

dr.sc. Deni Četković, univ.mag.ing.el
HEP-ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka
deni.cetkovic@hep.hr ; deni.cetkovic@gmail.com

Siniša Vučinić, univ.mag.ing.el
HEP-ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka
sinisa.vucinic@hep.hr

Igor Volarić, univ.mag.ing.el
HEP-ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka
igor.volaric@hep.hr

Renato Variola, el.teh
HEP-ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka
renato.variola@hep.hr

ANALIZA NESIMETRIJE KOD PROJEKTIRANJA NISKONAPONSKIH MREŽA I UTJECAJ ELEKTROMOBILNOSTI

SAŽETAK

Nesimetrija u niskonaponskim mrežama postaje sve izraženiji izazov, osobito zbog porasta broja punionica električnih vozila i solarnih elektrana priključenih na jednu fazu, što u određenim pogonskim uvjetima može izazvati značajnu nesimetriju. Rad se bavi teorijskom razradom uzroka nesimetrije te preciznom analizom kritičnih pogonskih trenutaka stvarnih mreža i usporedbom sa stvarnim mjerenjima. U radu se analizira pad napona po dubini mreže na najopterećenijem faznom vodiču. Analizira se i porast povratne struje na nul-vodiču kao posljedice nesimetričnog opterećenja što dovodi do porasta napona po dubini mreže na nul-vodiču te još izraženijeg pogoršanja naponskih prilika kod potrošača. U radu se također razmatraju potencijalni dodatni uzroci nesimetrije, osobito u slučaju priključka jednofaznih punionica električnih vozila, koje zbog nepredvidivih obrazaca punjenja i opterećenja pojedinih faza mogu uzrokovati dodatne probleme u slabim mrežama. Rad daje i dijagrame napona za različite slučajeve iz prakse.

Ključne riječi: nesimetrija, pad napona, porast napona, elektromobilnost

ANALYSIS OF ASYMMETRY IN DESIGNING LOW-VOLTAGE NETWORKS AND THE INFLUENCE OF ELECTROMOBILITY

SUMMARY

Asymmetry in LV networks is becoming an increasingly significant challenge, particularly due to the rising number of single-phase electric vehicle chargers and solar power plants, which, under certain operating conditions, can cause substantial imbalance. This paper provides a theoretical elaboration on the causes of asymmetry, along with a precise analysis of critical operating conditions in real networks and a comparison with actual measurements. The study examines voltage drop along the most heavily loaded phase conductor, as well as the increase in return current in the neutral conductor as a consequence of asymmetric loading. This results in a rise in neutral-to-ground voltage and further deterioration of voltage conditions for consumers. Additionally, the paper explores other potential causes of asymmetry, particularly the impact of single-phase EV chargers, which, due to unpredictable charging patterns and phase-specific loads, can introduce further complications in weak networks. The paper also provides practical voltage diagrams for different practical cases.

Key words: asymmetry, voltage drop, voltage rise, electromobility

1. UVOD

Distribucijske mreže suočavaju se s nizom tehničkih izazova, a jedan od ključnih problema u niskonaponskim sustavima je nesimetrija trofaznog opterećenja. Idealna trofazna mreža podrazumijeva ravnomjerno raspoređeno opterećenje među fazama, pri čemu se osigurava stabilnost napona i minimalni gubici energije. Međutim, u stvarnim uvjetima distribucijske mreže, zbog nepravilne raspodjele jednofaznih potrošača, dolazi do odstupanja u amplitudama faznih struja, što uzrokuje pojavu struje u nul-vodiču i dodatne padove napona.

Nesimetrija u distribucijskim mrežama ima značajan utjecaj na kvalitetu napona, posebno u ruralnim područjima gdje su niskonaponski vodovi dugi, a potrošnja izrazito nesimetrična. Jedan od ključnih problema koji proizlazi iz nesimetrije je porast napona na nul-vodiču, što može uzrokovati daljnja odstupanja u faznim naponima i negativno utjecati na rad osjetljivih električnih uređaja. Kako bi se razumjela dinamika ovih pojava, potrebno je analizirati teorijske aspekte nesimetrije, njene posljedice na napon potrošača te mogućnosti mitigacije negativnih učinaka.

Cilj ovog rada je teorijski i praktično analizirati nesimetriju u niskonaponskim mrežama te njen utjecaj na naponske prilike potrošača s naglaskom na uočenu pojavu porasta napona na nul-vodiču. Prvi dio rada posvećen je teorijskoj analizi nesimetrije, uključujući matematičke izraze koji opisuju utjecaj nesimetričnih struja na napon nul-vodiča i fazne napone. Zatim se analizira konkretan simulacijski primjer nesimetrične potrošnje, uz fazorski prikaz naponskih odstupanja. Dalje, rad prikazuje stvarni primjer nesimetričnog opterećenja iz distribucijske mreže, temeljen na mjerenjima i prigovorima potrošača. Dalje, u radu se analizira na utjecaj elektromobilnosti kod slučaja jednofaznih punionica. U radu se daju i praktične tablice izračuna nesimetričnog opterećenja za različite duljine zračnih niskonaponskih mreža te različite priključene snage i različite razine nesimetrije.

Ova analiza pruža uvid u izazove s kojima se susreću elektroenergetske mreže te služi kao podloga za buduća istraživanja i optimizaciju rješenja za smanjenje nesimetrije u distribucijskim sustavima.

2. TEORETSKA ANALIZA NESIMETRIJE I UTJECAJA NA NISKONAPONSKE MREŽE

2.1. Simetrične trofazne mreže

U idealnim uvjetima, trofazni sustav napajanja podrazumijeva jednoliko raspoređeno opterećenje među trima fazama, pri čemu su fazne struje iste amplitude i međusobno pomaknute za 120° . Vektorski prikaz ovakvog sustava pokazuje da je zbroj struja u nul-vodiču jednak nuli:

$$\vec{I}_N = \vec{I}_{L1} + \vec{I}_{L2} + \vec{I}_{L3} = 0 \quad (1)$$

Budući da kroz nul-vodič ne teče struja, on ostaje na potencijalu nule, što osigurava stabilan naponski profil i jednolikost faznih napona. Ova situacija je poželjna jer minimizira gubitke i osigurava pouzdan rad potrošača priključenih na mrežu.

2.2. Nesimetrične trofazne mreže

U realnim distribucijskim mrežama, nesimetrično opterećenje uzrokuje odstupanja u amplitudama faznih struja, što rezultira pojavom struje u nul-vodiču:

$$\vec{I}_N = \vec{I}_{L1} + \vec{I}_{L2} + \vec{I}_{L3} \neq 0 \quad (2)$$

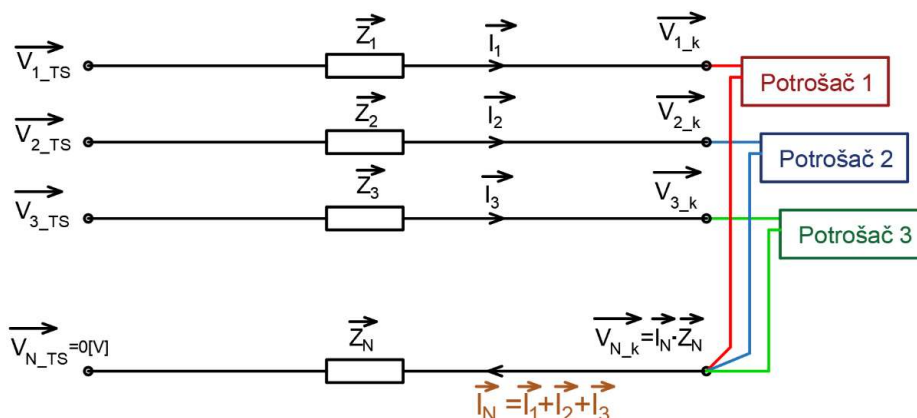
Kako nul-vodič nije idealan, već posjeduje određenu impedanciju $\vec{Z}_N$, na njemu dolazi do pada napona:

$$\Delta V_N = \vec{I}_N \cdot \vec{Z}_N \quad (3)$$

Ovaj dodatni pad napona u nul-vodiču uzrokuje porast njegovog potencijala u odnosu na početnu točku voda. To pomicanje referentnog potencijala mreže dovodi do promjena u faznim naponima, što može rezultirati dodatnim smanjenjem napona potrošača na kraju voda. Što je veća nesimetrija opterećenja, to su veće razlike u faznim naponima i veći porast napona na nul-vodiču.

2.3. Porast napona na nul vodiču uslijed nesimetrije i utjecaj na napon potrošača

Nesimetrično opterećeni niskonaponski vod prikazan je na Slici 1. Na slici $\vec{V}_{l,TS}$ označava napon i -te faze (ili nule) na početku voda a $\vec{V}_{l,k}$ napon i -te faze (ili nule) . $\vec{Z}_l$ predstavlja uzdužnu impedanciju vodiča i -te faze (ili nule).



Slika 1. Nesimetrično opterećeni niskonaponski vod

Napon na kraju i -tog faznog vodiča niskonaponskog voda iznosi :

$$\vec{V}_{l,k} = \vec{V}_{l,TS} - \vec{I}_l \cdot \vec{Z}_l \quad (4)$$

Napon na kraju nultog vodiča iznosi:

$$\vec{V}_{N,k} = \vec{I}_N \cdot \vec{Z}_N = (\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3) \cdot \vec{Z}_N \quad (5)$$

Konačno, napon koji i -ti potrošač vidi iznosi:

$$\vec{V}_{l,k} = \vec{V}_{l,TS} - \vec{I}_l \cdot \vec{Z}_l - (\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3) \cdot \vec{Z}_N \quad (6)$$

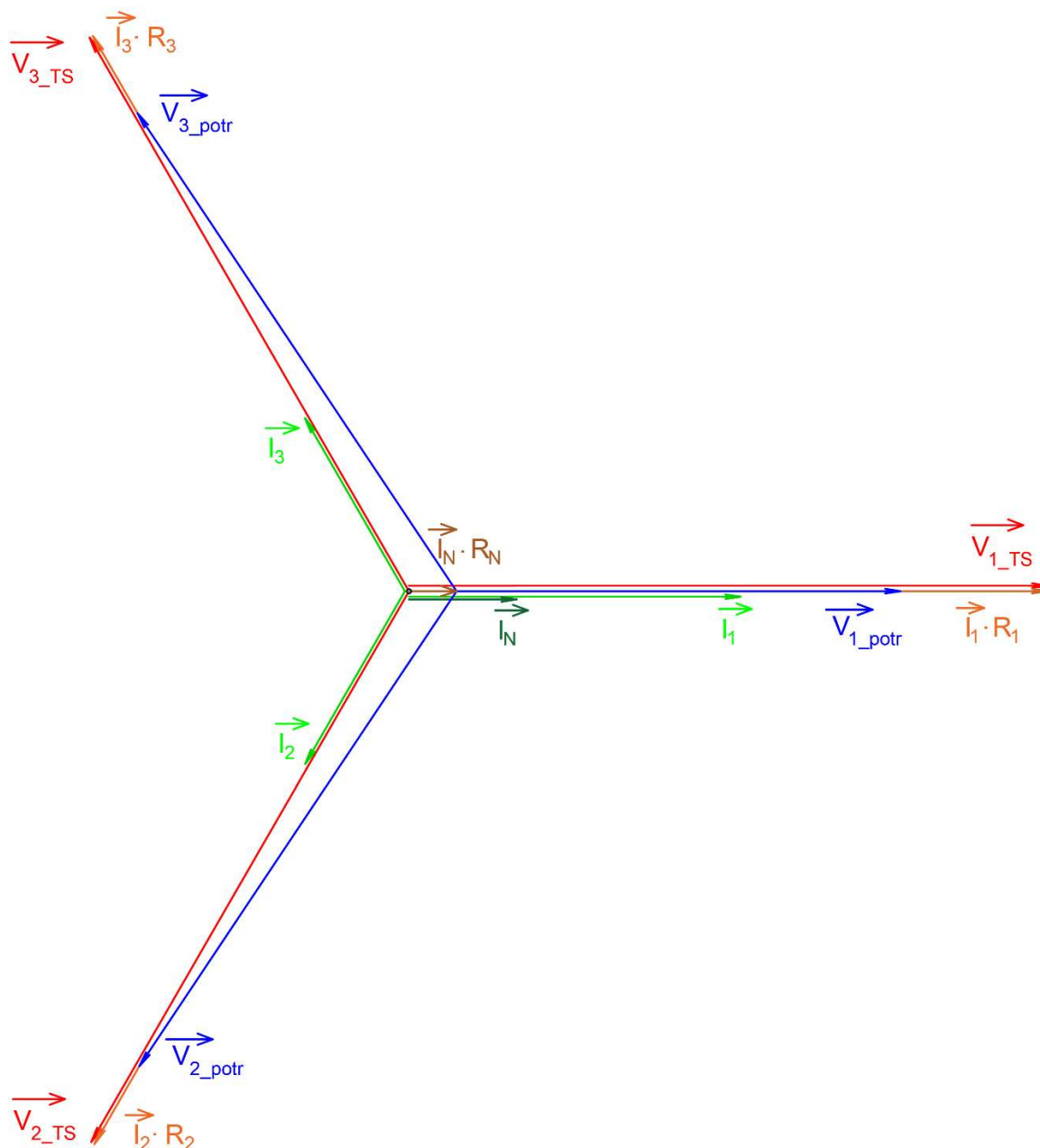
Iz relacije (6) vidljivo je da će na smanjenje napona potrošača i -te faze utjecati struja i uzdužna impedancija te faze. No također je vidljivo kako će u slučaju nesimetričnog opterećenja na dodatno smanjenje napona potrošača utjecati povratna struja kroz nul vodič kao i impedancija nul vodiča. **Veća nesimetrija i veća impedancija nul vodiča (veća duljina NN izvoda) mogu izazvati dodatno pogoršanje naponskih prilika kod potrošača.**

2.4. Simulacijski primjer nesimetrične potrošnje i fazorski dijagram

Fazorski dijagram nesimetrično opterećenog voda prikazan je na Slici 2. Predmetni dijagram izrađen je za primjer stvarnog proračuna provedenog u programu Windis, temeljenog na sljedećim podacima koji služe kao približna simulacija realnog slučaja iz prakse:

- Napajanje potrošača direktno iz TS sa početnim naponom 231V
- Potrošači se napajaju preko niskonaponskog zračnog voda tip FR-N1XD9-AR 3 x 70 + 70 mm2 duljine 1000m, sa uzdužnom impedancijom faznog/nul vodiča od $Z=0.443 \Omega$ (za potrebe analize zanemarena je mala reaktivna komponenta)

- Radna snaga potrošača na kraju izvoda iznosi $P_1=20$ kW, $P_2=15$ kW, $P_3=15$ kW . Za potrebe analize te prikaza vektorskog dijagrama zanemarena je jalova komponenta snage.



Slika 2. Fazorski dijagram struja i napona nesimetrično opterećenog voda

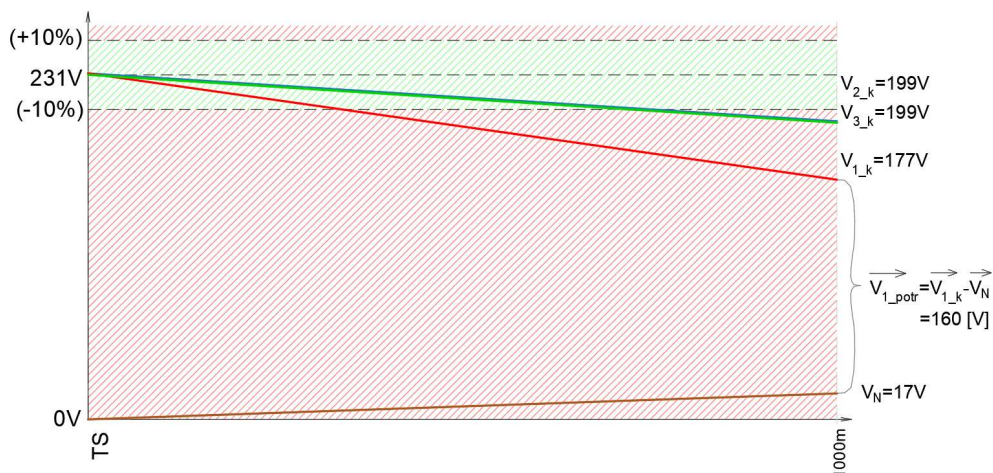
Proračunom su dobivene sljedeće vrijednosti struja i napona:

$$I_1 = 120 \text{ [A]} ; \quad I_2 = 72.1 \text{ [A]} ; \quad I_3 = 72.1 \text{ [A]} ; \quad I_N = 38.9 \text{ [A]} ;$$

$$V_{1_potr} = 160 \text{ [V]} ; \quad V_{2_potr} = 208 \text{ [V]} ; \quad V_{3_potr} = 208 \text{ [V]} ; \quad V_N = 17.3 \text{ [V]} ;$$

Primjenom relacije (4) može se izračunati kako napon na kraju prvog faznog vodiča iznosi 177 [V]. Napon na kraju nul vodiča uslijed porasta iznosi 17 [V]. Izračunati napon potrošača iznosi 160 [V]. Proračuni dakle jasno pokazuju kako je napon koji ima potrošač priključen na fazu 1 razlika između napona faznog i nul vodiča, koji ima porast. Rezultat također pokazuje da čak i kod male nesimetrije (40-30-30%) napon nul vodiča kod dugih NN izvoda (zračni NN vod duljine 1000m) može značajno porasti.

Naponski dijagram predmetnog voda prikazan je na Slici 3. Vidljivo je kako je napon potrošača kod faze 1 jednak razlici spuštenog napona na kraju prvog faznog voda i povišenog napona na kraju nultog vodiča.



Slika 3. Naponski dijagram nesimetrično opterećenog voda iz primjera

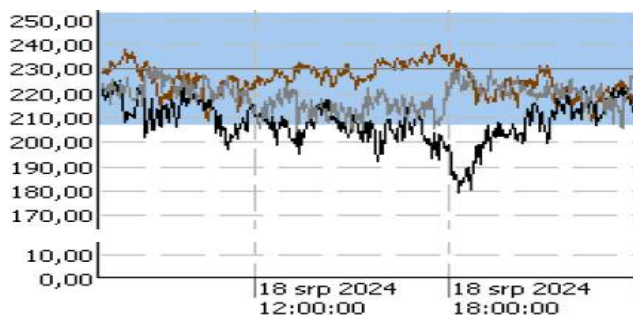
3. PRIMJER NESIMETRIJE IZ STVARNE MREŽE

U praksi je nesimetrija čest slučaj. Čak i u slučaju savršene raspodjele zakupljenih snaga jednofaznih potrošača pojaviti će se nesimetrija uslijed varijacija opterećenja potrošača.



Slika 4. Stvarna niskonaponska mreža sa nesimetričnim opterećenjem

Na Slici 4. prikazan je primjer stvarne niskonaponske mreže izvedene pretežno zračnim vodom, duljine glavnog voda 850 m. Za predmetnu mrežu zaprimljeni su prigovori potrošača te je temeljem izvršenih mjerenja utvrđeno značajno sniženi napon jedne faze. Izmjereni napon prikazan je na Slici 5. Također je primijećena mogućnost nesimetrije obzirom da je napon jedne faze vrlo dobar dok je napon najgore faze vrlo nizak.



Slika 5. Izmjereni pad napona u stvarnoj niskonaponskoj mreži

Temeljem dostupnih mjerenja i podataka o zakupljenim snagama procijenjen je raspored opterećenja po fazama od 45% / 30% / 25% te je izvršena simulacija.

Temeljem izvršenih simulacija dobiveni su sljedeći rezultati:

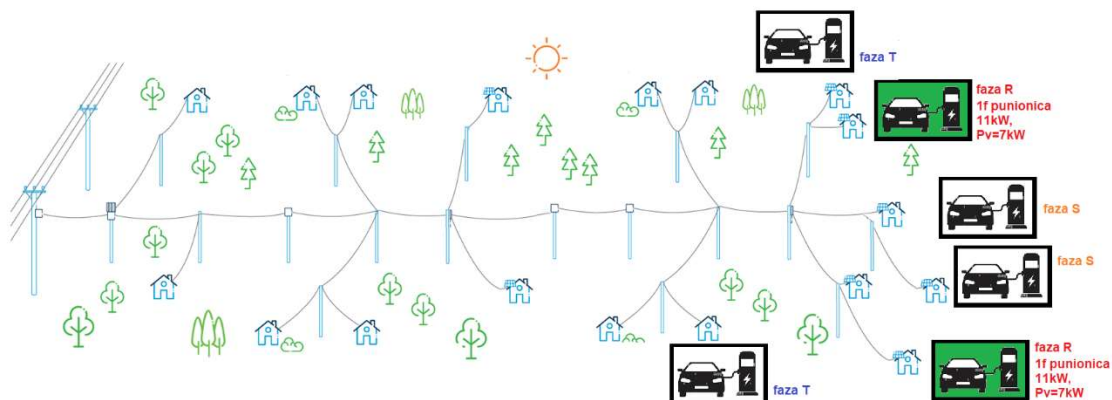
- Napon na kraju faznog vodiča faze 1, najopterećenije faze : $V_{1_k} = 196$ [V]
- Struja kroz nul-vodič uslijed nesimetrije na početku izvoda: $I_N = 65,9$ [A]
- Napon na kraju nul-vodiča $V_{N_k} = 15$ [V]
- Napon potrošača priključenog na fazu 1 : $V_{1_{potr}} = 181$ [V]

Na predmetnom primjeru iz stvarne mreže može se potvrditi kako nesimetrija u slaboj niskonaponskoj mreži sa velikom uzdužnom impedancijom može uzrokovati velike poraste napona na nul vodiču što može imati značajan utjecaj na dodatno pogoršanje naponskih prilika potrošača.

4. PUNJENJE ELEKTRIČNIH VOZILA KAO IZVOR NESIMETRIJE

Obzirom na porast elektromobilnosti razmotriti će se i utjecaj punjenja električnih vozila kao potencijalnog uzroka dodatne nesimetrije, kod priključenja jednofaznih punionica.

Razmotrit će se priključenje jednofaznih punionica u slaboj niskonaponskoj mreži a za primjer će se uzeti slaba zračna niskonaponska mreža duljine 850 m iz prethodnog poglavlja. Kod priključenja električnih punionica specifično je što se radi o većim snagama te će se u slučaju jednofaznih priključaka u nekom trenutku dogoditi situacija da se pune električna vozila preko punjača priključenih na jednu fazu.



Slika 6. Prikaz NN mreže sa aktivna tri jednofazna punjača spojena na istu fazu

Slika 6. prikazuje shemu jedne takve mreže sa pogonskim trenutkom kada se pune dvije jednofazne punionice spojene na jednu fazu.

Proračun nesimetrije uzrokovane punjenjem električnih vozila izrađen je u programu Windis uz korištenje sljedećih podataka:

- Niskonaponski zračni izvod duljine 850 m izveden je sa vodičem tip FR-N1XD9-AR 3 x 70 + 70 mm² sa jediničnom impedancijom od $Z=0.443+j0.077$ [Ω /km]
- Potrošnja bez električnih vozila modelirana je sa 25 kW simetrično uz faktor snage 0,95
- Razmatran je pogonski trenutak kad se vrši punjenje u **dvije jednofazne punionice** instalirane snage 11 kW odnosno vršne snage 7 kW odnosno **ukupno 14 kW na kraju izvoda**.

Prije aktivacije dvije jednofazne punionice vrijednosti struja i napona iznose:

$$V_{1_potr} = 216 \text{ [V]} ; \quad V_{2_potr} = 216 \text{ [V]} ; \quad V_{2_potr} = 216 \text{ [V]} ; \quad V_N = 0 \text{ [V]} ; \quad I_N = 0 \text{ [A]} ;$$

Nakon aktivacije dvije jednofazne punionice vrijednosti struja i napona iznose:

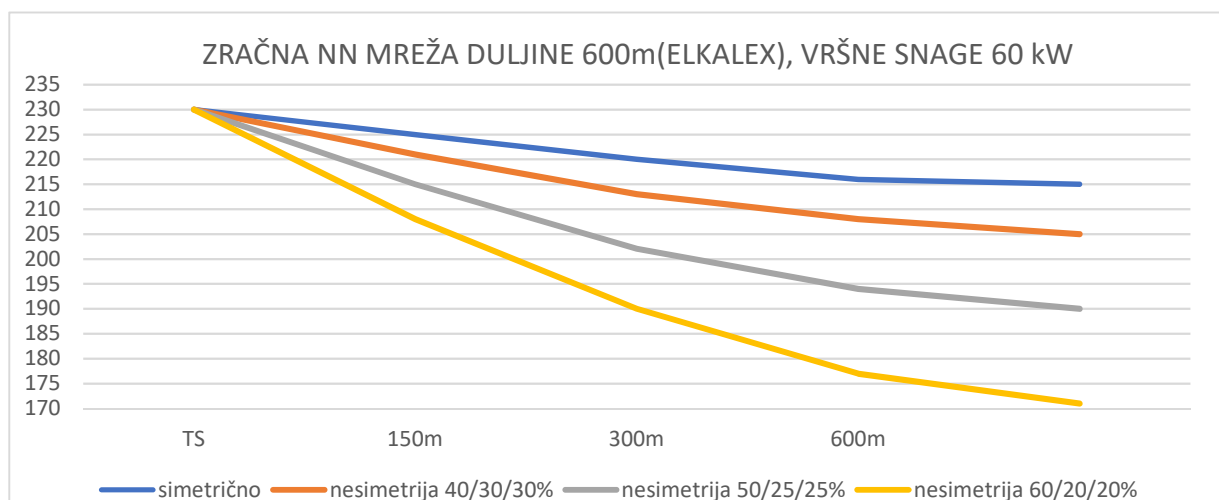
$$V_{1_potr} = 151 \text{ [V]} ; \quad V_{2_potr} = 238 \text{ [V]} ; \quad V_{2_potr} = 232 \text{ [V]} ; \quad V_N = 32 \text{ [V]} ; \quad I_N = 85 \text{ [A]} ;$$

Iz navedenog je vidljivo kako jednofazno punjenje dva automobila u slaboj niskonaponskoj mreži (dugi zračni izvod) može dovesti do velike vrijednosti povratne struje kroz nul-vodič te posljedično porasta napona na nul-vodiču. Daljnja posljedica je značajno sniženi napon te faze.

Stoga je potrebno kod priključenja jednofaznih punionica električnih vozila voditi računa o njihovom položaju u mreži i potencijalnom utjecaju na naponske prilike. Za razliku od običnih potrošača punionice električnih vozila vrlo je teško simetrirati.

5. PRORAČUNI MREŽA RAZLIČITIH DULJINA I RAZINA NESIMETRIJE

Na Slici 7. prikazan je proračun naponskih prilika u zračnoj mreži izvedenoj SKS-om presjeka Al70 mm² duljine 600m sa ukupnim vršnim opterećenjem 60 kW. Na slici je prikazan napon najkritičnije faze za različite snage i različite razine nesimetrije. Svaka snaga dimenzionirana je na način da je raspodijeljena u četiri čvora ravnomjerno raspoređena od početka do kraja izvoda. Proračuni faznog napon najgore faze izrađeni su za različite razine nesimetrije. Vidljivo je kako povećanje nesimetrije utječe na značajno pogoršanje naponskih prilika jedne faze.



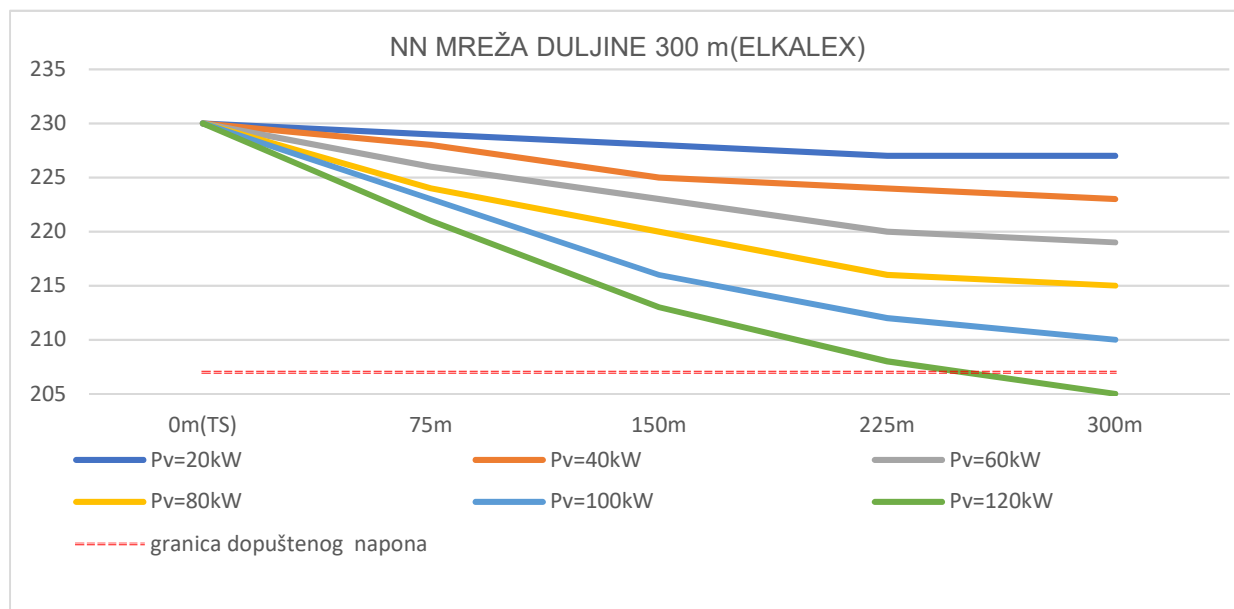
Slika 7. Izračun napona najgore faze u zračnoj NN mreži duljine 600m za različite duljine nesimetrije

U Tablici 1. prikazan je izračun struje najgore faze u zračnoj NN mreži duljine 600m za različite duljine nesimetrije.

Pv(kw)	Simetrija po fazama	Struja izvoda(A)
60	simetrično	96,2
60	40/30/30%	119
60	50/25/25%	158
60	60/20/20%	204

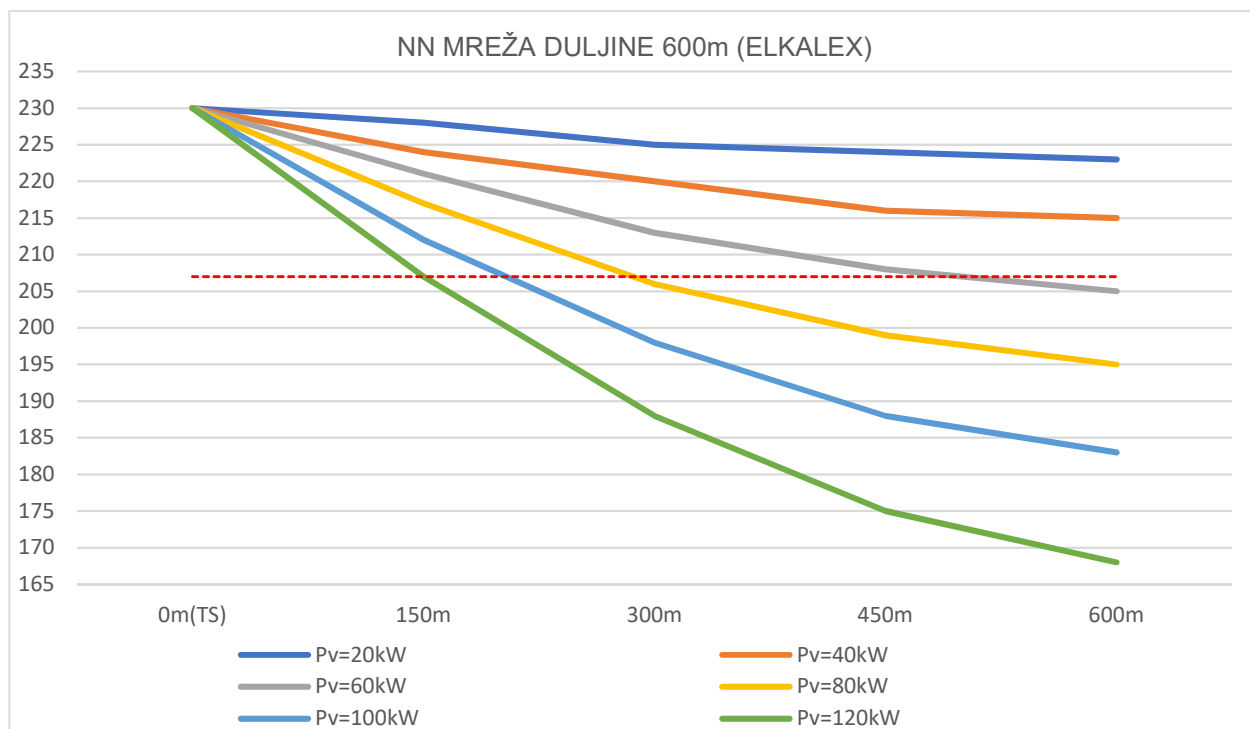
Tablica 1. Izračun struje najgore faze u zračnoj NN mreži duljine 600m za različite duljine nesimetrije

Na Slici 8. prikazan je proračun naponskih prilika u zračnoj mreži izvedenoj SKS-om presjeka Al70 mm² duljine 300m. Na slici je prikazan napon najkritičnije faze za različite snage. Svaka snaga dimenzionirana je na način da je raspodijeljena u četiri čvora ravnomjerno raspoređena od početka do kraja izvoda. Kako bi se uzela u obzir nesimetrija potrošnja je po fazama raspoređena na način da je 40% snage dimenzionirano na fazi R, 30% na fazi S, a 30% na fazi T. Primjerice, za snagu od 100 kW na fazu R je ukupno priključeno 4x10 kW, na fazu S ukupno 4x7,5 kW a na fazu T ukupno 4x7,5 kW.

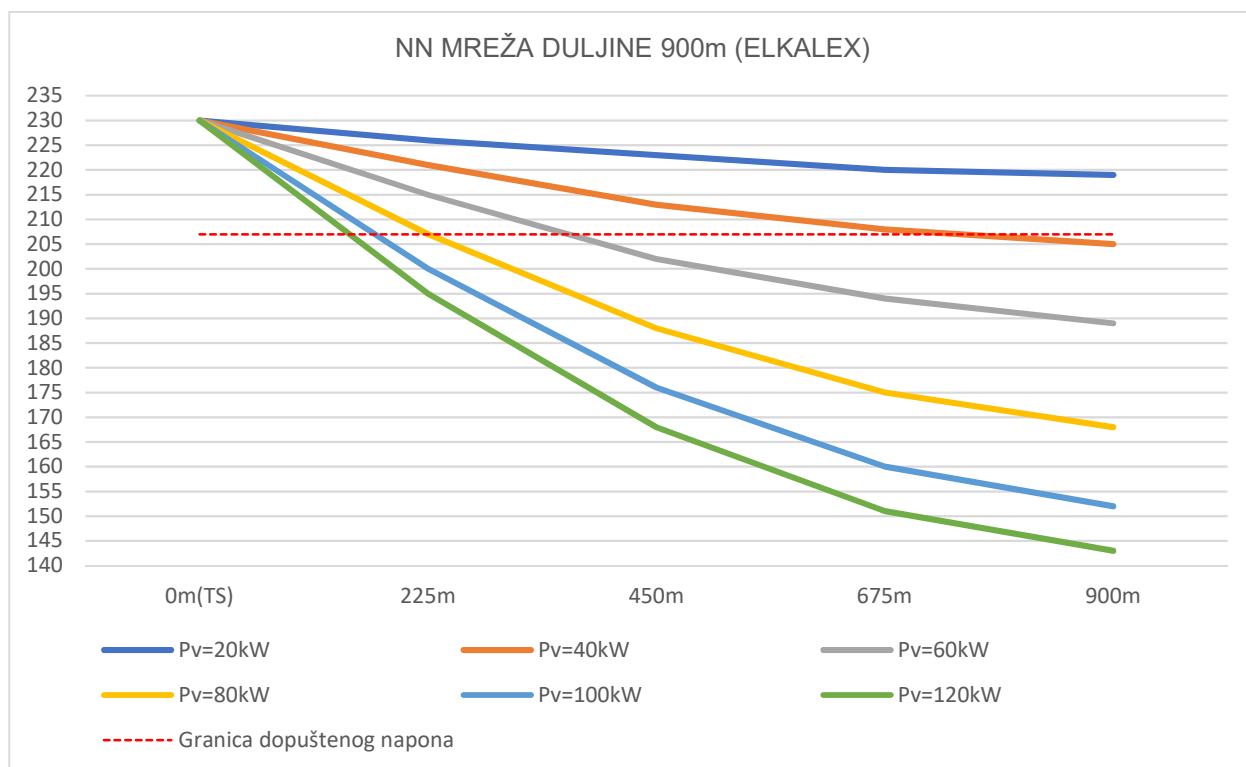


Slika 8. Izračun napona u zračnoj NN mreži duljine 300m uz nesimetrično opterećenje

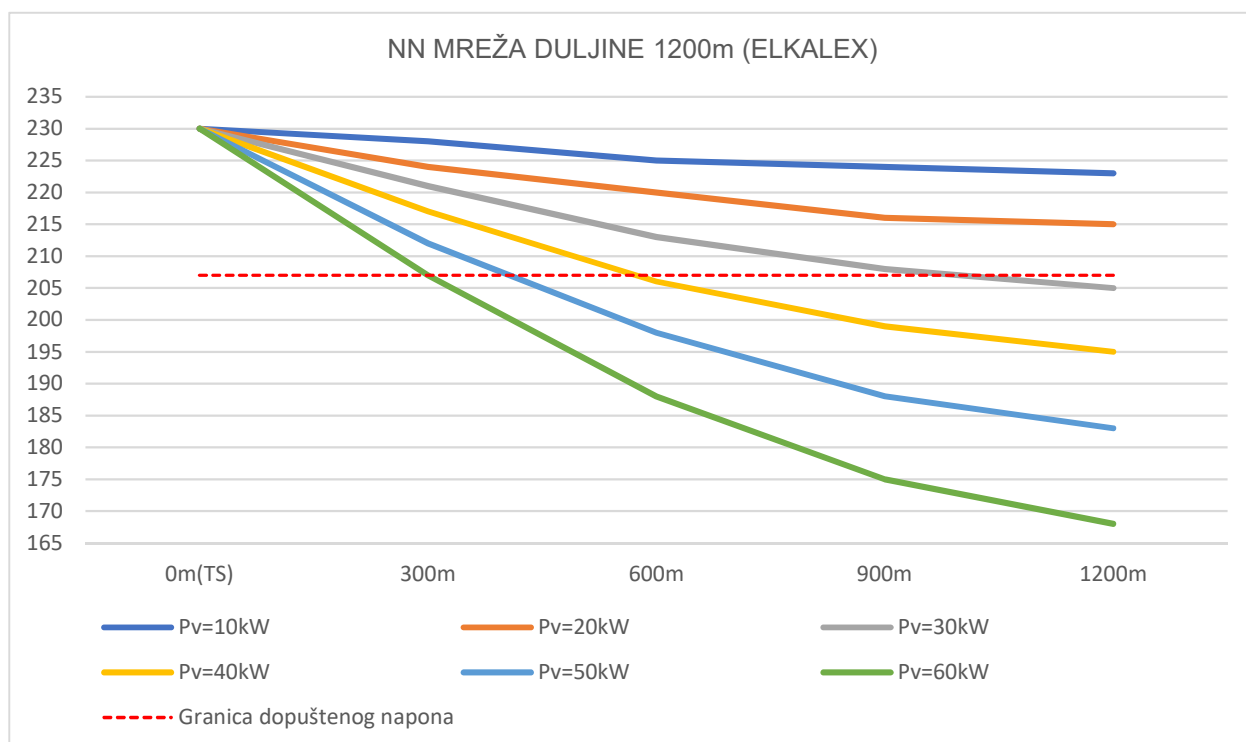
Na slikama 9.-11. prikazan je izračun napona za različite duljine NN izvoda i različite snage potrošača.



Slika 9. Izračun napona u zračnoj NN mreži duljine 600m uz nesimetrično opterećenje



Slika 10. Izračun napona u zračnoj NN mreži duljine 900m uz nesimetrično opterećenje



Slika 11. Izračun napona u zračnoj NN mreži duljine 1200m uz nesimetrično opterećenje

6. ZAKLJUČAK

Nesimetrija u niskonaponskim distribucijskim mrežama predstavlja značajan tehnički izazov koji utječe na kvalitetu napona, povećava gubitke energije i može uzrokovati probleme u radu osjetljivih električnih uređaja. Posebno izražen problem je porast napona na nul-vodiču, koji nastaje kao posljedica nesimetričnih faznih struja. Analiza provedena u ovom radu pokazala je da nepravilna raspodjela jednofaznih potrošača može dovesti do značajnih naponskih odstupanja, naročito u ruralnim područjima s dugim niskonaponskim vodovima.

Matematički modeli i simulacije potvrdili su utjecaj nesimetričnih struja na naponske prilike potrošača, dok su mjerenja iz stvarnih distribucijskih mreža potvrdila teorijska predviđanja. Također, analiziran je utjecaj elektromobilnosti, pri čemu su jednofazne punionice električnih vozila identificirane kao dodatni faktor koji doprinosi nesimetriji sustava.

Dobiveni rezultati pružaju važan uvid u mehanizme nastanka nesimetrije te ukazuju na potrebu za optimizacijom razmještaja potrošača, primjenu aktivnih regulatornih mjera i razvoj tehničkih rješenja za smanjenje negativnih učinaka nesimetrije. Daljnja istraživanja trebala bi biti usmjerena na primjenu naprednih metoda balansiranja opterećenja i optimizaciju mrežnih konfiguracija kako bi se osigurala veća stabilnost i pouzdanost distribucijskih sustava.

7. LITERATURA

- [1] Doc. dr. sc. Ranko Goić, dipl.ing., Damir Jakus, dipl.ing., Ivan Penović, dipl.ing. - "Distribucija električne energije"
- [2] Baza podataka programskog alata za izračun tokova snaga - „Windis“