

Procjena stanja sinhronog generatora sa aspekta električnog izolacionog sistema

Branislav Bošković

„Istraživačko razvojni centar elektroenergetike” a.d.
MH „ERS” – Matično preduzeće a.d. Trebinje
Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina
branislavboskovic330@gmail.com

Srđan Jokić

Univerzitet u Istočnom Sarajevu
Elektrotehnički fakultet
Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina
srdjan.jokic@etf.ues.rs.ba

Sažetak— Generator je svakako jedan od najvažnijih elemenata u svakoj proizvodnoj jedinici. Tokom eksploatacije, generator je izložen raznim mehaničkim, električnim i toplotnim naprezanjima, kao i pojedinim uticajima okoline kao što su nečistoća i vlaga. Ovi faktori tokom vremena mogu ozbiljno da naruše funkcionalnost generatora. Stoga se posebna pažnja mora posvetiti njegovom održavanju i nadzoru. Jedan od bitnih segmenata u održavanju generatora srednje i velike snage je svakako i ispitivanje njegovih izolacionih svojstava. U radu će biti opisane neke od važnijih dijagnostičkih metoda za ocjenu stanja generatora. Kroz praktičnu analizu će biti predstavljena mjerenja pojedinih dijagnostičkih tehnika, kao i rezultati dobijeni mjerenjem na realnom objektu.

Ključne riječi – sinhroni generator; ispitivanje; izolacija

I. UVOD

S obzirom da sinhroni generator predstavlja najskuplji i najznačajniji element svake proizvodne jedinice, potrebno je detaljno provjeravati njegovo stanje. Značajan procenat kvarova ovih generatora sigurno predstavljaju kvarovi na električnom izolacionom sistemu. Pri tome treba imati na umu da kvar izolacije namotaja koji se manifestovao kao električni proboj izolacije može biti uzrokovan ne samo električnim opterećenjima već i termičkim, mehaničkim i drugim. Degradacije izolacije namotaja često mogu izazvati vlaga i voda u sistemu [1]. Imajući u vidu izloženost različitim mehanizmima degradacije, postoji čitav niz testova kojima se provjerava funkcionalnost pojedinih dijelova generatora. Na primjer, rotor generatora je uzimajući u obzir centrifugalne sile i elektrodinamička naprezanja jedna od komponenti kojoj se posvećuje posebna pažnja i u samom dizajnu i tokom testiranja, sa tendencijom da se pravilno procijeni njegov preostali životni vijek [2].

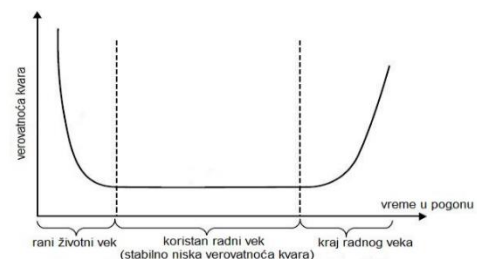
Termičko starenje je jedan od najčešćih uzroka degradiranja izolacionog sistema. Postoje generalno dvije vrste termičkog starenja: normalno i ubrzano. Normalno termičko starenje podrazumeva proces starenja izolacije pri kojem pri naznačenom opterećenju mašine temperatura najtoplije tačke – *hot spot* ne prelazi vrednost propisanu za primijenjenu termičku klasu izolacije namotaja. Ubrzano termičko starenje se najčešće javlja pri preopterećenju generatora, kvarovima u rashladnom sistemu generatora i sl. [1]. Kako bi se precizno opisao uticaj

termičkog opterećenja na gubitke unutar generatora i degradaciju izolacije, u literaturi su razvijeni različiti modeli kojima se pokušava odrediti raspodjela gubitaka ili toplote u posmatranom električnom sistemu [3], [4].

Električno starenje je najčešće prouzrokovano pojavom povećanih parcijalnih pražnjenja, ali i pojavom atmosferskih i sklopnih prenapona i prenapona industrijske učestanosti. Jedan od uzroka pojave parcijalnih pražnjenja jeste mehaničko oštećenje poluprovodnih premaza čija je svrha zaštita od korone [1].

Mehaničko starenje izolacije se javlja kod labavih namotaja, usljed povećanih vibracija i može biti prisutno npr. između štapova statora, kao i štapova statora i žleba magnetnog jezgra tj. na spojevima različitih materijala. Pored toga, uzrok starenja potiče i samim elektrodinamičkim naprežanjem generatora. Ovaj tip starenja je uvek blisko povezan sa električnim i termičkim starenjem [1], [5].

Generalno posmatrano, u održavanju generatora postoji niz pristupa da se procijeni raspoloživost generatora, koja se opisuje različitim matematičkim funkcijama. [6]. Statistička raspodjela verovatnoće ispada generatora tokom pogona prikazana je na Sl. 1, na kojoj se uočavaju tri vremenska perioda u pogledu vjerovatnoće pojave kvara opreme. Nakon puštanja u rad opreme, kada može postojati veća vjerovatnoća pojave kvarova, oprema ulazi u drugi period sa stabilno niskom vjerovatnoćom kvara, u kojoj generatori rade dugi niz godina. Treći period predstavlja sam kraj projektovanog životnog veka generatora koji karakteriše naglo povećanje vjerovatnoće kvara [1].



Slika 1. Vjerovatnoća kvara generatora tokom perioda eksploatacije [1]

Da bi se osigurao pravilan rad generatora tokom eksploatacije, i izbjegli eventualni kvarovi, pribjegava se raznim strategijama, često upotrijebljenim redovnim godišnjim testiranjima ili remontom u okviru kojih se realizuju mjerenja osnovnih parametara i procjena stanja. Pažljivim praćenjem trenda promjene pojedinih parametara, mogu se uočiti nedostaci i stanja sa greškom, i samim tim na vrijeme preduzeti odgovarajuće korektivne radnje u cilju rješavanja problema. Na taj način se sprječavaju dodatni zastoji u radu elektrane i ekonomska šteta.

U ovom radu je nakon teorijske analize pojedinih faktora koji utiču na stanje izolacije, kriterijuma procjene stanja i dijagnostičkih metoda, kao primjer mjerenih rezultata navedeno mjerenje na realnom objektu. U drugom poglavlju se navode detaljnije standardizovane procedure mjerenja u procjeni stanja sinhronog generatora. U trećem poglavlju je naveden pregled nekih od značajnijih standarda iz ove oblasti, a u nastavku, kroz četvrto poglavlje i mjerenje otpornosti izolacije statorskog i rotorskog kola na realnom objektu u termoelektrani. Analizirani su trendovi promjena otpornosti i stanje izolacionog sistema u eksploataciji.

II. TEORIJSKA ANALIZA

Dijagnostika podrazumijeva skup mjernih i kontrolnih radnji u cilju sigurnog i pouzdanog rada određenog elementa elektroenergetskog sistema. Ona uključuje mnoštvo raznih metoda kojima se provjeravaju određeni parametri. Te metode se međusobno prepliću i nadovezuju kako bi se dobila kompleksna slika o stanju ispitivanog objekta, a uspješnost metode zavisi od analiziranih parametara i konkretnih uslova izvođenja testiranja. S obzirom da čitav postupak dijagnostike u većini slučajeva nije moguće obaviti na licu mjesta, ispitivanja možemo podijeliti na terenska ispitivanja i laboratorijska ispitivanja.

Laboratorijska ispitivanja su mnogo tačnija, i ona se uzimaju kao referentna. Međutim, određeni broj ispitivanja se mora obaviti na terenu, zbog čega se rezultati često moraju korigovati na neke opšte laboratorijske uslove. Vrijednosti tih korekcionih faktora su međunarodno usaglašene.

U opštem slučaju, dijagnostičke metode mogu biti hemijske, električne, termičke, optičke ili mehaničke. Primjena svih poznatih dijagnostičkih metoda na svakom pojedinom elementu predstavljala bi izuzetno zahtjevan, skup i vremenski dugotrajan posao, koji u većini slučajeva ne bi bio isplativ. Zbog toga je uvedena podjela dijagnostičkih metoda u nekoliko nivoa primjene [7]:

- *standardni opseg dijagnostičkih metoda*, koji se primjenjuje na svim elementima,
- *prošireni opseg dijagnostičkih metoda*, koji se primjenjuje prilikom prvog puštanja u pogon nekog elementa ili prilikom procjene preostalog vijeka trajanja,
- *specijalne dijagnostičke metode*, koje se primjenjuju kada postoji potreba za analizom kvara koji se dogodio.

S obzirom na problem koji se analizira u ovome radu, u nastavku je dat opis metoda koje se tom prilikom najčešće upotrebljavaju.

A. Vizuelni pregled

Vizuelni pregled predstavlja prvu i osnovnu dijagnostičku metodu koja se koristi prilikom ispitivanja nekog elementa, a koja može ukazati na neke anomalije koje se ne mogu jasno odrediti putem mjerenja. Bez detaljne vizuelne kontrole nije opravdano vršiti dalja mjerenja.

B. Parcijalna pražnjenja

Prilikom proizvodnje, u izolaciji ostaju manje ili veće šupljine, koje su ispunjene vazduhom. Kada se takva izolacija izloži djelovanju jakog električnog polja u šupljinama dolazi do intenzivnih unutrašnjih pražnjenja. Prema definiciji, pod parcijalnim pražnjenjima podrazumijevaju se lokalna pražnjenja u dielektriku, čiji je uzrok najčešće jonizacija u šupljinama ili na površini dielektrika. Jonizacija u šupljinama dovodi do lokalnog zagrijavanja, a u kontinuitetu i do hemijske reakcije, koja za posljedicu dovodi do degradiranja izolacije [8]. S obzirom na nivo oslobođene energije, pražnjenja se mogu podijeliti, na pražnjenja niskog i visokog intenziteta. Pražnjenja niskog intenziteta redovno se pojavljuju u normalnom pogonu kao posljedica nehomogenosti, ali ne izazivaju trajna oštećenja na izolacionom sastavu. Pražnjenja visokog intenziteta opasna su jer izazivaju trajno oštećenje izolacionog sastava [7].

C. Otpornost izolacije

Mjerenje otpornosti izolacije je jedna od najvažnijih metoda za dijagnostiku stanja izolacionog sistema. Redovnim mjerenjem otpornosti izolacije namotaja i praćenjem stanja može se utvrditi da li je, i u kojoj mjeri, došlo do propadanja izolacije, koje nastaje usljed dejstva raznih faktora, među kojima su najčešći pregrijavanje ili pretjerano hlađenje mašine, vlaga, korozivna isparavanja, vibracije, prašina, prirodno starenje, mehanička oštećenja ili ogrebotine. Mjerenje otpornosti izolacije može da se izvodi primjenom naizmjeničnog ili jednosmjernog napona, zavisno od tipa testa, iako se u savremenoj praksi često realizuje primjenom jednosmjernog ispitnog napona. Vrijednost primjenjenog jednosmjernog ispitnog napona u velikoj mjeri zavisi od naponskog nivoa mašine i od klase izolacije, i u tom smislu najčešće primjenjivani naponi su 500 V, 1000 V, 2500 V, 5000 V i 10000 V. Kako ova otpornost zavisi i od temperature, međunarodno je propisano da se mjerenja vrše na temperaturi 10 - 40°C. Da bi se izvršila adekvatna procjena, poželjno je mjerenje vršiti uvijek istom metodom i pri sličnim uslovima, ukoliko je to moguće. Pri priključenju jednosmjernog naponskog izvora, kroz izolaciju će proteći struja koja ima 4 komponente: kapacitivnu struju punjenja, struju apsorpcije, površinsku struju odvođenja i unutrašnju struju provođenja

Priključenjem DC napona u izolaciji nastaje aktivan proces polarizacije, što dovodi do porasta otpornosti tokom vremena. U tome smislu su definisani određeni faktori na osnovu kojih se daje konačna ocjena stanja izolacije, DAR faktor ili faktor apsorpcije (engl. *Dielectric Absorption Ratio*) i PI faktor ili

faktor polarizacije (engl. *Polarisation Index*), koji su predstavljeni jednačinama (1) i (2):

$$DAR = \frac{R_{60}}{R_{15}} \text{ ili } \frac{R_{60}}{R_{30}}, \quad (1)$$

$$PI = \frac{R_{600}}{R_{60}}, \quad (2)$$

pri čemu R_{60} , R_{15} , R_{30} , R_{600} predstavljaju vrijednosti otpornosti u $M\Omega$, koje su navedene za određeni broj sekundi, dat u indeksu. Pretpostavlja se da je process polarizacije u značajnoj mjeri oslabio nakon 10 minuta od početka mjerenja pa je tom smislu definisan faktor PI odnosno faktor polarizacije. Faktor apsorpcije može biti korisna informacija o stanju izolacionog sistema, koja se može izvesti i bez određivanja PI indeksa, kod brzih stabilizacija struje, iako često nije isključiva metoda u ocjeni stanja [7]. Ovaj faktor je naročito značajan kod procjene sadržaja vlage u izolacionom sistemu. U situacijama gdje postoji vodeno hlađenje namotaja, vrijednost otpornosti izolacije ima značajno manju vrijednost. U tome slučaju faktori (1) i (2) nisu mjerodavni prilikom ocjene stanja izolacije i imaju vrijednosti blisku jedinici.

III. PREGLED STANDARDNIH PROCEDURA TESTIRANJA

Rotacione električne mašine pa tako i sinhronne mašine se podvrgavaju velikom broj različitih testova, čiji opseg zavisi od nivoa snage, tipa mašine i same namjene ispitivanja. Pored testova prihvatljivosti (engl. *Factory Acceptance Tests*), koji se izvode u procesu proizvodnje mašine, mogu se, u generalnom pogledu, navesti tipski ili rutinski testovi. U dijagnostici stanja se tako mogu istaći nizovi dijagnostičkih metoda, koji se djelimično mogu razlikovati u zavisnosti od standarda, među kojim se na primjer ističu testovi prema NEMA, API, IEEE ili IEC standardima. Rutinski testovi prema IEC standardu EN 60034-1 obuhvataju između ostalog određivanje izolacione otpornosti statorskog namotaja ili testiranje na podnosivi napon. Pored osnovnog opsega, prema ovom standardu se dodatno ističu testovi udarnog naponskog talasa i udarnog impulsnog talasa [9].

Značajniji testovi iz oblasti procjene električnih izolacionih osobina namotaja su: IEC/TS 60034-18-41 i 60034-18-42, koji su namijenjeni testiranju izolacije različitih naponskih nivoa na pojavu parcijalnih pražnjenja [10],[11], kao i ostali standardi iz serije 60034, među prvima IEC 60034-27, [12]. Pored njih postoji i niz drugih standarda koji pokrivaju ovu oblast, kao što su IEC 60270 - 2015, IEEE Std. 522 – 1992, a zanimljivi su i standardi IEEE Std. 43-2013, Nema MG - 1, [13] - [16].

Pored standardizovanih procedura, mogu se javiti i detaljnije opisane procedure, na nivou elektroprivrednih društava, kakva je na primjer i tehnička preporuka JP „Elektromreže Srbije“ TP 32, [17], koja se koristi i u ovom radu.

IV. ISPITIVANJE REALNOG OBJEKTA

U sklopu kapitalnog remonta termoelektrane, izvršeno je niz dijagnostičkih ispitivanja sinhronog generatora, vezanih za električni izolacioni sistem. Podaci o ispitivanom sinhronom generatoru su prikazani u Tabeli I [18].

TABELA I. TEHNIČKE KARAKTERISTIKE

<i>Proizvođač</i>	Dongfang Electric	<i>Napon/Struja uzbuđe</i>	455 [V] / 2075 [A]
<i>Nominalna snaga</i>	300 [MW]	<i>Broj obrtaja</i>	3000 [min ⁻¹]
<i>Napon/Struja</i>	20000 [V]/ 10189 [A]	<i>cosφ</i>	0,85
<i>Vrsta hlađenja stator/rotor</i>	Voda/vodonik H ₂	<i>Klasa izolacije stator/rotor</i>	F/F

A. MJERENJE OTPORNOSTI IZOLACIJE NAMOTAJA

Ovaj tip mjerenja je izveden na namotajima statora i rotora. Bitno je napomenuti da prilikom izvođenja testova nisu vladali karakteristični uslovi za ovo ispitivanje. Naime međunarodni standardi preporučuju da se prije ispitivanja isprazni voda iz vodom-hlađenih namotaja statora. Međutim, u izuzetnim situacijama moguće je obaviti VN ispitivanje i u prisustvu vode, ako tako definišu proizvođač ili naručilac, u skladu sa tačkom 7. standarda IEEE Std. 43-2013 [15]. Takođe, prilikom izvođenja oglada na rotorskom namotaju, rotor nije bio u statoru, pa samim tim rezultati se razlikuju od onih kakvi bi bili u normalnom pogonskom stanju.

Ukoliko nisu poznate vrijednosti ispitivanja koja je obavio proizvođač opreme, rezultati se mogu porediti sa rezultatima prethodnih ispitivanja, ili rezultatima ispitivanja sličnih generatora [19].

1) Mjerenje otpornosti izolacije statorskog namotaja:

Otpornost izolacije između jedne faze i druge dvije faze spojene sa magnetnim kolom (koje je uzemljeno) mjeri se 15 s ili 30 s, i 60 s. Kako je prilikom mjerenja u statorskom namotaju bila voda, očitavanje nakon 10 min nije vršeno, jer u tom slučaju faktor PI (2) nije mjerodavan. Takođe, za namotaje koji se hlade vodom nisu precizno standardizovane vrijednosti otpora izolacije.

U toku obavljanja remontnih aktivnosti bilo je potrebno da se rotor izvuče iz statora, kako bi se izvršila sva potrebna mjerenja na statoru. Zbog toga je, zajedno sa mjerenjem otpornosti izolacije namotaja potrebno izvršiti i kontrolno mjerenje dielektrične čvrstoće, kako bi se provjerilo da li je došlo do nekih mehaničkih oštećenja izolacije statora prilikom izvlačenja rotora. Prema tački 5.1.7. Tehničke preporuke 32, dielektrična čvrstoća izolacije pojedinih faza prema magnetnom kolu (koje je uzemljeno) i drugim dvijema fazama spojenim sa magnetnim kolom ispituje se naponom frekvencije 50 Hz u toku 60 s. Izolacija mora da izdrži bez oštećenja ispitni napon. Dielektrična čvrstoća izolacije pojedinih faza namotaja koji se hlade vodom ispituje se sa rashladnom vodom koja normalno cirkuliše kroz rashladni sistem [17].

Najprije je, nakon demontaže rotora izvršeno kontrolno mjerenje dielektrične čvrstoće na tri mjerne šeme, U-(VW+M), V-(UW+M) i W-(UV+M), u trajanju od 1 minute. Izolacioni sistem je uspješno prošao ovu fazu ispitivanja. Bitno je napomenuti da je, u dogovoru sa naručilcem vrijednost ispitnog napona podešena na $1,1U_n$, to jest 22 kV.

Postoje razni kriterijumi za vrijednost primjenjenog ispitnog napona, ali opšta je praksa da se ta vrijednost dogovori

sa proizvođačem ili korisnikom opreme. Često se kriterijum prilagođava u odnosu na starost ispitivane opreme.

Nakon vraćanja rotora, izvršeno je identično mjerenje, samo što je, u skladu sa dogovorom, vrijednost ispitnog napona podešena na $1,2U_n$, to jest 24 kV. Izolacioni sistem je uspješno prošao ovu fazu ispitivanja.

Na osnovu provedenih VN mjerenja može se prije svega zaključiti da nije došlo do lokalnog proboja dielektrika, kao ni mehaničkih oštećenja prilikom montaže rotora, pa je u skladu sa tim izvršeno mjerenje otpornosti izolacije namotaja, Tabela II [18].

Prije nego što je započet proces mjerenja, registrovane su vrijednosti temperature rashladne vode (ulaz/izlaz): 35/36°C i temperature statora 35°C (prosječna). Bitno je napomenuti da električni otpor izolacije sa rashladnom vodom koja cirkuliše kroz namotaj je normalno reda 1 MΩ, [17].

TABELA II. IZMJERENE VRIJEDNOSTI OTPORA IZOLACIJE STATORA NAKON VN MJERENJA

Mjerni spoj	Otpor izolacije namota [MΩ]		U _{isp} [kV]
	R ₃₀	R ₆₀	
U-(VW+M)	1,41	1,41	2,5
V-(UW+M)	1,45	1,45	2,5
W-(UV+M)	1,46	1,46	2,5

Navedene vrijednosti su u korelaciji sa parametrima demineralizovane vode i atmosferskim uslovima. Pouzdana procjena stanja zahtijeva i dodatno poređenje rezultata, kako bi se donijela konačna ocjena o stanju izolacionog sistema statora, sa stanovišta otpornosti izolacije namotaja. U tom pogledu su navedeni rezultati ispitivanja, koje je izvršeno godinu dana ranije, Tabela III, [20]. Mjerenje je izvedeno u sličnim pogonskim uslovima i pri istim testnim parametrima.

TABELA III. IZMJERENE VRIJEDNOSTI OTPORA IZOLACIJE STATORA NAKON VN MJERENJA (2020)

Mjerni spoj	Otpor izolacije namota [MΩ]		U _{isp} [kV]
	R ₃₀	R ₆₀	
U-(VW+M)	1,54	1,54	2,5
V-(UW+M)	1,59	1,59	2,5
W-(UV+M)	1,60	1,60	2,5

Poređenjem vrijednosti, može se uočiti da se rezultati neznatno razlikuju, a to je posljedica male razlike u ispitnim uslovima. Na osnovu toga zaključuje se da se izolacioni sistem statora nalazi u dobrom stanju.

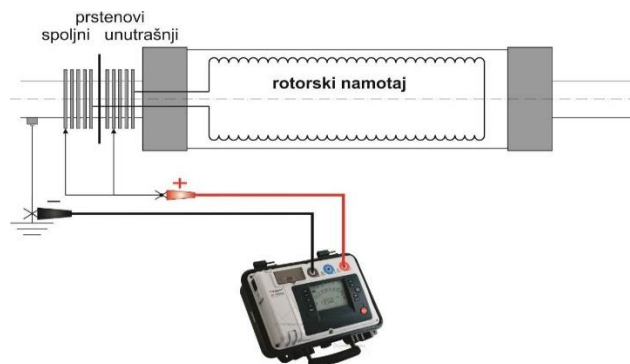
2) Mjerenje otpornosti izolacije rotorskog namotaja:

Mjerenje se realizuje dovođenjem DC naponskog izvora na priključke namotaja. Očitavanje vrijednosti se vrši nakon 15 s ili 30 s, 1 min i 10 min. Za izolacione sisteme klase F minimalna vrijednost koju treba da ima faktor PI iznosi 2. Međutim, ako je jednominutno očitavanje veće od 5 GΩ, onda nam faktor PI nije mjerodavan [15]. Na početku mjerenja temperature okoline bila je 18°C, a rezultati mjerenja su prikazani u Tabeli IV [18].

TABELA IV. IZMJERENE VRIJEDNOSTI OTPORA IZOLACIJE ROTORA

U _{isp} [V]	R ₁₅ [GΩ]	R ₆₀ [GΩ]	R ₆₀₀ [GΩ]	R ₆₀ /R ₁₅	R ₆₀₀ /R ₆₀
1000	1,94	6,26	30,98	3,22	5,4

Uočava se da je izmjerena vrijednost otpornosti nakon 60 s iznosila 6,26 GΩ, što ukazuje na činjenicu da se radi o jako dobroj izolaciji. U svrhu poređenja rezultata i davanja konačne ocjene stanja izolacije prikazani su rezultati prethodnih ispitivanja, Tabela V, [20], a šema mjerenja je data na Sl. 2, [18].



Slika 2. Šema mjerenja otpornosti izolacije namotaja rotora

TABELA V. IZMJERENE VRIJEDNOSTI OTPORA IZOLACIJE ROTORA (2020)

U _{isp} [V]	R ₁₅ [GΩ]	R ₆₀ [GΩ]	R ₆₀₀ [GΩ]	R ₆₀ /R ₁₅	R ₆₀₀ /R ₆₀
1000	2,20	7,08	40,67	3,21	5,74

Poređenjem vrijednosti se uočava da se rezultati neznatno razlikuju, što dovodi do zaključka da je tokom eksploatacije između dva perioda mjerenja izolacija zadržala svoje dobre dielektrične osobine.

B. MJERENJE KAPACITIVNOSTI I FAKTORA DIELEKTRIČNIH GUBITAKA

Procjena stanja izolacije statorskih namotaja velikih električnih mašina putem mjerenja tangensa ugla ili faktora dielektričnih gubitaka (tgδ) datira odavno, ali je to i u današnje vrijeme jedna od najčešće primjenjivanih mjernih metoda. Poznato je da se u izolacionom materijalu, usljed njegove nesavršenosti, javljaju pod uticajem naizmjeničnog napona dielektrični gubici dati izrazom:

$$P = UI_r = UI_c t g \delta = U^2 \omega C t g \delta, \quad (3)$$

gdje je:

$$t g \delta = \frac{I_c}{I_r}. \quad (4)$$

Odatle se vidi da je faktor dielektričnih gubitaka mjera za veličinu gubitaka u izolaciji pri određenom naponu, a samim tim i mjera za kvalitet izolacije [21]. Postupak kao i primjena metode za proračun ovoga faktora nisu standardizovani. U tehnici mjerenja tgδ na generatoru postoje različite metode kao npr. mjerenje vatmetrom, mjerenje kompenzacijskim ili nekim drugim mostom, mjerenje uz prisustvo demineralizovane vode [22].

Prema tački 6.3.6. Tehničke preporuke 32, za izolaciju namotaja koji se hlade vodom pri ispitivanju uz prisustvo vode u namotajima dobijaju se nepovoljnije apsolutne vrijednosti $tg\delta$, ali priraštaji faktora gubitaka $\Delta tg\delta$ ne bi trebalo da se bitno mijenjaju, što treba uzeti u obzir pri tumačenju rezultata [17].

Mjerenjem kapaciteta namota mogu se detektovati problemi uzrokovani termičkim naprezanjem ili vlažnošću većeg dijela izolacije. Metoda se najčešće primjenjuje na statore motora i statore velikih generatora direktno hlađenih vodom, kod kojih je moguća pojava curenja vode. Raslojavanjem izolacije dolazi do pojave vazdušnih šupljina unutar nje i smanjenja dielektrične čvrstoće izolacije namota, pri čemu će se ukupan kapacitet namota smanjiti. Pad kapaciteta za 1% tokom godine upozorava na termičko preopterećenje, dok porast za 5% ukazuje na povećanje vlažnosti namota [23]. Mjerenje kapaciteta i zavisnosti faktora gubitaka od napona $tg\delta = f(U)$ izolacije pojedinih faza prema magnetnom kolu (koje je uzemljeno), odnosno prema drugim dvjema fazama spojenim sa magnetnim kolom, utvrđuje se u intervalu od $0,2U_n$ do $1,0U_n$ u naponskim koracima po $0,2U_n$, pri naponu frekvencije 50 Hz, Tabela VI, [18].

Bitno je napomenuti da je prilikom mjerenja temperatura statora iznosila 36/35°C, i da se rotor nije nalazio u statoru. Takođe, od puštanja elektrane u pogon, to je prvi put da se u toku remonta izvukao rotor, pa nije bilo moguće napraviti adekvatno poređenje sa rezultatima prethodnih mjerenja. S obzirom da nema pristupa fabričkim rezultatima, ovo mjerenje se uzima kao referentno za buduća ispitivanja.

Poređenjem dobijenih vrijednosti faktora dielektričnih gubitaka sa zahtijevanim vrijednostima prema tački 6.3.6. Tehničke preporuke 32 zaključuje se da izolacija zadovoljava ispitivanje sa aspekta ove mjerne metode ($tg\delta_{0,2} < 4\%$ i priraštaj $\Delta tg\delta_{0,2-0,6} \leq 0,6\%$, $\Delta tg\delta_{0,6-1,0} \leq 0,8\%$), [17].

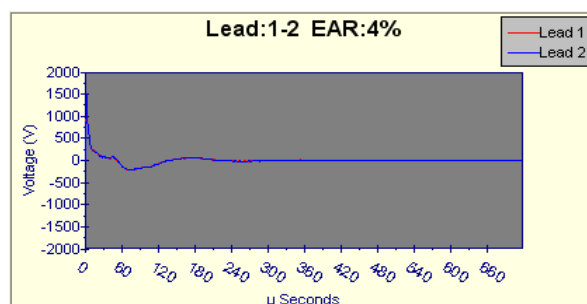
C. ISPITIVANJE MEĐUZAVOJNE IZOLACIJE ROTORA UDARNIM IMPULSOM MALE ENERGIJE

Tokom eksploatacije može doći do oštećenja međuzavojne izolacije i nastanka kratkog spoja između pojedinih navojaka. Iskustvo je pokazalo da međuzavojni kratki spojevi nastaju usljed atmosferskih pražnjenja ili grešaka u sklopnim elementima (kontakti prekidača i slično) [14]. Prisustvo kratkih spojeva se može otkriti primjenom udarnih impulsa male energije. Vrijednost primijenjenog ispitnog napona je dosta veća od nazivnog napona opreme. Standard IEEE 522 daje

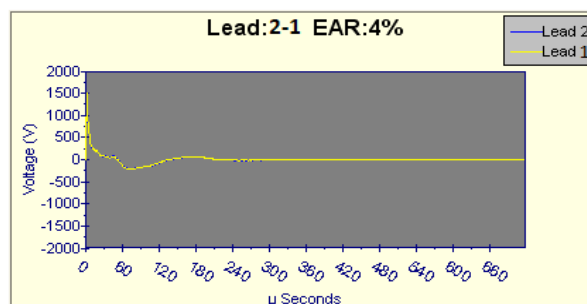
dosta blage preporuke o vrijednosti ispitnog napona. Međutim, kaže se da vrijednost ispitnog napona treba usaglasiti sa proizvođačem ili naručiocem [14]. Takođe, prema preporuci proizvođača ispitne opreme [24], vrijednosti ispitnog napona je $2 \cdot E + 1000$, gdje je E radni napon opreme.

Prije ovog testa preporučuje se provjera otpornosti namotaja. Ako je ta otpornost u dozvoljenim granicama onda se pristupa ispitivanju. Proizvođač korištenog instrumenta, prilikom izvođenja testova sa visokim udarnim naponom, deklarira tačnost mjerenja generisanog napona u granicama od $\pm 12\%$. Poređenje impulsa se vrši pomoću algoritma EAR, proizvođača testnog uređaja. Takođe, ako odziv nije isti sa obje strane namotaja, ili ako talasani oblik postane nepravilan ili treperi, to je pokazatelj kratkih spojeva [24].

Na Sl. 3 i Sl. 4, dati su rezultati ispitivanja. U dogovoru sa naručiocem vrijednost primijenjenog ispitnog napona je podešena na 1500 V_{peak}. Bitno je naglasiti da se prilikom mjerenja rotor nalazio unutar statora [18].



Slika 3. Mjerenje signala između kanala 1 i 2



Slika 4. Mjerenje signala između kanala 2 i 1

Poređenjem rezultata vidi se da odziv ima isti oblik mjereno sa oba kraja namotaja, što daje indicaciju da nema međufaznih kratkih spojeva.

TABELA VI. IZMJERENE VRIJEDNOSTI FAKTORA DIELEKTRIČNIH GUBITAKA I KAPACITETA IZOLACIJE STATORA

Mjerni spoj		0,2*U _n	0,4*U _n	0,6*U _n	0,8*U _n	1,0*U _n	0,2*U _n	0,2*U _n -0,6U _n	0,6*U _n -1,0U _n
		4 [kV]	8 [kV]	12 [kV]	16 [kV]	20 [kV]	4 [kV]	≤0,6%	≤0,8%
U-(VW+M)	tgδ (%)	2,33	2,44	2,56	2,70	2,91	2,35	0,24	0,35
	C (nF)	199,4	199,8	200,2	200,8	201,7	199,4		
V-(UW+M)	tgδ (%)	2,31	2,43	2,55	2,68	2,89	2,34	0,24	0,35
	C (nF)	199,1	199,6	200,1	200,7	201,6	199,2		
W-(UV+M)	tgδ (%)	2,27	2,39	2,51	2,64	2,84	2,30	0,24	0,34
	C (nF)	199,7	200,1	200,5	201,1	201,9	199,7		

V. ZAKLJUČAK

Iskustvo je pokazalo da najveći procenat kvarova električnih mašina, koji povlače za sobom velike materijalne gubitke, čine upravo kvarovi vezani za izolacioni sistem. Iako smo svjedoci velikog napretka tehnologije, još uvijek nije pronađena takva nedestruktivna ispitna metoda koja će dati direktnu informaciju o dielektričnim svojstvima izolacije. Zbog toga se, koristeći više različitih ispitnih metoda, dobijaju podaci o različitim parametrima, na osnovu kojih se može dati konačan sud o stanju izolacije. Kako bi se spriječili neplanirani zastoji u radu proizvodne jedinice, u svakom elektroenergetskom sistemu se izvode planska isključenja sa redovnim godišnjim remontima.

U radu su prikazana neka od ispitivanja izolacionog sistema generatora, izvedena na terenu. Na osnovu rezultata mjerenja, uvažavajući određene bitne faktore, prema Tehničkoj preporuci 32 [17], i praćenjem trenda promjene posmatranih parametara, ispitivani objekat se može svrstati u grupu I - stanje izolacije je dobro, i spreman je za dalju eksploataciju, sa stanovišta izvršenih mjerenja.

ZAHVALNICA

Zahvaljujemo se MH „ERS“ - Zavisnom preduzeću „Istraživačko razvojni centar elektroenergetike“ a.d. Istočno Sarajevo na saradnji prilikom izrade ovog rada.

LITERATURA

- [1] Ilija Klasnić, Ljubiša Nikolić, Zoran Ćirić, "The detection and localization of stator bar with electrical breakdown of insulation", prihvaćen 19.11.2018.
- [2] Ronald J. Zawoysky, Karl C. Tornroos, GE Generator Rotor Design, Operational Issues, and Refurbishment Options, Ge Power Systems, Schenectady, NY, avgust, 2001.
- [3] D. Arumugam, L. Premalatha, S. Karuppiyah, "Electromagnetic and thermal analysis of synchronous generator with different rotor structures for aircraft application" Alexandria Engineering Journal, 57(3):1447-1457.
- [4] O. Aglen, A. Andersson, "Thermal analysis of high-speed generator" 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003.
- [5] T. S. Ramu, "Degradation of HV generator insulation under mechanical, electrical and thermal stresses," IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1990, pp. 21-24
- [6] Group of authors, "Reliability Guideline, Power Plant Model Verification and Testing for Synchronous Machines," North American Electric Reliability Corporation, July 2018.
https://www.nerc.com/comm/PC_Reliability_Guidelines_DL/Reliability_Guideline_-_PPMV_for_Synchronous_Machines_-_2018-06-29.pdf (posjećeno; januar 2022)
- [7] Igor Kuzle, „Dijagnostika u održavanju elemenata elektroenergetskih sustava“, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2013.
- [8] Elaborat br. 664/03, Institut za elektroprivredu i energetiku d.d. Zagreb, "He Piva - ispitivanje generatora br. 2", 2003.
- [9] IEC EN 60034 - 1: Rotating electrical machines, Part 1: Rating and performance.
- [10] IEC/TS 60034 - 18 - 41: Rotating electrical machines, Part 18 - 41: Partial discharge free electricalinsulation systems (Type I) used in rotating electrical machines fed from voltage converters - Qualification and quality control tests.

- [11] IEC/TS 60034 - 18 - 42: Qualification and acceptance tests for partial discharge resistant electrical insulation systems (Type II) used in rotating electrical machines fed from voltage converters.
- [12] IEC TS 60034 - 27:2006, Rotating electrical machines, part 27: Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines, first edition.
- [13] IEC 60270 - 2015, High - voltage test techniques - partial discharge measurements, consolidated version, edition 3.1
- [14] IEEE Std. 522 - 1992, "Guide for testing turn - to - turn insulation on form - wound stator coils for alternating - current rotating electric machines", odobren 18. juna 1992.
- [15] IEEE Std. 43 - 2013, "Recommended practice for testing insulation resistance of rotating machinery", odobren 6. marta 2000.
- [16] NEMA MG - 1: Motors and generators, 2009.
- [17] Tehnička preporuka TP 32, "Izolacioni sistemi rotacionih mašina", Zdržena elektroprivreda - Beograd, služba za studije i istraživanja, maj 1982.
- [18] Velibor Vidić, Borislav Nišić, Branislav Bošković, "Izveštaj sa periodičnog terenskog ispitivanja TI - 114/21", ZD "Istraživačko razvojni centar elektroenergetike", oktobar 2021., neobjavljen.
- [19] Scot Cotner, "Insulation testing of AC generator windings", Electrical insulation conference, Baltimore, MD, USA, 11 - 1 june 2017.
- [20] Igor Krajišnik, Borislav Nišić, "Izveštaj sa periodičnog terenskog ispitivanja TI - 111/20", ZD "Istraživačko razvojni centar elektroenergetike", novembar 2020., neobjavljen.
- [21] Srđelj Vukovojac, "Pregled nedestruktivnih mjernih metoda za kontrolu stanja izolacije sinhronih generatora u pogonu", referat broj 11.11., X stručno savjetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Dubrovnik, 11 - 16 oktobar 1970.
- [22] Zvonimir Sirotić, Miloš Rašeta, Vladimir Jarić, "Tehničke preporuke za redovito održavanje elektrostrojarske opreme u Termoelektranama HEP -a", Knjiga II - Turbogeneratori, 1. izdanje, Fakultet elektrotehnike i računarstva, zavod za elektrostrojstvo i automatizaciju, Zagreb, 1995/1996.
- [23] Dino Haračić, Nerdina Mehinović, "Diagnostics methods for condition assessment insulation system of synchronous generator", 12 savjetovanje bosanskohercegovačkog komiteta Cigre, Neum, 4 - 8 oktobar 2015.
- [24] Baker instrument company, Digital winding tester D12R, User manual.

ABSTRACT

Generator is undoubtedly one of the most important elements in every power plant unit. During exploitation, generator is exposed to various mechanical, electrical and thermal stresses, as well as certain environmental influences such as dirt and humidity. These factors can seriously impair the functionality of the generator over time. Therefore, special attention must be paid to its maintenance and supervision. One of the crucial segments in the maintenance of medium and high power generators is certainly the testing of its insulating properties. This paper will describe some of important diagnostic methods for assessing the condition of the generator. Through practical analysis, measurements of individual diagnostic techniques will be presented, as well as the results obtained by measuring on a real object.

CONDITION ASSESMENT OF A SYNCHRONOUS GENERATOR FROM THE ASPECT OF ELECTRICAL INSULATION

Branislav Bošković
Srđan Jokić