

Modifikacija realizacije limitera minimalne pobude u okviru sistema pobude generatora bloka B1 u TE “Nikola Tesla B”

Ilija Klasnić¹, Slavko Veinović¹, Dušan Joksimović¹, Luka Ivanović¹, Bojan Radojičić³, Miloš Brdarević⁴,

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

²Elektroprivreda Srbije, Ogranak TE Nikola Tesla A, Bogoljuba Uroševića Crnog br. 44, 11500 Obrenovac, Srbija

³Elektroprivreda Srbije, Ogranak TE Nikola Tesla B, Bogoljuba Uroševića Crnog br. 44, 11500 Obrenovac, Srbija

ilija.klasnic@ieent.org

Kratak sadržaj: U radu je opisan pogonski događaj ispada bloka B1 u TE „Nikola Tesla B“ sa mreže kao i izvršena modifikacija realizacije limitera minimalne pobude koja je rezultat detaljne analize odziva sistema pobude neposredne pre i tokom samog događaja. Opisana je struktura multisegmentnog limitera minimalne pobude i način njegove realizacije. Na osnovu zabeleženih snimaka ispada bloka B1 sa mreže i detaljne analize pogonskog događaja i odziva sistema pobude izvršena je modifikacija implementacije limitera. Dodatno su filtrirana merenja koja ulaze u algoritam realizacije limitera: merenje napona statora i merenje aktivne snage generatora. Limiter takođe ima promenljivo pojačanje u zavisnosti od opsega reaktivne snage odnosno aktivnog segmenta. Na kraju, prikazani su rezultati ispitivanja odziva limitera minimalne pobude prilikom rada generatora na mreži koji ukazuju na stabilan odziv sa prigušenim oscilacijama.

Ključne reči: sinhroni generator, sistem pobude, limiter minimalne pobude, parametri regulatora

1. Uvod

Funkcija limitera sistema pobude je da ograniče rad generatora u okviru dozvoljene oblasti rada unutar pogonskog dijagrama generatora. Jedan od njih, limiter minimalne pobude, ima ulogu da ne dozvoli da se radna tačka generatora nađe levo od krive podešenja ovog limitera unutar pogonskog dijagrama generatora, najčešće u njegovom kapacitivnom delu. Na ovaj način se:

- Sprečava prekomerno grejanje čeonih delova jezgra statora naročito u podpobuđenom delu pogonskog dijagrama pri aktivnoj snazi generatora bliskoj naznačenoj,
- Održava stabilnost sinhronog generatora tj. sprečava se mogućnost gubitka sinhronizma usled nedovoljne pobude,
- Sprečava odrada zaštite od gubitka pobude (ukoliko su usklađena podešenja limitera i zaštite).

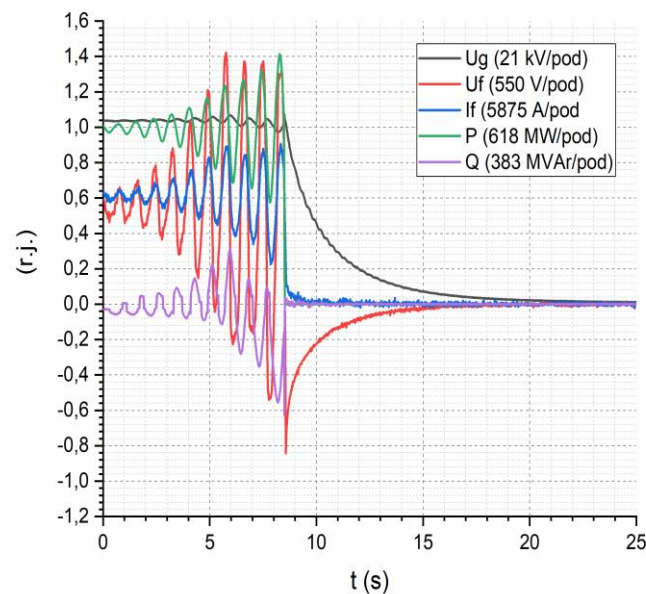
Tipovi i struktura limitera minimalne pobude su opisani u [1] gde se preporučuje PI struktura limitera za regulaciju reaktivne snage generatora. Limiter minimalne pobude se implementira kao spoljna upravljačka petlja koja se dodaje u sumator automatske regulacije napona statora generatora na koju nema uticaja tokom radnih režima unutar dozvoljene radne oblasti pogonskog dijagrama tj. kada limiter nije aktivan. U slučaju aktivacije limitera minimalne pobude, on postaje nadređeni regulator reaktivne snage i deluje na povećanje struje pobude, a samim tim i reaktivne snage generatora do granice prorade limitera. Za bezbedan i pouzdan rad generatora u kapacitivnom delu pogonskog dijagrama neophodno je izvršiti koordinaciju između podešenja limitera minimalne pobude i zaštite od gubitka pobude, a sve u skladu sa pogonskim dijagramom generatora [2], [3]. Podešavanje parametara PI regulatora limitera minimalne pobude pomoću frekventnih karakteristika prikazano je u [4] i [5].

Na bloku B1 u TE „Nikola Tesla B“ u okviru sistema pobude generatora realizovani su sledeći limiteri: limiter minimalne pobude, limiter maksimalne struje rotora, limiter maksimalne struje statora i V/Hz limiter. U radu je opisan jedan pogonski događaj koji je doveo do ispada bloka B1 sa mreže kao i modifikacija realizacije limitera minimalne pobude nakon detaljne ekspertize samog događaja.

2. Pogonski događaj ispada bloka B1 u TE “Nikola Tesla B” sa mreže

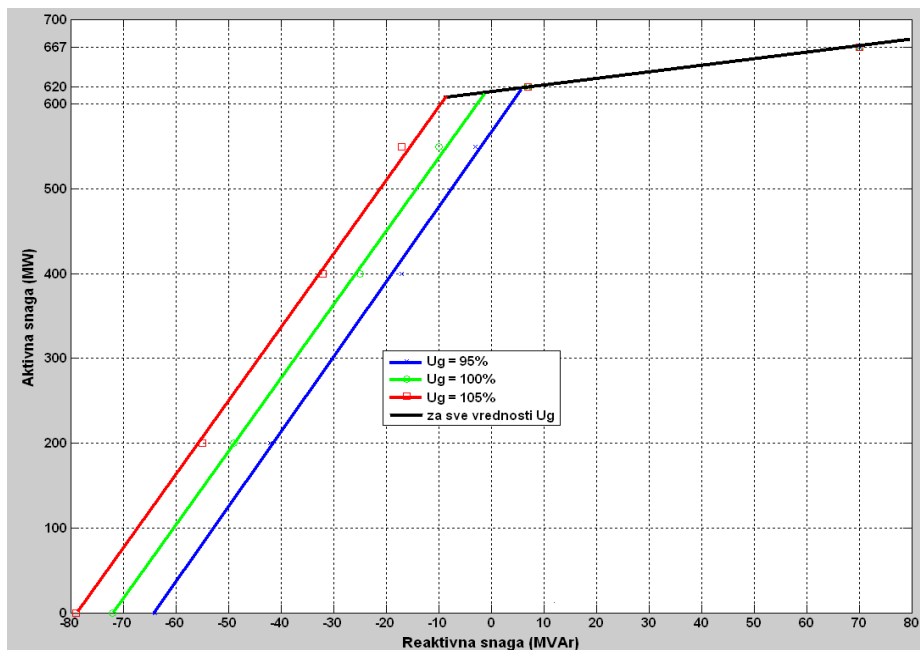
Nakon sinhronizacije bloka B1 posle završenog redovnog godišnjeg remonta, ispad bloka B1 u TE “Nikola Tesla B” desio se 13.06.2024. godine

usled delovanja 100% zemljospojne zaštite statora generatora. Ovaj pogonski događaj trigerovan je u okviru akvizicije pobudnog sistema bloka B1. Na slici 1 prikazani su napon statora generatora, napon i struja pobude, aktivna i reaktivna snaga generatora bloka B1 nekoliko sekundi pre i nakon ispada bloka B1 sa mreže. Primetan je oscilatorno neprigušen odziv svih prikazanih električnih veličina. S obzirom da je neposredno pre ispada sa mreže generator radio u kapacitivnom delu pogonskog dijagrama i to na granici limitera minimalne pobude, pristupilo se proveru načina realizacije ovog limitera i podešenja njegovih parametara. Limiter je realizovan u vidu dvosegmentne karakteristike: gornji segment obeležen crnom bojom, prava malog nagiba koja je nezavisna od napona na izvodima statora generatora; donji segment (tri vertikalne linije) koji zavisi od kvadrata napona statora, slika 2 [6]. Na osnovu podataka sa SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) sistema i sistema pobude, generator B1 je neposredno pre ispada sa mreže bio u radnoj tački koja se nalazi u kolenu karakteristike limitera minimalne pobude – tačka u kojoj se seku dve prave koje definišu karakteristiku odrade limitera.



Slika 1. Snimak trigera od 13.06.2024. godine sa akvizicije sistema pobude bloka B1

Zaključak analize je da bi bilo korisno implementirati filtraciju po merenju aktivne snage i napona statora generatora, što je i preporuka navedena u poslednjoj verziji standarda [1]. Takođe, potrebno je predvideti mogućnost promene pojačanja PI regulatora limitera minimalne pobude.



Slika 2. Dvosegmentna karakteristika limitera minimalne pobude generatora bloka B1, (preuzeto iz [6])

3. Struktura limitera minimalne pobude

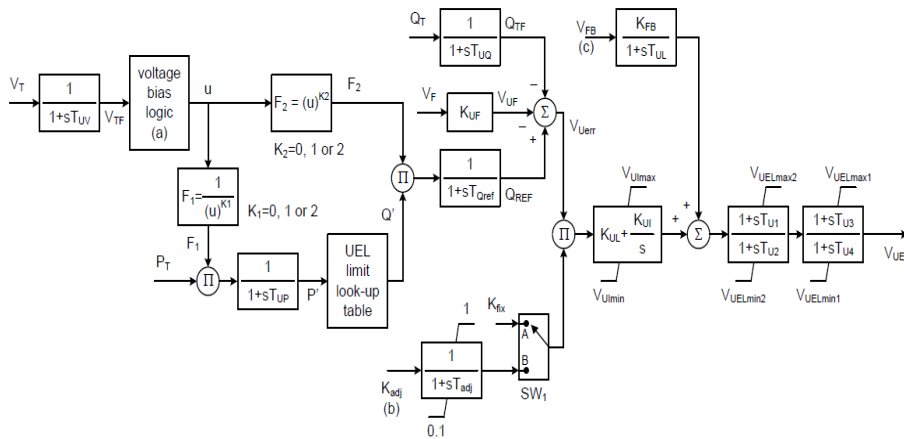
U cilju obuhvatanja širokog spektra aplikacija limitera minimalne pobude izvršena je podjela na dva tipa limitera [1]:

- Kružna karakteristika (*UEL1*),
- Linijska ili multisegmentna karakteristika (*UEL2*)

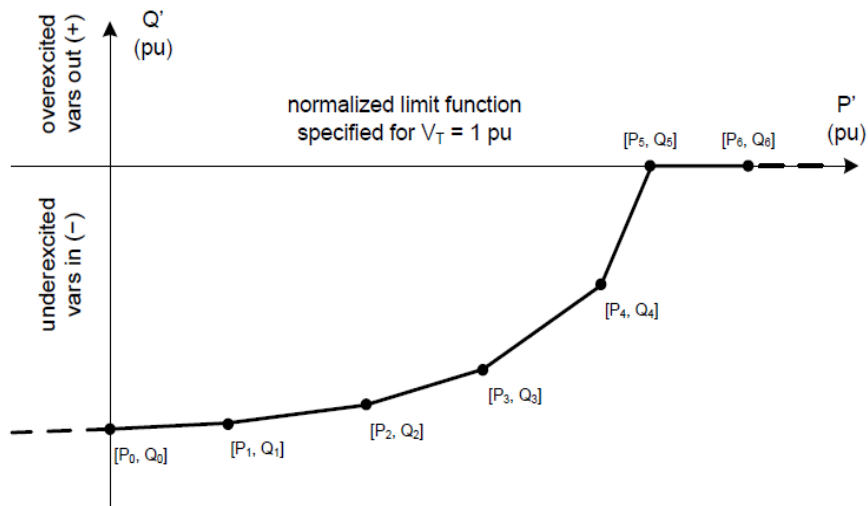
Look-up tabela limitera minimalne pobude za tip *UEL2C* realizuje multisegmentnu karakteristiku limitera (Slika 4) koji je implementiran u okviru sistema pobude generatora bloka B1 u TE „Nikola Tesla B“ prikazan je na Slici 3. Konkretno u slučaju sistema pobude generatora bloka B1 realizovana je dvosegmentna karakteristika (nezavisna od pritiska i temperature rashladnog gasa generatora tj. vodonika) i to:

- karakteristika prvog segmenta zavisi od kvadrata napona statora V_T tako da su vrednosti parametara K_1 i K_2 jednaki 2 (prave označene crvenom, zelenom i plavom bojom na Slici 2),
- drugi segment nezavisan od napona statora generatora (prava označena crnom bojom na Slici 2).

Na osnovu merenja aktivne snage generatora P_T i napona generatora V_T formira se referenca Q_{REF} sa kojom se poredi merenje reaktivne snage generatora Q_T . Formirana greška ulazi u PI regulator čiji izlaz utiče na referencu napona statora u glavnom naponskom regulatoru. Parametrima PI regulatora K_{UL} i K_{UI} se određuje dinamika limitera minimalne pobude. Direktno pojačanje limitera može da bude fiksno K_{FIX} ili promenljivo K_{ADJ} .



Slika 3. Blok dijagram limitera minimalne pobude (preuzeto iz [1])



Slika 4. Multisegmentna karakteristika limitera minimalne pobude (preuzeto iz [1])

Do opisanog pogonskog događaja, u regulatoru pobude generatora B1 bila je realizovana šema sa Slike 3 bez mogućnosti promene pojačanja PI

regulatora limitera minimalne pobude. Realizovana su dva segmenta tj. dve prave definisane sa tri tačke prema Tabeli 1.

Tabela 1. Parametri regulatora (REG1 i REG2) sistema pobude bloka B1 kojima je definisan dvosegmentni limiter minimalne pobude

Broj parametra	Opis parametra	REG1	REG2
26	Q_0 za $P_0 = 0$	-484	-484
50	P_1	1850	1850
67	Q_1	0	0
27	Q_2 za $P_2 = 2000$ (nominalna aktivna snaga)	484	484

Kada je radna tačka generatora na karakteristici limitera minimalne pobude, regulator pobude radi u režimu regulacije reaktivne snage. Negativna povratna sprega je zatvorena po merenju reaktivne snage generatora Q_T . Kako se referenca Q_{REF} formira na osnovu merenja aktivne snage P_T i napona statora generatora V_T pozitivna povratna sprega je zatvorena preko ovih veličina. Da ovaj efekat ne bi imao dodatni efekat na raspirivanje oscilacija koje se javljaju u sistemu, potrebno je raskinuti ovu povratnu spregu dodatnom filtracijom ovih mernih veličina. Preporuka u [1] je da se vremenske konstante T_{UV} i T_{UP} postave na 5 s.

Drugi negativni efekat ovog tipa limitera minimalne pobude na oscilacije sistema je promenljivi nagib segmenata karakteristike limitera. Naime, smanjenje nagiba (dešava se sa prelaskom sa donje prave na gornju) ima efekat povećanja efektivnog pojačanja limitera. Mala promena aktivne snage P_T proizvodi veću promenu reference Q_{REF} u gornjem segmentu (prava obojena crnom bojom na Slici 2). Ukoliko filtracija merenih veličina P_T i V_T nije dovoljna, ovaj efekat je značajan.

Ipak, pojačanja regulatora K_{UL} i K_{UI} imaju presudan značaj na dinamiku limitera pa i na prigušenje oscilacija sistema kada regulator pobude radi na karakteristici limitera minimalne pobude. Veća vrednost pojačanja znače brže izvlačenje radne tačke generatora iz podpobude ali i mogućnost negativnog uticaja na oscilacije sistema. Oscilacije sistema (elektromehaničke i sistemske) zavise od parametara generatora, prenosnog sistema ali i od parametara regulatora pobude i limitera. Parametri limitera minimalne pobude treba da su podešeni tako da su oscilacije koje se uvek javljaju pri promeni radne tačke dovoljno prigušene i da se radna tačka dovede u dozvoljeni deo pogonskog dijagrama pre odrade zaštita od gubitka pobude.

4. Izmene u realizaciji limitera minimalne pobude sistema pobude generatora B1

Nakon intervencije i promene koda, dodati su filteri prvog reda za merenje napona statora V_T i aktivne snage generatora P_T kao i dva pojačanja PI regulatora limitera minimalne pobude. Pojačanje se menja sa promenom segmenta limitera u kom se nalazi radna tačka generatora.

U cilju implementacije unapređenja limitera minimalne pobude sistema pobude bloka B1, uvedeni su novi parametri regulatora kao što je navedeno u Tabeli 2. Takođe, promenjeno je značenje parametra limitera minimalne pobude u okviru regulatora prema pojašnjenju iz Tabele 3.

Tabela 2. Novi parametri limitera minimalne pobude

Broj parametra	Opis parametra	REG1	REG2
107	T_{UV} (8 odgovara 5s)	8	8
108	T_{UP} (8 odgovara 5s)	8	8
109	Proporcionalno pojačanje K_p limitera za drugi segment	100	100

Tabela 3. Izmene u značenju parametara limitera minimalne pobude

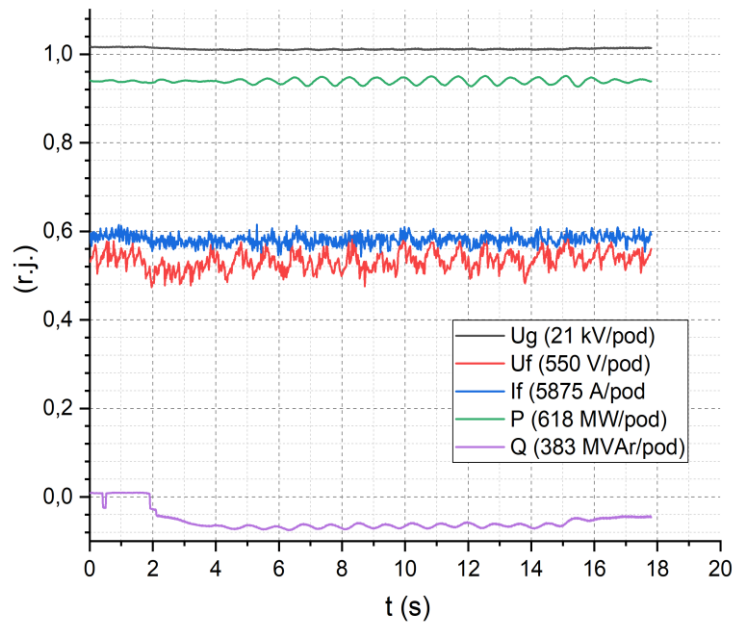
Broj parametra	Opis parametra (staro značenje)	Opis parametra (novo značenje)	REG1		REG2	
			stara vrednost	nova vrednost	stara vrednost	nova vrednost
86	K_p limitera	K_p limitera za prvi segment	300	100	300	100

5. Ispitivanja limitera minimalne pobude tokom rada bloka B1 na mreži

Nakon izmene dela koda koji se odnosi na realizaciju limitera minimalne pobude na oba regulatora izvršeno je ispitivanje istog pri radu generatora B1 na mreži sa različitim vrednostima aktivne i reaktivne snage. Cilj ispitivanja je bio da se generator dovede u radnu tačku u kojoj je aktivan limiter minimalne pobude (oba segmenta limitera) i da se provere snimljeni dinamički odzivi pomoću sistema akvizicije za različite vrednosti podešenja parametra K_p limitera minimalne pobude. Nakon pregleda snimaka sa akvizicije pobudnog sistema bloka B1 za različita podešenja parametara K_p zaključeno je da je neophodno smanjiti pojačanje limitera. Pri tome dodatni filteri su aktivirani ali

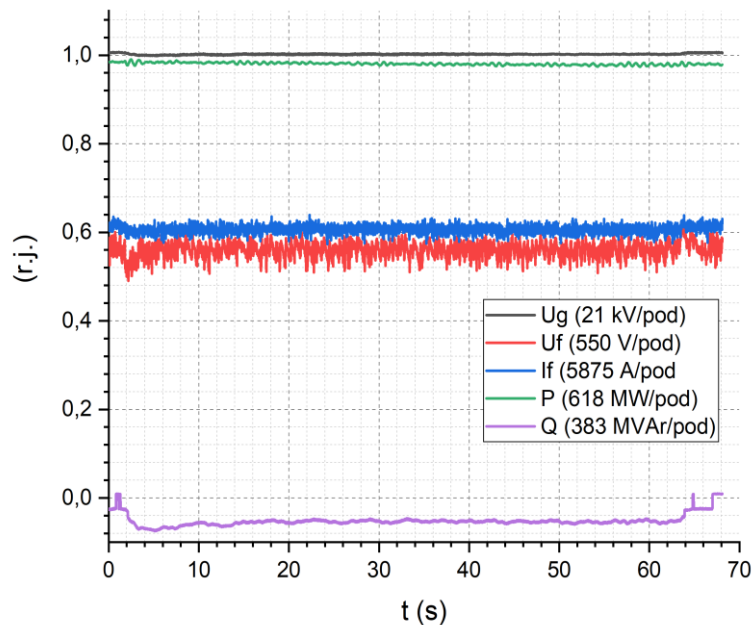
njihov efekat nije bio dovoljan da se izbegnu oscilacije koje nastaju pri svakoj promeni radne tačke kad je limiter aktivan.

Na slici 5 prikazan je jedan od izvršenih testova gde su i dalje primetne oscilacije prikazanih veličina (vrednost parametra K_p limitera minimalne pobude jednaka je 200). Zaključeno je da je potrebno dodatno smanjiti vrednost ovog parametra za dobijanje zadovoljavajućih dinamičkih odziva.



Slika 5. Odziv napona statora, napona i struje pobude i aktivne i reaktivne snage generatora prilikom aktivacije limitera minimalne pobude. Vrednost proporcionalnog pojačanja je $K_p=200$.

Na slici 6 prikazani su odzivi istih veličina kao na Slici 5, ali sa konačnim podešenjem parametara limitera minimalne pobude. Generator je radio u istoj radnoj tački u kojoj je bio neposredno pre ispada bloka B1 sa mreže 13.06.2024. godine. Na osnovu odziva prikazanih na Slici 6 može se zaključiti da su oscilacije dovoljno prigušene i da se postiže ustaljeno stanje.



Slika 6. Odziv napona statora, napona i struje pobude, aktivne i reaktivne snage generatora prilikom aktivacije limitera minimalne pobude. Vrednost proporcionalnog pojačanja je $K_p=100$.

6. Zaključak

U radu je opisan pogonski događaj ispada bloka B1 u TE „Nikola Tesla B“ sa mreže. Rezultat sveobuhvatne analize odziva sistema pobude neposredno pre i tokom samog događaja je izvršena modifikacija realizacije limitera minimalne pobude u okviru sistema pobude. Opisane su implementirane izmene u delu softvera regulatora pobude, a koje se tiču realizacije limitera minimalne pobude: uvedene su filtracija merenja napona statora i aktivne snage generatora i promenljivo pojačanje koje se menja u zavisnosti od toga koji segment limitera minimalne pobude je aktivan. Prikazani su rezultati ispitivanja dovođenjem radne tačke generatora u pogonskom dijagramu do granice aktivacije limitera, Date su konačne vrednosti podešenih parametara PI regulatora limitera koje zadovoljavaju stabilnost odziva i prigušenje oscilacija.

Zahvalnica

Ovaj rad je podržalo Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije kroz ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada NIO u 2024. godini (broj ugovora 451-03-66/2024-03).

Literatura

- [1] "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies", *IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005)*, Pages 1-207, 2016. [doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7553421](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7553421).
- [2] F. Baracho, A. Coelho, C. Pereira, L. Damião, W. Zvietcovich, "A New Admittance Approach Applicable to the Coordination Between the Loss-of Excitation Protection and the Underexcitation Limiter," *IEEE Latin America Transactions*, vol.18, no. 10, pp.1732-1742, 2020 [doi:10.1109/TLA.2020.9387644](https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9387644)
- [3] G. R. Berube and L. M. Hajagos, "Coordination of under excitation limiters and loss of excitation relays with generator capability," *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Calgary, AB, Canada, 2009, pp. 1-8, [doi: 10.1109/PES.2009.5275365](https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275365).
- [4] S. S. Choi and X. M. Jia, "A technique for tuning under excitation limiters," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.14, no. 4, pp.1279-1284, 1999. [doi:10.1109/59.801885](https://doi.org/10.1109/59.801885)
- [5] S. S. Choi and X. M. Jia, "Tuning under-excitation limiters in the multi-machine power system environment," *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077)*, Singapore, 2000, pp. 591-596 vol.1, [doi: 10.1109/PESW.2000.850070](https://doi.org/10.1109/PESW.2000.850070)
- [6] Izveštaj o ispitivanjima sistema pobude sinhronog generatora bloka B1 u TE „Nikola Tesla B“, Elektrotehnički institut Nikola Tesla AD Beograd, 2024.

Abstract. This paper investigates a grid outage event at TPP "Nikola Tesla B" Unit B1 and analyzes the excitation system's response. Based on this analysis, modifications were made to the underexcitation limiter within the excitation system. The paper details the structure of the multi-segment straight-line limiter and its implementation methodology. The limiter's implementation was refined using recordings of the outage event and a detailed analysis of the excitation system's behavior. Additionally, the paper discusses the filtering of input measurements (stator voltage and generator active power) and the variable gain mechanism of the limiter. Finally, the paper presents the results of

testing the modified limiter during grid operation, demonstrating stable behavior with damped oscillations.

Keywords: synchronous generator, excitation system, underexcitation limiter, regulator parameters

Modification of the Implementation of the Underexcitation Limiter within the Generator Excitation System of Unit B1 at TPP “Nikola Tesla B”

Ilija Klasnić^{ID}, Slavko Veinović^{ID}, Dušan Joksimović^{ID}, Luka Ivanović^{ID},
Bojan Radojičić, Miloš Brdarević

Rad primljen u uredništvo: 14.10.2024. godine.

Rad prihvaćen: 06.11.2024. godine.

