

DOI: [10.46793/CIGRE37.B5.17](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B5.17)**B5.17****ISKUSTVA U INŽENJERINGU I ISPITIVANJU REDUNDANTNE PROCESNE MREŽE U
TS BOR 6****ENGINEERING AND TESTING EXPERIENCE OF REDUNDANT PROCESS BUS
NETWORK IN SUBSTATION BOR 6****Tamara Damljanović, Milorad Jovičić, Desimir Trijić, Vladan Milanović, Miki Pejčev,
Vladan Cvejić***

Kratak sadržaj: Jedan od ključnih koncepata za unapređenje raspoloživosti i sigurnosti rada sistema relejne zaštite i upravljanja u trafostanicama jeste primena mrežnih protokola za postizanje redundanse sa nultim vremenom oporavka mreže poput PRP (Parallel Redundancy Protocol) i HSR (High Availability Seamless Redundancy). Njihove teoretske osnove, tehnički zahtevi, funkcionalni opisi i mrežne topologije detaljno su definisani u odgovarajućim IEC standardima i tehničkim preporukama. Međutim, stvarne prednosti i izazovi korišćenja ovih protokola dolaze do izražaja tek kroz njihovu primenu u realnim uslovima, ne samo u smislu direktne implementacije već i potpune integracije sa postojećim procesima inženjeringa (specifikacija, dizajn, fabrička ispitivanja i ispitivanja na lokaciji instalacije) i procesima operativnog održavanja. U ovom radu predstavljena je prva velika implementacija PRP protokola u Srbiji, realizovana na projektu izgradnje 400/110 kV TS Bor 6. Poseban akcenat stavljen je na odluke donete tokom projektovanja i definisanja dizajna mrežne infrastrukture trafostanice, raspodelu funkcija relejne zaštite i upravljanja, s ciljem postizanja standardnih funkcionalnosti trafostanice ove veličine i unapređenja pouzdanosti i raspoloživosti sistema. Pored primene standardnih rešenja IEC 61850 (MMS, GOOSE poruke), korišćene su i digitalizovane merne veličine (odbirci merenja - Sampled Values) za realizaciju funkcije sabirničke zaštite, kao i za distribuciju napona sabirnica do svih inteligentnih uređaja kojima su ove vrednosti neophodne. Ovaj rad pruža uvid u iskustva, izazove i postignute rezultate primene ovih savremenih tehnoloških rešenja.

Ključne reči: IEC61850, Procesna mreža, Stanična automatika, Lokalne mreže

Abstract: One of the key concepts for improving the availability and resilience of protection and control systems in substations is the implementation of network protocols that provide seamless failover against network component failures, such as PRP (Parallel Redundancy

*Tamara Damljanović, Siemens d.o.o. Beograd, tamara.damljanovic@siemens.com

Milorad Jovičić, Siemens doo Beograd, milorad.jovicic@siemens.com

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

Vladan Milanović, EMS, vladan.milanovic@ems.rs

Miki Pejčev, EMS, miki.pejcev@ems.rs

Vladan Cvejić, ENSACO Solutions, vladan.cvejic@itdepends61850.com

Protocol) and HSR (High Availability Seamless Redundancy). Their theoretical foundations, technical requirements, functional descriptions, and network topologies are extensively defined in the relevant IEC standards and technical recommendations. However, the real benefits and challenges of these protocols become apparent only through their application in real-world conditions—not only in terms of direct implementation but also in their full integration into existing engineering processes (specification, design, factory and site acceptance testing) and operational maintenance procedures. This paper presents the first major implementation of the PRP protocol in Serbia, realised in the new 400/110 kV Bor 6 substation project. Particular emphasis is placed on the decisions made during the design of the substation network infrastructure, the allocation of protection and control functions, with the aim of achieving the standard functionalities of a substation of this size and enhancing system reliability and availability. In addition to the application of standard IEC 61850 solutions (MMS, GOOSE messages), digitalized measurement values (Sampled Values) were used to implement the busbar protection function and distributing busbar voltage values to all intelligent devices requiring these values. This paper provides insights into the experiences, challenges, and results achieved in applying these modern technological solutions.

Key words: *IEC61850, Process bus, Substation Automation, LAN*

1 UVOD

Rastući nivo digitalizacije u trafostanicama, sa ciljem povećanja produktivnosti i kvaliteta, donosi i veću zavisnost od pouzdanosti mrežnih sistema. Kako bi se osigurao neometan rad i bezbednost postrojenja, ključno je implementirati mehanizme redundanse. U tom kontekstu, primena mrežnih protokola igra presudnu ulogu.

S obzirom na sve složenije mrežne aplikacije, zahtevi za pouzdan prenos podataka kontinuirano raste. Poslednjih godina, komunikacioni protokoli PRP (Parallel Redundancy Protocol) i HSR (High-availability Seamless Redundancy) stekli su veliku popularnost kao efikasna rešenja za postizanje mrežne redundanse. Ovi komunikacioni protokoli, koji su definisani u okviru IEC 62439:3 standarda, omogućavaju veću dostupnost mrežnih komunikacionih sistema. Zahvaljujući tome, infrastruktura postaje pouzdanija i otpornija na poremećaje koji mogu da se pojave.

Prvi veliki primer primene PRP protokola u Srbiji je realizovan za potrebe sistema relejne zaštite i upravljanja trafostanice 400/110 kV TS Bor 6. Na ovaj način je postavljen temelj za dalju digitalizaciju elektroenergetskih objekata. U ovom projektu PRP protokol je korišćen za obezbeđivanje redundanse u komunikacionoj mreži namenjenoj za prenos digitalizovanih vrednosti napona i struja. Prenos digitalizovanih mernih vrednosti definisan je standardom IEC 61850-9-2, a njegov ekvivalent u domaćem zakonodavnom okviru definisan je standardom SRPS EN 61850-9-2-Vrednosti uzoraka. Digitalizovane merne vrednosti korišćene su za potrebe realizacije funkcije sabirničke zaštite i za distribuciju napona sabirnica do svih inteligentnih uređaja kojima su te vrednosti neophodne.

2 TEHNIČKI ZAHTEVI I FUNKCIONALNI OPIS TS BOR 6

Trafostanica 400/110 kV TS Bor 6 sastoji se od:

- 9 polja na 400 kV naponskom nivou (5 dalekovodnih polja, 3 transformatorska polja i 1 spojno polje),

- i 17 polja na 110 kV naponskom nivou (10 dalekovodnih polja, 3 transformatorska polja, 2 podužna i 2 poprečna spojna polja).

Mrežna arhitektura podeljena je na staničnu i procesnu mrežnu infrastrukturu, čime se postiže segmentisanost mreže zarad dobijanja visoke sigurnosti i efikasnosti u prenosu podataka različitih tipova (MMS- Manufacturing Message Specification, GOOSE- Generic Object Oriented Substation Event, SV- Sampled Values, vremenska sinhronizacija, i slično).

- Stanična mreža preuzima podatke sa nivoa polja i distribuira ih do redundantnog sistema lokalnog upravljanja, kao i do nadređenih upravljačkih centara.
- Procesna mreža omogućava distribuciju digitalizovanih merenja i signala iz postrojenja ka uređajima relejne zaštite i upravljanja. Digitalizovani podaci prenose se putem GOOSE i SV mehanizama, oslanjajući se na PRP (Parallel Redundancy Protocol) za neprekidnu redundansu i maksimalnu pouzdanost.

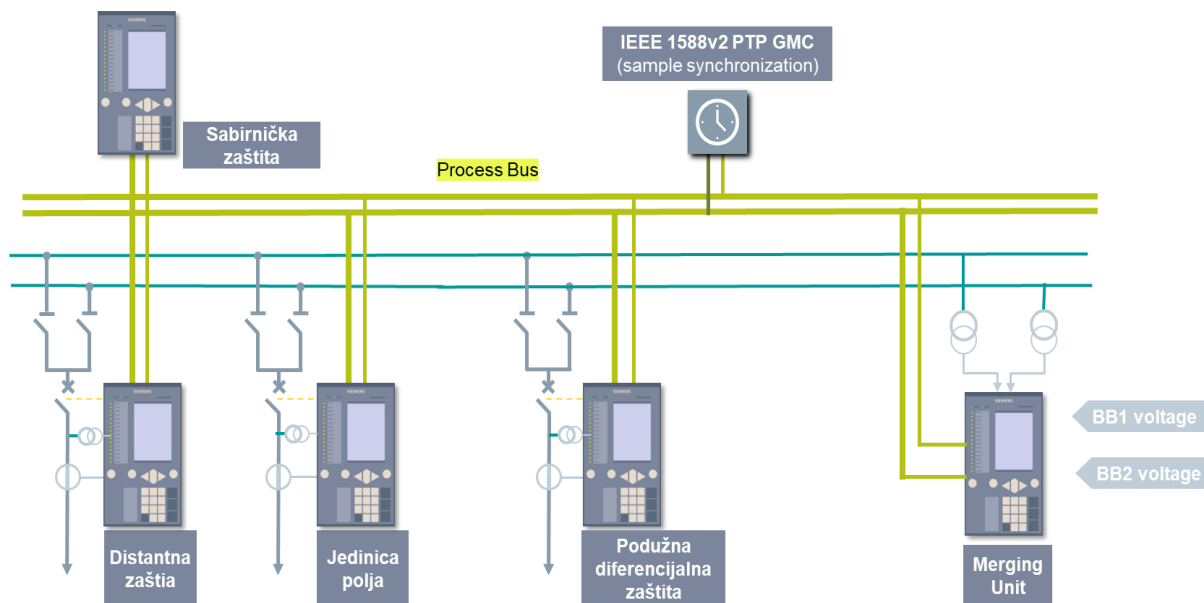
Centralnu ulogu u konverziji analognih signala napona sa sabirnica u digitalni format u skladu sa standardom IEC 61850-9-2 u elektroenergetskom postrojenju ima sprežni uređaj tzv. MU (Merging Unit). Po jedan MU je ugrađen u orman upravljanja poprečnih spojnih polja na 400 kV i 110kV naponskom nivou.

2.1 Vremenska sinhronizacija

Precizna vremenska sinhronizacija je od presudnog značaja u procesnoj mreži trafostanice TS Bor 6. U kontekstu obezbeđivanja tačnosti prenosa digitalizovanih merenja i sinhronizaciju svih inteligentnih elektronskih uređaja (IED), koristi se komunikacioni protokol za vremensku sinhronizaciju - PTP (Precision Time Protocol). Ovaj protokol (tj. profil standarda IEEE 1588 v2.1 definisan u IEC 61850-9-3 Power Utility Profile) omogućava vremensku sinhronizaciju uređaja u mreži sa preciznošću od 1 μ s, što je neophodno za ispravno funkcionisanje prenosa Sampled Values (SV) podataka u komunikacionoj mreži Process bus-a. Ova preciznost omogućava da funkcije koje koriste digitalizovana merenja iz različitih izvora tj. različitih MU ispravno „složi“ talasne oblike. U suprotnom se može desiti da zaštitna funkcija, zbog pomeranja talasnih oblika, detektuje lažni fazni pomeraj a što može biti uslov za prorađu iste.

Uređaj koji je namenjen za obezbeđivanje tačnog vremena prema PTP protokolu (tzv. Grandmaster sat) je povezan u oba LAN segmenta (LAN A i LAN B), čime je postignut neprekidan rad čak i u slučaju kvara jednog mrežnog segmenta. Sa GPS antenom i hardverskom izvedbom koja je otporna na temperaturne i druge promene, on predstavlja glavni izvor tačnog vremena u PTP mreži. Njegova glavna uloga je precizna vremenska sinhronizacija svih uređaja u sistemu, uključujući IED-ove, Merging Unit (MU) i Ethernet svičeve. U slučaju kvara PTP Grandmaster sata, njegovu funkciju automatski preuzima centralna jedinica sabirničke zaštite koja podržava mogućnost funkcije PTP Grandmaster sata, čime se osigurava kontinuirana tačnost vremenske sinhronizacije u mreži.

Neophodno je znati, da je u realizaciji procesne mreže ovog tipa potreban i dovoljan uslov relativno tačno vreme, tj. nije potrebno imati GPS vezu sa satelitima da bi se slanja svih digitalizovanih merenja u trafostanici sinhronizovala. Stoga, dok je PTP Grandmaster clock uređaj aktivan – zbog prisustva GPS antene, on obezbeđuje apsolutno tačno vreme ukoliko su sateliti u dometu, ukoliko nisu – interni sat uređaja će i dalje distribuirati vreme ka uređajima. Ako dođe do otkaza ovog uređaja, centralna jedinica će obezbeđivati samo relativno tačno vreme – što je i dalje dovoljan uslov za ispravan rad.



Slika 1: Prikaz koncepta distribucije vremena u Process bus-u

3 MREŽNA INFRASTRUKTURA

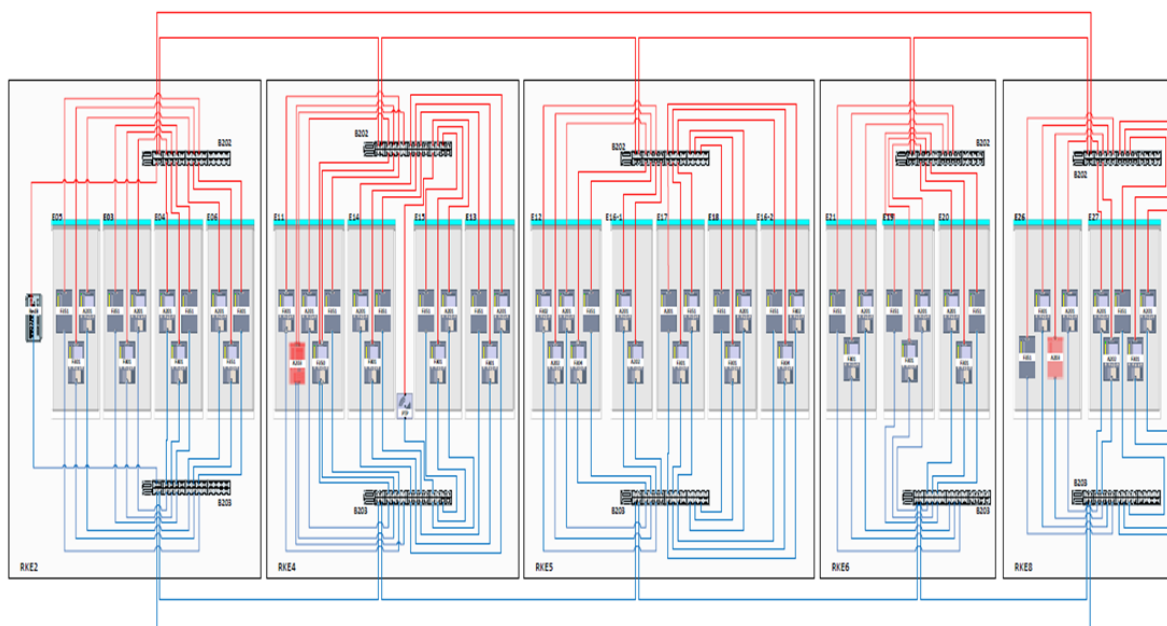
Na staničnom nivou, IED uređaji su povezani na pripadajuće Ethernet svičeve, koji rade pri brzini od 100 Mbit/s. Komunikacija sa elementima staničnog nivoa, kao i međusobna razmena podataka između IED uređaja, realizovana je u skladu sa IEC 61850 standardom (MMS protokol za izveštavanje i kontrolu, GOOSE poruke za blokadne uslove i slično). Ethernet svičevi su međusobno povezani u optičke prstenove sa brzinom prenosa od 1 Gbit/s, što omogućava dovoljan opseg za prenos predviđenog komunikacionog saobraćaja.

Pored toga, stanična mrežna infrastruktura jasno je odvojena od procesne mrežne infrastrukture. Ovaj vid fizičke segmentacije obezbeđuje da se funkcionalnosti sistema lakše konfigurišu i da se postigne optimalan prenos podataka.

Mrežna infrastruktura procesne mreže, namenjena distribuciji mernih veličina, realizovana je korišćenjem PRP protokola. Ethernet svičevi, za procesnu mrežnu infrastrukturu, međusobno su povezani u dve nezavisne mreže – PRP A i PRP B. Dizajnirana je tako da prati naponske nivoe, odnosno postoje dve odvojene PRP mreže za 400 kV i 110 kV (LAN A i LAN B). Iako PRP obezbeđuje potpunu redundansu putem dve nezavisne mreže (LAN A i LAN B), unutar svake od njih realizovana je prstenasta topologija svičeva zarad ostvarivanja dodatne sigurnosti funkcionisanja. U svrhu obezbeđenja redundanse na nivou linka između svičeva koji formiraju prstenastu topologiju u okviru PRP mrežne infrastrukture aktiviran je RSTP (Rapid Spanning Tree Protocol) u svakoj od PRP mreža – LAN A i LAN B.

SNMP (Simple Network Management Protocol) je korišćen za nadzor komunikacionih uređaja procesne PRP mreže (Ethernet svičevi, Redundancy Box, PTP GrandMaster sat). Kako bi se omogućila distribucija SNMP paketa ka staničnom sistemu i operatorskim radnim stanicama, ugrađeni su Redundancy Box uređaji, po jedan na svakom naponskom nivou. Redundancy Box uređaji povezuju procesnu PRP mrežu sa staničnom mrežom, tj. redundantne komunikacione sisteme (bilo da rade po PRP ili HSR protokolu) sa uređajima koji ne podržavaju ove protokole. Na ovaj način se omogućava pristup redundantnoj infrastrukturi, zarad monitoringa i dijagnostike u realnom vremenu kao i brzo prepoznavanje potencijalnih problema u komunikacionoj mreži.

Redundancy Box uređaji se koriste kao ulazna tačka u PRP LAN A i LAN B mrežu, omogućavajući povezivanje SAN (Single Attached Nodes) uređaja – uređaja koji ne podržavaju PRP/HSR protokol. Na ovaj način SAN uređaji mogu neometano komunicirati sa uređajima unutar redundantne mrežne infrastrukture.



Slika 2: Mrežna infrastruktura 110kV dela postrojenja TS Bor 6

Radi osiguranja efikasne i neometane komunikacije primenjeni su: VLAN segmentacija, multicast filtriranje i SNMP monitoring. Kao rezultat toga održava se stabilnost komunikacione mreže i smanjuje rizik od preopterećenja.

4 PRIMENA DIGITALIZOVANIH MERNIH VELIČINA

Komunikacioni moduli IED uređaja ugrađenih u TS Bor 6 podržavaju protok od 100 Mbps, što zahteva pažljivo upravljanje mrežnim saobraćajem. SV tokovi, koji generišu kontinuirano opterećenje, distribuirani su isključivo ka uređajima kojima su ti podaci potrebni. Ova optimizacija je posebno primenjena u prenosu strujnih SV tokova iz jedinica polja ka centralnoj jedinici sabirničke zaštite na 110 kV i 400 kV naponskim nivoima.

Dodatno, kako bi se poboljšala efikasnost komunikacije i smanjilo nepotrebno opterećenje mreže, VLAN konfiguracija je podešena tako da se SV tokovi namenjeni sabirničkoj zaštiti distribuiraju isključivo ka portovima na koje je povezana centralna jedinica. Ovim pristupom postiže se optimalan protok podataka, povećava efikasnost mreže i poboljšava reakcija sistema na eventualne promene i kvarove.

5 ISPITIVANJE REDUNDANTNE PROCESNE MREŽE

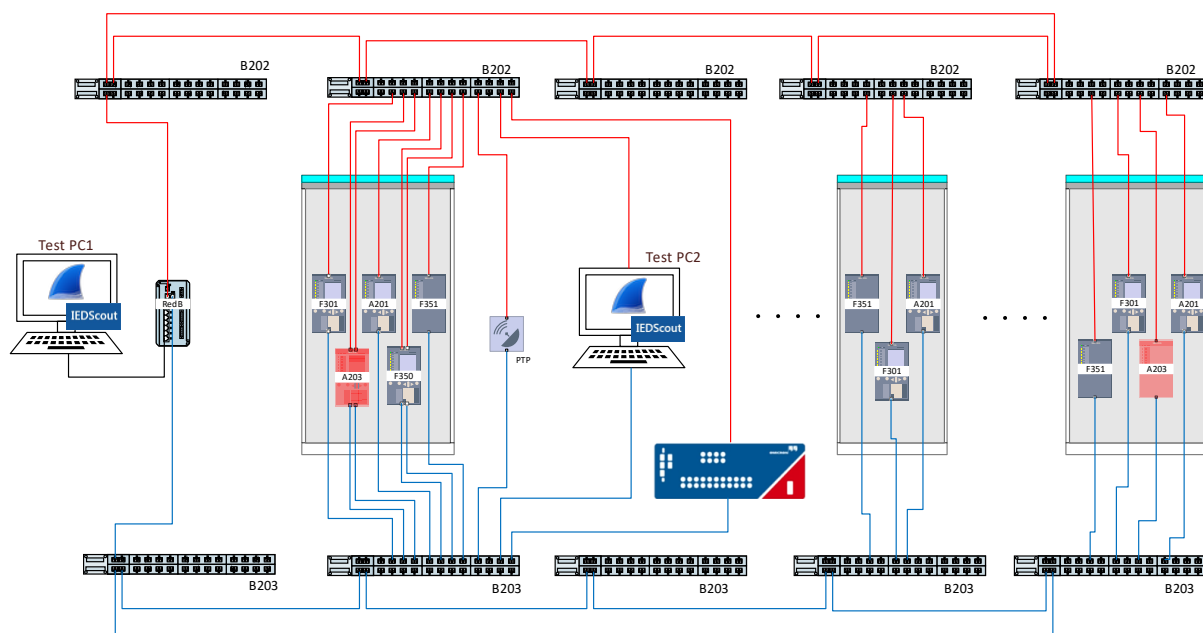
Iako, u principu, fabričko testiranje ne treba da obuhvata opsežne testove, u TS Bor 6 je izvršena detaljna provera funkcionalnosti u domenu konfiguracije i ponašanja redundantne procesne mreže. U sledećoj tabeli se nalaze skupovi testova koji su sprovedeni:

Tabela 1: Testovi

1	Provera konfiguracije LAN svičeve: • IP adresa • Podešenja portova • Filtriranja (VLAN) • Vremenska sinhronizacija Ova provera je vršena daljinski preko podataka dobijenih putem SNMP (Simple Network Management Protocol) protokola i delimično preko SRPS EN 61850 modela. Na ovaj način je provereno da li su ove komponente u funkciji i dostupne.
2	Provera povezanosti ostalih uređaja (IED-ovi, satovi vremenske sinhronizacije, HMI, stanični računari itd.). Vršena je provera: • Korišćenjem <i>ping</i> funkcije • Pristup putem raspoloživih protokola (HTTP, FTP, SSH, itd.) Dodatno, provera sa alatima koji kao ulazne parametre mrežnih konfiguracija koriste SCD fajlove (komunikacija putem MMS protokola)
3	Provera protokola PRP, PTP, RSTP kao i VLAN i multicast filtering funkcionalnosti
4	Provera funkcionisanja GOOSE i SV mehanizama (strana emitovanja). • Praćenjem uz pomoć alata poput (Wireshark) ili • uz pomoć drugih specijalističkih alata koji koriste SCD kao izvor parametara GOOSE i SV kontrolnih blokova
5	Test otpornosti mreže - U ovoj proveri su simulirani fizički defekti u mreži poput prekida mrežnog kabla (isključivanjem kabla sa jedne strane) na kritičnim mestima ili isključivanje Ethernet sviča i evidentirano da funkcije nastavljaju da rade (prijem i slanje GOOSE, SV, izveštaja itd.)
6	Opterećenje mreže - Korišćenjem mrežnog analizatora je utvrđeno koliki je protok informacija na bitnim pravcima mrežne infrastrukture
7	Testovi nadzornih funkcija - Za ovu proveru je sistem prethodno bio iskonfigurisan tako da su uređaji prijemnici GOOSE / SV poruka podešeni da evidentiraju pogrešan rad ili nedostatak pomenutih poruka i da alarme-informacije distribuiraju na odgovarajući način (npr. putem baferisanih ili nebaferisanih izveštaja BRCB/URCB).

5.1 Arhitektura za testiranje

Test PC1 i PC2 su računari putem kojih su se vršile testne akcije (ping, snimanje saobraćaja, generisanje saobraćaja, pokretanje aplikacija za povezivanje sa uređajima (IED, svičevi, RedBoxovi, Time masteri,...)). Lokacija Test PC i drugih uređaja za snimanje/generisanje mrežnog saobraćaja se menjala prema potrebama testa.



Slika 3: Arhitektura za testiranje

5.2 PRP testovi

U svakom zasebnom PRP LAN-u, Ethernet svičevi funkcionišu prema specifikacijama deklariranim IEEE 802.1D standardom. Najbitnije je bilo utvrditi da mrežna infrastruktura tj. Ethernet svičevi ne uklanjaju neophodne delove paketa za funkcionisanje PRP-a tzv. PRP trejlere. Test je sproveden i na RedBox-ovima pri čemu se proverava da uređaji proizvode duplirane pakete sa PRP trejlerima. Validaciju je moguće vršiti na sledećim tipovima paketa – GOOSE, SV. Koristio se port mirroring ili priključivanje na određenim trunk portovima sa mrežnim analizatorom/snimačem mrežnog saobraćaja. Obavljeni su sledeći PRP testovi:

- PRP supervizija u PRP LAN-u
- Slanje GOOSE, SV, PTP poruka u PRP LAN-u
- Slanje SAN paketa (HTTPS, DIGSI, PING...) izvan PRP mreže korišćenjem RedBox-a u PRP mrežu
- DANP interoperabilnost sa SAN
- SAN interoperabilnost sa DANP

5.3 PTP testovi

Ethernet svičevi u komunikacionoj mreži se ponašaju kao transparentni PTP satovi. Samim tim, omogućavaju da se vremenska sinhronizacija propagira kroz komunikacionu mrežu sa korekcijama koje omogućavaju veliku tačnost. Testovi se odnose na mrežnu opremu (ponajviše na Ethernet svičeve) koji pored osnovnih mrežnih funkcija mogu imati i ulogu servera vremenske sinhronizacije ili mogućnost da „razumeju“ PTP mrežne pakete.

PTP Grandmaster sat u obe PRP mreže (400kV i 110kV) je glavni izvor tačnog vremena dok kao redundantni „master capable“ PTP sat se koristi centralna sabirnička jedinica. Obavljeni su sledeći PTP testovi:

- Verifikovano da je maksimalno odstupanje PTP od reference maksimalno 50 ns

- Verifikovano prebacivanje sa jednog na drugi master sat i obratno

Provere su pokazale ispravno distribuiranje vremenske sinhronizacije sa maksimalnim odstupanjem od 25 ns. Takođe, prelaz sa PTP Grandmaster sata na redundantni sat nije ometalo funkcionisanje zaštitnih uređaja (od kojih je najbitniji sistem sabirničke zaštite).

5.4 Testovi VLAN-a

Za realizaciju ovih testova su korišćena postojeće GOOSE ili SV poruke koje imaju različite VLAN ID-ove.

- Verifikovano je da li je VLAN ID u GOOSE/SV poruci isti nakon što prođe minimalno 2 Ethernet sviča
- Provereno je da se SV (GOOSE) poruka koja ima VLAN tag u sebi javlja samo na odgovarajućim/konfigurisanim portovima.
- Provereno je da li su ostale multicast poruke (koje nisu konfigurisane prema portovima) poslate na sve portove.

5.5 Testovi otpornosti

Test otpornosti mreže je sproveden u svakom prstenu PRP mreže gde je simuliran fizički defekt u mreži poput prekida mrežnog kabla (isključivanjem kabla sa jedne strane) na kritičnim mestima ili isključivanje Ethernet sviča i evidentiranje da funkcije nastavljaju da rade (prijem i slanje GOOSE, SV, izveštaja itd.). Obavljeni su sledeći testovi otpornosti:

- Prekid glavnog prstena LAN mreže
- Isključenje Ethernet sviča jedne LAN mreže (A/B) PRP infrastrukture

Testiranje je pokazalo ispravno funkcionisanje mreže i benefit korišćenja PRP protokola za postizanje redundanse sa nultim vremenom oporavka mreže.

5.6 Testovi opterećenja

Testovi opterećenja su sprovedeni u svakom prstenu mrežne infrastrukture i na bitnijim pravcima sa ciljem da se odredi ukupan zauzeti propusni opseg (bandwidth). Ethernet svičevi procesne mreže imaju 1 Gbps portove tako da za same svičeve ova količina protoka nije kritična. Bitno je da su SV tokovi ograničeni samo prema uređajima koji ih koriste i to primarno SV tokovi sa 4 struje za sabirničku zaštitu korišćenjem VLAN funkcija. Obavljeni su sledeći testovi opterećenja:

- Povećano opterećenje po LAN A ili LAN B (20 Mbps, 60 Mbps, 80 Mbps)
- Povećano opterećenje po LAN A i LAN B (20 Mbps, 60 Mbps, 80 Mbps)

Posmatrane su kritične tačke u mreži (npr. u 400kV mreži kritična je centralna jedinica sabirničke zaštite čiji je port 100 Mbps, a gde je postojeći saobraćaj 40 Mbps, uz napomenu da preko 60 Mbps može doći do negativnog uticaja na vremensku sinhronizaciju i prijem SV tokova). Zaključeno je da pri dodatno simuliranom opterećenju imamo sledeće ponašanje:

- Dodatno 20 Mbps – nema uticaja
- Dodatno 60 Mbps – granični slučaj
- Dodatno 80 Mbps – vremenska sinhronizacija i pretplata SV prestaju da rade

5.7 GOOSE i SV testovi

Izvršeni su testovi performansi mreže pod normalnim i abnormalnim (lavina) uslovima mrežnog saobraćaja, provera slanja i prijema simuliranih GOOSE i SV tokova i merenje vremena odziva mreže (kašnjenja) između kritičnih mrežnih čvorova. Sledeći testovi su vezani za GOOSE i SV mehanizme:

- Provera slanja GOOSE/SV u normalnom režimu
- Provera slanja GOOSE/SV u abnormalnom režimu (opterećena mreža)
- Provera simulacije GOOSE/SV
- Provera vremena distribucije GOOSE/SV

Slanje i prijem GOOSE/SV u normalnom i abnormalnom režimu je ostalo neometano. Takođe, simulacija GOOSE i SV tokova putem testne opreme je ispravno primana od uređaja koji su se nalazili u stanju za prijem istih (uključen režim prijema simuliranih GOOSE/SV paketa).

Dodatno je vršeno merenje distribucije SV tokova. Sledeći segment ovog rada daje opis merenja.

5.7.1 Merenje propagacije SV na process bus 400 kV

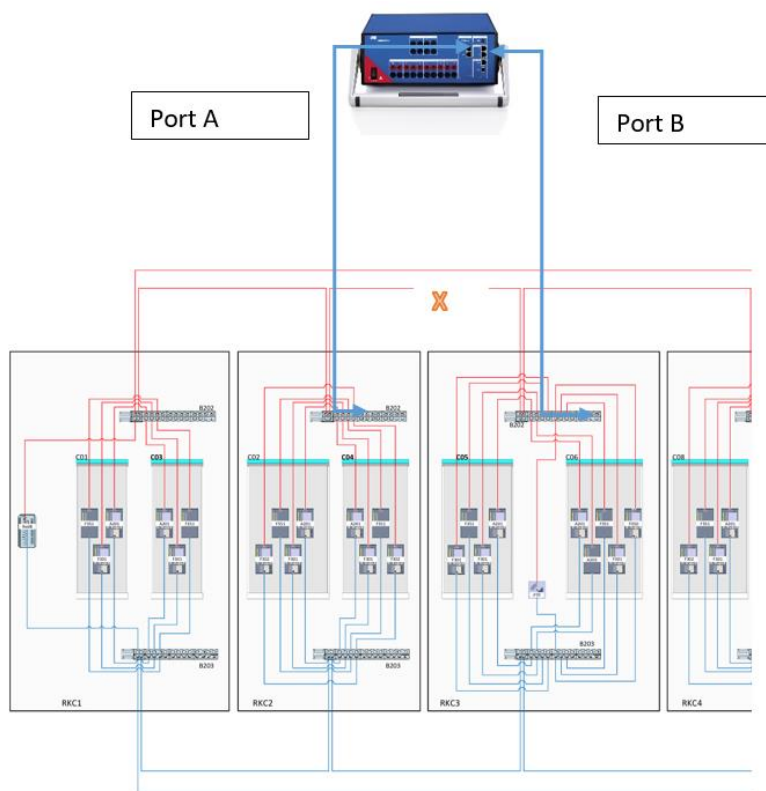
Mrežno vreme paketa, tj. vreme paketa koji šalje IED *publisher* do trenutka kada paket primi pretplatnički IED, može se meriti i proceniti pomoću snimanja mrežnog saobraćaja (u formatu pcap) i odgovarajuće ispitne opreme.

Kada se testira propagacije mrežnih paketa, mora se izvršiti statistička evaluacija. To znači da se ne meri samo kašnjenje propagacije jednog paketa, već matematička evaluacija na osnovu velikog broja paketa. Minimalno, maksimalno i prosečno vreme prenosa je onda dobra indikacija za performanse rada mreže.

Takođe, merenja kašnjenja propagacije treba da se izvrše za različita opterećenja komunikacione mreže (malo opterećenje tokom normalnog rada u odnosu na veliko opterećenje tokom testiranja sa dodatnim simuliranim uzorkovanim vrednostima i aktiviranim GOOSE porukama).

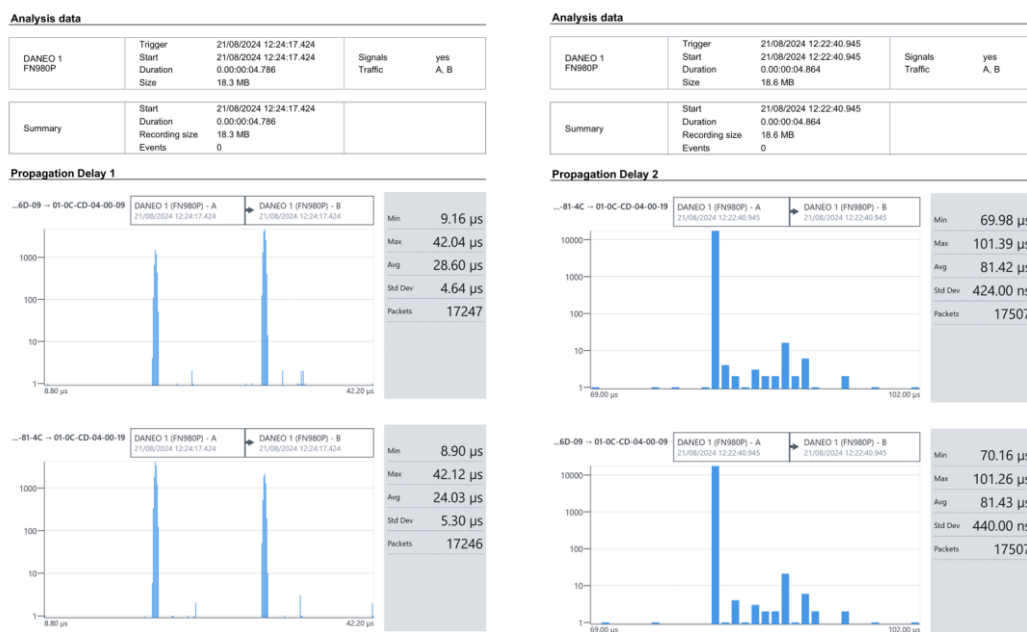
Kako bi se izvršilo merenje propagacije koriste se posebni test set. U konkretnom primeru dat je prikaz korišćenja ispitnog uređaja predviđenog specijalno za ovu namenu. Bitno je naglasiti da je uređaj takođe morao da bude vremenski sinhronizovan putem PTP protokola. Izabrano je testiranje propagacije signala od strane jedinica polja sabirničke zaštite uređaja C02_F351 i C04_F351 koji emituju SV tok za rad sabirničke zaštite. Uređaj centrale sabirničke zaštite F350 se nalazi u RKC3. Između svičeva u RKC2 i RKC3 postoji direktna veza. Izvršena su dva merenja u normalnom stanju i u situaciji da je prekinuta direktna veza RKC2 i RKC3.

Kako bi se izvršilo merenje bilo je potrebno da se posebno konfigurišu portovi P13 na Ethernet sviču B202 RKC02 i port P16 na Ethernet sviču B202 RKC03. Prekidanjem veze između RKC02 i RKC03 dolazi do rekonfiguracije mreže (zahvaljujući radu RSTP protokola u mrežnom prstenu), odnosno veza se ostvaruje preko svih ostalih svičeva u petlji što čini “najsporiju” rutu.



Slika 4: Prikaz veze ispitnog uređaja i dela PRP mreže

Na osnovu analize merenja srednja vrednost kašnjenja za slučaj normalne konfiguracije PRP mreže iznosi 28.6 μs dok u slučaju najsporije rute kašnjenje iznosi 81.42 μs .



Slika 5: Prikaz analize merenja propagacije signal iz ispitnog uređaja (levo normalno stanje mreže, desno simuliran prekid između RKC02 i RKC04)

5.8 Testovi nadzornih funkcija

Za nadzor prijema GOOSE poruke na strani pretplatnika uključena je supervizija GOOSE što podrazumeva konfigurisanje odgovarajućeg broja instanci LGOS logičkih čvorova (prema IEC 61850 modelu) sa postavljenom setSrcRef u kojoj je objektna referenca GOOSE kontrolnog bloka. Status pretplate se prati putem LGOS.St.stVal (SPS) atributa. Od interesa su GOOSE poruke u procesnoj PRP komunikacionoj mreži (ne nadziru se GOOSE poruke u staničnoj mreži koje realizuju blokadne uslove). Dodatno se koriste proizvođačke ekstenzije logičkog čvora LGOS.DiagErr.stVal (enum vrednost 0 – nema greške, da bi se lokalnom SCADA sistemu prijavila bilo kakva greška u nadzoru prijema određene GOOSE poruke).

Slično nadzoru GOOSE poruka, za nadzor prijema SV poruke na strani SV pretplatnika uključena je supervizija SV što podrazumeva konfigurisanje odgovarajućeg broja instanci LSVS logičkih čvorova sa postavljenom setSrcRef u kojoj je objektna referenca MSVCB kontrolnog bloka. Status pretplate se prati putem LSVS.St.stVal (SPS) atributa. Dodatno se koriste proizvođačke ekstenzije logičkog čvora LSVS.DiagErr.stVal čija je funkcija identična onoj u LGOS logičkom čvoru.

Da bi se pratila PTP sinhronizacija koja je veoma bitna za sinhronizovanje slanja SV tokova za sabirničku zaštitu, uveden je podatak iz proizvođačke ekstenzije logičkog čvora LSVS.DiagSynch.stVal (enum vrednost 0, aktivna vrednost 4 – koji ima značenje: SV nije sinhronizovan (smpSync=0)).

Nadzor komunikacione mreže tj. operativno stanje povezanih DANP uređaja se vrši korišćenjem SRPS EN 61850 funkcionalnosti samih IED-ova, tj. atributa odgovarajućih logičkih čvorova LCCH.ChLiv.stVal i LCCH.RedChLiv.stVal (ChLiv – PRP kanal A, RedChLiv – PRP kanal B).

Ovim funkcionalnostima je omogućen nadzor redundantne procesne mreže i pravovremeno alarmiranje korisnika zaštitno-upravljačkog sistema.

6 ZAKLJUČAK

Implementacija PRP protokola u realnim uslovima elektroenergetskih sistema donosi značajni niz prednosti, ali i određene izazove koje je potrebno pažljivo adresirati kako bi se obezbedila optimalna pouzdanost i raspoloživost komunikacione infrastrukture. Među ključnim prednostima izdvajaju se: nulto vreme oporavka mreže, poboljšana sigurnost rada sistema relejne zaštite i upravljanja, kao i povećana efikasnost prenosa podataka. Nulto vreme oporavka mreže posebno je značajno, jer omogućava neprekidnu i pouzdanu razmenu kritičnih podataka u realnom vremenu. Time se smanjuje rizik od gubitka zaštitnih i upravljačkih funkcija u slučaju mrežnih kvarova. Ovakva karakteristika direktno doprinosi povećanoj sigurnosti i stabilnosti elektroenergetskog sistema, čineći ga otpornijim na neočekivane izazove i spremnim za buduće tehnološke zahteve.

Takođe, PRP omogućava veću fleksibilnost u dizajnu mrežne arhitekture i jednostavnu integraciju sa postojećim sistemima, što olakšava implementaciju savremenih tehnoloških rešenja. Njegova fleksibilnost i skalabilnost čine ga pogodnim za različite mrežne arhitekture, od manjih postrojenja do kompleksnih sistema. Međutim, primena PRP-a u realnim uslovima suočava se i sa određenim izazovima koji uključuju: složenost inženjerskog planiranja, kao i povećanu kompleksnost održavanja i dijagnostike mrežnih problema. Osim toga implementacija zahteva dodatnu ekspertizu i detaljna testiranja.

Uprkos svim izazovima iskustva iz prve implementacije PRP protokola u Srbiji pokazala su da je primena ovih naprednih tehnoloških rešenja ključna za modernizaciju elektroenergetskih sistema. Postignuti rezultati potvrđuju da pravilno i pažljivo projektovana mrežna infrastruktura, uz stratešku raspodelu komunikacionog saobraćaja, može značajno doprineti unapređenju pouzdanosti i raspoloživosti sistema. Na taj način ne samo da se osigurava siguran, stabilan i efikasan rad trafostanica, već se postavlja i čvrst temelj za dalju digitalizaciju i unapređenje elektroenergetskih mreža. PRP se time potvrđuje kao tehnologija otporna na buduće izazove, omogućavajući dugoročnu stabilnost i adaptivnost sistema u sve složenijem energetsom okruženju.

7 LITERATURA

- [1] IEC TR 61850-90-4 ED2 Communication networks and systems for power utility automation – Part 90-4: Network engineering guidelines”, 2019.
- [2] Rodolfo C. Bernardino, Cristiano M. Martins, Paulo S. Pereira, Gustavo E. Lourenço , Paulo. S. P. Junior “Link redundancy in the process bus according to iec 61850 ed.2: experience with RSTP, PRP and HSR protocols“
- [3] IEC 61850-9-2, Communication networks and systems in substations – Part 9-2: Specific Communication System Mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3, First edition 2003-05