Broj rada: R3-04
DOI:10.46793/CIRED2026.R3-04_201

PRIMENA SLOŽENIH REŠENJA AUTOMATIZACIJE SN ELEKTRODISTRIBUTIVNE MREŽE

APPLICATION OF COMPLEX AUTOMATION SOLUTIONS OF THE MC ELECTRIC DISTRIBUTION NETWORK

Dušan Vukotić, „Elektrodistribucija Srbije“ d.o.o. Beograd, Srbija*
Stojan ŠIŠKOSKI, „Elektrodistribucija Srbije“ d.o.o. Beograd, Srbija
Goran PETROVIĆ, „Schneider Electric Beograd“ d.o.o. Beograd, Srbija
Saša ĐOKOVIĆ, „SNE Energy“ d.o.o. Čačak, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Priključenje značajnih korisnika SN elektrodistributivne mreže koji imaju visoke zahteve u cilju obezbeđenja najviših nivoa pouzdanosti napajanja, uslovljava njihovo priključenje preko složenih delova elektrodistributivne mreže, koja su do sada samo parcijalno bila pokrivena primenjenim koncepcijama automatizacije SN elektrodistributivne mreže. U radu je prikazano složeno rešenje automatizacije SN elektrodistributivne mreže koje se bazira na „decentralizovanom“ konceptu, jer napojne transformatorske stanice ne poseduju mrežne kontrolere, već se primenjeno automatizacije rešenje bazira na primeni rešenja funkcija lokalne automatike. U radu će biti prikazani primenjeni koncept automatizacije kroz koordinaciju rešenja lokalne automatike, koji će biti ilustrovani na vremenskim prikazima reagovanja lokalne automatike. Tokom sprovedenog funkcionalnog ispitivanja primenjenog rešenja složene automatizacije SN mreže vršena je provera rada implementirane lokalne automatike u realnim pogonskim uslovima putem simulacije kvarova na određenim elementima dela napojne složene SN elektrodistributivne mreže.

Ključne reči: Inteligentna mreža, Automatizacija SN mreže, Daljinska stanica, Složena SN mreža

ABSTRACT

The connection of significant users of the MV power distribution network who have high requirements in order to ensure the highest levels of power supply reliability, conditions their connection through complex parts of the power distribution network, which have so far only been partially covered by the applied concepts of automation of the MV power distribution network. The paper presents a complex solution for automation of the MV power distribution network based on a "decentralized" concept, because the feeder transformer stations do not have network controllers, as an upgrade of the existing integrated protection and control system, but the applied automation solution is based on the application of local automation functions. The paper will present the applied concept of automation through the coordination of local automation solutions, which will be illustrated by time displays of the response of local automation. During the functional testing of the applied solution of complex automation of the MV network, the operation of the implemented local automation was checked in real operating

*dusan.vukotic@es.rs

conditions by simulating failures on certain elements of the feeder part of the complex MV power distribution network.

Keywords: Smart grid, Automation MV network, RTU, Complex MV network

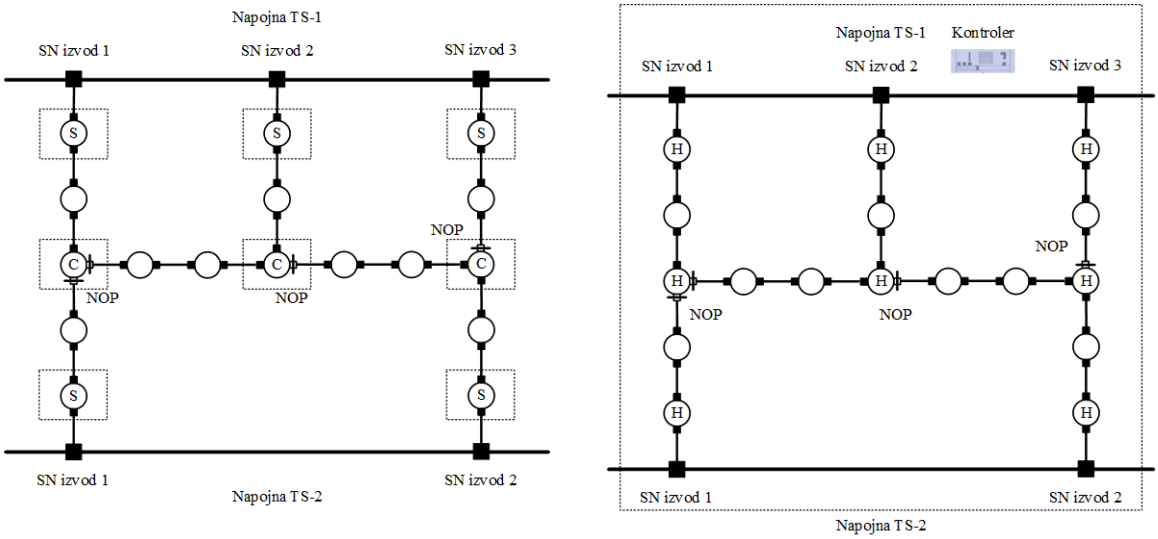
1 UVOD

Postojeći koncepti automatizacije SN elektrodistributivne mreže su do sada pre svega bili orjentisani kao SN elektrodistributivnim mrežama koje su napajale transformatorske stanice SN/NN, koje su zasnovane na osnovnim rešenjima oblikovanja SN elektrodistributivne mreže. Stepen automatizacije SN elektrodistributivne mreže neprestano se povećava tokom prethodnih decenija, gde su pretežno obuhvaćene koncepcijske SN mreže oblikovane po principu „petlji“ i „međupoveznih“ vodova. Poslednjih godina, prisutno intenzivno proširenje i pojačanje SN elektrodistributivne mreže zbog priključenja složenih elektroenergetskih objekata korisnika elektrodistributivnog sistema koji zahtevaju najveći nivou pouzdanosti u njihovom napajanju, dovelo je do potrebe da se primenjuju koncepcije automatizacije SN mreže koje bi te zahteve zadovoljile [1]. Zahtevani najveći nivo pouzdanosti napajanja ciljnih značajnih korisnika zahteva po pravilu potpunu automatizaciju dela mreže na koju se predmetni elektroenergetski objekti priključuju. U poslednjih nekoliko godina, primenjeni koncepti napredne automatizacije su se već potvrdili kroz primenu u određenim delovima elektroenergetskog sistema, a pre svega u centralnim gradskim zonama sa velikim brojem značajnih korisnika. Nažalost, zbog ograničene primene rešenja na određenim delovima SN elektrodistributivne mreže nije moguće pokriti putem implementiranih kontrolera u napojnim transformatorskim stanicama SN/SN i VN/SN, sve prisutnija složena priključenja određenih korisnika koji zahtevaju najviši nivou pouzdanosti u napajanju. Napajanje korisnika elektrodistributivnog sistema koji zahtevaju najviši nivo pouzdanosti napajanja se po pravilu vrši preko složenih mreža koja su krajnje specifične i ne uklapaju se u osnovna koncepcijska rešenja, već prevashodno predstavljaju njihovu kombinaciju [2]. Nesporno je da bi rešenje napredne automatizacije SN elektrodistributivne mreže koje je realizovano na bazi „polu-decentralizovanog“ koncepta sa primenom mrežnom kontrolera na krajnje efikasan način obezbedilo primenu potpune automatizacije dela mreže preko koje se napajaju ciljni značajni korisnici, ali zbog njihove ograničene primene bilo je potrebno pronaći rešenja koja se koriste u okviru osnovne koncepcije automatizacije SN elektrodistributivne mreže.

2 AUTOMATIZACIJA SLOŽENE SN ELEKTRODISTRIBUTIVNE MREŽE

Koncepcija složene SN elektrodistributivne mreže često zbog svoje specifičnosti nije obrađena u konceptualnim postavkama oblikovanja SN mreže. Ona po pravilu predstavlja kombinaciju osnovnih koncepcija mreže, pri čemu se po pravilu značajni korisnici zahtevaju napajanje iz više napojnih transformatorskih stanica SN/SN ili VN/SN preko više napojnih SN vodova. Kod složenih SN elektrodistributivnih mreža moramo razdvojiti slučajeve kada se značajni korisnici SN mreže napaja preko dela SN mreže koja napaja ostale korisnike široke potrošnje i slučajeve kada se oni napajaju direktnim SN izvodima iz nekoliko susednih napojnih transformatorskih stanica. Takođe, po pravilu svoje priključenje uslovljavaju zahtevom (budući da finansiraju svoj priključak na SN mrežu) da se njihovo napajanje realizuje preko više napojnih SN vodova (najčešće tri voda). Značajni korisnici su često napajani preko “čvornih” transformatorskih stanica SN/NN, koje poseduje najčešće tri SN napojna voda u dubini SN elektrodistributivne mreže [3]. Po pravilu, važno je istaći da složena SN elektrodistributivne mreža povezuje više napojnih transformatorskih stanica preko više SN izvoda i da je to njena glavna karakteristika. Pojava složenih SN elektrodistributivnih mreža najčešće je uslovljena odsustvom realizacije

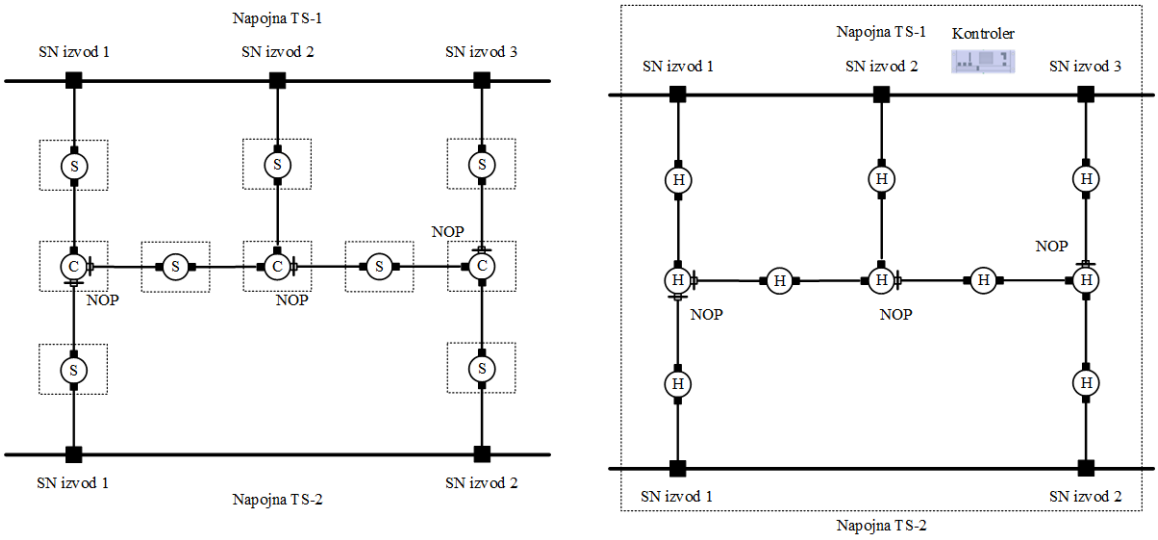
konačnog raspleta zbog nedostatka investicionih sredstava na pojedinim konzumnim područjima novoizgrađenih napojnih transformatorskih stanica. Na Slici 1a prikazan je karakterističan primer složene SN elektrodistributivne mreže koja se napaja iz više napojnih transformatorskih stanica preko više SN izvoda, gde su prema usvojenoj koncepciji automatizacije SN mreže (III nivo automatizacije) u pojedinim transformatorskim stanicama SN/NN primenjena rešenja automatizacije sa ugrađenim funkcijama lokalne automatike (**S**EC – sekcioner; **C**HO – automatsko prebacivanje pravca napajanja) [4, 5, 6].



a) III nivo automatizacije SN mreže b) V nivo automatizacije SN mreže

Slika 1 – Rešenja automatizacije složene SN elektrodistributivne mreže

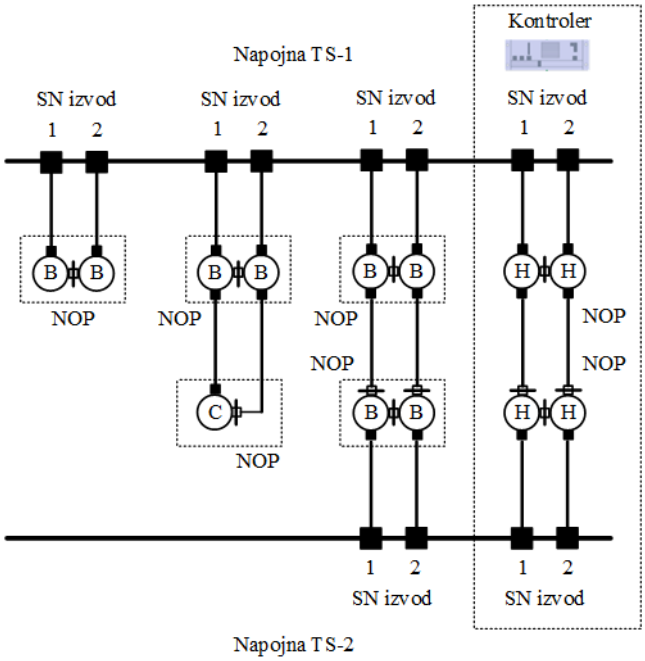
Na Slici 1b prikazan je primer složene SN elektrodistributivne mreže, gde su ciljne transformatorske stanice (H – „Self-Healing“) uključene u naprednu koncepciju automatizacije SN mreže (V nivo automatizacije), koja je realizovana na delu SN elektrodistributivne mreže koja je pokrivena mrežnim kontrolerom u jednoj od napojnih transformatorskih stanica.



a) III nivo automatizacije SN mreže b) V nivo automatizacije SN mreže

Slika 2 – Rešenja potpune automatizacije složene SN elektrodistributivne mreže

Na Slikama 2 (a,b) prikazana je redukovana složena SN mreža u istim koncepcijskim postavkama (III i V nivo automatizacije SN mreže) sa nešto manjim brojem automatizovanih transformatorskih stanica SN/NN. Na predmetnim slikama je upravo i prikazana glavna poenta rada koja treba da pokaže efikasnost rešenja potpune automatizacije SN mreže koja bi se zasnivala na III nivou automatizacije, odnosno kada bi u svim automatizovanim transformatorskim stanicama SN/NN bila primenjena određena rešenja funkcija lokalne automatike.



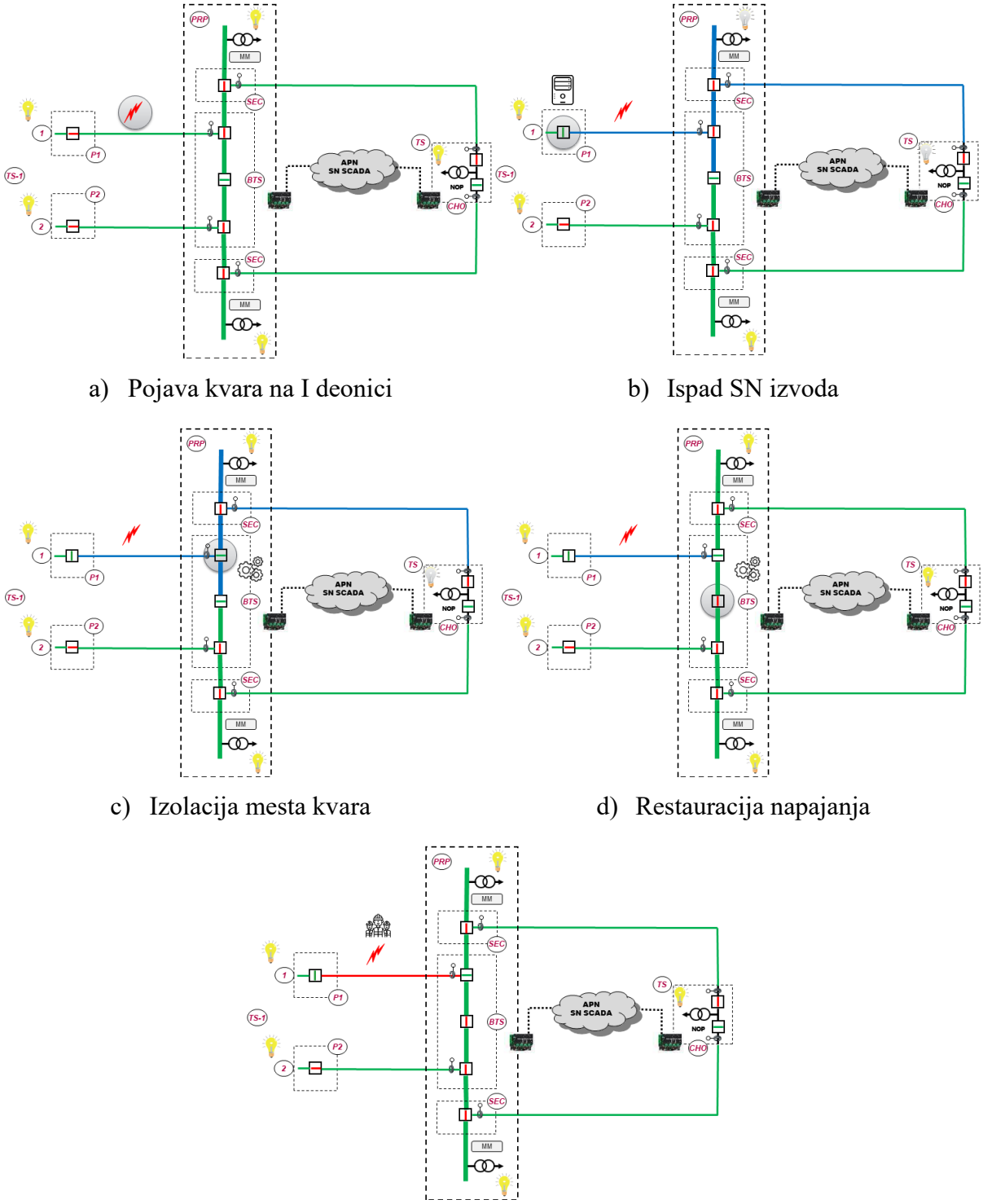
Slika 3 – Rešenja automatizacije složene SN elektrodistributivne mreže sa direktnim priključenjem značajnih kupaca

Na Slici 3 prikazani su primeri automatizacije složene SN elektrodistributivne mreže, gde su značajni korisnici priključeni direktnim SN vodovima na jednu ili više napojnih transformatorskih stanica. U prikazanim slučajevima značajni korisnici su priključeni preko SN postrojenja koja po pravilu imaju dva merna mesta na SN naponskom nivou i gde su SN napojne sabirnice produžno sekcionisane spojkom. Za takve konfiguracije SN postrojenja koriste se posebne lokalne automatike (**B**TS – „Bay Transfer Switch“), gde se automatsko prebacivanje pravca napajanja vrši uz pomoć podužne spojke.

Na prethodnoj slici prikazana su rešenja gde su značajni korisnici priključeni preko direktnih vodova, pri čemu je složenog samog priključka uslovljena složenošću SN mreže i broja mernih mesta kojim značajan korisnik raspolaže. Nesporno je da u slučaju kada se značajan korisnik priključuje preko SN izvoda u dve susedne napojne transformatorske stanice, da je superiorno rešenje koje se bazira na V nivou automatizacije, odnosno kada se primenjuje mrežni kontrolera realizovan u jednoj od napojnih transformatorskih stanica. Kao što je ranije rečeno, u radu je dat akcenat na primeni rešenja III nivoa automatizacije, odnosno kada se za ovakve složene SN mreže automatizuju kombinacijom prikazanih funkcija lokalne automatike (SEC, CHO, BTS). Važno je istaći da u III nivou automatizacije SN mreže ne postoji horizontalan komunikacija između daljinskih stanica i da se upravljačke akcije isključivo sprovode na osnovu dobijenih informacija iz automatizovanog postrojenja (signalizacije rasklopne opreme, prisustva napona, prolazak struja kvara, merenja, itd.).

3 PRIMERI RADA AUTOMATIZACIJE SLOŽENE SN MREŽE

Na Slici 4 prikazan je primer rada rešenja automatizacije složene SN mreže, koja se napaja preko dva direktna SN voda iz napojne transformatorske stanice (sa dva različita transformatora) u slučaju kvara na prvoj deonici, odnosno na jednom od napojnih SN vodova.



a) Pojava kvara na I deonici

b) Ispad SN izvoda

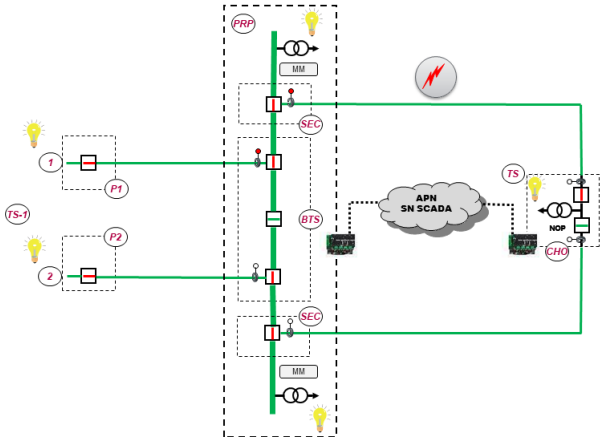
c) Izolacija mesta kvara

d) Restauracija napajanja

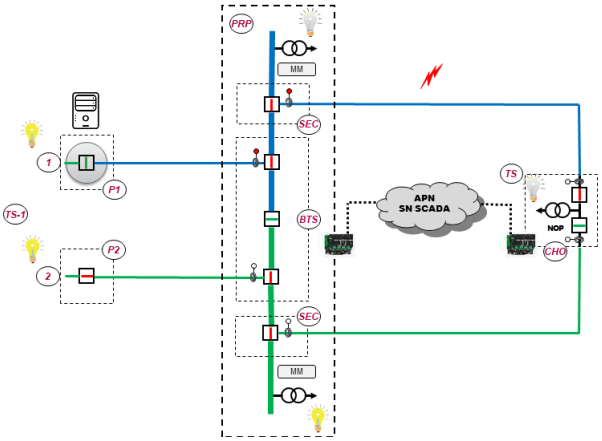
e) Popravka kvara

Slika 4 – Izolacija kvara i restauracija napajanja složene SN mreže u slučaju kvara na I deonici

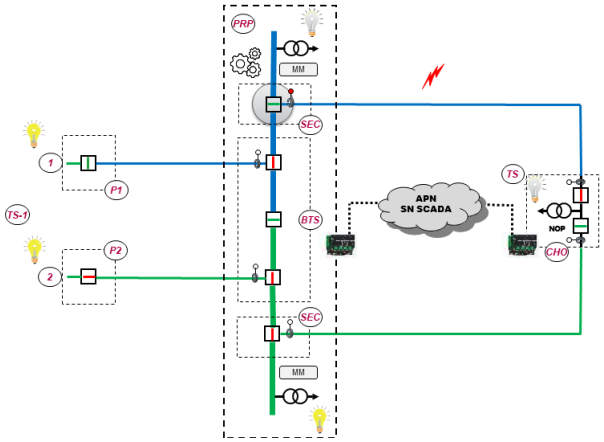
Na Slici 5 prikazan je primer rada rešenja automatizacije složene SN mreže, koja se napaja preko dva direktna SN voda iz napojne transformatorske stanice u slučaju kvara na drugoj deonici, odnosno na SN vodu koji napaja transformatorsku stanicu koja se napaja preko čvorne složene transformatorske stanice sa dva merna mesta. Za razliku od prvog primera, gde je praktično radila samo funkcija lokalne automatike BTS, u slučaju kvara na drugoj deonici, aktiviraće se sve tri realizovane funkcije lokalne automatike (BTS, SEC, CHO). Rekonfiguracija mreže nakon izolacije kvara vrši se od strane operatora u centru upravljanja, za razliku od V nivoa automatizacije, gde se to radi automatski od strane mrežnog kontrolera.



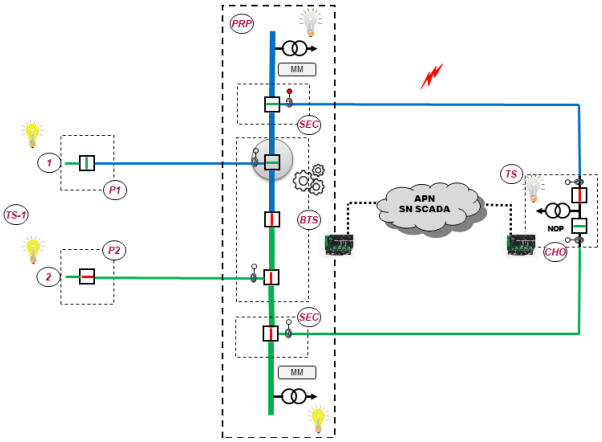
a) Pojava kvara na II deonici



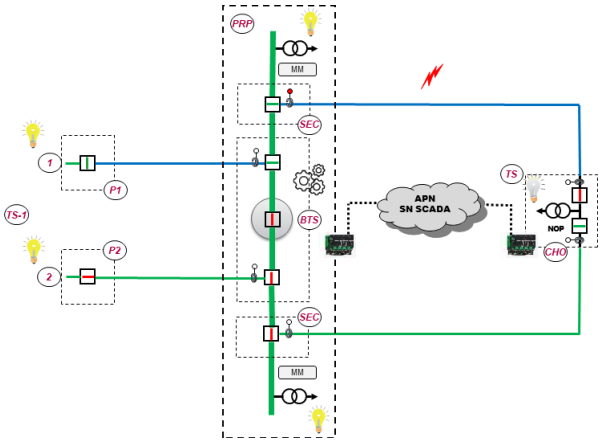
b) Ispad SN izvoda



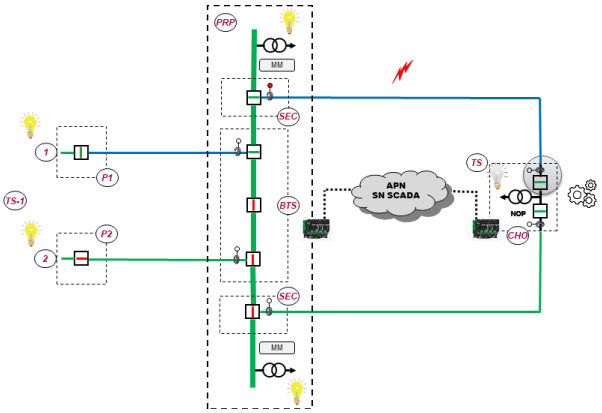
c) Izolacija mesta kvara (SEC)



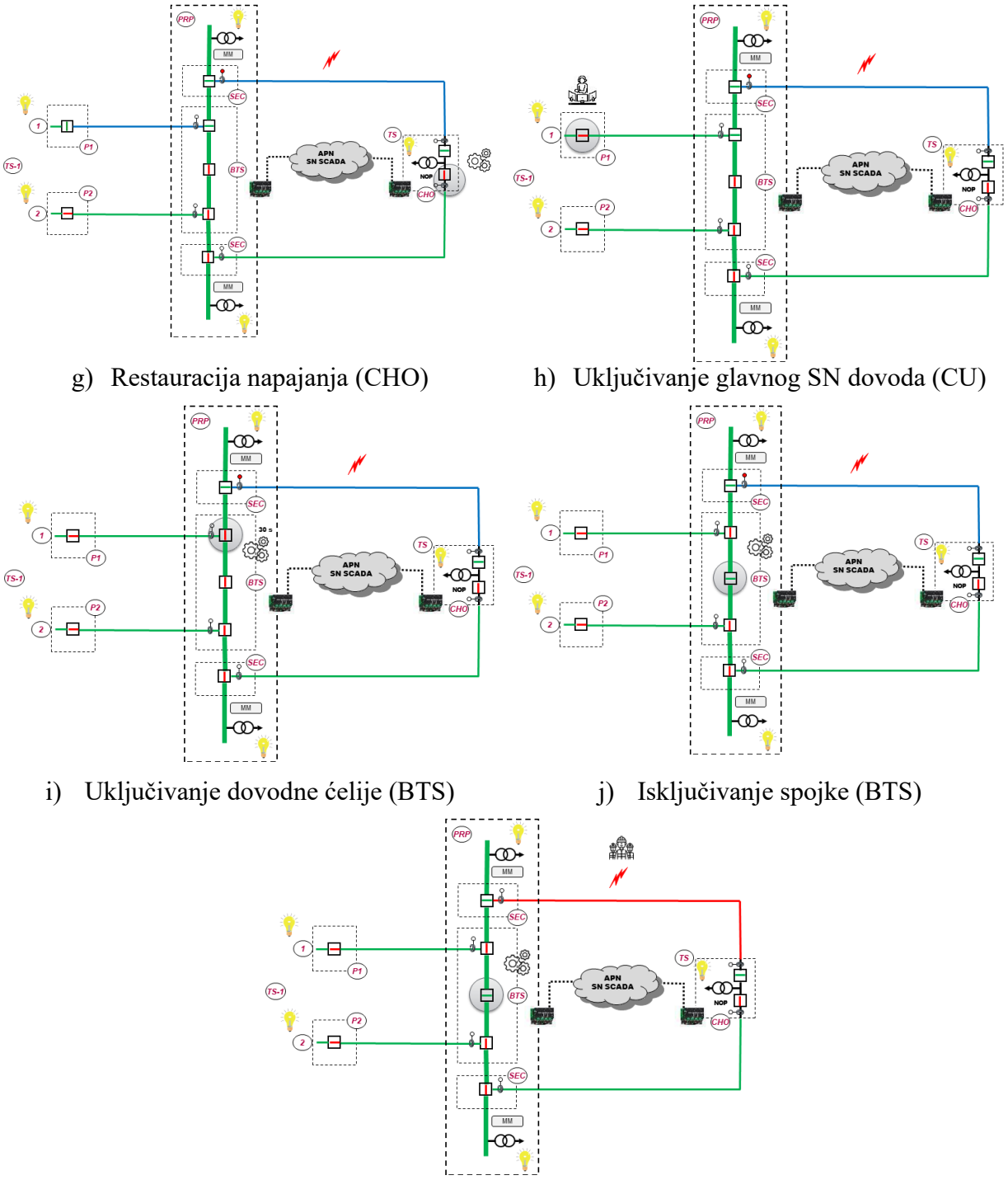
d) Isključivanje glavnog SN dovoda (BTS)



e) Restauracija dela napajanja (BTS)



f) Isključivanje pravca napajanja (CHO)



g) Restauracija napajanja (CHO)

h) Uključivanje glavnog SN dovoda (CU)

i) Uključivanje dovodne ćelije (BTS)

j) Isključivanje spojke (BTS)

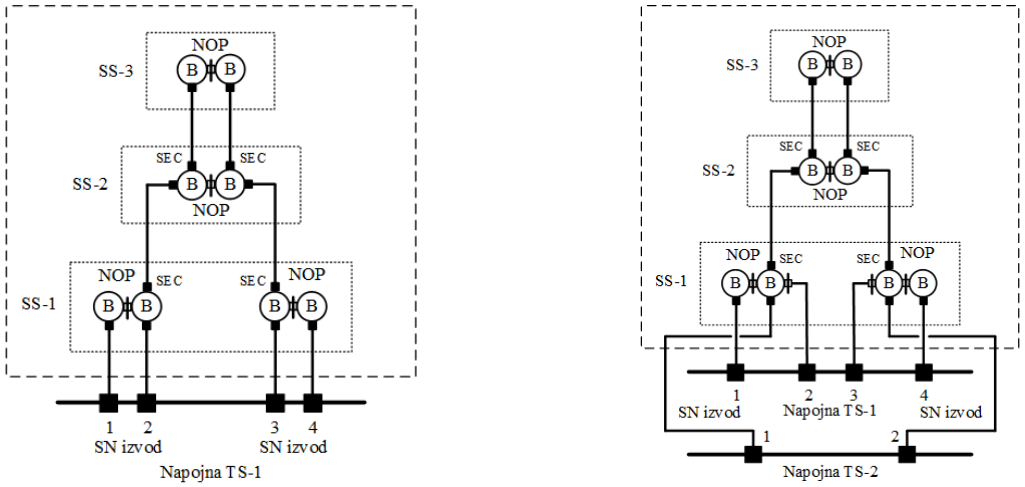
k) Popravka kvara

Slika 5 – Izolacija kvara i restauracija napajanja složene SN mreže u slučaju kvara na II deonici

Pored definisanja aktiviranja funkcija lokalne automatike po TS SN/NN izuzetno je važno izvršiti vremensko stepenovanje aktiviranja istih. Izuzetno je važno da funkcija sekcionera (SEC) koja je aktivirana na SN odvodu PRP postrojenja, bude bez vremenskog kašnjenja, odnosno da se aktivira neposredno posle ispada SN izvoda. Funkcija lokalne automatike BTS u okviru „čvornog“ PRP treba da bude vremenski tako podešena da se aktivira nakon isključenja SN odvodne ćelije PRP postojanja, gde je preporučeno vreme vremenskog kašnjenja 4 sekunde.

4 PRIKAZ REŠENJA AUTOMATIZACIJE SLOŽENE SN MREŽE

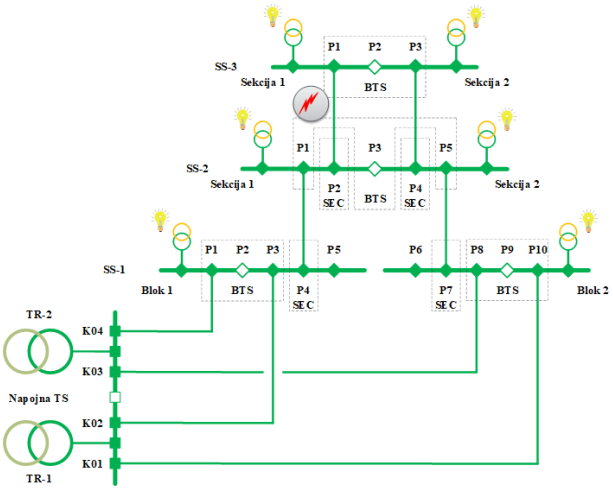
Prošle godine na konzumnom području DP Beograd priključen je značajan korisnik, koji je imao izuzetne visoke zahteve u pogledu obezbeđivanja najvišeg nivoa pouzdanosti napajanja. Njegovo priključenje je realizovano preko složenog priključka koji se sastoji od više transformatorskih stanica SN/NN složenih konfiguracija i koje su sve bile potpuno automatizovane sa podržanim funkcijama lokalne automatike (SEC, CHO, BTS).



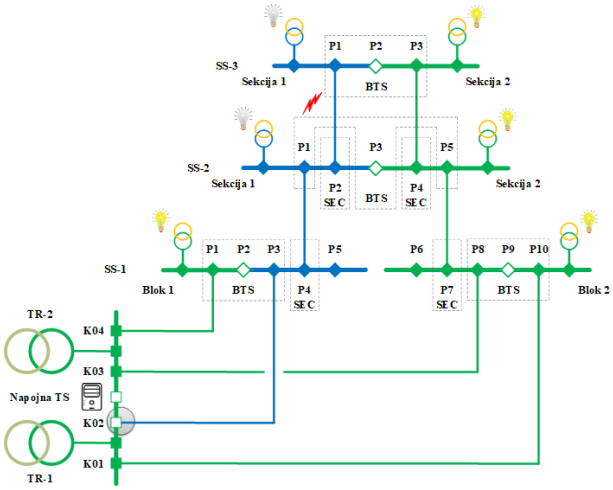
a) Trenutno stanje složene SN mreže b) Planirano stanje SN složene mreže

Slika 6 – Primenjeno rešenje potpune automatizacije složene SN mreže

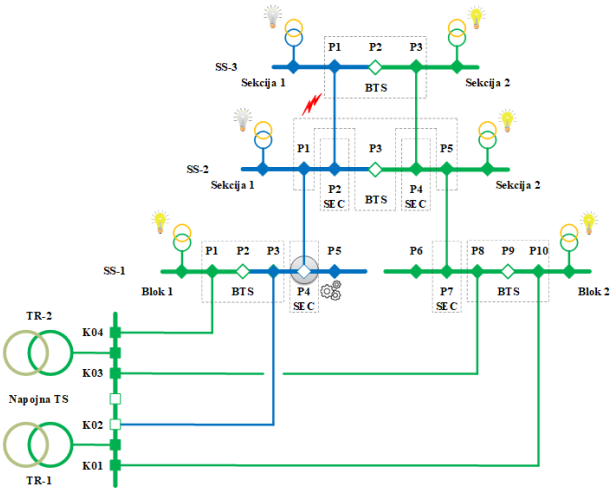
Na Slici 6a prikazano je trenutno stanje složene SN mreže, koja se napaja preko jedne napojne transformatorske stanice VN/SN (TS-1), preko četiri direktna SN izvoda. Važno je napomenuti da se SN izvodi (1,3) napajaju preko jednog transformatora snage, dok se SN izvodi (2,4) napajaju preko drugog transformatora snage u napojnoj transformatorskoj stanici. Važno je napomenuti da su sve ćelije u okviru transformatorskih stanica (SS-1, SS-2 i SS-3) uključene u neku od aktiviranih funkcija lokalne automatike (BTD ili SEC). Pri tome nije moguće da jedna SN ćelija bude u više lokalnih funkcija, već mora jednoznačno da pripada jednoj osnovnoj funkciji. U konkretnoj konfiguraciji složene SN mreže sve dovodne ćelije su uključene u funkciju BTS, dok su na svim odvodnim ćelijama prema susednim transformatorskim aktivirane SEC funkcije. Na Slici 6b prikazano je buduće planirano ciljno uklopno stanje SN složene mreže, koje će se ostvariti ulaskom u pogon nove susedne napojne transformatorske stanice VN/SN iz koje će se priključiti dve nove SN izvodne ćelije sa različitih transformatora snage. U ciljnoj konfiguraciji doći će do promene mesta SN dovodnih vodova u „čvornoj“ transformatorskoj stanici sa dve sekcije (bloka), tako da će novi SN vodovi iz nove napojne transformatorske stanice biti uključeni u funkciju BTS po svakoj sekciji (bloku) transformatorske stanice (SS-1). Postojeći vodovi će biti pod „granicom“ i oni neće moći biti uključeni u neku funkciju lokalne automatike, budući da se sve SN ćelije već obuhvaćene nekom od funkcija lokalne automatike. Operateri u nadređenom centru upravljanja će predmetne SN izvode putem daljinske komande koristiti za potrebe rekonfiguracije složene SN mreže posle ispada. U konačnoj konfiguraciji složene SN mreže, uključivanje novih SN vodova u rad funkcije lokalne automatike BTS ima pre svega za cilj da obezbedi napajanje jednog dela zgrade korisnika u slučaju kada dolazi do kompletnog ispada napojne transformatorske stanice (TS-1) usled kvara u 110 kV mreži. U trenutnoj konfiguraciji SN mreže ispad u okviru napojne 110 kV je kritičan za uspešan rad funkcija lokalne automatike, jer se ne obezbeđuju početni uslovi za njen rad, budući da će tada sve transformatorske stanice biti bez napajanja.



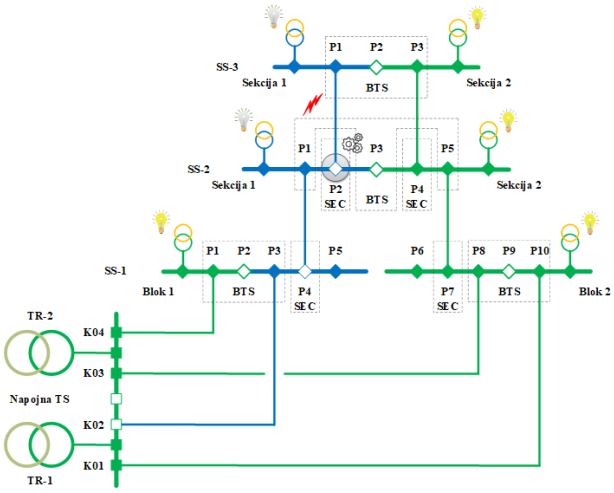
a) Pojava kvara na III deonici



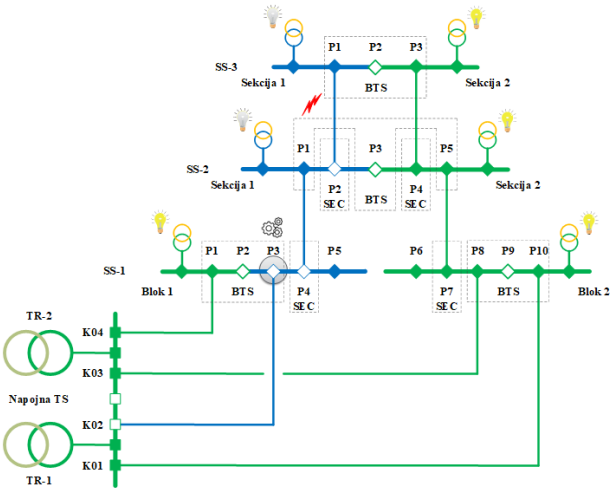
b) Ispad SN izvoda



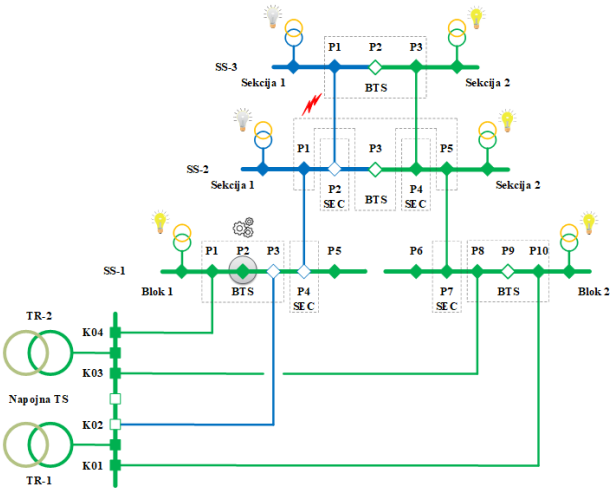
c) Izolacija mesta kvara SS-1 (SEC)



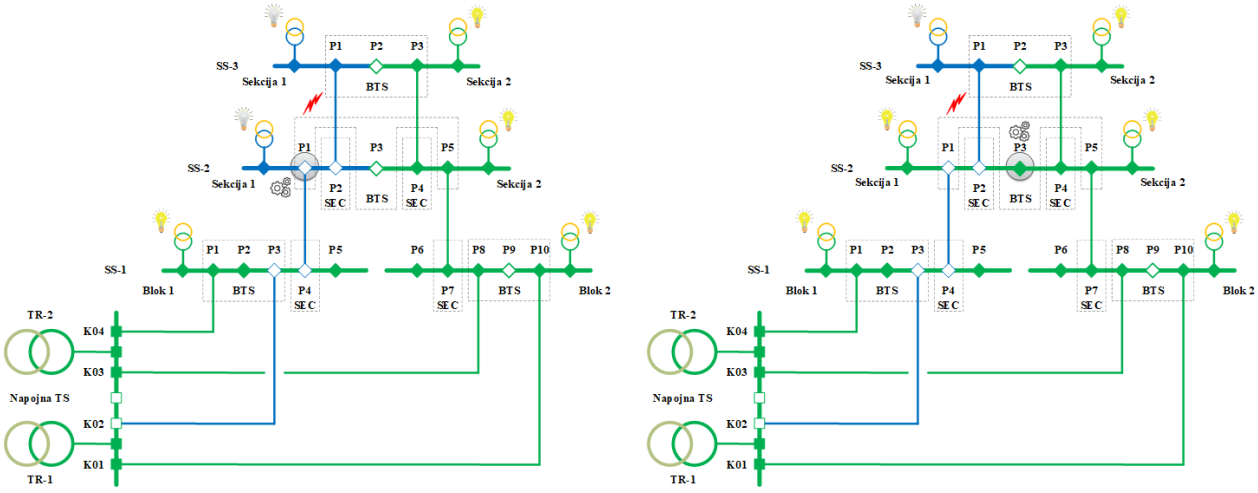
d) Izolacija mesta kvara SS-2 (SEC)



e) Izolacija glavnog SN napajanja (BTS)

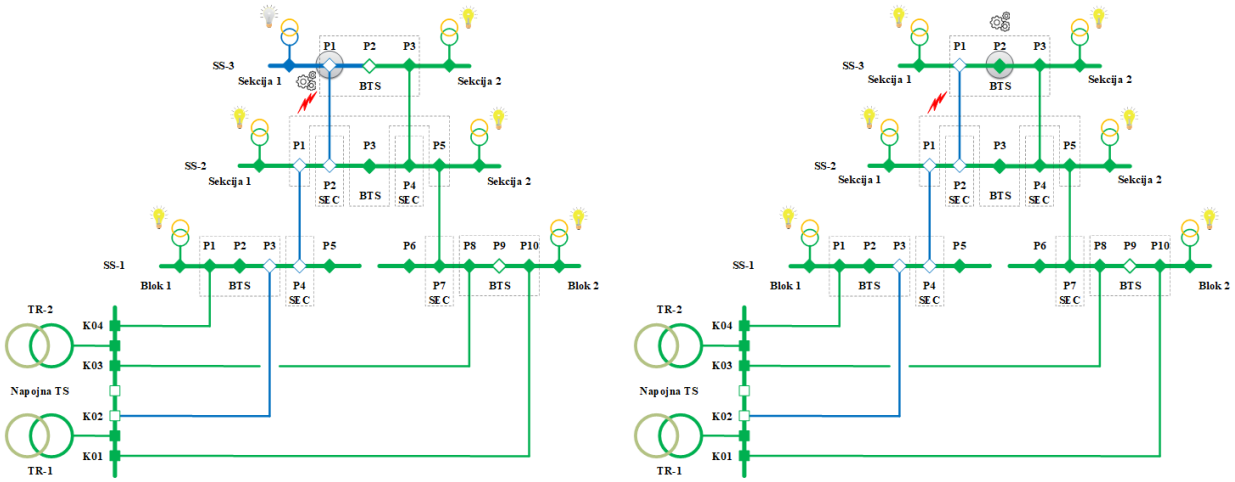


f) Restauracija napajanja SS-1 (BTS)



g) Izolacija napojnog SN voda SS-2 (BTS)

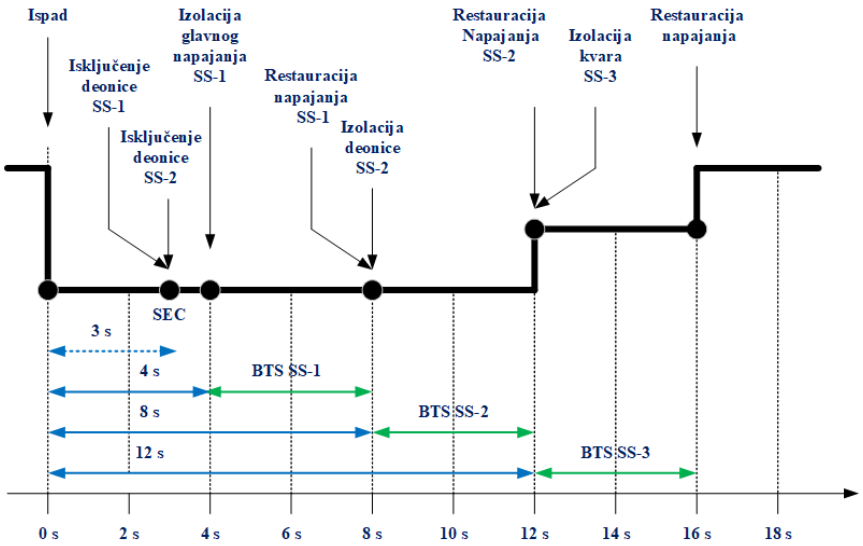
h) Restauracija napajanja SS-2 (BTS)



i) Izolacija kvara SS-3 (BTS)

j) Restauracija napajanja SS-3 (BTS)

Slika 7 – Izolacija kvara i restauracija napajanja složene SN mreže u slučaju kvara na III deonici



Slika 8 – Vremenski presek automatizacije složene SN mreže u slučaju kvara na III deonici

Na Slici 7 je prikazan rad rešenja automatizacije složene SN mreže korisnika u slučaju kvara na drugoj deonici mreže, odnosno na delu mreže između transformatorskih stanica (SS-2 i SS-3). Prikazan je detaljan rad kroz izveštavanje svih pojedinačnih upravljačkih akcija od strane aktiviranih funkcija lokalne automatike (BTS, SEC). Pojedinačne upravljačke akcije su hronološki prikazane iako za neke akcije ima vremensko poklapanje prilikom njihovog izvršavanja. Na Slici 8 je prikazan vremenski presek rada automatizacije, gde se može uočiti da se kompletna restauracija napajanja svim korisnicima složene mreže koji su pogođeni ispadom SN elementa obezbeđuje ukupno za 16 sekundi u skladu sa podešenim vrednostima rada funkcija lokalne automatike (SEC, BTS). Važno je napomenuti da da funkcije lokalne automatike BTS implementirane po transformatorskim stanicama moraju da budu vremenski stepenovane u odnosu na sam rad funkcije BTS. Sa dijagrama se vidi da to vreme treba da bude najmanje 4 sekunde u odnosu na izvršavanje same funkcije kojoj je zbog sporosti rada sklopka-rastavljača u spojnom polju (oko 3 sekunde). Na svim vodnim poljima su ugrađeni „brzi“ pogoni sklopka-rastavljača, čije je vreme reagovanja 0,3 sekunde. U slučaju kada bi se ugradili svi „brzi“ pogoni rasklopne opreme ukupno vreme za restauraciju napajanja svim korisnicima pogođenim ispadom bi bilo ispod 6 sekundi. U Tabeli 1 prikazana su podešenja rada funkcija lokalne automatike po transformatorskim stanicama SN/NN, koja prate vremenski presek dat na prethodnoj slici. Važno je napomenuti da se funkcija lokalne automatike SEC izvršava bez zadrške, neposredno nakon obezbeđivanja uslova za njen rad (indikacije nestanka napona i prolazak struje kvara).

Tabela 1 – Podešenja rada lokalnih automatika (BTS, SEC) po transformatorskim stanicama

	SS-1	**SS-2**	**SS-3**
Zadrška automatike BTS (beznaponska pauza)	4 s	8 s	12 s
Indikacija nestanka napona (zadrška)	3 s	3 s	3 s
Isključenje SN dovod (BTS)	0,3 s	0,3 s	0,3 s
Isključenje SN dovod (SEC)	0 s	0 s	0 s
Uključenje SN spojke (BTS)	3 s	3 s	3 s
Vreme stabilnog napona na SN dovodu	30 s	30 s	30 s

Na Slici 9 je prikazana HRD lista prilikom funkcionalnog ispitivanja, gde se može uočiti vreme potrebno da se funkcija lokalne automatike HRD izvrše prema datim podešenjima. Budući da zbog izuzetne složenosti mreže i potrebnih isključenja korisnika da se funkcionalna ispitivanja izvrše, ispitivanje je izvršeno po pojedinačnim transformatorskim stanicama vremenski pomereno po nekoliko časova, tako da ne može da se utvrdi ukupno vreme restauracije napajanja korisnika, već samo pojedinačna restauracija po svakoj transformatorskoj stanici SN/NN.



Slika 9 – Pregled HRD liste događaja tokom funkcionalnog ispitivanja TS SN/NN (SS-3)

5 ZAKLJUČAK

Primena složenih rešenja potpune automatizacije SN složenih elektrodistributivnih mreža, kada se koriste samo funkcije lokalne automatike sama po sebi predstavljaju veliki inženjerski izazov. Do sada su se u praksi potvrdila rešenja u skladu sa postavljenim nivoima automatizacije koja koriste funkcije lokalne automatike za slučaj kada se primenjuje osnovni koncept automatizacije SN mreže u kome sve transformatorske stanice SN/NN duž SN izvoda po pravilu nisu automatizovane. Prikazano rešenje nesumnjivo ukazuje da je moguće prilikom primene potpune automatizacije SN mreže, kada su sve transformatorske stanice SN/NN automatizovane duž SN vodova ili kada formiraju složene SN mreže, na vrlo efikasan način da obezbede efikasnu restauraciju napajanja korisnicima koji su pogođeni ispadom, kao i da izvrše izolaciju elementa mreže pogođenim kvarom. Mana ovakvo primenjenih rešenja leži u činjenici da nisu sposobna da izvrše potrebnu automatsku rekonfiguraciju SN mreže, već moraju da operateri u nadređenim centrima upravljanja izvrše upravljače akcije daljinskom komandom u cilju uspostavljanja novog uklopnog stanja mreže. Takođe, odsustvo horizontalne komunikacije između opreme za automatizaciju SN mreže predstavlja veliki problem u cilju obezbeđivanja željenog rada automatike, jer se funkcije lokalne automatike isključivo baziraju na informacijama po pojedinačnim elektroenergetskim objektima. Dobrom koordinacijom rada funkcija lokalne automatike problem odsustva horizontalne komunikacije nije eliminisan, ali u velikoj meri je ublažen i dobijeni su za veliki broj mogućih ispada zadovoljavajući rezultati rada automatizacije SN mreže. Svakako da primena mrežnih kontrolera u složenim SN mrežama nema adekvatnu alternativu, budući da rad kontrolera pokriva praktično sve moguće scenarije pojave ispada, kao i načine sprovođenja restauracije i rekonfiguracije kroz efikasan nadzor dela SN mreže.

6 LITERATURA

[1] D. Vukotić, S. Šiškoski and B. Ćirić,"Uporedna analiza primenjenih rešenja napredne automatizacije SNDM mreže", 14. Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije (CIRED Srbija 2024), rad R-3.01, DOI: 10.46793

[2] D. Vukotić, S. Šiškoski, and B. Ćirić, "Evolucija koncepta automatizacije kablovske srednjenaponske elektrodistributivne mreže," Elektroprivreda – Electric Power Industry Journal, vol. 3, no. 2, 2025

[3] D. Vukotić, B. Ćirić, S. Cvetković i N. Čolović, "Primena napredne automatizacije SNDM mreže (Application of Advanced Automation of MV Electricity Distribution Network)," 13. Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije (CIRED Srbija 2022), rad R-3.01, Kopaonik, Srbija, 2022.

[4] Shahin, A.M.: 'Smart Grid Self-Healing for Underground Distribution Network', 2013 IEEE ISGT Asia

[5] T. D. Sudhakar and K. N. Srinivas „Restoration of power network – a bibliographic survey", European Transactions on Electrical Power 21(1), pages:635 – 655, January 2011, DOI:10.1002/etep.467

[6] R. W. Uluski, „The Role of Advanced Distribution Automation in the Smart Grid", IEEE PES General Meeting, July 2010, DOI:10.1109/PES.2010.5590075