

Metodologija za ocenu naponsko – reaktivne sposobnosti sinhronih jedinica pri izmenjenoj impedansi transformatora

Jasna Dragosavac¹ , Žarko Janda¹ , Anita Mijajlović¹ , Ilija Klasnić¹ 

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

jasna.dragosavac@ieent.org

Kratak sadržaj: Rad predstavlja metodologiju za procenu naponsko – reaktivne sposobnosti sinhronih generatora nakon promene impedanse blok-transformatora. Predloženi okvir objedinjuje per-unit proračune, model ekvivalentnog kola i numeričku simulaciju rada za više naponskih scenarija. Aplikacija SIM-Pogonska Karta omogućava grafičku i analitičku verifikaciju margina, ograničenja i usklađenosti sa mrežnim kodeksima, podržavajući operativno planiranje i procenu sigurnosti pogona.

Ključne reči: naponsko-reaktivna sposobnost, impedansa transformatora, per-unit model, SIM-Pogonska Karta.

1. Uvod

Održavanje odgovarajuće naponsko – reaktivne sposobnosti sinhronih generatora predstavlja ključni element bezbednog i stabilnog rada elektroenergetskog sistema. Svaka izmena parametara transformatora, posebno impedanse, naponskog odnosa ili vektorske grupe direktno utiče na naponski profil generatora, raspoložive reaktivne margine i ukupnu naponsku stabilnost sistema. Takve situacije se najčešće javljaju nakon zamene, revitalizacije ili rekonstrukcije blok-transformatora (GSU transformatora), kada je potrebno ponovo proceniti reaktivne mogućnosti generatora i proveriti usklađenost sa zahtevima Mrežnog kodeksa.

Radi rešavanja ovog problema, razvijen je metodološki okvir za analitičku i računarsku procenu naponsko – reaktivne sposobnosti generatora nakon izmena parametara transformatora. Metodologija obuhvata proračun parametara generatora i transformatora u jediničnim vrednostima (per-unit),

formiranje ekvivalentnih kola i proračun napona i struja za više karakterističnih naponskih nivoa u mreži.

Ključni deo predložene metodologije predstavlja inženjerska aplikacija *SIM-Pogonska Karta*, razvijena u Elektrotehničkom Institutu Nikola Tesla. Ova aplikacija omogućava interaktivnu simulaciju pogonskih stanja generatora, automatski proračun per-unit veličina i prikaz radnih tačaka na naponsko – reaktivnim (PQ) mapama. Kombinovanjem analitičke tačnosti i operativne fleksibilnosti, alat omogućava određivanje naponskih i reaktivnih margina, identifikaciju ograničavajućih faktora (struja statora, uzbudni sistem, naponska ograničenja) i proveru usaglašenosti sa Q(U) karakteristikama definisanim Mrežnim kodeksima.

Predložena metodologija, uz prateći softverski alat, obezbeđuje konzistentan analitički osnov za procenu pogonskih mogućnosti sinhronih jedinica nakon izmena na opremi, omogućavajući pouzdanu koordinaciju proračuna, analize pogonskih podataka i podešavanja sistema upravljanja.

2. Pregled literature

Procena naponsko – reaktivne sposobnosti sinhronih generatora detaljno je obrađivana u regulatornoj i stručnoj literaturi, pre svega zbog njenog značaja za stabilnost napona i ispunjenje mrežnih zahteva. ENTSO-E *Network Code on Requirements for Generators* (RfG) [1] propisuje da se svaka izmena na generatoru koja može uticati na njegovu reaktivnu snagu mora ponovo analizirati i prijaviti prenosnom operatoru sistema (TSO) u okviru postupka *Compliance Monitoring after Operational Notification* [2]. Dodatno, *The System Operation Guideline and related Implementation Guidance Documents* [3] definišu način provere raspoložive reaktivne snage nakon puštanja u rad ili zamene opreme.

Sa aspekta modelovanja, IEEE *Std 421.5-2016* [4] daje standardizovane modele pobudnih sistema i limitera koji se uobičajeno koriste prilikom izrade analiza mogućnosti generatora. *Reliability Guideline on Reactive Power Planning* [5] posebno ističe uticaj impedanse blok-transformatora (GSU) na održavanje napona na tački priključenja (POI). U skladu s tim, IEEE PSRC *Voltage Collapse Mitigation Report* [6] pokazuje da se značajan deo pada napona upravo javlja na GSU transformatoru, što naglašava potrebu za njegovim preciznim predstavljanjem u analitičkim modelima.

Uticaj transformatora na raspoloživi reaktivni kapacitet detaljnije je razmatran u više radova. Overbaj i saradnici [7] pokazali su da pogrešno modelovanje stanja GSU transformatora može dovesti do greške i do 15% u proceni reaktivnih gubitaka, što direktno utiče na analizu regulacije napona. Øyvang i koautori [8] razvili su *on-line* sistem za praćenje koji omogućava vizuelizaciju kriva kapabiliteta u realnom vremenu, dok izveštaji CIGRE i ESIG [9], [10] sumiraju preporuke za proveru reaktivnog kapaciteta pod različitim uslovima u mreži.

Za razliku od prethodnih studija koje su bile usmerene uglavnom na statičku verifikaciju, metodologija predstavljena u ovom radu uvodi računarski okvir podržan aplikacijom *SIM-Pogonska Karta*, koja kombinuje analitičko modelovanje i interaktivnu PQ vizualizaciju. To omogućava brzo sagledavanje naponskih margina, dominantnih ograničenja i usklađenosti sa Q(U) zahtevima Mrežnih kodeksa nakon izmene parametara transformatora.

3. Motivacija i ciljevi rada

Modifikacije na opremi elektrana, posebno zamena ili revitalizacija blok-transformatora (GSU), neminovno dovode do promena električnih parametara koji direktno utiču na reaktivni kapacitet i sigurnost pogona generatorskih jedinica. Prema ENTSO-E Mrežnom kodeksu RfG, svaka izmena koja može promeniti reaktivne performanse mora biti ponovo analizirana, dokumentovana i dostavljena prenosnom operatoru sistema (*Transmission System Operator* - TSO). Ukoliko se ova ponovna procena ne uradi kako treba, jedinica može izaći van dozvoljenog naponsko – reaktivnog opsega, čime se smanjuje dostupna reaktivna podrška, narušava stabilnost napona ili čak dolazi do ograničenja proizvodnje.

Bezbedan rad podrazumeva i usklađivanje svih pomoćnih sistema koji zavise od prenosnog odnosa i impedanse transformatora. To uključuje rekalkulaciju mernih pretvarača, prilagođavanje podešenja zaštita koje referenciraju parametre transformatora, kao i proveru rada pobudnih i naponsko – regulacionih sistema (AVR, GRRS). Impedansa i vektorska grupa GSU transformatora imaju značajan uticaj na odziv zaštitnih uređaja, naročito onih osetljivih na fazni ugao i odnos struja. Zanemarivanje ovih promena nakon zamene transformatora može dovesti do lažnih ispada, grešaka pri sinhronizaciji ili smanjene performanse upravljanja naponom.

Istovremeno, kontinuirano smanjenje broja terenskih inženjera u elektranama povećava potrebu za automatizovanim i daljinskim postupcima evaluacije. To nameće zahtev za standardizovanim metodologijama i softverskim alatima koji ne samo da izvode analitičke proračune, već i služe kao operativni vodič kao referenca koja jasno ukazuje na to koji parametri zahtevaju proveru i prilagođavanje nakon svake izmene. Takva metodologija mora da poveže analitičko modelovanje sa praktičnim pogonom, kako bi se ključne međuzavisnosti pravovremeno prepoznale, proverile i bezbedno primenile.

U cilju rešavanja ovih izazova, rad predlaže jedinstveni analitički okvir za procenu naponsko – reaktivne sposobnosti generatora i identifikaciju zavisnih sistema koji zahtevaju prilagođavanje nakon bilo koje modifikacije transformatora. Okvir obuhvata standardizovane proračune u relativnim jedinicama, transformaciju impedanse i naponsko – strujne modele, uz podršku specijalizovane inženjerske aplikacije *SIM-Pogonska Karta*, koja vizuelizuje PQ oblasti i granične margine za više scenarija rada.

Ciljevi ovog rada su da:

- uspostave ponovljive i konzistentne korake za analitičku procenu naponsko – reaktivnog kapaciteta uz uvažavanje promena impedanse transformatora;
- identifikuju i sistematizuju operativne zavisnosti koje zahtevaju ažuriranje parametara (merni pretvarači, zaštite, pobudni sistemi i regulatori); i
- pokažu kako aplikacija *SIM-Pogonska Karta* može podržati daljinsku i automatizovanu analizu mogućnosti generatora, doprinoseći većoj sigurnosti pogona, usklađenosti sa Mrežnim kodeksima i prenosu znanja u radu elektrana.

4. Metodologija

Predložena metodologija uspostavlja analitički i računski okvir za procenu naponsko – reaktivne sposobnosti sinhronih generatora nakon promene parametara transformatora. Model obuhvata konverziju svih relevantnih veličina u relativne jedinice (p.u.), modelovanje bloka generator – transformator kao ekvivalentnog kola i numeričku simulaciju naponsko – strujnih stanja za različite režime pogona. Metodologija je implementirana kroz namensku inženjersku aplikaciju *SIM-Pogonska Karta*, koja kombinuje analitičku preciznost i intuitivnu vizuelizaciju reaktivnih mogućnosti.

4.1. Analitički model i proračun u relativnim jedinicama

Svi parametri generatora i transformatora prevode se na jedinstvenu per-unit osnovu, čime se omogućava direktno poređenje različitih konfiguracija transformatora. Izabrane baze su:

- $S_{bazno} = 360 \text{ MVA}$
- $U_{bazno,LV} = 15.75 \text{ kV}$

Za transformaciju impedanse primenjuje se standardna p.u. konverzija, što omogućava uporedivost efektivne serijske impedanse postojećeg i novog GSU transformatora, kao i proračun internih naponskih padova i snage kratkog spoja.

Ekvivalentno kolo obuhvata unutrašnje reaktanse generatora, statorski otpor i impedansu transformatora. Napon na krajevima generatora i struja statora dobijaju se iz jednačine snage:

$$P - jQ = V_{\text{gen}} I^*, \quad (1)$$

gde su P i Q aktivna i reaktivna snaga na priključcima generatora, dok se naponski pad duž ekvivalentnog bloka izražava kao:

$$V_{\text{gen}} = V_{\text{bus}} + (R_{\text{tr}} + jX_{\text{tr}})I, \quad (2)$$

gde su V_{gen} , V_{bus} , R_{tr} , X_{tr} napon na krajevima generatora, napon mreže, otpornost i reaktansa rasipanja namotaja transformatora, respektivno. Ovaj model predstavlja analitičku osnovu za procenu napona generatora pri zadanom naponskom nivou mreže, aktivnoj snazi i željenoj reaktivnoj snazi.

4.2. Računski algoritam i aplikacija *SIM-Pogonska Karta*

Aplikacija *SIM-Pogonska Karta* vrši automatizovano izračunavanje radnih uslova generatora pri različitim scenarijima napona i snage.

Za svaki izabrani skup parametara algoritam izračunava:

- reaktivnu snagu ograničenu strujom statora i strujom pobude
- reaktivnu snagu ograničenu minimalnim/maksimalnim naponom generatora (ili),
- struju pobude i termičke margine pobudnog namotaja, kao i tačke preseka ograničenja pobude, napona i struje statora.

Svi rezultati su vizualizovani na PQ dijagramima zasnovanim na konturama, što omogućava inženjerima da odmah protumače raspoloživu reaktivnu sposobnost pri različitim nivoima napona sistema. Alat takođe obezbeđuje tabelarne izlaze i automatsko označavanje ograničavajućih uslova, koji se mogu direktno koristiti za izveštavanje ka TSO-u ili za podešavanje sistema pobude.

4.3. Korišćeni podaci i parametri za simulaciju

Metodologija je proverena koristeći reprezentativne parametre sinhronog generatora od 247 MVA i dve konfiguracije blok-transformatora – postojeći **TR1** i zamenski **TR2**, nazivnih napona 235/15.75 kV/kV i 235/15 kV/kV. Sve vrednosti svedene su na zajedničku bazu od 360 MVA.

Glavne razlike među transformatorima date su u Tabeli 1.

Tabela 1. Osnovni parametri transformatora

Parametar	TR1	TR2	Promena
Nazivna snaga (MVA)	240	360	+50%
Napon kratkog spoja U_k (%)	11.3	12.6	+11.8%
Efektivna impedansa Z_{pu}	0.1695	0.1145	–32.4%
Snaga kratkog spoja (MVA)	2124	3145	+48%

Ovi podaci uneti su u aplikaciju *Sim-Pogonska Karta* radi kreiranja mapa naponsko naponsko – reaktivnih sposobnosti u opsegu mrežnih napona 220–242 kV i aktivnih snaga generatora od 110–210 MW. Rezultati, prikazani u sledećem poglavlju, ilustruju uticaj impedanse transformatora na reaktivne margine, regulaciju napona i granice stabilnosti.

Ulazni realni podaci obezbeđeni su od prenosnog operatora sistema, uključujući izmerene napone na 220 kV sabirnicama elektrane i propisane dozvoljene granice iz Mrežnog kodeksa. Prema tim pravilima, nominalni napon 220 kV može varirati $\pm 10\%$, što odgovara radnom opsegu od približno 198 do 242 kV. Zbog toga je aplikacija podešena da simulira sve scenarije u ovom intervalu.

Svaki slučaj simulacije odgovara određenom naponskom nivou (najčešće 220, 227, 235, 239 i 242 kV) i više nivoa aktivne snage (110, 147, 180 i 210 MW). Za svaki scenario algoritam izračunava: napon na priključcima generatora, statorsku i pobudnu struju i odgovarajuće granice reaktivne snage. Ovi scenariji omogućavaju verifikaciju performansi generatora u najkritičnijim uslovima, naročito blizu minimalno dozvoljenog napona mreže, gde održavanje sinhronizma i podrška naponu postaju izazovno.

Poređenjem rezultata kroz spektar napona moguće je identifikovati prag pri kome generator dostiže svoje reaktivne i stabilnosne granice, kao i utvrditi da li bi bilo potrebno isključenje ili automatsko smanjenje reaktivnog opterećenja radi očuvanja sigurnog rada.

Korišćenje operativnih podataka obezbeđuje da procena odražava stvarno okruženje elektroenergetske mreže i podržava formalno izveštavanje o marginama reaktivne sposobnosti ka TSO-u.

5. Rezultati i diskusija

Analitički okvir i aplikacija *SIM-Pogonska Karta* korišćeni su za izračunavanje naponsko–reaktivne snage (Q–U) generatora kroz ceo dozvoljeni opseg napona sistema, definisan od strane TSO kao 220 kV $\pm 10\%$, tj. od 198 kV do 242 kV. Cilj je da se proceni kako impedansa transformatora utiče na reaktivne margine generatora i sposobnost da ostane priključen i stabilan na donjoj granici napona.

5.1. Opseg reaktivne snage

Simulacije su izvedene za četiri reprezentativna nivoa aktivne snage (110 MW, 147 MW, 180 MW i 210 MW). Za svaki slučaj, algoritam *SIM-Pogonska Karta* odredio je maksimalne i minimalne granice reaktivne snage na terminalima generatora za nekoliko scenarija napona mreže (220 kV, 227 kV, 235 kV, 239 kV i 242 kV). Za svaki scenario i više nivoa opterećenja $P = \{210 \text{ MW}, 180 \text{ MW}, 147 \text{ MW}, 110 \text{ MW}\}$ na 247 MVA, alat pronalazi:

- Q pri kome se dospeva na minimalno dovoljen $|V_{gen}| \geq 0.95$ p.u. (i zasebno za $|V_{gen}| \geq 0.90$ p.u.),
- Q pri kome se dospeva na maksimalno dovoljen $|V_{gen}| \leq 1.05$ p.u.,
- Q pri kome se dospeva statorsko ogranichenje $|I| \leq 1.0$ p.u. (247 MVA na odabranoj bazi).

Tabela 2. Reaktivni radni opseg u funkciji napona sabirnica za snagu od 210 MW

P = 210 MW				
U_{HV} [kV]	Q_{max} [Mvar] nom. PQ karta	Q_{max} [Mvar] $I_{g,max} =$ 9.054 kA orga. nom. struja	Q_{min} [Mvar] $V_{gen,min} =$ 0.95 pu	Q_{min} [Mvar] $V_{gen,min} =$ 0.90 pu
220	132	86	59	39
227	130	105.7	41	40
235	127	126	41	41
239	128	134	41	41
242	125	140	38	38

Tabela 3. Reaktivni radni opseg u funkciji napona sabirnica za snagu od 180 MW

P = 180 MW				
U_{HV} [kV]	Q_{max} [Mvar] nom. PQ karta	Q_{max} [Mvar] $I_{g,max} =$ 9.054 kA orga. nom. struja	Q_{min} [Mvar] $V_{gen,min} =$ 0.95 pu	Q_{min} [Mvar] $V_{gen,min} =$ 0.90 pu
220	151	146.7	60	-10
227	148	158.5	-9	-9
235	144	171.2	-9	-9
239	143	177.3	-9	-9
242	140	182	-10	-10

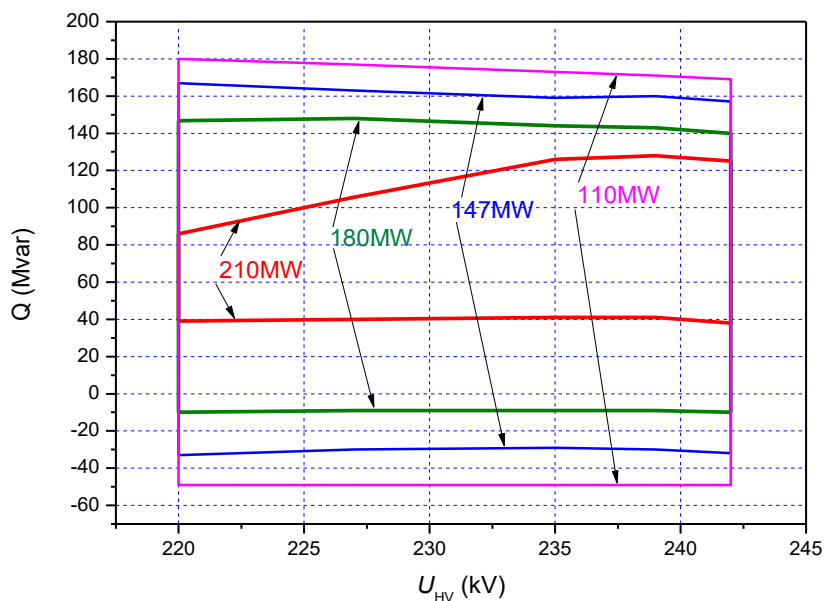
Tabela 4. Reaktivni radni opseg u funkciji napona sabirnica za snagu od 147 MW

P = 147 MW				
U_{HV} [kV]	Q_{max} [Mvar] ном. PQ карта	Q_{max} [Mvar] $I_{g,max} =$ 9.054 kA ogra. nom. struja	Q_{min} [Mvar] $V_{gen.min} =$ 0.95 pu	Q_{min} [Mvar] $V_{gen.min} =$ 0.90 pu
220	167	183.7	59	-33
227	163	193	-29	-30
235	159	203	-29	-29
239	160	208.4	-30	-30
242	157	212	-32	-32

Tabela 5. Reaktivni radni opseg u funkciji napona sabirnica za snagu od 110 MW

P = 110 MW				
U_{HV} [kV]	Q_{max} [Mvar] ном. PQ карта	Q_{max} [Mvar] $I_{g,max} =$ 9.054 kA ogra. nom. struja	Q_{min} [Mvar] $V_{gen.min} =$ 0.95 pu	Q_{min} [Mvar] $V_{gen.min} =$ 0.90 pu
220	180	210.4	59	-49
227	177	218.5	-28	-49
235	173	227.6	-49	-49
239	171	232	-49	-49
242	169	235.5	-49	-49

Na višim nivoima napona sistema ($U_{HV} \geq 235$ kV), opseg reaktivne snage prikazan na Slici 1 je gotovo simetričan, što ukazuje na dovoljne margine pobude i struje statora. Međutim, kako se napon sistema približava donjoj granici (~ 200 kV), sposobnost reaktivne snage naglo opada, naročito na kapacitivnoj strani, usled povećane struje i pada napona preko impedanse transformatora.



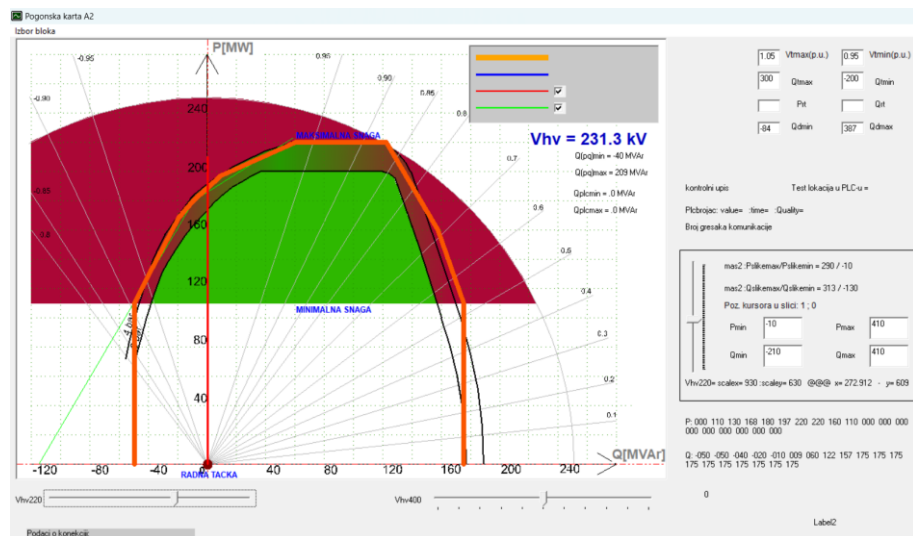
Slika 1: Reaktivni radni opsezi u funkciji napona sabirnica za razne vrednosti snage generatora u obliku konturnog dijagrama, $U_{min,G} = 0.9$ p.u.

5.2. Uticaj impedanse transformatora na naponsku marginu

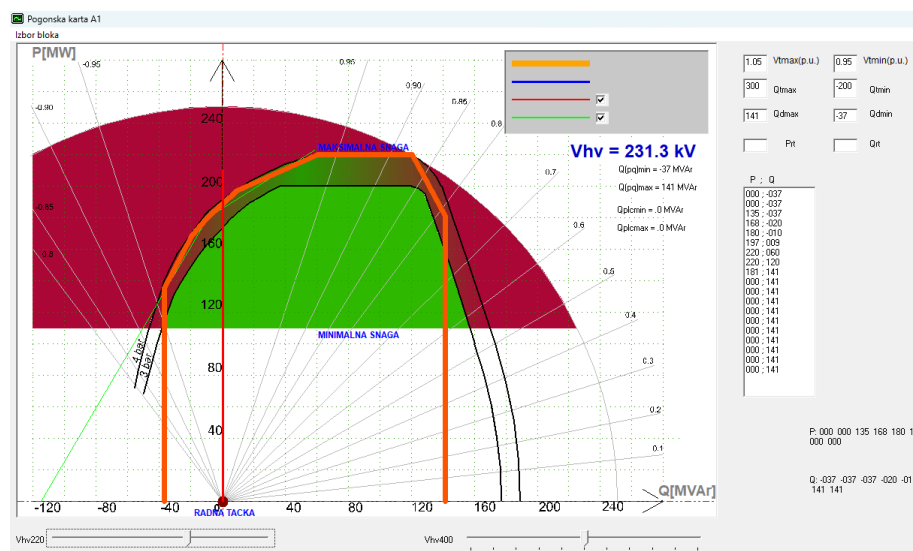
Zamena transformatora **TR1** ($Z_{pu} = 0.1695$) sa **TR2** ($Z_{pu} = 0.1145$) smanjila je serijsku impedansu za $\sim 32\%$, čime je lokalni nivo kratkog spoja povećan za $\sim 48\%$. Ova promena značajno poboljšava osetljivost kontrole napona i smanjuje unutrašnji pad napona na bloku generator–transformator. Kao rezultat:

- devijacija napona na terminalima generatora za isti reaktivni izlaz je manja,
- margina reaktivne snage na nominalnom naponu (235 kV) se povećava za 10 – 15%, i
- rezerva struje pobude tokom kapacitivnog rada raste, poboljšavajući podršku naponu sistema.

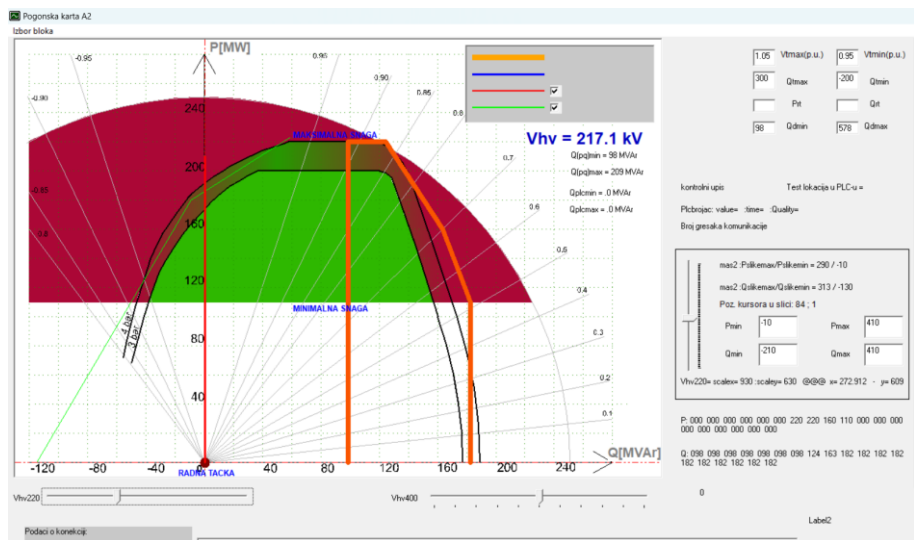
Rezultati generisani aplikacijom *SIM-Pogonska Karta* prikazani su na narednim Slikama 2 - 5.



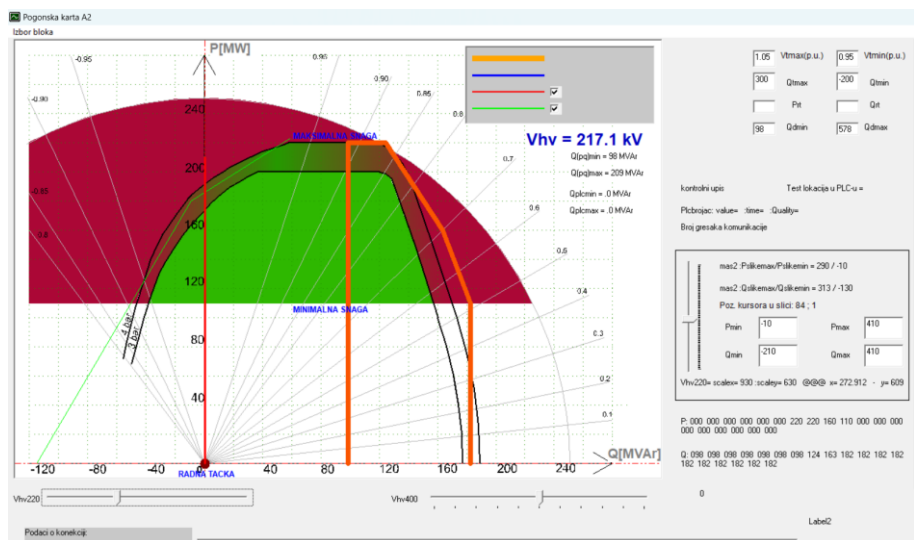
Slika 2: Pogonska karta bloka 1 pri minimalnom naponu generatora 0.95 pu i naponu VN sabirnica 231.3 kV



Slika 3: Pogonska karta bloka 2 pri minimalnom naponu generatora 0.95 pu i naponu VN sabirnica 231.3 kV



Slika 4: Pogonska karta bloka 1 pri minimalnom naponu generatora 0.95 pu i naponu VN sabirnica 217.1 kV



Slika 5: Pogonska karta bloka 2 pri minimalnom naponu generatora 0.95 pu i naponu VN sabirnica 217.1 kV

Ovi efekti su najkorisniji na srednjim nivoima napona (227–235 kV), gde generator može da održava reaktivnu podršku bez približavanja granicama pobude. Na ekstremno niskim naponima (~ 198–205 kV), međutim, ograničavajući faktor postaje struja statora, jer održavanje aktivne snage na nominalnim nivoima zahteva veću reaktivnu struju radi kompenzacije pada napona.

5.3. Radni uslovi blizu donje granice napona

Simulacije na minimalno dozvoljenom naponu mreže (198 kV) pokazuju da generator dostiže granicu struje statora čak i za umerene reaktivne izlaze. U takvim slučajevima, održavanje sinhronizma i kontrole napona postaje sve teže, naročito ako više proizvodnih jedinica radi pod sličnim uslovima. Analiza identifikuje približan prag napona ispod kojeg generator više ne može ostati stabilno priključen, pružajući jasnu operativnu granicu za operatore sistema. Taj prag odgovara $|V_{\text{gen}}| \approx 0.90$ p.u., što definiše minimalni opseg reaktivne sposobnosti u skladu sa Mrežnim kodeksom. Rezultati stoga pokazuju da alat *SIM-Pogonska Karta* može služiti ne samo za verifikaciju sposobnosti, već i za operativno planiranje, omogućavajući operatorima da predvide kritične uslove i preduzmu korektivne akcije (npr. redistribuciju reaktivnog opterećenja ili podešavanje parametara pobude).

5.4. Implikacije za usklađenost sa Mrežnim kodeksom i operativna sigurnost

Poređenje analitičkih rezultata sa zahtevima ENTSO-E RfG za reaktivnu sposobnost potvrđuje da generator, kada radi sa zamenskim transformatorom **TR2**, u potpunosti ispunjava $Q(U)$ ograničenja propisana za svoj naponski opseg. Margina sposobnosti ostaje u okviru usklađenih granica za napone do 0.90 p.u., obezbeđujući da proizvodna jedinica može pružiti potrebnu reaktivnu podršku prenosnoj mreži. Pored toga, naglašava se nekoliko operativnih mera neophodnih za očuvanje sigurnosti sistema nakon zamene transformatora:

- rekalkulaciju mernih pretvarača i zaštitnih releja koji referenciraju odnose i impedanse transformatora,
- verifikaciju podešavanja sistema sinhronizacije i pobude radi odražavanja novih uslova kratkog spoja, i
- integraciju alata *SIM-Pogonska Karta* u postupke održavanja i dijagnostike radi automatizovane, daljinske verifikacije reaktivne sposobnosti.

6. Zaključak

Rezultati kolektivno potvrđuju da impedansa transformatora igra odlučujuću ulogu i u fleksibilnosti reaktivne snage i u performansama zaštite. Implementacijom standardizovanih analitičkih alata kao što je *Sim-Pogonska Karta*, operatori mogu održati usklađenost, poboljšati situacionu svest i minimizovati rizik od pogrešnog rada u okruženjima sa smanjenim brojem osoblja.

Literatura

- [1] *Network Code on Requirements for Generators (RfG)*, ENTSO-E, Regulation (EU) 2016/631, Brussels, 2016.
- [2] ENTSO-E, Implementation Guidance Document: Compliance Monitoring after Operational Notification, Brussels, 2018.
- [3] *System Operation Guideline (SO GL)*, ENTSO-E, Brussels, 2017.
- [4] *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, IEEE Standard 421.5-2016, IEEE PES, New York, 2016.
- [5] *NERC, Reliability Guideline – Reactive Power Planning*, Atlanta, 2017.
- [6] *Voltage Collapse Mitigation: Analytical Approaches and Protection Considerations*, IEEE Power System Relaying Committee (PSRC), , IEEE Report, 2015.
- [7] T. J. Overbye, M. L. Crow, and J. D. Weber, "Modeling Generator Step-Up Transformer Status for Reactive Loss Analysis," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 33, no. 4, pp. 4128–4136, 2018.
- [8] S. Øyvang, H. Gjengedal, and L. Hofmann, "Online Monitoring of Synchronous Generator Capability Curves," *Electric Power Systems Research*, vol. 157, pp. 88–95, 2018.
- [9] *Reactive Power Capability Verification and Grid Code Compliance*, CIGRE Working Group C4/C1.25, CIGRE Technical Brochure No. 791, Paris, 2020.
- [10] *Reactive Power Capability and Interconnection Requirements*, Energy Systems Integration Group (ESIG), Technical Report, Charlottesville, VA.

Abstract. This paper presents a methodology for evaluating the voltage–reactive power capability of synchronous generators following changes in transformer impedance. The framework integrates per-unit calculations, an equivalent generator–transformer model, and numerical simulations across multiple grid-voltage scenarios. The SIM-Operating Map application provides analytical and graphical verification of reactive margins, limiting factors, and grid-code compliance, supporting

operational decision-making and enhancing system security after transformer replacement.

Keywords: reactive capability, transformer impedance, per-unit modeling, SIM-Operating Map.

Methodology for Assessing Voltage–Reactive Power Capability of Synchronous Units under Modified Transformer Impedance

Jasna Dragosavac^{}, Žarko Janda^{}, Anita Mijajlović^{}, Ilija Klasnić^{}

Rad primljen u uredništvo: 01.12.2025. godine.

Rad prihvaćen: 22.12.2025. godine.