

DOI: [10.46793/CIGRE37.B5.16](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B5.16)**B5.16****PILOT PROJEKAT PRVE IMPLEMENTACIJE OPTIČKIH STRUJNIH
TRANSFORMATORA NA VISOKOM NAPONU****PILOT PROJECT OF THE FIRST IMPLEMENTATION OF OPTICAL CURRENT
TRANSFORMERS AT HIGH VOLTAGE****Željko Petrović, Željko Ivetić, Desimir Trijić***

Kratak sadržaj: Početkom aprila 2024. u EMS, a time i u celom EES Srbije, prvi put u pogon su pušteni optički strujni transformatori na naponskom nivou 110 kV u postrojenju koje je vazduhom izolovano. Primena i razvoj savremenih tehnologija u elektroenergetici poslednjih godina, pored ostalog, posebnu pažnju poklanja razvoju potpuno novih tipova mernih transformatora, koji rade na drugačijim principa u odnosu na konvencionalne transformatore koji su bazirani na elektromagnetnoj indukciji. Nove tehnologije pružaju dosta unapređenja u pogledu performansi, ali sa druge strane nose i dosta izazova i zahteva na koje je potrebno obratiti pažnju. Prednosti optičkih strujnih transformatora se ogledaju pre svega u boljoj tačnosti, linearnosti karakteristike - efekat zasićenja jezgra je u potpunosti izbegnut, dosta manjoj masi i količini upotrebljenog materija (nije potrebno magnetno jezgro, bakar za sekundarne namotaje, uljna izolacija i drugo) i smanjena potreba za održavanjem. S druge strane optički strujni transformatori zahtevaju sprežne uređaje koji umesto analognih signala daju takozvani *sampled values stream* (SV), odnosno digitalni format merne veličine. Kako bi se SV koristili u staničnoj automatici neophodno je razviti odgovarajući interfejs - *process bus*, odnosno, u krajnjoj instanci realizaciju digitalne trafostanice. Ovaj rad predstavlja integraciju nove tehnologije, odnosno optičkih strujnih sa stanovišta praktične implementacije IEC 61850 -9-2 standarda u realnim uslovima. U radu je prikazana arhitektura sistema, iskustva stečena tokom implementacije, analiza rezultata dobijenih u pogonskim uslovima, kao i prednosti i izazove primene ovog koncepta.

Ključne reči: *optički strujni, process bus, PTP, PRP, HSR*

Abstract: In early April 2024, optical current transformers at the 110 kV voltage level were commissioned for the first time in EMS, and consequently in the entire Serbian power system (EES), within an air-insulated substation. The advancement of modern technologies in the power sector in recent years has led to a strong focus on developing entirely new types of measuring transformers that operate on principles different from those of conventional transformers, which rely on electromagnetic induction.

*Željko Petrović, EMS AD, zeljko.petrovic@ems.rs

Željko Ivetić, EMS AD, zeljko.ivetic@ems.rs

Desimir Trijić, EMS, desimir.trijic@ems.rs

New technologies offer significant performance improvements but also introduce numerous challenges and requirements that need to be addressed. The advantages of optical current transformers primarily include higher accuracy, linearity of characteristics (eliminating the core saturation effect), significantly lower weight and material usage (no need for a magnetic core, copper for secondary windings, oil insulation, etc.), and reduced maintenance requirements. On the other hand, optical current transformers require coupling devices that, instead of analog signals, provide a so-called sampled values stream (SV), i.e., a digital format of the measured quantity. To utilize SV in substation automation, it is necessary to develop an appropriate interface - a process bus - and ultimately implement a digital substation. This paper presents the integration of new technology - optical current transformers - from the perspective of the practical implementation of the IEC 61850-9-2 standard in real conditions. The paper describes the system architecture, experiences gained during implementation, an analysis of results obtained under operational conditions, as well as the advantages and challenges of applying this concept.

Key words: *optical current transformer, process bus, PTP, PRP, HSR*

1 UVOD

Realizacija pilot projekta implementacije optičkih strujnih transformatora u EMS AD je počela nakon što je potpisan ugovor o poslovno-tehničkoj saradnji sa eksternim partnerima. Na osnovu ugovora putem donacije predviđena je isporuka 3 optička strujna transformatora naponskog nivoa 120 kV i prateće opreme. Pošto se radilo o novim tehnologijama, stručne službe EMS su pristupile razradi konceptualnih i idejnih rešenja sve u cilju realizacije projekta odnosno ugradnje i puštanja u pogon. Održano je i više sastanaka sa eksternim partnerom gde su detaljnije precizirana tehnička rešenja.

Nakon pripremne faze, stručne službe EMS su zaključile da je izvodljiva realizacija projekta i pristupile su samom izvođenju. Za razliku od klasičnih strujnih mernih transformatora kod kojih se sekundarna jezgra direktno vode na posebne ulaze kod zaštitnih, upravljačkih i mernih uređaja, optički strujni zahtevaju poseban interfejs koji se sastoji od sprežnih modula odnosno uređaja i posebne LAN mreže kako bi se omogućilo da se digitalizovani merni signal prosledi do zaštitnih, upravljačkih i mernih uređaja. Standard IEC 61850 9-2 [3] definiše način primene digitalizovanih mernih signala (*sampled values*) SV u *process bus* (posebna LAN mreža) što je i primenjeno u ovom projektu. Takođe prikazano je konceptualno rešenje i arhitektura LAN mreže.

2 IZBOR OPREME I IMPLEMENTACIJA SISTEMA

Realizacija projekta je tekla kroz više faza:

- Nabavka opreme koja uključuje 3 optička strujna transformatora naponskog nivoa 120 kV, tip TOCT 123 sprežni uređaj - *merging unit* za optičke merne transformatore (IO 245 / 6MU85) i optički kabl za povezivanje.
- Kao mesto za ugradnju izabrano je DVP E09 (DV 129B/2 pravac TS Beograd 20) u TS 220/110kV Beograd 3. EMS je pristupila izradi potrebne projektno-tehničke dokumentacije, razradi i osmišljavanju koncepcije, nabavci nedostajuće opreme i ugovaranju radova za ugradnju.

- Radovi na ugradnji opreme su završeni početkom aprila 2024. nakon čega je uz nadzor i konsultacije sa proizvođačem opreme izvršen uspešan interni tehnički pregled i nova oprema puštena u probni rad 11.04.2024.g.

U sledećoj tabeli prikazani su podaci sa nazivne pločice optičkih strujnih transformatora (OCT).

Tabela 1: Tehničke karakteristike OCT sa natpisne pločice

TOCT 123	123/230/550 kV	50Hz	IEC 61896-6 IEC 61869-8	
Icth 1.2xIn	Ith 31,5 kA/1s	Idyn 80kA	Temperatura -25 ⁰ -+40 ⁰	
Oznake priključka	Nazivna struja In		jezgro	
P1- P2	600 A	IEC 61850 digitalni protokol	Cl. 0,2s	1-2
	600 A	IEC 61850 digitalni protokol	Cl. 5TPE	3-4

OCT poseduje dva jezgra - jedno namenjeno za merenje i jedno za zaštitu i koriste Faradejev efekat (optički magnetni efekat) za merenje električne struje. Osnovni principa rada je sledeći:

2.1 Faradejev efekat

Kada linearno polarizovana svetlost prolazi kroz optički medij koji je izložen magnetnom polju, dolazi do rotacije ravni polarizacije svetlosti. Ugao rotacije ravni polarizacije je proporcionalan magnetnoj indukciji polja, a samim tim i struji koja stvara to magnetno polje.

Ugao rotacije ravni polarizacije svetlosti (θ) dat je jednačinom:

$$\theta = V \cdot B \cdot L \quad (1)$$

Gde je:

- θ je ugao rotacije ravni polarizacije (u radijanima ili stepenima).
- V je Verdetova konstanta (specifična za optički medij, izražena u radijanima po tesla metru [rad/(T·m)]).
- B je magnetna indukcija [T].
- L je dužina puta svetlosti kroz optički medij [m].

2.2 Struktura OCT i merenje struje

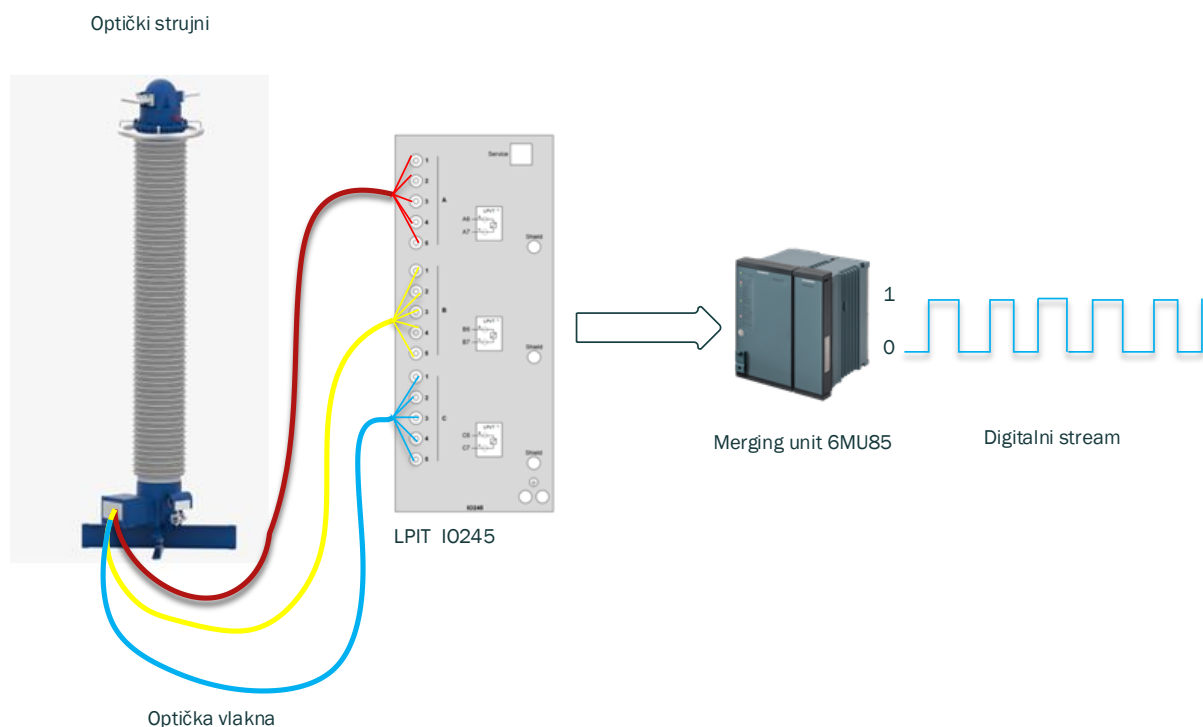
Optički senzor postavljen je oko provodnika kroz koji teče struja. Struja koja teče kroz provodnik stvara magnetno polje oko njega. Ovo magnetno polje uzrokuje rotaciju ravni polarizacije svetlosti (Faradajev efekat).

Svetlost se polarizuje (postaje linearno polarizovana) pre nego što uđe u senzor. Nakon prolaska kroz senzor, svetlost dolazi do detektora koji meri promenu u polarizaciji. Detektor meri ugao rotacije ravni polarizacije, koji je direktno proporcionalan jačini struje. Na osnovu ovog ugla, OCT izračunava vrednost struje.

Konkretni sistem se sastoji od pasivnog dela koji uključuje visokonaponski deo, odnosno optičku glavu sa senzorom, sam visokonaponski izolator, priključnu kutiju i optička vlakna i aktivnog dela koji čini posebni modul IO245 u kome se vrši obrada signala (laserski izvor, polarizator i detektor).

Unutrašnjost samog OCT je napunjena azotom (N₂) koji se koristi kao medij za punjenje. Ovaj medij koji se drži pod blagim natpritiskom unutar OCT pomaže da se spreči ulazak vlage i prljavštine. Međutim, električna i izolaciona svojstva se zadržavaju čak i u slučaju gubitka pritiska [1].

Modul IO245 je univerzalni interfejs za takozvane *low power instrument transformer* LPIT i zahteva da se ugradi u uređaj SIPROTEC 5 tipa 6MU85 u kome se merni signal pretvara u *sampled values stream* SV u skladu sa standardom IEC 61850 9-2, odnosno digitalizuje se merni signal koji se dobija od OCT. Sam IO245 modul poseduje nekoliko setova optičkih ulaznih kanala, odnosno tri za merenje i tri za zaštitu i kanala za temperaturnu kompenzaciju. Veza između priključne kutije OCT i IO245 modula je ostvarena optičkim kablovima koji su isporučeni od strane proizvođača zajedno sa ostalom opremom.



Slika 1: Principski blok dijagram optičkog strujnog i prateće opreme

Sampled Values (SV) su digitalni signali koji predstavljaju uzorke (*samples*) analognih veličina (npr. struja i napon) sa određenom frekvencijom uzorkovanja. Ovi podaci se prenose putem *Ethernet* komunikacione mreže i koriste se za zaštitu, upravljanje i nadzor u elektroenergetskim sistemima. Prema standardu IEC 61850-9-2 date su mogućnosti različitih načina konfiguracije SV kao što je izbor data set-a (sadržaj podataka) i učestanosti odabiranja, odnosno različitih profila što može dovesti do problema u praktičnoj implementaciji.

Kako bi se olakšale prve implementacije, Internacionalna korisnička grupa UCAIug je objavila uputstvo sa oznakom “9-2 Light Edition (“9-2LE”). Ovo uputstvo određuje više profila koji su namenjeni za zaštitne aplikacije i kvalitet električne energije. Specifično 9-2 LE određuje fiksni data set koji se sastoji od 4 napona i 4 struje sa definisanom učestanošću odabiranja od 80 odbiraka po periodu za zaštitu, odnosno 256 za kvalitet električne energije. Na ovaj način omogućava se interoperabilnost između servera koji emituju ove podatke i njihovih pretplatnika. U skorije vreme su definisani novi profili u delu 9 standarda IEC 61869 standard za merne transformatore „*Digital interface for instrument transformers*”. Specifikacija 9-2LE je normativni deo pomenutog standarda [2]. Poslednjih godina proizvođači opreme sve više podržavaju fleksibilno konfigurisanje SV atributa.

Defined Dataset	Defined sampling rate		
▸ 4 Voltages (3 Phases, 1 Neutral) ▸ 4 Currents (3 Phases, 1 Neutral) ... or: configurable (IEC 61869-9)			
IEC 61850-9-2LE			
	Sampling Frequency	Samples per Packet	Packet Frequency
	4000Hz (80SPC @50Hz)	1	4000Hz
	4800Hz (80SPC @60Hz)	1	4800Hz
	12800Hz (256SPC @50Hz)	8	1600Hz
	15360Hz (256SPC @60Hz)	8	1920Hz
IEC 61869-9			
	4800Hz	2	2400Hz
	14400Hz	6	2400Hz

Slika 1: Prikaz profila SV prema IEC 61869

Kako bi se SV mogli koristiti sa različitim IED uređajima neophodna je vremenska sinhronizacija visoke preciznosti. Odstupanje u opsegu milisekundi nije prihvatljivo. Primeri za takve primene su diferencijalna zaštita ili funkcije provere sinhronizacije, gde se IED pretplaćuje na SV iz različitih MU. Ovaj zahtev se može ispuniti implementacijom vremenske sinhronizacije preko namenske hardverske infrastrukture ili korišćenjem postojeće *Ethernet* mreže. Jedno od rešenja za visoko preciznu vremensku sinhronizaciju preko *Etherneta* je PTP (*Precision Time Protocol*) definisan u standardu IEEE 1588. Ovaj protokol koristi postojeću procesnu mrežu i ne treba mu paralelna hardverska infrastruktura. Međutim, za korektno funkcionisanje PTP protokola, neophodno je da komunikacioni uređaji podržavaju njegovu distribuciju („transparentni“ svičevi) i prihvata (IED uređaji). Dostiže tačnost u opsegu od 100 ns do 1 μ s.

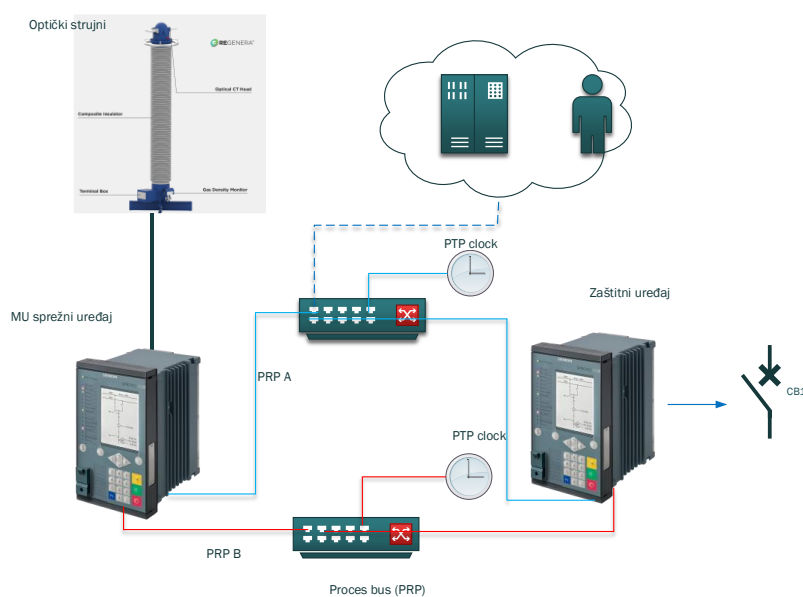
Kada je MU vremenski sinhronizovan i konfigurisan odgovarajući data set za SV, neophodna je odgovarajuća infrastruktura kako bi se podaci koji se emituju (*publishing*) preneli do prijemne strane (*subscribing*). Infrastruktura u suštini predstavlja LAN mrežu koja se, pošto se prenose informacije bitne za sam proces, naziva i *process bus*. U praksi se primenjuju različite mrežne topologije ali ono što je osnovni zahtev je da se omogući visoka pouzdanost, odnosno da se u slučaju kvara ili neraspoloživosti nekog elementa mreže omogući rad bez prekida. Gubitak paketa SV može voditi do blokiranja određenih funkcija što može biti opasno u nekim kritičnim situacijama. Kako bi se ovi zahtevi omogućili koriste se posebni protokoli koji omogućavaju zahtevanu redundansu PRP *Parallel Redundancy Protocol* i HSR *High-Availability Seamless Redundancy*. Ovi protokoli su definisani u IEC 62439 [4].

PRP funkcioniše tako što šalje iste podatke kroz dve nezavisne mreže istovremeno. Ove dve mreže se nazivaju LAN A i LAN B.

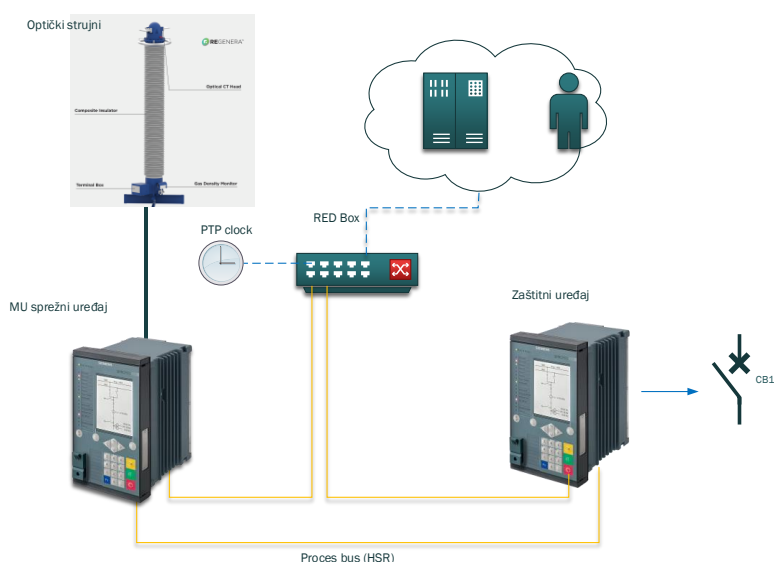
Uređaj koji prosleđuje paket šalje duplikat podataka na obe mreže, dok prijemni uređaj prima podatke sa obe mreže i koristi prvi pristigli paket, dok drugi paket odbacuje. Ovaj pristup obezbeđuje da se komunikacija nastavi čak i ako jedna od mreža otkáže.

HSR funkcioniše tako što šalje duplikat podataka kroz dve putanje u istoj mreži. Svaki uređaj u HSR mreži ima dva porta (A i B), a podaci se šalju u oba smera (u krug). Kada podaci stignu do odredišta, primalac koristi prvi pristigli paket, a drugi paket odbacuje. Ovaj pristup obezbeđuje da se komunikacija nastavi čak i ako jedna putanja otkáže.

Za konkretni slučaj koji bi uključivao MU i jedan zaštitni uređaj principska šema PRP i HSR je data na sledećim slikama.



Slika 2: Principska blok šema PRP



Slika 3: Principska blok šema HSR

PRP praktično ima dve nezavisne mreže i zahteva više hardvera (svičeva). Takođe, svičevi moraju da podržavaju PTP (*transparent*).

HSR ima petljastu strukturu i u principu ne zahteva posebne svičeve. Međutim, ukoliko je potrebno u mrežu uključiti uređaje koji ne podržavaju HSR potrebno je koristiti posebne uređaje Redundant Box (RedBox). HSR se uglavnom koristi u manjim i jednostavnijim mrežama.

3 KONCEPTUALNO REŠENJE

Stručne službe EMS su nakon više sastanaka sa proizvođačem opreme, projektantima i izvođačima razradile i usvojile konceptualno rešenje za praktičnu implementaciju projekta koje se sastojalo od samog OCT, pripadajućeg MU (A203) i jednog zaštitnog uređaja (F303). Zamišljeno je da MU prosleđuje SV do zaštitnog uređaja u kome su aktivirane odgovarajuće zaštitne, kontrolne i merne funkcije. Da bi se omogućila provera pouzdanosti, raspoloživosti i tačnosti merenja sa OCT, iskorišćena je postojeća funkcionalnost MU uređaja i zaštitnog uređaja da mogu da prime i analogne signale sa klasičnih strujnih i naponskih transformatora. Na taj način i u MU i zaštitnom uređaju se imaju iste merne veličine koje se dobijaju sa različitih izvora, odnosno OCT i klasičnih mernih transformatora.

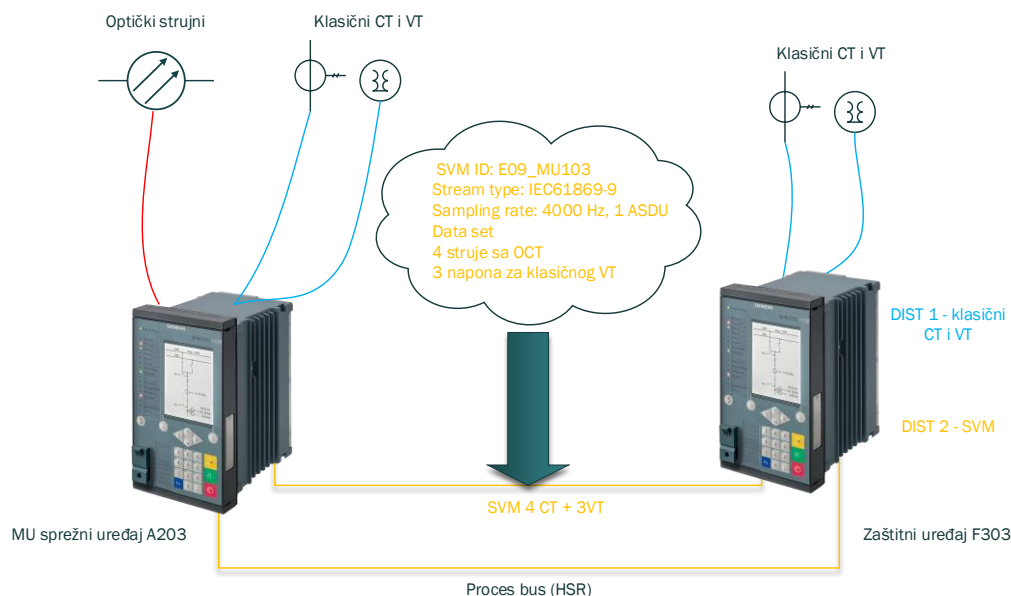
Pošto se sistem sastoji od dva uređaja izabran je redundantni HSR protokol jer zahteva manju količinu komunikacione opreme (*ethernet* svičeva) i u konkretnom slučaju je lakši za implementaciju. U MU uređaju konfigurisan je data set za SV koji sadrži četiri strujna merenja od OCT i tri naponska merenja od analognih naponskih ulaza. U zaštitnom uređaju F303 konfigurisane su dve višestepene distantne zaštitne funkcije sa istim parametrima podešenja kao i u postojećoj glavnoj zaštiti. U samom uređaju podešeno je da prva distantna funkcija uzima merenja sa klasičnih analognih mernih ulaza, dok druga distantna funkcija uzima merenja putem SV SVM ID: E09_MU103. Sve zaštitne i kontrolne funkcije u F303 uređaju koje primaju merenja od klasičnih mernih transformatora pripadaju funkcionalnoj grupi sa oznakom LINE 1 (podešenja u DIGSI 5 aplikaciji). S druge strane sve zaštitne i kontrolne funkcije u istom uređaju koje primaju merenja od SV pripadaju funkcionalnoj grupi sa oznakom LINE 2.

Stream type:	IEC 61869-9
Sampling-rate config.:	4000 Hz, 1 ASDU
SVM ID:	E09_MU103
MSVCB Name:	MSVCB03
Dataset name:	PhsMeas3
Sample mode:	samples per second
APPID:	16385
ConfRev:	80001
Direction IN:	IN = +310
SVM ID check:	on

Slika 4: Parametri za SV u MU

Kako bi sistem bio što jednostavniji za implementaciju u MU izabrana je mogućnost da mrežni modul ETH-BD ujedno bude i izvor vremenske sinhronizacije. U skladu sa IEEE 1588 izabrana je opcija *OC grandmaster-capable* sa Clock type *OCGD and P2P TC* i postavljen Profile na IEC 61850-9-3.

Na slici 6 prikazano je trenutno realizovano rešenje. Kako bi se omogućio pristup *process bus* potrebno je implementirati odgovarajući RedBox. Time bi se omogućio pristup uređaja koji ne podržavaju HSR protokol, kao na primer uređaji za testiranje i slično.



Slika 5: Principski blok dijagram realizovanog rešenja

4 PROCES PUŠTANJA U POGON I PRAĆENJE U RADU

Nakon što je izrađena sva neophodna projektno tehnička dokumentacija pristupilo se radovima na ugradnji opreme. Projektom je predviđeno da se optički strujni ugrade između izlaznih rastavljača i naponskih transformatora u polju E09. Za tu namenu izgrađeni su odgovarajući temelji i nosači OCT. Od strane proizvođača OCT dobijeni su optički kablovi za povezivanje priključnih kutija OCT i MU. U samom MU, u aplikativnom programu za podešavanje IO245 modula, potrebno je da se navedu tačne dužine svakoga kabla po fazi. Pored toga, unosi se nazivna struja od 600A kao i ID po fazi svakoga strujnog TOCT, odnosno production ID. Na osnovu ovog identifikacionog broja automatski se u aplikaciji prikazuju ID zaštitnih i mernih senzora za svaku fazu. Zamisao je da se na opisani način, odnosno unošenjem ID samih transformatora, iz online baze automatski povuku kalibracioni fajlovi (*sensor parametar data*) koji su pripremljeni od strane proizvođača za konkretan OCT. Zaštitni, sprežni uređaj i ostala oprema su ugrađeni u relejnoj kućici na posebnom zakretnom ramu u skladu sa raspoloživim prostorom.

Nakon što su završeni svi elektromontažni radovi pristupilo se prijemnim ispitivanjima i proverama. Finalna kalibracija OCT je urađena od strane predstavnika proizvođača. U sklopu predviđenih aktivnosti bilo je neophodno obezbediti primarno injektiranje. Za razliku od ispitivanja klasičnih strujnih transformatora gde se proverava prenosni odnos i polaritet jezgara, kod OCT polaritet jezgara se ne može neposredno ustanoviti. Stručne službe EMS su napravile privremenu vezu sva tri OCT na red nakon čega su simultano očitana merenja i fazni stavovi na osnovu čega je utvrđeno da sva sva tri OCT usmerena na isti način.



Slika 6: Optički strujni transformatori u polju E09 tokom ispitivanja

Nakon završetka svih predviđenih ispitivanja i provera, 11.04.2024. godine izvršeno je puštanje u pogon novougrađene opreme. Izvršena je verifikacija merenja struja sa OCT i klasičnog strujnog transformatora u MU i zaštitnom uređaju koja su pokazala da su merenja usaglašena. Proverena su operativna merenja svih zaštitnih i kontrolnih funkcija u uređajima. Pošto su sve provere i ispitivanja bila zadovoljavajuća, započet je probni rad pilot projekta.

Tokom probnog rada praćen je rad sistema sa posebnim osvrtnom na pouzdanost i raspoloživost merenja iz OCT. Na osnovu uvida u *Operational log* iz uređaja 6MU85 sa presekom od 25.02.2025 godine ustanovljeno je da nije bilo prekida u radu samog optičkog strujnog i IO245 modula. Uočen je zapis od 27.04.2024. u 7:28 kada je došlo do restarta uređaja 6MU85 koji je izazvao prekid slanja SV. Prekid slanja SV detektovao je zaštitni uređaj (signal *SV status SV.q.invalid*) i nakon 8ms došlo je do blokade svih aktivnih zaštitnih i kontrolnih funkcija u grupi Line 2 koja koristi SV.

Od puštanja do 25.02.2025. utvrđeno je da je zaštitni uređaj sačinio 21 zapis reagovanja neke od zaštitnih funkcije (*fault log*). U većini slučajeva su bile pobude distantnih, zemljospojnih ili prekostrujnih funkcija, dok je 02.06.2024. zabeleženo delovanje zaštite za kvar na samom vodu. Analizom tog zapisa ustanovljeno je da se kvar desio u 23:03, pri čemu je došlo do zemljospoja faze 0. Obe distantne funkcije u grupi Line 1 i Line 2 su u pogledu interne signalizacije reagovala na isti način. U samom *fault log*-u vremena reagovanja pobuda zona kao i isključenja zone Z1 su ista. Detaljnom analizom COMTRADE zapisa se pokazalo da je pobuda distantnih funkcija jednovremena, pritom je uočeno da je prorada zone 1 distantne funkcije Line 2 (od SV) sporija za 3.1 ms u odnosu na zonu 1 distantne funkcije u grupi Line 1 (od klasičnih strujnih).

Tokom kvara zabeležena je maksimalna struja od oko 12.3kA i izvršena je analiza merenja kako struja i napona (SV i klasičnih) tako i impedanse distantnih funkcija u grupi Line 1 i Line 2.

Tabela 1: Prikaz RMS merenja iz COMTRADE zapisa u trenutku 20ms od nastanka kvara

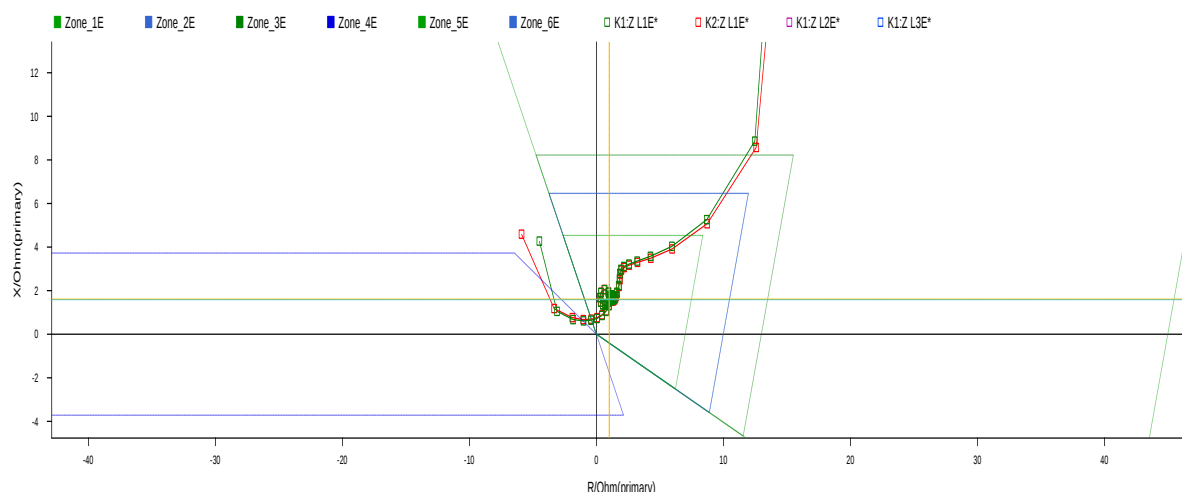
Measuring Signal	Fundamental /Sub-Harm.	Phase	Extremum	Razlika
K1:MPI3p1:I A	12.355 kA	-130.2°	-17.564 kA	0.06%
K2:MPI3p2:I A	12.362 kA	-130.0°	-17.546 kA	
K1:MPI3p1:I B	285.67 A	51.1°	354.40 A	-2.37%
K2:MPI3p2:I B	278.90 A	52.0°	342.94 A	
K1:MPI3p1:I C	203.27 A	-143.4°	-317.34 A	-0.62%
K2:MPI3p2:I C	202.00 A	-143.8°	-316.08 A	
K1:MPI3p1:IN	12.280 kA	49.4°	17.586 kA	0.00%
K2:MPI3p2:IN	12.280 kA	49.8°	17.524 kA	
K1:MPV3p1:V A	34.867 kV	-70.9°	-51.364 kV	-0.03%
K2:MPV3p2:V A	34.857 kV	-71.6°	-51.333 kV	
K1:MPV3p1:V B	62.379 kV	-177.1°	87.413 kV	0.02%
K2:MPV3p2:V B	62.390 kV	-177.9°	87.416 kV	
K1:MPV3p1:V C	62.431 kV	55.5°	87.792 kV	-0.06%
K2:MPV3p2:V C	62.396 kV	54.8°	87.768 kV	
K1:MPV1p1:V B	126.42 V	37.4°	178.28 V	

U tabeli 1 date su efektivne vrednosti merenja po svim konfigurisanim kanalima u zaštitnom uređaju. Instanca K1 se odnosi na Line 1 grupu, odnosno merenja od klasičnih mernih transformatora. Instanca K2 se odnosi na Line 2 grupu, odnosno prikaz merenja koji dolazi putem SV od MU i OCT. U koloni Razlika, data je procentualna vrednost razlike K2 u odnosu na K1 grupu signala. Vidi se da greška u fazi pogođenoj kvarom, (faza 0, odnosno IA) iznosi 0,06%, dok je razlika u uglu 0,2°. Najveća razlika je u fazi I B, odnosno -2,37% ili u apsolutnim vrednostima 6,77A.

Tabela 2: Prikaz merenja impedansi u određenom trenutku od nastanka kvara (primarne vrednosti)

	Time in ms	Measuring Signal	Fundamental /	Phase	Real	Imag
Cursor 1:	32.1	K1:Z L1E*	2.1341 Ohm	53.7°	1.2649 Ohm	1.7189 Ohm
Cursor 2:	32.1	K2:Z L1E*	2.1352 Ohm	52.7°	1.2941 Ohm	1.6984 Ohm
C2 - C1	0	K2:Z L1E* - K1:Z L1E*	0.0011 Ohm	-0.96°	0.0292 Ohm	-0.0205 Ohm

U tabeli 3 date su vrednosti imedanse na osnovu analize COMTRADE zapisa. Izabran je trenutak 32.1ms od nastanka kvara kada je trajektorija imedanse u zoni 1. Razlike u merenju impedansi u redu C2-C1 su u primarnim vrednostima. Vidi se da su razlike male, što se može potvrditi i prikazom trajektorije imedanse u RX ravni. U tabeli 3 prikazane su vrednosti lokatora kvara gde se vidi da je razlika očitavanja 0,1km.



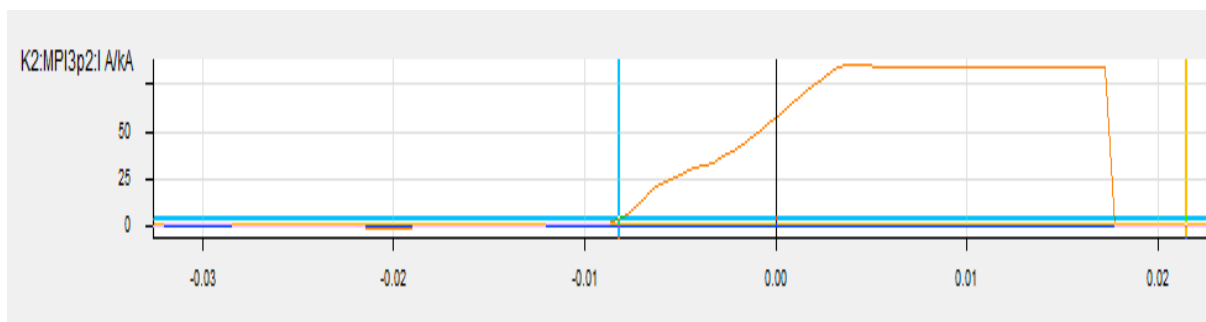
Slika 7: Prikaz trajektorija impedanse petlji kvara Z1E u RX dijagramu

Tabela 3: Očitavanje funkcija lokatora kvara

Line 1:Fault locator	Fault loop	AG
Line 1:Fault locator	Fault distance in %	31.7 %
Line 1:Fault locator	Fault distance	4.4 km
Line 1:Fault locator	Fault reactance sec.	0.944 Ω
Line 1:Fault locator	Fault resistance sec.	0.757 Ω
Line 1:Fault locator	Fault reactance prim.	1.730 Ω
Line 1:Fault locator	Fault resistance prim.	1.389 Ω
Line 2:Fault locator	Fault loop	AG
Line 2:Fault locator	Fault distance in %	31.3 %
Line 2:Fault locator	Fault distance	4.3 km
Line 2:Fault locator	Fault reactance sec.	0.933 Ω
Line 2:Fault locator	Fault resistance sec.	0.778 Ω
Line 2:Fault locator	Fault reactance prim.	1.711 Ω
Line 2:Fault locator	Fault resistance prim.	1.427 Ω

Probano je kako se ponaša sistem pri simulaciju prekida veze između OCT i sprežnog uređaja izvlačenjem optičkog vlakna iz *patch* panela. Analizom COMTRADE snimaka uočeno je da nakon prekida veze u predmetnoj fazi dolazi do naglog skoka vrednosti struje od preko 80kA koji traje oko 26ms. Sa naglim porastom struje u SV strimu dolazi i do promene q statusa. Prva promena q bita „SV. q out of range“ je na oko 13ms, a pojava bit „SV. q invalid“ na 31ms. Izvršeno je više simulacija prekida veze pri čemu se javljala pobuda zaštitnog uređaja, a u nekim slučajevima i prorada distantnih stepena.

Treba napomenuti da je uočeno ponašanje rada sistema naznačeno u uputstvima proizvođača, gde se navodi da je potrebno posebnu pažnju posvetiti upotrebi OCT kod jako brzih zaštitnih algoritama kao što su diferencijalna i distantna funkcija.



Slika 8. Prikaz strujnog signala u SV pri prekidu optičkog vlakna od OCT

5 ZAKLJUČAK

Opšti zaključak na osnovu dosadašnjeg probnog rada pilot projekta je da nisu uočeni problemi ili stanja koja ukazuju na smanjenu pouzdanost, raspoloživost i tačnost implementiranog sistema. Sprovedenom analizom zapisa u uređajima, snimača poremećaja i događaja uočena je korelacija u radu zaštitnih i kontrolnih funkcija koje obrađuju analogne signale sa klasičnih mernih transformatora i funkcija koje obrađuju analogne signale iz SV.

Tokom procesa puštanja u pogon bilo je neophodno prisustvo predstavnika proizvođača koji su izvršili konačna podešavanja sistema. Za to su korišćene posebne programske aplikacije. Stekao se utisak da sistem nije još u potpunosti „*user friendly*“. Veći procenat korišćenja OCT u realnim sistemima bi zahtevalo da tokom puštanja u pogon korisnik bude što manje zavisn od prisustva predstavnika proizvođača.

Implementirana arhitektura sistema treba da obezbedi lako proširenje sa novim uređajima kao i mogućnost ispitivanja, odnosno priključenja ispitne opreme za digitalne sisteme. Za priključenje ispitne opreme neophodno je prisustvo odgovarajućih interfejsa kao RedBox uređaja. Takođe planirano je da se u postojeći sistem ugradi i digitalno brojilo koje bi koristilo SV sa mernog jezgra OCT. S obzirom da sistem nije konfigurisan da deluje na isključenje prekidača to daje mogućnost za laku rekonfiguraciju sistema na primer promena arhitekture iz HSR u PRP. Time ovaj pilot projekat dobija još jednu dimenziju kao svojevrsna baza za obuku i testiranje odnosno usavršavanje zaposlenih u EMS. Sve ove aktivnosti su planirane u narednim fazama realizacije pilot projekta, jer je neophodno izvršiti nabavku nedostajuće opreme.

6 LITERATURA

- [1] TRENCH Optical Current Transformer, Operating manual and installation instructions, 02.12.2021;
- [2] IEC 61850 – System Engineering Concept and Testing in Digital Substations, OMICRON Academy, 2023-04-30;
- [3] SRPS EN 61850-9-2:2013/A1:2020 – Komunikacione mreže i sistemi za automatizaciju energetskih objekata — Deo 9-2: Specifično preslikavanje komunikacionih servisa (SCSM) — Vrednosti uzoraka prema ISO/IEC 8802-3
- [4] IEC 62439-3:2021 - Industrial communication networks - High availability automation networks - Part 3: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR)