

Nikša Županović, mag. ing. el.
HEP ODS d.o.o. Elektra Zagreb
niksa.zupanovic@hep.hr

ANALIZA PADOVA NAPONA I DOSEGA ZAŠTITE USLIJED PRIKLJUČENJA VELIKOG POTROŠAČA KOD DUGE I RAZGRANATE NISKONAPONSKE NADZEMNE MREŽE UPOTREBOM PROGRAMSKOG PAKETA WINDIS

SAŽETAK

U radu se analiziraju padovi napona i doseg zaštite kod priključenja trofaznog kupca priključne snage $P=29.9$ kW na kraju izvoda iz transformatorske stanice 20/0,4 kV. Kod priključenja velikih kupaca na krajevima izvoda u radijalnim niskonaponskim mrežama znatno se narušavaju naponske prilike kao i ispravno funkcioniranje zaštite. Da bi se ispunili kriteriji dozvoljenih odstupanja napona od $\pm 10\%$, te razni kriteriji ispravnog funkcioniranja zaštite potrebno je izvršiti analizu niskonaponske mreže te intervenirati izgradnjom ili rekonstrukcijom u mreži kako bi niskonaponska mreža ispravno funkcionirala i nakon priključenja novog potrošača. Svi potrebni proračuni i analize izvesti će se u programskom paketu WINDis koji se zasniva na istraženim metodologijama analize niskonaponskih mreža. Rad proučava priključak navedenog potrošača na kraju izvoda niskonaponske nadzemne mreže iz transformatorske stanice 2TS 187 Brezje II u pogonu Samobor na području Elektro Zagreb.

Ključne riječi: analiza padova napona, kriterij valjanosti osigurača, doseg zaštite, niskonaponska mreža, maksimalni pad napona, ukupna duljina voda, vršno opterećenje, faktor istodobnosti

ANALYSIS OF VOLTAGE DROPS AND PROTECTION SCOPE DUE TO ACCESSION OF LARGE CONSUMER WITH LONG AND BRANCHED LOW- VOLTAGE NETWORKS USING SOFTWARE PACKAGE WINDIS

SUMMARY

This paper analyzes the voltage drops and the scope of protection when connected three-phase customer load $P=29.9$ kW at the end of feeders of transformer station 20/0,4 kV. When connecting large customers at the ends of radial feeders in low-voltage networks significantly damaging voltage conditions as well as the proper functioning of protection. In order to fulfill the criteria for allowable voltage deviation $\pm 10\%$ and different criteria proper functioning of protection is necessary to analyze the low-voltage network and intervene in the construction or reconstruction of the low-voltage network to function properly after the connection of the new consumers. All necessary calculations and analysis will be made in the program WINDis. This paper explores the connection above the consumer at the end of the feeders of the low-voltage air network from transformer station 2TS 187 Brezje II in the Samobor at the area of Elektra Zagreb.

Key words: analysis of voltage drops, criterion validity fuse, scope of protection, low-voltage network, the maximum voltage drop, overall length of line, peak load, simultaneity factor

1. UVOD

Značaj niskonaponskih distributivnih mreža je prvenstveno je u tome što se na niskom naponu (0.4 kV) napaja velika većina potrošača, pa stoga izgradnja i održavanje niskonaponske mreže i trafostanica 20(10)/0.4 kV predstavlja najznačajniji dio distribucijske djelatnosti. Niskonaponske mreže su najčešće radijalne (zrakaste), pogotovo u neurbanim područjima, te radijalni izvodi iz trafostanica mogu biti poprilično dugački i razgranati. Ovakav pogon niskonaponske distribucijske mreže je najjednostavniji i najekonomičniji, ali zbog nemogućnosti rezervnog napajanja kvar na bilo kojem mjestu u mreži izaziva prekid napajanja kompletnog izvoda na kojem se dogodio kvar. Također kod seoskih i prigradskih niskonaponskih mreža koje su redovito nadzemne izvedbe (goli vodiči ili SKS - samonosivi kabelski snop) javljaju se problemi s velikim padovima napona na krajevima izvoda uslijed velikog opterećenja na izvodu, te velike duljine voda. Zaštita kod takvih pogonskih stanja često ne zadovoljava definirane zahtjeve, odnosno može krivo reagirati kod pojave kratkog spoja ili pojave preopterećenja na izvodu te vremenski reagirati prekasno u slučaju jednopolnih i trojnih kratkih spojeva.

Pad napona na krajevima izvoda kod dugačkih niskonaponskih radijalnih nadzemnih mreža zavisi o tri veličine: priključnoj snazi na izvodu (radna i jalova), duljini izvoda te presjeku i vrsti materijala od kojeg je izvod napravljen. Kod niskonaponskih nadzemnih mreža u sustavu HEP-ODS-a kao magistralni vod se u većini slučajeva koristi kabel tipa SKS 3x70+1x71.5+2x16 mm² (u našem slučaju u cijelosti), pa je stoga parametar presjeka i vrste materijala od kojeg je načinjen vod praktički konstanta, te pad napona isključivo ovisi o dvije preostale veličine. Dakle, da bi se zadovoljilo zahtjevima smanjenja pada napona na krajevima izvoda, odnosno da bi napon ulazio u granice dozvoljenih odstupanja $\pm 10\%$ potrebno je intervenirati skraćanjem izvoda i/ili rasterećivanjem samog izvoda. Analitički izraz za proračun pada napona za svaku zasebnu dionicu glasi:

$$\Delta U = \frac{P_i \cdot r_i \cdot l_i + Q_i \cdot x_i \cdot l_i}{U_n} = \frac{l_i}{U_n} (P_i \cdot r_i + Q_i \cdot x_i), \text{ gdje je:}$$

r_i, x_i - jedinični radni i induktivni otpor i-te dionice

P_i, Q_i - radna i jalova snaga koja teče i-tom dionicom

l_i - duljina i-te dionice

U_n - nazivni linijski napon mreže

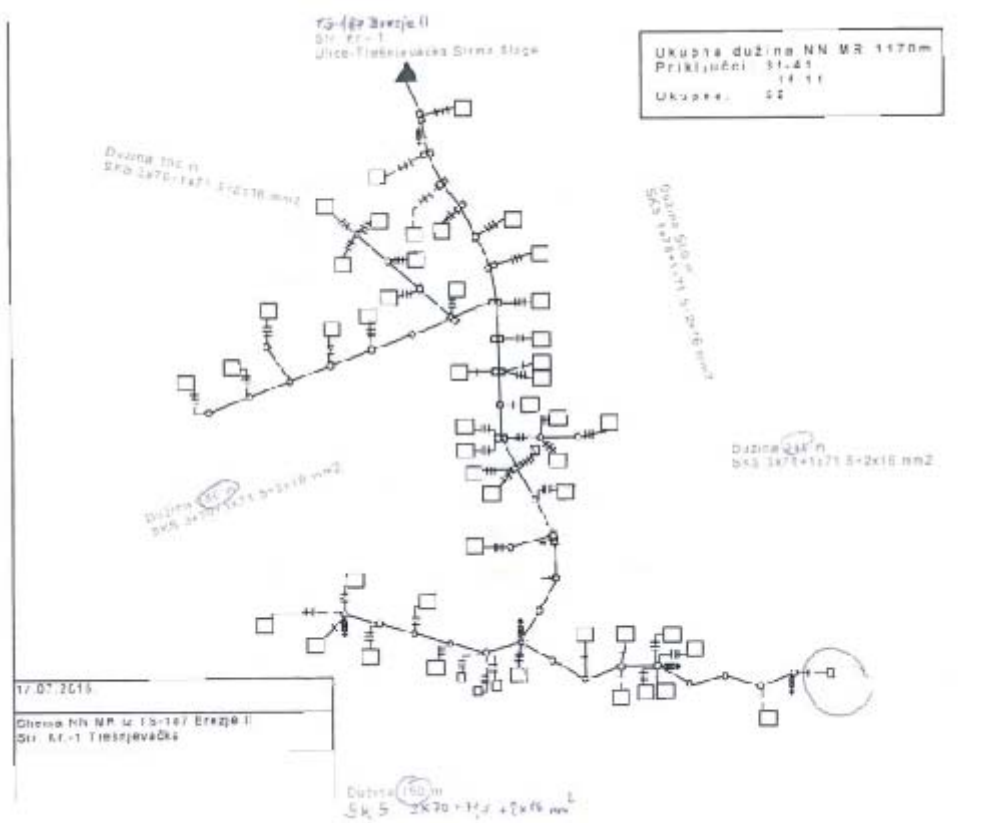
Nadstrujna zaštita u trafostanici koja štiti cijeli izvod mora zadovoljiti četiri kriterija, a to su: kriterij vršnog i trajnog strujnog opterećenja voda, kriterij termičke čvrstoće s obzirom na I_{K3} , kriterij dosega zaštite za minimalni I_{K1} i trajanje I_{K1} . Kod dugačkih i preopterećenih niskonaponskih izvoda javlja se preklapanje područja maksimalnog strujnog opterećenja voda i minimalne struje kratkog spoja, te zaštita ne funkcionira ispravno. Da bi se spriječila takva neželjena pogonska stanja, u mreži se postavljaju linijski osigurači koji sprječavaju takve pojave i omogućuju selektivno i ispravno funkcioniranje zaštite.

Na temelju ulaznih podataka i skice niskonaponske mreže, te njihovim ubacivanjem u programski paket WINDis može se kvalitetno i efektivno izraditi analiza padova napona i dosega zaštite kod niskonaponskih mreža. Program obavlja softverski sve spomenute proračune osim izračuna vršnog opterećenja pojedinog kućanstva i grupe kućanstava koje se može izračunati analitički (Ruscova formula) ili pomoću tablica.

2. ANALIZA PADOVA NAPONA I DOSEGA ZAŠTITE PRI STACIONARNOM STANJU MREŽE USLIJED PRIKLJUČENJA VELIKOG POTROŠAČA NA KRAJU IZVODA IZ TRAFOSTANICE 2TS 187 BREZJE II

2.1. Postupak analize niskonaponske mreže u stacionarnom stanju pomoću programskog paketa WINDis

Kao što je već naglašeno, analiza će se sprovesti na niskonaponskom izvodu (strujni krug 1) iz transformatorske stanice 2TS 187 Brezje II koja se nalazi na području Elektre Zagreb, u pogonu Samobor. Cijeli strujni krug je izveden nadzemno kabelom tipa SKS 3x70+1x71.5+2x16 mm², a njegova ukupna duljina sa svim odcjepima iznosi 1170 m. Na strujni krug je priključen ukupno 51 potrošač (trofazni i jednofazni potrošači), a na samom kraju strujnog kruga na udaljenosti od 740 m od transformatorske stanice zatražen je priključak potrošača priključne snage P=29.9 kW. Skica strujnog kruga 1 iz 2TS 187 Brezje II sa svim podacima prikazan je na slici 1.



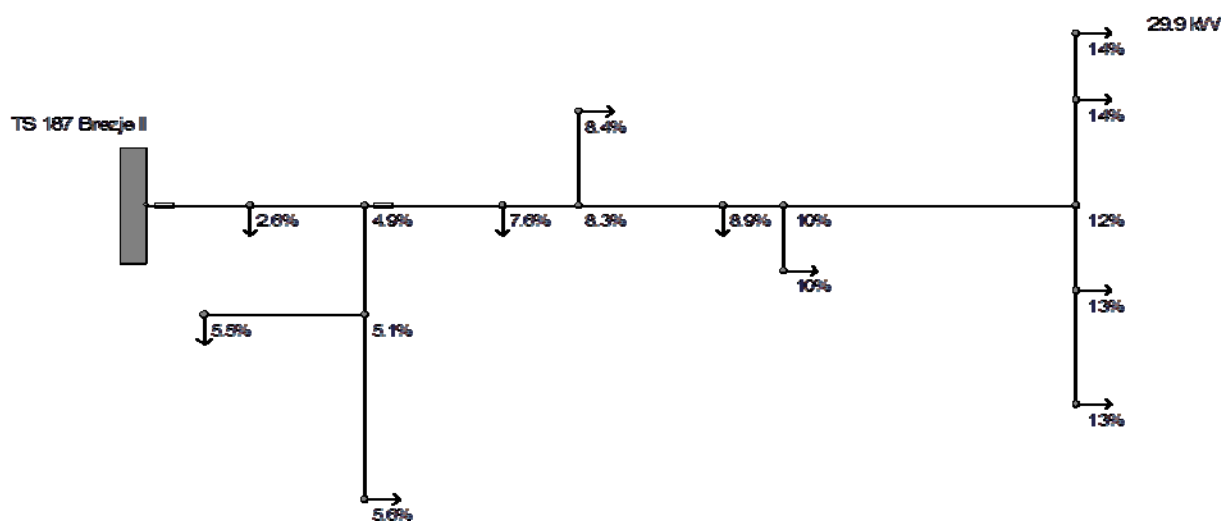
Slika 1. Prikaz strujnog kruga 1 iz 2TS 187 Brezje II s priklučenim novim potrošačem

Skicu niskonaponske mreže u stacionarnom stanju u kojem je prikazana na slici 1. treba unijeti u programski paket WINDis. Program se zasniva na radu u tri moguća moda:

- mod crtanja - mod u kojem se grafički vjerodostojno prikazuje shema mreže sa svim svojim elementima (transformator, magistralni vod, izvodi i podizvodi), ekvivalentima potrošača (grupa potrošača ucrtana kao jedan ekvivalentni potrošač) te tekstualnim oznakama
- mod unosa podataka - mod u kojem se unose podaci o vrsti i presjeku materijala vodova, duljinama dionica vodova, normativima potrošnje odnosno vršnoj snazi ekvivalentnih potrošača (korisnik računa i unosi manualno pomoću tablica normativa potrošnje ili pomoću Ruscove formule) te poziciji i karakteristikama osigurača za ispravno funkcioniranje zaštite

- mod analize - mod u kojem softver samostalno na bazi ucrtane sheme mreže i unesenih podataka radi kompletnu analizu parametara u niskonaponskoj mreži (strujna opterećenja, tokovi snaga, padovi napona, doseg zaštite itd.)

Iz opisa rada programa vidljivo je da pravilnim unosom sheme niskonaponske mreže i pravilnim unosom svih potrebnih podataka program automatski odrađuje kompletnu analizu niskonaponske mreže osim izračuna vršnih snaga ekvivalentnih potrošača koji su priključeni na mrežu, stoga će ovaj dio biti opisan u slijedećoj točki. Na slici 2. je prikazana ekvivalentna shema mreže sa slike 1. te obavljenom analizom za provjeru postotnog pada napona koji ne smije iznositi više od dozvoljenih $\pm 10\%$. Sa slike je vidljivo da pad napona u krajnjoj točki mreže gdje je priključen veliki potrošač iznosi 14% i premašuje dozvoljeno odstupanje pada napona. Pošto kriterij pada napona ne zadovoljava potrebne uvjete za ispravan rad mreže analiza kriterija doseg zaštite nije ni izvedena, odnosno izvodi se tek nakon određenih zahvata u niskonaponskoj mreži i dovođenja kriterija pada napona u svim točkama u mreži unutar dozvoljenih $\pm 10\%$.

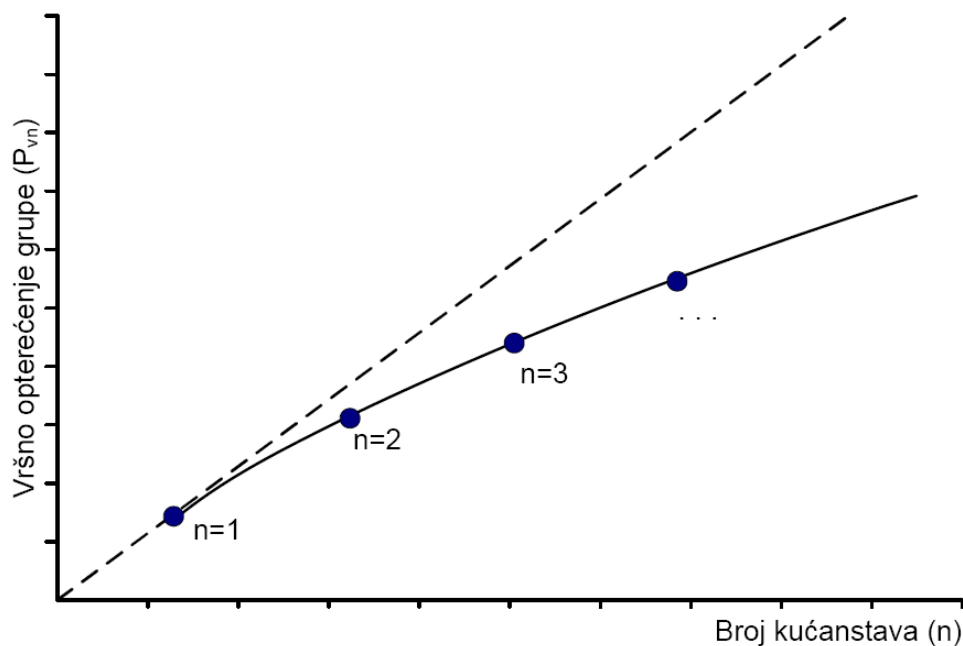


Slika 2. Ekvivalentna shema mreže s izvršenom analizom postotnog pada napona u programu WINDis

2.2. Određivanje ekvivalentnog vršnog opterećenja grupe potrošača

Potrošači u niskonaponskoj mreži obično se dijele u tri glavne kategorije: kućanstva, javna rasvjeta i ostali potrošači (poduzetništvo). Mogu se na mrežu priključivati jednofazno i trofazno, a u našem slučaju radi se o kućanstvima koja su spojena i trofazno i jednofazno. Osnovni parametri koje treba poznavati kod potrošača je radna snaga i faktor snage (jalova snaga) koju uzimaju iz mreže. Pošto je jako teško odrediti koliku jalovu snagu uzima pojedini potrošač, u proračunima najčešće stavljamo najniži dozvoljeni faktor snage iznosa $\cos \varphi = 0.95$. U proračunima opterećenja i padova napona u mreži, niskonaponski potrošači se uvijek modeliraju s određenim faktorom istodobnosti koji definira vršno opterećenje grupe potrošača u odnosu na zbroj vršnih opterećenja pojedinačnih potrošača.

Općenito omjer vršna snaga grupe potrošača/zbroj pojedinačnih vršnih snaga je sve manji što je broj potrošača (u ovom slučaju kućanstava) veći jer vršno opterećenje grupe kućanstava ne nastupa istovremeno, već se vršno opterećenje modelira pomoću faktora istodobnosti. Kod proračuna padova napona u niskonaponskoj mreži na koju su priključeni potrošači približno istih karakteristika mogu se primijeniti dvije metode određivanja ekvivalentnog vršnog opterećenja grupe kućanstava: pomoću tablice normativa opterećenja i potrošnje električne energije i pomoću Ruscove formule. Na konkretnom primjeru analize niskonaponske mreže (SK 1 iz 2TS 187 Brezje II) primijeniti ćemo obje metode.



Slika 3. Usporedba vršnog opterećenja grupe kućanstava uz uvažavanje faktora istodobnosti i bez njega

Prva metoda je veoma jednostavna, dakle izbrojimo ukupan broj potrošača koji su priključeni na SK 1 iz 2TS 187 Brezje II, a to je brojka od 51 kućanstvo + novi potrošač (29.9 kW). U tablici normativa opterećenja i potrošnje električne energije za 51 kućanstvo dobije se da je vršno opterećenje 51 kućanstva $P_v=98$ kW. Taj broj se podijeli sa brojem kućanstava te se dobije vršno opterećenje po jednom kućanstvu ($98 \text{ kW} / 51 \text{ kućanstvo} = 1.92 \text{ kW} / \text{kućanstvo}$). Završni korak je da se manje grupe kućanstava ucrtaju u WINDis kao zasebni potrošači skoncentrirani u zajedničkoj točki aritmetičkim zbrojem jediničnih vršnih opterećenja kućanstva kako je prikazano na slici 2. pomoću strelica. Za velikog potrošača na kraju izvoda se uzima da je njegovo vršno opterećenje $P=29.9 \text{ kW} \times 0.5$, dakle $P_v=14.95 \text{ kW}$.

Druga metoda se temelji na matematičkom izračunu pomoću Ruscove formule s kojom se računa vršno opterećenje 51 kućanstva koje će predstavljati ekvivalent vršnog opterećenja takve grupe potrošača. Ruscova formula glasi:

$$P_{vn} = P_{v1}(f_{\infty} \cdot n + (1 - f_{\infty}) \cdot \sqrt{n}), \text{ gdje je:}$$

P_{v1} - vršno opterećenje jednog kućanstva (8 kW)

f_{∞} - faktor istodobnosti za vrlo velik (teoretski beskonačan) broj kućanstava (0.17)

n - broj kućanstava u promatranoj grupi (51)

$$P_{v51} = P_{v1}(f_{\infty} \cdot n + (1 - f_{\infty}) \cdot \sqrt{n}) = 8 \text{ kW} (0.17 \cdot 51 + (1 - 0.17) \cdot \sqrt{51}) = 116.7 \text{ kW}$$

Kao i kod prve metode ovaj broj se podijeli s ukupnim brojem kućanstava, dakle $116.7 \text{ kW} / 51 \text{ kućanstvo} = 2.28 \text{ kW} / \text{kućanstvo}$ da se dobije vršno opterećenje po jednom kućanstvu. Završni postupak je identičan kao i kod prve metode. Primjećuje se razlika u rezultatima za vršno opterećenje grupe kućanstava kod ove dvije metode jer je Ruscova metoda nešto stroža jer uzima u obzir maksimalno opterećenje jednog kućanstva, dok je prva metoda nešto blaža i svodi se isključivo na smanjivanje faktora istodobnosti naprema povećanju broja kućanstava koja su priključena na mrežu.

2.3. Postupci provjere mogućnosti priključenja korisnika na niskonaponsku mrežu kod zahtjeva za većom priključnom snagom i/ili udaljenijih od postojeće niskonaponske mreže

Postupak provjere mogućnosti priključenja korisnika na niskonaponsku mrežu primjenjuje se na sve zahtjeve priključenja građevine na niskonaponsku mrežu, ali je u prvom redu namijenjen za slučajeve priključenja građevina s potrebom za većom priključnom snagom i/ili udaljenijih od postojeće niskonaponske mreže i provodi se u tri koraka:

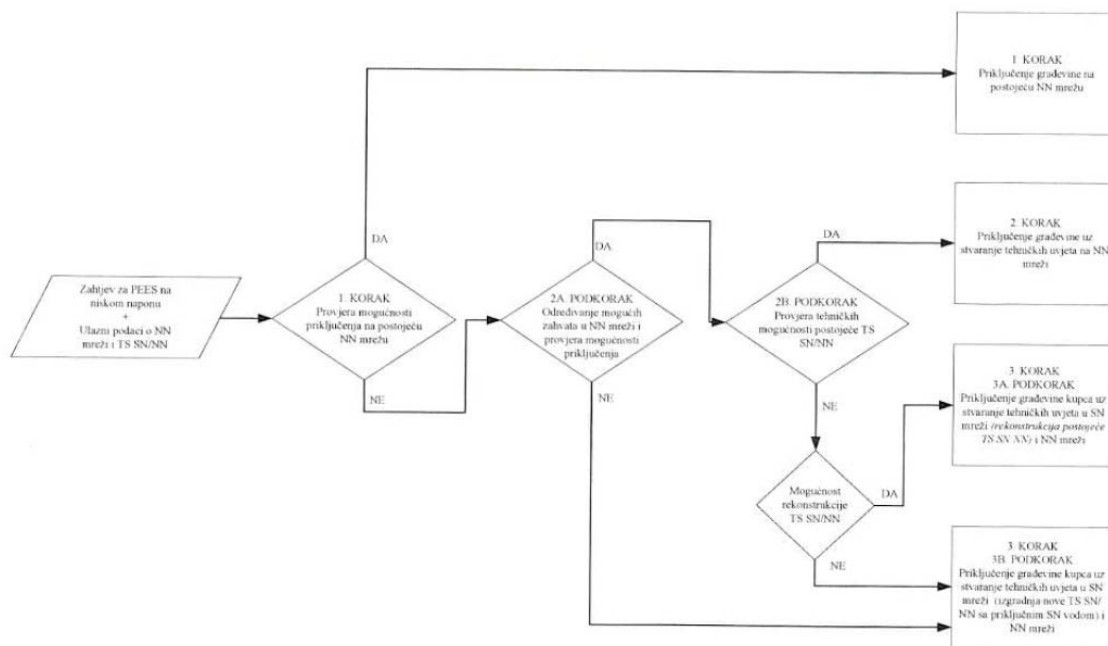
- **1. KORAK** - priključenje na postojeću niskonaponsku mrežu
- **2. KORAK** - priključenje uz ostvarenje tehničkih uvjeta u mreži izgradnjom i/ili rekonstrukcijom u niskonaponskoj mreži
- **3. KORAK** - priključenje uz ostvarenje tehničkih uvjeta u mreži izgradnjom i/ili rekonstrukcijom u srednjonaponskoj mreži

Prije analize parametara niskonaponske mreže potrebno je obuhvatiti sve podatke vezane za građevinu koja se priključuje, kao i mogućnosti priključenja na postojeću i/ili buduću elektroenergetsku mrežu. Neophodni podaci potrebni za analizu vezani su za građevinu (priključna snaga i položaj građevine) te tehničke podatke o elektroenergetskoj mreži (situacija mreže, planovi izgradnje i rekonstrukcije za promatrani dio mreže, podaci o transformatorskoj stanici, shema niskonaponske mreže s ucrtanim osnovnim podacima i podaci o postojećim kupcima).

Na osnovu ulaznih podataka o građevini koja se priključuje na niskonaponsku mrežu i tehničkih podataka elektroenergetske mreže vrši se analiza parametara u niskonaponskoj mreži (strujna opterećenja, tokovi snaga, padovi napona) te proračun dosega zaštite odnosno kriterija koje zaštita mora zadovoljavati za ispravno funkcioniranje niskonaponske mreže. Sve navedeno obuhvaća **1. KORAK** te ukoliko su svi tehnički kriteriji i drugi uvjeti za priključak zadovoljeni, građevina se može priključiti na postojeću niskonaponsku mrežu. Ukoliko barem jedan od navedenih tehničkih kriterija nije zadovoljen prelazi se na **2. KORAK** koji se sastoji od dva podkoraka, te u oba moraju biti zadovoljeni svi uvjeti i tehnički kriteriji kako bi se građevina mogla priključiti na niskonaponsku mrežu.

- **2A PODKORAK** - određuju se mogući zahvati u niskonaponskoj mreži te provjeravaju mogućnosti priključenja. Stvaranje tehničkih uvjeta u postojećoj niskonaponskoj mreži može se ostvariti ulaganjem u: produljenje postojećeg niskonaponskog voda od optimalne točke do građevine koja se priključuje, rekonstrukciju i izgradnju postojećeg niskonaponskog izvoda u smislu povećanja presjeka vodiča od transformatorske stanice do proračunski određene optimalne točke i izgradnju novog niskonaponskog izvoda od transformatorske stanice do građevine s minimalnim opterećenjem izvoda od 40%. Nakon izvođenja jednog od navedenih ulaganja s obzirom na tehničke i ekonomske uvjete te po definiranju novih ulaznih podataka za provjeru tehničkih kriterija, isti se provode prema uvjetima prvog koraka. Svi tehnički kriteriji moraju biti zadovoljeni za sve postojeće kupce, kao i za sve nove priključene kupce uzduž izvoda.
- **2B PODKORAK** - provjeravaju se tehničke mogućnosti postojeće TS 20(10)/0.4 kV. Ukoliko je transformatorska stanica preopterećena nakon priključenja novog potrošača, potrebno je sanirati novonastalu situaciju rekonstrukcijom transformatorske stanice i ugradnjom transformatora veće nazivne snage.

Ukoliko nije ispunjen barem jedan od kriterija iz **2A** i **2B PODKORAKA** prelazi se na **3. KORAK** koji je krajnje rješenje za priključak novog kupca ukoliko se ne ispunjavaju svi uvjeti i tehnički kriteriji iz prethodnih koraka. On podrazumijeva zamjenu niskonaponskog bloka ukoliko nema mogućnosti priključenja novog niskonaponskog izvoda ili zamjenu ugrađenog transformatora ukoliko postojeći ne zadovoljava prema povećanju vršne snage po priključku novog kupca, odnosno kao krajnju mjeru izgradnju i interpolaciju nove TS 10(20)/0.4 kV i SN vodova. Izgradnja nove transformatorske stanice TS 10(20)/0.4 kV s priključnim srednjonaponskim vodovima definira se kao konačno rješenje priključenja građevine kupca na niskonaponsku mrežu.

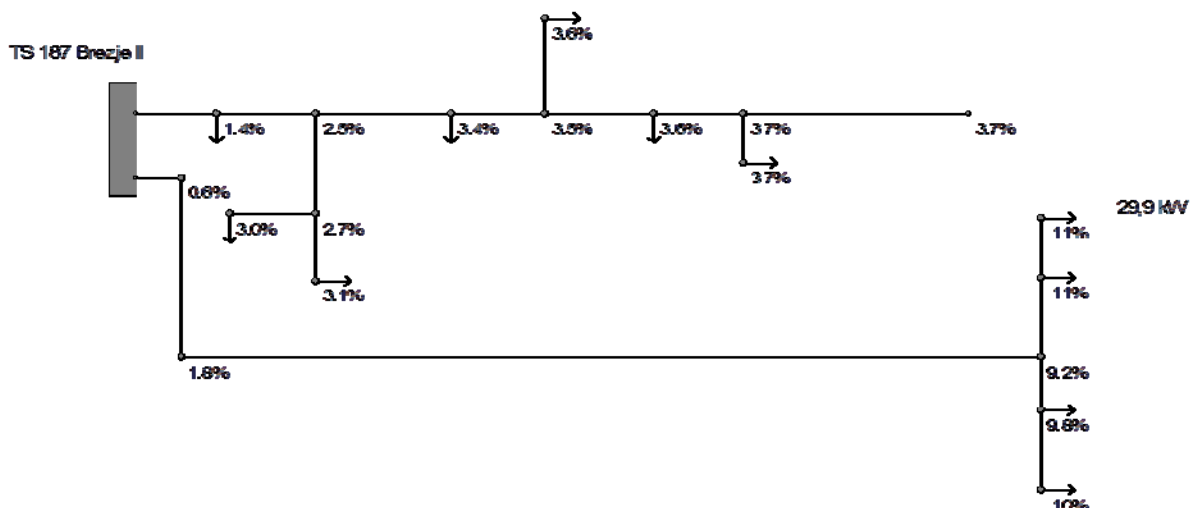


Slika 4. Prijedlog postupka priključenja građevine na niskonaponsku mrežu

3. ANALIZA PADOVA NAPONA I DOSEGA ZAŠTITE NAKON RASTEREĆENJA STRUJNOG KRUGA 1 I POVLAČENJA 500 m NOVOG STRUJNOG KRUGA IZ TRAFOSTANICE 2TS 187 BREZJE II

U točki 2.1. je opisan način unosa podataka niskonaponske mreže u programski paket WINDis te je prikazana analiza postotnog pada napona u mreži za slučaj priključenja novog kupca $P=29.9$ kW na kraju izvoda. Iz slike 2. je vidljivo da postotni pad napona na mjestu priključenja novog kupca iznosi 14% kao i da u ostalim točkama mreže postotni pad napona premašuje dozvoljeno odstupanje od $\pm 10\%$. Dakle, prema prethodno iskazanoj teoriji o postupcima provjere mogućnosti priključka korisnika na niskonaponsku mrežu zaključuje se da se novi potrošač ne može priključiti na postojeću niskonaponsku mrežu, tj. da se prvi korak odbacuje jer nije zadovoljen kriterij maksimalnog dozvoljenog pada napona u mreži. Zbog toga se prelazi na izvršavanje drugog koraka, odnosno sagledavaju se mogući zahvati u niskonaponskoj mreži kako bi se ispunili svi tehnički kriteriji, a prvenstveno kriterij dozvoljenog pada napona. Razmotriti ćemo slučaj izvođenja novog strujnog kruga iz 2TS 187 Brezje II kabelom tipa SKS $3 \times 70 + 1 \times 71.5 + 2 \times 16$ mm² na istim stupovima na kojima je izveden postojeći SK 1 tako da se na njega prespoje svi kupci iza proizvoljno odabrane optimalne točke račvanja strujnog kruga 1 nakon 500 m. Dakle uzima se slučaj iz **2A. PODKORAKA** u kojem se vrši izgradnja novog niskonaponskog izvoda od transformatorske stanice do određene optimalne točke (u ovom slučaju izvodi se nadzemno duljine 500 m). Kao i u prvom slučaju shema mreže i svi podaci o mreži unose se pravilno u programski paket WINDis koji vrši analizu parametara niskonaponske mreže u novonastaloj situaciji. Pritom treba biti oprezan s unosom podataka, a pogotovo s unosom podataka o ekvivalentnom vršnom opterećenju skupine potrošača. Pošto se strujni krug 1 iz 2TS 187 Brezje II rasteretio te je novi strujni krug preuzeo dio opterećenja na sebe, izračun ekvivalentnog vršnog opterećenja strujnih krugova treba vršiti zasebno za svaki strujni krug jer se uslijed smanjenog broja potrošača na strujnom krugu povećava faktor istodobnosti, pa će se iznosi vršnih opterećenja grupa kućanstava razlikovati prema prvom proračunu.

Na slici 5. je prikazana ekvivalentna shema mreže nakon povlačenja novog strujnog kruga u duljini 500 m s obavljenom analizom za provjeru postotnog pada napona. Sa slike je vidljivo da su se naponske prilike sanirale u većem dijelu mreže, ali ipak na mjestu priključenja novog kupca iznosi nezadovoljavajućih 11%. Pošto kriterij pada napona ne zadovoljava potrebne uvjete za ispravan rad mreže analiza kriterija dosega zaštite kao u prethodnom slučaju nije ni izvedena, odnosno izvodi se tek nakon što se pad napona u svim točkama u mreži dovede unutar dozvoljenih $\pm 10\%$.



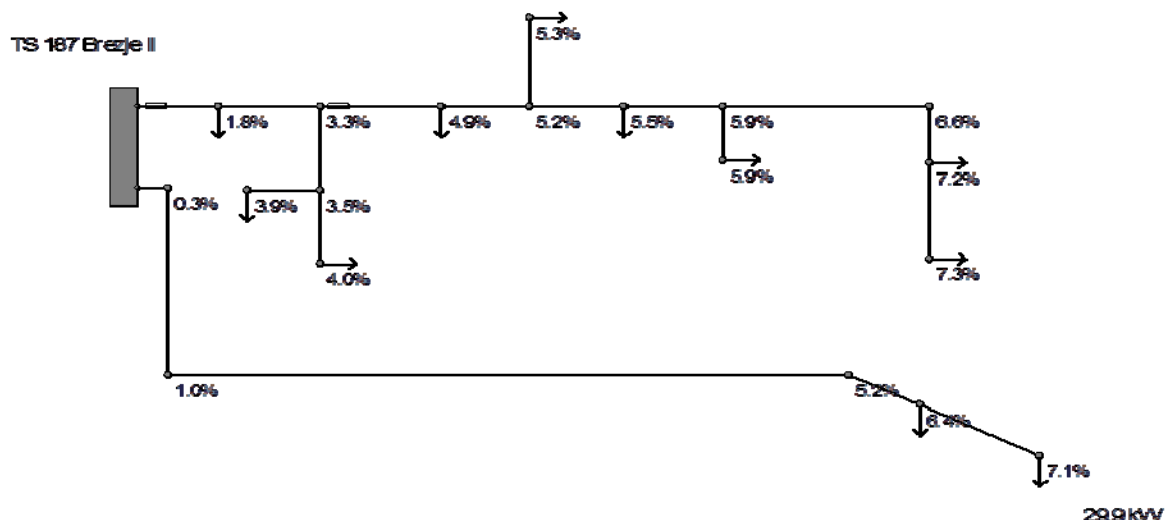
Slika 5. Ekvivalentna shema mreže s izvršenom analizom postotnog pada napona u programu WINDis nakon rasterećenja SK 1 i povlačenja novog strujnog kruga duljine 500 m

4. ANALIZA PADOVA NAPONA I DOSEGA ZAŠTITE NAKON POVLAČENJA 500 m NOVOG STRUJNOG KRUGA IZ TRAFOSTANICE 2TS 187 BREZJE II I PRESPAJANJA KUPACA ISTOČNO OD TOČKE RAČVANJA MREŽE

4.1. Analiza padova napona u novom slučaju nakon povlačenja 500 m novog strujnog kruga iz 2TS 187 Brezje II i prespajanja kupaca istočno od točke račvanja mreže

Kao optimalnu točku u prethodnom slučaju uzeli smo točku račvanja mreže na duljini 500 m od transformatorske stanice. Ispostavilo se da je broj kupaca i dalje prevelik, odnosno da je vršno opterećenje grupe potrošača preveliko s obzirom na duljinu strujnog kruga te da izaziva padove napona na kraju izvoda koji premašuju dozvoljenih $\pm 10\%$. Iz točke 2.3. da se očitati da je **3. KORAK** krajnje rješenje, odnosno ekonomski neisplativo rješenje koje će zadovoljiti sve tehničke kriterije za priključak novog kupca na niskonaponsku mrežu. Takvo rješenje, dakle rekonstrukcija postojeće TS 20(10)/0.4 kV ili gradnja nove TS 20(10)/0.4 kV s njenim SN priključkom se uzima u obzir jedino kada niti jedno moguće rješenje iz **2. KORAKA** ne uspijeva zadovoljiti sve tehničke kriterije za ispravan rad i funkcioniranje niskonaponske mreže. Stoga će se analizirati stanje mreže kada se izvede novi strujni krug iz 2TS 187 Brezje II kabelom tipa SKS 3x70+1x71.5+2x16 mm² na istim stupovima na kojima je izveden postojeći SK 1 s tom razlikom da se na njega prespoje samo kupci istočno od optimalne točke račvanja strujnog kruga 1 nakon 500 m, dok će svi ostali potrošači ostati spojeni na postojeći SK 1. Sve opreznosti koje su navedene u prethodnom slučaju prilikom unosa ekvivalentne sheme u program WINDis vrijede i u ovom slučaju.

Na slici 6. je prikazana ekvivalentna shema mreže nakon povlačenja novog strujnog kruga duljine 500 m i prespajanja samo kupaca istočno od točke račvanja mreže s obavljenom analizom za provjeru postotnog pada napona. Na ovoj slici se vidi da je **maksimalni pad na mjestu novog kupca iznosa 7.1%**. Također se uočava da su se naponske prilike sanirale na čitavom strujnom krugu. Ispunjenjem tehničkog kriterija pada napona na kraju izvoda analiziraju se i ostali tehnički parametri niskonaponske mreže, te se uočava znatno smanjenje strujnog opterećenja postojećeg strujnog kruga kao i primjerenija raspodjela tokova snaga. Ukoliko su svi parametri niskonaponske mreže u granicama dozvoljenih, vrši se još analiza **2B PODKORAKA** pri kojoj se može ustanoviti da ugrađeni transformator nazivne snage 160 kVA nije preopterećen priključenjem novog kupca na mrežu te da je osigurana pogonska rezerva snage od 20%. Analiza kriterija ispravnog funkcioniranja zaštite te dosega zaštite za minimalni jednopolni kratki spoj za novonastalu shemu niskonaponske mreže je pojašnjen u slijedećem odjeljku.



Slika 6. Ekvivalentna shema mreže s izvršenom analizom postotnog pada napona u programu WINDis nakon rasterećenja SK 1 i povlačenja novog strujnog kruga duljine 500 m te prespajanja kupaca istočno od točke računanja mreže

4.2. Ispunjavanje kriterija valjanosti osigurača i ispravnog funkcioniranja zaštite

Kriteriji valjanosti osigurača koje svaki osigurač postavljen u niskonaponskoj mreži mora ispunjavati kako bi zaštita funkcionirala ispravno i selektivno su:

- kriterij trajnog i vršnog strujnog opterećenja voda
- kriterij termičke čvrstoće s obzirom na I_{K3}
- kriterij dosega zaštite s obzirom na minimalni I_{K1}
- kriterij trajanja minimalnog I_{K1}

Što se tiče ispunjavanja prvog kriterija, osigurač koji se postavlja u transformatorskoj stanici na početku izvoda koji štiti cijeli strujni krug mora biti nazivne struje za jedan red veće od proračunski dobivene vršne struje cijelog izvoda. Primjerice, za novoformirani strujni krug iz 2TS 187 Brezje II proračunski dobivamo vrijednost vršnog strujnog opterećenja od 53.8 A, pa se stoga na početak izvoda postavlja osigurač nazivne struje 63 A. Kriterij trajnog opterećenja voda upozorava da se ne smije postaviti osigurač veće nazivne struje od dozvoljene trajne struje voda.

Tropolni kratki spoj je najteži oblik kvara u mreži i predstavlja istodobno kratko spajanje svih triju faza, te je praćen najvećim strujnim udarima u mreži. Ovakvi kratki spojevi su u pravilu rijetki, ali svakako treba voditi računa o što bržem i efikasnijem isklapanju takve vrste kvara u niskonaponskoj mreži. Ukoliko je vrijeme potrebno za taljenje rastalnice osigurača pri tropolnom kratkom spoju manje od dopuštenog vremena trajanja kratkog spoja ovaj kriterij je zadovoljen.

Jednopolni kratki spoj je najčešći kvar u mreži. On se javlja u mrežama s direktno uzemljenim zvjezdištima transformatora, a niskonaponska mreža je upravo takva. Ovakvi kratki spojevi su često praćeni mnogo nižim strujama nego u slučaju međufaznih kratkih spojeva. Zato s posebnom pažnjom treba odabrati osigurače nazivnih struja koji će sigurno i selektivno isključiti kvar. Najveći problem kod ispunjenja ovog kriterija je taj da su često vrijednosti maksimalne pogonske struje i minimalne struje jednopolnog kratkog spoja (program WINDis automatski izračunava tu vrijednost na temelju ucrtane sheme mreže) vrlo blizu ili da se čak preklapaju što dovodi do neispravnog funkcioniranja zaštite. Da bi se spriječio ovaj problem uzduž strujnog kruga postavljaju se linijski osigurači koji će osigurati osim svih

prethodno navedenih kriterija i selektivno prepoznavanje i pravovremeno odrađivanje u slučaju kvarova sa zemljom. Maksimalno dopušteno trajanje struje jednopolnog kratkog spoja u niskonaponskim mrežama iznosi 5 sekundi.

U konkretnom slučaju na primjeru niskonaponske mreže na slici 6., da bi vi kriteriji valjanosti osigurača bili ispunjeni te da bi zaštita ispravno i selektivno funkcionirala potrebno je postaviti na početku strujnog kruga 1 osigurač nazivne struje 160 A i jedan linijski osigurač na udaljenosti cca 200 m od transformatorske stanice nakon prvog grananja strujnog kruga, a na početku novog strujnog kruga osigurač nazivne struje 63 A. Na slici 7. je prikazan ispis svih kriterija valjanosti osigurača za odabrani osigurač nazivne struje 63 A koji se postavlja na početku izvoda novog strujnog kruga.

Od:	Cpt
Do:	C1
Izvod:	
Tip kabela/voda:	X00/0-A 3* 70+71.5
Smještaj:	Zrak
Ck:	1
In:	198 A
Duljina:	30.0 m
=====	
P	= 35.5kW
Q	= 11.3kvar
I(rst)=	53.8 A
I _z (rst)=	27%
ΔP=	0.12kW
ΔQ=	20.0 var
=====	
Tip Osigurača :	Končar 2NVO 1[63A]
In :	63.0 A
k :	1.25
Izvod :	
nivo :	1

t _{max} (Ik1):	2.58 s

Kriteriji valjanosti odabranog osigurača	

Provjera prema vršnom opterećenju	
In(osigurač):	63.0 A
Iv :	53.8 A
In(osigurač) > Iv	⇒ ZADOVOLJAVA
Rezerva:	15%

Provjera prema trajno dopuštenom opterećenju	
In(osigurač):	63.0 A
In(kab/vod):	198 A
In(osigurač) < In(kab/vod)	⇒ ZADOVOLJAVA
Rezerva:	68%

Provjera termičke čvrstoće s obzirom na Ik3	
Ik3:	>10 ⁸ A
t(osigurač)= t(Ik3):	4.00ms topl
t(dop.)=(Ik3x1sek/Ik3) ² :	159ms
t(osigurač) < t(dop.)	⇒ ZADOVOLJAVA
Rezerva:	97%

Provjera dosega zaštite (minimalni Ik1)	
Ios=Ik1min :	298 A
Ios(nul)= :	298 A
k*In(osigurač):	78.8 A
Ios > k*In(osigurač)	⇒ ZADOVOLJAVA
Rezerva:	74%

Provjera trajanja Ik1min	
t(osigurač)= t(Ik1):	2.58 s topl
TN mreža t(dop.):	5.00 s
t(osigurač) < t(dop.)	⇒ ZADOVOLJAVA
Rezerva:	48%

Slika 7. Kriteriji valjanosti osigurača (63 A) u 2TS 187 Brezje II koji štiti novi strujni krug

5. ZAKLJUČAK

Analizom podataka, prvenstveno provjerom postotnog pada napona u programskom paketu WINDis uočava se veliki pad napona na kraju izvoda (SK 1 iz 2TS 187 Brezje II) prilikom priključenja novog potrošača $P=29.9$ kW. Budući da na iznos pada napona na kraju izvoda utječe priključna snaga, odnosno ekvivalentno vršno opterećenje strujnog kruga i sama duljina izvoda, interveniralo se u niskonaponskoj mreži izvođenjem novog strujnog kruga iz transformatorske stanice kako bi se smanjile te dvije veličine koje prvenstveno utječu na nedozvoljeno velike iznose pada napona u pojedinim točkama mreže. Analizom niskonaponske mreže u WINDis-u nakon rasterećenja strujnog kruga 1 iz 2TS 187 vidi se da su se sanirale naponske prilike u svim točkama mreže te da postotni pad napona na mjestu priključenja novog kupca iznosi 7.1% što spada unutar dozvoljenih $\pm 10\%$. Problematika dozvoljenih strujnih opterećenja i dosega zaštite uslijed nastupa jednopolnog kratkog spoja je također riješena proračunima u programskom paketu WINDis i to na način da se u niskonaponskoj mreži postave linijski osigurači u određenim točkama mreže kako bi zaštita ispravno funkcionirala i selektivno štitila niskonaponski izvod uslijed pojave strujnih preopterećenja ili struja kratkog spoja.

6. LITERATURA

- [1] R. Goić, D. Jakus, I. Penović, "Distribucija električne energije", Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split, Split, 2008.
- [2] E. Mihalek, "Upute za projektiranje razdjelnih NN mreža 1. dio", EIHP, Zagreb, 1998.
- [3] Knjiga II - Normativi opterećenja i potrošnje električne energije, Institut za elektroprivredu Zagreb, Zagreb, 1980.
- [4] P. Sarajčev, "Zaštita u elektroenergetskom sustavu", Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split, Split, 2012.