

**PRIMJENA SINHRONIZIRANIH FAZORSKIH MJERENJA U SREDNJE NAPONSKOJ  
DISTRIBUTIVNOJ MREŽI SA PRIKLJUČENIM MALIM HIDROELEKTRANAMA****APPLICATION OF SYNCHRONIZED PHASOR MEASUREMENTS IN THE MEDIUM VOLTAGE  
DISTRIBUTION NETWORK WITH SMALL HYDRO POWER PLANTS CONNECTED**

Sakib JUSIĆ, JP “Elektroprivreda BiH” d.d. Sarajevo – Podružnica “Elektrodistribucija” Zenica, BiH

**KRATAK SADRŽAJ**

U skladu sa svjetskim trendovima, te postojećim razvojem opreme novi način nadzora i zaštite je usmjeren prema upotrebi sinhroniziranih fazorskih mjerenja, čime se omogućava nadzor pogona i zaštita distributivne mreže u realnom vremenu, kao i nadzor rada distribuiranih izvora, te zaštita od ostrvskog pogona distribuiranih izvora. Sistemi su zasnovani na ugrađenim uređajima za mjerenje fazora napona i struje u određenim čvorištima elektroenergetskog sistema, odnosno mjerenja amplitude i ugla u realnom vremenu (PMU – Phasor Measurement Unit) i centralnim kontrolerom sa programskom podrškom sa kojim ostvaruju kontinuiranu komunikaciju vezu. Ova platforma omogućava realnu dinamičku sliku elektroenergetskog sistema, veću tačnost mjerenja, brzu razmjenu podataka i stvaranje algoritama za koordinaciju i brzo djelovanje u slučaju pojave nestabilnosti i može se povezati sa postojećim sistemima za nadzor elektroenergetskog sistema (SCADA sistem - Supervisory Control and Data Acquisition).

Sistem radi u realnom vremenu tako što su izmjerene vrijednosti vremenski usklađene GPS sinhronizacijom s tačnošću od jedne mikrosekunde.

Cilj ovog rada je da se kroz analizu funkcionisanja implementiranih sinhroniziranih fazorskih mjerenja u dijelu 20 kV distributivne mreže sa priključenom grupom malih hidroelektrana na području Općine Zavidovići valoriziraju tehničke i posljedično ekonomske prednosti kojima se uz zadržavanje postojeće infrastrukture osigurava sigurnost i pouzdanost pogona distributivnog sistema sa priključenim distribuiranim izvorima.

**Ključne riječi:** sinhronizirana fazorska mjerenja, distributivna mreža, distribuirani izvori, mala hidroelektrana, nadzor i zaštita

**ABSTRACT**

In line with world trends and existing equipment developments, the new monitoring and protection method is geared towards the use of synchronized phasor measurements, which enables real-time monitoring of the drive and protection of the distribution network, as well as monitoring of the operation of distributed sources and protection against island drive of distributed sources. The systems are based on the built-in devices for measuring voltage and current phasors in certain nodes of the power system, i.e measurement of amplitude and angle in real - time (PMU - Phasor Measurement Unit) and a central controller with software with which they have continuous communication connection. This platform provides a real dynamic image of the power system, greater measurement accuracy, rapid data exchange and the creation of algorithms for coordination and rapid action in the event of instability, and can be linked to existing SCADA system - Supervisory Control and Data Acquisition.

The system works in real - time by measuring the values synchronized with GPS synchronization with an accuracy of one microsecond.

The aim of this paper is to evaluate the technical and consequently economic advantages that ensure the safety and reliability of the distribution system with connected distributed systems by analyzing the functioning of implemented synchronized phasor measurements in a part of 20 kV distribution network with a group of small hydropower plants in the municipality of Zavidovici sources.

**Key words:** synchronized phasor measurements, distribution network, distributed sources, small hydropower, control and protection

## UVOD

Tokovi snaga u distributivnim mrežama bez distribuiranih izvora energije su jednosmjerni, odnosno teku u jednom smjeru i to od mjesta preuzimanja električne energije pa do potrošača. Priključenjem nekog distribuiranog izvora energije, dolazi do promjene smjerova tokova snaga, distributivni vodovi postaju dvostrano napajani, a distributivna mreža nije više pasivna već postaje aktivna (*Vahl, Ruther, Filho (1)*).

Porast nivoa penetracije distribuiranih izvora u distributivnoj mreži unosi još veće promjene tokova snaga i otežava održavanje naponskih nivoa u propisanim granicama, što uz sezonske i dnevne varijabilnosti opterećenja i proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora, dodatno usložnjava pogon distributivne mreže.

Uticaj distribuiranih izvora na distributivnu mrežu stoga može biti pozitivan, ali i negativan. Najčešće se posmatra uticaj distribuiranih izvora na gubitke, naponske prilike i kvalitet električne energije.

Da li će novopriključeni izvor imati pozitivan ili negativan uticaj na pogon distributivne mreže zavisi od više faktora: mjesta priključka izvora, snage priključenog izvora, konfiguracije mreže, dnevnih dijagrama opterećenja mreže, itd. Prema važećim zakonskim odredbama distributer je obavezan preuzeti svu električnu energiju proizvedenu iz obnovljivih izvora, što postavlja nove zahtjeve za funkcije nadzora, upravljanja i zaštite distributivne mreže.

Aktivna distributivna mreža u kojoj se intenzivno primjenjuju nove tehnologije, informatizacija i automatizacija čini naprednu mrežu. Povećanje udjela distribuirane proizvodnje mijenja konvencionalne načine planiranja i vođenja distributivne mreže. S jedne strane, distribuirani izvori čine planiranje mreže još složenijim, dok s druge strane, ostale funkcionalnosti napredne mreže omogućuju prihvat distribuiranih izvora uz odgođena ulaganja u povećanje kapaciteta mreže. Stoga je potrebno razviti optimizacijske modele koji će se ugraditi kao funkcije naprednih mreža te na taj način omogućiti optimalno vođenje distributivne mreže. Time će se povećati pouzdanost napajanja krajnjih potrošača, a gubici u elektroenergetskom sistemu svesti na minimum.

U skladu sa svjetskim trendovima, te postojećim razvojem opreme novi način nadzora i zaštite je usmjeren prema upotrebi sinhroniziranih fazorskih mjerenja, čime se omogućava nadzor pogona i zaštita distributivne mreže u realnom vremenu, kao i nadzor rada distribuiranih izvora, te zaštita od ostrvskog pogona distribuiranih izvora.

## USLOVI ZA PRIKLJUČENJE I POGON DISTRIBUIRANIH IZVORA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI

Uslov za korištenje distributivne mreže je zadovoljenje tehničkih i pogonskih uslova u skladu s Mrežnim pravilima i Opštim uslovima za isporuku električne energije. Navedene uslove osigurava operator distributivnog sistema (ODS) svim korisnicima distributivne mreže.

Prema Mrežnim pravilima ODS JP EP BiH (2), priključenjem novog proizvođača električne energije niti u jednoj tački distributivne mreže, niti u situaciji maksimalnog niti minimalnog opterećenja, ne smije doći do poremećaja naponskih prilika, odnosno napon u svim tačkama smije varirati u obimu  $\pm 10\%$  nazivne vrijednosti za SN mrežu, odnosno od  $-10\%$  do  $+5\%$  nazivne vrijednosti za NN mrežu.

U normalnim pogonskim uslovima standardni obim frekvencije iznosi  $50,00 \pm 0,05$  Hz, a maksimalno odstupanje iznosi  $\pm 200$  mHz. U poremećenim uslovima pogona frekvencija se može kretati od 47,5 do 49,8 Hz i 50,2 do 51,5 Hz.

Proizvođač preuzimanje reaktivne energije iz distributivne mreže treba svesti na minimum, a u skladu sa izdatom elektroenergetskom saglasnosti.

Za odabranu tačku priključenja u distributivnoj mreži, distribuirana elektrana treba zadovoljiti osnovne i energetske kriterije mreže.

Osnovni kriteriji su:

- Kriterij dozvoljene snage uzimajući u obzir brzu promjenu napona
- Kriterij snage kratkog spoja
- Kriterij flikera
- Kriterij dozvoljenih struja viših harmonika

Energetski kriteriji su:

- Kriterij dozvoljene promjene napona u mreži
- Kriterij dozvoljenog termičkog opterećenja vodova
- Kriterij dozvoljenog termičkog opterećenja transformatora

U pogledu provjere zadovoljenja kriterija **dozvoljene snage uzimajući u obzir brzu promjenu napona**, promjena napona na mjestu priključenja distribuirane elektrane pri njenom uključenju ili isključenju ne smije biti veća od 4% (u slučaju priključenja na SN mrežu), odnosno 5% (u slučaju priključenja na NN mrežu).

Energetski kriteriji moraju biti zadovoljeni za sve scenarije pogona distributivne mreže sa distribuiranom elektranom, a analiza se vrši za slučaj maksimalne potrošnje u distributivnoj mreži pri isključenoj distribuiranoj

elektrani i za slučaj i minimalne potrošnje u distributivnoj mreži pri maksimalnoj proizvodnji distribuirane elektrane.

Minimalni skup zaštitnih funkcija kojim se obezbjeđuje siguran paralelni pogon distribuirane elektrane i distributivne mreže čine:

- a) zaštita od odstupanja uslova paralelnog pogona distribuirane elektrane i mreže,
- b) zaštita od međusobnih negativnih uticaja distribuirane elektrane i mreže.

Zaštitne funkcije koje se izvode na mjestu priključenja distribuirane elektrane na distributivnu mrežu trebaju biti sljedeće:

- a) prekostrujna zaštita, odnosno trofazna maksimalna strujna vremenski nezavisna zaštita, koja reaguje sa vremenskom zadržkom pri strujnim opterećenjima koja prelaze vrijednosti dozvoljenih strujnih opterećenja priključnog voda (prekostrujna zaštita) i trenutno pri bliskim kratkim spojevima (kratkospojna zaštita),
- b) zemljospojna zaštita koja se izvodi zavisno od načina uzemljenja neutralne tačke SN mreže.

Sistemska zaštita generatora sadrži pojedinačne uređaje ili funkcije integrisanog sistema sa sljedećom namjenom:

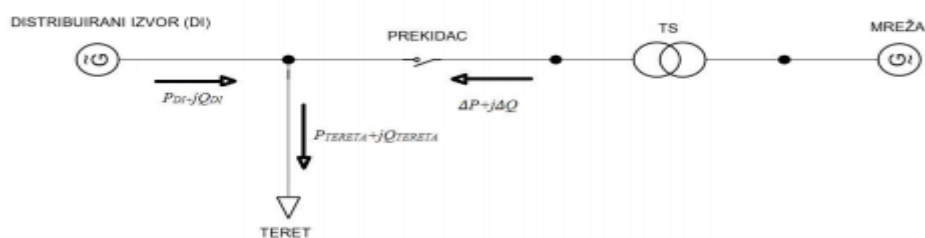
- a) naponska zaštita (prenaponska zaštita sa najmanjim obimom podešavanja zaštitnog uređaja  $90 \div 110\%$  nazivnog napona generatora, i podnaponska zaštita sa najmanjim obimom podešavanja zaštitnog uređaja  $100 \div 70\%$  nazivnog napona generatora), sa najmanjim obimom podešavanja vremenske zadržke  $0,2 \div 3$  sekunde,
- b) frekventna zaštita (nadfrekventna zaštita sa najmanjim obimom podešavanja zaštitnog uređaja  $48 \div 52$  Hz i podfrekventna zaštita sa najmanjim obimom podešavanja zaštitnog uređaja  $52 \div 48$  Hz), sa najmanjim obimom podešavanja vremenske zadržke  $0,2 \div 3$  sekunde.

Nije dozvoljen ostrvski režim rada distribuirane elektrane (2).

## ZAŠTITA OD OSTRVSKOG RADA DISTRIBUIRANIH IZVORA

Nastankom ostrvskog pogona uzrokovanog isklonom rastavnog uređaja te odvajanjem od mreže distribuirani izvor napaja potrošače bez prisutnosti ostatka elektroenergetskog sistema. Kod takvog pogona sistem je nepredvidiv jer nije moguća regulacija napona i frekvencije kao i razlika između snage proizvodnje i potrošnje ( $I_{vas}$  (3)). Kako bi nadnaponska/podnaponska i/ili nadfrekventna/podfrekventna zaštita proradila, potrebno je dovoljno velika promjena amplitude ili frekvencije napona na priključku distribuiranog izvora. Zaštita neće proraditi ako su na odvojenom odvodu snaga proizvodnje i tereta jednake.

Prikaz nadomjesne šeme tokova snaga između mreže i distribuiranog izvora prikazan je na Slici 1 (3).



Slika 1- Nadomjesna šema tokova snaga između mreže i distribuiranog izvora

Aktivna i reaktivna snaga prikazane su sljedećim formulama:

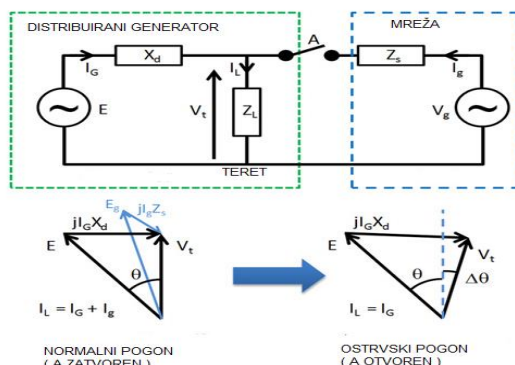
$$\Delta P = P_{TERETA} - P_{DI} \quad (1)$$

$$\Delta Q = Q_{TERETA} - Q_{DI} \quad (2)$$

S obzirom na mogućnost krivih i neželjenih prorada zaštite prilikom ostrvskog rada uvodi se zona neprepoznavanja kojom se može odrediti pouzdanost detekcije ostrvskog pogona. Zona neprepoznavanja ostrvskog pogona definira se kao neusklađenost razlike aktivne i reaktivne snage ( $\Delta P$  i  $\Delta Q$ ) (3).

Za razliku od nad/podnaponske i nad/podfrekventne zaštite koje se tretiraju kao pasivna metoda, primjenom aktivne metode se u potpunosti eliminiše zona neprepoznavanja. Tehnikom povratne veze prepoznaje se ostrvski rad koji detektuje promjene u naponu i frekvenciji. Najčešće i najtačnije aktivne metode za detekciju ostrvskog pogona koje se trenutno koriste su metoda detekcije promjene ugla napona generatora VS (Voltage Vector Shift) i metoda detekcije promjene brzine frekvencije generatora ROCOF (Rate of Change of Frequency) (Bugdal, Dysko, Burt, McDonald (4)).

Princip detekcije VS (Voltage Vector Shift) prikazan je na Slici 2 (Lavery, Best, Morrow (5)). Ekvivalentna šema generatora prikazuje najvažnije električne veličine kao i pomak ugla vektora napona generatora. Do pomaka dolazi zbog debalansa snage na stezaljkama generatora usljed kvarova u mreži, najčešće zemljospoja, drugih prekida te djelovanja APU-a.



Slika 2- Princip detekcije promjene ugla napona generatora

Algoritam zaštite promjene ugla napona temelji se na promjeni ugla napona u sve tri faze. Mjerenje se vrši nakon pola periode i nakon cijele periode u sve tri faze. Općenito, VS releji mjere iste vrijednosti kao i podfrekventni i nadfrekventni releji, ali na drukčijim principima. S obzirom da VS relej uspoređuje samo dva uzastopna rezultata, omogućena je brza detekcija, tj. prorada zaštite (Booth (6)).

ROCOF algoritmom se detektiraju promjene frekvencije uzrokovane oscilacijama rotora generatora nakon gubitka veze s glavnim vodom u slučaju ostrvskog rada (4). Promjena frekvencije uzrokovana je neravnotežom između ulazne mehaničke snage generatora i opterećenja. Nakon isključenja iz glavnog voda posljedicom neravnoteže frekvencija se dramatično mijenja.

Prema (4), konačna formula za promjenu frekvencije je:

$$f/dt = (\Delta P \cdot f) / (2 \cdot S_n \cdot H) \quad (3)$$

gdje je:

- $\Delta P$ - razlika u aktivnoj snazi generatora između sinhroniziranog i ostrvskog pogona,
- $f$  - nazivna frekvencija generatora,
- $S_n$  - nazivna prividna snaga generatora,
- $H$  – inercijska konstanta generatora.

Usporedbom uzastopno razmatranih vrijednosti ROCOF mjerenja u periodu od 60 ms ocjenjuje se je li promjena trajnija ili ne (4). Kada mjerena vrijednost prekorači zadanu vrijednost, relej proradi. Dodatno vrijeme kašnjenja može se mijenjati kako ne bi reagirao na normalna uklapanja i isklapanja te ostale prelazne promjene u sistemu, što je od izuzetne važnosti.

Osnovni problem VS i ROCOF algoritama je osjetljivost praćenih veličina koje predstavljaju problem u koordinaciji zaštite i vođenju sistema. Problemi s koordinacijom i detekcijom krivih kvarova mogu pobuditi zaštitni relej koji kvar krivo interpretira kao ostrvski pogon i tako isključiti distribuirani generator iz mreže, što predstavlja nepoželjnu pojavu.

Kombinacijom pasivne i aktivne metode nastoje se izbjeći negativne strane aktivnih i pasivnih metoda, tj. koriste se samo najbolje od njih. Pasivna zaštita koristi se kao primarna koja aktivira aktivnu u slučaju promjene pogonskog stanja.

Komunikacione metode temeljene na PLC (Power Line Communications) tehnologiji imaju veliku pouzdanost u otkrivanju ostrvskog pogona, ali visoki troškovi komunikacionog sistema za nadzor i detekciju ove metode svrstavaju u red neekonomičnih metoda. Radi na principu praćenja signala od strane odašiljača koji je smješten u mreži i prijemnika smještenog u distribuiranom izvoru. U slučaju isklopa, tj. pojave ostrvskog pogona, prijemnik ne dobiva signal i zaštita reagira (3).

## SISTEM NADZORA I ZAŠTITE ZASNOVAN NA SINHRONIZIRANIM FAZORSKIM MJERENJIMA

Priključkom distribuiranih izvora energije (DI) na distributivnu mrežu, na relativno malom dijelu mreže često dolazi do nesrazmjera proizvedene električne energije i priključene potrošnje. Obaveze Operatora distributivnog sistema (ODS) u pravilu nalažu prihvrat cjelokupno proizvedene električne energije iz DI, što postavlja nove zahtjeve na nadzor, vođenje i zaštitu distributivne mreže. U skladu sa svjetskim trendovima, te postojećim razvojem opreme novi način nadzora i zaštite je usmjeren prema upotrebi sinhroniziranih mjerenja, čime se

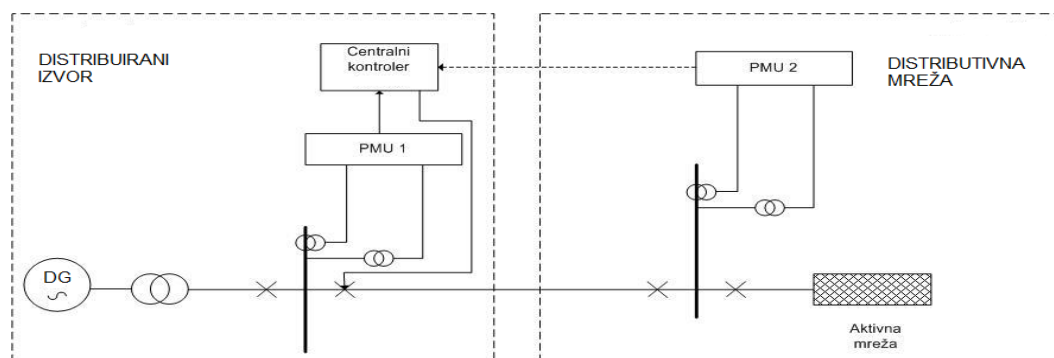
omogućava nadzor pogona i zaštita distributivne mreže u stvarnom vremenu, kao i nadzor rada DI, te zaštita od ostrvskog pogona DI.

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

Razvojem tehnologije došlo je do sve veće primjene nadzora, zaštite i vođenja elektroenergetskog sistema (EES) u stvarnom vremenu na osnovu sinhroniziranih mjerenja fazora, (eng. WAMPAC - *Wide Area Monitoring, Protection and Control*). Riječ je o sistemu koji će poslužiti kao dodatak postojećim SCADA sistemima, a koji se zasniva na ugrađenim uređajima za sinhronizirano mjerenje fazora (PMU). WAMPAC sistem radi u stvarnom vremenu budući da su izmjerene vrijednosti vremenski usklađene GPS sinhronizacijom s tačnošću od jedne mikrosekunde. GPS sinhronizacija uz PMU uređaje predstavlja najznačajniju tehnološku novost te je samim time omogućen uvid u dinamičku sliku EES-a u stvarnom vremenu uz veću tačnost mjerenja te brže (pravovremeno) djelovanje u slučaju nestabilnosti.

Upravo na ovakvom sistemu nadzora, zaštite i vođenja mreže, zasniva se i potencijalno rješenje nadzora i zaštite distributivne mreže sa priključenim distribuiranim izvorima. PMU uređaji imaju ključnu ulogu u nadzoru, zaštiti i vođenju rada distributivne mreže sa priključenim distribuiranim izvorima, 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 njihovu preciznu kalibraciju. Objedinjena ugradnja opisanih PMU uređaja na tačno određena čvorišta u distributivnim mrežama sa priključenim distribuiranim izvorima (proračuni tokova snaga i struja kratkog spoja za različita pogonska stanja, kao i dinamički odziv distribuiranih izvora) povezana sa centralnim kontrolerom na kojem se instalira programska podrška koja pomaže operatoru sistema u nadzoru, zaštiti i vođenju predstavlja idejno rješenje zaštite i vođenja distributivne mreže sa priključenim distribuiranim izvorima.

Šema nadzora, zaštite i vođenja dijela distributivne mreže i pripadnog distribuiranog izvora energije (ili više njih) na osnovu sinhroniziranih mjerenja prikazana je na Slici 3 (*Best et al. (7)*).



Slika 3- Šema nadzora, zaštite i vođenja dijela distributivne mreže i pripadnog distribuiranog izvora energije na osnovu sinhroniziranih fazorskih mjerenja

Nadzor, zaštita i vođenje pojedinačne distributivne mreže u stvarnom vremenu moguće je s najmanje dva ugrađena PMU uređaja, minimalno jedan na strani mreže i jedan na strani distribuiranih izvora. Ukoliko je u mreži 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) ili bežičnim prenosom. Obradom podataka dobivenih od strane PMU uređaja centralni i lokalni kontroleri automatski djeluju u cilju sigurnog vođenja i zaštite nadziranog dijela distributivne mreže. Osnovne funkcije centralnog kontrolera su (*Skok, Šturlić, Matica (8)*):

- prikupljanje mjerenja fazora napona i struje iz sinhroniziranih mjernih jedinica
- korelacija i obrada podataka, arhiviranje mjerenih i izračunatih veličina, detekcija događaja i alarmi,
- mogućnost slanja podataka u vanjske sisteme u svrhu razmjene podataka
- vizualizacija mjerenja i rezultata proračuna

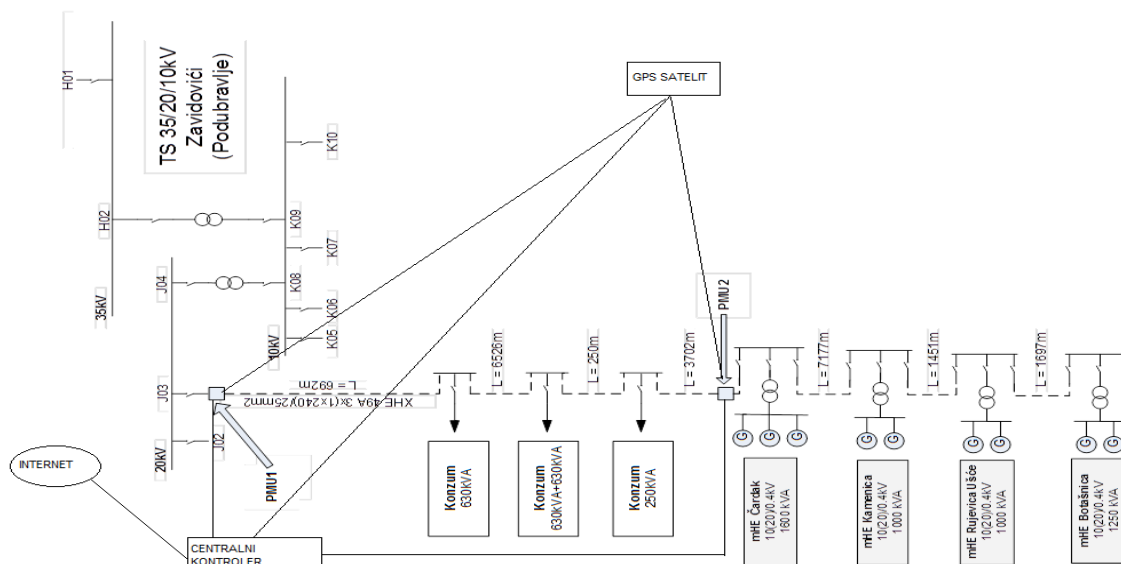
Ukoliko u mreži postoji relativno mali broj PMU uređaja, tada ih je moguće kvalitetno i sigurno povezati samo s jednim centralnim kontrolerom. Kada se taj broj poveća, odnosno povezuje se više područja, potrebno je ići u pravcu više centralnih kontrolera, koji su na kraju objedinjeni s jednim regionalnim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

Centralni kontroleri prikupljaju i obrađuju podatke iz PMU uređaja iz cijele mreže u stvarnom vremenu, čime se dobivaju trenutne snimke stanja mreže. Vrijeme za ostvarenja uvida u stanje mreže i osvježavanje podataka je manje od 200 ms (*Skok, Kirinčić (9)*). Ekstrakcijom, obradom i upotrebom ekspertnih algoritama (programska podrška) omogućava se i pravodobno informisanje i upozoravanje operatera u dispečerskim centrima.

Jedna od najznačajnijih mogućnosti sinhroniziranih mjerenja u distributivnoj mreži sa distribuiranim izvorima je detekcija ostrvskog rada zasnovana na kontinuiranom mjerenju sinhronizma distribuiranog generatora u odnosu na ostatak distributivne mreže na bazi PMU (PMU - Phasor measurement unit) tehnologije i sinhrofazora. Vrijedosti pragova okidanja za ove detektore se određuju iz eksperimentalnih podataka o sistemu dobijenih za vrijeme normalnog radnog režima i za vrijeme tranzijenata u sistemu. PMU-ovi se koriste za poređenje frekvencije i faznog ugla distribuiranih generatora sa sinhrofazorom dobijenim iz krute tačke distributivne mreže (npr. glavne TS). Ako je frekvencija distribuiranog generatora ista kao i u distributivnom sistemu, onda fazni ugao generatora prati fazni ugao mreže u odgovarajućem opsegu odstupanja. U slučaju da generator izgubi vezu sa mrežom, fazni ugao generatora počinje divergirati u odnosu na fazni ugao mreže. Sistem se može posmatrati kao jedan integralni relej sinhronog rada svih generatora u sistemu (5).

## ANALIZA RADA SISTEMA SINHRONIZIRANIH FAZORSKIH MJERENJA U DIJELU 20 kV DISTRIBUTIVNE MREŽE SA PRIKLJUČENIM MALIM HIDROELEKTRANAMA

Prvi PMU uređaj u Elektrodistribuciji Zenica nabavljen je i pušten u probni rad krajem 2019.g. u dijelu 20 kV distributivne mreže Podubravlje- Čardak u Zavidovićima, a prema šemi na Slici 4.



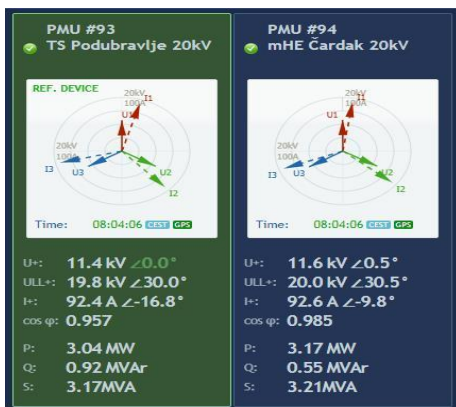
Slika 4- Jednopolna šema dijela 20 kV mreže Podubravlje-Čardak sa implementiranim uređajima za sinhronizirana fazorska mjerenja

Na kraju 20 kV odvoda Podubravlje-Čardak priključene su četiri male hidroelektrane sa sinhronim generatorima, čija ukupna instalirana aktivna snaga koncentrisana na mjestu priključenja u MHE Čardak iznosi 3358 kW, a iz navedenih podataka za dvostrano napajani konzum zaključak je da u određenom periodu postoji mogućnost izjednačavanja snage proizvodnje iz malih hidroelektrana i snage opterećenja kao preduslova za potencijalni nastanak ostrvskog rada. PMU uređaji nisu povezani sa postojećim SCADA sistemom, niti sa zaštitnim relejima. PMU1 ugrađen je u TS 35/20/10 kV Podubravlje, a PMU2 u mHE Čardak. Trenutna podešenja pragova okidanja karakterističnih mjerenih veličina su:

- Prag okidanja faznih napona na sve tri faze je:  $+0.1pu$  i  $-0.1pu$ , što je u skladu sa Mrežnim pravilima gdje je definisano dozvoljeno odstupanje napona od  $+10\%$  i  $-10\%$  od nazivne vrijednosti napona u SN mrežama.
- Prag okidanja promjene frekvencije na sve tri faze je:  $+450mHz$  i  $-450mHz$ , što nije u skladu s Mrežnim pravilima prema kojim je dozvoljeno maksimalno odstupanje od  $+200mHz$  i  $-200mHz$  od nazivne vrijednosti frekvencije 50Hz.

- Prag okidanja brzine promjene frekvencije na sve tri faze je: +700 mHz/s i -700 mHz/s. Ove vrijednosti nisu definisane u Mrežnim pravilima.
- Prag okidanja razlike faznih uglova napona na svim fazama je: +6° i -6°. Ove vrijednosti nisu definisane Mrežnim pravilima.

Na Slici 5 su grafički prikazani sinhrofazori faznih struja i napona PMU1 i PMU2 (10). Ispod sinhrofazora su dati podaci o tokovima snaga, faktoru snage, amplitude i faznog ugla direktne komponente struje i direktne komponente napona na obje strane odvoda.

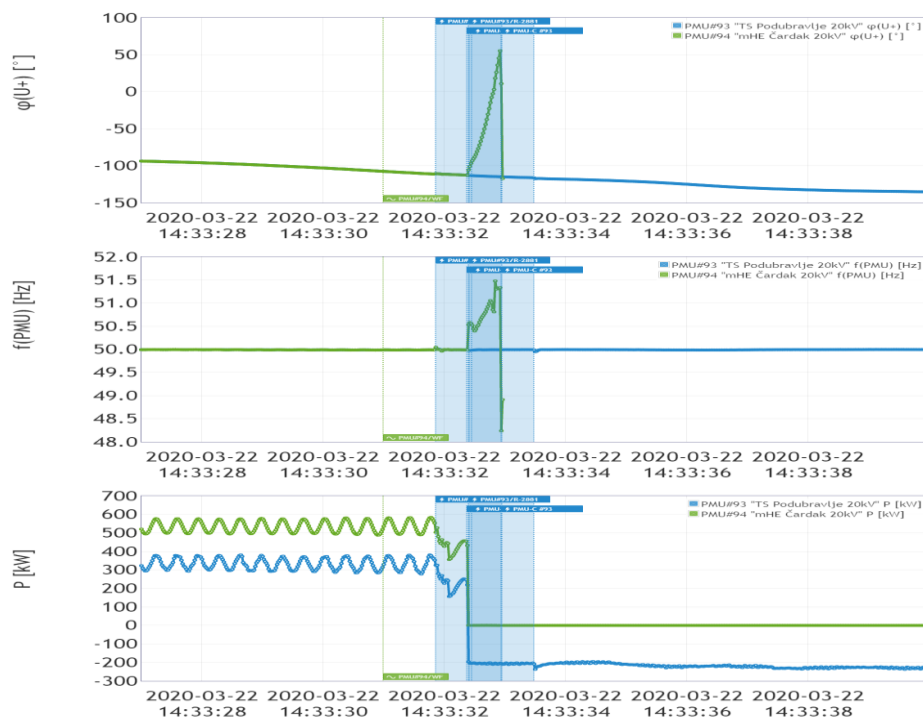


Slika 5- Grafički prikaz sinhrofazora faznih struja i napona na strani 20 kV distributivne mreže Podubravlje-Čardak i malih hidroelektrana (10)

### Zabilježeni karakteristični slučajevi

#### Slučaj 1: Ispad odlaza Podubravlje u mHE Čardak

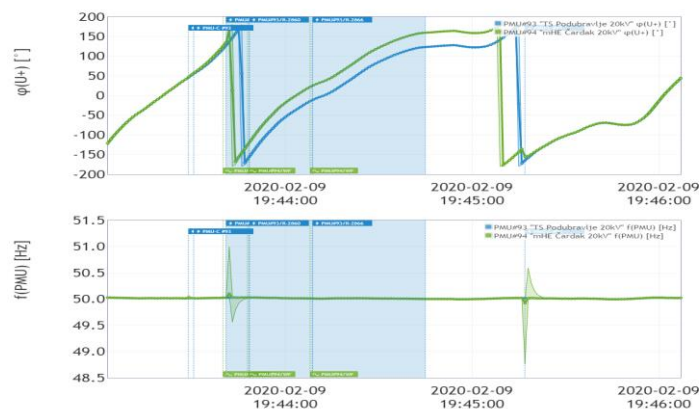
Na Slici 6 su prikazane promjene faznog ugla direktne komponente napona, frekvencije i trofazne aktivne snage u vrijeme ispada 20 V odlaza Podubravlje na dan 22.03.2020. godine u 14:33:32.



Slika 6- Karakteristične veličine u vrijeme ispada odlaza Podubravlje (10)

### Slučaj 2: Detekcija nepostojećeg ispada

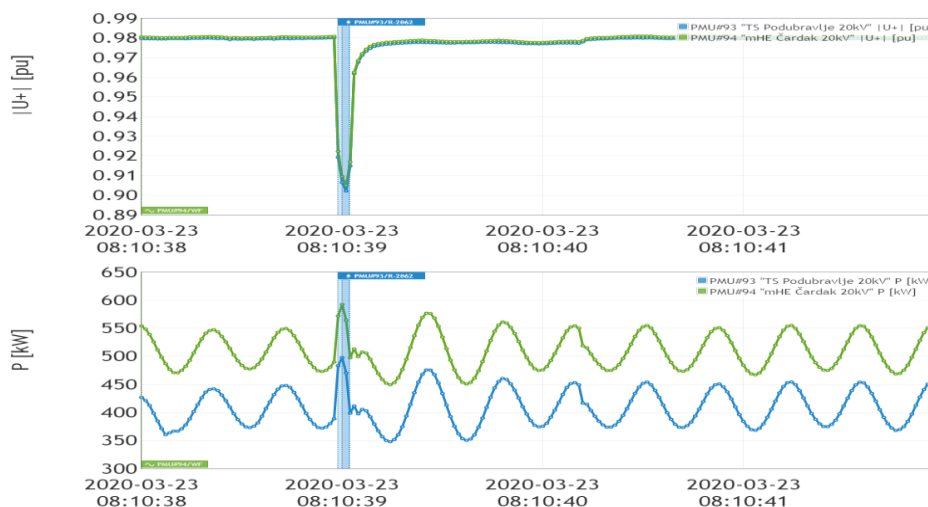
Na Slici 7 su prikazane promjene faznog ugla direktne komponente napona i frekvencije za vrijeme zabilježenog događaja 09.02.2020. godine u 19:44:00. Maksimalno međusobno odstupanje faznih uglova je iznosilo  $36.32^\circ$ . Međusobna razlika faznih uglova na PMU1 i PMU2 navodi na zaključak o potencijalnom ispadu DV-a iako na sistemu SCADA na taj dan nije zabilježen ispad tog voda. Potrebno je dodatno analizirati ovaj slučaj i zaključiti zašto je došlo do međusobnog divergiranja faznih uglova.



Slika 7- Karakteristične veličine za vrijeme detekcije nepostojećeg ispada (10)

### Slučaj 3: Propad napona

Na Slici 8 su prikazane promjene direktne komponente napona i trofazne snage opterećenja za vrijeme zabilježenog događaja propada napona. Amplituda napona je pala na vrijednost 0.87pu. Uzrok propada je naglo povećanje zahtijevane snage na koje mHE nisu mogle trenutno odgovoriti što je uzrokovalo kratkotrajno smanjenje napona na vrijednost 0.87pu što se prema standardu BAS EN 50160 definiše kao propad napona. Prema IEC standardima i normi EN 50160 propadom napona smatra se smanjenje efektivne vrijednosti napona na vrijednost između 1% i 90% nazivne efektivne vrijednosti.

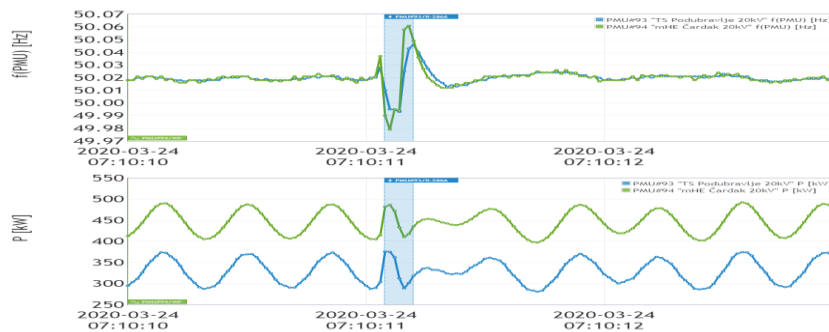


Slika 8- Promjena direktne komponente napona i trofazne snage (10)

### Slučaj 4: Brzina promjene frekvencije

Na Slici 9 je prikazana promjena frekvencije i trofazne snage u vremenu na dan 24.03.2020. godine u 07:10:11 kada je PMU detektovao brzinu promjene frekvencije od  $-15.7$  Hz/s. Analizom snage opterećenja u tom trenutku može se zaključiti da je nagla promjena frekvencije tj. velika brzina promjene vrijednosti frekvencije izazvana trenutnim povećanjem zahtijevane snage od strane konzuma.





Slika 9- Promjene frekvencije i trofazne snage opterećenja u vrijeme detektovane brzine promjene frekvencije od  $-15.7\text{Hz/s}$  (10)

## ZAKLJUČAK

Općenito, integracija distribuiranih izvora energije predstavlja brojne izazove koje je potrebno uvažiti pri projektovanju nadzora, zaštite i upravljanja tako da ne bude značajnog uticaja na trenutni nivo pouzdanosti sistema i da potencijalne prednosti distribuirane proizvodnje budu u potpunosti ostvarene. Neki od ovih izazova dolaze od pogrešnih pretpostavki uobičajeno primijenjenih u konvencionalnim distributivnim mrežama, dok su drugi rezultat problematike stabilnosti, dosad posmatrane samo na nivou prenosnog sistema.

Nadzor i zaštita distributivnog sistema primjenom sinhroniziranih fazorskih mjerenja omogućava tehničke prednosti koje se najbolje očituju u njegovom praćenju u stvarnom vremenu (osvježavanje podataka svakih 20 ms). Međutim, posebno značenje uvođenja nove tehnologije zasnovane na sinhroniziranim mjerenjima je ekonomskog karaktera. Problemi vezani uz priključak distribuiranih izvora na distributivni sistem uzrokuju povećane troškove regulacije sistema, te infrastrukturne zahvate u mreži. Predložena šema nadzora i zaštite primjenom sinhroniziranih fazorskih mjerenja omogućava priključak distribuiranih izvora (do određene granice) uz zadržavanje postojeće infrastrukture i osiguravanje sigurnosti i pouzdanosti pogona distributivnog sistema.

Jedna od najznačajnijih mogućnosti sinhroniziranih mjerenja u distributivnoj mreži sa distribuiranim izvorima je detekcija ostrvskog rada zasnovana na kontinuiranom mjerenju sinhronizma distribuiranog generatora u odnosu na ostatak distributivne mreže na bazi PMU (PMU - Phasor measurement unit) tehnologije i sinhrofazora. Vrijednosti pragova okidanja za ove detektore se određuju iz eksperimentalnih podataka o sistemu dobijenih za vrijeme normalnog radnog režima i za vrijeme tranzijenata u sistemu. PMU-ovi se koriste za poređenje frekvencije i faznog ugla distribuiranih generatora sa sinhrofazorom dobijenim iz krute tačke distributivne mreže (npr. glavne TS). Ako je frekvencija distribuiranog generatora ista kao i u distributivnom sistemu, onda fazni ugao generatora prati fazni ugao mreže u odgovarajućem opsegu odstupanja. U slučaju da generator izgubi vezu sa mrežom, fazni ugao generatora počinje divergirati u odnosu na fazni ugao mreže. Sistem se može posmatrati kao jedan integralni relej sinhronog rada svih generatora u sistemu.

U sadašnjoj fazi, ugradnja sinhroniziranih fazorskih mjerenja u svim pojedinačnim dijelovima distributivne mreže sa distribuiranim izvorima određenog distributivnog subjekta i njihovo uvezivanje sa postojećim SCADA sistemima je ekonomski neisplativa. Postojanje jednog ili nekoliko takvih sistema koji bi služili kao mobilni sistem za dobijanje relevantne stacionarne i dinamičke slike pojedinih dijelova distributivne mreže sa priključenim distribuiranim izvorima, a kojima bi se značajno uticalo na nivoe trenutne pouzdanosti i potpunog ostvarenja potencijalnih prednosti distribuirane proizvodnje u konkretnom području, sasvim sigurno ima svoju tehnokonmsku opravdanost.

## LITERATURA

1. F. P. Vahl, R. Ruther, N. C. Filho, 2013, The influence of distributed generation penetration levels on energy markets, Energy Policy 62, pp. 226-235
2. Mrežna pravila distribucije ODS JP EP BiH d.d. Sarajevo, BiH, 2018
3. M. Ivas, 2014, Otočni pogon distribuiranih izvora sastavljenih od mrežnih izmjenjivačkih jedinica, Telenerg d.o.o., Zagreb
4. R. Bugdal, A. Dysko, G.M.Burt, J.R. McDonald, 2006, Performance analysis of the ROCOF and Vector Shift methods using a dynamic protection modelling approach, PSP, Effect of distributed generation on power system protection, pp 139-144.

5. David M. Lavery, Robert J. Best, D. John Morrow, 21st May 2014, „Loss-of-mains protection system by application of phasor measurement unit technology with experimentally assessed threshold settings“, Queens's University Belfast
6. C. Booth, 2011, Loss of Mains Protection, University of Strathclyde, Manchester
7. R.J. Best et al., Oct. 2010, „Synchrophasor Broadcast Over InternetProtocol for Distributed Generator Synchronization“, IEEETransaction on Power Delivery 2010, Vol. 25, no.4, pp.2835-2841
8. S. Skok, I. Šturlić, R. Matica, 2009, Multipurpose Open System Architecture Model of Wide Area Monitoring, PowerTech, Bukurešt, Rumunjska
9. S. Skok S., V. Kirinčić, 2011, Projekt ugradnje PMU uređaja u cilju automatskog vođenja dijela prijenosnog EES-a PrP Rijeka, Zagreb, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci
10. <http://www.wamster.net/users/eventgroups>,