

Metodologija za identifikaciju parametara sinkronog hidrogeneratorskog sustava temeljena na mjerenjima u sustavu monitoringa

UDK 621.313.322
621.311.21
IFAC 5.5.4

Izvorni znanstveni članak

Definirana je metodologija za identifikaciju parametara sinkronog hidrogeneratorskog sustava u pogonu (on-line) koja se temelji na mjerenjima dostupnim u okviru sustava monitoringa hidroagregata. U postupku identifikacije koriste se podaci iz snimljenih odziva varijabli generatora u režimu malih pomaka, u kvazistacionarnom i tranzijentnom stanju, uz primjenu odgovarajućih estimacijskih modela i postupaka. Identifikacijski je postupak podijeljen u tri koraka, a teorijska provjera svakog koraka, temeljena na odgovarajućim simulacijskim odzivima, dala je vrlo dobre rezultate za sve parametre standardnog matematičkog modela sinkronog hidrogeneratorskog sustava. Eksperimentalna su istraživanja provedena pomoću mjernog sustava koji je instaliran na generatoru snage 26 MVA u HE Peruća na rijeci Cetini. Prikazani su eksperimentalni rezultati za sinkronu reaktanciju u uzdužnoj i poprečnoj osi stroja. U radu je definiran i postupak za identifikaciju parametara nadomjesne mreže pomoću istog mjernog sustava. Točnost estimacije parametara nadomjesne mreže provjerena je mjerenjem na laboratorijskom modelu, a prikazani su i rezultati koji su dobiveni mjerenjem u stvarnom pogonu HE Peruća.

Cljučne riječi: estimacija, identifikacija parametara, nadomjesna mreža, sinkroni generator

1. UVOD

Posljednjih godina u literaturi je primjetan porast interesa za identifikaciju parametara sinkronog generatora u pogonu (on-line) [1-6]. Razlog tomu prije svega leži u činjenici da pri određivanju parametara nije potrebno prekidati pogon, te da se dobivaju parametri koji odgovaraju stvarnom pogonu, tj. nazivnim vrijednostima magnetskog toka, brzine vrtnje i opterećenja. Pod pojmom on-line identifikacije parametara sinkronog generatora podrazumijeva se određivanje parametara odgovarajućeg matematičkog modela stroja na temelju podataka snimljenih u pogonu tijekom određene prijelazne pojave. Pritom prijelazna pojava u načelu može biti slučajna ili namjerno izazvana kao planiran pokus. Pokusi koji se prakticiraju mogu biti u području režima velikih pomaka, kao što su sinkronizacija i isključenje voda, ili u području režima malih pomaka kao što je promjena uzbudnog napona u malim granicama. Prednost se daje pokusima u režimima malih pomaka, izazvanih odgovarajućom promjenom uzbudnog napona, jer ne remete normalan rad generatora i mogu se ponavljati u različitim radnim točkama. Identifikacijske se metode uglavnom razlikuju prema odabranim estimacijskim modelima i primijenjenim estimacijskim postupcima.

U metodi opisanoj u [1] koristi se standardni matematički model generatora i poseban estimacijski postupak s Kalmanovim filtrom. Identifikacijski je postupak podijeljen u dva koraka, a testiranje je provedeno na laboratorijskom modelu. U [2] je prikazan identifikacijski postupak koji se temelji na lineariziranom matematičkom modelu generatora, a u estimacijskom se procesu koristi nelinearna metoda najmanjih kvadrata. Estimiraju se svi parametri matematičkog modela, a metoda je aplicirana na nekoliko generatora velike snage u stvarnom pogonu. U teorijskom radu [3] autori se kritički osvrću na metodu iz [2], ukazujući na mogućnost krajnje nerealnih rezultata kada se nastoji estimirati sve parametre matematičkog modela. Predlaže se postupak pomoću kojega se mogu selektirati parametri na koje je odziv sustava slabo osjetljiv, kako bi se smanjio red estimacijskog modela i tako poboljšala efikasnost estimacijskog procesa. Prema metodologiji koja je opisana u [4] za estimiranje parametara velikih generatora predlaže se identifikacijski postupak u dva koraka. U prvom koraku estimiraju se parametri armaturnog namota a u drugom parametri uzbudnog i prigušnog namota u uzdužnoj osi stroja. Postupak je provjeravan na temelju umjetnih podataka dobivenih simulacijom, pri čemu je analiziran utjecaj šuma na estimacijski proces. Metoda prikazana u [5] odnosi

se na određivanje parametara reduciranog matematičkog modela generatora (trećeg reda) kod kojega se zanemaruje dinamika armaturnog i prigušnog namota. Snimaju se odzivi napona i snage na stezaljkama generatora na izmjenični signal, biranog frekvencijskog spektra, koji se dodaje uzbuđnom naponu u odabranoj radnoj točki generatora. Mjerenje kuta opterećenja zahtijeva se samo u odabranoj radnoj točki generatora. Metoda je testirana u laboratorijskim uvjetima uz dobro slaganje eksperimentalnih i simulacijskih odziva, premda je podatak koji je dobiven za tranzijentnu reaktanciju generatora potpuno nerealan. U [6] je prikazan postupak za određivanje sinkronih reaktancija u uzdužnoj i poprečnoj osi generatora koji se temelji na mjerenjima u stacionarnoj radnoj točki i poznavanju karakteristika praznog hoda i kratkog spoja generatora. Postupak je testiran mjerenjima na generatoru u HE Peruća. U radu se problematizira mogućnost određivanja sinkronih reaktancija generatora estimacijskim postupcima poradi utjecaja zasićenja u željezu.

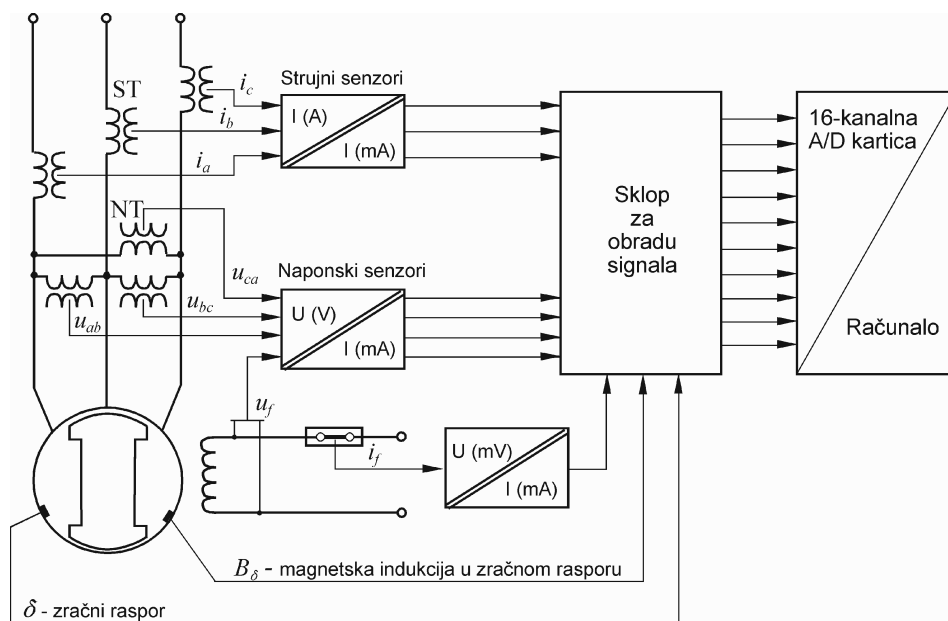
U ovom je radu prikazan cjelovit postupak za on-line identifikaciju parametara generatora koji se temelji na fizikalno dopustivim pojednostavljenjima estimacijskih modela. Na taj način identifikacijski je postupak podijeljen u tri koraka: u prvom se određuju parametri armaturnog namota (uključujući i rasipnu reaktanciju), u drugom parametri uzbuđnog namota, a u trećem parametri prigušnog namota. Svaki identifikacijski korak najprije je provjeren teorijski uz primjenu odgovarajućeg si-

mulacijskog modela. Postupak se temelji na mjerenjima koja su dostupna u okviru suvremenog sustava monitoringa hidroagregata. Naime, u takvim se sustavima u pravilu nadziru sve veličine koje su mjerodavne za ponašanje generatora u stacionarnim i dinamičkim režimima rada, a to su: naponi i struje armature, napon i struja uzbuđe, polje u zračnom rasporu i kut opterećenja koji se određuje pomoću signala iz senzora zračnog raspora. Drugim riječima, takav sustav monitoringa hidroagregata sadrži sva mjerenja koja su neophodna za identifikaciju parametara generatora u pogonu [6].

U radu su prikazani eksperimentalni rezultati koji se odnose na prvi korak identifikacijskog postupka, tj. na identifikaciju sinkrone reaktancije u uzdužnoj i poprečnoj osi generatora, dobiveni na temelju mjerenja u okviru sustava monitoringa hidroagregata u HE Peruća. Prikazan je i postupak za identifikaciju parametara nadomjesne mreže, koji se također temelji na mjerenjima u okviru sustava monitoringa. Potonji je postupak provjeren mjerenjima na laboratorijskom modelu i u stvarnom pogonu HE Peruća.

2. STRUKTURA MJERNOG SUSTAVA

Na slici 1 prikazana je blokovska shema mjernog sustava koji je dio sustava za trajni dijagnostički nadzor hidrogeneratora u HE Peruća. Sustav je zamišljen kao sredstvo za nadzor tranzijenata te za eksperimentalna istraživanja postupaka za iden-



Sl. 1. Struktura mjernog sustava za identifikaciju parametara generatora

renja rasipne reaktancije, na temelju signala armaturnog napona i struje te signala iz senzora magnetske indukcije u zračnom rasporu. Naime, pad napona na rasipnoj reaktanciji armaturnog namota može se odrediti ako su poznati napon, struja i fazni pomak između napona i elektromotorne sile generatora. To se jasno vidi iz fazorskog dijagrama armaturnog namota koji je, uz zanemarivanje pada napona na radnom otporu, prikazan na slici 2. Na temelju te slike, primjenom sinusova poučka na trokut oab, za rasipnu se reaktanciju dobiva sljedeći izraz:

$$X_{os} = \frac{U_s \sin \beta}{I_s \cos(\varphi_s + \beta)}. \quad (5)$$

Umjesto struje i faznog pomaka φ_s u gornju se relaciju mogu uvesti radna i jalova snaga generatora. U tom slučaju izraz za rasipnu reaktanciju u sustavu jediničnih vrijednosti glasi:

$$X_{os} = \frac{U_s^2 \operatorname{tg} \beta}{P - Q \operatorname{tg} \beta}. \quad (6)$$

Dakle, problem se svodi na određivanje faznog pomaka između napona i elektromotorne sile u odabranoj radnoj točki (β). U tu svrhu poželjno je izvršiti snimanje pri nazivnoj struji generatora u kapacitivnom području pogonske karte generatora, kako bi taj fazni pomak bio što veći. Kut β može se odrediti mjerenjem faznog pomaka između osnovnih harmonika signala odabranog (referentnog) armaturnog napona i signala iz senzora magnetske indukcije, u praznom hodu i pod opterećenjem generatora. Pritom mora biti ispunjen uvjet da je fazni pomak između elektromotorne sile generatora i signala iz senzora magnetske indukcije (α_0) neovisan o radnoj točki generatora.

Kut α_0 određen je položajem senzora magnetske indukcije u zračnom rasporu koji je proizvoljan. Primjerice, ako bi se Hallova sonda, kao senzor magnetske indukcije, postavila u os referentne faze, dobili bismo $\alpha_0 = 90^\circ$. Kut α_0 mjeri se u praznom hodu kao fazni pomak između osnovnih harmonika signala referentnog armaturnog napona i signala iz senzora magnetske indukcije. Nakon što se izmjeri kut između ta dva signala i pod opterećenjem (α_1) može se odrediti traženi fazni pomak: $\beta = \alpha_1 - \alpha_0$.

3.2.2. Sinkrona reaktancija u d - i q -osi

U postupku određivanja sinkronih reaktancija generatora, pored veličina koje su definirane relacijama (3) i (4), potrebno je još mjeriti i uzbuđnu struju. Teorijski su moguća dva postupka: (1) di-

rektni koji zahtijeva poznavanje faktora redukcije uzbuđne struje i (2) estimacijski kod kojega se faktor redukcije estimira zajedno s reaktancijama. Ovdje se opisuje samo prvi postupak, koji se temelji na mjerenjima u stacionarnoj radnoj točki i na poznavanju karakteristika praznog hoda i kratkog spoja generatora. Pokušaj da se drugi (estimacijski) postupak primjeni u uvjetima stvarnog pogona HE Peruća nije dao upotrebljive rezultate [8]. Uzrok tomu, kao što je opisano u [8], jest ovisnost reaktancija o radnoj točki, tj. o zasićenju u željezu, te slaba parametarska osjetljivost odziva. S druge strane, valja napomenuti da su prema [1] estimacijskim postupkom dobiveni dobri rezultati u laboratorijskim uvjetima na generatoru snage 5 kVA.

U naponskim jednadžbama za stacionarna stanja sinkronog generatora može se zanemariti utjecaj pada napona na otporu armaturnog namota pa, nakon uvođenja stvarne (mjerene) uzbuđne struje (I_f^*) umjesto reducirane (I_f), te jednadžbe glase:

$$u_d = X_q I_q \quad (7)$$

$$U_q = -X_d I_d + g X_{md} I_f^*. \quad (8)$$

gdje je g faktor redukcije uzbuđne struje, $I_f = g I_f^*$. Nakon što se u (8) uvrsti $X_{md} = X_d - X_{os}$, za sinkrone reaktancije generatora možemo napisati:

$$X_d = \frac{U_q + I_f^* X_{os}}{g I_f^* - I_d} \quad (9)$$

$$X_q = \frac{U_d}{I_q}. \quad (10)$$

Uz pretpostavku da raspolažemo rezultatima mjerenja u odabranoj radnoj točki, u izrazu (9) jedino je nepoznat faktor redukcije (g). Prema [11], kada je poznata rasipna reaktancija armaturnog namota, taj se faktor može odrediti na temelju standardnih karakteristika praznog hoda i kratkog spoja generatora: $E_s(I_f^*)$ i $I_{sk}(I_f^*)$, (v. sliku 5).

Uz zanemarenje pada napona na radnom otporu, u trajnom kratkom spoju hidrogenatora vrijedi naponska jednadžba:

$$X_{os} I_{sk} + X_{md} I_{sk} = X_{md} g I_{fk}^* \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (11)$$

U kratkom se spoju elektromotorna sila generatora (E_{sk}) troši na savladavanje pada napona na rasipnoj reaktanciji armaturnog namota. Može se, dakle, postaviti sljedeća relacija:

$$E_{sk} = X_{md} g I_{f\sigma}^* \frac{1}{\sqrt{2}} = X_{os} I_{sk} \quad (12)$$

gdje $I_{f\sigma}^*$ predstavlja uzбудnu struju kojoj prema karakteristici praznog hoda (slika 5a) odgovara elektromotorna sila E_{sk} . Kombiniranjem jednažbi (11) i (12) za faktor redukcije dobiva se:

$$g = \frac{\sqrt{2}I_{sk}}{I_{fk}^* - I_{f\sigma}^*}. \quad (13)$$

Dakle, za izračun faktora redukcije pomoću (13) potrebno je, za odabranu vrijednost struje I_{sk} , najprije odrediti struju I_{fk}^* iz karakteristike kratkog spoja a potom struju $I_{f\sigma}^*$ iz karakteristike praznog hoda.

3.3. Parametri uzbudnog namota

Identifikacija parametara uzbudnog namota (otpora i rasipne reaktancije) provodi se, nakon što su poznati parametri armaturnog namota, na temelju vremenskog odziva struje uzbuđene i napona armature u d-osi, snimljenih u režimu malih pomaka pri zadanoj linearnoj promjeni uzbudnog napona. U tom se režimu u naponskim jednažbama mogu zanemariti vremenske derivacije ulančenih tokova i padovi napona na radnom otporu armaturnog namota, a može se pretpostaviti da su struje u prigušnom namotu jednake nuli. Osim toga, pretpostavlja se konstantna brzina vrtnje ($\omega = \omega_s$) pa za uzbudni strujni krug vrijedi sljedeći estimacijski model [10]:

$$u_f = R_f \hat{i}_f + \frac{d\psi_f}{dt} \quad (14)$$

$$\hat{i}_f = \frac{1}{\hat{L}_{of} + k_d L_{os}} \left(\psi_f - \frac{k_d u_q}{\omega_s} \right)$$

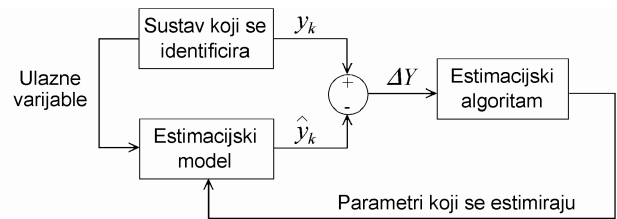
gdje je

$$k_d = \frac{L_{md}}{L_d}$$

Otpor uzbudnog namota određuje se na temelju mjerenja u početnoj stacionarnoj točki:

$$R_f = \frac{u_{f0}}{i_{f0}}$$

pa je rasipni induktivitet uzbudnog namota (\hat{L}_{of}) jedini nepoznat parametar u sustavu (14). Za potrebe estimacijskog postupka treba koristiti lineariziranu verziju toga sustava jer je nepoznat početni uvjet $\psi_f(0)$. Pritom u estimacijskom postupku prirasti napona Δu_f i Δu_q predstavljaju ulazne varijable, dok je prirast uzbudne struje $\Delta \hat{i}_f$ izlazna estimacijska varijabla, a $\Delta \psi_f$ predstavlja internu varijablu s nulnim početnim uvjetom.



Sl. 3. Blokovski dijagram estimacijskog postupka

Na slici 3 prikazan je identifikacijski postupak u formi općenitog blokovskog dijagrama. Estimacijski algoritam temelji se na Levenberg-Marquardtovoj metodi najmanjih kvadrata, [13, 16], a funkcija cilja koja se minimizira u promatranom slučaju glasi:

$$\Delta Y(\hat{L}_{of}) = \sum_{k=1}^N (\Delta i_f - \Delta \hat{i}_f)^2. \quad (15)$$

Provedena je teorijska provjera postupka na temelju simulacijskih odziva dobivenih pomoću standardnog matematičkog modela sinkronog stroja s istaknutim polovima, pri čemu je dobivena zanemariva estimacijska pogreška za traženi rasipni induktivitet uzbudnog namota.

3.4. Parametri prigušnog namota

Parametri prigušnog namota određuju se u posljednjem (trećem) identifikacijskom koraku, kada su već poznati parametri armaturnog i uzbudnog namota. Budući da su parametri prigušnog namota povezani sa subtranzijentnim stanjem generatora, nisu dopustiva nikakva zanemarenja osim pretpostavke da je konstantna brzina ($\omega = \omega_s$). Identifikacija se provodi na temelju vremenskih odziva pri skokovitoj promjeni napona uzbuđene (od oko 5 %), pri čemu se snimaju sve veličine koje su obuhvaćene mjernim sustavom na slici 1, osim magnetske indukcije u zračnom rasporu. Nakon što se odredi kut opterećenja, pomoću relacija (1)–(4) računaju se naponi i struje armaturnog namota u d- i q-osi. Dakle, za estimacijski postupak na raspolaganju su vremenski odzivi sljedećih veličina generatora: u_d , u_q , i_d , i_q , u_f i i_f , što omogućava provođenje estimacije odvojeno za uzdužnu i poprečnu os stroja. Naime, zahvaljujući činjenici da su pored odziva napona poznati i odzivi struja armaturnog i uzbudnog namota, moguće je numeričkom integracijom naponskih jednažbi (16) najprije odrediti odzive ulančenih tokova tih namota.

$$u_d = R_s i_d - \omega_s \psi_q + \frac{d\psi_d}{dt}$$

$$u_q = R_s i_q + \omega_s \psi_d + \frac{d\psi_q}{dt} \quad (16)$$

$$u_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt}.$$

Kada su poznati ulančeni tokovi ψ_d , ψ_q i ψ_f , mogu se definirati posebni estimacijski modeli za uzdužnu i poprečnu os stroja. U uzdužnoj osi taj se model sastoji od jedne diferencijalne naponske jednačbe i dviju algebarskih jednačbi koje prema [10] glase:

$$0 = \frac{\hat{R}_D}{L_D''} \left(\psi_D - \frac{k_d L_{of}}{L_{of} + k_d L_{os}} \psi_d - \frac{k_d L_{os}}{L_{os} + k_d L_{os}} \psi_D \right) + \frac{d\psi_D}{dt}$$

$$\hat{i}_d = \frac{1}{L_d''} \left(\psi_d - \frac{k_f L_{oD}}{\hat{L}_{oD} + k_f L_{of}} \psi_f - \frac{k_f L_{of}}{\hat{L}_{oD} + k_f L_{of}} \psi_D \right)$$

$$\hat{i}_f = \frac{1}{L_f''} \left(\psi_f - \frac{k_d L_{oD}}{\hat{L}_{oD} + k_d L_{os}} \psi_d - \frac{k_d L_{os}}{\hat{L}_{oD} + k_d L_{os}} \psi_D \right) \quad (17)$$

gdje je:

$$L_d'' = L_{os} + \frac{1}{\frac{1}{L_{md}} + \frac{1}{L_{of}} + \frac{1}{\hat{L}_{oD}}}$$

$$L_f'' = L_{of} + \frac{1}{\frac{1}{L_{md}} + \frac{1}{L_{os}} + \frac{1}{\hat{L}_{oD}}} \quad (18)$$

$$L_D'' = \hat{L}_{oD} + \frac{1}{\frac{1}{L_{md}} + \frac{1}{L_{os}} + \frac{1}{L_{of}}}.$$

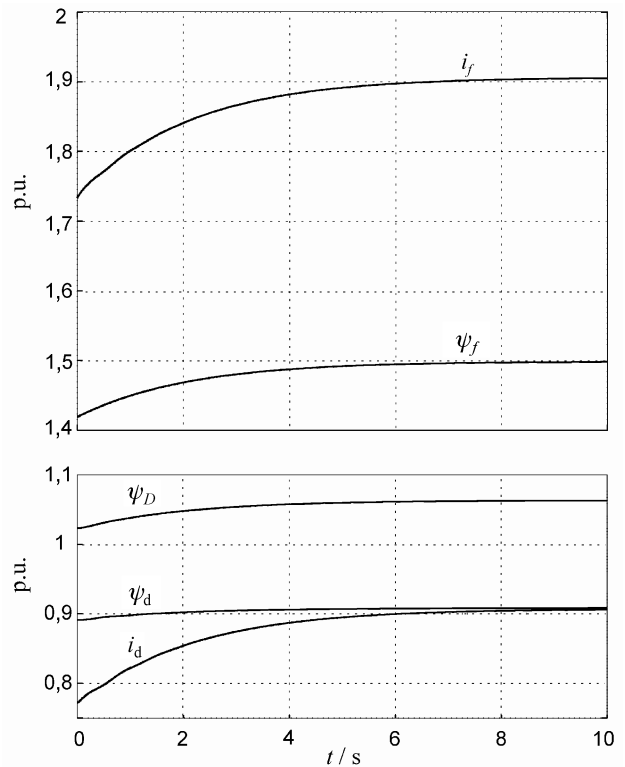
Ako se imaju na umu relacije za faktore ulančenja:

$$k_d = \frac{L_{md}}{L_{os} + L_{md}},$$

$$k_f = \frac{L_{md}}{L_{of} + L_{md}},$$

očito je da se u sustavu (17) kao parametri pojavljuju glavni i rasipni induktiviteti namota u uzdužnoj osi stroja i otpor prigušnog namota u toj osi, a estimiraju se parametri prigušnog namota \hat{R}_D i \hat{L}_{oD} . Ulančeni tokovi ψ_d i ψ_f , koji se određuju iz mjerenja integracijom sustava (16), predstavljaju ulazne varijable estimacijskog modela (17), dok ulančeni tok ψ_D predstavlja internu varijablu. Izlazne varijable sustava (17), koje se u estimacijskom postupku (v. sliku 3) uspoređuju s mjerenim vrijednostima, jesu struje i_d i i_f .

Za prigušni namot u poprečnoj osi estimacijski model glasi:



Sl. 4. Odzivi varijabli u uzdužnoj osi generatora pri skokovitom povećanju uzbuđnog napona za 10% (simulacija s podacima generatora u HE Peruća)

$$0 = \frac{\hat{R}_Q}{\hat{L}_{oQ} + k_q L_{os}} (\psi_Q - k_q \psi_q) + \frac{d\psi_Q}{dt} \quad (19)$$

$$\hat{i}_q = \frac{\hat{R}_Q}{L_{os} + k_Q \hat{L}_{oQ}} (\psi_q - k_Q \psi_Q)$$

gdje je:

$$k_q = \frac{L_{mq}}{L_q},$$

$$k_Q = \frac{L_{mq}}{\hat{L}_{oQ} + L_{mq}}.$$

U sustavu (19) statorski ulančeni tok predstavlja ulaznu varijablu, a statorska je struja izlazna estimacijska varijabla. Interna je varijabla ulančeni tok prigušnog namota, a estimiraju se parametri \hat{R}_Q i \hat{L}_{oQ} .

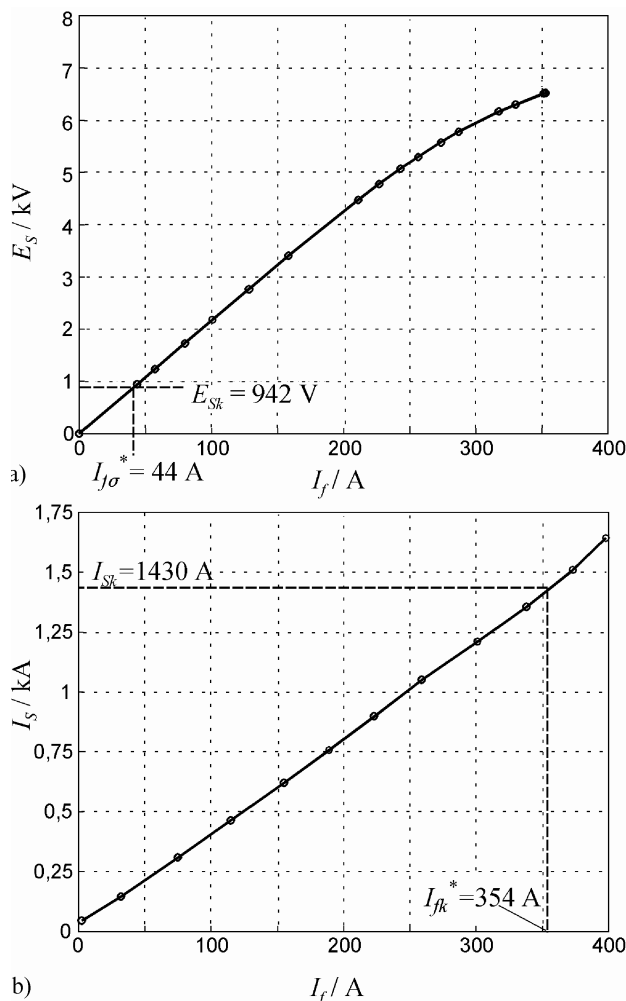
Na slici 4 prikazani su dinamički odzivi za ulazne i izlazne varijable u sustavu (17), dobiveni simulacijom (pomoću standardnog matematičkog modela s podacima generatora u HE Peruća) prijelazne pojave koja nastaje pri skokovitom povećanju uz-

budnog napona za 10 %. Na temelju tih odziva izvršena je teorijska provjera opisanog identifikacijskog postupka. Pokazano je da estimacijski postupak stabilno funkcionira i daje točne rezultate čak i u slučaju da početne vrijednosti parametara (koji se procjenjuju) iznose svega 20 % vrijednosti stvarnih parametara. Slično se dobiva i za parametre prigušnog namota u poprečnoj osi.

4. REZULTATI MJERENJA U HE PERUĆA

4.1. Sinkrona reaktancija u d- i q-osi

Na slici 5 prikazane su karakteristike praznog hoda i kratkog spoja snimljene na ispitivanom generatoru u HE Peruća, radi određivanja faktora redukcije uzbudne struje prema izrazu (13). Odabrana je nazivna točka na karakteristici kratkog spoja



Sl. 5. Karakteristika praznog hoda (a) i kratkog spoja (b) generatora 1 (26 MVA) u HE Peruća, određivanje struje $I_{f\sigma}^*$

($I_{sk} = 1430$ A, $I_{fk}^* = 354$ A). Radi usporedbe rezultata, faktor redukcije određen je za dvije vrijednosti rasipne reaktancije armaturnog namota: $X_{os1} = 0,66 \Omega$, $X_{os2} = 0,75 \Omega$, koje su dobivene različitim mjernim postupcima, a međusobno se razlikuju za 12 % [8]. Na karakteristici praznog hoda na slici 5a) ucrtana je točka koja, sukladno relaciji (12), odgovara nižoj vrijednosti rasipne reaktancije za koju se dobiva:

$$E_{sk} = X_{os1} I_{sk} = 0,66 \cdot 1430 = 942 \text{ V}$$

$$g_1 = \frac{\sqrt{2} I_{sk}}{I_{fk}^* - I_{f\sigma}^*} = \frac{\sqrt{2} \cdot 1430}{354 - 44} = 6,52. \quad (20)$$

Za $X_{os2} = 0,75 \Omega$ dobiva se faktor redukcije $g_2 = 6,63$ koji se od g_1 razlikuje za 1,6 %. Poradi toga pogreška u reaktanciji X_d prema (9) iznosila bi tek oko 0,5 %, što pokazuje da se moguća pogreška u vrijednosti X_{os} neće bitno odraziti na točnost određivanja reaktancije X_d .

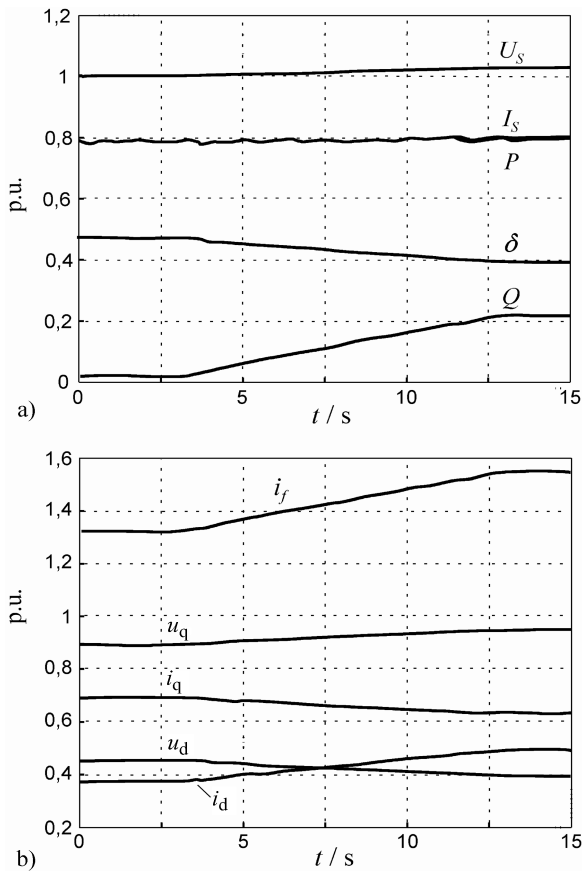
Nakon što je poznat faktor redukcije uzbudne struje, iz rezultata mjerenja napona i struja, armaturnog i uzbudnog namota, te kuta opterećenja, mogu se odrediti sinkrone reaktancije prema (9) i (10) u bilo kojoj radnoj točki generatora. Postupak se može primijeniti i na radne točke koje se dobivaju na temelju snimljenih kvazistacionarnih odziva varijabli generatora pri sporoj promjeni uzbudnog napona. Na slici 6 prikazani su odzivi svih veličina generatora, u jediničnim vrijednostima, koje su definirane u relacijama (1)–(4), te kut opterećenja i uzbudna struja preračunata na armaturni namot ($g = 6,52$).

Svakoju apscisi na krivuljama kvazistacionarnog odziva, koje su prikazane na slici 6, može se pridružiti jedno stacionarno stanje generatora. Drugim riječima, za svaku točku kvazistacionarnog odziva na slici 6b) može se, primjenom relacija (9) i (10), odrediti uzdužna i poprečna sinkrona reaktancija.

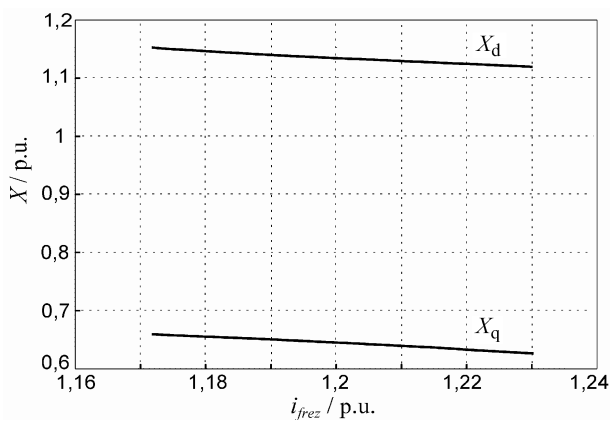
Prema [1], sinkrone se reaktancije mogu definirati u analitičkom obliku kao jednoznačne funkcije rezultirajuće uzbudne struje koja se, u stacionarnom odnosno kvazistacionarnom stanju, izračunava pomoću sljedeće relacije:

$$i_{frez} = \sqrt{i_q^2 + (K_{d/q} i_f - i_d)^2} \quad (21)$$

gdje je $K_{d/q}$ korekcijski faktor (približno jednak jedinici) koji se određuje posebno za uzdužnu a posebno za poprečnu os na temelju podešavanja analitičke funkcije eksperimentalnim rezultatima prema kriteriju najmanjih kvadrata. Na taj način, na temelju rezultata mjerenja u širokom području rezul-

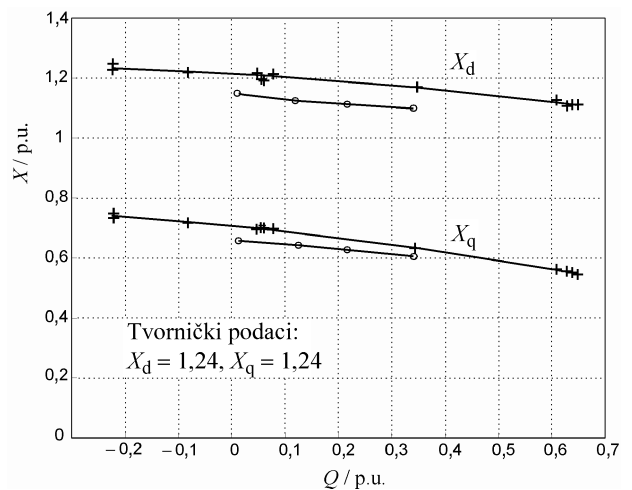


Sl. 6. Kvazistacionarni odzivi veličina generatora u HE Peruća pri sporom povećanju uzbude: a) armaturne veličine, b) naponi i struje u d- i q-osi



Sl. 7. Sinkrone reaktancije u ovisnosti o rezultirajućoj uzbudi, dobivene iz odziva na slici 6

tirajuće uzbude, mogle bi se za konkretni generator definirati krivulje $X_d(i_{frez})$ i $X_q(i_{frez})$ te na taj način uvesti zasićenje u analizu stacionarnih i dinamičkih režima rada. Na slici 7 prikazane su reaktancije X_d i X_q u ovisnosti o rezultirajućoj uzbudi, koja je određena pomoću (21) uz $K_{d/q} = 1$, u području koje odgovara provedenom pokusu.



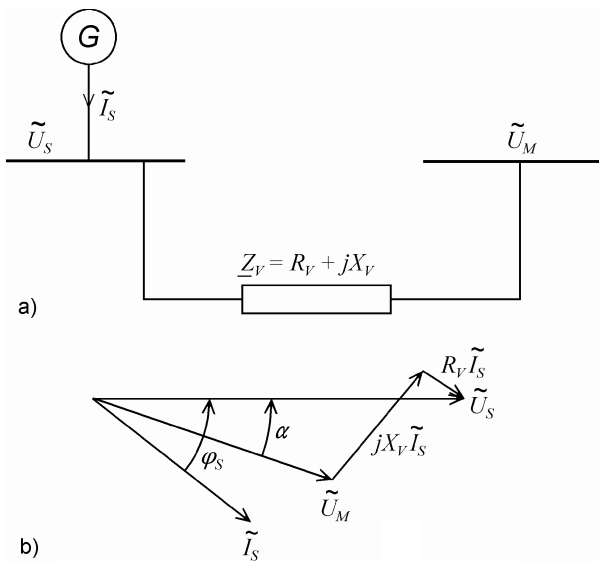
Sl. 8. Rezultati on-line identifikacije reaktancija X_d i X_q u različitim radnim točkama generatora u HE Peruća:

++++ - $P = 10\text{ MW}$
 oooo - $P = 20\text{ MW}$

S druge strane, za neke primjene kao što je, primjerice, određivanje pogonske karte generatora pogodno je definirati karakteristike koje pokazuju ovisnost sinkronih reaktancija o jalovoj i radnoj snazi generatora. Na slici 8 prikazane su karakteristike $X_d(Q)$ i $X_q(Q)$ za dvije vrijednosti radne snage ispitivanog generatora u HE Peruća. Valja napomenuti da te radne točke generatora, za koje su prikazani rezultati na slici 8, nisu birane sustavno, radi određivanja razmatranih karakteristika, nego su snimke nastale pri pokusima koji su rađeni u neke druge svrhe. Sustavno snimanje tih karakteristika nije moglo biti obavljeno zbog tehničkih razloga, tj. zbog početka radova na demontaži agregata radi njegove zamjene novim.

4.2. Parametri nadomjesne mreže

U analizi elektroenergetskih sustava elementarni model predstavlja generator koji je preko prijenosnog voda priključen na krutu mrežu (slika 9). Pritom se pretpostavlja da su reaktancija voda (X_v) i napon krute mreže (U_M) poznate veličine. U stvarnom pogonu reaktancija X_v i napon U_M predstavljaju parametre nadomjesne mreže koje treba odrediti, proračunom ili mjerenjem. Opisani mjerni sustav, koji je sastavni dio monitoringa hidrogeneratora, omogućava on-line identifikaciju tih veličina, tj. njihovo određivanje u pogonu, a da se pritom ničim ne remeti normalan rad elektroenergetskog sustava. Naime, u tu svrhu koriste se rezultati mjerenja napona i struja u više stacionarnih točaka koje se mogu očitati iz odziva varijabli generatora pri spojnoj promjeni uzbude u relativno uskim granicama.



Sl. 9. Sustav generator-kruta mreža: a) jednopolna shema, b) fazorski dijagram

Odnosi među veličinama sustava generator-kruta mreža u stacionarnom stanju definirani su vektorskim dijagramom prikazanim na slici 9b). U realnoj mreži radni je otpor zanemariv, tako da jednadžba za fazni kut između napona i struje generatora, koja predstavlja estimacijski model nadomjesne mreže, glasi:

$$\sin \hat{\varphi}_s = \frac{U_s^2 + (I_s \hat{X}_v)^2 - \hat{U}_M^2}{2U_s I_s \hat{X}_v}. \quad (22)$$

U toj relaciji efektivne vrijednosti armaturnog napona i struje (U_s, I_s) predstavljaju ulazne (mjerne) varijable, a fazni kut $\hat{\varphi}_s$ estimacijsku izlaznu varijablu. Iz snimljenog kvazistacionarnog odziva može se izdvojiti dovoljan broj od N mjernih uzoraka, te uz primjenu Levenberg-Marquardt metode najmanjih kvadrata, [14], estimirati parametre mreže \hat{U}_M i \hat{X}_v . Funkcija cilja, koja se minimizira u estimacijskom postupku prema slici 3, u promatranom slučaju glasi:

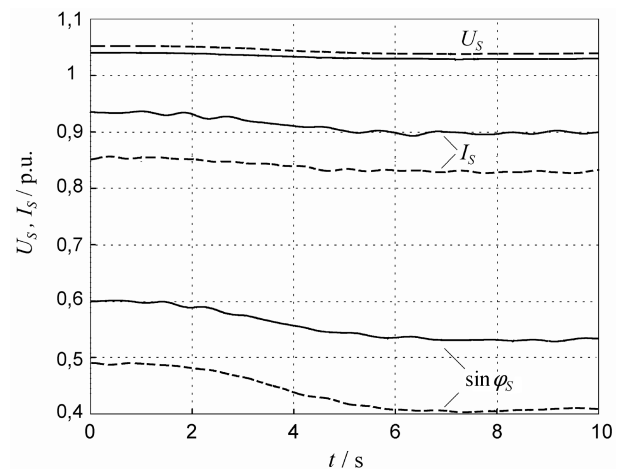
$$\Delta Y(U_M, X_v) = \sum_{k=1}^N (\sin \varphi_{sk} - \sin \hat{\varphi}_{sk})^2 \quad (23)$$

gdje je φ_{sk} mjerena, a $\hat{\varphi}_{sk}$ estimirana vrijednost izlazne varijable.

Efektivne vrijednosti napona i struje (U_s, I_s) i fazni pomak φ_s , za bilo koji mjerni uzorak, predstavljaju usrednjene vrijednosti faznih veličina. Napon i struja izračunavaju se pomoću (1), a za fazni pomak vrijedi sljedeća relacija:

$$\sin \varphi_s = \frac{Q}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (24)$$

pri čemu se radna i jalova snaga, koje se pojavljuju u (24), izračunavaju pomoću (2). Provjera opisnog identifikacijskog postupka u laboratorijskim uvjetima dala je vrlo dobre rezultate [7, 16].



Sl. 10. Odzivi veličina armaturnog namota generatora 1 u HE Peruća pri smanjenju uzbudne struje: — normalno stanje mreže, ---- dalekovod Peruća-Sinj izvan pogona

Na slici 10 prikazani su odzivi veličina U_s, I_s i φ_s generatora 1 u HE Peruća pri smanjenju uzbudne struje za dva različita stanja mreže. Ti su odzivi snimljeni pomoću mjernog sustava prikazanog na slici 1. U stacionarnoj radnoj točki, prije prijelazne pojave koja je izazvana promjenom uzbudne struje, zabilježene su sljedeće vrijednosti snaga i napona na generatorskim stezaljkama:

- slučaj a):
 $P = 20,3 \text{ MW}, Q = 15,2 \text{ MVA}, U_s = 10,9 \text{ kV}$,
- slučaj b):
 $P = 20,3 \text{ MW}, Q = 11,4 \text{ MVA}, U_s = 11,1 \text{ kV}$.

Na temelju snimljenih odziva, primjenom opisanog estimacijskog postupka temeljenog na relacijama (22) i (23), dobiveni su parametri ekvivalentne mreže koji su prikazani u tablici 1. U istoj

Tablica 1. Rezultati identifikacije parametara ekvivalentne mreže na stezaljkama generatora 1 u HE Peruća

	Slučaj a)		Slučaj b)	
	Estimacija	Proračun	Estimacija	Proračun
X_v	0,133	0,142	0,169	0,188
U_M	0,972	–	0,994	–

je tablici prikazana i proračunska vrijednost reaktancije ekvivalentnog prijenosnog voda koja je izračunata na temelju podataka preuzetih iz [15]. Da bi se provjerio utjecaj dinamike odziva na točnost estimacije, u slučaju a), tj. pri normalnom pogonskom stanju mreže, ponavljani su pokusi s različitim trajanjem prijelazne pojave. Dobiveno je rasipanje rezultata za reaktanciju u granicama $\pm 1,5\%$.

Valja napomenuti da se rezultati za X_v prikazani u tablici 1 odnose na stezaljke generatora. Drugim riječima u estimiranu reaktanciju nadomjesnog voda uključena je i reaktancija blok-transformatora koja je po iznosu dominantna, te u promatranom slučaju iznosi 11 %. Poradi toga, ako se opisanim postupkom želi odrediti ekvivalentna reaktancija vanjske mreže, tj. na VN strani blok-transformatora, važno je raspolagati sa što je moguće točnijom vrijednošću reaktancije blok-transformatora. Ta bi se reaktancija mogla mjeriti pomoću mjernog sustava na slici 1 dopunjenog mjerenjem napona na VN strani blok-transformatora i uz primjenu algoritma za određivanje faznog pomaka među sinusnim veličinama [7, 16].

5. ZAKLJUČAK

U radu je istraživana primjena mjernog sustava, koji je sastavni dio monitoringa hidroagregata, za on-line identifikaciju parametara generatora i nadomjesne mreže. Definirani su postupci identifikacije koji se temelje na snimanju vremenskih odziva nadziranih veličina u režimu malih pomaka, koji ne remete normalno funkcioniranje elektroenergetskog sustava, i na primjeni odgovarajućih estimacijskih modela i algoritama.

Postupak on-line identifikacije parametara generatora, koji je razrađen i teorijski potvrđen u ovom radu, temelji se na ideji maksimalno mogućeg pojednostavljanja estimacijskih modela. U tu svrhu definirana je metodologija u kojoj se parametri pojedinih namota identificiraju postupno, u tri koraka. Pritom se, na teorijskoj razini, dobivaju vrlo točni rezultati uz visoku pouzdanost estimacijskog procesa.

Prva eksperimentalna istraživanja koja su provedena u HE Peruća, dala su zadovoljavajuće rezultate za parametre armaturnog namota, tj. sinkronu reaktanciju u uzdužnoj i poprečnoj osi generatora. Međutim, zbog tehničkih razloga, ta istraživanja nisu mogla biti dovršena prema planiranom programu te ih je, za konačnu potvrdu opisanih identifikacijskih postupaka, potrebno nastaviti.

Postupak za identifikaciju reaktancije i napona nadomjesne mreže provjeravan je mjerenjima na laboratorijskom modelu pri čemu je potvrđena njegova visoka točnost. Testiranjem postupka u stvarnom pogonu HE Peruća, za dva različita pogonska stanja mreže, dobiveni su rezultati koji pokazuju dosta dobro slaganje s odgovarajućim proračunskim veličinama.

Prikazani postupak za identifikaciju sinkronih reaktancija pruža mogućnost da se utvrdi njihova ovisnost o radnoj točki generatora, što je od posebne važnosti za rad generatora u kritičnim režimima naduzbuđenog i poduzbuđenog stanja, tj. u graničnom induktivnom i kapacitivnom području pogonske karte. Kod generatora kod kojih se mjerenja mogu obaviti u okviru postojećeg sustava monitoringa, snimanje takvih karakteristika može biti relativno jeftino i vrlo korisno s osnova povećanja pouzdanosti u kritičnim režimima rada.

LITERATURA

- [1] H. Tsai, A. Keyhani, J. Demecko, R. G. Farmer, **On-Line Synchronous Machine Parameter Estimation from Small Disturbance Operating Data**. IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 10, no. 1, pp. 25–36, March 1995.
- [2] Z. M. Zhao, F. S. Zheng, J. D. Gao, L. Y. Xu, **A Dynamic On-line Parameter Identification and Full-Scale System Experimental Verification for Large Synchronous Machines**. IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 10, no. 3, pp. 392–398, September 1995.
- [3] M. Burth, G. C. Verghese, M. Velez-Reyes, **Subset Selection for Improved Parameter Estimation in On-Line Identification of a Synchronous Generator**. IEEE Trans. on Power Systems, vol. 14, no. 1, pp. 218–225, February 1999.
- [4] H. B. Karayaka, A. Keyhani, B. Agrawal, D. Selin, G. T. Heydt, **Methodology Development for Estimation of Armature Circuit and Field Winding Parameters of Large Utility Generators**. IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 14, no. 4, pp. 901–908, December 1999.
- [5] M. Karrari, O. P. Malik, **Identification of Physical Parameters of a Synchronous Generator From On-line Measurements**. IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 19, no. 2, pp. 407–415, June 1995.
- [6] M. Despalatović, M. Jadrić, B. Terzić, J. Macan, **On-Line Hydrogenerator Power Angle and Synchronous Reactances Determination Based on Air Gap Measurement**. IEEE Power Systems Conference & Exposition, CD ROM, New York, October 2004.
- [7] M. Jadrić, M. Despalatović, B. Terzić, J. Macan, **Monitoring električnih veličina i identifikacija parametara hidrogeneratora**. VI. savjetovanje HK CIGRE, grupa A1-Rotacijski strojevi, str. 23–32, Cavtat, Studeni 2003.

- [8] M. Despalatović, M. Jadrić, B. Terzić, J. Macan, **Određivanje sinkronih reaktancija hidrogeneratora tijekom pogona**. VII. savjetovanje HK CIGRE, grupa A1-Rotacijski strojevi, Cavtat, Studeni 2005.
- [9] A. M. El-Serafi, J. Wu, **A New Method for Determination The Armature Leakage Reactance of Synchronous Machines**. IEEE Trans on Energy Conversion, vol. 6, no. 1, pp. 120–125, March 1991.
- [10] M. Jadrić, B. Frančić, **Dinamika električnih strojeva**. Graphis, Zagreb, 1997.
- [11] K. P. Kovacs, I. Racz, **Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen**. Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest, 1960.
- [12] A. R. Bergen, V. Vittal, **Power System Analysis**. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2000.
- [13] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery, **Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of Scientific Computing**, Cambridge University Press, 1992.
- [14] ..., **IEC Standard, Publication 34-4, Part 4: Methods for Determining Synchronous Machine Quantities from tests**. Geneve, 1985.
- [15] D. Nevečerel, **Proračun kratkog spoja u mreži Hrvatske 2005. i 2010. godine**. Studija Instituta za elektroprivredu i energetiku, Zagreb, 1999.
- [16] M. Jadrić, B. Rajković, B. Terzić, V. Firingler, M. Despalatović, Ž. Gladina, G. Orešković, B. Meško, J. Macan, **Monitoring hidroagregata – stanje i razvoj u Hrvatskoj elektroprivredi Proizvodno područje HE Jug**. Studija, br. str. 248, FESB Split, 2004.

Methodology for Synchronous Hydrogenerator Parameter Identification Based on Monitoring System Measurement. This paper presents an identification methodology to estimate the parameters of the salient-pole synchronous machine from on-line small disturbance responses, using measurements which are available within the hydrogenerator monitoring system. First, the parameter identification procedure, which is divided into three steps, is tested using the synthetic data obtained by the machine standard model simulation. By this testing, very good results for all parameters of the standard mathematical model are obtained. The experimental researches are performed using measurement system installed on the 26 MVA generator in Peruća hydroelectric power plant (HPP) on Cetina river in Croatia. The results for the synchronous reactances in the d- and q-axis, obtained by measurement at stationary operating points, are presented. In addition, an identification procedure to estimate the equivalent line reactance and infinite bus voltage, to which a single machine is connected, is presented. First, this procedure is proved by laboratory test. By proposed procedure, using mentioned measurement system, the equivalent line reactance and the infinite bus voltage in Peruća HPP is determined.

Key words: estimation, parameter identification, infinite bus, synchronous generator

AUTHORS' ADDRESSES

prof. dr. sc. Martin Jadrić
Marin Despalatović, dipl. ing. el.
prof. dr. sc. Božo Terzić
Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje
Sveučilišta u Splitu
Ruđera Boškovića b.b., 21000 Split
prof. dr. sc. Borivoje Rajković
Končar – Institut za elektrotehniku d.d.
Baštijanova b.b., 21000 Zagreb

Primljeno: 2007-03-16