kamere od posmatranog elementa [m]	Temper. okolnih objekata [°C]	Temper. atmosfere [°C]	Relativ. vlažnost vazduha [°C]
Provodni izolatori transformatora na 10 [kV] strani	0,82	4	4	4	60
Spoljašnji delovi provodnih izolatora na 35 [kV] strani	0,78	5	4	4	60
Unutrašnji delovi provodnih izolatora na 35 [kV] strani	0,78	3	7	7	50

REZULTATI ISPITIVANJA

Kao rezultat termografskih snimanja, dobijene su fotografske i termografske slike provodnih izolatora transformatora na 10 [kV] strani, kao i spoljašnjih i unutrašnjih delova provodnih izolatora na 35 [kV] strani, koje su prikazane na slikama 1, 2 i 3, respektivno.



Slika 1. a) Fotografska i b) termografska slika provodnih izolatora transformatora na 10 [kV] strani



a)

b)

Slika 2. a) Fotografaska i b) termografska slika spoljašnjih delova provodnih izolatora na 35 [kV] strani



a)

b)

Slika 3. a) Fotografaska i b) termografska slika unutrašnjih delova provodnih izolatora na 35 [kV] strani

Na osnovu rezultata ispitivanja formirana je tabela 3. u kojoj su navedene vrednosti nominalnih I_n i izmerenih struja I_m kroz pojedine elemente, zatim vrednosti apsolutnih temperatura pojedinih elemenata T_i , temperature referentnih elemenata T_{ref} i veličine pregrevanja $\Delta T_m = T_i - T_{ref}$ koje su ti elementi imali pri opterećenju u trenutku termografskog snimanja, kao i veličine pregrevanja koje bi ti elementi imali pri nominalnom opterećenju ΔT_n , a koje su izračunate prema relaciji (1) i prema tabeli 1. određene klase termičkih stanja elemenata za svaku fazu posebno.

Tabela 3. Rezultati ispitivanja

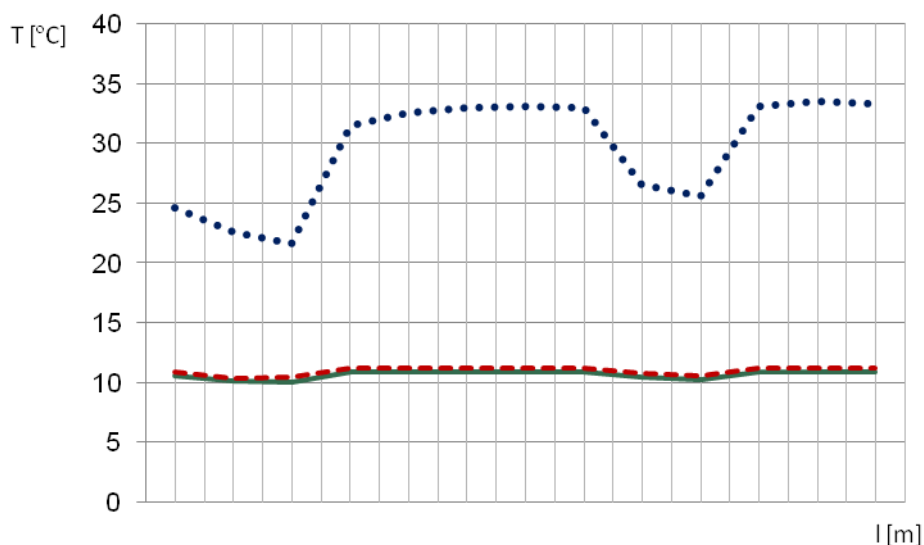
Ispitivani element	Faza	I_n [A]	I_m [A]	T_i [°C]	T_{ref} [°C]	ΔT_m [°C]	ΔT_n [°C]	Klasa termičkog stanja elementa
Spojevi završetaka provodnih izolatora sa namotajima transformatora na 10 [kV] strani	L ₁	800	781	10,9	10,9	-	-	ref. el.
	L ₂	800	782	11,2	10,9	0,3	0,3	C
	L ₃	800	781	33,6	10,9	22,7	23,2	B
Priključne stezaljke spoljašnjih delova provodnih izolatora na 35 [kV] strani	L ₁	230	201	119,9	5,5	114,4	149,7	A
	L ₂	230	202	5,5	5,5	-	-	ref. el.
	L ₃	230	201	26,8	5,5	21,3	27,8	B
Priključne stezaljke unutrašnjih delova provodnih izolatora na 35 [kV] strani	L ₁	230	202	16,6	10,1	6,5	8,4	B
	L ₂	230	201	10,1	10,1	-	-	ref. el.
	L ₃	230	201	12,2	10,1	2,1	2,7	C

ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

Nakon sprovedenih termografskih snimanja izvršena je analiza termografskih slika na osnovu koje su utvrđena mesta i uzroci neispravnosti i preporučene mere koje služba održavanja treba da sprovede u optimalnom vremenskom periodu da bi se otklonile uočene neispravnosti [4].

Analiza termografskih slika vršena je na računaru na kome je instalisan programski paket ThermaCAM Researcher, specijalno razvijen za dijagnostiku i naučna istraživanja, koji omogućava detaljnu analizu termografskih slika odnosno omogućava da se sa termografske slike lako mogu uočiti tačke sa maksimalnim i minimalnim vrednostima temperature, kao i njihov međusobni raspored i zavisnost. Kao rezultat analize termografskih slika ovaj program daje crtež, tabelu rezultata, profil temperatura i histogram u odgovarajućim delovima prozora programa ili direktno na termogramu. Takođe moguće je dobiti i iznose apsolutnih temperatura i relativnih temperatura u odnosu na prethodno definisanu referentnu temperaturu [5].

Na osnovu fotografske i termografske slike 1, kao i tabela 1 i 3, može se utvrditi da je strujno opterećenje u sve tri faze približno isto, kao i da je termičko stanje spojeva završetka provodnih izolatora sa namotajima transformatora na 10 [kV] strani takvo da je ovaj spoj u fazi L_1 ispravan zbog čega je on izabran kao referentni; spoj u fazi L_2 je termičkog stanja klase „C“ što znači da je potrebno praćenje stanja i planiranje intervencije; a spoj u fazi L_3 je termičkog stanja klase „B“ što znači da je potrebna intervencija prilikom prvog isključenja postrojenja. Pažljivom analizom termografske slike, odnosno utvrđivanjem načina, pravca i smera prostiranja toplote može se zaključiti da pregrevanje spoja sabirnice i provodnog izolatora u fazi L_3 nije posledica lošeg stanja tog spoja, već je posledica prenosa toplote kondukcijom na taj spoj sa spoja završetka provodnog izolatora sa namotajem transformatora na 10 [kV] strani u fazi L_3 , zbog čega je prilikom intervencije potrebno proveriti kvalitet tog spojnog mesta odnosno potrebno je proveriti kvalitet užeta koje spaja namotaj transformatora sa završetkom provodnog izolatora. Ovo se takođe može uočiti ako se na slici 4. posmatraju profili temperatura duž linija povučenih na termografskoj slici po dužini provodnih izolatora transformatora na 10 [kV] strani u sve tri faze, odnosno može se videti da je temperatura spojnog mesta završetka provodnog izolatora sa namotajem transformatora na 10 [kV] strani u fazi L_3 (tačka sa najvišom temperaturom na dijagramu) viša od temperature spoja sabirnice i provodnog izolatora u fazi L_3 , što znači da je došlo do prenosa toplote sa tog spojnog mesta na spoj sabirnice i provodnog izolatora.



Slika 4. Profili temperatura duž linija povučenih na termografskoj slici po dužini provodnih izolatora transformatora na 10 [kV] strani u sve tri faze; puna zelena linija se odnosi na fazu L_1 ; isprekidana crvena linija se odnosi na fazu L_2 , a tačkasta plava linija na fazu L_3

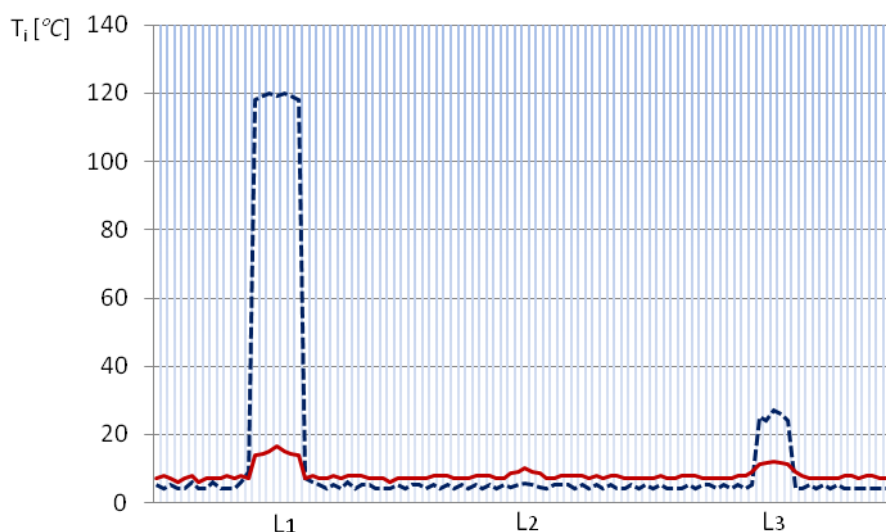
Takođe, iz tabele 3. se vidi da su vrednosti izmerenih struja u sve tri faze priključnih stezaljki spoljašnjih delova provodnih izolatora na 35 [kV] strani približno iste tj. da je opterećenje približno simetrično, pa bi prema tome isti elementi u svim fazama trebali da imaju približno iste temperature. Međutim, sa termografske slike prikazane na slici 2., može se uočiti da priključne stezaljke spoljašnjih delova provodnih izolatora na 35 [kV] strani, u pojedinim fazama, imaju različite temperature. Priključna stezaljka u fazi L₂ ima najnižu temperaturu, pa se zbog toga smatra ispravnom i usvaja se kao referentna i njena temperatura se poredi sa temperaturama istih tih stezaljki u preostalim fazama. Priključne stezaljke u fazama L₁ i L₃ imaju veće temperature od referentne priključne stezaljke u fazi L₂ za $\Delta T_m=114,4$ [°C] i $\Delta T_m=21,3$ [°C] respektivno. Navedene razlike u temperaturama (veliĉine pregrevanja) se odnose na strujno opterećenja koje je iznosilo $I_m=201$ [A], iz tabele 3. se vidi da bi pri nominalnom opterećenju $I_n=230$ [A] veliĉine ovih pregrevanja bile i veće, za priključnu stezaljku u fazi L₁ pregrevanje bi iznosilo $\Delta T_n=149,7$ [°C], a za priključnu stezaljku u fazi L₃ bi iznosilo $\Delta T_n=27,8$ [°C].

Prema kriterijumima navedenim u tabeli 1, na osnovu veliĉine pregrevanja priključne stezaljke u fazi L₁ od $\Delta T_n=149,7$ [°C] zaključuje se da njeno termiĉko stanje klase „A“, što znaĉi da je potrebno hitno otklanjanje neispravnosti. Takođe, prema istim kriterijumima na osnovu veliĉine pregrevanja priključne stezaljke u fazi L₃ od $\Delta T_n=27,8$ [°C] procenjuje se da je njeno termiĉko stanje klase „B“ što znaĉi da je potrebna intervencija prilikom prvog iskljuĉenja postrojenja. Međutim, pošto je potrebno izvršiti iskljuĉenje postrojenja da bi se izvršila hitna popravka priključene stezaljke u fazi L₁, predlaže se da se tada izvrši i popravka priključne stezaljke u fazi L₃.

Sa termografske slike se još uoĉava da su pregrevanja najveća na samim mestima spojeva priključnih stezaljki i uŹadi u fazama L₁ i L₃. PaŹljivim vizuelnim pregledom može se uoĉiti da je spoj u fazi L₁ u veoma lošem stanju odnosno da je korodirao, pa je to najverovatnije i uzrok njegovog pregrevanja, takođe se može uoĉiti da je spoj u fazi L₃ malo korodirao i zaprljan i da nije u tako lošem stanju kao spoj u fazi L₁.

Analogno prethodnoj analizi može se, na osnovu slike 3 i tabela 1 i 3, utvrditi da je termiĉko stanje priključnih stezaljki unutrašnjih delova provodnih izolatora na 35 [kV] strani takvo da je stezaljka u fazi L₂ ispravna, zbog ĉega je ona izabrana kao referentna; stezaljka u fazi L₁ je termiĉkog stanja klase „B“ što znaĉi da je potrebna intervencija prilikom prvog iskljuĉenja postrojenja; a stezaljka u fazi L₃ je termiĉkog stanja klase „C“ što znaĉi da je potrebno praćenje stanja i planiranje intervencije. Međutim, paŹljivom analizom termografske slike, odnosno utvrđivanjem naĉina, pravca i smera prostiranja toplote može se zaključiti da pregrevanje stezaljke u fazi L₁ od $\Delta T_m=6,5$ [°C] nije posledica lošeg stanja spoja, već posledica prenosa toplote kondukcijom na tu stezaljku sa spoja spoljašnje stezaljke u istoj toj fazi, zbog njenog jako velikog pregrevanja od $\Delta T_m=114,4$ [°C].

Ovo se takođe može uočiti ako se na slici 5. porede profili temperatura duž linija povučene na termografskoj slici kroz priključne stezaljke na spoljašnjim i unutrašnjim delovima provodnih izolatora na 35 [kV] strani, isprekidana plava linija se odnosi na termografsku sliku 2 b), a puna crvena linija na termografsku sliku 3 b), vidi se da spoljašnja priključna stezaljka u fazi L₁ ima znatno višu temperaturu nego unutrašnja. Intervencija na unutrašnjoj stezaljci nije neophodna, ali je poželjna, s obzirom da će se vršiti isključenje postrojenja radi otklanjanja neispravnosti na spoljašnjoj priključnoj stezaljci u fazi L₁, jer je zbog pregrevanja moglo doći do njenog oštećenja.



Slika 5. Profili temperatura duž linija povučene na termografskoj slici kroz priključne stezaljke na spoljašnjim i unutrašnjim delovima provodnih izolatora na 35 [kV] strani; isprekidana plava linija se odnosi na termografsku sliku 2 b), a puna crvena linija na termografsku sliku 3 b)

Poznato je da se zbog loših spojeva povećava njihova prelazna otpornost usled čega dolazi do pojave Džulovih gubitaka toplote ($Q=RI^2t$ [J]) i njihovog pregrevanja. Tako se merenjem prelaznih otpornosti spojeva može utvrditi kvalitet tih spojeva i uzrok njihovog eventualnog pregrevanja [1]. Zbog toga su u cilju provere rezultata termografskih ispitivanja izvršena merenja prelaznih otpornosti spojeva primenom električne $U-I$ metode, korišćen je spoj sa strujnim i naponskim stezaljkama, pogodan za merenja malih otpornosti. Nakon očitanih izmerenih vrednosti napona U i struja I izračunate su vrednosti prelaznih otpornosti spojeva prema relaciji $R=U/I$ [mΩ]. Rezultati tih izračunatih vrednosti dati su u tabeli 4.

Tabela 4. Izračunate vrednosti prelaznih otpornosti spojeva

Ispitivani element	Faza	Izračunate vrednosti prelaznih otpornosti spojeva [$m\Omega$]
Spojevi završetaka provodnih izolatora sa namotajima transformatora na 10 [kV] strani	L ₁	1,347
	L ₂	1,345
	L ₃	4,658
Priključne stezaljke spoljašnjih delova provodnih izolatora na 35 [kV] strani	L ₁	5,883
	L ₂	1,665
	L ₃	3,698
Priključne stezaljke spoljašnjih delova provodnih izolatora na 35 [kV] strani	L ₁	1,663
	L ₂	1,675
	L ₃	1,662

Analizirajući dobijene rezultate u tabeli 4., može se zaključiti da povećane prelazne otpornosti u odnosu na referentne stezaljke imaju priključne stezaljke spoljašnjih delova provodanih izolatora na 35 [kV] strani u fazama L₁ i L₃, za više od 4 odnosno 2 [$m\Omega$], kao i spoj završetka provodnog izolatora sa namotajem transformatora na 10 [kV] strani u fazi L₃, za više od 3 [$m\Omega$]. Za ova mesta je i termografskim ispitivanjima utvrđeno da imaju loše spojeve. Za priključnu stezaljku unutrašnjih delova provodanih izolatora na 35 [kV] strani u fazi L₁ i za spoj sabirnice i provodnog izolatora transformatora na 10 [kV] strani u fazi L₃ nisu izmerene povećane prelazne otpornosti u odnosu na referentne stezaljke što znači da imaju dobre spojeve, čime je potvrđena tačnost rezultata termografskih ispitivanja koji su pokazali da su pregrevanja ovih mesta posledica prenosa toplote na njima sa drugih mesta koja se pregrevaju zbog loših spojeva. Na ovaj način je pokazano veoma dobro slaganje rezultata ispitivanja elemenata elektroenergetskih postrojenja termografskom metodom sa rezultatima dobijenim električnom $U-I$ metodom merenja prelazne otpornosti spojeva.

ZAKLJUČAK

Rezultati sprovedenih termografskih ispitivanja elemenata elektroenergetskog postrojenja 35/10 [kV] su pokazali da su postojale određene neispravnosti nekih od tih elemenata. Pošto su određene neispravnosti zahtevale hitno otklanjanje, izvršeno je isključenje postrojenja u najpovoljnijem trenutku, radi otklanjanja tih neispravnosti, što je iskorišćeno i za otklanjanje neispravnosti koje nisu zahtevale hitnost.

Prilikom otklanjanja uočenih neispravnosti primenom električne $U-I$ metode izvršeno je merenje prelaznih električnih otpornosti spojeva i ustanovljeno da samo spojevi za koje je utvrđeno da su neispravni (odnosno loši) imaju povećane prelazne otpornosti u odnosu na referentne (ispravne) spojeve. Time je potvrđena ispravnost novog pristupa u utvrđivanju mesta neispravnosti, zasnovanom na utvrđivanju načina, pravca i smera prostiranja toplote, kao i analizi profila temperatura, koji je pokazao da mesta pregrevanja ne predstavljaju uvek i mesta neispravnosti. Takođe, odmah nakon obavljenih radova na otklanjanju uočenih neispravnosti ponovljena su termografska ispitivanja, a rezultati tih ispitivanja su pokazali da više ne postoje mesta pregrevanja, čime je i na taj način potvrđeno da su rezultati termografskih ispitivanja bili tačni, kao i da su otklonjene uočene neispravnosti koje su postojale pre ispitivanja. Svakako da je najznačajnija korist od termografskih ispitivanja otkrivanje neispravnosti u početnoj fazi njihovog nastanka, čime se stvaraju uslovi da se, preduzimanjem odgovarajućih aktivnosti održavanja u najpovoljnijem trenutku, spreče veći kvarovi i havarije, a time i troškovi koje oni uzrokuju. Na taj način se obezbeđuje rad elektroenergetskog postrojenja bez ili sa što manje zastoja i to planskih, jer zastoji, a naročito neplanski, mogu prouzrokovati velike troškove, pored toga mogu dovesti i do dodatnih oštećenja drugih delova postrojenja koja mogu ugroziti sigurnost ljudi. Tako se ovakvim redovnim termografskim ispitivanjima, kao delu programa preventivnog održavanja, postiže veća pouzdanost rada elektroenergetskih postrojenja, povećava sigurnost radnika na radu, zatim smanjuju troškovi održavanja (kroz smanjenje aktivnosti održavanja i optimalnije planiranje aktivnosti održavanja i sl.) odnosno održavanje postaje ekonomičnije i kvalitetnije, a pouzdanost napajanja potrošača električnom se podiže na viši nivo.

LITERATURA

- [1] M. Kutin, Z. Adamovic, *Tensile features of welded joint testing by thermography*, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 46, No 5, 2010, pp. 386-393.
- [2] B. Ilic, “*Automatizovani dijagnostički modeli i njihov uticaj na pouzdanost tehničkih sistema*”, doktorska disertacija (u pripremi).
- [3] R. Brkic, Z. Adamovic, *Research of defects that are related with reliability and safety of railway transport system*, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 47, No 6, 2011, pp. 420-429
- [4] Z. Adamovic, B. Ilic, B. Savic, M. Jevtic, *Termografija pouzdana dijagnostička metoda*, Monografija, Pan Book, Novi Sad, 2011.
- [5] J. H. Song, H. G. Noh, S. M. Akira, H. S. YU, H. Y. Kang, and S. M. Yang, *Analysis of effective nugget size by infrared thermography in spot weldment*, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 5, No. 1, 2004, pp. 55–59.
- [6] I.C. Bertmaring, *Using Thermography to Evaluate the Effects of Arm Flexion and Loading on the Anterior Deltoid during a Simulated Overhead Task*, Blacksburg, Virginia, 2006, pp. 4-13.

- [7] B. Ilic, Z. Adamovic, LJ. Radovanovic, B. Savic, N. Stankovic, *Thermographic investigations of power plant elements*, Proceedings/5th International Symposium on Industrial Engineering – SIE 2012, June 14-15, Belgrade, Serbia; organized by Industrial Engineering Department Faculty of Mechanical Engineering University of Belgrade and Steinbeis Advanced Risk Technologies Stuttgart, Germany. Publisher Faculty of Mechanical Engineering University of Belgrade 2012, pp. 291-296. (ISBN 978-86-7083-758-4)
- [8] J.H. Park; C.C. Lee, *A new configuration of nematic liquid crystal thermography with applications to GaN-based devices*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Volume: 55 , Issue: 1 2006 , Page(s): 273 –279
- [9] R. Yang; Y. Chen, *Design of a 3-D Infrared Imaging System Using Structured Light*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Volume: 60 , Issue: 2, 2011 , Page(s): 608 – 617
- [10] T. Ummenhofer, J. Medgenberg, *On the use of infrared thermography for the analysis of fatigue damage processes in welded joints*, doi: 10.1016/j.ijfatigue. 2008. 04. 005, 2008, International Journal of Fatigue, Vol. 31, 1, 2009, pp. 130-137.
- [11] M. Žarković, Z. Stojković, *Automatizacija termovizijskog postupka u monitoringu i dijagnostici elemenata prenosne mreže*, Infoteh-Jahorina, Vol. 11, mart 2012.

ASSESSMENT OF THE THERMAL CONDITION ELECTRIC POWER EQUIPMENT IN PROCESS INDUSTRY BY THE METHOD THERMOGRAPHY

Božo Ilić¹, Živoslav Adamović², Branko Savić³, Nenad Stanković³
bozoilic66@gmail.com

¹Technical High School, 75400 Zvornik, Republic of Srpska, B&H

²University of Novi Sad, Technical Faculty Mihajlo Pupin, 23000 Zrenjanin, Serbia

³Higher Technical School of Professional Studies, 21000 Novi Sad, Serbia

Abstract

During the operation of power equipment in the process industry failure can occur, which if not timely detected and corrected, could lead to major failures and disasters, and a time to unplanned downtime of entire production lines, which can lead to high costs, environmental damage and endanger the safety of workers is therefore within the program of preventive maintenance performed thermographic testing of power equipment. The aim of this is that propose new approach to determine defect of the method of thermography, which is based on determining the method, direction and direction of propagation of heat and temperature profile analysis. This approach allows to prove that the places are not always overheat and malfunction place. Results obtained with this approach are verified by results obtained using UI electrical transient measurements of electrical resistance of joints.

Key words: *thermal testing, electrical power equipment, assessment of thermal conditions, heat transfer, places of overheating.*