

Metod za indirektno određivanje parametara turbogeneratorsa u radnim uslovima

Miloje Kostić¹

¹ Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija
mkostic@ieent.org

Kratak sadržaj: U ovom radu se prezentira nova metoda za određivanje zasićenih sinhronih reaktansi ($X_{d,sat}$ i $X_{q,sat}$) i ugla rotora (δ) u radnim režimima. U sklopu ovog postupka se mere (registruju) samo vrednosti: struje pobude (I_f), napona generatora (U), aktivne (P) i reaktivne snage (Q). Potrebno je raspolagati i sa karakteristikom magnećenja generatora $E(i_f)$. Rezultati proračuna daju vrednosti $X_{d,sat}$ i $X_{q,sat}$ i ugla rotora (δ) i odražavaju uticaj zasićenja magnetnog kola generatora u radnim režimima. Postupak primene predložene metode se odvija sledećim redom:

- prvo se određuje vrednost sinhronih reaktansi $X_{d,sat}$ pomoću karakteristike magnećenja generatora $E(i_f)$ za vrednost napona iza reaktanse rasipanja (X_t) ili za vrednost napona iza Potjeove reaktanse (X_P), a potom
- vrednost sinhronih reaktansi za poprečnu (q) osu generatora, $X_{q,sat}$, i ugla opterećenja (δ) se određuju iz proračuna na osnovu odgovarajućih (nelinearnih) jednačina koje predstavljaju uzajamne zavisnosti parametara i karakteristika generatora po d-osi i q-osi, u relativnim jedinicama.

Predloženi metod je proveren na primeru generatora snage 500 MW iz literature [1], gde su pored vrednosti I_f , U , P , Q i date karakteristike magnećenja $E(i_f)$, merene i vrednosti ugla rotora (δ) u radnim režimima oko nominalnog. Dobijeni rezultati pomoću nove metode se razlikuju do 1-2 %, u odnosu na rezultate koji su dobijeni u [1] po složenijim postupcima, tj. (i) po metodi sa direktnim merenjem ugla rotora δ i proračunom vrednosti $X_{d,sat}$ i $X_{q,sat}$ i (ii) proračunu parametara generatora po metodi konačnih elemenata

Dobijeni rezultati pokazuju da vrednosti zasićene sinhronih reaktanse $X_{d,sat}$ mogu biti za 30 % ispod vrednosti nezasićene sinhronih reaktanse $X_{d,unsat}$, a da vrednosti $X_{q,sat}$ mogu biti manje do 20 % od odgovarajućih vrednosti $X_{d,sat}$. Na osnovu dobijenih rezultata i proverena se pokazuje da je predloženi metod verifikovan za indirektno merenje (određivanje)

parametara i karakteristika sinhronih turbogenerators u Elektroprivredi Srbije.

Ključne reči: turbogenerator, zasićene sinhronne reaktansi ($X_{d,sat}$ i $X_{q,sat}$), ugao rotora (δ), reaktansa rasipanja, Potjeova reaktansa, kriva magnećenja, aktivna snaga, reaktivna snaga.

1. Uvod

Pogodan postupak za određivanje reaktansi i parametara zasićenih turbogenerators je potreban za izradu sistemskih studija za odgovarajuće planske analize kao i za stručnjake koji upravljaju operativnim radom elektroenergetskog sistema (EES) i pojedinih elektrana. Prvobitni pristup [1]-[3], da se karakteristike generatora određuju na osnovu krive praznog hoda (magnećenja) turbogenerators i vrednosti reaktanse rasipanja (X_t) i nezasićene sinhronne reaktanse (X_{su}), daje dobre rezultate samo kada su u pitanju generatori sa slabije zasićenim magnetnim kolom. Moguća greška kod zasićenijih mašina se kompenzuje tako što se koristi vrednost napona iza Potjeove reaktanse (X_P) umesto vrednosti napona iza reaktanse rasipanja (X_t), [4] -[6]. Po tom postupku se dobijaju dovoljno tačne vrednosti struje pobude a time i pogonske karte generatora, ali su greške u određivanju ugla opterećenja (δ) relativno velike. Uvođenjem u postupke proračuna zasićene sinhronne reaktanse ($X_{s,sat} \leq X_{su}$) smanjene su greške u određivanju ugla δ , ali su one i dalje bile visoke kada su u pitanju turbogeneratori većih snaga, [7] - [10].

Zbog toga su urađene brojne studije na osnovu eksperimentalnih merenja kao i odgovarajućih proračunskih modela (koji se zasnivaju na metodi konačnih elemenata), uglavnom, za velike jedinice u nekim EES, [8] - [13]. Za ove svrhe formirani su odgovarajući postupci za određivanje vrednosti sinronih reaktansi turbogenerators za realne režime sa zasićenim magnetnim kolom generatora, zasićenih reaktansi po uzdužnoj (d -osi) i poprečnoj (q -osi), X_{dsat} i X_{qsat} . Dobijeni rezultati pokazuju da vrednosti zasićene sinhronne reaktanse $X_{d,sat}$ mogu biti za 30 % ispod vrednosti nezasićene sinhronne reaktanse $X_{d,unsat}$, a da vrednosti $X_{q,sat}$ mogu biti manje do 20% od odgovarajućih vrednosti $X_{d,sat}$. Uticaj stvarnih razlika u vrednosti X_{dsat} i X_{qsat} ($X_{dsat} \neq X_{qsat}$) je veliki kada je u pitanju određivanje vrednosti ugla opterećenja (δ) dok je on znatno manji kada se radi o proračunu vrednosti struje pobude generatora (J_F). Na osnovu navedenih rezultata i zaključaka se pokazuje da za izradu studijskih analiza, posebno onih za proveru stabilnosti rada EES, prvo treba utvrditi vrednosti zasićenih sinhronih reaktansi razmatranih generatora X_{dsat} i X_{qsat} . Očigledna je potreba za postupkom koji bi omogućio da se vrednosti X_{dsat} , X_{qsat} i δ , mogu relativno lako i dovoljno tačno određivati za relevantne režime opterećenja karakterisane sa izmerenim vrednostima napona (U), aktivne (P) i reaktivne snage (Q), tj za radne tačke karakterisane sa U , P i Q .

Tome treba dodati i veliku složenost pojava u magnetnom kolu generatora koje, pored zasićenja magnetnog kola, prati i uticaj reakcije magnetopobudne sile po q -osi na ukupni magnetni fluks po d -osi i obrnuto, [7] i [14]. U [11] je istaknuto da zavisnost X_{qsat} može biti predstavljena preko dve funkcionalne zavisnosti od kojih je jedna u direktnoj vezi komponentom struje generatora po poprečnoj q -osi (I_q), pa bi to mogao biti razlog izrazitijeg smanjenja ove reaktanse, $X_{qsat} < X_{dsat}$ [7]-[12].

Dovoljno tačne i praktične metode za određivanje zasićenih reaktansi generatora i ugla opterećenja δ , koji je mera stabilnosti rada generatora, se razvijaju više od 30 godina i prezentirane su u velikom broju radova, [7] - [13], koji su uglavnom rezultati studijskih istraživanja za potrebe EES elektroprivreda pojedinih zemalja. Potreba za takvim pristupom se ne može izbeći ni kada su u pitanju parametri i karakteristike sinhronih turbogeneratora u Elektroprivredi Srbije.

Pomenuta studijska istraživanja koriste dve (vrste) metoda, uglavnom paralelno, [8] - [12]:

- (i) vrednosti zasićenih reaktansi X_{dsat} i X_{qsat} razmatranih generatora se proračunavaju po metodi konačnih elemenata (MKE), a potom i odgovarajuće vrednosti ugla opterećenja δ , kao i
- (ii) postupak po kome se vrednost sinhronih reaktansi, X_{dsat} i X_{qsat} , određuju iz proračuna na osnovu odgovarajućih jednačina koje predstavljaju uzajamne zavisnosti parametara i karakteristika generatora po d -osi i q -osi, u relativnim jedinicama, pri čemu je vrednost ugla opterećenja (δ) poznata (merena) veličina.

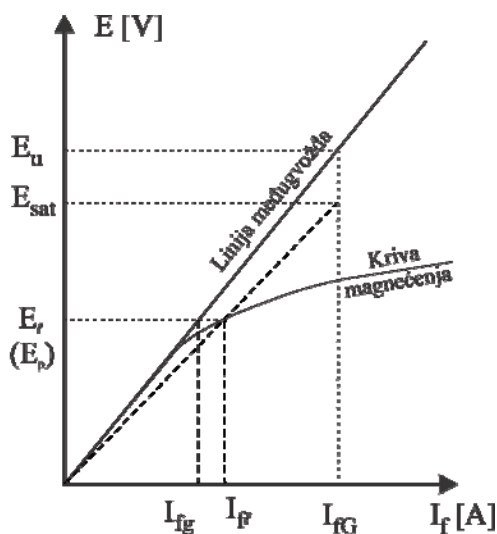
Navedeni kombinovani pristup je koristan kako bi se izbegle moguće greške zbog nesavršenosti merenja (posebno ugla δ), kao i mogućih greški u složenoj pripremi podataka za proračun po MKE, mada se ponekad smatra [7] da je dovoljno koristiti samo postupak pod (ii) koji omogućava da se uz merenje vrednosti: U , P , Q i ugla opterećenja (δ), odrede zavisnosti zasićenih reaktansi X_{dsat} i X_{qsat} od opterećenja.

Zbog potrebe za uporednom analizom rezultata proračuna, prvo će biti dat kratak prikaz metoda za određivanje zasićenih sinhronih reaktansi, [6] - [12]:

1. Određivanje zasićene sinhronne reaktanse ($X_{s,sat}$) i ugla opterećenja (δ) uz pretpostavku da je, i kod zasićenih turbogeneratora, $X_{dsat} = X_{s,sat}$, [6]
2. Metoda za određivanje zasićenih sinhronih reaktansi, X_{dsat} i X_{qsat} , u radnim režimima [7] - [12], uz merenju ugla opterećenja (δ) u radnim režimima [7] - [12], i kontrolne proračune po MKE [8], i
3. Nova metoda za određivanje (podešavanje) zasićenih sinhronih reaktansi, X_{dsat} i X_{qsat} , bez merenja ugla opterećenja (δ), sa detaljnijim prikazom uz primenu na turbogeneratoru od 588 MVA (i 500 MW) koji je razmotren u [8] po postupku pod 2, sa uporednom analizom dobijenih rezultata i rezultata datih u [8] i ocenom tačnosti predložene metode.

2. Metoda za određivanje sinhronih reaktansi uz pretpostavku o jednakosti uzdužne i poprečne reaktanse

Za primenu ove metode iz je potrebno meriti vrednosti napona (U), aktivne (P) i reaktivne snage (Q) generatora, a uz to treba raspolagati i sa krivom praznog hoda (magnećenja) datog turbogeneratora sa zasićenim magnetnim kolom, sl. 1 [6].



Slika 1. Kriva praznog hoda (magnećenja) sinhronog generatora sa zasićenim magnetnim kolom

Postupak se odvija sledećim redom:

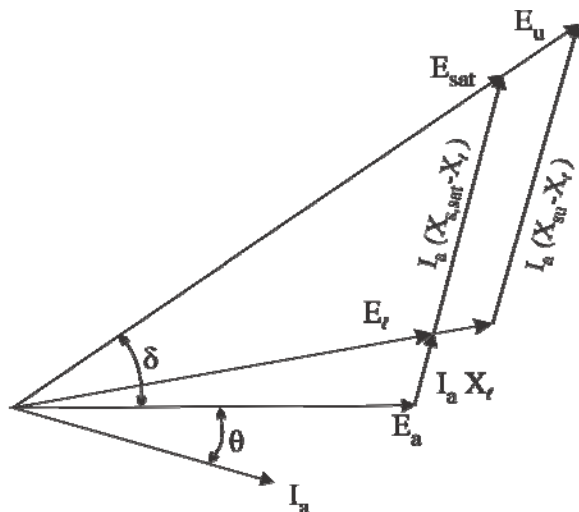
- prvo se određuju vrednosti zasićene sinhronne reaktanse ($X_{s,sat}$), na osnovu krive magnećenja generatora $E(i_f)$ za vrednost napona iza reaktanse rasipanja (X_r) ili iza Potjeove reaktanse (X_p), a

- onda se pretpostavi da je vrednost $X_{dsat} = X_{s,sat}$, [6]- [7].

Uticaj zasićenja se računava podešavanjem date vrednosti nezasićene sinhronne reaktanse (X_{su}) pomoću vrednosti faktora zasićenja (K_s) čija se vrednost određuje tako da omogućava da se dobiju odgovarajuće vrednosti zasićene sinhronne reaktanse ($X_{s,sat}$). Pretpostavi se da fluks rasipanja ima isti uticaj u režimu opterećenja kao i u režimu praznog hoda za koji se snima karakteristika magnećenja generatora $E(i_f)$. Moguća greška se kompenzuje tako što se koristi vrednost napona iza Potjeove reaktanse (X_p) umesto vrednosti napona iza reaktanse rasipanja (X_r), [4]- [7].

Uz pretpostavku da je međugvožđe između rotora i statora ravnomerno i da su jednake nezasićene sinhronne reaktanse po d -osi i q -osi, $X_{du} = X_{qu} =$

X_{su} , dobija se vektorski dijagram napona cilindričnog turbogeneratorsa, bez i sa računatim zasićenjem magnetnog kola (sa faktorom $K=K_s$), sl. 2.



Slika 2. Vektorski dijagram napona cilindričnog turbogeneratorsa: bez i sa računatim zasićenjem magnetnog kola (sa faktorom $K_s=E_u/E_{sat}$)

Faktor zasićenja magnetnog kola (K_s), se može odrediti pomoću krive praznog hoda sinhronog generatora sa zasićenim magnetnim kolom, sl. 1:

$$K_s = I_{f\ell} / I_{fg} \quad (1)$$

gde je $I_{f\ell}$ – struja pobude generatora sa krive na sl.1 za vrednost napona E_ℓ , (ponekad se, umesto $I_{f\ell}$, koristi I_{fp} – struja pobude generatora sa krive na sl.1 za vrednost napona E_p iza Potjeove reaktanse), a I_{fg} – struja pobude generatora sa linije međugvožđa, sl.1, za $E=E_\ell$ ili $E=E_p$.

Odgovarajuća vrednost unutrašnje (ukupne) elektromotorne sile (sl.2), za računatu vrednost faktora zasićenja, K_s , koja odgovara vrednosti struje pobude u razmatranom režimu:

$$E_{sat} = E_u / K_s \quad (2)$$

Na sl.2 su date i sledeće veličine
 E_a – napon na priključku (statora) generatora,
 Θ – su, redom, ugao faktora snage (Θ),
 δ – ugao opterećenja generatora.

U drugoj iteraciji sinhrona reaktansa se deli u dve komponente a veća komponenta, ($X_{su}-X_p$) ili ($X_{su}-X_t$) se podešava pomoću faktora zasićenja K_s , tako da sa reaktansom X_p ili X_t , zbirna vrednost daje zasićenu sinhronu reaktansu ($X_{s,sat}$). Odgovarajuće vrednosti faktora zasićenja K_p ili K_t su veće od jedinice [7]:

$$X_{s,sat} = X_p + \frac{X_{su} - X_p}{K_p} \quad (3)$$

ili

$$X_{s,sat} = X_\ell + \frac{X_{su} - X_\ell}{K_\ell} \quad (4)$$

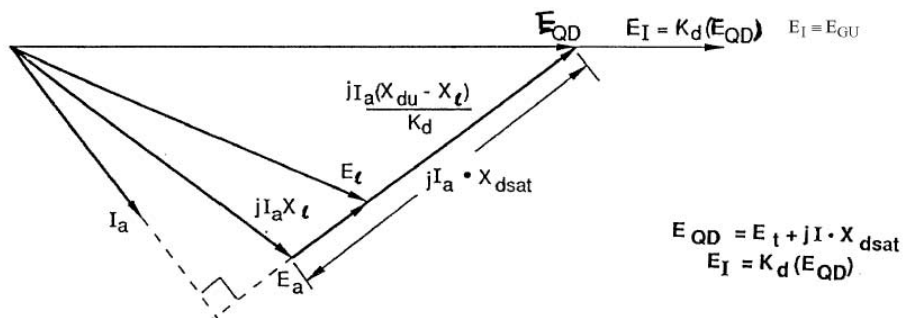
Vrednost zasićene sinhronne reaktanse ($X_{s,sat}$) se određuje na osnovu nezasićene sinhronne reaktanse (X_{su}) i vrednosti $K=K_s$ za napon E_ℓ ili E_p po proceduri koja je izložena u [6] i [7]. Uz pretpostavku da je $X_{d,sat} = X_{s,sat}$ [7]

$$X_{dsat} = X_\ell + \frac{X_{du} - X_\ell}{K_d} \quad (5)$$

gde je faktor zasićenja K_d , sl.3, određen pomoću krive praznog hoda sinhronog turbogeneratorsa, sl. 1, uz pretpostavku da je $K_d = K_s$ [7]

$$K_d = K_s = i_{f\ell} / e_p \quad (6)$$

Ukupni (unutrašnji) napon E_{QD} je prikazan na vektorskom dijagramu na Sl.3 [7]. Unutrašnji napon E_{QD} se određuje korišćenjem zasićenih reaktansi po postupku koji je prikazan pomoću sl.3. Ukupna pobudna struja se dobija množenjem datog napona E_{QD} sa faktorom zasićenja (K_d). Metod sa zasićenim sinhronim reaktansama se najviše koristi kada su u pitanju turbogeneratori. Poređenjem postupaka, koji su dati na sl.2 i sl.3, zaključuje se da su oni slični [7].

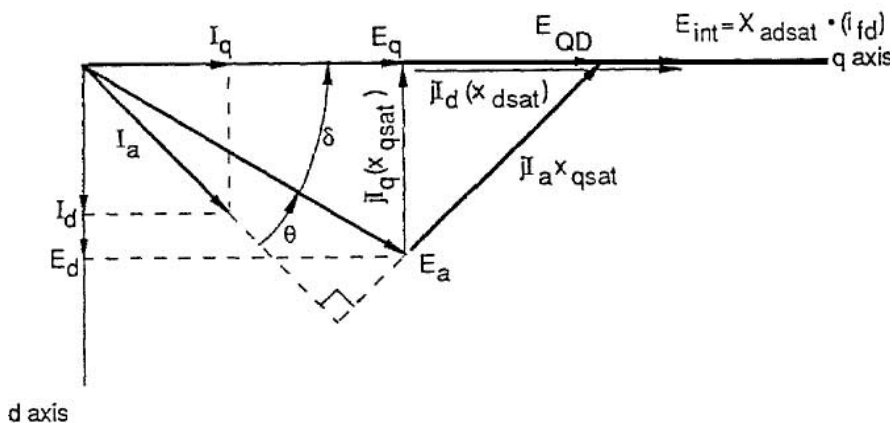


Slika 3. Vektorski dijagram napona turbogeneratorsa sa zasićenom sinhronom reaktansom (X_{dsat}), [7]

3. Metoda za određivanje zasićenih sinhronih reaktansi po d-osi i q-osi uz merenje ugla opterećenja

U opštem slučaju, zasićene sinhronne reaktanse po d-osi i q-osi, X_{dsat} i X_{qsat} , se dobijaju podešavanjem vrednosti nezasićenih reaktansi X_{du} i X_{qu} pomoću vrednosti odgovarajućih faktora zasićenja K_d i K_q , po postupku koji je opisan u 2. poglavlju. Faktor zasićenja K_d se određuje na osnovu funkcije zasićenja po d-osi tako da se dobije funkcionalna zavisnost zasićene sinhronne reaktanse po d-osi (X_{dsat}), a K_q se određuje na osnovu funkcije zasićenja po q-osi tako da se dobije funkcionalna zavisnost zasićene reaktanse (X_{qsat}), [7].

Vektorski dijagram napona turbogeneratora sa zasićenim sinhronim reaktansama, X_{dsat} i X_{qsat} , dat je na sl.4, i na njemu je označen ukupni unutrašnji napon ($E_{int}=X_{adsat} \cdot I_{fd}$). Vrednost struje pobude generatora se dobija kao proizvod napona E_{int} i faktora zasićenja K_d . U opštem slučaju, zasićene sinhronne reaktanse po d-osi i q-osi, X_{dsat} i X_{qsat} , se dobijaju podešavanjem vrednosti nezasićenih reaktansi X_{du} i X_{qu} pomoću funkcionalnih zavisnosti vrednosti faktora zasićenja K_d i K_q .



Slika 4. Vektorski dijagram napona turbogeneratora sa zasićenim i različitim sinhronim reaktansom po d-osi i q-osi, ($X_{dsat} \neq X_{qsat}$), [7]

Kada se pored vrednosti napona (E_a), aktivne (P) i reaktivne snage (Q) generatora, meri i vrednost ugla opterećenja (δ), na osnovu dijagrama sa sl. 4 se direktno dobijaju sledeći izrazi, [7] i [8]:

$$x_{dsat} = \frac{E_a \cos \delta + i_f x_\ell}{i_f - i_a \sin(\delta + \Theta)} \quad (7)$$

gde vrednost napona iza reaktanse rasipanja, $E_a + i_f x_\ell = E_t$, nije data na sl.3.

$$x_{qsat} = \frac{E_a \sin \delta}{i_a \cos(\delta + \Theta)} \quad (8)$$

gde su δ i Θ , redom, ugao opterećenja i ugao faktora snage. Navedeni postupak se koristi za određivanje (indirektno merenje) zasićenih sinhronih reaktansi, X_{dsat} i X_{qsat} , u radnim režimima, [7], [8] i [13]. Kao kontrolni postupak korišćeni su rezultati proračuna reaktansi X_{dsat} i X_{qsat} po metodi konačnih elemenata, za ispitivani generator od 588 MVA pri opterećenju sa nominalnom snagom od 500 MW i raznim reaktivnim snagama [8]. Ovi rezultati će biti dati uporedo sa dobijenim odgovarajućim vrednostima po metodi koja se predlože, u narednom poglavlju 4.

Vrednost zasićene reaktanse po d-osi, $x_{dsat} = x_{du} / K_d$, se može odrediti na osnovu vrednosti K_d koja je utvrđena po (6) pomoću krive praznog hoda (magnećenja) sinhronog generatora (sl.1), [7].

4. Novi metod za indirektno određivanje (podešavanje) parametara turbogeneratorsa u radnim uslovima

Za primenu nove metode koja se predlaže nije potrebno iz je potrebno meriti ugao opterećenja (δ) već samo vrednosti napona (U), aktivne (P) i reaktivne snage (Q) generatora u razmatranim režimima. Kao rezultati proračuna se dobijaju vrednosti zasićenih sinhronih reaktansi, X_{dsat} i X_{qsat} , i ugla opterećenja (δ). Uobičajeni postupak primene ove metode se odvija sledećim redom:

- prvo se određuju vrednosti zasićene sinhronne reaktanse ($X_{s,sat}$) i X_{qsat} , na osnovu krive magnećenja generatora $E(i_f)$ za vrednost napona iza reaktanse rasipanja (X_ℓ) ili iza Potjeove reaktanse (X_p),

- onda pretpostavi da je vrednost reaktanse po d-osi $X_{dsat} = X_{s,sat}$, pa se

- vrednost sinhronne reaktansi za poprečnu (q) osu generatora, $X_{q,sat}$, i ugla opterećenja (δ) se određuju iz proračuna na osnovu odgovarajućih jednačina koje predstavljaju uzajamne zavisnosti parametara i karakteristika generatora po d-osi i q-osi, u relativnim jedinicama.

Predloženi metod je proveren na primeru generatora snage 500 MW uz uporednu analizu sa rezultatima iz literature [1] koji su dobijeni i na osnovu izmerenih vrednosti ugla opterećenja (δ), pored vrednosti U , P , Q i karakteristikom magnećenja $E(i_f)$,

Redosled koraka za određivanje reaktanse po direktnoj d-osi X_{dsat} i postupaka za podešavanje vrednosti reaktanse po poprečnoj q-osi X_{qsat} da se dobije odgovarajuća vrednost ugla opterećenja (δ):

1. Prvo se određuje vrednosti sinhronne reaktanse $X_{dsat} = X_{s,sat}$ na osnovu vrednosti X_{du} i faktora zasićenja $K_D = K_\ell$ koji dobijen pomoću krive magnećenja generatora $E(i_f)$ za vrednost napona iza reaktanse rasipanja (X_ℓ), po postupku

koji je opisan u poglavlju 2. Ova vrednost se usvaja za (konačnu) vrednost zasićene reaktanse po d -osi. Da ovo unosi vrlo malu grešku, dokaz je u činjenici da se izračunate vrednosti pobudne struje generatora na osnovu vektorskih dijagrama na sl. 3 i sl. 4 razlikuju za manje od 1%, dok su visoke greške u određivanju ugla δ , pogotovu kada su u pitanju turbogeneratori većih snaga, [7] -[10].

2. Odgovarajuća vrednost (prve aproksimacije) ugla opterećenja (δ_{sat1}) se sračunava po izrazu

$$\sin \delta_{sat1} = \frac{pX_{dsat}}{e_a e_{int1}} \quad (9)$$

gde su

$e_a = E_a / E_{aR}$ – izmerena vrednost napona na krajevima generatora, u rj.,

$p = P / S_R$ – izmerena vrednost napona aktivne snage generatora, u rj., i

$X_{dsat} = X_{s,sat}$ – vrednosti zasićena sinhrona reaktanse po d -osi, u rj.,

e_{int1} – unutrašnji napon iza reaktanse $X_{d,sat} = X_{s,sat}$, u rj. ($e_{int1} = E_{int1} / E_{aR}$), a

E_a i E_{aR} – izmerena i nominalna vrednost napona na krajevima generatora,

S_R – nominalna prividna snaga generatora u MVA,

P – izmerena aktivna snaga generatora u MW.

3. Umesto (stvarne) vrednosti unutrašnjeg napon iza reaktanse $X_{d,sat}$, e_{int1} na sl. 4, pretpostavi se nova (fiktivna) i pogodno odabrana vrednost unutrašnjeg napon, $e_{int2} > e_{int1}$:

$$e_{int2} = \sqrt{(e_a \cos \delta_{sat1} + x_{dsat} i_a \sin(\Theta + \delta))^2 + (x_{dsat} i_a \cos(\Theta + \delta))^2} \quad (10)$$

Za tako dobijenu vrednost e_{int2} , i pretpostavku da zasićenje magnetnog kola generatora ostaje nepromenjeno i jednako stvarnom, sračunava se odgovarajuća fiktivna vrednost ugla opterećenja (δ_{fic}), koja predstavlja drugu aproksimaciju δ_{sat2}

$$\sin \delta_{sat2} = \frac{pX_{dsat}}{e_a e_{int2}} \quad (11)$$

Zatim se određuje odgovarajuća vrednost fiktivne zasićene reaktanse po q -osi, koja predstavlja drugu aproksimaciju iste, X_{qsat2}

$$x_{qsat2} = \frac{e_a \cdot \sin \delta_{sat2}}{i_{qsat2}} = \frac{e_a \cdot \sin \delta_{sat2}}{i_a \cos(\Theta + \delta_{sat2})} \quad (12)$$

4. Za tako dobijenu aproksimativne vrednost X_{qsat2} i δ_{sat2} , određuje se nove vrednosti unutrašnjeg napona e_{int3} :

$$e_{int3} = \sqrt{(e_a \cos \delta_{sat2} + x_{dsat} i_a \sin(\Theta + \delta_{sat2}))^2 + (x_{qsat2} i_a \cos(\theta + \delta_{sat2}))^2} \quad (13)$$

Zatim se, za ovu vrednost unutrašnjeg napona e_{int3} , određuju odgovarajuće vrednosti (treća aproksimacija) ugla opterećenja (δ_{sat3}) i zasićene reaktanse po q-osi, X_{qsat3}

$$\sin \delta_{sat3} = \frac{p x_{dsat}}{e_a e_{int3}} \quad (14)$$

$$x_{qsat3} = \frac{e_a \cdot \sin \delta_{sat3}}{i_{qsat3}} = \frac{e_a \cdot \sin \delta_{sat3}}{i_a \cdot \cos(\Theta + \delta_{sat3})} \quad (15)$$

Sa daljim produžavanjem iterativnih proračuna brzo konvergira niz vrednosti $\sin(\delta_{qsat4})$ i x_{qsat4} , $\sin(\delta_{qsat5})$ i x_{qsat5} , ..., $\sin(\delta_{qsatN})$ i x_{qsatN} , $\sin(\delta_{qsatN+1})$ i $x_{qsatN+1}$ tako da dalji nastavak proračuna nije neophodan. Šta više, rezultati proračuna na razmatranom primeru (poglavlje 5) pokazuje manje odstupanje vrednosti x_{qsat3} , $\sin(\delta_{sat3})$ od referentnih rezultata u odnosu na odstupanje vrednosti x_{qsat3} , $\sin(\delta_{sat3})$ i x_{qsat4} , $\sin(\delta_{sat4})$. Na osnovu toga se predlaže da se za tražene vrednosti ugla opterećenja (δ_{sat}) i zasićene reaktanse po q-osi, X_{qsat} , usvoje sračunate vrednosti x_{qsat3} i $\sin(\delta_{sat3})$ prema izrazima (14) i (15).

5. Primer proračuna reaktansi turbogeneratora u radnim uslovima po novoj metodi i provera tačnosti

Ilustracija primene nove metode za proračun zasićenih sinhronih reaktansi se ilustruje na primeru ispitivanog generatora od 588 MVA pri opterećenju sa nominalnom snagom od 500 MW i raznim reaktivnim snagama [8]. Kako za primenu metode koja se predlaže nije potrebno meriti ugao opterećenja (δ), već samo vrednosti napona (U), aktivne (P) i reaktivne snage (Q) generatora u razmatranim režimima, to je za ocenu tačnosti potrebno da se ovi rezultati uporede sa odgovarajućim vrednostima koji su dobijeni u literaturi [8] po dva postupka: (i) vrednosti zasićenih sinhronih reaktansi, X_{dsat} i X_{qsat} , se dobijaju metodom podešavanja uz merenje ugla opterećenja (δ), i (ii) rezultatima proračuna tih reaktansi po metodi konačnih elemenata koji su korišćeni kao kontrolni postupak.

PRIMER:

Podaci za turbogenerator s:

588 MVA, $\cos(\Theta_R)=0,90$ ($P_R=500$ MW),

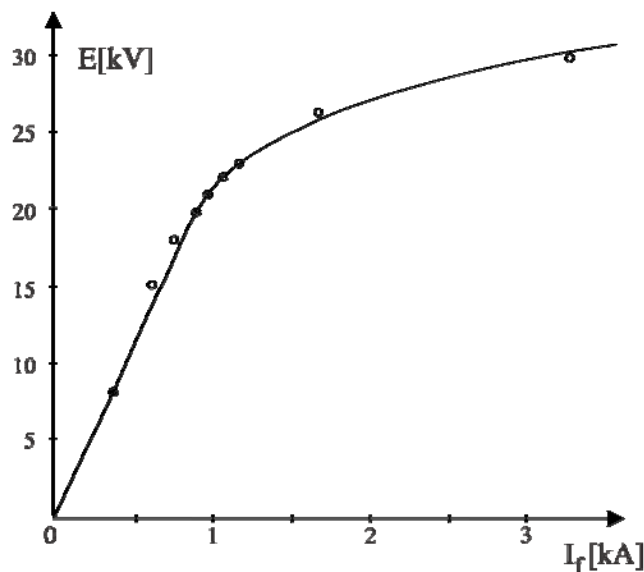
$$E_b = 22/\sqrt{3} \text{ kV i } I_b = 15,437 \text{ kA,}$$

$$x_{du} = 2,76 \text{ i } x_t = 0,17,$$

$$I_{f0} = 0,932\sqrt{2} \text{ A i } I_{fb} = 2,423\sqrt{2} \text{ A,}$$

gde su I_{f0} i I_{fb} , redom, vrednosti pobudne struje generatora u praznom hodu (za nominalni napon $E_a = E_b$) i nominalnom režimu ($E_b, I_b, \cos(\Theta_R)$).

Kriva magnećenja generatora u praznom, $E(i_f)$, je data na sl. 5..



Slika 5. Kriva praznog hoda (magnećenja) razmatranog turbogenerators (588 MVA) sa zasićenim magnetnim kolom napona

Postupak proračuna datog turbogenerators (588 MVA) po predloženoj metodi se odvija sledećim redom.

1. Prvo se određuju vrednosti zasićene sinhronne reaktanse ($X_{s,sat}$) na osnovu krive magnećenja generatora $E(i_f)$ za vrednost napona iza reaktanse rasipanja (X_t), po postupku koji je dat u poglavlju 2. Odgovarajuća (ili prva aproksimativna) vrednost ugla opterećenja (δ_{sat1}), $\delta_{sat1} = \arcsin(\sin(\delta_{sat1}))$, je sračunata vrednost $\sin(\delta_{sat1})$ po izrazu (9).

2. Pretpostavi se da je vrednost zasićene reaktanse po d -osi $X_{dsat} = X_{s,sat}$.

3. Vrednost zasićene reaktansi za poprečnu q -osu generatora, $X_{q,sat}$, i vrednost ugla opterećenja (δ) se određuju iz proračuna na osnovu odgovarajućih jednačina (10)-(15) po postupku koji je opisan u poglavlju 4.

U cilju provjere tačnosti, rezultata dobijeni po navedenim postupcima 1, 2 i 3 su dati u tabeli 1 i tabeli 2, uporedo sa rezultatima koji su dobijeni u [8] po složenijim i zahtevnijim postupcima proračuna.

Tabela 1. Rezultati proračuna ugla opterećenja (δ): po novoj metodi ($\delta_{\text{sat2-p}}$), uporedo sa rezultatima iz [8] – pomoću merenja (δ_{meas}) i proračuna (δ_{FEM}), kao i proračunima po standardnoj metodi za nezasićenu (δ_{unsat}) i zasićenu (δ_{sat1}) sinhronu reaktansu, za aktivnu snagu (500 MW) i date

P_G MW	Q_G Mvar	P/S_{GR} pu	Q/S_G pu	δ_{meas} grad	δ_{FEM} grad	δ_{unsat} grad	δ_{sat1} grad	$\delta_{\text{sat2-p}}$ grad
500	268,1	0,85	0,4559	39	38,5	45,46	41,13	39,79
500	137,7	0,85	0,2342	42,5	46,2	53,96	49,89	47,43
500	99,91	0,85	0,1699	48,5	48,7	56,88	52,88	49,96
500	0	0,85	0	56,5	56	65,66	62,41	58,15
500	-43,7	0,85	-0,074	61,3	61,1	69,96	67	61,62
500	-110,8	0,85	-0,189	67	66,8	77,01	74,94	67,93
500	-167,3	0,85	-0,285	72,5	72,8	83,29	81,5	72,53
500	-260,3	0,85	-0,443	82	80,5	86,09	87,02	77,05

reaktivne snage.

Tabela 2. Rezultati proračuna vrednost zasićenih reaktansi X_{dsat} i X_{qsa} po novoj metodi (X_{qsat2} za X_{dsat1}), uporedo sa rezultatima iz [8] - pomoću ($X_{\text{dsat-m}}$ i $X_{\text{dsat-m}}$) i proračunima po MKE (X_{dFEM} i X_{qFEM}), i prema standardnoj metodi za $X_{\text{dsat1}}=X_{\text{qsat2}}=X_{\text{s,sat}}$, za snagu (500 MW) i date reaktivne snage turbogeneratora

P_G MW	Q_G Mvar	P/S_G R pu	Q/S_G pu	Metoda podešavanja sa merenjem ugla opter. [8]		Metoda konačnih elemenata [8]		Standardna metoda sa zasićenem $X_{\text{ds1}}=X_{\text{qs1}}$	Nova metoda podešav anja [8] $X_{\text{qsat2-adj}}$ (za X_{dsat1})
				$X_{\text{dsat-m}}$	X_{qsatm}	X_{dFEM}	X_{qFEM}		
500	268,1	0,85	0,456	2,02	1,81	1,89	1,76	1,9312	1,770
500	137,7	0,85	0,234	1,965	1,82	2,01	1,79	2,0738	1,827
500	99,9	0,85	0,17	2,131	1,86	2,11	1,88	2,1122	1,837
500	0	0,85	0	2,251	1,91	2,16	1,91	2,2507	1,876
500	-43,7	0,85	-0,074	2,321	1,92	2,21	1,91	2,2971	1,873
500	-110,8	0,85	-0,188	2,421	1,96	2,23	1,91	2,3968	1,876
500	-167,3	0,85	-0,285	2,451	1,95	2,24	1,9	2,4299	1,811
500	-260,3	0,85	-0,443	2,05	2,03	2,35	1,9	2,5099	1,567

6. Zaključak

U radu je prikazana nova metoda koja se predlaže za određivanje vrednosti zasićenih reaktansi turbogenerators, X_{dsat} i X_{qsa} , i ugla opterećenja (δ). Rezultati proračuna se približno poklapaju sa onim koji su dobijeni u literaturi [8] po složenijim i zahtevnijim postupcima. Na osnovu dobijenih rezultata i proverena se pokazuje da je dati metod verifikovan i da se može predložiti za indirektno određivanje parametara i karakteristika sinhronih turbogenerators, u radnim uslovima.

Zahvalnica

Ovaj rad je podržalo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije o okviru projekta TR33024, „Povećanje energetske efikasnosti, pouzdanosti i raspoloživosti elektrana EPS-a utvrđivanjem pogonskih dijagrama generatora primenom novih mernih metoda ispitivanja“.

Literatura

- [1] Grupa autora, "Prenos i distribucija električne energije"-Priručnik, Poglavlje "Karakteristike mašina" str 149-198, Građevinska knjiga Beograd, 1964.g.
- [2] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, "Electrical machines", Naučna knjiga Beograd, 1962. god, page 560. (Serbian translation).
- [3] Standard IEC 34-4/1985, "Rotation electrical machines", Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests".
- [4] IEEE Std 115 – 1995.
- [5] M.M.Kostić, "Novo pravilo za određivanje Potjeove reaktanse za relevantna opterećenja turbogenerators", "Elektroprivreda", No 3, 2010, str. 210-221
- [6] Hunt J.P., T., Capability Curves and Excitation Requirements of saturated Cylindrical Rotor Synchronous Machines, *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-86, No. 7, July 1967, pp. 855-859.
- [7] IEEE Std. 1110-2002, *IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses*, USA, 2003.
- [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] Demardash N.A., Hamilton H.B., A Simplified Approach to Determination of Saturated Synchronous Reactances of Large Turbogenerator Under Load, *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. PAS-95, No. 2, pp. 560-569.
- [10] Chari M.V.K., Munich S.H., Tandon S.C., Load Characteristics of

- [11] Mello F.P., Hannet L.N., Representation of Saturation in Synchronous Machines, *IEEE Trans. on Pow. Syst, Vol. PWRS-1, No. 4*, 1986, pp. 8-14.
- [12] Munich S.H., Schulz R.P., Baker D.H., Sharma D.K., Fish J.H., Saturation Function for Synchronous Generator from Finite Elements, *IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. EC 2, No. 4*, 1987, pp. 680-692.
- [13] Vas P., Hallenius K.E., Brown J.E., Cross-Saturation in smooth-air-gap Electrical Machines, *IEEE Trans. on En Con. Vol. EC 1, No. 1*, pp. 103-112.
- [14] El-Serafi A.M., Abdullah A.S., Saturated Synchronous Reactance of Synchronous Machine, *IEEE Trans. on En. Con. Vol. 7*, 1992, pp. 570-579.

Abstract. A new method for determining the operational saturated synchronous reactances ($X_{d,sat}$ and $X_{q,sat}$) and the rotor angle (δ), under the normal operating condition, was presented in this paper. At the power station the voltages (U), active (P) and reactive power (Q) are recorded. It is necessary to fit the no load generator saturation curve with appropriate analytical function. The output results obtained by corresponding calculations includes values of $X_{d,sat}$, $X_{q,sat}$ and power angle δ , that reflect the level of generator saturation. Procedure by proposed method is following:

- first the synchronous reactance $X_{d,sat}$ value is determined by no load saturation curve using the voltage behind from leakage reactance (X_l) value or the voltage behind Potier reactance (X_P), then
- quadrature-axis reactance ($X_{q,sat}$) and load angle (δ) are determined by corresponding per-unit equations that connects generator parameters and characteristics d-axis and q-axis.

The proposed method was verified using reported case study of 500 MW generator [1], where are used, besides U , P , Q and $E(i)$ curve, the recorded rotor load angle value δ at rated load. Obtained results by new method differ up to 1-2 % from results in [1] obtained by more complex procedure, i.e. (i) by method with direct measurement of power angle δ , and corresponding $X_{d,sat}$, $X_{q,sat}$ values determined by indirect method, i.e. on the base by corresponding per-unit equations, and (ii) by the finite-element method, when $X_{d,sat}$, $X_{q,sat}$ and power angle (δ) values are calculated.

Obtained results proved that synchronous reactance $X_{d,sat}$ values can be as much as 30% below unsaturated vales ($X_{d,unsat}$), and measured values $X_{q,sat}$ can be up to 20 % below $X_{d,sat}$ values. Based on obtained results the proposed method is verified for indirect measurement of synchronous turbine-generator parameters and characteristics under load condition.

Keywords: turbine-generator, saturation synchronous reactances ($X_{d,sat}$ and $X_{q,sat}$), rotor (load) angle (δ), leakage reactance, Potier reactance, no load curve, active power, reactive power.

Method for Indirect Determination of Turbogenerator Parameters under Operating Condition

Rad primljen u uredništvo 12.09.2014. godine
Rad prihvaćen 10.10.2014. godine

