

Dušan Vukotić<sup>1\*</sup>, Božidar Ćirić<sup>1</sup>, Stojan Šiškoski<sup>1</sup>



## Evolucija koncepta automatizacije kablovske srednjenaponske elektrodistributivne mreže

<sup>1</sup>„Elektrodistribucija Srbije” d. o. o. Beograd, Srbija

Stručni rad

### Ključne poruke

- Automatizacija srednjenaponske (SN) elektrodistributivne mreže je okosnica inteligentnih mreža
- Potrebno je da se dosadašnji primenjeni koncept automatizacije SN elektrodistributivne mreže značajno unapredi
- Unapređeni koncept automatizacije SN elektrodistributivne mreže omogućava efikasnu restauraciju napajanja krajnjih korisnika nakon pojave kvara

### Kratak sadržaj

Pre više od dve decenije, za elektrodistributivno područje Beograda usvojen je koncept automatizacije srednjenaponske (SN) elektrodistributivne (ED) mreže, koji je bio početna osnova za njenu dalju intenzivnu automatizaciju. Koncept SN ED mreže se pre svega zasniva na decentralizovanom konceptu, gde je veliki broj elemenata bio planiran za integraciju u Sistem daljinskog upravljanja (SDU), sa mogućnošću aktiviranja standardnih predefinisanih funkcija lokalne automatike. Tokom poslednje decenije došlo je do značajnog funkcionalnog unapređenja opreme za automatizaciju SN ED mreže, usled intenzivne digitalizacije. Stoga je bilo potrebno redefinisati dalje pravce u smislu unapređenja postojećeg koncepta automatizacije, gde bi se veliki broj postojećih i novih automatizovanih tačaka u okviru SN ED mreže efikasno integrisao u SDU. Takođe, zahtevi u pogledu sve veće pouzdanosti SN ED mreže doveli su do situacije da je potrebno povećati stepen njene automatizacije, ali i da se obezbedi daleko veći stepen koordinacije između ugrađene opreme za automatizaciju SN ED mreže. Iz navedenih razloga bilo je neophodno započeti sa primenom novih savremenih koncepata napredne automatizacije SN ED mreže, koji su bili podržani najnovijom generacijom opreme i rešenja najvećih svetskih proizvođača opreme. Jedno rešenje je obuhvatalo primenu poludecentralizovane koncepcije sa mrežnim kontrolerima, dok je drugo rešenje obuhvatalo primenu rešenja bez mrežnog kontrolera sa predefinisanim aplikativnim algoritmom u okviru ugrađene i integrisane opreme za automatizaciju SN ED mreže. Oba rešenja su značajno podigla stepen automatizacije kablovske SN ED mreže u centralnim delovima grada, gde je izuzetno veliko specifično površinsko opterećenje, a samim tim obuhvaćen je veliki broj krajnjih kupaca realizovanim rešenjima. U radu je data uporedna analiza primenjenih rešenja, pri čemu je dat poseban osvrt na sve uočene prednosti primenjenih rešenja, ali i uočene nedostatke.

### Ključne reči

Inteligentne mreže, napredna automatizacija, SN mreža

Primljeno: 24. februar 2025.

Recenzirano: 3. jun 2025.

Izmenjeno: 9. jul 2025.

Odobreno: 18. jul 2025.

\*Korespondirajući autor: Dušan Vukotić, +381 64 834 2210

Imejl: [dusan.vukotic@es.rs](mailto:dusan.vukotic@es.rs)

#### Napomena:

Ovaj članak predstavlja proširenu, unapređenu i dodatno recenziranu verziju rada „Uporedna analiza primenjenih rešenja napredne automatizacije SN ED mreže“, nagrađenog u Stručnoj komisiji STK-3 Zaštita i upravljanje elektrodistributivnim mrežama, na 14. Savetovanju CIRED Srbija, Kopaonik, 16-20. septembra 2024. godine

## 1. UVOD

U trenutku kada je integracija distribuirane proizvodnje u okviru elektrodistributivne mreže na svim naponskim nivoima praktično došla do kritičnih nivoa, automatizacija distributivne elektrodistributivne mreže kao osnova za integraciju dobija na sve većem značaju. Praktično je od samog početka primene koncepcija inteligentnih mreža (*Smart Grids*) bilo jasno da automatizacija elektrodistributivne mreže predstavlja osnovu za dalji razvoj i njihovu široku primenu. Nažalost, prilikom razvoja i primene inteligentnih mreža pristupilo se implementaciji nekih njihovih drugih segmenata, kao što je npr. Realizacija sistema AMI (*Advanced Metering Infrastructure*) kroz masovnu zamenu (*Roll-out*) postojećih elektromehaničkih brojila inteligentnim brojilima (*Smart Meters*). U poslednje vreme došlo se do zaključka da je automatizacija mreže ključna za obezbeđivanje masovne integracije distribuirane proizvodnje u elektrodistributivnu mrežu, pre svega jer ona u sebi objedinjuje osnovni fundament inteligentnih mreža koji se ogleda u potpunoj integraciji energetskih i telekomunikacionih resursa koje poseduje jedno elektroprivredno preduzeće. Takve mreže postaju osnov za efikasno upravljanje aktivnim distributivnim mrežama, pred kojima se postavljaju višestruki izazovi. Oni su u poslednje vreme oličeni u potrebi da se obezbedi potrebna fleksibilnost u okviru elektrodistributivnih mreža. Predstojeće stanje mreže, kao i promena karaktera elektrodistributivne mreže iz pasivne u aktivnu mrežu, zahteva pre svega intenzivnu modernizaciju SN ED mreže, u okviru koje je „Elektrodistribucija Srbije” kao operator distributivnog sistema (ODS) u Republici Srbiji planirala da velika finansijska sredstva uloži u njenu modernizaciju. Modernizacija u cilju automatizacije SN ED mreže započela je pre više od dvadeset godina, kada je usvojena inicijalna koncepcija upravljanja SN elektrodistributivnom mrežom na konzumnom području Beograda, [1]. U prethodne dve decenije sprovedene su dve faze implementacije automatizacije SN ED mreže na konzumnom području Beograda. U prvoj fazi uvedena su rešenja decentralizovanog nadzora i upravljanja na nadzemnoj SN elektrodistributivnoj mreži, uvođenjem reklozera i daljinski upravljivih sklopka-rastavljača i njihovom integracijom u Sistem daljinskog upravljanja (SDU). U drugoj fazi vršena je ugradnja automatizovanih SN blokova tipa RMU (*Ring Main Unit*), sa ugrađenim daljinskim stanicama u kojima su realizovane funkcije lokalne automatike. Nakon ove dve faze, kada se u velikoj meri od strane ODS-a ovladalo primenjenim konceptom automatizacije SN ED mreže kroz implementaciju posebnog sistema za daljinski nadzor i upravljanja nad SN ED mrežom, stekli su se svi uslovi da se proces automatizacije SN ED pomeri ka narednoj, višoj fazi. Kroz primenu napredne automatizacije SN ED mreže koja se bazira na polucentralizovanom konceptu u odnosu na SCADA sistem, očekuje se zaokruživanje željenog koncepta inteligentnih mreža u pogledu ciljne automatizacije.

Važno je istaći da svaka primenjena koncepcija automatizacije SN ED mreže ima ograničenja u pogledu željenog stepena automatizacije, jer je praktično

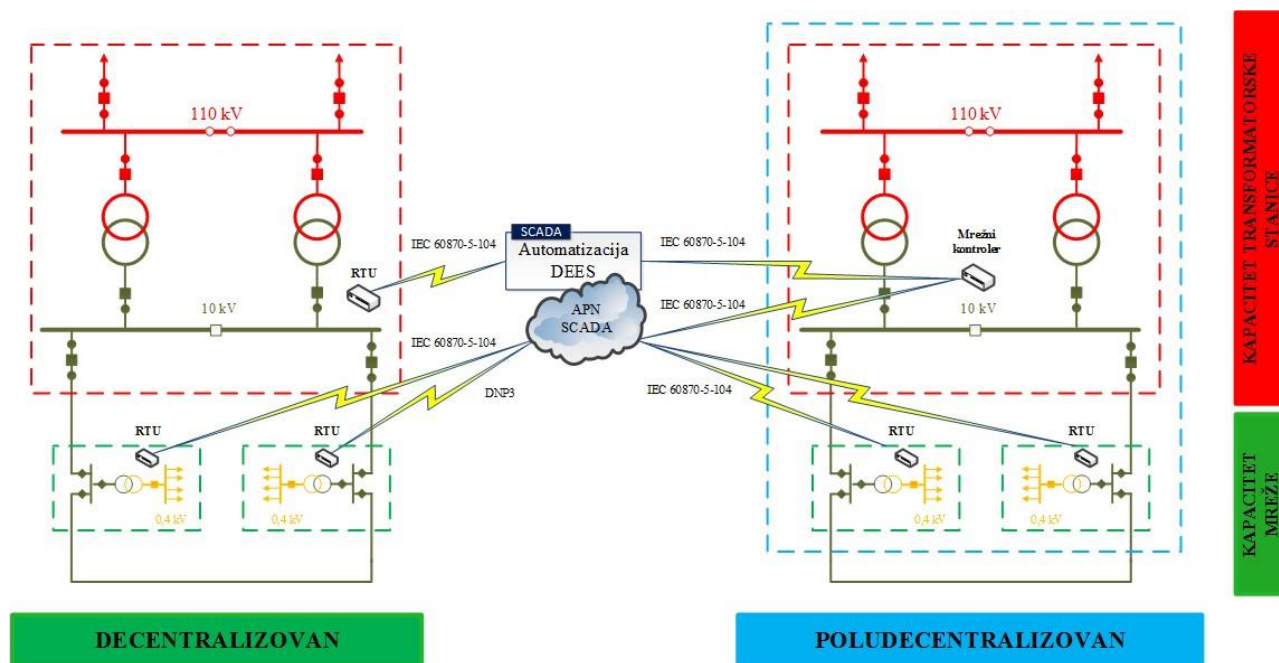
nerentabilno pokriti automatizacijom sve objekte u okviru SN ED mreže, a često to nije moguće iz tehničkih razloga; pre svega zbog postojanja elektroenergetskih objekata u privatnom vlasništvu, gde je elektrodistributivno preduzeće, i pored evidentne potrebe, zakonski sprečeno da investira u elektroenergetske objekte koji nisu u njenom vlasništvu. Takođe, postoje i tehnička ograničenja gde, na primer, nije moguće izvršiti automatizaciju stubnih transformatorskih stanica, a čiji je broj veliki u elektrodistributivnoj mreži. Svetska iskustva ukazuju da je moguće u potpunosti izvršiti automatizaciju SN ED mreže samo u slučaju kablovske mreže, tamo gde je ona konceptijski razvijana [2–6].

U radu je na sistematizovan način dat pregled primenjene koncepcije automatizacije SN ED mreže, dok je u okviru posebnih tačaka dat poseban prikaz primenjenih polucentralizovanih rešenja napredne automatizacije SN ED mreže. Izdvojena je posebna tačka u kojoj su dati prikazi i analize pojedinih slučajeva reagovanja rešenja napredne automatizacije SN ED mreže u slučaju pojave raznih slučajeva kvarova na pojedinim elementima SN ED mreže.

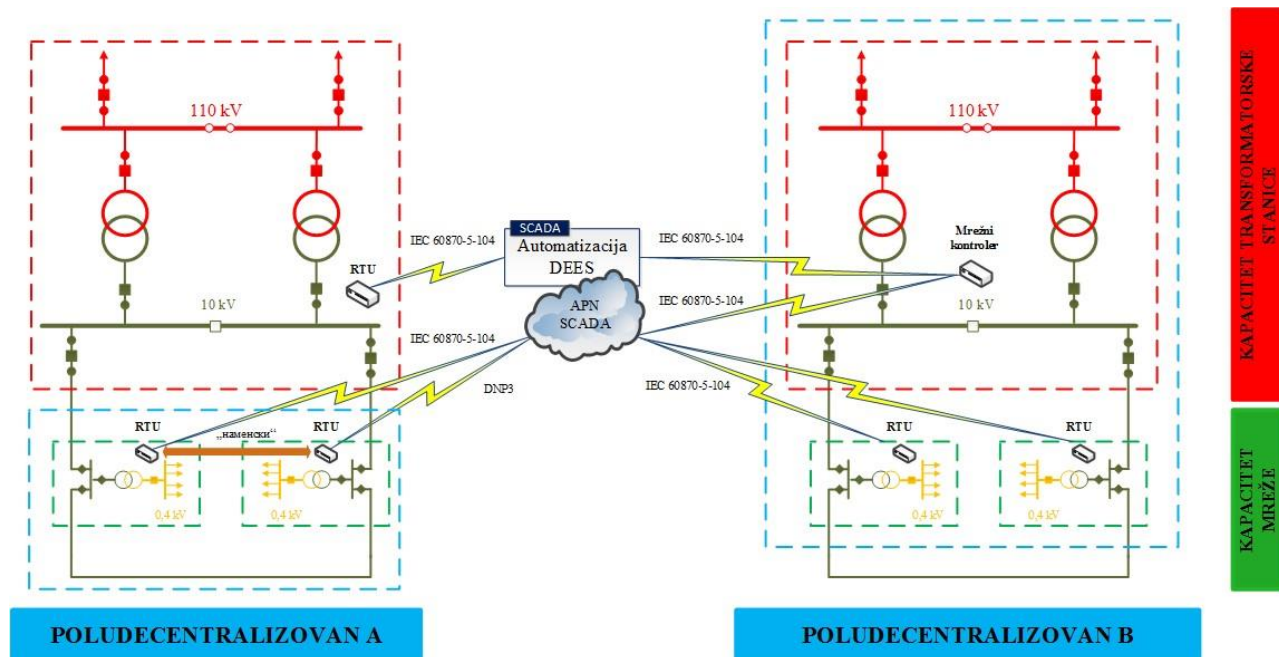
## 2. KONCEPCIJE AUTOMATIZACIJE SN ED MREŽE

Kao što je napomenuto, realizovani projekti automatizacije SN ED mreže u prethodne dve decenije na konzumnom području Beograda bazirani su prvobitno na decentralizovanoj, a u poslednje vreme na poludecentralizovanoj koncepciji automatizacije SN ED mreže, kao što je prikazano na Slici 1. Realizovane nove platforme obezbeđuju naprednu (inteligentnu) automatizaciju SN ED pre svega u cilju povećanja pouzdanosti i raspoloživosti elektrodistributivnog sistema, što treba u krajnjoj instanci da omogući sigurno i pouzdano snabdevanje krajnjih korisnika na ciljnim konzumnim područjima koja su obuhvaćena realizovanim rešenjima. Realizovani projekti automatizacije SN ED mreže se zasnivaju na primeni utvrđenog koncepta „Samooptimizirajuće mreže” (*Self-Optimising Grid*, SOG ili *Self-Healing Grid*, SHG), koji se kod različitih proizvođača opreme i sistema drugačije nazivaju, pre svega iz marketinških razloga. Realizovani projekti automatizacije SN ED mreže predstavljaju inovativna i inteligentna rešenja koja kombinuju automatizaciju SN ED mreže i decentralizovane aplikacije za daljinski nadzor i upravljanje SN ED mreže, koje su realizovane u okviru mrežnih kontrolera u napojnim transformatorskim stanicama VN/SN ili SN/SN ili u samim daljinskim stanicama koje izvršavaju upravljačke akcije prema predefinisanim algoritmu.

Na Slici 2 prikazane su obe podvarijante poludecentralizovanog rešenja: Varijanta A i Varijanta B. Varijanta A obuhvata rešenje gde je algoritam poludecentralizovanog rešenja implementiran u jednoj od daljinskih stanica koje pokrivaju celokupan automatizovan SN izvod, pri čemu daljinske stanice međusobno komuniciraju preko 3G/LTE mreže mobilnog operatera putem optimizovanog (*Peer-To-Peer*) protokola, koji je kod ovog proizvođača standardan DNP3 protokol.



Slika 1. Primenjene koncepcije automatizacije SN ED mreže



Slika 2. Primenjena rešenja poludecentralizovane koncepcije automatizacije SN ED mreže

Sa druge strane, Varijanta B obuhvata rešenje u kome je algoritam poludecentralizovanog rešenja implementiran u nadređenom mrežnom kontroleru koji je realizovan u okviru integrisanog sistema zaštite i upravljanja u napojnoj transformatorskoj stanici VN/SN ili SN/NN. Bez obzira koja je varijanta poludecentralizovanog rešenja primenjena u SN ED mreži, deo mreže koja je obuhvaćena naprednom automatizacijom treba da poseduje mogućnost da deonicu mreže koja je pogođena kvarom izoluje u najkraćem mogućem vremenskom periodu (do par sekundi), a da svi ostali ili najveći mogući broj krajnjih kupaca koji se napajaju

preko ostalih deonica SN izvoda koje nisu pogođene kvarom restaurira napajanje za manje od 30 sekundi.

Nakon dodatne detekcije u okviru deonice pogođene kvarom, vrši se mikrolokiranje sekcije u kvaru, nakon čega se vraća napajanje svim krajnjim kupcima. Tokom određivanja mikrolokacije deonice u kvaru, aplikacija se blokira iz razloga što je potrebno daljinskim putem i ručnim manipulacijama na elementima koji se nalaze u neautomatizovanim TS SN/NN detektovati sekciju u kvaru. Nakon popravke kvara, granice napajanja se vraćaju na stalne granice (NOP – *Normal Open Point*), i nakon toga

se aplikacija ponovo aktivira. U obe varijante, primenjena rešenja poludecentralizovane automatizacije SN ED mreže se baziraju na primeni funkcije automatske rekonfiguracije SN vodova u cilju restauracije pogona nakon kvara, pri čemu treba da obezbede sledeće, [2-13]:

- izolovanje sekcije (skup deonica) pogođene kvarom, koji je nastao na SN distributivnomvodu;
- rekonfiguracija SN voda zatvaranjem rasklopnog aparata na stalnoj granici (NOP);
- restauracija napajanja SN sekcija koje nisu pogođene kvarom, ponovnim uključivanjem rasklopnih aparata;
- postizanje poboljšanja pokazatelja pouzdanosti SN mreže (SAIDI, SAIFI, CAIDI, ENS);
- omogućavanje jednostavnog konfigurisanja i proširenje sistema novim automatizovanim SN postrojenjima;
- obezbeđivanje neophodne sigurnosti i postizanja optimalnog nivoa pouzdanosti za kritične potrošače;
- obezbeđivanje efikasne integracije daljinskih stanica putem standardnih protokola sa nadređenim centrom upravljanja.

### 3. POLUDECENTRALIZOVANA AUTOMATIZACIJA SN ED MREŽE – VARIJANTA A

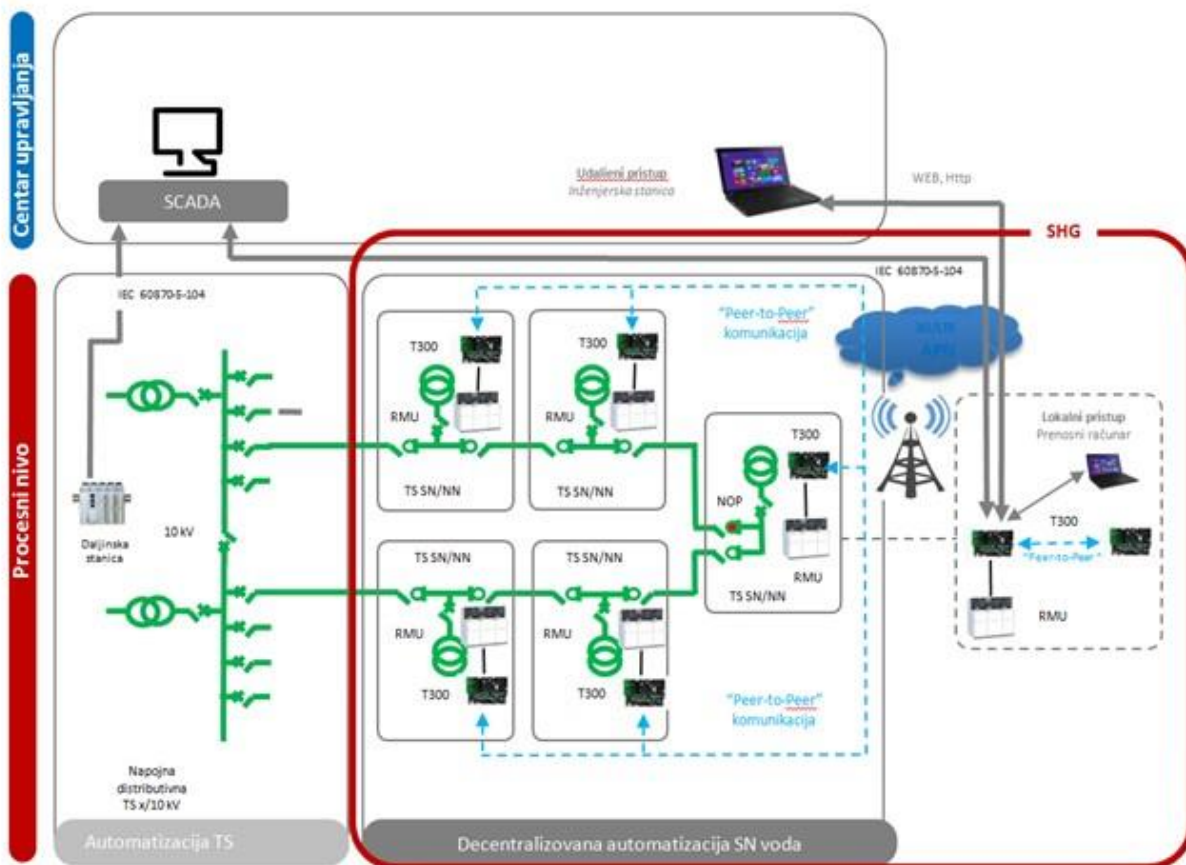
Sistem za naprednu automatizaciju SN ED mreže koji je realizovan po principu poludecentralizovanog rešenja na centralnom delu distributivnog područja Beograda, bazira se na rešenju u kome je omogućena samo horizontalna komunikacija između daljinskih stanica u automatizovanim SN postrojenjima duž jednog SN voda, pri čemu ne postoji komunikacija sa sistemima za daljinski nadzor i upravljanje u okviru napojnih transformatorskih stanica VN/SN i SN/SN, [14]. Važno je napomenuti da je u osnovi zadržan osnovni koncept automatizacije SN mreže, gde se podrazumeva da nadređeni centar upravljanja ima direktnu nadležnost u pogledu nadzora i upravljanja nad ugrađenim automatizovanim SN postrojenjima tipa RMU, sa pripadajućim daljinskim stanicama. Budući da u rešenju Varijante A ne postoji komunikacija sa napojnom transformatorskom stanicom, samim tim ne postoji posebno realizovan mrežni kontroler za potrebe realizacije Sistema za naprednu automatizaciju SN ED mreže, već jedna od daljinskih stanica preuzima ulogu mrežnog kontrolera (po pravilu daljinska stanica ugrađena na stalnoj granici (NOP) i odgovorna je za izvršenje logičkih šema za potrebe sprovođenja upravljačkih akcija nad obuhvaćenim SN izvodom.

Na Slici 3 prikazan je deo SN ED mreže nad kojim je primenjeno poludecentralizovano rešenje u Varijanti A, na kojoj je moguće uočiti komunikacione veze za potrebe

horizontalne komunikacije (*Peer-To-Peer*) između daljinskih stanica duž SN voda, kao i komunikacione veze za potrebe daljinskog nadzora i upravljanja od strane nadređenog centra upravljanja.

Važno je napomenuti da daljinske stanice u okviru ovog rešenja simultano međusobno komuniciraju, kao i sa nadređenim centrom, pri čemu se vrši paralelno prikupljanje procesnih veličina i izvršavanje komandi. U svakom trenutku, nadređeni centar upravljanja dobija potpun skup procesnih informacija iz Sistema za naprednu automatizaciju SN ED mreže, dok daljinske stanice, koje preuzimaju funkciju mrežnog kontrolera po delu SN ED mreže, dobijaju samo neophodan skup procesnih informacija za potrebe izvršavanja predefinisanih logičkih komandnih šema nad ciljnim delom SN mreže. Ciljno rešenje Sistema za naprednu automatizaciju SN ED mreže obuhvatilo je, pre svega, zamenu SN metalom oklopljenih vazduhom izolovanih postrojenja, ali i dotrajalih SN postrojenja sa zidanim ćelijama, savremenim SN postrojenjima tipa RMU.

Pored zamene postojećih SN postrojenja savremenim, kompletno automatizovanim SN postrojenjima sa daljinskim stanicama, na pojedinim delovima mreže koji su obuhvaćeni Sistemom za naprednu automatizaciju SN mreže pojavila se i potreba da se postojeće daljinske stanice starije generacije istog proizvođača zamene daljinskim stanicama najnovije generacije. Na taj način postignuta je uniformnost u pogledu ugradnje daljinskih stanica istog tipa duž SN voda, budući da je predviđenu „*Peer-To-Peer*“ komunikaciju moguće ostvariti samo između daljinskih stanica istog modela. Važno je napomenuti da se na prethodnoj slici uočava da se rešenje poludecentralizovane automatizacije SN vodova bazira na rešenju gde je mrežni kontroler aktiviran u jednoj od daljinskih stanica, sprovodi krajnje samostalno željene manipulacije u cilju restauracije pogona bez interakcije sa SN izvodima u napojnim distributivnim transformatorskim stanicama  $x/10$  kV. Budući da nema interakcije sa sistemom zaštite i sistemom daljinskog nadzora i upravljanja u napojnim distributivnim transformatorskim stanicama  $x/10$  kV, ovo rešenje je pogodno za realizaciju na SN izvodima na kojima su ugrađeni elektromehanički zaštitni uređaji. U skladu sa postavljenom metodologijom izbora ciljnih delova SN mreže koji treba da budu obuhvaćeni ovim rešenjem napredne automatizacije, SN ED mreža mora da bude realizovana i oblikovana po koncepciji kao SN međupoveznog voda ili SN voda u obliku petlje, gde daljinska stanica koja je ugrađena na stalnoj granici (*Normal Opened Point*, NOP) mora da bude definisana kao glavna tačka, odnosno tačka u kojoj daljinska stanica preuzima funkciju mrežnog kontrolera nad tim delom SN mreže.



Slika 3. Obuhvat SN voda polucentralizovanim rešenjem automatizacije SN ED mreže

Na osnovu prethodno pomenutog, važno je istaći da ovo predmetno rešenje poludecentralizovane automatizacije SN vodova nije moguće realizovati opremom i daljinskim stanicama drugih proizvođača upravo zbog potrebe da se ostvari horizontalna komunikacija po principu „Peer-To-Peer“. Ciljna horizontalna komunikacija isključivo se realizuje između daljinskih stanica modela istog proizvođača, čijom je opremom realizovano predmetno rešenje.

Na Slici 4 prikazan je jedan deo SN ED mreže koji je obuhvaćen rešenjem napredne automatizacije, gde se može videti da je rešenje potpuno autonomno i da je praktično dekoplovano u odnosu na ceo realizovani sistem za naprednu automatizaciju na jednom ograničenom delu mreže.

Takođe, važno je istaći da predmetni izvod ima 5 (pet) automatizovanih TS SN/NN, pri čemu svaka od njih ima po jednu dodeljenu ulogu prema kojoj učestvuje u primenjenom algoritmu (krajnji (početni) čvor, radni čvor (srednji čvor) i glavni čvor). Dodeljene uloge se dupliraju na jednom SN izvodu, gde samo glavni čvor nije dupliran, jer on ima jedinstvenu ulogu u realizovanom rešenju. Naravno, u slučaju primene potpune automatizacije SN izvoda, tada su radni čvorovi duž SN izvoda duplirani u potrebnom broju.

Na Slici 5 prikazan je HMI prikaz jednog dela mreže, na kojoj se mogu videti dodeljene uloge u okviru primenjenog algoritma na jednom SN izvodu, kao i funkcionalnost u odnosu na mogućnost promene pojedinačnih uloga.



Slika 4. Geografski prikaz jednog dela SN ED mreže obuhvaćenog rešenjem napredne automatizacije



Slika 5. HMI prikaz na SCADA sistemu jednog dela SN mreže obuhvaćenog rešenjem napredne automatizacije

#### 4. POLUDECENTRALIZOVANA AUTOMATIZACIJA SN ED MREŽE – VARIJANTA B

Sistemom za naprednu automatizaciju SN ED mreže koji se bazira na Varijanti B pokrivene su četiri napojne transformatorske stanice na području Novog Beograd i Zemuna: TS 110/10 kV „Beograd 41 – Blok 32”, TS 35/10 kV „Novi Beograd 1”, „Novi Beograd 3” i „Zemun Centar”, u kojima su instalirani mrežni kontroleri, [1, 2]. Takođe, sistem obuhvata i ciljane, karakteristične izvođe SN na pojedinim delovima njihovih konzumnih područja, na kojima je ukupno ugrađeno 30 automatizovanih transformatorskih stanica SN/NN, pri čemu je integrisano

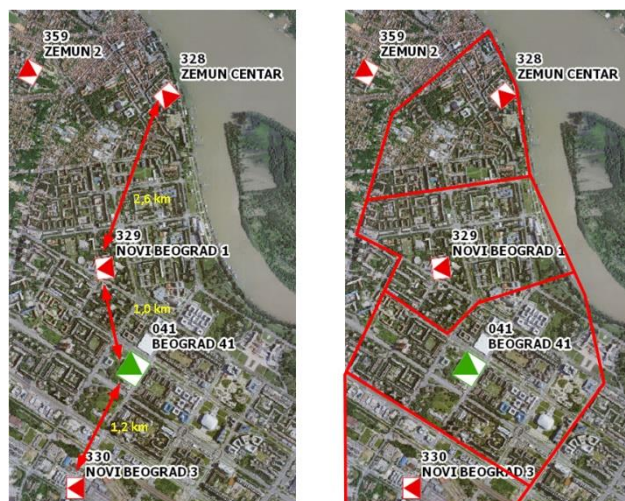
u sistem i pet postojećih TS SN/NN koje su do tada radile u decentralizovanom konceptu automatizacije. Automatizacija ciljnih transformatorskih stanica SN/NN je podrazumevala zamenu postojećih SN postrojenja u njima, kao i odgovarajućih daljinskih stanica koje preko posebnih komunikacionih protokola obezbeđuju željenu funkcionalnost napredne automatizacije SN ED. Važno je napomenuti da je izbor konzumnog područja koji je obuhvaćen realizovanim sistemom vršen po više kriterijuma (broj krajnjih kupaca, optimalna konfiguracija SN ED mreže, gustina opterećenja itd.), ali da je opredeljujući kriterijum bio broj instaliranih sistema izabranog proizvođača koji podržava koncept napredne automatizacije SN ED mreže.

Na Slikama 6 (a, b) prikazano je konzumno područje Novog Beograda i Zemuna, koje je obuhvaćeno

realizovanim rešenjem napredne automatizacije SN ED mreže, kao i obuhvati konzumnih područja pojedinih napojnih transformatorskih stanica, kao i međusobne dužine između samih lokacija napojnih transformatorskih stanica. Važno je napomenuti da ovakvo izabrano ciljno konzumno područje ima potencijal širenja i na okolne napojne transformatorske stanice, čime je moguće pokriti veliki deo Novog Beograda u delu od reka Save i Dunava prema Zemunu. Ograničavajući faktor u daljem širenju sistema predstavlja trenutno ograničenje primenjenog algoritma, po kome u algoritmu koji je implementiran po jednom mrežnom kontroleru može da bude obuhvaćeno najviše 50 rasklopnih elemenata u pokrivenoj SN ED mreži.

Kao što je ranije napomenuto, u cilju donošenja pravovremenih odluka prilikom upravljanja elektrodistributivnom mrežom, koristeći pre svega koncepte polucentralizovanog rešenja, a u krajnjoj instanci i centralizovanog upravljanja, znatno se usložnjava obrada procesnih informacija koje se sada prikupljaju u daleko većem obimu.

Sa druge strane, znatno veći obuhvat procesnih informacija iz realizovanog sistema, omogućava izbor optimalnog scenarija upravljanja, ali i nadogradnju sistema u cilju aktiviranja raspoloživih mrežnih aplikacija u okviru realizovanog sistema.

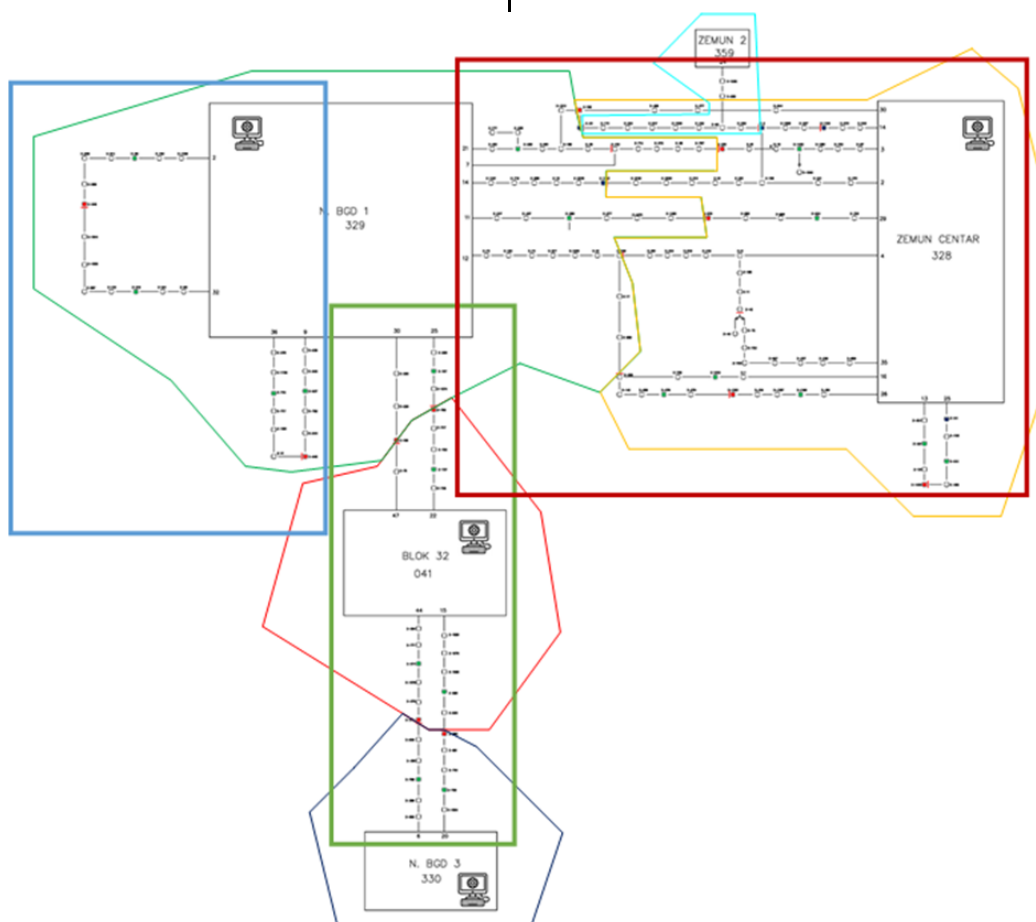


a) Lokacije napojnih TS

b) Konzumna područja napojnih TS

Slika 6. Konzumno područje obuhvaćeno jednim od rešenja za naprednu automatizaciju SN ED mreže

Na Slici 7 prikazan je obuhvat SN ED mreže od strane aktiviranih mrežnih kontrolera u napojnim transformatorskim stanicama.



Slika 7. Prikaz konzumnih područja napojnih TS i nadređenosti od strane mrežnih kontrolera

U okviru realizovanih mrežnih kontrolera, instalirane su mrežne aplikacije opisane u nastavku, koje svojom funkcionalnošću zaokružuju koncept napredne automatizacije SN ED mreže.

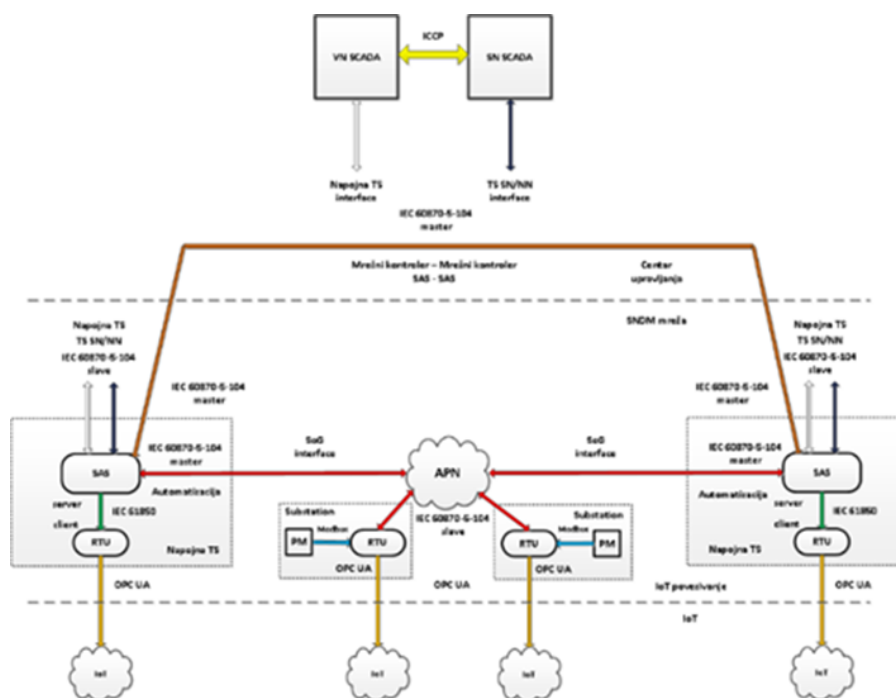
U okviru ciljnog koncepta inteligentnih mreža (*Smart Grids*) koji je predmet realizacije, postoje sledeće funkcije: samoozdravljenje mreže (*Self-Healing*), upravljanje potrošnjom (*Load Management*), automatsko prebacivanje izvora napajanja (*Automatic Source Transfer*), smanjenje preopterećenja (*Overload Reduction*) i područna kontrola napona (*Area Voltage Control*), [15].

Navedene mrežne aplikacije su od velikog interesa za primenu u okviru SN ED mreža, ali akcenat u dosadašnjoj realizaciji sistema za naprednu automatizaciju SN ED mreže dat je na primeni samo prve mrežne aplikacije samoozdravljenja mreže, dok su za sve ostale mrežne aplikacije obezbeđeni svi preduslovi za njihovu primenu. Zbog složenosti realizovanog sistema koji je u svojoj realizaciji bio vremenski ograničen, pristupilo se samo validaciji i praktičnoj primeni prve mrežne aplikacije. Za sve ostale funkcije obezbeđeni su svi neophodni ulazni podaci, ali njihova validacija u omogućenom simulacionom modu neće biti vršena u okviru ove faze realizacije sistema. Nakon toga što su se sistemi preveli u trajni rad, pristupiće se daljem širenju realizovanog

koncepta napredne automatizacije SN ED mreže, pod kojim se podrazumeva da će upravo preostale funkcije biti implementirane u određenim fazama. Takođe, obuhvat delova SN ED mreže od strane mrežnih kontrolera u velikoj meri je uslovljen i koncepcijom SN ED mreže, budući da pojedini mrežni kontroleri obuhvataju jednostavnije strukture mreže, dok neki od njih obuhvataju i daleko složenije, nekonceptijski oblikovane SN ED mreže.

U slučaju da se algoritam proširi na nešto veći broj rasklopnih elemenata u odnosu na postojeće ograničenje, sistem će trajno raditi sa dva mrežna kontrolera, što je bio i prvobitni scenario. U svakom slučaju, trenutno je omogućen rad sa tri primarna mrežna kontrolera i moguće je simulirati veći broj scenarija koji se tiču preuzimanja nadležnosti od strane pratećih mrežnih kontrolera.

Na Slici 8 prikazana je arhitektura polucentralizovanog sistema za naprednu automatizaciju SN ED mreže, Varijanta B, pri čemu je u početnoj fazi realizacije sistema u celosti zadržan koncept decentralizovanog daljinskog nadzora i upravljanja. Pod tim se podrazumeva da je zadržana direktna komunikacija sa podređenim daljinskim stanicama u automatizovanim TS SN/NN putem mobilne mreže preko posebno određenog APN segmenta.



Slika 8. Prikaz arhitekture sistema za naprednu automatizaciju SN ED mreže

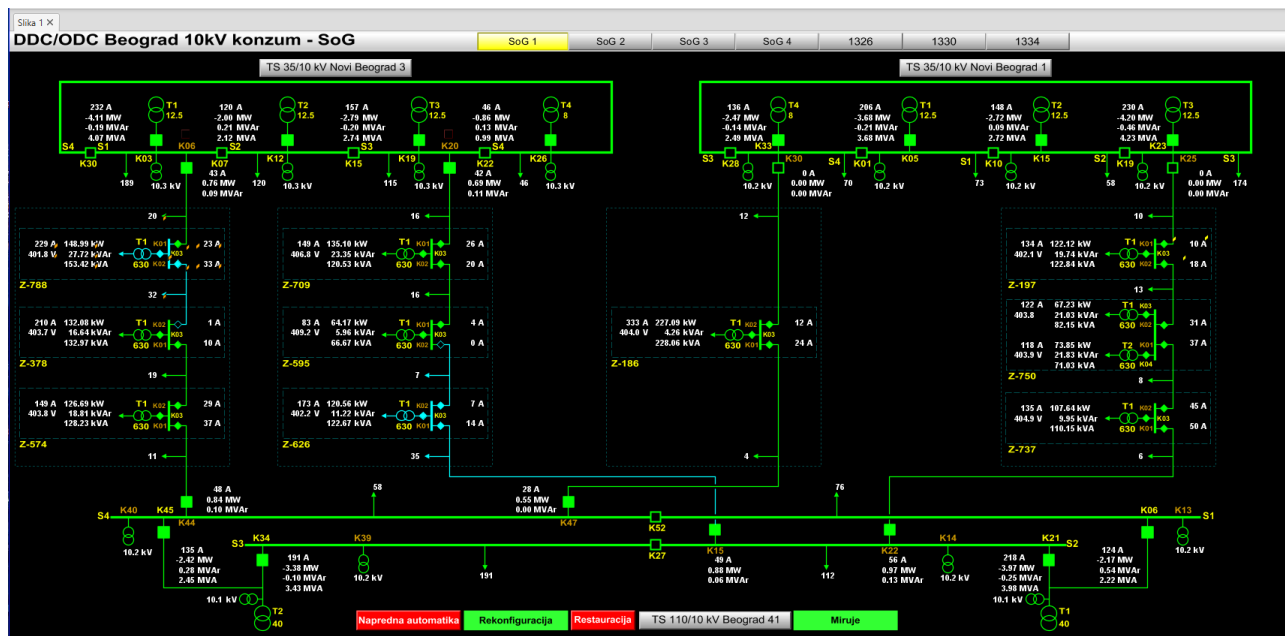
U svakom trenutku operator u nadređenom centru upravljanja može da blokira izvršenje aplikacije za naprednu automatizaciju SNMD mreže i da zadrži do sada standardni (decentralizovani) koncept daljinskog upravljanja TS SN/NN. Pored mogućnosti decentralizovanog koncepta upravljanja nad TS SN/NN, zadržan je i koncept centralizovanog upravljanja nad napojnim transformatorskim stanicama, ali putem optičkih telekomunikacionih vodova, pre svega u cilju obezbeđivanja potrebne brzine komunikacije, ali i same pouzdanosti komunikacije. Upravo je realizovana optička

komunikacija između nadređenog centra upravljanja i napojnih transformatorskih stanica obezbedila sve neophodne preduslove da se realizuje direktna horizontalna komunikacija na nivou napojnih transformatorskih stanica putem protokola IEC 60870-5-104 (*master/slave*). Putem uspostavljene horizontalne komunikacije obezbeđena je međusobna razmena neophodnih procesnih veličina iz susedne napojne transformatorske stanice, a koje su neophodni ulazni podaci za izvršavanje algoritma realizovane aplikacije. Na nivou napojnih transformatorskih stanica i svih ugrađenih

automatizovanih transformatorskih stanica SN/NN realizovan je još jedan poseban komunikacioni interfejs koji omogućuje komunikaciju sa ciljnom IoT platformom, ali putem do sada retko korišćenog u elektrodistributivnim sistemima – protokola UA OPC. Za razliku od HMI prikaza dela SN ED mreže koja je obuhvaćena rešenjem sistema Varijanta A, gde je prikazano samo jedno SN ostrvo, u HMI prikazu sistema Varijanta B zbog obuhvata mrežnog kontrolera nad većim delom SN ED mreže, HMI

prikazi su daleko složeniji. Slike su tako organizovane da se na jednoj procesnoj HMI slici prikažu svi SN izvodi koji su pod direktnom nadležnošću realizovanog mrežnog kontrolera u napojnoj ili izvornoj transformatorskoj stanici. Prikaz je tako organizovan da omogućava jednostavan nadzor ovako jednog složenog rešenja od strane dispečera.

Na Slici 9 prikazan je jedan od realizovanih HMI procesnih prikaza dela SN ED na kojem je implementirana napredna automatizacija SN ED mreže.



Slika 9. Procesni prikaz dela SN ED mreže u kome je realizovana napredna automatizacija SN ED mreže

Na procesnom prikazu je implementirana potpuna funkcionalnost koja se odnosi na praćenje rada napredne automatizacije, ali i mogućnost njenog deaktiviranja u slučaju kada postoji potreba da nadležnost upravljanja ponovo preuzme nadređeni centar upravljanja.

## 5. POKAZATELJI SN ED MREŽE OBUHVAĆENE NAPREDNOM AUTOMATIZACIJOM

Rešenjima napredne automatizacije obuhvaćeni su centralni delovi gradskog jezgra Beograda i centralni delovi Novog Beograda. U tabelama I i II su prikazani ukupni pokazatelji CAIDI za oba obuhvaćena konzuma, pre implemetacije sistema napredne automatizacije.

Tabela I Prikaz pokazatelja pouzdanosti CAIDI SN ED mreže obuhvaćena rešenjem sistema Varijanta A

| Transformatorska stanica | CAIDI [min] |
|--------------------------|-------------|
| Beograd 15               | 54,32       |
| Beograd 28               | 60,54       |
| Beograd 36               | 73,13       |
| Neimar                   | 60,91       |
| Tehnički fakultet        | 55,29       |
| Podstanica               | 35,96       |
| Srednja vrednost:        | 56,69       |

Važno je napomenuti da prikazani pokazatelji pouzdanosti CAIDI obuhvataju samo neplanirana isključenja usled pojave kvara, dok su pokazatelji pouzdanosti CAIDI za planirana isključenja značajno manji, budući da konfiguracija mreže omogućava dvostrano napajanje krajnjih korisnika usled isključenja zbog planiranih radova. Takođe, uočava se da su pokazatelji pouzdanosti CAIDI nešto veći za centralne delove gradskog jezgra Beograda u odnosu na centralne delove Novog Beograda, što je sasvim razumljivo imajući u vidu da je kretanje dispečerskih ekipa značajno brže na Novom Beogradu i da su TS SN/NN u tom delu grada dostupnije za prilaz ekipa i parkiranje.

Tabela II Prikaz pokazatelja pouzdanosti CAIDI SN ED mreže obuhvaćena rešenjem sistema Varijanta B

| Transformatorska stanica | CAIDI [min] |
|--------------------------|-------------|
| Beograd 41               | 44,33       |
| Novi Beograd 1           | 48,28       |
| Novi Beograd 3           | 42,78       |
| Zemun Centar             | 70,71       |
| Srednja vrednost:        | 51,53       |

U tabelama III i IV prikazana je struktura kvarova koji su zabeleženi na SN ED mrežama koje su obuhvaćene naprednom automatizacijom tokom prethodne tri godine.

Uočava se da je veći broj kvarova na delovima konzuma na kojima je intenzivna izgradnja građevinskih objekata tokom koje dolazi do mehaničkog oštećenja SN kablovskih vodova.

Na osnovu podataka datih u tabelama V i VI može se zaključiti da je veći stepen automatizacije po jednom SN izvodu u Varijanti A, ali da je, sa druge strane, daleko veći broj SN izvoda pokriven automatizacijom u Varijanti B. Optimum svakako treba tražiti između ova dva rešenja, ali u pogledu automatizacije primat definitivno odnosi rešenje sa većim brojem automatizovanih transformatorskih stanica po jednom SN izvodu. U tabelama je posebno dat ukupan broj TS SN/NN, kao i broj automatizovanih TS SN/NN.

*Tabela III* Prikaz strukture kvarova SN ED mreže obuhvaćene rešenjem sistema Varijanta A

| Transformatorska stanica | Broj ispada |
|--------------------------|-------------|
| <b>Beograd 15</b>        | <b>13</b>   |
| Kratkospojna zaštita     | 2           |
| Prekostrujna zaštita     | 1           |
| Zemljospojna zaštita     | 10          |
| <b>Beograd 28</b>        | <b>37</b>   |
| Kratkospojna zaštita     | 13          |
| Zaštita sabirница        | 1           |
| Zemljospojna zaštita     | 23          |
| <b>Beograd 36</b>        | <b>22</b>   |
| Kratkospojna zaštita     | 6           |
| Zemljospojna zaštita     | 16          |
| <b>Neimar</b>            | <b>8</b>    |
| Prekostrujna zaštita     | 1           |
| Zemljospojna zaštita     | 7           |
| <b>Tehnički fakultet</b> | <b>14</b>   |
| Kratkospojna zaštita     | 5           |
| Zemljospojna zaštita     | 9           |
| <b>Podstanica</b>        | <b>25</b>   |
| Kratkospojna zaštita     | 3           |
| Zemljospojna zaštita     | 22          |
| <b>Ukupno ispada:</b>    | <b>119</b>  |

*Tabela IV* Prikaz strukture kvarova SN ED mreže obuhvaćene rešenjem sistema Varijanta B

| Transformatorska stanica | Broj ispada |
|--------------------------|-------------|
| <b>Beograd 41</b>        | <b>7</b>    |
| Kratkospojna zaštita     | 4           |
| Zemljospojna zaštita     | 3           |
| <b>Novi Beograd 1</b>    | <b>18</b>   |
| Kratkospojna zaštita     | 5           |
| Zaštita sabirница        | 1           |
| Zemljospojna zaštita     | 12          |
| <b>Novi Beograd 3</b>    | <b>11</b>   |
| Zaštita sabirница        | 2           |
| Zemljospojna zaštita     | 9           |
| <b>Zemun Centar</b>      | <b>11</b>   |
| Kratkospojna zaštita     | 2           |
| Prekostrujna zaštita     | 1           |
| Zemljospojna zaštita     | 8           |
| <b>Ukupno ispada:</b>    | <b>47</b>   |

*Tabela V* Prikaz strukture SN ED mreže obuhvaćene rešenjem sistema Varijanta A

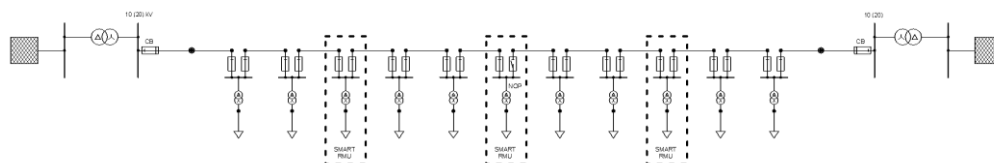
| SN ostrvo | Tip<br>SN izvoda | Broj<br>TS SN/NN | Broj<br>kupaca |
|-----------|------------------|------------------|----------------|
| Ostrvo 1  | Međupovezni      | 12 (6)           | 1.981          |
| Ostrvo 2  | Međupovezni      | 9 (5)            | 1.571          |
| Ostrvo 3  | Međupovezni      | 12 (5)           | 1.430          |
| Ostrvo 4  | Međupovezni      | 10 (5)           | 1.596          |
| Ostrvo 5  | Međupovezni      | 10 (5)           | 2.923          |
| Ostrvo 6  | Međupovezni      | 12 (5)           | 1.682          |
| Ostrvo 7  | Međupovezni      | 10 (5)           | 3.831          |
| Ukupno:   |                  |                  | <b>15.014</b>  |

*Tabela VI* Prikaz strukture SN ED mreže obuhvaćene rešenjem sistema Varijanta B

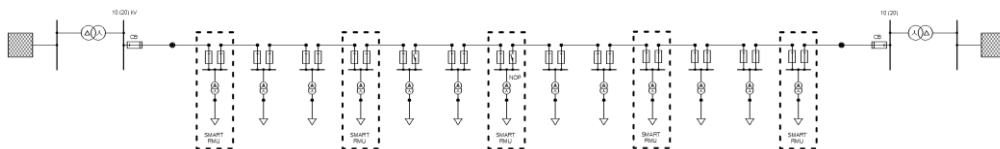
| SN ostrvo | Tip<br>SN izvoda | Broj<br>TS SN/NN | Broj<br>kupaca |
|-----------|------------------|------------------|----------------|
| Ostrvo 1  | Međupovezni      | 11 (3)           | 2.885          |
| Ostrvo 2  | Međupovezni      | 10 (3)           | 1.449          |
| Ostrvo 3  | Međupovezni      | 4 (2)            | 1.196          |
| Ostrvo 4  | Međupovezni      | 8 (3)            | 2.554          |
| Ostrvo 5  | Petlja           | 15 (3)           | 3.685          |
| Ostrvo 6  | Petlja           | 12 (3)           | 2.676          |
| Ostrvo 7  | Petlja           | 8 (3)            | 1.119          |
| Ostrvo 8  | Međupovezni      | 11 (3)           | 2.581          |
| Ostrvo 9  | Složeni          | 40 (6)           | 9.660          |
| Ostrvo 10 | Složeni          | 48 (7)           | 10.667         |
| Ukupno:   |                  |                  | <b>38.472</b>  |

Na Slici 10 dati su prikazi primenjenih koncepta automatizacije kablovske SN ED mreže. Na osnovu usvojene koncepcije koja je realizovana kroz studiju Izbor koncepcije upravljanja SN elektrodistributivne mreže na konzumnom području EDB favorizovano je rešenje sa manjim stepenom automatizacije po SN izvodu, budući da je inicijalno pokazano da nema ekonomskog opravdanja za primenu rešenja sa većim stepenom automatizacije.

Proširenje primenjenog koncepta automatizacije SN ED je sačekalo primenu, nakon skoro dve decenije, rešenja napredne automatizacije SN ED mreže, gde se javila potreba da se prve transformatorske stanice SN/NN na SN izvodu obavezno automatizuju, zbog toga što rešenje automatizacije forsira automatizaciju te lokacije na SN izvodu. Takođe, primena osnovnog koncepta je potvrdila da zbog velikog broja kvarova upravo na prvim deonicama SN izvoda, ona nije u stanju da obezbedi efikasnu izolaciju kvara i restauraciju napajanja krajnjim korisnicima. Upravo na primerima verifikacije primenjenih rešenja napredne automatizacije pokazao se pozitivan efekat u daljoj primeni proširenog koncepta automatizacije kablovske SN ED mreže.



a) Osnovni koncept automatizacije SN izvoda



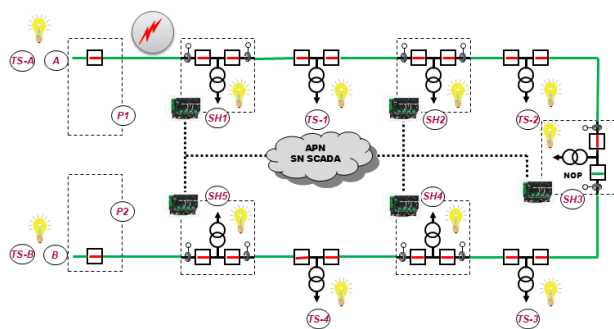
b) Prošireni koncept automatizacije SN izvoda

Slika 10. Prikaz primenjenih koncepcija automatizacije kablovske SN ED mreže

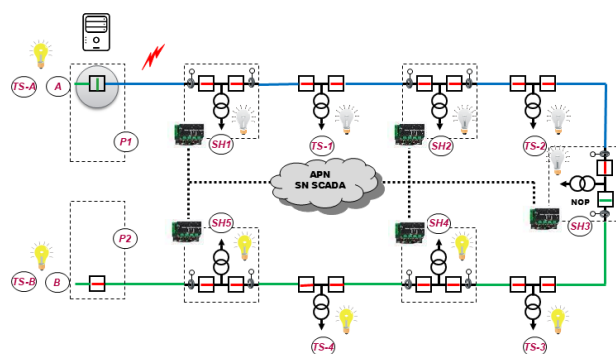
## 6. VERIFIKACIJA RADA NAPREDNE AUTOMATIZACIJE SN ED MREŽE U POGONSKIM USLOVIMA

Praktično oba sistema puštena su u probni rad do sredine 2023. godine i tokom probnog rada vršene su određene simulacije rada, pre svega rešenja Varijante B koja ima mogućnost izvršenja simulacija rada napredne automatizacije SN ED mreže za ciljna scenarija rekonfiguracije mreže u slučaju pojave kvara na određenim deonicama mreže. Tokom probnog perioda, a i kasnije, kada su oba sistema prevedena u trajni rad, došlo je do više prorada napredne automatike SN ED mreže pri realnim pogonskim događajima i svaki slučaj prorada posebno je analiziran i verifikovan. Za potrebe prezentacije prorada napredne automatike SN ED mreže u ovom radu, za obe varijante rešenja, uzeti su pogonski događaji koji su imali kvarove na prvim deonicama delova SN mreže. Analizirana je situacija kada je došlo do prekida napajanja SN sekcije napojne transformatorske stanice, što za posledicu ima identično reagovanje napredne automatizacije kao da je kvar bio na prvoj deonici. Ovaj slučaj je prikazan za slučaj ispada za Varijantu A.

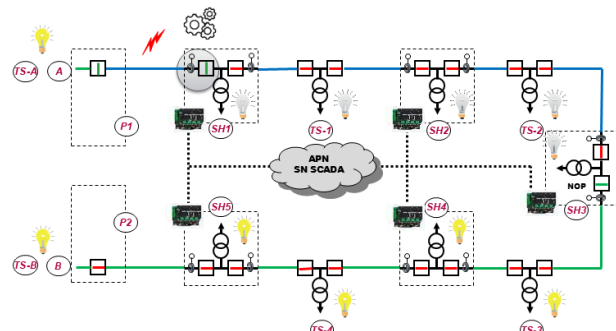
Na Slici 11 prikazan je scenario rada napredne automatike SN ED mreže u slučaju kvara na prvoj deonici u okviru rešenja zasnovanog na Varijanti A, gde se uočavaju četiri glavna koraka (sekvence).



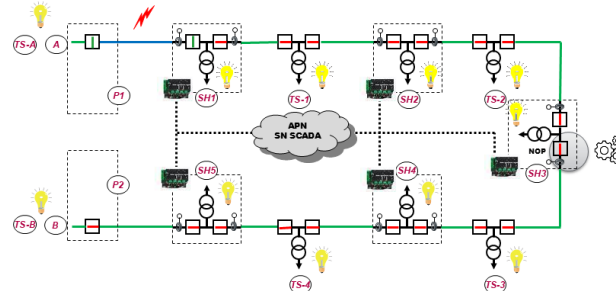
a) Pojava kvara



b) Reagovanje zaštite



c) Izolacija kvara



č) Restauracija napajanja

Slika 11. Primer rada napredne automatizacije u slučaju kvara na prvoj deonici – Varijanta A

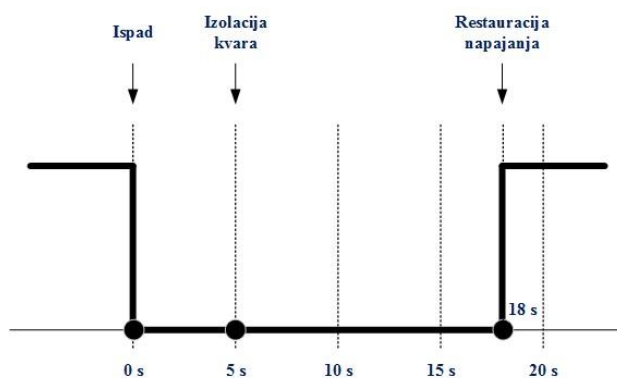
Oba rešenja imaju identičan broj potrebnih manipulacija (dve manipulacije) za potrebe restauracije napajanja, ali glavna razlika leži u činjenici da su u Varijanti A svi krajnji kupci napojeni, dok se u Varijanti B lociranje deonice u kvaru dalje sprovodi uz rad dispečerskih ekipa na terenu. Angažovanje dispečerskih ekipa je neophodno iz razloga lokacije kvara na segmentu, gde nemamo automatizovanu TS SN/NN.

Na Slici 12 prikazana je lista događaja sa SCADA sistema u slučaju kvara na prvoj deonici mreže za Varijantu A. Na listi se uočavaju ključni događaji u listi (označeni posebnim bojama) koji su doveli do pravovremene prorade napredne automatizacije SN ED mreže. Kao što se može videti iz liste događaja, u ovom scenariju napredne automatizacije SN ED mreže, realizovani sistem je izvršio rekonfiguraciju mreže u cilju restauracije napajanja za 18 sekundi, što je daleko kraće od postavljenog cilja od 30 sekundi. Važno je napomenuti da u listi nije bilo signala prorade identifikacije prolaska struje kvara, budući da je kvar bio na prvoj deonici.

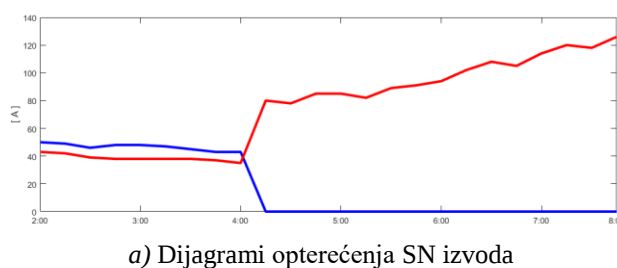
|        |              |        |                         |     |                                          |              |                |
|--------|--------------|--------|-------------------------|-----|------------------------------------------|--------------|----------------|
| 07-Feb | 04-11:02:000 | 180717 | 8-717                   | K01 | VOD NAPON                                | NUE PRISUTAN |                |
| 07-Feb | 04-11:02:014 | 180717 | 8-717                   | K03 | VOD NAPON                                | NUE PRISUTAN |                |
| 07-Feb | 04-11:02:096 | 180717 | 8-717                   | K00 | SHS SHS - STANJE RAPOLOŽIVOSTI           | KVAR         |                |
| 07-Feb | 04-11:03:042 | 180648 | 8-648                   | K01 | VOD NAPON                                | NUE PRISUTAN |                |
| 07-Feb | 04-11:03:052 | 180648 | 8-648                   | K01 | VOD NAPON                                | NUE PRISUTAN |                |
| 07-Feb | 04-11:03:127 | 180648 | 8-648                   | K00 | SHS SHS - STANJE RAPOLOŽIVOSTI           | KVAR         |                |
| 07-Feb | 04-11:03:386 | 180015 | TS 110/10 kV Beograd 15 | V99 | VOD MTK KRATKOSPOLNA ZAŠTITA ISKLJUČENJE | REAGOVANJE   |                |
| 07-Feb | 04-11:03:396 | 180015 | TS 110/10 kV Beograd 15 | K03 | VOD PREKIDANJE                           | ISKLJUČEN    |                |
| 07-Feb | 04-11:03:763 | 181857 | 8-1857                  | K01 | VOD NAPON                                | NUE PRISUTAN |                |
| 07-Feb | 04-11:03:829 | 180283 | 8-283                   | K04 | VOD NAPON                                | NUE PRISUTAN |                |
| 07-Feb | 04-11:03:830 | 180283 | 8-283                   | K02 | VOD NAPON                                | NUE PRISUTAN |                |
| 07-Feb | 04-11:03:858 | 181857 | 8-1857                  | K00 | SHS SHS - STANJE RAPOLOŽIVOSTI TS        | KVAR         |                |
| 07-Feb | 04-11:03:858 | 181857 | 8-1857                  | K00 | SHS SHS - STANJE RAPOLOŽIVOSTI           | KVAR         |                |
| 07-Feb | 04-11:03:968 | 180283 | 8-283                   | K00 | SHS SHS - STANJE RAPOLOŽIVOSTI           | KVAR         |                |
| 07-Feb | 04-11:04:635 | 180717 | 8-717                   | 001 | DAL NESTANAK NAPONA 230 V AC             | NASTANAK     |                |
| 07-Feb | 04-11:04:739 | 180648 | 8-648                   | 001 | DAL NESTANAK NAPONA 230 V AC             | NASTANAK     |                |
| 07-Feb | 04-11:04:546 | 180283 | 8-283                   | 001 | DAL NESTANAK NAPONA 230 V AC             | NASTANAK     |                |
| 07-Feb | 04-11:06:689 | 180283 | 8-283                   | K04 | VOD SKLOPA RASTAVLJANJE                  | ISKLJUČENJE  |                |
| 07-Feb | 04-11:06:689 | 180283 | 8-283                   | K00 | SHS SHS - SEKVENCIA U TOKU               | NASTANAK     |                |
| 07-Feb | 04-11:20:254 | 180717 | 8-717                   | K03 | VOD NAPON                                | PRISUTAN     |                |
| 07-Feb | 04-11:20:261 | 180717 | 8-717                   | K01 | VOD NAPON                                | PRISUTAN     |                |
| 07-Feb | 04-11:20:280 | 180717 | 8-717                   | 001 | DAL NESTANAK NAPONA 230 V AC             | PRESTANAK    |                |
| 07-Feb | 04-11:20:349 | 180717 | 8-717                   | K00 | SHS SHS - STANJE RAPOLOŽIVOSTI           | NORMALNO     |                |
| 07-Feb | 04-11:20:402 | 180648 | 8-648                   | K03 | VOD NAPON                                | PRISUTAN     |                |
| 07-Feb | 04-11:20:413 | 180648 | 8-648                   | K01 | VOD NAPON                                | PRISUTAN     |                |
| 07-Feb | 04-11:20:434 | 180648 | 8-648                   | 001 | DAL NESTANAK NAPONA 230 V AC             | PRESTANAK    |                |
| 07-Feb | 04-11:20:565 | 180648 | 8-648                   | K00 | SHS SHS - STANJE RAPOLOŽIVOSTI           | NORMALNO     |                |
| 07-Feb | 04-11:21:044 | 181857 | 8-1857                  | K01 | VOD SKLOPA RASTAVLJANJE                  | ISKLJUČENJE  |                |
| 07-Feb | 04-11:21:124 | 181857 | 8-1857                  | K01 | VOD NAPON                                | PRISUTAN     |                |
| 07-Feb | 04-11:21:191 | 180283 | 8-283                   | K02 | VOD NAPON                                | PRISUTAN     |                |
| 07-Feb | 04-11:21:204 | 181857 | 8-1857                  | K00 | SHS SHS - STANJE RAPOLOŽIVOSTI           | NORMALNO     |                |
| 07-Feb | 04-11:21:291 | 180283 | 8-283                   | 001 | DAL NESTANAK NAPONA 230 V AC             | PRESTANAK    |                |
| 07-Feb | 04-11:50:431 | 180648 | 8-648                   | K00 | SHS SHS - RAPOLOŽIVOST                   | NEKATYNA     |                |
| 07-Feb | 04-11:50:447 | 180717 | 8-717                   | K00 | SHS SHS - RAPOLOŽIVOST                   | NEKATYNA     |                |
| 07-Feb | 04-11:50:497 | 180648 | 8-648                   | 001 | DAL LOKALNA AUTOMATIKA                   | ISKLJUČENJE  |                |
| 07-Feb | 04-11:50:685 | 180717 | 8-717                   | 001 | DAL LOKALNA AUTOMATIKA                   | ISKLJUČENJE  |                |
| 07-Feb | 04-11:51:085 | 180283 | 8-283                   | K00 | SHS SHS - RAPOLOŽIVOST                   | NEKATYNA     |                |
| 07-Feb | 04-11:51:085 | 180283 | 8-283                   | K00 | SHS SHS - SEKVENCIA U TOKU               | PRESTANAK    |                |
| 07-Feb | 04-11:51:164 | 180283 | 8-283                   | K00 | SHS SHS - STANJE RAPOLOŽIVOSTI           | NORMALNO     |                |
| 07-Feb | 04-11:51:235 | 180283 | 8-283                   | 001 | DAL LOKALNA AUTOMATIKA                   | ISKLJUČENJE  |                |
| 07-Feb | 04-11:51:280 | 181815 | 8-1815                  | K00 | SHS SHS - RAPOLOŽIVOST                   | NEKATYNA     |                |
| 07-Feb | 04-11:51:360 | 181815 | 8-1815                  | 001 | DAL LOKALNA AUTOMATIKA                   | ISKLJUČENJE  |                |
| 07-Feb | 04-11:51:425 | 181857 | 8-1857                  | K00 | SHS SHS - NAPREDNA AUTOMATIZACIJA        | ISKLJUČENJE  |                |
| 07-Feb | 04-11:51:425 | 181857 | 8-1857                  | K00 | SHS SHS - STANJE RAPOLOŽIVOSTI TS        | NEKATYNA     |                |
| 07-Feb | 04-11:51:425 | 181857 | 8-1857                  | K00 | SHS SHS - RAPOLOŽIVOST                   | NEKATYNA     |                |
| 07-Feb | 04-11:51:499 | 181857 | 8-1857                  | 001 | DAL LOKALNA AUTOMATIKA                   | ISKLJUČENJE  |                |
| 07-Feb | 04-11:51:506 | 181857 | 8-1857                  | K00 | SHS SHS - STANJE RAPOLOŽIVOSTI           | KVAR         |                |
| 07-Feb | 04-11:59:233 | 180283 | 8-283                   | K00 | SHS SHS - STANJE RAPOLOŽIVOSTI           | KVAR         |                |
| 07-Feb | 04-18:18:000 | 180015 | TS 110/10 kV Beograd 15 | K03 | VOD PREKIDANJE                           | UKLJUČEN     | ZAHTEVANJE KOM |
| 07-Feb | 04-18:43:000 | 180015 | TS 110/10 kV Beograd 15 | K03 | VOD PREKIDANJE                           | UKLJUČEN     | KOM NEUSPEŠNO  |
| 07-Feb | 04-51:16:345 | 180283 | 8-283                   | K00 | SHS SHS - BLOKADA UKLJUČENJA             | NASTANAK     |                |
| 07-Feb | 04-51:16:348 | 180283 | 8-283                   | K04 | VOD RASTAVLJANJE ZA UZEMLENJE            | UKLJUČEN     |                |

Slika 12. Lista događaja za proradu napredne automatizacije SN ED mreže u slučaju kvara na prvoj deonici – Varijanta A

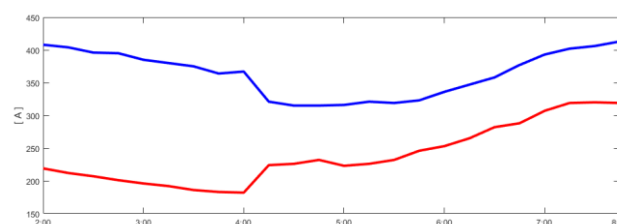
Na Slici 13 prikazani su vremenski tokovi, sa kojih se može jasno uočiti vreme reagovanja sekvenci napredne automatizacije SN ED mreže u posmatranom slučaju. Na Slici 14 dati su dijagrami opterećenja SN izvoda pripadajućeg SN ostrva (Ostrvo 2) i napojnih transformatora, na kojima su prikazana merenja sa SCADA sistema sa rezolucijom merenja od 15 minuta. Sa priloženih dijagrama nije moguće jasno uočiti reagovanja sekvenci napredne automatizacije, već samo promene opterećenja nakon izvršenja svih sekvenci napredne automatizacije SN ED mreže.



Slika 13. Vremenski tok prorade napredne automatizacije SN ED mreže u slučaju kvara na prvoj deonici – Varijanta A



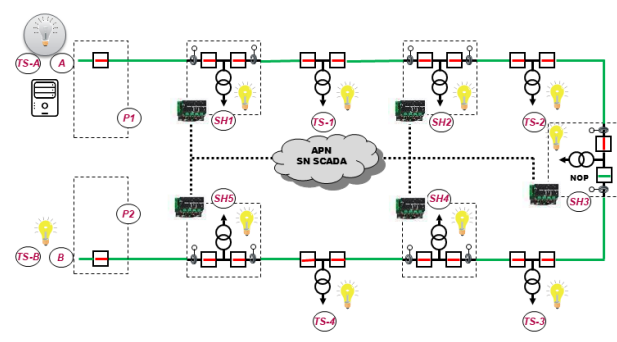
a) Dijagrami opterećenja SN izvoda



b) Dijagrami opterećenja napojnih transformatora

Slika 14. Dijagrami opterećenja SN izvoda i napojnih transformatora tokom prorade napredne automatizacije SN ED mreže u slučaju kvara na prvoj deonici – Varijanta A

Na Slici 15 prikazan je primer rada napredne automatizacije SN ED mreže u slučaju ispada napojnog voda ili transformatora snage u napojnoj transformatorskoj stanici VN/SN ili SN/SN. Slučaj se svodi praktično na prethodni, uz činjenicu da nije bilo kvara u mreži, što je dovelo do značajno brže prorade realizovane napredne automatizacije, u ukupnom trajanju od 8 sekundi.

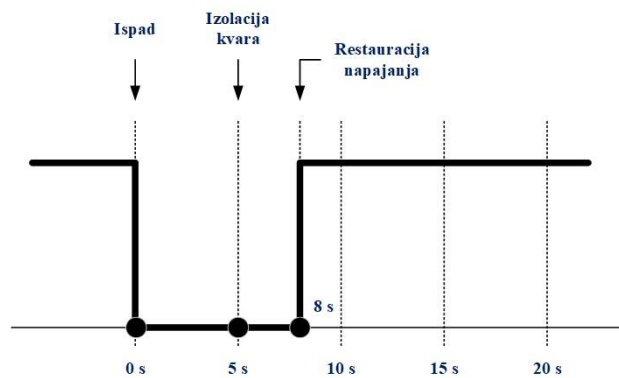


a) Ispad (napojnog voda ili transformatora snage)

Na Slici 16 prikazana je lista događaja sa SCADA sistema u slučaju ispada napojnog voda ili transformatora za Varijantu A.

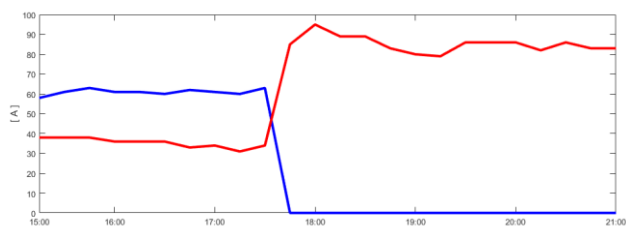
|          |              |        |                               |     |                         |                                |               |
|----------|--------------|--------|-------------------------------|-----|-------------------------|--------------------------------|---------------|
| 02-09-24 | 17:20:51:311 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M61 | VOD                     | PREKOSTRILNA ŽARŠTA POLUBLA    | NASTANK       |
| 02-09-24 | 17:20:51:321 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M61 | VOD                     | PREKOSTRILNA ŽARŠTA POLUBLA    | BRAGVALJO     |
| 02-09-24 | 17:20:51:320 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M61 | VOD                     | PREKID                         | PRESTANOK     |
| 02-09-24 | 17:20:51:321 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M61 | VOD                     | PREKOSTRILNA ŽARŠTA POLUBLA    | ISKLOČEN      |
| 02-09-24 | 17:20:51:326 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M61 | VOD                     | PREKOSTRILNA ŽARŠTA POLUBLA    | PRESTANOK     |
| 02-09-24 | 17:20:51:328 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M61 | VOD                     | POVRATNI NAPON                 | PRESTANOK     |
| 02-09-24 | 17:20:51:326 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M61 | VOD                     | POVRATNI NAPON                 | PRESTANOK     |
| 02-09-24 | 17:20:51:391 | 180128 | 8-328                         | V03 | VOD                     | NAPON                          | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:403 | 180128 | 8-328                         | V03 | VOD                     | NAPON                          | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:402 | 180122 | 8-122                         | V03 | VOD                     | NAPON                          | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:405 | 180128 | 8-328                         | V03 | SHG                     | SHG - STANJE RASPOLOŽIVOSTI TS | KVAR          |
| 02-09-24 | 17:20:51:407 | 180128 | 8-328                         | SHG | SHG                     | STANJE RASPOLOŽIVOSTI TS       | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:407 | 180128 | 8-328                         | SHG | SHG                     | STANJE RASPOLOŽIVOSTI TS       | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:416 | 180122 | 8-122                         | V03 | SHG                     | SHG - STANJE RASPOLOŽIVOSTI TS | KVAR          |
| 02-09-24 | 17:20:51:428 | 180098 | 8-98                          | K01 | VOD                     | NAPON                          | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:429 | 180098 | 8-98                          | V03 | VOD                     | NAPON                          | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:430 | 180098 | 8-98                          | V03 | SHG                     | SHG - STANJE RASPOLOŽIVOSTI TS | KVAR          |
| 02-09-24 | 17:20:51:442 | 180128 | 8-328                         | V03 | SHG                     | SHG - STANJE RASPOLOŽIVOSTI TS | PRESTANOK     |
| 02-09-24 | 17:20:51:461 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M62 | VOD                     | POVRATNI NAPON                 | PRESTANOK     |
| 02-09-24 | 17:20:51:462 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M62 | VOD                     | POVRATNI NAPON                 | PRESTANOK     |
| 02-09-24 | 17:20:51:463 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M62 | NB                      | NISTANAK NAPON 230 V AC        | NASTANK       |
| 02-09-24 | 17:20:51:463 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M62 | NB                      | NISTANAK NAPON 230 V AC        | PRESTANOK     |
| 02-09-24 | 17:20:51:463 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M62 | SP1                     | POVRATNI NAPON                 | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:475 | 180128 | 8-328                         | 001 | DAS                     | NISTANAK NAPON 230 V AC        | NASTANK       |
| 02-09-24 | 17:20:51:478 | 180128 | 8-328                         | 001 | DAS                     | NISTANAK NAPON 230 V AC        | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:480 | 180122 | 8-122                         | 001 | DAS                     | NISTANAK NAPON 230 V AC        | NASTANK       |
| 02-09-24 | 17:20:51:481 | 180122 | 8-122                         | 001 | DAS                     | NISTANAK NAPON 230 V AC        | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:484 | 180098 | 8-98                          | K01 | VOD                     | SALOPA RASTVALJAC              | ISKLOČEN      |
| 02-09-24 | 17:20:51:484 | 180098 | 8-98                          | K01 | VOD                     | SALOPA RASTVALJAC              | ISKLOČEN      |
| 02-09-24 | 17:20:51:484 | 180098 | 8-98                          | SHG | SHG                     | SEKVENCA I OTOKA               | NASTANK       |
| 02-09-24 | 17:20:51:485 | 180128 | 8-328                         | V03 | VOD                     | SALOPA RASTVALJAC              | ISKLOČEN      |
| 02-09-24 | 17:20:51:487 | 180128 | 8-328                         | K01 | VOD                     | NAPON                          | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:490 | 180128 | 8-328                         | 001 | DAS                     | NISTANAK NAPON 230 V AC        | PRESTANOK     |
| 02-09-24 | 17:20:51:491 | 180122 | 8-122                         | DAS | NISTANAK NAPON 230 V AC | PRESTANOK                      |               |
| 02-09-24 | 17:20:51:493 | 180122 | 8-122                         | V03 | VOD                     | NAPON                          | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:494 | 180122 | 8-122                         | V03 | VOD                     | NAPON                          | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:497 | 180122 | 8-122                         | V03 | VOD                     | NAPON                          | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:499 | 180128 | 8-328                         | SHG | SHG                     | STANJE RASPOLOŽIVOSTI TS       | NORMALNO      |
| 02-09-24 | 17:20:51:499 | 180122 | 8-122                         | SHG | SHG                     | STANJE RASPOLOŽIVOSTI TS       | NORMALNO      |
| 02-09-24 | 17:20:51:501 | 180122 | 8-122                         | V03 | VOD                     | NAPON                          | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:513 | 180098 | 8-98                          | 001 | DAS                     | NISTANAK NAPON 230 V AC        | PRESTANOK     |
| 02-09-24 | 17:20:51:534 | 180098 | 8-98                          | K01 | VOD                     | NAPON                          | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:541 | 180128 | 8-328                         | K01 | INVERTOR - ALARM        | NIŠ PRESTANOK                  | PRESTANOK     |
| 02-09-24 | 17:20:51:548 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M61 | VOD                     | PREKID                         | PRESTANOK     |
| 02-09-24 | 17:20:51:560 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M61 | NB                      | NISTANAK NAPON 230 V AC        | PRESTANOK     |
| 02-09-24 | 17:20:51:561 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M61 | SP1                     | POVRATNI NAPON                 | PRESTANOK     |
| 02-09-24 | 17:20:51:568 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M62 | SP1                     | POVRATNI NAPON                 | PRESTANOK     |
| 02-09-24 | 17:20:51:569 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M62 | SP1                     | POVRATNI NAPON                 | PRESTANOK     |
| 02-09-24 | 17:20:51:570 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M62 | SP1                     | POVRATNI NAPON                 | PRESTANOK     |
| 02-09-24 | 17:20:51:582 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M62 | INVERTOR - ALARM        | NIŠ PRESTANOK                  | PRESTANOK     |
| 02-09-24 | 17:20:51:586 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M62 | SHG                     | SHG - STANJE RASPOLOŽIVOSTI TS | NEAKTIVNA     |
| 02-09-24 | 17:20:51:596 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M62 | SHG                     | SHG - STANJE RASPOLOŽIVOSTI TS | NEAKTIVNA     |
| 02-09-24 | 17:20:51:597 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M62 | SHG                     | SHG - STANJE RASPOLOŽIVOSTI TS | NEAKTIVNA     |
| 02-09-24 | 17:20:51:597 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M62 | SHG                     | SHG - STANJE RASPOLOŽIVOSTI TS | NEAKTIVNA     |
| 02-09-24 | 17:20:51:598 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M62 | DAS                     | LOKALNA AUTOMATIKA             | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:601 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M62 | SHG                     | SHG - STANJE RASPOLOŽIVOSTI TS | KVAR          |
| 02-09-24 | 17:20:51:602 | 200906 | TS 15/10 VAP Tehniški faulbol | M62 | DAS                     | LOKALNA AUTOMATIKA             | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:617 | 180098 | 8-98                          | V03 | SHG                     | SHG - STANJE RASPOLOŽIVOSTI TS | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:617 | 180098 | 8-98                          | V03 | SHG                     | SHG - STANJE RASPOLOŽIVOSTI TS | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:617 | 180098 | 8-98                          | V03 | SHG                     | SEKVENCA I OTOKA               | PRESTANOK     |
| 02-09-24 | 17:20:51:623 | 180128 | 8-328                         | 001 | DAS                     | NISTANAK NAPON 230 V AC        | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:631 | 180098 | 8-98                          | V03 | DAS                     | LOKALNA AUTOMATIKA             | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:638 | 180450 | 8-450                         | SHG | SHG                     | SHG - RASPOLOŽIVOST            | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:643 | 180450 | 8-450                         | SHG | DAS                     | LOKALNA AUTOMATIKA             | NIŠ PRESTANOK |
| 02-09-24 | 17:20:51:674 | 180098 | 8-98                          | V03 | SHG                     | SHG - RASPOLOŽIVOST            | NEAKTIVNA     |
| 02-09-24 | 17:20:51:674 | 180098 | 8-98                          | SHG | SHG                     | SEKVENCA I OTOKA               | NIŠ PRESTANOK |

Na listi se uočavaju ključni događaji (označeni posebnim bojama) koji su doveli do pravovremene prorade napredne automatizacije SN ED mreže. Kao što se može videti iz liste događaja, u ovom scenariju napredne automatizacije SN ED mreže realizovani sistem je izvršio rekonfiguraciju mreže u cilju restauracije napajanja za 8 sekundi, što je daleko kraće od slučaja kada je kvar bio na prvoj deonici. Važno je napomenuti da u listi nije bilo signala prorade identifikacije prolaska struje kvara, budući da u ovom slučaju nije bilo kvara na SN izvodu. Vremenski tok prorade napredne automatizacije prikazan je na Slici 17.

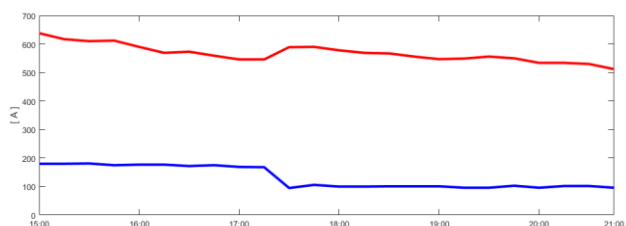


Na Slici 18 dati su dijagrami opterećenja SN izvoda pripadajućeg SN ostrva (Ostrvo 2) i napojnih transformatora, na kojima su prikazana merenja sa SCADA sistema sa rezolucijom merenja od 15 minuta. I sa ovih priloženih dijagrama nije moguće jasno uočiti

reagovanja sekvenci napredne automatizacije, već samo promene opterećenja nakon izvršenja svih sekvenci napredne automatizacije SN ED mreže, budući da se događaj odigrao veoma brzo.



a) Dijagrami opterećenja SN izvoda

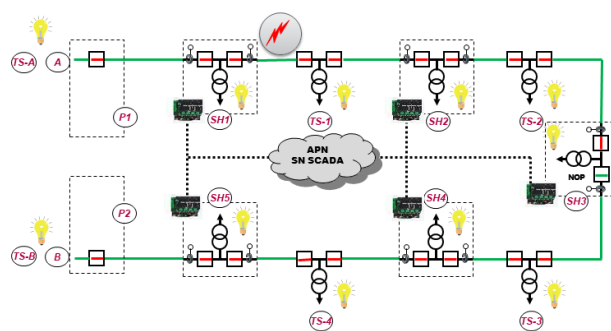


b) Dijagrami opterećenja napojnih transformatora

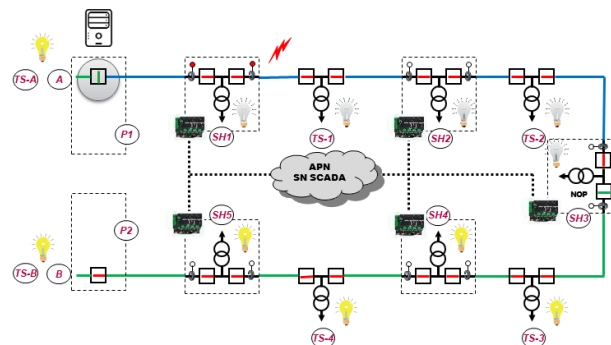
Slika 18. Dijagrami opterećenja SN izvoda i napojnih transformatora tokom prorade napredne automatizacije SN ED mreže u slučaju ispada napojnog voda ili transformatora – Varijanta A

S obzirom na to da je bio u pitanju neselektivan ispad usled paralelisanja napojnih SN vodova, uzrok ispada je relativno brzo otklonjen, za vreme manje od 3 minuta. Reagovanje napredne automatike je i u ovom slučaju dovelo do toga da su u veoma kratkom vremenskom periodu napojeni svi krajnji korisnici duž SN voda. Takođe, važno je napomenuti da usled rada napredne automatike nisu značajno preopterećeni rezervni pravci napajanja, kao ni transformatori koji preuzimaju dodatno opterećenje usled rekonfiguracije mreže. Ovaj slučaj je manje kritičan nego prethodni, budući da je dodatno opterećenje preuzimao transformator VN/SN veće instalisane snage. Za potrebe analize događaja preuzeti su i registrovani zapisi prelaznih pojava tokom ispada SN elemenata sa određenih MPZU, ali zbog obima rada nije ih moguće prezentovati. Izvršene analize ispada nedvosmisleno ukazuju da je neophodno vršiti i analizu prelaznih pojava.

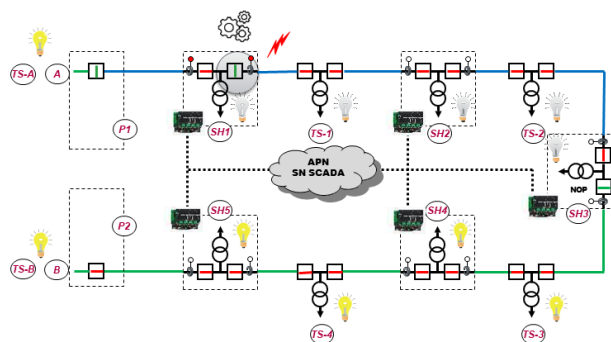
Na Slici 19 prikazan je scenario rada napredne automatike SN ED mreže u slučaju kvara na drugoj deonici u okviru rešenja zasnovanog na Varijanti A. Kod ove prorade rešenja napredne automatizacije SN DM mreže imamo praktično pet koraka (sekvenci). Takođe, u cilju dobijanja kompletnog uvida u celokupan postupak lociranja kvara i restauracije napajanja svih krajnjih korisnika, prikazani su svi koraci postupka.



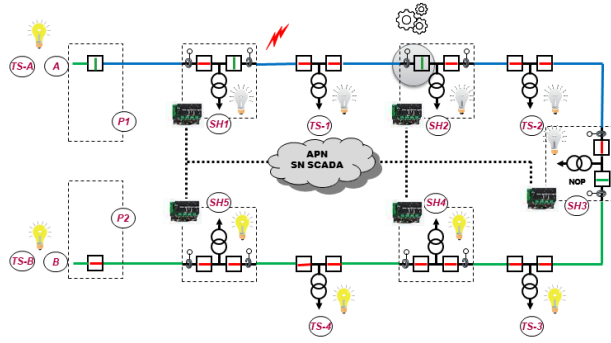
a) Pojava kvara



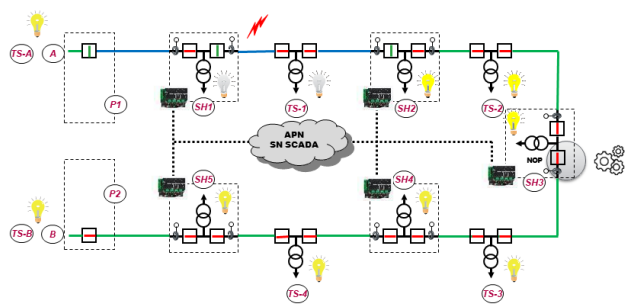
b) Reagovanje zaštite



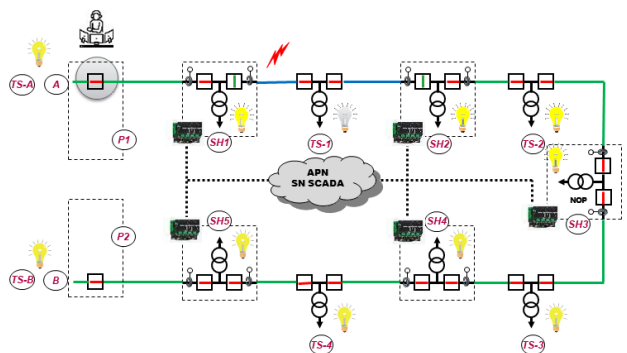
c) Prorada automatike – isključenje dela mreže



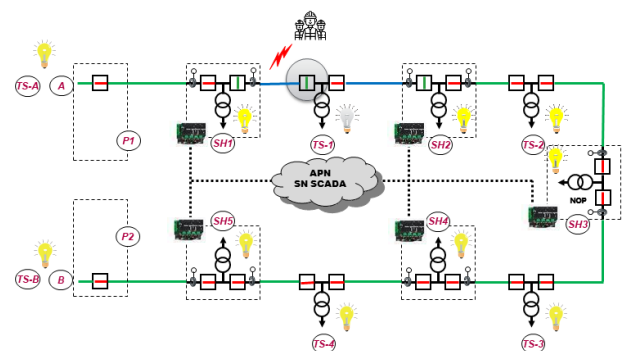
č) Prorada automatike – izolacija druge deonice



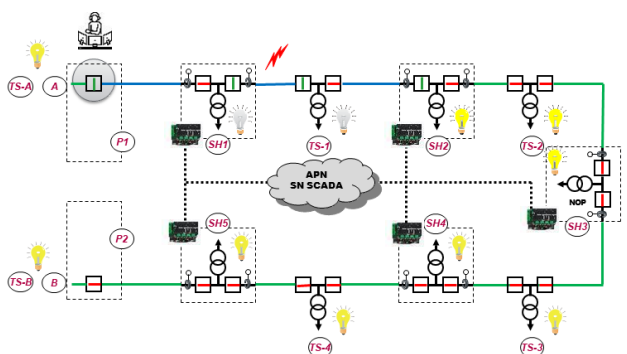
c) Restauracija napajanja dela SN izvoda



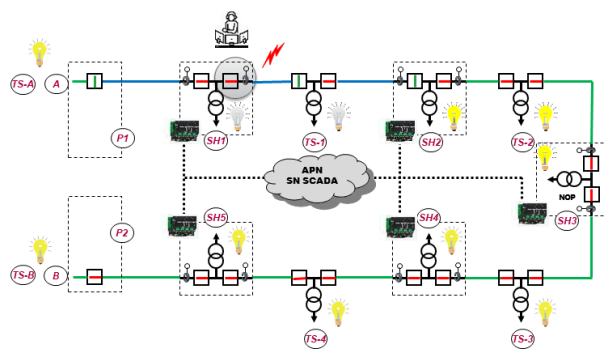
d) Uključenje prve TS SN/NN od strane dispečera



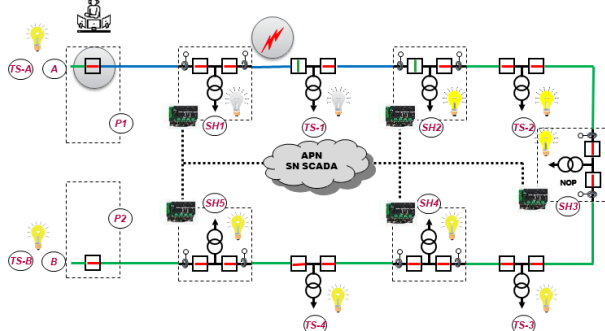
dž) Isključenje deonice od strane dispečerske ekipe



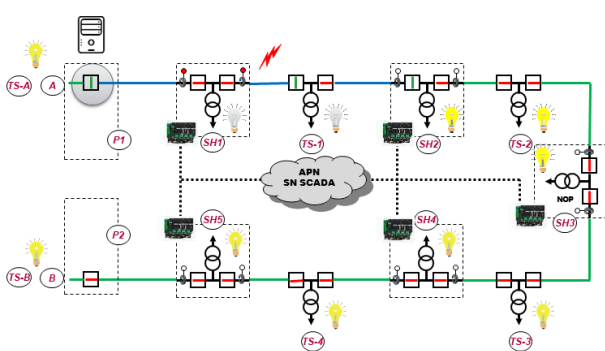
d) Isključenje napojene prve TS SN/NN



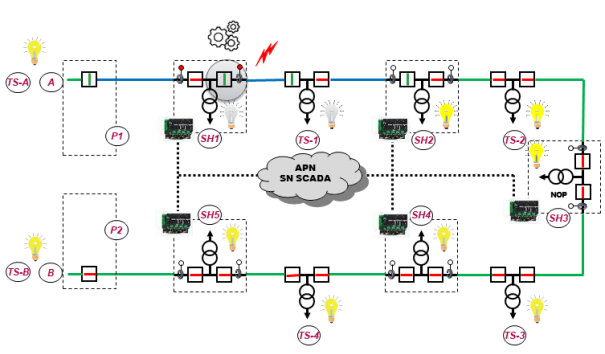
e) Uključenje izvodne ćelije u prvoj TS SN/NN



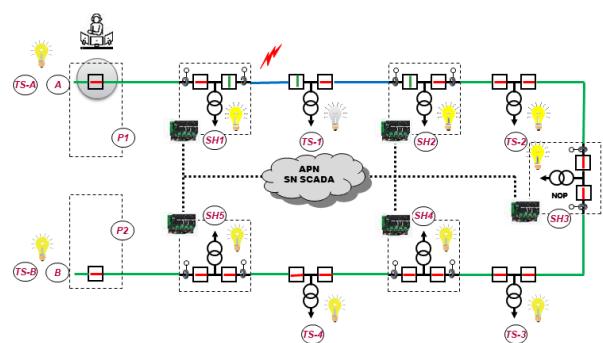
f) Uključenje „na kvar“ od strane dispečera



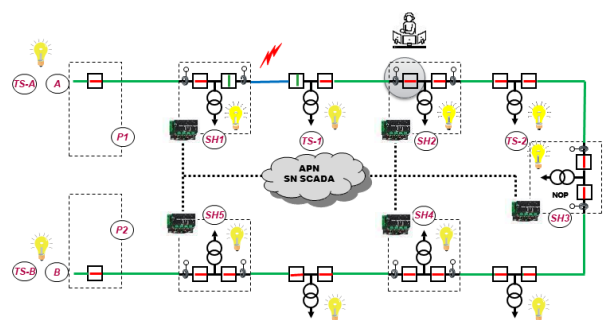
g) Prorada zaštite



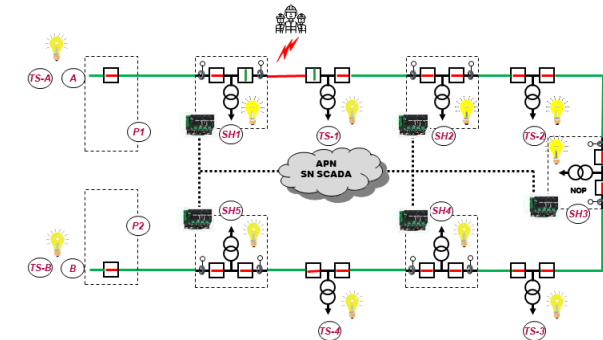
h) Prorada automatike – isključenje dela mreže



i) Uključenje prve TS SN/NN od strane dispečera



j) Uključenje prve TS SN/NN od strane dispečera



k) Priprema radova na SN deonici u kvaru

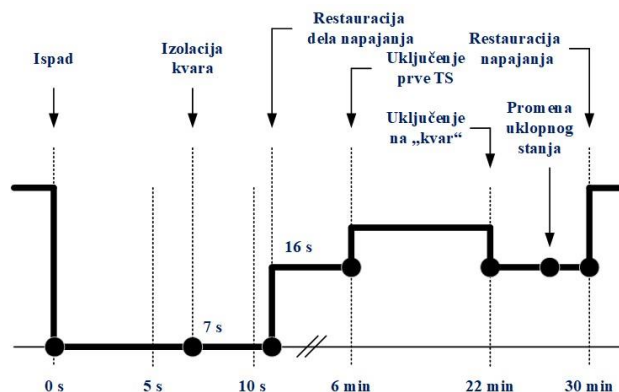
*Slika 19. Primer rada napredne automatizacije u slučaju kvara na drugoj deonici SN izvoda – Varijanta A*

Na Slici 20 prikazana je lista događaja sa SCADA sistema u slučaju kvara na drugoj deonici za Varijantu A. Na listi se uočavaju ključni događaji (označeni posebnim bojama) koji su doveli do pravovremene prorade napredne automatizacije SN ED mreže. Kao što se može videti iz liste događaja, u ovom scenariju napredne automatizacije SN ED mreže, realizovani sistem je izvršio rekonfiguraciju mreže u cilju restauracije dela napajanja za 11 sekundi, ali i da je dalji postupak lociranja kvara i restauracije napajanja ostatak krajnjih kupaca potrajao još dodatnih 30 minuta. Vremenski tok prorade napredne automatizacije prikazan je na Slici 21.

Na Slici 22 dati su dijagrami opterećenja SN izvoda pripadajućeg SN ostrva (Ostrvo 2) i napojnih transformatora, na kojima su prikazana merenja sa SCADA sistema sa rezolucijom merenja od 15 minuta.

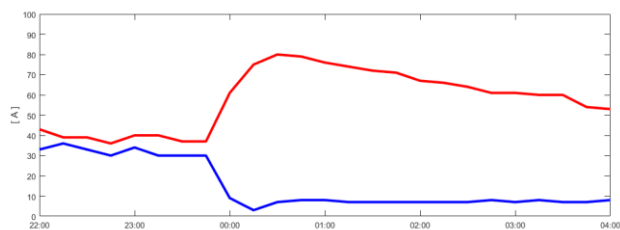
[illegible]

*Slika 20. Lista događaja za prorađu napredne automatizacije SN ED mreže u slučaju kvara na drugoj deonici SN izvoda – Varijanta A*

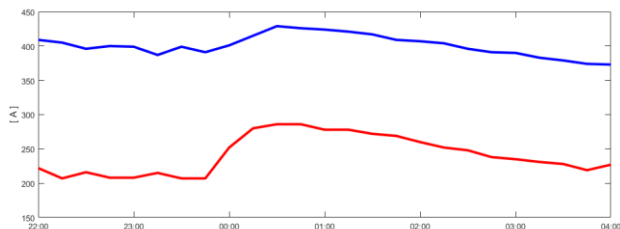


**Slika 21.** Vremenski tok prorade napredne automatizacije  
SN ED mreže u slučaju kvara na drugoj deonici SN  
izvoda – Varijanta A

I sa ovih priloženih dijagrama nije moguće jasno uočiti reagovanja sekvenci napredne automatizacije, već samo promene opterećenja nakon izvršenja akcija od strane dispečera u nadređenom centru i dispečerskih ekipa na terenu u cilju lociranja deonice u kvaru i restauracije napajanja preostalih krajnjih kupaca koji su bili pogođeni kvarom.



a) Dijagrami opterećenja SN izvoda



b) Dijagrami opterećenja napojnih transformatora

Slika 22. Dijagrami opterećenja SN izvoda i napojnih transformatora tokom prorade napredne automatizacije SN ED mreže u slučaju kvara na drugoj deonici SN izvoda – Varijanta A

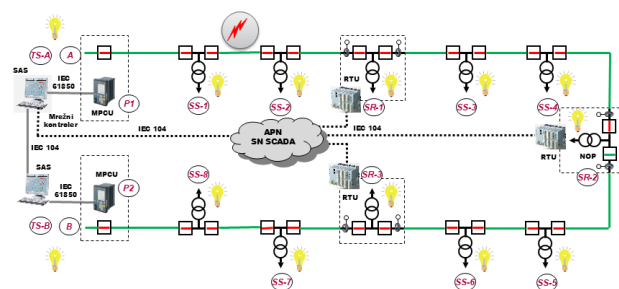
U prethodnim delu prikazana su tri karakteristična slučaja prorade realizovanog rešenja napredne automatike Varijante A, koja se zasniva na unapređenom konceptu automatizacije SN ED mreže, sa većim stepenom automatizacije SN voda. Veći stepen automatizacije SN voda omogućava da se SN vod segmentira na više kontrolabilnih deonica, što dovodi do efikasnije izolacije mesta kvara, kao i restauracije napajanja krajnjim kupcima pogođenih ispadom. Kao što je prikazano, u slučaju kvara na prvoj deonici, moguće je da se za relativno kratko vreme izvrši efikasna izolacija deonice pogođene kvarom, ali i potpuna restauracija napajanja svim krajnjim kupcima pogođenih tim ispadom. Budući da je broj ispada na prvim deonicama značajno veliki u odnosu na kvarove na ostalim deonicama, pre svega zbog većeg opterećenja kojem su one izložene, samim tim i uspešnost prorade sa potpunim očekivanim efektima je daleko veća.

Kada se primeni rešenje napredne automatizacije zasnovanog na Varijanti B, tada se ovo rešenje primenjuje na osnovnom konceptu automatizacije SN ED mreže, ali sa značajno unapređenom komunikacionom šemom i realizacijom nadređenog mrežnog kontrolera koji kontroliše određeni deo SN ED mreže.

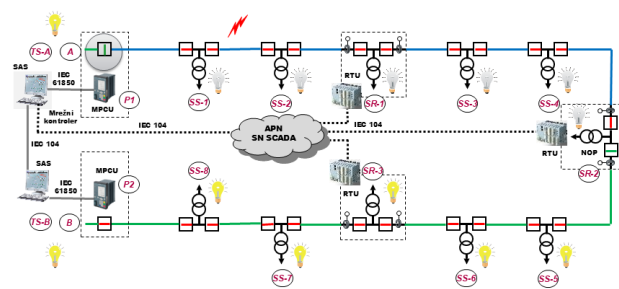
Osnovni koncept automatizacije SN ED mreže ima više većih segmenata koji obuhvataju veći broj SN deonica sa rasklopnim elementima TS SN/NN koji nisu kontrolabilni. Ovako segmentiran SN vod ne omogućava u velikoj meri efikasnu restauraciju napajanja krajnjim kupcima koji su pogođeni kvarom, budući da se izolacija deonice u kvaru i rekonfiguracija mreže u smislu potpune restauracije postiže radom dispečerskih ekipa na terenu. Zbog ovakvog načina rada vreme restauracije je kraće nego u slučaju bez rešenja automatizacije SN ED mreže, ali daleko od postavljenih ciljeva rekonfiguracije da se ona izvrši za nekoliko desetina sekundi. Sa stanovišta rada napredne automatike, uočavaju se identične sekvence rada

algoritama realizovanih u obe varijante. Takođe, uočava se da se realizovani sistem u Varijanti B zasniva na daleko složenijoj komunikaciji između komponenti realizovanog rešenja, što je prethodno napomenuto, na više mesta u radu.

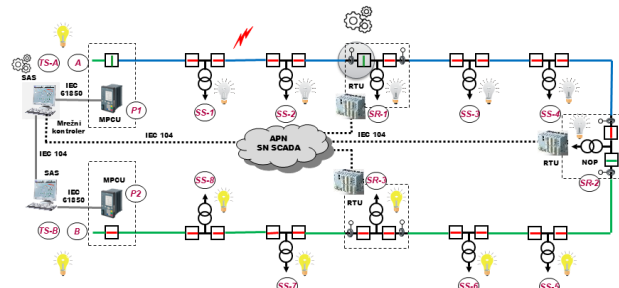
Na Slici 23 prikazane su samo sekvence rada realizovanog rešenja napredne automatizacije Varijante B, zaključno sa sekvencom izolacije SN segmenta (više deonica) u kvaru, dok druge sekvence koje se odnose na izolaciju ciljane SN deonice pogođene kvarom nisu prikazane iz razloga obimnosti i prisutne varijabilnosti u pogledu koja je deonica u okviru SN segmenta pogođena kvarom.



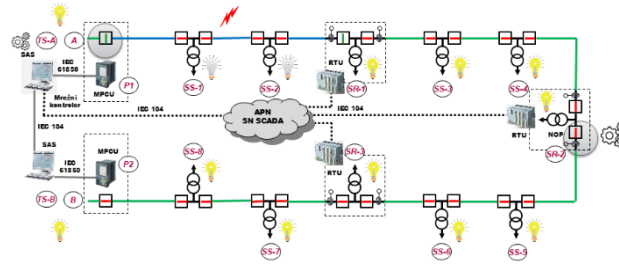
a) Pojava kvara



b) Reagovanje zaštite



c) Izolacija kvara (SN segmenta)



č) Restauracija napajanja dela pogođenih kupaca

Slika 23. Primer rada napredne automatizacije u slučaju kvara na prvom SN segmentu – Varijanta B

Na Slici 24 prikazana je lista događaja sa SCADA sistema u slučaju kvara na prvom SN segmentu mreže za Varijantu B. Na listi se uočavaju ključni događaji u listi (označeni posebnim bojama) koji su doveli do pravovremene prorade napredne automatizacije SN ED mreže, pri čemu u listi ne postoje u ovom rešenju signali koji se odnose na međusobnu komunikaciju između daljinskih stanica, jer je algoritam napredne automatizacije realizovan u nadređenom mrežnom kontroleru. Sa druge strane, u listi događaja postoji veći skup procesnih informacija, budući da je u ovom slučaju napojna transformatorska stanica VN/SN realizovana sa integrisanim sistemom zaštite i upravljanja sa MPCU uređajima.



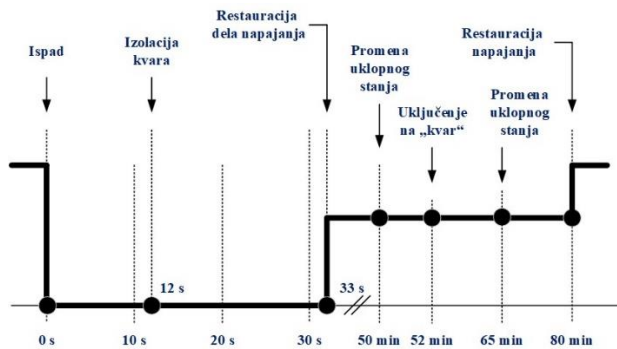
**Slika 24.** Lista događaja za prorađu napredne automatizacije SN ED mreže – Varijanta B

Sa prikazane liste događaja može se utvrditi da je u ovom scenariju napredne automatizacije SN ED mreže realizovani sistem izvršio rekonfiguraciju mreže za 33 sekunde, što približno odgovara postavljenom cilju od 30 sekundi. Izuzetno je važno napomenuti da je u ovom algoritmu uvedeno vremensko kašnjenje za svaku manipulaciju od 10 sekundi, što će se u narednom periodu eliminisati, tako da će se algoritam u ovom slučaju očekivano izvršiti za oko 10 sekundi, što odgovara proradama rešenja napredne automatizacije u primerima Varijante A.

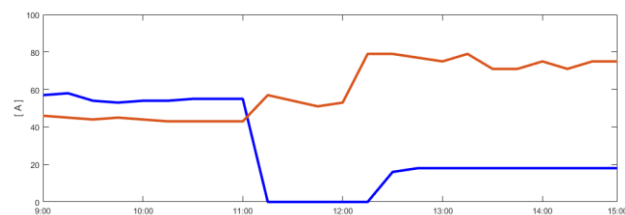
Kao što se sa Slike 25 može uočiti, reagovanje rešenja napredne automatizacije uspešno je sprovelo izolaciju pogođenog SN segmenta kvarom i delimično izvršilo napajanje krajnjih kupca koji se napajaju preko drugog segmenta SN izvoda, ali je ukupno vreme za kompletnu restauraciju napajanja čak i veće od prosečnog pokazatelja CAIDI za posmatrani deo SN mreže.

Na Slici 26 dati su dijagrami opterećenja SN izvoda pripadajućeg SN ostrva (Ostrvo 2) i napojnih transformatora, na kojima su prikazana merenja sa SCADA sistema sa rezolucijom merenja od 15 minuta. I sa ovih priloženih dijagrama nije moguće jasno uočiti reagovanja sekvenci napredne automatizacije, identično

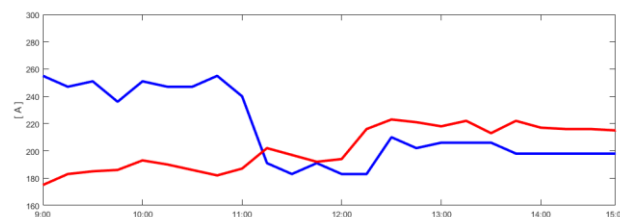
kao i u prethodnim slučajevima, kao i pokušaji uključenja SN izvoda od strane dispečera u centru upravljanja ili dispečerskih ekipa na terenu. Moguće je uočiti samo krajnje promene opterećenja nakon izvršenja akcija na mikrolokaciji kvara od strane dispečera u nadređenom centru i dispečerskih ekipa na terenu, u cilju lociranja deonice u kvaru i restauracije napajanja preostalih krajnjih kupaca koji su bili pogođeni kvarom.



**Slika 25. Vremenski tok prorade napredne automatizacije  
SN ED mreže u slučaju kvara na prvom segmentu SN  
izvoda – Varijanta B**



a) Dijagrami opterećenja SN izvoda



**b) Dijagrami opterećenja napojnih transformatora**

**Slika 26.** Dijagrami opterećenja SN izvoda i napojnih transformatora tokom prorade napredne automatizacije SN ED mreže u slučaju kvara na prvom segmentu SN izvoda – Varijanta B

Izabrani primer veoma realno prikazuje sve probleme pri sprovođenju procesa restauracije i rekonfiguracije mreže u slučaju pojave kvara na segmentu mreže koji nije automatizovan, gde rešenje napredne automatizacije samo delimično obavi posao, dok se konačno okončanje procesa završava angažovanjem ekipa na terenu, koje je u značajnoj meri zavisno od situacije na terenu (problem saobraćaja, pristupa objektima itd.).

## 7. ZAKLJUČAK

Napredna automatizacija SN ED mreže je, kroz implementaciju dva rešenja, bazirana na različitim konceptima vodećih svetskih proizvođača sistema i opreme za automatizaciju SN ED mreže, pokazala svu svoju superiornost u odnosu na rešenja automatizacije prethodnih generacija. Iako je osnovni koncept automatizacije kablovske SN ED mreže bio u primeni skoro dve decenije, primenjenim rešenjem nedvomisleno je pokazano da koncept automatizacije treba unaprediti kroz povećanje stepena automatizacije SN izvoda, a pre svega ugradnjom automatizovanih TS SN/NN na mestu prve TS na izvodu, bez obzira na to da li je primenjeno rešenje integrisanog sistema zaštite i upravljanja u napojnoj transformatorskoj stanici. Primenjena rešenja prokrčila su put daljoj evoluciji rešenja automatizacije prema krajnjem cilju – konceptu centralizovanog rešenja. U radu su prikazani samo karakteristični slučajevi prorade rešenja napredne automatizacije i dalje praćenje rada realizovanih rešenja omogućiće dalje poboljšanje rada primenjenih rešenja. Prikazana rešenja po obuhvatu mreže su trenutno referentna u svetskim razmerama, te dobijeni rezultati svako predstavljaju svojevrsan „benchmark“ rezultata koji se postižu prilikom rada sistema za naprednu automatizaciju SN ED mreže.

## LITERATURA

- [1] Vukotić, D., Čolović, N., 2022, 3.01 – „Napredna automatizacija SN ED mreže“, 13. Savetovanje CIRED SRBIJA 2022, Kopaonik, Srbija.
- [2] Elkadeem, M. R., Alaam M. A., and Azmy A. M., „Reliability Improvement of Power Distribution Systems using Advanced Distribution Automation“, *Renewable Energy and Sustainable Development (RESO)*, Volume 3 Issue 1, Special Issue, March 2017, DOI:10.13140/RG.2.2.28065.81763/1
- [3] Sudhakar T. D., and Srinivas K. N., „Restoration of power network – a bibliographic survey“, *European Transactions on Electrical Power*, 21(1), pages: 635 – 655, January 2011, DOI:10.1002/etep.467
- [4] Uluski, R. W., „The Role of Advanced Distribution Automation in the Smart Grid“, IEEE PES General Meeting, July 2010, DOI:10.1109/PES.2010.5590075
- [5] Shahin, M. A., „Smart Grids Self-Healing Implementation for Underground Distribution Networks“, 2013 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2013.6698702
- [6] Kuru, J., Ihonen, T., Haikonen, J., „Control-Centre-Based Automatic Fault Isolation and Restoration System for Rural Medium Voltage Networks“, 22<sup>nd</sup> International Conference on Electricity Distribution – CIRED, Paper 1012, DOI: 10.1049/cp.2013.1035
- [7] Chollot, Y., Wild, J., Berry, T., Jourdan, A., Raison, B., Marguet, R., Houssin, J., Joubert, R., „Decentralized Self Healing Solution Tested in the Framework of GreenLys Smart Grid Project“, 2013 IEEE Grenoble Conference, DOI: 10.1109/PTC.2013.6652289
- [8] Gomes, D., Colunga, R., Gupta P., Balasubramanian, A., „Distribution Automation Case Study: Rapid Fault Detection, Isolation, and Power Restoration for a Reliable Underground Distribution System“, 2015 68<sup>th</sup> Annual Conference for Protective Relay Engineers, DOI: 10.1109/CPRE.2015.7102176
- [9] Madani, V., Das, R., Aminifar, F., McDonald, J., Venkata S. S., Novosel, D., Bose, A., Shahidehpour, M., „Distribution Automation Strategies Challenges and Opportunities in a Changing Landscape“, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Volume 6, Issue 4, July 2015, DOI: 10.1109/TSG.2014.2368382
- [10] Das, R., Madani, V., Aminifar, F., McDonald, J., Venkata, S. S., Novosel, D., Bose, A., Shahidehpour, M., „Distribution Automation Strategies: Evolution of Technologies and the Business Case“, 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, DOI: 10.1109/PESGM.2015.7286018
- [11] Siirto, O., Kuru, J., Lehtonen, M., „Fault Location, Isolation and Restoration in a City Distribution Network“, 2014 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), DOI: 10.1109/PQ.2014.6866843
- [12] Gong, Y., Guzmán, A., „Integrated Fault Location System for Power Distribution Feeders“, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Volume 49, Issue 3, May-June 2013, DOI: 10.1109/TIA.2013.2252596
- [13] Subban, P. P., Awodele, K. O., „Reliability Impact of Different Smart Grid Techniques on a Power Distribution System“, 2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America), DOI: 10.1109/ISGT-LA.2013.6554467
- [14] Proizvođačka dokumentacija, 2021, Elaborat sistema za naprednu automatizaciju SN ED mreže – SoG, Siemens
- [15] Proizvođačka dokumentacija, 2021, Elaborat sistema za naprednu automatizaciju SN ED mreže – SHG, Schneider Electric

## BIOGRAFIJE



**Dušan Vukotić** je rođen 1968. godine u Beogradu. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu 1993. godine. Na istom fakultetu je 1999. godine magistrirao iz oblasti estimacije stanja elektrodistributivne mreže. Zaposlen je od 1994. godine u „Elektrodistribuciji Beograd”, koja se sada organizaciono nalazi u okviru „Elektrodistribucije Srbije” d. o. o. Beograd. Trenutno obavlja poslove višeg analitičara za poslovne procese upravljanja elektrodistributivnim sistemom. Od 2001. godine intenzivno se bavi automatizacijom SN DM mreže. ORCID: 0009-0005-3084-126X.



**Božidar Ćirić** je rođen 1970. godine u Beogradu. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu 1999. godine. Zaposlen je od 2000. godine u „Elektrodistribuciji Srbije” d. o. o. Beograd, gde i danas radi u Centru za IKT na radnom mestu glavnog stručnog saradnika za SCADA i procesnu tehniku.



**Stojan Šiškoski** je rođen 1969. godine u Beogradu. Master studije završio je na Tehničkom Fakultetu „Mihajlo Pupin” Univerziteta u Novom Sadu 2013. godine. Zaposlen je u „Elektrodistribuciji Srbije” d. o. o. Beograd u Službi za SCADA i procesnu tehniku za DP Beograd na radnom mestu šefa Službe. ORCID: 0009-0002-9935-1187.

D. Vukotić<sup>1\*</sup>, B. Ćirić<sup>1</sup>, S. Šiškoski<sup>1</sup>

# Evolution of the Concept of Automation of Underground Medium Voltage Electric Distribution Networks

<sup>1</sup>„Elektrodistribucija Srbije“ Ltd. Belgrade, Serbia

Professional article

## Highlights

- Automation of the MV electric distribution network is the backbone of "Smart Grids".
- The need to significantly improve the previously applied concept of automation of the MV electric distribution network.
- The improved concept of automation of the MV electric distribution network enables efficient restoration of power supply to end users after a fault occurs.

## Abstract

More than two decades ago, the concept of automation of the MV electricity distribution network was adopted for the electric distribution area of the city of Belgrade, which was the initial basis for further intensive automation of the MV electric distribution network. The concept of the MV electric distribution network was primarily based on a decentralized concept, where a large number of elements were planned for integration into the SCADA system, with the possibility of activating standard predefined local automation functions. As there has been a significant functional improvement of the equipment for automation of the MV electric distribution network during the last decade due to intensive digitalization, further directions in terms of improving the existing automation concept, where a large number of automated points within the MV electric distribution network would need to be redefined. Additionally, the requirements regarding the increasing reliability of the MV electric distribution network have led to a situation where it is necessary to increase the degree of automation of the MV electric distribution network, but also to ensure a much higher degree of coordination between the embedded equipment for the automation of the MV electric distribution network. For the above reasons, it was necessary to start implementing new modern concepts of advanced automation of the MV electric distribution network, which were supported by the latest generation of equipment and solutions from the world's largest equipment manufacturers. One solution included the implementation of a semi-decentralized concept with network controllers, while the other solution included the implementation of a solution without a network controller with a predefined application algorithm within the embedded and integrated equipment for the automation of the MV power distribution network.

## Keywords

Advanced Automation, Smart Grids, MV Network

Received: February 24<sup>th</sup>, 2025Reviewed: June 3<sup>rd</sup>, 2025Modified: July 9<sup>th</sup>, 2025Accepted: July 18<sup>th</sup>, 2025

\* Corresponding author: Dušan Vukotić, +381 64 834 2210

E - mail: [dušan.vukotic@es.rs](mailto:dušan.vukotic@es.rs)

### Note:

This article represents an expanded, improved and additionally peer-reviewed version of the paper "Comparative Analysis of the Implementation of Advanced MV Electric Distribution Network Automation Solutions", awarded by Expert Committee EC-3 Protection and Control in Distribution Networks at the 14<sup>th</sup> CIRED Serbia Conference, Kopaonik, September 16-20, 2024

