

mr.sc. Alen Katić, dipl.ing.
HEP – ODS d.o.o., Elektra Karlovac
alen.katic@hep.hr

Tomislav Radočaj, dipl.ing.
HEP – ODS d.o.o., Elektra Karlovac
tomislav.radocaj@hep.hr

Dalibor Jakšić, dipl.ing.
HEP – ODS d.o.o., Elektra Karlovac
dalibor.jaksic@hep.hr

HE OZALJ U OTOČNOM RADU NA DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI

SAŽETAK

Rad opisuje ispitivanje HE OZALJ 1 i HE OZALJ 2 u otočnom radu s 10(20) kV elektroenergetskom mrežom. Razmatraju se tri odvojena slučaja pogona hidroelektrane: otočni pogon, pogon na slaboj mreži i crni start. Za sva tri slučaja pogona se razmatraju problemi koji su se pojavili prilikom ispitivanja i daju se rezultati mjerenja.

Ključne riječi: otočni pogon, crni start, pogon na slaboj mreži, hidroelektrana, distribucijska mreža

HE OZALJ WORKS IN INTENTIONAL ISLANDING OPERATION ON DISTRIBUTION NETWORK

SUMMARY

The paper describes the testing of HPP OZALJ 1 and HPP OZALJ 2 in island operation with a 10(20) kV power grid. Three separate cases of hydropower operation are considered: intentional island operation, operation on a weak network and black start. For all three drive cases, the problems that appeared during testing are considered and the measurement results are given.

Key words: intentional islanding operation, black start, operation on weak network, hydro power plant, distribution network

1. UVOD

Nakon izgradnje HE OZALJ 1 i puštanja u pogon 1908. godine, hidroelektrana je radila u otočnom radu do 1929. godine kada je spojena na elektroenergetski sustav Hrvatske. Tijekom 1952. godine izgrađena je i HE OZALJ 2 na istoj brani, ali s druge strane rijeke Kupe. Hidroelektrana je imala mogućnost otočnog rada do rekonstrukcije koja je trajala od 2017. do 2020. godine. S obzirom da se hidroelektrana i cjelokupni konzum TJ Ozalj napajaju preko radijalnog DV 35 kV TS 110/35 kV POKUPJE – TS 35/20/10 kV OZALJ i ne postoji mogućnost dvostranog napajanja u 35 kV mreži postojala je potreba HEP-ODS-a da se i dalje omogući otočni rad dijela 20 kV i 10 kV mreže iz HE OZALJ kako ne bi dolazilo do prekida u napajanju tijekom radova ili kvara na spomenutom 35 kV dalekovodu.

HE OZALJ 1 je imala tri sinkrona generatora od po 1200 kVA. Rekonstrukcijom HE OZALJ 1 koja je trajala od 2017. do 2020. godine predviđeno je da se svaki od ta tri generatora zamjeni novim od 1700 kVA. S obzirom da su generatori mijenjani jedan po jedan u vremenskom razdoblju od godinu dana, investitor HEP-Proizvodnja d.o.o. je predvidio da se za svaki od generatora izvedu elaborat utjecaja elektrane na mrežu (EUEM), elaborat podešenja zaštite (EPZ) i program ispitivanja u pokusnom radu (PPI), tako da su napravljena tri seta dokumenata za svaku zamjenu generatora.

Predviđeno je da se otočni rad tretira kao posebno ispitivanje, tako da je napravljen i četvrti set EPZ i PPI, te je ispitivanje provedeno posebno. Prva tri ispitivanja su klasična ispitivanja koja se provode za hidroelektrane i neće biti obrađena u ovom radu te će rad biti usredotočen samo na probleme i postupak ispitivanja u otočnom radu. Osim zadržavanja sposobnosti otočnog pogona hidroelektrana, postoji potreba da se uvođenjem otočnog pogona sa srednje naponskom mrežom poveća raspoloživost napajanja električnom energijom kada to drugačije nije moguće (nemogućnost ostvarivanja kriterija „n-1“ i slično).

2. ULAZNI PODACI I ELABORAT

2.1. Ulazni podaci

Na slici 1) prikazana je principijelna shema napajanja 35 kV, 20 kV i 10 kV mreže terenske jedinice Ozalj. S obzirom da ne postoji mogućnost dvostranog napajanja TS 35/20/10 kV OZALJ na 35 kV mreži pokušavane su razne kombinacije kako osigurati dvostrano napajanje u momentu ispada 35 kV dalekovoda DV 35 kV TS POKUPJE – TS OZALJ. U tu svrhu je ostvarena veza između trafopodručja TS 35/20/10 kV ILOVAC i TS 35/20/10 kV OZALJ na 20 kV, međutim ova veza ne omogućava dvostrano napajanje za kompletan konzum iz TS OZALJ. Prema proračunima Elektre Karlovac mogućnost prijenosa električne energije je do 1 MW s time da su u tom slučaju naponi u skladu s normom EN 50160. Zbog svega navedenog, tražen je način da HE OZALJ 1 i 2 i dalje zadrže mogućnost otočnog rada.

Prilikom slaganja ulaznih podataka postavljeni su slijedeći zahtjevi prema izrađivaču EPZ-a i PPI-ja:

- 1) Kada je elektrana u paralelnom pogonu i vrši se odvajanje od mreže na 35 kV s namjerom otočnog pogona
- 2) Kako se elektrana ponaša kada se odvoji na 35 kV i ostane na 20 kV vezi (odnosno rad na slabij mreži, nije otočni pogon)
- 3) Crni start elektrane

Prilikom modeliranja mreže u otoku bilo je nekoliko problema sa zaštitom u hidroelektrani i trafostanici TS 35/10 kV HE OZALJ 2. Kada se hidroelektrana odvoji od napojne mreže dolazi do smanjenja struja kratkih spojeva u otoku tako da svi parametri i podešenja zaštite nisu valjani. Odnosno, potrebno je preparametrizirati zaštitu kako bi bila valjan u otoku. Stoga su svi releji podešeni tako da imaju dva načina rada. Jedan je za normalan, paralelni pogon, dok je drugi način rada za rad u otoku. S obzirom da su struje u otoku značajno manje, ne postoji mogućnost selektivnosti zaštite stoga ukoliko dođe do kvara u otoku, glavni prekidač elektrane istu isključuje s otoka. Podešenja zaštita generatora u otočnom pogonu podešena su tako da u slučaju kratkog spoja u bilo kojem dijelu mreže koja se napaja u otoku dolazi do prorade generatorskih zaštita i odvajanja generatora od distributivne mreže. Zaštite u postrojenju 5 kV korigirane su sukladno elaboratu podešenja za otočni rad i vrijede za paralelni pogon i za otočni rad.

Zaštite generatora podešene su tako da ista podešenja vrijede u paralelnom i otočnom radu. Korigirane su prenaponska, podnaponska, nadfrekventna, podfrekventna i naponski ovisna prekostrujna zaštita.

Otočni režim rada:

- sustavi turbinske regulacije agregata A, B i C prelaze u regulaciju po frekvenciji
- tijekom rada na mreži digitalni turbinski regulator održava konstantnu brzinu vrtnje odnosno frekvenciju mreže korigiranu za ugrađenu statiku. Ukoliko je međusobno odstupanje opterećenja radnom snagom generatora znatnije operater može korigirati međusobnu raspodjelu snage
- uzbuda agregata A, B i C prelazi iz regulacije po jalovoj snazi u regulaciju po naponu
- tijekom rada na mreži sustav uzbude održava konstantan napon korigiran za ugrađenu statiku. Ukoliko je međusobno odstupanje opterećenja jalovom snagom generatora znatnije operater može korigirati međusobnu raspodjelu jalove snage

Rad na slaboj mreži:

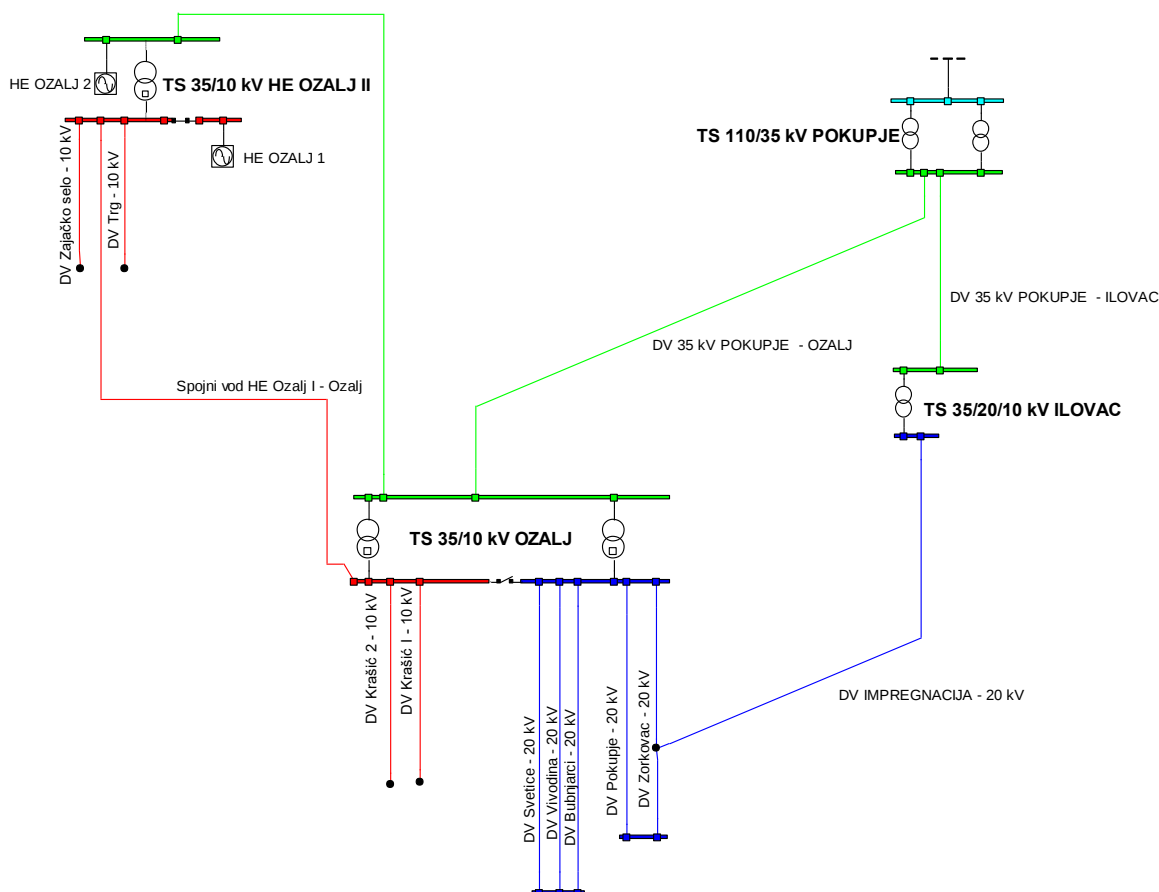
- u TS 35/20/10 kV Ozalj ARN transformatora preko kojeg se dovodi napon iz susjedne 10(20) kV mreže do HE Ozalj mora biti u ručnom režimu rada – 10(20) kV mreža jača od 35 kV i dolazi do pobjega regulatora (transformacija 20/35 kV → 35/10 kV → 10/5 kV)
- agregatima A, B i C se zadaje fiksna vrijednost radne snage – ukoliko se ostavi regulacija po frekvenciji turbinski regulatori smanje izlaznu snagu (praktički se odvoje od mreže)
- uzbuda agregata A, B i C prelazi iz regulacije po jalovoj snazi u regulaciju po naponu
- tijekom rada na mreži sustav uzbude održava konstantan napon korigiran za ugrađenu statiku. Ukoliko je međusobno odstupanje opterećenja jalovom snagom generatora znatnije operater može korigirati međusobnu raspodjelu jalove snage

U tablici u nastavku se nalaze podešenja zaštite za rad na krutu mrežu kao i podešenja za otočni pogon/pogon na slabu mrežu.

Tablica I. Pregled podešenja zaštite zavisno od režima rada

zaštita	Paralelni režim rada	Otočni režim rada / rad na "slaboj" mreži	SN polje
I> / 51	420 A / 1,2 s	420 A / 1,2 s	Polje za odvajanje =1J10 (10 kV HEP-ODS u TS 35/10 kV HE Ozalj II)
I>->/67	1080 A / 0,9 s /prema vodu	1080 A / 0,9 s /prema vodu	
I0>->/67N	15 A / 1 s / cosØ / prema vodu	15 A / 1 s / cosØ / prema vodu	
U0> / 59N	3,46 kV(20%) / 10 s	3,46 kV(20%) / 10 s	
U> / 59-1	11 kV (110%) / 30 s	blokirano	
U>> / 59-2	11,5 kV (115%) / 1 s	blokirano	
U< / 27-1	8,5 kV (85%) / 1,5 s	blokirano	
U<< / 27-2	5 kV (50%) / 1 s	blokirano	
U1< / 47O+	0,5 p.u. / 1 s / mjerodavna direktna komponenta	blokirano	
f> / 81O	51,5 Hz / 0,3 s	blokirano	
f< / 81U	47,5 Hz / 0,3 s	blokirano	
df/dt / 81R	0,5 Hz/s / 0,5 s	blokirano	
I> / 51	390 A / 0,9 s	390 A / 0,9 s	Polje glavnog prekidača Elektrane =2J1 (10 kV HEP-Proizvodnja u TS 35/10 kV HE Ozalj II)
I>->/67	1050 A / 0,6 s	1050 A / 0,6 s	
I0>->/67N	12 A / 0,8 s	12 A / 0,8 s	
U0> / 59N	3,46 kV (20%) / 5 s	3,46 kV (20%) / 5 s	
U> / 59-1	11 kV (110%) / 20 s	blokirano	
U>> / 59-2	11,5 kV (115%) / 0,2 s	blokirano	
U< / 27-1	8,9 kV (90%) / 1 s	blokirano	
U<< / 27-2	5 kV (50%) / 0,15 s	blokirano	
U1< / 47O+	0,5 p.u. / 0,15 s / mjerodavna direktna	blokirano	

	komponenta		
f> / 81O	51,5 Hz / 0,1 s	blokirano	
f< / 81U	47,5 Hz / 0,1 s	blokirano	
df/dt / 81R	0,5 Hz/s / 0,3 s	blokirano	
3dl>T / 87T	0,2 I/In / 0 s	0,2 I/In / 0 s	=J1, =J2 (10 kV postrojenje u HE Ozalj I)
I>/51-1	500 A / 2 s	500 A / 2 s	
I>>/ 51-2	2,4 kA / 0,1 s	2,4 kA / 0,1 s	
I0> / 51N	30 A / 0,05 s	30 A / 0,05 s	
U0> / 59N	10% / 2 s	10% / 2 s	
U> / 59	110% / 3 s	blokirano	
U< / 27	90% / 3 s	blokirano	
3dl>G / 87G	0,2I/In / 0 s	0,2I/In / 0 s	Podešenja generator u HE Ozalj 1 =K1 (GC), =K2 (GB), =K3 (GA) (5 kV postrojenje u HE Ozalj I)
I(U)> / 51V	2,3 kV/181 A / 3 s	2,3 kV/181 A / 3 s	
Z<G / 21G	0,2 Ω / 0,1 s	0,2 Ω / 0,1 s	
P> / 32R	-1 % / 10 s	-1 % / 10 s	
I0>->/67Ns	150 V / 1 A / 0,5 s	150 V / 1 A / 0,5 s	
U0> / 59N	150 V (5,2%) / 0,5 s	150 V (5,2%) / 0,5 s	
U> / 59-1	6 kV (120%) / 3 s	5,75 kV (115%) / 10 s	
U>> / 59-2	6,5 kV (130%) / 0,5 s	6 kV (120%) / 3 s	
U>>> / 59-3	-	6,5 kV (130%) / 0,5 s	
U< / 27-1	3,75 kV (75%) / 5 s	4,25 kV (85%) / 3,5 s	
U<< / 27-2	3,25 kV (65%) / 0,5 s	3,5 kV (65%) / 1,5 s	
U<< / 27-2	-	2,5 kV (50%) / 0,15 s	
U1< / 47O+	0,5 p.u. / 0,15 s	0,5 p.u. / 0,15 s	
X< / 40	0,66 MVar / 5 s	0,66 MVar / 5 s	
f> / 81O-1	51,5 Hz // 10 s	51,5 Hz // 10 s	
f>> / 81O-2	52 Hz // 0,2 s	52,5 Hz // 0,5 s	
f>>> / 81O-3	-	54,5 Hz // 0,15 s	
f< / 81U-1	47,5 Hz / 10 s	47,5 Hz / 10 s	
f<< / 81U-2	47 Hz / 0,2 s	46,5 Hz / 0,5 s	
f<<< / 81U-3	-	45 Hz / 0,15 s	
I2> / 46	15,6 A / 15 s	15,6 A / 15 s	
I0>R / 64R	40 kΩ / 5 kΩ // 10 s / 1 s	40 kΩ / 5 kΩ // 10 s / 1 s	



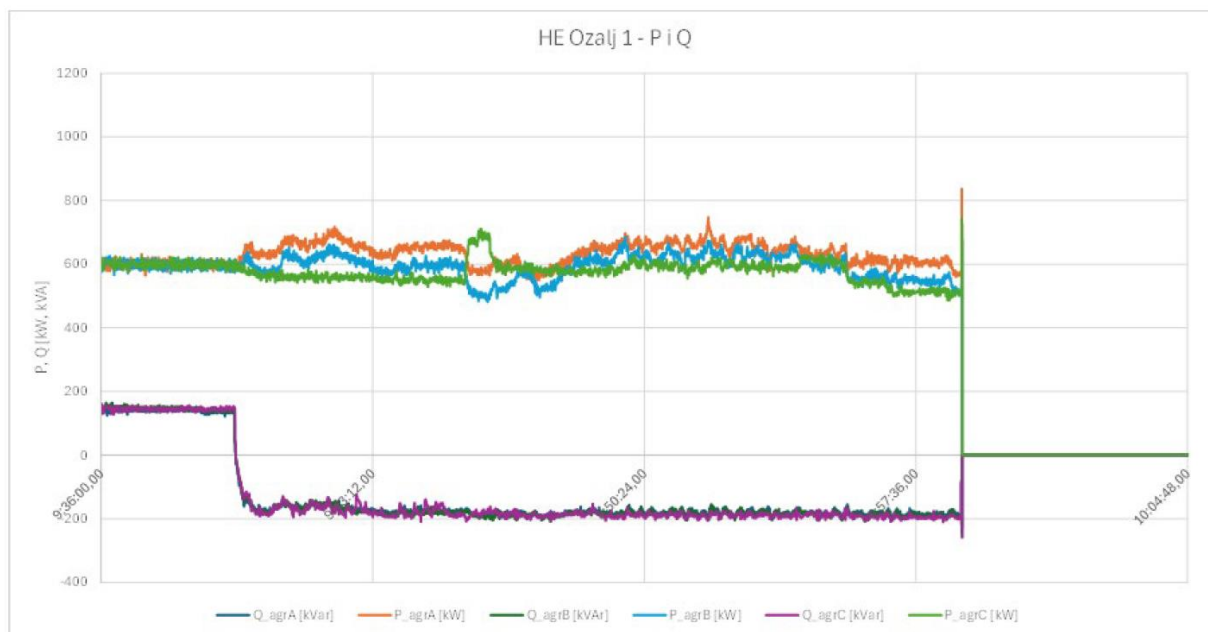
Slika 1. Principijelna shema 35 kV, 20 kV i 10 kV mreže terenske jedinice Ozalj

2.2. Normalan ulazak u otočni pogon isključenjem DV 35 kV TS POKUPJE – TS OZALJ

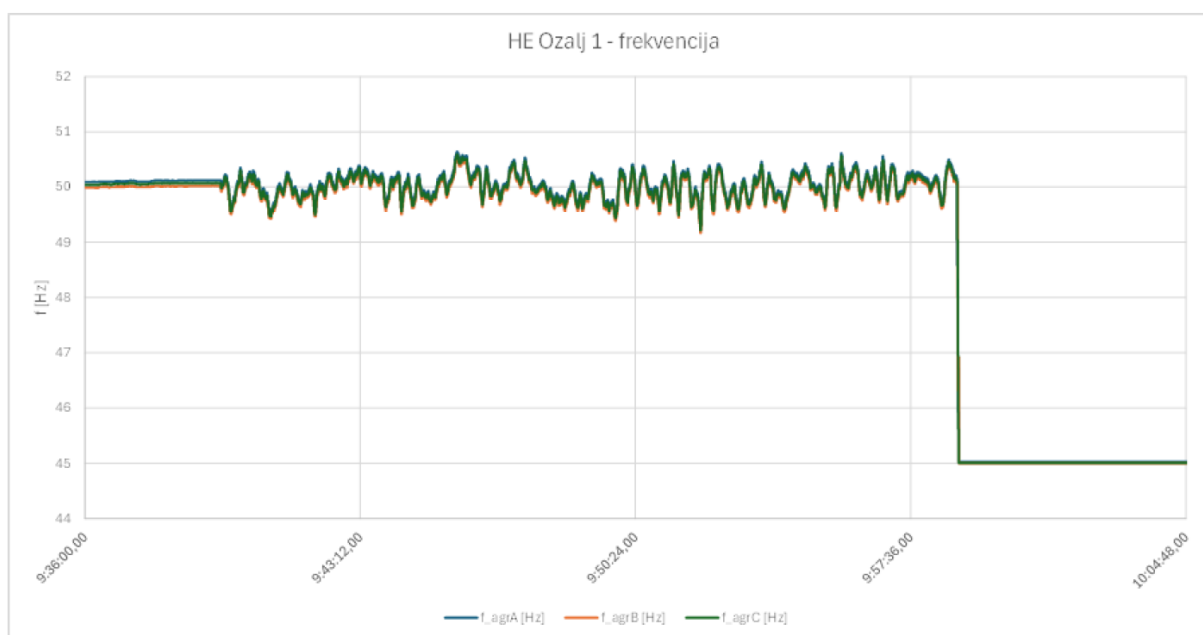
Da bi se proveo ovaj režim rada potrebno je da se prije isključenja DV 35 kV TS POKUPJE – TS OZALJ procjeni kolika je mogućnost davanja proizvodnje HE OZALJ u otoku. Kada se dobije procjena istog, dispečer Elektro Karlovac mora isključiti dio 10 kV i 20 kV mreže tako da se radna snaga na DV 35 kV TS POKUPJE – TS OZALJ svede na minimum. Nakon toga, operater HE OZALJ 1 i HE OZALJ 2 postavlja parametre zaštite elektrane za otočni rad, s čime se automatski mijenjaju i parametri zaštite u HEP-ODS-ovoj TS 35/10 kV HE OZALJ 2. Nakon što se odrade sve ove predradnje, dispečer Elektro Karlovac isklapa DV 35 kV TS POKUPJE – TS OZALJ i ostavlja HE OZALJ u otočnom radu.

Ulazak nazad u paralelni rad s mrežom je obrnut redoslijed od ulaska u otočni rad. Prije ponovne sinkronizacija na elektroenergetsku mrežu potrebno je da se HE OZALJ 1 i HE OZALJ 2 isključe s otoka. Nakon toga, operater HE OZALJ 1 i 2 prebacuje parametre zaštitu elektrane u paralelni režim rada te se automatski parametri TS 35/10 kV HE OZALJ 2 prebacuju za paralelni režim rada. Nakon toga, uklapa se opet DV 35 kV TS POKUPJE – TS OZALJ i vrši sinkronizacija HE OZALJ 1 i 2 na elektroenergetsku mrežu. Isto tako, paralelno sa sinkronizacijom vrši se uklapanje dalekovoda na elektroenergetsku mrežu.

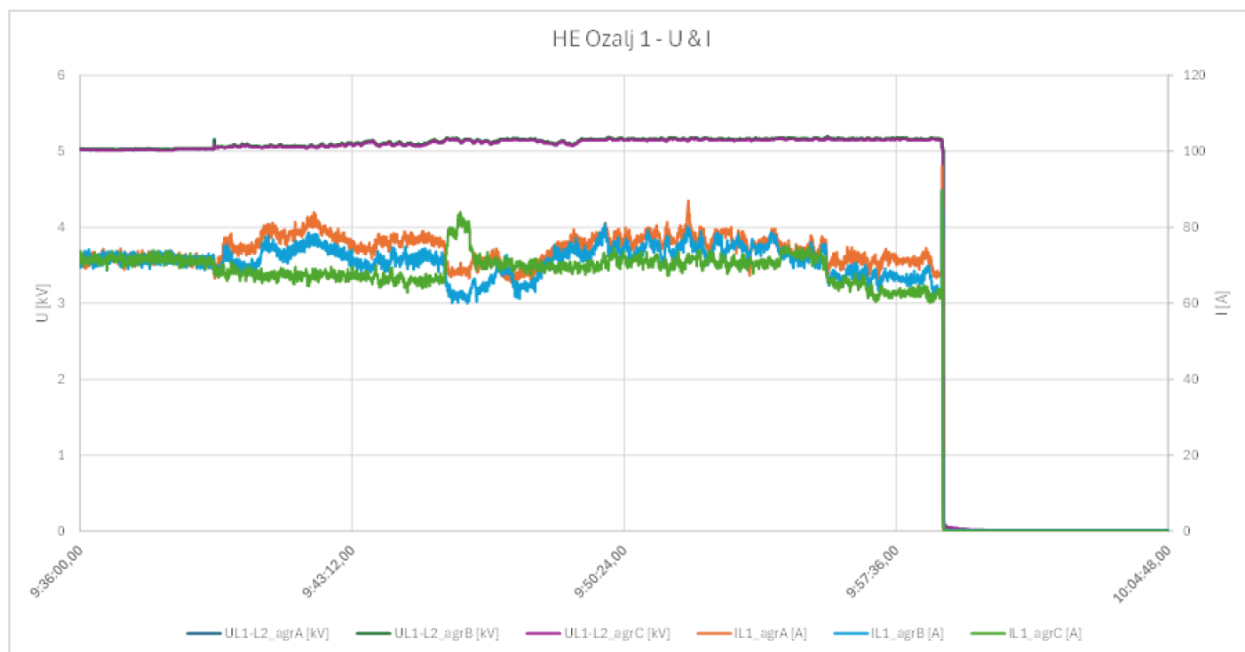
Na slikama 2., 3. i 4. prikazane su proizvodnja, frekvencija, struja i napon na agregatima A, B i C u HE OZALJ 1. Vidi se moment odvajanje otoka od mreže u smislu da se proizvodne snage, frekvencija i struja počinju više mijenjati te regulatori pokušavaju održati referente vrijednosti napona i frekvencije. Zabilježen je i moment prekida napajanja. Radi se o tome da je prilikom ispitivanja bilo pokusa opterećivanja i rasterećivanja generatora i to je elektrana uspijevala iskompenzirati. Moment kad to nije bilo više moguće je kada smo je opteretili s 200 kW vršnog opterećenja. Tada je došlo do ispada.



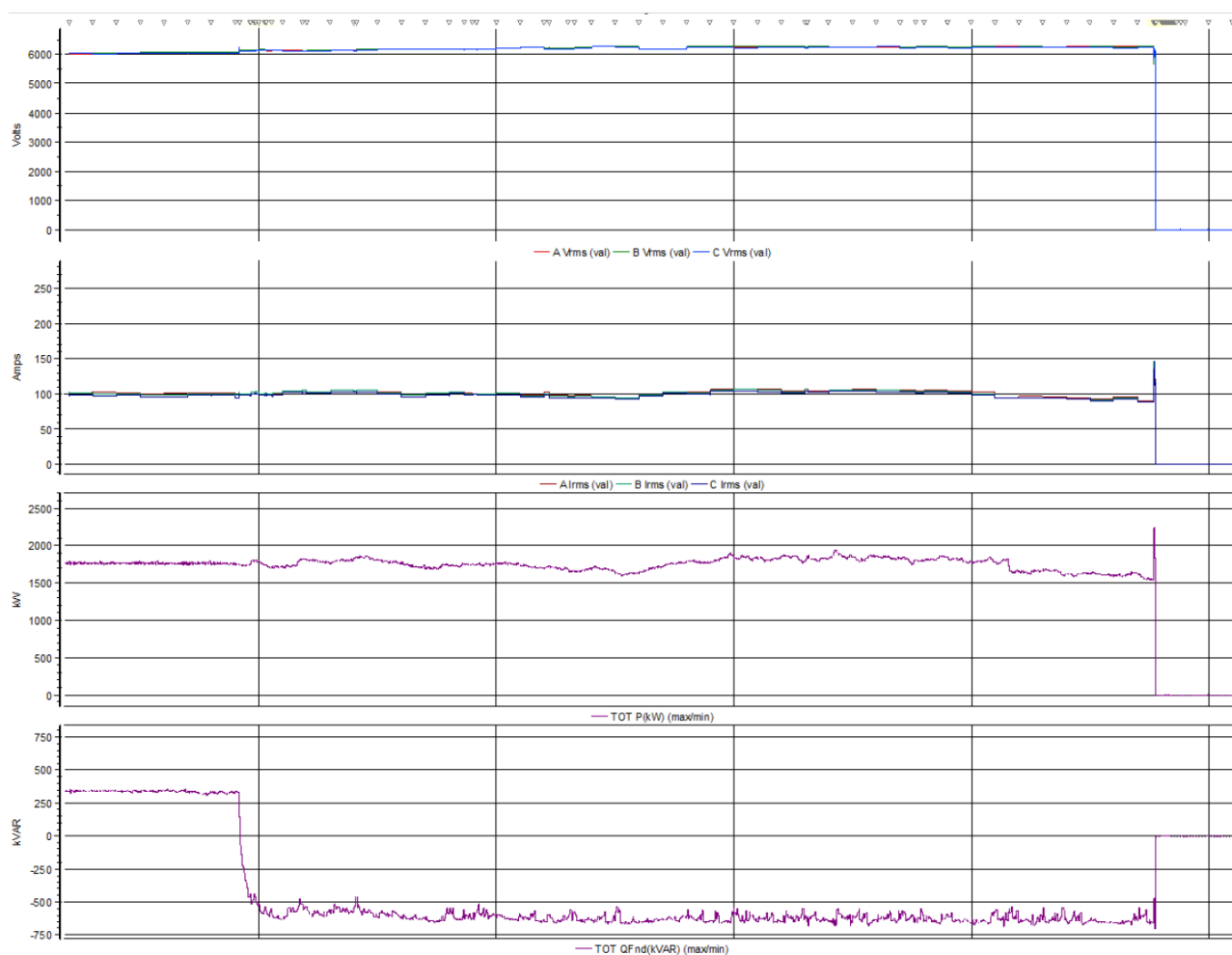
Slika 2. Proizvodnja na agregatima A, B i C u HE OZALJ 1



Slika 3. Frekvencija na agregatima A, B i C u HE OZALJ 1



Slika 4. Strujno – naponske prilike na agregatima A, B i C u HE OZALJ 1



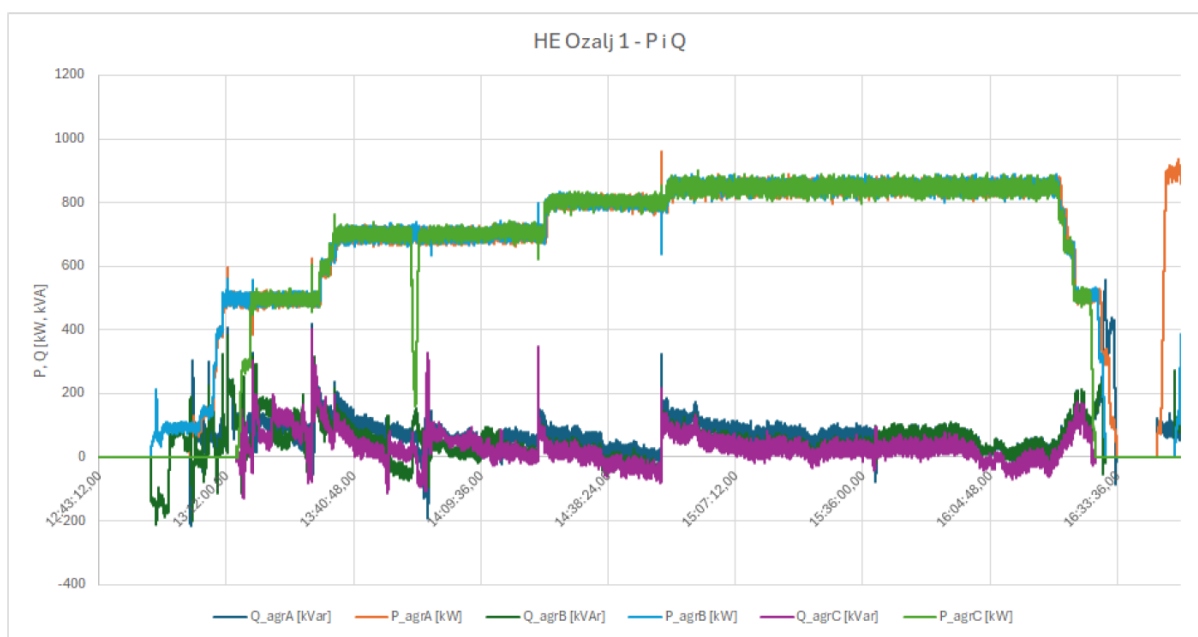
Slika 5. Proizvodnja i strujno – naponske prilike na prekidaču za odvajanje u TS HE OZALJ 2

2.3. Rad elektrane na „slaboj mreži“ odnosi preko 20 kV veze

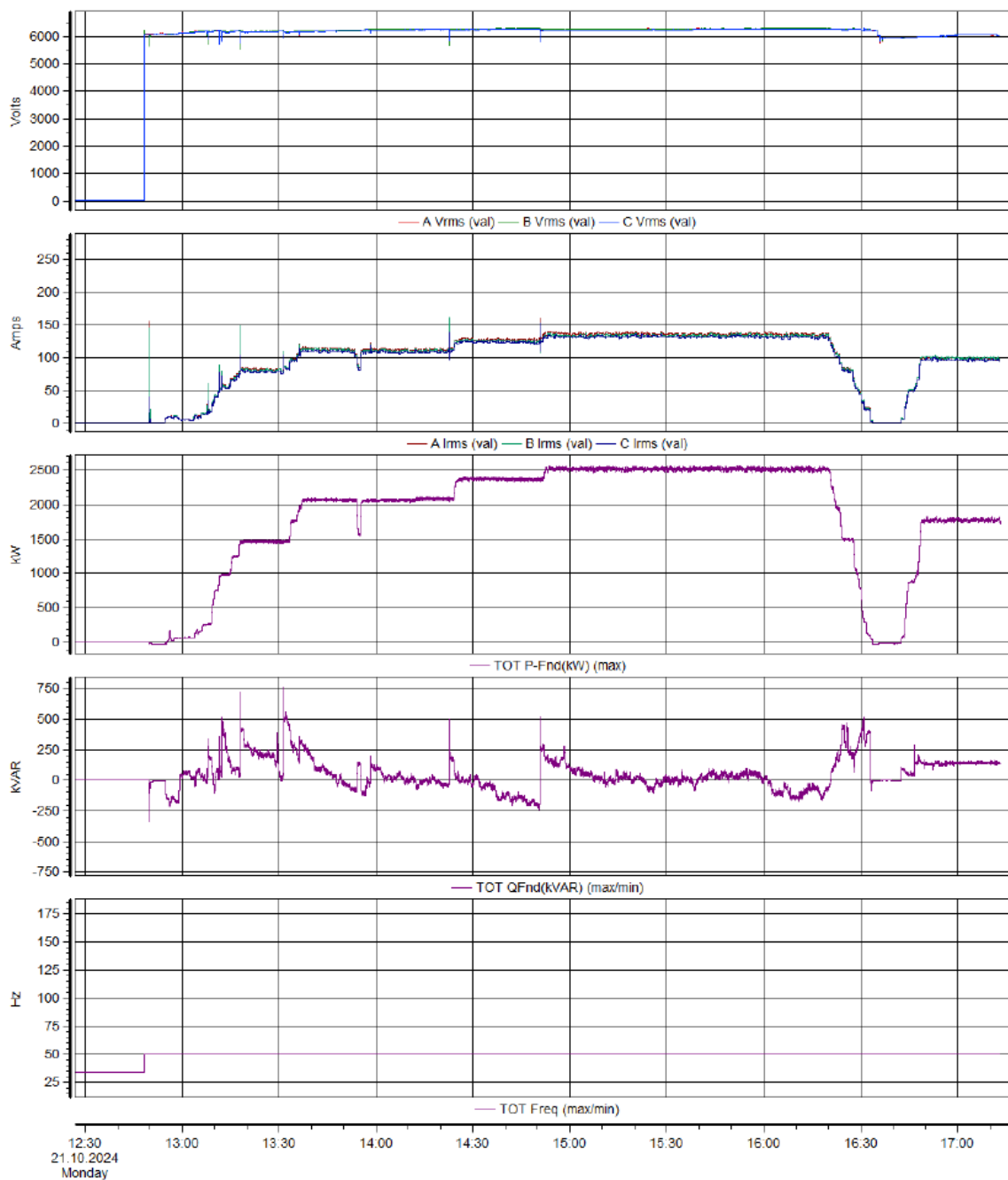
S obzirom da je cjelokupno područje terenske jedinica Ozalj radikalno napajano na 35 kV mreži, razmatrana je opcija da se cjelokupno područje TJ Ozalj napaja preko DV 20 kV IMPREGNACIJA iz TS 35/20/10 kV ILOVAC i DV 20 kV ZORKOVAC koji se napaja iz TS 35/20 /10 kV OZALJ (Slika 1.). Procjena Elektre Karlovac je da se preko ove veze može isporučiti 1 MW vršnog opterećenja, a da se napon zadrži u propisanim granicama.

Prije početka ovog režima rada potrebno je utvrditi koliko je opterećenje na DV 35 kV TS POKUPJE - TS OZALJ, te je potrebno uspostaviti stanje da je razmjena energije na dalekovodu unutar 1 MW. Dispečer Elektre Karlovac daje nalog za uklop prekidača na spojnom dalekovodu između DV 20 kV ZORKOVAC i DV 20 kV IMPREGNACIJA tako da radi u paraleli s DV 35 kV TS POKUPJE - TS OZALJ. Smjer faza i okretno polje zajedno sa satnim brojem su već prije usklađeni. Nakon davanja naloga za uklop u vodno polje DV 20 kV ZORKOVAC, operater HE OZALJ i dispečer Elektre Karlovac postavljaju zaštitu HE OZALJ 1 i 2 i TS 35/10 kV HE OZALJ 2 u režim rada na slaboj mreži. Nakon toga, dispečer Elektre Karlovac isklapa DV 35 kV TS POKUPJE - TS OZALJ.

Kao i u slučaju otočnog rada, ponovni povratak u paralelni režim je obrnuti postupak od ulaska u režim na slaboj mreži. Jedina razlika prema otočnom pogonu je u tome što nema prekida napajanja korisnika mreže na slaboj mreži. Nakon uklapanja dalekovoda DV 35 kV TS POKUPJE - TS OZALJ, operater HE OZALJ i dispečer Elektre Karlovac postavljaju zaštitu HE OZALJ 1 i 2 i TS 35/10 kV HE OZALJ 2 u paralelni režim rada i na kraju dispečer Elektre Karlovac vrši isklapanje DV 20 kV ZORKOVAC.



Slika 6. Proizvodnja na agregatima A, B i C u HE OZALJ 1



Slika 7. Proizvodnja, frekvencija i strujno – naponske prilike na prekidaču za odvajanje u TS HE OZALJ 2

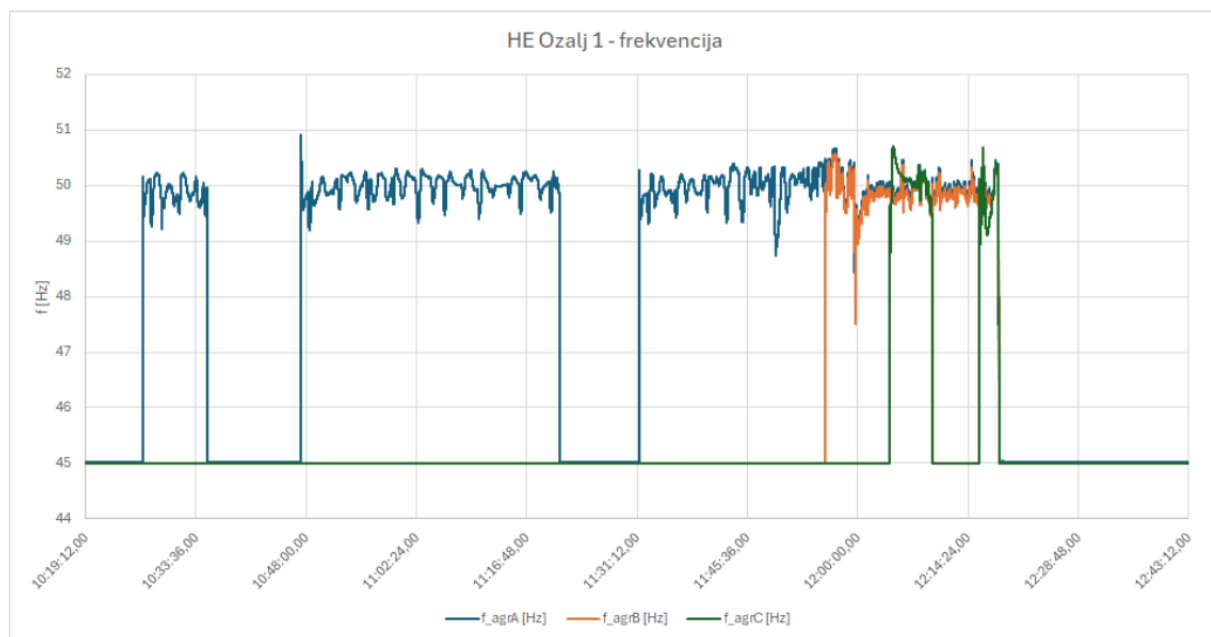
Prilikom ovog pokusa, ispitivač je krenuo tako da se cjelokupna elektrana zagasi, te je u HE OZALJ 1 doveden napon preko DV 20 kV ZORKOVAC do elektrane. Nakon toga je počela sinkronizacija agregata A, B i C na mrežu dok je sa sinkronizacijom počelo uklapanje i dalekovoda iz TS 35/10 kV OZALJ tako da opterećenje na DV 20 kV ZORKOVAC ne prijeđe referentnih 1 MW. U isto vrijeme su rađeni radovi na DV 35 kV TS POKUPJE - TS OZALJ te je sve trajalo cca. 4 h. Nakon što su radovi izvedeni, hidroelektrana je zaustavljena i uspostavljen normalni paralelni rad.

2.4. Crni start elektrane

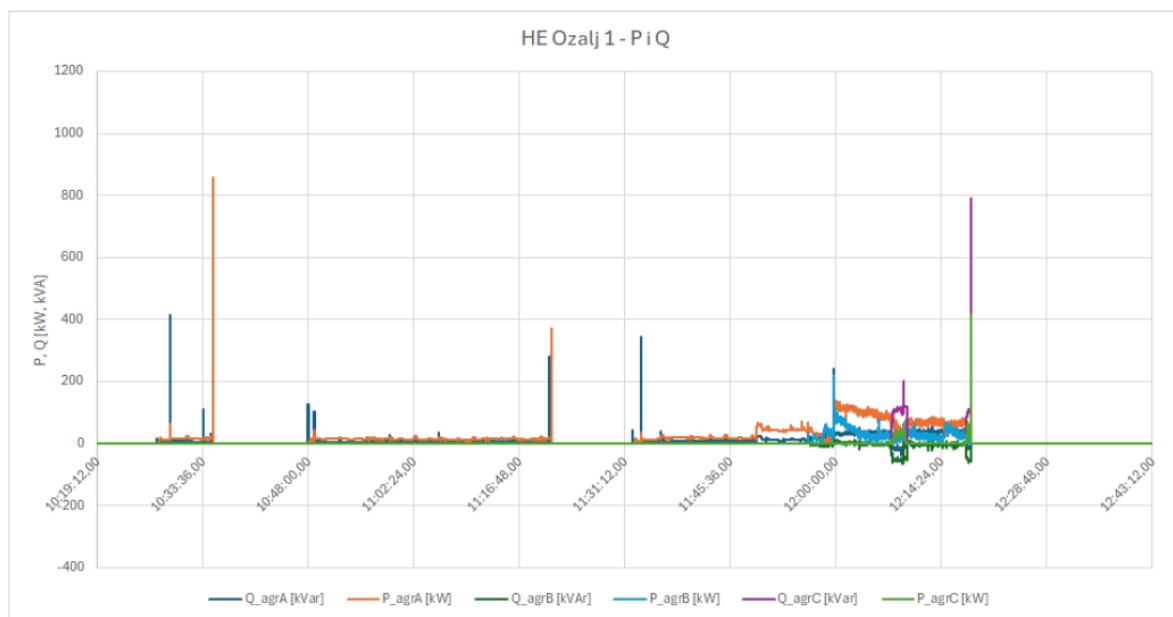
Kao preduvjet da bi se proveo ovaj pokus potrebno je procijeniti mogućnost proizvodnje u HE OZALJ koju mora dati operater hidroelektrane te na temelju tog podatka dispečer Elektre Karlovac

procjenjuje s kojim izlazima je moguće raditi u pogonu, odnosno krenuti u crni start. Određeno je da generator A u HE OZALJ 1 bude onaj s kojim bi se krenulo na mrtve sabirnice, te bi se na njega sinkronizirali i drugi (po potrebi).

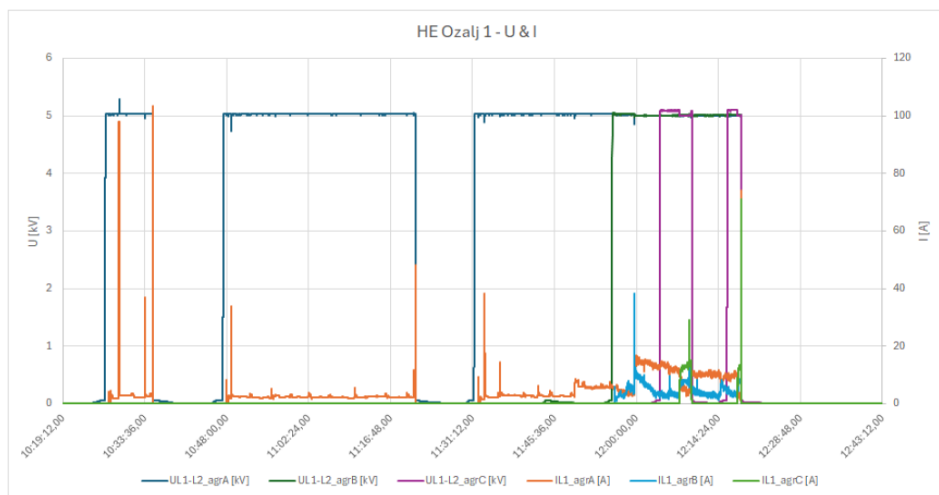
Na početku crnog starta, svi prekidači u HE OZALJ su otvoreni, te nije prisutan napon u elektrani. Sekundarna oprema elektrane, kao i druga trošila se napajaju s diesel agregata elektrane. Zaštita elektrane je podešena za otočni rad. Operater elektrane daje nalog za sinkronizaciju na mrtve sabirnice i isti se uklapa na sabirnice kada napon i frekvencija budu u zadovoljavajućim granicama. Kompletna proizvodnja generatora A u ovom momentu služi za napajanje vlastite potrošnje elektrane te dolazi do gašenja diesel agregata. Nakon toga se redom uklapaju prekidači u TS 35/10 kV HE OZALJ 2 čime se postupno počinju napajati i drugi korisnici mreže u već prije definiranom otoku.



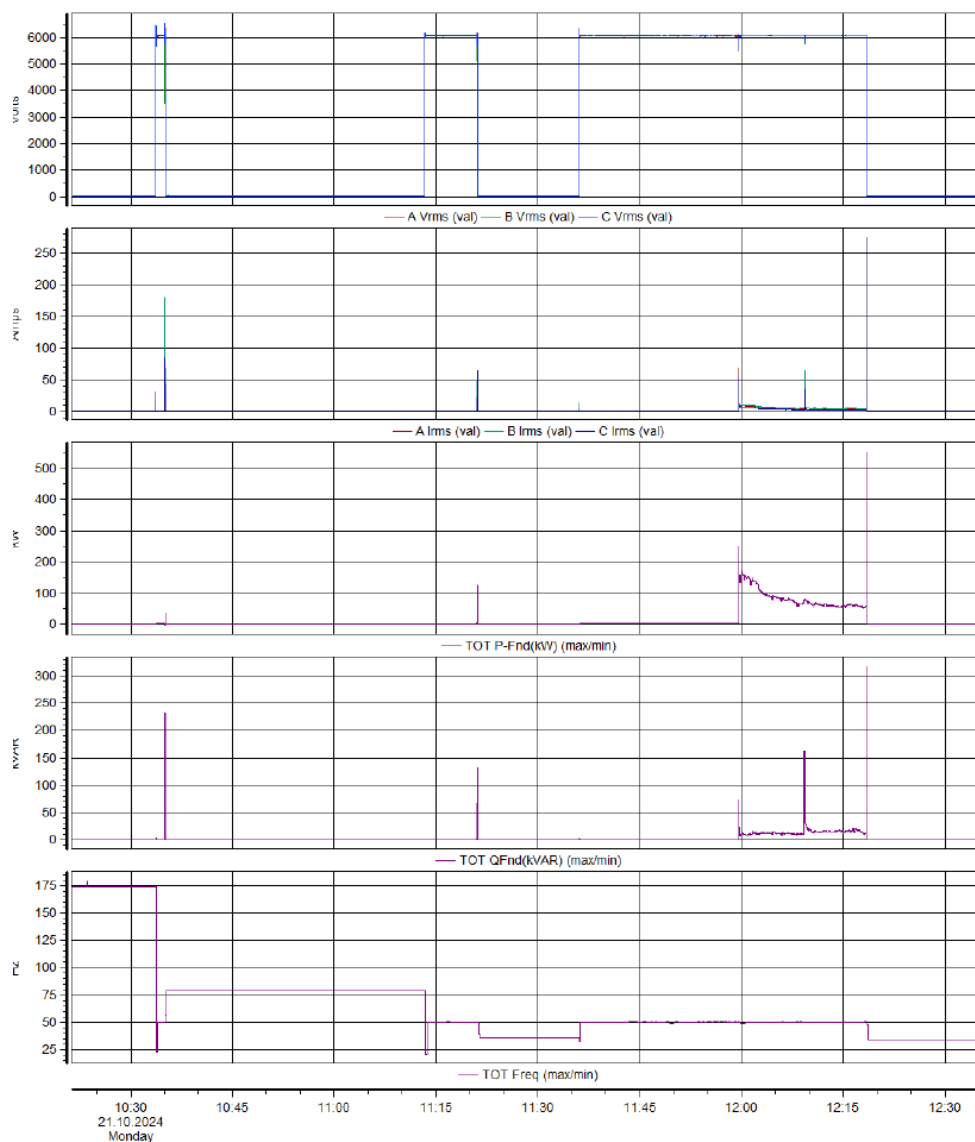
Slika 8. Proizvodnja i frekvencija na agregatima A, B i C u HE OZALJ 1



Slika 9. Proizvodnja i frekvencija na agregatima A, B i C u HE OZALJ 1



Slika 10. Strujno – naponske prilike na agregatima A, B i C u HE OZALJ 1



Slika 11. Proizvodnja, frekvencija i strujno – naponske prilike na prekidaču za odvajanje u TS HE OZALJ 2

Na slikama 9., 10., 11. i 12. vide se mjerenja frekvencije, struje, napona i opterećenja na agregatima A, B i C u HE OZALJ 1 odnosno na glavnom prekidaču elektrane. Moramo napomenuti da ovaj pokus nije uspio te da je frekventna zaštita $f > f_{\text{gr}}$ izbacivala cijelo vrijeme. Radi se o tome da je crni start pokrenut s agregatom A, ali prilikom terećenja hidroelektrane agregat nije mogao dovoljno brzo odgovoriti na opterećenje te je dolazilo do prevelike promjene frekvencije u datom momentu. Stoga je frekventna zaštita izbacivala agregat.

3. ZAKLJUČAK

Otočni pogon elektrane je režim rada koji je dobro koristiti u slučajevima kada nije moguće postići dvostrano napajanje u mreži. Ovaj slučaj je jedan od njih. Smisao ovog ispitivanja i izrade svih potrebitih elaborata je da se pokuša uvesti i ovaj način pogona u distributivnim razdjelnim mrežama.

Radi poboljšanja raspoloživosti mreže korisnika mreže gdje to nije moguće izvesti dvostrani napajanjem potrebno je provoditi ovakav način pogona.

5. LITERATURA

- [1] mr.sc. Tihomir Kovačić, dipl.ing.el., dr.sc. Ivan Goran Kuliš, dipl.ing.el., "Plan i program ispitivanja otočnog pogona elektrane s dijelom distribucijske mreže", KONČAR Inženjering, lipanj 2024.