Konstruisanje pogonskog dijagrama turbogeneratorsa u oblasti visokih reaktivnih snaga pomoću Potjeove reaktanse

MILOJE M. KOSTI, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd

NIKOLA L. GEORGIJEVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd

Stručni rad

UDC: 621.313.12.011.23

DOI: 10.5937/tehnika1602263K

U radu su sprovedeni proračuni i analiza zavisnosti vrednosti Potjeove reaktanse u režimima reaktivnih snaga iznad nominalne ($Q_G > Q_{G,N}$). Važan je zaključak da odgovarajuće vrednosti Potjeove reaktanse vrlo malo odstupaju od one za nominalni režim ($x_{p,N}$). To omogućava da se proračuni vrednosti pobudnih struja generatora i odgovarajućeg dela P-Q krive konstruišu na osnovu vrednosti Potjeove reaktanse $x_p > x_{p,N}$ i krive magnećenja u praznom hodu. Tražena vrednost $x_{p,N}$ se određuje iz oglada reaktivnih opterećenja ili pomoću proračuna za nominalni režim i stvarnu vrednost napona generatora u režimu datih opterećenja. Najveće razlike P-Q krive, u delu $Q_G > Q_{G,N}$, koja se dobija od proizvođača i one koja je utvrđena ispitivanjem, su posledica odstupanja (povišenja) vrednosti napona generatora u radu u odnosu na nominalni. Pokazuje se da je proračun P-Q krive turbogeneratorsa u režimu visokih reaktivnih snaga po Potjeovom metodu relativno jednostavan i dosta tačan.

Ključne reči: Potjeova reaktansa; reaktivna snaga, pobudna struja, P-Q krive

1. UVOD

Na slici 1 dat je pogonski dijagram generatora sa cilindričnim rotorom (turbogeneratora). Deo pogonskog dijagrama, linija 1 na slici 1, [1, 2], definiše granicu režima reaktivnih snaga $Q_G > Q_{G,n}$ (Mvar) pri radu generatora sa nominalnom ili sniženom aktivnom snagom $P_G < P_{G,n}$ (MW), a da pri tome struja pobudnog namotaja ne premaši dozvoljenu granicu. Zadatak se svodi na to da se, na osnovu granica dozvoljenih vrednosti pobudnih struja u sadašnjem stanju generatora (nivo hladnoće, stanje magnetnog kola i namotaja pobude), kao i aktuelnih vrednosti napona generatora u režimima datih reaktivnih opterećenja (generatora i EES), utvrde stvarni pogonski dijagrami, P-Q krive generatora [3, 4].

Znatnija odstupanja pogonskih dijagrama, u odnosu na one koje je dao proizvođač, dobijena su tokom ispitivanja i istraživanja za novije generatore [3, 4]. Te razlike se mogu javiti iz sledećih razloga:

- P-Q krive koje je dao proizvođač generatora, najčešće su utvrđene kombinovanjem proračuna i ograničenja mogućnosti ispitivanja;

- za razmatrani deo P-Q krive sa koordinatama ($Q_G > Q_{G,n}$, $P < P_{G,n}$), vrednosti napona na priključcima generatora su, po pravilu, iznad nominalnih vrednosti, što dodatno utiče na odstupanja pogonskih dijagrama.

Proračun polazi od utvrđivanja komponente pobudne struje za magnećenje mašine, tj. za stvaranje zajedničkog fluksa, odnosno elektromotorne sile iza reaktanse rasipanja ili iza Potjeove reaktanse. Najveći problem je kako što ta nije uračunata dodatno zasićenje magnetnog kola rotora zbog rasutog fluksa namotaja pobude u režimima sa opterećenjima, kada su pobudne struje za 2-4 puta veće nego u režimu praznog hoda. Navedeni uticaj se uračunava preko povećanja reaktanse rasipanja statora (x_l), tako da je odgovarajuća Potjeova reaktansa $x_p > x_l$, pa je i odgovarajuća elektromotorna 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.

Kako je pokazano u [5], u režimu visokih reaktivnih snaga Potjeova reaktansa $x_{p,min} = \text{const}$ $x_{p,n}$, pa je pogodno da se vrednosti pobudnih struja generatora (i_f) računaju pomoću vrednosti $x_{p,n}$ i karakteristike praznog hoda $i_0(e_0)$, tj. pomoću vektorske jednačine [5, 6, 7]:

$$\underline{i}_{f,ra} = \underline{i}_{fp}(e_p) + \underline{i}_{fa} \quad (1)$$

gde su

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

Rad primljen: 17.06.2015.

Rad prihvaćen: 18.03.2016.

$i_{fp}=i_0(e_p=e_0)$, struja magne enja za elektromotornu silu iza reaktanse x_p , $e_p = u + x_p i$, i

i_{fa} komponenta struje pobude koja kompenzuje magnetnu reakciju MPS statora.

Slika 1 - Pogonski dijagram generatora sa cilindrim rotorom (turbogeneratora)

Za generatore velikih snaga (460 MVA i 500 MVA) u [8] je pokazano da $X_p = (1.4 \div 1.5)X_l$, (gde su X_p i X_l Potjeova reaktansa i reaktansa rasipanja namotaja statora generatora) u režimima oko nominalnog. Do sli njih vrednosti za X_p se dolazi i u radovima [6, 7]. Razlika u vrednostima odnosa (X_p/X_l), u odnosu na date vrednosti u [9], X_p/X_l , se objašnjava injenicom da je znatno ve i uticaj dodatnog zasi enja magnetnog kola rotora kod velikih generatora u režimima optere enja.

U podru ju visokih reaktivnih optere enja generatora od vrednost $Q_n \div Q_{max} = (0.5 \div 0.8)S_n$, napon generatora se menja u opsegu $1.05U_n \div 1.08U_n$, a elektromotorne sile generatora (E_p ili E_l) se pove avaju, ak do $1.20U_n \div 1.30U_n$. To je i razlog da vrednosti Potjeove reaktanse konvergiraju nekoj konstantnoj vrednosti ($X_{p,min}$) koja je znatnije ve a od reaktanse rasipanja, $X_p/X_{p,min} > X_l$ [5]. Kako je $X_{p,min} \text{ const}$ $X_{p,n}$ ($X_{p,n}$ Potjeova reaktansa u nominalnom režimu (P_n i Q_n)), to se može preporučiti da se veliki generatori karakterišu sa datom nominalnom reaktansom $X_{p,n}$.

Mala promena Potjeove reaktanse u pomenutim režimima je poslužila kao motiv:

- da se razvije postupak za ta nije odre ivanje zavisnosti Potjeove reaktanse od reaktivnog optere enja, $X_p = f(Q/Q_n)$, [6];
- da se odredi vrednosti $X_{p,min} \text{ const } X_{p,n}$, za dati generator u nominalnom režimu [5];
- da se ispita uticaj napona generatora na promene vrednosti pobudnih struja za date vrednosti reaktanse X_p ili X_l , a time i
- da se utvrde promene pogonskog dijagrama u zavisnosti od napona u oblasti visokih reaktivnih snaga, $Q_n \div Q_{max} = (0.5 \div 0.8)S_n$.

U ovom radu se pomo u pogodne analize rešavaju poslednja dva zadatka i dolazi se do zaklju ka da je pogodno da se veliki generatori karakterišu sa Potjeovom reaktansom $x_{p,n}$, kada su u pitanju prora uni i analize režima sa visokim reaktivnim optere enjima, $Q_G = Q_n \div Q_{max}$.

2. ODRE IVANJE POTJEOVE REAKTANSE GENERATORA

Ponekad se daje vrednost $x_{p,n}$ za nominalni režim (P_n, Q_n, U_n), ali to treba uzeti sa rezervom zbog nemogućnosti proizvo a da istu utvrdi ispitivanjem, ali i zbog injenice da generatori pri nominalnom optere enju (P_n, Q_n) eš e rade pri naponu koji je viši od nominalnog ($U_G \div U_{G,n}$).

Imaju i to u vidu, kao i mogu e promene karakteristika magnetnog kola generatora u radu, korisno je [3] da se odredi zavisnost Potjeove reaktanse za aktuelne naponske prilike u voru elektroenergetskog sistema (EES) gde je generator priklju en, [6, 7].

Po pravilu, napon na priklju cima generatora se pove ava sa rastom reaktivnih optere ena, i pri vrednosti $Q_G = Q_{G,n}$, je ve i od nominalnog ($U_G \div U_{G,n}$). Manje su promene napona u ta ki priklju ka na EES, pa je korisno utvrditi zavisnost Potjeove reaktanse generatora od vrednosti reaktivnih optere enja, kao u [6 i 7]. Primena opisanog postupka se ilustruje na primeru turbogeneratora snage 727 MVA [10].

Vrednosti Potjeove reaktanse x_p su odre ene (a) prvo iz oglada reaktivnih optere enja, a zatim i (b) za režime datih optere enja ($p_L, q_L, u_{GL} = f(q_L)$), i date u tabeli 1. Na osnovu podataka u tabeli 1, zaklju uje se da se sa rastom optere enja, u ogledu reaktivnih optere enja ($\cos \varphi = 0$ ili preciznije pri $p_L = 0.13, q = Q/S_n = 0.234 \div 0.513$) [10], smanjuju vrednosti Potjeove reaktanse. Poznato je da vrednosti Potjeove reaktanse $x_p(r.j.)$, u režimima datih optere enja (p, q, u_G), zavise od vrednosti napona generatora (u_G) i/ili od vrednosti elektromotorna sila iza Potjeove reaktanse (e_p), kao što se naj eš e navodi u literaturi [1, 3, 4, 7, 9].

Interesantno je da su, za ispitivani generator, vrednosti Potjeove reaktanse $x_p(r.j.)$ u boljoj korelaciji sa vrednostima reaktivnih snaga (q) u odnosu na korelaciju sa vrednostima napona u_{Gi} i e_{Pi} , tabela 1, bez obzira na aktivnu snagu (p), što se vidi kada se uporede date vrednosti $x_p(p_{Li}, q_{Li}, u_{Gi})$ i $x_{p,cos \varphi}(q_{cos \varphi}, q_L, i u_{cos \varphi} \div u_L)$.

Na osnovu analize podataka koji su dati u tabeli 1, vrši se i kvantitativna provera ta nosti hipoteze da vrednost Potjeove reaktanse, prakti no, zavisi od reaktivne komponente struje ($i_{aQ} = i_a \sin \alpha$) [6, 7]. Pri tome se izvode slede i relevantni zaklju ci:

- Za režime oko nominalnog, vrednosti Potjeove reaktanse ($x_p=0.372\div0.356$) su znatno veće od reaktanse rasipanja ($x=0.244$).
- Za nominalni režim ($p_G=0.823$, $q_G=0.530$), vrednosti reaktanse $x_{p,n}=0.3638$ se malo razlikuju od iznosa $x_{p,\cos\phi=0}=0.3647$ u režimu reaktivnih snaga pri $q_{\cos\phi=0}=0.513$, pa je potvrđena hipoteza o približnoj jednakosti odgovarajućih reaktansi.

$$x_{p,i} = x_{p,\cos\phi=0}, \text{ za } q_L \approx q_{\cos\phi=0} \quad (2)$$

Korisno je da se, za konkretan generator, i datu oblast napona $U_G=f_U(Q_G)$, utvrdi zavisnost

$$x_p = f(q_G, u_G(q_G)) \quad (3)$$

Zavisnost (3), za datu vrednost napona u tački priključka na elektroenergetski sistem (EES), $U_{EES}=\text{Const}$, se svodi na zavisnost:

$$x_p = f(q_G), \text{ za } U_{EES} = \text{const} \quad (4)$$

U slučaju posmatranog generatora [10], utvrđeno je da se napon u tački priključka na prenosnu mrežu (U_{EES}) dobija pri naponu na generatora

$$u_G \approx u_{G,q=0} + x_T \cdot i_q \quad (5)$$

pri čemu su:

Tabela 1. Vrednosti Potjeove reaktanse $x_p(r.j.)$ određene: iz oglada reaktivnih opterećenja, za izmerene vrednosti $q_{\cos\phi=0}=0.15\div0.70$ i $p<0.13$, a $u_G=f(q)$, i u režimima datih opterećenja, za izmerene vrednosti ($p_L, q_L, u_G=f(q)$)

p 0.13	$q_{\cos\phi=0}$	$u_G=f(q_{\cos\phi=0})$	e_p	$x_{p,\cos\phi=0}$	p_L	q_L	$u_G=f(q_L)$	e_p	x_p
a) Oglad reaktivnih opterećenja ($\cos\phi=0$)					b) Režimi datih opterećenja, (p, q_L, u_G)				
0.138	0.234	1.02	1.1183	0.4204	0.853	0.227	1.003	1.1648	0.4456
0.128	0.264	1.026	1.1322	0.4091	0.835	0.281	1.006	1.1766	0.4208
0.129	0.289	1.03	1.1441	0.4014	0.827	0.491	1.024	1.2135	0.3724
0.13	0.319	1.034	1.1564	0.3936	0.829	0.517	1.033	1.2464	0.3639
0.129	0.343	1.039	1.1676	0.3884	0.823	0.53	1.037	1.2528	0.3638
0.125	0.377	1.043	1.1822	0.3818	0.825	0.541	1.038	1.257	0.3621
0.127	0.414	1.05	1.1987	0.376	0.828	0.546	1.038	1.2602	0.3618
0.129	0.443	1.054	1.2111	0.3721	0.829	0.556	1.038	1.2617	0.3599
0.124	0.49	1.058	1.2287	0.3669	0.829	0.558	1.039	1.2643	0.3587
0.124	0.513	1.065	1.2416	0.3647	0.829	0.578	1.039	1.2642	0.3565
					0.829	0.585	1.04	1.2701	0.3579
					0.829	0.592	1.04	1.274	0.3561

3. ODREĐIVANJE POBUDNE STRUJE POMOĆU POTJEOVE REAKTANSE

Vrednosti pobudnih struja, za utvrđene vrednosti Potjeove reaktanse (x_p), ili $x_p=x$ date u tabeli 1, mogu se izraziti pomoću sledećeg izraza, koji se dobija iz

x_T - reaktansa blok-transformatora.

$u_{G,q=0}=U_{EES}/m_T$ - napon generatora kada je reaktivna snaga $q=0$ (ovde $u_{G,q=0}=0.98$), a:

$m_T=U_{HV}/U_{LV,0}$ - koeficijent transformacije blok transformatora,

U_{HV} i $U_{LV,0}$, napon na strani višeg i nižeg napona transformatoru u praznom hodu, i

za $x_T=0.12$ rj, dolazi se do zavisnosti napona ($u_G=U_G/U_{G,R}$ od reaktivnih snaga ($q_G=Q_G/S_{G,n}$):

$$u_G \approx 0.98 + 0.12 \cdot q, \text{ za } U_{EES} = \text{const} \quad (6)$$

Na osnovu stava o jednoznačnoj zavisnosti reaktanse x_p od reaktivnih opterećenja (q), za dati generator se dolazi do izraza:

$$x_p(q_G) = x_{p,\cos\phi=0}(q_G) \quad (7)$$

Izraz unate vrednosti pobudnih struja (i_{f-ra}), za dobijene reaktanse (x_p) jednake su izmerenim vrednostima (i_{f-mer}), tj. te razlike su po pravilu jednake nultim vrednostima, za vrednosti reaktansi (x_p) određene iz oglada reaktivnih opterećenja ili za režime razmatranih opterećenja (tabela 1, vrednosti pod (a) i (b)). Važi i obrnuto: razlika izmerenih (i_{f-mer}) i izraza unatih (i_{f-ra}), vrednost za date iznose x_p , i, zavisi samo od odstupanja vrednosti x_p od stvarnih vrednost.

vektorske jednačine (1), tj. iz odgovarajućeg trougla OF_2F_2' (slika 2 u [5]):

$$i_{f-cal} = \sqrt{\left[i_{f-l} + (x_d - x_p)(s/u) \cdot \sin(W + u) \right]^2 + \left[(x_d - x_p) \cdot \cos(W + u) \right]^2} \quad (8)$$

Vrednosti pobudne struje $i_f(e_p)$, za elektromotornu silu iza reaktanse rasipanja ili iza Potjeove reaktanse, se određuju pomoću karakteristike magnetne energije u praznom hodu (sl. 2), tj. pomoću u zavisnosti $i_{f0}(e)$, za $e=e$ ili $e=e_p$.

Slika 2 - Zasićena karakteristika magnetne energije, $E_0(I_f)$, generatora 727.5MVA, analitički aproksimacija (—) ne odstupa od eksperimentalnih tačaka (••••)

Navedena zavisnost $i_{f0}(e)$ je predstavljena u analitičkom obliku, pa je kompletan postupak proračuna vrednosti i_{f-cal} po izrazu (8) automatizovan i sproveden na računaru, koristeći program Excel.

Navedeni proračun i vrednosti struje pobude generatora (i_{f-cal}), kao i izračunate vrednosti odgovarajuće greške $i_{f-cal}(\%)$ u odnosu na izmerenu vrednost struje pobude (i_{f-m}), sprovedeni su za date vrednosti reaktansi x ili x_p , a odgovarajući rezultati su sprovedeni za različite vrednosti reaktanse rasipanja, tj.:

- za vrednost reaktanse $x_p = x = 0.244$, i (a) $u_G = u_{Gn} = 1$, ili (b) $u_G = f(q, p)$ 1,
- za vrednost reaktanse $x_p = 1.25x = 0.305$ i (a) $u_G = u_{Gn} = 1$, ili (b) $u_G = f(q, p)$ 1,
- za vrednost reaktanse $x_p = x_{p,n} = 0.364$ i (a) $u_G = u_{Gn} = 1$, ili (b) $u_G = f(q, p)$ 1,
- za vrednost reaktanse $x_p = x_{p,cos\phi} = 0.355$ i (a) $u_G = u_{Gn} = 1$, ili (b) $u_G = f(q, p)$ 1.

Na osnovu rezultata proračuna se izводе sledeći zaključci u vezi odstupanja izračunatih vrednosti pobudnih struja generatora (i_{f-cal}), kao i vrednosti odgovarajućih greški $i_{f-cal}(\%)$ u odnosu na izmerene vrednosti pobudnih struja (i_{f-m}):

- Najveće vrednosti greške su oko 10% (i_{f-cal} 10%) kada su vrednosti i_{f-cal} , sračunate za vrednost reaktanse $x_p = x = 0.244$ i $u_G = u_{Gn} = 1$,
- nešto manje za vrednost x_p i $u_G = f(q, p)$ 1, tabela 2.
- Kada se, umesto reaktanse rasipanja, računaju vrednostima Potjeove reaktanse $x_p = 1.25x = 0.305$, odgovarajuće vrednosti greške ($i_{f-cal}(\%)$) su manje.

Ali ako se računaju sa vrednostima Potjeove reaktanse za nominalni režim (p i q), tj. za $x_p = x_{p,n} = 0.364$ ili za $x_p = x_{p,cos\phi} = 0.355$ (iz ogleđa reaktivnog opterećenja za q ($0.6 \div 0.7$) $> q_n = 0.527$), vrednosti greške su male, što se vidi iz tabele 2, u kojoj je dat sumarni prikaz navedenih greški.

Tabela 2. Sumarni prikaz vrednosti greški ($i_{f-cal}(\%)$) za režime, za date vrednosti Potjeove reaktanse x_p i date vrednosti napona generatora u_G

x_p	$u_G = u_{Gn} = 1$	$u_G = f(q, p)$ 1,
	Oblast vrednosti greški ($i_{f-cal}(\%)$)	
$x_p = x = 0.244$	(-9.55)-(-10.7)%	
- II -		(-5.93)-(-9.40)%
$x_p = 1.25x = 0.305$	(-6.41)-(-6.72)%	
- II -		(-6.41)-(-6.86)%
$x_p = x_{p,n} = 0.364$	(-2.34)-(-1.47)%	
- II -		(-0.77)-(+0.97)%
$x_p = x_{p,cos\phi} = 0.355$	(-3.04)-(-2.38)%	
- II -		(-1.55)-(-0.06)%

4. KONSTRUISANJE POGONSKIH DIJAGRAMA GENERATORA

4.1. Uvodne napomene

Postupak koji je iznet u [6] je posle analize i provera prihvaćen u JP Elektroprivreda Srbije a potom je definisan Programski zadatak i uračunate odgovarajuće Studija „Konstruisanje stvarnih pogonskih karakteristika generatora (po novoj metodi za određivanje Potjeove reaktanse), za 5 odabranih turbogeneratora“ [10], za aktuelna pogonska stanja generatora i uobičajene režime napona u elektroenergetskom sistemu. Ovde se daje prikaz primene te metode na primeru generatora snage 727.5MVA, $\cos\phi = 0.85$ u Termoelektrani „Nikola Tesla B“. Preciznije, radi se o delu $P_G - Q_G$ krive koji definišu granice režima sa reaktivnom snagom Q_G ($Q_{G,n}$ (Mvar) pri radu generatora sa nominalnom ili sniženom aktivnom snagom P_G ($P_{G,n}$ (MW)). Taj deo krive je određen za nominalnu vrednost pobudne struje generatora, $I_f = I_{f,n} = \text{const}$, pri kojoj temperatura pobudnog namotaja ne prelazi dozvoljenu vrednost. Najvažniji rezultat odnosi se na mogućnost da se P-Q krive generatora odrede na bazi tačaka koje određuju vrednosti Potjeove reaktanse generatora - preciznije rečeno samo na osnovu rezultata ispitivanja u praznom hodu i ogleđa reaktivnog opterećenja u elektrani.

Iako se vrednosti Potjeove reaktanse menjaju sa promenom opterećenja, utvrđeno je da je ta promena mala u oblasti sa reaktivnom snagom Q_G ($Q_{G,n}$). Tako su u oblasti reaktivnih opterećenja $Q_G = Q_{G,n} \div 1.3 Q_{G,n}$, vrednosti Potjeove reaktanse $x_p = x_{p,n} \div 0.975 x_{p,n}$ pa je proračun navedenog dela P-Q krive dovoljno izvršiti za

neku od izabranih vrednosti x_p iz navedene oblasti. To potvrđuju i male razlike u izraženim vrednostima pobudne struje za $x_p = x_{p0} = 0.364$ i $x_p = x_{p90-n} = 0.355$, tabele 4 i 5. Na osnovu tako utvrđene zavisnosti (ili vrednosti) Potjeove reaktanse (x_p), konstruisan je pogonski dijagram (P_G - Q_G kriva) generatora snage 727.5MVA, $\cos \varphi = 0.85$.

4.2. Pogonski dijagrami generatora

Za generator nominalne prividne snage 727 MVA, pri sprovođenju ogleda reaktivnog opterećenja nije mogla biti obezbeđena potrebna reaktivna snaga (oko 550 Mvar) i ogled je sproveden nepotpuno sa maksimalnom reaktivnom snagom od samo 380 Mvar. Pošto se raspolagalo sa podacima iz režima visokih reaktivnih opterećenja (602 MW, 430 Mvar), to je Potjeova reaktansa određena za navedene tačke visokih (reaktivnih) opterećenja i data u vidu zavisnosti $x_p = f(e_p)$. Tako srađunata vrednost $e_p = 1.2804$ r.j. je jednaka vrednosti elektromotornе sile iza Potjeove reaktanse iz ogleda reaktivnog opterećenja za $Q = 481$ Mvar.

Da bi se naglasilo da je ovde utvrđena zavisnost Potjeove reaktanse od elektromotornе sile, ona se daje u vidu $x_p = f(e_p)$. Treba naglasiti da je ovako određena vrednost Potjeove reaktanse sa visokom tačnošću kada su u pitanju režimi u okolini nominalnog. Ekstrapolacijom zavisnosti $x_p = f(e_p)$, sl.3, dobija se da je $x_p(e_p = 1.30 \text{ r.j.}) = 0.358$, a toj vrednosti odgovara reaktivno opterećenje od $0.723 \text{ r.j.} = 526$ Mvar, tj. $x_p(q) = x_p(q = 0.723 \text{ r.j.}) = x_p(Q = 525 \text{ Mvar})$, i približno odgovara tačka pogonskog dijagrama za $P_G = 0$. Time je omogućeno da se sprovede dosta tačan proračun pogonskog dijagrama generatora u režimu reaktivnih opterećenja ($P_G = 0$, $Q_G = Q_{G,max}$).

Slika 3 - Zavisnost Potjeove reaktanse od reaktivne snage, $x_{p,i}(e_p)$, generatora nominalne prividne snage 727.5MVA i nominalnog faktora snage $\cos \varphi = 0.85$

Na osnovu vrednosti Potjeove reaktanse (zavisnost $x_{p,i}(e_p)$ je prikazana na sl. 3), proračunima se konstruišu odgovarajuća P-Q kriva. Kompletan postupak proračuna P-Q zavisnosti se automatizuje i sprovodi na računaru.

Vrednosti odgovaraju ih aktivnih snaga (P_{Gi}) se određuju proračunima, pri čemu se za nezavisno promenljivu uzimaju vrednosti reaktivnih snaga, $Q_{Gi} = Q_{G,R} \div Q_{G,max}$. Za ispitivani generator nominalne prividne snage 727.5MVA, $\cos \varphi = 0.85$, uporedni prikaz P-Q zavisnosti proizvođača i P-Q zavisnosti koje su dobijene na opisan način, je dat na sl. 4, obe za stalnu vrednost napona na priključcima generatora, $U_G = U_{G,n} = \text{Const}$.

Slika 4 - Pogonski dijagrami generatora nominalne prividne snage 727.5MVA i nominalnog faktora snage $\cos \varphi = 0.85$; kriva iz dokumentacije proizvođača i (- - -) odstupa od krive dobijene ispitivanjima (—)

Kako se u praksi napon na priključcima ispitivanog generatora bitnije menja sa promenom (reaktivnog) opterećenja, i onda kada nema promena napona u tački priključka blok-transformatora, $U_{EES} = \text{Const}$, to je na sli. 5 i slici 6, dodata i P-Q kriva za konstantnu vrednost napona ($U_{EES} = \text{Const}$) u tački priključka blok-transformatora na elektroenergetski sistem.

Slika 5 - Pogonski dijagrami, P-Q krive, generatora snage 727MVA i $\cos \varphi = 0.85$: krive iz dokumentacije proizvođača i (- - -) i krive dobijene ispitivanjima (—) za $U_G = U_{G,n} = \text{Const}$, kao i P-Q kriva za $U_{EES} = \text{Const}$ a promenljiv napon $U_G = f(P, Q)$

P-Q kriva sa slike 6, za $U_{EES} = \text{Const}$, se nalazi nešto ispod P-Q krive ($U_{G,n} = \text{Const}$), tj. najviše dopuštene vrednosti reaktivne snage su nešto manje. Razlog za smanjenje maksimalne reaktivne snage je što su u tim režimima odgovarajuće vrednosti napona

na priklju cima generatora više od nominalnih vrednosti, $U_G > U_{G,N}$.

Slika 6 - Pogonski dijagrami generatora snage 727.5 MVA i $\cos \varphi = 0.85$: krive iz dokumenta proizvođača (- -) i krive dobijene ispitivanjima (—): za $U_G = U_{G,N} = \text{Const}$, $U_{G1} = 0.95 U_{G,N} = \text{Const}$ i $U_{G2} = 1.05 U_{G,N} = \text{Const}$, kao i kriva za $U_{EES} = \text{Const}$ i promenljiv napon $U_G = f(P, Q)$

Zbog toga je korisno pored navedenih P - Q zavisnosti, konstruisati i P - Q krive za još dve grani ne vrednosti napona na priklju cima generatora, $U_{G1} = 0.95 U_{G,N} = \text{Const}$ i $U_{G2} = 1.05 U_{G,N} = \text{Const}$. Sve navedene P - Q krive su prikazane uporedo na jedinstvenoj slika 6.

4.3. Analiza pogonskih dijagrama generatora

Na osnovu uporedne kvalitativne i kvantitativne analize pogonskih dijagrama, P - Q zavisnosti sa slike 4, slike 5 i slike 6, za generator nominalne snage 727 MVA i faktora snage $\cos \varphi = 0.85$, izvede se sledeći zaključci.

Za nominalni napon na priklju cima generatora, $U_{G1} = U_{G,N} = 21 \text{ kV}$, slika 4 i slika 5:

- pri opterećenjima oko nominalnog ($P_{G,N}$, $Q_{G,N}$) praktično nema razlike u odnosu na P - Q zavisnosti prema podacima proizvođača i aktuelnim podacima iz studije [10];
- u režimu visokih reaktivnih snaga (Q_G , $Q_{G,N}$, P_G , $P_{G,N}$), dopuštena reaktivna opterećenja po aktuelnim podacima su malo veća (za 2-3%) u odnosu na podatke proizvođača, što se objašnjava činjenicom da su aktuelne vrednosti Potjeove reaktanse manje do 1%, u režimu visokih reaktivnih snaga.

Kada se napon na generatoru poveća ili smanji u granicama $\pm 5\%$, $U_G = U_{G,N} \pm 5\%$, slika 6:

- pri opterećenjima oko nominalnog režima ($P_{G,N}$, $Q_{G,N}$) praktično nema razlike u odnosu na P - Q zavisnosti prema dokumentu proizvođača;
- u režimu visokih reaktivnih snaga (Q_G , $Q_{G,N}$ i P_G , $P_{G,N}$), dopuštena reaktivna opterećenja se

smanjuju sa povećanjem napona, i povećavaju sa smanjenjem napona na priklju cima generatora, kako pokazuju P - Q krive, redom, za vrednosti napona generatoru $1.05 U_N$, $1.00 U_N$ i $0.95 U_N$.

Dopuštena reaktivna opterećenja se smanjuju sa povećanjem napona na priklju cima generatora, ali i onda kada napon na visokonaponskoj strani blok-transformatora održava konstantnu vrednost, $U_{EES} = \text{Const}$. Naime, zbog povećanja napona generatora dodatno se povećava elektromotorna sila iza Potjeove reaktanse (e_P), tj:

$$e_P = u_{G,q=0} + x_T i_q + x_P i_q \quad (8)$$

Kada se ta vrednost Potjeove reaktanse izrazi preko iste u nominalnom režimu, $x_P = x_{P,n} + \Delta x_P$, onda izraz (9) prelazi u izraz

$$e_P = u_{G,q=0} + x_T i_q + x_{P,n} i_q + \Delta x_P i_q \quad (9)$$

Kako se vrednosti Potjeove reaktanse, pri povećanju reaktivnih opterećenja sa $q_N = 0.53$ na $q_{\max} = 0.70$, smanjuju sa $x_{P,n} = 0.364$ na $x_P = 0.355$, tj. samo za $x_P = 0.009 r_j$, pa je to smanjenje za 12-13 puta manje od vrednosti x_T . O igledno je greška zbog zanemarivanja povećanja napona generatora za $x_T i_q$ mnogo veća od greške za iznos $x_P i_q$ zbog smanjenja Potjeove reaktanse u režimu visokih reaktivnih opterećenja.

Time se ističe važnost konstruisanja pogonskih dijagrama za datu vrednost napona ($U_{EES} = \text{Const}$) u tački priključenja bloka transformator-generator na prenosnu mrežu EES, tj. za odgovarajuće promenljive vrednosti napona na priklju cima generatora (slika 6).

5. ZAKLJUČCI

U radu su sprovedeni proračuni i analiza kvalitativnih i kvantitativnih zavisnosti vrednosti Potjeove reaktanse u režimima visokih reaktivnih snaga (Q_G , $Q_{G,N}$, P_G , $P_{G,N}$). Najvažniji zaključak je da odgovarajuće vrednosti Potjeove reaktanse ostaju u uskom području vrednosti, $x_P = x_{P,N} \pm (x_{P,N} - 0.01)$ u navedenim uslovima (Q_G , $Q_{G,N}$, P_G , $P_{G,N}$). To omogućava da se proračuni vrednosti pobudnih struja generatora i crtanje odgovarajućeg dela P - Q krive izvrše na osnovu proračuna za prethodno utvrđenu vrednost Potjeove reaktanse u nominalnom režimu x_P , $x_{P,N}$ i krive magnetizacije u praznom hodu (slika 1).

Tražena vrednost $x_{P,N}$ se određuje iz ogleda reaktivnih opterećenja za $Q_{G,\cos \varphi = 0} = Q_{G,N}$ ili pomoću opisanih proračuna za nominalne snage ($P_{G,N}$, $Q_{G,N}$) i stvarnu vrednost napona generatora u režimu datih opterećenja. Pokazuje se da najveće razlike u delu P - Q krive sa Q_G , $Q_{G,N}$ posledica odstupanja (povećanja) vrednosti napona $U_G = U_{G,N}$ (ili $U_G > U_{G,N}$).

LITERATURA

- [1] Ion Boldea, "Synchronous Generators - The Electric Generator Handbook", pp. 512, 2006 by Taylor & Francis Group, Boca Raton London New York, 2006.
- [2] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, "Električne mašine", Nauka knjiga Beograd, 1962. god, 560 str. (prevod sa američkog originalnog izdanja iz 1952.g.
- [3] 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.
- [4] M. M. Adibi, D. P. Milanicz, "Reactive Capability Limitation of Synchronous Machines", IEEE Trans. Power Delivery and Systems, Vol.9, No. 1, pp. 29-40, 1994.
- [5] M. M. Kosti, "Doprinos proračunu i analizi zavisnosti izmena reaktanse rasipanja i Potjeove reaktanse sinhronih generatora", Prihvaćen za objavu "Tehnika", No 4, 2015.
- [6] M. M. Kosti, "Nova metode za određivanje Potjeove reaktanse sinhronih turbogeneratora", "Elektroprivreda", No 4, str. 8-17, 2009.
- [7] M. M. Kosti, "Determining the Generator Potier Reactance for Relevant (Reactive) Loads", Elektrotehnički vestnik (English edition) Vol.79(3), pp. 31-36, 2014.
- [8] M. V. K. Chari, Z. J. Csendes, S. H. Minnich, "Load Characteristics of Synchronous Generators by the Finite-Element Method", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 1, pp. 1-13, January 1981.
- [9] A. M. El-Serafi, J.Wu, "A New Method For Determining the Armature Leakage Reactance of Synchronous Machines", IEEE Trans. En. Con., V. 6, No. 1, pp. 120-125, 1991.
- [10] Studija "Konstruisanje stvarnih pogonskih dijagrama generatora (P-Q krive generatora) po novoj metodi za određivanje Potjeove reaktanse", str. 12, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, 2012,

SUMMARY

CONSTRUCTION OF TURBOGENERATOR CAPABILITY CURVE FOR HIGH REACTIVE POWER REGION BY POTIR REACTANCE

Calculation and analysis potier reactance dependence in high reactive power region (Q_G - $Q_{G,N}$). Important conclusion is that corresponding potier reactance values practically equally that in rated regime. It is enabled that excitation current calculations and construction corresponding generator capability curves (P-Q curve) performed by potier reactance rated values (x_p - $x_{p,N}$) and the open-circuit saturation curve. From reactive load test are determined $x_{p,N}$ values. Greatest difference between P-Q curves, obtained from designer and by presented procedure, is result change of generator voltage in relation to rated. It is shown that P-q curve calculation in high reactive power region by Potir method is simple and sufficiently accurate.

Key words: potier reactance, reactive power, excitation current, P-Q curve