

Branko Posedel, dipl. ing. el.  
HEP – ODS d.o.o., Elektroistra Pula  
[branko.posedel@hep.hr](mailto:branko.posedel@hep.hr)

Mario Jerman, ing. el.  
HEP – ODS d.o.o., Elektroistra Pula  
[mario.jerman@hep.hr](mailto:mario.jerman@hep.hr)

Marko Ražman, ing. el.  
BROLEX d.o.o., Buje  
[markorazman@yahoo.com](mailto:markorazman@yahoo.com)

## JEDNOPOLNI KRATKI SPOJ I POTENCIJAL PEN VODIČA U NN MREŽI

### SAŽETAK

U radu su prikazani matematički modeli za izračun struje jednopolnog kratkog spoja, potencijala PEN vodiča, najvišeg napona PEN vodiča prema zemlji na mjestu kvara ( $U_{max}$ ) i potencijala zvjezdišta transformatora ( $U_0$ ). Predložene su vrijednosti otpora pogonskog uzemljenja NN mreže ( $R_p$ ) i uzemljenja na kraju niskonaponskog izvoda ( $R_k$ ) kod kojih je napon PEN vodiča prema zemlji manji od 50 i 65 V. Napravljena je usporedba izračunatih vrijednosti sa mjernim rezultatima dobivenih kod izvedenog jednopolnog kratkog spoja u NN mreži.

U distributivnim NN mrežama priključen je znatan broj potrošača čije su instalacije izvedene bez zaštitnog vodiča (PE) i temeljnog uzemljivača te nije izvedeno izjednačavanje potencijala. Zbog takvih instalacija važno je da distributer električne energije ograniči potencijal PEN vodiča na vrijednost definiranu u Pravilniku o tehničkim normativima za zaštitu niskonaponskih mreža i pripadnih transformatorskih stanica u daljnjem tekstu "Pravilnik".

**Ključne riječi:** jednopolni kratki spoj, matematički model, pravilnik, potencijal PEN vodiča, dozvoljeni trajni napon dodira, granične vrijednosti, stambena zgrada

## SINGLE PHASE SHORT CIRCUIT AND POTENTIAL OF THE PEN CONDUCTOR IN LOW VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORKS

### SUMMARY

The article elaborates mathematical models for calculating single phase short circuit current, the potential of the PEN conductor, the highest potential against the earth on the fault place and the transformer star point potential. There are suggested values of the grounding-electrode resistance in the low voltage networks ( $R_p$ ), as well as the grounding at the end of the low voltage feeder ( $R_k$ ) featuring the potential of the PEN conductor is lower then 65 V. The calculated values have been compared with the results of measurement in the low voltage networks during single phase short circuit.

In low voltage networks there is a considerable number of consumers whose electrical installation don't have a protection conductor (PE), fundament grounding-electrode neither equalization of potential. Cause such electrical installations, it is very important that distribution company of electrical energy limit the potential of the PEN conductor on the value prescript by the „Regulations about technical norms of protection of low voltage networks and corresponding substations” hereinafter „regulations”.

**Key words:** single phase short circuit, mathematical model, regulations, potential of the PEN conductor, permanent allowed indirect touch voltage, limit values

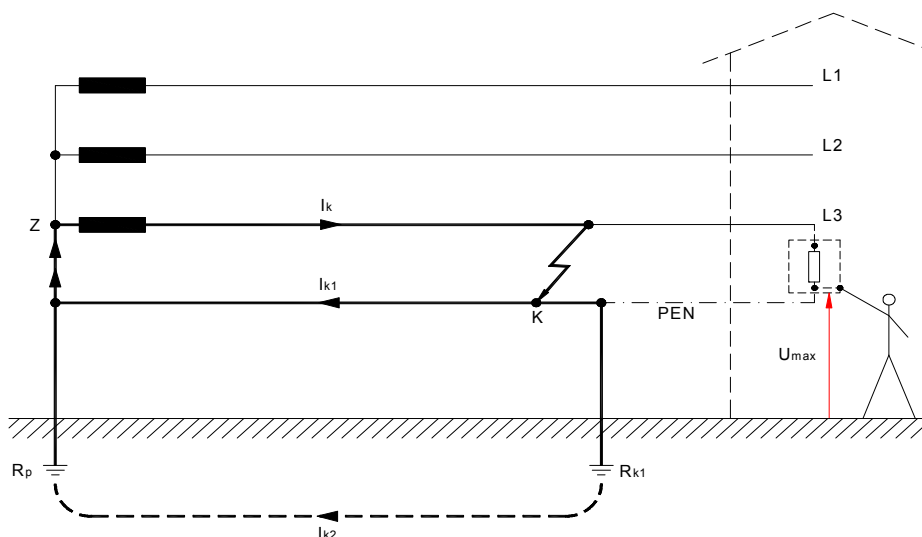
## 1. UVOD

Previsoki naponi dodira u niskonaponskim TN-C mrežama i instalacijama potrošača koji imaju zaštitu od indirektnog dodira izvedenu "nulovanjem" mogu biti izazvani:

- Kvarovima u VN mreži (110 kV), posebno kod transformacije 110/20 (10) kV kada se potencijal iz TS 110 kV prenosi preko plašta kabela na uzemljivače TS SN/NN i dalje preko PEN vodiča do instalacija potrošača.
- Kvarovima u SN mreži posebno kada je zvjezdište SN mreže uzemljeno, što je generalna orijentacija u našim mrežama
- Jednopolnim kvarovima u NN mreži

U ovom radu analizirana je samo pojava previsokih napona dodira uslijed jednopolnih kratkih spojeva (u daljnjem tekstu JKS) u NN mrežama. JKS je najfrekventniji kvar u niskonaponskim mrežama. Pod JKS-em podrazumijevamo spoj faznog i PEN vodiča. Struja JKS-a zatvara se kroz paralelnu granu koju čine PEN vodič i uzemljenja mreže, i pri tome podiže potencijal PEN vodiča i zvjezdišta transformatora.

Jedan dio potencijala PEN vodiča manifestira se kao napon dodira između masa nulovanih elemenata u NN mreži i nulovanih aparata u instalacijama potrošača. Na slici 1. prikazana je shema mreže kod JKS-a i prijenos djela potencijala PEN vodiča na "nulovanu" instalaciju potrošača.



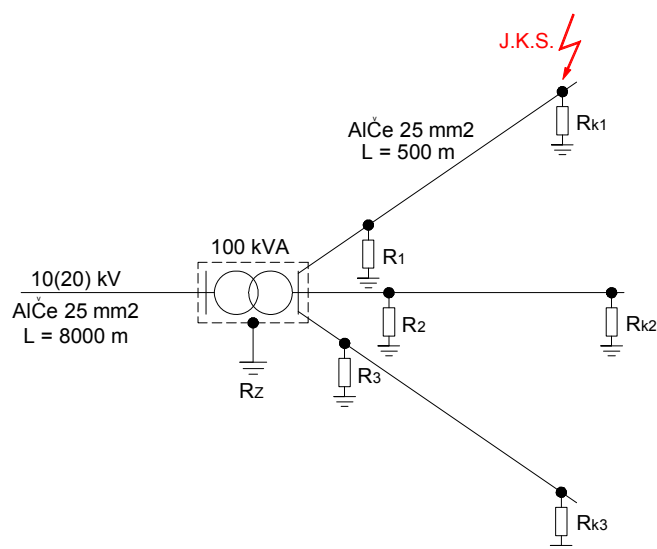
Slika 1. JKS na kraju niskonaponskog voda

## 2. PRORAČUNI

Potencijali PEN vodiča računati su tako da je najprije izračunata struja JKS-a, uzevši u obzir impedanciju 10(20) kV mreže i transformatora 10(20)/0.4 kV. Impedancija potrošača je zanemarena obzirom da je znatno veća od impedancije mreže.

### 2.1. Proračun struje jednopolnog kratkog spoja

Proračun struje JKS-a izveden je za zračnu radialnu mrežu koja je zastupljena u svim distributivnim NN mrežama. Jednopolna shema za proračun prikazana je na slici 2. Proračun je izvršen metodom simetričnih komponenti. Otpor uzemljenja zvjezdišta transformatora ( $R_p$ ) predstavlja ukupni otpor združenog uzemljenja trafostanice umanjen za otpor krajnjeg uzemljenja ( $R_{k1}$ ) na kraju izvoda. U ruralnim i prigradskim naseljima gdje je trafostanica priključena na kabelsku mrežu, ukupnom pogonskom uzemljenju ( $R_p$ ) moramo pridodati i uzemljenja susjednih trafostanica koja su povezana kabelskim plaštem na zaštitno uzemljenje trafostanice ( $R_z$ ).

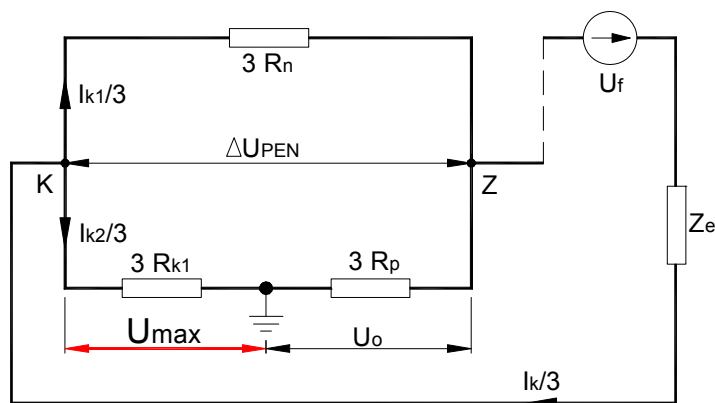


Slika 2. Jednopolna shema mreže sa prikazom položaja uzemljivača

Otpor pogonskog uzemljenja ( $R_p$ ) prikazanog na slici 2. računamo:

$$R_p = \frac{1}{\frac{1}{R_z} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{k2}} + \frac{1}{R_{k3}}} \quad (1)$$

Zbog jednostavne mreže, umjesto tri sheme direktnog, inverznog i nultog sistema koristimo pojednostavljenu shemu prikazanu na slici 3.



Slika 3. Shema referentne faze za izračun struje JKS

Pojedine oznake prikazane na slici 3. znače:

$U_f$  - fazni napon referentne faze (230 V)

$R_n$  - omski otpor PEN vodiča ( $\Omega$ )

$\Delta U_{PEN}$  - pad napona na PEN vodiču (V)

$R_p$  - združeno uzemljenje trafostanice bez krajnjeg uzemljenja  $R_{k1}$  ( $\Omega$ )

$R_{k1}$  - otpor uzemljenja krajnjeg uzemljivača ( $\Omega$ )

$U_o$  - potencijal zvjezdišta transformatora prema zemlji (V)

$U_{max}$  - maksimalni potencijal PEN vodiča prema zemlji na mjestu JKS-a (V)

$I_k$  - struja JKS-a (A)

- $I_{K1}$  - struja JKS-a kroz PEN vodič
- $I_{K2}$  - struja JKS-a kroz uzemljivače
- $Z$  - zvjezdište transformatora
- $K$  - točka JKS-a

Impedanciju pozitivnog, negativnog i nultog redoslijeda nadomjestimo sa ekvivalentnom impedancijom koja iznosi:

$$Z_e = Z_{1d} + 2 \cdot (Z_{1T} + Z_{1n}) + Z_{0T} + Z_{0n} \quad (2)$$

gdje je:

- $Z_{1d}$  - direktna impedancija 10 kV voda reducirana 0.4 kV ( $\Omega$ )
- $Z_{1T}$  - direktna impedancija transformatora 10(20)/0.4 kV reducirana na 0.4 kV ( $\Omega$ )
- $Z_{1n}$  - direktna impedancija NN izvoda ( $\Omega$ )
- $Z_{0T}$  - nulta impedancija transformatora 10(20)/0.4 kV reducirana na 0.4 kV ( $\Omega$ )
- $Z_{0n}$  - nulta impedancija NN zračnog izvoda ( $\Omega$ )

Direktne i nulte impedancije dalekovoda i transformatora uzete su iz kataloga, dok je nulta impedancija NN zračnog izvoda izračunata po relaciji:

$$Z_{0n} = (R_d + 3 \cdot R_n) + j4 \cdot X_d \quad (3)$$

gdje je:

- $R_d$  - omski otpor faznog vodiča ( $\Omega$ )
- 0.15 ... 2  $\Omega/\text{km}$  - prosječna vrijednost otpora zemlje  $\Omega/\text{km}$
- $X_d$  - induktivni otpor (za Al/Če 4 x 25 mm<sup>2</sup> iznosi 0.345 ( $\Omega/\text{km}$ ))

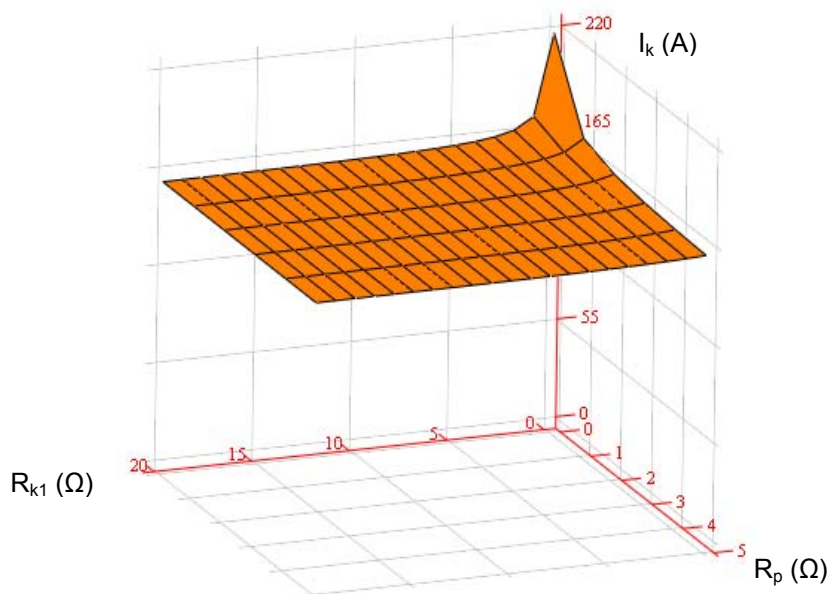
Obzirom da je PEN vodič uzemljen, zbog točnijeg proračuna struje JKS-a umjesto otpora PEN vodiča ( $R_n$ ) moramo uzeti paralelnu kombinaciju otpora PEN vodiča i otpora uzemljenja ( $R_P$  i  $R_{K1}$ ). Ekvivalentna impedancija iznosi:

$$R_e = 3 \cdot \frac{R_n \cdot (R_{K1} + R_P)}{R_n + R_{K1} + R_P} \quad (4)$$

Na osnovu slike 3. i jednadžbi (2) (3) i (4) struja JKS-a na kraju NN izvoda iznosi:

$$I_K = \frac{3 \cdot U_f}{Z_e + R_e} = \frac{3 \cdot U_f \cdot (R_n + R_{K1} + R_P)}{Z_e \cdot (R_n + R_{K1} + R_P) + 3 \cdot R_n (R_{K1} + R_P)} \quad (5)$$

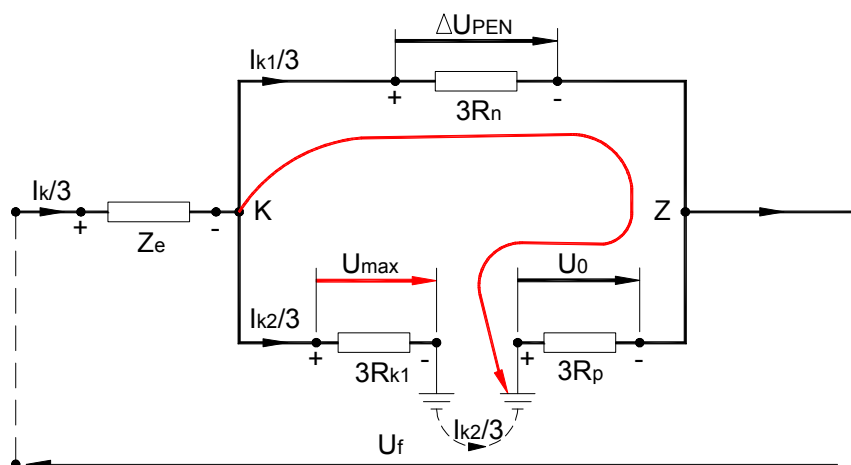
Na slici 4. prikazana je funkcijska ovisnost struje JKS-a o otporima uzemljenja  $R_P$  i  $R_{K1}$ . Iz slike vidimo da je funkcija osjetljiva na promjene kada je  $R_{K1}$  manji od cca. 2  $\Omega$  a  $R_P$  manji od cca. 1  $\Omega$ , dok za ostale vrijednosti blago pada. Veličina impedancije  $Z_e$  izračunata je za parametre mreže sa slike 2.



Slika 4. Struja JKS kao funkcija  $R_p$  i  $R_{k1}$

## 2.2. Proračun potencijala PEN vodiča

Proračun potencijala PEN vodiča je izveden samo za najgori mogući slučaj tj. kada je JKS nastao na kraju voda. Za sve druge slučajeve JKS-a koji su bliži napojnoj trafostanici potencijali PEN vodiča su manji. U kabelskim mrežama PEN vodič je uzemljen na više mjesta, presjeci vodiča su veći a i mogućnost kvara je manja, pa za te mreže nije vršen izračun. Shema za izračun potencijala PEN vodiča ( $\Delta U_{PEN}$ ), maksimalnog dodirnog napona ( $U_{max}$ ) i napona zvjezdista transformatora ( $U_0$ ) prikazana je na slici 5.



Slika 5. Shema NN mreže za proračun  $\Delta U_{PEN}$ ,  $U_{max}$  i  $U_o$

### 2.2.1. Parametri za proračun

Vrijednost združenog uzemljenja ( $R_p$ ) za zračne mreže određena je čl. 24 "Pravilnika" i veličinom struje JKS-a u 10(20)kV mreži. Struje JKS-a u SN mreži u ovisnosti o različitim tipskim izvedbama uzemljenja zvijezdišta transformatora iznose:

$$I_{IKS} = (300...150...55...10A) \quad (6)$$

Za vrijeme isključenja struje JKS-a od 0,4 sekunde dopušteni napon dodira prema krivulji "a" iz čl.6. "Pravilnika" iznosi 88 V. Za navedeni napon dodira prema čl.57 istog "Pravilnika" otpor združenog uzemljenja U TS 10(20)/0,4 kV može iznositi:

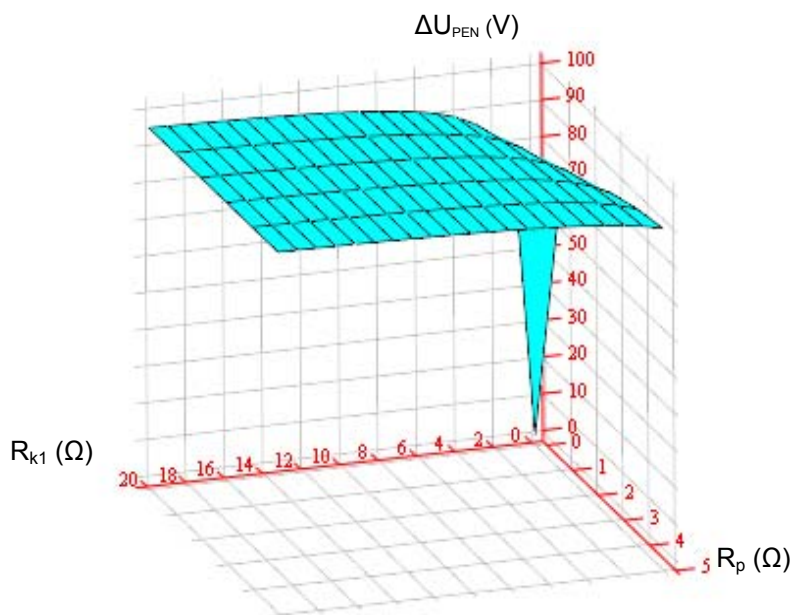
$$R_p = (0,3...0,58...1,6...5\Omega) \quad (7)$$

Otpor uzemljenja na kraju voda  $R_{k1}$  varirat će od 1 do 20  $\Omega$  iako najveća vrijednost po "Pravilniku" može biti 10  $\Omega$ . Vrijednost impedancije  $Z_e$  izračunata je za parametre mreže prikazanih na slici 2.

Struja JKS-a na nadomjesnoj impedanciji  $R_e$  stvara pad napona koji iznosi:

$$\Delta U_{PEN} = I_k \cdot R_e = U_f \cdot \frac{3 \cdot R_n \cdot (R_{k1} + R_p)}{3 \cdot R_n \cdot (R_k + R_p) + Z_e \cdot (R_n + R_{k1} + R_p)} = \frac{U_f}{1 + \frac{Z_e}{R_e}} \quad (8)$$

Na slici 6. prikazana je funkcijska ovisnost  $\Delta U_{PEN}$  o otporima uzemljenja  $R_p$  i  $R_{k1}$ . Iz slike vidimo da funkcijska vrijednost za sve uobičajene vrijednosti  $R_p$  i  $R_{k1}$  ima približno konstantnu vrijednost i kreće se od 60 do maksimalno 95 V. Za tipične presjeke NN vodova od 25 do 70 mm<sup>2</sup> i transformatore snage do 630 kVA i uobičajene vrijednosti uzemljenja iz „Pravilnika” iznosi najviše 91 V.

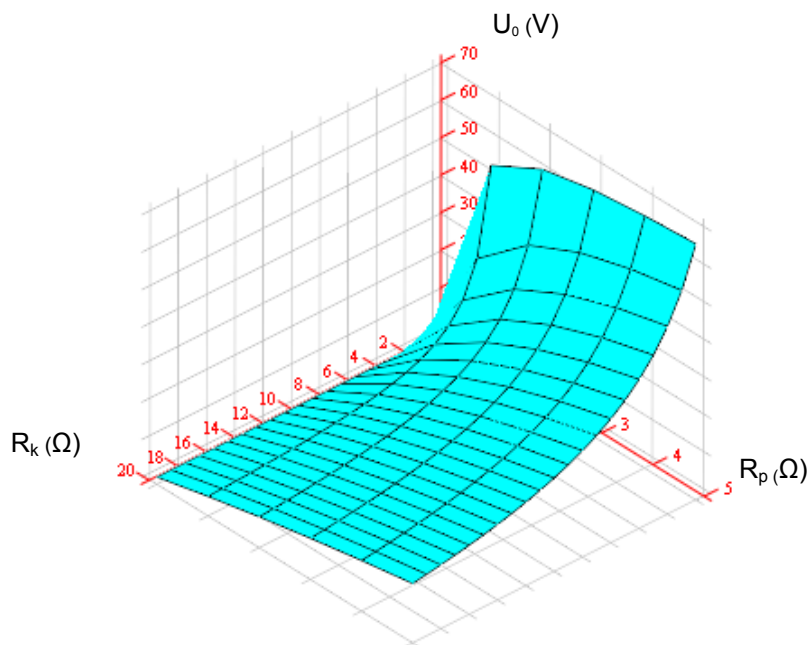


Slika 6. Pad napona na PEN vodiču u ovisnosti o  $R_p$  i  $R_{k1}$

Na pogonskom uzemljenju  $R_p$  struja  $I_{k2}$  uzrokuje pomak potencijala zvjezdišta transformatora  $U_0$  prema zemlji koji iznosi:

$$U_0 = I_{k2} \cdot R_p = \frac{\Delta U_{PEN}}{1 + \frac{R_{k1}}{R_p}} \quad (9)$$

Na slici 7. prikazana je funkcijska ovisnost  $U_0$  o otporima uzemljenja  $R_p$  i  $R_{k1}$ . Iz slike vidimo da funkcijska vrijednost za sve uobičajene vrijednosti  $R_p$  i  $R_{k1}$  iznosi od 1 do 45 V.



Slika 7. Potencijal zvjezdišta transformatora  $U_0$  u ovisnosti o  $R_p$  i  $R_{k1}$

Zbrajajući padove napona (slika 5.) od mjesta kvara (K) do zemlje, dobijemo napon između točke kvara i zemlje tj. maksimalni napon PEN vodiča prema zemlji  $U_{\max}$ . Napon na PEN vodiču ( $\Delta U_{PEN}$ ) i napon na zvjezdištu transformatora ( $U_0$ ) su suprotno usmjereni, pa najveći napon PEN vodiča prema zemlji na mjestu kvara iznosi:

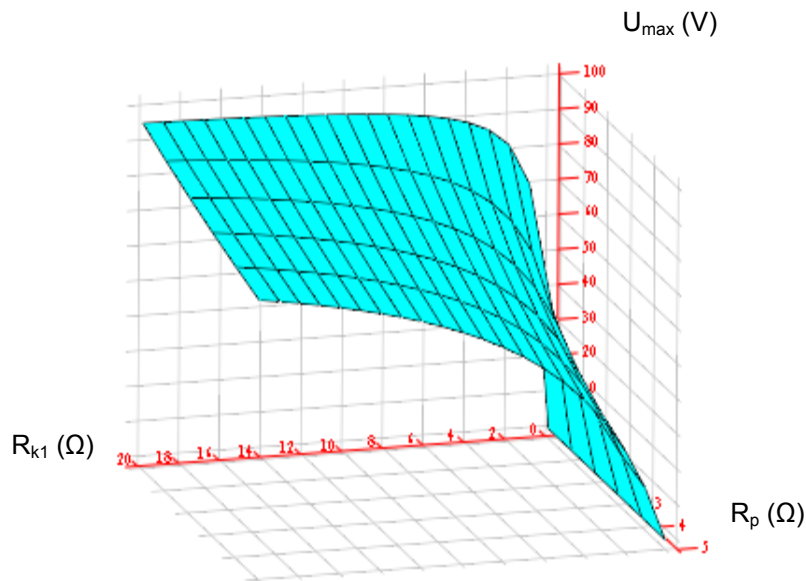
$$U_{\max} = \Delta U_{PEN} - U_0 = \frac{3 \cdot U_f \cdot R_n \cdot R_{k1}}{3 \cdot R_n \cdot (R_k + R_p) + Z_e \cdot (R_n + R_{k1} + R_p)} = \frac{\Delta U_{PEN}}{1 + \frac{R_p}{R_{k1}}} \quad (10)$$

Iz izraza (10) možemo odrediti dvije krajnje vrijednosti  $U_{\max}$  i to:

a)  $R_{k1} = R_p$  - tada je  $U_{\max} = \frac{\Delta U_{PEN}}{2}$

b)  $R_{k1} \gg R_p$  - tada je  $U_{\max} = \Delta U_{PEN}$

Sa povećanjem otpora krajnjeg uzemljivača ( $R_{k1}$ ) povećava se i  $U_{\max}$ . Kod prekida spoja PEN vodiča i krajnjeg uzemljivača,  $U_{\max}$  je jednak  $\Delta U_{PEN}$ . Na slici 8. prikazana je funkcijska ovisnost  $U_{\max}$  o otporima uzemljenja  $R_p$  i  $R_{k1}$ .

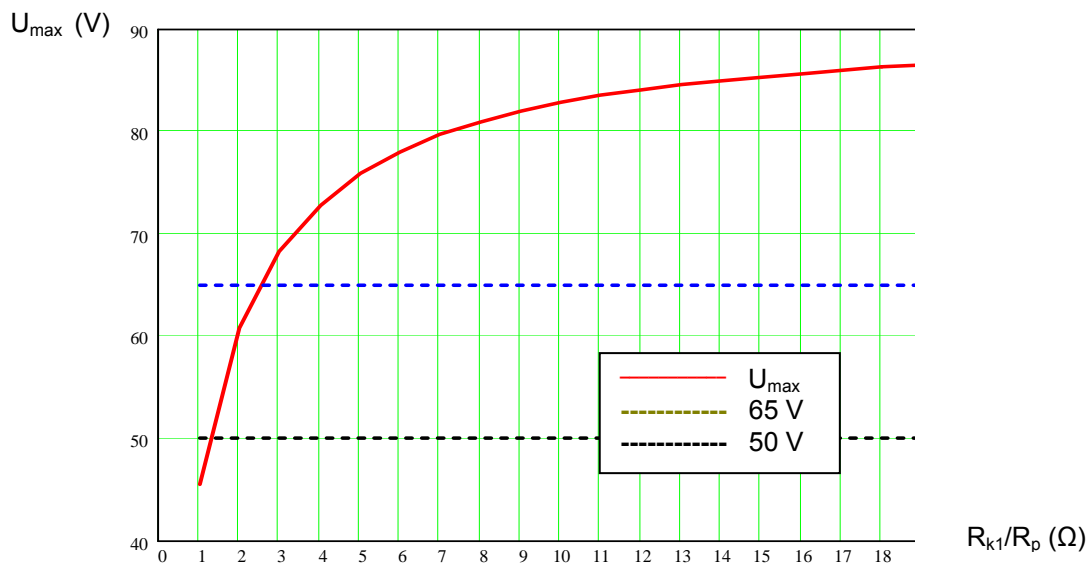


Slika 8. Maksimalni napon PEN vodiča prema zemlji

Iz izraza (10) vidimo da nam maksimalan napon PEN vodiča prema zemlji ( $U_{\max}$ ) ovisi o omjeru  $R_p$  i  $R_{k1}$  a ne o njihovim pojedinačnim vrijednostima. Maksimalan napon PEN vodiča ( $U_{\max}$ ) raste kada se vrijednost pogonskog uzemljenja ( $R_p$ ) smanjuje, što se vidi na slici 8. Ako u izrazu (10) zamijenimo  $\Delta U_{PEN}$  sa odabranom najvećom vrijednošću koju može poprimiti, a to je 91 V, dobit ćemo najmanji omjer  $R_p$  i  $R_{k1}$  kod kojeg maksimalni napon PEN vodiča prema zemlji neće biti veći od 65 V odnosno 50 V. Slika 9. prikazuje ove omjere otpora  $R_p$  i  $R_{k1}$ .

Na osnovu izraza (10) računamo omjere:

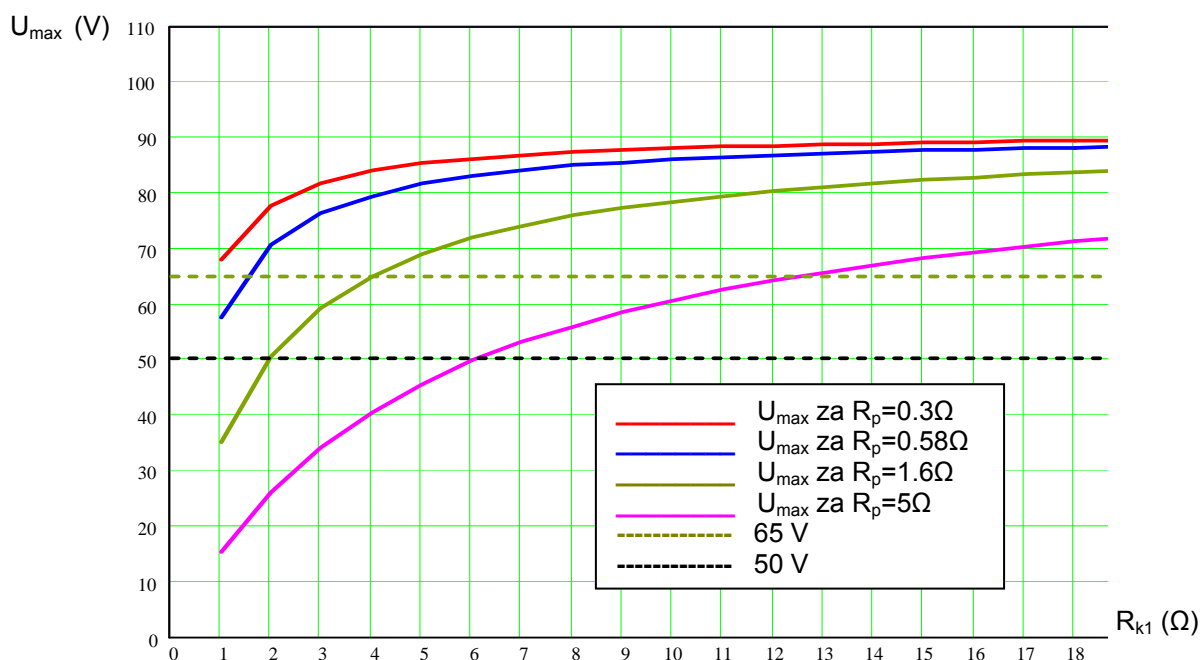
- ako je  $\frac{R_{k1}}{R_p} \leq 2,5$  maksimalni napon PEN vodiča prema zemlji ( $U_{\max}$ ) biti će manji od 65 V
- ako je  $\frac{R_{k1}}{R_p} \leq 1,3$  maksimalni napon PEN vodiča prema zemlji ( $U_{\max}$ ) biti će manji od 50 V



Slika 9. Maksimalni napon PEN vodiča prema zemlji uz  $\Delta U_{PEN} = 91$  V



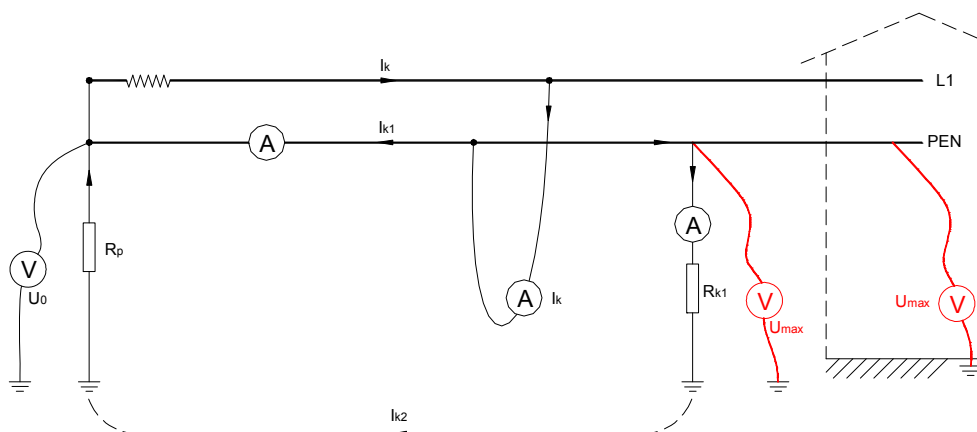
Na slici 10. je prikazana funkcijska ovisnost  $U_{\max}$  od tipičnih vrijednosti združenog uzemljenja u distributivnoj mreži. Iz slike vidimo da za vrijednosti združenog uzemljenja do  $1.6 \Omega$  ( $0.3$ ,  $0.58$  i  $1.6 \Omega$ ) vrijednosti krajnjeg uzemljivača  $R_{k1}$  moraju biti manje od  $0.8$ ,  $1.5$  i  $4 \Omega$  da bi  $U_{\max}$  bio manji od  $65 \text{ V}$ , dok za vrijednosti združenog uzemljenja od  $1.6$  do  $5 \Omega$  mogu biti od  $4$  do  $12.5 \Omega$ .



Slika 10. Maksimalni napon PEN vodiča prema zemlji

### 3. REZULTATI MJERENJA

Provjera matematičkog modela izvršena je mjerenjem električnih veličina u NN mreži. Parametri NN mreže prikazani su na slici 2. JKS je izvršen na zadnjem stupu NN izvoda gdje je PEN vodič spojen sa uzemljivačem  $R_{k1}$ . Shematski prikaz mjerenja prikazan je na slici 11. Vrijednost otpora uzemljenja združenog uzemljivača  $R_p$  iznosila je  $1.3 \Omega$  dok je vrijednost krajnjeg uzemljivača  $R_{k1}$  bila  $2 \Omega$ . Obzirom da je omjer između  $R_{k1}$  i  $R_p$  manji od  $2.5$  bilo je za očekivati manji maksimalni napon PEN vodiča prema zemlji od  $65 \text{ V}$ , što je mjerenje i potvrdilo.



Slika 11. Shematski prikaz mjerenja

Iz tablice I. vidimo da se izračunate vrijednosti podudaraju sa izmjerenim što potvrđuje ispravnost matematičkog modela. Izmjereni maksimalni napon PEN vodiča prema zemlji prenosi se u električnu instalaciju potrošača kao dodirni napon. Maksimalni napon PEN vodiča prema zemlji koji je nastao uslijed JKS-a u NN mreži zadovoljava odredbe "Pravilnika", međutim ne zadovoljava uvjete iz Pravilnika o tehničkim normativima za električne instalacije niskog napona gdje je najveći napon dodira 50 V.

Tablica I. Izmjerene i izračunate vrijednosti

	$I_k$ (A)	$I_{k2}$ (A)	$I_{k1}$ (A)	$U_o$ (V)	$\Delta U_{PEN}$ (V)	$U_{max}$ (V)
Izračunate vrijednosti	168	21	146	7	65	58
Izmjerene vrijednosti	167	22	140	6,5		55

#### 4. OSVRT NA "PRAVILNIK"

Zaštita od previsokog dodirnog napona u nulovanim NN mrežama temelji se na dva osnovna uvjeta i to:

- Sigurnim isklopom kvara, tj. struja JKS-a mora biti veća od isklopne struje pripadnog osigurača
- Ograničenjem potencijala na PEN vodiču, tj. ukupni otpor uzemljenja PEN vodiča mora biti takav da onemoguću pojavu ili održavanje dodirnih napona većih od danih na krivulji "a".

U NN zračnim mrežama zbog dužine izvoda, vremena pregaranja osigurača su u velikoj većini veća od 1 s, (u našem slučaju 25 s) pa je bitno da trajno dozvoljeni napon dodira bude ispod 65 V. Iz proračuna se vidi da ispunjenje uvjeta iz čl.24 "Pravilnika" ne osigurava da dodirni napon bude ispod 65 V. Za slučaj da nam je vrijednost otpora združenog uzemljenja manja od 1  $\Omega$  (0.3, 0.58 i 1.6  $\Omega$ ), a otpor krajnjeg uzemljenja 10  $\Omega$  što dozvoljava "Pravilnik", napon dodira ( $U_{max}$ ) bi prema slici 10. bio veći od 65 V.

#### 5. ZAKLJUČAK

U referatu je prikazan matematički model za izračun potencijala PEN vodiča prema zemlji a mjerenja u NN zračnoj mreži potvrdili su rezultate proračuna. U NN mrežama koje imaju otpor združenog uzemljenja manji od 4  $\Omega$ , mogu se pojaviti potencijali PEN vodiča prema zemlji veći od 65 V bez obzira što otpor krajnjeg uzemljivača NN mreže zadovoljava uvjete iz čl.24 "Pravilnika".

Zbog toga se predlaže, da se pored uvjeta iz čl.24 uvede dodatni kriterij "naponske vage" tj., omjer između  $R_{k1}$  i  $R_p$  kojim se određuje raspodjela potencijala duž PEN vodiča, a koji ne bi smio biti veći od 2.5. Ovaj uvjet omogućuje ekonomično uzemljivanje PEN vodiča u TN mrežama

Također je ukazano na neusklađenost veličine napona dodira definiranih u "Pravilniku" i u Pravilniku o tehničkim normativima za električne instalacije niskog napona.

#### LITERATURA

- [1] EDZ, "Pravilnik o tehničkim normativima za zaštitu niskonaponskih mreža i pripadnih transformatorskih stanica", Zbirka propisa za polaganje stručnog ispita, Zagreb 2008.
- [2] Institut za elektroprivredu - Zagreb, "Istraživanje i izbor sistema zaštite u mreži niskog napona i kod potrošača s elementima za elektroenergetsku suglasnost", Zagreb 1986.
- [3] Institut za elektroprivredu - Zagreb, "Osigurači u mreži niskog napona, Efekti zaštite i zadovoljavanje uvjeta nulovanja", Zagreb, 1986.
- [4] EDZ, "Pravilnik o tehničkim normativima za električne instalacije niskog napona", Zbirka propisa za polaganje stručnog ispita, Zagreb 2008.