

DOI: [10.46793/CIGRE37.D2.15](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.D2.15)**D2.15****SAVREMENI TRENDОВI REALIZACIJE TELEKOMUNIKACIONIH MREŽA ZA
ELEKTROENERGETSKE SISTEME****CONTEMPORARY TRENDS IN THE REALIZATION OF TELECOMMUNICATION
NETWORKS FOR POWER SYSTEMS****Ivan Vujović, Vojislav Tanjević, Mladen Koprivica, Željko Đurišić***

Kratak sadržaj: Veličina, broj čvorišta i međuveza unutar elektroenergetskog sistema (EES-a) i sa drugim EES-ima se sve više povećavaju. U isto vrijeme, tehnološki i tehnički razvoj telekomunikacionih mreža omogućava primjenu različitih rješenja u cilju značajnog unapređenja sistema nadzora i upravljanja EES-om. Nad svakim elementom EES-a je moguće, u većoj ili manjoj mjeri, vršiti nadzor, a za određene elemente potrebno je omogućiti i funkcije upravljanja. Prenos informacija između elemenata EES-a treba biti brz, pouzdan i zaštićen. Konačan cilj je ostvariti potpuno automatizovan proces održavanja vrijednosti parametara sistema, odnosno pojedinačnih elemenata sistema, u okviru zadatih, prethodno definisanih, granica. U ovom radu je predstavljen koncept dizajna telekomunikacione mreže za cjelokupni EES koji sadrži izvore električne energije, prenosne kapacitete, elektroenergetska postrojenja i potrošače. Hardverski dio mreže čine komponente implementirane na centralnim lokacijama, primarni i redundantni linkovi, kao i mrežni uređaji u čvorištima EES-a i kod potrošača. Nadzor i upravljanje mrežom vrši se u okviru *network management system* (NMS-a), dok su softverske konfiguracije mrežnih uređaja takve da omogućavaju primjenu *best-practice* rješenja u prenosu i zaštiti podataka. Infrastruktura za prenos informacija između elemenata EES-a i NMS-a definisana je *Transmission Control Protocol/ Internet Protocol* (TCP/IP) arhitekturom i IEC 61850 standardom. Razmjena podataka između distribuiranih i centralnih lokacija, kao i između čvorišta EES-a i centralnih lokacija vrši se upotrebom *Internet of Things* (IoT) tehnologije na distribuiranim lokacijama, odnosno u čvorištima EES-a, ili direktnom komunikacijom uređaja na distribuiranim lokacijama i u čvorištima sa centralnim lokacijama, ako hardverska konfiguracija tih uređaja uključuje *network interface card* (NIC).

Ključne reči: elektroenergetski sistem, telekomunikaciona mreža, data centar, prenos podataka, IEC 61850 standard

Abstract: The size, number of nodes and interconnections within the power system (PS) and with other PSs are increasing more and more.

* Ivan Vujović, Elektrotehnički fakultet - Univerzitet u Beogradu, vi205041p@student.etf.bg.ac.rs

Vojislav Tanjević, M:tel Crna Gora, vojislav.tanjevic@yahoo.comMladen Koprivica, Elektrotehnički fakultet - Univerzitet u Beogradu, kopra@etf.rsŽeljko Đurišić, Elektrotehnički fakultet - Univerzitet u Beogradu, djurisic@etf.rs

At the same time, technological and technical development of telecommunication networks enables implementation of various solutions in order to significantly improve PS monitoring and management system. Each element of the PS can be monitored to a greater or lesser extent, and management functions must be enabled for certain elements. Transfer of information from and to PS elements should be fast, reliable and protected. The final goal is to realize a fully automated process of keeping values of the system and individual elements of the system parameters within the given, previously defined, limits. This paper presents design concept of the telecommunication network for the entire PS which contains electrical energy sources, transmission capacities, substations and consumers. The hardware part of the network consists components implemented on the central locations, primary and redundant links, as well as network devices in PS nodes and at consumers. Monitoring and management of the network is carried out within the network management system (NMS), while software configurations of the network devices are such that they enable implementation of best-practice solutions in the data transmission and protection. The infrastructure for transmission of information between PS elements and NMS is defined by the the Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP) architecture and IEC 61850 standard. Data exchange between distributed and central locations, as well as between PS nodes and central locations is done using the Internet of Things (IoT) technology on the distributed locations and in the PS nodes or by using directly communication between devices at distributed locations and in the PS nodes and central locations if hardware configuration of that devices includes network interface card (NIC).

Key words: *power system, telecommunication network, data center, data transfer, IEC 61850 standard*

This work was financially supported by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia under contract number: 451-03-137/2025-03/200103.

1 UVOD

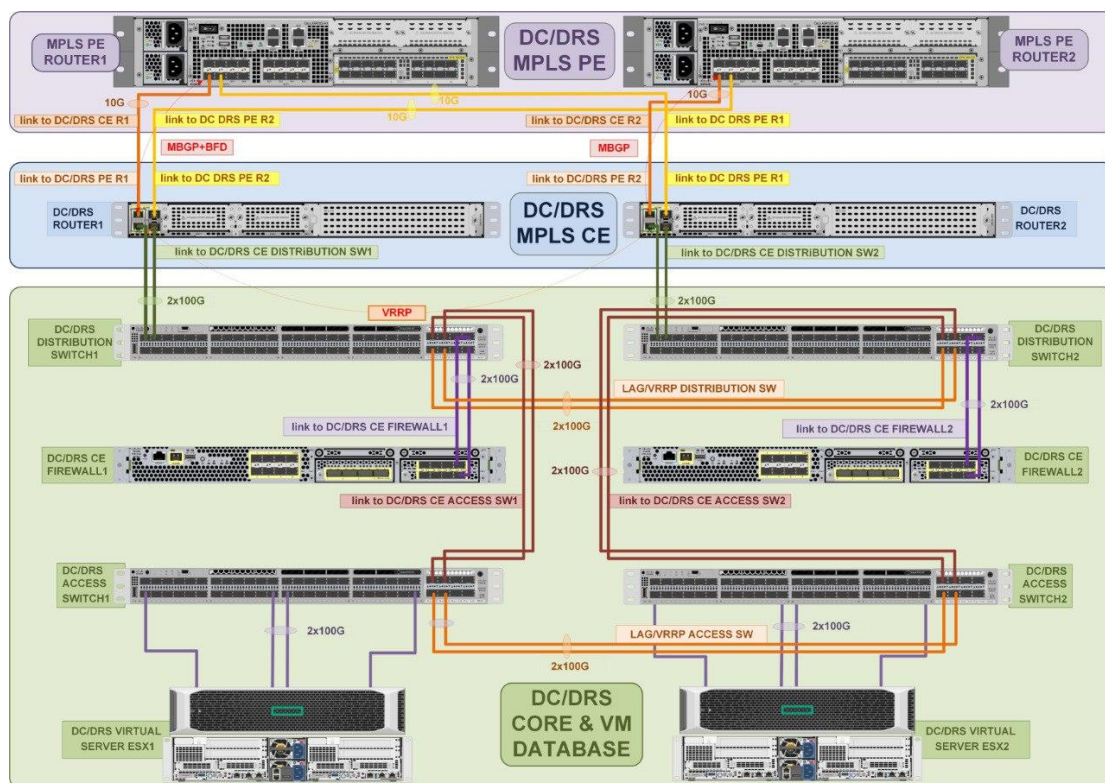
Bez obzira na veličinu EES-a, neophodno je omogućiti uvid u stanje svakog pojedinačnog elementa sistema, u realnom vremenu, preko vrijednosti karakterističnih parametara. Takođe je, za elemente koji podrazumijevaju upravljačke funkcionalnosti, potrebno realizovati izvršenje naredbi u realnom vremenu, na osnovu prethodnih odluka na lokalnom ili na centralnom nivou, u okviru *network management system* (NMS-a). Informacije o vrijednostima parametara elemenata susjednih EES-a koji su, u interkonekciji, povezani sa posmatranim EES-om, u realnom vremenu, su takođe od velike važnosti za kvalitetan nadzor i upravljanje.

Komunikaciona infrastruktura EES-a podijeljena je u tri međusobno povezane cjeline. Centralni dio čine *data center* (DC) i *disaster recovery siste* (DRS). Nadzor i upravljanje u okviru NMS infrastrukture realizovane na ovim lokacijama funkcioniše u redundantnom režimu. Transportni dio telekomunikacione mreže čine uređaji i konekcije koji omogućavaju povezivanje distribuiranih lokacija i čvorova EES-a sa centralnim dijelom. Na svim lokacijama gdje se ostvaruje značajna proizvodnja električne energije, lokacijama većih i velikih razvodnih postrojenja, odnosno većih i velikih potrošača, kao i u *headquarters*-ima (HQ-ima), odnosno poslovnim i administrativnim lokacijama, realizacija redundantne komunikacije je obezbijedena upotrebom optičkih konenkcija. Za manje izvore električne energije, manja razvodna postrojenja i manje potrošače, redundansa u komunikaciji podrazumijeva primarnu optičku vezu i redundantnu bežičnu vezu.

Komunikaciona infrastruktura, odnosno dio ove infrastrukture, može biti u vlasništvu kompanije koja upravlja EES-om ili u vlasništvu provajdera telekomunikacionih servisa. Osnovna koncepcija i dizajn NMS-a podrazumijeva implementaciju *supervisory control and data acquisition* (SCADA) sistema na lokaciji DC-a i DRS-a, pri čemu je ostvarena međusobna sinhronizacija baza podataka na ovim lokacijama. Komunikaciona infrastruktura EES-a i mrežna infrastruktura provajdera telekomunikacionih servisa trebaju biti tako koncipirane da omoguće što brži i sigurniji prenos podataka od centralnih ka distribuiranim lokacijama, odnosno čvorištima EES-a i obratno. U okviru svih elemenata EES-a potrebno je implementirati funkcionalnosti IEC 61850 standarda koji, između ostalog, propisuje i način reagovanja na događaje u EES-u, posebno one lokalnog karaktera, od kojih neki događaji moraju biti procesuirani lokalno jer nije dozvoljeno kašnjenje u reagovanju koje može uzrokovati prenos informacija do centralnih lokacija i prenos naredbi od centralnih lokacija do lokacije gdje se desio događaj.

2 INFRASTRUKTURA NA CENTRALNIM LOKACIJAMA

Na lokacijama DC-a i DRS, tj. na centralnim lokacijama, implementirana je mrežna i servisna infrastruktura kao što je prikazano na slici 1. Segment pristupa *multiprotocol label switching* (MPLS) mreži karakteriše upotreba *multiprotocol border gateway protocol* (MBGP) protokola rutiranja [1], [2] i *bidirectional forwarding detection* (BFD) protokola [3]. Objedinjavanje rutera u jedan virtualni ruter i dodjeljivanje redundantnih funkcija pojedinačnim ruterima u okviru virtualnog rutera, postiže se implementacijom *virtual router redundancy protocol*-a (VRRP-a) [4]. Fizička osnova za implementaciju VRRP-a ostvarena je između dva *distribution switch*-a (DC/DRS *distribution switch* 1 i 2). Svi linkovi koji povezuju opremu unutar internog sementa (DC/DRS *core and vm database*) su redundantni, optički, 100 Gbps/s. Linkovi koji povezuju DC, odnosno DRS *customer edge* (CE) opremu sa MPLS mrežom su redundantni, 10 Gbps.



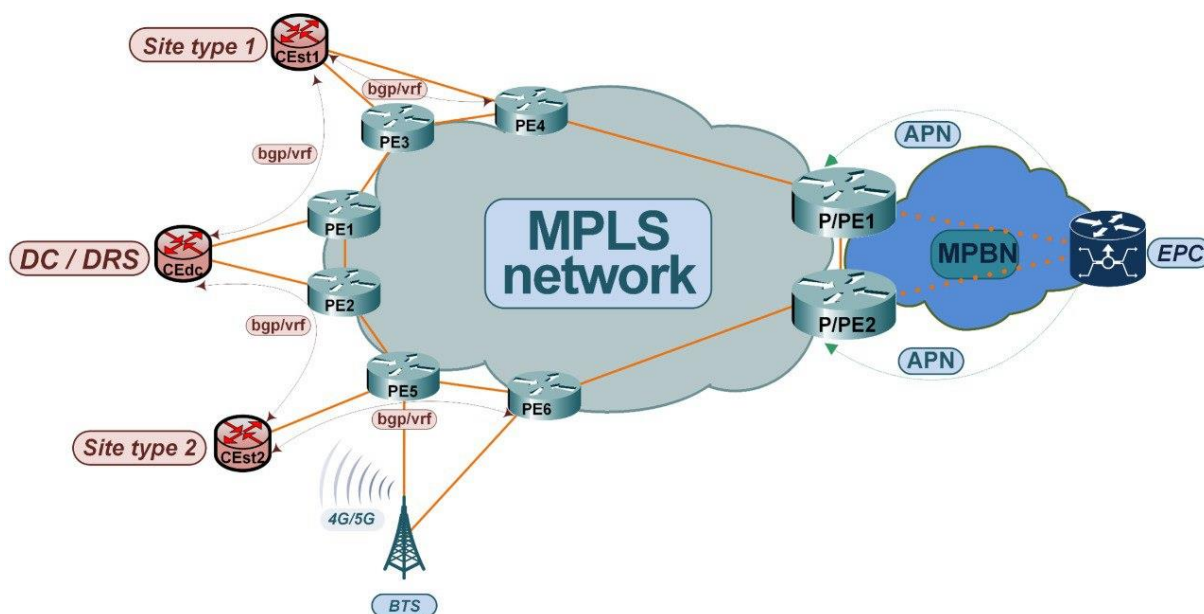
Slika 1: Mrežna i servisna infrastruktura na centralnim lokacijama

Funkciju filtriranja mrežnog saobraćaja obavljaju redundandni *firewall*-i. Procesiranje informacija vrši se u okviru *virtual server*-a. Za skladištenje obrađenih informacija zaduženi su *network attached storages* (NAS) koji nisu tema ovog rada.

3 TRANSPORTNA INFRASTRUKTURA

Prenos informacija između distribuiranih lokacija, odnosno čvorova EES-a i centralnih lokacija, kao i između centralnih lokacija vrši se upotrebom transportne mreže. Predlog realizacije infrastrukture koja omogućava ovakav prenos prikazan je na slici 2. Konekcije pojedinačnih lokacija sa MPLS mrežom ostvarene su u zavisnosti od važnosti lokacije. Tako su centralne lokacije tj. CE ruteri na DC-u, odnosno DRS-u, povezani preko, minimalno, dvije optičke konekcije, sa dva različita *provider edge* (PE) rutera. Lokacije značajne proizvodnje, većih i velikih razvodnih postrojenja, odnosno potrošača, HQ-i, kao i poslovne i administrativne lokacije, na MPLS mrežu su povezane preko dvije optičke konekcije, sa dva različita PE rutera (*site type 1*). Lokacije manjih izvora električne energije, manjih razvodnih postrojenja i manjih potrošača povezane su, primarno, preko optičke konekcije, a redundantno, bežično, upotrebom 4G ili 5G mreža (*site type 2*). Rijetko se kao primarna i redundantna konekcija, na istoj lokaciji, koriste dvije bežične konekcije istog tipa. Kada je to zaista neophodno, mogu se koristiti radio relejne konekcije. Najrjeđe je u upotrebi satelitska komunikacija ili komunikacija preko napojnih kablova tj. *power line communication* (PLC). Zbog rijetke potrebe za ovim tehnologijama u telekomunikacionim mrežama EES-a, iste nisu tema ovog rada.

Komunikacija u graničnom dijelu i unutar MPLS mreže vrši se upotrebom BGP-a i *virtual private network* (VPN) tehnologije, odnosno *virtual routing and forwarding* (VRF) funkcionalnosti [5]. Infrastruktura koja omogućava ostvarivanje bežične 4G/5G komunikacije realizovana je upotrebom *mobile packet backbone network* (MPBN) i *evolved packet core* (EPC) tehnologija, kao i korišćenjem *private access point name* (APN) funkcionalnosti [6].

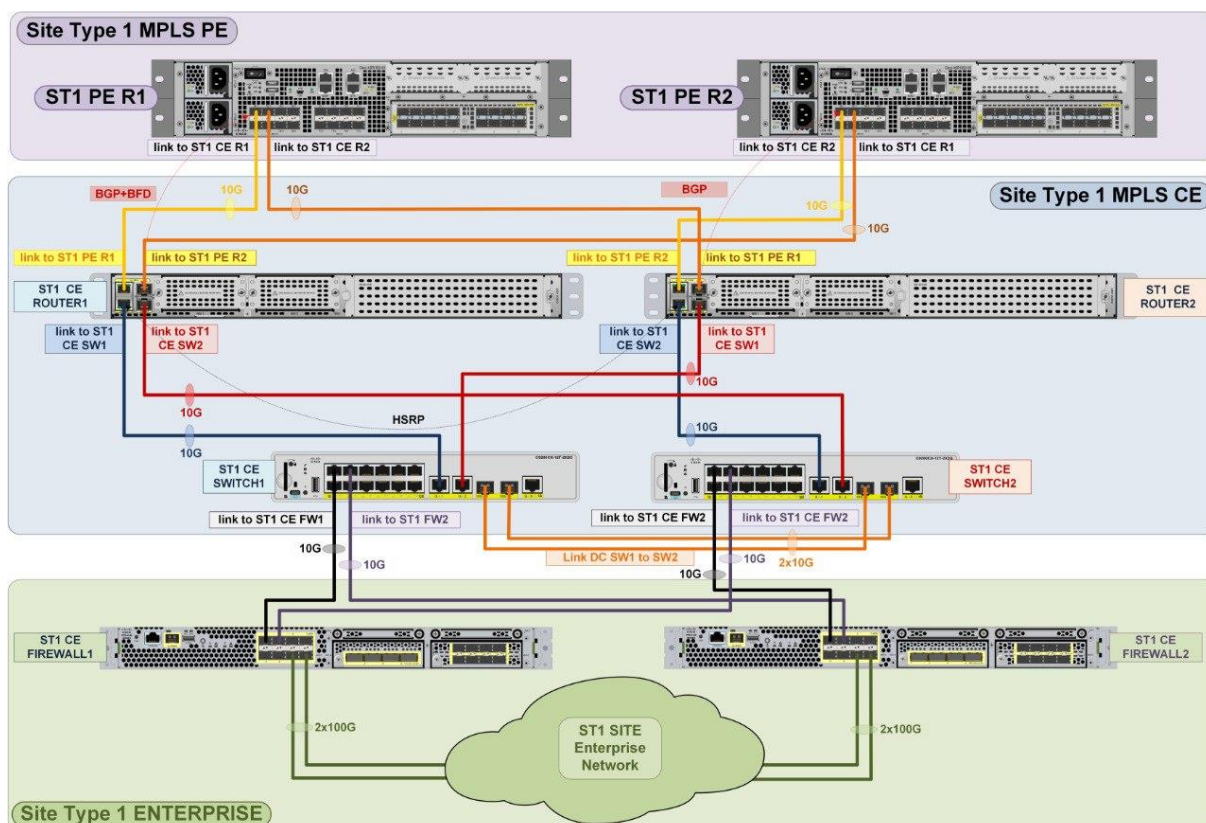


Slika 2: Transportna mreža za prenos informacija između elemenata EES-a

4 INFRASTRUKTURA NA DISTRIBUIRANIM LOKACIJAMA I U ČVOROVIMA

4.1 Lokacija tipa 1

Na lokacijama od velikog značaja za rad EES-a u tehničkom, finansijskom i administrativnom smislu (*site type 1*) implementirana je infrastruktura kao što je prikazano na slici 3. Unutar *enterprise* segmenta, veze su redundantne, optičke, 100 Gbps. Veza između *enterprise* segmenta i MPLS CE segmenta, kao i komunikacija unutar MPLS CE i PE segmenata ostvarena je preko direktnih, optičkih, 10 Gbps veza.

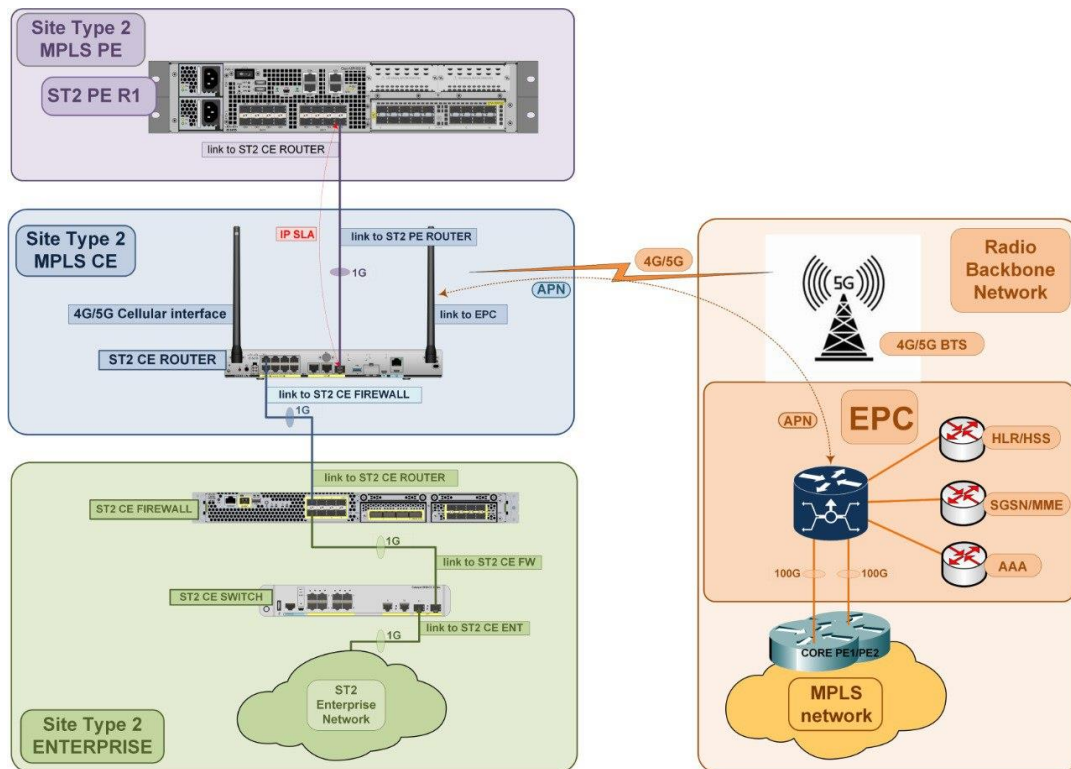


Slika 3: Infrastruktura na lokaciji tipa 1

Redundansa u rutiranju saobraćaja prema MPLS mreži omogućena je upotrebom *hot standby router protocol* (HSRP-a) [7].

4.2 Lokacija tipa 2

Na slici 4 je prikazana infrastruktura za lokacije tipa 2 (*site type 2*). Komunikacija preko optičkih linkova između segmenata realizovana je sa 1Gbps. Na optičkom linku prema MPLS mreži uspostavljeno je mjerenje i monitoring parametara definisanih u okviru *service level agreement* (SLA-a) [8]. Bežični, redundantni link je realizovan upotrebom 4G/5G tehnologije. Komunikacija se ostvaruje preko dodijeljenog APN-a, prema baznoj stanici, odnosno radio *backbone* mreži. Provjera informacija vezanih za korisnika mreže obavlja se u *home location register* (HLR) i *home subscriber server* (HSS) bazama podataka. Za signalizaciju i mobilnost se koriste *serving GPRS support node* (SGSN) i *mobility management entity* (MME). Provjera pristupa mreži vrši se primjenom *authentication, authorization, and accounting* (AAA) *framework*-a.

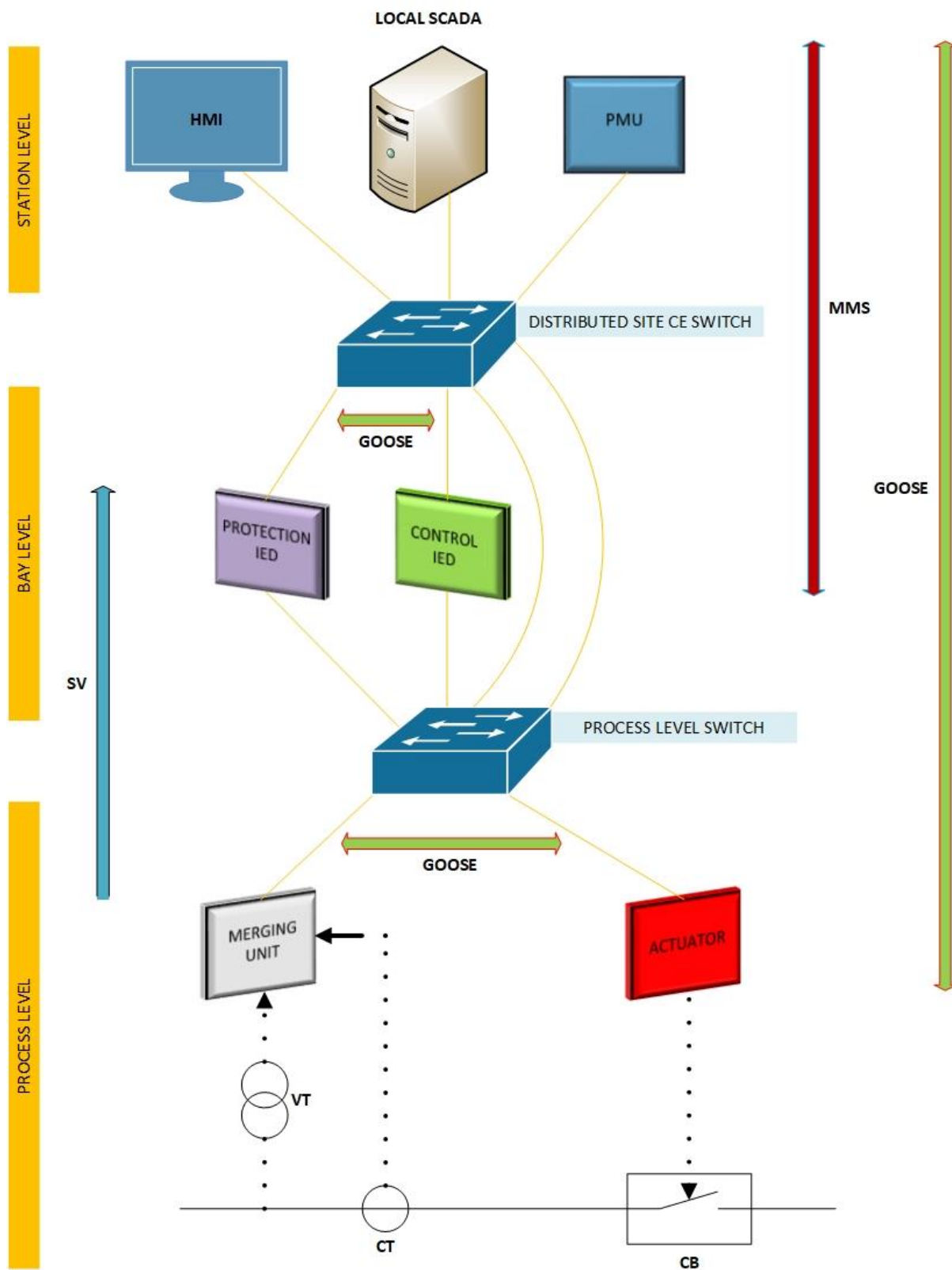


Slika 4: Infrastruktura na lokaciji tipa 2

5 INFRASTRUKTURA DEFINISANA IEC 61850 STANDARDOM

Informacije o stanju elemenata EES-a, odnosno kontrola pojedinačnih elemenata lokalno, ili sa centralnih lokacija, ostvarena je upotrebom IEC 61850 standarda. Slika 5 prikazuje IEC 61850 infrastrukturu [9]. Kontinualne vrijednosti analognih mjerenja na strujnim transformatorima (*current transformer* – CT) i na naponskim transformatorima (*voltage transformer* – VT) šalju se u mjerne jedinice (*merging units* – MU). Ovi uređaji vrše digitalizaciju podataka i upotrebom *sampled values* (SV) protokola periodično šalju podatke, preko procesne *Ethernet* magistrale (*process level switch*), do *intelligent electronic devices* (IED-a) za zaštitu i kontrolu u *bay level*-u. Kontrola prekidača (*circuit breaker* – CB) vrši se, upotrebom mehanizma aktuatora, a na osnovu dobijenih vrijednosti struja i napona. Razmjena poruka između IEC 61850 lokalnih entiteta i prema lokalnoj SCADA vrši se upotrebom *generic object oriented substation event* (GOOSE) protokola. I SV i GOOSE su protokoli nivoa linka. Informacije se prenose kao *multicast* saobraćaj. Upotrebljavaju se *virtual local area network* (VLAN-ovi), a frejmovi sadrže tagove za prioritizaciju. Za prenos kontrolnih komandi, izvještaja, fajlova i logova između IED-a i lokalne SCADA, koristi se *manufacturing message specification* (MMS) protokol. Ovaj protokol je nivoa aplikacije, a podaci se, na transportnom nivou, prenose preko *Transmission Control Protocol* (TCP-a). Protokol funkcioniše prema klijent-server arhitekturi (lokalna SCADA-IED).

Na *station level*-u su: lokalna SCADA, *human machine interface* (HMI) i *phasor measurement unit* (PMU) [10]. Komunikacija od i ka ovim uređajima ostvaruje se preko distribuiranih *switch*-eva (*site type 1* i *site type 2* CE switch). Prijem i obrada podataka, komunikacija sa centralnim SCADA-ma i slanje komandi funkcionalnosti su lokalne SCADA-e. Prikazivanje podataka u realnom vremenu vrši se preko HMI sistema, dok je obrada podataka o fazorima struje i napona rezervisana za PMU-ove.



Slika 5: Infrastruktura prema standardu IEC 61850

6 ZAKLJUČAK

Svaki od elemenata EES-a trebao bi biti dostupan, u komunikacionom smislu, lokalnim i centralnim djelovima NMS-a. Mjerenja vrijednosti parametara elementa EES-a (najčešće struje i napona) realizuju se neprekidno i sa što većom rezolucijom kako bi, na osnovu analize prikupljenih podataka, mogla uslijediti brza reakcija na lokalnom nivou ili sa centralnih lokacija, u onim slučajevima kada se pokaže da je neophodno reagovati na promjenu stanja elementa sistema. Ovi podaci se, zajedno sa podacima o izvršenoj reakciji na promjenu stanja elementa, skladište na centralnim lokacijama. Kada su izmjerene vrijednosti parametara elementa EES-a u predefinisanim granicama podaci se, poslije obrade, direktno skladište na centralnim lokacijama radi mogućnosti kasnijih analiza.

Da bi se prenos podataka do centralnih lokacija o stanju elemenata EES-a i EES-a u cjelini kontinualno odvijao, i podaci koji sadrže naredbe i odluke prenosili od centralnih lokacija do elemenata EES-a, potrebno je omogućiti brz, pouzdan i siguran transport, preko redundantnih linkova. Primarni linkovi uvijek trebaju biti realizovani upotrebom optičke infrastrukture, dok redundantni linkovi, zavisno od važnosti elementa i dostupnosti medijuma za prenos informacija, mogu biti optički ili bežični, najčešće realizovani preko 4G ili 5G mreža mobilnih servisa. Svaki element tj. *enterprise* infrastruktura sa kom je povezan, trebaju biti, u komunikaciji sa MPLS segmentima, zaštićeni *firewall*-ima.

Na osnovu velikog broja, kvalitetnih, uskladištenih podataka koji sadrže vrijednosti izmjerenih parametara elemenata EES-a, u dužem vremenskom periodu, kao i uskladištenih podataka o događajima na elementima sistema, uz upotrebu podataka koji nisu direktno vezani za EES već su dobijeni iz drugih EES-ova ili drugih instanci (hidro-meteorološki podaci), poželjno je vršiti stalne proračune stanja svakog elementa i EES-a u cjelini, upotrebom algoritama neuralnih mreža. Predikcija ponašanja elementa EES-a dobijena na osnovu proračuna njegovog stanja omogućava pravovremene reakcije, prije nego što nastane neželjeni događaj koji se tiče tog elementa ili drugih elemenata, odnosno cijelog EES-a.

7 LITERATURA

- [1] Y. Rekhter, T. Li, S. Hares, "A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)", IETF, Network working group, RFC 4271, january 2006.
- [2] T. Bates, R. Chandra, D. Katz, Y. Rekhter, "Multiprotocol Extensions for BGP-4", IETF, Network working group, RFC 4760, January 2007.
- [3] D. Katz, D. Ward, "Bidirectional Forwarding Detection (BFD)", IETF, RFC 5880, June 2010.
- [4] S. Nadas, "Virtual Router Redundancy Protocol (VRRP) Version 3 for IPv4 and IPv6", IETF, RFC 5798, March 2010.
- [5] E. Rosen, Y. Rekhter, "BGP/MPLS IP Virtual Private Networks (VPNs)", IETF, Network working group, RFC 4364, February 2006.
- [6] G. Soos, F. N. Janky, P. Varga, "Distinguishing 5G IoT Use-Cases through Analyzing Signaling Traffic Characteristics", 43rd International conference on telecommunications and signal processing (TSP), doi: 10.1109/TSP.2019.8769045, pp. 562-565, Budapest, Hungary, July 2019.

- [7] T. Li, B. Cole, P. Morton, D. Li, "Cisco Hot Standby Router Protocol (HSRP)", IETF, Network working group, RFC 2281, March 1998.
- [8] J. Horalek, F. Holik, V. Hurtova, "Implementation and testing of Cisco IP SLA in smart grid environments", 40th International convention on information and communication technology, electronics and microelectronics (MIPRO 2017), doi: 10.23919/MIPRO.2017.7973467, pp. 450-454, Opatija, Croatia, May 2017.
- [9] R. Liposchak and Institute of Electrical and Electronics Engineers C15 working group, "IEEE recommended practice for implementing an IEC 61850-based substation communications, protection, monitoring, and control system", IEEE standards association, IEEE power and energy society, Substations committee, May 2017.
- [10] A. G. Phadke, T. BI, "Phasor measurement units, WAMS, and their applications in protection and control of power systems", Journal of modern power systems and clear energy, vol. 6, pp. 619–629, July 2018.