

# DINAMIČKO ODREĐIVANJE REAKTIVNE MOGUĆNOSTI SINHRONOG GENERATORA U 110 KV MREŽI

## REAL-TIME ESTIMATION OF SYNCHRONOUS GENERATOR IN 110 kV NETWORK

Jasna DRAGOSAVAC, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Srbija  
Žarko JANDA, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Srbija  
Jelena PAVLOVIĆ, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Srbija  
Sava DOBRIČIĆ, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Srbija  
Zoran ĆIRIĆ, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Srbija  
Jelena NIKOLIĆ, JP EPS, TE "Kostolac", Srbija  
Zlatko SIMEUNOVIĆ, JP EPS, TE "Kostolac", Srbija  
Dejan ŽUKOVSKI, JP EPS, TE "Kostolac", Srbija

### KRATAK SADRŽAJ

Sa priključivanjem distribuirane proizvodnje na distributivnu mrežu javlja se potreba za promenom načina regulacije napona u distributivnoj mreži. Priključenjem distribuirane proizvodnje menjaju se tokovi aktivnih i reaktivnih snaga, raspodela napona u mreži i dinamika promene napona u mreži. Javljaju se novi izazovi i to su regulacija napona u tački koja nije na krajevima generator jer je neophodno uzeti i uticaj aktivnih tokova na veličinu napona u tački priključenja na mrežu i dinamiku promene aktivne i reaktivne snage distribuiranih generatora čija je proizvodnja zavisna od prisustva energenta. Klasični izvori, hidro i termo, imaju mogućnost poravnjanja nivoa generisane aktivne i reaktivne snage u cilju održavanja željenih frekventnih i naponskih prilika. To je prilika da se kroz ostvarivanje dodatnih funkcionalnosti klasičnih izvora realizuju nove usluge koje mogu da doprinesu povećanju ekonomičnosti rada klasičnih izvora. Digitalizacijom upravljanja napona na 110 kV koja je ostvarena u TE "Kostolac" realizovana je softverska alatka za određivanje dinamičke reaktivne mogućnosti generator povezanog na mrežu. Ova alatka ostvaruje dva cilja: ograničava rad generator u okviru njegovih tehničkih ograničenja uz puno korišćenje mogućnosti do dostizanja ograničenja i komunikacionim putem prenosi informaciju o rezervi reaktivne snage koju može upotrebiti za regulaciju napona u mreži. Poteškoće u određivanju dinamičke rezerve na generatorima priključenim na 110 kV mrežu potiču od velike vrednosti reaktanse mreže kod koje se otpornost ne može zanemariti, snažnog uticaja nivoa generisane aktivne i reaktivne snage na nivo napona u tački priključenja koji povratno nameće ograničenja na proizvodnoj jedinici. U radu će biti opisan način realizacije određivanja rezerve reaktivne snage na proizvodnoj jedinici s obzirom na nivo generisane aktivne i reaktivne snage, napona na krajevima generator i napona u tački priključenja. Takođe će biti razmatrane varijante za realizaciju naponske zavisnosti pogonske karte s obzirom na merenja koja se koriste i njihovu tačnost. Rezultati poređenja će biti prikazani. Konačni rezultat primene alatke je raspolaganje tačnim granicama dopuštenog sigurnog rada proizvodnih jedinica povezanih na prenosnu mrežu koje učestvuju u regulaciji napona.

**Ključne reči:** proizvodna jedinica, regulacija napona, impendansa mreže, reaktivna rezerva

Jasna Dragosavac, jasna.dragosvac@ieent.org

### ABSTRACT

With the connection of distributed production to the distribution network, there is a need to change the way voltage regulation in the distribution network. The connection of distributed production changes the flows of active and reactive power, the distribution of voltages in the network and the dynamics of change of voltages in the network. New challenges are emerging, namely the regulation of voltage at the point not at the ends of the generator, since it is necessary to take into account the influence of active flows on the magnitude of the voltage at the point of connection to the grid and the dynamics of change of active and reactive power of distributed generators whose production depends on the presence of energy. Classic sources, hydro and thermo, have the ability to align the levels of generated active and reactive power in order to maintain the desired frequency and

voltage conditions. This is an opportunity to realize, through the implementation of additional functionalities of classic sources, new services that can be billed and contribute to increasing the efficiency of operation of classical sources. With the digitalization of the 110 kV voltage control, which was realized at TPP "Kostolac", a software tool for determining the dynamic reactive capability of the generator connected to the network was realized. This tool achieves two goals: limiting the operation of the generator within its technical limitations with full use of the capability to reach the limits and communicating via communication to the national dispatch center so that the transmission system operator has at all times information on the reserve of reactive power it can use for voltage regulation in the network. Difficulties in determining the dynamic reserve of generators connected to a 110 kV network are due to the high reactance of the non-negligible network, the strong influence of the level of generated active and reactive power on the new voltage at the connection point, which imposes constraints on the production unit. The paper will describe the way of realizing the reactive power reserve at the production unit with respect to the level of generated active and reactive power, the voltage at the ends of the generator and the voltage at the connection point. Variants for realizing the voltage dependence of the drive map will also be considered, given the measurements used and their accuracy. The results of the comparison will be displayed. The end result of the application of the tool is the disposition of the exact limits of the permitted safe operation of the generating units connected to the transmission network involved in voltage regulation.

**Keywords:** production unit, voltage regulation, network impedance, reactive reserve

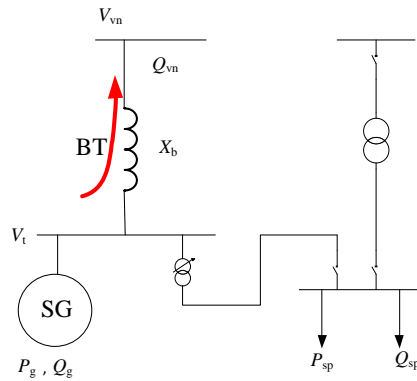
## UVOD

Regulacija napona u mreži 110 kV na koju su priključeni obnovljivi izvori za proizvodnje električne energije predstavlja tehnički izazov savremenog upravljanja naponima u mrežama ovog i nižeg naponskog nivoa. Izazovi koji se javljaju u upravljanju naponima proističu iz naglih promena nivoa generisane aktivne snage obnovljivih izvora u zavisnosti od prisustva resursa i dinamičnih zahteva tržišta električne energije. Nagle promene u nivou aktivne snage značajno utiču na lokalne naponske prilike, a ove povratno utiču na sve korisnike mreže. Održavanje napona u 110 kV mreži mora biti značajno dinamičnije tj. u realnom vremenu. Tradicionalni izvori imaju sada posebnu ulogu u održavanju željenih naponskih prilika posebno pri uključenju i isključenju obnovljivih izvora. To iziskuje nagle promene nivoa generisane reaktivne snage koje dodatno naprežu opremu tradicionalnih izvora. Da bi obezbedili rad proizvodnih jedinica (kotao, turbina, generator, blok transformator i dr. prateća oprema) u okviru tehnički dozvoljenih granica tradicionalni izvori prinuđeni su da ugrađuju novu opremu koja će vršiti regulaciju napona u tački priključenja uz poštovanje limita koji postoje na opremi. Ova regulacija daje dodatni doprinos regulaciji napona na mreži. Ona obezbeđuje promenu nivoa generisane reaktivne snage tako da naponi u mreži ostanu konstantni. To posebno povoljno utiče na smanjenje gubitaka i povoljno utiče na ekologiju kroz smanjenje zagađenja (emisije dimnih gasova) i smanjenja toplotne emisije. S druge strane nameće dodatne troškove za nabavku i održavanje ovakve opreme.

Da bi se vršila regulacija napona u tački priključenja na mrežu koja se menja u realnom vremenu neophodno je stalno estimiranje impedanse mreže. Tako se određuje potreban nivo reaktivne snage za održavanje željene vrednosti napona. Sa druge strane napon u tački priključenja proizvodne jedinice utiče kroz više parametara na njegove proizvodne mogućnosti pa je neophodno u realnom vremenu vršiti estimaciju proizvodnih mogućnosti u zavisnosti od napona mreže. U ovom radu biće opisana unapređenja koja su implementirana u okviru uređaja za grupnu regulaciju reaktivne snage i napona sabirnica GRRS da bi se omogućio rad uređaja u mreži sa visokom impedansom. Opisana unapređenja odnose se na dinamičko određivanje reaktivne mogućnosti sinhronog generatora koja služe uređaju GRRS i operatoru prenosnog sistema za ocenu regulacionih moći generatora u konkretnoj radnoj tački mreže.

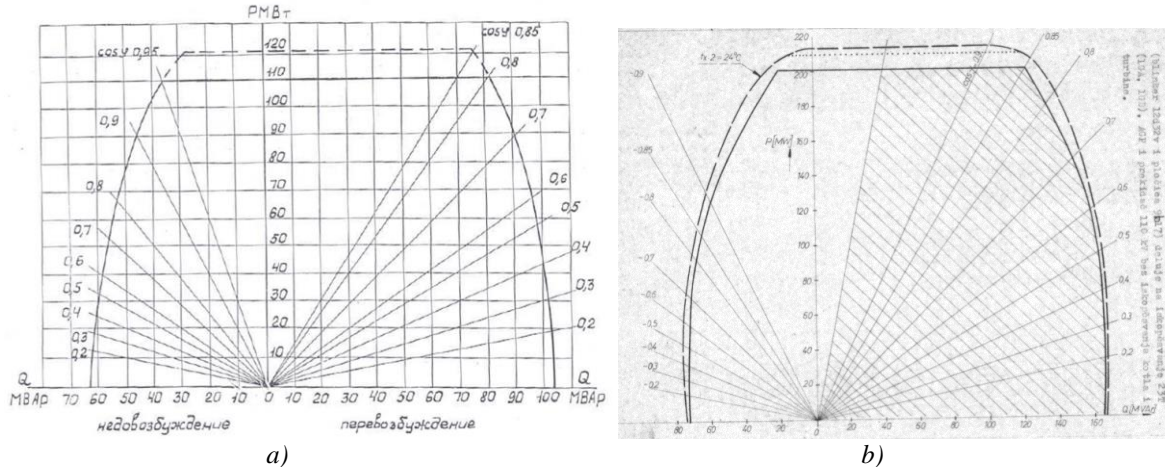
## **ODREĐIVANJA REZERVE REAKTIVNE SNAGE NA PROIZVODNOJ JEDINICI S OBZIROM NA NIVO GENERISANE AKTIVNE I REAKTIVNE SNAGE, NAPONA NA KRAJEVIMA GENERATORA I NAPONA U TAČKI PRIKLJUČENJA**

Standardna konfiguracija termoelektrane prikazana je na slici 1. Generalno, sopstvena potrošnja proizvodne jedinice se napaja preko transformatora sopstvene potrošnje koji je priključen direktno na izvode generatora. Alternativni izvor je sa visokonaponske strane, iz prenosne mreže posebnim transformatorom u toku starta jedinice, zaustavljanja ili drugim uslovima. Generator se na prenosnu mrežu priključuje preko blok-transformatora. Reaktivna mogućnost proizvodne jedinice ograničena je tehničkim mogućnostima generatora, opreme priključene na krajeve generatora i blok transformatorom.



SLIKA 1 TIPIČNA JEDNOLINISKA ŠEMA POVEZIVANJA PROIZVODNE JEDINICE NA MREŽU

Sam sinhroni generator ograničen je termički i nivo dozvoljene generisane reaktivne snage je utoliko manji, ukoliko je viši nivo generisane aktivne snage. Ovo ograničenje definisano je termičkim kapacitetom namotaja statora. Na ovo termičko ograničenje superponiraju se još dva termička ograničenja i to u induktivnoj oblasti po struji rotora i u kapacitivnoj oblasti po termici krajnjih paketa statora generatora koje je konstruktivno i geometrijski određeno. Ova termička ograničenja definisana su pogonskom kartom generatora, slika 2, pa je pogonska karta sastavni deo regulacionih ograničenja uređaja GRRS. Međutim pogonska karta je naponski zavisna. Prema [1] generator može uspešno isporučivati nazivne kilovoltampere, frekvenciju i nazivni faktor snage na bilo kojem naponu koji nije veći od 5% iznad ili ispod nazivnog napona, ali *ne* u skladu sa standardnim performansama koje su definisane za rad na nazivnom naponu. Rezultat je da se reaktivna sposobnost različita za napone koji nisu nazivni, osim za nazivni faktor snage (prema pogonskom dijagramu dostavljenom od strane proizvođača generatora). Najuočljivije razlike su u potpobuđenom području kada rade ispod nazivnog napona. Uopšteno, kod napona nižeg od nazivnog napona, kapacitivno-reaktivna sposobnost je smanjena, dok je induktivno reaktivna sposobnost gotovo netaknuta za  $\pm 5\%$ , kod novih konstrukcija [2] i zavisna od napona kod starijih [3]. Generalno, kada generator radi sa naponom od 95%  $V_n$ , reaktivna sposobnost se smanjuje sa kvadratom napona u potpobuđenoj oblasti.



SLIKA 2 POGONSKI DIJAGRAM GENERATORA U TE „KOSLOLAC A“ A) GENERATOR A1, B) GENERATOR A2

Sva napred pomenuta ograničenja važe za vrednosti napona statora u opsegu 95% do 105% nazivnog napona. Standard [1] ne dozvoljava trajan rad sa naponima izvan ovog opsega zbog dodatnog naprezanja izolacije koje može dovesti do oštećenja. Dozvoljena odstupanja napona zavise od odstupanja frekvencije od nazivne vrednosti i radna oblast je definisana u standardu [4].

Ako je napon u tački priključenja na mrežu fiksna i impedansa beskonačno mala može se konstruisati karakteristika promene napona generatora sa promenom reaktivne snage. Nagib ove karakteristike je određen reaktansom blok-transformatora, a položaj (po vertikalnoj osi) prenosnim odnosom blok-transformatora. Veza između napona na krajevima generatora i generisanih Mvar nije linearna ali se uzima kao linearni segment u uskom opsegu napona 95% do 105%  $U_n$  (nominalne vrednosti napona). Poželjno je da generator može da apsorbira Mvar do svojih limita pri visokim naponima u mreži i da ih generiše pri niskim. Ako mreža nije beskonačne snage i reaktansa nije beskonačno mala, reaktivna snaga koja teče od generatora u mrežu ima tendenciju da utiče na povećanje napona mreže, dok apsorpcija Mvar snižava napon mreže. Sama mreža je

određena dozvoljenim opsegom napona u tački priključenja i reaktansom mreže. Što je veća reaktansa mreže to se za istu promenu reaktivne snage više menja napon u tački priključenja. U normalnom radu generator povezan na mrežu [5] je regulisan i vrednost napona na statoru je konstantna. Pri promeni napona u mreži javlja se razlika napona na krajevima blok-transformatora i reaktivna snaga menja svoju vrednost. Zbog postojanja reaktanse blok transformatora, napon u tački priključenja nije tvrdo regulisan i zavisi od pada napona na blok-transformatoru. Sinhroni generatori su najznačajnije sredstvo za regulaciju napona u mrežama 110 kV i više. Priključivanjem distribuiranih generatora na niže naponske nivoe neophodno je njihovo uključivanje u uslugu regulaciju napona. Značaj ovih generatora može biti veliki jer mogu doprineti smanjenju tokova i aktivnih i reaktivnih snaga iz visokonaponske (VN) mreže i omogućiti prenos aktivne snage koju sami proizvode. S obzirom da se nalaze na mnogo manjem fizičkim rastojanjima pa su komunikacioni kanali najčešće već realizovani u odnosu na sinhronne generatore u VN mrežama potrebno je upravljanje generatorima koordinisati. Na taj način je moguće obezbediti reaktivnu podršku za plasman aktivne snage, održavanje napona u lokalnoj mreži na propisanim nivoima i smanjenje gubitaka u prenosu. Za realizaciju koordinisane regulacije neophodno je rešavati multikriterijumske funkcije optimizacije sa ograničenjima. Ograničenja su različita (propusna moć dalekovoda u zavisnosti od spoljašnje temperature, kvarovi na pojedinim delovima mreže, posebni zahtevi lokalne potrošnje) i nisu fiksna. Savremeni upravljački uređaji imaju mogućnost da računaju ograničenja u realnom vremenu. Na nivou elektrane dozvoljene limite za generisanje reaktivne snage računaju se za grupnu regulaciju reaktivnih snaga. Ove vrednosti potrebno je u realnom vremenu dostavljati koordinisanom sistemu za upravljanje naponima u mreži i ona služe kao ulazi u funkcije optimizacije.

Uređaj GRRS u okviru alatke „aktuelne pogonske karte u realnom vremenu“ računa reaktivne rezerve agregata superponiranjem svih granica, [6] i [7]. Prilikom projektovanja uređaja GRRS bilo je predviđeno da se granice po dozvoljenim vrednostima napona na krajevima generatora računaju direktno prema merenjima napona generatora ili na osnovu merenja generisanih reaktivnih snaga i napona u tački priključenja. Različita rešenja su primenjivana u zavisnosti od merenja koja su bila na raspolaganju. U TE „Kostolac A“ na raspolaganju su bila sva neophodna merenja na strani generatora (10,5 kV nivo za generator A1 i 15,75 kV nivo za generator A2). U toku ispitivanja mreže 110 kV pre puštanja uređaja u rad uočene su velike oscilacije napona mreže 110kV prouzrokovane radom velikih industrijskih postrojenja, slika 3. To izaziva dodatno naprezanje generatora u TE „Kostolac A“ koji ulažu regulacione napore da napon na svojim krajevima održavaju konstantnim, slika 3. Poslednjih godina generatori rade sa niskim nivoima generisane reaktivne snage koji su bliski 0Mvar ili kapacitetu u tački priključenja. Prenosni odnos blok-transformatora je takav da je napon na generatorima blizak minimalnim vrednostima. Zbog toga je bitno bilo proveriti odziv generatora koji je upravljani od strane GRRS kada radi na minimalnim naponima generatora, a pri tome napon mreže značajno osciluje.

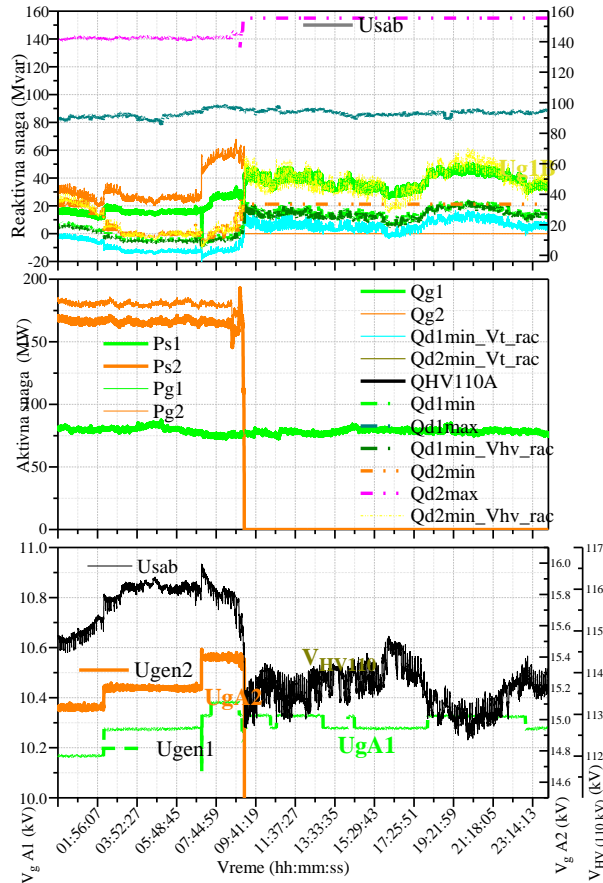
Jedan uobičajeni dan prikazan je na slici 3. Na slici 3a su prikazane reaktivne snage i promene dinamičkih reaktivnih rezervi, na slici 3b nivoi generisane aktivne snage i na slici 3c naponi generatora i napon 110 kV. Prilike u 110kV mreži pokazuju da u normalnom radu napon osciluje sa približnim trajanjem oscilacije oko 3 minuta. Naponi na krajevima generatora ostaju konstantni. Dolazi do promena veličine reaktivne snage koja se ubrzigava u mrežu. U 09:07 generator A2 je isključen sa mreže.

Uređaj GRRS upravlja nivoom generisane reaktivne snage pomeranjem naponsko-reaktivne karakteristike generatora duž naponske ose. Pošto se karakteristika sa nagibom kreće duž naponske ose potrebno je proveravati da postignuta radna tačka generatora ne izađe izvan dopuštenih opsega. Promena napona na krajevima generatora izaziva promene tokova reaktivnih snaga i dalje napona u mreži, što ponovo utiče na promenu reaktivnih snaga po vodovima i kroz blok transformator. Za isti napon na krajevima generatora koji radi u induktivnom režimu sa porastom napona mreže opada nivo generisane reaktivne snage i obrnuto. Ako je napon u mreži isuviše nizak i postoje veliki potrošači koji izazivaju promene nivoa generisane reaktivne snage potrebno je voditi računa da regulacioni opseg ostane dovoljno širok da generator ne bi bio ugrožen. Pošto se želi postići odgovarajuća promena reaktivne snage kako bi se napon u tački priključenja održavao oko referentne vrednosti potrebno je reaktivnu snagu menjati do vrednosti kada se dostižu granice po naponu na terminalima. Ove granične vrednosti na slici 3a označene su sa  $Q_{dimin\_Vhv\_rac}$  i  $Q_{dimin\_Vt\_rac}$  i njihov proračun je opisan u sledećem poglavlju.

## TEORETSKA OSNOVA PROBLEMA

Da bi se izračunala promena reaktivne maksimalna dozvoljena promena reaktivne snage potrebno je od napona na viskonaponskoj strani blok-transformatora oduzeti padove napona, slika 1. S obzirom da su parametri transformatora poznati moguće je izračunati padove napona. Međutim, pri kojoj će se vrednosti dostići limit za poznate padove napona na blok-transformatoru zavisi od napona mreže. Pri prvom koraku promene napona generatora menja se i napon mreže pa sa njima i veličina  $Q$  pri kojoj se dostiže naponski limit. Ovaj proces je po svojoj prirodi iterativan i veoma lako ulazi u pojavu nazvanu „granični ciklus“ (u literaturi najčešće opisna kao „Limit Cycle“), [8].

Osnovna jednačina toka reaktivne snage kroz blok transformator data je sledećim izrazom (1)



SLIKA 3 RAD GENERATORA U TE KOSTOLAC A TOKOM 24H

$$\frac{Q_g}{V_g} = \frac{V_g - V_{HV}}{X_{BT}} + \frac{1}{2} \frac{P^2 X_{BT}}{V_g^2 V_{HV}} \quad (1)$$

gde su

$Q_g$  reaktivna snaga na krajevima generatora,  $V_g$  napon na krajevima generatora,  $V_{HV}$  napon u tački priključenja na mrežu 110 kV,  $X_{BT}$  reaktansa blok-transformatora,  $P$  aktivna snaga na krajevima generatora.

Maksimalna reaktivna snaga koja se može preneti kroz blok transformator pri naponu na krajevima generatora  $V_{gmax}$  data je izrazom (2):

$$\frac{Q_{gmax\_vgmax}}{V_{gmax}} = \frac{V_{gmax} - V_{HV}}{X_{BT}} + \frac{1}{2} \frac{P^2 X_{BT}}{V_{gmax}^2 V_{HV}} \quad (2)$$

gde su

$Q_{gmax\_vgmax}$  maksimalna reaktivna snaga pri maksimalno dozvoljenom naponu generatora  $V_{gmax}$ .

Postignuta granica  $Q_{gmax}$  pri  $V_{gmax}$  važi samo ukoliko se vrednost napona mreže nije promenila. Eliminacijom napona mreže  $V_{HV}$  iz izraza (1) i (2) dobija se izraz (3):

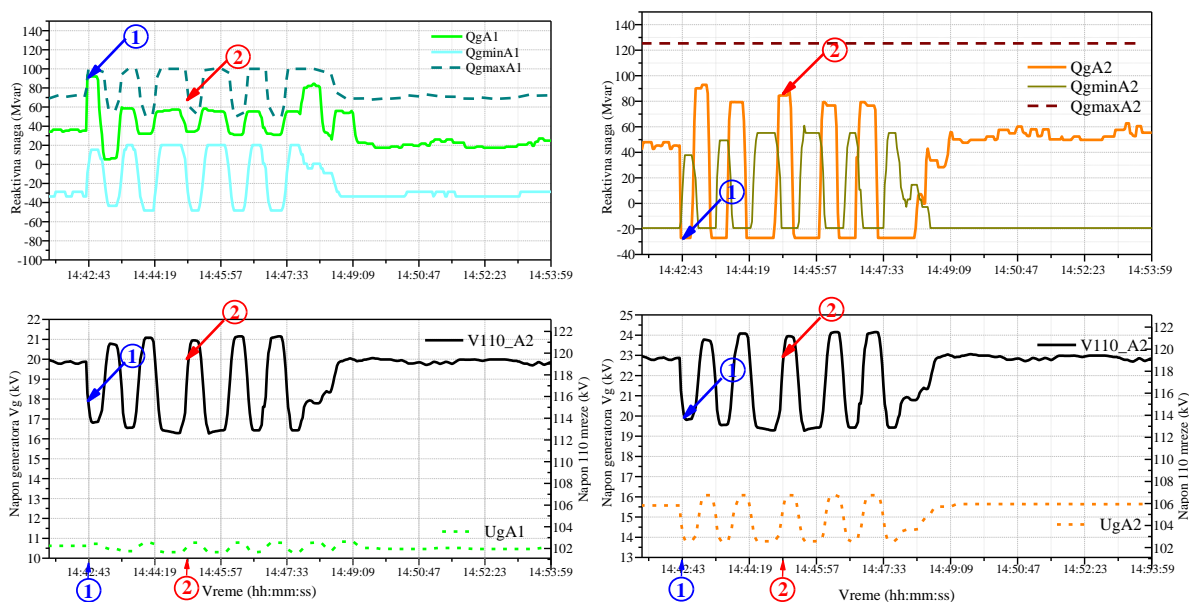
$$\frac{Q_{gmax\_vgmax}}{V_{gmax}} = \frac{Q_g}{V_g} + \frac{V_{gmax} - V_g}{X_{BT}} + \frac{1}{2} \frac{P^2 X_{BT}}{V_{HV}} \left( \frac{1}{V_{gmax}^2} - \frac{1}{V_g^2} \right) \quad (3)$$

Izraz (3) je vezan samo za merenja na krajevima generatora. Izraz (2) vezan je za kombinovana merenja i na niskonaponskoj (NN) i na visokonaponskoj (VN) strani blok-transformatora. Oba izraza mogu se koristiti za određivanje minimalno dozvoljene reaktivne snage  $Q_{gmin\_vgmin}$  pri minimalno dozvoljenom naponu generatora  $V_{gmin}$  zamenom indeksa *max* sa indeksom *min*. Nedostatak oba izraza, (2) i (3), vezan je za činjenicu da su vezani za merenja VHV i  $Q_g$  u sadašnjem trenutku, a predikcija se vrši za novu radnu tačku.

Da bi se ovaj uticaj ilustrovao u laboratoriji je izvedena simulacija prikazana na slici 4. Na uređaju GRRS je zahtevano veliko smanjenje reaktivne snage. Prema prilikama u tački vremena 14:42 nova radna tačka je moguća i GRRS izdaje komande i pokušava da je postigne. Na slici se vidi uticaj generisane reaktivne snage na napon sabirnica. Promene napona sabirnica prate promene reaktivne snage na generatoru A2. Promena napona mreže

utiče na promenu minimalno dozvoljene reaktivne snage i ona se menja sa-20Mvar na približno 40Mvar. To dalje izaziva dejstvo uređaja GRRS koji pokušava da radnu tačku generatora pomeri iz nedozvoljene oblasti. Javlja se granične („Limit cycle“) oscilacije. Limit cycle je oscilacija svojstvena nelinearnim sistemima. Oscilatorno ponašanje karakteriše stalna amplituda i frekvencija određena nelinearnim svojstvima sistema i ne može se opisivati alatkama koje se koriste kod linearnih sistema. Granični ciklusi se razlikuju od linearnih oscilacija po tome što je njihova amplituda oscilacije nezavisna od početnih uslova tako da je teže oceniti uslove ulaska regulisanog sistema u „limit cycle“. Na slici se uočava uticaj oscilacija napona na generatoru A2 na oscilacije napona na 110 kV, što dalje izaziva oscilovanje granica na generatoru A1 i A2. U ovoj laboratorijskoj simulaciji potpuno je oslikana problematika regulacije napona u mrežama 110 kV i niže.

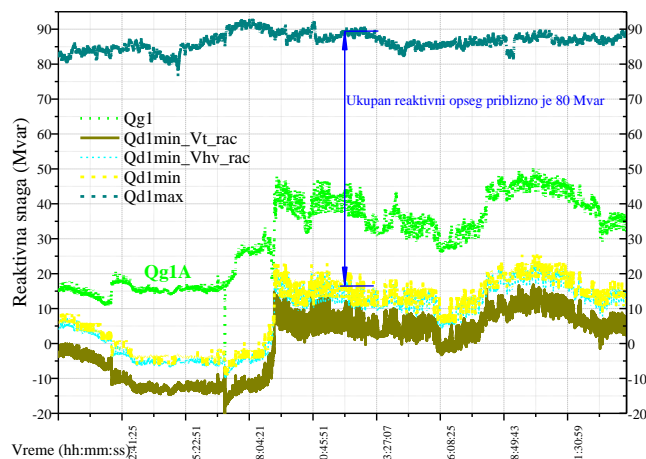
U 14:42 komandovano je da se vrednost napona u mreži 110 KV promeni sa 119 kV na 115 kV. Proračun nove radne tačke elektrane pokazao je da ukupno injektirana reaktivna snaga treba da se promeni sa 50 Mvar na -30Mvar. Proverom granica na slici 4a i 4b vidi se da u početnoj radnoj tački postoji dovoljna reaktivna rezerva da se pređe u novi režim. Značajna promena reaktivne snage A2 izaziva promenu napona  $V_{110kV}$  što izaziva promenu  $Q_{gmin A1}$  U vremenskim trenucima 1 i 2 uočava se da se generatori osciluju između dve vrednosti ali u suprotnoj fazi i pojavljuju se „limit cycle oscilacije“. Pri tome generator G1 ostaje unutar dozvoljenih vrednosti napona generatora dok generator A2 prelazi dopuštenu minimalnu vrednost. Uočava se i da generator A2 prelazi  $Q_{gmin A2}$ . Računanje  $Q_{gmin}$  vrši se na osnovu izraza 3. Zbog postojanja realne mogućnosti pojave „Limit Cycle“ oscilacija u TE „Kostolac“ na uređaju GRRS su implementirane oba načina računanja minimalnih i maksimalnih granica reaktivne snage po uslovu napona na krajevima generatora. Analiza dobijenih rezultata izvršena je u toku puštanja uređaja GRRS u rad na elektrani.



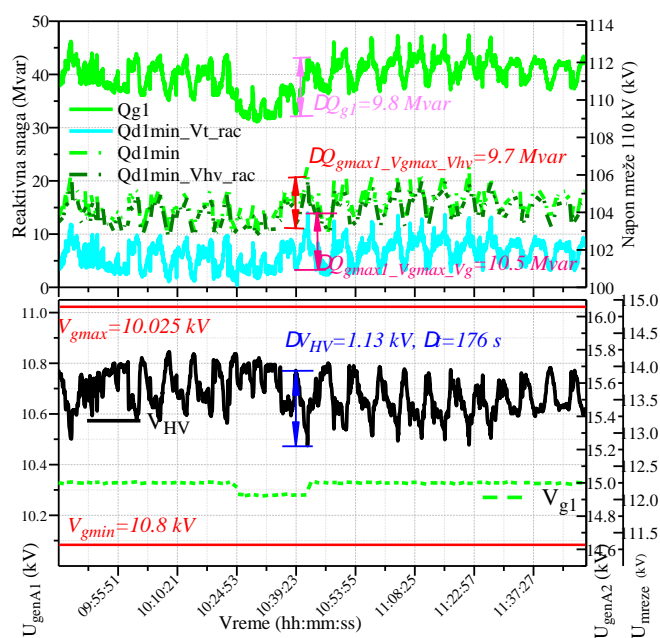
SLIKA 4 LABORATORIJSKE SIMULACIJE DOSTIZANJA GRANICA PO NAPONU STATORA I POJAVE „LIMIT CYCLE“ OSCILACIJA. PRIKAZANE SU REAKTIVNE SNAGE GNENERATORA A1 I A2 U TE „KOSTOLAC A“ I NJIHOVE MINIMALNE I MAKSIMALNE GRANICE

## DINAMIČKO ODREĐIVANJE REAKTIVNE MOGUĆNOSTI SINHRONOIG GENERATORA U 110 KV MREŽI

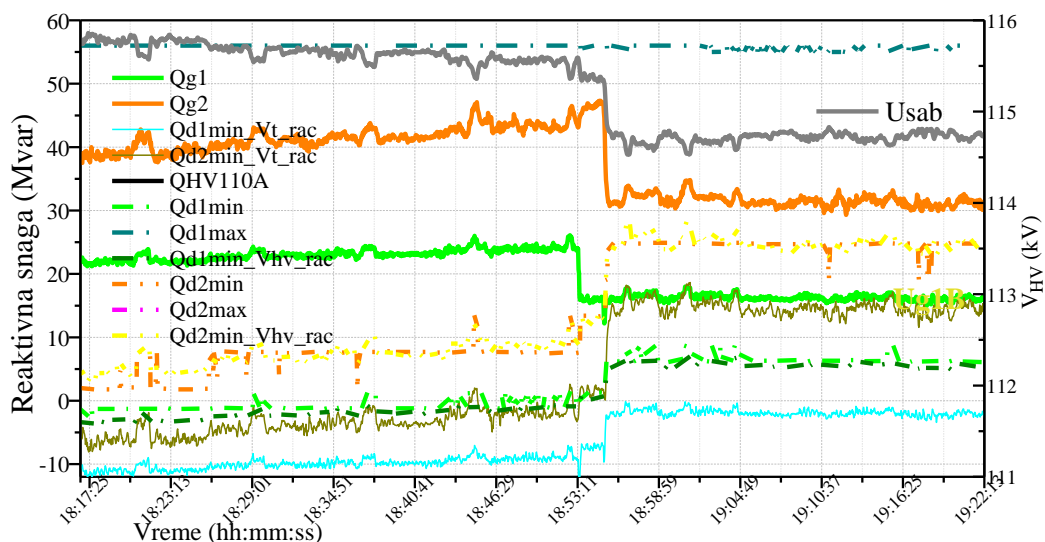
Za radne uslove sa slike 3 proračuni minimalnih granica po izrazima (2) i )3) prikazani su na slici 5. Na slici 5 se uočava da je ukupan reaktivni opseg generatora A1 bio širok 80 Mvar i da su oscilacije reaktivne snage zbog prilika u mreži iznosile približno 10 Mvar što predstavlja 12% raspoloživog opsega. Takođe se uočava da su oscilacije vrednosti minimalnih granica reaktivne snage po naponu terminala pratile prilike u mreži i oscilovale nešto manje od 10 Mvar, slika 6. Pri tome proračun granica prema merenjima sa NN strane daje niže vrednosti u odnosu na proračune sa VN strane, slika 6. Razlike u izračunatim vrednostima su očekivane i potiču od grešaka merenja i grešaka proračuna. Izabrano je da aktivna ostane predikcija granica prema merenjima sa VN jer su granice strožije tako da im generatori „sporije“ prilaze. Kada dođu u novu radnu tačku u sledecem koraku će prići bliže granicama bez opasnosti od pojave „Limit Cycle“ oscilacija. Kvalitet postignute regulacije u graničnim režimima prikazan je na slici 7.



SLIKA 5 REAKTIVNA SNAGA GENERATORA A11 NJEGOVI DOPUŠTENI REAKTIVNI OPSEZI, MAKSIMALNA GRANICA JE PRIKAZANA DARK-CYAN BOJOM, A MINIMALNA GRANICA ŽUTOM BOJOM



SLIKA 6 PROMENE NAPONA U TAČKI PRIKLJUČENJA OD 1%, KOJE SE JAVLJAJU U NORMALNOM RADU (1,13 KV), IZAZIVAJU PROMENU TOKA REAKTIVNE SNAGE OD Približno 10 MVAR ŠTO PREDSTAVLJA 12,5% UKUPNOG REAKTIVNOG OPSEGA



SLIKA 7 RAD GENERATORA U ZONAMA BLISKIM OGRANIČENJIMA

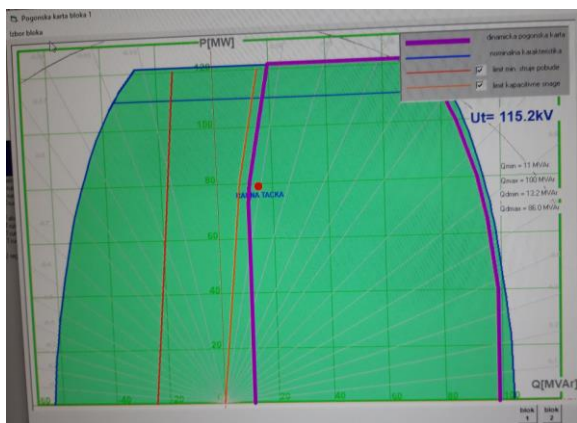
**REZULTAT PRIMENE ALATKE JE RASPOLAGANJE TAČNIM GRANICAMA DOPUŠTENOG SIGURNOG RADA PROIZVODNIH JEDINICA POVEZANIH NA PREOSNOU MREŽU KOJE UČESTVUJU U REGULACIJI NAPONA**

Značaj dinamičkog određivanja reaktivnih rezervi prikazan je na slikama 8, 9, 10, 11 i 12. Na slikama se vide zapisi na operatorskoj stanici uređaja GRRS koji je instaliran u TE „Kostolac A“. Oba generatora su bila povezana na mrežu. U prvoj radnoj tački koja je prikazana na slici 8 vidi se da je napon na 110 kV sabirnicama iznosio 115,2 kV, i da je reaktivna snaga injektirana u mrežu u tački priključenja iznosila približno 24 Mvar. Na slikama 9 i 10 su prikazane radne tačke generatora na kojima se vide njihove generisane aktivne i reaktivne snage (radne tačke su predstavljene crvenim tačkama). Dopusene vrednosti reaktivnih snaga oivičene su pink linijama. U okviru grafika su date i minimalne dopuštene reaktivne snage na krajevima generatora. Kako postoje potrošnja reaktivne snage koja se odvaja sa krajeva generatora kao i gubici u samom blok-transformatoru, za nadređeni sistem automatskog upravljanja naponima ili za dispečera, od većeg je značaja opseg definisan na sabirnicama visokog napona. Taj opseg se precizno računa i može se u realnom vremenu dostavljati nadređenom sistemu upravljanja,. Takođe rukovalac GRRS može očitati vrednosti granica pritiskom miša na odgovarajuće polje slike na operatorskoj stanici, slike 8 i 11. Na slici 8 se vidi da je za dati nivo napona i generisanih aktivnih snaga elektrana mogla da minimalno generiše 42,8 Mvar, a maksimalno 207 Mvar. Pri promeni napona mreže na vrednost 116,26 kV, slika 11, dopuštene granice opsega su bile 15 Mvar minimalno i 77 Mvar maksimalno. Raspodela po generatorskim jedinicama prikazana je na slici 12 gde se vidi operatorski panel na samom uređaju. Rezultati prikazuju da dopušteni opseg klizi po reaktivnoj osi sa promenom napona i da se pri tome menja i njegova širina. Ovaj primer pokazuje značaj proračuna različitih ograničenja u mrežama 110 kV i niže.

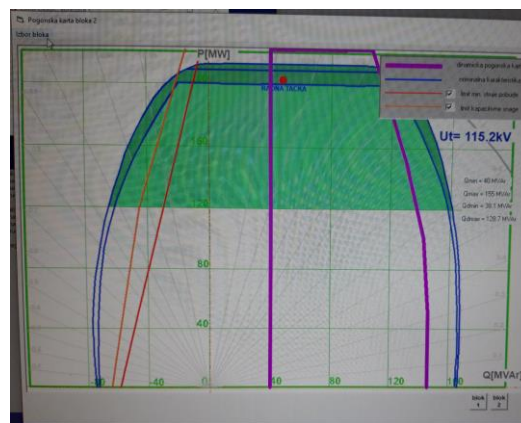


SLIKA 8 PROZOR ZA ZADAVANJE REFERENCE NAPONA I OČITAVANJE DOPUŠTENOG OPSEGA REAKTIVNIH SNAGA U TAČKI PRIKLJUČENJA





SLIKA 9 ADAPTIVNA POGONSKA KARTA GENERATORA A1



SLIKA 10 ADAPTIVNA POGONSKA KARTA GENERATORA A2



SLIKA 11 PROZOR ZA ZADAVANJE REFERENCE NAPONA I OČITAVANJE DOPUŠTENOG OPSEGA REAKTIVNIH SNAGA U TAČKI PRIKLJUČENJA

P1	85.0	Q1	6.9	Q1 <sub>min</sub>	3.8	Q1 <sub>max</sub>	9.5
P2	199.7	Q2	66.9	Q2 <sub>min</sub>	20.4	Q2 <sub>max</sub>	70.9

SLIKA 12 OPERATORSKI PANEL NA UREĐAJU GRRS PRIKAŽUJE DOPUŠTENE RADNE OPSEGE GENERATORA

## ZAKLJUČAK

Reaktivne mogućnosti generatora u 110 kV mreži i niže veoma zavise od naponskih ograničenja koja postoje na samom generatoru i dalje u različitim tačkama mreže. Zbog prisustva otpornosti u provodnicima električne struje i visoke impedanse mreže, napon u tački priključenja generatora se menja sa promenom nivoa generisane aktivne i reaktivne snage. Predikcija granica može se vršiti tačno za širi model mreže, iterativnim off-line postupkom kada se definiše stanje u koje se želi doći. Međutim, u toku upravljanja naponima potrebno je unapred posmatrati promenu granica da bi se sistem mogao dovesti u željenu radnu tačku. U uređaju GRRS su primenjena dva postupka estimacije granice na osnovu trenutnih merenja. Prvi postupak obuhvata merenja generisanih reaktivnih snaga na krajevima generatora i napona na sabirnicama (koji je regulisana veličina za GRRS). Drugi postupak obuhvata merenja reaktivne snage na krajevima generatora i napona na krajevima generatora (koji je limitirajući faktor). Rezultati ispitivanja su pokazali da se primenom prvog postupka postiže stabilnija regulacija u graničnim režimima i da reaktivne snage finije prilaze granicama. Ovako estimirane vrednosti treba koristiti i za potrebe regulacije napona u sistemu i dostavljati operatoru prenosnog sistema. U sledećem koraku ukoliko se pokaže da je potrebna preciznija predikcija granica, na primer u slučaju značajnijeg udela obnovljivih izvora, u proračun je neophodno uvrstiti estimaciju napona u tački priključenja na osnovu estimacije reaktanse mreže.

## LITERATURA

1. Standard Std C50.13-2005 - IEEE Standard for Cylindrical-Rotor 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators Rated 10 MVA and Above
2. China Machinery Engineering Corp. (CMEC) Project Department, „Technical Specifications for 350MW Power Plant”, Power Plant Project.
3. Žarko Janda, Jasna Dragosavac, Ilija Klasnić, Zoran Ćirić, Mihailo Đorđević, Ljubiša Mihailović, Zoran Božović, 2019, „Ispitivanja generatora B2 u TE „Nikola Tesla“ B u cilju utvrđivanja eksploatacionog pogonskog dijagrama“, Zbornik radova, CIGRE Srbija 34 savetovanje, R A1 06
4. Standard IEC 60034:2004(E) Rotating, electrical machines
5. AD „Elektromreža Srbije“ Beograd, Pravila o radu prenosnog sistema, dostupno <http://www.ems.rs>.
6. J. Dragosavac, Ž. Janda, T. Gajić, S. Dobričić, J. Pavlović, D. Arnautović, 2013, „Grupna regulacija pobude i reaktivnih snaga u elektrani“, *Zbornik radova EI "Nikola Tesla"*, 23, str.85-98
7. D. Arnautović, J. Dragosavac, Ž. Janda, T. J. Milanović, Lj. Mihajlović, 2014, „Definisanje uslova za rad uređaja za grupnu regulaciju pobude i reaktivnih snaga (GRPRS) u sistemu automatskog upravljanja naponima u mreži“, *Zbornik radova EI "Nikola Tesla"*, knjiga 24, str. 1-14
8. Mac E. Van Valkenburg Reference Data for Engineers, 2002, „Radio, Electronics, Computers and Communications“, Newnes.