

Zoran Zbunjak
Hrvatski operator sustava – HOPS
zoran.zbunjak@hops.hr

Hrvoje Pandžić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
hrvoje.pandzic@fer.hr

Hrvoje Bašić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
hrvoje.basic@fer.hr

Igor Kuzle
Fakultet elektrotehnike i računarstva
igor.kuzle@fer.hr

INTEGRACIJA SUSTAVA BATERIJSKOG SPREMNIKA ENERGIJE U ELEKTROENERGETSKI SUSTAV ZA OSIGURANJE N-1 KRITERIJA SIGURNOSTI

SAŽETAK

Integracijom velikog broja obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sustav u Hrvatskoj od 2008. godine do danas, s tendencijom daljnjeg porasta, osiguranje sigurnosti sustava postaje sve zahtjevnije. Integracijom obnovljivih izvora energije u područjima s niskom potrošnjom dolazi do dodatnog povećanja potreba za prijenosom snage prijenosnim vodovima, a time i povećane vjerojatnosti zagušenja vodova, čime se otežava osiguravanje n-1 kriterija sigurnosti.

Cilj ovog istraživanja je prikazati i analizirati ideju ublažavanja lokalnih utjecaja integracije obnovljivih izvora energije u područjima s niskom potrošnjom ugradnjom sustava baterijskih spremnika energije, i time osigurati n-1 kriterije sigurnosti bez dodatnih zahtjeva na izgradnju novih prijenosnih vodova u mreži.

Ključne riječi: Baterijski spremnik energije, N-1 kriterij sigurnosti, autotransformator s kosom regulacijom

INTEGRATION OF BATTERY ENERGY STORAGE IN ELECTRIC POWER SYSTEM TO INSURE N-1 CRITERION OF SAFETY

SUMMARY

Insurance of safety of Croatian electric power system is becoming more challenging since the portion of non-dispatchable renewable generators in the system is increasing, since 2008., with the tendency of further growth. Integration of renewable generators in areas with low consumption causes an increase in power flow and in probability of congestion of power lines. Thus, it is more difficult to insure N-1 criterion of stability.

The main objective of this work is to show and analyze the idea of mitigation the effects of integration renewable generators in areas with low consumption with integration of battery energy storage, and insuring the N-1 criterion of stability without additional demands for building new transmission lines in network.

Key words: Battery energy storage, N-1 criterion of safety, phase-shifting autotransformer

1. UVOD

Integracija velikog broja obnovljivih izvora energije globalno povećava zahtjeve za osiguravanjem više rezervi za regulaciju frekvencije i napona u elektroenergetskom sustavu. Lokalno je zahtjevnije osigurati n-1 kriterij sigurnosti, posebice u područjima sa slabom potrošnjom i visokim udjelom proizvodnje iz obnovljivih izvora energije zbog povećanog toka snage kroz prijenosne vodiče.

Problem povećanog toka snage i zagušenja u prijenosu moguće je riješiti konvencionalnim metodama, kao što je izgradnja novih ili revitalizacija i povećanje prijenosne moći postojećih vodova. Iako takvo rješenje može dugoročno riješiti problem zagušenja, ograničenja prijenosne mreže, u smislu pod opterećenja vodova, ga mogu činiti neefikasnim ili tehnički neizvedivim. U područjima sa slabom ili povremenom potrebom za velikim tokom snage, dodatni prijenosni vodovi bi uzrokovali dodatne gubitke jer pod opterećenjem vodovi induciraju reaktivnu snagu u mrežu što uzrokuje povećanje napona u mreži. Također, gradnja novih vodova može biti komplicirana zbog geografskih ograničenja, te imovinsko pravnih odnosa. Zbog svega navedenog, predstavljene su različite metode za rješavanje problema zagušenja u prijenosnim vodovima: integracija autotransformatora s kosom regulacijom za usmjeravanje toka snage, te metoda razdvajanja sabirnica i integracija baterijskog spremnika energije za osiguravanje N-1 kriterija sigurnosti.

Energetski transformatori su u elektroenergetskom sustavu prvenstveno koriste za prijenos električne snage između dvije naponske razine. Imaju značajnu ulogu u regulaciji elektroenergetskog sustava zbog sposobnosti regulacije iznosa napona i faznog kuta napona primarne ili sekundarne strane transformatora. Osnovna podjela energetskih transformatora u odnosu na primjenu je na transformatore s uzdužnom, poprečnom, te kosom regulacijom. Transformatori s uzdužnom regulacijom se koriste za upravljanje tokovima jalove snage u sustavu, upravljanjem iznosom induciranih napona transformatora. Transformatori s poprečnom regulacijom koriste se za upravljanje tokovima radne snage, regulacijom kutova napona transformatora. Transformatori s kosom regulacijom se koriste za upravljanje tokovima i radne i jalove snage jer imaju mogućnost regulacije i iznosa i kuta napona transformatora.

Metoda razdvajanja sabirnica je alat koji se može koristiti za rješavanje različitih problema u prijenosnom sustavu. Može se koristiti kao alat za rješavanje zagušenja u prijenosnim vodovima, regulaciju napona u mreži, te za optimalnu preraspodjelu proizvodnje, a kako je objašnjeno o [1]. Također, može se koristiti za izmjenu topologije prijenosne mreže nakon ispada prijenosnih vodova u mreži, za povećanje učinkovitosti prijenosnog sustava, za smanjenje troškova proizvodnje, te za osiguravanje N-1 kriterija sigurnosti.

Kako su tehnologije baterijskih spremnika energije napredovale i postale ekonomski prihvatljive, nameće se ideja o integraciji baterijskih spremnika energije za pružanje usluga povećanja sigurnosti sustava.

U radu se detaljnije promatra postrojenje HE Senj u prijenosnom području Rijeka, koja se smatra jednim od važnijih čvorišta u hrvatskom elektroenergetskom sustavu zbog povezivanja sjeverozapadnog i jugoistočnog područja putem 110 kV i 220 kV prijenosnih vodova, te zbog hidro generatora spojenih na mrežu koji sudjeluju u pružanju usluga sekundarne i tercijarne regulacije u sustavu. Specifična geografska lokacija promatranog područja uzrokuje visoke zahtjeve na prijenos snage prvenstveno s područja jugoistoka prema sjeverozapadu, koji su dodatno pojačani ugradnjom vjetroelektrane Vrataruša ukupno instalirane snage 42 MW. Godine 2016. u postrojenju HE Senj ugrađen je novi autotransformator 220/110 kV s kosom regulacijom čiji su ciljevi održavanje naponskih prilika i smanjenje zagušenja 110 kV vodova u smislu preusmjeravanja energije u 220 kV mrežu. Prema rezultatima analiza postojećeg stanja smanjeno je opterećenje 110 kV vodova, te se ugradnja autotransformatora pokazala kao dobro rješenje [2], ali i dalje ostaje pitanje n-1 kriterija sigurnosti u slučaju kvara ugrađenog autotransformatora. Kako bi se izbjegla potreba za dodatnim ulaganjima u izgradnju novih prijenosnih vodova u mreži, te kako bi se osigurao N-1 kriterij sigurnosti u ovom radu razmatraju se pozitivne i negativne strane ugradnje sustava baterijskog spremnika energije u blizini vjetroelektrane Vrataruša ili postrojenja HE Senj.

Elektroenergetski sustav modeliran je i simuliran u programskom alatu za analiziranje i planiranje prijenosnih elektroenergetskih sustava PSS/E (eng. „Power Transmission System Planning Software”) [3]. Provedene su detaljne analize sustava prema postojećem stanju, te predložene lokacija i veličina sustava baterijskog spremnika.

2. MODELIRANJE SUSTAVA

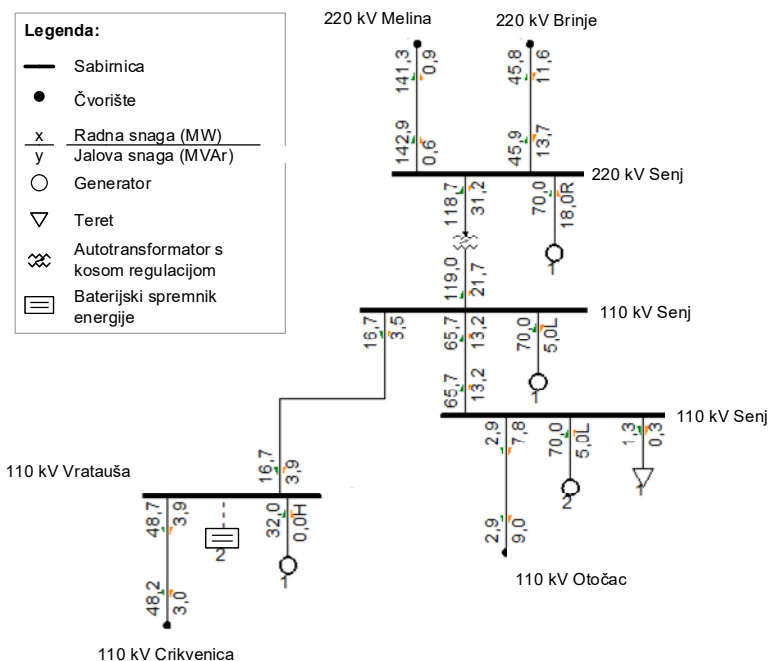
Cilj ovog rada je prikazati smanjenje lokalnog zagušenja uzrokovanog integracijom neupravljivih obnovljivih izvora energije u područje, te osiguranje N-1 kriterija sigurnosti.

Modelom je prikazan stvarni dio hrvatskog elektroenergetskog sustava s postojećim problemom osiguranja N-1 kriterija sigurnosti nakon integracije vjetroelektrane u području. Model modeliran i simuliran u programskom alatu PSS@E je verificiran usporedbom rezultata simulacija mjerenog u stvarnom sustavu.

Mjerenja u stvarnom sustavu su temeljena na tehnologiji sinkroniziranih mjerenja fazora, te spremljena u platformi WAMSTER [4], kao sto je prikazano na Slici 1.



Slika 1. Tokovi snaga u stvarnim prijenosnim vodovima snimljeni u platformi WAMSTER



Slika 2. Verifikacija modela simuliranog u PSS®E modeliranog prema stvarnim vrijednostima tokova snaga

Rezultati simulacije prikazane na Slici 2 te rezultati stvarnih mjerenja prikazani su i uspoređeni u Tablici I. Rezultati usporedbe pokazuju zadovoljavajuće rezultate pri većim snagama, dok se pri malim tokovima snaga javlja velika relativna pogreška simuliranih mjerenja. Kako su u ovom radu promatrani veći

tokovi snaga zbog promatranja zagušenja vodova, zaključujemo da je model razvijen u programu PSS@E pogodan za provođenje daljnjih analiza.

Tablica I. Usporedba simuliranih i mjerenih vrijednosti

| Prijenosni vod | Tokovi radne snage simulirani u PSS@E modelu | | Tokovi radne snage dobiveni mjerenjima, prikazani u platformi WAMSTER | | Relativna pogreška (%) | Apsolutna pogreška (%) |
|---------------------------|--|-------|---|-------|------------------------|------------------------|
| | P (MW) | P (%) | P (MW) | P (%) | | |
| 220 kV Senj - Melina | 141,3 | 45,6 | 128,7 | 41,5 | -9,79 | 4,1 |
| 220 kV Senj - Brinje | 45,8 | 15,8 | 58,7 | 20,2 | 21,98 | 4,4 |
| 220 kV Senj - 110 kV Senj | 118,7 | 65,9 | 118,4 | 65,7 | -0,25 | 0,2 |
| 110 kV Senj - Vrataruša | 16,7 | 13,6 | 16,2 | 13,2 | -3,09 | 0,4 |
| 110 kV Senj - Otočac | 2,9 | 3,3 | 0,9 | 1,0 | -222,22 | 2,2 |

3. SIMULACIJA SCENARIJA PRIMJENE RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA ZA OSIGURANJE N-1 KRITERIJA

Osnovni scenarij predstavlja najveći tok radne snage u promatranom području, snimljen u stvarnom svijetu, uzrokovan velikom proizvodnjom hidroelektrana i vjetroelektrana. U Tablici II prikazana je primjena različitih metoda za smanjenje povećanog toka radne snage u 4 scenarija.

Povećanje prijenosne moći ugroženog prijenosnog voda bi riješilo probleme zagušenja i N-1 kriterija, ali moglo bi uzrokovati dodatne gubitke tijekom rada pod opterećenih vodova što rezultira povećanjem jalove snage u sustavu i povećanje iznosa napona. Stoga povećanje prijenosne moći voda nije simulirano i analizirano.

Tablica II. Scenariji s različitim metodama za povećanje stabilnosti sustava uslijed povećanog toka radne snage

| Scenarij | Opis scenarija |
|------------------|--|
| Osnovni scenarij | Najveći tok radne snage u promatranom području snimljen u stvarnom svijetu |
| Scenarij 1 | Integracija autotransformatora s kosom regulacijom za smanjenje toka radne snage |
| Scenarij 2 | Primjer ugrožavanja N-1 kriterija sigurnosti – ispad autotransformatora |
| Scenarij 3 | Metoda razdvajanja sabirnica za osiguranje N-1 kriterija nakon ispada autotransformatora |
| Scenarij 4 | Integracija baterijskog spremnika energije za osiguranje N-1 kriterija nakon ispada autotransformatora |
| Scenarij 5 | Kombinacija integracije baterijskog spremnika energije i metode razdvajanja sabirnica |

3.1. Osnovni scenarij

U osnovnom slučaju, autotransformator radi u načinu rada s uzdužnom regulacijom, baterijski spremnik energije nije ugrađen, te prijenosna moć prijenosnog voda nije povećana. Ne koristi se niti metoda razdvajanja sabirnica, stoga je omogućen dodatni tok snage iz drugih područja. Tok radne snage prikazan je na Slici 3. Prikazano je da je prijenosni vod 110 kV Vrataruša – 110 kV Crikvenica opterećen sa 108,1 MW (89,2 %).

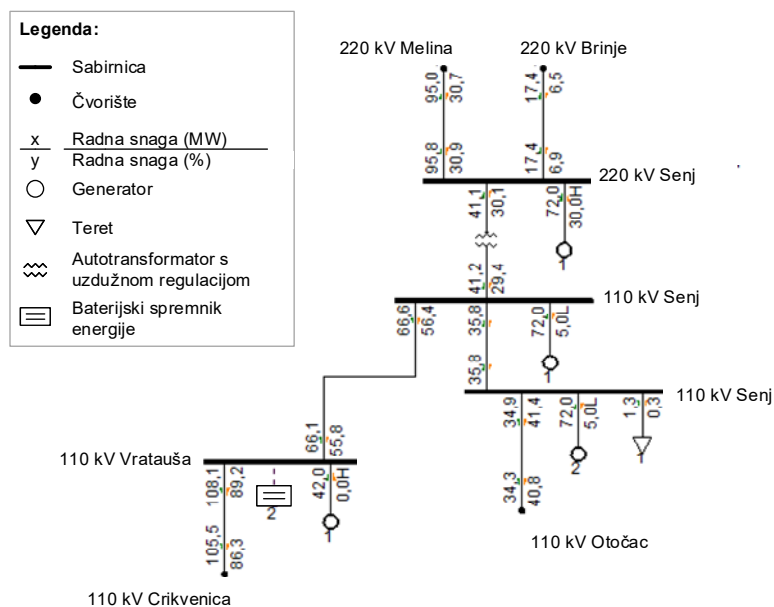
3.2. Scenarij 1

Integracija autotransformatora s kosom regulacijom predstavlja dobro rješenje za dugoročno smanjenje toka radne snage, preusmjeravanjem toka iz 110 kV mreže u 220 kV mrežu. Na Slici 4 prikazano je da je velik dio toka radne snage preusmjeren iz opterećene 110 kV mreže u manje opterećenu 220 kV mrežu, i da je time znatno smanjena mogućnost zagušenja vodova. Tok aktivne radne snage se na prijenosnom vodu 110 kV Vrataruša – 110 kV Crikvenica u ovom slučaju smanjio na 54,8 MW (48,8 %).

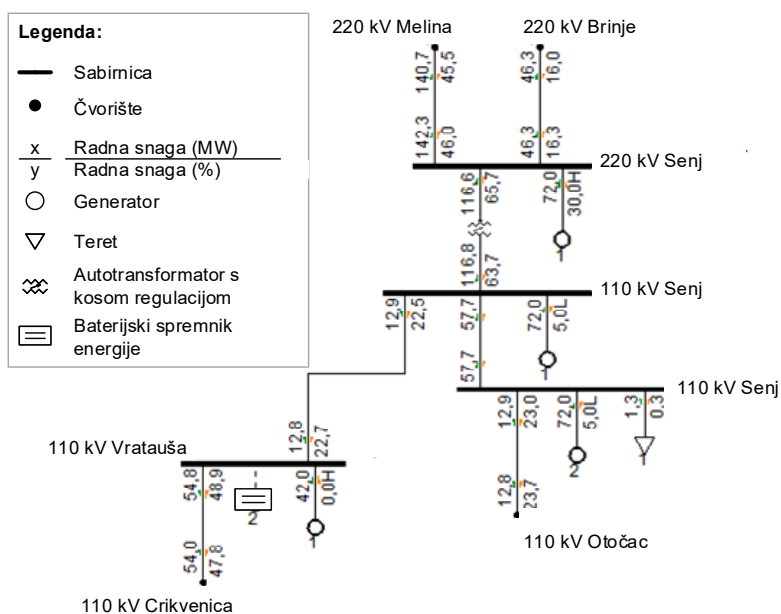
Bitno je napomenuti da je i dalje postoji potencijalan problem osiguranja N-1 kriterija u slučaju ispada autotransformatora, ili u slučaju znatnog povećanja tokova snaga u 220 kV mreži.

3.3. Scenarij 2

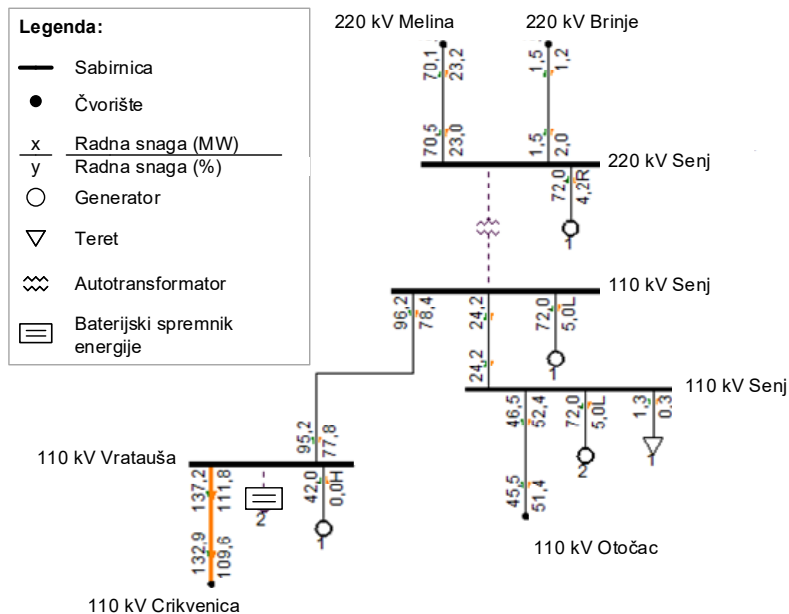
Na Slici 5. prikazano je ugrožavanje N-1 kriterija sigurnosti uzrokovano ispadom autotransformatora. Prijenosni vod 110 kV Vratauša – 110 kV Crikvenica je preopterećen nakon ispada autotransformatora, kada tok radne snage iznosi 137,2 MW (111,8 %).



Slika 3. Tokovi radne snage u promatranoj mreži u osnovnom scenariju



Slika 4. Tokovi radne snage u promatranoj mreži u scenariju 1



Slika 5. Tokovi radne snage u promatranoj mreži u scenariju 2

Postoji nekoliko načina za osiguravanje N-1 kriterija sigurnosti u promatranom području. Primjena metode razdvajanja sabirnica, te integracija baterijskog spremnika energije analizirani su u nastavku.

3.4. Scenarij 3

Primjena metode razdvajanja sabirnica nakon ispada autotransformatora prikazana je na Slici 6. Nakon isključenja prikazanog prijenosnog voda, tok radne snage promijenjen je u skladu s Kirchhoff-ovim zakonom, te je opterećenje voda 110 kV Vrataruša – 110 kV Crikvenica smanjeno na 113,4 MW (92,4 %). Rezultati u ovom slučaju su zadovoljavajući. Bitno je napomenuti da je primjena ove metode ograničena karakteristikama i ograničenjima različitih dijelova prijenosnog sustava, te da se ne može smatrati globalno primjenjivom za trajno osiguravanje N-1 kriterija sigurnosti u različitim dijelovima mreže.

3.5. Scenarij 4

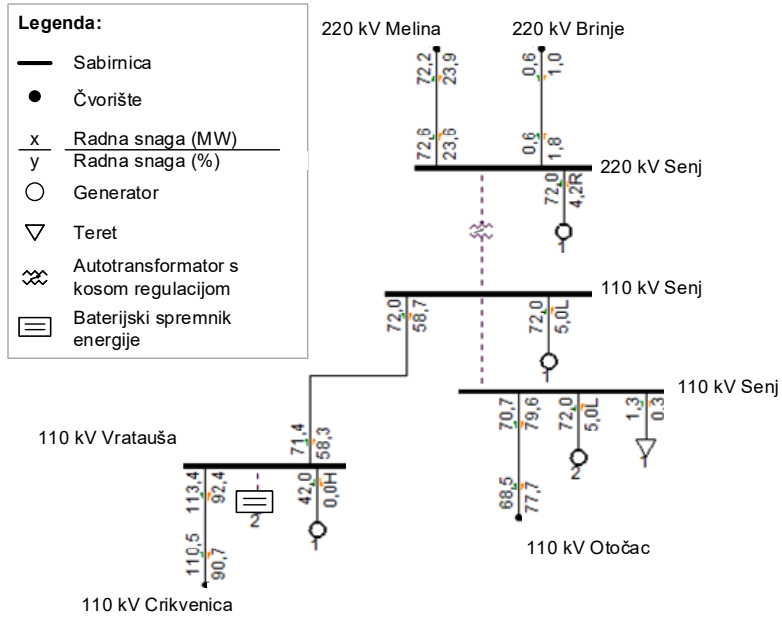
Integracija 20 MW baterijskog spremnika energije na jednom kraju voda 110 kV Vrataruša – 110 kV Crikvenica za osiguranje N-1 kriterija nakon ispada autotransformatora prikazana je na Slici 7.

Baterijski spremnik energije se u ovom slučaju ponaša kao potrošač koji sprema ograničenu količinu energije. Stoga je potrebno dimenzionirati kapacitet baterijskog spremnika energije prema povijesnim podacima i prema dugoročnim predviđanjima proizvodnje i potrošnje na tom dijelu mreže.

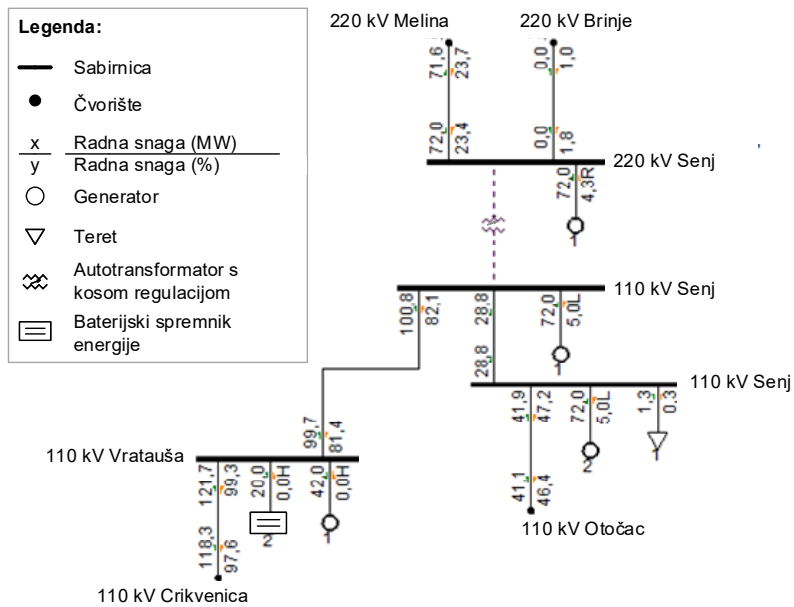
Na Slici 7. prikazano je da integrirani baterijski spremnik energije snage 20 MW smanjuje opterećenje prijenosnog voda 110 kV Vrataruša – 110 kV Crikvenica na 121,7 MW (99,3 %). Izvedenom analizom utvrđena je najmanja potrebna snaga baterijskog spremnika kako bi se otklonilo proopterećenje voda 110 kV Vrataruša – Crikvenica i osigurao N-1 kriterij sigurnosti.

3.6. Scenarij 5

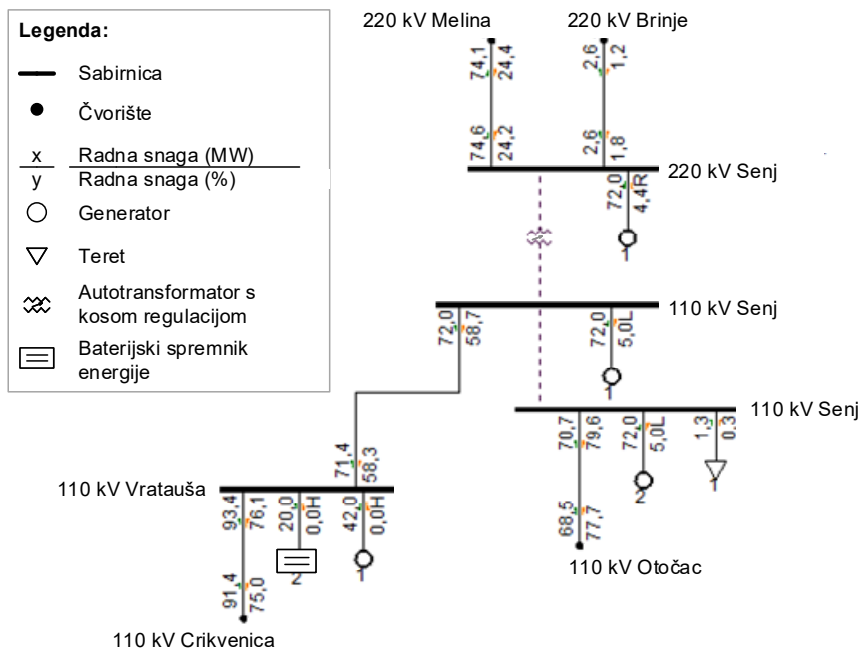
Kombinacija integriranog 20 MW baterijskog spremnika energije i metode razdvajanja sabirnica prikazana je na Slici 8. Opterećenje prijenosnog voda 110 kV Vrataruša – 110 kV Crikvenica se u tom slučaju smanjilo na 93,4 MW (76,1 %).



Slika 6. Tokovi radne snage u promatranoj mreži u scenariju 3



Slika 7. Tokovi radne snage u promatranoj mreži u scenariju 4



Slika 8. Tokovi radne snage u promatranoj mreži u scenariju 5

3.7. Analiza rezultata

Rezultati svih scenarija prikazani su u tablici III. Predviđene cijene predloženih investicija bazirane su prema postojećim elaboratima ili procjenama.

Tablica III. Usporedba rezultata osnovnog scenarija i scenarija 1, 2, 3 i 4, te prikaz procjena potrebnih investicija

| Scenarij | Tokovi radne snage u vodu 110 kV Vratauša – 110 kV Crikvenica | | Procjena investicije (€) |
|------------------|---|-------|--------------------------|
| | P (MW) | P (%) | |
| Osnovni scenarij | 108,1 | 89,2 | 7.500.000 |
| Scenarij 1 | 54,8 | 48,8 | 3.000.000 |
| Scenarij 2 | 137,2 | 111,8 | / |
| Scenarij 3 | 113,4 | 92,4 | 0 |
| Scenarij 4 | 121,7 | 99,3 | 56.000.000 |
| Scenarij 5 | 93,4 | 76,1 | 56.000.000 |

Procjena investicijskih troškova za baterijski spremnik energije bazirana je na [5], gdje su investicijski troškovi procijenjeni na 2.800 € po 1 kW. Stoga, investicija za 20 MW baterijski spremnik energije je procijenjena na 56.000.000 €.

Investicijski troškovi za izgradnju novih prijenosnih vodova procijenjeni su prema informacijama iz [6], gdje su troškovi procijenjeni na 2.500.000 € za 10 km 110 kV prijenosnog voda. Ugroženi prijenosni vod 110 kV Vratauša – 110 kV Crikvenica je otprilike 30 km dug, pa je procjena ukupnih troškova za izgradnju novog voda 7.500.000 €. Investicija druge opcije povećanja prijenosne moći voda, zamjena samo postojećih vodiča s učinkovitijim visoko temperaturnim vodičima, prema stvarnoj procjeni iznosi 2.000.000,00 €. Metoda razdvajanja sabirnica postoji u prijenosnoj mreži, te ne zahtjeva dodatne investicijske troškove.

Investicija u autotransformator s kosom regulacijom, određena prema stvarnoj investiciji, je visoka, ali kako je zamjena postojećeg transformatora bila potrebna zbog starosti investicija u novi

autotransformator s kosom regulacijom je opravdana i predstavlja dugoročno rješenje za upravljanje tokovima snaga u promatranom području.

Osiguranje N-1 kriterij sigurnosti može se riješiti integracijom baterijskog spremnika energije, te mogućom uporabom metode razdvajanja sabirnica. Visoki investicijski troškovi za integraciju baterijskih spremnika energije mogu se opravdati korištenjem baterijskog spremnika energije u pružanju dodatnih pomoćnih usluga u regulaciji sustava, u vremenu kada N-1 kriterij sigurnosti nije ugrožen.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazano je nekoliko mogućih rješenja za osiguranje N-1 kriterija sigurnosti uslijed povećanja toka snage u elektroenergetskoj prienosnoj mreži. U specifičnom području hrvatskog elektroenergetskog sustava, gdje je 110 kV mreža opterećena, posebno nakon priključka vjetroelektrana u području, kao dugoročno rješenje smanjenja tokova snaga predstavljena je ugradnja autotransformatora s kosom regulacijom s mogućnošću preusmjeravanja tokova snaga iz opterećene 110 kV mreže u manje opterećenu 220 kV mrežu. Nakon ugradnje ostaje potencijalno neosiguran N-1 kriterij sigurnosti u slučaju ispada autotransformatora. Integracija baterijskog spremnika energije na ugroženi vod je predstavljena kao dobro rješenje za osiguravanje N-1 kriterija, posebno u kombinaciji s metodom razdvajanja sabirnica.

5. ZAHVALA

Rad autora sufinancirali su Hrvatska zaklada za znanost i Hrvatski operator prienosnog sustava d.o.o. kroz projekt Smart Integration of RENewables - SIREN (I-2583-2015).

6. LITERATURA

- [1] K. W. Hedman, S. S. Oren and R. P., O'Neill, A review of transmission switching and network topology optimization, in 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011, pp. 1–7.
- [2] L. Sokolić, I. Pavić, A. Andrić, Z. Šojat, D. Kotorac, Parameters selection and user experience with angle regulation transformer in substation HPP Senj, 12th Symposium on Power System Management, Split, November 2016
- [3] dostupno na poveznici: <http://w3.siemens.com/>
- [4] dostupno na poveznici: <http://www.wamster.net/>
- [5] dostupno na poveznici: <http://www.renewableenergyworld.com>
- [6] J. Yli-Hannuksela, The Transmission Line Cost Calculation, University of Applied Science, 2011.