

DOI: [10.46793/CIGRE37.D2.12](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.D2.12)**D2.12****KOMUNIKACIJA PUTEM ELEKTROENERGETSKIH VODOVA – PRIMENA U PRAKSI****COMMUNICATION VIA POWER LINES – APPLICATION IN PRACTICE****Ivan Marijanović, Aleksandra Kuč Krulj, Marina Ristić***

Kratak sadržaj: Usled potrebe automatizacije svih sistema i procesa, razvijaju se nove tehnologije kako bi se osigurao brz i bezbedan prenos podataka. Komunikacija, koja je neophodna, često stvara potrebe za dodatnim kabliranjem i instalacijom novih infrastrukture, što utiče na samu cenu sistema. Uz dodatno proširivanje mreže, u pojedenim slučajevima ovo mogu biti otežavajuće okolnosti. Tema ovog rada je sve češća primena ostvarivanja komunikacije putem elektroenergetskih mreža i razlozi za njihovu primenu. Komunikacija AC kablovima ili poznata kao PLC (*Power Line Communication*) sve je više prisutna u kućnim i poslovnim mrežama, ali svoju primenu nalazi i u industrijskim mrežama. Pored prednosti koje se ostvaruju primenom ovog vida komunikacije, biće ukazano i na nedostatke koji postoje, ali koji će vremenom biti sve manji, usled razvoja tehnologije. Kroz primer solarne elektrane biće predstavljeno gde energetske kablovi kao medijum mogu poboljšati performanse sistema, kao i tačke gde njihova primena nije poželjna, usled ograničenja koja imaju.

Ključne reči: *Power Line Communication, Power Line Carrier Communication, solarne elektrane, invertori, SCADA, MBUS protokol, energetska automatizacija, infrastrukturna optimizacija*

Abstract: Due to the need to automate all systems and processes, new technologies are being developed to ensure fast and secure data transfer. Communication, which is necessary, often creates the need for additional cabling and installation of new infrastructure, which affects the price of the system itself. Along with additional network expansion, in some cases this can lead to aggravating circumstances. The topic of this paper is the increasingly common application of communication through power lines and the reasons for their application. Communication via AC cables, also known as PLC (*Power Line Communication*) is increasingly applied in home and business networks, but it also finds its application in industrial networks. In addition to the advantages achieved by applying this type of communication, the disadvantages that exist also will be presented, but which will decrease over time, due to the development of technology. Using the example of an utility solar power plant, a case will be presented in which energy cables as a medium can improve the performance of the system, as well as the points where their application is not desirable, due to their limitations.

* Ivan Marijanović, Energoprojekt Entel, imarijanovic@ep-entel.com
Aleksandra Kuč Krulj, Energoprojekt Entel, akuckrulj@gmail.com
Marina Ristić, Energoprojekt Entel, mristic@ep-entel.com

Key words: *Power Line Communication, Power Line Carrier Communication, solar power plants, inverters, SCADA, MBUS protocol, power automation, infrastructure optimization*

1 UVOD

Usled potrebe automatizacije svih sistema i procesa, razvijaju se nove tehnologije kako bi se osigurao brz i bezbedan prenos podataka. Komunikacija, koja je neophodna, često stvara potrebe za dodatnim kabliranjem i instalacijom novih infrastrukture. Time utiče na samu cenu sistema, kao i dodatno proširivanje mreže, što u pojedinim slučajevima mogu biti otežavajuće okolnosti.

Tema ovog rada je primena ostvarivanja komunikacije putem elektroenergetskih mreža i razlozi za njihovu primenu. Komunikacija putem elektroenergetskih vodova poznata kao *Power Line Communication* (u daljem tekstu PLC tehnologija) sve je više prisutna u kućnim i poslovnim, ali svoju primenu nalazi i u industrijskim mrežama. Pored prednosti koje se ostvaruju primenom ovog vida komunikacije, biće ukazano i na nedostatke koji postoje, ali koji će vremenom biti sve manji usled razvoja tehnologije. Kroz primer solarne elektrane biće predstavljeno gde energetski kablovi kao medijum mogu poboljšati performanse sistema, kao i tačke gde njihova primena nije poželjna, usled ograničenja koja imaju.

Kada su u pitanju stambene jedinice sa starom infrastrukturom, koje želimo da umrežimo, koriste se PLC adapteri. Jedan adapter se priključuje u utičnicu blizu rutera, a drugi u prostoriji gde na primer želimo da koristimo internet ili povežemo uređaj. Na ovaj način se postiže vrlo jednostavno rešenje, gde se koristi već postojeća infrastruktura, što olakšava rešavanje problema i uštedu usled korišćenja postojeće infrastrukture.

U industriji, sve češća primena PLC tehnologije predstavlja efikasnu i ekonomičnu tehnologiju za prenos podataka omogućavajući integraciju i automatizaciju u postrojenjima.

Važno je naglasiti da se PLC tehnologija može koristiti za različite naponske nivoe. To zahteva određene razlike, poput razlike u zahtevima i kompleksnosti uređaja, ali osnovna funkcija za sve nivoe je ista. Viši naponski nivoi (za koje se češće koristi naziv *Power Line Carrier Communication* ili PLCC) zahtevaju i kompleksnije uređaje, striktnu regulatornu smernicu, pažljivo upravljanje elektromagnetnim smetnjama i sl.

U ovom radu biće predstavljena analiza sistema gde se razmatra kompletan prenos signala PLC tehnologijom za različite naponske nivoe na primeru solarne elektrane.

Cilj rada je otkrivanje opravdanosti i pouzdanosti ove tehnologije kako bi se dalje razmatrala za širu upotrebu.

1.1 Dosadašnja primena u Srbiji i regionu

U Srbiji i regionu, primena PLC tehnologije u elektroenergetskim sistemima je još uvek u fazi razvoja, ali beleži značajne pomake, posebno u kontekstu digitalizacije i modernizacije mreža. U distribuciji električne energije, PLC tehnologija najčešće se koristi na niskonaponskom nivou, prvenstveno u pametnim mrežama (*Smart Grids*) i AMI (*Advanced Metering Infrastructure*) sistemima, gde omogućava daljinsko očitavanje brojila i upravljanje potrošnjom.

U praksi su se pokazale kao uspješne primene PLC komunikacije u niskonaponskim mrežama Elektro distribucije Srbije, ali se s obzirom na ograničenja propusnog opsega i prisustvo šuma na višim naponima, implementacija na srednjem i visokom naponu realizuje kroz specijalizovanu opremu, često u saradnji sa međunarodnim partnerima i proizvođačima invertora, releja i upravljačkih sistema.

U regionu, posebno u Hrvatskoj i Sloveniji, PLC tehnologija se koristi za nadzor i upravljanje srednjenaponskim mrežama, uključujući automatizaciju trafostanica i integraciju obnovljivih izvora energije. U Hrvatskoj, HEP Distribucija je implementirala PLC rešenja za komunikaciju između brojila i centralnog sistema za upravljanje, što je omogućilo efikasnije praćenje potrošnje i bržu detekciju kvarova. Ovi projekti pokazuju potencijal PLC tehnologije za unapređenje pouzdanosti i efikasnosti elektroenergetskih sistema u regionu.

S obzirom na porast broja velikih fotonaponskih elektrana i trend digitalizacije elektroenergetskih sistema, očekuje se veće interesovanje za PLC tehnologiju u narednim godinama, posebno u kontekstu integracije obnovljivih izvora i potrebe za efikasnim upravljanjem sistemom bez dodatnog komplikovanja infrastrukturnih zahteva.

Na osnovu dosadašnjih istraživanja i prakse u Evropi i regionu, PLC tehnologija je uspešno primenjena u:

- Austriji (Linz): Pilot-projekat za daljinsko upravljanje brojilima i tarifama.
- Švedskoj (Gotland): PLC korišćen za kućnu automatizaciju i upravljanje potrošnjom.
- Poljskoj i Nemačkoj: PLC integrisan u pametne mreže za komercijalne korisnike.
- Hrvatskoj: PLC korišćen u sistemima automatizacije niskonaponskih mreža i u distributivnim TS.

Primena u regionu ukazuje na jaku motivaciju za korišćenje PLC-a u distribuciji, ali i na izazove u radu sa srednjenaponskim i visokonaponskim sistemima.

Postoji snažan interes i praksa u regionu za i korišćenje PLC tehnologije u distribuciji, ali su izazovi na višim naponskim nivoima (npr. 110 kV) već tada bili identifikovani kao kompleksni.

1.2 PLC tehnologije u IoT scenarijima

Kontinuirani razvoj komunikacionih tehnologija predstavlja neophodnu osnovu za dalji razvoj IoT tehnologija (eng. *Internet of things*). Uvođenje IoT tehnologija dovodi do neizbežnog porasta broja umreženih senzora i pametnih uređaja, pa samim tim raste i količina podataka koje je potrebno preneti kroz mrežu. Da bi se ispunili svi zahtevi protoka i da bi se obezbedila pouzdana, bezbedna i efikasna komunikacija razvijene su različite tehnologije pristupa.

IoT komunikacione tehnologije se mogu podeliti u dve kategorije: bežične (npr. Bluetooth, Wi-Fi i ZigBee) i žičane (npr. industrijski field bus i PLC). Žičane komunikacione tehnologije predstavljaju pouzdanije rešenje jer ne podležu uticaju okruženja u značajnoj meri, kao što je to slučaj kod bežičnih tehnologija. S druge strane, njihova mana bi mogla biti cena potrebna za polaganje novih instalacija, što je korišćenjem PLC tehnologije prevaziđeno. PLC koristi postojeće električne vodove za prenos podataka, omogućavajući povezivanje krajnjih uređaja bez potrebe za polaganjem novih instalacija. U zavisnosti od frekventnog opsega i brzine prenosa, PLC se dalje deli na uskopojasni PLC, PLC srednjeg opsega i širokopojasni PLC.

Uskopojasni PLC (definisan standardom IEEE P1901.2) se primenjuje kod scenarija u kojima nije neophodan protok veći od 150 kbps i gde kašnjenje ne predstavlja problem za ispravno tumačenje signala na prijemu. Prenos signala je moguć i na rastojanjima većim od 1 km, što ovu vrstu PLC tehnologije čini pogodnom za primene u automatizaciji niskonaponske i srednjenaponske prenosne mreže tj. za daljinsko očitavanje parametara za koje nije važno da budu prikupljeni u realnom vremenu.

Širokopojasni PLC (definisan standardom IEEE P1901) obezbeđuje protok do čak 1.5 Gbps uz minimalno kašnjenje. Maksimalno rastojanje pri prenosu signala je u ovom slučaju 200 m. Širokopojasni PLC može se koristiti za povezivanje domaćinstava na internet.

PLC srednjeg opsega (definisan standardom IEEE P1901.1) omogućava prenos podataka sa protokom do 2 Mbps i malim kašnjenjem. Ovaj tip PLC tehnologije je samim tim pogodan za IoT scenarije gde je neophodna visoka pouzdanost i kontrola u realnom vremenu kao što je npr. upravljanje pametnim semaforima ili za kontrolu parametara u okviru solarnih elektrana.

PLC-IoT je zasnovan na standardu IEEE 1901.1 i PLC tehnologiji srednjeg opsega, orijentisanoj na IoT scenarije. Koristi se frekvencijski opseg u rasponu od 0.7 MHz do 12 MHz, koji karakteriše dobar kvalitet kanala sa niskim i stabilnim šumom. PLC-IoT koristi OFDM modulaciju signala, koja nudi visoku iskorišćenost frekvencijskog opsega i visoku otpornost na interferenciju. Modulacijom digitalnih signala nosiocima visoke učestanosti obezbeđuje se veći protok informacija. Mana ovakvog prenosa informacija je u tome što u slučaju većeg opterećenja energetskih vodova dolazi do slabljenja snage signala nosioca, pa se samim tim smanjuje rastojanje na kojem je moguće preneti signal. Sa druge strane, u slučaju da energetski kablovi nisu opterećeni, signal je moguće preneti i na rastojanju od više kilometara.

Tradicionalni PLC komunikacioni model obuhvata fizički sloj, sloj linka podataka i sloj aplikacije. U ovom slučaju sloj linka podataka je taj koji pruža usluge prenosa podataka sloju aplikacije. Kod PLC-IoT mrežna arhitektura je izmenjena po ugledu na OSI model, tako da su dodati mrežni sloj i transportni sloj. Mrežni sloj implementira standardnu IP mrežnu komunikaciju preko TCP/IP. Ovo omogućava aplikacijama da koriste mrežni sloj sposoban i za korišćenje IPv6, dok transportni sloj obezbeđuje pouzdan prenos podataka s kraja na kraj.

2 PRENOS PODATAKA PUTEM PLC TEHNOLOGIJE

PLC je tehnologija u kojoj se električne vodovi koriste kao medijum za prenos podataka. To iziskuje da se signali koji se šalju putem PLC-a moraju modifikovati, kako bi se uklopili u električnu mrežu, koja je projektovana za prenos naizmenične struje.

Za PLC sistem su neophodne visoke frekvencije (1-100 MHz), kako bi se omogućio normalan prenos signala, a da se pri tome ne ometa struja u mreži.

Modulacija omogućava prenos signala, a da pri tome ne remetimo struju u mreži. Postoje raznovrsne tehnike modulacije pomoću kojih se prilagođava prenos signala specifičnim uslovima i potrebama, ali konkretno za PLC tehnologiju, prepoznatljivi su:

- OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) i
- QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*).

Sam izbor tipa modulacije u PLC tehnologiji zavisi od više faktora:

Kvalitet i dužina linije: duže linije sa slabijom kvalitetom mogu zahtevati robusnije tehnike modulacije (npr. BPSK ili QPSK) za bolju otpornost na smetnje;

Brzinu prenosa: Za veće brzine, koriste se složenije modulacije poput QAM;

Otpornost na šum i smetnje: Mreže sa visokim nivoima elektromagnetnih smetnji ili drugih izvora smetnji mogu zahtevati primenu OFDM-a ili jednostavnijih modulacija koje su robusnije na smetnje;

Specifične aplikacije: Neke aplikacije (npr. IoT uređaji) mogu zahtevati manju brzinu prenosa, dok druge (npr. video streaming) zahtevaju visoke brzine i efikasnost.

Pomenute OFDM i QAM, možda okarakterisane kao modulacije sa najčešćom primenom, omogućavaju visoke brzine i efikasan prenos. Pored modulacije, koraci koji se preduzimaju za neometan prenos signala, i nesmetani prenos AC struje, su i:

Filtriranje i izolacija: PLC uređaji koriste filtre za izolaciju signalnog opsega i sprečavanje interferencije sa AC naponom koji teče kroz iste žice;

Ojačavanje signala: - električne instalacije mogu imati gubitke tokom prenosa, signali u PLC sistemima obično se pojačavaju u različitim tačkama kako bi se osigurala stabilnost i kvalitet veze;

Šum i smetnje: Zbog same prirode električnih kablova (koji nisu prvobitno dizajnirane za prenos podataka), PLC signali mogu biti podložni različitim vrstama smetnji, kao što su elektromagnetne smetnje ili smetnje od drugih električnih uređaja na mreži. Kako bi se smanjile ove smetnje, primenjuju se različite tehnike kodiranja i filtriranja.

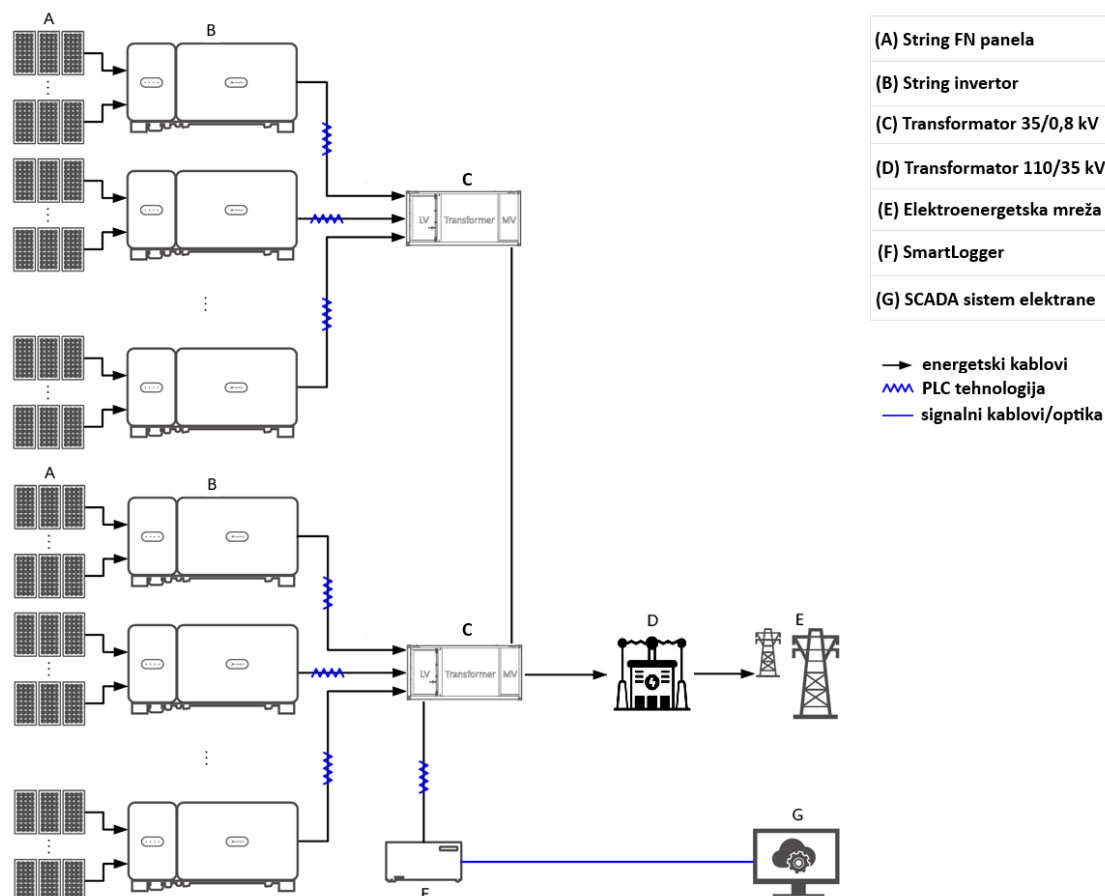
Kako se na strani izvora modulira signal i vrši niz gore navedenih operacija, i kao takav se šalje kroz medijum elektroenergetskih vodova kao visokofrekventni signal, na strani prijema signal se demodulira. To znači da se signali podataka odvajaju od visokofrekventnih signala, i na taj način vraćaju u originalan oblik, skroz ih odvajajući od struje.

3 PRIMENA PLC TEHNOLOGIJE NA KONKRETNOM PRIMERU U PRAKSI

PLC predstavlja tehnologiju koja omogućava prenos podataka korišćenjem postojećih elektroenergetskih vodova, bez potrebe za dodatnim komunikacionim kablovima. Ova tehnologija može se uspešno primenjivati na različitim naponskim nivoima, od niskog do srednjeg i visokog napona, što je čini posebno atraktivnom za automatizaciju, nadzor i upravljanje u elektroenergetskim sistemima.

Na osnovu svega navedenog, u nastavku je predstavljena upotreba PLC vida komunikacije kroz primer solarne elektrane. Kako je konkretna solarna elektrana planirane snage preko 10 MW, analiziraće se jedno fotonaponsko polje, odnosno individualni strujni krug, kao funkcionalna celina snage do 10 MW na strani predaje snage ka mreži, a kao primer rešenja koje se trenutno češće nalazi u Srbiji i regionu.

Sistem solarne elektrane će se predstaviti kroz 0,8 kV kablove koji predstavljaju vezu invertora u polju i obližnjih step-up trafostanica sa kojima se povezuju, a zatim kroz 35 kV kablove koji predstavljaju jedan strujni krug koji se dovodi do objekta mesta priključenja, ili u ovom slučaju izvodne 35 kV ćelije unutar glavne transformatorske stanice 110/35 kV putem koje se dalje ostvaruje priključenje na prenosni sistem.



Slika 1: Princip rada

U kontekstu fotonaponskih elektrana, PLC tehnologija može se primeniti na naponskom nivou od 0,8 kV, koji tipično predstavlja interkonekciju između invertora u polju i obližnjih step-up trafostanica. Korišćenjem PLC modula ugrađenih u invertore i odgovarajuće PLC prijemnike u trafostanicama, omogućava se dvosmerna komunikacija neophodna za prenos informacija o proizvodnji, greškama, statusima i komandama, bez potrebe za dodatnom komunikacionom infrastrukturom. Ovakva primena doprinosi smanjenju ukupnih troškova i pojednostavljuje projektovanje elektrane, naročito u teškim terenskim uslovima gde polaganje dodatnih kablova može biti izazovno.

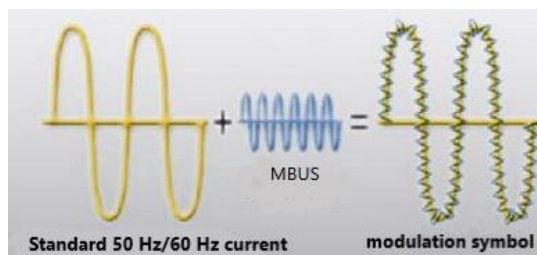
Na ovom primeru razmatrana je oprema koja nudi rešenja koja omogućavaju efikasnu integraciju PLC tehnologije u elektroenergetske sisteme. Konkretno, invertori snage 300 kW i prateće 35/0,8 kV trafostanice dizajnirani su za rad u zahtevnim uslovima i podržavaju napredne komunikacione protokole.

Posmatrani invertori su trofazni uređaji koji podržavaju komunikacione protokole kao što su RS485 i MBUS (dužine do 1000 m), omogućavajući integraciju PLC sistema za prenos podataka preko postojećih elektroenergetskih vodova (u ovom slučaju su dužine do 300 m).

Trafostanice, na ovom primeru kontejnerskog tipa snage 3.300 kVA i 6.000 kVA respektivno, nude izlazne napone do 35 kV i opremljene su naprednim zaštitnim sistemima, uključujući prenaponske odvodnike i zaštitu od kratkog spoja. Ove trafostanice su kompatibilne sa invertorima i omogućavaju radijalno povezivanje u strujne krugove, što je ključno za povezivanje sa prenosnim sistemom.

U praksi, kombinacija ovakvih invertora i trafostanica omogućava efikasno upravljanje i nadzor fotonaponskih elektrana, smanjujući potrebu za dodatnom komunikacionom infrastrukturom. Integracija PLC komunikacije omogućava prenos podataka o performansama sistema, detekciju kvarova i daljinsko upravljanje, što je ključno za optimizaciju rada i održavanje elektrane.

Trafostanice su tipsko rešenje koje integriše 35/0,8 kV transformator, RMU (35 kV sklopna oprema), zaštitu i merenje, niskonaponsku opremu i interfejs invertora. PLC komunikacija u ovim sistemima se zasniva na MBUS protokolu na 0,8 kV strani, i koristi se za komunikaciju između invertora i trafostanice, a zatim ka SmartLogger-u.



Slika 2: MBUS protokol

Posmatrano fotonaponsko polje sadrži 33 invertora koji, umesto serijskim putem, korišćenjem PLC tehnologije imaju direktnu vezu sa transformatorima u polju. Na ovaj način se eliminiše upotreba preko 7 km komunikacionih kablova. Kako konkretna solarna elektrana ima 11 fotonaponskih polja, upotreba komunikacionih kablova na nivou kompletne elektrane smanjuje se za preko 80 km ili više u zavisnosti od stanja terena i načina polaganja niskonaponskih kablova u rovove namenjene za povezivanje FN panela sa njihovim invertorima.

4 PRIMENA NA VIŠIM KABLOVSKIM NIVOIMA

PLC komunikacija ne prolazi kroz transformator, tj. ne prelazi sa 0,8 kV na 35 kV stranu bez konverzije. Trafostanice nemaju ugrađene PLC modeme za 35 kV stranu ni kapacitivne spojnice koje bi omogućile komunikaciju između trafostanica putem srednjenaponskog kabla.

Korišćenje 35 kV kabla za prenos komunikacije izlazi iz standardnog okvira ovakvih sistema i zahteva dodatnu opremu specijalizovanih proizvođača na srednjenaponskoj strani.

PLC sistemi predstavljaju izazov na 35 kV nivou, jer se sastoje od sledećih ključnih komponenti, posebno na srednjem i visokom naponskom nivou:

- Kapacitivna spojnica (Coupling Capacitor): Omogućava da visokofrekventni signal (koji nosi komunikaciju) prođe u energetski vod, dok blokira niskofrekventnu struju (50/60 Hz).
- Line trap (Wave trap): Instalira se na ulazu u transformatorsku opremu kako bi sprečio prolazak PLC signala u transformator i time omogućio signalizaciju samo kroz željeni pravac.
- Line Matching Unit (LMU): Prilagođava impedansu za optimalan prenos signala.
- PLC modem: Kodira/dekodira podatke na visokofrekventnom signalu
- Hibridni sklopovi i filteri: Omogućavaju filtriranje višestrukih komunikacionih kanala bez interferencije.
- Oscilator i pojačavači: Generišu i pojačavaju frekvencije za stabilan prenos signala na elektroenergetskom vodu.
- Napajanje i zaštita sistema po potrebi.

Ukoliko se PLC koristi na 35 kV nivou, preporučuje se primena ovih komponenti radi stabilnosti signala i zaštite opreme. Ovo rešenje nije niskobudžetno - oprema za SN nivo je skuplja od optike i zahteva detaljniju razradu isplativosti.

Ključni izazovi na višim naponskim nivoima su:

- Elektromagnetske smetnje (EMI).
- Prigušenje signala i degradacija kvaliteta na dužim trasama.
- Prepreke pri prelasku kroz transformatore.
- Nepostojanje jedinstvene standardizacije za PLC na visokom naponu.

Pored korišćenja kapacitivnih spojki i line trap-ova, rešenja se mogu naći implementacijom OFDM, FH, DSSS modulacionih tehnika za otpornost na šum, redundantnim komunikacionim protokolima, ili prosto upotrebom PLC tehnologije samo do tačke konverzije, nakon čega se prelazi na optički prenos podataka.

Ova rešenja mogu znatno unaprediti pouzdanost komunikacije u sistemima koji koriste PLC kao osnovu za nadzor i upravljanje.

U Tabeli 1 prikazano je poređenje primene PLC tehnologije na niskonaponskom, srednjenaponskom i visokonaponskom nivou.

Tabela 1: Poređenje po naponskim nivoima

Naponski nivo	Primena PLC tehnologije	Prednosti	Ograničenja
0,8 kV (niski napon)	Između invertora i trafostanica	- Odlična stabilnost signala- Kratke trase (10–100 m)- Direktna komunikacija MBUS protokolom	- Ograničen broj uređaja po kablju (adresiranje)
35 kV (srednji napon)	Povezivanje trafostanica koje formiraju strujne krugove	- Moguća komunikacija bez dodatnih kablova- Efikasna za topologije sa radijalnim vezama- Idealno za jedan strujni krug do Logger-a	- Slabljenje signala na većim dužinama (>300 m)- Potrebna dodatna zaštita od prenapona- Nije moguće preneti signal kroz transformator bez posebnih uređaja (coupleri, kapacitivni spojevi)
110 kV (visoki napon)	Tehnički moguća ali nepreporučljiva u standardnim SCADA vezama	- Ušteda na optičkom kablju teoretski moguća	- Veoma jak EMI- Skupe i komplikovane spojne jedinice- Nepouzdanost u radu- Skoro uvek potrebna optika (zbog udaljenosti i izolacije)

Na osnovu svega navedenog, presek različitih naponskih nivoa je sledeći:

0,8 kV tj. niski napon – najpogodniji za PLC tehnologiju (npr. MBUS).

35 kV tj. srednji napon – moguće i možda isplativo za jedan strujni krug (npr. između trafostanice i Logger-a), ali se signal mora prevesti na optiku pre ulaska u glavnu trafostanicu.

110 kV tj. visoki napon – i dalje nepreporučljivo za PLC. Optika ostaje standard zbog sigurnosti, dometa i EMI otpornosti.

5 ZAKLJUČAK

PLC tehnologija predstavlja oblast koja se kontinuirano razvija, kako u pogledu prenosnih kapaciteta, tako i u pogledu otpornosti na smetnje i pouzdanosti u realnim uslovima rada.

Neke od prednosti korišćenja ove tehnologije su:

- **Smanjenje broja kablova** – koristi postojeće energetske vodove za komunikaciju, čime se izbegava polaganje dodatnih optičkih ili signalnih kablova.
- **Brža instalacija** – jednostavnija i brža implementacija u poređenju sa optikom.
- **Niži troškovi** – posebno izraženo kod projekata sa velikim brojem uređaja na bliskim lokacijama (npr. solarni paneli i invertori).
- **Idealna za distribuirane sisteme** – efikasna za lokalnu komunikaciju između invertora i trafostanica.

PLC tehnologija takođe ima i svoje mane, među kojima su:

- **Ograničenja dometa** – signal degradira sa dužinom kabla, posebno kod srednjih i visokih napona.
- **Smetnje (EMI)** – visokonaponski vodovi mogu generisati elektromagnetne smetnje koje otežavaju komunikaciju.
- **Zavisnost od kvaliteta uzemljenja i spojeva** – loši kontakti i šum mogu potpuno onemogućiti komunikaciju.
- **Problemi pri prelasku naponskih nivoa** – na primer, signal ne može bez dodatnih komponenti proći kroz transformator.

Iako se danas njena primena u energetici dominantno vezuje za niskonaponski nivo, ovaj rad je imao za cilj da istakne njene prednosti, promoviše njenu upotrebu u okviru fotonaponskih solarnih elektrana i podstakne njeno šire prihvatanje upravo na tom nivou. Sa razvojem opreme i standarda, očekuje se da će se mogućnosti primene PLC tehnologije proširivati i na srednje, pa čak i visoke naponske nivoe, čime bi se dugoročno mogla postići još veća fleksibilnost i ekonomičnost u projektovanju komunikacionih sistema u elektroenergetskoj infrastrukturi.

6 LITERATURA

- [1] Ivan R. S. Casella, Alagan Anpalagan, Power Line Communication Systems for Smart Grids, 2nd edition, The Institution of Engineering and Technology
- [2] Texas Instruments, Power Line Communication in Solar Applications
- [3] Huawei Technologies, Fusionsolar Utility Smart PV & ESS Solution, solar.huawei.com