

Zavisnost gubitaka snage turbogeneratorsa od reaktivnih opterećenja

Miloje.M. Kostić, Branka B.Kostić, Igor Belić, Nikola Georgijević

Elektrotehnički Institut "Nikola Tesla", Univerzitet u Beogradu,
11000 Beograd, Srbija
mkostic@ieent.org

Kratak sadržaj: U radu je izložena metoda za određivanje gubitaka snage u generatoru za karakteristične režime, kao i analiza zavisnosti tih gubitaka od vrednosti reaktivnih opterećenja. Postupak je ilustriran na primeru turbogeneratorsa snage 410 MVA (i 348 MW). Dati su postupci i rezultati proračuna pojedinih komponenti gubitaka snage, kao i ukupnih gubitaka snage: prvo za čisto aktivno opterećenje sa nominalnom snagom, a potom i za režime sa nominalnom aktivnom snagom uz različita opterećenja po reaktivnoj snazi. Razlika tih gubitaka i gubitaka u režimu sa čisto aktivnom snagom predstavlja komponentu gubitaka snage koji potiču od reaktivnih opterećenja. Za turbogeneratore snaga 210 MW, 348 MW i 618 MW dati su samo rezultati proračuna i analize zavisnosti gubitaka snage od reaktivnih opterećenja. Pokazano je da se gubici snage u bloku generator-transformator značajno smanjuju kada se faktorom snage generatora poveća na vrednost 0.92, sa vrednosti 0.85. Ovo je, uz činjenicu da se time povećava i obrtna rezerva u reaktivnoj snazi, bio važan argument za podizanje nivoa kompenzacije reaktivne energije u Elektroenergetskom sistemu Elektroprivrede Srbije (EES EPS-a)- Od 2005-2008. godine, sa novih 550 Mvar kondenzatora u distributivnoj mreži, reaktivna snaga na pragu elektrana je ukupno smanjena za 720 Mvar, a gubici snage za oko za 9 MW, samo u blokovima generator-transformator ukupne snage 3800 MW.

Ključne reči: turbogenerator, stepen iskorišćenja, reaktivna opterećenja, pobudna struja, ukupni gubici snage, gubici opterećenja

1. Uvod

Kao tehnički podaci generatora uobičajeno se daju vrednosti parametara: u nominalnom režimu i režimu praznog hoda, nominalnih veličina kola pobude i relevantnih reaktansi. U cilju ilustracije, za generator, nominalne snage 348 MW i nominalne prividne snage 410 MVA, dati su navedeni podaci u

tabeli 1 [1]. Interesantno je da se od energetske karakteristike daje samo vrednost stepena iskorišćenja snage u nominalnom režimu (η_n).

Tabela 1. Osnovni tehnički podaci, nominalne karakteristike i reaktanse generatora GTH- 360:

Parametri i karakteristike generatora	Podaci iz dokumentacije	Izmerene vrednosti
Nominalna prividna snaga, S_n (kVA)	410 000	
Nominalni napon generatora, U_G (V)	22 000	
Nominalna struja generatora, I_G (A)	10 760	
Nominalni faktor snage, $\cos \varphi$	0.85	
Nominalna aktivna snaga, P_n (kW)	348 500	
Nominalna reaktivna snaga, Q_n (kvar)	216 000	
Nominalni broj obrtaja, n (o/min)	3 000	
Stepen iskorišćenja, η_n	0.9862	
Nominalni napon pobude, U_{fn} (V)	516	
Nominalna struja pobude, I_{fn} (A)	2 708	
Struja pobude u praznom hodu, I_{f0} (A)	818	807
Pobuda za međugvožđe("gap"), I_{fg} (A)	633	677
Struja pobude u režimu kratkog spoja, I_{fSC} (A)	1 656	1 716
Odnos kratkog spoja (I_{fg} / I_{fSC})	0.4941	0.4703
Uzdužna sinhrona reaktansa, x_d	2.347	2.535
Uzdužna reaktansa u tranz. režimu, x_d'	0.306	
Uzdužna reakt. u suptranz. režimu, x_d''	0.188	
Reaktansa rasipanja statora, x_ℓ	0.197	
Inverzna reaktansa generatora, x_2	0.099	
Nulta reaktansa generatora, x_0	0.16	
Hlađenje namotaja statora	Voda	
Hlađenje namota rotora, gvožđa i ostalo	Vodonik	

Kada se želi utvrditi zavisnost stepena iskorišćenja od opterećenja, posebno od vrednosti reaktivnih opterećenja generatora koja se kod turbogeneratora i jedino menjaju u širokim granicama, $0 \leq QG \leq QG_n$, praktičari najčešće nemaju precizan odgovor. Da bi se dobila tačna predstava o navedenim zavisnostima Elektroprivreda Srbije je inicirala rad na studijama [2,3]. U studijskim proračunima i analizama se polazi od vrednosti komponenti gubitaka snage u nominalnom režimu generatora.

2. Gubici snage u nominalnom režimu i karakterističnim režimima

2.1. Uvod

Gubici snage u generatoru se uobičajeno razvrstavaju u dve grupe.

- Gubitke praznog hoda, tj. gubitke u gvožđu generatora i gubitke na trenje i ventilaciju, dok su gubici u namotaju pobude u praznom hodu generatora relativno mali i mogu se zanemariti;
- Gubitke opterećenja, u koje ulaze gubici u namotaju statora, gubici u namotaju pobude i dodatni gubici.

Gubici opterećenja čine oko 2/3 ukupnih gubitaka snage u generatorima, i biće svrstani u dve komponente:

- Gubitke snage koji potiču od aktivnih opterećenja, i
- Gubitke snage koji potiču od reaktivnih opterećenja.

Navedeno razvrstavanje gubitaka je posebno korisno kada su u pitanju sinhroni generatori u termoelektranama (turbogeneratori), koji po pravilu stalno rade sa aktivnom snagom oko nominalne vrednosti ($P \approx P_n$), dok se reaktivna snaga menja, počev od niskih vrednosti ($Q \leq 0.2Q_n \approx 0.1S_n$), naprimer u noćnim satima, kada praktično postoje samo gubici snage koji potiču od aktivnih opterećenja [2,3]. Već u popodnevnim satima, reaktivna opterećenja se često približavaju nominalnim vrednostima ($Q_n = 0.527S_n$, kada je $\cos\varphi \approx \cos\varphi_n = 0.85$), pa generatori rade sa većom prividnom snagom i većim gubicima snage koji zavise od veličine prividnog opterećenja (S_n). Razlika tih gubitaka i gubitaka u režimu sa čisto aktivnom snagom predstavlja *komponentu gubitaka snage od reaktivnih opterećenja*. Biće pokazano da se gubici snage u generatorima značajno smanjuju kada rade sa faktorom snage 0.92, umesto sa nominalnim faktorom snage 0.85, tj sa reaktivnom snagom od $0.390S_n$ umesto sa $Q_n = 0.527S_n$. To je, uz činjenicu da se time povećava i obrtna rezerva u reaktivnoj snazi, bio važan argument za poboljšanje kompenzacije reaktivne energije u Elektroenergetskom sistemu Elektroprivrede Srbije (EES EPS-a). Već u periodu 2005-2008. godine¹. sa novih 550 Mvar kondenzatora u distributivnoj mreži, reaktivna snaga na pragu elektrana je smanjena za 720 Mvar, a gubici snage u generatorima za oko 9 MW.

¹ Iz JP EPS, preciznije tadašnji Direktor TENT-a inž Boško Buha je zatražio od prvog autora ovog rada da odredi zavisnosti jediničnih gubitaka snage u generatorima od nivoa reaktivnih opterećenja generatora (kW/Mvar), kako se to radi kada su u pitanju distributivna i prenosna mreža. Kao rezultat toga urađene su dve studije [2,3] iz kojih je i proizašao ovaj rad.

U tabeli 2 su dati podaci o pojedinim komponentama gubitaka snage u nominalnom režimu. Za razliku od uobičajenog, dodatno su sve te komponente gubitaka razdvojene na dva dela: deo koji potiče od aktivnih opterećenja, i dodatni deo koji potiču od reaktivnih opterećenja u nominalnom režimu (P_n, Q_n), [2,3].

Gubici praznog hoda su dobijeni iz dokumentacije proizvođača [1], dok je zavisnost gubitaka praznog hoda od vrednosti napona dobijena iz oglada praznog hoda ispitivanog generatora [4].

Ukupni gubici snage u nominalnom režimu (P_n, Q_n), su određeni pomoću izraza:

$$P_{\gamma n} = P_{Gn}(1 - \eta_n) / \eta_n \quad (1)$$

na osnovu date vrednosti stepena iskorišćenja generatora u nominalnom režimu (η_n). Omski gubici u namotaju statora datog otpora na 75°C , $R_{s,75} = R_{s,20}(235+75)/255$, u nominalnom režimu ($I_{G,n}=10760\text{A}$), za generator čiji su podaci dati u tabelama 1 i 2, su određeni pomoću izraza:

$$P_{s,n} = 3R_{s,75}I_{Gn}^2 \quad (2)$$

Gubici snage u pobudnom namotaju (rotora) date vrednosti otpora na 20°C ($R_{r,20}$) i odgovarajućeg otpora na 75°C , za nominalnu vrednost pobudne struje ($I_{r,n}=2708\text{A}$), su određeni pomoću izraza:

$$P_{f,n} = 3R_{r,75}I_{fn}^2 \quad (3)$$

Dodatni gubici opterećenja ($P_{d,G}$), u nominalnom režimu, su sračunati kao razlika gubitaka:

$$P_{dn} = P_{\gamma n} - (P_0 + P_f + P_{s,n}) \quad (4)$$

2.2. Gubici u režimu čisto aktivne snage generatora i gubici zbog reaktivnih opterećenja

Prvo su određeni gubici snage za režim sa aktivnom nominalnom snagom (P_n) i $Q=0$. Gubici zbog reaktivnih opterećenja su određeni kao razlika gubitaka u nominalnom režimu (P_n, Q_n) i režimu sa nominalnom aktivnom snagom bez reaktivnog opterećenja ($P_n, Q=0$). U cilju ilustracije, uz osnovne tehničke podatke generatora GTH- 360 (TE Kostolac „B“), u tabeli 2 su date i vrednosti tako proračunatih komponenti navedenih gubitaka snage u nominalnom režimu.

Tabela 2. Osnovni tehnički podaci, nominalne veličine i gubici snage generatora GTH-360

Veličine generatora	Generator (B1-B2)	
Nominalna prividna snaga, S_n (kVA)	410 000	
Nominalni napon generatora, U_G (V)	22 000	
Nominalna struja generatora, I_G (A)	10 760	
Nominalni faktor snage, $\cos\varphi$	0.85	
Nominalna aktivna snaga, P_n (kW)	348 500	
Nominalna reaktivna snaga, Q_n (kvar)	216 000	
Nominalni napon pobude, U_{fn} (V)	516	
Nominalna struja pobude, I_{fn} (A)	2 708	
Stepen iskorišćenja generatora, η	0.9862	
GUBICI SNAGE U GENERATORU	kW	U procentima (%)
Ukupni gubici snage, $P_{yn} = P_n(1-\eta)/\eta$	4876	100.00%
1. Gubici praznog hoda, P_{0n}, za $U=U_n$	1872	38.39%
Gubici u gvožđu P_{Fe}		
Gubici na trenje i ventilaciju, P_{fw}^1		
2. Gubici optereć. u nominalnom režimu, (P_n, Q_n)	3004	61.61%
Gubici u namotaju pobude, $P_{fn} = U_{fn} I_{fn}$	1279	26.05%
Gubici u namotaju statora, $P_{Cu,s} = 3R_s I_{G,n}^2$	752	15.42%
Dodatni gubici u generatoru ¹ , P_{dGn}	9821	20.14%
2a. Gubici opter. u režimu aktivne snage² ($P_n, Q=0$)	16732	34.31%
Gubici u namotaju pobude, $P_{f,Pn} = U_{fn} I_{fn}$	421	8.63%
Gubici u namotaju statora, $P_{Cu,s,Pn} = 3R_s I_{G,n}^2$	543	11.14%
Dodatni gubici u generatoru, $P_{d,Pn}$	709	14.54%
2b. Gubici zbog reaktivnih opterećenja³ ($2b=2-2a$)	13313	27.30%
Gubici u namotaju pobude, $P_{f,Qn} = U_{fn} I_{fn}$	849	17.41%
Gubici u namotaju statora, $P_{Cu,s,Qn} = 3R_s I_{G,n}^2$	209	4.29%
Dodatni gubici u generatoru, $P_{d,Qn}$	273	5.60%
1. Dodatni (nominalni) gubici opterećenja su određeni kao razlika gubitaka: $P_{dGn} = P_{yn} - (P_{0n} + P_f + 3R_s I_{G,n}^2)$.		
2. Gubici opterećenja u režimu sa aktivnom nominalnom snagom (P_n) i $Q=0$.		
3. Gubici zbog reaktivnih opterećenja su određeni kao razlika gubitaka u nominalnom režimu (P_n, Q_n) i režimu sa čisto aktivnom snagom ($P_n, Q=0$).		

Na osnovu datih vrednosti za navedene komponente gubitaka (tabela 2), izvode se zaključci o učešću pojedinih komponenti gubitaka snage u ukupnim gubicima snage u nominalnom režimu (P_n, Q_n):

- Gubici opterećenja iznose 61.61% ukupnih nominalnih gubitaka,
- Gubici u namotaju pobude iznose 26.05%, i čine skoro 1/2 gubitaka opterećenja.

Interesantno je porediti gubitke opterećenja u režimu aktivne snage ($P_n, Q=0$), i gubitke snage zbog reaktivnih opterećenja, koji su određeni kao razlika gubitaka opterećenja u nominalnom režimu (P_n, Q_n) i gubitke opterećenja u režimu aktivne snage ($P_n, Q=0$), vrsta 2b=2-2a u tabeli 2. Na osnovu toga se izvodi zaključak da reaktivna opterećenja generatora značajno utiču na povećanje gubitaka snage u generatorima a time i na povećanja temperature pojedinih delova, kao i na značajno opterećenje sistema za hlađenje. Posebno je taj uticaj visok kada je u pitanju rotor, jer je porast gubitaka u namotaju pobude zbog reaktivnih opterećenja (17.41%) znatno veći od odgovarajućih gubitaka u režimu čisto aktivne snage (8.61%), tabela 2.

2.3. Prosečni jedinični gubici snage u režimu aktivne snage i režimu reaktivnih opterećenja

Interesantno je primetiti (tabela 3) da je priraštaj ukupnih gubitaka snage u generatoru (1673 kW), pri povećanju aktivne snage iz režima praznog hoda do nominalne vrednosti ($P_{Gn}=348$ MW) malo veći od dodatnog priraštaja gubitaka snage u generatoru (1331 kW), pri povećanju reaktivne snage od nulte vrednosti do $Q_{Gn}=216$ Mar, tj. prelaza iz režima (348MW,0 Mvar) u režim (348MW,216 Mvar).

Kako su odgovarajuće reaktivne snage manje po apsolutnoj vrednosti ($Q_n=0.619P_n$), to i odgovarajući gubici snage u generatoru (kW/Mvar) znatnije premašuju odgovarajuće gubitke po jedinici aktivne snage (kW/MW). Tako, za dati generator, pomenuti (prosečni) iznosi jediničnih gubitaka snage u pobudnom namotaju iznose, redom, 4.807 kW/MW i 6.162 kW/Mvar.

Tabela 3: Prosečna povećanja gubitaka snage generatora za područja: povećanja aktivne snage do nominalne (kW/MW) i povećanja reaktivne snage do nominalne (kW/Mvar)

Područje promene opterećenja generatora:	ΔP_{yPn}	ΔP_{yQn}	$\Delta P_{yPn}/\Delta P_n$	$\Delta P_{yQn}/\Delta Q_n$
	kW	kW	kW/MW	kW/Mvar
Povećanje aktivne snage iz režima praznog hoda do nominalne vrednosti: $\Delta P_G=0 \rightarrow P_{Gn}=348$ MW (režim 348MW, 0Mvar)	1673		4.807	
Povećanje reaktivne snage od nulte vrednosti do $Q_{Gn}=216$ Mar, tj. prelaz: iz režima (348 MW,0 Mvar), u režim (348MW,216 Mvar)		1331		6.162

Ovi podaci pokazuju da su prosečni gubici snage u generatoru po jedinici reaktivne snage (kW/Mvar) veći od odgovarajućih gubitaka po jedinici aktivne snage (kW/MW), za više oko 30%. Uz to gubici snage po jedinici reaktivne

snage (kW/Mvar) dostižu dvostruke prosečne iznose pri opterećenjima $Q \approx Q_n$, pa je potrebno da se utvrdi *zavisnost gubitaka snage u generatoru od reaktivnih opterećenja*.

3. Proračun i analiza zavisnosti gubitaka snage od reaktivnih opterećenja generatora GTH'360

3.1. Uvod

Da bi se odredila *zavisnost gubitaka snage u generatoru od reaktivnih opterećenja generatora* potrebno je, za razmatrane režime rada, utvrditi vrednosti pojedinih komponente gubitaka snage generatoru:

- Gubitaka u gvožđu generatora (P_{fe}), ili zbirnih gubitaka praznog hoda ($P_{fe}+P_{fw}$),
- Gubitaka u namotaju statora generatora ($P_{Cu,s}$),
- Dodatnih gubitaka opterećenja u generatoru ($P_{d,G}$), i
- Gubitaka u namotaju pobude (rotora) generatora (P_f),

jer ukupni gubici snage generatora ($\Sigma P_{YG,opt}$) predstavljaju zbir navedenih komponenti.

Razmatraju se i gubici snage u blok-transformatoru, tj. gubici u gvožđu generatora ($P_{fe,T} \approx P_{OT}$) i gubici opterećenja ($P_{YT,opt}$), kako bi se odredili ukupni gubici snage u bloku generator-transformator (ΣP_{YG+T}), koji se sračunavaju kao zbir ukupnih gubitaka u generatoru (ΣP_{YG}) i gubitaka snage u blok-transformatoru ($P_{OT}+P_{YT,opt}$). Takođe se razmatraju i promene ovih gubitaka sa promenama opterećenja generatora, odnosno njihove zavisnosti od promena reaktivnih opterećenja, pošto se kod turbogeneratora u termoelektranama bitnije menja samo ova komponenta opterećenja, ili se na njenu promenu može uticati ukoliko za to postoji potreba ili interes (manji gubici snage u EES uključujući i blok generator-transformator). *Promene navedenih gubitaka se karakterišu preko vrednosti jedinične promene ovih gubitaka (kW/Mvar)*, za koje je uobičajen naziv *marginalni gubici snage* kada su u pitanju gubici snage u namotajima transformatora i vodovima mreža.

3.2. Proračun i analiza zavisnosti (komponenti) gubitaka od reaktivnih opterećenja

Prvo se određuju vrednosti navedenih komponenti gubitaka snage u generatoru ($P_{fe}+P_{fw}$, $P_{Cu,s}$, $P_{d,G}$, P_f) i blok-transformatoru (P_{OT} , $P_{YT,opt}$) da bi se utvrdile njihove zavisnosti od reaktivnih opterećenja generatora. Posebno je

složen postupak za određivanje vrednosti (gubitaka) snage u pobudnom namotaju (P_f) zbog teškoća da se tačno odrede vrednosti - zavisnosti pobudnih struja od opterećenja generatora kod generatora sa zasićenim magnetnim kolom To je bio razlog i motiv da se razvije dovoljno tačna metoda za određivanje istih za razmatrane režime [5, 6].

Da bi se odredile vrednosti (gubitaka) snage u pobudnom namotaju (P_f), prvo se određuju vrednosti (tj. zavisnost) struje pobude, u relativnim jedinicama $I_{fg,u}=1rj$, po izrazu (5), [5, 6]:

$$i_{f,n} = \sqrt{\left[i_{f1} + (x_d - x_{p,n})(s/u)(\sin \varphi_n \cos \delta + \cos \varphi_n \sin \delta) \right]^2 + \left[(x_d - x_l) \cdot (\cos \varphi \cos \delta - \sin \varphi \sin \delta) \right]^2} \quad (5)$$

Vrednosti $\cos \delta$, $\sin \delta$ i e_p se izračunavaju pomoću izraza datih u [5,6], za parametre datih režima: $s=S/S_n=1$, $p=P_r/S_n=\cos \varphi$, $q=Q/S_n=\sin \varphi$ i $u=U/U_n=1$. Vrednosti $i_{ff}(e_p)$ se određuje pomoću eksperimentalno utvrđene zavisnosti $i_{f0}(e)$, za $e = e_p$. [5, 6]. Navedena zavisnost $i_{f0}(e)$ je predstavljena u analitičkom obliku, pa je kompletan postupak proračuna vrednosti i_f (ili $i_{f,n}$) po izrazu (5) automatizovan i sproveden na računaru.

Vrednosti (gubitaka) snage u pobudnom namotaju (P_f) se određuju po izrazu:

$$P_f = R_r(^0T) \cdot (i_{f,cal} \cdot I_{fg,u})^2 \quad (6)$$

gde su:

$i_{f,cal}$ - sračunate vrednosti pobudne struje po izrazu (5),

$I_{fg,u}=1rj=677A$ -vrednosti struje pobude za međugvožđe ("gap") za nominalni napon (U_n),

$R_r(^0T)$ - vrednost omskog otpora namotaja pobude, na odgovarajućoj radnoj temperaturi (0T), se određuje na osnovu vrednosti otpora na 20^0C (R_{20}) i odgovarajućeg povećanja temperature namotaja pobude u nominalnom režimu (ΔT_n) i nominalnoj struji pobude (i_{fn}), pomoću izraza:

$$R_r(^0T) = R_{20} \cdot \left(1 + \frac{i_f^2}{i_{fn}^2} \cdot \frac{\Delta T_n}{255} \right) \quad (7)$$

Vrednost omskih gubitaka snage u namotaju statora (indukta) mašine ($P_{Cu,s}$) se određuje na osnovu vrednosti istih ($P_{Cus,n}$) u nominalnom režimu (S_n , U_n), po izrazu:

$$P_{Cu,s} = P_{Cus,n} \cdot (s/u)^2 \quad (8)$$

Izraz (8), je pogodno napisati u vidu zavisnosti od relativnih vrednosti reaktivnih ($q=Q/S_n$) i aktivnih ($p=P/S_n$) snaga

$$P_{CuS} = P_{CuS,n} \cdot (p^2 + q^2) / u^2 \quad (9)$$

Vrednosti dodatnih gubitaka snage u generatoru (P_{dG}) se određuju na osnovu date vrednosti istih u nominalnom režimu ($P_{dG,n}$), po formuli:

$$P_{dGn} = P_{dGn} \cdot (p^2 + q^2) \quad (10)$$

ili kao razlika odgovarajućih gubitaka snage u a) režimu sa prividnom snagom vrednosti $s_1^2 = p_1^2 + q_1^2$ i b) režimu sa prividnom snagom $s_2^2 = p_2^2 + q_2^2$.

Ukupni gubici snage u generatoru ($\Sigma P_{\gamma G}$) se određuju kao zbir navedenih komponenti gubitaka, tj:

$$\Sigma P_{\gamma G} = (P_{fe} + P_{fw}) + P_f + P_{CuS} + P_{dG} \quad (11)$$

Gubici praznog hoda transformatora ($P_{0T} \approx P_{feT}$) se određuju iz ogleđa praznog hoda za vrednosti napona koje se javljaju na priključcima blok-transformatora u razmatranim režimima. Gubici opterećenja u blok-transformatoru ($P_{\gamma T, opt}$) se određuju na osnovu date vrednosti istih u nominalnom režimu ($P_{\gamma T, n}$), po formuli

$$P_{\gamma T, opt} = P_{\gamma T, n} \cdot (p^2 + q^2) \quad (12)$$

pa se ukupni gubici opterećenja, u **bloku generator-transformator** ($\Sigma P_{\gamma G+T}$), određuju kao zbir svih navedenih gubitaka u generatoru ($\Sigma P_{\gamma G}$) i gubitaka u blok-transformatoru ($P_{0T} + P_{\gamma T, opt}$), tj:

$$\Sigma P_{\gamma G+T} = \Sigma P_{\gamma G} + (P_{0T} + P_{\gamma T, opt}) \quad (13)$$

Tako određene vrednosti gubitaka snage, za data reaktivna opterećenja (Q_G) pri nominalnoj aktivnoj snazi $P_{Gn}=348.5\text{MW}$, date su u tabeli 4.

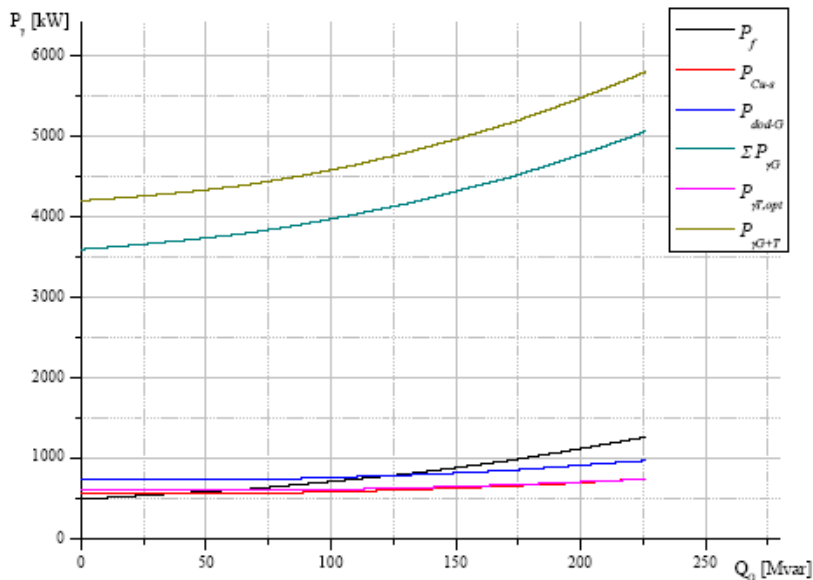
Tabela 4. Vrednosti komponenti gubitaka snage ($P_{fe}+P_{fw}$, P_f , $P_{Cu,s}$ i P_{dG}) i ukupnih gubitaka u generatoru (ΣP_{YG}), gubitaka u blok-transformatoru (P_{0T} , P_{YT} , kao i zbirnih gubitaka snage $\Sigma P_{YG+T} = \Sigma P_{YG} + P_{YT}$ za data reaktivna opterećenja (Q_G) pri nominalnoj aktivnoj snazi $P_{Gn}=348.5MW$

Q_G Mvar	U_G kV	$P_{fe}+P_{fw}$ kW	P_f kW	$P_{Cu,s}$ kW	P_{dG} kW	ΣP_{YG} kW	P_{0T} kW	$P_{YT,opt}$ kW	ΣP_{YG+T} kW
Prazan hod	21.7223	1797.869	85.547	0	0	1883.416	256.05	0	2139.466
Režimi sa nominalnom aktivnom snagom $P_{Gn}=348.5MW$ i sa $Q_G=0\pm 226$ Mvar ($0\pm 1.05Q_{Gn}$)									
0	21.7223	1797.869	492.3	564.574	737.25	3591.989	256.05	604.541	4452.58
21.6	21.8845	1825.033	532.83	558.683	729.557	3646.102	261.97	597.831	4505.902
43.2	22.0468	1852.4	571.03	557.872	728.498	3709.796	267.89	595.76	4573.447
66.4	22.2091	1879.971	615.41	561.969	733.848	3791.201	274.29	598.128	4663.618
86.4	22.3713	1907.746	667.88	570.843	745.436	3891.902	280.69	604.74	4777.332
108	22.5336	1935.725	729.83	584.399	763.139	4013.094	287.91	615.411	4915.416
129.6	22.6958	1963.907	802.27	602.578	786.877	4155.635	295.21	629.966	5080.811
151.2	22.8536	1992.293	884.58	625.351	816.615	4318.837	302.89	648.235	5269.962
172.8	23.0204	2020.085	975.06	651.898	851.281	4498.325	310.57	669.403	5478.298
194.4	23.1826	2049.675	1082.5	684.716	894.138	4711.028	318.89	695.272	5725.191
216	23.2578	2078.672	1200.9	721.395	942.035	4943.052	327.21	723.737	5994
226	23.3216	2092.166	1258.6	739.983	966.308	5057.08	335.743	737.976	6130.799

Na osnovu datih tabelarnih vrednosti prikazane su odgovarajuće grafičke zavisnosti (sl. 1) navedenih komponenti gubitaka snage u generatorima (P_f , $P_{Cu,s}$ i P_{dG}) i ukupnih gubitaka snage u generatoru (P_{YG}), gubitaka opterećenja u blok-transformatoru ($P_{YT,opt}$) i ukupnih gubitaka snage u bloku G-T (P_{YG+T}). Na osnovu toga se razmatraju i promene ovih gubitaka sa promenama opterećenja generatora, odnosno njihove zavisnosti od promena reaktivnih opterećenja, pošto se kod turbogeneratora u termoelektranama bitnije menja samo ova komponenta opterećenja.

Navedene vrednosti pojedinih gubitaka, $P_f(Q)$, $P_{Cu,s}(Q)$ i $P_{dG}(Q)$, kao i ukupnih gubitaka snage generatora $P_{YG}(Q)$, gubitaka snage u blok-transformatoru $P_{YT,opt}(Q)$ i ukupnih gubitaka snage u bloku generator-transformator $P_{YG+T}(Q)$, pri nultoj vrednosti reaktivnih opterećenja ($Q=0$, P_n), predstavljaju odgovarajuće gubitke pri radu generatora sa nominalnom aktivnom snagom, $P_1=P_n=348.5MW$.

Ostale vrednosti u nizu, tabela 4, predstavljaju navedene gubitke, pri radu generatora sa stalnom (nominalnom) aktivnom snagom, i datim reaktivnim opterećenjima $q=Q/Q_n=0.1, 0.2, 0.3, \dots, 1.0, 1.046=Q_{m1}$. Očigledno da razlike pomenutih gubitaka (iz niza vrednosti) i odgovarajućih gubitaka, pri nultoj vrednosti reaktivnih opterećenja ($Q=0$, P_n), predstavljaju povećanja odgovarajućih gubitaka za date vrednosti reaktivnih opterećenja.



SI.1: Zavisnosti komponenti gubitaka (P_f , $P_{Cu,s}$ i P_{dod-G}) i ukupnih gubitaka u generatoru ($\Sigma P_{\gamma G}$), gubitaka opterećenja u blok-transformatoru ($P_{\gamma T,Opt}$), i zbirnih gubitaka bloka generator-transformator ($P_{\gamma G+T}$), za data reaktivna opterećenja (Q) pri nominalnoj aktivnoj snazi $P_{Gn}=348.5MW$

Razlika pomenutih gubitaka za nominalnu vrednost reaktivnog opterećenja ($Q=Q_n$, P_n), i odgovarajućih gubitaka, pri nultoj vrednosti reaktivnih opterećenja (P_n , $Q=0$), predstavlja povećanje odgovarajućih gubitaka zbog reaktivnog opterećenja u nominalnom režimu (P_n , $Q=Q_n$), i poklapa se sa vrednosti datoj u tabeli 2. Te razlike, tj. prosečni jedinični gubici opterećenja po jedinici reaktivne snage (kW/Mvar), premašuju odgovarajuće gubitke po jedinici aktivne snage (kW/MW).

Uz to treba primetiti da su gubici po jedinici reaktivne snage (kW/Mvar), u području reaktivnih opterećenja $Q \leq 0.7Q_n$, manji od datih prosečnih vrednosti, a da premašuju dvostruke prosečne iznose, pri opterećenjima $Q \approx Q_n$. Razlog je činjenici da su promene vrednosti gubitaka $\Delta P_{Cu,s}$ i ΔP_{dG} , srazmerne vrednosti $((p^2+q^2)-p^2)/p^2=q^2/p^2$, tj. srazmerne su kvadratu reaktivnih opterećenja, dok su (gubici) snage u pobudnom namotaju (P_f) srazmerni kvadratu pobudne struje pa je njihov rast i brži. Iz tog razloga je potrebno utvrditi zavisnosti jediničnih gubitaka snage od reaktivnih opterećenja, kako bi se utvrdile vrednosti dodatnih (marginalnih) gubitaka snage koji prate povišenja reaktivnih opterećenja u područjima kada su ona relativno visoka, iako još u dozvoljenim granicama. Povećanja gubitaka snage u namotaju pobude su znatno veća od odgovarajućih povećanja gubitaka opterećenja u namotajima statora (i blok transformatora), kao i povećanja dodatnih gubitaka u generatoru (i transformatoru)- tabela 4. Pokazuje se da navedeni priraštaji

gubitaka u namotaju pobude premašuje zbirne priraštaje gubitaka opterećenja u namotaju statora i dodatnih gubitaka u generatoru.

3.3. Analiza zavisnosti jediničnih promena gubitaka snage od reaktivnih opterećenja

Na osnovu niza dobijenih vrednosti navedenih komponenti gubitaka snage ($P_{fe}+P_{fw}$, P_f , $P_{Cu,s}$ i P_{dod-G}) i ukupnih gubitaka u generatoru (ΣP_{YG}), gubitaka snage u blok-transformatoru (P_{0T} , $P_{YT,opt}$), kao i zbirnih gubitaka snage $\Sigma P_{YG+T} = \Sigma P_{YG} + (P_{0T} + P_{YT})$, za data reaktivna opterećenja (Q_G) pri nominalnoj aktivnoj snazi $P_{Gn}=348.5\text{MW}$ (tabela 4), mogu se odrediti odgovarajuće jedinične promene pojedinih komponenti gubitaka snage generatora, $\Delta(P_{fe}+P_{fw})/\Delta Q$, $\Delta P_f/\Delta Q$, $\Delta P_{Cu,s}/\Delta Q$, $\Delta P_{d,G}/\Delta Q$ i transformatora, $dP_{0T}/\Delta Q$ i $dP_{YT,opt}/\Delta Q$, za $P_G = \text{const}$. Redosled proračuna za gubitke snage u pobudnom namotaju je takav da se prvo određuju razlike odgovarajućih gubitaka snage za dve susedne vrednosti reaktivnih opterećenja:

$$\Delta P_{f,i} = P_{f,i} - P_{f,i-1}, \text{ pri promeni reaktivnih opterećenja } \Delta Q_i = Q_i - Q_{i-1}$$

$$\Delta P_{f,i+1} = P_{f,i+1} - P_{f,i}, \text{ pri promeni reaktivnih opterećenja } \Delta Q_{i+1} = Q_{i+1} - Q_i,$$

pa potom vrednosti odgovarajuće jediničnih promene gubitaka snage u namotaju pobude

$$(\Delta P_f/\Delta Q)_i = \Delta P_{f,i}/\Delta Q_i$$

$$(\Delta P_f/\Delta Q)_{i+1} = \Delta P_{f,i+1}/\Delta Q_{i+1}$$

Pored navedenih jediničnih promena gubitaka snage, poseban interes predstavlja i određivanje odgovarajućih jediničnih promena ukupnih gubitaka snage u generatoru. Prvo se određuju odgovarajuće promene tih gubitaka snage

$$\Delta P_{YG,i} = \Sigma P_{YG,i} - \Sigma P_{YG,i-1}, \text{ pri promeni reaktivnih opterećenja } \Delta Q_i = Q_i - Q_{i-1}$$

$$\Delta P_{YG,i+1} = \Sigma P_{YG,i+1} - \Sigma P_{YG,i}, \text{ pri promeni reaktivnih opterećenja } \Delta Q_{i+1} = Q_{i+1} - Q_i$$

a potom vrednosti odgovarajuće jedinične promene gubitaka snage u generatoru

$$(\Delta P_{YG,i}/\Delta Q)_i = \Delta P_{YG,i}/\Delta Q_i$$

$$(\Delta P_{YG,i+1}/\Delta Q)_{i+1} = \Delta P_{YG,i+1}/\Delta Q_{i+1}$$

Na sličan način su određene vrednosti jediničnih promena ukupnih gubitaka snage u bloku: generator-transformator, $(\Delta P_{YG+T,i}/\Delta Q)_i = \Delta P_{YG+T,i}/\Delta Q_i$.

Za nominalnu vrednost aktivne snage ($P_{Gn}=348\text{ MW}$) i dati niz vrednosti reaktivnih opterećenja: $Q=0\text{ Mvar}$, 21.6 Mvar , 43.2 Mvar , 66.4 Mvar 1894.4 Mvar , 216 Mvar (Q_n) i 226 Mvar), određene su vrednosti

odgovarajućih jediničnih promena gubitaka snage: $(\Delta P_f/\Delta Q)_i$, $(\Delta P_{VG,i}/\Delta Q)_i$ i $(\Delta P_{VG+T,i}/\Delta Q)_i$, i date u tabeli 5.

Tabela 5 Vrednosti datih komponenti jediničnih promena gubitaka snage $(\Delta P_f/\Delta Q, \Delta P_{VG}/\Delta Q, i \Delta P_{VG+T}/\Delta Q)$, za date vrednosti reaktivnih opterećenja (Q_G) pri nominalnoj aktivnoj snazi $P_{Gn}=348\text{MW}$

Q_G		$\Delta P_f/\Delta Q$	$\Delta P_{VG}/\Delta Q$	$\Delta P_{VG+T}/\Delta Q$
Q_G/Q_n	Mvar	kW/Mvar	kW/Mvar	kW/Mvar
0	0			
0.1	21.6	1.876	2.5052	2.47
0.2	43.2	1.768	2.9488	3.127
0.3	66.4	2.054	3.7687	4.127
0.4	86.4	2.428	4.6621	5.264
0.5	108	2.868	5.6107	6.393
0.6	129.6	3.353	6.599	7.565
0.7	151.2	3.81	7.556	8.761
0.8	172.8	4.308	8.547	9.836
0.9	194.4	4.839	9.581	11.43
1	216	5.483	10.742	12.446
1.046	226	5.767	11.403	13.68

Utvrđeno je (tabela 3) da prosečni gubici snage u generatoru po jedinici reaktivne snage $(6.162 \text{ kW/Mvar})_{\text{med}}$, u nominalnom režimu, premašuju odgovarajuće gubitke po jedinici aktivne snage $(4.807 \text{ kW/MW})_{\text{med}}$. Interesantno je uporediti prosečne jedinične gubitke opterećenja po jedinici reaktivne snage $(\text{kW/Mvar})_{\text{med}}$ sa odgovarajućim vrednostima istih (kW/Mvar) za različit nivo reaktivnih opterećenja (Q). Iz tabela 4 i 5 se vidi da, već pri reaktivnom opterećenju $0.6Q_n$, promene gubitaka snage postaju veće od prosečnih vrednosti, $\Delta P_{VG}/\Delta Q_i=6.599 \text{ kW/Mvar} > 6.162 \text{ kW/Mvar}$ (tabela 3), da bi pri nominalnoj reaktivnoj snazi (Q_{Gn}) dostigli skoro dvostruke iznose ($\Delta P_{VG}/\Delta Q_i=10.742 \text{ kW/Mvar}$). Kada se uračuna i povećanje gubitaka u blok-transformatoru onda jedinični gubici dostižu iznos od 1.25% (tačnije $\Delta P_{VG+T}/\Delta Q=12.446 \text{ kW/Mvar}$, tabela 5). Kako jedinični gubici snage u bloku generator-transformator po jedinici reaktivne snage dostižu iznos od 10 kW/Mvar (ili od 1%), pri $Q \geq 0.8Q_n$, zaključuje se da reaktivna opterećenja u području od $0.8Q_n \div Q_n$, iako u dozvoljenim granicama, postaju ekonomski neopravdana, pogotovu ako su zastupljena u dužim vremenskim periodima-traju $> 4000 \text{ h/god}$.

3.4. Dozvoljena povećanja reaktivnih snaga pri smanjenju aktivnih snaga generatora

Sa smanjenjem aktivne snage, stvara se mogućnost da generator poveća maksimalnu reaktivnu snagu, ali u manjoj meri nego što je smanjena aktivna snaga. To se ilustruje podacima u tabeli 6, u kojoj su, za navedene aktivne snage, date odgovarajuće maksimalne reaktivne snage za maksimalnu dozvoljenu vrednosti pobudne struje, $I_{f,max1}=2550$ A za generator GTH-360. Navedena povećanja reaktivnih snaga su manja što su dostignute veće maksimalne reaktivne snage. Tako smanjenje aktivne snage za 17.4 MW (tj. sa $P_{1G}=P_n$ na $P_{2G}=0.95P_n$), omogućava povećanje reaktivne snage samo za 10.8 Mvar. Smanjenje aktivne snage za dodatnih 17.4 MW (ili sa $P_{2G}=0.95P_n$ na $P_{3G}=0.90P_n$) omogućava još manje povećanje reaktivne snage za dodatnih 7.2 Mvar, dok smanjenje aktivne snage za dodatnih 17.4 MW (ili sa $P_{3G}=0.90P_n$ na $P_{4G}=0.85P_n$) omogućava povećanje reaktivne snage samo za dodatnih 7.0 Mvar, ili samo za 0.40 Mvar/MW. Ograničavajući kriterijum ovde je maksimalna dozvoljena vrednost struje pobude ($I_{f,max1}=2550$ A), odnosno jedinično povećanje gubitaka snage ($\Delta P_f/\Delta Q_G$) koje je za više od dva puta veće u odnosu na jedinično povećanje gubitaka snage ($\Delta P_f/\Delta P_G$), za razmatrane režime visokih reaktivnih opterećenja, tabela 6.

Tabela 6: Dozvoljena povećanja reaktivnih snaga pri datom smanjenju aktivnih snaga, za datu maksimalnu vrednosti pobudne struje: $I_{f,max1}=2550$ A

Aktivna snaga MW	$I_{f,max1}=2550$ A	
	Reaktivna snaga (Mvar)	Povećanje reaktivne snage (Mvar)
$P_{1G}=P_n=348.5$ MW	216	
$P_{2G}=0.95P_n=331$ MW	226.8	10.8
$P_{3G}=0.90P_n=313.6$ MW	234	7.2
$P_{4G}=0.85P_n=296.2$ MW	241	7

4. Analiza zavisnosti gubitaka od reaktivnih opterećenja generatora termoelektrana Nikola Tesla A i B

4.1. Osnovni tehnički podaci generatora

U sastav ovih elektrane ulazi osam blokova (generator – transformator), i to:

- Termoelektrana "Nikola Tesla" A ima 6 blokova - blokovi A1-A2; A3-A6, i
- Termoelektrana "Nikola Tesla" B ima 2 bloka - blokovi B1-B2.

Kao tehnički podaci generatora uobičajeno se daju vrednosti: parametara i karakteristika u nominalnom režimu i režimu praznog hoda, nominalnih veličina kola pobude i relevantnih reaktansi. Pošto su pojedini blokovi identični, u tabelu 7, navedene veličine su date za tri generatora, i to [2,5]:

- za generator A2 (time i za identični generator A1),
- za generator A5 (time i za sve identične generatore A3-A6), i
- za generator B2 (time i za identični generator B1).

Rezultati proračuna i analiza zavisnosti gubitaka snage od reaktivnih opterećenja generatora TENT-a [2]

Za generatore čiji su osnovni podaci dati u tabeli 7, po postupku koji je izložen i ilustrovan u poglavlju 3.2, određene su [2]:

srednje vrednosti jedinični gubitaka snage, $(kW/MW)_{med}$ ili $(kW/Mvar)_{med}$, i jedinični (marginalni) gubici snage po jedinici reaktivne snage: u pobudnom namotaju, $\Delta P_{f,i} / \Delta Q_i$, $(kW/Mvar)$; u generatoru, $\Delta P_{yG,i} / \Delta Q_i$ $(kW/Mvar)$; i u bloku generator-transformator po jedinici reaktivne snage, $\Delta P_{yG-T,i} / \Delta Q_i$ $(kW/Mvar)$ a dobijeni rezultati su dati u tabeli 8. Iz tabele 8 se vidi da prosečni gubici opterećenja po jedinici reaktivne snage $(kW/Mvar)_{med}$, u nominalnom režimu, premašuju odgovarajuće gubitke po jedinici aktivne snage $(kW/MW)_{med}$, izuzev za generatore A1 i A2 (tabela 8, vrste 1 i 2). Uz to treba primetiti da su marginalni gubici u generatorima (vrste 3-5) po jedinici reaktivne snage $(kW/Mvar)$

- nešto veći od ovih prosečnih vrednosti, pri reaktivnom opterećenju $Q = 0.7Q_n$, a time i
- manji od ovih prosečnih vrednosti u području reaktivnih opterećenja $Q \leq 0.6Q_n$.

Tabela 7. Osnovni tehnički podaci, nominalne karakteristike i reaktanse datih generatora

Veličine generatora	Generator A2 (A1-A2)	Generator A5 (A3-A6)	Generator B1 (B1-B2)
Nominalna prividna snaga, S_n (kVA)	247 000	367 000	727 500
Nominalni napon generatora, U_G (V)	15 750	15 000	21 000
Nominalna struja generatora, I_G (A)	9 050	14 126	20 000
Nominalni faktor snage, $\cos \varphi$	0.85	0.85	0.85
Nominalna aktivna snaga, P_n (MW)	210 000	308 500	618 375
Nominalna reaktivna snaga, Q_n (Mvar)	130 000	198 800	383 235
Nominalni broj obrtaja, n (o/min)	3 000	3 000	3 000
Stepen iskorišćenja snage, η	0.986	0.984	0.9863
Nominalni napon pobude, U_m (V)	460	310	550
Nominalna struja pobude, I_m (A)	1 930	3 840	5 875
Struja pobude u praznom hodu, I_{f0} (A)	732	1 278	1 530
Pobuda za međugvožđe("gap"), I_g (A)	703	1 168	1 425
Hlađenje namotaja statora	Vodonik	Voda	Voda
Hlađenje namota rotora, gvožđa i ostalo	Vodonik	Vodonik	Vodonik
Uzdužna sinhrona reaktansa, x_d	1.845	2.14	2.56
Uzdužna reaktansa u tranz. režimu, x_d'		0.3	0.38
Uzdužna reakt. u suptranz. režimu, x_d''	0.2	0.23	0.24
Reaktansa rasipanja statora ¹ , x_t	0.1751	0.2051	0.244
Inverzna reaktansa generatora, x_2		0.21	0.24
Nulta reaktansa generatora, x_0		0.11	0.16
Potijeova reaktansa, x_p			
¹ - Reaktansa rasipanja statora je određena računski po približnoj formuli, $x_t = x_d'' - 0.025$ [6]			

Tabela 8. Jedinični i marginalni gubici snage po jedinici reaktivnih opterećenja, uključujući i reaktivna snage iznad nominalnih vrednosti: $Q_{m4} > Q_{m3} > Q_{m2} > Q_n$ [2]

Generatori:	A1-A2	A3-A6	B1-B2
<i>Prosečni jedinični gubici opterećenja, (kW/MW)_{med} ili (kW/Mvar)_{med}</i>			
1. Za područje aktivne snage od 0-P _n , (Q=0) (kW/MW) _{med}	5.176	6.103	5.228
2. Za reaktivne snage od Q=0-Q _n , (i P ₁ =P _n), (kW/Mvar) _{med}	5	6.735	7.309
<i>Marginalni gubici u pobudnom namotaju po jedinici reaktivne snage, ΔP_{f,i} /ΔQ_i, (kW/Mvar)</i>			
9. Za reaktivnu snagu Q= 0.5Q _n , (kW/Mvar)	2.778	3.091	3.801
10. Za reaktivnu snagu Q= 0.7Q _n , (kW/Mvar)	3.301	4.302	5.307
11. Za reaktivnu snagu Q= Q _n , (kW/Mvar)	4.11	7.064	8.928
12. Za reaktivnu snagu <i>Q_{m2} > Q_n, (i P₂=0.95P_n)</i> (kW/Mvar)	4.335	7.769	9.823
13. Za reaktivnu snagu <i>Q_{m3} > Q_{m2}, (i P₃=0.90P_n)</i> (kW/Mvar)	4.401	7.835	9.932
14. Za reaktivnu snagu <i>Q_{m4} > Q_{m3}, (i P₃=0.85P_n)</i> (kW/Mvar)	4.456	7.911	10.056
<i>Marginalni gubici opterećenja u generatoru po jedinici reaktivne snage, ΔP_{YG,i} /ΔQ_i (kW/Mvar)</i>			
3. Za reaktivnu snagu Q=0.5Q _n , (i P ₁ =P _n) (kW/Mvar)	4.505	5.807	5.615
4. Za reaktivnu snagu Q=0.7Q _n , (i P ₁ =P _n) (kW/Mvar)	5.794	8.224	7.99
5. Za reaktivnu snagu Q= Q _n , (i P ₁ =P _n) (kW/Mvar)	7.753	12.798	12.762
6. Za reaktivnu snagu <i>Q_{m2} > Q_n, (i P₂=0.95P_n)</i> (kW/Mvar)	8.304	13.909	13.939
7. Za reaktivnu snagu <i>Q_{m3} > Q_{m2}, (i P₃=0.90P_n)</i> (kW/Mvar)	8.473	14.066	14.122
8. Za reaktivnu snagu <i>Q_{m4} > Q_{m3}, (i P₃=0.85P_n)</i> (kW/Mvar)	8.616	14.233	14.32
<i>Marginalni gubici u bloku generator-transf. po jedinici reaktivne snage, ΔP_{Y,G+T,i} /ΔQ_i (kW/Mvar)</i>			
15. Za reaktivnu snagu Q= 0.5Q _n , (kW/Mvar)	5.482	7.055	6.456
16. Za reaktivnu snagu Q= 0.7Q _n , (kW/Mvar)	7.207	10.027	9.205
17. Za reaktivnu snagu Q= Q _n , (kW/Mvar)	9.818	15.432	14.541
18. Za reaktivnu snagu <i>Q_{m2} > Q_n, (i P₂=0.95P_n)</i> (kW/Mvar)	10.552	16.732	15.847
19. Za reaktivnu snagu <i>Q_{m3} > Q_{m2}, (i P₃=0.90P_n)</i> (kW/Mvar)	10.78	16.93	16.055
20. Za reaktivnu snagu <i>Q_{m4} > Q_{m3}, (i P₃=0.85P_n)</i> (kW/Mvar)	10.973	17.138	16.298

Interesantno je uporediti prosečne jedinične gubitke snage po jedinici reaktivne snage (kW/Mvar)_{med} sa odgovarajućim vrednostima istih (kW/Mvar) za različite nivoe reaktivnih opterećenja (Q). U tom cilju, u tabeli 8 su pridodati i podaci o marginalnim gubicima snage za reaktivna opterećenja iznad nominalnih vrednosti: $Q_{m4} > Q_{m3} > Q_{m2} > Q_n$. Te vrednosti su dodate "italic oznakama" u tabeli 8, tako da sadrže pomenute vrednosti marginalnih gubitaka opterećenja po jedinici reaktivne snage (kW/Mvar), za sledeće vrednosti reaktivnih opterećenja: 0.5Q_n, 0.7Q_n, Q_n, *Q_{m2} > Q_n*, *Q_{m3} > Q_{m2}* i *Q_{m4} > Q_{m3}*, za date generatore A2, A5 i B2.

Ukoliko su reaktivna opterećenja iznad nominalnih vrednosti, $Q_{m4} > Q_{m3} > Q_{m2} > Q_n$, marginalni gubici snage po jedinici reaktivne snage (kW/Mvar) postaju još veći, tako da kod generatora A5 i B2, postaju > 14 kW/Mvar, pri $Q = Q_{m4}$, i time značajno premašuju prihvatljive iznose od 10 kW/Mvar (ili od 1%). Na osnovu toga se zaključuje, da su reaktivna opterećenja u području od $0.7Q_n \div (\geq Q_n)$, iako u dozvoljenim granicama, ekonomski neopravdana, ako su zastupljena u dužim vremenskim periodima- traju > 4000 h/god.

Otežavajuća okolnost je što reaktivna opterećenja generatora značajno utiču na povećanje gubitaka snage u generatorima a time i na povećanja temperature pojedinih delova, kao i na dodatno opterećenje sistema za hlađenje, pa i na eventualne teškoće u funkcionisanju tih sistema. Posebno je taj uticaj veliki kada je u pitanju rotor jer povećanje gubitaka u namotaju pobude čini oko polovinu tog rasta. Iz tog razloga je u studiji [2] posebna pažnja posvećena određivanju gubitaka snage u pobudnom namotaju generatora. Marginalni gubici u bloku generator-transformator po jedinici reaktivne snage, $\Delta P_{Y,G+T} / \Delta Q_j$, kada su reaktivna opterećenja iznad nominalnih-vrednosti $Q_{m4} > Q_{m3} > Q_{m2} > Q_n$, su još veća-iznose 17.138 kW/Mvar (za A3-A6) i 16.298 kW/Mvar(za B1-B2), tj. redom iznose 1.714% i 1.630%.

5. Zaključci

U radu je izložen postupak proračuna gubitaka snage u generatorima. Primena te metode je detaljno ilustrovana na primeru turbogeneratora TGH 360 (410 MVA, $\cos\phi_n=0.85$), a dati su i rezultati proračuna gubitaka snage, po navedenom postupku, za još tri turbogeneratora snaga: 247 MVA i $\cos\phi_n=0.85$, 367 MVA i $\cos\phi_n=0.85$, i 727 MVA i $\cos\phi_n=0.85$. Sprovedena je i detaljnija analiza zavisnosti gubitaka snage tih generatora od reaktivnih opterećenja generatora. Najvažnije činjenice i zaključci se redom navode.

- 1. Metodologija za određivanje gubitaka snage u generatoru za karakteristične režime, kao i analiza zavisnosti tih gubitaka od vrednosti reaktivnih opterećenja je ilustrovana na primeru turbogeneratora prividne snage 410 MVA i aktivne snage 348 MW. Dati su rezultati proračuna pojedinih komponente gubitaka snage generatora:
 - Gubitaka praznog hoda, tj. zbirnih gubitaka u gvožđu i mehaničkih gubitaka $(P_{fe}+P_{fw})_G$
 - Gubitaka u namotaju statora generatora $(P_{Cu,s})$
 - Dodatnih gubitaka snage u generatoru (P_{dG}) , i
 - Gubitaka u namotaju pobude (rotora) generatora (P_r) ,

prvo za čisto aktivno opterećenje sa nominalnom snagom, a potom i režime sa nominalnom aktivnom snagom uz različita opterećenja po reaktivnoj snazi. Razlika tih gubitaka i gubitaka u režimu sa čisto aktivnom

snagom predstavlja komponentu gubitaka snage koji potiču od reaktivnih opterećenja.

Takođe su određene i odgovarajuće vrednosti gubitaka snage u blok-transformatoru, tj. gubitaka u gvožđu (P_{feT}) i gubitaka opterećenja ($P_{YT,opt}$).

2. Na osnovu dobijenih vrednosti pojedinih komponenti gubitaka ($P_{fe}+P_{fw}$, $P_{Cu,s}$, P_f , $P_{d,G}$, P_{feT} , i $P_{YT,opt}$), sračunate su odgovarajuće vrednosti ukupnih gubitaka snage u generatoru (ΣP_{YG}) i bloku generator- transformator (ΣP_{YG+T}).

3. Potom su sračunate jedinične promene ukupnih gubitaka snage pri povećanju reaktivnih opterećenja: $\Delta P_{YG,i}/\Delta Q_i$ i $\Delta P_{YG+T,i}/\Delta Q_i$, kao i promene gubitaka u namotaju pobude generatora $\Delta P_{f,i}/\Delta Q_i$, po jedinici reaktivne snage, u kW/Mvar, za datu nominalnu vrednost aktivne snage. Njihove vrednosti se značajno povećavaju sa rastom reaktivnih snaga.

4. Posebno su velika povećanja gubitaka snage u namotaju pobude. Naime, ti gubici porastu sa iznosa od oko 40%, pri čisto aktivnoj snazi ($P=P_{Gn}$, $Q=0$), na 100% kada se reaktivna snaga poveća do nominalne vrednosti (režim: $Q=Q_{Gn}$, $P=P_{Gn}$).

5. Povećanja ukupnih gubitaka snage u bloku generator-transformator dostiže 10 kW/Mvar (ili 1%), kod generatora snaga iznad 300 MW, kada reaktivna opterećenja postanu veća od 70% nominalne reaktivne snage. Na osnovu toga se zaključuje da, već pri reaktivnoj snazi $Q > 0.7Q_{Gn}$, povećanja gubitaka postaju veća od 10 kW/Mvar (ili 1%), pa bi stalan rad u ovim režimima bio neekonomičan. Ako se zna da se time i rezerva u reaktivnoj snazi svodi na nizak nivo, onda bi bilo potrebno i korisno da prosečna reaktivna opterećenja generatora ne budu iznad 70% od nominalnih ($\leq 0.7Q_N$).

6. Ovo je (pod 5) bio važan argument za podizanje nivoa kompenzacije reaktivne energije u Elektroenergetskom sistemu Elektroprivrede Srbije (EES EPS-a). Već u periodu 2005-2008. godine, sa dodatnih 550 Mvar kondenzatora u distributivnoj mreži, reaktivna snaga na pragu elektrana je smanjena za 720 Mvar a gubici snage za oko za 9 MW, samo u 10 blokova generator-transformator ukupne snage 3800 MW.

7. Zavisnosti gubitaka snage od reaktivnih opterećenja su slične, za razmatrane generatore većih snaga (> 300 MW), pa se mogu generalno pripisati generatorima čije je magnetno kolo više zasićeno nego kod generatora srednjih i manjih snaga (≤ 200 MW).

Literatura

- [1] Osnovni tehnički podaci Generatora Bloka 1 u Termoelektani "Kostolac" B.
- [2] Studija "Zavisnosti pobudnih struja i gubitaka snage u sinhronim generatorima Termoelektrana Nikola Tesla A i B od nivoa reaktivnih

- [3] Studija "Određivanje karakteristika regulacije, gubitaka snage i stvarnih dijagrama aktivnih i reaktivnih snaga (P - Q krive generatora) blokova B1 i B2 u Termoelektani "Kostolac" B, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd 2009, st.57.
- [4] Parametri i rezultati ispitivanja Generatora Bloka 1 u Termoelektani "Kostolac" B.
- [5] M.M.Kostić, "Novo pravilo za određivanje Potjeove reaktanse za relevantna opterećenja turbogeneratora", "*Elektroprivreda*", No 3, 2010, str. 210-221.
- [6] M.M.Kostić, "Nova metode za određivanje Potjeove reaktanse sinhronih turbogeneratora", "*Elektroprivreda*", No 4, 2009, str. 59-68.

Abstract. The new method for turbogenerator power losses determination is introduced in this paper. The method relies on the experimentally derived power losses versus power reactive power dependence using data recorded in characteristic operating points. The proposed procedure is illustrated on the example of turbogenerators 410 MVA (and 348 MW). The procedures and the results of power losses calculations are also given for purely active generator load and at different reactive load levels. The power losses difference at same active power levels and at different reactive power levels appears to be related to the reactive load. For the three different turbogenerators rated at 247 MVA (and 210 MW) 367 MVA (and 348 MW) 727 MVA (and 618 MW), the results of calculations and analysis of power losses functions from reactive loads are presented. It is shown that block generator-transformer power losses are reduced remarkably, when generators power factor increase up to 0.92 from 0.85. This presents an important argument for power factor correction improvement in EES EPS together with the fact that in this situation the rotation reserves have been increased. From 2005 to 2008 by installing 550 Mvar of new capacitors in distribution network, reactive power demand from generators has been reduced for 720 Mvar, and so power losses are reduced for 9 MW, only in generator-transformer blocks of total rated power of 3800 MW.

Keywords: turbogenerator, efficiency, reactive loads, excitation current, total losses, load losses.

Turbogenerator Losses Dependence of Reactive Loads

Rad primljen u uredništvo 15.09.2011. godine
Rad prihvaćen 19.10.2011. godine