

mr.sc. Zdravko Lipošćak, dipl. ing. el.
HEP-Operator distribucijskog sustava
d.o.o.
zdravko.liposcak@hep.hr

mr.sc. Ivica Hadjina, dipl. ing. el.
HEP-Operator distribucijskog sustava
d.o.o.
ivica.hadjina@hep.hr

Petar Rašić, mag. ing. el.
HEP-Operator distribucijskog
sustava d.o.o.
petar.rasic@hep.hr

Marko Lihter,
mag.ing.inf.et.comm.techn.
HEP-Operator distribucijskog sustava
d.o.o.
marko.lihter@hep.hr

Marko Mamić, mag. ing.el.
HEP-Operator distribucijskog sustava
d.o.o.
marko.mamic@hep.hr

DISTRIBUCIJSKA MREŽA KAO KOMUNIKACIJSKI KANAL

SAŽETAK

Korištenjem PLC (Power Line Communication) komunikacije za daljinsko očitavanje i upravljanje brojilima, elektroenergetska distribucijska mreža sve više dobiva ulogu podatkovnog komunikacijskog kanala. Komunikacijski kanal je put prijenosa informacije i u pravilu je ili žični (telefonska parica, koaksijalni kabel, optički kabel) ili bežični (radio, infracrveni, mikrovalni, satelitski). Korištenje postojećih energetske vodova kao komunikacijskih kanala ima određene prednosti, izbjegava se investicija ožičenja, komunikacijski kanal je u vlasništvu operatora distribucijskog sustava koji ima obvezu i potrebu izgradnje sigurnog podatkovnog kanala između brojila i centralnog sustava. Nedostaci korištenja distribucijske mreže za potrebe komunikacije su vezani uz činjenicu da distribucijska mreža nije dizajnirana kao komunikacijski kanal. Jedan od osnovnih problema, koji smo pokušali opisati u ovom radu je promjenjiva impedancija mreže zbog promjenjivog opterećenja. Osim analize komunikacijskog kanala dana je i kratka usporedba energetske i komunikacijske pogleda na distribucijsku mrežu te određeni problemi u korištenju uobičajenih metoda predviđenih za analizu namjenskih komunikacijskih vodova.

Glavne riječi: komunikacijski kanal, distribucijska mreža, PLC

DISTRIBUTION NETWORK AS A COMMUNICATION CHANNEL

SUMMARY

By using PLC (Communication Power Line) communications for remote reading and meter management, the power distribution network increasingly gains the role of the data communication channel. The communication channel is a way of transmitting information and is usually either wireless (radio, infrared, microwave, satellite) or wired (telephone cable, coaxial cable, optical cable). The use of existing power lines as communication channels has certain advantages, the investment in wiring is avoided and the communication channel is owned by the distribution system operator which has the obligation and the need to build secure data channels between the scales and the central system. The disadvantages of using distribution networks for communication purposes are related to the fact that the distribution network is not designed as a communication channel. One of the basic problems we tried to describe in this paper is the variable network impedance due to variable loads. Apart from the analysis of the communication channel there is also a brief comparison of the energy and communication view on the distribution network as well as certain problems in the use of common methods for the analysis of dedicated communication lines.

Keywords: communication channel, distribution network, PLC

1. UVOD

Elektroenergetska mreža za distribuciju električne energije ima primarni zadatak opskrbe električnom energijom krajnjih korisnika mreže. Cijeli dizajn distribucijske mreže, prostorno rasprostiranje, način pogona i vođenja, namijenjen je izvršenju primarnog zadatka. Distribucijska mreža ima i sve veću ulogu u preuzimanju električne energije iz distribuiranih proizvodnih jedinica. Povećanje broja distribuiranih izvora zahtijevati će izmjenu originalnog dizajna, jer dosadašnji jednosmjerni tok energije postaje u sve većem dijelu mreže dvosmjernan. Pored ovih energetske izazova, komunikacija putem elektroenergetske mreže postala je ozbiljan izbor za ostvarenje ideje „pametne“ ili „napredne“ distribucijske mreže. Napredna mreža je elektroenergetska mreža koja na troškovno učinkovit način može integrirati ponašanje i djelovanje svih priključenih korisnika mreže radi očuvanja ekonomski učinkovitog i održivog elektroenergetskog sustava s niskim gubicima i visokim razinama kvalitete te sigurnosti opskrbe električnom energijom.

Distribucijska mreža dizajnirana je za prijenos stabilne sinusoide mrežnog napona frekvencije 50 Hz i stabilne razine nazivnog napona koji se dijeli na srednji napon 10 kV, 20 kV, 35(30) kV i niski napon 230/400 V. Komunikacijske mreže dizajniraju se u pravilu za prijenos više frekvencija signala, ali se optimiziraju za određeni raspon frekvencija ili frekvencijsko područje. Za razliku od stabilne sinusoide u elektroenergetskoj mreži, sinusoida signala u komunikacijskoj mreži „izobličuje“ se kodiranjem za potrebe prijenosa podataka te se ovisno o vrsti kodiranja mijenja razina amplitude, frekvencija te fazni pomak.

Frekvencijska područja u komunikacijama dijele se od ekstremno niskih frekvencija (od 3 Hz do 30 Hz), do ekstremno visokih frekvencija (od 30 GHz do 300 GHz). Za komuniciranje se uobičajeno koriste signali amplituda u području od μV do kV te snaga od nekoliko μW do nekoliko MW. Zbog ovako velike dinamike razina, fizikalne vrijednosti u komunikacijskoj tehnologiji se često izražavaju jedinicom decibel (oznaka dB, $1 \text{ dB} = 1/10 \text{ B}$, A. G. Bell), kao iznimno dopuštene izvan međunarodnog sustava mjernih jedinica (SI).

2. Komunikacija putem energetske distribucijske mreže

Distribucijska elektroenergetska mreža koristi se kao komunikacijski kanal već od 30-ih godina prošlog stoljeća za prijenos signala za potrebe mrežnog tonfrekventnog upravljanja (MTU) [1]. Osnovna ideja komunikacije putem energetske vodova (PLC - Power Line Communication) je korištenje postojeće infrastrukture energetske vodova za prijenos podataka čime se izbjegavaju troškovi postavljanja namjenskih komunikacijskih vodova.

Za razliku od vodova dizajniranih za prijenos podataka, kao što je koaksijalni kabel ili neoklopljena upletena parica, energetske niskonaponske vodovi predstavljaju iznimno teško okruženje za komunikaciju. To je prije svega zbog prisutnosti šuma (pozadinska buka, uskopojasni i impulsni šum), snage signala šuma, vremenski nepredvidljive promjene ukupne impedancije voda i priključenih trošila te prigušenja signala. PLC tehnologija omogućava transformaciju energetske mreže u informacijsku podatkovnu mrežu. Tipično se za komuniciranje putem energetske mreže koriste dva voda koji imaju isti presjek, a komunikacija se odvija istovremeno, istim vodovima kojima se i krajnji kupci opskrbljuju električnom energijom. Zbog toga je za komunikacijske signale definirana maksimalna razina signala kako se ne bi narušila kvaliteta mrežnog napona, a zbog utjecaja na druge komunikacije ograničava se i frekvencijski spektar koji je dozvoljen za distribucijsku djelatnost [2].

Komunikacija putem distribucijske mreže moguća je s različitom efikasnošću u širokom frekvencijskom rasponu. Za komuniciranje putem ekstremno niskih frekvencija (od 3 do 30 Hz) distribucijska mreža se koristila kao odašiljačka antena. Dimenzije antena za ovo frekvencijsko područje su nekoliko desetaka kilometara. Zbog vrlo male efikasnosti na ovom frekvencijskom području potrebna je velika snaga odašiljača pa su se počele graditi zasebne odašiljačke antene koje izgledaju poput energetske distribucijske mreže, jer se antena izvodi kao zračni vod na stupovima u duljini od npr. 60 km (ZEVS odašiljač, Murmansk) ili 52 km (USA, Michigan, snaga odašiljača 5 MW). Signal ovih odašiljača se može primiti gotovo bilo gdje na Zemlji, a namjena je u pravilu jednosmjerna komunikacija s podmornicama, budući da signali ovih frekvencija mogu prodrijeti u vodu na dubinu od nekoliko desetaka metara.

Frekvencija MTU signala je uobičajeno u području od 200 do 450 Hz. Zbog povijesnog razvoja dominira utiskivanje signala na sredjenaponskoj razini, a u novije vrijeme signal se utiskuje na visokonaponsku razinu 110 kV. Utiskivanje signala obavlja se filtrima namještenim na izabranu frekvenciju čija je uloga da galvanski odvoji mrežu od predajnika MTU signala te da priguši utjecaje iz mreže na predajnik.

Maksimalno dozvoljena razina MTU signala u elektrodistribucijskoj mreži je ograničena s jedne strane normama za konstrukciju i tipsko ispitivanje MTU prijemnika na oko $10 \times U_{min}$ prorade, s najvišom razinom od 5 % U_n , što za fazni napon 230 V iznosi najviše 11,5 V [3].

Poznavanje načina širenja komunikacijskih valova viših frekvencija kroz distribucijske vodove omogućilo je razvoj uređaja za ispitivanje kabela, traženje grešaka i mjesta kvara na kabelskim instalacijama te mjerenje dužine kabela. Uređaj priključen na jedan kraj kabela na dva vodiča, emitira kratkotrajni impuls. Impuls putuje uzduž vodiča te će na mjestu oštećenja, drugog kraja kabela ili bilo koje druge promjene geometrije vodiča, zbog promjene impedancije, doći do stvaranja reflektiranog vala koji se vraća prema mjernom uređaju. Na osnovi vremena mjerenog od polaska impulsa sa mjernog mjesta do povratka reflektiranog impulsa može se odrediti udaljenost do mjesta promjene impedancije odnosno oštećenja. Frekvencije impulsa variraju ovisno o namjeni od nekoliko MHz do nekoliko stotina MHz, ali postoje i odašiljači u frekvencijskom području od 200 Hz do 10 kHz (akustični detektori kvara).

Komuniciranje na malim brzinama (<30 kb/s) u frekvencijskom pojasu 3 – 95 kHz (CENELEC A), za primjene kao što su daljinsko očitavanje brojila i automatizacija mreže, koristi se već više od dvadesetak godina. Današnje PLC tehnologije s poboljšanim kodiranjem signala dostižu u ovom pojasu brzine 46,0 kb/s (G3 PLC) i 61,4 kb/s (PRIME PLC).

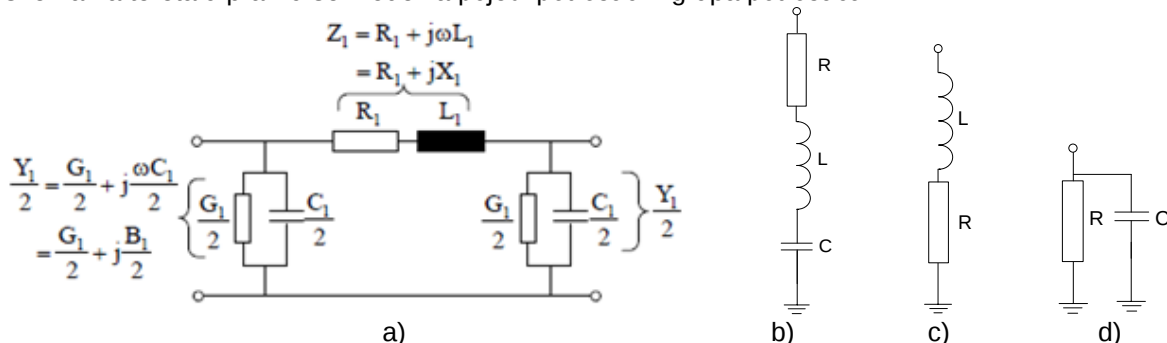
U novije vrijeme kada rastu zahtjevi prema komunikacijskom povezivanju uređaja unutar kućanstva, razmatra se i komunikacija putem energetske vodova kućne instalacije viših brzina >2Mb/s.

3. Komunikacijska ili prijenosna svojstva distribucijske niskonaponske energetske mreže

Za proračun širenja komunikacijskih signala u pravilu se koristi nadomjesna shema mreže koja uvažava frekvencijsku ovisnost realnih i imaginarnih dijelova impedancije pojedinih elemenata mreže. Konstante voda su ovisne o svojstvima materijala od kojeg je vod izveden, o geometrijskim svojstvima voda i o okolnim prilikama. Definiraju se po jedinici duljine, najčešće po kilometru. Kod trofaznih sustava konstante voda se zadaju po fazi s time da se kao povratni dio uzima zamišljeni neutralni vodič. Vod distribucijske energetske mreže najčešće se prikazuje ekvivalentno π – shemom ili rjeđe T – shemom.

Na sabirnicama NN dijela TS SN/NN mogu biti priključene kondenzatorske baterije za kompenzaciju jalove snage, kao i u postrojenjima industrijskih potrošača. Kondenzatorska baterija prikazuje se susceptancijom spojenom između čvora u kojeg je spojena i referentne neutralne točke. U pojedinim izvedbama za zaštitu baterije, ispred kondenzatora se spaja prigušnica.

Model opterećenja ima vrlo velik utjecaj na točnost proračuna širenja signala. Postoje velike razlike u impedanciji instalacija i trošila različitih kategorija korisnika mreže. Dodatno, impedancija industrijskih postrojenja, instalacija malog poduzetništva i kućanstava su i vremenski promjenjive. Nadomjesnim shemama tereta u pravilu se modelira pojedini potrošač ili grupa potrošača.



Slika 1. Nadomjesne sheme: a) π -shema voda distribucijskog NN voda, b) kondenzatorskih baterija, c) induktivnog opterećenja, d) kapacitivnog opterećenje

Za nadomjesne sheme opterećenja koristi se dosta različitih modela. Impedancija potrošačkih instalacija obično se aproksimira serijskim spojem induktiviteta i radnog otpora. Zbog porasta broja kapacitivnih napajaačkih sklopova (prekidačka napajanja računala, televizora) impedancija potrošačkih instalacija može se aproksimirati i paralelnim spojem kondenzatora i radnog otpornika. Kako bi se smanjio povratni utjecaj na mrežu od strane energetske ili potrošačke elektronike često se na ulazu ovih sklopova ugrađuju

filterski sklopovi (PSU filtri) koji su u pravilu prema mreži kapacitivnog karaktera (niža impedancija za više frekvencije). Model induktivnog i kapacitivnog opterećenja dani su na slici 1.

Nazivne veličine voda su: R_1 (Ω/km) - jedinični radni otpor, X_1 (Ω/km) - jedinična reaktancija, G_1 (S/km) - jedinična poprečna radna vodljivost (konduktancija), B_1 (S/km) - jedinična poprečna kapacitivna vodljivost (susceptancija). Nazivne veličine voda mogu se naći u tehničkim specifikacijama voda ili se mogu izračunati na osnovu poznatih konstrukcijskih karakteristika i vrste korištenih materijala. Množenjem jediničnih parametara s duljinom voda (km), dobiju se odgovarajuće uzdužne i poprečne veličine.

Konstanta prostiranja signala po vodu (γ) definira promjenu električnog signala duž voda po amplitudi i po fazi.

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}, [1/\text{km}] \quad (1)$$

Realni dio konstante prostiranja γ predstavlja konstantu prigušenja signala (α) i definira promjenu amplitude električnog signala duž voda, tj. pokazuje za koliko se smanji amplituda signala na jedan kilometar duljine voda. Opći izraz za konstantu prigušenja je:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} + (RG - \omega^2 LC) \right]}, [\text{Np}/\text{km}] \quad (2)$$

Imaginarni dio konstante prostiranja γ predstavlja konstantu promjene faze β i definira promjenu faze električnog signala duž voda, tj. pokazuje za koliko se promijeni faza signala na jedan kilometar duljine voda. Opći izraz za određivanje fazne konstante je

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} - (RG - \omega^2 LC) \right]}, [\text{rad}/\text{km}] \quad (3)$$

Brzina prijenosa signala po vodu V pokazuje brzinu kojom se signal širi po vodu, a određuje se izrazom

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi f}{\beta}, [\text{km}/\text{s}] \quad (4)$$

Valna ili karakteristična impedancija predstavlja odnos između napona i struje u bilo kojoj točki voda i određuje se pomoću izraza:

$$\overline{Z}_k = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, [\Omega] \quad (5)$$

Ako električni signal na svom putu po vodu nailazi na promjene karakteristične impedancije, dolazi do njegove djelomične ili potpune refleksije. Veličinu te refleksije pokazuje faktor refleksije r koji se određuje pomoću izraza:

$$r = \frac{Z - Z_k}{Z + Z_k} \quad (6)$$

U novijim radovima, posebno onima koji se bave PLC komunikacijom pojavljuju se i prijenosni parametri koji su kombinacija dva ili više temeljna parametra. Indeks kvalitete komunikacijskog kanala (LQI – *Link Quality Index*) definiran je kao zbroj vrijednosti šuma i prigušenja kanala [10].

$$LQI = N + \alpha, [\text{dB}] \quad (7)$$

Kapacitet prijenosa informacije komunikacijskim kanalom opisuje broj neovisnih simbola koji se mogu prenijeti kanalom u jedinici vremena. Osnovni simbol u digitalnoj komunikaciji je *bit*. Prilikom komuniciranja, odašiljač šalje signale u komunikacijski kanal koji ima određenu frekvencijsku propusnost i gdje se signalu dodaje šum. Kapacitet kanala ovisi o odnosu signala (S) i šuma (N) i frekvencijskom pojasu (B) raspoloživom za prijenos podataka. C.E. Shannon predstavio je 1948. godine matematičku formulu za izračun kapaciteta prijenosa informacija komunikacijskog kanala:

$$C = B * \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \left[\frac{\text{bit}}{\text{s}} \right] \quad (8)$$

U teoriji informacija, Shannon-ov teorem daje maksimalnu brzinu kojom se informacije mogu prenositi preko komunikacijskog kanala određene širine pojasa u prisutnosti šuma. Ukoliko se za komunikaciju koristi više (n) frekvencija nosioca i svaki nosilac ima frekvencijsko područje B' , uz $\delta = S/N$ omjer signal šum u tom pojasu, kapacitet kanala je tada jednak:

$$C = \sum_1^n B' * \log_2(1 + \delta(n)), \left[\frac{\text{bit}}{s} \right] \quad (9)$$

4. Vrijednosti prijenosnih parametara distribucijske niskonaponske mreže

Prijenosni parametri distribucijskih niskonaponskih vodova značajno ovise o dužini vodova, presjeku, materijalu i načinu izvedbe mreže. Za primjer, otpor vodova samonosivog kabelskog snopa (SKS), kreće se u granicama od oko 0,443 do 1,91 Ω/km (ovisno o materijalu i presjeku), vlastiti induktivitet voda od oko 0,245 do 0,277 mH/km, vlastiti kapacitet voda izračunat iz dimenzija voda kreće se u granicama oko 0,001 do 0,06 $\mu\text{F}/\text{km}$ [9].

Tablica I. Vrijednosti radnog otpora, induktivnog otpora (za $f = 50 \text{ Hz}$) i induktiviteta za različite presjeke SKS-a

Presjek SKS-a [mm ²]	Radni otpor [Ω/km]	Induktivni otpor [Ω/km]	Induktivitet [mH/km]
4x16	1,91	0,087	0,277
3x25+71,5	1,2	0,085	0,271
3x35+71,5	0,868	0,083	0,264
3x50+71,5	0,641	0,081	0,258
3x70+71,5	0,443	0,077	0,245

Tablica II. Dozvoljene razine PLC signala

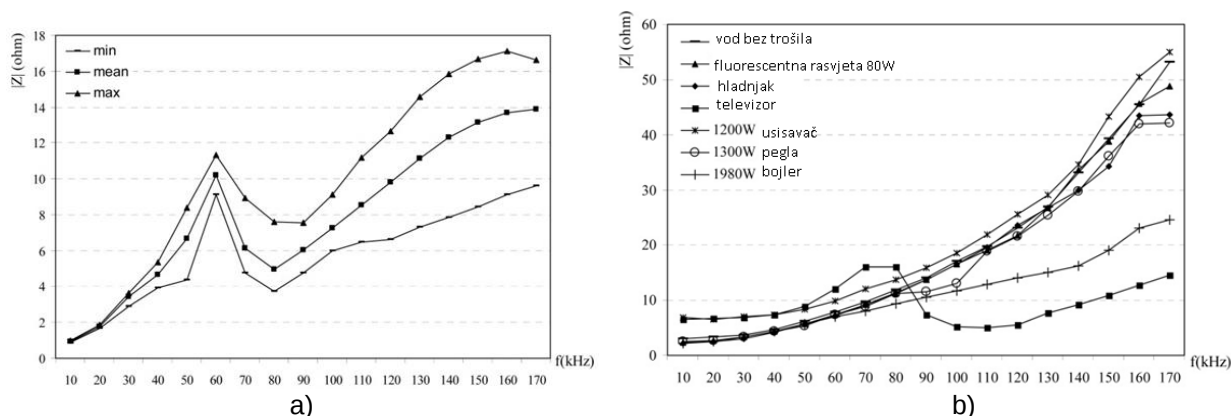
Frekvencijski pod-pojas	Jednofazni uređaj dB(μV)	Trofazni uređaj dB(μV)
3 kHz do 9 kHz	134	128
9 kHz do 95 kHz uskopojasno	134 - 120 *	128 - 114 *
9 kHz do 95 kHz širokopojasno	134	128
95 kHz do 148,5 kHz (razred 122)	122	116
95 kHz do 148,5 kHz (razred 134)	134	128

* Smanjuje se linearno s logaritmom frekvencije

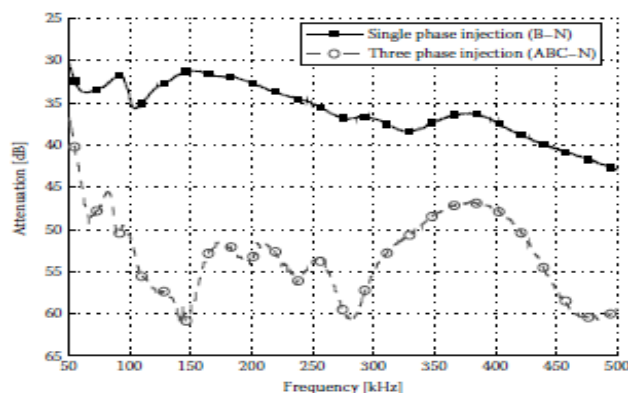
Za SKS vod presjeka 3x70+71,5 otpor vodova iznosi 0,443 Ω/km , vlastiti induktivitet voda od oko 0,245 mH/km, a vlastiti kapacitet oko 51,4 nF/km (izračun). Poprečna radna vodljivost je vrlo mala i može se u pravilu zanemariti i u energetskim i komunikacijskim izračunima. Utjecaj vlastitog kapaciteta voda je gotovo zanemariv za energetske analize, ali se treba razmatrati u komunikacijskoj analizi, jer kod visokih frekvencija kapacitet voda uzrokuje nisku impedanciju. Karakteristična impedancija ovog voda kod viših frekvencija približno iznosi:

$$\overline{Z}_k \approx \sqrt{\frac{L}{C}} = 69 \Omega, \quad (10)$$

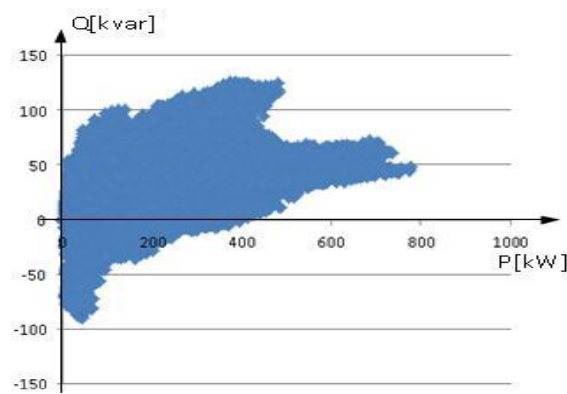
Na slici 2.a) dan je primjer ovisnosti impedancije voda niskonaponske mreže o frekvenciji za gradsko područje [5]. Ukupna impedancija koja opterećuje komunikacijski uređaj koji se u pravilu smješta u TS SN/NN znatno ovisi o impedanciji instalacija korisnika mreže. Na slici 2.b) prikazan je utjecaj nekoliko uređaja koji se koriste u kućanstvu na impedanciju niskonaponskog voda.



Slika 2. Primjer ovisnosti impedancije voda niskonaponske mreže o frekvenciji za urbano područje a) i utjecaj nekoliko uređaja koji se koriste u kućanstvu na impedanciju voda [5]



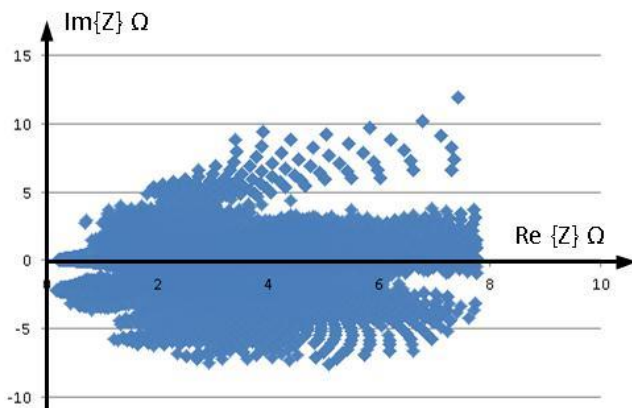
Slika 3. Ovisnost prigušenja NN voda o frekvenciji (usporedba jednofaznog i trofaznog priključenja) [10]



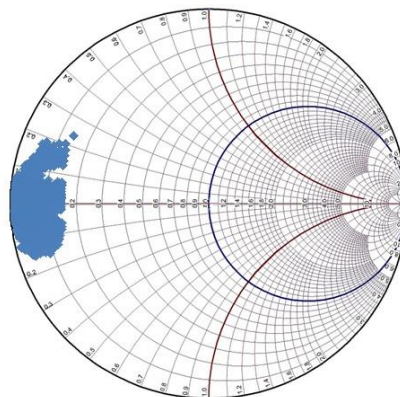
Slika 4. Područje 15-minutnih srednjih radnih i jalovih snaga tereta (mjereno na 24 TS SN/NN)

Mjerenje impedancije elektroenergetske mreže za potrebe analize komunikacijskih svojstava provedeno je u više istraživanja. U svom radu Malack i Engstrom mjerili su 86 distribucijskih sustava 50 Hz u šest europskih zemalja i SAD-a. Ova mjerenja pokazuju da se impedancija vodova za opskrbu kućanstva povećava s frekvencijom i da se nalazi u rasponu od oko 1,5 do 80 Ω na 100 kHz [6]. Vines i suradnici su proveli mjerenje impedancije na vodovima za opskrbu kućanstva na frekvencijama od 5 do 20 kHz te su izvijestili da se impedancija kreće u području od 1 do 12 Ω [7].

Kako bi se odredilo područje vrijednosti ukupne impedancije koja opterećuje niskonaponski izlaz TS SN/NN, proveli smo tijekom 2017. godine mjerenja na ukupno 24 transformatorske stanice SN/NN. Mjerenje je obuhvatilo 15 minutne vrijednosti srednje radne snage (srednja vrijednost snage unutar 15 minuta) i srednje vrijednosti jalove induktivne i kapacitivne snage na niskonaponskom dijelu transformatora. Na slici 4. prikazano je područje izmjerenih veličina radne i jalove snage za mrežu frekvencije 50 Hz.



Slika 5. Područje impedancije faze mjereno na 24 TS SN/NN u periodu od jedne godine

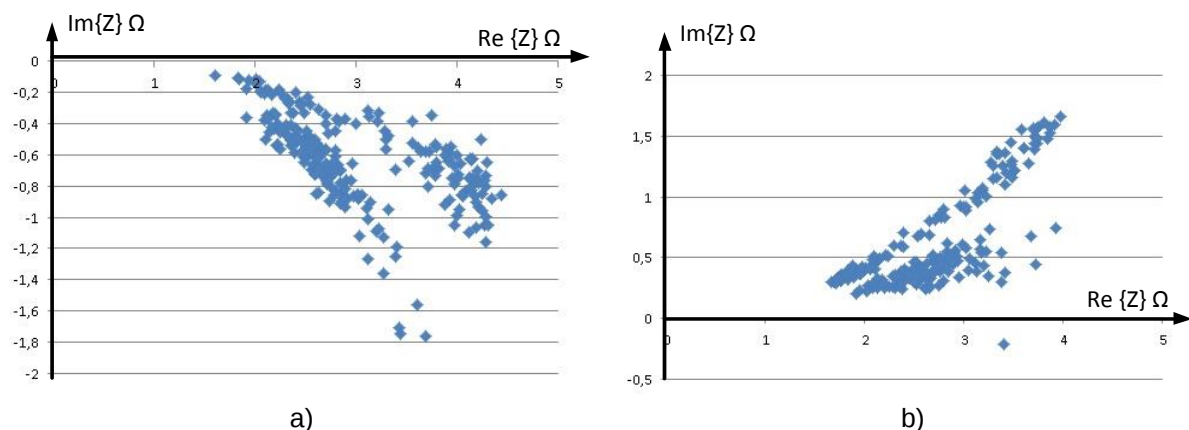


Slika 6. Prikaz impedancije sa slike 4. u Smith-ovom dijagramu

Na slici 5. prikazane su vrijednosti impedancije faze dobivene izračunom iz mjerenih vrijednosti snaga (uz pretpostavku simetričnog tereta i stabilnog mrežnog napona). Dobiveni rezultati u skladu su s navedenim istraživanjima [6], [7], jer se radni otpor kreće u granicama od 0,1 do 8 Ω , a jalovi otpor (reaktancija) u području od -8 Ω kapacitivno do 12 Ω induktivno. Slika 6. prikazuje impedanciju NN voda distribucijske mreže na frekvenciji 50 Hz, normaliziranu na impedanciju 50 Ω , u Smith-ovom dijagramu (Phillip H. Smith, 1905.–1987.). Ova vrsta dijagrama često se koristi u analizama impedancije i koeficijenta refleksije za potrebe komunikacije, jer omogućava pregledan prikaz impedancije velikog raspona vrijednosti. Impedancija se normalizira na određenu vrijednost, najčešće 50 Ω , koja predstavlja središte dijagrama.

U nastavku, na slici 7., dan je primjer promjene impedancije faze odlaznog voda iz TS SN/NN u periodu dva dana prije isključenja kondenzatorskih baterija za kompenzaciju jalove energije i dva dana nakon isključenja kompenzacije. Do potrebe za isključenjem kompenzacije došlo je zbog smanjenja ukupnog opterećenja TS te porasta mrežnog napona. Smanjeno opterećenje TS SN/NN s transformatorom od 1000 kVA kretalo se u granicama od 40 kW do 100 kW, isključenjem kondenzatorskih baterija došlo je

prosječnog smanjenja napona faze za 2,16 V. Promjena impedancije voda niskonaponske distribucijske mreže, prije i nakon isključenja kondenzatorskih baterija, dana je na slikama 7.a) i 7.b) u nastavku.



Slika 7. Područje impedancije voda niskonaponske distribucijske mreže TS SN/NN kod opterećenja 40 – 100 kW mjereno tijekom dva dana prije isključenja kompenzacije (a) i mjereno tijekom dva dana nakon isključenja kompenzacije jalove energije (b)

Kod izračuna/procjene kapaciteta prijenosa informacija putem distribucijskog energetskog voda korištenjem Shannon-ovog teorema treba biti svjestan činjenice da su rezultati vezani uz određenu razinu šuma, koji je vremenski promjenjiva varijabla i ovisi o karakteristikama priključenih uređaja krajnjih korisnika te o razini signala, čije prigušenje na liniji ovisi i o impedanciji priključenih uređaja krajnjih korisnika.

Tablica III. Procjena kapacitet prijenosa podataka energetskog distribucijskog voda u CENELEC A frekvencijskom pojasu uz prisutnost prosječnog šuma određene razine

Frekvencijski pojas [kHz]	Dozvoljena snaga šuma [dBm]	Prosječna snaga šuma * [dBm]	Dozvoljena razina PLC signala [dB/μV]	Dozvoljena razina PLC signala [dBm]	Širina pojasa B [Hz]	Kapacitet kanala C [bit/s]	Kapacitet kanala * C [bit/s]
3 – 30	-11	-35	134	43	27.000	145.800	210.600
30 – 70	-16	-40	127	36	40.000	208.000	304.000
70 – 95	-21	-45	120	29	25.000	125.000	185.000
					Ukupno	478.800	699.600

Primjenom Shannon-ovog teorema na distribucijski vod sa srednjim dozvoljenim razinama šuma i srednjim dozvoljenim razinama PLC signala u skladu s normom HRN EN 50065-1, daje u frekvencijskom pojasu CENELEC A od 3 kHz do 95 kHz teoretsku maksimalnu brzinu od oko 479 kbit/s kojom se informacije mogu prenositi preko ovog komunikacijskog kanala. Korištenjem srednjih prosječnih mjerenih razina šuma, koje su niže od dozvoljenih razina, daje u frekvencijskom pojasu CENELEC A od 3 kHz do 95 kHz teoretsku maksimalnu brzinu prijenosa informacija od oko 700 kbit/s. Slične vrijednosti kapaciteta kanala distribucijske mreže u CENELEC B području (95 KHz to 125 KHz) u iznosu od 560 kbit/s dobiveni su u radu [8]. Približavanje Shannon-ovom kapacitetu prijenosa podataka može omogućiti stalno istraživanje i razvoj novih načina modulacije [9].

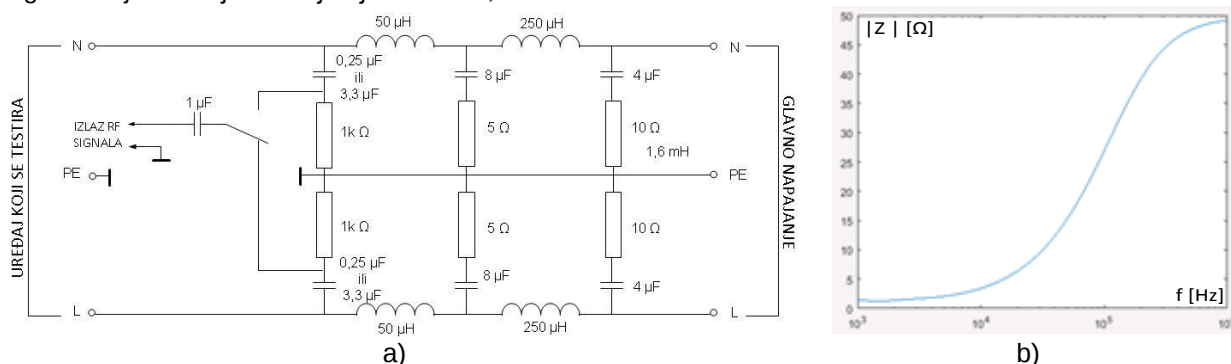
Brzina prijenosa signala po vodu može se približno odrediti korištenjem uređaja za detekciju kvarova voda na osnovi refleksije (TDR). Dobivene vrijednosti odnose se na frekvenciju impulsa kojeg generira uređaj. Za primjer, brzina širenja signala za detekciju kvara kod SKS voda X00/A 4(2)×6 mm² iznosi 231,3 m/μs. Iz brzine širenja signala moguće je korištenjem formule (3) dobiti i faznu konstantu voda za frekvenciju signala za detekciju kvara.

5. Mjerenje razine komunikacijskog signala koji se odašilje u distribucijsku mrežu

Kako bi se omogućilo jednostavnije mjerenje signala (ili smetnji) koje odašilju pojedini električni uređaji u distribucijsku mrežu, normom CISPR 16-1:1993 definiran je *model distribucijske mreže*. Hrvatska norma HRN EN 50065-1 *Signalizacija na niskonaponskim električnim instalacijama u frekvencijskom opsegu 3*

kHz do 148,5 kHz – 1.dio: Opći zahtjevi, frekvencijski pojasi i elektromagnetske smetnje, primjenjuje se na električne uređaje za prijenos informacija putem javne elektroenergetske mreže ili električnim kućnim instalacijama u frekvencijskom području 3 kHz do 148,5 kHz. Norma specificira frekvencijska područja dodijeljena za pojedine namjene, navodi maksimalnu razinu signala u frekvencijskom području i navodi metode mjerenja. Normom se definira frekvencijski pojas od 3 kHz do 95 kHz za opskrbu električnom energijom. Širina pojasa signala B je određena kao širina pojasa izvan kojeg su sve frekvencije manje od 20 dB od maksimalne vrijednosti pojasa. Signal se smatra uskopojasnim ako mu je širina pojasa manja od 5 kHz, a širokopojasni ako mu je širina pojasa jednaka ili veća od 5 kHz. Frekvencijski pojas od 95 kHz do 148,5 kHz namijenjen je za krajnje korisnike distribucijske mreže.

Primjer nadomjesne sheme modela distribucijske mreže i frekvencijska karakteristika modela za mjerenje signala koje odašilje uređaj koji se testira, dani su na slici u nastavku.



Slika 8. Primjer nadomjesne sheme (a) i frekvencijska karakteristika (b) modela za testiranje razine signala testiranih uređaja prema normi CISPR 16-1:1993

Izlazni napon uređaja u frekvencijskom pojasu od 9 kHz do 150 kHz mjeri se korištenjem jednofazne umjetne mreže prikazane na slici 8. Za frekvencijski pojas od 9 kHz do 95 kHz koristi se vrijednost ulaznog kapaciteta od 3,3 μF. Mjerenje izlaznih napona trofaznih uređaja provodi se korištenjem tri umjetne mreže. Napon izlaznog uskopojasnog signala uređaja ne smije prijeći iznos od 134 dB(μV) na frekvenciji 9 kHz, a granica se linearno smanjuje na 120 dB(μV) na 95 kHz. Napon izlaznog širokopojasnog signala uređaja ne smije prijeći iznos od 134 dB(μV) u cijelom frekvencijskom pojasu od 9 kHz do 95 kHz (tablica II).

6. Zaključno

Elektroenergetska mreža za distribuciju električne energije ima primarni zadatak opskrbe električnom energijom krajnjih korisnika mreže, a u novije vrijeme i preuzimanje energije iz distribuiranih izvora. Smjer razvoja prema naprednoj distribucijskoj mreži, povećanje broja distribuiranih izvora, elektromobilnost, sustavi za pohranu energije, napredna mjerna infrastruktura, pretvaraju niskonaponsku mrežu u jedan od najvećih izvora informacija. Komunikacija putem energetske mreže (PLC tehnologija) omogućava transformaciju energetske mreže u informacijsku podatkovnu mrežu.

Razvojem modulacijskih tehnika za očekivati je da će doći do porasta brzine prijenosa informacija putem distribucijske mreže. Dodatno povećanje brzine prijenosa informacije moguće je dodjeljivanjem/korištenjem frekvencijskih pojasa na višim frekvencijama za potrebe distribucijske djelatnosti, povećanjem dozvoljene razine signala, rad u frekvencijskom pojasu sa nižim šumom te prilagodbom dizajna energetske mreže i kabela.

Zbog promjenjivih vrijednosti prijenosnih parametara distribucijske niskonaponske mreže, komunikacijski uređaji moraju imati mogućnosti dinamičke prilagodbe kako bi se u različitim uvjetima rada ostvarile maksimalne brzine prijenosa informacije.

7. LITERATURA

- [1] Z.Jadrijević, G.Majstorović, Komunikacija putem elektroenergetske mreže, CIGRE, 2003.

- [2] HRN EN 50065-1, Signalizacija na niskonaponskim električnim instalacijama u frekvencijskom opsegu 3 kHz do 148,5 kHz – 1.dio: Opći zahtjevi, frekvencijski pojasi i elektromagnetske smetnje, 2012.
- [3] B.Krstulja, K.Šimleša, Utjecaj kabliranja SN mreže na rasprostiranje MTU signala, HO CIRED, 2016.
- [4] I. Hakki Cavdar, E. Karadeniz, Measurements of Impedance and Attenuation at CENELEC Bands for Power Line Communications Systemy, MDPI, 2001.
- [5] Malack J.A., Engstrom J.R. RF Impedance of United States and European Power Lines. IEEE Trans. Electromag. Compat. 1976;18:36–38.
- [6] Vines R.M., Trussell H.J., Shuey K.C., O'neal J.B. Impedance of the Residential Power-Distribution Circuit. IEEE Trans. Electromag. Compat. 1985;27:6–12.
- [7] A.J. Han Vinck, F. Rouissi, T. Shongwe, G.R. Colen, L.G. Oliveira, Impulse Noise and Narrowband PLC, Ninth workshop on power line communications, 2015, Austria
- [8] Claude Berrou, Alain Glavieux, Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: turbo-codes, patent N 92460011.7 Europe
- [9] Dino Perhoč, Određivanje uzdužne impedancije nadzemnog voda, 2016. Rijeka
- [10] Lars T. Berger, P. Pagani, A. Schwager, D.M. Schneider, MIMO Power Line Communication, CRC Press, 2014.