

Pokretanje sinhronog motora u PAP "Lisina" pomoću generatora iz HE "Vrla 1"

Ilija Stevanović, Đorđe Stojić, Žarko Janda¹,
Milorad Jovanović, Petar Marković, Zlatko Đukanović²

¹ Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla,
Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija
ilija.stevanovic@jeent.org

² JP Elektroprivreda Srbije, Ogranak "HE Đerdap", Vlasinske HE,
Kej Rade Cvetković 15, 17530 Surdulica, Srbija

Kratak sadržaj: U radu je opisano ispitivanje koje je urađeno u cilju balansiranja rotora sinhronog motora u PAP "Lisina". Da bi se balansiranje izvršilo bilo je potrebno polako vrteti rotor motora do sinhronne brzine. To je urađeno pomoću jednog od generatora iz HE "Vrla 1". Sinhroni motor je pokretan asinhrono uz konstantni odnos U/f. Pre toga su urađeni proračuni neophodnih parametara. Eksperiment je ilustrovan vremenskim snimcima procesa na kojim su prikazani promene brzine, napona i struje statora, kao i struje u rotoru sinhronog motora u toku njegovog zaleta.

Ključne reči: sinhroni motor, zalet, U/f regulacija, balansiranje rotora.

1 Uvod

Na sinhronom motoru M1 u PAP "Lisina" pojavio se kvar početkom maja 2018. godine. Kvar se manifestovao kao proboj izolacije na statorskom namotaju usled čega je došlo do njegovog značajnog oštećenja.

Izgled statora i rotora neposredno posle kvara prikazan je na slikama 1 i 2, respektivno. U donjem delu statora vide se mesta na namotaju gde se pojavio kvar. Na ovom mestu je oštećena izolacija između štapova i prema magnetnom kolu. Pošto se razvila visoka temperatura došlo je do topljenja bakra namotaja, gorenja izolacije i pojave dima. Zbog toga su bili veoma zaprljani ostali delovi namotaja statora i rotora kao što se vidi na priloženim slikama.

U postupak popravke motora se ušlo sa idejom da je dovoljno zameniti namotaje statora, a da će magnetno kolo imati zadovoljavajuće karakteristike.



Slika 1. Izgled statora motora posle kvara Slika 2. Izgled rotora motora posle kvara

Zbog toga je izvršeno vađenje rotora i skidanje polova rotorskog namotaja, zatim vađenje statora i skidanje njegovih namotaja. Sve to je urađeno u elektrani. U postupku defektaže izvršena su ispitivanja na osnovu kojih je konstatovano da je, zbog prekomernih lokalnih zagrevanja, potrebno zameniti i magnetno kolo statora.

U narednom periodu izvršeno je saniranje kvara na statoru zamenom magnetnog kola i namotaja, a polovi rotora su očišćeni i prefarbani. Radovi su urađeni u fabrici električnih mašina. Zatim su izvršena ispitivanja zagrevanja statora i visokonaponska ispitivanja na saniranom statoru. Motor je montiran u bure u postrojenju i povezan sa pumpom i ostalom opremom.

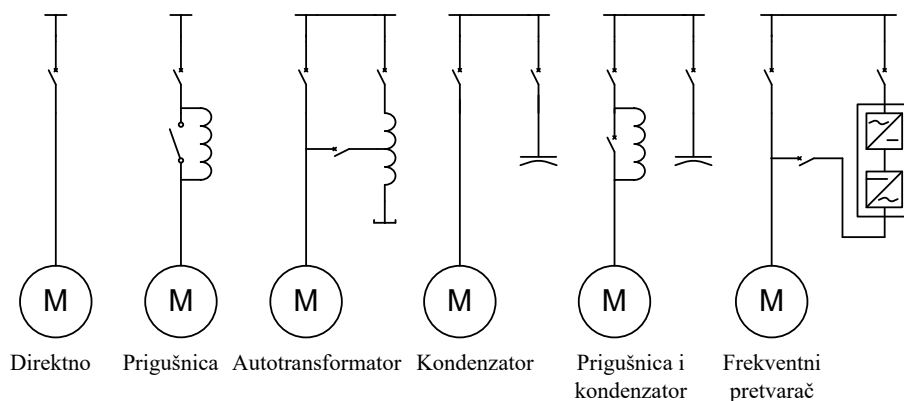
Nakon ovih radnji, pre puštanja u rad, bilo je potrebno izvršiti balansiranje rotora motora. Pošto je motor već montiran u postrojenju, balansiranje rotora se moralo izvršiti na licu mesta. Da bi se balansiranje izvršilo bilo je potrebno polako vrtiti rotor motora do sinhronne brzine pri čemu bi se merile vibracije. Za pokretanje motora je bio potreban izvor promenljivog napona i frekvencije odgovarajuće snage kojim bi se napojio stator motora. Jedina mogućnost koja je bila na raspolaganju je da se pokretanje motora izvrši pomoću nekog od generatora iz HE „Vrla 1“.

Da bi se ispitivanje uspešno izvršilo i da bi se razumeli procesi koji se dešavaju izvršena su kratka teorijska podsećanja na osnovne načine pokretanja sinhronog motora i principe upravljanja brzinom u pogonima sa asinhronim motorima.

2 Teorijske osnove

2.1 Vrste pokretanja sinhronog motora

Pokretanje sinhronih motora može da se vrši na više načina, što je ilustrovano na slici 3. Jedan od načina pokretanja je direktno priključenje motora na mrežu. Nedostaci ovakvog načina pokretanja su velike polazne struje i veliki pad napona u mreži u toku zaleta motora [1]. Da bi se ublažio ovaj pad napona i smanjile struje statora, pokretanje se vrši preko prigušnice ili autotransformatora ili uz pomoć kondenzatorskih baterija. Najsavremeniji način pokretanja sinhronog motora je pomoću mekih upuštača (softstartera), kod kojih se vrši regulacija napona na statoru motora u toku zaleta. Kod sinhronih motora sa promenljivom brzinom, priključenje motora na mrežu se vrši preko frekventnih pretvarača [2].



Slika 3. Metode pokretanja sinhronih motora

Sa stanovišta rotora razlikuju se dva načina zaleta sinhronih motora. Prvi način je asinhroni zalet, a drugi sinhroni. U toku asinhronog zaleta sinhronog motora na rotoru, u prigušnom i pobudnom namotaju, se indukuju elektromotorne sile. Prigušni namotaj je konstruisan kao kavez kod asinhronog motora i kroz njega protiče struja u toku zaleta motora. Elektromotorna sila u pobudnom namotaju može da proizvede prenapone vrlo velike vrednosti. Zbog toga se u ovo kolo preko prekidača za zalet uključuje odgovarajući otpornik. Na taj način sprečena je pojava prenapona na rotoru i ograničena struja u pobudnom namotaju. Kroz ovako formirano strujno kolo protiče struja čija je frekvencija proporcionalna klizanju rotora i osnovnoj frekvenciji napona mreže. Kako se sinhroni motor približava sinhronoj brzini smanjuje se i frekvencija indukovanih struja u rotoru motora. U blizini sinhronne brzine, sinhroni motor se sinhronizuje na mrežu po principu samosinhronizacije.

Asinhroni zalet sinhronog motora primenjuje se pri direktnom priključenju motora na mrežu, pri priključenju preko prigušnice, autotransformatora ili kondenzatorskih baterija i pomoću mekog upuštača (softstartera).

Ako se zalet sinhronog motora vrši uz pomoć frekventnog pretvarača, primenjuje se sinhroni zalet. Ova vrsta zaleta podrazumeva da se od početka zaleta na pobudni namotaj dovodi pobudna struja. Jačina struje kroz pobudni namotaj se reguliše tako da se sinhroni motor održava u sinhronizmu pri različitoj frekvenciji napona na statoru u toku zaleta. Promenom frekvencije napona statora menja se brzina obrtanja njegovog elektromagnetnog polja, koje je spregnuto sa poljem rotora tako da se rotor postepeno ubrzava do konačne sinhronne brzine sinhronog motora. Struje u statoru i rotoru imaju ograničene vrednosti i zavise od karaktera opterećenja.

Težinu starta sinhronog motora u velikoj meri određuje vrsta opterećenja na koje je motor priključen. Kod pumpno-akumulacionih postrojenja opterećenje je ventilatorskog tipa. To znači da moment opterećena raste sa kvadratom brzine. Na ovaj moment treba dodati i moment trenja koji ima konstantnu vrednost.

2.2 Asinhroni zalet sinhronog motora

U toku asinhronog zaleta sinhronog motora kroz pobudni namotaj i šipke prigušnog odnosno startnog kaveza teku indukovane struje. Motor razvija dve vrste momenta: a) asinhroni, koji ima srednju vrednost različitu od nule i koji vrši zaletanje obrtnih delova motora i pumpe i b) sinhroni reluktantni koji potiče od asimetrije magnetskog kola duž podužne i poprečne ose i čija je srednja vrednost jednaka nuli, ali proizvodi pulsacije. Takođe, u motoru u toku starta postoji i inverzno obrtno polje koje proizvodi dodatne gubitke u motoru.

Moment električne mašine se procenjuje koristeći poznati koncept obrtne snage iz teorije asinhronih motora [3],

$$M_{ob} = \frac{P_{ob}}{\Omega_s} \quad (1)$$

gde je M_{ob} srednja vrednost obrtnog momenta, P_{ob} vrednost obrtne snage i Ω_s mehanička sinhrona brzina. Ona se dobije kada se ugaona brzina obrtnog magnetnog polja statora ω_s podeli sa brojem pari polova p rotora, tj.

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (2)$$

Obrtna snaga se može izračunati na osnovu sledeće formule:

$$P_{ob} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_s \cdot \cos\varphi - 3 \cdot I_s^2 \cdot r_s - P_{Fe} \quad (3)$$

gde su: U_s - efektivna vrednost linijskih napona statora, I_s – efektivna vrednost struje statora motora, φ - fazni pomeraj između napona i struje, r_s – otpornost statorskog namotaja, a P_{Fe} – gubici u gvožđu statora.

Zatim se određuje moment opterećenja u toku zaleta, tako što se od obrtnog momenta dobijenog prema (1) oduzima dinamički moment koji ubrzava rotacione momente inercije motora i pumpe, prema jednačini (4),

$$M_{opt} = M_{ob} - (J_M + J_P) \cdot \frac{d\Omega}{dt} \quad (4)$$

gde su: J_M - moment inercije sinhronog motora, a J_P - moment inercije pumpe.

Pri ovom proračunu gubici usled trenja i ventilacije su uračunati u moment opterećenja.

2.3 Osnovni principi upravljanja brzinom asinhronog motora

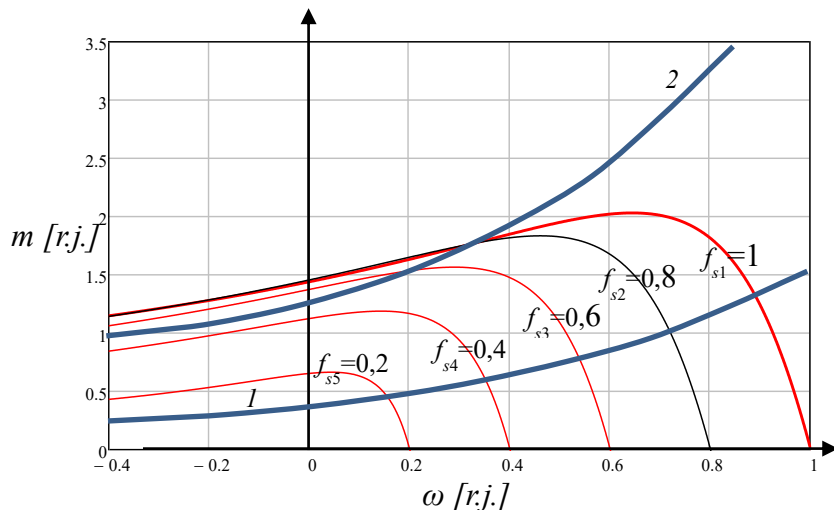
Pri asinhronom pokretanju sinhronog motora važe sva pravila koja važe i za asinhronu mašinu. Zbog toga je potrebno podsetiti se ovih pravila i u sklopu njih analizirati zalet motora sa upravljanjem odnosom U/f [4].

Elektromagnetni moment asinhronog motora zavisi od veličine otpora rotorskog namotaja. Povećanjem otpornosti rotorskog namotaja prevalni moment se pomera ka oblasti sa manjim brzinama, što dovodi i do povećanja polaznog momenta.

Pošto elektromagnetni moment zavisi od kvadrata napona dovedenog na stator motora svako smanjenje napona dovodi do značajnog smanjenja elektromagnetnog momenta. Posebno je ugrožena vrednost polaznog momenta.

Promenom frekvencije napona napajanja motora menja se sinhrona brzina. Upravljanje brzinom asinhronog motora se vrši po principu $U/f=Const$. U realnoj situaciji pri manjim brzinama prevalni moment i polazni moment, takođe, imaju manju vrednost. Zbog toga se vrši kompenzacija napona kako bi se dobile karakteristike sa konstantnom vrednošću prevalnog momenta. U tom slučaju U/f nije konstantno već se menja po definisanoj zavisnosti koja se implementira u upravljački sistem.

Na slici 4 su prikazane nekompenzovane karakteristike elektromagnetnog momenta pri promeni frekvencije napona napajanja [5] i dve karakteristike opterećenja ventilatorskog tipa. Karakteristika opterećenja obeležena brojem 1 ilustruje manje opterećenje. Ona preseca karakteristike elektromagnetnog momenta motora u njihovom linearnom delu, pa je zalet motora stabilan i uspešan. Karakteristika opterećenja označena brojem 2 opisuje veće opterećenje motora. Da bi se motor pokrenuo pri ovom opterećenju, potrebno je da dostigne znatno veću frekvenciju napona napajanja (karakteristika f_{s3}) kako bi polazni elektromagnetni moment motora imao veću vrednost od momenta opterećenja. Presek karakteristike elektromagnetnog momenta i momenta opterećenja se nalazi na nestabilnom delu karakteristike i motor se neće uspešno zaleteti čak i pri povećanju frekvencije napona napajanja. U ovom slučaju, da bi se zalet motora uspešno izvršio, potrebno je povećati odnos U/f , tj. povećati veličinu napona U .



Slika 4. Uspostavljanje radne tačke asinhronih motora pri različitoj frekvencije napona statora

Dakle, za postizanje stabilne radne tačke motora potrebno je ispuniti sledeći uslov

$$\frac{dM_{opt}}{d\omega} > \frac{dM_{ob}}{d\omega} \quad (5)$$

odnosno da je u radnoj tački nagib tangente (tangens ugla) na karakteristiku opterećenja veći od nagiba tangente na elektromagnetni moment motora prema osi brzine.

3 Opis asinhronog zaleta sinhronog motora u PAP “Lisina” pri direktnom priključenju na mrežu

U PAP “Lisina” se nalaze dve sinhronne mašine koje rade u ulozi elektromotora pumpnog agregata, pojedinačne snage 15,4 MVA. Rotor pumpe je potopljen u vodu i na nižem je nivou od najnižeg nivoa vode u donjem jezeru iz koga se voda pumpa na viši nivo, odnosno u gornje jezero. U toku zaleta agregata, opterećenje na motoru u znatnoj meri stvara voda u pumpi. Na ulazu vode u pumpu, sa strane donjeg jezera, se nalazi leptirasti zatvarač koji je otvoren u toku normalnom pogonskog stanja motora.

Na izlazu iz pumpe nalazi se kuglasti zatvarač, koji je zatvoren pri isključenom motoru i onemogućava povratak vode iz tunela i cevovoda od gornjeg ka donjem jezeru.

Sinhroni motori koji pokreću pumpe nalaze se u pumpnom postrojenju i puštaju se u rad asinhrono direktnim priključenjem na mrežu. Samo puštanje u rad realizuje se tako što se pre pokretanja mašine, kolo rotora spoji preko dodatnog otpornika oko deset puta veće vrednosti otpornosti od otpornosti samog pobudnog namotaja. Posle uključenja prekidača snage motora i njegovog priključenja na mrežu počinje zalet motora. Kada rotor dostigne brzinu blizu sinhronne, uključuje se pobuda motora, isključuje se dodatni otpornik za zalet i sinhroni moment dovodi rotor u sinhronizam. Ceo ovaj proces traje oko 10 sekundi.

U toku zaleta sinhronog motora, s brzinom raste i pritisak u izlaznom delu pumpe. Kuglasti zatvarač počinje da se otvara tek kada se na izlazu pumpe postigne pritisak koji je dovoljan da savlada pritisak vode u cevovodu (oko 38 bara). Pri otvorenom kuglastom zatvaraču pritisak postiže konstantnu vrednost koju zadržava u celom periodu rada motora na mreži. Kuglasti zatvarač se mora u potpunosti otvoriti za 40s posle početka zaleta motora.

Ovakav start sinhronog motora smatra se "teškim" zato što na početku zaleta napon na motoru padne na 65% nazivnog napona, a struja motora poraste na vrednost oko 3,5 puta veću od nazivne. U pobudnom namotaju se indukuje naizmenična struja maksimalne vrednosti do 600A [6].

4 Tehničke karakteristike mašina

4.1 Motor 1

Proizvođač	BBC
Godina proizvodnje	1975.
Klasa izolacije	F
Nominalna broj obrtaja/pobeg	1500/2000 min ⁻¹
Nominalna prividna snaga	15400 kVA
Nominalni faktor snage cosφ	0.95
Nominalni napon statora	6000 V +10% -10%
Nominalna struja statora	1480 A
Učestanost	50 Hz
Nominalna struja pobude	530 A DC
Nominalni napon pobude	90 V DC
Moment inercije motora – mD ²	4400 kgm ²

4.2 Pumpa 1

Proizvođač	J.M.Voith AG ST. Pelten
Godina proizvodnje	1975.
Nominalni napor Hn	335 m

Nominalni protok Qn	3,6 m ³ /s
Nominalni broj obrtaja Nn	1500 o/min
Broj obrtaja pri pobegu Np	2000 o/min
Snaga P	13400 kW
Moment inercije pumpe – mD ²	440 kgm ²

4.3 Generator G3

Proizvođač	„Škoda“, ČSR
Godina proizvodnje	1974.
Klasa izolacije	F
Nominalna broj obrtaja/pobeg	600/1035 min ⁻¹
Nominalna prividna snaga	15750 kVA
Nominalni faktor snage cosφ	0.9
Nominalni napon statora	6300 V +5% -5%
Nominalna struja statora	1440 A
Učestanost	50 Hz
Napon pobude	75V
Struja pobude	484A

5 Program ispitivanja pri pokretanju motora M1 U PAP „Lisina” pomoću generatora G3 iz HE „Vrla 1”

Na osnovu analize procesa pokretanja sinhronog motora formiran je sledeći program ispitivanja:

1. Balansiranje rotora motora se vrši nakon *snimanja vibracija u toku zaleta motora* do određene brzine, po mogućnosti sinhrono. Promena brzine, odnosno zalet motora, mora se vršiti postepeno i sa mogućnošću prekida procesa, ako se pojave prevelike vibracije. Potrebno je izvršiti više pokretanja u toku ovog procesa.
2. Motor je minimalno opterećen zato što pumpa nije potopljena u vodu.
3. Zalet motora se vrši pomoću sinhronog generatora G3 iz HE „Vrla 1” uz regulaciju $U^*/f^*=Const.$ Zvezdica označava da se radi o relativnim jedinicama.
4. Formiranje šeme ispitivanja, odnosno uspostavljanje uklopnog stanje u rasklopnom postrojenju u HE „Vrla 1”, na dalekovodu DV 1123 od HE „Vrla 1” do PAP „Lisina” i u rasklopnom postrojenju u PAP „Lisina”.
5. Stvoriti uslove za pokretanje i rad pobuđenog generatora G3 u HE „Vrla 1” sa promenljivom brzinom.
6. Pripremiti uslove za start motora M1 i obezbeđenja u PAP „Lisina”.

7. Uraditi neophodne blokade električnih zaštita u HE „Vrla 1“, na dalekovodi DV 1123 i u PAP „Lisina“.
8. Postepeno zaletati motor M1 delovanjem na struju pobude i brzinu generatora G3.
9. Prekid zaletanja motora i njegovo zaustavljanje izvršiti isključenjem prekidača snage na motoru M1 ili generatorskog prekidača na generatoru G3.

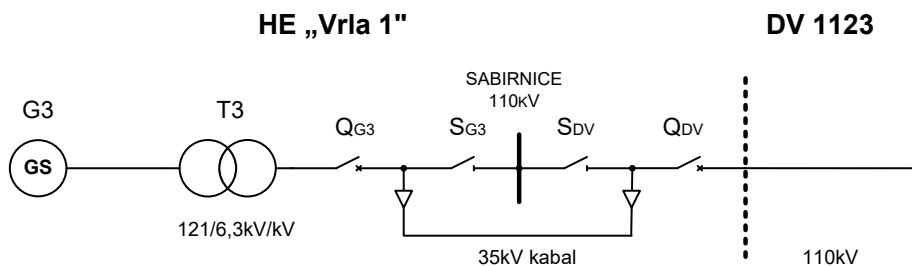
6 Šema ispitivanja

Za pokretanje motora M1 u PAP „Lisina“ izabran je sinhroni generator G3 iz HE „Vrla 1“. Ovaj generator je odabran zato što ima pumpu za podmazivanje ležajeva pa je moguća dugotrajna vrtnja generatora i pri znatno manjim brzinama od sinhrone.

Jednopolna šema postrojenja u HE „Vrla 1“ pri ispitivanju je prikazana na slici 5. Izvodi generatora G3 su direktno vezani na blok transformator T3 prenosnog odnosa 121/6,3kV/kV. Na visokonaponskoj strani ovog transformatora nalazi se generatorski prekidač Q_{G3} i generatorski rastavljač S_{G3} do sabirnica 110kV. Ovaj rastavljač i dalekovodni rastavljač S_{DV} na dalekovodu DV 1123 koji povezuje HE „Vrla 1“ i PAP „Lisina“ moraju biti isključeni. Generatorski prekidač Q_{G3} i dalekovodni prekidač Q_{DV} se uključuju neposredno pre početka ispitivanja i ostaju uključeni tokom ispitivanja.

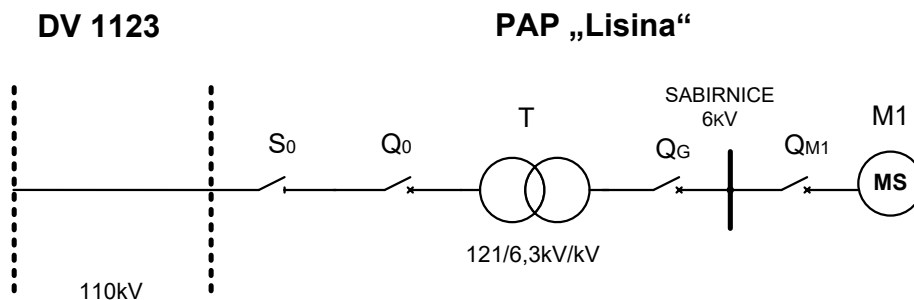
Pošto se na sabirnicama 110kV nalaze vezani sva četiri generatora u HE „Vrla 1“ navedeni rastavljači S_{G3} i S_{DV} sa obe strane sabirnica zadržavaju se u toku ispitivanja u isključenom stanju.

Prosleđivanje napona od generatora G3 na dalekovod se vrši preko 35kV kabla (120mm^2) koji se sa jedne strane povezuje na priključke između generatorskog prekidača i generatorskog rastavljača, a sa druge strane na priključke između dalekovodnog rastavljača i dalekovodnog prekidača dalekovoda DV 1123 kao što je prikazano na slici 5. Zbog ovog kabla napon na dalekovodu se ograničava na iznos od 35kV.



Slika 5. Jednopolna šema postrojenja u HE „Vrla 1“ potrebna za ispitivanje

Na drugom kraju dalekovoda DV 1123 nalazi se 110kV-no rasklopno postrojenje PAP „Lisina“. Jednopolna šema postrojenja u PAP „Lisina“ pri ispitivanju je prikazana na slici 6. U njemu je potrebno, u toku procesa pripreme šeme ispitivanja, isključiti dalekovod DV 1182 koji napaja potrošačko područje „Bosilegrad“, a ove potrošače napojiti električnom energijom iz distributivne mreže 35kV. Dalekovodni rastavljač S₀ i prekidač Q₀ na 110kV-nom sistemu su uključeni kako bi se omogućilo prosleđivanje napona sa dalekovoda na transformator 121/6,3kV/kV. Takođe, prekidač Q_G koji prosleđuje napon sa transformatora na sabirnice 6kV mora biti uključen. Na sabirnicama 6kV u PAP „Lisina“ se nalaze prekidači snage oba motora, prekidači za napajanje sistema pobude oba motora i prekidač za napajanje sopstvene potrošnje. Svi ovi prekidači, izuzev motornog prekidača Q_{M1} motora M1, moraju biti isključeni i obezbeđeni od uključjenja (test položaj).



Slika 6. Jednopolna šema postrojenja u PAP „Lisina“ potrebna za ispitivanje

7 Proračuni i analize pre pokretanja motora

Zbog ograničenja napona na dalekovodu na 35kV maksimalni napon na generatoru u toku zaleta motora mora biti manji od 1820V ($35 \times 6,3 / 121 = 1820$). Potrebna struja pobude za postizanje ovog napona pri nazivnoj brzini je 70A i dobijena je iz karakteristike praznog hoda generatora G3. Eksperimentom je potvrđeno da je pri neopterećenom generatoru (isključen generatorski prekidač) pri ovoj struji pobude $U^*/f^* = 0,3$.

U toku zaleta motora M1, sinhroni generator G3 koji napaja uspostavljenu mrežu je opterećen strujom do maksimalno 0,25I_n. Ova struja opterećenja proizvodi padove napona na sinhronom generatoru G3, blok transformatoru generatora G3, dalekovodu DV 1123 i transformatoru u PAP „Lisina“ i samom motoru M1. Zbog toga je u toku ovih ispitivanja potrebno imati veću struju pobude (I_f=170A), odnosno veću vrednost odnosa U^*/f^* . Njegova vrednost ne sme biti veća od 1,0 da ne bi magenetna indukcija u mašinama bila veća od nazivne. Pokazalo se u toku ispitivanja da je odnos U^*/f^* potrebno održavati na vrednosti 0,6 do 0,8.

U toku procesa pripreme za zalet motora M1, struja pobude se dovodi na zaustavljeni rotor generatora G3 neposredno pre pokretanja, i reguliše na zadanoj vrednosti u toku procesa zaletanja motora. Regulator pobude generatora treba da je u režimu regulacije struje pobude. Promena vrednosti struje pobude se, vrši samo ako se, eventualno, pojavi potreba u toku ispitivanja. Razlog za to je neophodnost da se savlada moment opterećenja na početku pokretanja motora ili kasnije pri velikim brzinama zbog ograničenja napona na dalekovodu ($I_f=135A$). Posle zadavanja struje pobude na zaustavljenom rotoru generatora, uključi se generatorski prekidač Q_{G3} i počinje povećanje njegove brzine ručnom regulacijom na turbinskom regulatoru. Brzina se povećava dok se ne postigne pre pokretanja dogovorena frekvencija (brzina).

Da bi se povećao napon na motoru, smanjen je prenosni odnos transformatora u PAP „Lisina“ tako što je regulaciona sklopka iz položaja 2 sa prenosnim odnosom 118,75/6,3kV/kV dovedena u položaj 5. U ovom položaju regulacione sklopke, prenosni odnos transformatora u PAP „Lisina“ iznosi 107,5/6,3kV/kV. Na taj način napon na motoru je podignut za 9,5%.

Motor M1 u PAP „Lisina“ se pokreće bez vode u radnom kolu pumpe. To znači da ukupni moment opterećenja pri zaletu čine moment inercije motora i centrifugalne pumpe i moment trenja i ventilacije motora i pumpe u vazduhu. Ovi momenti se uravnotežuju elektromagnetnim momentom sinhronog motora M1. Zaletanje motora se vrši asinhrono tj. bez dovođenja struje pobude u rotorski namotaj. Brzina motora se povećava zahvaljujući povećanju napona i njegove frekvencije u već utvrđenom odnosu koji proizvodi generator G3 iz HE „Vrla 1“.

Očekuje se da će pad napona na reaktansama oba transformatora i dalekovoda biti oko 10%. Pošto je ovo smanjenje napona kompenzovano promenom prenosnog odnosa blok transformatora u PAP „Lisina“ može se očekivati dostizanje napona na motoru od 1800V pri nazivnoj brzini. Kada je zadana brzina motora manja od nazivne, na generatoru G3 će, pri zadanoj struji pobude, biti i proporcionalno manji napon. Ipak, napon koji se ostvari pri bilo kojoj brzini treba da bude dovoljan za savladavanje momenata opterećenja. U slučaju da tu ima problema, posebno na početku zaleta, dolazi do ispada iz „režima malog klizanja“ generatora G3 i motora M1. Ova situacija se prepoznaje tako što brzina generatora raste, a brzina motora stagnira odnosno više se ne održava odnos: brzina motora/brzina generatora = $1500/600 = 2,5$. U tom slučaju je potrebno prekinuti proces zaletanja motora, zaustaviti obe mašine, a novo pokretanje početi sa većom strujom pobude.

S obzirom da se zalet sinhronog motora vrši asinhrono i da se pretpostavlja da će taj proces trajati reda veličine 10-ak minuta, u tom periodu zaletni otpornik ($1,1\Omega$) može biti temperaturno ugrožen. Zbog toga je razmatrana mogućnost da se on prespoji. U tom slučaju struja u rotoru bi mogla dostići 10 puta veću vrednosti jer je otpornost rotorskog namotaja $0,12\Omega$. Ni to nije bila dobra opcija jer se onda nije znalo kolika će biti vrednost struje kroz rotor u toku eksperimenta. Otpornik za zalet je dimenzionisan za maksimalnu kratkotrajnu struju od 400A, 10s. Za trajan rad, iskustvo pokazuje

da je moguće na otporniku imati tri puta manju struju od maksimalne, a da se on ne pregreje. Dakle, struja kroz otpornik od 130 - 150A u trajanju od 10-ak minuta ne bi trebala da dovede do njegovog pregrevanja. Zbog toga je odlučeno da se prvo pokretanje sinhronog motora izvrši sa otpornikom za zalet uključenim u kolo rotora i da se meri njegova temperatura. Ako temperatura otpornika za zalet ne bude veća od 100°C na kraju zaleta, otpornik treba zadržati u kolu rotora prilikom ovih ispitivanja.

Sa otpornikom za zalet u kolu rotora biće veći i polazni moment motora tako da je bolje da on bude uključen u rotorsko kolo prilikom zaleta.

U toku zaleta motora na ormanu pobude treba pratiti veličinu struje pobude. Za očekivati je da struja u rotoru motora manja od 300A (oko 60% nazivne struje pobude) neće dovesti do pregrevanja rotora i pored toga što je smanjena ventilacija zbog manje brzine.

8 Uslovi za rad i obezbeđenja

U toku pripreme za pokretanje motora potrebno je izvršiti sledeća *obezbeđenja na sistemu pobude generatora G3 u HE „Vrla 1“*:

- uključiti nezavisni sistem pobude,
- isključiti prekidač Q_{TP} za napajanje transformatora pobude u sistemu samopobude,
- blokirati električno kočenje,
- blokirati prelaz na drugi kanal regulacije,
- uključiti lokalno upravljanje na regulatoru,
- uključiti regulaciju struje pobude,
- blokirati početnu pobudu,
- blokirati forsiranje pobude,
- blokirati „neuspešno početno pobuđivanje“,
- blokirati „gubitak merenja napona“ na regulatoru,
- ostvariti uslov brzine $n > 95\% n_s$,
- deaktivirati uslov brzine $n < 90\% n_s$,
- simulirati uključeno stanje sabirničkog rastavljača.

Na *generatoru G3 u HE „Vrla 1“* potrebno je blokirati sledeće električne zaštite:

- podfrekventnu.

Na *dalekovodu DV 1123 koji povezuje HE „Vrla 1“ i PAP „Lisina“* potrebno je:

- blokirati distantnu zaštitu.

U *PAP „Lisina“* moraju se uraditi *blokade sledećih električnih zaštita*:

- blokada podnaponske zaštite,
- blokada podfrekventne zaštite,
- blokada zaštite od gubitka pobude,
- isključiti BBC-ovu zaštitu od ukočenosti rotora (3s).

Na *sistemu pobude u PAP „Lisina“* potrebno je:

- podesiti daljinsko upravljanje na regulatoru pobude,
- isključiti prekidač za napajanje transformatora pobude Q_{TP} ,
- blokirati delovanje zaštita sistema pobude,
- blokirati uključenje prekidača demagnetizacije,
- uključiti prekidač za zalet,
- blokirati isključenje prekidača za zalet,
- obezbediti uslov za uključenje prekidača snage motora Q_{M1} od sistema pobude.

Na komandnim tablama agregata (KTA) obezbediti startne uslove. Pored ostalog potrebno je:

- simulirati uključeno stanje prekidača za napajanje transformatora pobude Q_{TP} ,
- isključiti vremensko ograničenje za uključanja pobude (10s),
- isključiti vremensko ograničenje za trajanja zaleta (40s),
- blokada hidromehaničkih zaštita.

Motor M2 mora biti isključen sa mreže. Prekidač Q_{TP} za napajanje transformatora pobude drugog motora mora biti isključen. Dalekovod 110kV prema Bosilegradu treba isključiti. Rastavljač na 6kV za napajanje sopstvene potrošnje mora biti isključen.

9 Opis toka ispitivanja

Redosled operacija u toku pokretanje motora je sledeći:

1. Formirati šemu ispitivanja.
2. Obezbediti uslove za start mašina u HE „Vrla 1“ i PAP „Lisina“.
3. U HE „Vrla 1“ uključiti dalekovodni prekidač Q_{DV} .
4. U PAP „Lisina“ uključiti prekidače Q_G , Q_0 i Q_{M1} .
5. Zadati željenu struju na regulatoru pobude generatora G3.
6. Na regulatoru pobude aktivirati „Pobuđivanje“.
7. Uključiti generatorski prekidač Q_{G3} .
8. Povećavati brzinu generatora pomoću ručnog upravljanja turbinskim regulatorom. Treba voditi računa da povećanje brzine ne bude veliko. Preporučeno povećanje brzine je oko 3 ob/s^2 .
9. Kada se postigne brzina generatora oko 30-40 ob/min na generatoru, počinje pokretanje sinhronog motora.
10. Brzina se povećava dok se ne postigne sinhrona brzina ili se proces prekine zbog drugih uzroka (npr. povećane vibracije ili povećano klizanje).

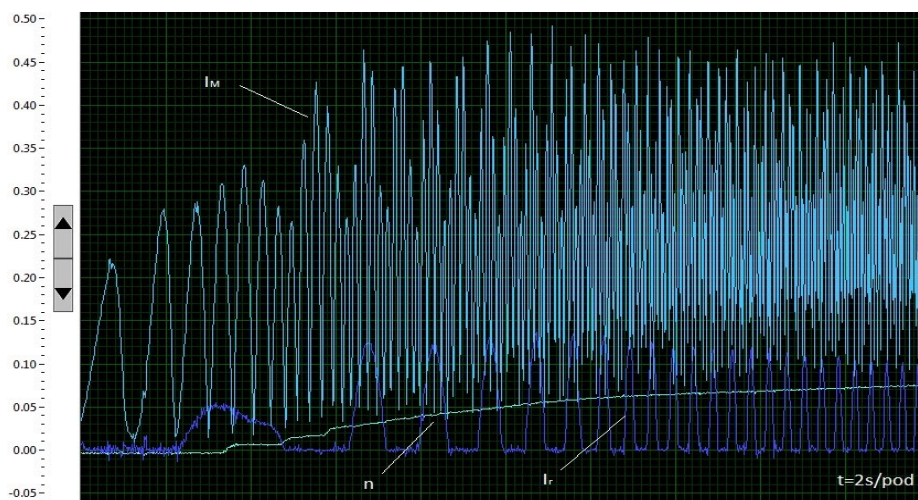
Prekidanje procesa zaletanja ili isključenje posle uspešno završenog procesa, vrši se na generatoru G3 isključenjem generatorskog prekidača. Prekid zaletanja motora se može izvršiti i isključenjem prekidača snage motora Q_{M1} .

10 Rezultati ispitivanja

Na opisani način izvršeno je ukupno 9 pokretanja motora. Od toga su 4 pokretanja bila neuspešna, a 5 su bili uspešni.

Pri neuspešnim pokretanjima, brzina motora nije proporcionalno rasla sa povećanjem brzine generatora. U toj situaciji motor je ostajao na manjoj brzini i sporo se ubrzavao. U rotorskom namotaju se indukovala struja veće frekvencije jer je i klizanje bilo veliko. Izgled jednog ovakvog neuspešnog pokretanja je prikazan na slici 7. To je bio prvi test koji je izvršen. Na ovoj slici je prikazana zavisnost brzine motora od vremena $n=f(t)$, zavisnost struje statora od vremena $I_M=f(t)$ i zavisnost struje rotora od vremena $I_r=f(t)$. Na apscisi je prikazano vreme pri čemu 1 pod iznosi 2s. Na ovoj slici je prikazano prvih 20s od početka testa. Pri frekvenciji od oko 1,0Hz počinje pokretanje rotora motora. Na kraju posmatranog vremenskog perioda postignuta je brzina od 0,08ns, maksimalna struja statora je iznosila 0,49In, a struja rotora 0,13Im sa frekvencijom od oko 2,5Hz.

U trenutku kada je prepoznat režim rada sa velikim klizanjem, odnosno kada, pri povećanju brzine generatora, nije proporcionalno rasla brzina motora, izmerene su vrednosti promenljivih na generatoru G3 i motoru M1 iz tabele 1 i zaletanje je prekinuto. Iz ove tabele je vidljivo da je brzina motora bila ista kao brzina generatora iako bi trebala da je 2,5 puta veća. Struja statora i struja rotora motora su imale relativno male vrednosti (oko 0,27In). Ceo proces je trajao oko 5 minuta. U tom periodu zaletni otpornik se zagrejao sa 19°C na 38°C. Dakle, zagrevanje pobudnog namotaja nije veliko čak i pri neuspešnom zaletu. Ovo pokretanje motora je urađeno sa odnosom $U^*/f^*=0,3$ jer je struja pobude generatora iznosila 65A.

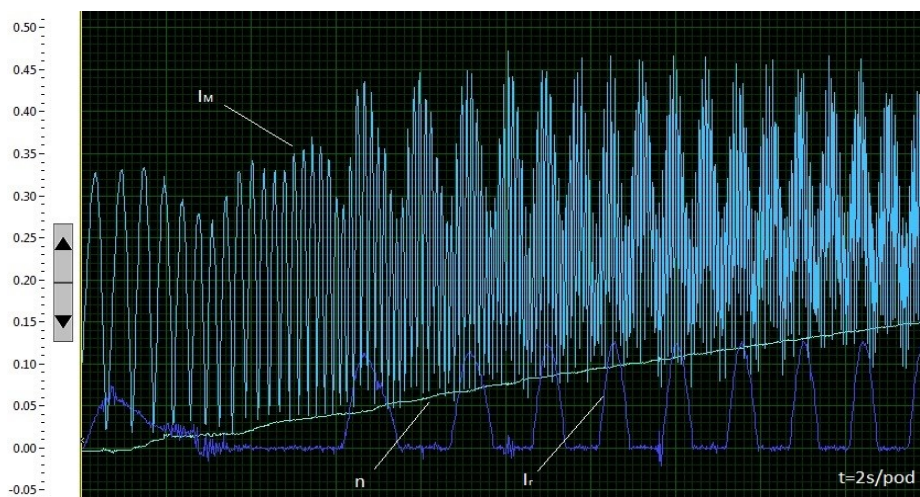


Slika 7. Neuspešno pokretanje motora pri $U^*/f^*=0,3$
(n-brzina motora, I_M -struja motora, I_r -struja rotora motora)

Tabela 1. Izmerene vrednosti promenljivih na generatoru G3 i motoru M1 pri neuspešnom pokretanju

Promenljive	Generator G3	Motor M1
Brzina n (ob/min)	300	300
Napon statora U (V)	400	300
Struja statora I (A)	400	400
Struja rotora I_r (A)	65	50

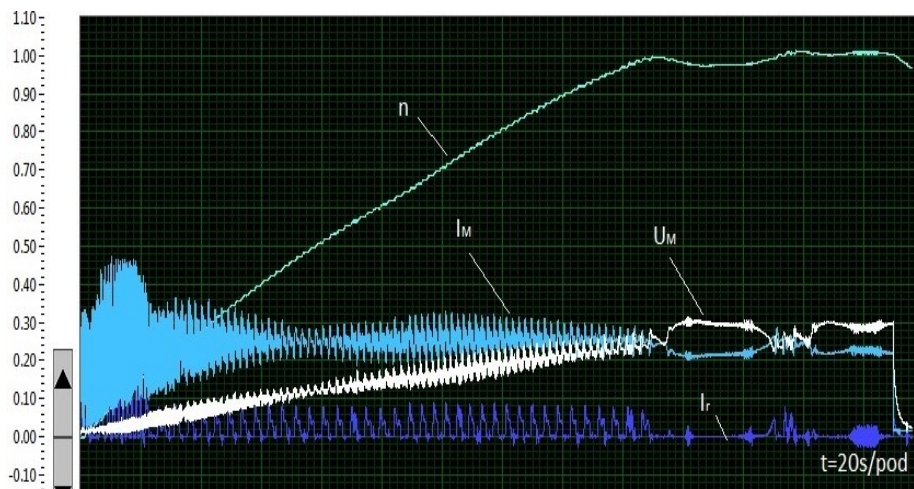
Kako bi rotor motora prilikom pokretanja ostao u zoni malih klizanja povećana je pobudna struja generatora na vrednost $134A$, odnosno uspostavljen je odnos $U^*/f^*=0,63$. Pokretanje motora je bilo uspešno, a zalet je izvršen do sinhronne brzine. Izgled ovog procesa u prvih 20s je prikazan na slici 8. Pri frekvenciji od oko $1,0Hz$ počinje pokretanje rotora motora. Na kraju posmatranog vremenskog perioda postignuta je brzina od $0,15ns$, maksimalna struja statora je iznosila $0,47In$, a struja rotora $0,13In$ sa frekvencijom od oko $0,65Hz$.



Slika 8. Uspešno pokretanje motora pri $U^*/f^*=0,63$ - početak procesa (n -brzina motora, I_M -struja motora, I_r -struja rotora motora)

Na slici 9 je prikazan kompletan zalet sinhronog motora. Ukupno vreme prikazano na snimku iznosi 280s. Motor se zaleti do nazivne brzine za 190s. Na ovom delu snimka se vide testeraste promene napona i struje statora motora koje su posledica prelaznog procesa pri prelasku sa jedne statičke karakteristika na drugu pri promeni frekvencije. U toku eksperimenta treba obratiti pažnju na to da se brzina generatora što je moguće sporije povećava kako bi pulsacije struje bile manje, a samim tim i mogućnost ispada motora iz režima malih klizanja. Neka od neuspešnih pokretanja koja su izvršena su bila

direktna posledica bržeg povećanja frekvencije napona. Na ovoj slici su prikazane samo pozitivne poluperiode struje u rotoru zato što se merenje vrši pomoću pretvarača jednosmerne struje pa negativne poluperiode ne prolaze kroz pretvarač. Pri kraju snimka vide se periodi kada se motor povremeno nalazi u sinhronizmu zbog delovanja reluktantnog momenta. U tim trenucima struja u rotoru je jednaka nuli. Na kraju zaleta izmerene su vrednosti promenljivih na generatoru G3 i motoru M1 iz tabele 2.



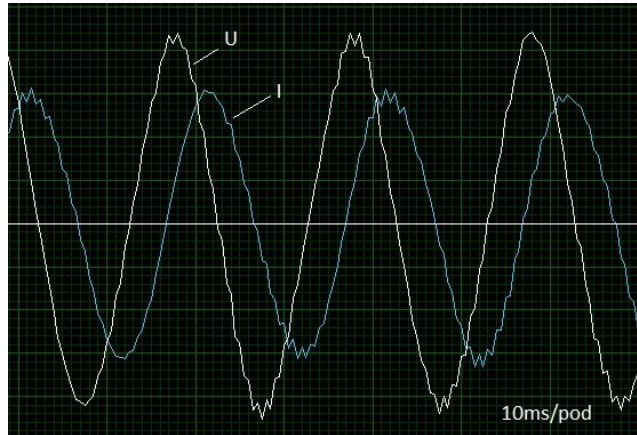
Slika 9. Uspešni zalet motora pri $U^*/f^*=0,63$ – kompletan proces (n -brzina motora, U_M -napon motora, I_M -struja motora)

Tabela 2. Izmerene vrednosti promenljivih na generatoru G3 i motoru M1 pri uspešnom pokretanju motora

Promenljive	Generator G3	Motor M1
Brzina n (ob/min)	600	1480
Napon statora U (V)	1810	1810
Struja statora I (A)	330	327
Struja rotora I_r (A)	134	50

Iz tabele 2 je vidljivo da je brzina motora bila 2,5 puta veća od brzine generatora. Struja statora i struja rotora motora su imale relativno male vrednosti. Ceo proces je trajao oko 5 minuta. U tom periodu zaletni otpornik se zagrejao sa 20°C na 26°C . Na kraju zaleta motora izmeren je napon na dalekovodu DV 1123 od 35kV.

Na slici 10 je prikazan vremenski dijagram napona i struje motora na kraju zaleta, odnosno u stacionarnom stanju. Ovo radno stanje je zbog delovanja reluktantnog momenta motora, u pojedinim trenucima, praktično sinhrono. Sa dijagrama se vidi da struja kasni u odnosu na napon za 4ms, odnosno za ugao $\varphi=72^{\circ}\text{el}$.



Slika 10. Vremenski dijagram napona (U) i struje (I) motora na kraju zaleta

Na osnovu izmerenih napona, struja i faznog stava između ovih veličina može se izračunati aktivna snaga koju motor u stacionarnom stanju uzima iz prethodno opisane električne mreže. Ona iznosi:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi = 1,73 \cdot 1810 \cdot 327 \cdot 0,37 = 317,42 \text{ kW} \quad (6)$$

Ako se zanemare gubici u statoru i, uz klizanje jednako nuli, ulazna električna snaga je jednaka mehaničkoj, pa se moment opterećenja motora u stacionarnom sinhronom stanju može izračunati na sledeći način:

$$M_{opt} = \frac{P_1}{\omega_M} = \frac{P_1}{\frac{\omega_S}{p}} = \frac{317,42}{\frac{314}{2}} = 2,02 \text{ kNm} \quad (7)$$

Pošto nazivni moment motora iznosi

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_M} = \frac{P_n}{\frac{\omega_S}{p}} = \frac{14,63 \cdot 10^6}{\frac{314}{2}} = 93,2 \text{ kNm} \quad (8)$$

dolazi se do podatka da je u ovom slučaju mašina opterećena sa 2,17% nazivnog momenta.

11 Zaključak

U cilju balansiranja rotora sinhronog motora M1 u PAP "Lisina" koje je vršeno posle sanacije kvara na njegovom statoru, izvršeno je pokretanje sinhronog motora pomoću generatora G3 iz HE „Vrla 1“.

Za ovo pokretanje pripremljeno je uklopno stanje u rasklopnom postrojenju u HE „Vrla 1“, dalekovod DV 1123 i u rasklopnom postrojenju u PAP „Lisina“.

Zatim su stvoreni odgovarajući startni uslovi na mašinama i urađena potrebna obezbeđenja. Zaletanje motora M1 je vršeno uz regulaciju $U^*/f^*=Const=0,6-0,8$ na generatoru G3 u HE „Vrla 1“. Ukupno je odrađeno pet uspešnih pokretanja.

Posle izvršenih ispitivanja, sinhroni motor M1 u PAP "Lisina" je uspešno sinhronizovan na mrežu.

Zahvalnica

Rad je nastao u okviru projekta: Povećanje energetske efikasnosti, pouzdanosti i raspoloživosti elektrana JP EPS utvrđivanjem pogonskih dijagrama generatora i primenom novih mernih metoda ispitivanja i daljinskog nadzora, pod brojem TR033024, koji je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Literatura

- [1] I. Stevanović, Đ. Stojić i dr. „Razvoj i primena sistema regulacije pobude sinhronih motora od 15,4 MVA u PAP Lisina“, *Zbornik radova sa 31. savetovanja Cigre Srbija*, Zlatibor, 2013.
- [2] <https://new.siemens.com/global/en/products/drives/sinamics/medium-voltage-converters/sinamics-gl150.html>
- [3] M. Zečević, *Električne mašine*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Istočno Sarajevo, 2005.
- [4] V. Vučković, *Električni pogoni*, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1997.
- [5] <http://www.pogoni.etf.bg.ac.rs/index1.htm>, Regulisani elektromotorni pogoni sa asinhronim motorom - skalarno upravljanje
- [6] I. Stevanović, Ž. Janda i dr., „Ispitivanje ponašanja sinhronog motora pri asinhronom startu“, *Zbornik radova sa 34. savetovanja Cigre Srbija*, Vrnjačka Banja, 2019.

Abstract: This paper describes test that was done in order to balance the synchronous motor rotor installed in plant PAP "Lisina". To perform balancing, it was necessary to slowly rotate the motor rotor up to synchronous speed. This was done by using one of the available generators from the nearby hydro power plant HPP "Vrla 1" to supply motor under test. The synchronous motor is driven asynchronously with a constant U/f ratio during balancing. Before that, the necessary experimental parameters were calculated in order to properly adjust all equipment used. The experiment is illustrated with recorder time diagrams showing the stator speed, voltage and current as well as the current in the synchronous motor rotor during motor run-in.

Keywords: synchronous motor, start, U/f regulation, rotor balancing.

Starting the Synchronous Motor in the PAP "Lisina" by a Generator from the HPP "Vrla 1"

Ilija Stevanović, Đorđe Stojić, Žarko Janda
Milorad Jovanović, Petar Marković, Zlatko Đukanović

Rad primljen u uredništvo: 07.05.2020. godine.

Rad prihvaćen: 04.06.2020. godine.

