

Matija Babić
HEP-ODS Elektra Vinkovci
matija.babic@hep.hr

Ivan Ivkić
HEP-ODS Elektra Vinkovci
ivan.ivkic@hep.hr

Marko Ištók
URED EEP d.o.o.
marko.istok@ured-EEP.hr

Dejan Šteković
HEP-ODS SVS – PSTK Istok
dejan.stekovic@hep.hr

ISKUSTVA POGONA UZDUŽNE DIFERENCIJALNE ZAŠTITE U GRADSKOJ KABELSKOJ SN MREŽI

SAŽETAK

Kabelska 35 kV mreža grada Vinkovci sastoji se od 4 transformatorske stanice 35/10 kV, koje su međusobno prstenasto povezane 35 kV kabelima, a iz nje je moguće radijalno napajati susjedne podmreže (Vukovar, Županja). Godine 2021. predmetna mreža opremljena je uzdužnom diferencijalnom zaštitom za sve kabelske dionice i prešla u režim rada u prstenu. U radu se opisuje tehničko rješenje, oprema i komunikacijsko povezivanje kojim je realizirana opisana funkcionalnost. Nadalje, u radu su opisana iskustva u pogonu te usporedba postignutih poboljšanja sa očekivanjem.

Ključne riječi: diferencijalna, svjetlovod, SAIFI, SAIDI, CAIDI

OPERATIONAL EXPERIENCES WITH LINE DIFFERENTIAL PROTECTION IN THE URBAN CABLE MV GRID

SUMMARY

The 35 kV cable network of the city of Vinkovci consists of 4 transformer stations 35/10 kV, which are interconnected in a ring configuration by 35 kV cables, and it is possible to radially supply neighboring sub-networks (Vukovar, Županja). In 2021, the network was equipped with line differential protection for all cable sections and switched to ring operation mode. This paper describes the technical solution, equipment, and communication connection used to implement the described functionality. Furthermore, the paper discusses operational experiences and compares the achieved improvements with the expected ones.

Key words: differential, optical fiber, SAIFI, SAIDI, CAIDI

1. UVOD

U razdjelnoj mreži DP Elektra Vinkovci nazivnog napona 35 kV koja se napaja iz TS 110/35 kV Vinkovci 1 pojavila se, zbog povećanja sigurnosti napajanja, potreba za prstenastim pogonom. Kako bi se takav pogon mogao ostvariti bilo je potrebno provesti odgovarajuće proračune za utvrđivanje strujnih i naponskih prilika kako u normalnom pogonu, tako i u slučaju kvara te nadogradnju pojedinih primarnih i sekundarnih sustava mreže. S obzirom na znatan broj distribuiranih proizvodnih jedinica, izrađen je elaborat u kojem su provedeni proračuni tokova snaga za određivanje pogonskih struja te proračuni struja kratkog spoja koje su neophodne za ispravno i selektivno podešavanje uređaja relejne zaštite.

U radu je dan pregled tehničkog rješenja za uvođenje uzdužne diferencijalne zaštite te je navedena oprema koju je bilo potrebno dograditi ili zamijeniti u pojedinim poljima. Osim opreme koja se dograđivala ili mijenjala u vodnim poljima, prikazano je rješenje komunikacijskog povezivanja diferencijalnih releja. Tehničko rješenje je obuhvaćalo i uzdužnu diferencijalnu zaštitu postojećeg KB 35 kV Vinkovci 2 – Vinkovci 3, koji se nije mijenjao, ali su se rekonstrukcijom 35 kV mreže stekli uvjeti za šticeenje ovog kabela diferencijalnom zaštitom.

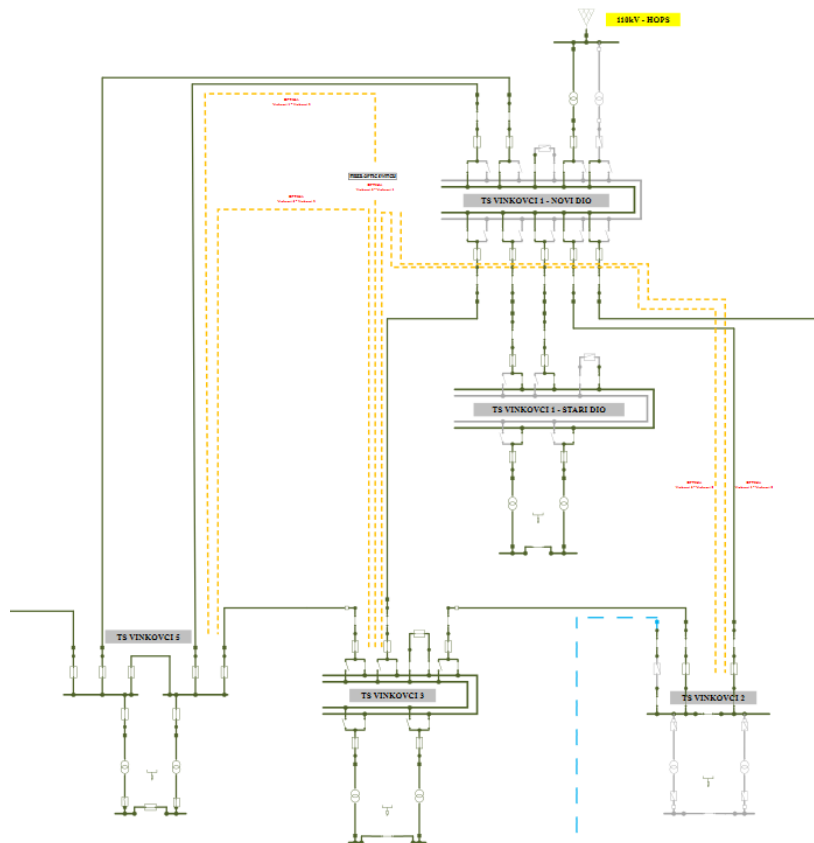
U svrhu procjene koristi zahvata, koriste se statistički pokazatelji pouzdanosti napajanja: SAIFI, SAIDI i CAIDI.

2. OPIS TEHNIČKOG RJEŠENJA

Mreža nazivnog napona 35 kV na području grada Vinkovci se sastoji od:

- napojne prijenosne mreže 110 kV,
- energetskih transformatora 110/35 kV,
- kabela i nadzemnih vodova,
- energetskih transformatora 35/10 kV,
- potrošača i proizvodnih postrojenja priključenih na 35 kV i 10 kV sabirnice,
- komunikacijskih veza.

Na slici 1 je prikazana razdjelna 35 kV mreža grada Vinkovci, gdje su osim energetskih vodova prikazane i svjetlovodne veze između predmetnih trafostanica.



Slika 1 - Promatrana srednjenaponska mreža grada Vinkovci

U mreži 10 kV također se nalazi i nekoliko elektrana koje su uzete u obzir prilikom proračuna strujnih i naponskih prilika u 35 kV mreži:

- mE PIK Vinkovci, snage 2 MW koja je spojena na 10 kV sabirnice u TS Vinkovci 5
- mE Spačva, snage 3 MW koja je spojena na 10 kV sabirnice u TS Vinkovci 3
- mE Landia Tordinci, snage 1 MW koja je spojena u 10 kV mrežu TS Vinkovci 1
- mE Ivankovo 1, snage 1 MW koja je spojena u 10 kV mrežu TS Vinkovci 5
- mE Ivankovo 2, snage 1 MW koja je spojena u 10 kV mrežu TS Vinkovci 5
- mE Staklenik, snage 0,65 MW koja je spojena u 10 kV mrežu TS Vinkovci 5.

U mreži postoje i elektrane manje snage koje se nalaze daleko od 35 kV i 10 kV sabirnica, a koje nisu uzete u razmatranje budući da impedancije 10 kV vodova previše smanjuju utjecaj njihova doprinosa na struju kvara i tokove snaga.

Zbog uvođenja diferencijalne zaštite kabela, bilo je potrebno ugraditi nove zaštitne releje koji imaju u sebi integriranu funkciju diferencijalne zaštite kabela. U Tablica I. su navedeni svi energetske kabele koji čine prsten grada Vinkovaca. Također je navedeno za koje je kabele bilo potrebno promijeniti zaštitne releje.

Tablica I. Popis kabela 35 kV prstena grada Vinkovci

Strana kabela	Strana kabela	Komentar
TS Vinkovci 1 (2x)	TS Vinkovci 5 (2x)	Prije zahvata je već bila ugrađena diferencijalna zaštita na oba kabela.
TS Vinkovci 1	TS Vinkovci 2	Zahvat je obuhvaćao ugradnju releja sa diferencijalnom zaštitom.
TS Vinkovci 2	TS Vinkovci 3	Zahvat je obuhvaćao ugradnju releja sa diferencijalnom zaštitom.
TS Vinkovci 3	TS Vinkovci 1	Zahvat je obuhvaćao ugradnju releja sa diferencijalnom zaštitom.
TS Vinkovci 3	TS Vinkovci 5	Zahvat je obuhvaćao ugradnju releja sa diferencijalnom zaštitom.

Na području grada Vinkovaca HEP-ODS d.o.o. Elektra Vinkovci posjeduje vlastitu komunikacijsku infrastrukturu. Prije zahvata, postrojenja TS 110/35/10 kV Vinkovci 1, TS 35/10 kV Vinkovci 2 i TS 35/10 kV Vinkovci 5 su bili povezani u HEP LAN/WAN mrežu putem svjetlovodnih podzemnih kabela. Modernizacijom komunikacijske infrastrukture uvelo se postrojenje TS 35/10 kV Vinkovci 3 u svjetlovodnu infrastrukturu Elektre Vinkovci. Ovo postrojenje je bilo jedino postrojenje na području grada Vinkovaca koje nije bilo povezano svjetlovodnom infrastrukturom s ostalim postrojenjima. Zbog toga su se izgradile dodatne komunikacijske svjetlovodne veze, čiji detalji su dani u Tablica .

Tablica II. Prikaz podataka novo položenih komunikacijskih kabela

Trasa	Vrsta optičkog kabela	Tip optičkog kabela	Dužina trase
TS 110/35/10 kV Vinkovci 1 TS 35/10 kV Vinkovci 3	Podzemni svjetlovodni kabel	SM48 (ITU-T G.652) 48 niti	5200 m
TS 35/10 kV Vinkovci 5 TS 35/10 kV Vinkovci 3	Podzemni svjetlovodni kabel	SM48 (ITU-T G.652) 48 niti	4600 m

Dodavanjem kabela prema Tablica II., stekli su se uvjeti za šticeenje energetskih kabela između TS Vinkovci 1 – TS Vinkovci 3, odnosno TS Vinkovci 3 – TS Vinkovci 5. Također, iako stanice TS Vinkovci 2 i TS Vinkovci 3 nisu izravno povezane komunikacijskom vezom, koristeći komunikacijsku vezu TS Vinkovci 2 – TS Vinkovci 1 – TS Vinkovci 3 stekli su se uvjeti za šticeenje kabela KB 35 kV Vinkovci 2 – Vinkovci 3 diferencijalnom zaštitom.

3. PROCJENA KORISTI UVOĐENJA UZDUŽNE DIFERENCIJALNE ZAŠTITE

Kako s tehničkog, tako i s ekonomskog stajališta, nemoguće je osigurati stalno napajanje električnom energijom, ali je potrebno kupcu osigurati zadovoljavajuću razinu pouzdanosti napajanja. Pouzdanost napajanja odnosi se na sposobnost elektroenergetskog sustava za pružanje stalne opskrbe kupaca sukladno zahtjevima, uzimajući u obzir planirane i prisilne zastoje jedinica mreže.

Pouzdanost napajanja se implicira na sve kategorije kupaca na razne načine. Za velike industrijske kupce i kupce iz kategorije poduzetništvo, čak i kratkotrajni prekidi mogu dovesti do velikih financijskih gubitaka, dok za kućanstva prekidi prvenstveno predstavljaju nemogućnost korištenja električnih uređaja, bez kojih je nezamisliv život suvremenog čovjeka.

Prekidi u opskrbi električnom energijom kupaca ovise o pouzdanosti cjelokupnog sustava, sastavljenog od proizvodnih postrojenja, prijenosne mreže i distribucijske mreže. S gledišta kupca, prekidi napajanja električnom energijom najbolje su opisani brojem prekida u jedinici vremena, kao i njihovim ukupnim trajanjem.

Pouzdanost napajanja je određena brojem i trajanjem prekida napajanja u jedinici vremena, najčešće jednoj godini. Sukladno propisima, HEP-Operator distribucijskog sustava d.o.o. je uspostavio sustav praćenja okazatelja pouzdanosti napajanja, za prekide napajanja dulje od tri minute.

Kako bi se sagledale koristi koje će se postići realizacijom sustava uzdužne diferencijalne zaštite u mreži 35 kV grada Vinkovaca, analizirana u kvarovi u kabelskoj mreži 35 kV na području grada Vinkovci zabilježeni u sustavu DISPO za promatranu SN mrežu. U sustavu DISPO zabilježeni su samo događaji koji su trajali dulje od 3 min i koji su za posljedicu imali prekid opskrbe potrošača, a analizirao se period 10 godina prije ugradnje.

Sustav DISPO (DISTRibucijska POuzdanost) je specijalistički računalni program namijenjen praćenju i analizi kvalitete opskrbe kupaca električnom energijom. Sustav DISPO bilježi i energiju koja nije isporučena potrošačima uslijed kvarova u 35 kV Mreži grada Vinkovaca. Prema tablici kvarova ta energija kreće se od 432 kWh do maksimalnih 11223 kWh.

Slično kao i kod pokazatelja pouzdanosti, za ocjenu gubitaka najbolje je promatrati srednju vrijednost neisporučene energije za sve kvarove u promatranom razdoblju.

Prema podacima dostupnim u bazi podataka DISPO, Elektra Vinkovci svojim kupcima neisporučio prosječno godišnje 3664 kWh zbog ispada vodova prouzročenih kvarovima u mreži 35 kV grada Vinkovaca. Iako se zbog poboljšanja reakcije na kvarove uvođenjem sustava daljinskog vođenja ne čini da se radi o velikim iznosima, treba napomenuti da strukturu potrošača dobrim dijelom čine gospodarski subjekti koji zbog prekida u napajanju trpe dodatne gubitke.

Kvarovi na predmetnom postrojenju značajno su doprinikli statističkim pokazateljima pouzdanosti napajanja. Iako je uvođenjem sustava daljinskog vođenja trajanje beznaponskih pauza u napajanju potrošača svedeno na 10-ak minuta, još uvijek se radi značajnim veličinama.

Broj potrošača koji je zahvaćenih prekidima isporuke ovisno o uklopnom stanju mreže u trenutku kvara kretao se do maksimalnih 24189 potrošača, što čini gotovo trećinu ukupnog broja potrošača Elektro Vinkovci.

4. ISKUSTVA U POGONU SREDNJE NAPONSKE MREŽE

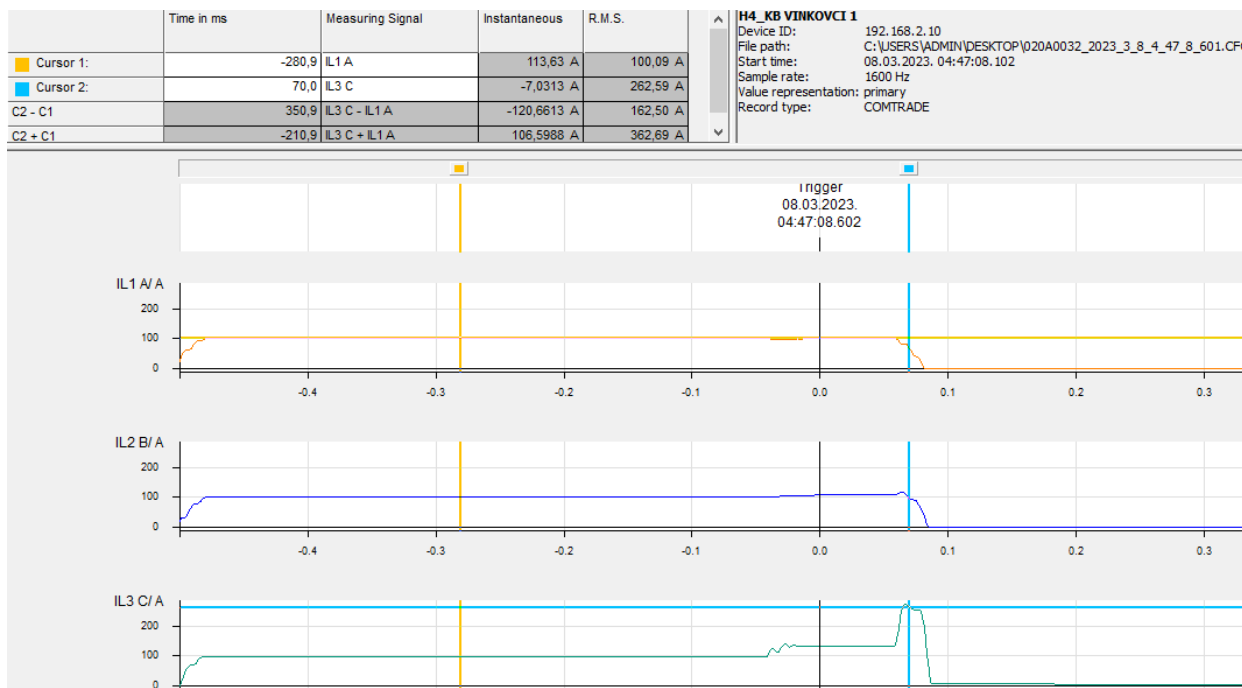
Projekt uvođenja uzdužne diferencijalne zaštite u SN mrežu grada Vinkovaca realiziran je tijekom 2021. godine. Ugrađena je, ispitana i puštena u pogon sva predviđena oprema, a SN mreža prešla je iz radijalnog u prstenasti način rada.

U periodu nakon uvođenja u pogon uzdužne diferencijalne zaštite Elektra Vinkovci paralelno je ulagala i u zamjenu energetskih kabela. U cijeloj dužini trase zamijenjeni su energetski kabeli KB 35 kV Vinkovci 1 – Vinkovci 3 i KB 35 kV Vinkovci 3 – Vinkovci 5.

Za vrijeme pogona, u periodu od 2022. do 2024. godine, osim redovnih ispitivanja zabilježene su 4 prorade zaštite. U dva navrata kvarovi na kabelima uzrokovani su vanjskim utjecajima, zemljanim radovima trećih lica, u kojim slučajevima je registrirano pravilno djelovanje diferencijalne zaštite, odnosno trenutna obostrana isključivanja oštećene kabeleske dionice. Obzirom na prstenasti pogon 35 kV mreže, korisnici nisu osjetili predmetne prorade zaštite te oni nisu imali utjecaja na povećanje pokazatelja pouzdanosti. Primjer snimke poremećaja prvog navedenog kvara prikazan je na slici 2, uz napomenu da terminali polja za uzdužnu diferencijalnu zaštitu u tom trenutku nisu imali vremensku sinkronizaciju sa procesnom mrežom pa vrijeme sa snimke kvara ne odgovara stvarnom vremenu.

Jedan kvar uzrokovao je proboj izolacije na starom kabelu s uljnom izolacijom KB 35 kV Vinkovci 2 – Vinkovci 3. I u ovom slučaju zaštita je djelovala prema očekivanju te nisu zabilježeni zastoji kod korisnika mreže.

Na slici 2. prikazan je zapis poremećaja kod prorade Uzdužne diferencijalne zaštite zbog kvara na energetskom kabelu.



Slika 2 - Zapis poremećaja kod prorade Uzdužne diferencijalne zaštite zbog kvara na energetskom kabelu

Četvrta prorada dogodila se u neredovnom uklopnom stanju nakon redovnog godišnjeg održavanja u TS 35/10 kV Vinkovci 3. Pri ulasku energetskih transformatora nazivne snage 8 MVA u paralelu, struja magnetiziranja uzrokovala je proradu diferencijalne zaštite KB 35 kV Vinkovci 1 – Vinkovci 3. Budući da u trenutku prorade na TS 35/10 kV Vinkovci 3 nije bilo priključenih korisnika mreže, niti ovaj kvar nije imao negativnog utjecaja na pokazatelje pouzdanosti napajanja korisnika mreže.

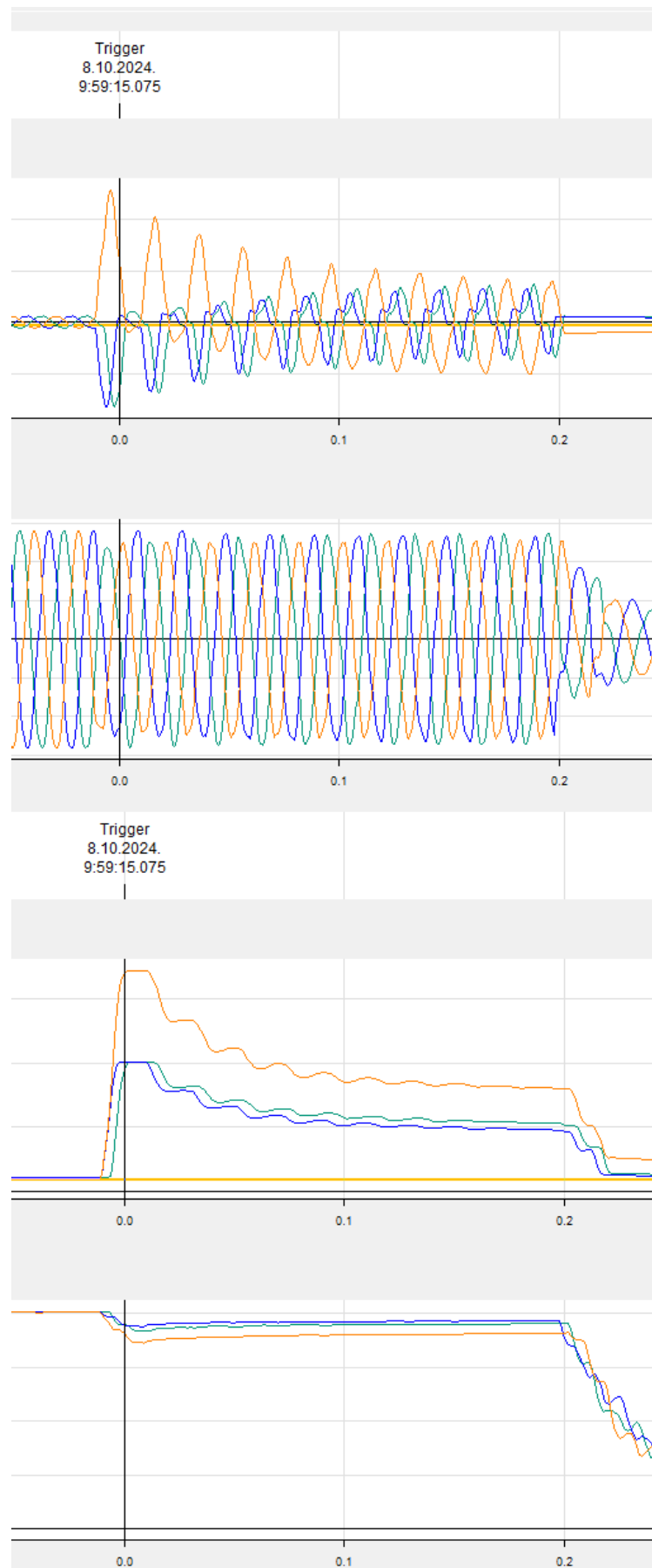
Valja napomenuti kako su transformatori prije spomenutog događaja već bili radili u paraleli te su tijekom ispitivanja izvedene razne kombinacije uklopnih stanja i ulazaka u paralelu. Analizom oscilografskog zapisa poremećaja utvrdilo se da se radi o specifičnoj pojavi produljenog stanja magnetizacije transformatora, odnosno radi se o takozvanom *sympathetic inrush* fenomenu.

Analiza zapisa poremećaja pokazala je vrlo velik udio DC komponente u struji te visok udio drugog harmonika. Isklop se dogodio 158 ms nakon energizacije drugog transformatora, a nakon pada komponente drugog harmonika ispod blokadnog praga koji je iznosio 20%. Minimalna podesiva vrijednost blokadnog praga drugog harmonika iznosi 10%. Analizom struje nakon izdavanja isklupne komande zaključilo se kako izmjena praga na 10% kao jedina izmjena s ciljem povećanja stabilnosti neće biti dostatna te se je pristupilo izmjeni podešenja praga diferencijalne zaštite.

Budući da je neutralna točka predmetne SN uzemljena preko otpornika za ograničenje radne komponente struje jednopolnog kvara na 300 A, prag diferencijalne zaštite od 30% (uz SMT prijenosnog omjera 300/1 A) će detektirati i jednopolne kvarove sa strujom iznad 90 A. Prag od 90 A procijenjen je dostatnim kako bi diferencijalna zaštita ostala stabilna tijekom tranzijenata poput promatrnog.

Slijedom analize, na oba kraja vodova prag za blokadu diferencijalne zaštite detekcijom drugog harmonika smanjena je na 10% te je prag prorade diferencijalne zaštite podignut na 30%.

Prikaz zapisa poremećaja kod opisanog kvara dan je na slici 3.



Slika 3 - Zapis poremećaja kod prorade Uzdužne diferencijalne zaštite zbog harmoničkih izobličenja

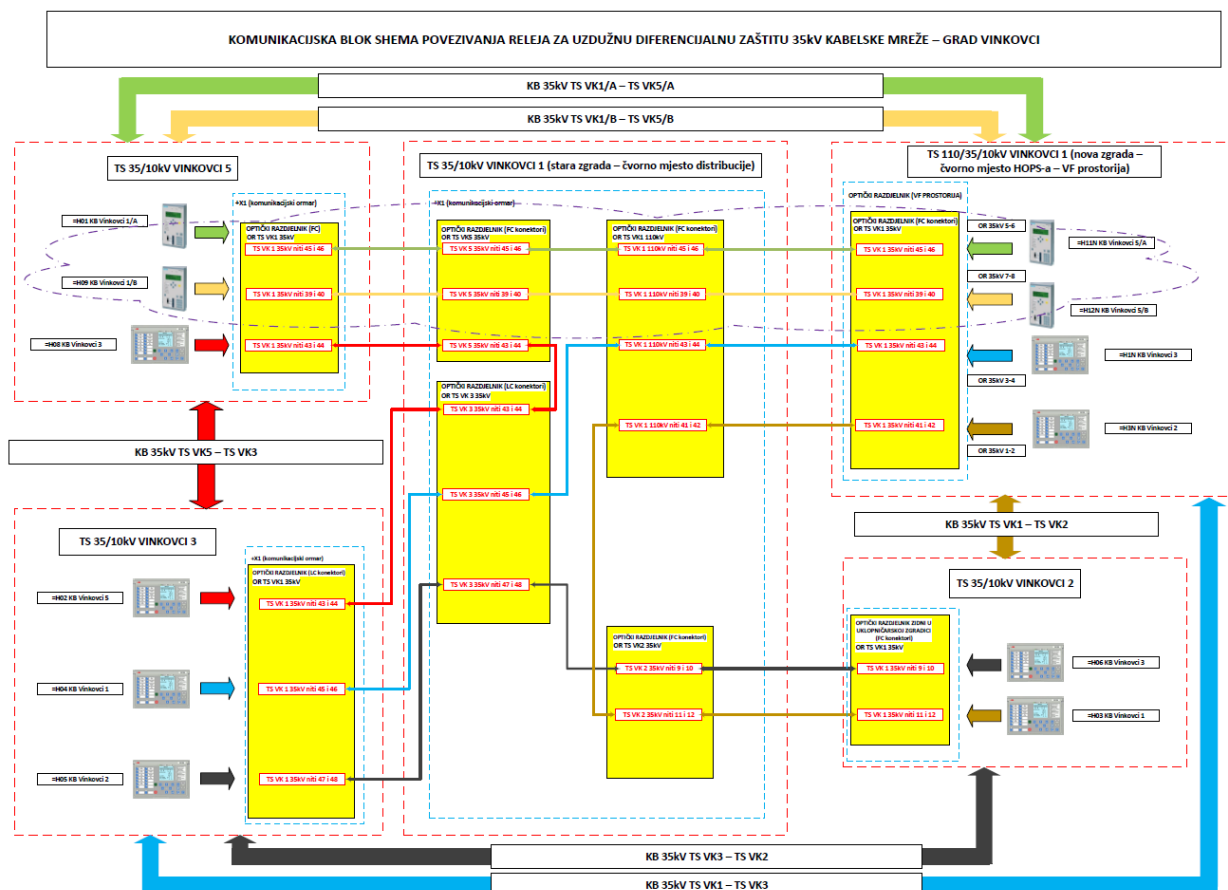
5. ISKUSTVA U POGONU I ODRŽAVANJU SVJETLOVODNIH VEZA

Svjetlovodi su neosjetljivi na elektromagnetsku interferenciju (EMI) i radio-frekvencijsku interferenciju (RFI). Utjecaj svjetlosne interferencije i interferencije zbog visokog napona je također eliminirana, pa su pogodni na mjestima gdje se javljaju smetnje zbog naponskih udara i smetnje generirane zbog elektrostatskog pražnjenja.

Komunikacijska infrastruktura na području HEP - ODS d.o.o. Elektra Vinkovci temeljena je na korištenju svjetlovodnih kabela jednomodnog tipa (eng Single Mode Fiber). Jednomodni optički kabel posjeduje jezgru debljine do 10 mikro metara. Prema ITU-T G.652 standardu promjer jezgre korištenih prespojnih kabela je 9 μm , dok je ukupni promjer s izolacijom 125 μm . Jednomodni optički kabeli koriste lasere kao izvor svjetlosti koji rade na 1310 nm i 1550 nm valne duljine. Jednomodni optički kabel je optimiziran za valnu duljinu od 1310 nm i na njoj ima nultu disperziju, a može raditi i na valnoj duljini od 1550 nm. Danas je postignuto prigušenje od 0,3 – 0,4 dB/km na 1310 nm i 0,17 – 0,25 dB/km na 1550 nm [1].

Jednomodni optički kabel nema višemodnu disperziju svjetlosti što rezultira širim prijenosnim pojasom od višemodnih niti. To svojstvo omogućuje svjetlosnom valu da se širi pravocrtno bez refleksije, pa je njezina udaljenost širenja vrlo velika, stoga se jednomodni optički kabel koristi za velike udaljenosti. Brzine prijenosa podataka na jednomodnom optičkom kabelu kreću se od 100 Mbit/sek do 1 Gbit/sek na udaljenostima većim od 5 km, što je vrlo brza komunikacija potrebna za brze odzive numeričkih releja uzdužne diferencijalne zaštite, gdje je potrebno da medij bude pouzdan i da omogući prijenos informacije u vrlo kratkom vremenu (milisekundi).

Na slici 4. prikazana je blok shema komunikacijskog povezivanja numeričkih releja za uzdužnu diferencijalnu zaštitu 35kV kabelske mreže grada Vinkovaca.



Slika 4. – komunikacijska blok shema povezivanja releja uzdužne diferencijalne zaštite

Unutar trafostanica korišteni su jednomodni prespojni optički kabeli za spajanje svakog numeričkog releja na svjetlovodnu infrastrukturu, tipa konektora LC-FC. Na pojedinim trafostanicama TS Vinkovci 1 i TS Vinkovci 2 tijekom početnog korištenja svjetlovodnih komunikacijskih veza susreli smo se s problemom učestalih mehaničkih kvarova na prespojnima optičkim kabelima unutar postrojenja uzrokovanih djelovanjem glodavaca, iako su svi prespojni optički kabeli bili zaštićeni fleksi cijevima. Kako bi prevladali probleme učestalih mehaničkih kvarova u navedenim postrojenjima pribjeglo se proširenju optičke mreže unutar zgrada postrojenja ugradnjom ormarića s optičkim razdjelnicima blizu ćelija vodnih polja na kojima se nalazi numerička relejna zaštita. Prespojni optički kabeli su se umjesto fleksi zaštitili kaoflex cijevima koje su se dodatno zabrtvile na uvodnicama u vodnim poljima i ormarićima optičkih razdjelnika. Na taj način su smanjene dužine prespojnih optičkih kabela u postrojenjima, a i ograničila su se mjesta potencijalnih mehaničkih kvarova.

6. ZAKLJUČAK

Analizom pogonskih događaja nedvojbeno je utvrđeno da uvođenje uzdužne diferencijalne zaštite i prstenastog pogona srednjenaponske mreže ima pozitivan utjecaj na pouzdanost napajanja i na opće zadovoljstvo korisnika mreže, a time i na pokazatelje pouzdanosti. Utjecaj na pokazatelje pouzdanosti zbog kratkog vremena promatranja od tri godine nije moguće jednoznačno matematički iskazati bez procjena broja zahvaćenih korisnika mreže i trajanja kvara

7. LITERATURA

[1] ITU-T G.652 SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS, Characteristics of a single – mode optical fibre and cable (11/2009)