

## Analiza dinamičkih karakteristika sistema za regulaciju pobude kada je aktivan limiter ugla snage primenom računarskog modela

Dušan Joksimović<sup>1</sup>, Jasna Dragosavac<sup>1</sup>, Slavko Veinović<sup>1</sup>, Đorđe Stojić<sup>1</sup>, Milan Marinković<sup>2</sup>, Milan Đorđević<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla,  
Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija

[dusan.joksimovic@ieent.org](mailto:dusan.joksimovic@ieent.org)

<sup>2</sup>ELPRO DOO, Heroji sa Košara 16/29, 17501 Vranje, Srbija

<sup>3</sup>Javno preduzeće Elektroprivreda Srbije, Carice Milice 2, 11000 Beograd, Srbija

**Kratak sadržaj:** Prema preporuci proizvođača sinhronog generatora bloka B2 u TE "Nikola Tesla B" u postojećem sistemu pobude je kao dodatna funkcija realizovan limiter ugla snage kako bi se pogonski dijagram agregata mogao u potpunosti koristiti. U okviru analize dinamičkih karakteristika koja je prikazana u radu najpre su određeni vremenski odzivi i frekventne karakteristike sistema za regulaciju pobude kada je aktivan limiter ugla snage. Na osnovu njih su dobijene vrednosti pokazatelja dinamičkih performansi koji govore o kvalitetu regulacije. U radu je uz analizu dinamičkih karakteristika dat i kratak opis realizacije limitera, kao i opis računarskih modela primenjenih pri analizi.

**Ključne reči:** sistem pobude, limiter ugla snage, pogonski dijagram, računarski model, pokazatelji dinamičkih karakteristika

### 1. Uvod

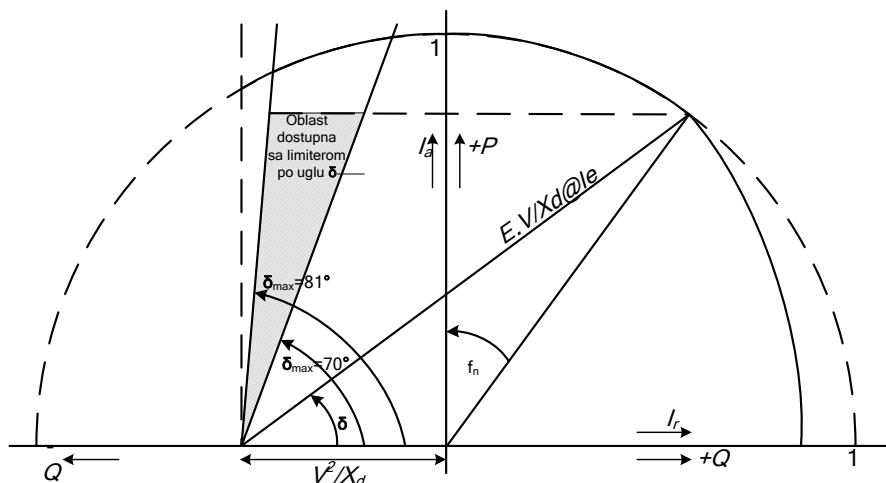
Da bi se omogućio rad generatora bloka B2 u Termoelektrani „Nikola Tesla B“ u kapacitivnoj oblasti prema pogonskom dijagramu dostavljenom od strane proizvođača generatora, automatskom regulatoru napona sistema za regulaciju pobude je dodat limiter po uglu snage generatora. Osnovna funkcija limitera je delovanje na povećanje struje pobude generatora kada ugao snage postane veći od podešene vrednosti prorade limitera. Na taj način limiter ograničava ugao snage na podešenu vrednost prorade i time sprečava radne režime koji mogu ugroziti stabilnost sinhrono mašine ili mogu

dovesti do gubitka sinhronizma usled nedovoljne pobude. Sa standardnim limiterom minimalne pobude, a bez limitera po uglu snage, je dozvoljen rad generatora do ugla snage od  $70^\circ$ , dok je sa limiterom po uglu snage dozvoljen rad do ugla od  $85^\circ$  [1].

Problem pri određivanju dinamičkih karakteristika sistema pobude predstavlja to što je većina ispitivanja na samom agregatu često skupa i vremenski ograničena. Pored toga, mogućnosti ispitivanja su ograničene i time da generator i elektroenergetski sistem moraju biti u dozvoljenom režimu rada, kako ne bi bila ugrožena njihova bezbednost, i kako bi se izbegla havarija. To često onemogućava velike promene veličina koje su od interesa za rad pobudnog sistema kao i ispitivanja svih dinamičkih karakteristika sistema za regulaciju pobude i proveru podešenih vrednosti parametara sistema pobude. Zbog toga postoji potreba za računarskim modelima koji precizno simuliraju rad sistema za regulaciju pobude [2]. Pravilan izbor parametara sistema pobude u velikoj meri je olakšan njihovom primenom. Modelovanje i korišćenje računarskih simulacija omogućava analizu odziva sistema za regulaciju pobude na različite poremećaje, kao i određivanje dinamičkih performansi sistema za različite radne režime agregata. Na osnovu rezultata simulacije mogu se odrediti vrednosti pokazatelja dinamičkih performansi i analizirati uticaj parametara pobude na pokazatelje, što omogućava verifikaciju izabranih vrednosti parametara. Modeli sistema za regulaciju pobude mogu biti nelinearni i linearni. Nelinearni modeli se mogu koristiti za analizu i malih i velikih poremećaja u sistemu. Linearni modeli su modeli u prostoru stanja i dobijaju se linearizacijom nelinearnih modela u okolini izabrane radne tačke. Koriste se za analizu odziva na male poremećaje u sistemu. U ovom radu je na osnovu odziva u vremenskom i frekventnom domenu dobijenih primenom računarskih modela data analiza dinamičkih karakteristika sistema za regulaciju pobude kada je aktivan limiter ugla snage. U okviru analize određene su vrednosti pokazatelja dinamičkih performansi i proverena je stabilnost sistema pri malim i velikim poremećajima.

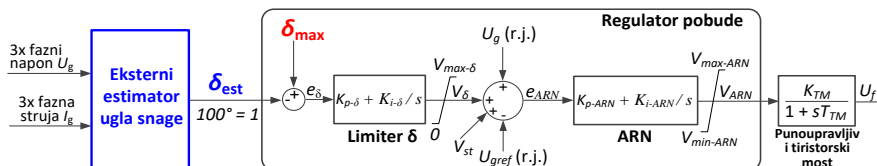
## **2. Tehničko rešenje limitera po uglu snage**

Limiter ugla snage omogućava proširenje dozvoljene oblasti pogonskog dijagrama sinhronog generatora [4]. Ugradnjom limitera po uglu snage omogućen je bezbedan rad generatora u osenčenom delu kapacitivne oblasti pogonskog dijagrama na slici 2-1.



Slika 2-1. Teoretski konstruisan P-Q dijagram turbo sinhronog generatora

Tehničko rešenje limitera po uglu snage realizovano u okviru sistema pobude bloka B2 u TE "Nikola Tesla B" zasnovano je na kombinaciji eksternih uređaja TM4C za estimaciju vrednosti ugla snage generatora i funkcije limitera po uglu snage koja je implementirana kao nova funkcija postojećih regulatora pobude, slika 2-2 [1]. Limiter je zasnovan na PI regulacionom dejstvu i kao i ostali limiteri deluje preko sumatora automatske regulacije.



Slika 2-2. Realizacija sistema sa eksternim estimatorom ugla snage i limiterom po uglu snage implementiranim u okviru automatskog regulatora pobude

### 3. Računarski modeli

Za analizu dinamičkih performansi sistema za regulaciju pobude formirani su modeli korišćenjem programskog paketa *Matlab/Simulink*. Većina elemenata u modelu je uzeta iz *Simulink* biblioteke *SimPowerSystems*. U modelima su regulatori pobude modelovani pomoću alatke *Matlab C/C++ Compiler* koji izvorni C-kod regulatora pobude koji je instaliran na samom regulatoru implementira u *Simulink* model. Simulacije su bazirane na numeričkom rešavanju sistema diferencijalnih jednačina.

Model agregata B2 u TE "Nikola Tesla B" je prikazan na slici 3-1. Model obuhvata model sinhronog generatora, regulator pobude i model turbine sa turbinskom regulacijom [3]. *Simulink* model sinhronog generatora za

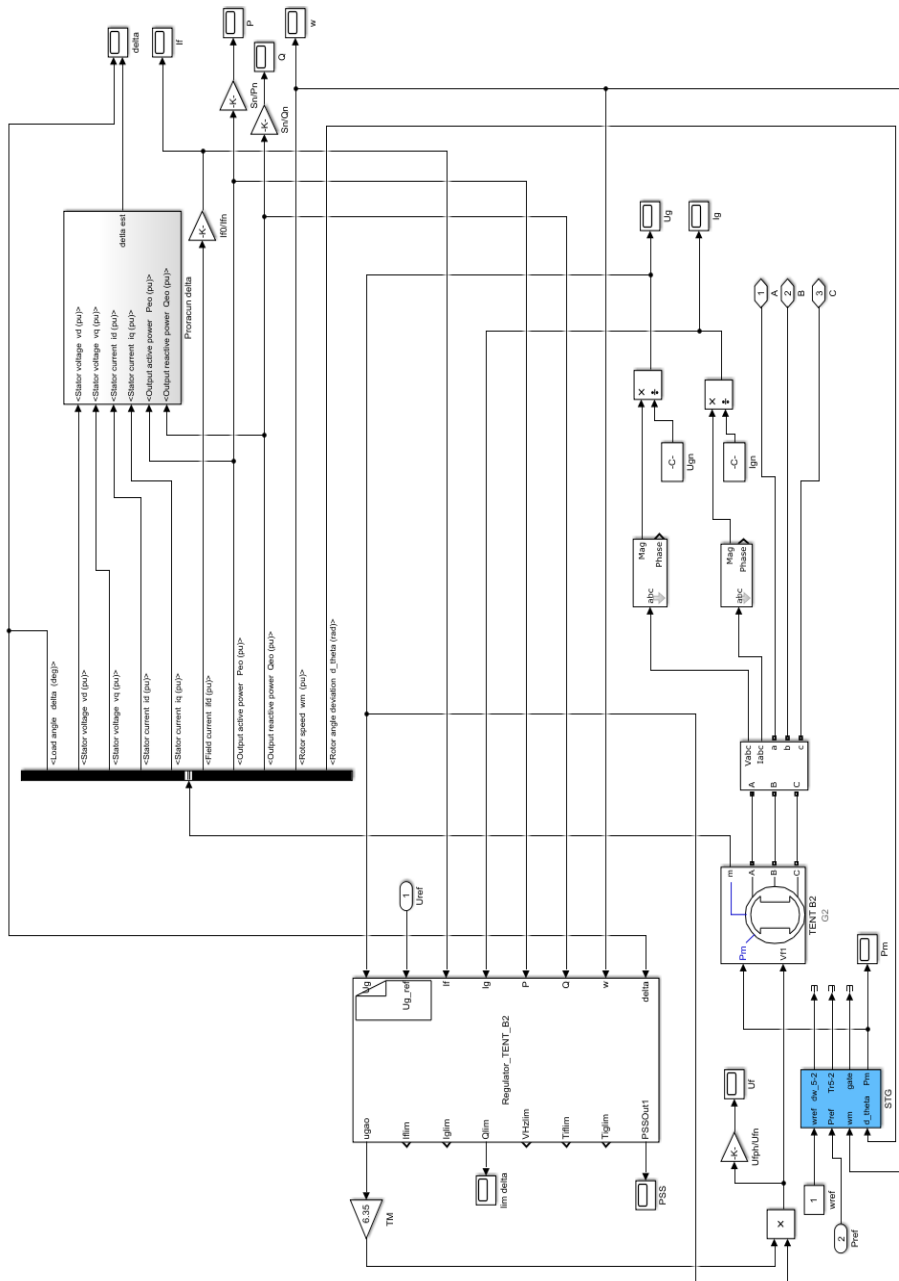
modelovanje zasićenja koristi unete podatke karakteristike praznog hoda. Ulazni signal limitera ugla snage je estimirana vrednost ugla dobijena pomoću relacije [5] i [12]:

$$\delta_{est} = \angle(U_g + j \cdot X_q \cdot (I_g \cdot \cos\varphi + j \cdot I_g \cdot \sin\varphi_g)) \quad (3.1)$$

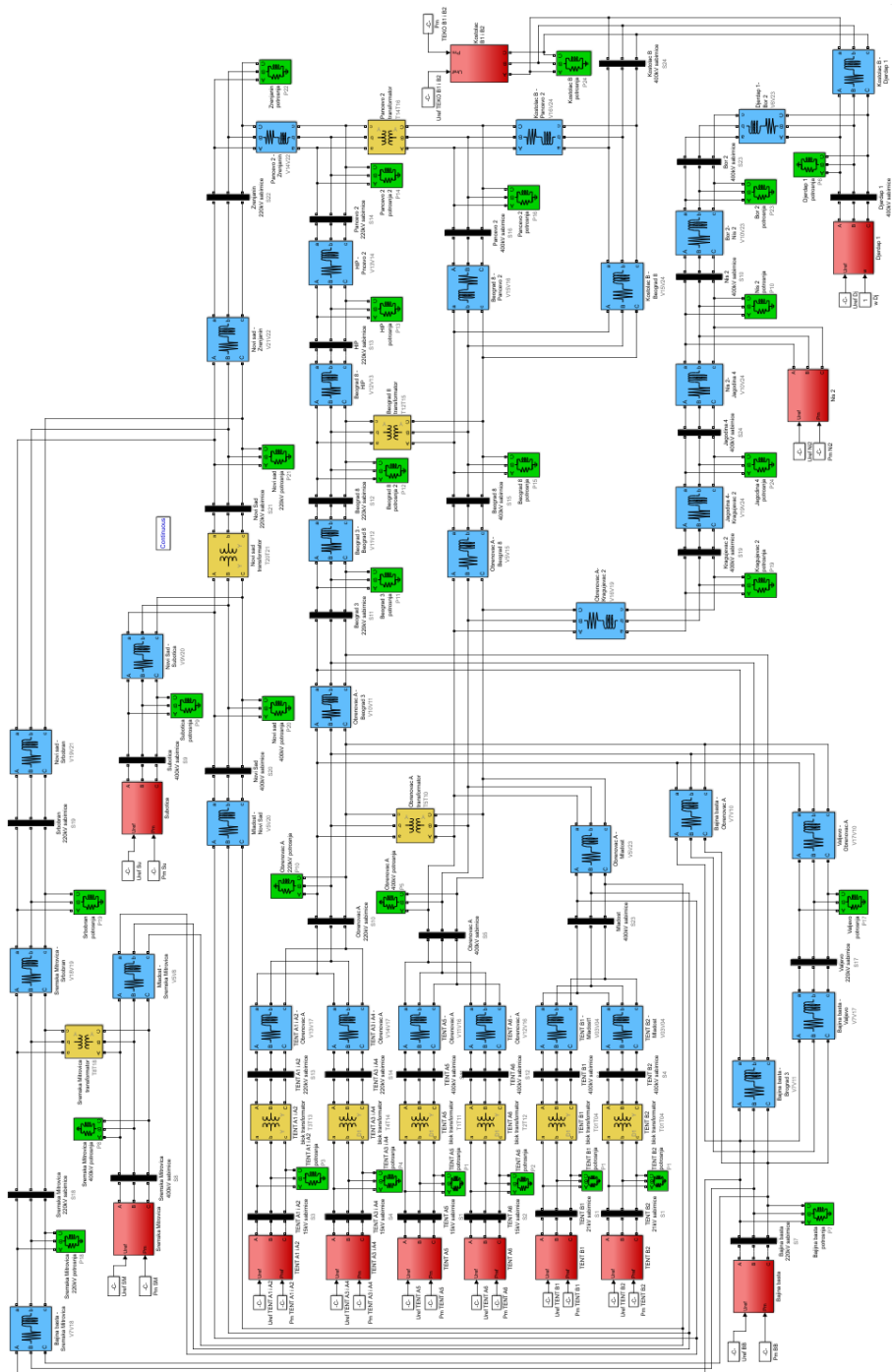
gde su:  $\delta_{est}$  - estimirana vrednost ugla snage,  $U_g$  - efektivna vrednost faznog napona statora,  $I_g$  -efektivna vrednost fazne struje statora,  $\varphi_g$  - faktor snage i  $X_q$  - sinhrona reaktansa u q-osi. Takođe, *Simulink* model sinhronog generatora kao izlazni signal daje ugao snage  $\delta$  koji je iskorišćen za proveru estimacije.

Za simulaciju rada agregata na mreži korišćeni je model elektroenergetskog sistema prikazan na slici 3-2. Model obuhvata modele agregata u TENTu A i B zajedno sa modelom 400kV i 220kV elektroenergetskog sistema. Modeli agregata obuhvataju model sinhronog generatora sa ili bez budilice, regulator pobude [3] i [10], model turbine sa turbinskom regulacijom [3], modele blok transformatora, sopstvene potrošnje i voda od blok transformatora do razvodnog postrojenja. Model 400kV i 220kV elektroenergetskog sistema obuhvata modele vodova, potrošnji, transformatora i ekvivalentnih generatora. Elektroenergetski sistem iza sabirnica Kostolac B1 i B2, Đerdap 1, Niš 2, Sremska Mitrovica i Subotica je modelovan ekvivalentnim generatorima.

*Matlab/Simulink* modeli se koriste za analizu sistema za regulaciju pobude u vremenskom domenu. Za analizu sistema u frekventnom domenu je korišćenjem programskog paketa *Matlab* urađen program koji vrši linearizaciju kompletnog modela TE "Nikola Tesla B" i elektroenergetskog sistema u okolini izabrane radne tačke i formira model sistema u prostoru stanja [6]. Parametri izabranog radnog režima se dobijaju pomoću proračuna tokova snaga, za šta se koristi *Matlab/Simulink* alatka *Powergui*. U programu je svaki generator zajedno sa pobudnim sistemom predstavljen modelom 7. reda uz zanemarenje uticaja prigušnih namotaja. Promenljive stanja su priraštaji: fluksa statora po d i q-osi, fluksa pobudnog namotaja, pobudnog napona, ugaone brzine rotora, ugla rotora i izlaza iz integratora regulatora pobude. Ugao rotora se meri u odnosu na d - osu referentnog čvora "Đerdap 1". Generatori su međusobno povezani preko matrice admitansi transformisane primenom Kronove redukcije [7].



Slika 3-1. Model agregata TENT B2



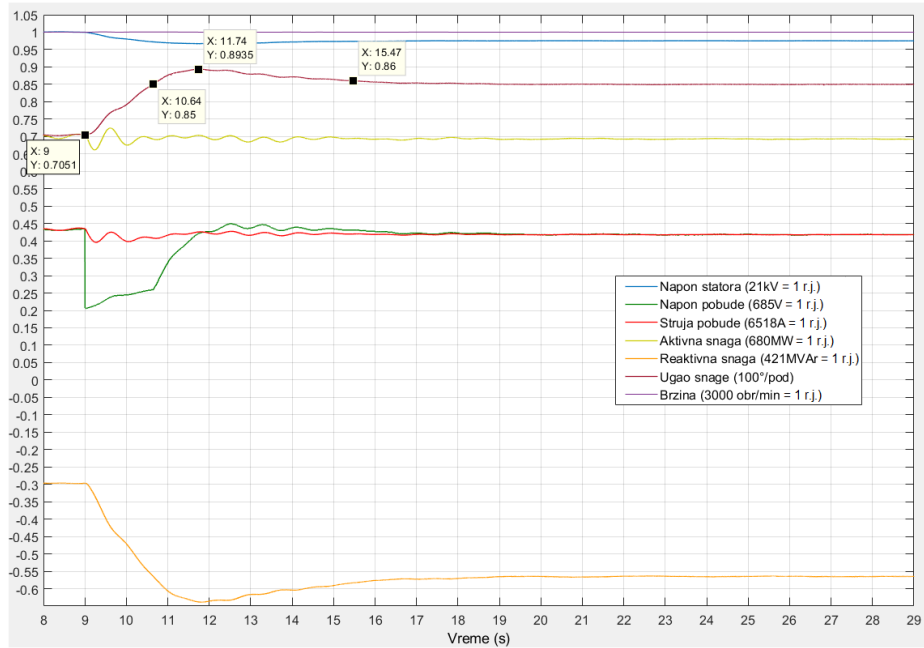
Slika 3-2. Model 400kV i 220kV elektroenergetskog sistema

#### 4. Određivanje pokazatelja dinamičkih performansi

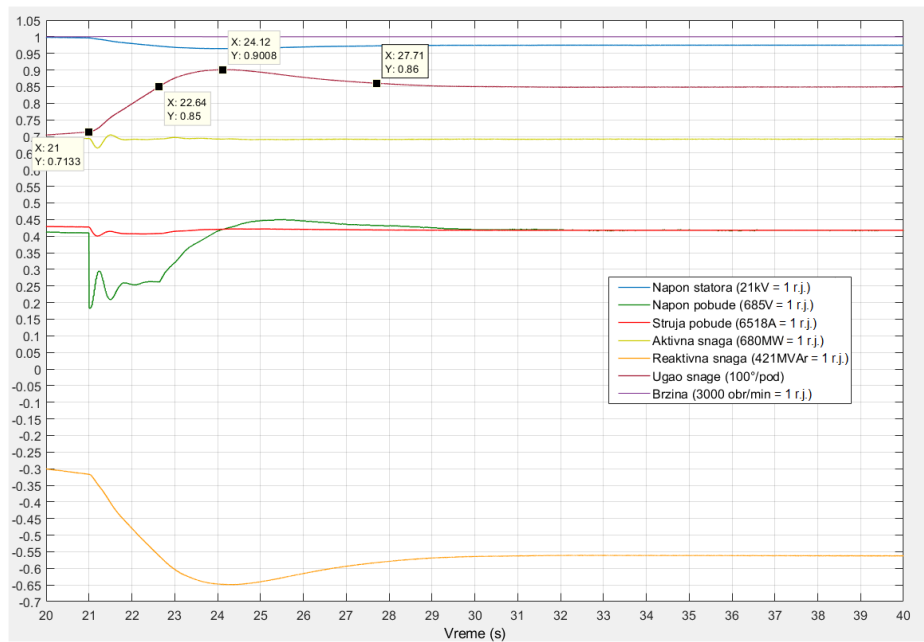
Na osnovu vremenskih odziva (slike 4-1 do 4-4) i frekventnih karakteristika (slike 4-7 do 4-10) određene su vrednosti pokazatelja dinamičkih performansi simuliranog sistema pri odradi limitera ugla snage u vremenskom i frekventnom domenu za minimalnu (0,7) i nominalnu aktivnu snagu i za tri vrednosti napona statora (0,95, 1 i 1,05) sa isključenim i uključenim stabilizatorom elektroenergetskog sistema (u radu su prikazani samo odzivi za nominalnu vrednost napona statora). Stabilizator je standardnog tipa PSS2B. Model stabilizatora je dat u [10]. Osnovna funkcija stabilizatora je prigušenje elektromehaničkih oscilacija generisanjem pozitivnog prigušnog momenta na vratilu koji je u fazi sa varijacijama brzine. To se postiže delovanjem na pobudni fluks preko dodatnog ulaza u automatsku regulaciju napona statora. Stabilizator treba da deluje samo na oscilacije koje su u opsegu učestanosti od interesa (od 0,2 do 2,5Hz). Vrednosti parametara limitera po uglu snage, automatske regulacije napona statora, stabilizatora i tiristorskog mosta su date u tabeli 4-1. Parametri automatske regulacije napona su podešeni prema [8], dok su parametri stabilizatora podešeni prema [9]. Pokazatelji dinamičkih performansi su dati u tabeli 4-2. Prihvatljive vrednosti pokazatelja su date u [2].

Tabela 4-1. Vrednosti parametara limitera po uglu snage, automatske regulacije, stabilizatora i tiristorskog mosta

Limiter $\delta$		ARN		Stabilizator		Tiristorski most	
$\delta_{max}$	0.85	$K_{p-ARN}$	3	$V_{ST-nmax}$	0.1	$K_{TM}$	6.35
$K_{p-\delta}$	0.3	$K_{i-ARN}$	0,8	$V_{ST-nmin}$	-0,1	$T_{TM}$	0.005
$K_{i-\delta}$	0.1	$V_{max-ARN}$	1	$V_{ST-PGmax}$	0,5		
$V_{max-\delta}$	0.6	$V_{min-ARN}$	-0,9	$V_{ST-PGmin}$	1,1		
				$T_{w1}$	10		
				$T_{w2}$	10		
				$T_{w3}$	10		
				$T_{w4}$	-		
				$K_{S2}$	1,39		
				$K_{S3}$	1		
				$T_1$	0,15		
				$T_2$	0,025		
				$T_3$	0,15		
				$T_4$	0,02		
				$T_6$	0		
				$T_7$	10		
				$T_8$	0,5		
				$T_9$	0,1		
				$T_{10}$	0		
				$T_{11}$	0,033		
				$M$	1		
				$N$	5		
				$K_{S1}$	20		
				$V_{STmax}$	0,1		
				$V_{STmin}$	-0,1		

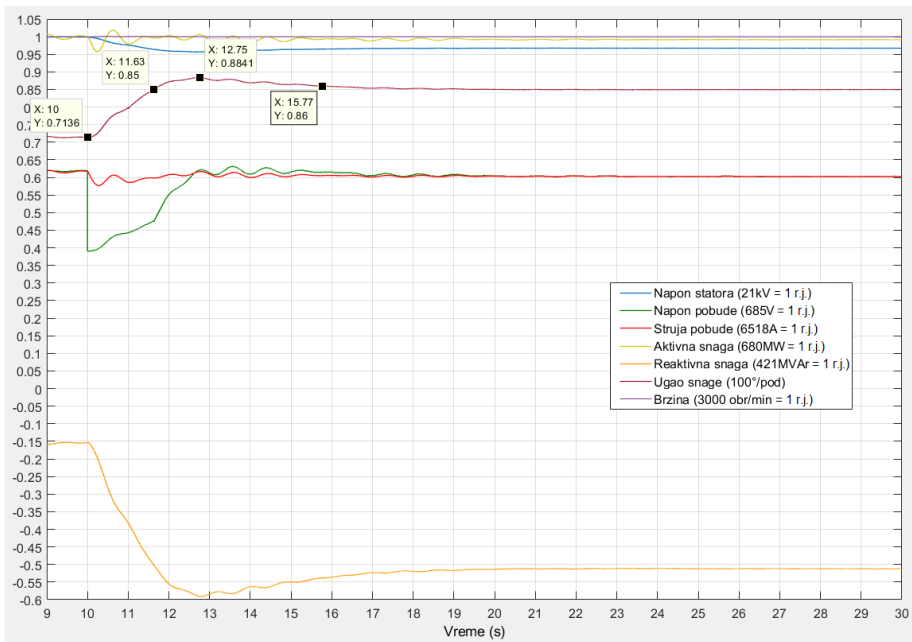


Slika 4-1. Odziv na odskočnu promenu reference ARNa od -5% pri odradi limitera ugla snage sa isključenim stabilizatorom za  $P=0,7P_n$  i  $U_g=U_{gn}$

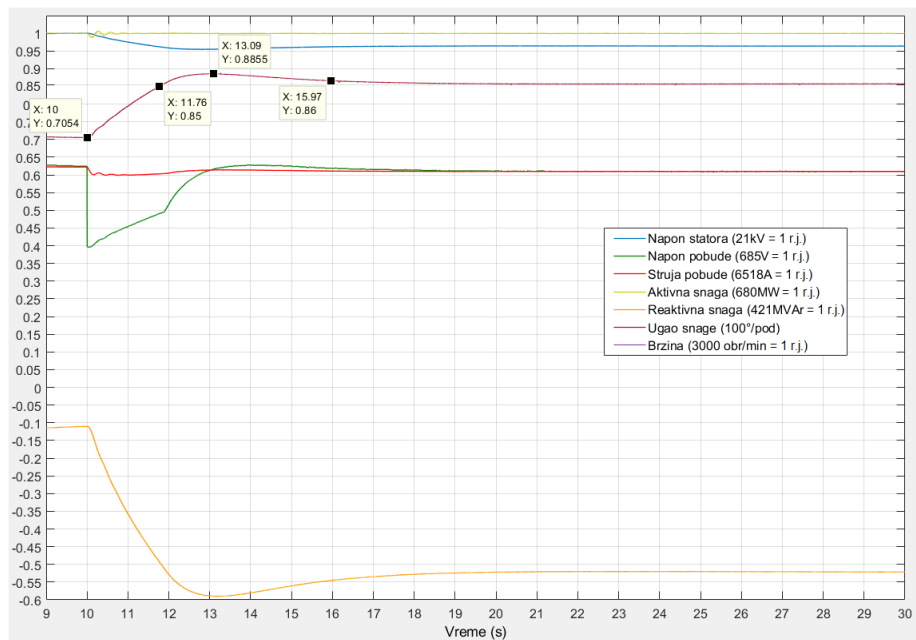


Slika 4-2. Odziv na odskočnu promenu reference ARNa od -5% pri odradi limitera ugla snage sa uključenim stabilizatorom za  $P=0,7P_n$  i  $U_g=U_{gn}$

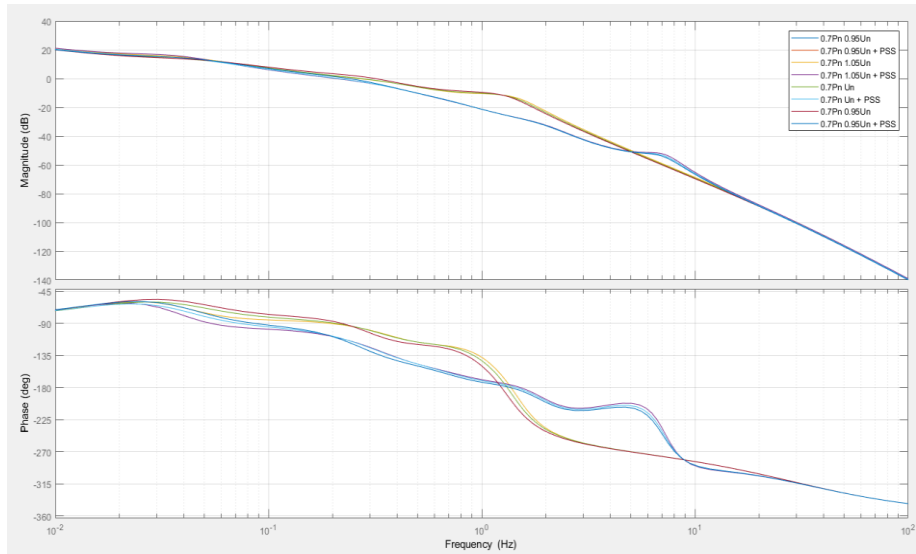




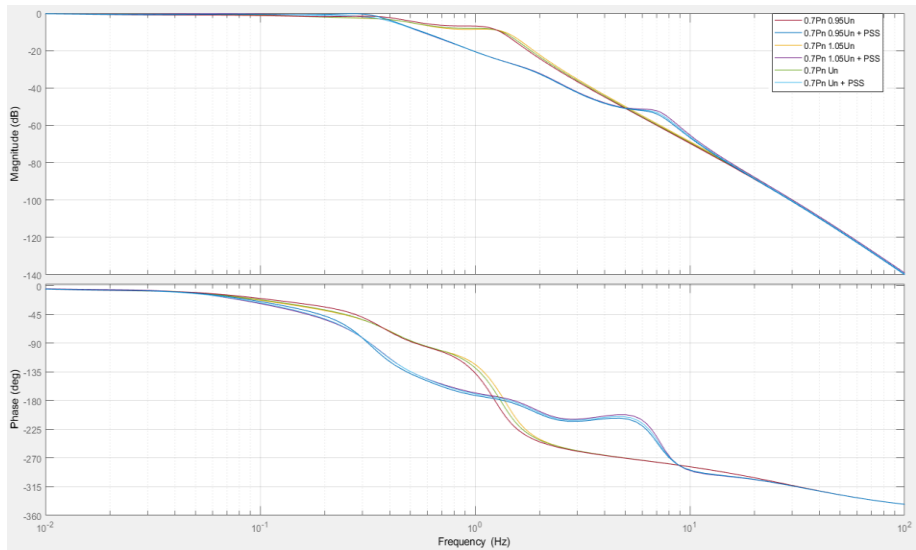
Slika 4-3. Odziv na odskočnu promenu reference ARNa od -5% pri odradi limita ugla snage sa isključenim stabilizatorom za  $P=P_n$  i  $U_g=U_{gn}$



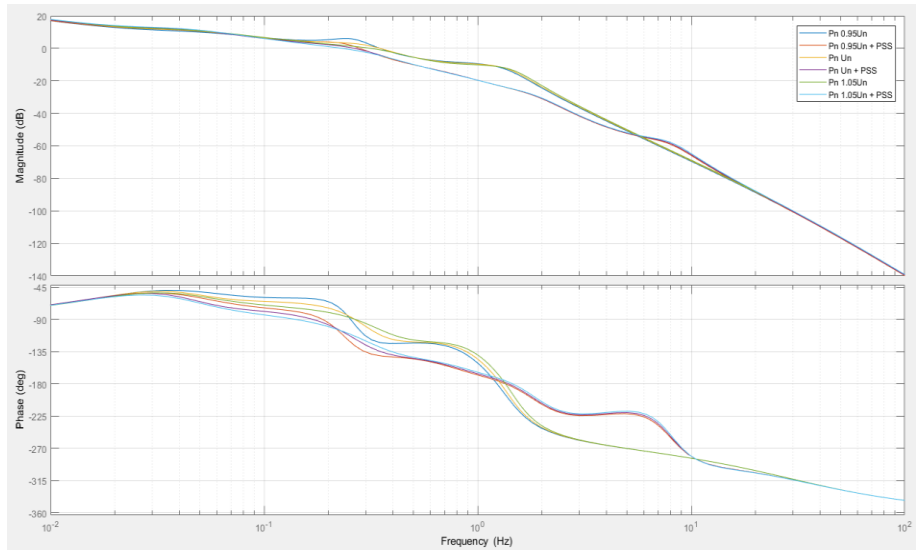
Slika 4-4. Odziv na odskočnu promenu reference ARNa od -5% pri odradi limita ugla snage sa uključenim stabilizatorom za  $P=P_n$  i  $U_g=U_{gn}$



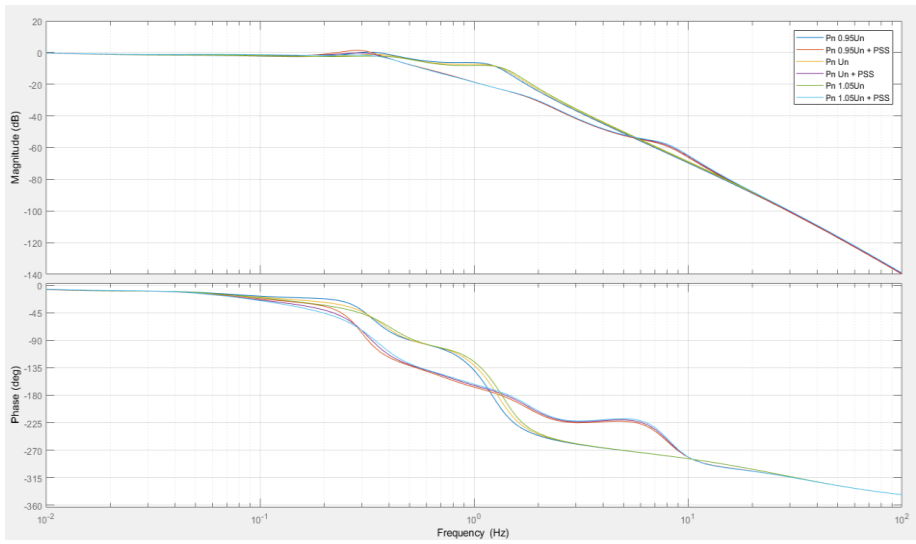
Slika 4-7. Frekventne karakteristike limitera ugla snage pri otvorenoj povratnoj sprezi za  $P=0,7P_n$



Slika 4-8. Frekventne karakteristike limitera ugla snage pri zatvorenoj povratnoj sprezi za  $P = 0,7P_n$



Slika 4-9. Frekventne karakteristike limitera ugla snage pri otvorenoj povratnoj sprezi za  $P=P_n$



Slika 4-10. Frekventne karakteristike limitera ugla snage pri zatvorenoj povratnoj sprezi za  $P = P_n$

Tabela 4-2. Pokazatelji dinamičkih performansi simuliranog sistema pri odradi limitera ugla snage

Naziv	$U_g=0,95$ $P=0,7$ St. isklj.	$U_g=0,95$ $P=0,7$ St. uklj.	$U_g=0,95$ $P=1$ St. isklj.	$U_g=0,95$ $P=1$ St. uklj.	Opseg
Prag odrade limitera (°)	85	85	85	85	/
Maks. vrednost ugla (°)	89,03	89,84	88,11	88,90	/
Prebačaj ugla snage (°)	4,03	4,84	3,11	3,90	/
Vreme smirenja (s)	4,59	4,86	3,76	4,54	0.4 -10
Statičko pojačanje (dB)	>20,1	>19,9	>17	>17	>30
Presečna učestanost (Hz)	0,317	0,237	0,349	0,281	/
Fazna margina (°)	74	63	58	49	>40
Margina pojačanja (dB)	11,4	26,3	11,2	23,9	>6
Propusni opseg (Hz)	0,434	0,384	0,466	0,388	0.1-3
Rezonantni vrh (dB)	0	0	0,29	1,40	0-12
Naziv	$U_g=1$ $P=0,7$ St. isklj.	$U_g=1$ $P=0,7$ St. uklj.	$U_g=1$ $P=1$ St. isklj.	$U_g=1$ $P=1$ St. uklj.	Opseg
Prag odrade limitera (°)	85	85	85	85	/
Maks. vrednost ugla (°)	89,35	90,08	88,41	88,55	/
Prebačaj ugla snage (°)	4,35	5,08	3,41	3,55	/
Vreme smirenja (s)	4,83	5,07	4,14	4,21	0.4 -10
Statičko pojačanje (dB)	>20,4	>20,3	>17,4	>17,4	>30
Presečna učestanost (Hz)	0,272	0,212	0,349	0,264	/
Fazna margina (°)	83	70	58	64	>40
Margina pojačanja (dB)	12,2	27,1	11,5	24,3	>6
Propusni opseg (Hz)	0,364	0,361	0,451	0,385	0.1-3
Rezonantni vrh (dB)	0	0	0	0	0-12
Naziv	$U_g=1,05$ $P=0,7$ St. isklj.	$U_g=1,05$ $P=0,7$ St. uklj.	$U_g=1,05$ $P=1$ St. isklj.	$U_g=1,05$ $P=1$ St. uklj.	Opseg
Prag odrade limitera (°)	85	85	85	85	/
Maks. vrednost ugla (°)	89,5	89,75	88,08	88,89	/
Prebačaj ugla snage (°)	4,5	5,23	3,08	3,89	/
Vreme smirenja (s)	5,89	4,96	4,16	4,55	0.4 -10
Statičko pojačanje (dB)	>21,1	>21	>17,9	>17,9	>30
Presečna učestanost (Hz)	0,265	0,206	0,315	0,230	/
Fazna margina (°)	84	70	82	74	>40
Margina pojačanja (dB)	12,5	27,9	12,1	25	>6
Propusni opseg (Hz)	0,35	0,358	0,432	0,376	0.1-3
Rezonantni vrh (dB)	0	0	0	0	0-12

Na osnovu vremenskih odziva na slikama 4-1 do 4-4 može se zaključiti da su u svim posmatranim režimima rada agregata odzivi limitera ugla snage stabilni. Limiter nakon povećanja ugla snage iznad granice prorade deluje na smanjenje ugla uz odgovarajuću dinamiku sprečavajući ispad generatora iz sinhronizma. Nakon toga limiter održava ugao snage na granici prorade sve dok uslovi u sistemu ne dovedu do smanjenja ugla. Pokazatelji dinamičkih performansi dati u tabeli 4-1 u svim posmatranim režimima se nalaze u opsegu prihvatljivih vrednosti, a vreme smirenja je manje od vremenske

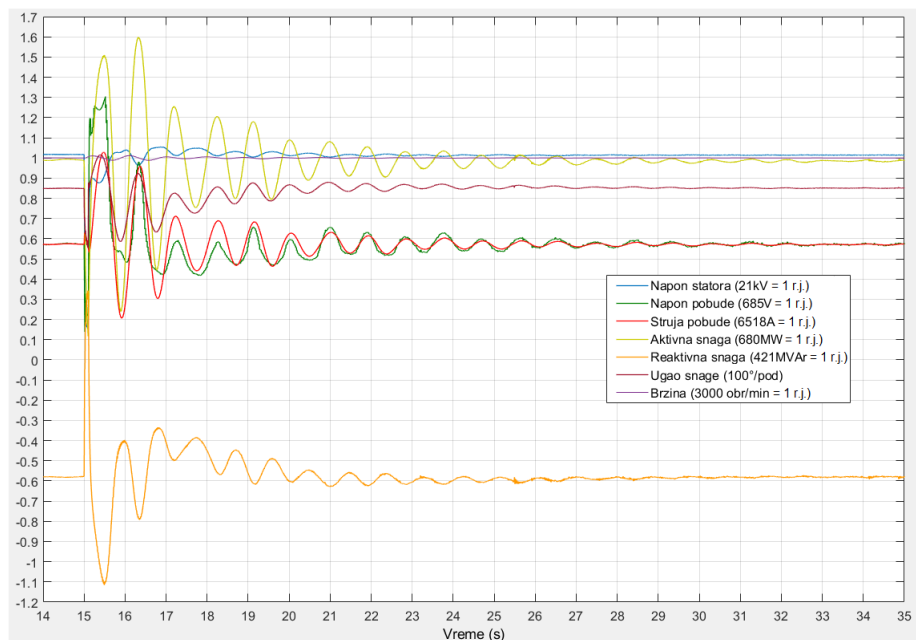
zadržke odrade prvog stepena generatorske zaštite od gubitka pobude koje iznosi 10s [11].

Pri uključenom stabilizatoru elektroenergetskog sistema elektromehaničke oscilacije se znatno brže prigušuju, ali svojim delovanjem stabilizator usporava odziv sistema pobude, a samim tim i reaktivne snage, pa je vreme smirenja duže, prebačaj ugla snage povećan, a fazna margina manja. Ipak, u svim posmatranim režimima i sa uključenim stabilizatorom svi pokazatelji imaju prihvatljive vrednosti, a stabilnost generatora pri odradi limitera ugla snage nije ugrožena.

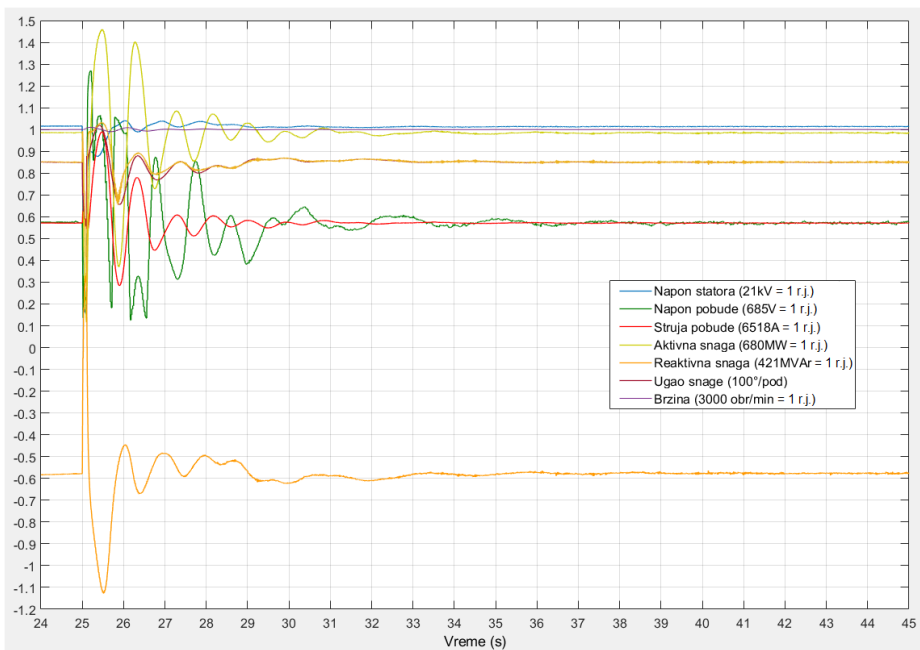
Za isti početni ugao snage ( $70^\circ$ ) pri većoj aktivnoj snazi je potrebna veća promena reaktivne snage (na koju sistem pobude direktno utiče), da bi došlo do aktiviranja limitera po uglu snage. Samim tim prebačaj ugla snage i vremena smirenja su manji pri nominalnoj aktivnoj snazi u odnosu na minimalnu.

## 5. Odzivi pri kratkim spojevima na 400 kV sabirnicama

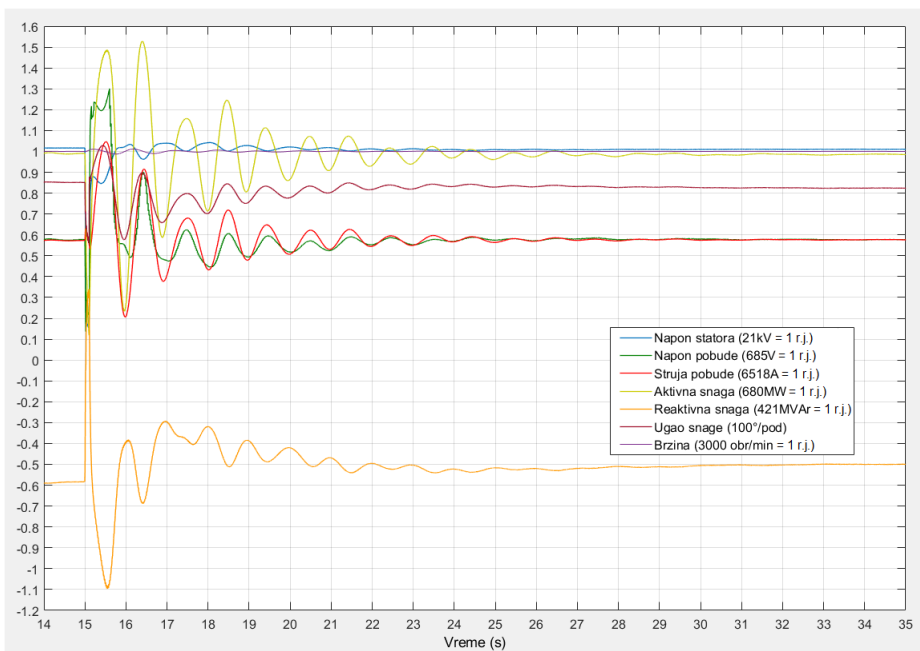
Testirani su odzivi simuliranog sistema pri aktivnom limiteru ugla snage sa isključenim i sa uključenim stabilizatorom EESa za najkritičnije slučajeve trolnog kratkog spoja u trajanju od 100 ms na početku vodova koji polaze iz 400kV razvodnog postrojenja Mladost.



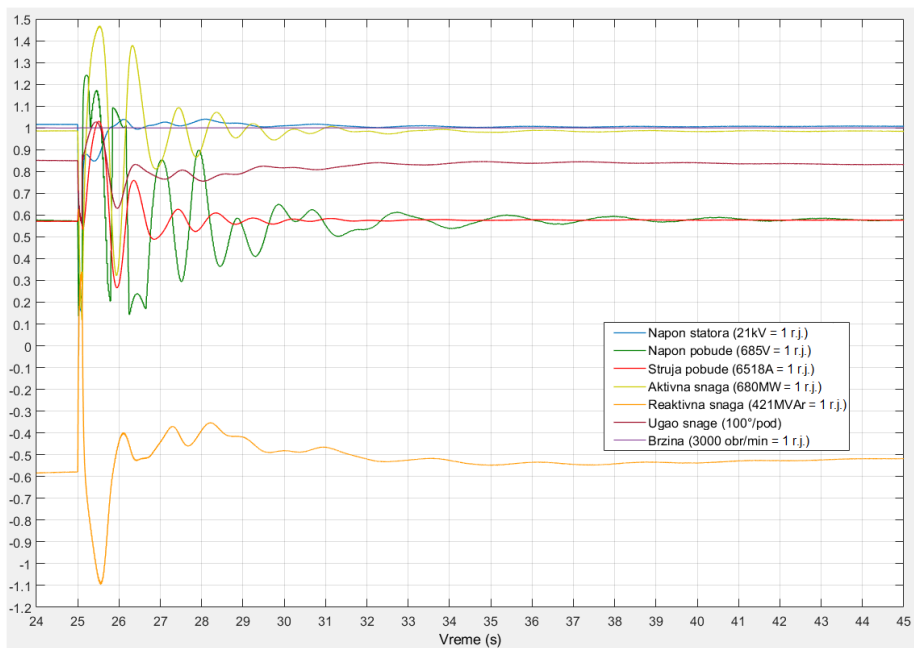
Slika 5-1. Odziv pri trolnom kratkom spoju na početku voda Mladost -Sremska Mitrovica pri aktivnom limiteru ugla snage sa isključenim stabilizatorom EESa



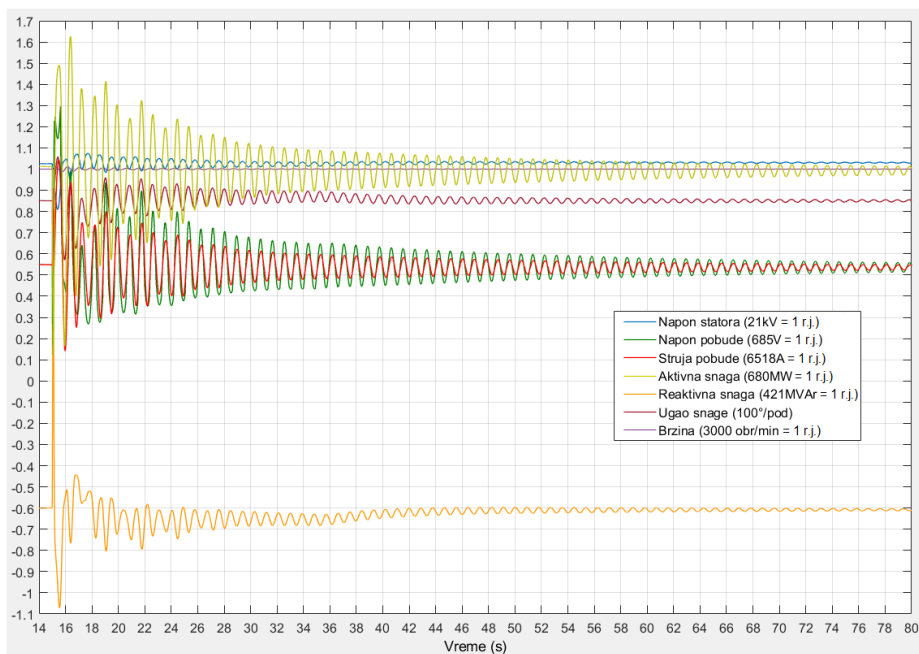
Slika 5-2. Odziv pri troleznom kratkom spoju na početku voda Mladost - Sremska Mitrovica pri aktivnom limiteru ugla snage sa uključenim stabilizatorom EESa



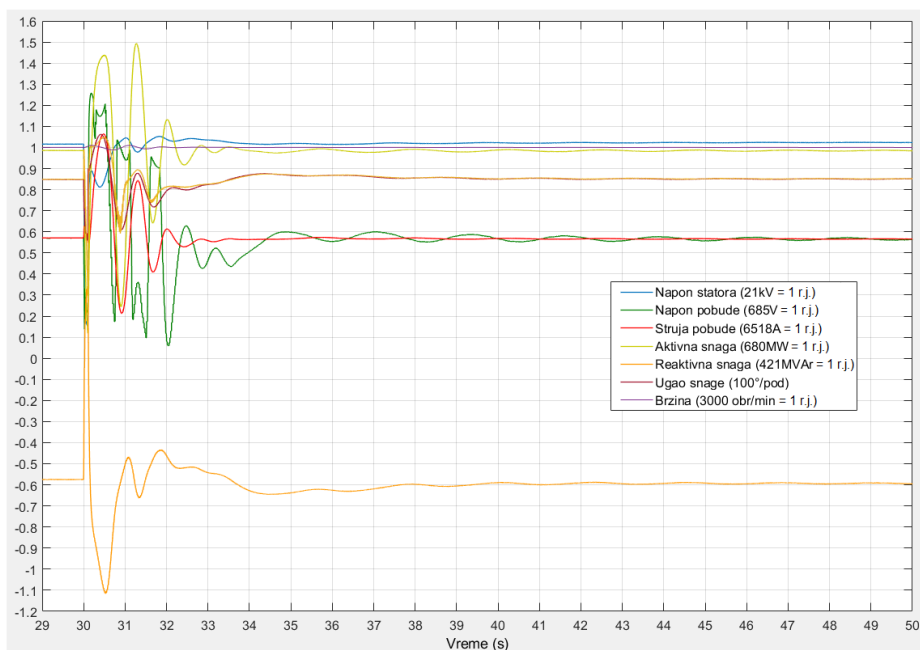
Slika 5-3. Odziv pri troleznom kratkom spoju na početku voda Mladost - Novi Sad pri aktivnom limiteru ugla snage sa isključenim stabilizatorom EESa



Slika 5-4. Odziv pri troleznom kratkom spoju na početku voda Mladost - Novi Sad pri aktivnom limiteru ugla snage sa uključenim stabilizatorom EESa



Slika 5-5. Odziv pri troleznom kratkom spoju na početku voda Mladost - Obrenovac A pri aktivnom limiteru ugla snage sa isključenim stabilizatorom EESa



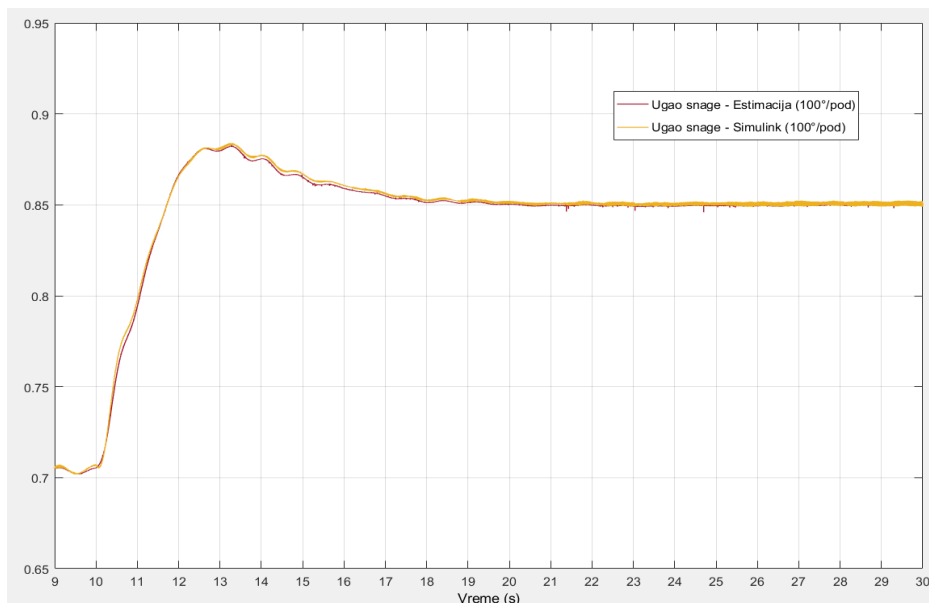
Slika 5-6. Odziv pri trofaznom kratkom spoju na početku voda Mladost - Obrenovac A pri aktivnom limiteru ugla snage sa uključenim stabilizatorom EESa

Na osnovu dobijenih odziva se može zaključiti da je generator sa pobudnim sistemom pri aktivnom limiteru ugla snage i sa isključenim i sa uključenim stabilizatorom EESa tranzijentno stabilan za sve najkritičnije slučajeve trofaznog kratkog spoja na početku vodova koji polaze iz 400kV razvodnog postrojenja Mladost, odnosno nakon isključenja kratkog spoja generator ne ispada iz sinhronizma. Sistem pobude ima odgovarajući odziv tokom prelaznog procesa i nakon isključenja kratkog spoja vraća ugao snage na vrednost pre kratkog spoja. Kada je stabilizator EESa uključen elektromehaničke oscilacije se brže prigušuju.

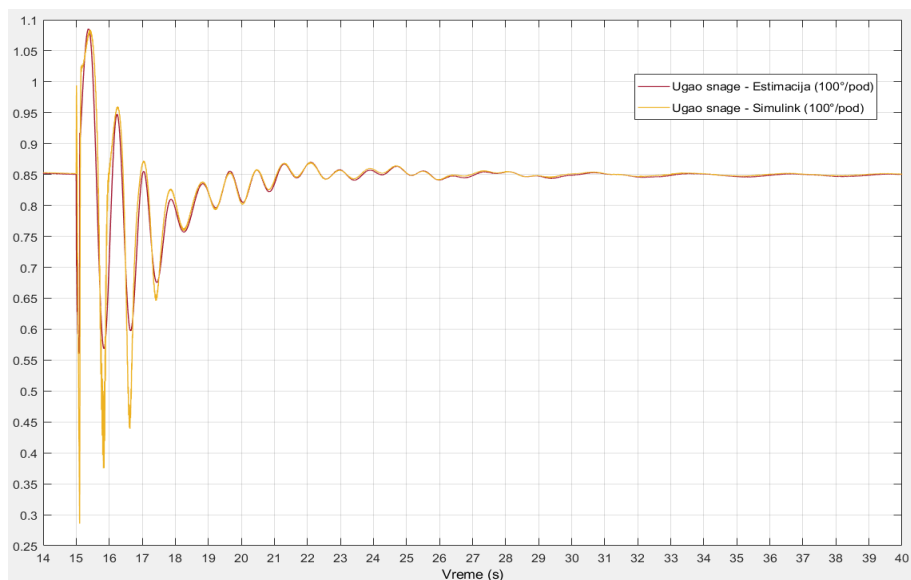
## 6. Poređenje estimirane vrednosti ugla snage i ugla snage simulnik modela sinhronog generatora

Primenjeni *Simulink* model kao rezultat rešavanja sistema diferencijalnih jednačina u kom su sinhroni generatori kompletno modelovani kao izlazni signal daje ugao snage koji je iskorišćen za proveru estimacije ugla snage na osnovu izraza (3.1). koja se koristi kao ulazni signal limitera ugla snage. U nastavku su zajedno prikazani snimci odziva estimirane vrednosti ugla snage i ugla snage na izlazu *Simulnik* modela sinhronog generatora za različite poremećaje sa isključenim i uključenim stabilizatorom EESa.





Slika 6-1 Poređenje estimirane vrednosti ugla snage i ugla snage Simulnik modela sinhronog generatora pri odzivu na odskočnu promenu reference od -5%



Slika 6-2. Poređenje estimirane vrednosti ugla snage i ugla snage Simulnik modela sinhronog generatora pri odzivu na trolni udarni kratak spoj

Na prikazanim snimcima estimirane vrednosti ugla snage vrlo malo odstupa od ugla snage na izlazu Simulnik modela sinhronog generatora tokom sporijih promena ugla snage i u stacionarnom stanju dok su odstupanja veća pri brzim promenama ugla snage. S obzirom da limiter ne može da

ograniči vrednost ugla snage pri velikim njihanjima mašine, već treba da deluje nakon završetka tranzijentnog procesa može se zaključiti da primenjena metoda estimacije ugla snage daje dobre rezultate.

## 7. Zaključak

Primenom računarskih simulacija na modelima sistema za regulaciju pobude agregata u TE "Nikola Tesla B" dobijeni su snimci dinamičkih odziva sistema na male i velike poremećaje kada je limiter aktivan. Linearizacijom modela u okolini izabrane radne tačke formirani su modeli sistema u prostoru stanja pomoću kojih su dobijene frekventne karakteristike. Na osnovu snimaka odziva i frekventnih karakteristika određene su vrednosti pokazatelja dinamičkih performansi simuliranog sistema pri odradi limitera ugla snage u vremenskom i frekventnom domenu za različite radne režime agregata sa isključenim i sa uključenim stabilizatorom elektroenergetskog sistema. U svim posmatranim režimima rada agregata odzivi sistema sa aktivnim limiterom ugla snage na poremećaje su stabilni, uključujući i odzive pri tropskim kratkim spojevima. Pokazatelji dinamičkih performansi u svim posmatranim režimima se nalaze u opsegu prihvatljivih vrednosti. Može se zaključiti da limiter ugla snage ima dobre dinamičke performanse i sa isključenim i sa uključenim stabilizatorom elektroenergetskog sistema sprečavajući ispad generatora iz sinhronizma i odradu prvog stepena generatorske zaštite od gubitka pobude.

Pri zajedničkom radu limitera ugla snage i stabilizatora elektromehaničke oscilacije se znatno brže prigušuju, ali su vrednosti dinamičkih pokazatelja limitera lošije. Ipak, u svim posmatranim režimima i sa uključenim stabilizatorom svi pokazatelji imaju prihvatljive vrednosti, a stabilnost generatora pri odradi limitera ugla snage nije ugrožena. Može se zaključiti da u slučaju agregata TENT B2 limiter ugla snage i stabilizator EESa mogu da rade zajedno, čime se postiže znatno brže prigušenje elektromehaničkih oscilacija, dok negativni efekti zajedničkog rada ne utiču na stabilnost rada agregata.

## Literatura

- [1] "Analiza i usklađivanje rada proizvodnih kapaciteta JP EPS sa pravilima o radu prenosnog sistema: - 1. Lot: mogućnost implementacije limitera ugla snage na generatoru sa idejnim rešenjem na primeru bloka TENT B2", naučna studija za potrebe JP Elektroprivrede Srbije, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, 2021.
- [2] *IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems*, IEEE Std 421.2-2014, 2014.

- [3] "Sistemska parametrisacija regulacije pobude i turbinske regulacije u elektranama EPS-a", naučna studija za potrebe JP Elektroprivrede Srbije, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, 2013.
- [4] Tomislav Idžotić, "Proširenje područja stabilnog rada sinkronog generatora regulacijom uzbude", Doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2003
- [5] P. Kundur, N.J.Balu and M.G. Lauby, *Power system stability and control*. (Vol. 7), New York: McGraw-hill, 1994.
- [6] R. Milijanović, D. Arnautović, P. Ristanović, "Analiza uticaja višeparametarske regulacije na paralelan rad više agregata jedne hidroelektrane", Elektrotehnički institut Nikola Tesla, 1987.
- [7] P.C. Krause, O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff and S. Pekarek S, *Analysis of electric machinery and drive systems*" (Vol. 2), New York: IEEE press, 2002.
- [8] D. Joksimović, Z. Ćirić, N. Milojević, D. Arnautović, Đ. Stojić, M. Milinković, S. Veinović, D. Petrović, "Parametri pobudnih sistema" - 30. savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor; časopis *Elektroprivreda* broj 3, str. 198-206, Beograd, 2011.
- [9] IEEE 09TP250, "IEEE Tutorial Course Power System Stabilization Via Excitation Control", IEEE Power & Energy Society, 2009.
- [10] *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, IEEE Std 421.5-2016, 2016.
- [11] Working Group J-5 of the Rotating Machinery Subcommittee, "Power System Relay Committee, Coordination Of Generator Protection With Generator Excitation Control And Generator Capability", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [12] E. Ghahremani, M. Karrari, M.B. Menhaj and O.P. Malik, "Rotor angle estimation of synchronous generator from online measurement", *43rd International Universities Power Engineering Conference* (pp. 1-5). IEEE, September 2008.

**Abstract.** A load angle limiter was implemented as an additional function in the existing excitation system to enable the operation of the synchronous generator in the entire P-Q diagram according to the recommendation of the manufacturer of the unit B2 synchronous generator in the "Nikola Tesla B" TPP. The analysis of dynamic performance presented in this paper consists of determining the time responses and frequency characteristics of the excitation control system when the load angle limiter is active, based on which the values of the dynamic performance indexes were obtained. In addition, the paper also provides a brief description of the implementation of the limiter, as well as a description of the computer models used in the analysis.

**Keywords:** excitation system, load angle limiter, P-Q diagram, computer model, dynamic performance indexes.

## **Computer Model Analysis of Dynamic Performances of the Excitation Control System When the Load Angle Limiter Is Active**

Dušan Joksimović, Jasna Dragosavac, Slavko Veinović, Đorđe Stojić,  
Milan Marinković, Milan Đorđević

Rad primljen u uredništvo: 24.12.2022. godine.

Rad prihvaćen: 02.12.2022. godine.