

Josip Bošnjak, dipl. ing. el.
Encron d.o.o.
josip.bosnjak@encron.hr

Velimir Ravlić, dipl. ing. el.
Ravel d.o.o.
velimir.ravlic@ravel.hr

Ante Ravlić, mag. ing. el.
Ravel d.o.o.
ante.ravlic@ravel.hr

MOGUĆNOST PRIMJENE SMANJENIH MODELA STEZALJKI KOD ISPITIVANJA PORASTA TEMPERATURE STEZALJKI U POSTROJENJIMA

SAŽETAK

Zbog znatnog povećanja snage prijenosa i distribucije električne energije posljednjih godina, u Republici Hrvatskoj i u svijetu, izgrađeno je mnogo novih izvora električne energije i to posebno vjetroelektrana i solarnih elektrana koje su dosta udaljene od središta potrošnje. Zbog izgradnje novih visokonaponskih postrojenja i prijenosnih vodova potrebno je ugraditi jako veliki broj stezaljki. Iz toga je razloga potrebno posvetiti posebnu pažnju zamjeni i razvoju novih metoda ispitivanja stezaljki u postrojenjima uzimajući u obzir način rada (prijenos snage i utjecaj temperature) koji se realno očekuje na lokaciji ugradnje [1]. IEC norme [2] i ANSI/NEMA norme [3] su okvir za provedbu ispitivanja visokonaponskih stezaljki. Ova ispitivanja su rutinska ispitivanja koja moraju biti uključena u planove kontrole kvalitete proizvođača stezaljki.

Treba naglasiti da je ispitivanje stezaljki i ostale spojne opreme, kao i ispitivanje postrojenja relativno vremenski dugotrajno i zahtijeva troškove zbog potroška energije za izvođenje ovih ispitivanja.

Ključne riječi: postrojenje, ispitivanje porasta temperature, smanjeno mjerilo (model), sličnost, visokotemperaturni niskoprovjesni vodič (HTLS), stezaljke u postrojenju, visoke vrijednosti struje

REDUCED SCALE FEASIBILITY OF TEMPERATURE RISE TESTS IN SUBSTATION CONNECTORS

ABSTRACT

Due to the significant increase in power transmission and distribution of electricity in recent years, in the Republic of Croatia and in the world, many new sources of electricity have been built, especially wind power plants and solar power plants that are quite far from the centers of consumption. Due to the construction of new high-voltage substations and transmission lines, it is necessary to install a very large number of substation connectors. For this reason, it is necessary to pay special attention to the replacement and development of new methods of testing substation connectors, taking into account the mode of operation (power transmission and temperature influence) that is realistically expected at the installation location [1]. IEC standards [2] and ANSI/NEMA standards [3] sets standardized tests for the evaluation of high voltage connectors. These tests are routine tests that must be included in the connectors manufacturer's quality control plans.

It should be emphasized that the testing of connectors, as well as the testing of the substation, is relatively time-consuming and requires costs due to the energy consumption for performing these tests.

Key words: switchgear, temperature rise test, reduced scale, similarity, High Temperature Low Sag (HTLS), substation connectors, high-currents

1. UVOD

Zbog velikog broja stezaljki za nove nadzemne vodove i postrojenja potrošnja električne energije za ispitivanja nije zanemariva, pri čemu su dugotrajna izvođenja ispitivanja.

Tako, npr. za izvođenje ispitivanja zagrijavanja (porasta temperature) za stezaljke u postrojenjima potrebna je snaga od 100 kVA, koja se primjenjuje ciklički tijekom više tjedana. Ovakva ispitivanja se mogu izvoditi samo u nekoliko laboratorija i vrlo su skupa jer su privremenog karaktera, uzrokuju značajne troškove, energetski su trošak te imaju i utjecaj na okoliš. Zbog navedenih razloga koriste se tehnološka dostignuća iz aeronautike, brodogradnje i automobilske industrije kao i rezultati drugih studija iz područja elektroenergetike, a posebno u vezi korone i radio smetnji [1], kako bi se predložila primjena smanjene skale ispitivanja za izvođenje ispitivanja porasta temperature za stezaljke u postrojenjima.

Teorijska razmatranja zasnovana na analitičkim formulama, simulacije metodom konačnih elemenata (engl. finite element method – FEM) i rezultati ispitivanja su omogućili razvoj smanjenih modela stezaljki kod ispitivanja porasta temperature i definiranje uvjeta koji omogućuju dobivanje usporedivih rezultata u odnosu na originalnu izvedbu stezaljki kod ispitivanja porasta temperature. Prvo se analiziraju dvije kružne petlje (originalne i smanjene petlje) koje se sastoje od vodiča i dvije stezaljke. Cilj prvog stupnja postupka analize je određivanje lakog i pouzdanog načina određivanja vrijednosti napona i struje koje će se prenijeti kod smanjenih ispitivanja porasta temperature kako bi se dobile iste stacionarne vrijednosti temperature kao u originalnoj izvedbi stezaljki i petlji kod ispitivanja porasta temperature [1]. Odnos mjerila između originalnog modela ispitivanja i smanjenog modela ispitivanja kod porasta temperature je 1:1,8 pa se predložena metoda u ovom članku može primijeniti s bilo kojim drugim faktorom skale (mjerila).

U ovom članku se opisuje primjena za prvi stupanj postupka za dobivanje konačnih rezultata kod procedure ispitivanja stezaljki u postrojenjima.

Pri tome treba istaknuti sve veću primjenu HTLS vodiča u svijetu i Republici Hrvatskoj. To su visokotemperaturni niskoprovjesni vodiči.

Oznake korištene u daljnjem tekstu:

r	- polumjer vodiča (m)	P_e	- radna snaga (W)
R	- otpor (Ω)	Q_e	- jalova snaga (Var)
X	- reaktancija (Ω)	S_e	- prividna snaga (VA)
L	- induktivitet (H)	$\cos \varphi$	- faktor snage
ρ	- specifični otpor (Ωm)	t	- vrijeme (s)
h	- koeficijent konvekcije ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)	n	- omjer skala (mjerilo) ispitivanja
ε	- emisivnost	σ	- Stefan-Boltzmann konstanta ($\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$)
J	- gustoća struje ($\frac{A}{m^2}$)	S	- područje radijacije/konvekcije (m^2)
T	- temperatura (K)		

2. IZBOR MJERILA (SKALA)

2.1. Općenito

Sve smanjene skale (mjerila) modela kod ispitivanja sadrže više ograničenja prilikom primjene. Fokusirajući se na našu problematiku, za izvođenje smanjene skale ispitivanja (slika 1) postoje dva osnovna ograničenja koja su definirana raspoloživosti materijala. Prvo ograničenje se odnosi na činjenicu da se obje strane stezaljke koriste za komercijalno raspoložive HTLS vodiče. Zbog toga su smanjene skale ispitivanja (engl. reduced scale – RS) odnose se na primjenu GT ACSR 131-19 vodiča koji su najmanji HTLS vodiči koji su raspoloživi na tržištu. S druge strane se originalna skala ispitivanja (engl. original scale – OS) koristi uz GT ACSR 464 CONDOR vodiče koji su bili najveći HTLS vodiči u trenutku ispitivanja (2016. godine).

Sljedeće ograničenje se odnosi na vijke. Za originalnu skalu ispitivanja OS korišteni su vijci M10, dok su smanjenoj skali ispitivanja RS korišteni vijci M6. Kao rezultat se može zaključiti da je odnos skala 1 : 1,74.



Sl. 1.: Stezaljke za vodiče HTLS za smanjenu skalu ispitivanja (lijevo) i originalnu skalu ispitivanja (desno) koje su korištene za izvođenje ispitivanja [1]

2.2. Opis vodiča

Tablica 1. Tvornički podaci o vodičima GT ACSR 131-19

Vanjski promjer vodiča (mm)	15,79
Vanjski promjer čelične jezgre (mm)	5,55
Električni otpor po jedinici dužine kod 20 °C (Ω/km)	0,2241
Maksimalno dopuštena temperatura (°C)	150
Bezdimenzijski termički faktor emisivnosti ϵ	0,5

Tablica 2. Tvornički podaci o vodičima GT ACSR 464 CONDOR

Vanjski promjer vodiča (mm)	27,60
Vanjski promjer čelične jezgre (mm)	9,00
Električni otpor po jedinici dužine kod 20 °C (Ω/km)	0,0708
Maksimalno dopuštena temperatura (°C)	150
Bezdimenzijski termički faktor emisivnosti ϵ	0,5

2.3. Opis spojnice

Tablica 3. Dimenzije i relevantne fizikalne karakteristike spojnice

	Originalna skala	Reducirana skala
Visina (mm)	188	104
Širina (mm)	95	58
Maksimalni vanjski promjer (mm)	28	18
Veličina vijaka	M10	M6
Otpor aluminijske legure (Ωm)	$4,5 \cdot 10^{-8}$	$4,5 \cdot 10^{-8}$
Bezdimenzijski termički faktor emisivnosti ε	0,45	0,45

3. ISPITIVANJE PORASTA TEMPERATURE GOLIH ALUMINIJSKIH VODIČA

3.1. Teorijske osnove

Početna studija je izvedena za određivanje porasta temperature dvije vrlo pojednostavljene petlje (smanjena skala RS i originalna skala OS), koje se sastoje samo od golih aluminijskih vodiča. Cilj početne studije je pronaći odnos između struja u stacionarnom stanju koje će biti korištene u svakoj petlji kako bi se postigla ista termička naprezanja kod iste stacionarne temperature.

3.2. Hipoteze

Izabrane hipoteze modeliraju tranzijentne temperaturne profile aluminijskih okruglih vodiča i prikazane su u tablici 4. To je multidisciplinarni elektromagnetski – termički problem. Toplina je proizvedena zbog utjecaja Jouleovih gubitaka kod protjecanja struje kroz vodljivi materijal.

Tablica 4. Ulazni podaci za model toplinskog ponašanja aluminijskih okruglih vodiča

1.	Konačno (ustaljeno) tijelo
2.	Varijabilna fizička ograničenja
3.	Toplina proizvedena zbog utjecaja Jouleovih gubitaka
4.	Prirodna konvekcija za cilindrični model [4]
5.	Sivo tijelo
6.	Difuzna radijacija
7.	Kružni poprečni presjek
8.	Toroidalni oblik
9.	Aluminijski vodič

3.2. Metoda proračuna stacionarnih prilika

Pojednostavljena metoda proračuna stacionarnih prilika vodiča koristi se za određivanje razine struje koja se treba primijeniti u svakoj petlji (RS ili OS) kako bi se postigle iste temperature u stacionarnom stanju [4].

Jednadžba za ravnotežu energije u stacionarnom stanju iznosi:

$$\dot{Q}_{generation} = \dot{Q}_{radiation} + \dot{Q}_{convention} \quad (1)$$

\dot{Q} (W) je prirast energije u vremenu.

$$\begin{cases} \dot{Q}_{generation} = Q_{Joule} = I^2 \cdot R = 2 \cdot J^2 \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot \rho \cdot R \\ \dot{Q}_{convention} = h \cdot S \cdot [T - T_{air}] \\ \dot{Q}_{radiation} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot [T^4 - T_{air}^4] \end{cases} \quad (2)$$

Iz jednadžbi (2) može se dobiti jednadžba za zahtijevanu gustoću struje kod zagrijavanja vodiča u ispitnoj petlji:

$$J = \sqrt{\frac{2}{r \cdot \rho} \cdot [\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_C^4 - T_{air}^4) + h(T_C - T_{air})]} \quad (3)$$

Gustoća struje izračunata iz jednadžbe (3) koristi se kao ulazna veličina za FEM simulacije kod analize toplinskog ponašanja vodiča u kružnoj petlji.

Otpor i impedancija kružne petlje se može računati iz jednadžbi:

$$R = \rho \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \text{Radijus}_{\text{petlje}}}{\pi \cdot r^2} \quad (4)$$

$$X = 2 \cdot \pi \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot R \cdot \left[\ln \left(\frac{8 \cdot \text{Radijus}_{\text{petlje}}}{r} \right) - \frac{7}{4} \right] \quad (5)$$

3.3. FEM simulacije

Za jednostavne konfiguracije može se koristiti 2D-osnosimetrični model (slika 2 i 3). Razmatrani volumen se sastoji od dva dijela.

Prvi dio se sastoji od kružne petlje iz aluminija s mrežom trokutnih konačnih elemenata.

Drugi dio je okolni zrak oko petlje koji se također modelira s mrežom trokutnih konačnih elemenata.

Dimenzije u razmatranoj domeni su važne zbog toga što se ukupni induktivitet L petlje izračunava kako bi se dobila potrošnja jalove snage. Ako je domena premala, tada će izračunati induktivitet petlje L biti premali i nerealne vrijednosti. To će se reflektirati na netočnost rezultata proračuna impedancije vodiča.

FEM formulacija

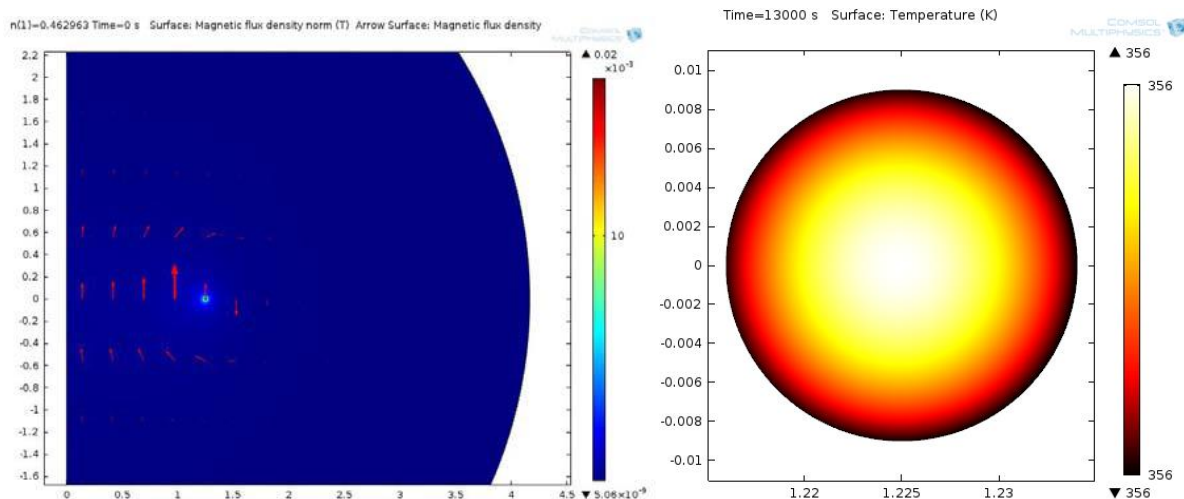
Maxwellove jednadžbe se koriste za kvazi-statičko aproksimiranje i kontinuitet protjecanja.

Ravnoteža energija se formira slično prikazu u jednadžbi (1) i koristi se za proračun razvoja temperature vodiča.

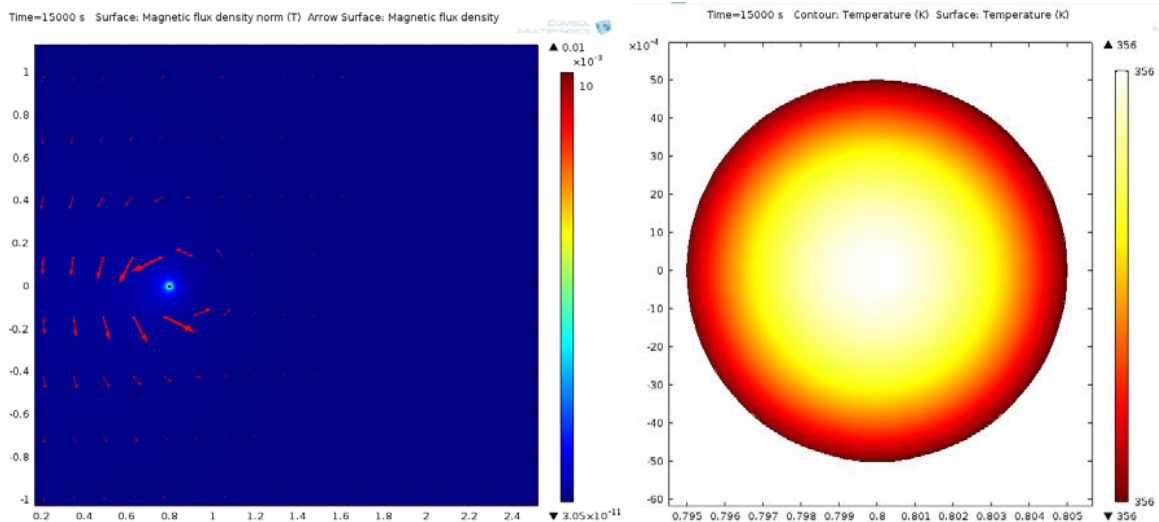
Pri tome se koristi 2D osnosimetrični FEM model.

Rubni uvjeti za FEM simulaciju

Pretpostavlja se da je vodič okružen zrakom i da se toplina evakuira s površine vodiča prirodnom konvekcijom i radijacijom [1].



Sl. 2.: a) 2D osnosimetrična razdioba gustoće magnetskog toka
b) Stacionarna temperatura vodiča uz originalno mjerilo vodiča i gustoću struje uz $J_{RMS} = 1,99 \cdot 10^6 \text{ (A/m}^2\text{)}$



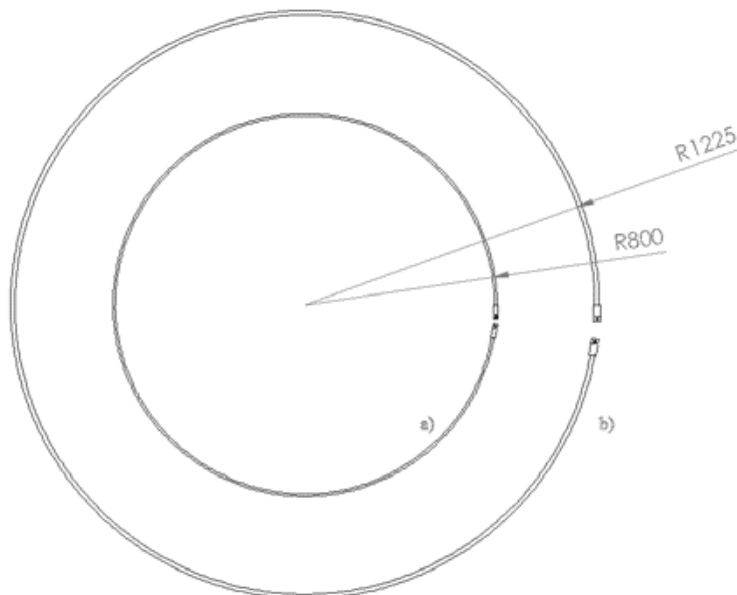
Sl. 3.: a) 2D osnosimetrična razdioba gustoće magnetskog toka
 b) Stacionarna temperatura vodiča uz originalno mjerilo vodiča i gustoću struje uz $J_{RMS} = 2,28 \cdot 10^6 \text{ (A/m}^2\text{)}$

Rezultati na slikama 2b i 3b pokazuju da je dobra toplinska vodljivost aluminijska te da gotovo nema temperaturnog gradijenta između središnjeg dijela i vanjskih dijelova vodiča.

Sa slika 2 i 3 je također vidljivo da će stacionarna temperatura biti ista bez obzira na razmatranu skalu (mjerila ispitnih uzoraka).

3.4. Usporedba rezultata proračuna i rezultata ispitivanja

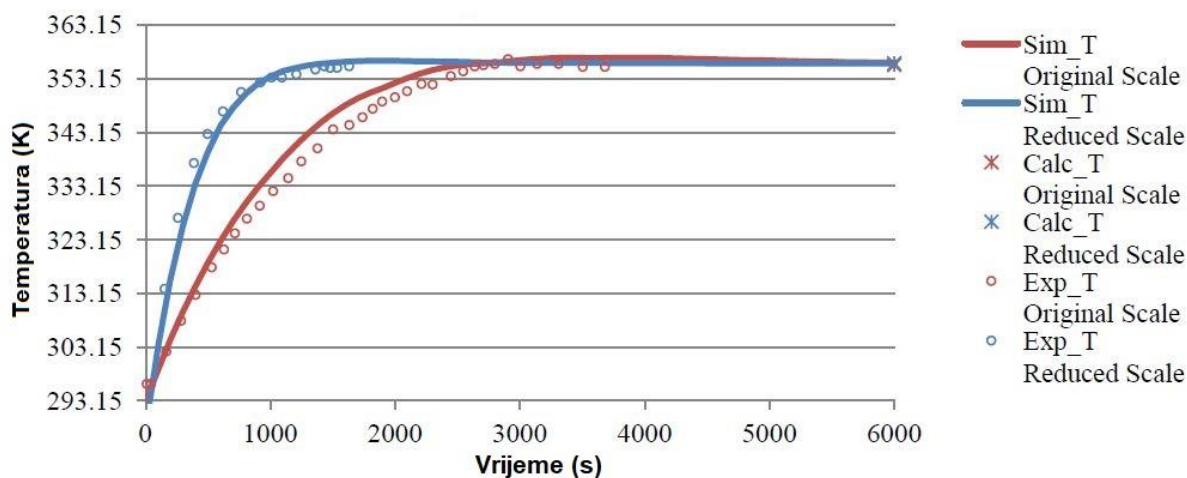
Dva aluminijska vodiča s omjerom dimenzija 1 : 1,8 su blizu dimenzija koje su definirane za ispitne petlje s pripadajućim stezaljkama (slika 1). Rezultat ovih ispitivanja donosi empirijsku spoznaju oko pouzdanosti smanjenih modela ispitivanja kod ispitivanja porasta temperature stezaljki [1].



Sl. 4.: Skup originalnih i smanjenih kružnih petlji za ispitivanje porasta temperature
 a) Smanjena ispitna petlja $D=8 \text{ mm}$; polumjer petlje $=800 \text{ mm}$
 b) Originalna ispitna petlja $D=125 \text{ mm}$; polumjer petlje $=1225 \text{ mm}$

Na slici 5 su prikazane promjene temperature za originalne i smanjene petlje dobivene FEM simulacijom i odgovarajućom metodom proračuna te usporedbom s rezultatima ispitivanja. Dobiveni

rezultati također potvrđuju smanjenje vremenskih konstanti gotovo linearno s mjerilom uzoraka. Također se sa smanjenjem mjerila ispitne petlje smanjuju zahtjevi za snagom gotovo dva puta sa smanjenjem mjerila ispitne petlje. U analiziranom slučaju je energija potrošnje kod smanjenih mjerila ispitivanja oko 5,5 puta manja nego u slučaju originalnih skala ispitivanja (OS test).



Sl. 5.: Ispitivanje porasta temperature pri čemu se mjeri temperatura površine te usporedba između uzoraka s originalnim mjerilom i smanjenim mjerilom [1]

U tablici 5 su uspoređeni rezultati dobiveni FEM simulacijom i odgovarajućom metodom proračuna s rezultatima ispitivanja u stacionarnom stanju za ispitne petlje iz aluminijskih vodiča [1].

Tablica 5. Rezultati u stacionarnom stanju uz usporedbu između rezultata simulacije i proračuna s rezultatima ispitivanja pri čemu su dobivene vrijednosti za kružne petlje iz aluminijskih vodiča

	Omjer mjerila	Promjer vodiča (mm)	T_{final} (K)	V_{RMS} (V)	L (micro H)	I_{RMS} (A)	R (mili Ω)	X_L (mili Ω)	P_e (W)	S_e (VA)	Q_e (VAr)	$\cos \varphi$
SMANJENA SKALA (RS)												
Simulacija (FEM)	0,56	12,5	355,97	0,83	5,43	177,42	4,34	1,71	136,50	146,66	53,72	0,93
Izračunato	0,56		355,97	0,83	5,43	179,30	4,28	1,71	137,71	148,22	54,81	0,93
Ispitivanje	0,56		355,15	0,85	5,62	173,38	4,55	1,77	136,75	146,70	53,10	0,93
Pogreška kod simulacije (%) Sim-Exp	0,56		0,23	2,35	3,38	2,33	4,62	3,39	0,18	0,03	1,17	0,00
Pogreška kod proračuna (%) Calc-Exp	0,56		0,00	2,35	3,38	3,41	5,93	3,39	0,70	1,04	3,22	0,00
ORIGINALNA SKALA (OS)												
Simulacija (FEM)	1	8	355,67	1,43	8,07	499,18	1,32	2,53	329,20	712,27	631,61	0,46
Izračunato	1		355,15	1,43	8,07	508,75	1,20	2,54	310,89	725,92	655,97	0,43
Ispitivanje	1		355,65	1,44	8,51	486,23	1,27	2,67	300,60	699,59	631,72	0,43
Pogreška kod simulacije (%) Sim-Exp	1		0,01	0,69	5,17	2,66	3,94	5,24	9,51	1,81	0,02	6,98
Pogreška kod proračuna (%) Calc-Exp	1		0,14	0,69	5,17	4,63	5,51	4,87	3,42	3,76	3,84	0,00

Iz tablice 5 se može zaključiti da su rezultati u slučaju uzoraka sa smanjenim mjerilom značajno povećani faktori snage ispitne petlje i da tada imamo smanjenje potreba za jalovom snagom.

Za razmatrani slučaj jalova snaga je smanjena s faktorom približno 12. Navedeni rezultati sugeriraju da je ispitivanje sa smanjenim modelom opcija kod izvođenja ispitivanja porasta temperature.

4. ISPITIVANJE PORASTA TEMPERATURE ZA PETLJE S HTLS STEZALJKOM U VISOKONAPONSKOM POSTROJENJU

4.1. Teorijske osnove

Zaključci iz prethodnih odjeljaka potakli su ideju za ispitivanjem u stvarnim uvjetima (petljama) stezaljke u visokonaponskim postrojenjima koje zadovoljavaju zahtjeve norme ANSI/NEMA CC1-2009 [3]. Stacionarno stanje temperature vodiča je također proračunato FEM simulacijama i pripadajućim metodama proračuna.

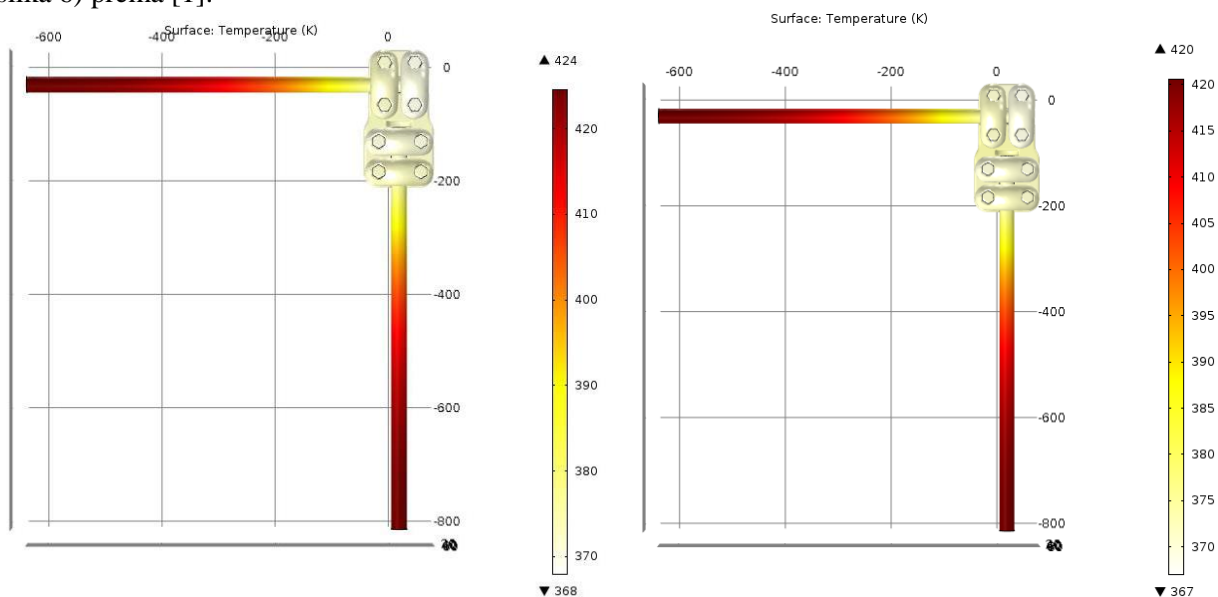
Hipoteze za model elektrotermičkog problema definiranja ponašanja HTLS alučeličnih vodiča je prikazan u tablici 6. Prema iskustvenim podacima, izbor petlji nije bio u mjerilu zbog poteškoća s manipulacijama stezaljkama za HTLS užetne vodiče koji imaju čeličnu jezgru (slika 7). Te razlike se odnose na impedanciju ispitnih petlji i nemaju utjecaja na zaključke studije.

Tablica 6. Hipoteze za model petlje za ispitivanje povišenja temperature

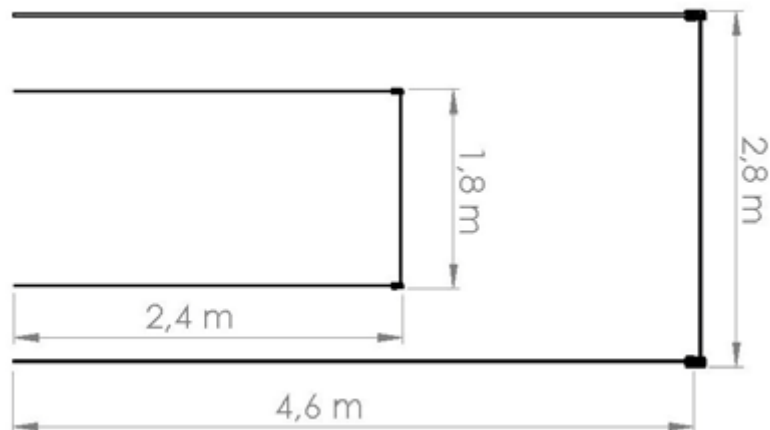
1.	Stacionarno stanje
2.	Varijabilna fizička ograničenja
3.	Toplina proizvedena zbog utjecaja Jouleovih gubitaka
4.	Prirodna konvekcija za cilindrična tijela prema Churchilllovom modelu [4]
5.	Sivo tijelo
6.	Difuzna radijacija

4.2. FEM simulacije

Trodimenzionalne FEM simulacije mogu se primijeniti za postizanje razdiobe temperature vodiča (slika 6) prema [1].



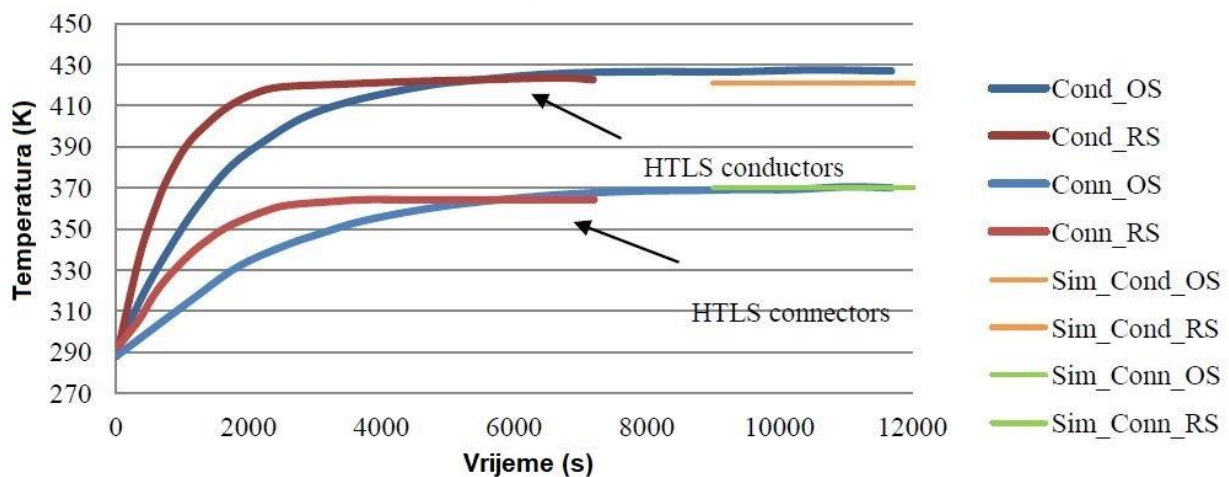
Sl. 6.: FEM simulacije: a) Razdioba temperature na površini za smanjenu skalu stezaljki; b) Razdioba temperature na površini originalne skale stezaljki



Sl. 7.: Osnovne dimenzije ispitnih petlji s HTLS vodičima. Stvarne petlje imaju tendenciju nepravilnog oblika zbog gubitka elastičnosti HTLS vodiča [1]

4.3. Usporedba između FEM simulacije i rezultata ispitivanja

Slika 8 prikazuje usporedbu između stacionarne temperature dobivene pomoću FEM simulacija s rezultatima ispitivanja. Informacije u vezi vremenskih konstanti koje opisuju krivulje prijenosa topline su prikazane u Tablici 7.



Sl. 8.: Vodiči i stezaljke s prikazom temperature kod ispitivanja porasta temperature. Usporedba između smanjenih i originalnih skala ispitnih petlji [1]

Mala razlika u stacionarnim uvjetima prikazana je na slici 8 i uglavnom se može pripisati rezoluciji napona (jedan zavoj) autotransformatora kojim se regulira napon primarnog namota energetskog transformatora.

U tablici 7 je prikazan omjer vremenskih konstanti krivulje porasta temperature RS i OS petlji, koji su vrlo blizu omjera skala, tj. 0,57.

Tablica 7. Vremenske konstante krivulje promjena temperature kao rezultat ispitivanja prikazane na slici 7 [1]

	Vremenska konstanta	Omjer vremenskih konstanti
Cond_OS Cond_RS	900 1200	$\tau_{R,vodič} = 0,53$
Conn_OS Conn_RS	1700 2300	$\tau_{R,spojnica} = 0,52$

Tablica 8. Rezultati stacionarnog zagrijavanja s usporedbom FEM simulacija, metode proračuna i rezultata ispitivanja, za kružne petlje uključujući HTLS stezaljke u postrojenjima [1]

Omjer	Promjer vodiča (mm)	T (K)	V_{RMS} (V)	L (μH)	I_{RMS} (A)	R (mili Ω)	X_L (mili Ω)	P_e (W)	S_e (VA)	Q_e (VAr)	$\cos \varphi$	
SMANJENA SKALA (RS)												
Simulacija (FEM)	0,57	15,79	423	1,86	8,05	539,33	0,00234	0,00253	681,24	1002,49	735,26	0,68
Ispitivanje	0,57		423	1,89	8,78	545,00	0,00209	0,00276	622,10	1028,95	819,59	0,60
Pogreška kod simulacije (%) Sim-Exp	0,57		0,00	1,59	8,31	1,04	11,96	8,33	9,51	2,57	10,29	13,33
ORIGINALNA SKALA (OS)												
Simulacija (FEM)	1	27,6	423	5,57	1,46	1206,52	1,29E-03	0,00458	1883,07	6714,92	6445,43	0,28
Ispitivanje	1		426	5,59	1,47	1171	1,19E-03	0,00462	1626,9	6541,37	6335,85	0,25
Pogreška kod simulacije (%) Sim-Exp	1		0,70	0,36	0,68	3,03	8,40	0,87	15,75	2,65	1,73	12,00

U Tablici 8 su uspoređeni rezultati kod zagrijavanja u stacionarnom stanju s rezultatima dobivenim FEM simulacijama te rezultatima ispitivanja u ispitnim petljama s HTLS vodičima i stezaljkama.

4.4. Pogonska iskustva analiza kvalitete stezaljki

U SS San Carlos i SS Chivor korisnik je tijekom 2008. i 2009. godine ugradio oko 2000 stezaljki za spojeve opreme u 230 kV postrojenju, pri čemu su neke popucale, a neke imale pukotine već tijekom montaže. Zbog toga se detaljnije analiziralo ovu problematiku [5].

Treba naglasiti da je investitor zahtijevao da stezaljke moraju zadovoljiti zahtjeve u vezi djelovanja struje kratkog spoja prema normi IEC 62271-1:2007, pri čemu je investitor odlučio da će zamijeniti stezaljke ako se tako pokažu rezultati ispitivanja stezaljki.

Nakon detaljne analize fizičkih karakteristika i konstrukcije stezaljki, zatražene su ponude različitih proizvođača pri čemu su neki koristili kalupe s pijeskom, a neki metalne kalupe u proizvodnji stezaljki. Pokazalo se da proizvodni proces ima znatan utjecaj na mehanička svojstva stezaljki. Također se pokazalo da površine nekih stezaljki koje su proizvedene u kalupima s pijeskom pokazuju znatne nepravilnosti i da su površine nekih stezaljki izrađenih u metalnim kalupima hrapave čak i nakon ponovne obrade pijeskom (pjeskarenje).

Također je uočeno da su neke stezaljke imale vrlo male kontaktne površine te da su dvije stezaljke bile nedovoljne mase te stoga nisu zadovoljile ispitivanja zbog mehaničkih i termičkih naprezanja kod struja kratkog spoja 40 kA i 63 kA u SS San Carlos i SS Chivor. Zbog toga je odlučeno izvesti ispitivanja na lokaciji simulirajući dvije ispitne konfiguracije u SS San Carlos, kao dodatna ispitivanja koja se definirana u normi IEC 62271-1:2007.

Ispitivanja su obavljena u dva koraka. Prvi korak je bilo ispitivanje s 2,5 puta strujom kratkog spoja (udarnom strujom) u trajanju 0,3 s. Taj prvi korak je bilo dinamičko ispitivanje i stezaljke su bile podvrgnute velikim mehaničkim naprezanjima.

Drugi korak se sastojao od ispitivanja nazivnom strujom kratkog spoja za vrijeme 1 s i zove se statičko ispitivanje u kojemu su stezaljke podvrgnute velikim termičkim naprezanjima.

Stezaljke su uspješno završile ispitivanja ako su uspješno prošle i statička i dinamička ispitivanja.

Treba naglasiti važnost izvođenja ispitivanja u postrojenju i to u slučaju velikih struja kratkog spoja (većih od 40 kA) ili u slučaju nepovoljnih konfiguracija s velikim mehaničkim naprezanjima.

Rezultati ispitivanja su pokazali da neke stezaljke različitih proizvođača nisu zadovoljili zahtjeve na mjestu ugradnje, a posebno u vezi dopuštenih struja kratkog spoja u SS San Carlos i SS Chivor te su se stezaljke morale demontirati i zamijeniti s novim stezaljkama koje imaju odgovarajuću kvalitetu [5].

5. ZAKLJUČAK

Članak opisuje metode smanjene skale ispitivanja stezaljki za visokonaponska postrojenja. Rezultati pokazuju da su pojednostavljene metode ispitivanja vrlo bitne i da pokazuju da primjena smanjene skale kod ispitivanja porasta temperature nije samo izvediva već je i realna metoda za izvedbu jeftinijih, bržih i pouzdanih ispitivanja sa svrhom optimizacije ispitivanja.

Model razvijen s jednostavnom geometrijom kružne petlje sastoji se od samo jednog aluminijskog vodiča i ispitivanja su izvedena s dvije različite skale s omjerom 1:1,8 osiguravaju uvid u mogućnosti primjene ispitivanja sa smanjenim skalama uzoraka.

Prikazani rezultati pokazuju evidentno smanjenje potrošnje električne energije i vremena potrebnog za izvođenje smanjene skale za izvođenje eksperimentalnih ispitivanja. Iz dobivenih rezultata vidljivo je da je smanjenje prividne snage s faktorom približno 6,4 koji je blizu povećanja faktora snage $\cos \varphi$ s 0,24 na 0,60.

Dodatno, i vrijeme potrebno za postizanje stacionarnih uvjeta opada aproksimativno/proporcionalno s faktorom smanjena skale.

Iz priloženih slika je vidljivo da su rezultati analize i rezultati ispitivanja vrlo slični. Zbog toga se može zaključiti da je termodinamičko ponašanje neovisno o dimenzijama ispitnih petlji.

Iz provedenih analiza se može zaključiti da je moguće izvoditi ispitivanja zagrijavanja pomoću smanjenja skale ispitnih uzoraka. Iako su procedure opisane u ovom radu primijenjene u skladu s normom ANSI/NEMA CC1 [3], slične procedure bi se mogle proširiti i za izvođenje ispitivanja cikličkog zagrijavanja stezaljki u skladu s normom IEC 61238-1 [6] kao i za ispitivanje drugih uređaja i komponenti elektroenergetskih postrojenja.

IEC norme su okvir za provedbu ispitivanja visokonaponskih stezaljki. Iako je termodinamičko ponašanje modela smanjenih dimenzija vrlo slično, rezultati ispitivanja pokazani u [5] pokazuju da u slučaju postrojenja s vrlo velikim iznosima struja kratkog spoja i u slučaju specifičnih konfiguracija, treba biti vrlo oprezan i da su tada ispitivanja na lokaciji koja je vrlo slična onoj na kojoj će se ugraditi oprema, vrlo bitna i da za takve slučajeve treba izvesti ispitivanja na terenu, a ne samo u laboratorijskim uvjetima. Jedino se na taj način mogu simulirati potrebne udaljenosti i traženi međusobni odnosi.

U pojedinim slučajevima tipične konfiguracije predložene u normama za laboratorijska ispitivanja nisu dostatne za zadovoljenje mehaničkih naprezanja stezaljki koje će biti montirane u postrojenjima s kompleksnim konfiguracijama kod mogućih struja kratkog spoja.

U slučaju postrojenja s visokim mehaničkim naprezanjima za stezaljke zbog velikih struja kratkog spoja, preporuka je da se koriste stezaljke sa zahtijevanom toplinskom obradom i glatkim površinama [5].

LITERATURA

- [1] C. Abomailek, J. R. Riba, P. Casals-Torrens: Reduced scale feasibility of temperature rise tests in substations connectors, CIGRÉ, A3-303, Paris, 2016.
- [2] IEC 61284 Overhead lines – Requirements and Tests for fittings, 1997.
- [3] ANSI/NEMA CC1 Electric Power Connection for Substation, 2009.
- [4] S. I. Churchill: Free Convection around Immersed Bodies, Heat Exchanger Design Handbook, New York, NY Hemisphere Publishing, 1983.
- [5] J. G. M. Montoya, D. E. G. Torres: Quality analysis of connectors used in the uprating of San Carlos and Chivor substations, Interconexión Eléctrica S. A. E. S. P. – ISA Colombia, CIGRÉ, B3-214, Paris, 2012.
- [6] IEC 61238-1:2003 Compression and mechanical connectors for power cables for rated voltages up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) – Part 1: Test methods and requirements