

DOI: [10.46793/CIGRE37.A1.02](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.A1.02)

A1.02

**NOVI TURBOGENERATOR SNAGE 412/350 MVA/MW U BLOKU B3 U
TE “KOSTOLAC B” – MEĐUFAZNA, FABRIČKA PRIJEMNA, PRIMOPREDAJNA I
GARANCIJSKA ISPITIVANJA****NEW TURBO GENERATOR 412/350 MVA/MW UNIT B3 IN TPP „KOSTOLAC-B“ –
PREFABRICATION TESTING, FAT, SAT, PERFORMANCE AND WARRANTY TESTING****Dorđe Jovanović, Zoran Ćirić, Ilija Klasnić, Denis Ilić, Zoran Božović***

Kratak sadržaj: Inicijalni rad koji je takođe u programu 37. savetovanja CIGRE Srbija daje pregled osnovnih tehničkih parametara i karakteristika novog turbogeneratorskog B3 u TE “Kostolac B”, snage 412/350 (MVA/MW), koji je prvi put sinhronizovan na elektroenergetski sistem Srbije 26.01.2024. godine.

U ovom radu koji se na njega nadovezuje biće dat akcenat na električna i druga ispitivanja i testove realizovane u sklopu međufaznih odnosno završnih prijemnih ispitivanja koja su obavljena u fabrici, odnosno primopredajnih i garancijski ispitivanja novog turbogeneratorskog B3 sprovedenih na mestu pogona u TE Kostolac-B. Pored toga dat je prikaz *savremene metode provere dimenzija statorskih poluzavoja (štapova)*, odnosno *modalne analize učvršćenja glava namotaja statora*.

Obim ispitivanja i garantovane vrednosti parametara su definisane ugovornom obavezom između isporučioца i kupca generatora (EPS AD), a sva ispitivanja su sprovedena u skladu sa važećim međunarodnim standardima za ispitivanje obrtnih električnih mašina. Rezultati ispitivanja potvrđuju zahtevani kvalitet jer su vrednosti parametara i karakteristika generatora unutar definisanih granica. Rezultati ovih ispitivanja treba da posluže kao referenca odnosno *fingerprint* za sva buduća profilaktička ispitivanja.

Ključne reči: *turbogenerator, međufazna ispitivanja, fabrička prijemna ispitivanja-FAT, primopredajna ispitivanja, garancijska ispitivanja, radni parametri generatora*

Abstract: The initial technical paper, which is also in program of 37. Conference CIGRE Serbia, provides an overview of the basic technical parameters and characteristics of the new turbo generator Unit B3 in TPP "Kostolac B", rated power 412/350 (MVA/MW), which was first synchronized to the Serbian power system on January 26th, 2024.

In this paper, which is continuation of already mentioned one, emphasis will be given to the scope of electrical and other testing as a part of prefabrication and fabrication stage and final acceptance testing (FAT) performed in manufacturer facilities as well as site acceptance test

* Dorđe Jovanović, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, djordje.jovanovic@iecent.org

Zoran Ćirić, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, zciric@iecent.org

Ilija Klasnić, Elektrotehnički institut Nikola Tesla ad Beograd, ilija.klasnic@iecent.org

Denis Ilić, Schneider Electric, denis.ilic@se.com

Zoran Božović, Dornier Group East d.o.o., Beograd, zbozovic1@gmail.com

(SAT) and performance test after final installation of new generator Unit B3 on site in TPP Kostolac-B, before trial service. Finally, the scope and results of warranty testing before handover from EPS are also presented. Further, the platform for testing of the parameters of the assembled generator in the factory before delivery, as well as modern method for stator bars dimension checking and technique for modal analysis of stator endwinding stiffness are described.

The scope of testing and the guaranteed values of the parameters are defined by the contract signed between the supplier and the buyer of the generator (EPS AD), and all tests were conducted in accordance with the valid international standards for testing rotating electrical machines. The test results confirm the required quality because the values of parameters and characteristics of the generator are within the defined limits. The results of these tests should serve as a fingerprint for all future prophylactic tests.

Key words: *turbo generator, prefabrication testing, FAT, SAT, performance testing, warranty testing, guaranteed values*

1. UVOD

Ovaj rad se naslanja na rad #117 na temu novog turbogeneratorsa B3 u TE „Kostolac B“, snage 412 MVA, koji je prvi put je sinhronizovan na elektroenergetski sistem Srbije 26.01.2024. godine.

Glavni tehnički podaci novog generatora B3 (podaci sa natpisne pločice) prikazani su u Tabeli 1.1 uporedo sa tabličnim podacima postojećih generatora B1 i B2, datih radi poređenja:

Tabela 1.1: Podaci sa natpisne pločice generatora B3

	TE Ko-B3	TE Ko-B1/B2		TE Ko-B3	TE Ko-B1/B2
Tip generatora	QFSN-350-2	GTHW-360	Naznačena struja pobude	2683 A	2737 A
Serijski broj	B0350W30J048	13131801/ 13050401	Naznačeni napon pobude	346 V	520 V
Naznačena prividna snaga	412 MVA	410 MVA	Broj faza	3	3
Naznačena aktivna snaga	350 MW	348,5 MW	Sprega	YY	Y
Naznačeni faktor snage	0,85	0,85	Klasa izolacije statora i rotora	F/F	F/F
Naznačeni napon statora	22000 V	22000 V	Nadbrzina	120%	120%
Naznačena struja statora	10806 A	10770 A	Masa statora	285 t	197/340 t
Naznačena brzina obrtanja rotora	3000 min ⁻¹	3000 min ⁻¹	Masa rotora	58 t	-
Naznačena učestanost	50 Hz	50 Hz	Naznačeni pritisak H ₂	3,31 MPa(g)	-

Turbogenerator B3 koji je tema rada je sa izolacijom namotaja statora termičke klase F izrađenoj u tehnologiji sa vakuumskom impregnacijom (*Vacuum Pressure Impregnation - VPI*), sa direktnim hlađenjem namotaja statora demineralizovanom vodom, odnosno vodonikom hlađenim rotorom i magnetskim jezgrom statora.

U radu #117 su opisane pojedine specifičnosti konstrukcije generatora, posebno učvršćenja glava namotaja statora, dok će u ovom radu biti dat prikaz aktivnosti i pojedini rezultati međufaznih ispitivanja u toku procesa proizvodnje, zatim završnih fabričkih prijemnih ispitivanja statora, odnosno rotora obavljenih u fabrici proizvođača generatora, zatim prijemnih ispitivanja nakon montaže na mestu pogona, zaključno sa garancijskim ispitivanjima i rezultatima probnog pogona koji su svi izvršeni u samoj elektrani.

2. ISPITIVANJA GENERATORA

2.1. Međunarodni standardi, interni standardi proizvođača, ugovorni zahtevi korisnika

Ceo projekat izgradnje novog bloka u TE Kostolac-B je krenuo u pripremu i kasnije realizaciju još 2017. godine. Mora se reći da su početni definisani tehnički zahtevi koji su bili dostupni za analizu bili neuobičajeno skromni, ne na nivou tehničkih specifikacija koje su bile uobičajene prilikom nabavke nove opreme posebno generatora, energetskih transformatora, 6 kV motora odnosno sistema pobude, s obzirom na to da je ovaj projekat rezultat međudržavne saradnje Srbije i Kine. Mnogo početnih problema predstavljala je jezička barijera i značajne razlike u pristupu i realizaciji projekata ovog tipa u odnosu na evropsku praksu. U ceo ovaj proces pored stručnjaka EPS kao konsultanti i nadzor bili su angažovani inženjeri Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“ (INT).

Baš iz tog razloga unapred su pripremljeni specijalni dokumenti - Vodiči za primenu standarda i prijemna ispitivanja elektroenergetske (EE) opreme. Vodiči predstavljaju skup izvoda iz standarda, preporuka i uobičajena pravila dobre tehničke prakse kojima se opisuju kontrole, ispitivanja i aktivnosti koje se sprovode prilikom proizvodnje, isporuke i primopredaje opreme za projekat TE Kostolac B3. Vodičima br. 1-5 obuhvaćena je sledeća oprema:

- Knjiga 1/5 Energetski transformatori [1],
- Knjiga 2/5 Generator [2],
- Knjiga 3/5 6 kV motori [3],
- Knjiga 4/5 Sistem pobude [4] i
- Knjiga 5/5 EE oprema za regulisano napajanje elektrofiltera [5]

Organizovan je veliki broj sastanaka na daljinu, što je bilo prilično naporno i mukotrpno, kako za srpsku tako i za kinesku stranu, zbog značajne vremenske razlike i jezičke barijere, tako da je u početku bilo puno nerazumevanja i pogrešnih interpretacija. Na tim sastancima su ekipe stručnjaka Instituta kao tehničke podrške i potpore EPS svako na svom polju delovanja vodile bitku za usvajanje precizno definisanih tehničkih zahteva sa karakteristikama koje su pretočene u ugovorene vrednosti sa definisanim tolerancijama, a koje su u startu u velikoj meri nedostajale. Osnovni cilj aktivnosti bio je detaljna analiza i korekcija plana kontrole kvaliteta za pojedine elemente opreme (*Equipment Quality Control Plan-EQCP*), analiza dokumentacije za prijem i ispitivanje pojedinih elemenata opreme (*Inspection and Test Plan-ITP*) [6], pregled i mišljenje o projektima za građevinsku dozvolu (*Design for Building Permits-DBP*) i projektima za izvođenje (*Design for Construction*). Kao rezultat dvogodišnje aktivnosti od početka projekta analizirane su i usvojene tehničke karakteristike generatorskog blok - transformatora, transformatora sopstvene potrošnje i opšte grupe, pripremljeni su i usvojeni *EQCP* и *ITP* dokumenti za navedenu ključnu EE opremu, sve u skladu i uz insistiranje na primeni relevantnih *IEC/EN/SRPS* standarda.

Takođe se insistiralo na preciznom definisanju karakteristika ključnih komponenti – profilisanih bakarnih provodnika (izolovanih i neizolovanih) za potrebe izrade statorskih štapova, odnosno namotaja transformatora, izboru magnetskog lima za stator generatora, odnosno magnetska jezgra transformatora, izolacionih materijala i izolacionih aranžmana i transformatorskog izolacionog ulja. Veoma značajan i pokazalo se kasnije neophodan za precizno razumevanje i rešavanje svih nedoumica i nejasnoća, bio prvi sastanak uživo sa predstavnicima i odgovornim inženjerom projekta generatora u fabrici *proizvođača generatora* u martu 2019. године. Posebno tokom prvog ali i kasnijih sastanaka uživo praktično svi do tada nerazjašnjeni i tokom beskrajnih video-konferencija pogrešno tumačeni problemi i pitanja, razrešeni su uz obostrano razumevanje i sve veće poverenje što je dalo dodatno ubrzanje realizacije postojećeg projekta.

2.2. Međufazna ispitivanja pojedinih delova generatora kod proizvođača

Prilikom prve posete fabrici proizvođača generatora organizovan je obilazak pogona u kojima će biti proizveden i sklopljen generator za TE Kostolac-B, počevši od dela pogona u kojima se od osnovnog čeličnog odlivka na strugovima impozantnih dimenzija u izuzetno čistoj sredini obavlja mašinska obrada, urezivanje žlebova i formiranje profila magnetnog tela rotora turbogeneratora, zatim izrada rotorskih kapa za rotore raznih dimenzija, rotorskih ventilatora, kontaktnih prstenova, dok je u drugom delu hale prostor u kome se vrši montaža aktivnog dela generatora u njegovo kućište. U posebnoj mašinskoj hali sa takođe impozantnom higijenom, što je veoma važno za proces, organizovan je postupak izrade statorskih polunavojaka-štapova, počevši od poluproizvoda-izolovanih profilisanih bakarnih provodnika, koji se zatim formiraju u snop, koji nakon obrade savijanja i preplitanja-transpozicije postaju Roebel-polunavojak spreman za proces izrade glavne izolacije u specijalnoj fizički odvojenoj prostoriji motaonici sa kontrolisanom atmosferom. U motaonici se održava stalna temperatura i relativna vlažnost vazduha uz stalni nadpritisak u odnosu na ostatak proizvodnog pogona čime se sprečava ulazak prašine i drugih nečistoće, što je jedan od ključnih faktora za izradu kvalitetnog izolacionog sistema.

Pored upoznavanja sa kompletnim proizvodnim procesom ovom prilikom izvršena je međufazna kontrola tehnologije i kompletnog procesa proizvodnje statorskih polunavojaka (štapova) koja je obuhvatila sva ispitivanja navedena u odgovarajućem dokumentu plana za prijem i ispitivanje (ITP No. GN-ITP09-S – Qualification Stator Coil). Kompletan proces od izbora polaznih materijala, kontrola kvaliteta i provera sertifikata sa fizičko-hemijskim i električnim karakteristikama izolovanih bakarnih profilisanih provodnika, izolacionih materijala (izolacionih mika-traka, provodnih i poluprovodnih materijala i premaza). Osim tehnologije izrade statorskih štapova izvršena je i inspekcija magnetskih limova od kojih će biti složeno magnetsko jezgro statora.

Izvršena je hidraulična provera ujednačene prohodnosti šupljih bakarnih provodnika koji treba da obezbede cirkulaciju demineralizovane rashladne vode, zatim provera formiranog profila Roebel-statorskog polunavojka sa proverom transpozicije za 540°, provera izolovanosti svakog pojedinačnog profilisanog bakarnog provodnika u Roebel -štapu, konsolidovanost strukture i poprečnog profila *Roebel* -štapu, tzv. *Green-bar-a*, pre postupka formiranja glavne izolacije. Nakon hidrauličke provere protoka, testa zaptivenosti i testa nadpritiska, izvršeno je formiranje i završno indukciono zavarivanje hidrauličnih kutija na glavama štapova. Ispraćen je proces izrade (namotavanja) glavne izolacije koji je kompletno automatizovan, zatim postupak izrade slojeva za ujednačavanje potencijala radi sprečavanja koncentracije polja i pojave uslova za parcijalna pražnjenja – unutrašnji – *Inner Corona Protection (ICP)* i spoljni – *Outer Corona Protection*.

Po kompletno završenom procesu izrade glavne izolacije, zajedno sa *ICP* i *OCP*, usledila je priprema i sam proces impregnacije epoksidnom smolom u dubokom vakuumu – *Vacuum Pressure Impregnation (VPI)* tehnologija. Tehnologija *VPI* podrazumeva kontrolisano zagrevanje statorskih štapova koji su potopljani u epoksidnu smolu u specijalnim pećima uz primenu vakuuma, sa ciljem da se sve postojeće šupljine nastale u procesu namotavanja glavne izolacije koja je u vidu mika (liskunskih) traka ispune epoksidnom smolom. Na ovako proizvedenim štapovima se na kraju izrađuje završni sloj za formiranje potencijala u zoni izlaska iz ravnog u zakrivljeni deo statorskog poluzavojka – *End Corona Protection (ECP)*, bez koga bi se inače u toj zoni imala velika koncentracija električnog polja tokom pogona i stvarali se uslovi za pojavu površinskih parcijalnih pražnjenja (PP).

Odabrana su po 2 gornja i 2 donja kompletno izrađena statorska štapa koji su predstavljali uzorak za osvedočenje (kvalifikaciju) kvaliteta materijala i kompletne primenjene tehnologije izrade statorskih štapove (prema *ITP No. GN-ITP09-S – Qualification Stator Coil*) [7]. Pozitivan rezultat predstavljao je potvrdu kvaliteta i samim tim odobrenje za proizvodnju kompletnog kontingenta statorskih štapova od kojih će se kasnije formirati statorski namotaj. Ovi štapovi su posebno pripremljeni u smislu formiranja privremene zaštite elektroda za merenje faktora dielektričnih gubitaka- $\tan\delta$ (slika 1 i 2), a što je definisano standardom IEC 60034-27-3:2015 [8]

Na kvalifikacionom uzorku statorskih polunavojaka (štapova) izvršena su sva električna i druga ispitivanja koja su navedena u prethodno pomenutom dokumentu kontrole kvaliteta [7]: kontrola otpora izolacije *OCP* završnog premaza, merenje faktora dielektričnih gubitaka- $\tan\delta$ i kapaciteta, merenje intenziteta parcijalnih pražnjenja (PP), ispitivanje povišenim naizmeničnim ispitnim naponom $3 \times 22 \text{ kV} + 1 \text{ kV} = 67 \text{ kV}$ u trajanju od 60 sekundi. Sva ova ispitivanja su morala da daju vrednosti relevantnih parametara izolacionog sistema koji su navedeni u dokumentu kontrole kvaliteta kao kriterijumska vrednost.

Jedno od ispitivanja bilo je dimenziona provera svakog proizvedenog statorskog štapa u odnosu na fabričke crteže i dokumentaciju. Dimenzije ravnih delova štapa su proverene na klasičan način, odgovarajućim mernim alatima-modelima žleba, ali je primenjena i savremena metoda 3D laserskog skeniranja koje je vršeno najsavremenijom mernom opremom (Slika 3a)-3b)) koja do tada nije viđena od strane inženjera ekipe INT.



Slika 1: Prikaz statorskih štapova odabranih za kvalifikacionu proveru tehnologije fabrikacije



Slika 2: Uzorak statorskih štapova sa pripremljenim zarezima na *OCP* i formiranim zaštitnim elektrodama za merenje $\tan\delta$ prema [8]

Prilikom skeniranja operator ručno pomera i vodi 3D laserski skener duž statorskog štapa postavljenog na nosače, skenirajući svaki detalj, koji zatim preko specijalnog prijemnika bežičnim putem šalje podatke u kontrolni računar na kome se direktno crta 3D tehnički crtež-slika sa svim preciznim dimenzijama i krivinama koje se porede sa fabričkim crtežima.



a)

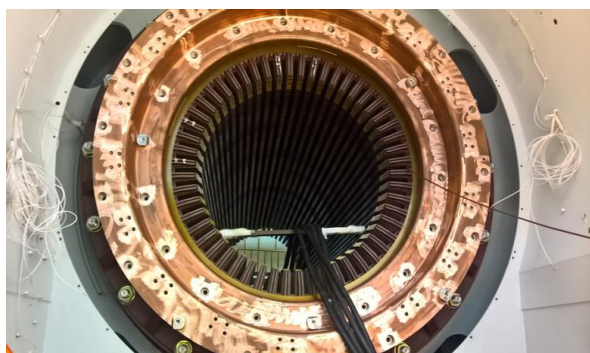


b)

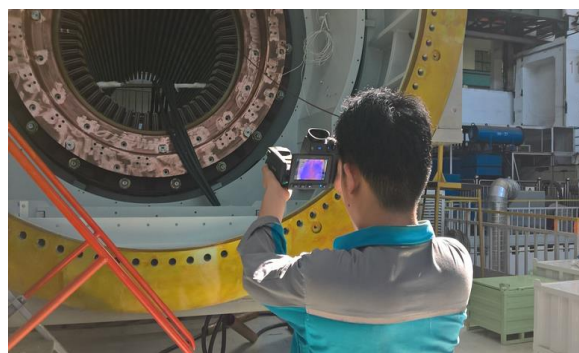
Slika 3a)-3b): Dimenziona provera 3D laserskim skenerom

Na kraju kvalifikacionog ispitivanja iz uzorka od četiri štapa izabrana su dva – jedan gornji i jedan donji koji su izloženi procesu ubrzanog termičkog i električnog starenja s namerom da se nakon procesa ubrzanog starenja ova dva štapa postave u uljnu kadu i napregnu naizmeničnim ispitnim naponom koji je konstantno podizan do trenutka proboja. Ovo ispitivanje termičkog i električnog starenja imalo je za cilj da simulira proces „prirodnog“ starenja izolacije koje bi se imalo tokom pogona. Konačan probij izolacije uzorka gornjeg i donjeg štapa desio se pri naponima 135 kV odnosno 127 kV što je bilo značajno iznad kriterijuma u odgovarajućem ITP – dokumentu od 113 kV [7].

Obavljen je i nadzor nad ispitivanjem magnetskog kola statora pre ulaganja namotaja statora koje je obavljeno metodom naznačenog fluksa od 1,4 T, uz detaljno termovizijsko snimanje površine magnetskog jezgra statora tokom procesa zagrevanja.



a)



b)

Slika 4a) - 4b): Ogljed zagrevanja magnetskog jezgra statora metodom naznačene indukcije sa termovizijskom kontrolom

2.3. FABRIČKA PRIJEMNA ISPITIVANJA STATOR GENERATORA

Fabrička prijemna ispitivanja namotaja statora usledila su nakon kompletne montaže aktivnog dela statora generatora i obavljena su prema dokumentu kontrole kvaliteta *GN-ITP014-SA Stator assembly (Stator winding assembly)* [6]. Za svako ispitivanje su u okviru ITP dokumenta definisane granične kriterijumske vrednosti, kako za početnu vrednost i priraštaje faktora dielektričnih gubitaka – $\tan\delta$, nivoa prividnog naelektrisanja PP, tako i vrednosti ispitnih napona pri ispitivanju visokim jednosmernim i naizmeničnim ispitnim naponima. Sva ispitivanja su obavljena na „suvom“ statoru, dakle bez cirkulacije demineralizovane vode. Sve izmerene vrednosti su zadovoljile granične kriterijumske vrednosti.

Statorski namotaj je uspešno izdržao ispitivanje visokim jednosmernim ispitnim naponom u iznosu od 77 kV, odnosno ispitivanje povišenim naizmeničnim naponom od $2 \times U_n + 1 \text{ kV} = 45 \text{ kV}$ u trajanju od 60 sekundi.



a)



b)

Slika 5a) – 5b): Ispitivanje izolacionog sistema namotaja statota visokim jednosmernim ispitnim naponom

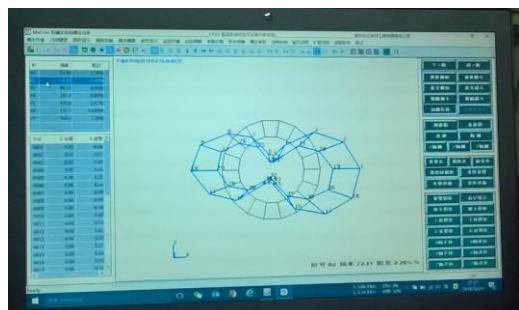
Jedno od ispitivanja koje je privuklo pažnju ekipe nadzora ispitivanja bilo je ispitivanje prirodnih rezonantnih frekvencija krajeva namotaja ali i kompletnog konusnog sklopa učvršćenja bočnih veza-glava namotaja statora. To je urađeno uz pomoć impulsnog pobudnog čekića koji je spojen sa mernim uređajem koji je upravljan specijalnim programskim paketom preko računara. Operator impulsnim čekićem odsečnim udarcem u zoni kutija sa spojem teflonskih creva rashladnog sistema i hidrauličnih glava štapova namotaja statora, pobuđuje na njihovo oscilovanje, pri čemu merni uređaj beleži odzive. Pobuđivanje se vrši udarcima impulsnim čekićem u nekoliko tačaka u zoni konusa glava namotaja i sve se to beleži i grafički prikazuje zajedno sa vrednostima rezonantnih frekvencija koje moraju da budu van kritičnog ospega 95-115 Hz [6].



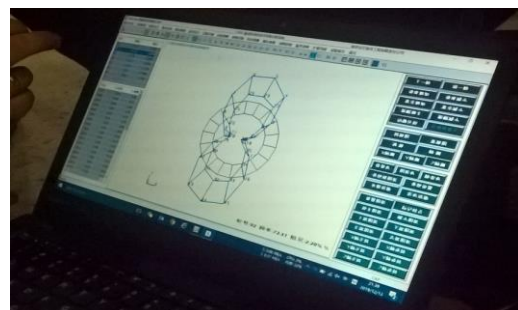
a)



b)



c)

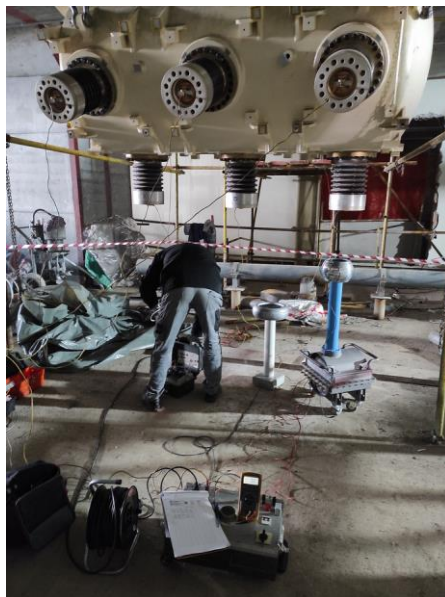


d)

Slika 6 a) – d): Merenje sopstvenih frekvencija oscilovanja krajeva štapova i konusa bočnih veza statora

2.4. ZAVRŠNA PRIMOPREDAJNA ISPITIVANJA GENERATORA NA MESTU UGRADNJE

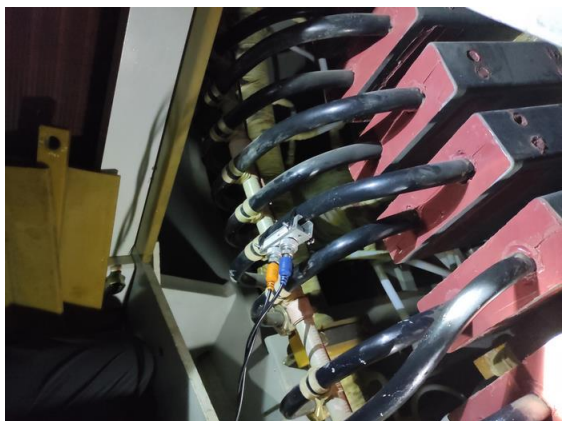
Nakon transporta i završne montaže generatora odnosno pripadajuće pomoćne opreme – rashladnog sistema statora, prema odgovarajućem dokumentu obavljena su prijemna ispitivanja statora i rotora generatora na mestu pogona. Ispitivanja su obuhvatila i međufazne kontrole pojedinih sklopova pre završne montaže kao npr. ispitivanje generatorskih prolaznih izolatora povišenim naizmeničnim ispitnim naponom od 61,5 kV, 50Hz u trajanju od 60 sekundi, uz merenje otpora izolacije pre i nakon VN ispitivanja prema *ITP GN-ITP23-FSA Bushings* [9].



Slika 7: VN ispitivanje generatorskih izolatora [9]

Ozbiljne prepreke postojale su kada je bilo potrebno izvršiti merenje protoka rashladne demi vode kroz sistem statora što je takođe predviđeno odgovarajućim ITP dokumentom. Konstruktivno, rashladni sistem statorskog namotaja sastoji se od sistema teflonskih creva koje povezuju hidraulične grane svakog statorskog štapa - 54 žleba sa po dva statorska polunavojka odnosno po dve hidraulične grane, što ukupno čini 108 hidrauličnih grana koje su povezane na dva kolektora ulazni sa jedne strane generatora aksijalno i izlazni na suprotnoj strani. Na svih 108 hidrauličnih creva bilo je potrebno izmeriti protoke. Ispostavilo se da montažni radovi nisu uvažavali potrebu za ovim merenjem jer je za pristup teflonskim cevima bilo neophodno da na jednoj strani (bilo sa strane pobude ili prema turbini) kućište generatora ostane otvoreno i pristupačno. Međutim, radovi na montaži i zaptivanju poklopaca (deklova) kućišta su bili završeni i njihova ponovna demontaža i zaptivanje nije dolazila u obzir. Stoga se uz ogroman trud izvršilaca ekipe INT koja je obavljala merenje protoka, ali i angažovanje saradnika od strane izvođača montaže, koji je uspeo da kroz veoma uzak prostor uđe u konusni međuprostor unutar statora i vrši premeštanje merne sonde na teflonska creva po celom obimu statora (slika 8a) i 8b)).

Merenje protoka je veoma važno jer pored potvrde o zadovoljavajućim montažnim radovima i zaptivenosti sistema, dobija se potvrda da su sve hidraulične grane prohodne i sa odgovarajućim protokom demi vode koji je u dozvoljenim granicama rasipanja,



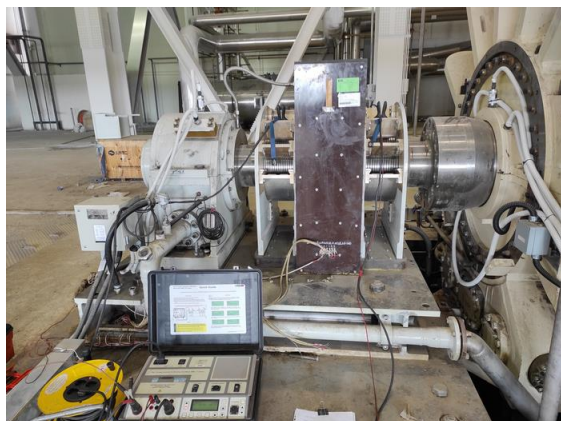
a)



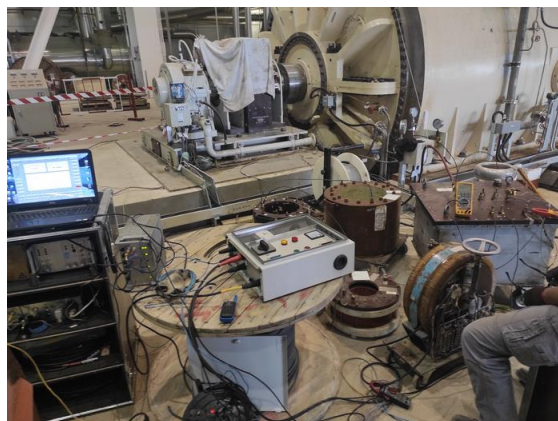
b)

Slika 8 a) –b): Merenje protoka rashladne demi-vode kroz namotaje statora

Završna električna ispitivanja generatora (statora i rotora) na mestu ugradnje nakon završen montaže obavljeno je sa cirkulacijom rashladne demi-vode u statoru, dakle kao u pogonskim uslovima, a sve prema ITP GNITP24-Generator Test after Assembly [6].

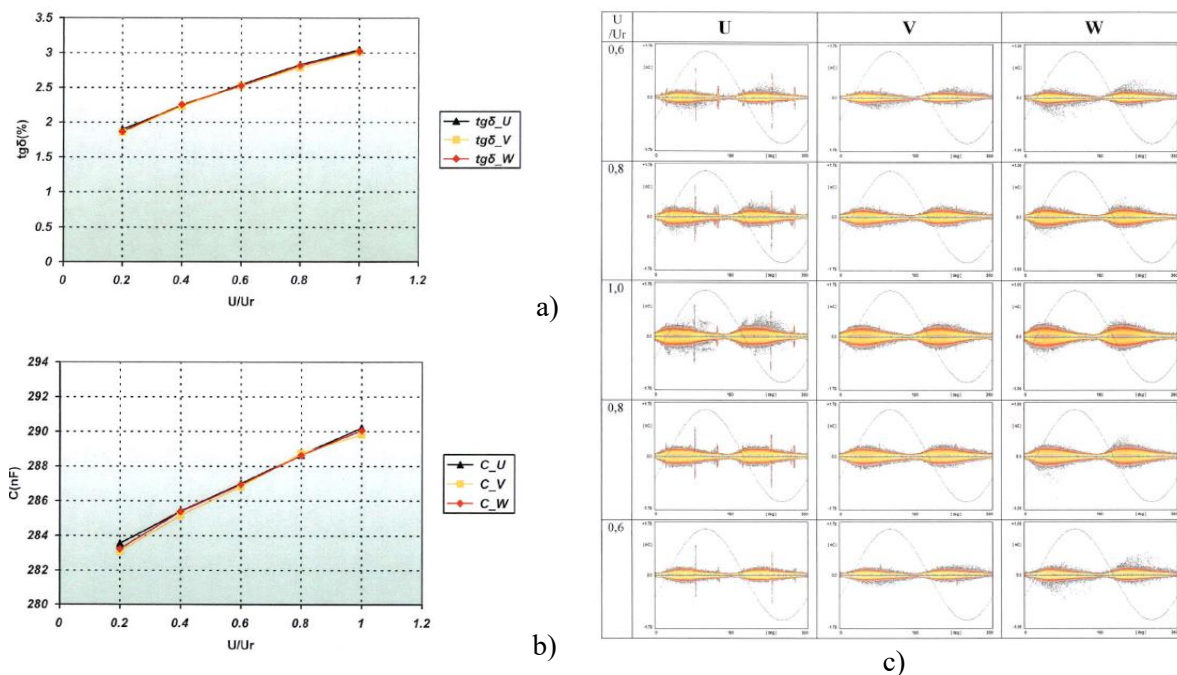


Slika 9 a): Završno prijemno ispitivanje rotora



Slika 9b) Završno prijemno ispitivanje statora

Pored merenja otpora izolacije i merenja faktora dielektričnih gubitaka-tgδ i kapaciteta, te snimanja aktivnosti parcijalnih pražnjenja do vrednosti ispitnog napona jednakoj linijskom naponu statora od 22 kV, izvršeno je i ispitivanje povišenim naizmeničnim ispitinim naponom od $0,8 \times 2U_{n+1} \text{ kV} = 0,8 \times 45 \text{ kV} = 36 \text{ kV}$ - svaka faza prema druge dve kratko spojene i uzemljene, u trajanju od 60 sekundi. Sve tri faze su uspešno izdržale ovaj završni visokonaponski test. Pored toga, dobar kvalitet izolacije i izrade statorskog namotaja potvrđuju i izuzetno niski izmereni nivoi parcijalnih pražnjenja koji pri naponu $1,0 U_n = 22 \text{ kV}$ nisu veći od 700 pC.



Slika 10 a) – c): Prikaz rezultata završnih prijemnih ispitivanja generatora na mestu pogona – promena $\text{tg}\delta$ i kapaciteta sa promenom ispitnog napona (a) i (b) i mape fazne raspodele impulsa parcijalnih pražnjenja do $1,0 U_n$ (c)

2.5. GARANCIJSKA ISPITIVANJA GENERATORA

Garancijska ispitivanja generatora B3 izvršena su u cilju određivanja stepena iskorišćenja generatora. Ispitivanja su obavljena u elektrani, a prema prethodno usvojenoj metodologiji ispitivanja.

Obim ispitivanja podrazumevao je merenje pojedinačnih gubitaka u generatoru kalorimetrijskom metodom tokom rada generatora na mreži u sledećim radnim režimima:

- Test broj 1 – aktivna snaga generatora jednaka $P = 350 \text{ MW}$ i reaktivna snaga generatora jednaka $Q = 0 \text{ MVar}$ ($\cos\varphi=1,0$),
- Test broj 2 - aktivna snaga generatora jednaka $P = 350 \text{ MW}$ i reaktivna snaga generatora jednaka $Q = 217 \text{ MVar}$ (naznačeni faktor snage tj. $\cos\varphi=0,85$),

Merenja faznih napona i struja generatora vršena su pomoću mrežnog analizatora velike tačnosti (bolje od 0,1%), preko postojećih mernih naponskih i strujnih transformatora. Temperatura ulazne i izlazne vode za hlađenje vodonika unutar generatora su merene pomoću četiri Pt100 temperaturne sonde koje su postavljene za potrebe ispitivanja na ulaznim i izlaznim cevima rashladne vode za hlađenje vodonika. Protok rashladne vode za hlađenje vodonika unutar generatora meren je pomoću dva elektromagnetna protokomera, tipa W400 5W4C2H, koji su postavljeni za potrebe ispitivanja na ulaznim cevima rashladne vode za hlađenje generatora, slika 11a) i 11b).

Temperatura okolnog vazduha u blizini kućišta generatora merena je pomoću četiri termometra koji su postavljeni na rastojanju 1 metar od kućišta generatora. Merenja temperature i protoka rashladne vode za hlađenje vodonika su uvedena u merno akvizicioni sistem i snimana su tokom trajanja testa sa rezolucijom od 1 sekunde.

Merenje protoka i ulazne i izlazne temperature demineralizovane vode za hlađenje namotaja statora su vršena preko fabrički postavljenih senzora. Sva merenja su vršena u stanju termičke ravnoteže generatora (porast temperature delova generatora manji od gradijenta 2K/h) pomoću etalonirane merne opreme i instrumenata.



Slika 11 a) i 11 b): Merenje protoka i temperature rashladne vode za hlađenje vodonika

Ukupni gubici snage generatora koji radi na mreži sa određenim opterećenjem mogu se odrediti kalorimetrijskom metodom i sastoje se od [10]:

- Gubitaka unutar referentne površi P_{irs} (gubici koji se mere kalorimetrijskom metodom i gubici koji se odnose sa referentne površi kondukcijom, konvekcijom, radijacijom)
- Gubitaka izvan referentne površi P_{ers} (gubici u ležajevima i u sistemu pobude generatora)

Gubici snage unutar referentne površi se sastoje od gubitaka snage koje odnose rashladna voda za hlađenje vodonika, demineralizovana voda za hlađenje namotaja statora i gubici koji se konvekcijom predaju okolnom vazduhu.

Gubici snage koje odnese rashladna voda se izračunavaju primenom sledeće formule:

$$P_{irs,1} = c_p Q_{v_tur} \rho \Delta\vartheta_{tur} + c_p Q_{v_exc} \rho \Delta\vartheta_{exc} \quad (2.5.1)$$

gde su:

- Q_{v_tur} i Q_{v_exc} – zapreminski protok rashladne vode za hlađenje vodonika unutar generatora u m^3/s , mereni na strani turbine i na strani kliznih prstenova, respektivno;
- $\Delta\vartheta_{tur}$ i $\Delta\vartheta_{exc}$ – porast temperature rashladne vode za hlađenje vodonika (razlika temperature vode na izlazu i na ulazu) u K, mereni na strani turbine i na strani kliznih prstenova, respektivno;
- c_p – specifični toplotni kapacitet rashladne vode za hlađenje vodonika u $kJ/(kgK)$, određen za srednju vrednost temperature rashladne vode;
- ρ – gustina rashladne vode za hlađenje vodonika u kg/m^3 , određena za temperaturu ulazne vode (hladne vode za hlađenje vodonika).

Gubici snage koje odnese demineralizovana voda koja hladi namotaj statora $P_{irs,1d}$ se izračunavaju primenom sledeće formule:

$$P_{irs,1d} = c_p Q_{demi_w} \rho \Delta\vartheta_{demi_w} \quad (2.5.2)$$

gde su:

- Q_{demi_w} – zapreminski protok demineralizovane vode koja hladi namotaj statora u m^3/s ;
- $\Delta\vartheta_{demi_w}$ – porast temperature demineralizovane vode koja hladi namotaj statora (razlika temperature vode na izlazu i na ulazu) u K;
- c_p – specifični toplotni kapacitet demineralizovane vode koja hladi namotaj statora u $kJ/(kgK)$, određen za srednju vrednost temperature demineralizovane vode;
- ρ – gustina demineralizovane vode koja hladi namotaj statora u kg/m^3 , određena za temperaturu ulazne vode (hladne vode za hlađenje namotaja statora).

Gubici referentne površi $P_{irs,2}$ koji se konvekcijom predaju okolnom vazduhu se izračunavaju:

$$P_{irs,2} = hA\Delta\vartheta \quad (2.5.3)$$

gde su:

- h – koeficijent prenosa toplote od kućišta generatora prema okolnom vazduhu, za slučaj prirodnog strujanja vazduha ovaj koeficijent jednak je $15 W/(m^2K)$;
- $\Delta\vartheta$ – razlika između srednje vrednosti temperature kućišta generatora i srednje vrednosti temperature okolnog vazduha u K,
- A – površina referentne površi (kućišta generatora) u m^2 .

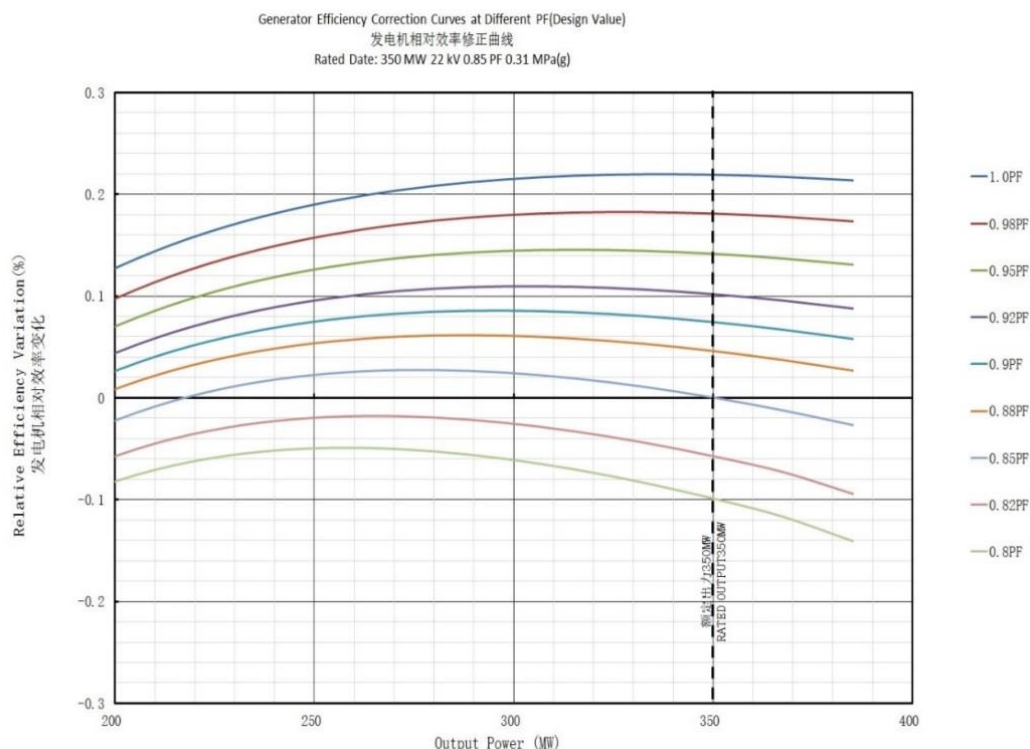
Spoljašnji gubici snage (gubici izvan referentne površi) P_{ers} se sastoje od gubitaka u ležajevima generatora P_{br} i gubitaka u sistemu pobude P_{exc} (uključujući kolektorske gubitke) se izračunavaju:

$$P_{ers} = P_{br} + P_{exc} \quad (2.5.4)$$

Prilikom izračunavanja spoljašnjih gubitaka snage za vrednost gubitaka snage u ležajevima generatora uzima se računaska vrednost koju je dostavio proizvođač generatora $P_{br}=312$ kW. Gubici snage u sistemu pobude se sastoje od gubitaka u tiristorskim pretvaračima, pobudnom transformatoru i kolektorskih gubitaka.

Na osnovu izvršenih merenja, izračunat je stepen iskorišćenja generatora u oba radna režima. S obzirom da drugi radni režim (test broj 2) nije bilo moguće postići zbog uslova u mreži I ograničenja napona statora (105 % naznačenog napona), drugi test je izvršen sa radom generatora u sledećoj radnoj tački: nominalna aktivna snaga na izvodima generatora $P=350$ MW i reaktivna snaga $Q=130$ MVar ($\cos\varphi=0,93$). Iz tog razloga je za drugi test izvršena korekcija izračunatog stepena iskorišćenja prema korekcionoj krivi usled varijacije faktora snage i aktivnog opterećenja generatora u toku ispitivanja koju je dostavio proizvođač generatora, slika 12 (dato u pratećoj tehničkoj dokumentaciji proizvođača generatora):

Rezultati ispitivanja su prikazani u Tabeli 2.5.1 gde je pored određenog stepena iskorišćenja generatora za svaki od testova, navedena i merna nesigurnost. Određena vrednost stepena iskorišćenja generatora za oba testa garancijskih ispitivanja generatora B3 je veća od garantovane vrednosti što je pozitivan rezultat.



Slika 12: Korekcione krive za stepen iskorišćenja generatora za različite vrednosti faktora snage i aktivnog opterećenja generatora

Tabela 2.5.1.: Stepen iskorišćenja generatora B3

Test br.	Izračunata vrednost na osnovu ispitivanja η_g [%]	Garantovana vrednost η_g [%]
1	$99,19 \pm 0,0025$	98,78
2	$99,04 \pm 0,0025$	

2.6. OSTVARENI PARAMETRI U TOKU PROBNOG RADA GENERATORA

Novi turbogenerator B3 u TE „Kostolac B“, snage 412 MVA, prvi put je sinhronizovan na elektroenergetski sistem Srbije 26.01.2024. godine. Probni rad agregata i generatora je obavljen od 2.-9.10. 2024. godine, pri čemu je jedinica radila neprekidno 168 sati, što je bio uslov dat u tehničkoj specifikaciji. Tokom perioda od 168 sati, kumulativna proizvodnja električne energije iznosila je 57 499 MWh, sa prosečnim opterećenjem od 342,26 MW i stopom opterećenja od 97,79 %.

Test 96-časovnog režima punog opterećenja obavljen je u periodu od 2.-6.10 2024. godine. Jedinica je stabilno radila u režimu CCS - *Coordinated Control System*, odnosno koordinisanom režimu rada bloka – turbinski regulator i upravljanje kotlom su u automatski regulisanom modu rada, pod punim opterećenjem 96 sati. Kumulativna proizvodnja električne energije iznosila je 33 748 MWh, sa prosečnim opterećenjem od 351,54 MW i stopom opterećenja od 100,44 %.

Što se tiče samog generatora, u toku testova generatora su dostignute sledeće vrednosti:

- Napon generatora 28,6 kV (130 % U_n) u ogledu praznog hoda
- Struja generatora 10 806 A (100 % I_n) u ogledu kratkog spoja
- Reaktivna snaga u kapacitivnom režimu -155,3 MVAR pri aktivnoj snazi 350,9 MW, i struji generatora od 10 083 A u testu kapacitivnog rada generatora.

Na slici 13 dat je prikaz promena parametara tokom perioda probnog pogona – crveno aktivna snaga, plavo donja toplotna moć uglja:



Slika 13: Promena toplotne moći uglja (plavo) i aktivna snage (crveno) na generatoru tokom perioda probnog pogona

3. ZAKLJUČAK

Uprkos ne malim početnim teškoćama i nerazumevanjima sa predstavnicima proizvođača generatora oko pripreme dokumentacije kontrole kvaliteta i definisanja skupa i postupaka ispitivanja, koje su bile prevashodno posledica razlike u pristupima i praksi ispitivanja i kontrola kakve su uobičajene u Srbiji, odnosno u Kini, uz značajan trud i brojne sastanke putem video-konferencija, a kasnije i uživo u direktnom kontaktu sa odgovornim inženjerima fabrike generatora, uspešno su otklonjene sve nedoumice. Usaglašeni su protokoli ispitivanja, dokumenti kontrole kvaliteta i definisane su sve kriterijumske vrednosti koje su bile obaveza proizvođača da ih ispuni u procesu proizvodnje i tokom završnih fabričkih ispitivanja. Ovo je bilo od ključnog značaja za dobijanje kvalitetnog generatora.

Tokom prve nadzorne poseta ekipe inženjera EPS i stručnih konsultanata INT uverili su se u kvalitet proizvodnog procesa, isprativši kvalifikaciona ispitivanja uzoraka statorskih štapova osvedočili su i odobrili postupak proizvodnje, da bi u narednim posetama izvršili i nadzor nad prijemnim ispitivanjima odabranom reprezentativnom grupom statorskih štapova koji su prošli sva fabrička prijemna ispitivanja.

Na kompletno sklopljenom statorskom namotaju izvršena su fabrička prijemna ispitivanja, kome su prethodila ispitivanja magnetskog jezgra statora pre ugradnje namotaja,

Nakon transporta i montaže generatora na mesto pogona u TE Kostolac-B izvršena su brojna prijemna ispitivanja na mestu pogona, takođe definisana odgovarajućim ITP-dokumentom zajedno sa takođe usvojenim kriterijumskim vrednostima.

Ovaj rad je imao za cilj da opiše aktivnosti i ispitivanja koja su izvršena u procesu pripreme dokumentacije kontrole kvaliteta, praćenja međufaznih i fabričkih prijemnih ispitivanja, ispitivanja nakon završne montaže i probnog perioda pogona, uključujući i veoma važno garancijsko ispitivanje novog generatora B3 u TE Kostolac-B.

4. LITERATURA

- [1] VODIČ za primenu standarda i procedura za električna ispitivanja u procesu proizvodnje, isporuke i primopredaje opreme za TE Kostolac B3 – 1. faza - Knjiga 1/5: Energetski transformatori
- [2] VODIČ za primenu standarda i procedura za električna ispitivanja u procesu proizvodnje, isporuke i primopredaje opreme za TE Kostolac B3 – 1. faza - Knjiga 2/5: Obrtne mašine – generator
- [3] VODIČ za primenu standarda i procedura za električna ispitivanja u procesu proizvodnje, isporuke i primopredaje opreme za TE Kostolac B3 – 1. faza - Knjiga 3/5: Obrtne mašine – 6 kV motori
- [4] VODIČ za primenu standarda i procedura za električna ispitivanja u procesu proizvodnje, isporuke i primopredaje opreme za TE Kostolac B3 – 1. faza - Knjiga 4/5: Obrtne mašine - pobudni sistem generatora
- [5] VODIČ za primenu standarda i procedura za električna ispitivanja u procesu proizvodnje, isporuke i primopredaje opreme za TE Kostolac B3 – 1. faza - Knjiga 5/5: Regulisana napajanja elektrostatičkih filtera
- [6] Inspection Test Plan of Kostolac-B Generator in SGP GN-ITP00 Q0A933F251 Rev J
- [7] ITP No. GN-ITP09-S – Qualification Stator Coil
- [8] IEC 60034-27-3: 2015 Rotating electrical machines – Part 27-3: Dielectric dissipation factor measurement on stator winding insulation of rotating electrical machines
- [9] ITP GN-ITP23-FSA Bushings
- [10] IEC 60034-2 Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)