

Hrvatska zaklada za znanost
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb
Zavod za visoki napon i energetiku

FLEXIBASE

Popis uočenih nepravilnosti u modelu optimalnog nastupa
mikromreže na tržištima energije i pomoćnih usluga uz uvjet
otpornosti na vanjske kvarove

Domagoj Badanjak, mag. ing.
Ivan Grcić, mag. ing.
Marija Miletić, mag. ing.
prof. dr. sc. Hrvoje Pandžić



Europska unija
Zajedno do fondova EU



Sadržaj

1	Uvod	1
2	Vanjski kvarovi	2
3	Laboratorijski postav mikromreže	3
3.1	Komunikacijska mreža	4
3.2	AC mikromreža	6
3.3	Hidroelektrana	8
3.4	Fotonaponska elektrana	10
3.5	Punionica za EV	12
3.6	Baterijski spremnik	14
3.7	Elektronički tereti i dvosmjerni pretvarač	15
4	Popis nepravilnosti	16
5	Zaključna razmatranja	17
	Literatura	18

1. Uvod

Razvoj modela nastupa mikromreže na tržištima energije i pomoćnih usluga je jedan od ciljeva FLEXIBASE projekta. U prethodnim izvještajima je spomenuti model detaljno opisan te su provedena ispitivanja modela koja su za zadaću imala pronalazak njegovih mana. Pronađene mane su dokumentirane te su poduzeti koraci kako bi se nedostaci riješili. Međutim, utjecaj vanjskih kvarova na model optimalnog nastupa mikromreže na tržištima nije do sad proučavan te će biti opisan u ovom izvještaju. Naime, vanjski kvarovi za posljedicu imaju nemogućnost nastupa mikromreže na tržištima, pri čemu je vrijeme trajanja nepredvidivo a može se mjeriti satima, ali i danima. Posljedice nemogućnosti nastupa su dakako financijske prirode, te se moraju uzeti u obzir pri planiranju sudjelovanja na tržištima. Poglavlje 2 opisuje kako vanjski kvarovi utječu na mikromrežu, u poglavlju 3 je opisan laboratorijski postav mikromreže te u poglavlju 4 je dan popis uočenih nepravilnosti, dok poglavlje 5 zaključuje izvještaj.

2. Vanjski kvarovi

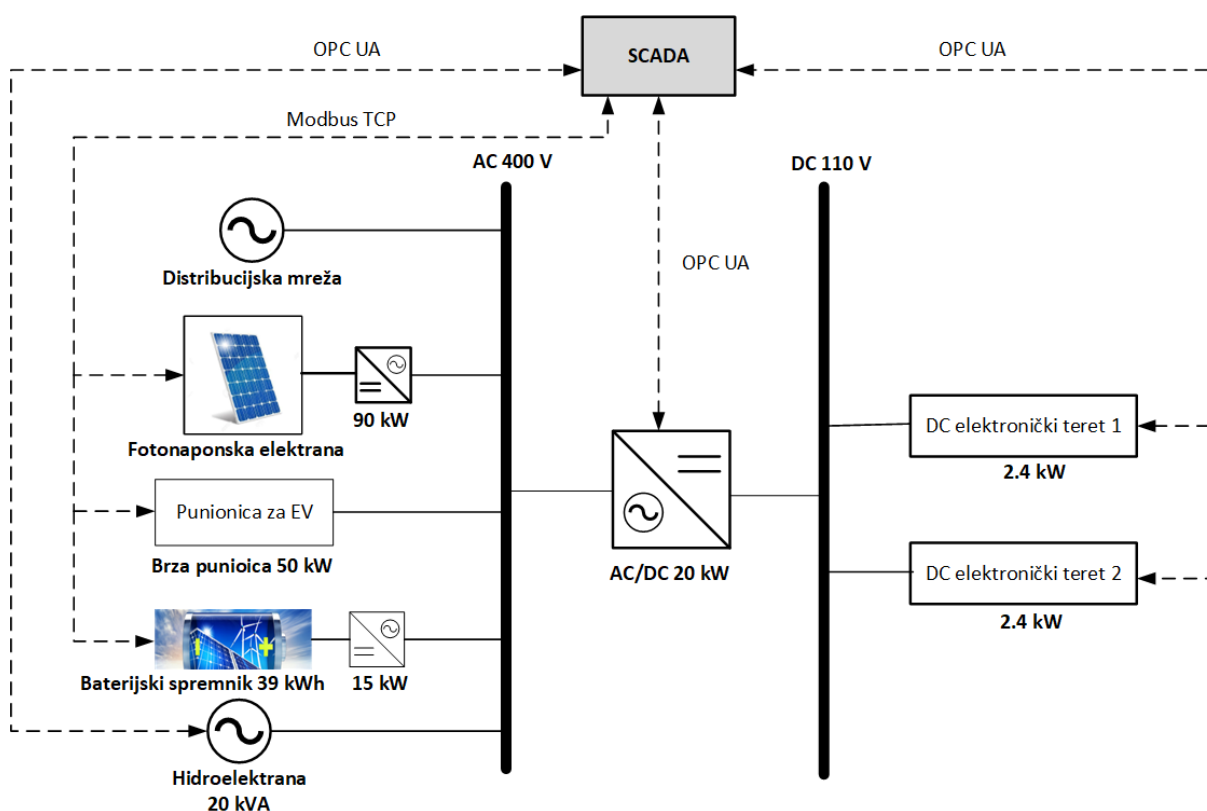
Prilikom sudjelovanja na tržištima energije i pomoćnih usluga, mikromreža mora biti sposobna razmijeniti energiju s mrežom. Distribuirani generatori te spremnici energije koji se nalaze unutar mikromreže stoga moraju biti u električnoj vezi s ostatkom mreže. Ako dođe do prekida iste, mikromreža je onemogućena obavljati ugovorene dužnosti što uzrokovati negativne financijske posljedice. Uzroci vanjskih kvarova mogu biti uzrokovani djelovanjem prirode ili čovjeka, no i zbog samih značajki sustava na koji je mikromreža spojena.

Kvarovi uzrokovani djelovanjem prirode mogu imati značajne posljedice na elektroenergetski sustav te posljedično i na mikromrežu koja koristi sustav za nastup na tržištima. U slučaju prirodnih katastrofa koje mogu značajno oštetiti infrastrukturu sustava, nastup mikromreže na tržištu je onemogućen dok se sustav ne uspostavi u radno stanje, što može potrajati više dana ili tjedana. Mikromreža će u ovom slučaju moći biti pogonjena samo u otočnom načinu rada, napajajući samo lokalne terete. Prirodni utjecaji također mogu uzrokovati kvar na opremi (npr. od posljedica zamrzavanja), no takvi se kvarovi u pravilu rješavaju brže od prethodno navedenoga slučaja. U ovom slučaju će mikromreža biti odvojena od sustava dok se kvar ne otkloni radi sigurnosti osoblja. Kvarovi također mogu uzrokovati ljudskim djelovanjem na sustav, a posljedice mogu svakojake. Najčešći oblik uzrokovanja kvara je fizičko djelovanje, međutim, *cyber* napadi postaju sve učestaliji oblik onemogućavanja ispravnog rada sustava. Vrijeme prekida djelovanja sustava je u ovom slučaju teško procijeniti jer ovisi o težini intruzije. Utjecaj kvarova na rad mikromreže se mjeri na više načina, a uključuje vrijeme koje je mikromreža odvojena od mreže te trošak koji je time prouzročen. Utjecaj vanjskih kvarova se može uzeti u obzir statističkom analizom kojom vjerojatnost pojave kvara može biti procijenjena. Poznavajući vjerojatnost da će mikromreža biti odvojena od sustava zbog djelovanja vanjskih utjecaja omogućava detaljniju analizu utjecaja na nastup mikromreže na tržištima.

3. Laboratorijski postav mikromreže

U svrhu provedbe eksperimentalne validacije upravljačkog modela donje i gornje razine koji su sastavni dio EMS sustava razvijenog u sklopu projekta FLEXIBASE korišten je laboratorijski postav mikromreže koja se nalazi u sklopu Laboratorija za napredne elektroenergetske mreže (engl. *Smart Grid Laboratory* - SGLab) koji se nalazi na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu elektrotehnike i računarstva [1].

U nastavku ovoga poglavlja detaljno je objašnjen korišteni laboratorijski postav mikromreže. Struktura laboratorijske mikromreže prikazana je na Slici 3.1.



Slika 3.1: SGLab - struktura laboratorijske mikromreže.

Na Slici 3.1 vidljivo je da je korišten laboratorijski postav hibridne mikromreže, tj. mikromreže koja se sastoji od izmjeničnog AC i istosmjernog DC dijela koji su međusobno povezani korištenjem dvosmjernog pretvarača. Nadalje, na Slici 3.1 izmjenični dio mikromreže zbog jednostavnosti prikaza prikazan je samo jednim čvorištem iako u stvarnosti izmjenični dio mikromreže ima 13 čvorišta. Nadalje, sve komponente mikromreže integrirane su centralni

nadzorni i upravljački sustav mikromreže (engl. Supervisory Control and Data Acquisition System - SCADA) koji služi kao aplikacijska platforma za integraciju i testiranje razvijenog EMS sustava. U nastavku su detaljno objašnjene sve komponente laboratorijskog postava.

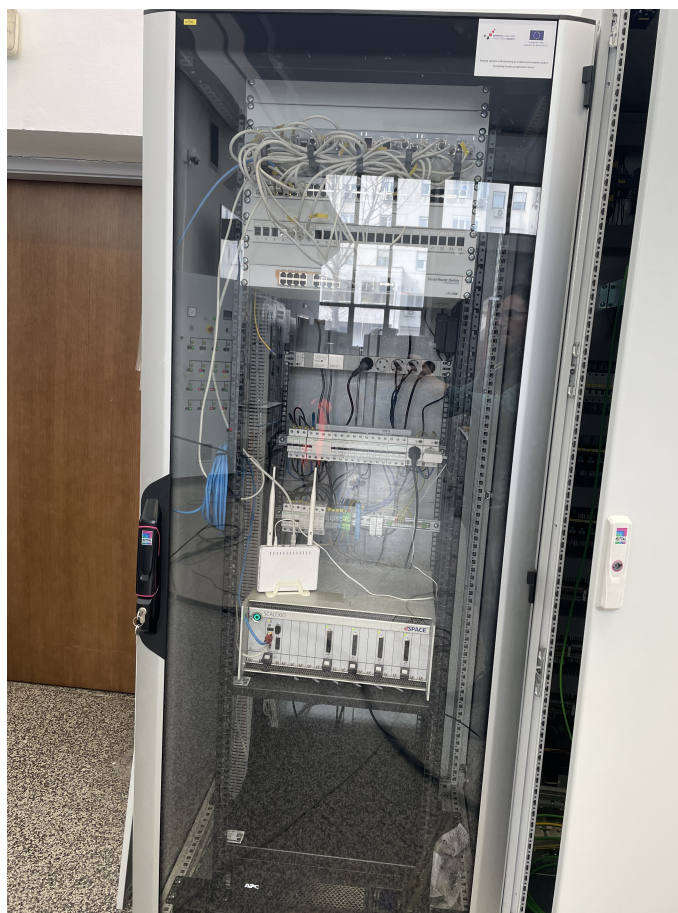
3.1 Komunikacijska mreža

Laboratorijska validacija razvijenog EMS algoritma napravljena je korištenjem distribuirane arhitekture koja se sastoji od tri servera tipa Lenovo SR 530 [?]. U tom smislu jedan server se koristi za izvođenje SCADA sustava dok je izvođenje EMS algoritma (upravljački model gornje razine i upravljački model donje razine) podijeljeno između druga dva servera. Distribuirana arhitektura je korištena za izvršavanje EMS algoritma kako bi se osigurale što bolje performanse izvršavanja algoritma. Slika 3.2 prikazuje ormar gdje su smješteni serveri u SGLab-u.



Slika 3.2: SGLab - ormar sa serverima.

Integracija svih komponenti laboratorijske mikromreže ostvarena je korištenjem različitih komunikacijskih protokola koji kao fizički sloj mreže koriste Ethernet. U tom smislu za integraciju hidroelektrane, dvosmjernog pretvarača i elektroničkih tereta unutar SCADA sustava korišten je OPC UA komunikacijski protokol, dok su inverteri fotonaponske elektrane, punionica za električna vozila i baterijski spremnik integrirani u SCADA sustav korištenjem Modbus TCP protokola. Nadalje, za pristupanje parametrima zaštitnih funkcija generatorske zaštite hidroelektrane korišten je IEC 61850 komunikacijski protokol. Slika 3.3 prikazuje komunikacijski ormar u kojem su smješteni mrežni preklopnici koji povezuju sve komponente mikromreže.



Slika 3.3: SGLab - komunikacijski ormar.

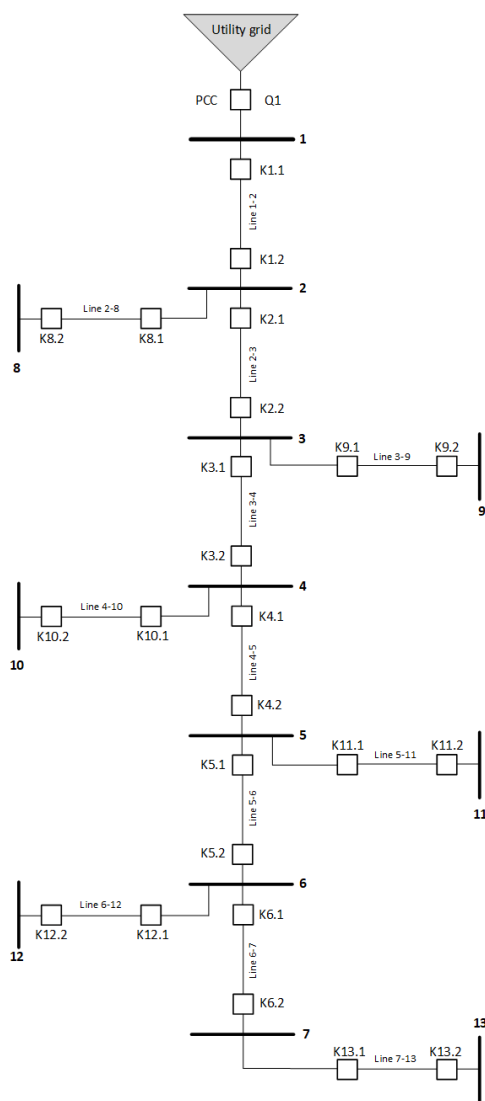
3.2 AC mikromreža

U nastavku ovog poglavlja opisan je izmjenični dio laboratorijske mikromreže korišten kao dio postava za validaciju razvijenog EMS algoritma. Slika 3.4 prikazuje ormare gdje su smještene komponente izmjenične mikromreže. U tom smislu iz slike je vidljivo sustav upravljanja mikromrežom integriran u prvom ormaru, u sljedeća tri ormara nalaze se sklopnici koji su spojeni na početku i na kraju svake dionice/kabela mikromreže. Na ovaj način moguće je uklapati odnosno isklapati pojedine segmente mikromreže. Nadalje, u tim ormarima nalaze i mjerni pretvornici koji mjere električne parametre na početku svake dionice mikromreže. Električni parametri koji su dostupni u mjerenjima za svaku dionicu mikromreže su: fazni i linijski naponi, struje za svaku fazu, ukupno harmoničko izobličenje (engl. Total Harmonic Distortion - THD) napona i struja, frekvencija, nesimetrije, ukupna djelatna snaga kroz dionicu mikromreže, djelatna snaga po fazi, ukupna jalova snaga kroz svaku dionicu mikromreže, jalova snaga po fazi, ukupna prividna snaga kroz svaku dionicu mikromreže te prividna snaga po fazi. Zadnja 4 ormara sadrže otpornike i zavojnice koje imaju vrijednosti koje odgovaraju kabelima različitih tipova, presjeka i duljina.



Slika 3.4: SGLab - ormari mikromreže.

Slika 3.5 prikazuje jednopolnu shemu izmjeničnog dijela laboratorijske mikromreže. Iz jednopolne sheme vidljivo je da izmjenični dio mikromreže ima ukupno 13 čvorišta i radijalne je strukture. Ovdje je također potrebno istaknuti da se radijalna struktura mikromreže ne može mijenjati (osim uklopa/isklopa pojedinih dionica) dok su parametri kabela mikromreže dostupni u dvije različite konfiguracije. Naime, jedna konfiguracija parametara kabela izmjenične mikromreže odgovara vrijednostima referentne niskonaponske CIGRE mikromreže, dok u drugoj konfiguraciji vrijednosti parametara kabela odgovaraju tipičnim vrijednostima distribucijske mreže u Republici Hrvatskoj.



Slika 3.5: SGLab - jednopolna shema izmjeničnog dijela mikromreže.

3.3 Hidroelektrana

Upravljiva proizvodnja u sklopu laboratorijskog postava u SGLab-u ostvarena je korištenjem hidroelektrane. Slika 3.6 prikazuje laboratorijsku hidroelektranu. Iz slike je vidljivo da su glavne komponente laboratorijske hidroelektrane: hidraulički agregat, pelton turbina i sinkroni generator. Nadalje, u podrumu laboratorija se još nalaze spremnik s vodom kao i pumpa koja pumpa vodu kroz tlačni cjevovod prema turbini. Ukupna prividna snaga sinkronog generatora hidroelektrane iznosi 20 kVA. Budući da hidroelektrana koristi turbinu tipa Pelton izlaznom snagom hidroelektrane upravlja se mijenjajući položaj igle koja se nalazi u mlaznici na kraju tlačnog cjevovoda. Na ovaj način se regulira protok vode kroz turbinu i posljedično izlazna snaga hidroelektrane.



Slika 3.6: SGLab - hidroelektrana.

Slika 3.7 prikazuje razvodni i upravljački ormar hidroelektrane. Ovdje je potrebno istaknuti da laboratorijska hidroelektrana posjeduje sve upravljačke i mjerne sustave koji su dostupni u stvarnom industrijskom okruženju. U tom smislu implementacija turbinskog regulatora je ostvarena korištenjem programibilnog logičkog kontrolera (engl. Programmable Logic Controller-

PLC) tipa ET200-SP, regulacija uzbude je ostvarena korištenjem regulatora tipa KONreg S1000 dok je generatorska zaštita ostvarena korištenjem numeričkog zaštitnog releja SepamG80.



Slika 3.7: SGLab - ormar razvoda i upravljački ormar hidroelektrane.

3.4 Fotonaponska elektrana

Neupravljiva proizvodnja u sklopu laboratorijskog postava realizirana je u obliku fotonaponske elektrane. Ukupna instalirana snaga fotonaponskih panela na krovu laboratorija iznosi 108 kW, dok je ukupno instalirana snaga invertera elektrane 90 kW. U tom smislu, fotonaponska elektrana se sastoji od ukupno 7 invertera. Slika 3.8 prikazuje jedan od ormara u kojem su smješteni inverteri proizvođača SMA čija je nazivna snaga 10 kW po svakom inverteru. Nadalje, Slika 3.9 prikazuje ormar u kojem su smješteni inverteri tipa Fronius nazivne snage 12,5 kW po inverteru. Svi inverteri su integrirani u SCADA i EMS sustav korištenjem Modbus TCP komunikacijskog protokola. Korištenjem ovog protokola moguće je pristupiti mjerenjima sa svakog invertera (ukupna djelatna, jalova i prividna snaga, djelatna, jalova i prividna snaga po fazi, linijski i fazni naponi, ukupno proizvedena električna energija) te postavkama zaštite na inverterima (naponske i frekvencijske zaštite kao i ograničavanje izlazne snage invertera). Slika 3.10 prikazuje položaj fotonaponskih panela na krovu laboratorija.



Slika 3.8: SGLab - ormar sa SMA inverterima fotonaponske elektrane.



Slika 3.9: SGLab - ormar s FRONIUS inverterima fotonaponske elektrane.



Slika 3.10: SGLab - fotonaponski paneli na krovu laboratorija.

3.5 Punionica za EV

U svrhu validacije utjecaja punionica za električna vozila (EV) na učinkovitost izvedbe razvijenog EMS algoritma u laboratorijski postavu mikromreže uključena je i brza punionica za EV ukupne snage 50 kW. Na Slici 3.11 vidljivo je da punionica ima tri priključka za punjenje električnih vozila. Krajnji desni priključak ima utičnicu Type2 za izmjenično punjenje maksimalne snage do 43 kW, dok prva dva priključka (CCS i CHAdeMO) se koriste za istosmjerno punjenje maksimalne snage do 50 kW. Punionica je integrirana u SCADA i EMS sustav korištenjem komunikacijskog protokola Modbus TCP pomoću koje je moguće prikupljati ukupna mjerenja snage punionice kao snagu sa svakog priključka. Nadalje, iz SCADA odnosno EMS sustava moguće je ograničiti ukupnu snagu punjenja punionice kao i snagu punjenja preko pojedinog priključka za punjenje.



Slika 3.11: SGLab - brza punionica za električna vozila.

3.6 Baterijski spremnik

Ukupni dostupni kapacitet baterijskih spremnika dostupnih u SGLab-u iznosi 113 kWh. Međutim za potrebe eksperimentalne validacije EMS algoritma u mikromrežu je integrirano 6 baterijskih modula tipa VARTA PLUSE 6. Svaki od modula se sastoji od baterijskog spremnika s pripadajućim BMS sustavom ukupnog kapaciteta 6,6 kWh te jednofaznim pretvaračem nazivne snage 2,5 kW. Na ovaj način osigurana je veća fleksibilnost primjene spremnika budući da se spremnici korištenjem jednofaznog priključka mogu spojiti na različita čvorišta u mikromreži ako je potrebno simulirati nesimetrije. Nadalje, u slučaju potrebe za baterijskim spremnikom koji se trofazno spaja na samo jedno čvorište u mikromreži po dva spremnika je moguće spojiti na istu fazu nekog čvorišta u mikromreži. U ovom slučaju potrebno je integrirati i nadređeni sustav koordiniranog upravljanja sa svih 6 baterijskih modula. Slika 3.12 prikazuje baterijske module dostupne u SGLab-u.



Slika 3.12: SGLab - baterijski spremnik.

3.7 Elektronički tereti i dvosmjerni pretvarač

Istosmjerni dio mikromreže realiziran je korištenjem dvosmjernog pretvarača te dva DC elektronička tereta. Na DC stranu dvosmjernog pretvarača povezani su elektronički tereti. U kontekstu upravljanja moguće je slati postavne vrijednosti snage, struje i napona na DC strani pretvarača, te postavne vrijednosti snage i struje za svaki od elektroničkih tereta. Nadalje, korištenjem OPC UA komunikacijskog protokola moguće je prikupljati mjerenja snage, struje i napona s DC strane dvosmjernog pretvarača, kao i mjerenja snage i struje za svaki od elektroničkih tereta. Ovdje je potrebno istaknuti da je za dvosmjerni pretvarač moguće mijenjati izlaznu snagu u rasponu od 0-20 kW, struju od 0-63 A te napon DC strane od 0-400 V dok je za elektroničke terete moguće mijenjati izlaznu snagu u rasponu od 0-2,4 kW. Slika 3.13 prikazuje ormar u kojem su smješteni dvosmjerni pretvarač kao i elektronički tereti.



Slika 3.13: SGLab - istosmjerna mikromreža i elektronički tereti.

4. Popis nepravilnosti

Ovo poglavlje donosi pregled uočenih nepravilnosti u modelu optimalnog nastupa mikromreže na tržištima energije i pomoćnih usluga uz uvjet otpornosti na kvarove. Kao što je prije spomenuto, kvarovi imaju značajan utjecaj na nastup mikromreže na tržištima. U Tablici 4.1 prikazan je popis uočenih nepravilnosti/nedostataka u modelu.

Tablica 4.1: Nepravilnosti u modelu

1.	Dojava prelaska u otočni način rada prilikom pojave vanjskog kvara.
2.	Prilagodba modela nastupa na tržištima novonastalim uvjetima uzrokovanih vanjskim kvarom.
3.	Predviđanje vremenskog trajanja nemogućnosti nastupa na tržištu.
4.	Preraspodjela energije unutar mikromreže prilikom nemogućnosti nastupa na tržištima.
5.	Detekcija mogućnosti ponovnog nastupa na tržištima.
6.	Određivanje novonastalih ograničenja nakon otklanjanja vanjskog kvara.

Prilikom pojave vanjskog kvara, mikromreža treba biti odvojena od ostatka mreže radi sigurnosti osoblja koje otklanja kvar. Model nastupa na tržištu treba znati je li mikromreža u mogućnosti sudjelovati na tržištima i shodno tome promijeniti svoje djelovanje. Ovdje se javlja potreba za signalom na koji će model djelovati, što dodatno povećava kompleksnost modela. Prilagodba modela na novonastale uvjete je težak zadatak pošto je vremensko trajanje prekida inicijalno nepoznato. Model mora uzeti u obzir više scenarija koji se mogu odviti te donijeti optimalnu odluku. Naravno, kompleksnost proračuna tada raste i utječe na brzinu izvođenja. Vremensko trajanje prekida se u nekim slučajevima može predvidjeti, olakšavajući tako donošenje optimalne odluke. Međutim, takvo predviđanje je potrebno razvijati te implementirati. Dok je mikromreža u otočnom pogonu, preraspodjela energije unutar mikromreže direktno ovisi o trajanju prekida. Odluke poput pražnjenja spremnika energije za napajanje lokalnog tereta mogu biti u suprotnosti s onim što je model za nastup na tržištima odredio kao optimalnu odluku. Koordinacija je stoga bitan aspekt pri pojavi vanjskih kvarova. Signal pojave mogućnosti nastupa na tržištu je također potrebno ukomponirati u model, omogućavajući tako pravovremen nastavak nastupa na tržištima. Otklanjanje vanjskog kvara za posljedicu može imati promjenu uvjeta u mreži, što model vidi kao promjenu ograničenja koja mora zadovoljiti pri donošenju optimalne odluke. Ovakva ograničenja su često tehničke prirode, a trebala bi se vratiti u početno stanje u što kraćem roku.

5. Zaključna razmatranja

U ovom izvještaju su opisani utjecaji vanjskih kvarova na model nastupa mikromreže na tržištima energije i pomoćnih usluga. Naime, vanjski kvarovi direktno sprječavaju nastup mikromreže na tržištima čime utječe na njene financijske prilike. Nepravilnosti koje su uzrokovane kvarovima stoga su navedene u izvještaju te je opisan utjecaj na model. Određene nepravilnosti povećavaju kompleksnost modela dok neke istiskuju razvoj posebnih metoda koji bi pomagale modelu pri izvođenju, odnosno donošenju optimalne odluke.

Mišljenja, nalazi i zaključci ili preporuke navedene u ovom materijalu isključiva su odgovornost autora i ne odražavaju nužno stajališta Hrvatske zaklade za znanost, Ministarstva znanosti i obrazovanja i Europske komisije.

Literatura

- [1] Faculty of Electrical Engineering and Computing (FER). Available Online: <https://sglab.fer.hr/>.