Analiza tačnosti metoda za određivanje zasićenih sinhronih reaktansi i karakteristika turbogeneratorsa

MILOJE M. KOSTIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd

Stručni rad
UDC: 621.313.322.011.23
DOI: 10.5937/tehnika1703392K

Vrednosti zasićenih sinhronih reaktansi turbogeneratorsa po d-osi i po q-osi su različite, $X_{d,sat} > X_{q,sat}$, i onda kada su njihove nezasićene vrednosti jednake, $X_{d,u} = X_{q,u}$. Tačan proračun istih je dosta složen i moguć je samo pomoću metode konačnih elemenata (MKE) sa eksperimentalnom validacijom. U cilju prilagođavanja praktičnim potrebama, najvažniji rezultati se elaboriraju u vidu familije krivih magnetećenja opterećene mašine po d i po q-osi. Time se omogućava tačniji proračun zasićenih sinhronih reaktansi, a na osnovu toga pobudne struje i ugla snage, odnosno tačnija konstrukcija pogonskog dijagrama za režime natpobude i režime potpobude. Navedeni postupak konstruisanja dve familije krivih je složen za praktičnu primenu, pa se koristi jednostavniji postupak. Rezultati proračuna sa navedenim uprošćenjima se analiziraju u radu tako što se izračunata vrednosti snaga poredi sa zadatim (izmerenim) vrednostima. Pokazuje se da su te razlike velike, čak, i u primerima iz poznate literature, pa treba kritički koristiti metode koje su implementirane i u komercijalne računarske programe.

Ključne reči: turbogenerator, pobudna struja, ugao snage, zasićene, sinhrona reaktansa, krive magnetećenja, reaktivna snaga

1. UVOD

U novije vreme je utvrđeno da i kod turbogeneratorsa sa zasićenim magnetnim kolom mogu postojati bitnije razlike u vrednostima zasićenih sinhronih reaktansi po d-osi i q-osi, $X_{d,sat} > X_{q,sat}$, čak i kada su odgovarajuće vrednosti nezasićenih sinhronih reaktansi međusobno jednake, $X_{du} = X_{qu}$ [1-8]. Naime, ako generator nije opterećen aktivnom snagom, prazan hod ($P_G=0$ i $Q_G=0$) ili ogled-opterećenje samo sa reaktivnom snagom ($P_G=0$ i $Q_G=Q_L$), osa zajedničkog (glavnog) fluksa se poklapa sa geometrijskom osom rotora (d-osom). Kada se generator optereti aktivnom snagom raste ugao snage (δ) između ose zajedničkog fluksa i d-ose, i to tim više što je ta snaga veća. Zbog toga se javlja i nesimetrija (razlika) fluksa u levoj i desnoj polovini geometrijskog pola rotora kao i razlika u magnetnim permeabilnostima simetričnih delova tih polovina. Kako je taj uticaj različit po vrednosti i kvalitetu, različito se smanjuju zasićene sinhronne reaktanse po d-osi i q-osi. Preciznije te promene su takve da je $X_{d,sat} > X_{q,sat}$ i onda kada su vrednosti nezasićenih sin-

hronih reaktansi jednake, $X_{du} = X_{qu}$. To dovodi do potrebe:

- da se režim turbogeneratorsa karakteriše pomoću fazorskog dijagrama generatora sa nejednakim reaktansama po d-osi i q-osi, tj. kao kod generatora sa istaknutim polovima, a time i
- da se analiziraju metode za određivanje zasićenih sinhronih reaktansi, $X_{d,sat} > X_{q,sat}$.

To ukazuje na potrebu da se karakteristike turbogeneratorsa većih snaga određuju na osnovu fazorskog dijagrama sa nejednakim zasićenim sinhronim reaktansama $X_{d,sat} > X_{q,sat}$, sl. 3, čije vrednosti treba da bude određene za dati režim.

S obzirom na složenost u određivanju uticaja zasićenja magnetnog kola na vrednosti zasićenih sinhronih reaktansi, korisno je da se detaljnije razmotre i analiziraju metode za određivanje zasićenih sinhronih reaktansi turbogeneratorsa, $X_{d,sat}$ i $X_{q,sat}$, kao i uticaj istih na karakteristike generatora.

2. UTICAJ SINHRONIH REAKTANSI NA KOMPONENTE SNAGE

Na osnovu fazorskog dijagrama izvode se odgovarajući izrazi (zavisnosti) za proračun aktivnih (P) i reaktivnih (Q) snaga generatora [1, 7, 8, 9]. Polazi se od izraza za aktivnu $P = E_d I_d + E_q I_q$ i reaktivnu snagu

Adresa autora: Miloje Kostić, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd, Koste Glavinića 8a, e-mail: mkostic@ieent.org

Rad primljen: 09.01.2017.

Rad prihvaćen: 31.03.2017.

$Q = E_q I_d - E_d I_q$, pa se dolazi do sledećih zavisnosti [10, 11].

$$P = \frac{E_a E_{int}}{X_d} \sin \delta + \frac{E_a^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin(2\delta) \quad (1)$$

$$Q = \frac{E_a E_{int}}{X_d} \cos \delta - \frac{E_a^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right) + \frac{E_a^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \cos(2\delta) \quad (2)$$

gde su

- E_a - napon na priključcima generatora,
- E_{int} - unutrašnja (interna) elektromotorna sila (slika 3) koju bi indukovala pobudna struja vrednosti (I_f) da nema reakcije indukta i da je zasićenje magnetnog kola kao u datom režimu,
- X_d - sinhrona reaktansa generatora po d-osi ($X_d = X_{d,sat}$) u datom (zasićenom) režimu,
- X_q - sinhrona reaktansa generatora po q-osi ($X_q = X_{q,sat}$) u datom (zasićenom) režimu,
- δ - ugao snage (ugao između fazora napona E_a i q-ose).

Kada je $X_d = X_q$, izrazi (1) i (2) se svode na izraze za turbogeneratore sa $X_d = X_q$, tj. ne postoje drugi član u izrazu (1), kao ni treći član u izrazu (2).

Za uopštenije analize proračun elektromagnetne, aktivne (p) i reaktivne (q), snage generatora se sprovode u relativnim jedinicama, tako da izraz za aktivnu snagu sadrži dve komponente, p_1 i p_2 :

$$p_1 = p_1 + p_2 = \frac{e_a e_{int}}{x_d} \sin \delta + \frac{e_a^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin(2\delta) \quad (3)$$

gde

- prvi član (p_1) definiše osnovnu komponentu aktivne snage, a
- drugi član (p_2) definiše reluktantnu komponentu aktivne snage.

3. METODE ZA PRORAČUN ZASIĆENIH SINHRONIH REAKTANSI

3.1. Uvod

Intenzitet zasićenja magnetnog kola je različit u pojedinim delovima generatora, a menja se i u zavisnosti od promene opterećenja generatora pošto se tada menjaju vrednosti elektromotornih sila i magnetnih flukseva (osnovnog fluksa i rasutih flukseva).

Činjenica je da se zbog toga menjaju i vrednosti induktivnosti i odgovarajućih reaktansi, u zavisnosti od vrednosti komponenti struja koje stvaraju polja po d-osi i q-osi.

Odgovarajući model, koji bi uračunao uzajamne uticaje polja iz jedne ose na polja duž druge ose, bi mogao biti dosta složen za praktične proračune. Te

modele, redom, karakterišu sledeće pretpostavke [7, 10]:

- prvi model pretpostavlja da se zasićenje magnetnog kola karakteriše sa jednom krivom magnećenja po d-osi i drugom krivom magnećenja po q-osi, $\Psi_{dm}(I_m)$ i $\Psi_{qm}(I_m)$, ali su obe krive magnećenja date u zavisnosti od iste (rezultantne) magnetopobudne sile i odgovarajuće rezultantne struje magnećenja $I_m = (I_{dm}^2 + I_{qm}^2)^{1/2}$, dok
- drugi model koristi dve familije krivih magnećenja, jednu po d-osi i drugu po q-osi u zavisnosti od komponenti struje magnećenja, redom, po d-osi i po q-osi, tj. familije krivih $\Psi_{dm}(I_{dm})$ i $\Psi_{qm}(I_{qm})$.

3.2. Model sa po jednom krivom magnećenja po d-osi i po q-osi

U skladu sa pretpostavkom da su, po d-osi i q-osi, različiti intenziteti magnetnog zasićenja različite su i zavisnosti magnetnih flukseva $\Psi_{dm}(I_m)$ i $\Psi_{qm}(I_m)$, slika 1 [1].

Slika 1 - Jedinstvene krive magnećenja generatora po d i q-osi, $\Psi_{dm}(I_m)$ i $\Psi_{qm}(I_m)$, u zavisnosti od rezultantne struje magnećenja (I_m)

Zavisnosti $\Psi_{dm}(I_m)$ i $\Psi_{qm}(I_m)$ se daju samo u funkciji od rezultantne struje magnećenja $I_m = (I_{dm}^2 + I_{qm}^2)^{1/2}$, tj:

$$\Psi_{dm}^*(I_m) \neq \Psi_{qm}^*(I_m) \quad (4)$$

$$I_m = \sqrt{I_{dm}^2 + I_{qm}^2} \quad (5)$$

$$I_{dm} = I_f + I_d + I_D \quad (6)$$

$$I_{qm} = I_q + I_Q \quad (7)$$

gde su

$I_f = I_{fd}$ - pobudna struja (rotora),

$I_d = I_{ad}$ - komponenta struje statora po d-osi,

$I_q = I_{qd}$ - komponenta struje statora po q-osi, a

kada se razmatraju struje prigušnog (damper) namotaja postoje i komponente struja I_D i I_Q .

Uočeno je da navedene jedinstvene krive magnećenja generatora po d i q -osi, ponekad, nisu pouzdana informacija za određivanje zasićenih sinhronih reaktansi. To je pokazano pomoću proračuna tih reaktansi po metodi konačnih elemenata (MKE), [1, 6, 7].

3.3. Model sa po jednom familijom krivih magnećenja po d -osi i po q -osi

Navedeni nedostatak proračuna sinhronih reaktansi turbogeneratora, po modelu sa po jednom krivom magnećenja po d -osi i po q -osi, se prevazilazi uvođenjem modela sa dve familije krivih magnećenja, $\Psi_{dm}(I_{dm})$ i $\Psi_{qm}(I_{qm})$, jedne po d -osi i drugu po q -osi, redom, u funkciji od (komponenti) struje magnećenja po d -osi i struje magnećenja po q -osi, slika 2 [1]. Vrednosti struja magnećenja, I_{dm} i I_{qm} , se određuje pomoću izraza (5) i (6), ili ako se zanemare uticaji komponenti struje prigušnog (damper) namotaja po d -osi (I_D) i q -osi (I_Q), onda se one sračunavaju po izrazima

$$I_{dm} = I_f + I_d \quad (7)$$

$$I_{qm} = I_q \quad (8)$$

Slika 2 - Familije krivih magnećenja po d i q -osi u zavisnosti od struje magnećenja po d -osi (I_{dm}) i po q -osi (I_{qm}), krive $\Psi_{dm}(I_{dm})$ i $\Psi_{qm}(I_{qm})$, koje se određuju proračunima konkretnog generatora

Sa navedenim modelom, koji je složeniji za primenu, povećana je tačnost sa uvođenjem parametra koji treba da uračuna uticaj vrednosti (komponente) struje magnećenja po q -osi (I_{qm}) na zavisnost $\Psi_{dm}(I_{dm})$ i obrnuto vrednosti (komponente) struje magnećenja po d -osi (I_{dm}) na $\Psi_{qm}(I_{qm})$. Tako se, slici 2, dobijaju zavisnosti:

- familija krivih magnećenja po d -osi, $\Psi_{dm,i}(I_{dm})$ za date vrednost parametra, struje I_{qmi} , i
- familija krivih magnećenja po q -osi, $\Psi_{qm,i}(I_{qm})$ za date vrednost parametra, struje I_{dmi} .

Navedeni model, pomoću slike 2, je složen za primenu uz nedostatake koji umanjuju tačnost metoda. Naime, dovoljno je samo da vrednosti napona u tački

priključenja odstupaju od onih za koje su utvrđene date familije krivih $\Psi_{dm}(I_{dm})$ i $\Psi_{qm}(I_{qm})$ pa da to dovode do promene ugla snage a time i do nešto izmenjenih zavisnosti $\Psi_{dm}(I_{dm})$ i $\Psi_{qm}(I_{qm})$ u novim uslovima, a time i do manjih ili većih greški.

3.4. Metoda konačnih elemenata sa eksperimentalnom validacijom

Sa povećanjem gustine magnetnog fluksa postaje intenzivnije zasićenje magnetnog kola turbogeneratora, kao i razlike u zasićenju po d i q osi. Zbog toga se javljaju i razlike u vrednostima zasićenih sinhronih reaktansi, $X_{d,sat}$ i $X_{q,sat}$. U tom slučaju pored osnovne (p_1) postoji i reluktantna komponenta snage (p_2) koja je veća što je veća nejednakost u vrednostima sinhronih reaktansi $X_{d,sat} > X_{q,sat}$.

Na osnovu analize zavisnosti aktivne snage (izraz 3), utvrđuje se da pri datoj (izmerenoj) aktivnoj snazi (p), pri različitim vrednostima $X_{d,sat} \neq X_{q,sat}$, postoji veliki broj kombinacija vrednosti $X_{d,i}$ i $X_{q,i}$, koji zadovoljava date (izmerene) iznose aktivne snage ($p = p_1 + p_2$), ali sa odgovarajućim i različitim vrednostima ugla snage (δ). Kako je od svih mogućih kombinacija vrednosti: $p_{1,rač}$, $p_{2,rač}$ i ugla $\delta_{(p_1+p_2),rač}$, izraz 3, tačna samo jedna kombinacija tih vrednosti, to su očigledne teškoće da se sa sigurnošću dobije (baš) ta tačna kombinacija navedenih vrednosti, tj. tačno rešenje zadatka.

U savremenoj nauci i struci se utvrdilo mišljenje da se Metoda konačnih elemenata (MKE) sa eksperimentalnom validacijom smatra referentnom za određivanje vrednosti zasićenih sinhronih reaktansi, $X_{d,sat} > X_{q,sat}$, a time i vrednosti pobudnih struja (I_f) i ugla snage generatora (δ). Ali zbog teškoća u modelovanju fizičkih karakteristika (magnetne permeabilnosti za različite nivoe zasićenja) velikog broja geometrijski malih elemenata magnetnog kola sa različitim gustinama fluksa, tačan proračun je moguć samo posle velikog broja (iterativnih) proračuna po MKE. Smatra se da je dostignuta dovoljna tačnost kada se, za tako utvrđene vrednosti sinhronih reaktansi, $X_{d,sat}$ i $X_{q,sat}$, odgovarajuće računске vrednosti aktivne snage i ugla snage poklapaju sa izmerenim vrednostima, $p_{rač} = p_{1,rač} + p_{2,rač} = p_{izm}$ i $\delta_{rač} = \delta_{izm}$.

U režimu opterećenja različite su magnetopobudne sile (mps) i njima odgovarajuće komponente struja magnećenja po d -osi i q -osi, $i_{d\Sigma} = i_f - i_{ad}$ i $i_{q\Sigma} = i_{aq}$, pa su različita i magnetna zasićenja po d i q -osi kao i odgovarajuće sopstvene reaktanse ($x_{dd} \neq x_{qq}$). Time je tačan proračun moguć samo po metodi konačnih elemenata (MKE). Naime, MKE uključuje uzajamni uticaj polja obe ose, i daje dosta tačne rezultate, tj. uz manju grešku [1]:

- od 1-2%, u proračunu pobudne struje (I_f), i
- u granicama $\pm 2^\circ$, za ugao snage (δ).

Za svaku radnu tačku (režim opterećenja) određene su odgovarajuće vrednosti ems E_ℓ (čije se vrednosti nanose na ordinati), dok se, na osnovu vrednosti reaktansi $X_{d,sat}$ i $X_{q,sat}$, određuju odgovarajuće komponente rezultantne pobudne struje po d-osi i po q-osi, $I_{ex,d}$ i $I_{ex,q}$. One su svedene na odgovarajuće vrednosti ems E_ℓ da bi mogle biti korišćene za apscise odgovarajućih krivi magnećenja, tj:

$$I_{md} = (E_\ell / E_q) \cdot (I_{fd} - I_d) = E_\ell / X_{ad,sat}, i$$

$$I_{mq} = E_\ell / X_{aq,sat}, gde je X_{aq,sat} = X_{q,sat} - X_\ell = E_d / I_q - X_\ell.$$

Za svaku radnu tačku (režim opterećenja) određene su odgovarajuće vrednosti ems E_ℓ , komponente rezultantne pobudne struje po d-osi i po q-osi, I_{md} i I_{mq} , i sračunate odgovarajuće familije krivih magnećenja, slika 4:

- familija krivi magnećenja po d-osi, $E_{\ell i}(I_{md,i})$, i
- familija krivi magnećenja po q-osi, $E_{\ell i}(I_{mq,i})$.

Slika 4 - Familije krivih magnećenja po d i q-osi $E_{\ell i}(I_{md,i})$ i $E_{\ell i}(I_{mq,i})$, u zavisnosti od komponenti pobudne struje po d i q osi za različite aktivne snage ispitivanog generatora 555 MVA [4, 5]

U proračunima je korišćen tzv. recipročni sistem, gde je relativna jedinica pobudne struje usklađena (po efektu u pogledu stvaranja polja) sa strujom statora, I_a , tako da, u ovom sistemu jedinica, vrednost pobudne struje za magnećenje međugvožđa iznosi $(1/X_{d,un})$. U cilju daljeg prilagođavanja praktičnim potrebama u svojstvu odgovarajućih parametara odabrane su vrednosti opterećenja po aktivnoj snazi (P), umesto parametara $I_{mq,i}$ i $I_{md,i}$, tako da su dobijene i konstruisane, slika 4, sledeće funkcije zasićenja:

- familija krivi magnećenja po d-osi, $E_{\ell i}(I_{md,i})$, za date vrednosti parametra- aktivne snage (P), i
- familija krivi magnećenja po q-osi, $E_{\ell i}(I_{mq,i})$, za date vrednosti aktivne snage (P) kao parametra.

To znači da je za konstrukciju po jedne krive, $E_{\ell i}(I_{md,i})$ i $E_{\ell i}(I_{mq,i})$, potrebno sprovesti kompletan ogled sa konstantnom aktivnom snagom ($P=Const$) uz promene reaktivnih opterećenja, kao pri konstruisanje

V-krive, $I_G=f(I_f)$ za datu vrednost aktivne snage ($P_i=Const$) kao parametra. Za konstrukciju navedenih familija krivih, $E_{\ell i}(I_{md,i})$ i $E_{\ell i}(I_{mq,i})$, potrebno je sprovesti kompletan ogled sa relevantnim vrednostima aktivnih snaga ($P_i=Const$, $P_i=P_1, P_2, \dots$) uz odgovarajuće promene reaktivnih opterećenja za svaku od datih vrednosti P_i (tj. slično kao za konstruisanje familije V-krivih). Na taj način se, za konkretan generator, konstruišu potrebne familije krivih (sl. 4). Kako pokazuju određene provere [5] za konstrukciju svake krive, za datu vrednost aktivne snage (P), dovoljne su četiri tačke (četiri različite vrednosti reaktivnih snaga Q). Pomoću datih familija krivih $E_{\ell i}(I_{md,i})$ i $E_{\ell i}(I_{mq,i})$ se određuju zavisnosti zasićenih sinhronih reaktansi po d-osi i po q-osi, $X_{d,sat}$ i $X_{q,sat}$. Potom se određuju vrednosti (i zavisnosti) faktora zasićenja po d-osi i po q-osi, $K_{d,sat}=X_{d,sat}/X_{d,un}$ i $K_{q,sat}=X_{q,sat}/X_{q,un}$. Na sl. 4 su date po dve krive $E_{\ell i}(I_{md,i})$ i $E_{\ell i}(I_{mq,i})$, svaka za datu (naznačenu) vrednost aktivne snage (P).

U cilju pojednostavljenja, na slici 5, je nacrtana samo po jedna kriva magnećenja za d-osu i za q-osu. To su računске zavisnosti dobijene pod pretpostavkom da prvo postoji samo fluks u međugvožđu čija se osa poklapa sa d-osom, a potom da postoji samo fluks u međugvožđu čija se osa poklapa sa q-osom. Za te pretpostavke sračunate su vrednosti faktora zasićenja po d-osi i q-osi, K_d i K_q , i odgovarajuće vrednosti ems E_ℓ . A potom su nacrtane odgovarajuće računске krive magnećenja, $e_\ell(i_{md})_{rac}$ i $e_\ell(i_{mq})_{rac}$, sl. 5. Iako se navodi [2, 3, 4] da se pomoću krivih sa sl. 5 dobijaju zadovoljavajući rezultati, poređenjem tih krivi i familija krivih sa slike 4 može se utvrditi da postoje veće razlike za režime sa visokim induktivnim reaktivnim snagama ($Q \geq Q_n$) kao i za režime sa kapacitivnim reaktivnim snagama (režimi potpobude).

Slika 5 - Računske krive magnećenja po d-osi i q-osi, $e_\ell(i_{md})_{rac}$ i $e_\ell(i_{mq})_{rac}$, za dati SG 555 MVA [4, 5]

4.3. Uprošćen postupak za određivanje sinhronih reaktansi i karakteristika generatora

Za sprovođenje proračuna parametara i karakteristika generatora sve više se koristi (ili se nameće) upotreba komercijalnih računarskih programa, posebno kada su u pitanju studije stabilnosti. Ti programi

se direktno zasnivaju na savremenoj literaturi, npr. Kunderinoj knjizi [2] i/ili IEEE St. 1110 [4] što se i navodi u tim programima [12]. Postupak za konstruisanje dve familije krivih (slika 4), ili samo dve zavisnost (slika 5), nije jednostavan za većinu praktičnih primena, pa se koristi i jednostavniji postupak.

Naime, uvode se dva sledeća uprošćenje:

- za određivanje vrednosti zasićene sinhronne reaktanse po d-osi ($X_{d,sat}$) i faktora zasićenja po d-osi ($K_{d,sat} = X_{d,sat}/X_u$) se koristi kriva praznog hoda (sl. 6), umesto familije krivih magnećenja po d-osi, i time računa sa vrednostima reaktanse $X_{d,sat0}$ i faktora zasićenja $K_{d,sat0}$ [2, 12], a
- vrednost zasićene sinhronne reaktanse po q-osi ($X_{q,sat}$) se određuje kao unapred procenjeni procenat vrednosti reaktanse $X_{d,sat0}$ [2, 12], tj.

$$X_{q,sat} = (K_{q,sat0}/K_{d,sat0}) \cdot X_{d,sat0}$$

Obe pretpostavke su praćene sa određenim (ponekad i većim) greškama. Veliki uticaj na grešku ima to što se vrednost pobudne struje (I_f) određuje pomoću krive magnećenja u praznom hodu za ems iza reaktanse rasipanja $E_t = U_a + X_\ell I_a$. Iako to dovodi do znatnije greške, jer se zanemaruje dodatno zasićenje rotora koje je uračunato kada se koristi Potjeova reaktansa, ovo se dosta koristi u savremenoj literaturi [2], standardima [4] i komercijalnim računarskim programima [12]. Najveća prednost navedenih uprošćenja je u lakšoj dostupnosti potrebnih podataka, npr kriva zasićenja (magnećenja) praznog hoda, po pravilu, se lako dobija za svaki generator – bilo od proizvođača ili se snima iz oglada praznog hoda koji se sprovodi u elektrani. Za potrebe automatizacije proračuna, dobijena kriva praznog hoda se modeluje analitičkim izrazom na neki od poznatih načina. Jedan od poznatih modela je ilustrovan na slici 6 [2,4, 5].

Slika 6 - Ilustracija postupka za analitička aproksimacija zasićene karakteristike praznog hoda, $e_0(i_{f0}=i_{fd})$

Data kriva se deli na dva (ili tri) segmenta, pri čemu prvi segment predstavlja pravu (linearni deo) dok se drugi (i treći) segment modeluju predloženom eksponencijalnom funkcijom. U računarski program je dovoljno da se unesu koordinate za tri tačke sa krive

praznog hoda, npr za tačke $E_{0,gr}=I_{f0,gr}$, $E_0=U_N$ i $E_0=1.20U_N$, pa se analitička aproksimacija te krive vrši automatski [2, 5, 12].

U cilju provere (ne)tačnosti ove metode, sa $e_0(i_{f0}=i_{fd})$ i $X_{q,sat}/X_{d,sat0}=Const$, biće razmotreni primeri iz poznate literature [2].

4.4. Primer i analiza tačnosti proračuna sinhronih reaktansi i karakteristika generatora

U svojstvu ilustracije primene opisanog postupka razmatra se primer iz literature [2].

PRIMER 1 (Example 3.3 [2]):

Generator sledećih parametara:

- nominalne prividne 555 MVA i nominalne aktivne snage 500 MW (ili $\cos\phi=0.90$),
- nezasićene reaktanse magnećenja po uzdužnoj osi $X_{ad,u}=1.61$ i reaktanse rasipanja $X_\ell=0.15$ (zanemaruje se otpornost statora, $R_a=0.003$), a
- zadata je i zasićena karakteristika praznog hoda, sl. 6, sa tri tačke ($i_{fd,at}$, Ψ_{at}), tj. tačke sa koordinatama: (0.8, 0.8), (1.2, 1.7), (1.3, 2.3), koja je i analitički modelovana za proračune pomoću eksponencijalne zavisnosti [2]

$$\Psi_{at} = A_{sat} e^{B_{sat}(\Psi_{at} - \Psi_{T1})} = 0.03125 e^{6.931(\Psi_{at} - 0.8)}$$

Zadatak je bio [2] da se sračunaju vrednosti pobudne struje (i_{fd}) i ugla snage generatora (δ) za režim praznog hoda i još četiri različita režima opterećenja po aktivnoj (P) i reaktivnoj snazi (Q), čije su vrednosti date u tabelama 1 i 2.

Rezultati proračuna sa sračunatim iznosima pobudne struje (i_{fd}) i ugla snage (δ), [2], su dati

- u tabeli 1, za razmatrane režime opterećenja, uz pretpostavku da su vrednost faktora zasićenja po d-osi i po q-osi jednake, $K_{d,sat} = K_{q,sat}$, i
- u tabeli 2, za (iste) režime opterećenja, uz pretpostavku da su vrednost faktora zasićenja po d-osi i q-osi različite, tj. $K_{q,sat} = 0.75 K_{d,sat}$.

U navedenim tabelama su, uz kompletne podatke iz odgovarajućih tabela u [2], pridodati i rezultati naših proračuna (u cilju dalje analize) sa odgovarajućim vrednostima računskih snaga $P_{rač} \neq P_t$ i $Q_{rač} \neq Q_t$, (poslednje dve kolone) u tabelama 1 i 2. Vrednosti snaga $P_{rač}$ i $Q_{rač}$ se razlikuju od odgovarajućih vrednosti zadatih snaga P_t i Q_t , što ukazuje na netačne vrednosti zasićenih sinhronih reaktansi, $X_{d,sat}$ i $X_{q,sat}$, jer su sračunate na osnovu navedenih (time i netačnih) vrednosti faktora zasićenja po d-osi (K_{ds}) i po q-osi (K_{qs}).

Očigledno je da primena metoda proračuna koji su korišćeni u [2] daje nedovoljno tačne rezultate u obe varijante. Zbog toga se ovaj primer detaljnije razmatra i analizira, i to za:

- varijantu proračuna po uprošćenom modelu za jednu (sinhronu) osu, sa $X_{d,sat}=X_{q,sat}$, kao i za

- varijantu proračuna po modelu, sa $X_{d,sat} > X_{q,sat}$.

1. Rezultati proračuna po modelu sa jednakim sinhronim reaktansama, $X_{d,sat} = X_{q,sat}$, tabela 1:

Autor smatra za nedostatak pretpostavku, koji se koristi u [2], tj. što se računa

- sa $K_{d,sat} = K_{d,s0}$ a time i sa $X_{d,sat} = K_{d,s0} \cdot X_{d,un} = X_{d,s0}$ i krivom magnećenja u praznom hodu, umesto
- sa krivom magnećenja opterećene mašine po d-osi i reaktansom $X_{d,sat} = K_{d,sat} X_{d,un} < K_{d,s0} X_{d,un} = X_{d,s0}$ (jer je $K_{d,sat} < K_{d,s0}$).

Navedeno se jednostavno dokazuje i na ovom primeru. Dovoljno je da se pomoću izraza (1) i (2), sračunaju odgovarajuće vrednosti aktivne (P_{rac}) i reaktivne snage (Q_{rac}). Pošto se one razlikuju od zadatih (polaznih) vrednosti za iste, $P_{rac} \neq P_t$ i $Q_{rac} \neq Q_t$, to se može zaključiti da postoji greška u modelu proračuna. Naime, pošto su preценjene vrednosti reaktanse $X_{ds0} > X_{dsat}$, to su preценjene vrednost ugla snage (δ_i) a time i odgovarajuće vrednosti aktivne snage (P_{rac}), pogotovu u režimu visokih reaktivnih snaga (Q_{rac}) kada je najveće zasićenje magnetnog kola pa je time i najviše potcenjena vrednost zasićene sinhronne reaktansa $X_{d,sat} = K_{ds} \cdot X_{du} < X_{ds0}$.

2. Rezultati proračuna sa nejednakim sinhronim reaktansama, $X_{d,sat} > X_{q,sat}$, tabela 2:

Zbog pomenute složenosti modela sa opisanim postupkom za konstruisanje dve familije krivih (sl. 4), ili samo dve zavisnosti (sl. 5), u razmatranom primeru je korišćen d-q model uz uprošćeno određivanje parametara, tj:

- za određivanje vrednosti zasićene sinhronne reaktanse po d-osi ($X_{d,sat}$) i faktora zasićenja po d-osi ($K_{d,sat} = X_{d,sat} / X_{d,un}$) se koristi kriva praznog hoda (slika 6), umesto familije krivih zasićenja sa slika 4, tj. računa se sa vrednostima reaktanse $X_{d,sat0}$ i faktora zasićenja $K_{d,sat0}$ [2, 4, 15], a

- - vrednost zasićene sinhronne reaktanse po q-osi ($X_{q,sat}$) se određuje kao unapred procenjeni procenat vrednosti reaktanse $X_{d,s0}$, tj. $X_{q,sat} = 0.75 K_{d,s0} \cdot X_{q,sat0}$ [2], što približno odgovara odnosu istih na sl. 5, ali to često nije dovoljno tačno.

Rezultati proračuna po d-q modelu, sa navedenim uprošćenjima, su dati u tabeli 2, a njihova tačnost se procenjuju na isti način kao i rezultata u tabeli 1. Tako su, uz relevantne podatke iz odgovarajuće tabele u [2], dati i rezultati naših proračuna odgovarajućih vrednosti P_{rac} i Q_{rac} kako bi se proverila (ne)usklađenost istih sa zadatim (izmerenim) vrednostima P_t i Q_t . Na osnovu toga se daje ocena o tačnosti u određivanju vrednosti datih reaktansi $X_{d,sat} = X_{d,s0}$ i $X_{q,sat} = 0.75 X_{d,s0}$. Suprotno očekivanjima, odstupanja u vrednostima P_{rac} i P_t su veća nego u tabeli 1. Razlog bi mogao biti u tome što se vrednost zasićene sinhronne reaktanse po q-osi ($X_{q,sat}$) određuje kao unapred zadat deo vrednosti reaktanse $X_{d,sat0}$, tj. $X_{q,sat} = 0.75 \cdot X_{d,s0}$ [2]. Naime, zbog preценjene vrednosti reaktanse $X_{d,s0} > X_{d,sat}$ i potcenjene vrednosti reaktanse $X_{q,sat}$, preценjena je vrednost trećeg člana u izrazu (2) a time i vrednost $Q_{rac} = 0.473 > 0.436 = Q_t$, za režim visokih reaktivnih snaga.

Time je pokazano (i u potpunosti dokazano) da poznati modeli čija je upotreba rasprostranjena u praksi [2, 4, 5, 12] ne daju dovoljno tačne rezultate. Tačnije određivanje vrednosti zasićene sinhronne reaktanse po q-osi, $X_{q,sat}$, je moguće pomoću iterativnih proračuna na osnovu zadatih vrednosti aktivnih i reaktivnih snaga, P i Q, uz prethodno utvrđenu dovoljno tačnu vrednost zasićene sinhronne reaktanse po d-osi, $X_{d,sat}$ [13]. Tačno određivanje vrednosti $X_{d,sat}$ je, ipak, dosta složeno. Novi postupak – patent [14] ovog autora treba da poveća tačnost kada je u pitanju određivanje zasićene sinhronne reaktanse po d-osi, $X_{d,sat}$.

Tabela 1. Rezultati proračuna ugla snage (δ) i pobudne struje (i_{fd}), po modelu sa jednakim vrednostima sinhronih reaktansi, $X_{d,sat} = K_{d,s0} \cdot X_{d,un} = X_{q,sat}$, za date (izmerene) snage P_t i Q_t , kao i odgovarajuće vrednosti aktivnih i reaktivnih snaga sračunatih po izrazima (1) i (2), $P_{rac} \neq P_t$ i $Q_{rac} \neq Q_t$

Primer:	P_t (pu)	Q_t (pu)	E_a (pu)	$K_{d,sat}$ (= K_{ds0})	δ_i deg	i_{fd} (pu)	P_{rac}^1 (pu)	Q_{rac}^1 (pu)
1.	0	0	1.0	0.889	0	0.678	<u>0</u>	<u>0</u>
2.	0.4	0.2	1.033	0.868	25.3 ³	1.016	<u>0.41</u>	<u>0.196</u>
3.	0.9	0.436	1.076	0.835	39.1 ³	1.565	<u>0.94²</u>	<u>0.404</u>
4.	0.9	0	1.012	0.882	54.6 ³	1.206	<u>0.897</u>	<u>0.003</u>
5.	0.9	-0.2	0.982	0.899	64.6 ³	1.089	<u>0.885</u>	<u>-0.17</u>
1 – Vrednosti P_{rac} i Q_{rac} sračunate po (1) i (2) za $X_{d,sat} = X_{ds0}$ za date iznose $K_{d,sat} = K_{ds0}$								
2- Preценjena vrednost snage, $P_{rac} > P_t$, zbog $X_{d,sat} = X_{d,s0}$, umesto $X_{d,sat} < X_{d,s0}$								
2- Preценjena vrednost ugla snage (δ), u odnosu na tačnije u tabeli 2, zbog $X_{d,sat} = X_{ds0}$								

Tabela 2. Rezultati proračuna ugla snage (δ) i pobudne struje (i_{fd}), po modelu sa nejednakim vrednostima sinhronih reaktansi, $X_{d,sat} = K_{d,sat} \cdot X_{d,un} > X_{q,sat} = K_{q,sat} \cdot X_{q,un}$, sa $K_{d,sat} = K_{ds0}$ i $K_{q,sat} = 0.75K_{ds0}$ za date snage P_t i Q_t , kao i odgovarajuće vrednosti računskih snaga $P_{rač} \neq P_t$ i $Q_{rač} \neq Q_t$, za $X_{d,sat} = K_{ds0} \cdot X_{du}$ i $X_{q,sat} = 0.75K_{ds0} \cdot X_{qu}$

Primer:	P_t (pu)	Q_t (pu)	$K_{q,sat}$ ($0.75K_{ds0}$)	$K_{d,sat}$ ($=K_{ds0}$)	δ_i (deg)	i_{fd} (pu)	$P_{rač}^1$ (pu)	$Q_{rač}^1$ (pu)
1.	0	0	0.667	0.889	0	0.678	0	0
2.	0.4	0.2	0.648	0.868	21.0	1.013	0.417	0.144
3.	0.9	0.436	0.623	0.835	34.6	1.559	0.962	0.473
4.	0.9	0	0.660	0.882	47.5	1.194	0.909	0.089
5.	0.9	-0.2	0.676	0.899	55.9	1.074	0.886 ³	-0.08
1 – Vrednosti $P_{rač}$ i $Q_{rač}$, po (1) i (2) za $X_{d,sat} = X_{ds0}$ i $X_{q,sat} = K_{q,sat} X_{q,un}$, za $K_{q,sat} = 0.75K_{ds0}$								
2- Precenjene vrednosti $P_{rač}$ i $Q_{rač}$, zbog $X_{d,sat} = X_{ds0}$, umesto $X_{d,sat} < X_{ds0}$								
3-Potcenjene vrednost snage ($P_{rač}$) u režimu potpobude, zbog $X_{d,sat} = X_{ds0} > X_{d,sat}$ i $X_q \neq X_{q,sat}$.								

6. ZAKLJUČCI

U nastavku su navedeni najvažniji zaključci.

1. U savremenoj nauci i struci se utvrdilo mišljenje da se Metoda konačnih elemenata (MKE) sa eksperimentalnom validacijom smatra referentnom za određivanje vrednosti zasićenih sinhronih reaktansi $X_{d,sat} > X_{q,sat}$, a time i za proračun vrednosti pobudnih struja (I_f) i ugla snage (δ) generatora za razmatrane režime.

2. Kako je proračun pod 1 dugotrajan i složen, to se rezultati proračuna, za reprezentativne režime, elaboriraju u vidu familija krivih magnećenja po d-osi i po q-osi, $e_{ti}(i_{md,i})$ i $e_{ti}(i_{mq,i})$, za koje su kao parametri odabrane vrednosti relevantnih (datih) opterećenja po aktivnoj snazi (P).

3. Proračuna familija krivih $e_{ti}(i_{md,i})$ i $e_{ti}(i_{mq,i})$ nije jednostavan za praktičnu primenu, pa se

- za određivanje zasićene sinhronne reaktanse po d-osi ($X_{d,sat}$) koristi kriva praznog hoda $e_0(i_0)$ umesto familije krivih magnećenja po d-osi, a
- vrednost zasićene sinhronne reaktanse po q-osi ($X_{q,sat}$) se određuje kao unapred dati procenat vrednosti utvrđene sinhronne reaktanse $X_{d,sat0}$, npr. $X_{q,sat} = (K_{q,sat0}/K_{d,sat0})X_{d,sat0}$, npr $K_{q,sat0}/K_{d,sat0} = 0.75$.

4. Tačnost proračuna, sa datim uprošćenjima (pod 3), se proverava poređenjem izračunatih vrednosti snaga, $P_{rač}$ i $Q_{rač}$, sa datim (izmerenim) vrednostima, P_t i Q_t . Te razlike su velike, tabele 1 i 2, u navedenom primeru iz lit. [2] što dovodi u sumnju opravdanost šire primene ove metode.

LITERATURA

- [1] Ion Boldea, "Synchronous Generators - The Electric Generator Handbook", pp. 512, 2006, by Taylor & Francis Group, New York, 2006.
- [2] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc, 2000, pp. 1167.

- [3] Chari M.V.K, Munich S. H, Tandon S. C, Load Characteristics of Synchronous Generator by the Finite-Element Method, *IEEE Trans on Power System*, Vol. PAS-100, No.1, Jan 1981, pp. 1-13.

- [4] IEEE Std. 1110-2002, *IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Appl. in Power System Stability Analyses*, 2003.

- [5] Munich S. H, Schulz R. P, Baker D. H, Sharma D. K, Fish J. H, Saturation Function for Synchronous Generator from Finite Elements, *IEEE Tran on En. Con*, No. 4, 1987, pp. 680-92.

- [6] M. A. Arjona, Macdonald D. C, "A new lumped steady – state synchronous mashine model derived from finite element analysis. *IEEETransact on Energy Conversion*, Vol. EC 14, No. 1, 1999, pp. 1-7.

- [7] M. A. Arjona, Macdonald D. C, "Analysis of Synchronous Reactance as a Function of Airgap MMF", *Electric Power Components and Systems*, Copyright Taylor & Francis Group, 2002, pp. 345-359.

- [8] Macdonald D. C, Reace A. B, Turner P.J., Turbine-generator steady-state reactance, *IEE Proceedings*, Vol. 132, Pt. C. No.3, May 1985.

- [9] A. M. El-Serafi, T. A. Abdallah, M. K. El-Sherbiny, E.h. Badawy, Experimental Study of the Cross-magnetizing Phenomenon in Saturated Synchronous Machines, *IEEE Transaction on En. Conv*, Vol. 3, No. 4, pp. 815-823, Dec 1988.

- [10] M. Namba, J. Hosoda, S. Doi, M. Udo, Development for Measurement of Operating Parameters of Synchronous Generator and Control Systems, *IEEE Tran. on Power App. and System*, Vol. PAS/100, No.2, 1981, pp. 618-628.

- [11] Yoshihide Hase, "Handbook of Power System Engin.", John Wiley & Sons, Ltd, pp. 504, 2007.

- [12] DigSILENT Technical Documentation Synchronous Generator, Published by DigSILENT GmbH, Germany, <http://www.digsilent.de>, 2010,.

- [13] Miloje M. Kostić, "Metoda za indirektno određivanje parametara turbogeneratorskog u radnim uslovima", *Zbornik radova za 2014. godinu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, Vol.24*, str. 177-191.
- [14] Miloje M. Kostić, Prijava patenta P 2016/0940 od 02. 11.: „Postupak za određivanje ekvivalentne reaktanse rasipanja i sinhronne reaktanse u režimima potpobude generatora“, 2016.

SUMMARY

ANALYSIS OF THE ACCURACY OF METHODS FOR THE DETERMINATION OF THE SYNCHRONOUS REACTANCES AND THE CHARACTERISTICS OF TURBOGENERATOR

The values of saturated synchronous reactances turbogenerator for d-axis and q axis are different, $X_{d,sat} > X_{q,sat}$ and when their unsaturated equal value, $X_{d,u} = X_{q,u}$. The exact calculation these reactances is quite complex and is conducted only using the finite element method (FEM) with experimental validation. In order to adapt to practical needs, the most important results are elaborated in the form of family magnetizing curves loaded machines for d and q axis. This enables more accurate calculation of saturated synchronous reactance, and on the basis of the excited current and the power angle, and accurate design of the capability diagram for overexcited regimes and underexcited regimes. Such a method of constructing the two families of curves is complex for practical application, however, uses a simpler procedure. The calculation results with the above simplifications are analyzed in the work so that the calculated values of power are compared with the given (measured) values. It turns out that these differences are large, even, in the examples from famous literature, and be critical to use methods that are implemented and in computer programs.

Key words: turbogenerator, excited current, power angle, synchronous reactance, magnetizing curves, reactive power