

Ivan Pavković
Elektrodalmacija Split, Pogon Trogir
ivan.pavkovic@hep.hr

Viktor Milardić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
viktor.milardic@fer.hr

Božidar Filipović-Grčić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
bozidar.filipovic-grcic@fer.hr

ANALIZA UČINKOVITOSTI PRENAPONSKE ZAŠTITE TS 10/0.4 kV

SAŽETAK

Obrađena je problematika prenaponske zaštite vangradskih TS 10/0,4 kV, tipa «tornjić». Temeljem usvojenih geometrijskih veličina za TS, izračunata je amplituda struje groma (koja može pogoditi pripadni DV). Potom su pretpostavljeni oblici (strmine) upadnog naponskog putnog i strujnog vala koji spomenutim DV 10 kV ulazi u navedenu TS.

Programom EMTP izvršen je proračun prenapona na energetskom transformatoru u sljedećim slučajevima:

A) - ugrađen je samo odvodnik prenapona na ulazu u TS 10/0,4 kV

B) - ugrađeni su odvodnici prenapona na ulazu TS 10/0,4 kV i uz energetski transformator

Rezultati proračuna za slučaj B su pokazali da su prenaponi na pripadnom energetskom transformatoru znatno manji od koordinacijskog podnosivog napona, te da će spomenuti energetski transformator biti učinkovito zaštićen od očekivanih atmosferskih prenapona.

Ključne riječi: TS 10/0,4 kV, prenaponska zaštita, analiza učinkovitosti, koordinacijski podnosivi napon, dva sloga odvodnika prenapona.

EFFICIENCY ANALYSIS OF 10/0.4 kV SUBSTATION OVERVOLTAGE PROTECTION

SUMMARY

This paper presents a case study of overvoltage protection of 10/0.4 kV "tower type" rural substation. On the basis of acquired substation geometric values, lightning current amplitude (which can strike the line incoming substation) was calculated. Hence the waveforms (steepness) of the voltage and current travelling waves which strike 10 kV line and enter the mentioned substation were assumed. The overvoltage calculations on power transformer have been carried out by computer program EMTP for two cases:

A) - surge arrester installed on the 10/0,4 kV substation entrance

B) - surge arresters installed on the 10/0,4 kV substation entrance and close to power transformer

Calculation results for case B) show that overvoltages on power transformer are significantly lower than coordination withstand voltage therefore power transformer will be efficiently protected from expected lightning overvoltages.

Key words: 10/0.4 kV substation, overvoltage protection, efficiency analysis, coordination withstand voltage, two stage of surge arresters.

1. UVOD

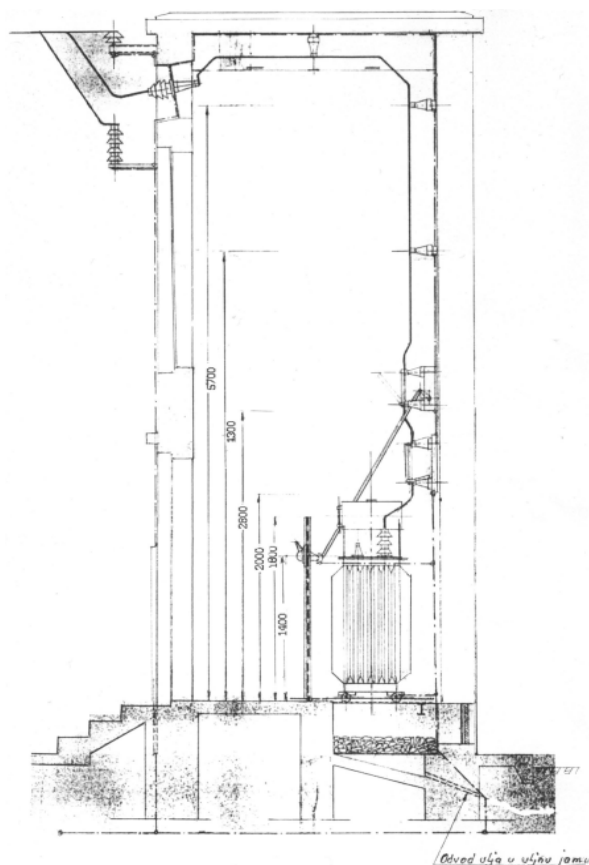
Udar groma je jedna od najsloženijih prirodnih pojava. Premda su dosadašnja iskustva pokazala da je tijekom godine broj udara groma u vezi sa pojavom grmljavine, ipak se nikad točno ne može predvidjeti kada će doći do atmosferskog izbijanja prema zemlji. Više je činitelja koji djeluju na ovu prirodnu pojavu. Ovu tezu potkrepljuje i činjenica da se grom ili munja ne pojavljuje u svim krajevima podjednaki broj puta. Za područje visoke kerauničke razine često se rabi i naziv prenaponski ugroženo područje. U jedno od takvih područja zasigurno spada i Trogirska zagora te još neka mjesta njene okolice. Primjerice, u posljednjih deset godina na ovom području, kojeg pokriva elektrodistribucijska mreža Pogona Trogir, evidentirano je oko 20 havarija na TS 10/0,4 kV tipa "tornjić", prouzročenih uslijed atmosferskih izbijanja.

Uspriko činjenici da se u distribucijskoj mreži danas u pravilu grade tipske TS 10(20)/0,4 kV (tj. TS s ugrađenom 20 kV opremom), ipak su u pogonu ostale brojčano dominantnije TS klasičnog tipa. Dakle, riječ je o TS čija je oprema 10 kV razine. Kako se u ovom članku razmatraju isključivo vangradske TS, tj. TS seoskog tipa, logično je da su one (zbog nezatnog zaklanjanja vodova) spram atmosferskih prenapona znatno izloženije, nego li TS koje su smještene u gradovima ili većim naseljima.

U praksi se više puta pokazalo da su TS tipa "tornjić" kod kojih je odvodnik prenapona ugrađen samo na njenom ulazu (zbog kratke zaštitne zone) neučinkovito zaštićene od atmosferskih prenapona. Postavlja se pitanje kako ove TS učinkovito štiti od spomenutih prenapona?

Osim toga, važno je još napomenuti da u pogonu tijekom vremena uslijed starenja, onečišćenja, neadekvatnog održavanja i sl. dolazi do narušavanja izolacijskih svojstava opreme, zbog čega stvarni podnosivi naponi mogu biti niži od već definiranih.

Zbog svega navedenog, za analizu učinkovitosti prenaponske zaštite, odnosno pri iznalaženju njenog adekvatnog rješenja, potrebno je uvažiti gore navedene (neizbježne) praktične činjenice. Prema [1], na slici 1. prikazana je (za slučaj A) predmetna TS 10/0,4 kV, tipa «tornjić».



Slika 1. prikaz TS 10/0,4 kV, tipa «tornjić» (za slučaj A)

2. IZOLACIJSKA SVOJSTVA OPREME 10 kV

Prema [2], oprema ugrađena u mrežu nazivnog napona $U_n=10$ kV je stupnja izolacije:

$$12 \text{ Si } 28/75 \quad (1)$$

Vrijednost 12 u izrazu (1) označava najviši radni napon dotične mreže, tj. $U_m=12$ kV. Radi se, naime, o efektivnoj vrijednosti linijskog napona. Vrijednost 28 označava nazivni podnosivi jednominutni napon, nazivne frekvencije (50 Hz), spomenute opreme. Riječ je o efektivnoj vrijednosti napona, koja je mjerodavna za definiranje izolacijskih svojstava opreme u odnosu na: pogonski napon, te prenapone privremenog i sklopnog podrijetla.

Za razmatranu opremu prema (1) nazivni podnosivi udarni napon iznosi 75 kV. Radi se o tjemenoj vrijednosti napona oblika $1,2/50 \mu\text{s}$, kojim se definiraju izolacijska svojstva spomenute opreme u odnosu na prenapone atmosferskog podrijetla.

Dakle, izolacijska razina spomenute opreme, glede atmosferskih prenapona, iznosi:

$$U_i=75 \text{ kV} \quad (2)$$

Valja naglasiti, da se navedena vrijednost podnosivih napona odnose na novu, ispravno dimenzioniranu opremu.

3. OČEKIVANI PARAMETRI ATMOSFERSKIH IZBIJANJA

U analizi atmosferskih prenapona, osnovni cilj je poznavanje parametara izbijanja i značajki prenapona, kako bi se na temelju njih izračunala električna naprezanja koja se javljaju na izolaciji elektroenergetskih mreža. Poznato je da je grom stohastička/slučajna prirodna pojava. Njegova struja je impulsnog karaktera. Opisuje se oblikom (amplitudom i strminom), te polaritetom (prema svjetskim istraživanjima gotovo 90% gromova je negativnog polariteta).

Prema [3] u tablici I. dati su temeljni statistički podaci o osnovnim parametrima struje groma.

Tablica I. temeljni parametri struje groma

Vjerojatnost izbijanje	95%		50%		5%	
	Prvo	Slijedeće	Prvo	Slijedeće	Prvo	Slijedeće
I_{\max} (kA)	14	4,6	30	12	80	30
$(di/dt)_{\max}$ (kA/ μs)	5,5	12	12	40	32	120

Brojnim eksperimentalnim istraživanjima utvrđeno je da se kumulativna vjerojatnost raspodjele amplituda struja groma podvrgava logaritamsko-normalnoj razdiobi, koja se može definirati sljedećim izrazom:

$$P(I_g) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_g}{31}\right)^{2,6}} \quad (3)$$

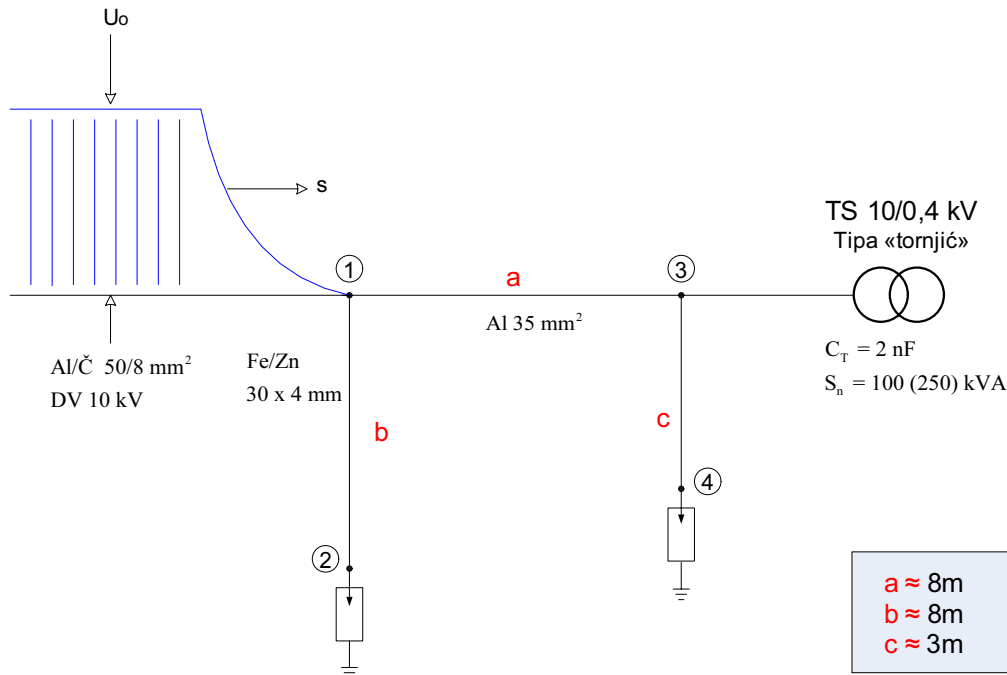
gdje su:

I_g – iznos amplitude struje groma [kA]

$P(I_g)$ – vjerojatnost s kojom će biti prekoračena struja groma amplitude I_g

4. POSTUPAK PRORAČUNA

Pretpostavljen je udar groma u fazni vodič DV 10 kV na kojeg je priključena (krajnja) TS 10/0,4 kV, tipa «tornjić» (slika 2.). Pritom, važno je napomenuti da dotični DV 10 kV nema zaštitno uže.



Slika 2. prikaz stanice i mjesta ugradnje odvodnika prenapona

Za TS 10/0,4 kV (tip «tornjić») navedene geometrijske veličine imaju slijedeće iznose: $a \approx 8$ m, $b \approx 8$ m, $c \approx 3$ m.

Za Al/Č užu poprečnog presjeka od 50/8 mm² promjer iznosi $d=9,6$ mm. Prosječna visina dotičnog vodiča nad tlom iznosi $h \approx 5$ m.

Odgovarajući valni otpor Al/Č užeta prema zemlji iznosi:

$$Z = 60 \ln \frac{4h}{d} \approx 460 \Omega \quad (4)$$

Valni otpor uzemljivačke trake (Fe/Zn 30 x 4 mm) može se odrediti iz slijedećih izraza:

$$Z = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (5)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (6)$$

Korištenjem (6), izraz (5) poprima oblik:

$$Z = L_1 v \quad (7)$$

pri čemu su:

L_1 – jedinični induktivitet dotične trake. Prema [4] jednak je slijedećem iznosu $L_1 \approx 1,2 \frac{\mu H}{m}$

v – brzina širenja putnog vala u zraku. Jednaka je brzini svjetlosti $v = 300 \frac{m}{\mu s}$

Uvrštenjem jediničnog induktiviteta dotične trake i brzine putnog vala u izraz (7) dobiva se $Z = 360 \Omega$.

Za ostale spojne vodove u TS 10/0,4 kV (tip «tornjić») mogu se usvojiti iste vrijednosti valnih otpora (360 Ω).

Promatrani energetski transformator može se prikazati nadomjesnim/ulaznim kapacitetom iznosa $C_T \approx 2 \text{ nF}$.

Zaštitna karakteristika korištenih odvodnika prenapona dana je vrijednostima prema [5] prikazanim u tablici II.

Tablica II. karakteristika preostalog napona MO-nog odvodnika prenapona

Struja	Udarna odvodna struja 8/20 μs				Struja sklopnog vala 30/60 μs	
(kA)	5	10	20	40	0,125	0,5
Napon (kV)	30,8	33,3	37	42,9	24,1	25,6

Stupanj izolacije navedenog energetskog transformatora dan je prema (1). Dakle, njegovi nazivni podnosivi naponi, iznose: $U_{-p} = 28 \text{ kV}$, $U_{op} = 75 \text{ kV}$.

Odgovarajući koordinacijski podnosivi napon izolacije dotičnog energetskog transformatora jednak je sljedećem iznosu:

$$U_{kp} = \frac{U_{op}}{1,15} \quad (8)$$

Dakle, $U_{kp} = 65 \text{ kV}$.

Za procjenu amplitude struje groma koja može pogoditi pripadni DV 10 kV koristi se izraz:

$$N = N_g S \tau \quad (9)$$

gdje je:

N – ukupni broj udara groma u pripadni DV 10 kV, tijekom promatranog vremenskog razdoblja
 N_g – gustoća udara groma. Određuje se izrazom:

$$N_g = 0,04 T_d^{1,25} \left[\frac{\text{br. udara}}{\text{km}^2 \cdot \text{god}} \right] \quad (10)$$

u kojem veličina T_d predočuje prosječni godišnji broj grmljavinskih dana promatranog područja (keraunička razina). $T_d = 35$.

$$S = (28 \cdot h^{0,6} + b) \cdot l \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

S – prihvatna/privlačna površina DV10 kV (površina tzv. «električne sjene» dotičnog voda), km^2 .

Uvrštenjem (10), i (11) u (9) dobiva se:

$$N = 4 \cdot 10^{-5} T_d^{1,25} (28 \cdot h^{0,6} + b) \cdot l \cdot \tau \quad (12)$$

gdje je:

h – prosječna visina gornjeg faznog vodiča DV 10 kV nad tlom [m]
 b – horizontalni razmak između krajnjih faznih vodiča DV 10 kV [m]
 l – duljina promatranog DV 10 kV [km]
 τ – promatrano vremensko razdoblje [god]

Na dalje, broj udara groma s amplitudom struje većom od I može se odrediti sljedećim izrazom:

$$n = P(I) \cdot N \quad (13)$$

gdje je:

$P(I)$ - vjerojatnost s kojom će biti prekoračena struja amplitude I [kA]. Ona je dana izrazom (3).

Za $n=1$ izraz (13) daje:

$$P(I_{\max}) = \frac{1}{N} \quad (14)$$

gdje je:

I_{\max} - amplituda struje koja može biti prekoračena samo jednom tijekom promatranog vremenskog razdoblja.

Uvrštenjem (12) u (14) slijedi:

$$P(I_{\max}) = \frac{2,5 \cdot 10^4}{T_d^{1,25} (28 \cdot h^{0,6} + b) \cdot l \cdot \tau} \quad (15)$$

Analogno izrazu (3) slijedi:

$$P(I_{\max}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{\max}}{31}\right)^{2,6}} \quad (16)$$

Iz (13) i (14) slijedi:

$$\frac{1}{1 + \left(\frac{I_{\max}}{31}\right)^{2,6}} = \frac{2,5 \cdot 10^4}{T_d^{1,25} (28 \cdot h^{0,6} + b) \cdot l \cdot \tau} \quad (17)$$

Rješenjem (17) po struji I_{\max} dobiva se:

$$I_{\max} = 31 \left[h \cdot 10^{-5} T_d^{1,25} (28 \cdot h^{0,6} + b) \cdot l \cdot \tau - 1 \right]^{\frac{1}{2,6}} \quad (18)$$

Primjerice uz:

$T_d = 35$, $h = 5$ m, $b = 1$ m, $l = 1$ km, $\tau = 5$ god, dobiva se $I_{\max} = 18,7$ kA.

Odgovarajuća amplituda naponskog putnog vala može se odrediti pomoću izraza:

$$U_0 = \frac{1}{2} I_{\max} Z \quad (19)$$

Dakle, $U_0 = 4300$ kV.

Popratne strmine čela naponskog putnog vala ovise o udaljenosti mjesta udara u DV 10 kV od pripadne TS 10/0,4 kV. Mogu se usvojiti vrijednosti iz tablice III.

Tablica III. usvojene strmine čela vala

s [kV/μs]	500	800	1200
-----------	-----	-----	------

Trajanje čela pripadnog naponskog vala određuje se pritom pomoću izraza:

$$T_{\epsilon} = \frac{U_0}{s} \quad (20)$$

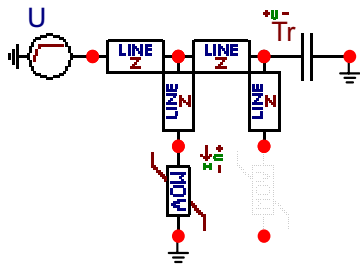
U tablici IV. navedeni su oblici razmatranog upadnog naponskog putnog vala koji spomenutim DV 10 kV ulazi u TS 10/0,4 kV.

Tablica IV. razmatrani oblici upadnog putnog vala

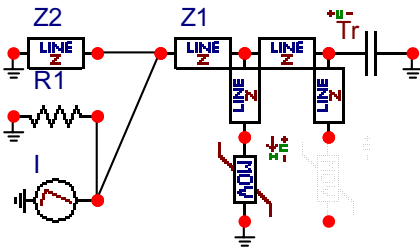
U_0 [kV]	s [kV/μs]	T_{ϵ} [μs]
4300	500	8,6
	800	5,375
	1200	3,583

Računati su prenaponi na energetskom transformatoru u slijedećim slučajevima:

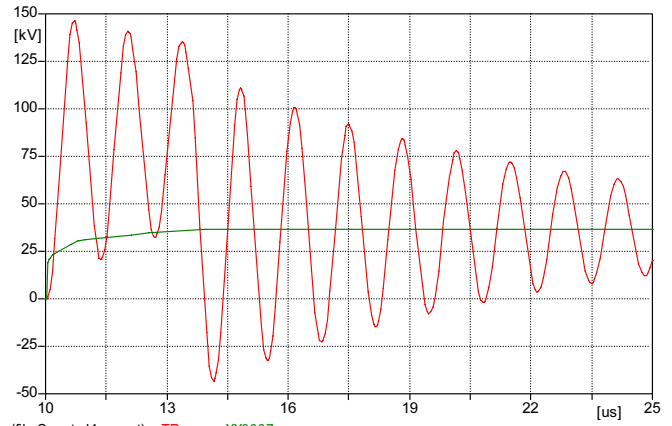
A – ugrađen je samo odvodnik prenapona na ulazu u TS 10/0,4 kV



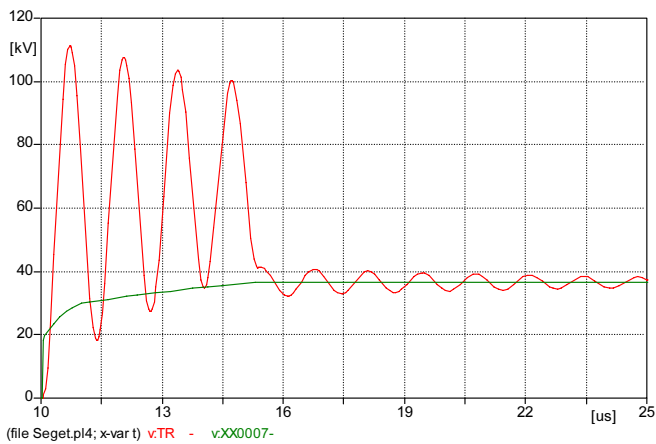
Slika 5. prikaz modela u EMTP-u [6] (slučaj A-1)



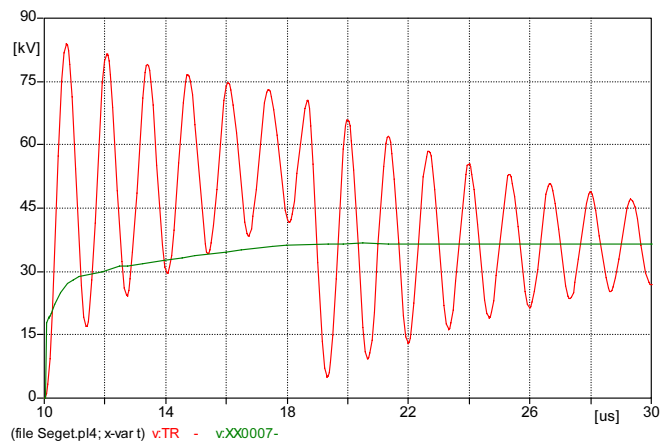
Slika 6. prikaz modela u EMTP-u (slučaj A-2.)



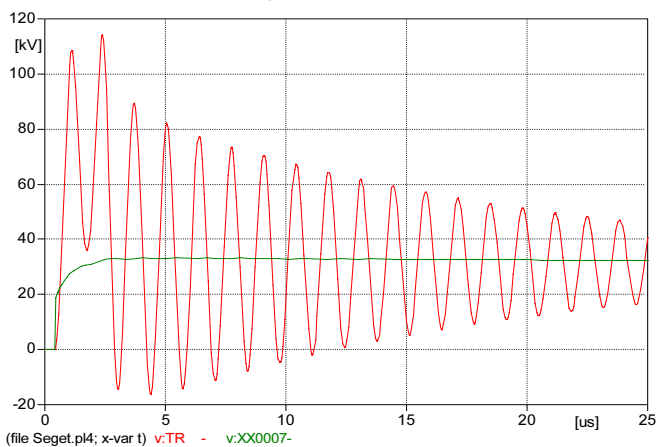
Slika 7. slučaj A-1: $U_0=4300$ kV, $T_c=3.583$ μ s;
 $U_{tr}=146.4$ kV



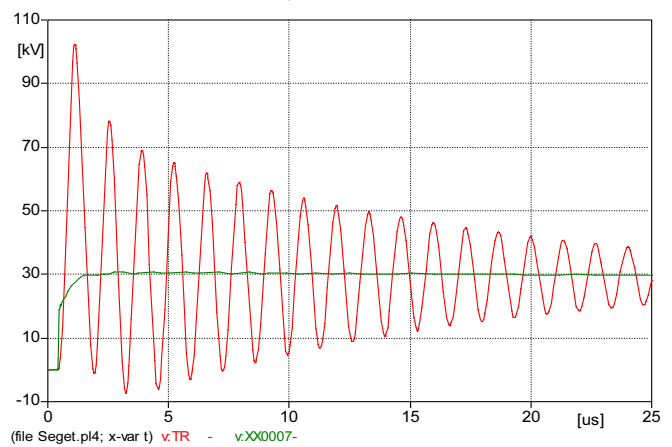
Slika 8. slučaj A-1: $U_0=4300$ kV, $T_c=5.375$ μ s
 $U_{tr}=111.39$ kV



Slika 9. slučaj A-1: $U_0=4300$ kV, $T_c=8.6$ μ s
 $U_{tr}=83.9$ kV

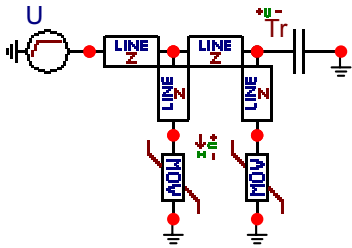


Slika 10. slučaj A-2: $I=10$ kA, $1.9/50$ μ s
 $U_{tr}=114.15$ kV

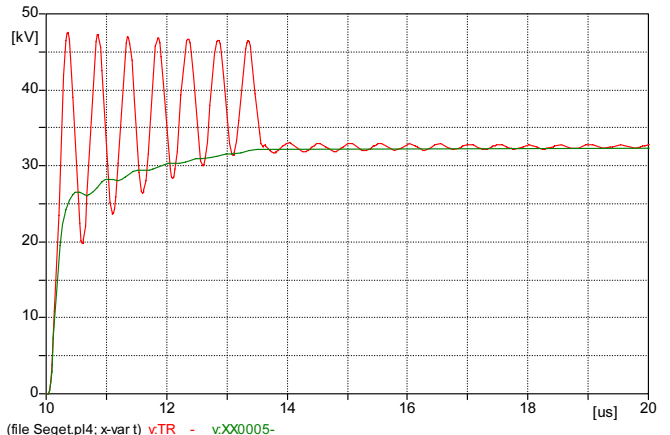


Slika 11. slučaj A-2: $I=5$ kA, $1.04/50$ μ s
 $U_{tr}=102.3$ kV

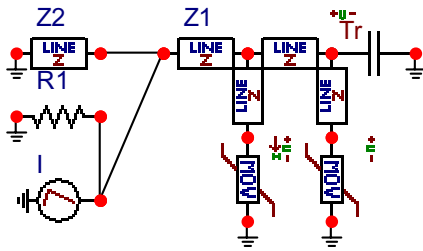
B – ugrađeni su odvodnici prenapona na ulazu u TS 10/0,4 kV i uz energetski transformator



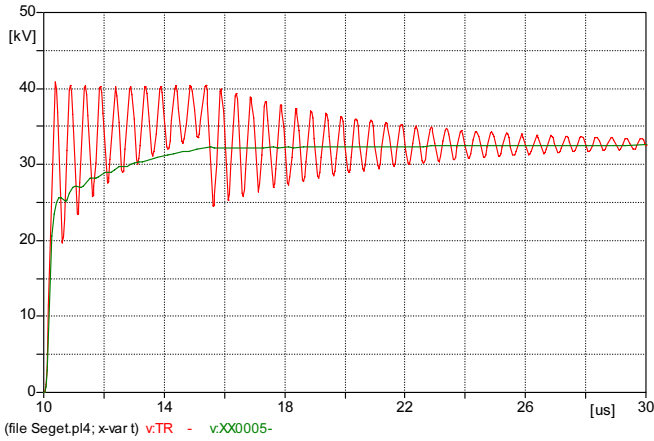
Slika 12. prikaz modela u EMTP-u (slučaj B-1)



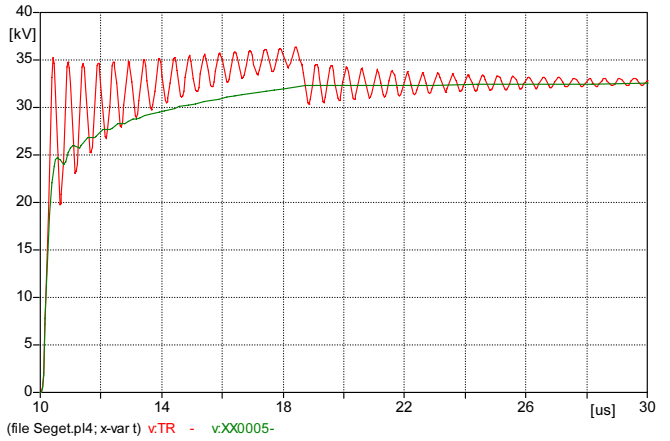
Slika 14. slučaj B-1: $U_0=4300$ kV, $T_c=3.583$ μ s;
 $U_{tr}=47.53$ kV



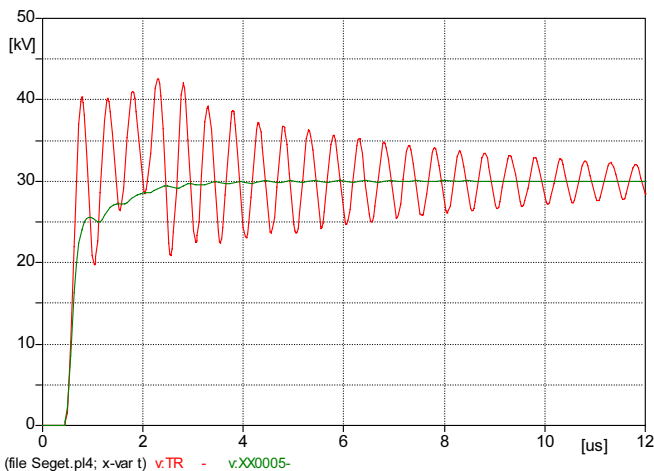
Slika 13. prikaz modela u EMTP-u (slučaj B-2)



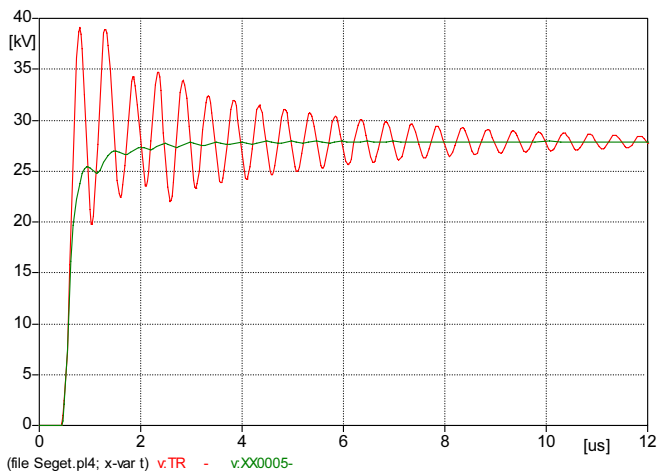
Slika 15. slučaj B-1: $U_0=4300$ kV, $T_c=5.375$ μ s
 $U_{tr}=40.92$ kV



Slika 16. slučaj B-1: $U_0=4300$ kV, $T_c=8.6$ μ s
 $U_{tr}=36.37$ kV



Slika 17. slučaj B-2: $I=10$ kA, $1.9/50$ μ s
 $U_{tr}=42.6$ kV



Slika 18. slučaj B-2: $I=5$ kA, $1.04/50$ μ s
 $U_{tr}=39.1$ kV

Rezultati proračuna za slučaj udaljenog udara predočeni su u tablici V.

Tablica V. rezultati proračuna za slučaj udaljenog udara groma

U _o [kV]	T _ε [μs]	U _{TR} [kV]	
		Slučaj A-1	Slučaj B-1
4300	8,6	83.9	36.37
	5,375	111.39	40.92
	3,583	146.4	47.53

Rezultati proračuna za slučaj bliskog udara predočeni su u tablici VI.

Tablica VI. rezultati proračuna za slučaj bliskog udara groma

I [kA]	T _ε /T _h [μs]	U _{TR} [kV]	
		Slučaj A-2	Slučaj B-2
5	1,04/50	102.3	39.1
10	1,90/50	114.15	42.6

5. ZAKLJUČAK

Iz rezultata proračuna koji su prikazani tablicama V. i VI. slijedi da su za slučaj A (ugrađen samo jedan slog odvodnika prenapona na ulazu u TS 10/0,4 kV) prenaponi na pripadnom energetsom transformatoru znatno veći od odgovarajućeg koordinacijskog podnosivog napona koji iznosi U_{kp} = 65 kV.

Zbog toga je velika vjerojatnost da će dotični energetski transformator biti oštećen tijekom očekivanih atmosferskih izbijanja, što prikazuju i pogonski događaji.

Nasuprot tome, za slučaj B (ugrađen odvodnik prenapona na ulazu u TS 10/0,4 kV i uz energetski transformator) prenaponi na pripadnom energetsom transformatoru su znatno manji od navedenog koordinacijskog podnosivog napona, tj. vrijedi:

$$U_{TR} < U_{kp} \quad (20)$$

Stoga se može zaključiti da će spomenuti energetski transformator biti učinkovito zaštićen od očekivanih atmosferskih prenapona. Dakle, odabir rješenja za situaciju B smatra se optimalnim i ekonomski opravdanim, pogotovo kod krajnjih TS koje su smještene u (prenaponski ugroženim) područjima velike kerauničke razine.

Slog odvodnika prenapona uz energetski transformator treba postaviti što bliže transformatoru, najbolje neposredno pored provodnih izolatora.

6. LITERATURA

- [1] Odjel projektiranja, Elektrodalmacija, "Glavni projekt TS 10/0,4 kV – tipa «tornjić»", Split, 1967
- [2] Lj. Rošajski, G. Dotlić, "Zbirka propisa u elektrotehnici 2", IRO Građevinska knjiga, Beograd, 1987
- [3] V. Kolega, S. Žutobradić, "Zaštita distribucijskih mreža od atmosferskih prenapona – temeljni podaci", El Hrvoje Požar, Zagreb, 1998
- [4] M. Padelin, "Zaštita od groma", Zagreb, 1987
- [5] Katalog "Raychem" MO odvodnika prenapona
- [6] L. Prikler, H. K. Hoidalen: ATPDRAW, version 3.5. for Windows 9x/NT/2000/XP, Users' Manual, Preliminary Release No. 1.1. October 2002.