Doprinos proračunu i analizi zavisnosti između reaktanse rasipanja i Potjeove reaktanse sinhronih generatora

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

Originalni naučni rad
UDC: 621.313.322.011.23
DOI: 10.5937/tehnika1504647K

U radu se analiziraju stavovi o zavisnosti vrednosti Potjeove reaktanse od režima opterećenja generatora i tačnosti odgovarajuće metode za određivanje pobudne struje sinhronih mašina. Razmotrena je i tačnost postupka, koji je predložen za tu namenu, a koji se zasniva na reaktansi rasipanja i krivi magnećenja opterećene mašine. Kriva magnećenja opterećene mašine se dobija tako što su vrednosti odgovarajućih pobudnih struja sa krive praznog hoda uvećavane za vrednost povećanja struje pobude zbog dodatnog zasićenja rotora u režimu opterećene mašine. Uspostavljena je nova analitička zavisnost između vrednosti Potjeove reaktanse i reaktanse rasipanja. Pogodno je da se veliki generatori karakterišu sa Potjeovom reaktansom za nominalni režim, posebno kada su u pitanju proračuni struje pobude pri visokim reaktivnim opterećenjima.

Ključne reči: raktansa rasipanja, potjeova reaktanse, zasićenje rotora, pobudna struja, reaktivna snaga

1. UVOD

Postupci za određivanje pobudne struje u nominalnom režimu (I_{fn} i i_{fn}) i odgovarajuće promene napona (ΔU_n i Δu_n) su detaljno definisani u Standardu IEC 34-4 za sinhronne generatore [1], kao i u [2, 3]. Zadatak postaje još složeniji kada je potrebno utvrditi stvarne pogonske dijagrame, P-Q krive generatora, na osnovu parametara mašine u pogonskom stanju [4]. Problem je u tome što treba uzeti u obzir uticaj zasićenja magnetnog kola sinhronog generatora u razmatranim režimima opterećenja.

Polazi se od utvrđivanja zavisnosti komponente pobudne struje za magnećenje mašine od zajedničkog magnetnog fluksa, odnosno od elektromotorne sile iza reaktanse rasipanja. Najveći problem je kako što tačnije uračunati dodatno zasićenje magnetnog kola rotora zbog rasutog fluksa namotaja pobude u režimima sa opterećenjima, kada su pobudne struje za 2 do 4 puta veće, u odnosu na iste u režimu praznog hoda. Navedeni uticaj se uračunava preko povećanja reaktanse rasipanja statora (x_l), tako što je odgovarajuća Potjeova reaktansa $x_P > x_l$ (reaktanse rasipanja namotaja statora), pa je i odgovarajuća elek-

tromotorna sile iza Potjeove reaktanse $e_P = u + x_P i > u + x_l i = e_l$, tj. veća je od elektromotorne sile iza reaktanse rasipanja.

Ranija istraživanja su pokazala da je odnos $x_P/x_l = 1.05 \div 1.3$ kada su u pitanju turbogeneratori [5], i da postaje $x_P \approx x_l$, tek pri naponima za 20-30 % iznad nominalnih vrednosti [5]. Tada je Potjeva reaktansa, koja se može odrediti poznatim metodama, praktično jednaka reaktansi rasipanja koja se ne može tačno proračunati niti izmeriti. Sa primenom metode konačnih elementa za proračun magnetnih polja mašine, moguć je tačniji proračun reaktansi rasipanja [6].

Tu je pokazano da vrednost reaktanse rasipanja ostaje stalna, $x_l \approx \text{const}$, za opterećenja generatora po struji do $120\% I_{Gn}$. U [7] je publikovana relativno jednostavna metoda koja omogućava da se merenjem odrede vrednosti reaktanse rasipanja i Potjeove reaktanse. Rezultati merenja reaktansi, X_l i X_P , su dati za malu sinhronu mašinu (3.5 kVA, 230 V) sa cilindričnim rotorom.

Iz dobijenih zavisnost reaktanse rasipanja statora, $X_l(\Omega)$ od struje indukta, $I_G(A)$, se vidi da vrednost ove reaktanse ostaju nepromenjena sve dok je opterećenje po struji $\leq 130\%$. Na osnovu zavisnosti Potjeove reaktanse, $X_P(\Omega)$, od napona na priključku mašine, $U_G(V)$, se zaključuje da se ona bitnije menja sa promenom vrednosti napona, i da konvergira nižim vrednostima, $X_P \rightarrow X_l$, tek pri naponu $U_G \geq 1.2 \div 1.3 U_{Gn}$.

Adresa autora: Miloje Kostić, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“ Beograd, Koste Glavinića 8a

Rad primljen: 10.12.2014.

Rad prihvaćen: 09.06.2015.

Za generatore velikih snaga (460 MVA i 500 MVA) u [8] je pokazano da $X_P \rightarrow (1.4 \div 1.5)X_l$ u režimima oko nominalnog. Do sličnih vrednosti za X_P se dolazi i u radovima [9, 10]. Razlika u vrednostima odnosa (X_P/X_l), u odnosu na pomenute vrednosti u [7], se objašnjava činjenicom da je znatno veći uticaj dodatnog zasićenja magnetnog kola rotora kod velikih generatora u režimima opterećenja.

Naime, u području visokih reaktivnih opterećenja generatora od vrednost $Q_n \div Q_{max} = (0.5 \div 0.8)S_n$, napon generatora se menja od vrednosti $1.05U_n \div 1.08U_n$, a elektromotorne sile generatora (E_p ili E_l) se povećavaju, čak do $1.20U_n \div 1.30U_n$. To je i razlog da vrednosti Potjeove reaktanse konvergiraju nekoj stalnoj vrednosti ($X_{P,min}$) koja je znatnije veća od reaktanse rasipanja, $X_P \rightarrow X_{P,min} > X_l$.

Kako je $X_{P,min} \approx const \approx X_{P,n}(X_{P,n} - \text{Potjeova reaktansa u nominalnom režimu } (P_n \text{ i } Q_n))$, to se može preporučiti da se veliki generatori karakterišu sa datom nominalnom reaktansom $X_{P,n}$. Napred navedeno bilo je motiv da se:

- razvije postupak za tačnije određivanje zavisnosti Potjeove reaktanse od reaktivnog opterećenja, $X_P = f(Q/Q_n)$, [9];
- utvrdi povećanja struje pobude ($\Delta i_{f,r}$) zbog dodatnog zasićenja magnetnog kola na delu rotora pri opterećenju, i da definiše krivu magnećenja opterećene sinhronne mašine $i_f(e_l)$, [9, 10], kao i
- uspostavi analitičku zavisnost između reaktansi X_P i X_l , kao i vrednosti pomenute veličine $\Delta i_{f,r}$.

U ovom radu pomoću pogodne teorijske analize koja je ilustrovana i grafičkim prikazom, rešava se i zadatak naveden u tački 3. i dolazi se do zaključka da je pogodno da se veliki generatori karakterišu sa Potjeovom reaktansom $X_{P,n}$, posebno kada su u pitanju proračuni i analize režima sa visokim reaktivnim opterećenjima, $Q_G = Q_n \div Q_{max}$.

2. ODREĐIVANJE POBUDNE STRUJE POTJEOVIM METODOM

Komponenta pobudne struje, koja služi za stvaranje zajedničkog (glavnog) fluksa mašine, se određuje za prethodno utvrđenu vrednost rezultantne (zajedničke) elektromotorna sile ili, kako se to češće navodi u literaturi, elektromotorne sile iza reaktanse rasipanja (e_l) ili iza Potjeove reaktanse (e_p), slika 1.

Zatim se za tako dobijenu elektromotornu silu, e_p ili e_l , pomoću karakteristike praznog hoda $i_{f0}(e_0) \equiv i_{f0}(e_p)$ određuje vrednost odgovarajuće (komponente) pobudne struje, i_{fP} ili i_{fL} , koja je potrebna za održavanje odgovarajućeg zajedničkog fluksa mašine [1-3].

Da bi se odredila komponenta pobudne struje koja je potrebna za održavanje zajedničkog fluksa mašine,

prethodno se mora odrediti odgovarajuća elektromotorna sila iza reaktanse rasipanja namotaja statora (E_l), čija se vrednost izračunava pomoću izraza:

$$E_l = U + X_l I \quad (1)$$

ili, u relativnim jedinicama nominalnog napona ($U_n=1$) i nominalne struje ($I_n=1$), kako je to uobičajeno [1-3]:

$$e_l = u + x_l i \quad (2)$$

Pretpostavljeno je da je data vrednost reaktanse rasipanja (x_l) i da je poznata kriva magnećenja opterećene mašine $i_f(e_l)$, ili da je određena pomoću postupka navedenog u [9, 10].

Za utvrđenu vrednost elektromotorne sile iza reaktanse rasipanja (e_l), pomoću krive magnećenja opterećene mašine $i_f(e_l)$, određena je vrednost odgovarajuće (komponente) pobudne struje (i_{fL}) koja je potrebna za održavanje zajedničkog (rezultantnog) fluksa mašine (slika 1).

Na sličan način se određuje tražena komponenta pobudne struje, koja je potrebna za održavanje zajedničkog fluksa mašine, i po Potjeovoj metodi.

Prvo se određuje elektromotorna sila iza Potjeove reaktanse (E_p), čija se vrednost izračunava pomoću izraza:

$$E_p = U + X_P I \quad (3)$$

ili, u relativnim jedinicama nominalnog napona ($U_n=1$) i nominalne struje ($I_n=1$)

$$e_p = u + x_P i \quad (4)$$

Uz poznatu vrednost Potjeove reaktanse (x_P), dovoljno je poznavati krivu magnećenja mašine u praznom hodu $i_{f0}(e_0) \equiv i_{f0}(e_p)$.

Za utvrđenu vrednost elektromotorne sile iza Potjeove reaktanse (e_p), pomoću krive magnećenja $i_{f0}(e_p)$, određena je vrednost komponente pobudne struje (i_{fP}) za održavanje zajedničkog fluksa mašine (slika 1).

Sušтина opisane metode je da se dodatno zasićenje magnetnog kola rotora zbog rasutog fluksa pobude u režimima opterećenja, kada su pobudne struje za 2-4 puta veće nego u praznom hodu, uračunava preko povećanja reaktanse rasipanja statora (x_l), na vrednost Potjeove reaktanse $x_P > x_l$, pa je elektromotorna sila iza Potjeove reaktanse, $e_P = u + x_P \cdot i > u + x_l \cdot i = e_l$, tj. veća je od elektromotorne sile iza reaktanse rasipanja (slika 1).

Za tako dobijenu elektromotornu silu iza Potjeove reaktanse (e_p), pomoću karakteristike praznog hoda, $i_{f0}(e_0)$, određuje vrednost odgovarajuće (komponente) pobudne struje (i_{fP}) koja je potrebna za održavanje zajedničkog fluksa mašine, slika 1.

Slika 1 - Vektorski dijagram elektromotornih sila iza Potjeove reaktanse (e_p) i iza reaktanse rasipanja (e_r), i vrednosti pobudnih struja, i_{fr} i i_{fe} , koje su određene sa zavisnosti $i_{fr}(e_r)$ i $i_{fo}(e_p)$

3. UPOREDNI PRIKAZ PRORAČUNA POBUDNE STRUJE GENERATORA POMOĆU REAKTANSE RASIPANJA I POMOĆU POTJEOVE REAKTANSE

Postupak koji se predlaže omogućava da se odrede vrednosti povećanja pobudne struje zbog promena fluksa rasipanja namotaja pobude opterećene mašine, tj. zbog dodatnog zasićenja magnetnog kola generatora na delu rotora ($\Delta i_{fr,L}$). Time se menja i način utvrđivanja vrednosti pobudne struje sinhronih generatora u nominalnom režimu (I_{fn}), kao i vrednosti struje pobude (I_f) u radnim režimima koji se razlikuju od nominalnog. Postupak se zasniva na dve činjenice:

- komponentu struje pobude koja kompenzuje uticaj dodatnog zasićenja magnetnog kola mašine na delu rotora ($\Delta i_{fr,L}$) opterećene sinhronne mašine, treba posebno utvrditi za konkretne režime, dok se
- vrednost komponente struje pobude koja odgovara zasićenju magnetnog kola na delu statora ($\Delta i_{fs,L}$) određuje pomoću karakteristike praznog hoda po postupku koji je dat u [1], slika 2.

Na slici 2 su date relevantne karakteristike, i to:

- prava zavisnosti pobudne struje za magnećenje međugvožđa mašine, $i_{fs}(e)$,
- kriva praznog hoda, $i_{fo}(e)$, i
- kriva magnećenja opterećene mašine, crta-crta kriva $i_f(e) \equiv i_{fr}(e)$.

Povećanja pobudne struje (Δi_{fr}), zbog dodatnog zasićenja rotora od rasutog fluksa u režimu opterećenja mašine, se može izračunati po Potjeovoj metodi (slika 1), pomoću vektorske jednačine (5):

$$\dot{i}_{f,n} = \dot{i}_{fp}(e_p) + \dot{i}_{fa} \quad (5)$$

ili pomoću reaktanse rasipanja x_ℓ i krive magnećenja opterećene mašine, kada je $i_{fr}(e_\ell) = i_{fo}(e_\ell) + \Delta i_{fr,L}$, tj. iz pravouglog trougla OF_2F_2' (slika 2), odnosno pomoću vektorske jednačine:

$$\dot{i}_{f,n} = \dot{i}_{fo}(e_\ell) + \Delta i_{fr,L}(e_\ell) + \dot{i}_{fa} \quad (6)$$

Slika 2 - Postupak za određivanje priraštaja struje pobude zbog promena fluksa rasipanja pobudnog namotaja, nominalno opterećene sinhronne mašine [10]

Tražena vrednost Potjeove reaktanse (x_p) dobija se iz jednačine (7), [10, 11]. To je vrednost reaktanse rasipanja $x_\ell = x_p$ za koju se dobija $\Delta i_{fr,L} \approx 0$.

$$0 = \sqrt{i_f^2 - [(x_d - x_p)(s/u) \cdot \cos(\varphi + \delta)]^2} - [i_{fl} + (x_d - x_p)(s/u) \cdot \sin(\varphi + \delta)] \quad (7)$$

4. ZAVISNOST POVEĆANJA POTJEOVE REAKTANSE X_P/X_ℓ I VREDNOSTI PARAMETRA $C_F = \Delta i_{fr,L}/\Delta i_{fs,L}$

Za određivanje pobudne struje pomoću reaktanse rasipanja, potrebno je raspolagati sa dovoljno tačnom krivom magnećenja opterećene mašine, $i_f(e)$, odnosno sa zavisnosti vrednosti povećanja struje pobude zbog dodatnog zasićenja rotora Δi_{fr} . Uobičajeno se vrednosti Δi_{fr} određuju ili procenjuju u vidu odnosa $C_f = \Delta i_{fr} / \Delta i_{fs}$ čija se vrednost manje ili više menja. Naime, kriva magnećenja opterećene mašine, $i_f(e)$, koja se određuje pomoću krive praznog hoda $i_{fo}(e)$, slika 3, je tačna koliko je tačno utvrđena vrednost parametra C_f , tj. povećanja vrednosti pobudne struje zbog dodatnog zasićenja rotora $\Delta i_{fr} = C_f \Delta i_{fs}$. Pretpostavka je da tu postoje razlozi za određenu grešku, koji mogu imati dosta sličnosti sa uzrocima koji dovode do greške kada je u pitanju Potjeova metoda. U ovom poglavlju, biće analizirana i utvrđena analitička zavisnost između koeficijenta povećanja Potjeove reaktanse X_P/X_ℓ i vrednosti navedenog parametra $C_f = \Delta i_{fr} / \Delta i_{fs}$.

4.1. Upporedna analiza vrednosti parametra C_f , reaktanse rasipanja (x_ℓ) i odnosa (x_p/x_ℓ)

Već na prvi pogled se može uočiti određena zavisnost između koeficijenta povećanja Potjeove reaktanse (X_P/X_ℓ) i vrednosti navedenog parametra $C_f = \Delta i_{fr,L} / \Delta i_{fs,L}$, tj. da rastu vrednosti odnosa X_P/X_ℓ sa povećanjem vrednosti parametra C_f . U cilju analize, na

slici 3, pored stvarne karakteristike praznog hoda $i_{f0}(e_0) \equiv i_{fp}(e_P)$, nacrtane su i tri hipotetičke krive magnećenja opterećene mašine, $i_{fl}(e_l)_1$, $i_{fl}(e_l)_2$ i $i_{fl}(e_l)_3$. Svaka od ove tri krive je nacrtana tako što su, za date vrednosti elektromotorne sile e_l , vrednosti odgovarajućih struja pobude sa krive praznog hoda $i_{f0}(e_l)$ uvećavane za iznos $\Delta i_{fl,L} = C_f \cdot \Delta i_{fs,L}$. Tako su vrednosti pobudnih struja za krive magnećenja opterećene mašine, $i_{fl}(e_l)$, izračunavate korišćenjem formule

$$i_{fl}(e_l) = i_{f0}(e_l) + C_f \cdot \Delta i_{fs,L} \quad (8)$$

Pri konstrukciji navedenih krivi magnećenja opterećene mašine, $i_{fl}(e_l)$, pretpostavljeno je da su konstantne vrednosti parametra $C_f = \Delta i_{fl,L} / \Delta i_{fs,L}$, u čitavoj oblasti promena vrednosti pobudnih struja i napona, ali da su u sva tri slučaja te vrednosti različite. Tako su za pretpostavljene vrednosti parametra, $C_{f1} = 0.5$, $C_{f2} = 1.0$ i $C_{f3} = 1.5$, redom, za 1, 2. i 3. krivu $i_{fl}(e_l)$, sračunavate apscise traženih krivih magnećenja opterećene mašine, po formuli:

$$i_{fl}(e_l)_1 = i_{f0}(e_l) + 0.5 \cdot \Delta i_{fs,L} \quad (9)$$

$$i_{fl}(e_l)_2 = i_{f0}(e_l) + 1.0 \cdot \Delta i_{fs,L} \quad (10)$$

$$i_{fl}(e_l)_3 = i_{f0}(e_l) + 1.5 \cdot \Delta i_{fs,L} \quad (11)$$

Slika 3 - Grafički postupak za određivanje reaktansi rasipanja (x_l) pomoću krivih magnećenja opterećene mašine, $i_{fl}(e_l)_1$, $i_{fl}(e_l)_2$ i $i_{fl}(e_l)_3$ za date vrednosti elektromotorne sile $e_l = e_P = u + x_P \cdot i$

U tabeli 1 su date, grafičkim postupkom utvrđene, vrednosti reaktansi rasipanja, x_l , za sva tri analizirana slučaja sa slika 5, koja se karakterišu različitim vrednostima parametra $C_f = \Delta i_{fl,L} / \Delta i_{fs,L}$. Zatim su sračunate vrednosti koeficijenta povećanja Potjeove reaktanse X_P / X_l , i date uporedo sa odgovarajućim vrednostima parametra $C_f = \Delta i_{fl,L} / \Delta i_{fs,L}$. Na osnovu podataka u tabeli 1, zaključuje se da većim vrednostima parametra C_f , odgovaraju veće vrednosti koeficijenta povećanja Potjeove reaktanse x_P / x_l , (po pretpostavci je $x_P = 0.25$).

pa su tako dobijene zavisnosti, $i_{fl}(e_l)_1$, $i_{fl}(e_l)_2$ i $i_{fl}(e_l)_3$, prikazane grafički na slici 3.

Potom su za reaktivna opterećenja mašine ($\cos \varphi = 0$), pri nominalnoj vrednosti napona $u = U / U_n = 1$ i opterećenja po struji, $i = I / I_n$, redom, od $i = 0.8$, 1.2; 1.6 i 2.0, prvo određene vrednosti elektromotorne sile iza Potjeove reaktanse, $e_P = u + x_P \cdot i$, po poznatom postupku, za vrednost reaktanse $x_P = 0.25$. Dalje su, za tako dobijene vrednosti $e_l = e_P$, za svaku od pretpostavljenih krivih magnećenja opterećene mašine, grafičkim postupkom (slika 3) određene odgovarajuće vrednosti reaktanse rasipanja, kao količnik pada napona na toj reaktansi i struje, tj:

$$x_l = (e_l - u) / i \quad (12)$$

Interesantno je da se za date stalne vrednosti parametra C_f , dobijaju Potjeove reaktanse približno stalne vrednosti, $x_P \approx \text{const}$, u čitavoj oblasti promena vrednosti pobudnih struja i napona, ali su te vrednosti bile različite za svaku od datih krivih magnećenja opterećene mašine, $i_{fl}(e_l)_1$, $i_{fl}(e_l)_2$ i $i_{fl}(e_l)_3$, slika 3. Očigledno je da važi i obrnuti zaključak da bi Potjeova reaktansa mogla biti stalne vrednosti ukoliko je konstantna vrednost odnosa $C_f = \Delta i_{fl,L} / \Delta i_{fs,L} = \text{const}$ u oblasti posmatranih opterećenja. Tako su, pomoću sl. 3, utvrđene vrednosti reaktansi rasipanja za datu i stalnu vrednost Potjeove reaktanse, $x_P = 0.25$

Tabela 1. Uporedne vrednosti vrednosti parametra (C_f), reaktanse rasipanja (x_l) i odnosa x_P / x_l

Krivi magnećenja opterećene mašine, sl.6:	$i_{fl}(e_l)_1$	$i_{fl}(e_l)_2$	$i_{fl}(e_l)_3$
Vrednosti $C_f = \Delta i_{fl,L} / \Delta i_{fs,L}$	0.5	1.0	1.5
Vrednosti reaktanse, x_l	0.205	0.175	0.160
Povećanja Potjeove reaktanse, x_P / x_l	1.22	1.43	1.56
- Grafički postupak, sl.6:	1.225	1.414	1.581
- Izraz (23): $x_P / x_l = \sqrt{1 + C_f}$			

Pomoću krive praznog hoda, $i_{f0}(e_0) \equiv i_{fp}(e_P)$, i krive magnetčenja opterećenog mašine, $i_{f\ell}(e_\ell)$, (slika 5.), i pogodno nacrtanih konstrukcija za uporedno određivanje odgovarajućih vrednosti Potjeove reaktanse, x_P , i reaktanse rasipanja, x_ℓ , utvrđena je analitička zavisnost između izmeđ u vrednosti parametra (C_f) i koeficijenta povećanja Potjeove reaktansi (x_P/x_ℓ). Navedena konstrukcija (slika 3) za uporedno određivanje odgovarajućih vrednosti Potjeove reaktanse, x_P i reaktanse rasipanja, x_ℓ , biće objašnjena detaljnije.

Pomoću slike 4 se dolazi do jednakosti

$$\frac{x_p \cdot i_n}{x_\ell \cdot i_n} = \frac{p'_n p_n}{L'_n L_n} = \frac{p'_{n-1} p'_n}{p'_{n-1} L'_n} = \frac{p_n X}{p_{n-1} L_n} = \frac{p_n L_{n+1} \cdot (x_\ell / x_p)}{p_{n-1} L_n} \quad (13)$$

$$P_n L_{n+1} = \Delta i_{frLn} \quad (14)$$

$$P_{n-1}L_{n+1} = \Delta_{frLn-1}^i P_{n-1} \quad (15)$$

$$x_p / x_\ell = \sqrt{(1 + C_f)} \quad (16)$$

U tabeli 1 su, pored vrednosti x_P/x_I određenih grafičkim postupkom, date i sračunate vrednosti po izrazu (16). Logično je pretpostaviti, da je vrlo malo

Potjeova reaktansa (x_p) se obično daje kao konstantna vrednost za generator, iako se stvarne vrednosti menjaju sa promenom opterećenja. Uobičajeno se daje vrednost x_p koja odgovara nominalnom režimu (P_n , Q_n , U_n), ali to treba uzeti sa rezervom zbog nemogućnosti proizvođača da istu utvrdi ispitivanjem, ali i zbog činjenice da generator pri nominalnom opterećenju (P_n , Q_n) češće radi pri naponu koji je veći od nominalne ($U_G \geq U_{Gn}$). Imajući to u vidu, kao i moguće promene karakteristika magnetnog kola generatora u radu, korisno je, i preporučuje se [4], da se odredi zavisnost Potjeove reaktanse za dati generator i aktuelne naponske prilike u čvoru mreže elektroenergetskog sistema (EES) na koji je isti priključen, kao u [9, 10].

Sprovedena su eksperimentalna i teorijska ispitivanja kako bi se utvrdilo eventualno postojanje širih dijapazona reaktivnih opterećenja za koje bi Potjeova reaktansa imala približno stalne vrednosti, $x_p \approx \text{const}$. U tom slučaju bi mogla biti pogodan parametar za karakterisanje generatora.

Vrednosti Potjeove reaktanse x_P su prvo određene iz ogleda reaktivnih opterećenja (za $q_{\cos\varphi} \approx 0=0.15 \div 0.70$), tabela 2, a zatim i za režime datih opterećenja ($p_n, q_n, u_G = u_{Gn}$), tabela 3.

Na osnovu podataka u tabeli 2, zaključuje se da se sa rastom opterećenja u ogledu reaktivnih opterećenja ($\cos\varphi_{sc}\approx 0$, ili $P_r\approx 0$, $Q=0.1\div 0.75S_N$) smanjuju vrednosti Potjeove reaktanse. Interesantno je da vrednosti Potjeove reaktanse $x_P(r.j.)$ u režimima datih opterećenja (P, Q, U), praktično, zavise samo od vrednosti reaktivnih snaga bez obzira na nivo aktivnih opterećenja (P), što se vidi kada se uporede odgovarajuće vrednosti $x_P(p_i, q_i, u_i)\approx x_P(p_i\approx 0, q_i, u_i)$, pošto su vrednosti napona približno jednake u režimu čisto reaktivnih opterećenja i u režimu mešovitih opterećenja kada su iznosi reaktivnih snaga isti.

Taj stav potvrđuju podaci za x_p čije su vrednosti date u tabeli 2 i tabeli 3. To znači da su približno stalne vrednosti $C_f = \Delta i_{fr,L} / \Delta i_{fs,L}$, a to je uglavnom kada je magnetno kolo jako zasićeno i na delu statora i na delu i rotor.

Time se zaključuje (izraz 16) da Potjeove reaktanse konvergiraju nekoj stalnoj vrednosti ($X_{P,min}$)

koja je znatnije veća od reaktanse rasipanja, $X_p \rightarrow X_{P,min} > X_l$, a da $X_p \rightarrow X_l$ samo kada je magnetno kolo nezasićeno na delu rotora. Kako je $X_{P,min} \approx \text{const} \approx X_{Pn}$ (X_{Pn} u režimu sa P_n i Q_n), to se može preporučiti da se veliki generatori, u režimu visokih reaktivnih snaga, karakterišu sa Potjeovom reaktansom X_{Pn} .

Tabela 2. Vrednosti Potjeove reaktanse $x_p(r.j.)$ iz Oglada reaktivnih opterećenja, za $q_{\cos\varphi=0} = 0.15 \div 0.70$.

$q_{\cos\varphi=0}$	0.158	0.185	0.246	0.289	0.325	0.388	0.446	0.461	0.498	0.556	0.601	0.644	0.666	0.701
x_p	<i>0.381</i>	<i>0.371</i>	0.337	0.293	0.287	0.285	0.283	0.279	0.277	0.270	0.271	0.264	0.265	0.255

Tabela 3. Vrednosti Potjeove reaktanse u $x_p(r.j.)$ u režimima datih opterećenja ($p \approx p_n$, $q = 0.25 \div 0.563$)

$p=P/S_n$	0.783	0.85	0.783	0.785	0.783	0.768	0.771	0.783	0.856	0.783	0.783
$q=Q/S_n$	0.563	0.527	0.527	0.498	0.500	0.500	0.478	0.378	0.368	0.312	0.256
x_p	<i>0.284</i>	<i>0.275</i>	0.287	0.282	0.284	0.289	0.288	0.285	0.292	0.287	0.293

6. PRORAČUN POBUDNE STRUJE U REŽIMU VISOKIH REAKTIVNIH SNAGA

U režimu visokih reaktivnih snaga Potjeova reaktansa $x_{P,min} \approx \text{const} \approx x_{Pn}$, pa je pogodno da se vrednosti pobudnih struja generatora (i_r) računaju pomoću vrednosti x_{Pn} i karakteristike praznog hoda $i_{r0}(e_0)$, tj. pomoću vektorske jednačine:

$$\underline{i}_{f,rač} = \underline{i}_{fp}(e_p) + \underline{i}_{fa} \quad (17)$$

gde je $i_{fp} = i_0(e_p = e_0)$, tj. za elektromotornu silu iza Potjeove reaktanse, $e_p = \underline{u} + x_p \cdot \underline{i}$, slika 1. Razlika izračunatih i izmerenih vrednosti, $i_{f,rač}$ i $i_{f,mer}$, zavisi od odstupanja vrednosti date Potjeove reaktanse od njene stvarne vrednosti. Tako su sračunate pobudne struje ($i_{f,rač}$), za režime datih opterećenja ($p \approx p_n, q = 0.15 \div 0.563$), za koje su u tabeli 3 date tačne vrednosti reaktansi x_p . Kako su vrednosti x_p različite za različite režime opterećenja, to je interesantno utvrditi vrednosti greške u sračunavanju pobudnih struja ($i_{f,rač}$), za date vrednost x_p za sve navedene

režime. Jedinствена vrednost Potjeove reaktanse x_p se bira na nekoliko načina, pa su u cilju uporedne analize sračunate, i date u odgovarajućim tabelama, vrednosti izmerenih ($i_{f,mer}$) i izračunatih ($i_{f,rač}$) pobudnih struja za različite iznose x_p :

- za $x_p = x_\ell = 0.188$, u tabeli 4,
- za $x_p = x_{Pn} = 0.275$ (x_{Pn} - Potjeova reaktansa u nominalnom režimu), tabela 5,
- za $x_p = x_{P,\cos\varphi=0} = 0.255$ (za $I_G \approx I_{Gn}$), tabela 6, i
- • za $x_p = x_\ell \sqrt{1 + \Delta i_{fr} / \Delta i_{fs}} = 0.266$

gde je C_f određeno za srednju vrednost $\Delta i_{fr,L}$.

Korisno je primetiti da su najveće greške u vrednostima izračunatih pobudnih struja ($\Delta i_{f-rač}$ %) kada su sračunate za $x_p = x_\ell$, i da su znatno manje za vrednosti Potjeovih reaktansi određenih po nekom od uobičajenih kriterijuma, tabele 4, 5 i 6. Vrednosti greški $\Delta i_{f-rač}$ % su najmanja kada je x_p određena po predloženom izrazu (16), za srednju vrednost $\Delta i_{fr,L}$, tabela 7

Tabela 4. Izmerene (i_{f-mer}) i izračunate ($i_{f-rač}$) vrednosti pobudnih struja za $x_p = x_\ell = 0.188$, i iznosi odgovarajućih i greški ($\Delta i_{f-rač}$ %), u režimima datih opterećenja $p(p \approx p_n, q_n, u_G \approx u_{Gn})$

$p=P/S_n$	0.783	0.85	0.783	0.785	0.783	0.768	0.771	0.783	0.856	0.783	0.783
$q=Q/S_n$	0.563	0.527	0.527	0.498	0.500	0.500	0.478	0.378	0.368	0.312	0.256
$i_{f,mer}$	3.809	3.743	3.691	3.579	3.575	3.563	3.487	3.199	3.312	3.043	2.885
$i_{f,rač}$	3.556	3.542	3.457	3.379	3.371	3.346	3.293	3.065	3.168	2.916	2.794
$\Delta i_{f-rač} \%$	-6.66	-5.361	-6.356	-5.601	-5.682	-6.07	-6.56	-4.21	-4.37	-4.18	-3.15

Tabela 5. Izmerene (i_{f-mer}) i izračunate ($i_{f-rač}$) vrednosti za $x_p = 0.275$, i iznosi i greški ($\Delta i_{f-rač}$ %),

$p=P/S_n$	0.783	0.85	0.783	0.785	0.783	0.768	0.771	0.783	0.856	0.783	0.783
$q=Q/S_n$	0.563	0.527	0.527	0.498	0.500	0.500	0.478	0.378	0.368	0.312	0.256
$i_{f,mer}$	3.809	3.743	3.691	3.579	3.575	3.563	3.487	3.199	3.312	3.043	2.885
$i_{f,rač}$	3.781	3.743	3.659	3.561	3.550	3.523	3.458	3.181	3.284	3.008	2.867
$\Delta i_{f-rač} \%$	-0.75	-0.01	-0.89	-0.49	-0.67	-1.13	-0.85	-0.57	-0.84	-1.15	-0.63

Tabela 6. Izmerene ($i_{f,mer}$) i izračunate ($i_{f-rač}$) vrednosti za $x_p = 0.255$, i iznosi i greški ($\Delta i_{f-rač}$ %),

$p=P/S_n$	0.783	0.85	0.783	0.785	0.783	0.768	0.771	0.783	0.856	0.783	0.783
$q=Q/S_n$	0.563	0.527	0.527	0.498	0.500	0.500	0.478	0.378	0.368	0.312	0.256
$i_{f,mer}$	3.809	3.743	3.691	3.579	3.575	3.563	3.487	3.199	3.312	3.043	2.885
$i_{f,rač}$	3.722	3.690	3.606	3.514	3.504	3.477	3.415	3.151	3.253	2.984	2.848
$\Delta i_{f-rač}$ %	-2.29	-1.42	-2.31	-1.82	-1.98	-2.42	-2.08	-1.51	-1.76	-1.93	-1.28

Tabela 7. Izmerene ($i_{f,mer}$) i izračunate ($i_{f-rač}$) vrednosti pobudnih struja za $x_p = x_\ell \sqrt{1 + \Delta i_{fr} / \Delta i_{fs}} = 0.266$, i odgovarajući iznosi greški ($\Delta i_{f-rač}$ %), u režimima datih opterećenja ($p_n, q_n, u_G \approx u_{Gn}$)

$p=P/S_n$	0.783	0.85	0.783	0.785	0.783	0.768	0.771	0.783	0.856	0.783	0.783
$q=Q/S_n$	0.563	0.527	0.527	0.498	0.500	0.500	0.478	0.378	0.368	0.312	0.256
$i_{f,mer}$	3.809	3.743	3.691	3.579	3.575	3.563	3.487	3.199	3.312	3.043	2.885
$i_{f,rač}$	3.754	3.718	3.634	3.539	3.529	3.501	3.438	3.167	3.270	2.997	2.858
$\Delta i_{f-rač}$ %	-1.46	-0.66	-1.54	-1.10	-1.27	-1.72	-1.41	-1.00	-1.26	-1.51	-0.93

7. ZAKLJUČAK

U radu se analiziraju stavovi o zavisnosti vrednosti Potjeove reaktanse od režima opterećenja generatora i tačnosti odgovarajuće metode za određivanje pobudne struje sinhronih mašina. Uporedo se analizira tačnost Potjeove metode i postupka koji se zasniva na reaktansi rasipanja i krivi magnećenja opterećene mašine, $i_{f0}(e_l)$. Kriva magnećenja opterećene mašine se dobija tako što su vrednosti odgovarajućih pobudnih struja sa krive praznog hoda $i_{f0}(e_l)$ uvećavane za vrednosti povećanja struje pobude zbog dodatnog zasićenja rotora u režimu opterećene mašine ($\Delta i_{fr,L}$).

Najvažniji doprinosi rada su:

- Uspostavljena je analitička zavisnost između vrednosti parametra ($C_f = \Delta i_{fr,L} / \Delta i_{fs,L}$) i povećanja Potjeove reaktansi (x_p / x_l).
- Značajni su i zaključci koji se odnose na analizu zavisnosti Potjeove reaktanse i vrednosti parametra $C_f = \Delta i_{fr,L} / \Delta i_{fs,L}$, od opterećenja i zasićenja magnetnog kola sinhronne mašine, odnosno od veličine sinhronne mašine.
- Pokazano je da je pogodno da se generatori velikih snaga karakterišu sa Potjeovom reaktansom u nominalnom režimu ($X_{P,n}$), za proračuni struje pobude i režima sa visokim reaktivnim opterećenjima, $Q_n \approx Q_{max}$.

LITERATURA

- [1] Standard IEC 34-4, "Rotation Electrical Machines, Part 4: Methods for Determining Synchronous Machine Quantities from Tests".
- [2] Grupa autora, "Prenos i distribucija električne energije" - Priručnik, Prevod, Građevinska knjiga Beograd, 1964. godine.
- [3] Ion Boldea, "Synchronous Generators - The Electric Generator Handbook", pp. 512, by Taylor & Francis Group, 2006.
- [4] N. E. Nilsson, J. Mersurio, "Synchronous Generator Capability Curve Testing and Evolution", IEEE Trans. on Power Delivery and Systems, Vol. No. 1, pp. 414-424, 1994.
- [5] M. P. Kostenko, L. M. Piotrobskij, "Električeskie mašini, tom II", "Energija", Leningrad, str. 648 (na ruskom jeziku), 1973.
- [6] J. C Flores, G.W. Buckley, G.M. Pherson, "The Effect of Saturation on the Armature Leakage Reactance of Large Synchronous Machines", IEEE Trans. PAS-103, No. 3, pp. 593-600, March 1984.
- [7] A. M. El-Serafi, J. Wu, "A New Method For Determining the Armature Leakage Reactance of Synchronous Machines", IEEE Tr. En. Con, V. 6, No. 1, pp. 120-125, 1991.
- [8] M. V. K. Chari, Z. J. Csendes, S. H. Minnich, "Load Characteristics of Synchronous Generators by the Finite-Element Method", IEEE Trans. PAS-100, No. 1, pp. 1-13, January 1981.
- [9] M. M. Kostić, "Nova metode za određivanje Potjeove reaktanse turbogeneratora", "Elektroprivreda", No 4, str. 8-17, 2009.
- [10] M. M. Kostić, "Determining the Generator Potier Reactance for Relevant (Reactive) Loads", Elektrotehnički vestnik (English edition) Vol.79(3), pp. 31-36, 2014.
- [11] "Određivanje karakteristika regulacije, gubitaka snage i stvarnih dijagrama aktivnih i reaktivnih snaga (P-Q krive generatora) blokova B1 i B2 u TE "Kostolac B", Institut Nikola Tesla, Beograd, st.58 (Studija), 2008.

SUMMARY

CONTRIBUTION TO CALCULATION AND ESTABLISHED OF ANALITICALLY MUTUALLY DEPENDENCE OF POTIER AND LEAKAGE REACTANCE

Statement about mutually dependence of potier reactance value from load regime is analyzed in this paper, as and accuracy corresponding method for determination of generator field current. Proposed procedure accuracy, which is based on loaded machine saturation curve and leakage reactance, is considered. Loaded machine saturation curve is obtained so that to the no-load excitation current values with saturation curve are added corresponding current components due to the rotor addition saturation in load regime. New analytically dependency between of potier reactance and leakage reactance is reestablished.

It is convent that large generators to be characterized with potier reactance for rated regime, $X_{p,n}$, especially in regime with high reactive loads.

Key words: *Potier reactance, rotor addition saturation, generator excitation curent calculation, high reactive power regime*