

SVEUČILIŠTE U RIJECI
EKONOMSKI FAKULTET

NADZOR I ZAŠTITA DISTRIBUIRANIH IZVORA ZASNOVANA NA
SINKRONIZIRANIM MJERENJIMA

ZAVRŠNI RAD

Predmet: Ekonomika inteligentnih energetske sustava

Mentor: Dr.sc. Tomislav Plavšić

Student: Krešimir Ugarković

Studski smjer: PSS Ekonomija energetske sektora

Matični broj studenta: 696/15

Rijeka, prosinac, 2017.

SADRŽAJ:

1.	UVOD	1
1.1	Problem i predmet istraživanja	1
1.2	Radna hipoteza.....	2
1.3	Svrha i ciljevi istraživanja.....	3
1.4	Metode istraživanja.....	3
1.5	Struktura rada.....	3
2.	NAPREDNE ELEKTROENERGETSKE MREŽE.....	5
2.1	Tehnologija naprednih mreža	7
2.2	Rješenja naprednih elektroenergetskih mreža	8
2.3	Poboljšana estimacija stanja	15
2.4	Proračun parametara elektroenergetskog sustava	19
2.5	Automatsko vođenje elektroenergetskog sustava	22
3.	MIKROMREŽE.....	24
3.1	Osnovni koncept i arhitektura mikromreže.....	24
3.2	Određivanje granica mikromreže.....	26
3.3	Podjela mikromreža	26
4.	NADZOR, ZAŠTITA I VOĐENJE MIKROMREŽA i DISTRIBUIRANIH IZVORA NA OSNOVU SINKRONIZIRANIH MJERENJA.....	29
4.1	Nadzor, zaštita i upravljanje mikromreža	29
4.2	Uređaji za sinkronizirano mjerenje fazora.....	31
4.3	Idejno rješenje nadzora i zaštite mikromreže i distribuiranih izvora zasnovano na sinkroniziranim mjerenjima	32
4.4	Zaštita distribuiranih izvora od otočnog pogona	38
4.5	Detektiranje i zaštita DI od otočnog pogona zasnovana na sinkroniziranim mjerenjima	39
5.	TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA PRIMJENE IDEJNOG RJEŠENJA NA MIKROMREŽU S KOGENERACIJSKIM POSTROJENJEM.....	43

5.1	Tehnički opis mikromreže – elektrane na biomasu SLAVONIJA OIE.....	43
5.2	Nadzor, zaštita i vođenje mikromreže DI Slavonija	47
5.3	Tehno – ekonomska analiza rada mikromreže DI Slavonija	49
6.	ZAKLJUČAK	53
LITERATURA		54
POPIS SLIKA		57
POPIS TABLICA		58
POPIS OZNAKA I KRATICA.....		59
PRILOG 1		61

SAŽETAK

Posljednjih godina udio obnovljivih izvora energije (OIE) u ukupnoj proizvodnji električne energije unutar elektroenergetskih sustava (EES) poprima značajne razmjere, tako da su instalirane snage distribuiranih izvora (DI) usporedive s klasičnim elektranama. Priklučkom distribuiranih izvora energije (DI) na distribucijsku mrežu, na relativno malom dijelu mreže, često dolazi do nesrazmjera proizvedene električne energije i priključene potrošnje. Obveze Operatora distribucijskog sustava u pravilu nalažu prihvrat cjelokupno proizvedene električne energije iz DI, što postavlja nove zahtjeve na nadzor, vođenje i zaštitu distribucijske mreže. Sukladno svjetskim trendovima, te postojećim razvojem opreme novi način nadzora i zaštite je usmjeren prema upotrebi sinkroniziranih mjerenja, čime se omogućava nadzor pogona i zaštita distribucijske mreže u stvarnom vremenu, kao i nadzor rada DI, te zaštita od otočnog pogona DI. U radu je prikazano koncepcijsko rješenje i tehnno-ekonomska analiza nadzora i zaštite DI na osnovu sinkroniziranih mjerenja.

SUMMARY

In recent years, the share of renewable energy sources (RES) in the total electricity production within the power systems (PS) is significant, so the installed distributed generation (DG), are comparable to the conventional power plants. By connecting DG to the distribution network, on a relatively small part of PS there is often a disproportion of produced electricity and connected consumption. Obligations of the Distribution System Operator generally require the receipt of the entire generated electricity from DG, which places new demands on the monitoring and protection of the distribution network. According to the world trends and the existing development of equipment, the new way of surveillance and protection is directed towards the use of synchronized measurements, enables real-time monitoring of the drive and protection of the distribution network, as well as controlling, operation and protection of the DG. This thesis presents the conceptual solution and the technical-economic analysis of the monitoring and protection of DG on the basis of the synchronized measurements.

1. UVOD

1.1 *Problem i predmet istraživanja*

Posljednjih godina udio obnovljivih izvora energije (OIE) u ukupnoj proizvodnji električne energije unutar elektroenergetskih sustava (EES) poprima značajne razmjere, tako da su instalirane snage OIE u EES-u usporedive s klasičnim elektranama.

Teme istraživanja u elektroenergetici mijenjaju se tijekom godina u skladu s primjenom novih tehnoloških rješenja, primjenom novih matematičkih modela, adaptivnih tehničkih rješenja ili drastičnijih primjera, kao što je ovdje prisutno, a to su promjene topologije i koncepcije mreže uzrokovane integriranjem distribuiranih izvora električne energije (DI) (obično OIE).

Stoga je razumljivo da su DI, odnosno OIE, potentna tema znanstvenih istraživanja s ciljem osmišljavanja što jeftinijeg i jednostavnijeg njihovog priključka u EES. Ne treba zaboraviti da se pojavom DI, mijenja topologija prijenosne i distribucijske mreže, kao i koncepcija nadzora, zaštite i vođenja EES-a.

Priključkom distribuiranih izvora energije (DI) na distribucijsku mrežu, na relativno malom dijelu mreže tzv. mikromreža, često dolazi do nesrazmjera proizvedene električne energije i priključene potrošnje. Obveze Operatora distribucijskog sustava u pravilu nalažu prihvrat cjelokupno proizvedene električne energije iz DI, što postavlja nove zahtjeve na nadzor, vođenje i zaštitu distribucijske mreže.

Prilikom analize distribucijske mreže, sa značajnom priključenom snagom iz DI, mogu se izdvojiti problemi povišenja napona dijela mreže i problemi vezani uz otočni rad DI. Naime, prema Mrežnim pravilima onemogućen je rad DI u otočnom pogonu, te je stoga potrebno osigurati adekvatnu zaštitu od takvog pogona.

Sukladno svjetskim trendovima, te postojećim razvojem opreme novi način nadzora i zaštite je usmjeren prema upotrebi sinkroniziranih mjerenja, čime

se omogućava nadzor pogona i zaštita distribucijske mreže u stvarnom vremenu, kao i nadzor rada DI, te zaštita od otočnog pogona DI.

Nadzor i zaštita distribucijskog EES-a omogućava tehničke prednosti koje se najbolje očituju u osmotrivosti EES-a u stvarnom vremenu (osvježavanje podataka svakih 20 ms). Međutim posebno značenje uvođenja nove tehnologije zasnovane na sinkroniziranim mjerenjima je ekonomskog karaktera. Problemi vezani uz priključak DI na distribucijski sustav uzrokuju povećane troškove regulacije sustava, te infrastrukturne zahvate u mreži. Predložena shema nadzora i zaštite, omogućava priključak DI (do određene granice) uz zadržavanje postojeće infrastrukture i osiguravanje sigurnosti i pouzdanosti pogona distribucijskog EES-a.

Predmet istraživanja bit će problem nadzora i zaštite u distribucijskom elektroenergetskom sustavu sa priključenim distribuiranim izvorima električne energije. Razmatrat će se dijelovi distribucijskog EES-a sa priključenim distribuiranim izvorom električne energije, odnosno mikromreže.

Navedeno će se istražiti proučavanjem stanja vezanog za distribuirane izvore – obnovljive izvore električne energije, aktualne problematike poticajnih mjera za priključenje obnovljivih izvora, energetske regulative, kako domaće, tako i europske, kao i izrade nove energetske strategije Republike Hrvatske.

1.2 Radna hipoteza

U okviru tako determiniranoga predmeta istraživanja postavlja se i temeljna hipoteza:

Razvojem i implementacijom novog načina nadzora i zaštite dijelova distribucijskog elektroenergetskog sustava omogućava se stabilnost pogona i ekonomska opravdanost priključenja distribuiranih izvora električne energije.

1.3 *Svrha i ciljevi istraživanja*

Svrha rada je prikaz tehničkih i ekonomskih problema penetracije obnovljivih izvora električne energije u distribucijski elektroenergetski sustav, te prijedlog osnovnih smjernica za njihovo rješavanje.

Cilj rada je predložiti idejno rješenje nadzora i zaštite dijela distribucijskog elektroenergetskog sustava (mikromreže) i distribuiranih izvora zasnovanih na sinkroniziranim mjerenjima koje je ekonomski primjenjivo obzirom na uvjete priključenja i poticajne mjere za obnovljive izvore električne energije.

1.4 *Metode istraživanja*

Znanstveno-istraživačke metode koje će se koristiti tijekom izrade ovog završnog rada i primjenom kojih će se provesti istraživanje jesu, u odgovarajućoj kombinaciji, metoda deskripcije, metoda kompilacije, metoda analize i sinteze, induktivna metoda, povijesna metoda te komparativna metoda.

U istraživanju će se pretražiti postojeće baze znanstvenih članaka, objavljene knjige, statistički ljetopisi, predmetna legislativa te će se istražiti web-stranice s aktualnom tematikom. Također, na uobičajen način citirat će se tuđi stavovi, opažanja i spoznaje.

1.5 *Struktura rada*

Rezultati istraživanja do kojih će se doći u ovom završnom radu bit će prezentirani u šest međusobno povezanih poglavlja.

U prvom poglavlju, **Uvodu**, definirat će se predmet i problem istraživanja, postaviti će se temeljna hipoteza, odrediti će se svrha i cilj istraživanja te će se navesti najvažnije znanstvene metode koje će se koristiti u istraživanju i prezentiranju rezultata istraživanja.

U okviru drugog poglavlja, naslovljenog **Napredne elektroenergetske mreže** obradit će se danas često korišten pojam „Smart Grids“. Smart Grids ili Napredne mreže obuhvaćaju nova tehnološka rješenja primijenjena na postojeću infrastrukturu elektroenergetske mreže. Pojasnit će se tehnološka

rješenja koja obuhvaćaju Napredne mreže, te razlozi uvođenja Naprednih mreža.

Unutar trećeg poglavlja, s naslovom **Mikromreže** bit će definiran pojam mikromreža, kao novi pojam elektroenergetskog entiteta unutar „šire“ distribucijske mreže. Obradit će se arhitektura mikromreža, metodologija određivanja granica mikromreža i priključak na okolnu distribucijsku mrežu, te osnovne značajke i prednosti podjele distribucijske mreže na mikromreže.

Četvrto poglavlje, **Idejno rješenje nadzora i zaštite mikromreža i distribuiranih izvora**, ključno je poglavlje koje će dati koncepciju novog rješenja nadzora i zaštite distribucijskog elektroenergetskog sustava koje se značajno razlikuje od tradicionalnog, prvenstveno zbog osmotrivosti mreže u stvarnom vremenu. Obradivati će se nadzor i zaštita distribucijskog elektroenergetskog sustava zasnovanog na sinkroniziranim mjerenjima, a posebice mikromreža. Pojasnit će se upravljačka hijerarhija u mikromreži, kao i zaštita distribuiranih izvora, prvenstveno od otočnog pogona. Na osnovu dostupne literature obradit će se ekonomski aspekt uvođenja nadzora i zaštite zasnovanog na sinkroniziranim mjerenjima.

U petom poglavlju, **Tehno-ekonomska analiza primjene idejnog rješenja na mikromrežu s kogeneracijskim postrojenjem**, primijenit će se predloženo idejno rješenje nadzora i zaštite mikromreže i distribuiranih izvora na stvarnu mikromrežu s kogeneracijskim postrojenjem. Provest će se odgovarajući proračuni koji će dati konkretne tehničke i ekonomske rezultate kako bi se usporedili s tradicionalnim metodama nadzora i zaštite distribucijskog elektroenergetskog sustava

U poglavlju šest, **Zaključak**, prezentirat će se najvažniji rezultati istraživanja te će se izvršiti argumentacija (ne)dokazivosti postavljene hipoteze.

2. NAPREDNE ELEKTROENERGETSKE MREŽE

Napredna elektroenergetska mreža predstavlja budućnost elektroenergetskog sustava u kojem sustav treba zadovoljiti stroge zahtjeve za sve većom puzdanošću, a sa što manjim ulaganjima u postojeću infrastrukturu. Takva mreža predstavlja aktivnu infrastrukturu koja implementacijom novih digitalnih i adaptivnih tehnoloških rješenja uz sve veće integriranje obnovljivih izvora energije, u mogućnostima je prijenjeti i distribuirati sve veću količinu električne energije do njenih potrošača a da time ne narušava stabilnost, sigurnost i pouzdanost elektroenergetske mreže čak i u negativnim okolnostima rada.

Najveći problemi elektroenergetskih sustava su raspadi pojedinih dijelova EES-a koji dovode do raspada čak i cijelih EES-a čime rezultiraju prekidima opskrbe električne energije, doveli su do ideje, osmišljavanja zatim i same realizacije naprednih prijenosnih elektroenergetskih mreža. Uzroci raspada dijelova ili cjelih EES-a često su kombinacija različitih, manjih međusobno povezanih i zavisnih događaja koji mogu izazvati cijeli lanac nepovoljnih posljedica po sam sustav. Takvi nizovi događaja ne odvijaju se po već nekom ustaljenom i predvidivom principu već se uglavnom pojavljuju stohastički i nepredvidivo što dodatno otežava vođenje EES-a kao i intervenciju prilikom mogućnosti rješavanja nastalog problema. Dodatnu težinu čini ponekad i ljudski faktor koji u nepromišljenom i brzopletom djelovanju može biti samo okidač ka još većim poremećajima i raspadima.

Primarni cilj razvoja naprednih elektroenergetskih mreža upravo je smanjenje i mogućnost otklona nastalih nestabilnosti u EES-u, ali uz očuvanje njegovog integriteta i pouzdanosti. U otklanjanju nastalih poremećaja prvo se poduzimaju aktivnosti, nadzor i upravljanje nad onim događajima koji su već u naprijed analizirani, proračunati i ubačeni u algoritme za upravljanje te se njima pokušava sustav vratiti u stanje stabilnosti. Poremećaji, kao što je već i spomenuto, nisu uvijek predvidljivi i jednostavni nego mogu izazvati razvoj događaja sasvim suprotno od očekivanog. U takvim slučajevima potrebno je djelovanje drugih posebno razvijenih metoda temeljenih na složenijim

algoritmima koji ovise i djeluju od slučaja do slučaja. Upravo takav koncept naprednih elektroenergetskih mreža ideja je vodilja za budućnost, kako bi se postigao što bolji nadzor, upravljanje i rješavanje nastalih poremećaja ali i omogućila što veća nesmetana prijenosna moć EES-a.

Složenost elektroenergetskog sustava, njegov budući razvoj sa implementacijom skupih tehnoloških multidisciplinarnih rješenja, odluke vezane za razvoj kao i investicije koje se namjeravaju ostvariti za razvoj takvih mreža uvelike će odrediti tijek razvoja elektroenergetskog sustava u vremenu koji slijedi. Stavke koje napredna distribucijska energetska mreža treba implementirati u svojoj budućnosti su:

- Sposobnost samostalnog oporavka predviđanjem mogućih poremećaja i vraćanje u normalno pogonsko stanje korištenjem podataka u stvarnom vremenu
- Motivacija potrošača ka aktivnom sudjelovanju u radu mreže
- Otpornost na poremećaje uzrokovane djelovanjem čovjeka ili prirode
- Povećanje kvalitete električne energije sa stajališta raspoloživosti i stabilnosti
- Implementacija dostupnih mogućnosti proizvodnje i pohrane električne energije
- Pružanje potpore razvoju električne energije
- Efikasniji rad mreže uzevši u obzir trenutnu ponudu i potražnju na tržištu uz optimalno korištenje svih raspoloživih resursa

S mogućnošću implementiranja navedenih stavaka u svoj budući razvoj, a uspješno djelujući u sve složenijim i zahtjevnijim elektroenergetskim sustavima, nove napredne elektroenergetske mreže postat će nezamjenjiv dio svakog EES-a kao i dio njegovog vođenja.

2.1 Tehnologija naprednih mreža

Poznato je da postoji više od 50 vrsta dalekovoda u uporabi, a još više u razvojnoj fazi. Ciljevi su naravno smanjenje gubitka, veća ukupna pouzdanost i učinkovitost. Sve je više pokušaja (stvarnih rješenja) koji nastoje primijeniti supravodljive tehnologije. Nove vrste kompozitnih vodiča su se razvili kako bi zadržali svoju prijenosnu moć i bili otporni na degradaciju pri visokim temperaturama. Nadzor, zaštita i vođenje prijenosne mreže zasnovane na sinkroniziranim mjerenjima (eng. WAMPAC – Wide Area Monitoring, Protection and Control) više nije apstrakcija, već je primijenjena u mnogim elektroprivredama. Razvijeni su sustavi koji služe zaštiti cjelovitosti prijenosnog EES-a, uključujući stabilnost, sprječavanje poremećaja i minimiziranje njihovih posljedica, jedinstvenog naziva SIPS (engl. *System Integrity Protection Scheme*) ili SPS (engl. *Special Protection Systems*).

Upravo na takav, deskriptivan, način mogu se definirati – opisati Napredne elektroenergetske mreže, odnosno Smart Grid su nova generacija elektroenergetskih mreža, koje koriste nove dostupne tehnologije u cilju poboljšanja pouzdanosti i ekonomičnosti [1].

Napredne mreže razvijaju se usporedo s tehnološkim inovacijama, kako u prijenosu i distribuciji, tako i u IT i telekomunikacijskim inovacijama. Napredne mreže pružaju u stvarnom vremenu, dvosmjerni protok energije i informacija, povezivanje svih sudionika u lancu proizvođača i korisnika električne energije - omogućuju bolju komunikaciju između proizvođača i operatora prijenosnog ili distribucijskog sustava, bolju koordinaciju između distributera električne energije i krajnjih potrošača.

Smart Grid tehnologije imaju za cilj promijeniti način na kojim se vodi elektroenergetska mreža, i donijeti pogodnosti kako za operatore sustava, tako i za potrošače električne energije:

Veća pouzdanost i kvaliteta napajanja električnom energijom

Smart grid omogućuje pouzdano napajanje s manje i kraće zastoja, "čišćom" električnom energijom i sposobnošću „samoizlječenja“.

Povećana energetska učinkovitost

Smart grid pruža smanjene ukupnih gubitaka energije, smanjuje vršnu potrošnju.

Ekološke prednosti

Smart grid sudjeluje u zaštiti okoliša kroz smanjenje nepotrebnih gubitaka. Time se doprinosi smanjenju emisije stakleničkih plinova i kroz smanjenje proizvodnje električne energije iz neučinkovitih izvora energije, a omogućava integriranje obnovljivih izvora energije većih snaga.

Izravna financijska korist

Smart grid nudi izravne ekonomske koristi u vođenju elektroenergetskog sustava korištenjem tehnologija koje omogućavaju povećanje prijenosne moći pojedinih vodova.

U sljedećim poglavljima bit će dati primjeri naprednih mreža korištenjem različitih tehnologija i različitih aplikacija.

2.2 Rješenja naprednih elektroenergetskih mreža

Dosadašnji nadzor, zaštita i vođenje EES-a provodi se na osnovu lokalnih mjerenja statičkih vrijednosti parametara EES-a (napon, tokovi snaga, frekvencija, itd.). Nakon velikih raspada EES-a u svijetu 2003. godine razvijaju se i primjenjuju sustavi za nadzor, zaštitu i vođenje EES-a na osnovu trenutnih vrijednosti osnovnih parametara, tzv. WAMPAC (Wide Area Monitoring, Protection and Control) sustavi. Sustavi su zasnovani na ugrađenim uređajima za mjerenje fazora napona i struje u točkama EES-a od posebne važnosti, odnosno mjerenja amplitude i kuta u realnom vremenu (PMU – Phasor Measurement Unit). WAMPAC platforma omogućava realnu dinamičku sliku EES-a, veću točnost mjerenja, brzu razmjenu podataka i stvaranje algoritama za koordinaciju i brzo djelovanje u slučaju pojave nestabilnosti.

WAMPAC sustavi mogu se povezati sa postojećim sustavima za nadzor EES-a (SCADA sustavom - Supervisory Control and Data Acquisition).

Korištenjem WAMPAC sustava omogućene su mnoge prednosti koje su opisane kako slijedi.

Proračuni za praćenje opterećenja EES-a u realnom vremenu

Računa se djelatna, jalova i prividna snaga na dalekovodima.

Trofazna snaga na svim dalekovodima koji su unutar sustava za nadzor EES-a treba se računati iz mjerenja fazora napona i struje koji se dobivaju iz PMU uređaja. Potrebno je računati trofaznu djelatnu, jalovu i prividnu snagu u MW, MVAR i MVA na vodnim poljima s prikazom 4 decimalna mjesta.

Izračun snage je potrebno je računati i arhivirati s rezolucijom od 50 uzoraka u sekundi. Prikaz mjerenja snage treba biti vidljiv na grafičkom sučelju uz prikaz dalekovoda.

Izračunata vrijednost djelatne snage koja se nalazi ispod podešenog praga upućuje na isključen dalekovod ili na dalekovod u praznom hodu te je potrebno signalizirati na grafičkom sučelju o isključenom dalekovodu. Snaga na vodovima dobiva se iz ulaznih sinkrofazorskih mjerenja fazora napona i struje te kuta razlike između njih.

Praćenje temperature dalekovoda u realnom vremenu

Osnovna funkcija proračuna za nadzor temperature dalekovoda je pružanje informacije o srednjoj temperaturi dalekovoda u realnom vremenu temeljeno na mjerenjima napona i struje s obje strane dalekovoda. Iz mjerenja fazora napona i struje računa se stvarna impedancija i admitancija dalekovoda iz čega je poznat i djelatni otpor voda. Poznavajući karakteristike materijala vodiča određuje se srednja temperaturu dalekovoda.

Za punu funkcionalnost aplikacije potrebno je imati sinkrofazorska mjerenja fazora napona i struje s obje strane promatranog dalekovoda. Rezolucija ulaznih signala je minimalno 10 uzoraka u sekundi, dok proračun računa srednju temperaturu dalekovoda svake sekunde.

Proračuni za praćenje kutne stabilnosti EES-a u realnom vremenu

Izračun razlike kutova napona

Aplikacija za nadzor razlike kuteva napona u EES-u daje informaciju o opterećenju promatranog koridora ili voda u realnom vremenu.

Proračun za nadzor kuteva u realnom vremenu kontinuirano računa te na grafičkom sučelju vizualno prikazuje iznos razlike kuteva između fazora napona bilo koja dva čvorišta u sustavu s ugrađenim PMU uređajem. Izračun razlike kuteva može se pridodijeliti bilo kojem vodu ili koridoru u sustavu i za nadzor.

Ukoliko izračun razlike kuteva napona prijeđe predefinirani prag, proračun upozorava korisnika. Pristup povijesnim podacima omogućen je iz povijesne baze za potrebe analize i interpretaciju prošlih scenarija i događaja. Iznosi razlike kuteva spremljeni su u arhivu s vremenskom rezolucijom od 20ms. Točnost prikaza razlike kuta vektora napona (struje) ne smije biti manja od $\pm 0.1^\circ$. Ulazni signali za proračun razlike kuteva fazora napona su apsolutni iznosi kuta iz sinkrofazorskih mjerenja fazora napona (struje).

Proračuni za detekciju oscilacija djelatne snage

Oscilacije (njihanje) djelatne snage u sustavu nastaju zbog interakcije rotora generatora s EES-om što je uzrokovano različitim odzivima generatora na promjene u sustavu. EES sadrži veliki broj različitih oscilatornih modova koji se javljaju zbog interakcije među različitim komponentama.

Prony analiza

U proračun prony-eve analize ulazni signal je djelatna snaga na dalekovodu te je potrebno u realnom vremenu proračunati frekvenciju i prigušenje dominantnog oscilatornog moda na tom dalekovodu. Potrebno je da proračun procesira ulazni signal djelatne snage na način da se detektiraju vrijednosti dominantnih modova osciliranja (kao dominantni mod osciliranja podrazumijeva se onaj s najmanjim prigušenjem). Potrebno je da proračun u realnom vremenu prikazuje frekvenciju i prigušenje njihanja.

Modalna analiza

U modalnoj analizi potrebno je da ulazni signal bude frekvencija napona sabrinica. U realnom vremenu na grafičkom sučelju se prikazuje se frekvencija oscilacija u vremenskoj domeni.

Nakon detekcije tranzijentne pojave, potrebno je da proračun prepozna njihanje snage ili frekvencije u sustavu kao prigušeno ili neprigušeno te sukladno tome upozori korisnika preko sustava za upozoravanje.

Proračuni trebaju prepoznati oscilacije u sustavu od rasponu od 0.1 do 2.0Hz uz podešenje osjetljivosti u koracima od 0,001Hz. Osjetljivost funkcija treba biti od 20mHz (od vrha do vrha oscilacije). Tipovi signala iz kojih je moguće detektirati oscilacije su razlika kuta vektora napona, frekvencija i djelatna snaga.

Analiziraju se ulazni signali s rezolucijom od 50 uzorka u sekundi. Potrebno je detektirati oscilacije s frekvencijom do 3Hz.

Proračuni za praćenje naponske stabilnosti EES-a

Krivulja djelatne snage i napona (P-V dijagram) u realnom vremenu

Osnovni faktor koji utječe na nestabilnost napona je nemogućnost sustava da održi potrebu za jalovom snagom. Potrebno je da P-V dijagram u realnom vremenu dostavlja informaciju o margini djelatne snage koju je moguće prenijeti dalekovodom ili koridorom bez da se naruši naponska stabilnost. Aplikacija kontinuirano računa i na grafičkom sučelju prikazuje dinamičku PV krivulju s prikazom trenutačne radne točke dalekovoda ili promatranog koridora. Proračun računa u sekundnom periodu marginu snage i udaljenost trenutačne radne točke do točke nestabilnosti. Analiziraju se ulazni signali fazora napona s obje strane dalekovoda ili koridora s rezolucijom od 50 uzorka u sekundi.

Krivulja napona i jalove snage (Q-V dijagram) u realnom vremenu

Tokovi jalove snage nužni su radi održavanja razine napona u prijenosnoj mreži unutar propisanih granica kako bi se osigurala naponska stabilnost u sustavu. Povećani tokovi jalove snage uzrokuju povišenje napona u mreži (karakteristično za period noćnih minimuma) kada slabo opterećeni vodovi generiraju jalovu snagu koju je potrebno apsorbirati.

Prikazom Q-V krivulje daje se informacija o iznosu jalove snage koju je potrebno injektirati u sabrinicu kako bi se održala propisana razina napona. Prikaz QV krivulje u realnom vremenu daje minimalnu vrijednost jalove snage da koju je potrebno prenijeti vodom a da se izbjegne naponski slom, pri čemu je djelatna snaga konstantna.

Krivulja djelatne i jalove snage (P-Q dijagram) u realnom vremenu

Prikazom P-Q krivulje daje se informacija o trenutačnoj radnoj točki dalekovoda s obzirom na ograničenje prijenosa radne i jalove snage. Proračunom PQ dijagrama moguće je u realnom vremenu dobiti informaciju o maksimalno mogućem prijenosu radne snage, a da se održi potreba za jalovom snagom.

Estimacija stanja zasnovana na sinkroniziranim mjerenjima

Više riječi će biti u slijedećim poglavljima

Detekcija lokacije poremećaja temeljena na mjerenjima frekvencije i snage

Vremenski sinkronizirana mjerenja frekvencije visoke rezolucije u više različitih točaka EES-a omogućuju točno određivanje lokacije izvora poremećaja. Ispad generatora ili opterećenog dalekovoda uzrokuje promjenu frekvencije koja propagira kao elektromehanički val kroz mrežu od točke nastajanja kroz cijelu interkonekciju. Ukoliko u EES-u postoji više vremenski sinkroniziranih mjernih točaka koje mjere frekvenciju u visokoj rezoluciji moguće je odrediti izvoriste poremećaja.

Potrebno je da proračun na temelju mjerenja frekvencije i snage na vodovima određuje lokaciju izvora poremećaja u sustavu. Brzina propagacije vala promjene frekvencije kroz sustav mijenja se ovisno o karakteristikama dijela EES-a kroz koji prolazi, a unutar jednog dijela EES-a proporcionalna je iznosu djelatne snage.

Proračun je potrebno da uzima u obzir sinkronizirana mjerenja frekvencije u više različitih točaka EES-a s rezolucijom ne manjom od 50 uzoraka u sekundi.

Gubitak sinkronizma

U slučaju pojave dva odvojena otoka s dvije različite frekvencije u EES-u, kutevi napona pojedinih čvorišta također su u značajnom pomaku. Veličina iznosa razlike frekvencije između dva čvorišta proporcionalna je razlici kuteva napona između ta dva čvorišta. Razlika u iznosu kuta između sabirnica povećava kako sustav slabi i teži ka ispadu iz sinkronizma.

Proračun se bazira na analizi trenda razlike faznih kuteva napona. Različite frekvencije između dva dijela sustava označavaju i dva različita otoka, stoga i povećanje apsolutnog iznosa razlike faznih kuteva napona. Ukoliko je povećanje konstantno, a brzina povećanja odgovara iznosu apsolutne razlike frekvencije između dva područja aktivira se alarm. Za funkcionalnost aplikacije potrebno je imati sinkronizirano mjerenje fazora napona između dvije određene lokacije u sustavu.

Post – mortem analiza

Treba biti omogućeno repriziranje odabranog perioda mjerenja iz arhiva te prikaz odabranog perioda na grafičkom sučelju uz provođenje proračuna nad odabranim podacima.

Događaji i alarmi

Sustav upozorenja

Potrebno je da sustav upozorenja bude slikovni i zvučni. Na svim grafičkim sučeljima sustav upozorenja mora biti u tri boje, zelena za normalno stanje, žuto za prvi stupanj upozorenja i crveno za drugi stupanj upozorenja. Sustav upozorenja mora signalizirati i greške u radu samog sustava za nadzor EES-a (gubitak sinkronizacije s PMU uređajem, gubitak ulaznih signala za proračune...) koji moraju biti u narančastoj boji. Promjene u radu EES-a koje su popraćene drugim stupnjem upozorenja, moraju biti i zvučno signalizirane. Sustav upozorenja mora se moći slobodno podešavati po svim parametrima za sve granice za status rada EES-a i za sve granice za proračune koji se koriste.

Lista događaja

U listi događaja se prikazuju i bilježe sve promjene i svi događaji u sustavu te se zapisuju događaji po svim funkcijama u sustavu za nadzor. Pristup listi događaja mora bit moguć iz glavnog korisničkog sučelja. Potrebno je da se događaji mogu pretraživati i filtrirati po datumu i tipu događaja.

Arhiviranje podataka

Osnovno arhiviranje

Osnovno arhiviranje sprema u povijesnu bazu sva odabrana mjerenja i izlazne rezultate aplikacija u rezoluciji od 20ms za sinkrofazorska mjerenja i 1s ili

manje za izlazne rezultate aplikacija.

Arhiviranje temeljeno na događajima

Servis za arhiviranje podataka temeljen na događajima prepoznaje i arhivira odabrana sinkrofazorska mjerenja i izlazne rezultate aplikacija nakon detekcije događaja ili poremećaja u EES-u. Poremećaj ili događaj je definiran kao svaka situacija u kojoj je odabrani signal iznad ili ispod unaprijed podešene vrijednosti uz dodatnu mogućnost definiranja funkcije kojom će se detektirati događaj iz jedne ili više ulaznih veličina. Veličina poremećaja i odabir funkcije se definiraju u izborniku, a moguće je odabrati osnovne veličine EES-a ili izvedene. Arhiva sadrži podatke prije i nakon nastanka poremećaja, a vremenski opseg zapisa mora definirati korisnik. Pokretanje arhiviranja može aktivirati bilo koje mjerenje ili izvedena veličina.

Zapis u bazi sa spremljenim podacima o poremećaju formira se automatski po nastanku poremećaja.

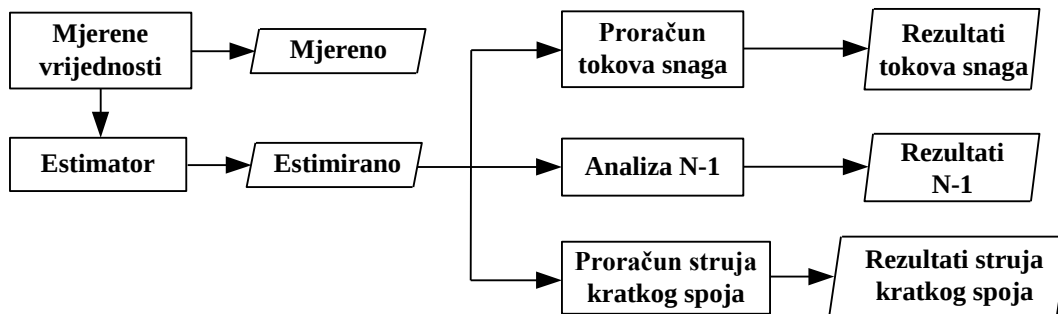


Slika 2.1. Prikaz operatorske konzole modernog WAMPAC sustava – SynchroShield (Preuzeto od strane Hrvatskog operatora prijenosnog sustava)

2.3 Poboljšana estimacija stanja

Proračun estimacije (procjene) stanja EES-a predstavlja temeljni proračun u suvremenim centrima vođenja EES-a. U većini se slučajeva pritom koristi metoda najmanjih kvadrata s težinskim faktorima (engl. *Weighted Least Squares* – WLS), odnosno rješenje zasnovano na klasičnoj teoriji estimacije stanja, čije su osnove postavljene prije više desetljeća, točnije krajem 1960-ih godina [2]. Konvencionalna mjerenja prikupljena SCADA sustavom se osvježavaju svakih nekoliko sekundi, te obično obuhvaćaju mjerenja tokova i injekcija djelatne i jalove snage, kao i amplitude napona čvorišta, bez mjerenja kuta napona čvorišta. Proračun estimacije stanja se ne pokreće u svakom ciklusu prikupljanja podataka, već svakih nekoliko minuta ili prilikom promjene topologije mreže. U proračun estimacije stanja ulaze vremenski nesinkronizirana mjerenja, koja su

prikupljena u intervalu između dva proračuna. Zbog različite duljine komunikacijskih putova kao i vrste korištenih medija, podaci u centar vođenja ne stižu istovremeno već s izvjesnim kašnjenjem pa su moguće nedosljednosti. U situacijama djelovanja sustava zaštite ili naglih promjena snage u EES-u pouzdane je rezultate estimacije stanja moguće dobiti tek nakon uspostave stacionarnog stanja u sustavu. Navedeno je često nezadovoljavajuće u slučaju poremećaja, obzirom da rezultat estimacije stanja može imati ključnu ulogu za povratak u normalno pogonsko stanje. Stoga se estimatore stanja zasnovane na klasičnoj teoriji može smatrati kvazi-statičnim, obzirom da je rezultat estimatora stanja zapravo aproksimacija prosječnog stanja EES-a u intervalu između dva proračuna estimacije stanja. Slijedom navedenog, možemo zaključiti da je korištenjem klasičnih estimatora stanja, koji koriste samo mjerenja prikupljena SCADA sustavom, teško ostvariti uvid u stanje EES-a u stvarnom vremenu, što će dodatno biti naglašeno u okruženju liberaliziranog i dereguliranog tržišta električne energije s integriranim značajnim udjelom OIE.



Slika 2.2. Odnos estimatora stanja s ostalim aplikacijama u centru vođenja

S druge strane, sinkronizirana mjerenja fazora (engl. *synchronized phasor measurements*) predstavljaju tehnologiju koja je prepoznata kao jedan od ključnih faktora u uspostavi sigurnijeg i učinkovitijeg vođenja suvremenog EES-a. Teoretske osnove su postavljene početkom 1980-ih, prve komercijalno dostupne jedinice za sinkronizirano mjerenje fazora (engl. *Phasor Measurement Unit* –

PMU) su se pojavile početkom 1990-ih godina, dok je intenzivnija primjena uslijedila u 21. stoljeću. Aplikacije koje koriste tehnologiju sinkroniziranih mjerenja fazora nalaze primjenu diljem svijeta u sustavima sistemskog nadzora, zaštite i upravljanja EES-a (engl. *Wide Area Monitoring, Protection and Control* – WAMPAC). U prvoj se fazi ugrađene PMU jedinice koriste u sustavima sistemskog nadzora (engl. *Wide Area Monitoring* – WAM), da bi uslijedio razvoj aplikacija za sistemsku zaštitu (engl. *Wide Area Protection* – WAP) i sistemsko upravljanje (engl. *Wide Area Control* – WAC), gdje se povratnim vezama utječe na sklopno i pogonsko stanje EES-a, s ciljem optimizacije pogona i očuvanja integriteta EES-a [3, 4, 8]

PMU jedinice mjere amplitudu i fazni kut, odnosno fazore napona čvorišta, koji predstavljaju elemente vektora stanja sustava. Dodatna je prednost što su mjerenja vremenski sinkronizirana te se prikupljaju većom učestalošću u usporedbi s konvencionalnim mjerenjima. Stoga estimator stanja predstavlja pogodnu aplikaciju za primjenu tehnologije sinkroniziranih mjerenja fazora. U skladu s navedenim, estimacija stanja je od samih početaka razvoja PMU jedinica razmatrana kao područje u kojem se očekuju značajne prednosti uslijed primjene tehnologije sinkroniziranih mjerenja fazora. Analiza broja godišnje objavljenih publikacija u posljednja dva desetljeća, odnosno počevši od komercijalizacije PMU jedinica, ukazuje na porast interesa za razmatranom tematikom u proteklom desetljeću. Navedeno je u skladu sa spomenutom problematikom porasta broja raspada EES-a početkom 21. stoljeća, nakon čega je uslijedilo intenzivnije promišljanje o razvoju te sama izgradnja WAMPAC sustava.

Paralelno s razvojem tehnologije sinkroniziranih mjerenja fazora i dostupnošću PMU jedinica, provodila su se istraživanja s ciljem maksimiziranja prednosti proizašlih iz njihove primjene u području estimacije stanja. Nakon odluke o izgradnji sustava temeljenog na sinkroniziranim mjerenjima fazora, jedan od prvih zadataka obuhvaća projektiranje istog. Izazov s kojim se pritom susreću elektroprivrede i koji predstavlja predmet brojnih dosadašnjih istraživanja

jest određivanje potrebnog broja i optimalnog rasporeda PMU jedinica za učinkovitu primjenu u estimaciji stanja. Naime, iako se razvojem tehnologije te intenzivnijom komercijalizacijom cijena PMU jedinica u posljednjih nekoliko godina smanjuje, u slučaju većih sustava ona i dalje predstavlja značajnu stavku, kojoj treba pridodati trošak inženjeringa, kao i gubitke zbog smanjene funkcionalnosti mreže u fazi ugradnje PMU jedinica. Pronalazak optimalnog rasporeda PMU jedinica se provodi prema kriterijima minimizacije broja PMU jedinica i maksimizacije redundancije u skupu mjerenja, uz ostvarivanje osmotrivosti što je moguće šireg dijela EES-a. Ugradnjom PMU jedinica u svim čvorištima sustava ostvarila bi se osmotrivost cjelokupnog sustava korištenjem samo sinkroniziranih mjerenja fazora. U tom bi slučaju veza mjerenja i varijabli stanja bila linearna, čime bi bio uspostavljen linearni estimator stanja, koji direktno mjeri stanje EES-a, bez potrebe za iterativnim postupkom. Potpunu osmotrivost sustava je moguće ostvariti i s manjim brojem PMU jedinica, ugrađenih u $1/4$ do $1/3$ ukupnog broja čvorišta, primjenom metoda optimalnog rasporeda PMU jedinica. Pored navedenih financijskih, postoji više tehničkih razloga zbog kojih linearni estimator stanja zasad nije izgledna opcija primjene sinkroniziranih mjerenja fazora u estimaciji stanja. Naime, ukoliko raspored PMU jedinica ne osigurava redundantnost mjerenja, u slučaju gubitka ili netočnosti fazorskih mjerenja (otkaz PMU jedinice, pogreška mjernog transformatora, komunikacijska pogreška) dolazi do degradacije rezultata estimacije, uz nemogućnost detekcije i identifikacije grubih pogrešaka u mjerenju i pogrešaka u modelu mreže.

Obzirom na brojnost postojećih mjernih uređaja koji čine sastavni dio SCADA sustava te osiguravaju redundantnost mjerenja, dosadašnja rješenja primjene tehnologije sinkroniziranih mjerenja fazora u estimaciji stanja ukazuju na evolucionarni pristup, kojim se želi iskoristiti prednosti obje tehnologije. Stoga kompromisno rješenje između estimatora stanja zasnovanog na klasičnoj teoriji i linearnog estimatora stanja predstavljaju hibridni modeli, objedinjavajući konvencionalna SCADA mjerenja i sinkronizirana mjerenja fazora. Pritom je cilj

optimiziranje performansi estimatora stanja u smislu točnosti i konvergentnosti proračuna, robusnosti obzirom na utjecaj pogrešaka u mjerenjima i poremećaja u sustavu, kao i veće redundancije mjerenja, odnosno sposobnosti detekcije i identifikacije grubih pogrešaka. Posljedično, uvođenje sinkroniziranih mjerenja fazora u proračun estimacije stanja ima pozitivan utjecaj na ostale proračune i analize u centru vođenja, što rezultira većom razinom raspoloživosti EES-a i sigurnosti pogona EES-a u stvarnom vremenu.

2.4 Proračun parametara elektroenergetskog sustava

Konstante dalekovoda su osnovna električna svojstva nadzemnog voda i iz njih slijede sva ostala svojstva i karakteristike o kojima ovise električne prilike navodu. Vrijednost konstanti voda ovisi o svojstvima materijala od kojih je vod izveden (npr. specifični otpor materijala za vodiče), o geometrijskim svojstvima voda (npr. dimenzije vodiča, međusobna udaljenost i raspored vodiča) i o okolnim prilikama (npr. temperatura, oborine).

Poznavanje konstanti voda temelj je za izrade modela mreže EES-a u raznim programima za analizu rada EES-a kao i za podešenje uređaja relejne zaštite. Vrijednosti koje se koriste najčešće se preuzimaju iz kataloga s time ne moraju nužno odgovarati stvarnim prilikama na terenu koje mogu utjecati na iznos parametara dalekovoda u realnom pogonu.

Sinkronizirana mjerenja fazora napona i struja s obje strane dalekovoda, otvorila su dodatnu mogućnost, a to je izračun parametara dalekovoda u stvarnom vremenu. Sinkronizirana mjerenja fazora napona i struja, kao i svaki mjerene vrijednosti sadrže pogreške koje je potrebno poznavati i kompenzirati. Sinkronizirana mjerenja fazora napona i struja moraju biti konzistentna i visoke raspoloživosti.

Upotreba sinkroniziranih mjernih jedinica za proračun parametara prijenosnih vodova u stvarnom vremenu mora zadovoljiti slijedeće uvjete:

- Visoka pouzdanost mjerenja: nesinkronizirana mjerenja fazora napona i struja ili mjerenja sa statusom 'loš' nisu upotrebljiva za proračun parametara vodova

- Visoka pouzdanost telekomunikacijskog sustava
- Prepoznavanje sklopnih operacija u EES-u

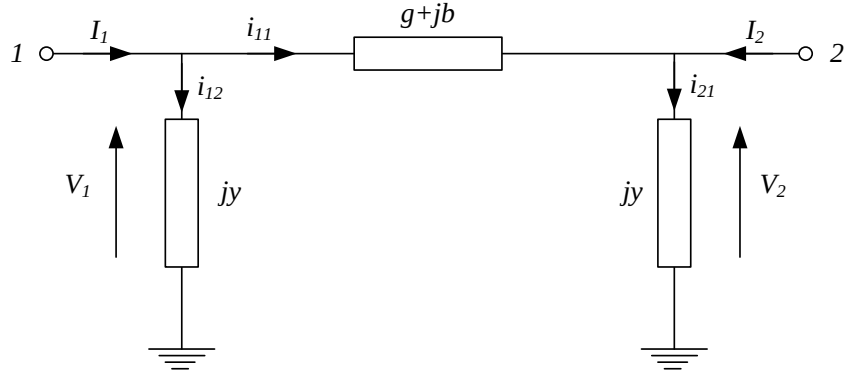
Centralni poslužitelj sustava za nadzor dijela EES-a (*eng. WAMS – Wide Area Monitoring System*) na osnovi sinkroniziranih mjerenja prikuplja podatke iz svih PMU jedinica ugrađenih u određenom sustavu. Rezolucija pristizanja mjerenja u poslužitelj najčešće je 20ms ili 100ms. U Hrvatskom Operatoru Prijenosnog Sustava koristi se rezolucija od 20ms, te se podaci (fazori napona čvorišta, struja grana i frekvencija) arhiviraju u centralnu bazu poslužitelja. PMU uređaji koji su ugrađeni s obje strane prijenosnog voda mjere struje u grani sa svake strane voda i napon čvorišta na mjestu ugradnje PMU jedinice. Svakih 20ms u centralni poslužitelj pristiže informacija o mjeranjima s obje strane voda. S obzirom na visoku rezoluciju mjerenja, može se pretpostaviti da se vrijednosti uzastopnih uzoraka mjerenja ne mijenjaju značajno, te je uz ovu pretpostavku, moguće postaviti model mjerenja višestrukih uzoraka mjerenja koji je definiran jednadžbom (2.1):

$$z(t_i) = h(x(t_i), p) + e(t_i), \quad i = 1 \dots n \quad (2.1)$$

pri čemu su:

- z vektor mjerenja koji sadrži uzorke mjerenja napona čvorišta i struja grana u trenutku t_i
- h vektor nelinearnih funkcija koji povezuje nepoznate varijable s mjeranjima;
- $x(t_i)$ vektor varijabli stanja;
- p vektor nepoznatih parametara prijenosnog voda
- e vektor koji sadrži mjernu grešku svakog uzorka u trenutku t_i

Uz pretpostavku homogenog voda, za model prijenosnog voda koristi se nadomjesna simetrična pi shema prijenosnog voda prikazana na slici (2.3).



Slika 2.3. Nadomjesna pi shema prijenosnog voda

Za matematički model voda koriste se serijska admitancija $g+jb$ i paralelna susceptancija jy . Uz poznate strujno naponske prilike na početku i kraju prijenosnog voda mogu se postaviti slijedeće jednadžbe:

$$I_1 = i_{11} + i_{12} = (V_1 - V_2)(g + jb) + V_1(jy) \quad (2.2)$$

$$I_1 = i_{21} - i_{11} = (V_2 - V_1)(g + jb) + V_2(jy) \quad (2.3)$$

$$V_1 = u_1 + jv_1 \quad (2.4)$$

$$V_2 = u_2 + jv_2 \quad (2.5)$$

Rastavljanjem jednadžbi (2.2) do (2.5) na realne i imaginarne vrijednosti postavlja se vektor mjerenja $z_x(t_i)$ koji sadrži mjerenja struja grana i napona čvorišta u pravokutnim koordinatama:

$$z_x(t_i) = [Re_{ti}\{I_1\} Im_{ti}\{I_1\} \dots Re_{ti}\{V_1\} Im_{ti}\{V_1\} \dots]^T \quad (2.6)$$

U predloženom algoritmu vektor mjerenja $z(t_i)$ uvećati će se za vektor nepoznatih parametara prijenosnog voda g, b i y :

$$z_p(t_i) = [g \ b \ y]^T \quad (2.7)$$

Iz jednadžbi (2.6) do (2.7) dobije se konačni vektor mjerenja $z(t_i)$:

$$z(t_i) = [z_x(t_i) \ z_p(t_i)]^T \quad (2.8)$$

Metodom najmanjih vaganih kvadrata iz jednadžbe (2.8) iterativnim postupkom računaju se parametri prijenosnog voda dok se ne dostigne zadovoljavajuća točnost.

U predloženom algoritmu mijenja se broj uzastopnih uzoraka mjerenja koji se uzimaju u obzir. Nadalje će se identificirati krajnji broj uzoraka mjerenja nakon kojeg povećanje broja uzoraka mjerenja ne utječe na točnost proračuna i vjerodostojne rezultate.

2.5 Automatsko vođenje elektroenergetskog sustava

Automatsko vođenje prijenosnog sustava podrazumjeva zajedničko automatsko djelovanje, zasnovano na funkcijama upravljanja, zaštite i mjerenja, u svrhu očuvanja zadanog stanja dijela prijenosne mreže. Zahtjevi na brzinu djelovanja su ekstremni, te je potrebno djelovati u stvarnom vremenu, uz vrlo sigurne i pouzdane telekomunikacijske puteve [4].

Za izradu projekta automatskog vođenja sustava potrebno je provesti proračuni tokova snaga i proračune struja kratkog spoja, u stacionarnom i dinamičkom stanju.

Sustav automatskog vođenja, sastoji se iz dijela opreme koja se instalira u centru vođenja - MC i opreme koja se instalira u određene objekte. Također automatsko vođenje sustava će koristiti i informacije iz drugih sustava korištenih za vođenje EES-a, kao npr. SCADA sustav, mjerenja izvan SDV-a, nadzor EES-a u stvarnom vremenu i drugih sekundarnih sustava (upravljanja i zaštite). Srce sustava čini više paralelnih procesora na kojima se obavljaju proračuni i donose odluke [5-6].

Sustav vođenja koristi za svoje potrebe dio telekomunikacijske infrastrukture. Potrebno je predvidjeti i za sustav automatskog vođenja prijenosnog sustava korištenje telekomunikacijske strukture istih karakteristika.

Centralni dio sustava automatskog vođenja ima specijalno prilagođenu programsku podršku, koja je dizajnirana s ciljem očuvanja cjelovitosti EES-a. Programska podrška u principu se sastoji od dva dijela, prvi dio ima rutine zasnovane na unaprijed analiziranim i proračunavanim varijantama (event

based), a drugu skupinu čine rutine zasnovane na mjerenjima nakon kojih se odrađuju određeni algoritmi (response based). Izbor korištenja algoritama ovisi o raspoloživom vremenu za reakciju.

Dio sustava montiran u Mrežnom centru, sastoji se od računala visoke raspoloživosti i pouzdanosti, sa programskom podrškom. Također dio centralnog dijela su određeni uređaji za upravljanje i zaštitu (IED uređaji) preko kojih se i prenose kriteriji i komande prema objektima.

IED uređaji instalirani u objektima imaju višestruke uloge. Služe za prihvatanje informacija u postrojenju, posredno u EES-u. Prikupljaju se informacije s analognih ulaza za mjerenja ključnih veličina u EES-u, prikupljaju se informacije o uklopnim stanjima. IED uređaji služe za prijenos komandi u dva smjera, prema samim aparatima u postrojenju i prema centralnom dijelu sustava.

3. MIKROMREŽE

Današnja elektroenergetska mreža obuhvaća više od 50 vrsta dalekovoda u uporabi, a još više u razvojnoj fazi. Nadzor, zaštita i vođenje prijenosne mreže zasnovane na sinkroniziranim mjerenjima (engl. *Wide Area Monitoring, Protection and Control* – WAMPAC) više nije apstrakcija, nego se primjenjuje u mnogim elektroprivredama [9]. Razvijeni su sustavi koji služe zaštiti cjelovitosti prijenosnoga EES-a, uključujući stabilnost, sprečavanje poremećaja i minimiziranje njihovih posljedica, jedinstvenoga naziva SIPS (engl. *System Integrity Protection Scheme*) ili SPS (engl. *Special Protection Systems*).

Napredne elektroenergetske mreže odnosno *Smart Grid* nova su generacija elektroenergetskih mreža, koje koriste nove dostupne tehnologije radi poboljšanja pouzdanosti i ekonomičnosti.

Napredne prijenosne mreže razvijaju se usporedno s tehnološkim inovacijama, u prijenosu i distribuciji i u IT i telekomunikacijskim inovacijama. Napredne mreže pružaju dvosmjerni tok energije u stvarnom vremenu, povezivanje svih sudionika u lancu proizvođača i korisnika električne energije – omogućuju bolju komunikaciju između proizvođača i operatora

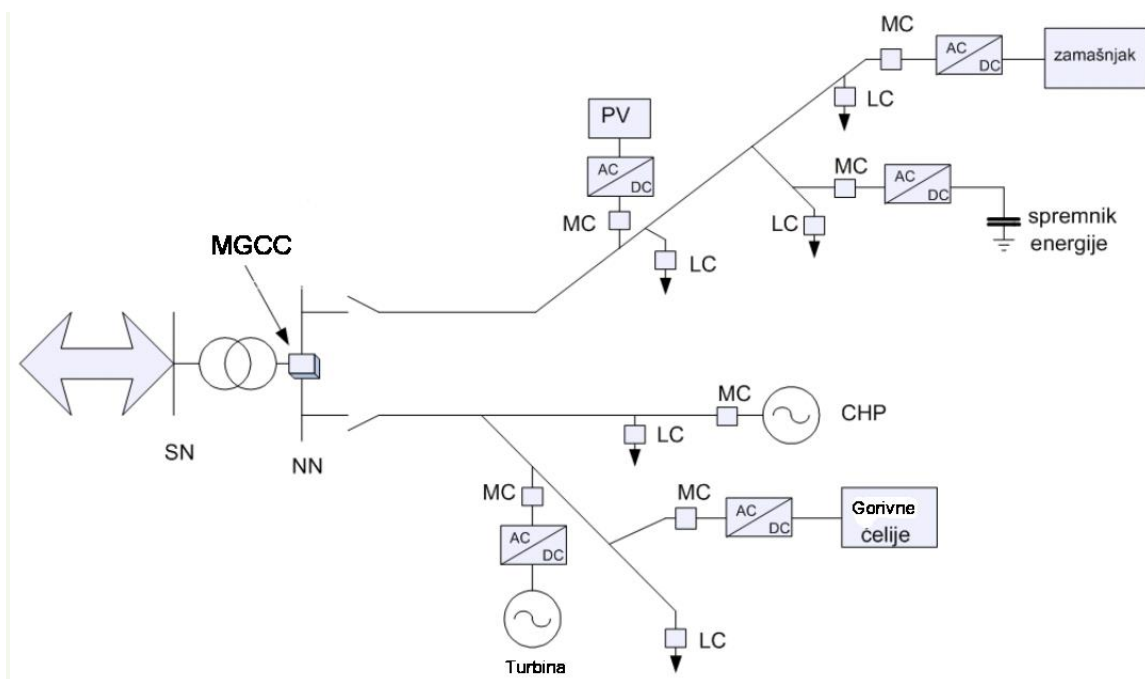
Mikromreža (engl. *Microgrid*) predstavlja elektroenergetski sustav koji se sastoji od distribuiranih izvora i trošila unutar određenih granica. U odnosu na ostatak mreže, mikromreža se ponaša kao zasebna cjelina. U normalnom pogonu je priključena na vanjsku mrežu ali može raditi i u otočnom pogonu, odnosno neovisno o vanjskom izvoru električne energije.

3.1 Osnovni koncept i arhitektura mikromreže

Napredne mikromreže (engl. *Smart Microgrids* ili μ Grid) moderni su, mali centralizirani elektroenergetski sustavi koji sadrže sve sastavnice kao i veliki elektroenergetski sustavi (proizvodnja – uobičajeno obnovljivi izvori električne energije; sustavi za skladištenje energije; prijenos – od izvora do potrošača; potrošači). Osnovno je svojstvo da se mikromreža može voditi kao i veliki EES te da može raditi otočno ili vezano za veliki EES. Također je bitno naglasiti da mikromreže imaju vlastite izvore proizvodnje električne energije – distribuirane

izvore električne energije (uobičajeno obnovljivi izvori energije). Kao i veliki EES, napredne mikromreže proizvode, prenose, skladište i distribuiraju električnu energiju i reguliraju tok električne energije prema potrošačima, ali na lokalnoj razini. Napredne mikromreže imaju točno određene granice, jedinstveno su upravljiv entitet i mogu raditi vezano na EES kao i u otočnom pogonu. Napredne mikromreže čine sastavnice – blokove napredne elektroenergetske mreže. Naime, s razine cjelokupnoga EES-a upravlja se lokalno ograničenim naprednim mikromrežama.

Određivanje optimalne veličine, vrste i lokacije mikromreža u razdjelnim mrežama važno je za korisnika mikromreže (upravljanje proizvodnjom i dobavom energije poslovni je oportunitizam) i operatora razdjelne mreže (predviđanje opterećenja i planiranje investicijskih ulaganja, pomoć pri održavanju konstantnoga napona i frekvencije). Metode korisne i upotrebljive u tržišnim uvjetima moraju se temeljiti na višekriterijskim metodama optimiranja i teoriji odlučivanja te moraju uključivati neizvjesnosti i odgovarajuće vrednovati moguće rizike. Slika 3.1 prikazuje tipičnu topologiju mikromreže [9-13].



Slika 3.1. Tipična topologija mikromreže [9]

gdje je:

- MGCC – centralni kontroler i nadzor mikromreže (u ovom se radu predlaže da to bude *Local Area Network*, odnosno nadzor i vođenje zasnovano na sinkroniziranim mjerenjima fazora napona i struje, što će biti opisano poslije) (engl. *MicroGrid Central Controller*). MGCC trebao bi imati tehničke i ekonomske funkcije da bi potpuno optimirao proizvodnju iz mikromreže.
- MC – kontroler izvora u mikromreži (engl. *Microsource Controller*)
- LC – kontroler potrošnje u mikromreži (engl. *Load Controller*).

3.2 Određivanje granica mikromreže

U literaturi vezanoj uz mikromreže može se uočiti da ne postoji konsenzus oko određivanja granica mikromreže prema kojima se neka mreža može definirati kao mikromreža.

Unatoč nekonzistentnosti u određivanju granica mikromreže, ipak je moguće odrediti zajedničke karakteristike koje se mogu koristiti za definiranje granica mikromreže:

- Jasno definirano područje, odnosno dio elektroenergetske mreže koji ima vlastiti sustav upravljanja kako proizvodnim jedinicama tako i potrošnjom. Na priključku mikromreže prema elektroenergetskom sustavu, mikromreža djeluje kao jedna proizvodna jedinica i jedno trošilo.
- Mikromreža mora sadržavati distribuirane izvore energije.

3.3 Podjela mikromreža

Prema karakteristikama korištene frekvencije mikromreže se dijele na izmjenične, istosmjerne i hibridne, kao što je prikazano slikom 3.2.



Slika 3.2. Podjela mikromreža prema frekvenciji [11]

Mikromreže imaju značajnu ulogu u modernizaciji EES-a i implementaciji naprednih tehnologija. Mikromreže se sukladno svemu navedenom oslanjaju na tehnologiji naprednih mreža.

Osnovne prednosti mikromreža se zasnivaju na pozitivnom utjecaju u sljedećim područjima:

- Učinkovitost:
 - Proizvodnja u blizini potrošnje – manji gubici i mogućnost korištenja toplinske energije
- Ekonomske aspekt:
 - Smanjenje vršne potrošnje (engl. *Peak Shaving*) i
 - Izmještanje potrošnje s vremena visokog opterećenja u vrijeme nižeg (engl. *LoadShifting*)
 - Manji utjecaj promjene cijena energije
- Sigurnost i pouzdanost opskrbe:
 - Osiguranje stalne opskrba značajnih potrošača iz lokalne proizvodnje
 - Sposobnost rada otočnog pogona

- Podržava rad elektroenergetskog sustava sa lokalnim upravljanjem značajnim trošilima, te se omogućava pružanje pomoćnih usluga EES-u.
- Optimalno upravljanje distribuiranom proizvodnjom
- Pouzdano i kvalitetno napajanje električnom energijom na lokalnoj razini
- Održivost
 - poboljšava i olakšava integraciju distribuiranih izvora (DI) koji su najčešće OIE i kogenaracija.

Iako postoje različiti električni sustavi koji se mogu primijeniti u mikromrežama i mikromreže u njima, općenito je najinteresantnija primjena na mrežnoj frekvenciji izmjeničnog napona za napajanje klasičnih trošila i pogon distribuiranih izvora, koji su i prije uspostavljanja mikromreže mogli raditi u sklopu klasične distribucijske mreže.

Prema današnjim iskustvima, postoje tri osnovne arhitekture mikromreža, a u ovisnosti su o lokaciji u distribucijskoj mreži, načinu priključka, vlasništva i svrsi [13], unutar kojih je moguće izdvojiti pet glavnih tržišnih segmenata primjene mikromreža [14]:

- Izdvojene (često privatne) poslovno-industrijske mikromreže:
 - Mikromreže za institucije i kampuse – bolnice, sveučilišta
 - Industrijske i komercijalne mikromreže
 - Vojne mikromreže
- Distribucijske mikromreže: Preoblikovanje javnih distribucijskih mreža u mikromreže
- Autonomne mikromreže: Mikromreže na otocima ili izoliranim mjestima u potpunosti odvojeni od prijenosne ili javne distributivne mreže.

4. NADZOR, ZAŠTITA I VOĐENJE MIKROMREŽA I DISTRIBUIRANIH IZVORA NA OSNOVU SINKRONIZIRANIH MJERENJA

4.1 *Nadzor, zaštita i upravljanje mikromreža*

Mikromreže, i općenito integracija distribuiranih izvora energije, predstavlja brojne izazove koje je potrebno uvažiti pri projektiranju nadzora, zaštite i upravljanja tako da ne bude značajnog utjecaja na trenutnu razinu pouzdanosti sustava i da potencijalne prednosti distribuirane proizvodnje budu u potpunosti ostvarene. Neki od ovih izazova dolaze od pogrešnih pretpostavki uobičajeno primijenjenih u konvencionalnim distribucijskim mrežama, dok su drugi rezultat problematike stabilnosti, dosad promatrane samo na razini prijenosnog sustava. Najznačajniji izazovi u zaštiti i upravljanju mikromrežama uključuju [15]:

- **Dvosmjerni tokovi snaga:** Kako su distribucijska vodna polja prvotno projektirana za jednosmjerne tokove snaga, integracija DI na niskonaponskim razinama može uzrokovati obrnute tokove snaga što dovodi do komplikacija u koordinaciji zaštite, neželjenih oblika tokova snaga, pojava struja kvara i stabilnosti napona.
- **Stabilnost:** Mogućnost pojave lokalnih oscilacija uslijed interakcije upravljačkih sustava DI, što zahtjeva temeljitu analizu stabilnosti pri malim poremećajima. Osim toga, analiza prijelazne stabilnosti je potrebna za osiguranje glatkog prijelaza između mrežnog i otočnog rada mikromreže (resinkronizacija).
- **Modeliranje:** Pri modeliranju konvencionalnih elektroenergetskih sustava, uobičajeno vrijede pretpostavke simetričnih uvjeta za sve tri faze, konstantnih tereta i primarno induktivnih prijenosnih vodova. Kod mikromreže ovi uvjeti nisu nužno valjani, a time je potrebno revidirati određene modele.
- **Mala inercija:** Za razliku od glavnog elektroenergetskog sustava u kojem postoji velik broj sinkronih generatora koji osiguravaju relativno veliku inerciju, mikromreže mogu pokazivati karakteristike sustava s malom inercijom, naročito kada imaju značajan udjel DI priključenih

preko elektroničkih pretvarača. Iako takva priključna sučelja mogu poboljšati dinamičke performanse, mala inercija sustava može dovesti do značajnih devijacija frekvencije u otopnom režimu rada ako ispravan upravljački mehanizam nije implementiran.

- **Nesigurnost:** Ekonomičan i pouzdan rad mikromreža zahtjeva određenu razinu koordinacije između različitih DI. Ova koordinacija postaje još zahtjevnija u izoliranim mikromrežama, gdje je potrebno održavati razmjer proizvodnje i potrošnje, uzimajući u obzir mogućnosti kvarova komponenti, uz nesigurnosti parametara poput profila potrošnje i vremenskih uvjeta. Ova nesigurnost je znatno veća nego u velikim elektroenergetskim sustavima uslijed manjeg broja trošila i visoke korelacije varijacije proizvodnje iz dostupnih izvora energije (ograničen je efekt usrednjavanja).

Upravljački sustav mikromreže mora moći osigurati pouzdan i ekonomičan rad mikromreže, ujedno prevladavajući prethodno spomenute izazove. Konkretno, poželjne značajke upravljačkog sustava čine [15]:

- **Upravljanje izlaznim veličinama:** Naponi i struje na izlazima različitih DI moraju pratiti svoje referentne vrijednosti te je potrebno osigurati pravilno prigušivanje oscilacija.
- **Ravnoteža snage:** DI u mikromrežama moraju biti sposobni prilagoditi se naglim pojavama neravnoteže radne snage, bilo viškova ili manjkova, održavajući promjene frekvencije i napona unutar prihvatljivih opsega.
- **Upravljanje potrošnjom:** Tamo gdje je moguće, potrebno je osmisliti odgovarajuće mehanizme kako bi se omogućilo upravljanje dijelom potrošnje. Dodatno, za elektrifikaciju izoliranih zajednica s mnogo OIE, aktivno sudjelovanje lokalne zajednice može pridonijeti dizajniranju isplativih strategija upravljanja potrošnjom koje poboljšavaju upravljanje opterećenjem/frekvencijom.
- **Ekonomski dispečing:** Odgovarajući dispečing DI koji sudjeluju u radu mikromreže može značajno smanjiti operativne troškove, ili povećati

profit. Pouzdanost sustava je isto tako pritom potrebno uzeti u obzir, naročito u otočnom pogonu.

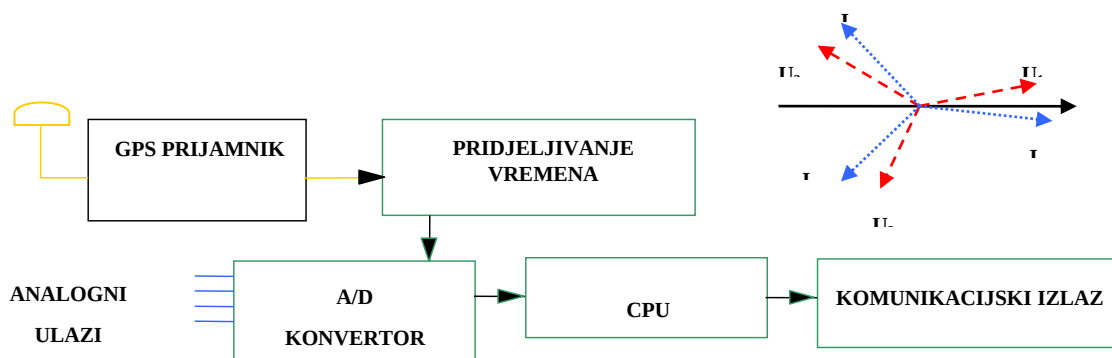
- **Prelazak između načina rada:** Željena značajka mikromreže je mogućnost rada u mrežnom i otočnom pogonu uz glatki prijelaz između ta dva načina rada. Različite upravljačke strategije mogu biti definirane za svaki od načina rada, stoga je algoritam za brzu detekciju otočnog rada vrlo važan za prilagođavanje upravljačke strategije.

4.2 Uređaji za sinkronizirano mjerenje fazora

Uređaji za sinkronizirano mjerenje fazora (eng. Phasor Measurement Unit) tehnološki su napredak u korištenju sistemskoga nadzora i čine njegovu osnovu. Ti su uređaji objedinili klasične uređaje sekundarnih sustava i potrebno novo funkcijsko svojstvo za prikupljanje podataka u stvarnom vremenu. Tek tako oblikovani omogućili su kvalitetnu realizaciju sistemskoga nadzora.

Razvoj tih ili sličnih uređaja započeo je ranih 1980-ih, uglavnom u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD). Početkom devedesetih objavljena je i prva norma američkoga strukovnog udruženja IEEE (eng. Institute of Electrical and Electronics Engineers). Norma IEEE 1344 o sinkrofazorima doživjela je više promjena, a najnovija verzija nosi naziv IEEE 1344-1995.

Razvojem uređaja za sinkronizirano mjerenje fazora izrađena je nova norma, koja je globalno prihvaćena (norma nosi oznaku C.37-118-2005).



Slika 4.1. Osnovna blok-shema uređaja za sinkronizirano mjerenje fazora

Kao i svaki drugi uređaj sekundarnih sustava, uređaji za sinkronizirano mjerenje fazora pretvaraju analogni signal u digitalni, uz određeno filtriranje i brzinu uzorkovanja. Ključna prednost uređaja za sinkronizirano mjerenje fazora pridjeljivanje je vremenske oznake za svaki uzorak. Tek se nakon toga informacija o struji, naponu i frekvenciji šalje prema daljinskim centrima vođenja. Glavne karakteristike uređaja za sinkronizirano mjerenje fazora su:

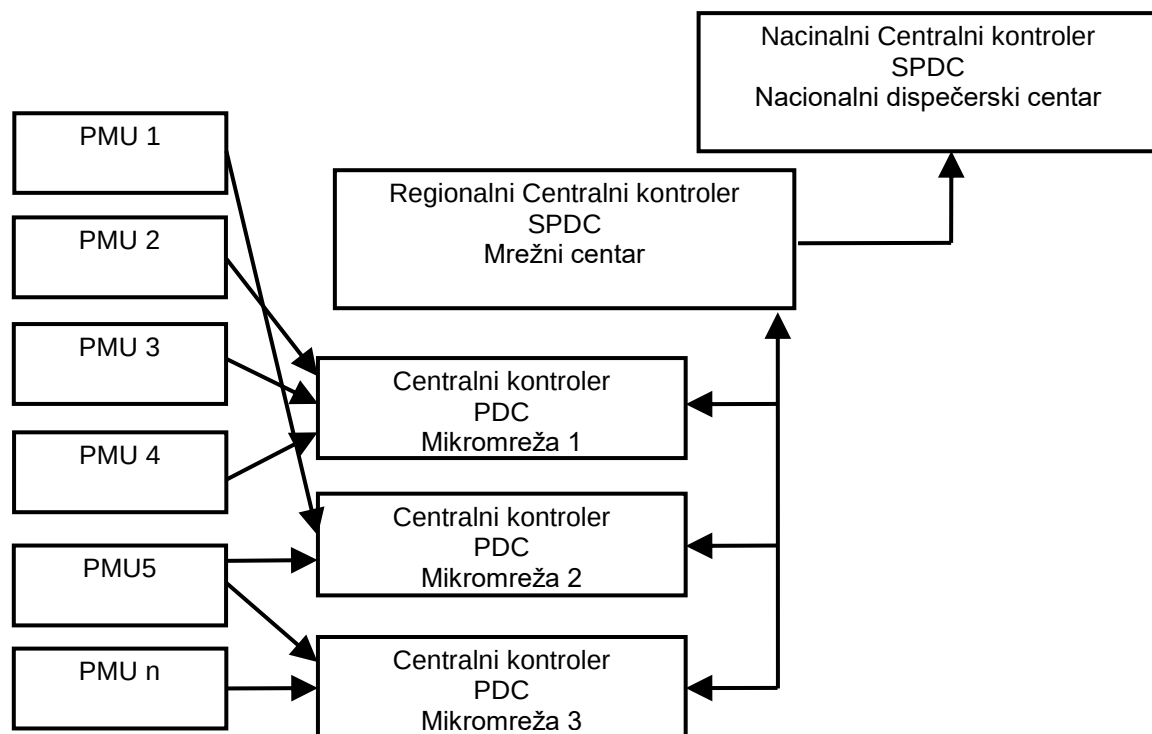
- brzina uzorkovanja od 10 do 50 uzoraka u sekundi
- uzorkovanje napona i struja
- pridjeljivanje točnog vremena uzorku, s točnošću od 10^{-6} (1 μ s)
- vrijeme obrade unutar sinkronizirane mjerne jedinice do nekoliko milisekundi
- prijenos direktne komponente, napona, struje i frekvencije
- lokalna mjerenja i lokalne funkcije
 - funkcija podnaponske zaštite
 - funkcija nadnaponske zaštite
 - funkcija podfrekventne zaštite
 - funkcija nadfrekventne zaštite
 - funkcija nadstrujne zaštite
 - o funkcije lokalnoga upravljanja i signalizacije
- brzine komunikacijskih ulaza/izlaza 10, 100 ili 200 MB
- lokalni prikaz mjerenja na uređaju.

4.3 Idejno rješenje nadzora i zaštite mikromreže i distribuiranih izvora zasnovano na sinkroniziranim mjerenjima

Procesom deregulacije i liberalizacije tržišta električne energije posebno je istaknut ekonomski aspekt nadzora, vođenja i zaštite EES-a, dok je bitniji tehnički dio stavljen u drugi plan što je u nekim slučajevima dovelo i do raspada sustava. Upravo zbog toga se u posljednje vrijeme potiče razvoj algoritama za nadzor, zaštitu i vođenje EES-a u stvarnom vremenu kako bi se postigla bolja pripremljenost sustava na razne neizbježne nepogode. Takav pristup vođenju sustava, s dostupnim informacijama u stvarnom vremenu, nudi optimalno vođenje sustava samim time što je omogućeno bolje iskorištavanje njegovih mogućnosti

bez ugrožavanja stabilnosti. Dosadašnji trend nadzora i vođenja EES-a temeljio se na sustavu za nadzor, upravljanje i prikupljanje podataka SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), koji pomoću udaljenih terminalnih jedinica RTU (Remote Terminal Unit) prikuplja informacije o efektivnim vrijednostima struja i napona uz određeno vremensko kašnjenje i ograničenu sliku dinamičkih uvjeta u mreži. Budući da takav sustav vođenja nije bio dovoljan za adekvatan pristup vođenju EES-a koji omogućuje pravovremeno djelovanje, razvojem tehnologije došlo je do sve veće primjene nadzora, zaštite i vođenja EES-a u stvarnom vremenu na osnovi sinkroniziranih mjerenja fazora, (eng. WAMPAC - *Wide Area Monitoring, Protection and Control*). Riječ je o sustavu koji će poslužiti kao dodatak postojećim SCADA sustavima, a koji se zasniva na ugrađenim uređajima za sinkronizirano mjerenje fazora (eng. PMU -). WAMPAC sustav radi u stvarnom vremenu budući da su izmjerene vrijednosti vremenski usklađene GPS sinkronizacijom s točnošću od jedne mikrosekunde. GPS sinkronizacija uz PMU uređaje predstavlja najznačajniju tehnološku novost te je samim time omogućen uvid u dinamičku sliku EES-a u stvarnom vremenu uz veću točnost mjerenja te brže (pravovremeno) djelovanje u slučaju nestabilnosti. Upravo na ovakvom sustavu nadzora, zaštite i vođenja mreže, zasniva se i idejno rješenje nadzora i zaštite distribucijske mikromreže i distribuiranih izvora. PMU uređaji imaju dakle ključnu ulogu u nadzoru, zaštiti i vođenju rada mikromreže te će pružati precizne informacije kako bi i omogućili isti uz izbjegnute probleme ispada pojedinih elemenata. Kako bi to bilo postignuto, PMU-ovi moraju biti izuzetno pouzdani i zamjenjivi od modela do modela, što će zahtijevati njihovo precizno kalibriranje.

Objedinjena ugradnja opisanih PMU uređaja na točno određena čvorišta u mikromrežama (proračuni tokova snaga i struja kratkog spoja za različita pogonska stanja, kao i dinamički odziv distribuiranih izvora) povezana sa opisanim centralnim kontrolerom na kojem se instalira programska podrška koja pomaže operatoru sustava u nadzoru, zaštiti i vođenju predstavlja idejno rješenje zaštite i vođenja mikromreže i distribuiranih izvora zasnovanog na sinkroniziranim mjerenjima (slika 4.2.).



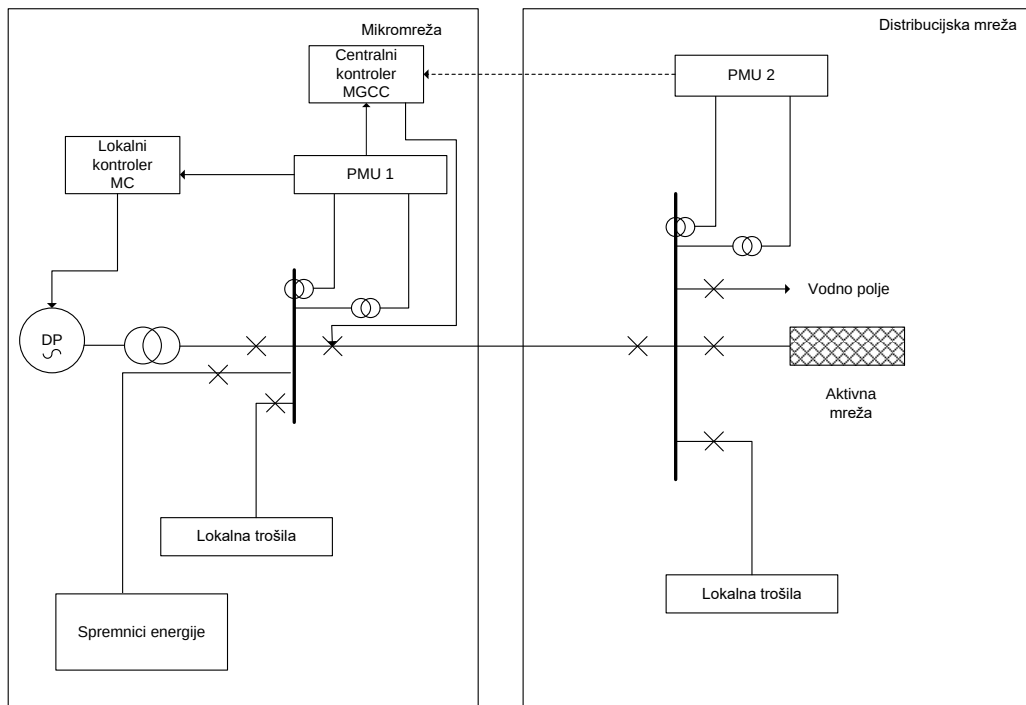
Slika 4.2. Blok shema idejnog rješenja zaštite i vođenja mikromreže i distribuiranih izvora zasnovanog na sinkroniziranim mjerenjima

Ukoliko u mikromreži postoji relativno mali broj PMU uređaja tada ih je moguće kvalitetno i sigurno povezati samo s jednim centralnim kontrolerom. Kada se taj broj poveća, odnosno povezuje se više područja potrebno je migrirati u pravcu više centralnih kontrolera, koji su na kraju objedinjeni s jednim regionalnim centralnim kontrolerom. Obrade podataka unutar centralnog kontrolera ne usporavaju bitno protok i brzinu slanja, kašnjenje je u tom slučaj nekoliko stotina milisekundi.

Centralni kontroleri prikupljaju i obrađuju podatke iz PMU uređaja, iz cijele mikromreže u stvarnom vremenu, čime se dobivaju trenutne snimke stanja mikromreže. Vrijeme za ostvarenja uvida u stanje mikromreže i osvježavanje podataka je manje od 200 ms [16]. Ekstrakcijom, obradom i upotrebom

ekspertnih algoritama (programska podrška) omogućava se i pravodobno informiranje i upozoravanje operatera u dispečerskim centrima.

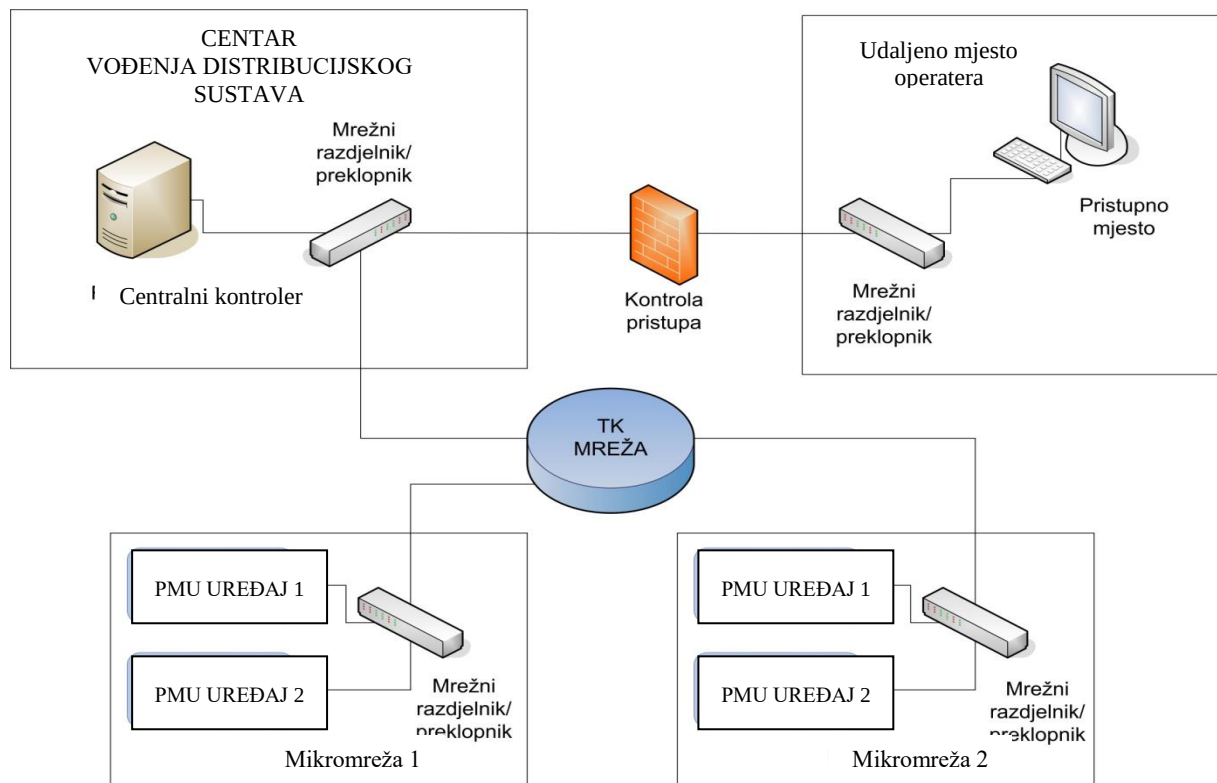
Shema nadzora, zaštite i vođenja zasebne mikromreže i pripadnog distribuiranog izvor energije (ili više njih) na osnovu sinkroniziranih mjerenja prikazana je na slici 4.3.



Slika 4.3. Shema nadzora, zaštite i vođenja pojedinačne mikromreže na osnovu sinkroniziranih mjerenja

Nadzor, zaštita i vođenje pojedinačne mikromreže u stvarnom vremenu moguće je s najmanje dva ugrađena PMU uređaja, minimalno jedan na strani mikromreže i jedan na strani distribucijske mreže – granica mikromreže. Ukoliko je u mikromreži prisutno više distribuiranih izvora poželjno je ugraditi PMU uređaj za svaki distribuirani izvor. Potrebno je ostvariti komunikaciju između PMU uređaja i lokalnog kontrolera, odnosno centralnog kontrolera. Komunikacija se ostvaruje putem optičke veze ukoliko postoji (položen optički kabel uz spojni vod mikromreže i distribucijske veze) ili bežičnim prijenosom. Obradom podataka

dobivenih od strane PMU uređaja centralni i lokalni kontroleri automatski djeluju u cilju sigurnog vođenja i zaštite mikromreže, kao i cjelokupnog nadziranog dijela distribucijske mreže. Na slici 4.4. prikazano je idejno rješenje nadzora, zaštite i vođenja distribucijskog sustava kao skupa mikromreža. PMU uređaj 1 nalazi se na strani distribucijske mreže, dok je ugradnja PMU uređaja 2 predviđena u mikromreži (uobičajeno u blizini distribuiranog izvora).



Slika 4.4. Idejno rješenje nadzora, zaštite i vođenja distribucijskog sustava kao skupa mikromreža [17]

Centralni (lokalni) kontroler

Osnovni parametri centralnog kontrolera su sljedeći [2]:

- Prikupljanje mjerenja fazora napona i struje iz sinkroniziranih mjernih jedinica
- Koreliranje i obrada podataka, arhiviranje mjerenih i izračunatih veličina, detekcija događaja i alarmi,
- mogućnost slanja podataka u vanjske sustave u svrhu razmjene podataka

- vizualizacija mjerenja i rezultata izračuna

Specifikacije kontrolera:

- Sustav bi trebao biti razvijen na Microsoft .NET 4.0 platformi te podržavati Microsoft Windows Server 2008/2012 operacijski sustav za poslužiteljske komponente i Microsoft Windows 7/8 za korisničke aplikacije.
- Grafičko sučelje za operatore sustava omogućuje prikaz izmjerenih, uvezenih, izračunatih i arhiviranih vrijednosti, te alarma i događaja kroz sljedeće vizualne module: Prikaz vektorskih dijagrama, topološki prikaz promatrane mreže s pridijeljenim izmjerenim i izračunatim vrijednostima na elektroenergetskom objektu (napon, struja, frekvencija, radna snaga, jalova snaga i prividna snaga), prikaz podataka iz arhive
- Alarmiranje i lista događaja – sustav upozorenja prati i signalizira promjene u radu mikromreže i distribucijske mreže u cjelini. Pragovi za upozorenja i alarme mogu se podešavati po svim parametrima za sve granice za stanje elektroenergetskog sustava i za sve proračune.
- Sustav podržava protokol IEEE C37.118 za prikupljanje i izvoz podataka
- Sustav koristi Microsoft SQL Server 2008 ili višu verziju RDBMS-a za spremanje konfiguracije svih komponenti sustava i modela mreže.
- U bazu podataka sprema se model mreže koji se koristi za proračune koji zahtijevaju poznavanje topologije mreže.
- Konfiguracijska baza i baza modela mreže podržava verzioniranje, tj. mogućnost spremanja više verzija konfiguracija i modela kako bi se održala konzistentnost arhive podataka uslijed promjena konfiguracije i promjene topologije mreže.
- Arhiva izmjerenih i izračunatih veličina sprema se u raspodijeljenu bazu (bazu koja može biti raspodijeljena na više fizičkih servera), a koju korisnik vidi kao jednu bazu. Ovime se postiže redundancija i segmentiranje podataka po serverima. Baza nema ograničenja vezana uz količinu podataka i vremenski period čuvanja podataka.
- Korisniku je omogućeno da bilo koji set podataka izveze u CSV format.

- Omogućeno je parcijalno arhiviranje na događaj u EES-u.

Što se tiče samih sustava za obradu podataka, oni moraju posjedovati sljedeće značajke:

- Obrada toka podataka u stvarnom vremenu bez spremanja podataka u procesu obrade
- Otpornost na nepravilnosti u toku podataka poput vrijednosti s pogrešnom vremenskom oznakom ili nedostajućih vrijednosti
- Obrada podataka na predvidljiv i ponovljiv način s ciljem dobivanja istog rezultata u slučaju nepromijenjenih vrijednosti
- Efikasno spremanje i čitanje povijesnih podataka
- Podržavanje automatskog prebacivanja na zamjensku komponentu u slučaju kvara s ciljem očuvanja kontinuirane obrade toka podataka
- Mogućnost automatske raspodjele obrade toka podataka na više jezgri procesora unutar jednog poslužitelja u svrhu povećanja performansi sustava
- Visoko optimizirana jezgra sustava koja omogućuje zahtijevani odziv u stvarnom vremenu za velike količine ulaznih podataka

Lokalni, centralni i kontroleri su smješteni u sklopu opreme i podrške za nadzor, zaštitu i vođenje mikromreže u lokalnim (MGCC), regionalnim te nacionalnim centrima upravljanja.

4.4 *Zaštita distribuiranih izvora od otočnog pogona*

Mrežnim pravilima elektroenergetskog sustava uređuje se pogon i način vođenja, razvoj i izgradnja te uspostavljanje priključaka na prijenosnu i distribucijsku mrežu u elektroenergetskom sustavu, kao i mjerna pravila za obračunsko mjerno mjesto, a pravila se primjenjuju na energetske subjekte i korisnike mreže.

Mrežnim pravilima se propisuju tehnički i pravni aspekti vezani uz djelovanje elektroenergetskog sustava.

S tehničke strane to su:

- Tehnički i drugi uvjeti za siguran pogon EES-a, i prijenosne i distribucijske mreže u svrhu pouzdane opskrbe električnom energijom zadovoljavajuće kvalitete.
- Postupci djelovanja pri pogonu EES-a u kriznim stanjima.
- Tehnički i drugi uvjeti za međusobno povezivanje i djelovanje mreža.
- Tehnički i drugi uvjeti za obračunsko mjerenje električne energije.

Pored toga, Mrežnim pravilima je uređeno i planiranje razvoja, ali i prava, obveze i odnosi između svih sudionika na tržištu električne energije u svrhu osiguranja učinkovitog i pouzdanog rada EES-a.

Otočni pogon je u Mrežnim pravilima definiran kao „pogonsko stanje proizvodne jedinice u kojem ona može sigurno podnijeti djelomično opterećenje u izdvojenom dijelu elektroenergetskog sustava“. Paralelni pogon s mrežom definiran je na način da elektrana ne smije imati nedopuštena povratna djelovanja na distribucijski mrežu, a uvjeti paralelnog pogona osiguravaju se međusobno usklađenim zaštitnim uređajima distribucijske mreže i elektrane [19]. Sukladno važećim Mrežnim pravilima Republike Hrvatske rad DI u otočnom pogonu nije dozvoljen. S toga su se razvile tehnike za otkrivanje otočnog rada za potrebe zaštite distribuiranog izvora od rada u slučajevima kada dio distributivne mreže u kojem se nalazi ostane odvojen od ostatka mreže.

4.5 Detektiranje i zaštita DI od otočnog pogona zasnovana na sinkroniziranim mjerenjima

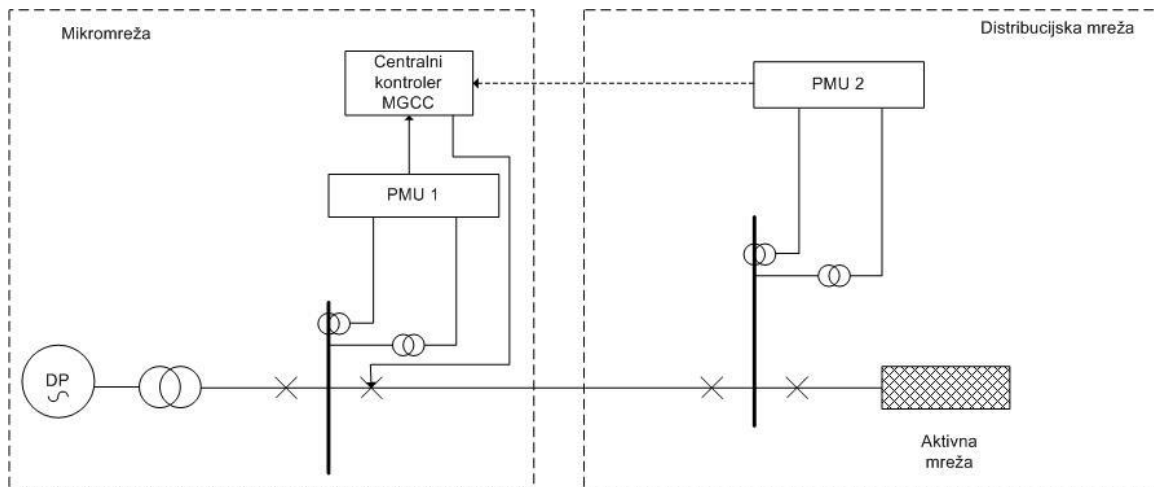
Prepoznavanje (detekcija) otočnog pogona zasnovana na sinkroniziranim mjerenjima oslanja se na mjerenja fazora napona ili frekvencije na strani distribucijske mreže (mjesto priključka DI) i na strani mikromreže, odnosno distribuiranog izvora.

Podaci o sinkroniziranim mjerenjima prikuplja kontroler (MCGG) u mikromreži putem optičke veze (ukoliko postoji) ili bežičnim putem (WiFi veza za kraće udaljenosti). U centralnom kontroleru se provodi usporedba vrijednosti fazora napona ili frekvencije, te se određuje postojanje otočnog pogona, ukoliko je

razlika fazora napona (prvenstveno se odnosi na kut napona) ili razlika frekvencije veća od zadane vrijednosti. Zadana vrijednost razlike fazora napona ili frekvencije potrebno je odrediti na osnovu teorijskih analiza dinamičkih promjena za različita pogonska stanja distribucijske mreže i mikromreže (otočni pogon, kvarovi u distribucijskoj mreži “blizu” mikromreže i “daleko” od mikromreže).

Algoritam za prepoznavanje otočnog pogona na osnovi razlike fazora napona

Algoritam za prepoznavanje otočnog pogona djeluje na osnovi razlike fazora napona, odnosno razlike kuteva napona. U ovoj metodi, odvajanje mikromreže, odnosno distribuiranog izvora od distribucijske mreže detektira se izvršenjem algoritma u centralnom kontroleru koji koristi sinkrofazorske podatke (fazore napona) iz dva releja (1. na pragu distribuiranog izvora i 2. na strani distribucijske mreže, slika 4.5) [23].

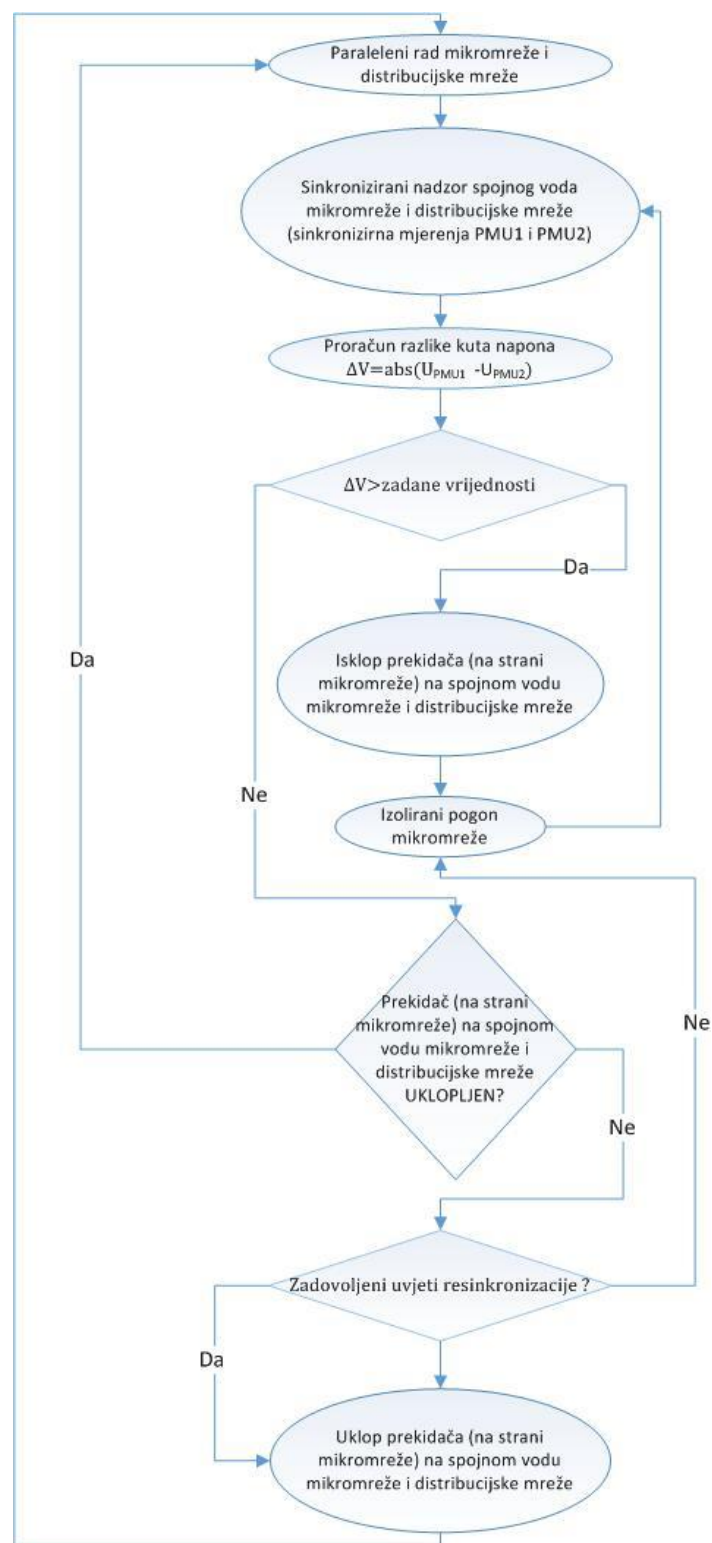


Slika. 4.5. Shema spoja za prepoznavanja otočnog pogona na osnovi razlike fazora napona

Koriste se dvije tehnike za prepoznavanje otočnog pogona na osnovu sinkroniziranih mjerenja fazora napona [23 - 25]:

Razlika kuta napona –uspoređuje se razlika između kuta napona distribuiranog izvora (odnosno kuta napona na sabirnicama mikromreže) i kuta napona na

sabirnicama distribucijske mreže na koju je spojena mikromreža ili distribuirani izvor, sa zadanom vrijednošću. Ako je razlika kuta veća od zadane vrijednosti, mikromreža (distribuirani izvor) je u otočnom pogonu, te kontroler se šalje naredbu prekidaču za isključivanje distribuiranog izvora. Na slici 4.6. prikazan je dijagram toka algoritma za prepoznavanje i zaštitu distribuiranih izvora (mikromreža) od otočnog pogona, a vezan je uz oznake na slici 4.5. Uvjeti resinkronizacije predstavljaju zaseban algoritam.



Slika 4.6. Dijagram toka algoritma za prepoznavanje i zaštitu distribuiranih izvora (mikromreža) od otočnog pogona

5. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA PRIMJENE IDEJNOG RJEŠENJA NA MIKROMREŽU S KOGENERACIJSKIM POSTROJENJEM

5.1 Tehnički opis mikromreže – elektrane na biomasu SLAVONIJA OIE

Idejno rješenje nadzora, zaštite i vođenja distribuiranih izvora i mikromreža primjenjeno je na mikromreži tvrtke Slavonija OIE d.o.o. iz Slavonskog Broda. U mikromreži tvornice tvrtke Slavonija OIE d.o.o. za drvenu preradu (Tvornica parketa i Tvornica namještaja) priključena je elektrana na biomasu s generatorom INDAR, prividne snage $S=6.000$ kVA i faktora snage $\cos \varphi=0,85$ na priključnom naponu 6,3 kV. Generator je preko blok-transformatora 6,3/10,5 (21) kV, snage 6.000 kVA, spojen kabelom na 10 kV rasklopište distribucijske mreže pod nadzorom HEP ODS-a. Vlastita potrošnja kogeneracije iznosi 716 kVA. Radna snaga na stezaljkama generatora iznosi 4.660 kW. Generator je trofazni, sinkroni, opremljen beskontaktnim sustavom uzbude i regulacije napona, a postrojenje je opremljeno tako da se omogući predaja snage u mrežu s faktorom snage od minimalno $\cos \varphi = 0,85$. Veza između generatora i distribucijske mreže ostvarena je preko blok transformatora 6,3/10(21) kV $\pm 2 \times 2,5\%$, što omogućuje u budućnosti prijelaz na distribucijski napon 20 kV.

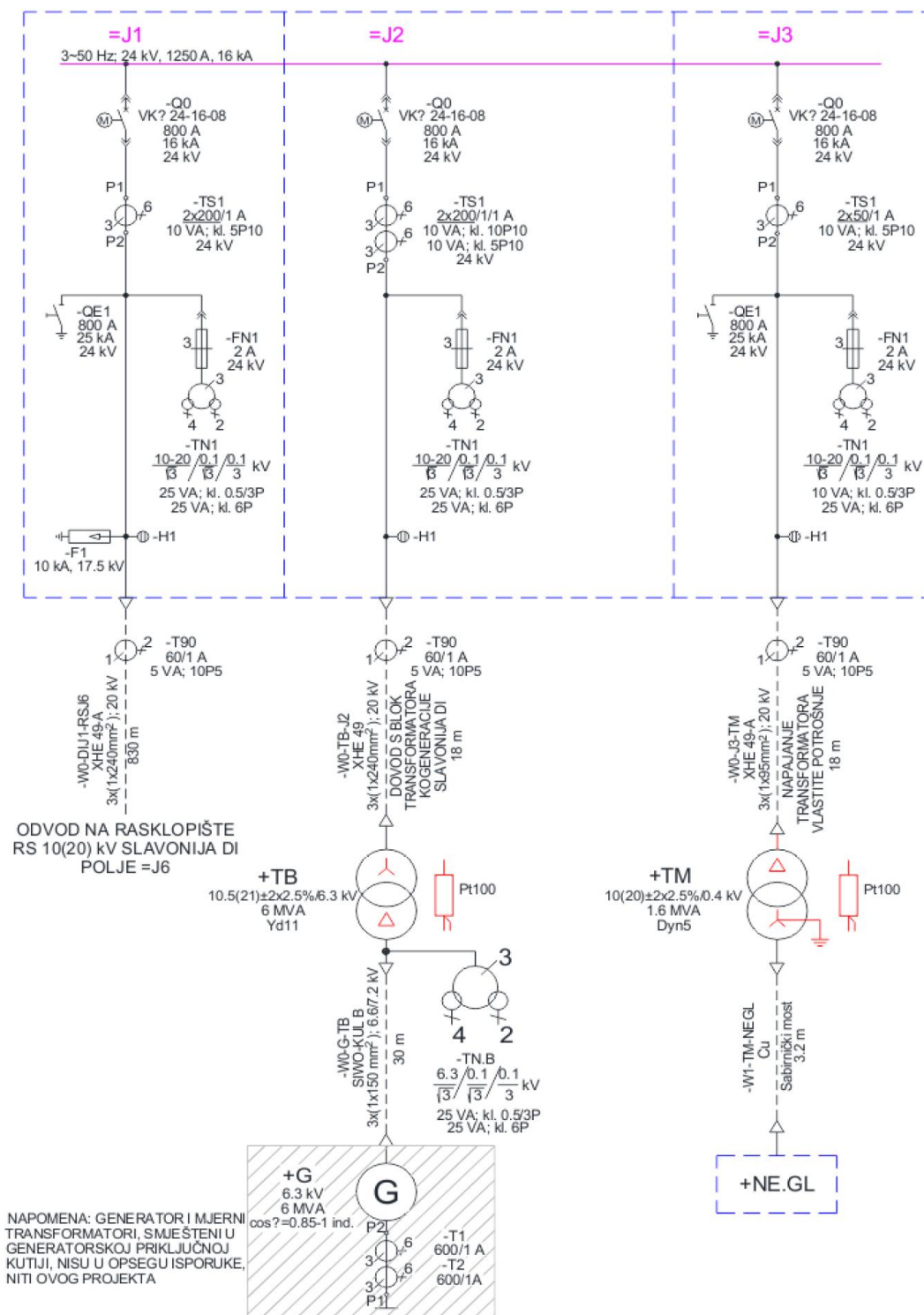
Postrojenje vlastite potrošnje kogeneracijskog postrojenja sastoji se od sljedećih, neovisno napajanih podsustava s vlastitim podrazdjelnicima na 0,4 kV: kotlovsko postrojenje, deponij i transport biomase, turbinsko postrojenje i elektro-filter.

Na slici 5.1. prikazana je jednopolna shema postrojenja promatrane elektrane na biomasu, a na slici 5.2 prikazana je shema raslopišta 10 kV distribucijske mreže TS Sl. Brod 2 pod nadzorom HEP ODS-a, na koju je spojena mikromreža tvornice DI Slavonija, te na slici 5.3. promatrana distribucijska mreža u okolini mikromreže DI Slavonija.

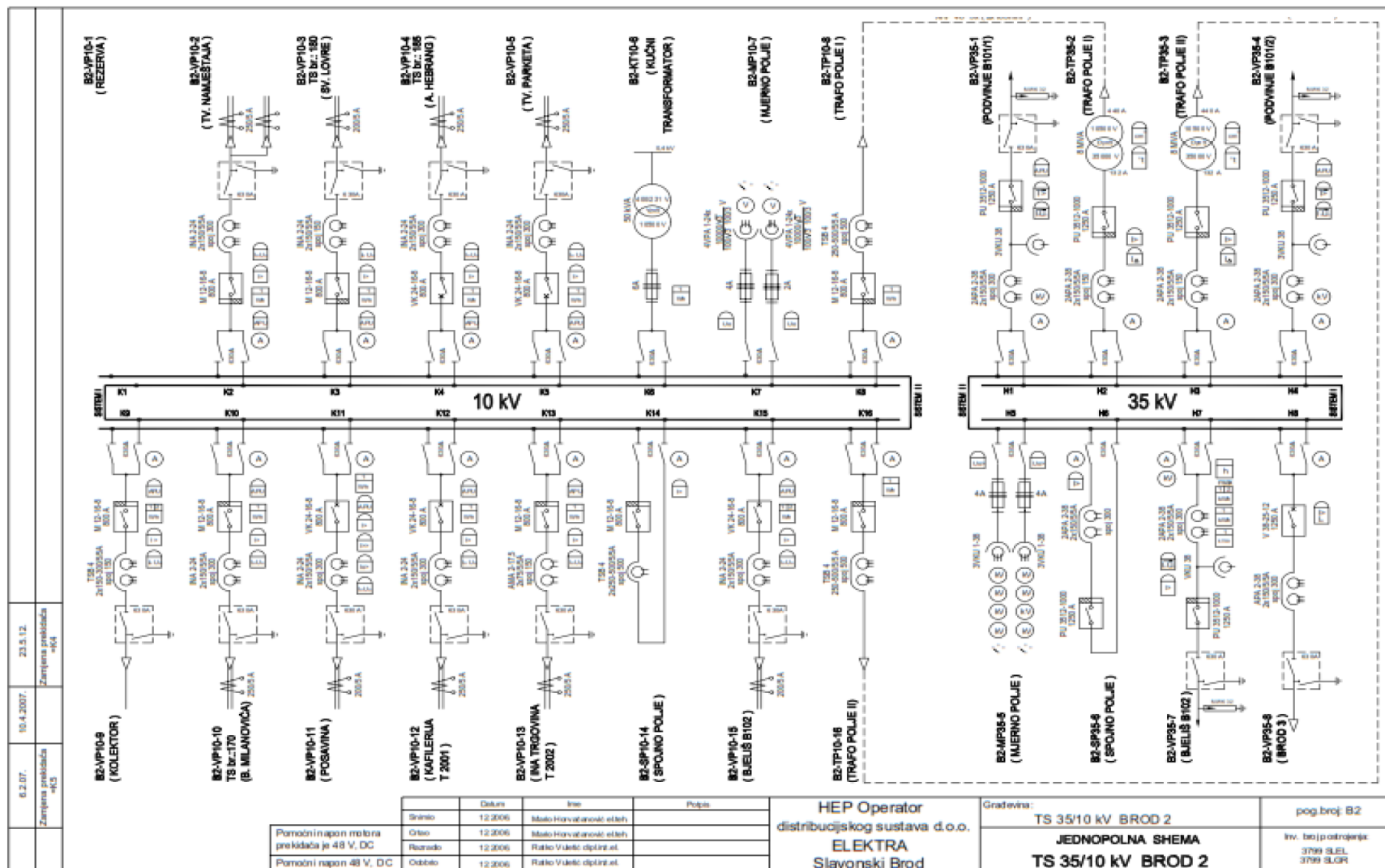
U TS 35/10 kV Brod 2 postoje dva 10 kV izvoda (Tvornica parketa i Tvornica namještaja) koji napajaju isključivo potrošnju tvornice Slavonija OIE. Budući da je 10 kV mreža tvornice prstenasta, u normalnom je pogonu isklopljen izvod Tvornica parketa.

U prilogu 1 navedeni su podaci o generator, blok – transformatoru elektrane, kao

i svim elementima mikromreže, TS Brod 2 i okolne distribucijske mreže.



Slika 5.1. Jednopolna shema postrojenja elektrane na biomasu



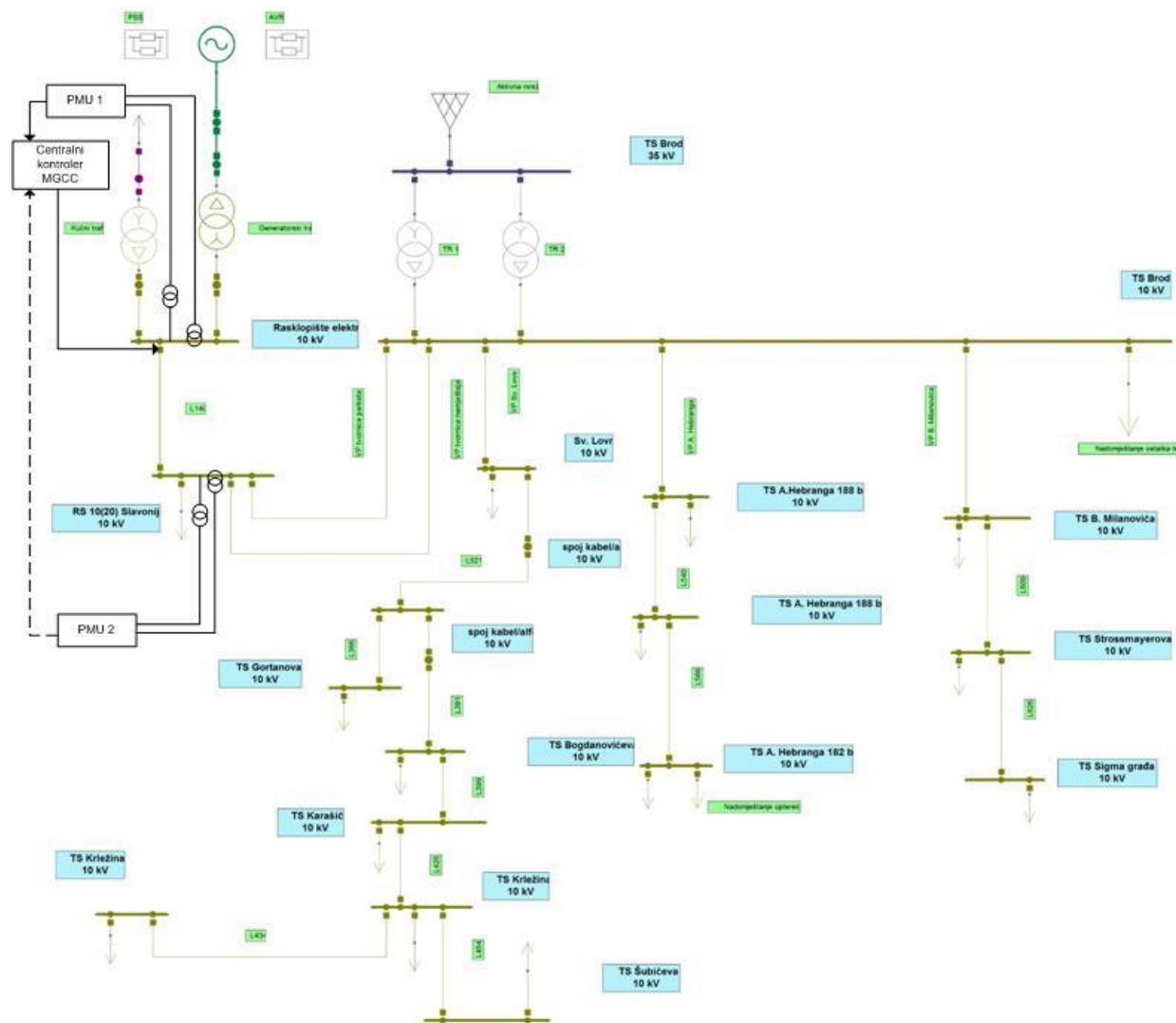
Slika 5.2. Shema raslopišta 10 kV distribucije mreže

5.2 Nadzor, zaštita i vođenje mikromreže DI Slavonija

Mikromreže DI Slavonija obuhvaća elektranu na biomasu, vlastitu potrošnju elektrane, te Tvornicu namještaja i Tvornicu parketa (na slici 5.2. označeno crvenim pravokutnikom). Na slici 5.3. prikazano je idejno rješenje nadzora, zaštite i vođenja mikromreže DI Slavonija zasnovano na sinkroniziranim mjerenjima. Idejno rješenje je zasnovano na teorijskim podlogama iznesenim u poglavlju 4. Posebnu pažnju zahtjeva izrada centralnog kontrolera koji bi trebao zadovoljiti specifične zahtjeve za nadzor mikromreže kao što su:

- Prepoznavanje i zaštita mikromreže od otočnog pogona (na slici 5.3. označeno je djelovanje centralnog kontrolera na prekidač spojnog voda mikromreže i distribucijske mreže, na strani mikromreže)
- Resinkronizacija u slučaju izoliranog pogona mikromreže i distribucijske mreže,
- Regulacija frekvencije i napona u slučaju izoliranog pogona s funkcijom podfrekvencijskog rasterećenja mikromreže

Izrada centralnog kontrolera mikromreže nije predmet ovog rada, već je potrebno za svaku pojedinu mikromrežu izraditi zaseban centralni kontroler koji bi obuhvatio prethodno navedene zahtjeve, te specifične zahtjeve koje određuje svaka pojedina mikromreža. U ovom radu posebno je obrađena teorijska analiza otočnog pogona Mikromreže DI Slavonija koja predstavlja ulazne parametre za izradu funkcije prepoznavanja i zaštite mikromreže DI Slavonija od otočnog pogona, kao funkcije centralnog kontrolera.



Slika 5.3. Idejno rješenje nadzora, zaštite i vođenja mikromreže DI Slavonija

5.3 Tehno – ekonomska analiza rada mikromreže DI Slavonija

Za provedbu teorijske analize rada i pogonskih stanja mikromreže DI Slavonija bilo je potrebno izraditi matematički model mikromreže i okolne distribucijske mreže. Provedeni su proračuni struja kratkog spoja za karakteristične točke u mikromreži i distribucijskoj mreži. Provedena je dinamička analiza na predmetnom matematičkom modelu za različita pogonska stanja koja uključuju promjenu topologije distribucijske mreže, promjenu opterećenja distribucijske mreže i otočnog pogona mikromreže.

Posebna analiza posvećena je zaštiti od otočnog pogona rada elektrane DI SLAVONIJA, te tehno-ekonomska analiza ugradnje nadzora, zaštite i vođenja mikromreže DI Slavonija zasnovano na sinkroniziranim mjerenjima vezano uz zaštitu od otočnog pogona.

Sadašnja predložena zaštita od otočnog pogona je realizirana uređajem proizvođača DEIF tip GPU 3 koja ima zaštite: pod i nad naponsku, pod i nad frekvencijsku i zaštitu od pomaka kuta napona ($U<$, $U>$, $f<$, $f>$ i $\Delta\theta$). Zaštita djeluje na prekidač u **polju J2** (slika 5.1.). Od svih funkcija DEIF GPU3 koriste se samo zaštitne funkcije brze pod/nad naponske $U<<$, $U>>$; brze pod/nad frekvencijske $f<<$, $f>>$, i zaštite od pomaka kuta napona $\Delta\theta>$. U tablici 5.1. prikazana su podešenja zaštite od otočnog pogona (crveno i žuto) u odnosu na zadana tvornička podešenja.

Tablica 5.1. Podešenje zaštite od otočnog pogona

OPIS	PODEŠENJE	PRIMARNA VRIJEDNOST	VRIJEME ZATEZANJA	DJELOVANJE
Podnaponska $U<<$	92 % 85%	9,2 kV 8,5 kV	0.15 s	Isklop
Nadnaponska $U>>$	108 % 115 %	10,8 kV 11,5 kV	0.10 s	Isklop
Podfrekvencijska $f<<$	49,5% 49 %	49,5 Hz 49,0 Hz	0.10 s	isklop
Nadfrekvencijska $f>>$	50,5 % 51,0 %	50,5 Hz 51,0 Hz	0.10 s	Isklop
Zaštita od otočnog rada, (pomak kuta napona $\Delta\theta$)		9° 7°	0.00 s	isklop
ROCOF ili df/dt zaštita		1.5 Hz/s	0,00 s	signal

Od značaja je promatrati događaje prikazane u Tablici 5.2. i odzive kuta napona na sabirnicama generatora u elektrani i 10 kV sabirnicama u TS Brod 2.

Tablica 5.2. Odziv kuta napona na sabirnicama generatora u elektrani i 10 kV sabirnicama u TS Brod 2

Događaj	ΔU_g [p.u.]	ΔU_{Brod2} [p.u.]
3KS na sabirnici TS A. Hebranga 188	0,7	0,7
3KS na sabirnici 10 kV TS Brod 2	0,4	0,08
Ispad VP Tvornica namještaja i VP Tvornica parketa (otočni pogon)	2	0,05

Gdje je:

- ΔU_g [p.u.] - Promjena kuta napona na sabirnicama generatora
- ΔU_{Brod2} [p.u.] - Promjena kuta napona na 10 kV sabirnicama generatora

Može se uočiti da će prilikom nastanka poremećaja bliskih mikromreži, a koji nisu otočni pogon, doći do promjene kuta napona na sabirnicama generatora elektrane na biomasu, što bi prema sadašnjoj zaštiti od otočnog pogona moglo dovesti do pogrešnog djelovanja te zaštite i zaustavljanja rada predmetne elektrane.

Prema trećem slučaju iz Tablice 5.2., odnosno simulacijom otočnog pogona dolazi do značajne razlike između promjene kuta napona na sabirnicama elektrane i promjene kuta napona 10 kV sabirnica u TS Brod 2.

U Tablici 5.3. prikazani su troškovi ugradnje nadzora, zaštite i vođenja mikromreže DI Slavonija zasnovano na sinkroniziranim mjerenjima.

Tablica 5.3. Troškovi ugradnje nadzora, zaštite i vođenja mikromreže DI Slavonija zasnovano na sinkroniziranim mjerenjima

A. MATERIJAL					
Broj stavke	Opis stavke	Jedinica mjere	Količina	Jedinična cijena (kn)	Ukupna cijena stavke (kn)
1	Uređaji za sinkronizirano mjerenje PMU	kom	2	37.500,00	75.000,00
2	Centralni kontroler - PDC	kom	1	4.000,00	4.000,00
	UKUPNO A. MATERIJAL:				79.000,00
B. RAD					
Broj stavke	Opis stavke	Jedinica mjere	Količina	Jedinična cijena (kn)	Ukupna cijena stavke (kn)
3	Izrada programske podrške za zaštitu od otočnog pogona	kpl	1	10.000,00	10.000,00
4	Parametriranje programskog paketa	kpl	1	1.000,00	1.000,00
5	Parametriranje sklopovske opreme	kpl	1	1.000,00	1.000,00
6	Puštanje sustava u pogon koje obuhvaća montažu i spajanja PMU i PDC uređaja s isporukom instalacijskih i komunikacijskih kabela, kabelaških kanala, sitnog montažnog materijala i pribora prema tehničkoj specifikaciji te funkcionalno ispitivanje i izradu izvještaja o funkcionalnosti sustava	kpl	1	1.500,00	1.500,00
	UKUPNO B. RAD:				13.500,00
	UKUPNO A+B				92.500,00

Prema podzakonskom aktu "Pravilnik o korištenju obnovljivih izvora energije i kogeneracije (NN 63/12), DI SLAVONIJA potpada u grupu c.II. Prodajna cijena električne energije određena je u iznosu:

$$C_{ELEN}=1,15 \text{ kn/kWh}_{EL} \text{ ili oko } 0,154 \text{ €/kWh}_{EL}$$

Predviđena je ukupna godišnja proizvodnja električne energije DI SLAVONIJA u iznosu od 32.800.000,00 kWh/god, te je uz navedenu otkupnu cijenu električne energije predviđen ukupni godišnji prihod od prodaje električne energije u iznosu od 37.720.000,00 kn.

Radna snaga generatora DI SLAVONIJA je 4.660 kW, što znači da je proizvodnja električne energije u jednom satu 4.660 kWh, odnosno dobit je 5.359 kn.

Prilikom isključenja elektrane s mreže, moguć je ponovni uklop uz uvjete :

- Vrućeg starta
- Toplog starta
- Hladnog starta

Različiti uvjeti određuju i vrijeme trajanja između isključenja elektrane do ponovnog priključenja na mrežu - ΔT .

Obzirom na izneseno vrijeme ΔT je:

- 45 minuta za vrući start
- 90 minuta za topli start
- 10 sati za hladni start

Ukoliko dođe do ispada elektrane zbog pogrešne prorade postojeće zaštite vrijeme neisporučivanja električne energije povlači financijske gubitke:

- 3.495 kn u slučaju vrućeg starta
- 6.990 kn u slučaju toplog starta
- 46.600 kn u slučaju hladnog starta

Ugradnjom nadzora, zaštite i vođenja elektrane zasnovanog na sinkroniziranim mjerenjima spriječili bi se neželjeni ispadi, te bi povrat investicije bio:

- Nakon 26 neželjenih ispada u slučaju vrućeg starta
- Nakon 13 neželjenih ispada u slučaju toplog starta
- Nakon 2 neželjena ispada u slučaju hladnog starta

Potrebno je navesti da su uzeti u obzir samo financijski gubici obzirom na neisporučenu električnu energiju, dok postoje i financijski gubici obzirom i na neisporučenu toplinsku energiju.

DI Slavonija je izvijestila da su ukupni gubici zbog neisporuke električne energije uzrokovani ispadom s mreže iznosili 1.300.000,00 kn. Utvrđeno je da je oko 50% ispada s mreže bilo uzrokovano neadekvatnom proradom zaštite.

Obzirom na navedeno, te uzimajući i dodatne tehničke dobiti u nadzoru pogona elektrane u stvarnom vremenu, može se zaključiti da je opravdana ugradnja nadzora, zaštite i vođenja elektrane zasnovanog na sinkroniziranim mjerenjima.

6. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljeno idejno rješenje nadzora i zaštite mikromreže (odnosno distribuiranog izvora) na osnovu sinkroniziranih mjerenja. Opisana je shema idejnog rješenja koja obuhvaća centralni kontroler, uređaje za sinkronizirano mjerenje fazora, komunikacijske veze, te hijerarhijsku strukturu nadzora, zaštite i vođenja.

Izrada centralnog kontrolera zahtjeva posebnu pažnju, te zasebnu projektnu dokumentaciju, dok je u radu detaljno razrađena jedna od funkcija centralnog kontrolera – zaštita od otočnog pogona, te je predstavljen algoritam zaštite, kao i dijagram toka zasnovan na sinkroniziranim mjerenjima.

Predstavljeni rezultati nadzora i zaštite mikromreže, kao i zaštite od otočnog pogona su primijenjivi na realne mikromreže.

Provedena je tehno-ekonomska analiza vezana uz ugradnju nadzora, zaštite i vođenja mikromreže DI Slavonija zasnovano na sinkroniziranim mjerenjima i zaštite od otočnog pogona. Iskazana je opravdanost ugradnje nadzora, zaštite i vođenja mikromreže zasnovano na sinkroniziranim mjerenjima obzirom na tehničke dobiti, kao i na ekonomski aspekt posebno vezan uz zaštitu od otočnog pogona.

LITERATURA

- [1] V.Terzija, G.Valverde, D.Cai, P.Regulski, V.Madani, J.Fitch, S.Skok, M.Begovic, A.Phadke, Wide Area Monitoring, Protection and Control of Future Electric Power Networks, Proceedings of the IEEE, Volume: 99, Issue: 1
- [2] S. Skok, I. Šturlić, R. Matica, Multipurpose Open System Architecture Model of Wide Area Monitoring, PowerTech, od 28. lipnja do 2. srpnja 2009., Bukurešt, Rumunjska
- [3] D. Novosel, K. Vu, V. Centeno, S. Skok, M. Begović, Benefits of Synchronized-Measurement Technology for Power-Grid Applications, HICSS 2007, 3. - 6. siječnja 2007., Havaji
- [4] S. Skok, V. Kirinčić, R. Rubeša, K. Frlan, Z. Zbunjak, Dinamička analiza pogona dijela elektroenergetskog sustava Prijenosnog područja Rijeka obzirom na rad VE Vrataruša, 9. simpozij o sustavu vođenja EES-a, 8-10 studenog 2010, Zadar, Hrvatska
- [5] Razvoj prijenosne mreže na području Prijenosnog područja Rijeka u razdoblju 2009-2030., studija, prosinac 2009., Institut za elektroprivredu i energetiku d.d.
- [6] Idejni projekt automatskog vođenja dijela Prijenosnog područja Rijeka, elaborat, siječanj 2011., Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci
- [7] V. Skendzic, R. Moore, Extending the Substation LAN Beyond Substation Boundaries: Current Capabilities and Potential New Protection Applications of Wide-Area Ethernet, Power System Conference and Exposition 2006, Atlanta, Georgia, SAD
- [8] K. Schwarz, Standard IEC 61850 for Substation Automation and Other Power System Applications, International Conference of Power Systems and Communications Infrastructures for the Future, September 2002, Peking, Kina.
- [9] ŽivićĐurović, M.; Kezele, B.; Škrlec, D.: „Primjenjivost mikromreža u distribucijskoj mreži HEP ODS-a“, CIRED, 2. Savjetovanje, Umag, 2010.

- [10] Alinjak, T.: „Optimizacija pogona distribucijske mreže sa značajnim udjelom distribuiranih izvora“, Kvalifikacijski doktorski ispit, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2012.
- [11] Mariam, L.; Basu, M.; Conlon, M. F.: „A Review of Existing Microgrid Architectures“, Hindawi Publishing Corporation, Journal of Engineering, Article ID 937614, Dublin, 2013.
- [12] Li, X.; Xin, A.; Wang, Y.: „Study of singlephase HFAC Microgrid based on MATLAB/Simulink“, in Proceedings of the IEEE Conference on Electric Utility Deregulation Restructuring and Power Technologies (DRPT '11), pp. 1104–1108, 2011.
- [13] Škrlec, D.: „Arhitektura i vođenje mikromreža – Koncepti i primjenjivost u Hrvatskoj“, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2010.
- [14] „Microgrids: White paper“, SIEMENS, 2011., s Interneta, 18. kolovoza 2015., www.siemens.com/download?DLA17_8
- [15] Olivares, D. E.: „Trends in Microgrid Control“, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 5, NO. 4, 2014.
- [16] Skok, S., Kirinčić, V.: Projekt ugradnje PMU uređaja u cilju automatskog vođenja dijela prijenosnog EES-a PrP Rijeka, Zagreb, 2011., Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci
- [17] Idejni projekt automatskog vođenja dijela Prijenosnog područja Rijeka, elaborat, siječanj 2011., Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci
- [18] Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva: „Mrežna pravila Elektroenergetskog sustava“, (NN 36/06), Zagreb, 2006.
- [19] Ivas, M.: „Otočni pogon distribuiranih izvora sastavljenih od mrežnih izmjenjivačkih jedinica“, Kvalifikacijski doktorski ispit, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2013.
- [20] Bruendlinger, R. i dr.: „State of the art solutions and new concepts for islanding protection“, Project Dispower, Austria, 2006
- [21] Teodorescu, R.; Lissere, M.; Rodriguez, P.: „Grid converters for photovoltaic and wind power systems“, John Wiley & Sons Ltd, UK, 2011., ISBN: 978-0-

- [22] E. O. Schweitzer et al., "Synchrophasor-Based PowerSystem Protection and Control Applications", ModernElectric Power Systems 2010.
- [23] R.J. Best et al. , "Synchrophasor Broadcast Over InternetProtocol for Distributed Generator Synchronization", IEEETransanction on Power Delivery 2010, Vol. 25, no.4, pp.2835-2841, Oct. 2010.
- [24] M. Patel, "PJM SynchroPhasor Technology DeploymentProject", EEI Conference 2010.
- [25] Qian, C. i dr.: „PMU based Islanding Detection Method for Large Photovoltaic Power Station“, IEEE PEDS, Sydney, Australia, 2015.

POPIS SLIKA

- Slika 2.1. Prikaz operatorske konzole modernog WAMPAC sustava - SynchroShield
- Slika 2.2. Odnos estimatora stanja s ostalim aplikacijama u centru vođenja
- Slika 2.3. Nadomjesna pi shema prijenosnog voda
- Slika 3.1. Tipična topologija mikromreže
- Slika 3.2. Podjela mikromreža prema frekvenciji
- Slika 4.1.. Osnovna blok-shema uređaja za sinkronizirano mjerenje fazora
- Slika 4.2. Blok shema idejnog rješenja zaštite i vođenja mikromreže i distribuiranih izvora zasnovanog na sinkroniziranim mjerenjima
- Slika 4.3. Shema nadzora, zaštite i vođenja pojedinačne mikromreže na osnovu sinkroniziranih mjerenja
- Slika 4.4. Idejno rješenje nadzora, zaštite i vođenja distribucijskog sustava kao skupa mikromreža
- Slika 4.5. Shema spoja za prepoznavanja otočnog pogona na osnovi razlike fazora napona
- Slika 4.6. Dijagram toka algoritma za prepoznavanje i zaštitu distribuiranih izvora (mikromreža) od otočnog pogona
- Slika 5.1. Jednopolna shema postrojenja elektrane na biomasu
- Slika 5.2. Shema promatrane distribucijske mreže u okolini mikromreže DI Slavonija
- Slika 5.3. Idejno rješenje nadzora, zaštite i vođenja mikromreže DI Slavonija

POPIS TABLICA

Tablica 5.1. Podešenje zaštite od otočnog pogona

Tablica 5.2. Odziv kuta napona na sabirnicama generatora u elektrani i 10 kV sabirnicama u TS Brod 2

Tablica 5.3. Troškovi ugradnje nadzora, zaštite i vođenja mikromreže DI Slavonija zasnovano na sinkroniziranim mjerenjima

POPIS OZNAKA I KRATICA

AC	Izmjenični napon/struja
CHP	Kombinirana proizvodnje toplinske i električne energije
DC	Istosmjerni napon/struja
DI	Distribuirani izvor energije
EEM	Elektroenergetska mreža
EES	Elektroenergetski sustav
EU	Europska Unija
f	Frekvencija
FN	Fotonapon
H	Konstanta inercije sustava
HE	Hidroelektrane
HVDC	Visokonaponski istosmjerni prijenos električne energije
ICT	Informatičke i komunikacijske tehnologije
IEU	Inteligentni elektronički uređaj
LC	Lokalni kontroler
LVRT	Prolazak kroz kvar/propad napona (engl. <i>LowVoltageRideThrough</i>)
MAS	Višeagentni sustav (engl. <i>Multi-Agent System</i>)
MGCC	Centralni upravljač mikromreže
mHE	Male hidroelektrane
NDZ	Zona neprepoznavanja (engl. <i>Non-detection zone</i>)
NN	niski napon
ODS	Operater distribucijskog sustava
OIE	Obnovljivi izvori energije
OPS	Operater prijenosnog sustava
P	Radna (aktivna) snaga
PCC	Zajedničko priključno čvorište (engl. <i>Point of Common Coupling</i>)
PLC	Komunikacija putem energetske vodova (engl. <i>Power Line Communication</i>)
PMU	Uređaj za sinkronizirana mjerenje (engl. <i>Phasor Measurement Unit</i>)

Q	Jalova (reaktivna) snaga
RH	Republika Hrvatska
SA	Servisni Agenti
SDV	Sustav daljinskog vođenja
SN	srednji napon
STS	statička sklopka
U	Napon
VN	visoki napon

PRILOG 1

Tablica 1. Podaci o generatoru

Sinkroni generator Tip LSA-710-K/4 Bez prigušnih polova bez četkica		
Nazivna snaga	6000 kVA	
Napon	6300 V	
Struja	549,9 A	
Cos φ	0,85	
Frekvencija	50 Hz	
Brzina	1500 o/min	
Max brzina	1800 o/min	
Br. polova	4 pola	
Br. faza	3	
Spoj u zvijezdu		
Temperatura ambijanta	40 °C	
Klasa izolacije	H/H	
Vrsta hlađenja	IC 31	

Trajni rad			
Reaktancije		nezasićene	zasićene
Sinkrona reaktancija po d-osi	X_d	269 %	206,1 %
Sinkrona reaktancija po q-osi	X_q	265,1 %	169 %
Prijelazna reaktancija po d-osi	X'_d	27,4 %	25,9 %
Početna reaktancija po d-osi	X''_d	19,1 %	16,7 %
Početna reaktancija po q-osi	X''_q	26,4 %	20,8 %
Inverzna reaktancija	X_2	22,2 %	18,5 %
Nulta reaktancija	X_0	11,1 %	9,7 %
Rasipna reaktancija statora	X_l	10,8 %	10,1 %
Vremenske konstante na 115 °C			
Tranzijentna vremenska konstanta direktne osi pri praznom hodu		$T_{d0'}$	1,93 s
Subtranzijentna vremenska konstanta direktne osi pri praznom hodu		$T_{d0''}$	0,03 s
Subtranzijentna vremenska konstanta kvadratne osi pri praznom hodu		$T_{q0'}$	0,17 s
Tranzijentna vremenska konstanta direktne osi pri kratkom spoju		T_d'	0,24 s
Subtranzijentna vremenska konstanta direktne osi pri kratkom spoju		T_d''	0,02 s
Subtranzijentna vremenska konstanta kvadratne osi pri kratkom spoju		T_q''	0,02 s
Vremenska konstanta armature pri kratkom spoju		T_a	0,08 s

Djelatni otpor pri 20 °C					
Djelatni otpor armaturnih namota pri protjecanju DC struje po fazi	R_s	35,65 mΩ			
Djelatni otpor namota rotora pri protjecanju DC struje	R_r	270,7 mΩ			
Podaci kratkog spoja					
Omjer kratkog spoja	K_C	0,49			
Početna izmjenična struja trofaznog kratkog spoja (rms vrijednost)	I_K^*	6,0 p.u.			
Maksimalna istosmjerna struja trofaznog kratkog spoja (vršna vrijednost)	I_S	15,2 p.u.			
Početni moment kod dvofaznog kratkog spoja	M_{K2}	296,9 kNm			
Učinkovitost pri različitim opterećenjima					
Cos φ	1/4	2/4	3/4	4/4	5/4
0,850	95,2	96,8	97,0	97,0	96,8
1,000	96,1	97,4	97,7	97,6	97,5

Red. broj	Oznaka	ENERGETSKI TRANSFORMATOR	Količina
		Naziv opreme	
1	+TB	Trofazni suhi blok transformator s spojem generatora na NN strani, prespojiv na VN strani, za unutarnju montažu i normalne uvjete rada prema standardu IEC 60076-11, uz prirodno hlađenje zrakom na nadmorskoj visini ispod 1000 m, slijedećih tehničkih karakteristika: Vrsta transformatora suhi blok transformator Tipska oznaka TBE6000-24x Instalacija unutarnja montaža Norma IEC 60076-11 Nazivna snaga 6000 kVA Način hlađenja AN Broj faza 3 Nazivna frekvencija 50 Hz Nazivni napon VN 21(10.5) kV, spoj u Y Nazivni napon NN 6.3 kV, spoj D Nazivna linijska struja NN namota (6.3 kV) 550 A Tip regulacije na VN strani bez napona Opseg regulacije $\pm 2 \times 2.5 \%$ Oznaka spoja Yd11 Ispitni napon (50 Hz, 1 min.) VN/NN 50/20 udarni napon (1.2/50 μs) VN/NN 125/60 Temperatura okoline 40 °C Dopušteno povišenje srednje temperature namota 100 K Temperaturni razred izolacijskih materijala 155 °C (F) Napon kratkog spoja 6 % Gubici praznog hoda 9500 W Gubici zbog opterećenja (75 °C) 35000 W Priključci na VN strani vijčani Priključci na NN strani plosni Dimenzije – duljina 2730 mm širina 1540 mm visina 2990 mm Masa transformatora 12200 kg Nivo zvuka Lp(A) ≤ 73 dB	kom. 1

Red. broj	Oznaka	ENERGETSKI TRANSFORMATOR	Količina
		Naziv opreme	
		Nivo zvuka Lw(A) ≤90 dB Zaštita od korozije bojanje, RAL 9005 Oprema: - Pt100 sonde u NN namotu Napomena: Zaštitni relej T-154 nije u opsegu +TB, biti će ugrađen u SN polje transformatora =J2 tip: TBE6000-24x, "Končar"	
2	+TM	Trofazni suhi transformator prespojiv na VN strani, za unutarnju montažu i normalne uvjete rada prema standardu IEC 60076-11, nazivne snage definirane prema IEC standardima, uz prirodno hlađenje zrakom na nadmorskoj visini ispod 1000 m, slijedećih tehničkih karakteristika: Vrsta transformatora suhi transformator Tipaska oznaka TBE1600-24x Instalacija unutarnja montaža Norma IEC 60076-11 Nazivna snaga 1600 kVA Način hlađenja AN Broj faza 3 Nazivna frekvencija 50 Hz Nazivni napon VN 20(10) kV, spoj u D Nazivni napon NN 0.4 kV, spoj y Tip regulacije na VN strani bez napona Opseg regulacije ± 2x2.5 % Oznaka spoja Dyn5 Ispitni napon (50 Hz, 1 min.) VN/NN 50/3 udarni napon (1.2/50 μs) VN/NN 125/- Temperatura okoline 40 °C Dopušteno povišenje srednje temperature namota 100 K Temperaturni razred izolacijskih materijala 155 °C (F) Napon kratkog spoja 6 % Gubici praznog hoda 3100 W Gubici zbog opterećenja (75 °C) 13950 W	kom. 1

OPTEREĆENJA U PROMATRANOM DIJELU MREŽE

Izvod	Struja [A]
RS Slavonija DI	121
Svetog Lovre	88
Andrije Hebranga	144
Kolektor	27
Bože Milanovića	40
Posavina	103
Velekem	21
INA Trgovina	4
UKUPNO (na 35kV)	100

Izvod	Naziv TS	Nazivna snaga [kVA]	Izračunato opterećenje [A]
Tvornica namještaja	Tvornica parketa	2 x 630	571
	Impregnacija	630	385
	Novi finir	2 x 1000	906
	Pilana	630	284
	Tvornica namještaja	2 x 630	569
Sv. Lovre	Sv. Lovre	250	199
	Gortanova	160	129
	Bogdanovićeve	630	506
	Karašička	400	322
	Krležina	630	508
	Krležina 10	400	323
	Šubićeva 52	250	201
A.Hebranga	A.Hebranga blok 8	630	390
	A.Hebranga blok 5	2 x 630	781
	A.Hebranga blok 6	2 x 630	782
	A.Hebranga blok 2	630	381
	Kneza Trpimira	400	248
	Lutvninka	630	392
	Veterinarska	250	155
	PZC	400	249
	Osječka 1	250	155

B.Milanovića	B.Milanovića	400	315
	Strossmayerova	630	495
	Sigma građa	250	197
Kolektor	V.Karasa	160	104
	Brod tekstil	250	163
	Kolektor 1	500	331
	Poloj	100	65
Bjeliš (Kafilerija)	Silos 2	400	23
	Silos 1	2 x 630	75
	Hladnjača 1	2 x 1000	120
	Hladnjača 2	2 x 1000	120
	Hladnjača 3	2 x 1000	120
	Kafilerija	2 x 1000	120
	RT Centar Bjeliš	630	36
	Velekem	50	3
INA Trgovina	INA trgovina	400	35
	INA Ruščica	2 x 400	70
Posavina	Vrbskih Žrtava 14	160	160
	Braće Radić	400	403
	Vrbskih Žrtava 201	160	160
	Ruščica centar	400	407
	Ruščica Čretni	400	407
	Ruščica sjever	100	103
	Ruščica 86	250	253
	Ruščica	160	159
	Čuvarnica	50	50
	G.Bebrina 59	100	103
	G.Bebrina 119	100	120
	Klakar 29	100	103
	Klakar 109	100	103