



**DECENTRALIZOVANO I CENTRALIZOVANO RJEŠENJE ZA LOKACIJU I
IZOLACIJU KVARA I RESTAURACIJU NAPAJANJA U PAMETNIM MREŽAMA**
**DECENTRALIZED AND CENTRALIZED SOLUTION FOR FAULT LOCATION,
ISOLATION AND SUPPLY RESTORATION IN SMART GRID**

Sara Tomić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratka sadržaj – U ovom radu, predstavljeno je rješenje koja igra bitnu ulogu u poboljšanju pouzdanosti i povećanju kvaliteta i kontinuiteta napajanja potrošača električnom energijom – FLISR (eng. Fault Location, Isolation and Supply Restoration). FLISR ima zadatak da brzo locira i izoluje mjesto kvara i restaurira napajanje „zdravom“ dijelu mreže. Zbog toga, istraživanja o mogućim FLISR rješenjima dolaze u prvi plan u elektroenergetskim sistemima. Glavni fokus rada je na komparativnoj analizi FLISR rješenja u različitim arhitekturama, centralizovanim i decentralizovanim.

Ključne reči: pametna mreža, automatizacija, lokacija kvara, izolacija kvara, restauracija napajanja, (de)centralizovana arhitektura.

Abstract – This paper presents solution that has an important role in improving network reliability and increasing quality and continuity of power supply to customers – FLISR (Fault Location, Isolation and Supply Restoration). FLISR provides fast fault location, isolation and supply restoration for „healthy“ part of network. Thus, the research on FLISR solutions is coming at the forefront of interest in power systems. The main focus of the paper is on the comparative analysis of FLISR solutions in different architectures, centralized and decentralized.

Keywords: smart grid, distribution automation, fault location, fault isolation, supply restoration, (de)centralized architecture

1. UVOD

U današnjem svijetu potrebe potrošača za električnom energijom su sve veće i raznovrsnije, jer gotovo sve ljudske djelatnosti zavise od napajanja istom. Istovremeno, rastu i potrebe za njenom kvalitetnijom, sigurnijom i pouzdanijom isporukom. Međutim, u većini zemalja sve veća potražnja za energijom znači još veće opterećenje ionako prenapregnute, stare i krhke elektroenergetske infrastrukture [1].

Potencijalne posljedice kvarova u mreži nikada nisu bile veće, jer gotovo sve infrastrukture zavise od sigurnih i pouzdanih isporuka električne energije. Zbog toga,

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Duško Bekut, red. prof.

tradicionalni elektroenergetski sistem (EES) postepeno evoluirao ka pametnoj mreži. Dio EES kojim se električna energija preuzima sa prenosnih mreža i distribuira potrošačima predstavlja distributivnu mrežu (DM). Udio DM u broju kvarova je oko 80%, pri čemu se najveći broj kvarova događa na srednjenaponskim (SN) fiderima (20(10) kV). Pojava kvara u DM može izazvati velike štete na elementima EES ili ugroziti bezbjednost ljudi koji se nalaze njegovoj blizini. Pored toga, uvođenjem deregulacije tržišta i tržišnih mehanizama, regulatorno tijelo nagrađuje distributivnu kompaniju kada unapređuje kontinuitet isporuke električne energije, a kažnjava kada ne ispunjava minimalnu zahtijevanu pouzdanost.

Da bi efekti pojave kvarova u DM bili svedeni na minimum, nameće se potreba brze detekcije, lokacije i izolacije dionice u kvaru, a zatim i restauracije napajanja potrošačima koji nisu direktno pogođeni kvarom. Skup funkcija koje se koriste u tu svrhu predstavljaju jedinstveno rješenje FLISR. FLISR zahtijeva različite sisteme za automatizaciju DM, centralizovane ili decentralizovane, kako bi postigao optimalna rješenja.

U zavisnosti od toga, FLISR rješenja se realizuju kao centralizovana ili decentralizovana.

U potpuno centralizovanim FLISR rješenjima, osnovna logika je smještena u SCADA/DMS sistemu koji je lociran u kontrolnom centru. Nasuprot njima, decentralizovana FLISR rješenja koriste inteligentne elektronske uređaje, raspoređene duž fidera, za upravljanje prekidačima distribuiranim po čvorovima fidera. Dakle, osnovna logika je smještena unutar same stanice. U radu su u drugom delu date teorijske osnove za ove pristupke, u trećem sistemu za automatizaciju, dok su u četvrtom i petom dati decentralizovani i centralizovani pristup. Šesti deo je posvećen komparativnoj analizi. Poslednja dva dela rada su zaključak i literatura.

2. TEORIJSKA OSNOVA

EES je tehnički sistem u okviru kog se izvode sve elektroenergetske transformacije iz ili u električnu energiju, njen prenos, distribucija i neposredna potrošnja [2].

Da bi se unaprijedio kontinuitet i kvalitet napajanja potrošača električnom energijom pojavio se koncept EES sljedeće generacije, odnosno tzv. pametna mreža. Pametna mreža je moderna elektroenergetska mreža koja pruža poboljšanu efikasnost, pouzdanost i sigurnost, uz integraciju obnovljivih i alternativnih izvora energije, kroz automatizovanu kontrolu i moderne komunikacione tehnologije [3].

Prekidi u napajanju električnom energijom imaju negativan uticaj na kvalitet života, te imaju značajne direktne ili indirektno ekonomske posljedice. DM su posebno podložne kvarovima, pa je zbog toga potrebno posvetiti posebnu pažnju analizi i smanjivanju efekata kvarova u njima. Kako bi se unaprijedio kontinuitet isporuke električne energije, distributivno preduzeće prilikom planiranja DM treba da sagleda sljedeće tri opcije:

1. Povećanje pouzdanosti pojedinih elemenata – ostvaruje se primjenom kvalitetnijih elemenata i unapređivanjem sistema održavanja.
2. Skraćivanje trajanja otkaza – obezbjeđuje se skraćivanjem trajanja postupka za lokaciju i izolaciju dijela mreže u kvaru i restauraciju napajanja, kao i skraćivanjem trajanja popravke elementa u kvaru.
3. Smanjenje broja potrošača pogođenih kvarom – postiže se boljim planiranjem i konfiguracijom mreže.

3. SISTEMI ZA AUTOMATIZACIJU

Sistemi za automatizaciju imaju ključnu ulogu u unapređivanju kontinuiteta napajanja potrošača električnom energijom. U zavisnosti od primijenjene arhitekture u DM, centralizovane ili decentralizovane, različiti sistemi za automatizaciju se koriste.

3.1. Centralizovani sistemi za automatizaciju

U centralizovanim sistemima za automatizaciju se koriste složeni softverski alati za upravljanje, kontrolu i optimizaciju putem sistema za nadzor i prikupljanje podataka u realnom vremenu (eng. *Supervisory Control and Data Acquisition – SCADA*) i sistema za upravljanje DM (eng. *Distribution Management System – DMS*). Sistem za automatizaciju, pored njih, čine daljinski kontrolisani i upravljani rasklopni uređaji i uređaji za detekciju i snimanje struje kvara.

Rasklopni uređaj – termin za opremu koja se koristi za prekidanje i uspostavljanje strujnog kola u normalnim radnim režimima ili u uslovima kvara. Rasklopni uređaji koji imaju značajnu ulogu u poboljšanju pouzdanosti su: prekidač, reklozer i rastavljač.

Uređaji za detekciju i snimanje struje kvara – imaju za cilj ubrzanje postupka traženja mjesta kvara. U ovu grupu spadaju sljedeći uređaji: indikatori prolaska struje kvara, digitalni snimači kvara i mikroprocesorski releji.

DMS sistem je izgrađen na konceptu rješenja pametne mreže [4]. Velika količina podataka i informacija koje prikuplja DMS, pruža mogućnost za pokretanje velikog broja naprednih analitičkih funkcija, od kojih je jedna upravo FLISR.

SCADA je važna komponenta sistema za automatizaciju, koja na osnovu prikupljenih podataka sa uređaja u DM vrši upravljanje istim. Upravljanje može biti inicirano ručno od strane dispečera u centru upravljanja ili automatski od strane sistema koji prati stanje u DM.

3.2. Decentralizovani sistemi za automatizaciju

U decentralizovanim sistemima nadgledanje, kontrola i upravljanje se vrši na lokalnom nivou, na nivou jedne stanice. U ovakvom pristupu DM je opremljena inteligentnim elektronskim uređajima (eng. *Intelligent Electronic Device – IED*) i prekidačima duž SN fidera.

Svaki IED uređaj potrebno je pridružiti odgovarajući prekidač, kojim će vršiti upravljanje na lokalnom nivou, za potrebe izolacije kvara i restauracije napajanja. IED uređaji su konektovani na LAN (eng. *Local Area Network*) mrežu i preko nje komuniciraju međusobno.

Standard namijenjen za automatizaciju podstanica distributivnih mreža, pomoću savremenih IED uređaja i skupa komunikacionih protokola, je IEC 61850. IED uređaj, koji je izvor informacija, objavljuje događaj i bilo koji drugi uređaj kome su informacije potrebne može da ih primi pretplatom na njega. Takav brz prenos informacija o događajima na više različitih uređaja ostvaruje se GOOSE (eng. *Generic Object Oriented Substation Event*) porukom.

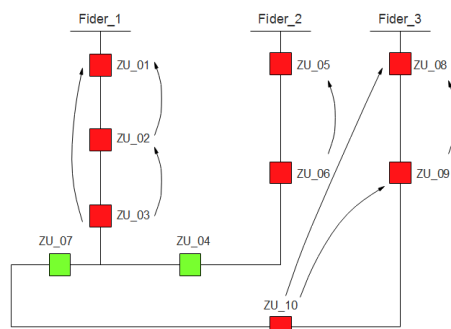
Decentralizovani sistem za automatizaciju podrazumijeva komunikaciju IED uređaja u sklopu jedne logičke grupe. Odgovarajuća konfiguracija između uređaja treba da bude podešena kako bi mogli da odluče šta da urade sa dobijenom informacijom. Ukoliko je neophodna reakcija na emitovanu poruku, moraju biti konfigurisani tako da izvrši očekivane akcije. Adekvatna konfiguracija podrazumijeva dodjelu određenih signala svim uređajima u logičkoj grupi. Konfiguraciju je potrebno ažurirati pri svakoj topološkoj promjeni, manuelno, kako bi zaštitna šema radila ispravno u uslovima kvara.

4. DECENTRALIZOVANO FLISR RJEŠENJE

Decentralizovano FLISR rješenje ostvareno je korišćenjem logičke selektivnosti zaštite, koja se zasniva na principima objašnjenim u poglavlju 3.2. Logička selektivnost se odnosi na automatsku detekciju, lokaciju i izolaciju kvara i restauraciju napajanja u DM, gdje je inteligencija implementirana u samoj stanici. Na osnovu podešene konfiguracije između IED (u daljem tekstu zaštitnih) uređaja, svaki od njih će „znati“ šta treba da radi u uslovima kvara. U svrhu konfiguracije koristi se diskretni signal – virtuelni ulaz (VU). Svaki uređaj unutar logičke grupe će imati onoliko signala koliko uređaja i različitih akcija u grupi ima. Akcije podrazumijevaju pravila blokiranja, izolovanja i automatske restauracije, koja će obezbijediti maksimalnu selektivnost u DM.

4.1. Pravilo blokiranja

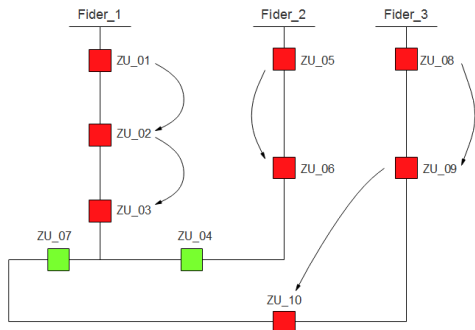
Logikom blokiranja omogućeno je da reaguje zaštitni uređaj najbliži kvaru. Pravilo blokiranja glasi: svaki uređaj u logičkoj grupi može blokirati sve uređaje koji se nalaze iznad njega (prema izvoru napajanja). Na slici 1. data je konfiguracija između zaštitnih uređaja, sa aspekta akcije blokiranja.



Slika 1. Konfiguracija blokiranja

4.2. Pravilo izolacije

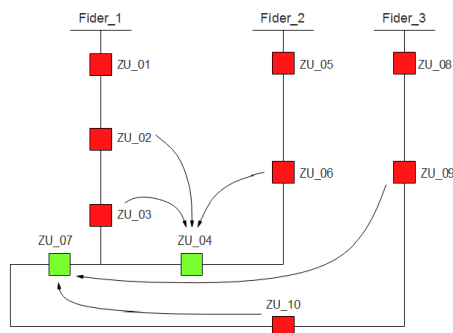
Logika kojom se postiže izolacija kvara od svakog potencijalnog izvora napajanja. Pravilo izolovanja glasi: svaki uređaj u logičkoj grupi može izolovati (otvoriti) prvi uređaj koji se nalazi ispod njega na putanji kvara. Na slici 2. data je konfiguracija između zaštitnih uređaja, sa aspekta akcije izolovanja.



Slika 2. Konfiguracija izolovanja

4.3. Pravilo automatske restauracije

Pošto izolacija kvara ostavi dio potrošača bez napajanja, povratak napajanja može biti ostvaren putem susjednih fidera (ukoliko postoji normalno otvoreni prekidač između fidera). Pravilo automatske restauracije glasi: svaki uređaj koji je prethodno dobio signal za izolaciju kvara ima mogućnost da pošalje signal za zatvaranje prvog uređaja koji se nalazi nizvodno od njega i koji predstavlja normalno otvoreni prekidač između fidera. Ukoliko postoji više susjednih fidera sa normalno otvorenim rastavljačima na svojim krajevima, zatvoren će biti onaj koji ima veću strujnu rezervu. Ukoliko ne postoji dovoljna rezerva na susjednim fiderima, signal za automatsku restauraciju neće biti poslat nijednom normalno otvorenom prekidaču. Na slici 3. data je konfiguracija između zaštitnih uređaja, sa aspekta akcije automatske restauracije.



Slika 3. Konfiguracija automatske restauracije

5. CENTRALIZOVANO FLISR RJEŠENJE

U današnjim DMS sistemima skup funkcija za lokaciju i izolaciju kvara, kao i restauraciju napajanja čini jedinstvenu aplikaciju FLISR. Nakon detekcije kvara pristupa se procesu lokacije kvara. Informacije sa mjernih uređaja, najčešće sa relejne zaštite ili indikatora kvara, prosljeđuju se direktno u DMS, koji na osnovu tih podataka može da odredi lokaciju kvara. Upravljanje rasklopnom opremom može da bude ručno, poluautomatsko i potpuno automatsko. U ovom radu razmatra se automatski režim rada FLISR aplikacije.

automatskom upravljanju, sve faze procesa lokacije, izolacije i restauracije odvijaju se automatski, bez učešća dispečera, pa je beznaponska pauza svedena na minimum.

5.1. Lokacija kvara

Cilj je odrediti najmanji mogući dio fidera koji sadrži sekciju sa kvarom. Lokacija kvara je prva akcija koju je potrebno izvršiti u sklopu upravljanja kvarovima. Sljedeće metode se koriste za lokaciju kvara u okviru automatskog FLISR režima:

- Metoda indikatora kvara.
- Strujna metoda.
- Impedantna metoda.

5.2. Izolacija kvara

Funkcija je namijenjena za izolaciju elementa pogođenog kvarom. Ulaz u funkciju za izolaciju kvara je rezultat funkcije za lokaciju kvara. Kao rezultat pokretanja funkcije za izolaciju kvara dobija se lista prekidačkih operacija za izolaciju dijela fidera na kome se desio kvar. Upravljačka sekvenca sadrži samo daljinski kontrolisane prekidačke uređaje.

5.3. Restauracija napajanja

Restauracija napajanja je funkcija koja se koristi za određivanje optimalnog plana manipulacija prekidačkom opremom za obnavljanje napajanja na dijelu fidera koji je ostao bez napajanja nakon izolacije kvara. Funkcija kao rješenje daje prijedlog svih varijanti alternativnog napajanja. Varijante alternativnog napajanja se rangiraju u skladu sa korisnički specificiranim kriterijumom. Funkcija kao rezultat daje listu prekidačkih operacija, potrebnih za restauraciju, koje se automatski izvršavaju.

6. KOMPARATIVNA ANALIZA IZLOŽENIH FLISR RJEŠENJA

Komparativna analiza, decentralizovanog FLISR (u daljem tekstu D-FLISR) rješenja i centralizovanog FLISR (u daljem tekstu C-FLISR) rješenja, spram opreme, signala, podataka i proračuna potrebnih za realizaciju oba rješenja i vremena djelovanja, data je u ovoj glavi. Na kraju su izložene prednosti i nedostaci oba rješenja.

Oprema potrebna za realizaciju rješenja

- Opremu u sklopu D-FLISR rješenja čine samo prekidači i zaštitni uređaji (releji). Operacije poput mijenjanja statusa rasklopne opreme se izvršavaju lokalno na nivou jedne logičke grupe. Dakle, oprema ne mora biti daljinski upravljiva.
- Automatski FLISR za lokaciju kvara koristi indikatore kvara, digitalne snimače kvara ili mikroprocesorske releji. Dok za izolaciju i restauraciju može koristiti sljedeću opremu: prekidač, reklozer, sekcionalizer, rastavljač snage, osigurač ili rastavljač. U automatskom režimu potrebno je da sva oprema bude daljinski upravljiva.

Skup potrebnih signala

- Logika na osnovu koje zaštitni uređaji u jednoj logičkoj grupi, u D-FLISR rješenju, „znaju“ šta da rade bazira se na signalima koje oni između sebe razmjenjuju. Tri različita signala opisuju ponašanje koje se očekuje od zaštitnog uređaja koji ih prima, to su: signal za blokiranje (BL), signal za izolovanje (IZ) i signal za

automatsko restauriranje napajanja (AR). Njima nije potrebno ništa drugo, oni „znaju“ šta treba da urade u zavisnosti od signala koji prime.

- Za C–FLISR rješenje potrebno je sakupiti aktuelne statuse indikatora kvara koji pripadaju fideru afektovanom kvarom. Vrijednost signala na indikatoru kvara (IK_Status) može biti aktivan (On) ili neaktivan (Off). Sa mjernih jedinica čitaju se dva tipa analognih i dva tipa digitalnih signala. Analogni signali predstavljaju naponska i strujna mjerenja u sve tri faze (Napon_Amplituda, Napon_Ugao, Struja_Amplituda, Struja_Ugao). Digitalni tipovi signala su tip kvara (tipKvara) i faze pogođene kvarom (fazeKvara).

Skup potrebnih podataka za donošenje odluka

- D–FLISR rješenje svoju logiku sprovodi u zavisnosti od trenutne topologije mreže. Dakle, rješenje se bazira na topologiji i potkovano je određenim pravilima, na osnovu kojih se ručno podešava određena konfiguracija. Stoga, nisu potrebne nikakve metode i proračuni u svrhe, lokacije i izolacije kvara i restauracije napajanja.
- U zavisnosti od primijenjene metode za lokaciju kvara, C–FLISR zahtijeva različite ulazne podatke. Za svaku metodu potreban je identifikator zaštitne opreme i model konektivnosti mreže. Metoda indikatora kvara zahtijeva očitane statuse indikatora kvara, dok strujna i impedantna metoda zahtijevaju vrijednosti mjerenja struje i napona kvara prikupljenih sa mjernih uređaja. Ulazni podatak u funkciju za izolaciju kvara je lista sekcija koje su pogođene kvarom, dok je ulaz u funkciju za restauraciju rezultat funkcije za izolaciju kvara. Kada se radi restauracija napajanja, FLISR algoritam traži najbolje varijante za restauraciju i rangira ih prema nekom unaprijed specificiranom kriterijumu. Sve informacije potrebne za proračun u automatskom režimu su primljene putem SCADA sistema.

Vrijeme djelovanja

- Mijenjanje konfiguracije nema veze sa pojavom kvarom, već se vrši svaki put kada se promijeni topologija mreže kako bi se uvažila nova konektivnost. Kada se kvar desi, tada je logika već pripremljena i svaki zaštitni uređaj u grupi „zna“ šta treba da radi. Očekivano vrijeme za koje se odrade detekcija, lokacija, izolacija i restauracija je ~10s.
- Vrijeme izvršavanja automatskog C–FLISR rješenja zavisi od primijenjene metode za lokaciju kvara i opremljenosti fidera daljinski upravljivom opremom. „Metoda indikatora kvara“ daje najbrže vrijeme izvršavanja ukoliko je fider opremljen velikim brojem indikatora kvara jer je bazirana uglavnom na topološkim pretragama. Ukoliko na fideru ne postoji dovoljan broj indikatora kvara koristi se „Strujna metoda“, koja daje tačnije rezultate za kvarove na početku fidera ili „Impedantna metoda“, čiji su rezultati validniji ukoliko se kvar desio u dubini mreže. Očekivano vrijeme djelovanja je ~1min.

Prednosti i nedostaci oba rješenja

- Prednost C–FLISR rješenja je u tome što centralni sistem ne zavisi od konfiguracije fidera. Kada dobije neophodne informacije za proračun, on uvijek „zna“ da locira kvar, pošalje odgovarajuću komandu za izolaciju kvara i nađe najbolju varijantu za restauraciju napajanja.

Osnovna mana jeste da svaki uređaj mora komunicirati sa centralnim sistemom direktno. Takođe, zahtijeva veliki skup podataka i proračune za donošenje odluka. Ovaj pristup je i dalje dominantan u savremenim DM.

- D–FLISR rješenje, zasnovano na logičkoj selektivnosti zaštite je jednostavno, ali zavisno od konfiguracije samog fidera. Da bi opisana logika radila, takva konfiguracija mora da se ugradi u svaki dio mreže. To je prilično skupo, tako da se biraju samo fideri u urbanim predjelima sa kojih se napajaju „bitni“ potrošači. Osnovna mana ovakvog pristupa je da svaki put kada se fider rekonfiguriše i sama logička šema mora biti rekonfigurisana, manuelno, kako bi logika ispravno radila kada se dogodi kvar u mreži. Osnovna prednost je u tome što mu nije potreban veliki skup podataka, kao ni proračuni za donošenje odluka. Komunikacija između uređaja na nivou stanice je mnogo brža, što čini ovo rješenje dosta efikasnijim. U posljednjih 10 godina postoji značajan trend porasta implementacije D–FLISR rješenja.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu dat je opis i komparativna analiza decentralizovanog i centralizovanog FLISR rješenja. Izbor pravog i jedinog rješenja nije moguć, jer oba pristupa imaju svoje prednosti i mane. Dok decentralizovani FLISR vrši bržu restauraciju napajanja i počiva na jednostavnim pravilima koja se poštuju unutar jedne logičke grupe, centralizovani FLISR nudi uvid u cijeli sistem koji treba da restauriše, dajući tako najoptimalnije rješenje.

Oba pristupa zahtijevaju visoki stepen testiranja u cilju sticanja povjerenja ljudi u njihovu tačnost. Dalji razvoj i implementacija oba rješenja je neminovan, s obzirom na to da FLISR postaje jedna od najatraktivnijih aplikacija u savremenim distributivnim sistemima.

7. LITERATURA

- [1] Vehbi C. Gungor, Bin Lu, Gerhard P. Hancke, *Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 10, 2010.
- [2] Vladimir C. Strezoski, *Osnovi elektroenergetike*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad 2019.
- [3] Patrick McDaniel, Stephen McLaughlin, *Security and Privacy Challenges in the Smart Grid*, IEEE Security&Privacy vol. 7, no. 3, pp. 75 – 77, 2009.
- [4] Nenad Katić, *Menadžment sistemi u elektroenergetici – DMS*, materijal sa predavanja, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, 2019.

Kratka biografija:



Sara Tomić rođena je u Vlasenici 1995. god. Osnovne studije završila je na Fakultetu tehničkih nauka 2018. godine iz oblasti Elektrotehnike i računarstva, smjer Elektroenergetski sistemi. Master rad na istom fakultetu smjer Elektroenergetika – Elektroenergetski sistemi odbranila je 2020. godine.

Kontakt: sara.tomic95@gmail.com