

## Analiza mogućnosti postojanja paralelnog rezonantnog kola u RHE Bajina Bašta

Milica Dilparić Cakić<sup>1</sup> , Branka Kovačević<sup>1</sup>

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

[milica.dilparic@ieent.org](mailto:milica.dilparic@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** Pokretanje reverzibilnih agregata u režimu pumpi u RHE Bajina Bašta se vrši preko statičkog frekventnog pretvarača (SFP). To je rezultiralo povećanjem nivoa viših harmonika u okviru RHE. Međutim, nije bilo poznato da li rad ovog SFP-a može ugroziti rad potrošača koji se napajaju iz pomenute RHE preko distributivnog transformatora. U tu svrhu, bilo je potrebno proveriti mogućnosti postojanja paralelnog rezonantnog kola, kako u samoj RHE, tako i u delu distributivne mreže koji je bio od interesa. Analize su izvršene u formiranom linearnom simulacionom modelu u softverskom paketu *DlgSILENT PowerFactory*. Simulacioni model je formiran tako da odgovara stanju minimalnog opterećenja distributivnog područja koje se napaja iz TS Metaljka. Takođe analizirano je nekoliko uklopnih stanja u TS Đurici (odakle se napajaju pumpe u filterskom postrojenju). Rezultati pokazuju postojanje paralelne rezonance u okolini 13. harmonika na nivou 10 kV sabirnica u TS Metaljka, dok na sabirnicama prema prenosnom sistemu nije identifikovano postojanje rezonance, što je u skladu sa merenjima.

**Ključne reči:** statički frekventni pretvarač, SFP, viši harmonici, rezonantno kolo, reverzibilna hidroelektrana, pumpe, Bajina Bašta, simulacioni model, *DlgSILENT PowerFactory*

### 1. Uvod

Za potrebe pokretanja pumpi u RHE Bajina Bašta, ranije su korišćeni agregati instalirani u HE Bajina Bašta. Kako je to značilo gubitak energije i manje efikasan rad HE, u RHE je u prethodnom periodu ugrađen statički frekventni pretvarač (SFP). Njegovom implementacijom omogućen je efikasniji rad hidroelektrane, ali i produžavanje radnog veka, zbog manjeg

broja pokretanja onih generatora koji su do sada radili kao pogonski agregati prilikom sinhronizacije pumpi u RHE. Sa druge strane, primena SFP-a je značila i promenu topologije mreže unutar same RHE, a samim tim i izvesne promene u tokovima snaga i naponskim prilikama.

Merenja koja su izvršena maja 2022. godine prilikom startovanja SFP-a pokazala su relativno visoke vrednosti viših harmonika napona na 35 kV sabirnicama i 0,4 kV sabirnicama u samoj RHE. Najistaknutiji bili su viši harmonici 11, 13, 23, 25, 35 i 37. reda. Kako je u okviru topologije samog SFP-a sadržan 12-pulsni ispravljač, ovakve vrednosti su se mogle i očekivati jer su one tipične pri radu ove vrste ispravljača. Međutim, ono što je bilo nepoznato, jeste da li se ove smetnje mogu preneti i na konzum distributivne TS 35/10 kV Metaljka.

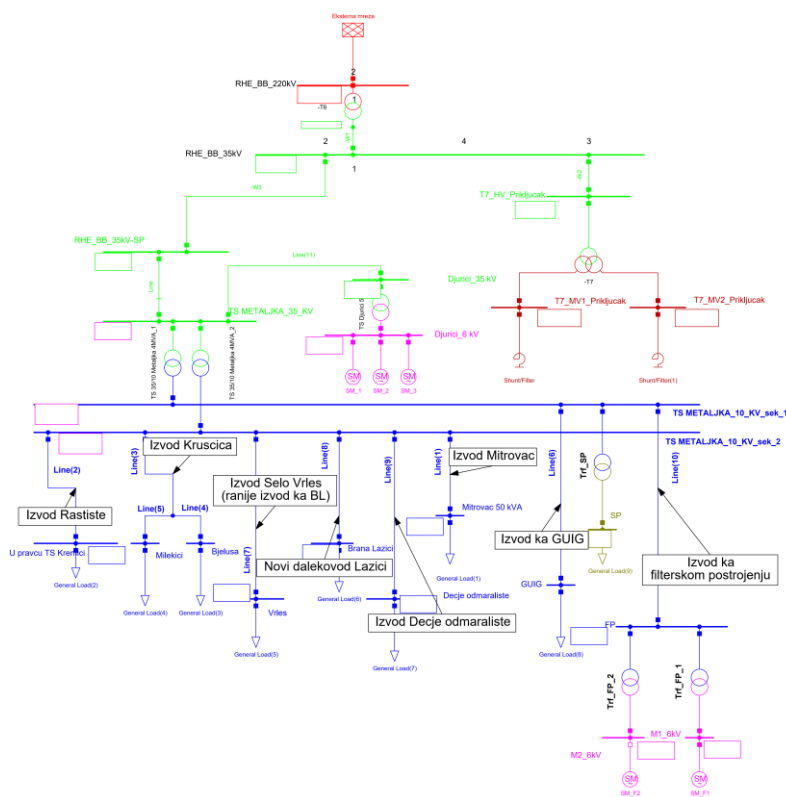
Zbog ovih potreba formiran je detaljan, linearni, simulacioni model u softverskom paketu *DigSILENT PowerFactory*, koji bi poslužio za analizu mogućnosti postojanja paralelnog rezonantnog kola na sabirnicama 35 kV u RHE Bajina Bašta, kao i na sabirnicama 35 kV u TS 35/10 kV Metaljka.

## 2. Formiranje simulacionog modela

Za potrebe analize mogućnosti postojanja paralelnog rezonantnog kola bilo je potrebno formirati dovoljno detaljan i validan simulacioni model. Svrha modela je analiza postojanja paralelne rezonance koja bi omogućila olakšanu propagaciju harmonijskih izobličenja. Propagiranje harmonika u kolu RHE Bajina Bašta može biti izrazito nepovoljno u slučaju da se pokaže smanjenje ekvivalentne impedanse:

- na sabirnicama TS Metaljka 35/10 kV, a naročito na 10 kV sabirnicama što bi značilo prostiranje harmonika dublje u distributivnu mrežu i potencijalne problem u radu pojedinih potrošača koji se napajaju sa ove trafostanice,
- na 220 kV sabirnicama transformatora T6 u RHE Bajina Bašta, što bi značilo propagiranje harmonika dublje u prenosnu mrežu i nepovoljan uticaj na kvalitet električne energije u prenosnoj mreži kao i odgovornosti za to prema operatoru prenosnog sistema.

Šematski prikaz formiranog modela dat je na Slici 1. Simulacioni model se prvenstveno odnosi na 35 kV sabirnice sopstvene potrošnje u RHE i 35 kV sabirnice u TS 35/10 kV Metaljka, ali i deo distributivne mreže gde je, na osnovu informacija i merenja sa terena, uočen problem. Treba napomenuti da je formirani model linearan, odnosno nisu uvažavane nikakve nelinearne karakteristike rada motora ili transformatora. Takođe, nisu modelovane nikakve specifične zavisnosti parametara mreže od frekvencije jer podaci o tome nisu postojali, niti je složenost modela tog tipa bila neophodna za ovu vrstu indikativne analize.



Slika 1. Jednopolna šema modela iz softvera DlgSILENT PowerFactory

Prikazana jednopolna šema ilustruje pre svega trenutno uklopno stanje u TS Metaljka 35/10 kV/kV. U okviru ove trafostanice nalaze se dva transformatora čiji su parametri dati u Tabeli 1.

Na 10 kV strani TS Metaljka su dve normalno otvorene sabirnice sa kojih polazi ukupno osam izvoda i postoji jedan transformator sopstvene potrošnje. Dužine i tipovi vodova u modelovanom 10 kV distributivnom području dati su u Tabeli 2.

Tabela 1. Parametri vodova 10 kV distributivnog područja sa TS Metaljka

Parametar	Opis	Vrednost
$U_{1n}$	Naznačeni napon primara [kV]	35
$U_{2n}$	Naznačeni napon sekundara [kV]	10,5
$S_n$	Nominalna snaga [MVA]	4
$U_{kn}$	Naznačeni napon kratkog spoja[%]	5,87

Tabela 2. Parametri transformatora u TS Metaljka

Oznaka	od	do	Tip i presek voda/kabla	L [m]
Line(1)	10 kV sabirnice u TS Metaljka	10 kV sabirnice u TS 10/0,4 kV Mitrovac	Nadzemni Alc 35 10kV	2000
Line(2)	10 kV sabirnice u TS Metaljka	Izvod Rastište	Nadzemni Alc 35 10kV	6500
Line(3)	10 kV sabirnice u TS Metaljka	Izvod Kruščica	PP Cu 35 10kV	3500
Line(4)	Izvod Kruščica	10 kV sabirnice u TS 10/0,4 kV Bjeluša	Nadzemni Alc_50	1225
Line(5)	Izvod Kruščica	10 kV sabirnice u TS 10/0,4 kV Milekići	Nadzemni Alc_50	1400
Line(6)	10 kV sabirnice u TS 35/10 kV Metaljka	10 kV sabirnice u TS 10/0,4 kV Ulazna građevina	PP Cu 35 10kV	3400
Line(7)	10 kV sabirnice u TS 35/10 kV Metaljka	10 kV sabirnice u TS 10/0,4 kV Vrleš	PP Cu 35 10kV	1400
Line(8)	10 kV sabirnice u TS 35/10 kV Metaljka	10 kV sabirnice u TS 10/0,4 kV Brana Lazići	XHP Al 70	7500
Line(9)	10 kV sabirnice u TS 35/10 kV Metaljka	10 kV sabirnice u TS 10/0,4 kV Dečje odmaralište	PP Cu 35 10kV	2454
Line(10)	10 kV sabirnice u TS 35/10 kV Metaljka	10 kV sabirnice u TS 10/6 kV Filtersko postrojenje	PP Cu 35 10kV	3500
Line	35 kV sopstvena potrošnja RHE	35 kV sabirnice u TS 35/10 kV Metaljka	NPZO13 AL70 (C=254nF/km)	3000
			NPZO13 AL70 (C=174nF/km)	6200

Parametre distributivne mreže je važno tačno modelovati da bi se na relevantan način proračunala ekvivalentna impedansa i ocenila mogućnost propagacije harmonika ka konzumu. Takođe, kao što se vidi sa Slike 1 detaljno je modelovano i ostalo 35 kV okruženje analizirane TS Metaljka i statičkog frekventnog pretvarača. To je podrazumevalo modelovanje motora u TS Đurići, kao i poveznih vodova i transformatora prema 220 kV naponskom nivou (nivou prenosne mreže). Sam statički frekventni pretvarač modelovan je na sekundaru i tercijaru transformatora T7 kao pasivni element, odnosno bez upravljačkih struktura ugla paljenja i ispravljača u tiristorskom mostu.

### 3. Formiranje nivoa opterećenja

Da bi se adekvatno proračunala ekvivalentna impedansa mreže na sabirnicama 10 kV TS Metaljke, bilo je potrebno na adekvatan način izmodelovati ne samo parametre mreže, već i opterećenje odnosno potrošnju tog 10 kV trafo rejona. Potrošnja je modelovana na krajevima izvoda. Na osnovu značajnog broja planerskih studija, a naročito na osnovu [1] bila je poznata aktivna i reaktivna snage potrošnje u krajnjim 10/0,4 trafostanicama. U [1] je međutim bilo modelovano minimalno perspektivno stanje mreže. Na osnovu merenja na 35 kV kابلu od TS Metaljka do RHE BB\_35 kV u vremenskom periodu kada je došlo do harmonijske propagacije do potrošača, utvrđena je reaktivna snaga u iznosu od 0,023 MVar, u slučaju kada radi jedna pumpa u filterskom postrojenju i jedan motor u TS Đurići što je skoro duplo manje od prognoziranog minimalnog opterećenja. U ovim uslovima tako slabo opterećene i „prazne” mreže, a imajući u vidu značajnu dužinu kablovskih trasa od 35 kV sabirnica sopstvene potrošnje RHE do 35 kV sabirnica TS Metaljke, očne kapacitivnosti ovih kablova u velikoj meri određuju nivo paralelne rezonance. Parametri pomenutog kablovskog voda (dve sekcije) dati su u poslednjem redu u Tabeli 2.

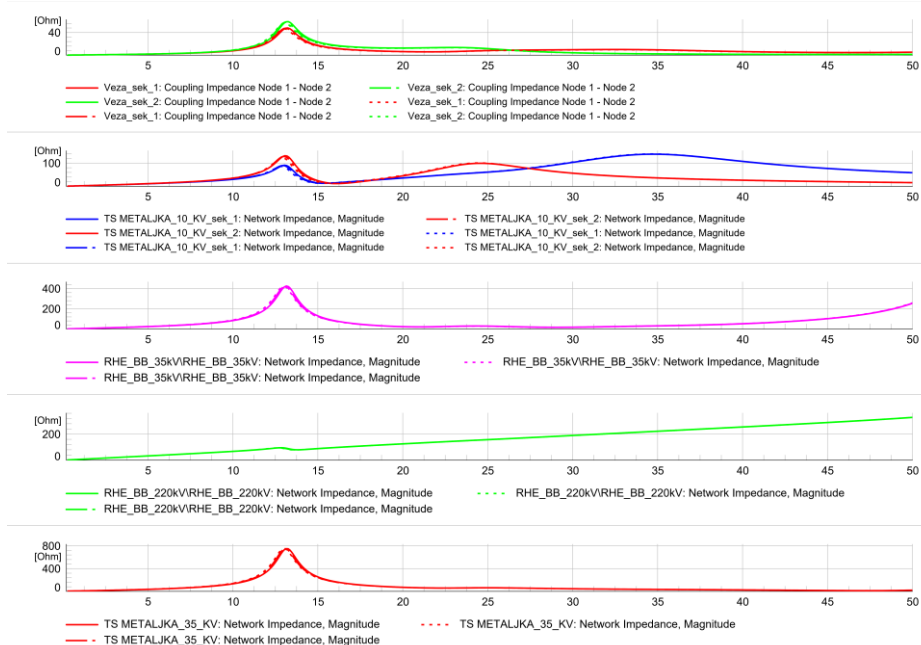
Na osnovu poznatog nivoa opterećenja iz [1] i zadržavajući isti faktor snage potrošača, izvršeno je skaliranje potrošnje tako da je za analizirano opterećenje modelovane distributivne mreže uzeto zbirno stanje od 0,323 MW i 0,075 MVar. Simulacijom zadatog opterećenja distributivnog dela i zadatog uklopnog stanja po pomenutom vodu postignuta je reaktivna snaga od 0,027 MVar.

Takođe, merenja sprovedena u maju 2022. od strane JP EMS pokazala su da startovanje agregata u RHE u pumpnom režimu preko pretvarača, u prvim momentima ima induktivni karakter. Zato je za potrebe analiza statički frekventni pretvarač modelovan kao dve prigušnice, po jedna na sabirnicama sekundara i tercijara transformatora - T7 (Slika 1), jednakih vrednosti, podešenih tako da se na 35 kV strani imaju izmerene vrednosti reaktivne snage (reda 18 MVar, a simulacijom se dobija 18,021 MVar).

## 4. Opis simulacija i rezultati

Rezultati analiza dobijeni su u programu *DigSILENT PowerFactory*. Program radi u tzv. modulu *Frequency Sweep*, u okviru koga računa ekvivalentnu impedansu mreže na izabranim sabirnicama za različite frekvencije [2]. Takođe, za ovakve analize je od ključnog značaja predstaviti i međusobnu impedansu, kao vezu napona na sabirnicama 10 kV u TS Metaljka usled struja statičkog frekventnog pretvarača sa sabirnica sekundara/tercijara transformatora T7. Na ovaj način se mogu dobro detektovati fenomeni redne i paralelne rezonance. U slučaju redne rezonance na određenoj frekvenci, ekvivalentna impedansa ima minimalnu vrednost, pa tako u slučaju postojanja strujnih izvora viših harmonika u mreži, deo mreže sa rednom rezonancom maksimalno „upija” te struje. Sa druge strane, paralelna rezonanca na određenoj frekvenci uzrokuje maksimalnu ekvivalentnu impedansu za tu frekvencu, tako da i mala strujna harmonijska izobličenja mogu prouzrokovati povišene napone.

U okviru simulacija uzet je u obzir start jednog agregata u pumpnom režimu u RHE Bajina Bašta, dok drugi agregat tom prilikom nije radio. Dalje su, za utvrđeno distributivno opterećenje (0,323 MW i 0,075 MVar) i rad jedne pumpe u filterskom postrojenju modelovana tri stanja u zavisnosti od broja priključenih motora u TS Đurići (izvršena je simulacija kada su u pogonu jedan, dva i na kraju sva tri motora u pomenutoj TS). Rezultati proračuna prikazani su na Slici 2.



Slika 2. Impedanse mreže u izabranim tačkama, za tri analizirana stanja

Prvi set grafika sa slike predstavlja međusobnu impedansu, kao impedansu koja se vidi sa 10 kV sabirnica (sekcija 1 i 2) usled struja koje se injektiraju na mestu statičkog frekventnog pretvarača (sekundar/tercijar transformatora T7).

Drugi set grafika sa slike predstavlja sopstvenu impedansu 10 kV sabirnica u TS Metaljka (sabirnice 1 i 2).

Treći set grafika predstavlja sopstvenu impedansu na 35 kV sabirnicama RHE B. Bašta.

Četvrti set grafika je impedansa mreže koja se vidi sa stanovišta Operatora prenosnog sistema, odnosno sopstvena impedansa mreže na 220 10 kV sabirnicama.

Na kraju je, kao ilustracija, data i sopstvena impedansa mreže na 35 kV sabirnicama TS 35/10 Metaljka (peti skup grafika na slici).

Različitim stilovima linija (punom, isprekidanom i tačkastom, označeni su rezultati za jedan, dva i tri motora u pogonu, respektivno).

Na osnovu svih prikazanih grupa grafika, a naročito na osnovu prve, vidi se da u slučaju rada sa jednim motorom u TS Đurići do paralelne rezonance dolazi na 13. harmoniku, što potvrđuju i izvršena merenja. Ta se rezonanca primećuje i na ostalim grupama grafika odnosno, postoji i na 35 kV naponskom nivou. Impedansa ima veće vrednosti na 35 kV sabirnicama, odnosno rezonanca na 10 kV sabirnicama TS Metaljka je donekle prigušena ostatkom mreže ( $121,77 \Omega$  naspram  $750 \Omega$  na 35 kV strani pri 13,01). Za ovo stanje vrednost međusobne impedanse iznosi oko  $57,02 \Omega$ .

U slučaju kada se u TS Đurići priključuju dva motora, rezonantna frekvencija ostaje bliska 13. harmoniku, mada je blago pomerena u desno (13,2 harmonik). Najznačajnija vrednost impedanse ima se na 35 kV strani TS Metaljka i iznosi  $745,62 \Omega$ , naspram  $129,12 \Omega$  sopstvene impedanse na 10 kV strani. Međusobna impedansa iznosi  $58,50 \Omega$ .

U slučaju kada su u TS Đurići priključena tri motora, sa stanovišta paralelne rezonance stanje je vrlo slično kao kad se imaju priključena dva motora (paralelna rezonanca se uspostavlja na 13,201 harmoniku). Najznačajnija vrednost impedanse ima se na 35 kV strani TS Metaljka i iznosi  $752,30 \Omega$ , naspram  $131,83 \Omega$  sopstvene impedanse na 10 kV strani. Međusobna impedansa iznosi  $59,40 \Omega$ .

## 5. Zaključak

Simulacije sprovedene u programskom paketu *DigSILENT PowerFactory* na modelu koji pre svega obuhvata 35 kV mrežu RHE Bajina Bašta, 35 kV sabirnice u TS Metaljka kao i okolnu distributivnu mrežu od interesa, pokazuju da se prilikom pokretanja agregata u pumpnom režimu RHE Bajina Bašta

preko statičkog frekventnog regulatora mogu javiti problemi u radu određenih potrošača.

U cilju identifikacije problema modelovano je kritično stanje dela distributivne mreže sa različitim brojem uključenih motora u TS Đurići.

Rezultati pokazuju mogućnost pojave paralelne rezonance na 13. harmoniku i u 35 kV i 10 kV mreži. Paralelnu rezonancu prati povećanje viših harmonika napona koji mogu negativno uticati na rad potrošača u vidu otežanog rada, povećanih gubitaka, ali i kvarova pojedinih uređaja i opreme.

Važno je istaći da su rezultati propračuna dobijeni na osnovu simulacionog modela relevantnog dela mreže koji je linearan. Drugim rečima, nije modelovana ni jedna nelinearna karakteristika ni jednog elementa mreže. To je mogući razlog zbog koga se u rezultatima ne vidi npr. 11 harmonik, koji postoji u merenjima. Iako je blizu 13. harmonika, njegova pojava kao rezonantnog može biti posledica nelinearnosti elemenata mreže (npr. motora ili transformatora u zasićenju).

## Literatura

- [1] Proračunate vrednosti struja kratkog spoja za aktuelno i perspektivno stanje mreže za RP 220 kV u RHE „Bajina Bašta” i RHE „Bajina Bašta”, JP EMS, 28.09.2020
- [2] DigSILENT PowerFactory Training prepare for Harmonic Seminar, june 2016

**Abstract.** The pumps in RHPP Bajina Bašta are started via a static frequency converter (SFC). This resulted in increased level of higher harmonics within the RHPP. However, it was not known whether the operation of this SFP could endanger the consumers supplied from the mentioned RHPP via the distribution transformer. For this purpose, it is necessary to check the possibilities of the existence of a parallel resonant circuit, both in the RHPP itself, and in the part of the distribution network that was of interest. Analyzes were performed in the linear simulation model created in the *DigSILENT PowerFactory* software package. The simulation model was created so that it corresponds to the state of minimum load of the distribution area supplied by TS Metaljka. Also, several variants were analyzed in TS Đurići (depending on the number of motor engines in operation). The results show the existence of parallel resonant circuit in the vicinity of the 13th harmonic at the level of 10 kV busbars in TS Metaljka, while its existence was not identified at the transmission system busbar, which is in accordance with the measurements.



**Keywords:** static frequency converter, SFC, harmonics, resonant circuit, reversible hydroelectric power plant, pumps, Bajina Bašta, simulation model, *DigSILENT PowerFactory*

## **Analysis of the Possibility of a Parallel Resonant Circuit in RHPP Bajina Bašta**

Milica Dilparić Cakić, Branka Kovačević

Rad primljen u uredništvo: 08.12.2022. godine.

Rad prihvaćen: 23.12.2022. godine.

