



ELEKTROINŠTITUT MILAN VIDMAR

***IZBIRA TEHNIČNIH LASTNOSTI SN
KOVINSKOOKSIDNIH
PRENAPETOSTNIH ODVODNIKOV
RAZLIČNIM RAZMERAM
OBRATOVANJA IN MESTOM
VGRADNJE***

Referat št.: 1835

Ljubljana, maj 2008



ELEKTROINŠTITUT MIŁAN VIDMAR



ELEKTROINŠTITUT MILAN VIDMAR

IZBIRA TEHNIČNIH LASTNOSTI SN KOVINSKOOKSIDNIH PRENAPETOSTNIH ODVODNIKOV RAZLIČNIM RAZMERAM OBRATOVANJA IN MESTOM VGRADNJE

Oznaka študije: Ref. št. 1835

Številka pogodbe: 26/2005

Naročnik: Elektro Celje d.d., javno podjetje za distribucijo električne energije,
Elektro Gorenjska d.d., javno podjetje za distribucijo električne energije,
Elektro Ljubljana d.d., javno podjetje za distribucijo električne energije,
Elektro Maribor d.d., javno podjetje za distribucijo električne energije,
Elektro Primorska d.d., javno podjetje za distribucijo električne energije.

Odgovorni pri naročniku: Franc LESKOVEC, univ. dipl. inž. el.

Izvajalec: ELEKTROINŠTITUT MILAN VIDMAR
Inštitut za elektrogospodarstvo in industrijo
Hajdrihova 2, Ljubljana

Odgovorni pri izvajalcu: Mladen IGLIČ, univ. dipl. inž. el.

Študijo izdelali: Mladen IGLIČ, univ. dipl. inž. el.,
Marko JANŠA, univ. dipl. inž. el.,
Karol GRABNER ml., univ. dipl. inž. el.

Obseg študije: 82 strani

Datum izdelave: maj 2008

Število izvodov: 20



Direktor:

Prof. dr. Maks BABUDER, univ. dipl. inž. el.

Ljubljana, maj 2008



ELEKTROINŠTITUT MILAN VIDMAR



ELEKTROINŠTITUT MILAN VIDMAR

Vse pravice pridržane!

Objavljanje rezultatov dovoljeno z navajanjem vira!
Tisk: Elektroinštitut MILAN VIDMAR, Ljubljana



ELEKTROINŠTITUT MILAN VIDMAR

POVZETEK

Študija obravnava izbiro tehničnih lastnosti SN distribucijskih ZnO odvodnikov. Obravnavane so karakteristične veličine ZnO odvodnikov, kot so zaščitni napetostni nivo, zaščitna cona ter njihove termične obremenitve, ki nastopajo med obratovanjem odvodnikov. Nadalje so podana navodila za izbiro nazivnih veličin odvodnikov, kot so: nazivna napetost odvodnika, nazivni odvodni tok in razred praznitve voda ter določitev zaščitne cone odvodnika. Za večino dobaviteljev odvodnikov, ki so prisotni na slovenskem trgu, je bila opravljena njihova izbira (nazivna napetost in energijska sposobnost), ki je zbrana v tabelarični obliki. Prav tako so bile raziskane prenapetostne razmere in termične obremenitve odvodnikov, ki obratujejo v zgoščeni namestitvi in v točki prehoda zračni vod-kablovod. Da bi bili odvodniki, ki so oz. bodo vgrajeni v slovenska distribucijska omrežja kar se da kvalitetni, so v zadnjem poglavju podane smernice in navodila o preskušanju odvodnikov in o dokumentaciji, katero naj bi predložil proizvajalec odvodnikov oz. njihov zastopnik.

KAZALO

	POVZETEK.....	7
	KAZALO.....	9
	UTEMELJITEV NALOGE.....	11
	TERMINOLOGIJA.....	12
1.	UVOD.....	15
2.	ZnO PRENAPETOSTNI ODVODNIKI.....	16
2.1	Karakteristične lastnosti ZnO prenapetostnih odvodnikov.....	16
2.2	Karakteristika ZnO uporov.....	17
2.2.1	Področje nizkega električnega polja.....	18
2.2.2	Področje srednjega električnega polja.....	19
2.2.3	Področje visokega električnega polja.....	19
3.	TERMIČNE OBREMENITVE ZnO ODVODNIKA.....	21
3.1	Termične obremenitve ZnO odvodnika v normalnem obratovanju.....	23
3.2	Termične obremenitve pri delovanju ZnO odvodnika ob prenapetostih.....	23
3.3	Posledice preobremenitev pri delovanju ZnO odvodnika.....	23
3.3.1	Vpliv termičnih obremenitev ZnO odvodnika na njegovo življenjsko dobo.....	23
3.3.2	Staranje ZnO odvodnika.....	24
4.	DOLOČITEV NAZIVNIH VELIČIN ODVODNIKA.....	28
4.1	Določitev trajne obratovalne U_c in nazivne napetosti U_r odvodnika.....	28
4.2	Postopek izbire nazivne napetosti odvodnika, ko je odpornostni faktor odvodnika T podan na trajno obratovalno napetost U_c	31
4.3	Postopek izbire nazivne napetosti odvodnika, ko je odpornostni faktor odvodnika T podan na nazivno napetost U_r	31
4.4	Izbira nazivne napetosti odvodnika U_r za slovenska distribucijska omrežja.....	33
4.5	Postopek izbire nazivne napetosti odvodnika v zvezdišču trnasformatorja.....	35
4.6	Nazivni odvodni tok odvodnika.....	36
4.7	Izbira razreda praznitve voda.....	38
4.8	Zaščitna cona odvodnika.....	40
4.9	Vpliv vgrajene opreme na zaščitno cono odvodnika.....	44
4.10	Zaščitna cona odvodnika pri prenapetostni zaščiti kablovodov.....	46
4.11	Ozemljevanje in prenapetostna zaščita zunanjega opleta kablovoda.....	51
4.11.1	Oplet ozemljen na obeh straneh kablovoda.....	52
4.11.2	Oplet ozemljen na eni strani kablovoda.....	52
4.11.3	Oplet ozemljen na obeh straneh kablovoda z vmesnim navzkrižnim povezovanjem.....	53
4.11.4	Izbira prenapetostnega odvodnika za prenapetostno zaščito opleta kablovoda.....	53
4.12	Transformator na koncu dolgega kablovoda.....	54
4.13	Kompenzacija jalove energije.....	55
5.	ANALIZA PRENAPETOSTNIH POJAVOV.....	56
5.1	Računalniške simulacije.....	56
5.1.1	Začetni pogoji.....	57
5.1.2	Časovni korak.....	57
5.1.3	Trajanje simulacije.....	57
5.1.4	Numerične oscilacije.....	57
5.1.5	Predstavitev rezultatov.....	57
5.2	Program EMTP-RV.....	58
5.3	Model omrežja.....	59
5.3.1	Vod in kablovod.....	63
5.3.2	Stikalne celice.....	66
5.3.3	Energetski transformator.....	66
5.3.4	Ozemljilo.....	67
5.3.5	ZnO odvodnik.....	68
5.3.6	Udar strele.....	68
5.4	Simulacije.....	69
5.4.1	Izbira opazovanih veličin.....	69
5.4.2	Vpliv velikosti temenske vrednosti in oblike udarnega vala.....	70
5.4.3	Vpliv št. odvodnikov na velikost prenapetosti in njihove termične obremenitve.....	72

6.	PRESKUŠANJE ODVODNIKOV.....	76
6.1	Tipski preskusi.....	76
6.2	Kosovni preskusi.....	77
6.3	Posebni preskusi.....	78
6.4	Prezemni preskusi.....	78
7.	ZAKLJUČEK.....	80
	LITERATURA.....	82

UTEMELJITEV NALOGE

Za prenapetostno zaščito v SN omrežjih se danes vgrajujejo izključno kovinskooksidni (ZnO) prenapetostni odvodniki. Poleg njihovih odličnih zaščitnih lastnosti, jih odlikuje velika obratovalna zanesljivost. Razmeroma nizka cena omogoča, da odvodnike vgrajujemo pogosteje. Razmišlja se tudi o uporabi odvodnikov na mestih, kjer jih do sedaj nismo našli. Ena takšnih možnosti so nadzemni vodi, pri katerih bi z odvodniki vsekakor zmanjšali število izpadov, ki jih povzročijo udari strel. Večja zanesljivost obratovanja pa je zagotovljena le v primeru, ko so vgrajeni odvodniki z ustreznimi karakteristikami. V nasprotnem primeru lahko odpovedi odvodnikov samih povzročajo izpade omrežja.

Na EIMV smo že pred leti opravili raziskave, kjer smo osrednjo pozornost posvetili termičnim obremenitvam ob prenapetostih. Rezultati so bili objavljeni v posebni študiji. Na podlagi teh raziskav smo postavili pravila, po katerih se določajo karakteristike odvodnikov za SN omrežja. Mednje v prvi vrsti spadata nazivna napetost odvodnika in njegova energijska zmogljivost. Zaradi enostavnih pravil so bili upoštevani najneugodnejši kriteriji. Razmere pa v vseh točkah omrežja niso enako neugodne. Pričakovati je npr., da se na odvodnikih, ko so nameščeni tesno drug ob drugem (razdalje nekaj metrov), energijske obremenitve ob prenapetostih porazdelijo. Zahteve glede zmogljivosti odvodnikov bi v takšnih primerih lahko zmanjšali. Vgradnja cenejših odvodnikov je tako mogoča in upravičena.

V okviru predlagane študije bi raziskali, kaj se dogaja z odvodniki v različnih konfiguracijah in ob različnih prenapetostih. Ugotovili bi, v katerih primerih je mogoče vgraditi drugačne odvodnike in katerim karakteristikam morajo ustrezati.

PROGRAM NALOGE

1. Obremenitve pri ZnO prenapetostnih odvodnikih:

- ⇒ Karakteristične lastnosti odvodnikov,
- ⇒ Prenapetosti in obremenjevanje odvodnikov,
- ⇒ Termične obremenitve ob delovanju odvodnika,
- ⇒ Posledice preobremenitev in
- ⇒ Postopek izbire odvodnikov.

2. Razmere pri porazdeljenih obremenitvah:

- ⇒ Odvodniki v paralelnem obratovanju,
- ⇒ Razmere pri porazdeljeni obremenitvi in
- ⇒ Kriteriji za določanje karakteristik odvodnikov.

4. Zaključki

TERMINOLOGIJA

- ⇒ Atmosferski napetostni udar je napetostni udar določene oblike, ki se pride ob napetostnih preskusih, pri katerem je trajanje čela približno eno mikrosekundo, čas do polovične temenske vrednosti pa približno 50 mikrosekund (za standardni atmosferski napetostni udar velja oznaka 1,2/50 μ s).
- ⇒ Časna prenapetost (TOV- Temporary overvoltage) je malo dušena ali nedušena nihajna prenapetost omrežne frekvence na danem mestu v omrežju, ki razmeroma dolgo traja.
- ⇒ EMTP-RV (Electro-Magnetic Transients Program – Restructured Version) je simulacijski program, ki omogoča simulacije stacionarnih stanj in prehodnih pojavov v omrežjih.
- ⇒ Energijska (termična) obremenjenost prenapetostnega odvodnika nam pove, koliko energije je prenapetostni odvodnik prejel v določenem časovnem intervalu.
- ⇒ Faktor zemeljskega stika je razmerje med najvišjo efektivno vrednostjo napetosti omrežne frekvence med zdravo fazo in zemljo na določenem mestu v omrežju, ko ima ena ali več faz trifaznega sistema stik z zemljo in efektivno vrednostjo napetosti omrežne frekvence med fazo in zemljo na tem mestu, če stika ne bi bilo.
- ⇒ Karakteristična valovna impedanca daljnovoda (kablovoda) je impedanca, ki je odvisna od geometrijskih in snovnih lastnosti in jo uporabimo pri analizi potujočih valov.
- ⇒ Koordinacija izolacije je izbiranje dielektrične zdržnosti opreme glede na napetosti, ki se lahko pojavijo v omrežju, za katero je oprema namenjena, upošteva lastnosti razpoložljivih zaščitnih naprav.
- ⇒ Na hrbtu odrezani napetostni udar je napetostni udar, ki je odrezan potem, ko je presegel temensko vrednost. Oblika vala je 1,2/10-20 μ s in se uporablja za simulacijo preboja izolacije.
- ⇒ Nazivni odvodni tok odvodnika (Nominal Discharge Current) se navaja za razvrstitev odvodnika v 5 različnih razredov.
- ⇒ Najvišja napetost opreme je najvišja efektivna vrednost medfazne napetosti, za katero je oprema grajena, glede na izolacijo in druge značilnosti, ki se nanašajo na to napetost v ustreznih standardih za to opremo.
- ⇒ Najvišja napetost sistema je največja vrednost obratovalne napetosti, ki se lahko pojavi v normalnih obratovalnih razmerah v katerikoli točki sistema in v kateremkoli času.
- ⇒ Nazivna napetost odvodnika je najvišja dovoljena vrednost napetosti industrijske frekvence izražena v r.m.s. za katero je odvodnik dimenzioniran in da deluje termično stabilno ob nastanku časne prenapetosti.
- ⇒ Neposredni udar strele je udar strele v element elektroenergetskega omrežja, npr. v vodnik, daljnovodni steber, opremo transformatorske postaje ipd.
- ⇒ Odrezani atmosferski napetostni udar - atmosferski napetostni udar, ki ga prekine prebojna razelektritev in s tem poruši napetost praktično do vrednosti nič (ločimo: na čelu in na hrbtu odrezani napetostni udar).

-
- ⇒ Poln atmosferski napetostni udar - atmosferski napetostni udar, ki ga ne prekine prebojna razelektritev.
 - ⇒ Prehodna prenapetost s strmim čelom je prenapetost, ki je običajno enosmerna, s trajanjem čela $0,1 \mu s \leq T_c \leq 20 \mu s$ in trajanjem hrbta $T_h \leq 300 \mu s$.
 - ⇒ Prenapetost je katerakoli napetost med fazo in zemljo ali med fazama, katere temenska vrednost presega temensko vrednost najvišje napetosti opreme.
 - ⇒ Prenapetostna naprava je namenjena za omejevanje prenapetosti, ki se pojavljajo v elektroenergetskem omrežju zaradi različnih vzrokov. Sestavljena je lahko iz nelinearnega upora (ZnO prenapetostni odvodnik), zaščitnega iskrila ali pa iz obeh (SiC odvodnik). Prav tako sta lahko nelinearni upor in zaščitno iskrilo med seboj povezana zaporedno ali vzporedno.
 - ⇒ Prenapetostni odvodnik je naprava, ki je namenjena za zaščito električnih aparatov pred visokimi prehodnimi prenapetostmi. Omejuje trajanje, pogosto pa tudi amplitudo spremljajočega toka.
 - ⇒ Preostala napetost odvodnika (Residual Voltage) je napetost, ki se pojavi med priključnima sponkama prenapetostnega odvodnika ob razelektritvenem toku skozi odvodnik.
 - ⇒ Razred praznitve voda (Line Discharge Class) neposredno določa sposobnost, koliko toplotne energije se lahko sprosti v odvodniku v določenem časovnem intervalu.
 - ⇒ Referenčna napetost odvodnika (Reference Voltage U_{ref}) je definirana kot napetost industrijske frekvence pri kateri teče skozi odvodnik referenčni tok I_{ref} .
 - ⇒ Referenčni tok odvodnika (Reference Current I_{ref}) je temenska vrednost ohmske komponente toka pri katerem je merjena referenčna napetost.
 - ⇒ Sistem z direktno ozemljeno nevtralno točko je sistem, v katerem je nevtralna točka omrežja neposredno povezana z ozemljilom obratovalne ozemljitve transformatorske postaje.
 - ⇒ Sistem z indirektno ozemljeno nevtralno točko je sistem, kjer je nevtralna točka omrežja povezana z ozemljilom preko nizkoohmskega ali induktivnega upora.
 - ⇒ Sistem z izolirano nevtralno točko je sistem, v katerem nevtralna točka omrežja ni namerno povezana z zemljo, razen visoko impedančne povezave, ki je namenjena za zaščito ali meritve.
 - ⇒ Sistem z resonančno ozemljeno nevtralno točko je sistem, v katerem je nevtralna točka omrežja povezana z ozemljilom preko induktivnega upora, ki je uravnavan ustrezno s kapacitivnostjo omrežja s ciljem omejevanja toka zemeljskega stika.
 - ⇒ Spremljevalni tok odvodnika I_f je tok, ki teče skozi odvodnik, ko je na odvodniku preostala napetost.
 - ⇒ Trajna obratovalna napetost je napetost omrežne frekvence, za katero menimo, da ima konstantno efektivno vrednost.
 - ⇒ Zaščitni nivo za atmosferske napetostne udare (zaščitne naprave) je največja dopustna temenska vrednost napetosti na priključnih sponkah zaščitne naprave, ki je pod določenimi pogoji izpostavljena atmosferskim napetostnim udarom.

- ⇒ Zaščitno področje (zaščitna cona) prenapetostnega odvodnika je tisto področje oziroma razdalja (v metrih), v kateri odvodnik še uspešno ščiti izolacijo električnih naprav pred previsokimi prenapetostmi.
- ⇒ $1 \text{ p.u.} = \sqrt{2} \cdot U_m / \sqrt{3}$ podajanje prenapetosti na enoto najvišje obratovalne napetosti omrežja.

1. UVOD

Prenapetosti v električnih omrežjih so posledica udarov strel ali stikalnih operacij, katerim se v večini primerov ne moremo izogniti. Zaradi ekonomskih razlogov ni smotno izdelovati električne naprave s tako izolacijo, ki bi zdržala te prenapetosti. Ekonomičneje je uporabiti razširjeno prenapetostno zaščito, ki je lahko izvedena na dva načina. En način predvideva uporabo zaščitne vrvi, ki pa je v SN omrežjih večinoma neučinkovita zaradi premajhnih razdalj med faznim in zaščitnim vodnikom. Drugi način, ki pa je bistveno bolj učinkovit pa je, da se v SN distribucijsko omrežje vgradijo prenapetostni odvodniki. Včasih so se vgrajevali SiC odvodniki, v zadnjih dveh desetletjih pa so jih izpodrinili ZnO odvodniki. Njihove karakteristike so bistveno boljše, saj ščitijo izolacijo naprav tako pred atmosferskimi, kakor tudi pred stikalnimi prenapetostmi. Tudi dovolj nizke cene odvodnikov omogočajo njihovo široko uporabo.

V SN omrežju se danes za zaščito postrojev oz. vgrajenih naprav pred prenapetostmi izključno vgrajujejo ZnO prenapetostni odvodniki. Njihov osnovni element je kovinskooksidni upor v katerem prevladuje ZnO upor. Njegova izrazito nelinearna $U-I$ karakteristika omogoča "ventilsko" delovanje, pri katerem ni potrebno serijsko iskrišče, kot je to pri SiC odvodniku. Zato ob priključitvi odvodnika na obratovalno napetost skozi ZnO odvodnik teče nek majhen tok. Ta tok je sestavljen iz prevladujoče kapacitivne in mnogo manjše ohmske komponente toka. Slednja je močno odvisna od temperature odvodnika, hkrati pa je pokazatelj kolikšna je še preostala življenska doba odvodnika. Staranje se pojavi zaradi ireverzibilnih sprememb v varistorski keramiki, ki nastanejo tako zaradi same obremenitve z obratovalno napetostjo, še posebej pa zaradi obremenitev z visokimi odvodnimi tokovi, ki se pojavijo ob prenapetostih. Zaradi sprememb v varistorski keramiki, ki jih povzroča staranje, se povečuje prevodnost ZnO uporov v spodnjem delu $U-I$ karakteristike in s tem stacionarni tok, zlasti njegova ohmska komponenta, ki povzroča segrevanje ZnO uporov in s tem višjo temperaturo odvodnika v stacionarnem obratovanju. To pomeni manjšo rezervo do najvišje dovoljene temperature odvodnika, ki se sme med obratovanjem odvodnika pojaviti in s tem nižjo energijsko absorpcijsko sposobnost odvodnika. Zaradi nastopa različnih dogodkov in njihovega časovnega zaporedja lahko že neposredno po njihovem nastopu ali pa z določenim časovnim zamikom (dodatne obremenitve) pride do poškodbe ali uničenja odvodnika ali pa do take (prikrite) deformacije v varistorski keramiki, ki lahko povzroči tudi tako drastično zmanjšanje absorpcijske sposobnosti odvodnika, da se zaradi tega bistveno zmanjša obratovalna sposobnost odvodnika in s tem zanesljivost obratovanja omrežja. Take (prikrite) deformacije so še posebej nevarne, ker jih v stacionarnem obratovanju ni mogoče enostavno ugotoviti. Določiti jih je mogoče le posredno preko merjenja stacionarnega (uhajavega) toka oziroma njegove ohmske komponente, ter na osnovi primerjave izmerjene vrednosti s predhodnimi vrednostmi ali vrednostmi, ki jih podaja proizvajalec v obliki krivulj glede na obratovalno dobo. Na podlagi odstopanja izmerjene vrednosti od "normalne" garantirane vrednosti, ki ustreza nekemu povprečnemu scenariju staranja odvodnika (krivulje), je mogoče podati oceno o obratovalni sposobnosti odvodnika in njegovi preostali življenski dobi in na njeni osnovi sprejeti odločitev o njegovem nadaljnjem obratovanju ali zamenjavi. Ker je v SN omrežju vgrajenih zelo veliko ZnO odvodnikov, je zaradi ekonomskega vidika (odstranitev, drage meritve v primerjavi z nizko nabavno ceno odvodnika in ponovna namestitve odvodnikov) praktično nemogoče opravljati kontrolne meritve uhajavega toka na vsakem odvodniku. Predlaga se, da se na določenem območju SN omrežja naključno izbere odvodnike po enačbi:

$$n = \sqrt[3]{N}, \quad (1.1)$$

kjer je:

- ⇒ N število vgrajenih prenapetostnih odvodnikov v določenem območju SN omrežja in
- ⇒ n število odvodnikov na katerih se opravijo preskusi.

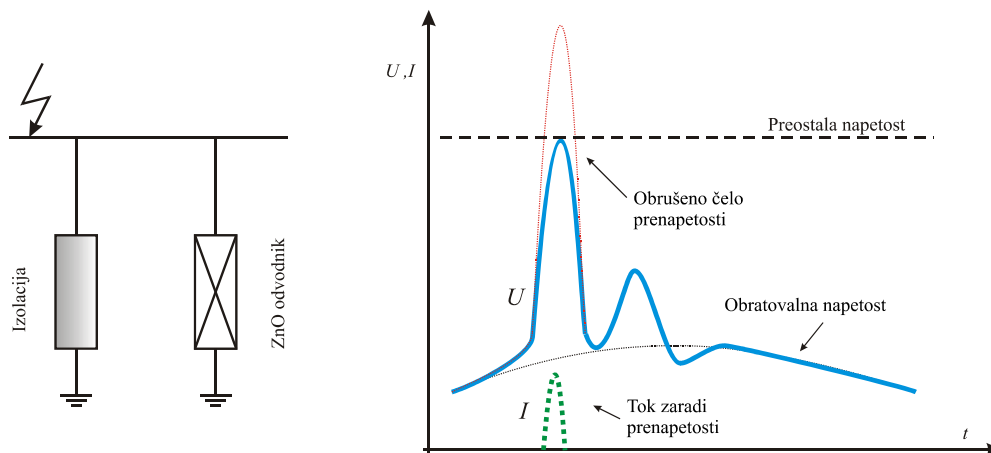
na katerih se opravijo kontrolne meritve.

Pri izbiri ustrezne nazivne napetosti odvodnika in sposobnosti absorpcije energije, je potrebno posvetiti posebno pozornost časnim prenapetostim in keravnličnemu nivoju nekega območja. Ta dva podatka v največji meri vplivata na pravilno izbiro odvodnika.

2. ZnO PRENAPETOSTNI ODVODNIKI

2.1 Karakteristične lastnosti ZnO prenapetostnih odvodnikov

Prenapetostni odvodnik je zaščitna naprava, ki omejuje prenapetosti. Odvodnik je običajno vezan vzporedno z izolacijo električnih naprav, kot je shematsko prikazano na sliki 2.1.



Slika 2.1: Osnovni princip vezave odvodnika in njegovega delovanja

Odvodnik je zgrajen iz aktivnega dela, ki vsebuje en ali več ZnO uporovnih blokov in iz izoliranega ohišja, ki zagotavlja izolacijsko in mehansko trdnost odvodniku.

V osnovi so na voljo tri različne konstrukcije:

- ⇒ Ohišje ojačano s steklenimi vlakni, ki hkrati služi kot izolacija. Ti odvodniki imajo enake težave kot votli izolatorji, saj potrebujejo tesnenje in tlačno napravo. Z vdorom nečistoč in vlage v notranjost odvodnika, se bistveno povečajo delne razelektritve.
- ⇒ Aktivni del odvodnika je ovit s steklenimi vlakni, ki so prepojena z umetno smolo, kar daje odvodniku odlične mehanske lastnosti. Čez aktivni del odvodnika in steklena vlakna se nato namesti še ohišje iz polimernega materiala. Pomankljivost te izvedbe je, da različni izolacijski materiali otežujejo kvalitetno zatesnitev. Pri preobremenitvah ZnO blokov pogosto pride do zloma odvodnika.
- ⇒ Aktivni del odvodnika je mehansko povezan in utrjen z »armiranimi« trakovi iz steklenih vlaken (Slika 2.2). Silikonsko ohišje pa je neposredno nameščeno na ZnO bloke, kar omogča boljši prehod toplote in preprečuje kopičenje plina med ZnO bloki in ohišjem odvodnika. Zato v tem primeru težje pride do vdora vlage in s tem tudi do eksplozije odvodnika, pa tudi vrednosti parcialnih razelektritev so zelo nizke.



Slika 2.2: Prikaz zgradbe kvalitetnega odvodnika

Premer (velikost) ZnO bloka je neposredno (proporcionalno) povezan z zmožnostjo energijske absorpcije in z nazivnim odvodnim tokom. Odvodniki za posebne primere (prenapetostna zaščita generatorjev in kompenzacije jalove energije), kjer se ob naglih razbremenitvah lahko sprosti veliko energije (toplote), imajo premer ZnO bloka znato večji. Večji premer ZnO bloka omogoča odvodniku večjo absorpcijo toplote.

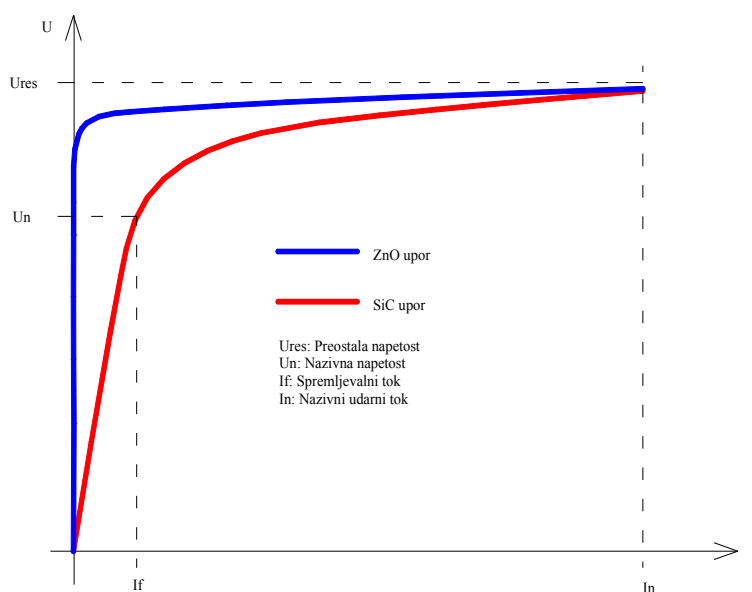
Vsak blok (upor) ima neko stresano kapacitivnost in skupek ZnO blokov (uporov). Ta se pri obratovalni napetosti obnaša kot neka kapacitivnost, ki povzroči nelinearno porazdelitev potenciala vzdolž odvodnika. Zato se VN odvodnikom doda potencialni obroč, s katerim se doseže linearna porazdelitev potenciala vzdolž odvodnika. Ker so SN odvodniki relativno kratki, le ti ne potrebujejo potencialnih obročev.

ZnO prenapetostni odvodniki so sestavljeni iz ZnO nelinearnih uporov, katerih upornost je odvisna od napetosti na njihovih sponkah. Delujejo na principu ventilnega delovanja. Preprosto povedano, to pomeni, da se upornost odvodnika spreminja v odvisnosti od napetosti. Povezava toka in napetosti je približno dana z enačbo:

$$I = C \cdot U^\alpha \quad (2.1)$$

V enačbi pomeni:

- ⇒ I tok skozi upor,
- ⇒ C konstanta, ki je odvisna od oblike upora,
- ⇒ U padec napetosti na uporu in
- ⇒ α nelinearni eksponent.

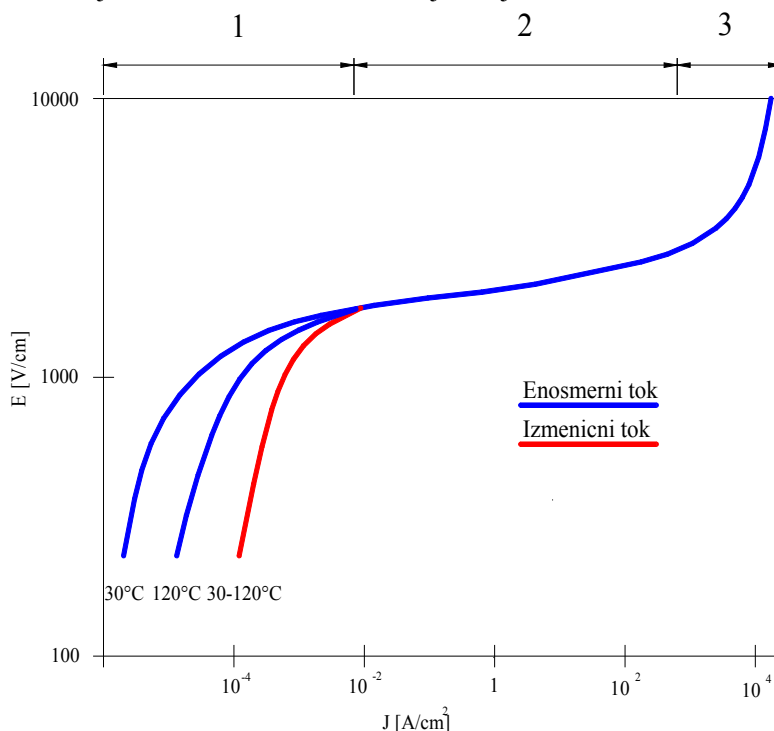


Slika 2.3: Vpliv nelinearnega eksponenta na karakteristiko tok/napetost

2.2 Karakteristika ZnO uporov

Na sliki 2.4 je prikazana tipična karakteristika ZnO nelinearnega upora, ki podaja relacijo med električno poljsko jakostjo in tokovno gostoto pri enosmerni in izmenični obremenitvi. Iz karakteristike so razvidna tri področja delovanja in sicer področje nizkega, srednjega in visokega električnega polja. Iz primerjave med karakteristikama pri enosmerni in izmenični obremenitvi je razvidna razlika v velikosti tokovne gostote in njuni temperaturni odvisnosti spodnjega dela

karakteristike pod kolenom. Velikost tokovne gostote pri enosmerni obremenitvi je bistveno manjša kot pri izmenični obremenitvi, kar kaže na prevladujočo kapacitivno komponento tokovne gostote pri izmenični obremenitvi. To potrjuje tudi temperaturna odvisnost spodnjega dela karakteristike, ki je bistveno močnejše izražena pri enosmerni obremenitvi kot pri izmenični, kjer je tako majhna, da je pri uporabi logaritemskega merila sploh ni mogoče opaziti. Razlog je v tem da se temperaturna odvisnost karakteristike nanaša skoraj izključno na ohmsko komponento tokovne gostote, ki je lepo izražena na karakteristiki za enosmerno obremenitev, medtem ko je pri izmenični obremenitvi, kjer prevladuje kapacitivna komponenta njena odvisnost bistveno manjša in jo lahko zanemarimo.



- ⇒ 1: Področje nizkega električnega polja,
- ⇒ 2: Področje srednjega električnega polja in
- ⇒ 3: Področje visokega električnega polja.

Slika 2.4: U-I karakteristika ZnO upora

2.2.1 Področje nizkega električnega polja

Za to področje je značilna termična odvisnost in kapacitivnost varistorjev iz katerih je sestavljen prenapetostni odvodnik. Slika 2.5 prikazuje principiarno sestavo ZnO upora. V tem področju imajo na lastnosti ZnO upora odločilen vpliv meje med zrni ZnO (intergranulacijska plast). Zrna ZnO imajo razmeroma majhno upornost, med tem ko meje med zrni poskrbijo za oviro električnemu toku v področju nizkega električnega polja. Poznano je več teorij, ki obravnavajo to področje, najbolj pa je poznana teorija, ki jo je podal Schottky.

Meje med zrni predstavljajo oviro toku med zrni ZnO. Ko se pojavi električno polje, se te ovire znižajo, tako da lahko elektroni lažje prehajajo preko ovir. Tok, ki nastopi zaradi potovanja elektronov, je odvisen od napetosti in temperature. Tokovna gostota v področju nizkega električnega polja je podana z enačbo:

$$J = J_0 \cdot e^{\frac{\sqrt{E \cdot q^3 / 4\pi\epsilon} - \phi_b}{k \cdot T}} \quad [\text{A/m}^2] \quad (2.2)$$

V enačbi pomeni:

- $\Rightarrow J_0$ konstanta odvisna od materiala [A/cm^2],
- $\Rightarrow \Phi_b$ padec potenciala na mejni plasti,
- $\Rightarrow E$ električna poljska jakost [V/m],
- $\Rightarrow q$ naboj elektrona [$\text{As} = \text{C}$],
- $\Rightarrow \varepsilon$ dielektrična konstanta [F/m],
- $\Rightarrow k$ boltzmanova konstanta: $1.380658(12)\text{E-}23$ [J/K] in
- $\Rightarrow T$ temperatura [K].

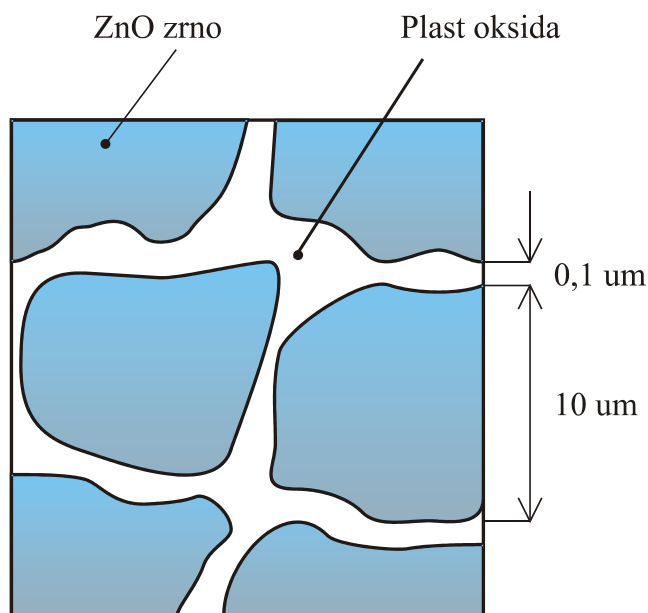
2.2.2 Področje srednjega električnega polja

Področje srednjega električnega polja je takoimenovano področje nelinearnosti. V tem področju se meje med zrnji ZnO stanjšajo. Elektroni lažje prehajajo skozi ne neodvisno od njihove energije. Zaradi tega tok skozi upor v tem področju ni odvisen od temperature. Ta pojav se imenuje tunelski efekt.

Tokovna gostota v tem področju je podana z enačbo:

$$J = J_1 \cdot e^{\frac{A \cdot \phi_b^{3/2}}{E}} \quad [\text{A}/\text{m}^2] \quad (2.3)$$

V enačbi sta J_1 in A materialni konstanti.



Slika 2.5: Zgradba ZnO upora

2.2.3 Področje visokega električnega polja

V tem področju je padec napetosti na mejnih intergranulacijskih plasteh zelo majhen. Prevladuje padec napetosti na zrnih ZnO. Tok je odvisen le od upornosti zrn ZnO. Karakteristika ima v tem področju ohmski značaj.

Tokovna gostota je v tem področju podana z enačbo:

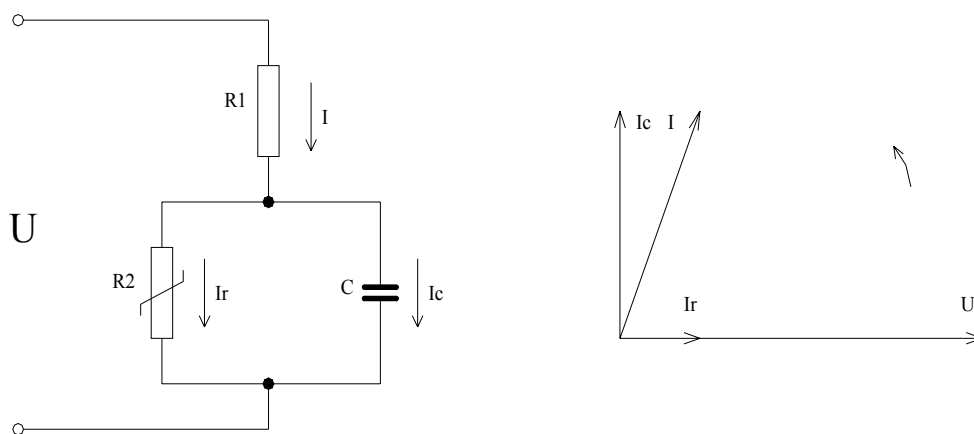
$$J = \frac{E}{\rho} \quad [\text{A/m}^2] \quad (2.4)$$

kjer je:

- $\Rightarrow E$ električna poljska jakost [V/m] in
- $\Rightarrow \rho$ specifična upornost materiala [Ωm].

3. TERMIČNE OBREMENITVE ZNO ODVODNIKA

Zaradi stalne priključenosti ZnO odvodnikov, ki so sestavljeni iz uporov ZnO na obratovalno napetost, skozi ZnO odvodnik ves čas teče nek uhajavi tok, ki je sestavljen iz kapacitivne in ohmske komponente. Trajna obratovalna napetost mora biti izbrana tako, da obratuje odvodnik v spodnjem delu $U-I$ karakteristike, kjer je ohmska komponenta toka, ki povzroča izgube mnogo manjša od kapacitivne. Obe komponenti sta odvisni od napetosti, zlasti ohmska pa je močno odvisna tudi od temperature. Segrevanje ZnO upora v stacionarnem obratovanju tako zavisi od obratovalne napetosti, kot tudi od same temperature upora. Dodatno se ZnO upor segreva ob raznih absorpcijah energije, zaradi nastanka prenapetosti. V kolikor želimo, da bi odvodnik normalno obratoval, mora biti sposoben oddati v okolico več ali vsaj enako količino toplote, kot se jo sprosti pri odvajanju prenapetosti. Sproščena toplota je odvisna od obratovalne napetosti, vrste in števila prenapetosti pri katerih je odvodnik deloval. Toplota, ki se lahko preda v okolico, pa je proporcionalna površini odvodnika in temperaturni razliki med odvodnikom in okolico. V kolikor je proizvedena toplota v odvodniku večja od toplote, ki se lahko preda v okolico, se začne odvodnik pretirano segrevati, kar pripelje do termičnega pobega in odvodnik se uniči.



Slika 3.1: Nadomestna shema ZnO upora

kjer je:

- ⇒ R_1 konstantna upornost,
- ⇒ R_2 spremenljiva upornost in
- ⇒ C kapacitivnost ZnO upora.

Obremenjevanje ZnO prenapetostnega odvodnika je odvisno od:

- ⇒ keravnicega nivoja in izpostavljenosti priključenih vodov,
- ⇒ strukture in velikosti postroja ter števila priključkov na vode,
- ⇒ ozemljitve nevtralne točke omrežja,
- ⇒ obratovalne napetosti,
- ⇒ vrste prenapetosti,
- ⇒ kratkostične moči in
- ⇒ karakterja omrežja (DV, KV in mešano omrežje).

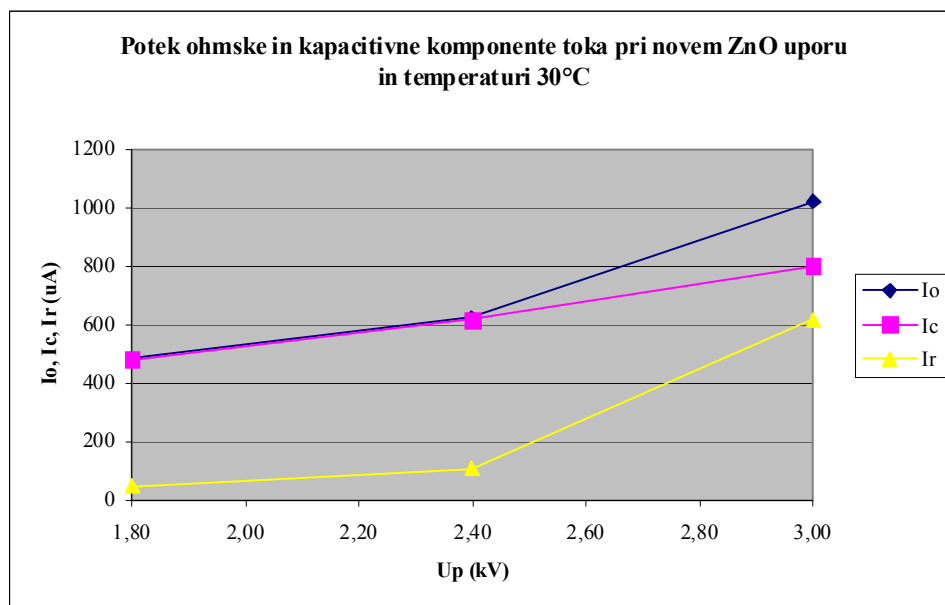
Do povišanja temperature ZnO prenapetostnega odvodnika lahko pride v naslednjih primerih:

- ⇒ zaradi napačne izbire prenapetostnega odvodnika,
- ⇒ zaradi delnega defekta na nelinearnih uporih in
- ⇒ zaradi nastanka močnih zaporednih atmosferskih, stikalnih in časnih prenapetosti.

Od odvodnika zahtevamo predvsem da izpolnjuje naslednje:

- ⇒ zanesljivost obratovanja,
- ⇒ da so njegove izgube čim manjše,
- ⇒ da je njegov zaščitni nivo čim nižji in
- ⇒ življenjska doba čim daljša.

Prvo in drugo zahtevo izpolnimo tako, da izberemo obratovalno napetost v linearnem delu U - I karakteristike, kjer prevladuje kapacitivna komponenta toka, ohmska pa je zadosti majhna. Ohmska komponenta toka, ki teče skozi odvodnik pri obratovalni napetosti in odvodni tok ob odvajanju prenapetosti postopoma rušita strukturo odvodnika. Rezultat delovanja obeh je povečanje ohmskega toka oziroma izgub v stacionarnem obratovanju, rečemo, da se odvodnik stara.



Slika 3.2 Prikaz ohmske in kapacitivne komponente v skupnem stacionarnem toku skozi upor ZnO v odvisnosti od napetosti

Iz diagrama, ki ga prikazuje slika 3.2 je razvidno da napetost najmočnejše vpliva na velikost ohmske komponente stacionarnega toka, čim nižja je napetost, tem manjša je ohmska komponenta tega toka in s tem manjše izgube oziroma segrevanje. Čim manjše pa je segrevanje, tem nižja je temperatura odvodnika v stacionarnem obratovanju, zato je povečanje temperature odvodnika na račun absorpcij energije, ki še ne povzroči termičnega pobega lahko večje. Zato s poskusom določimo neko napetost, ki jo imenujemo kritična napetost U_{kri} . Prekoračitev kritične napetosti v stacionarnem obratovanju pelje k termičnemu pobegu. Kritična napetost se lahko pojavi le za določen čas, po absorpciji velike količine energije. Obratovalno napetost izberemo zato nižjo od kritične in sicer v mejah $(0.6-0.7) \cdot U_{kri}$. S tem povečamo zanesljivost obratovanja in podaljšamo življenjsko dobo odvodnika.

Zahteva po zagotovitvi nizkega zaščitnega nivoja je v nasprotju z zahtevo po čim manjši ohmski komponenti uhajavega toka. Za zagotovitev nizkega zaščitnega nivoja mora biti nazivna napetost odvodnika čim nižja, saj nizek zaščitni nivo pomeni, da odvodnik deluje že pri prenapetostih, ki so precej nižje od izolacijske trdnosti ščitene naprave. To istočasno pomeni, da mora biti odvodnik sposoben absorbirati veliko količino energije. Kot smo že omenili je odvodnik sposoben absorbirati večjo količino energije, v kolikor teče v stacionarnem obratovanju skozenj čim manjši ohmski tok. Prav izrazito nelinearna U - I karakteristika upora ZnO omogoča, da je kljub majhnemu ohmskemu toku v stacionarnem obratovanju zaščitni nivo odvodnika nizek. Poenostavljeno povedano, ob velikem povečanju toka, se napetost poveča zelo malo.

3.1 Termične obremenitve ZnO odvodnika v normalnem obratovanju

Zaradi stalne priključenosti ZnO odvodnikov, ki so sestavljeni iz ZnO uporov na obratovalno napetost, teče skozenj ves čas tok, ki je sestavljen iz kapacitivne in ohmske komponente, pri čemer je trajna obratovalna napetost tako izbrana, da obratuje odvodnik v spodnjem delu $U-I$ karakteristike, kjer je ohmska komponenta toka, ki povzroča segrevanje, mnogo manjša od kapacitivne. Obe komponenti sta odvisni od napetosti in temperature, vendar je temperaturna odvisnost mnogo bolj izražena pri ohmski komponenti. Velikost ohmske komponente stacionarnega toka zavisi od obratovalne napetosti in temperature ZnO upora. Ohmska komponenta povzroča segrevanje odvodnika in s tem degradacijo ZnO upora. Vrednost ohmske komponente stacionarnega toka mora biti čim manjša, nikakor pa ne sme preseči vrednosti, ki jo predpisuje proizvajalec. Nižja kot je vrednost ohmske komponente stacionarnega toka, nižja je temperatura odvodnika v stacionarnem obratovanju in s tem večja razlika do njene najvišje dovoljene vrednosti, kar pomeni večjo sposobnost absorpcije energije.

3.2 Termične obremenitve pri delovanju ZnO odvodnika ob prenapetostih

Pri delovanju ZnO prenapetostnega odvodnika skozi odvodnik steče velik odvodni tok, zaradi katerega se sprostijo velika količina toplote in pride do velikih termičnih obremenitev. Te lahko ogrozijo termično ravnovesje. To je še posebej nevarno, če vrednost proizvedene toplote že v stacionarnem obratovanju (pri obratovalni napetosti) dosega tako visoke vrednosti, kot jih je odvodnik ravno še sposoben oddati v okolico. V tem primeru bi odvodnik že pri obratovalni napetosti obratoval na meji termične stabilnosti, vsako delovanje odvodnika oziroma odvajanje prenapetosti pa bi zaradi dodatnega segrevanja takoj povzročilo njegovo termično nestabilnost in termični pobeg odvodnika. Ker pa je naloga odvodnika prav omejevanje prenapetosti, mora biti odvodnik sposoben absorbirati vso energijo, ki se pojavi pri delovanju odvodnika, pri tem pa ne sme biti porušena njegova termična stabilnost. Osnovni pogoj, ki to omogoča je, poleg ustrezne absorpcijske sposobnosti, dovolj nizka vrednost ohmske komponente stacionarnega toka, ki zagotavlja dovolj nizko temperaturo odvodnika v stacionarnem obratovanju. Nižja temperatura odvodnika v stacionarnem obratovanju pomeni počasnejše staranje in večjo rezervo pri absorpciji energije v primeru delovanja odvodnika.

3.3 Posledice preobremenitev pri delovanju ZnO odvodnika

Visoke termične obremenitve povzročajo degradacijo v kristalni strukturi ZnO uporov. Zaradi slednje se povečuje ohmska komponenta odvodnega toka in z njo temperatura odvodnika. Višja temperatura posledično zopet povzroča povečevanje ohmske komponente stacionarnega toka in s tem večje izgube, kar pomeni znižanje absorpcijske sposobnosti odvodnika oziroma večjo obremenitev pri enaki absorpcijski sposobnosti. Večja obremenitev zopet pomeni močnejšo degradacijo in posledično nadaljnje znižanje absorpcijske sposobnosti.

3.3.1 Vpliv termičnih obremenitev ZnO odvodnika na njegovo življenjsko dobo

Življenjska doba ZnO prenapetostnega odvodnika je odvisna predvsem od velikosti toka, ki teče skozenj pri obratovalni napetosti in števila delovanj odvodnika ter amplitude in oblike odvodnih tokov, ki pri delovanju stečejo skozenj.

Velikosti stacionarnega toka, ki teče skozi ZnO prenapetostni odvodnik pri obratovalni napetosti je odvisna od nazivne napetosti ZnO prenapetostnega odvodnika oziroma izbire njegove delovne točke na $U-I$ karakteristiki. Na velikost stacionarnega toka, ki teče skozi ZnO odvodnik pri obratovalni napetosti vplivajo tudi temperatura, vlaga in konstrukcijske pomanjkljivosti odvodnika. Zaradi delovanja teh vplivov in odvajanja odvodnih tokov različnih amplitud in trajanja, je življenjska doba ZnO prenapetostnega odvodnika skoraj vedno krajša od vrednosti izračunane iz enačbe 3.7.

Da bi zagotovili čim daljšo življenjsko dobo ZnO prenapetostnega odvodnika je potrebno poskrbeti, da temperatura odvodnika v obratovanju ne preseže kritične vrednosti, pri kateri lahko pride do porušitve termičnega ravnovesja. Odvodnik se v obratovanju segreva zaradi ohmske komponente toka, ki teče skozenj pri obratovalni napetosti. Pri obratovalni napetosti se odvodnik nahaja v spodnjem linearnem delu U - I karakteristike za katerega je značilna močna temperaturna odvisnost toka in sicer zaradi odvisnosti njegove ohmske komponente. Če želimo zagotoviti zanesljivo delovanje ZnO prenapetostnega odvodnika in njegovo dolgo življenjsko dobo, je potrebno poskrbeti, da ne pride do porušitve termičnega ravnovesja tako v normalnih obratovalnih pogojih, kot tudi ob prenapetostih, ko prihaja do absorpcij velikih vrednosti energije. V obratovanju pri normalnih obratovalnih pogojih je tako potrebno zagotoviti, da je temperatura odvodnika dovolj nizka, oziroma da je vrednost ohmske komponente toka, ki teče skozenj pri obratovalni napetosti dovolj nizka. To dosežemo z izbiro dovolj visoke nazivne napetosti odvodnika ter izbiro konstrukcije, ki omogoča dobro hlajenje odvodnika. Potrebno je upoštevati tudi povečanje temperature zaradi delovanja zunanjih vplivov kot so sončno sevanje, slana atmosfera, onesnaženje itd. Poleg tega je za zagotovitev zanesljivega delovanja odvodnika potrebno izbrati odvodnik z ustrezno absorpcijsko sposobnostjo v skladu s pričakovanimi vrednostmi odvodnih tokov oziroma keravnimi nivojem in kratkostično močjo v obravnavani točki omrežja.

3.3.2 Staranje ZnO odvodnika

Kot je bilo že omenjeno, se v obratovanju ZnO prenapetostnega odvodnika pojavlja degradacija v strukturi ZnO uporov. Proces imenujemo staranje, ki se odraža v spreminjanju spodnjega dela U - I karakteristike odvodnika. Obremenitve, ki povzročajo staranje lahko razdelimo v dve veliki skupini:

Obremenitev s trajno obratovalno napetostjo

V primeru obremenitve z trajno obratovalno napetostjo, je mogoče enostavno matematično izraziti življenjsko dobo odvodnika oziroma upora ZnO. Pri taki obremenitvi se ohmska komponenta odvodnega toka proporcionalno povečuje s kvadratnim korenom časa, razen na začetku in koncu življenjske dobe. Časovno odvisnost ohmske komponente gostote odvodnega toka podamo z enačbo:

$$J_r(t) = J_0(0)(1 + h\sqrt{t}) \quad (3.1)$$

h označuje degradacijo in je odvisen od temperature T_d ter električne poljske jakosti E_d , pri kateri poteka degradacija.

Degradacija strukture je kemičen proces, ki je odvisen od temperature in se podaja z enačbo:

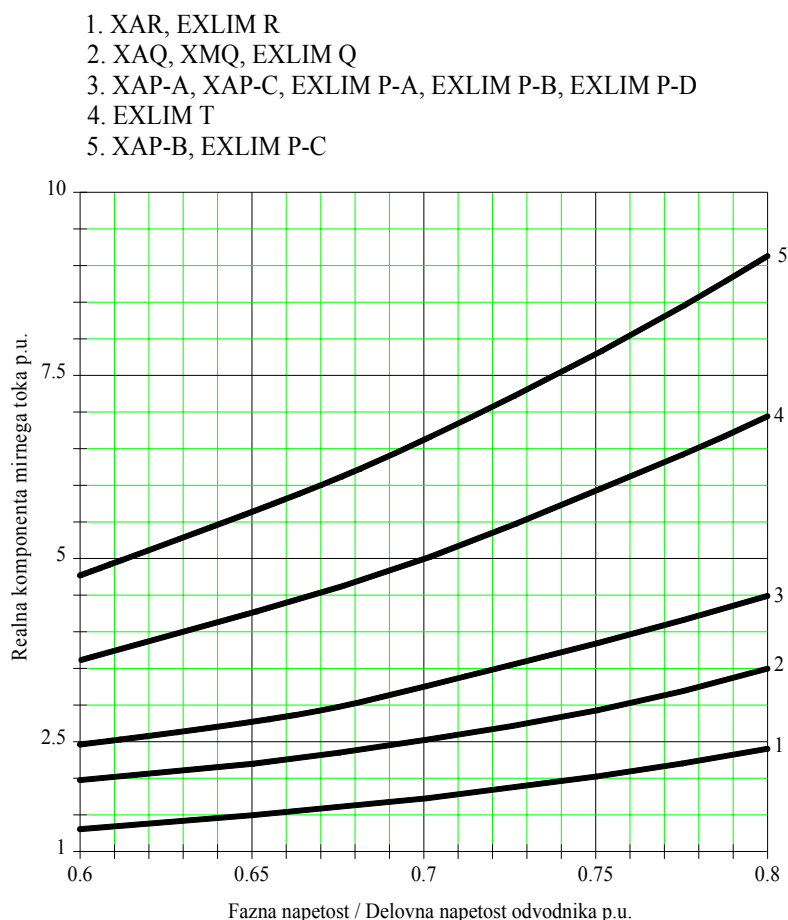
$$h = h_0 E_d e^{-\frac{W_d}{KT_d}} \quad (3.2)$$

$$h_0 = H_0 E_d^n \quad (3.3)$$

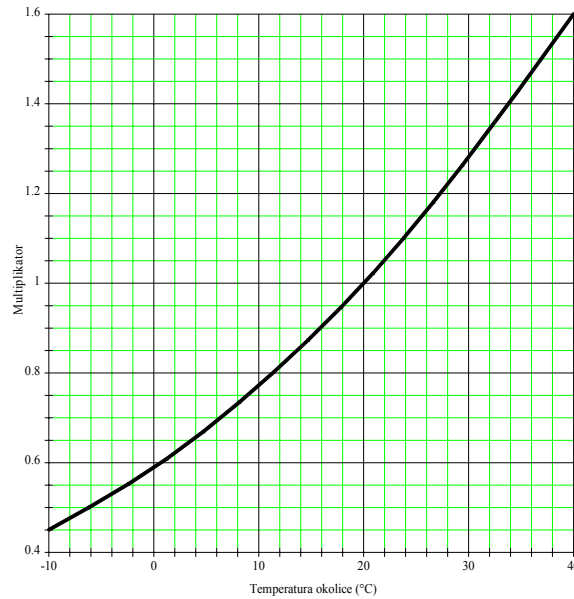
kjer pomeni:

- $\Rightarrow W_d$ aktivacijska energija, ki je potrebna da degradacija nastopi,
- $\Rightarrow E_d$ električna poljska jakost, pri kateri poteka degradacija,
- $\Rightarrow h_0$ degradacija strukture zaradi električne poljske jakosti,
- $\Rightarrow T_d$ temperatura, pri kateri poteka degradacija,
- $\Rightarrow T_0$ referenčna temperatura,
- $\Rightarrow H_0, n$ konstanti odvisni od materiala in
- $\Rightarrow K$ Boltzmanova konstanta.

Pri določanju življenjske dobe odvodnika oziroma upora ZnO, zaradi enostavnega izračuna navadno upoštevamo, da se je njegova življenjska doba iztekla, ko se je vrednost izgub oziroma vrednost ohmske komponente odvodnega toka pri trajni obratovalni napetosti povečala za nek faktor v primerjavi z novim primerkom. Pri novem odvodniku se vrednost ohmskega toka imenuje referenčna vrednost ohmskega toka. Proizvajalci ZnO odvodnikov podajajo maksimalno dovoljeno povečanje ohmskega toka skozi odvodnik glede na referenčno vrednost, v odvisnosti od obratovalne napetosti, največkrat kar v obliki diagramov, ki veljajo za določeno t.j. referenčno temperaturo. Poleg omenjenih diagramov se podajajo tudi diagrami za korekcijo rezultatov na referenčno temperaturo, v kolikor je bila meritev opravljena pri temperaturi, ki odstopa od referenčne. Za ilustracijo je prikazan diagram (Slika 3.3) maksimalnega dovoljenega povečanja ohmskega toka skozi odvodnik glede na referenčno vrednost za različne tipe 110 kV ZnO odvodnikov proizvajalca ABB. Analogno velja tudi pri SN odvodnikih.



Slika 3.3: Največje dopustno povečanje ohmskega toka v življenjski dobi glede na referenčno vrednost 50 μ A, v odvisnosti od razmerja med trajno obratovalno napetostjo in delovno napetostjo odvodnika, pri temperaturi 20 $^{\circ}$ C za različne tipe ZnO odvodnikov ABB



Slika 3.4: Korekcijski faktor za največje dopustno povečanje ohmskega toka s slike 3.3 zaradi odstopanja od referenčne temperature 20 °C.

Iz diagrama na sliki 3.4 se vidi koliko znaša največje dopustno povečanje ohmskega toka v odvisnosti od trajne obratovalne napetosti. V primeru, da meritev poteka pri temperaturi 20 °C in pri tem znaša trajna obratovalna napetost 0,6 nazivne napetosti (delovne nap. odvodnika), iz diagrama izberemo, da se sme vrednost ohmskega toka prenapetostnega odvodnika tip XAQ povečati za dvakrat, glede na referenčno vrednost, to pomeni, da se življenjska doba temu prenapetostnemu odvodniku izteče, ko se vrednost ohmskega toka podvoji. Ob tej predpostavki izračunamo življenjsko dobo prenapetostnega odvodnika oz. ZnO upora iz enačb:

$$t = \frac{1}{h_0^2} \cdot e^{\frac{2 \cdot W_d}{K \cdot T_d}} \quad (3.4)$$

s substitucijo se enačba spremeni

$$t_0 = \frac{1}{h_0^2} \quad (3.5)$$

in

$$T_0 = \frac{2 \cdot W_d}{K} \quad (3.6)$$

tako dobi dokončno obliko

$$t = t_0 \cdot e^{\frac{T_0}{T_d}} \quad (3.7)$$

kjer je:

- ⇒ t življenjska doba ZnO odvodnika oz. upora,
- ⇒ E električna poljska jakost,
- ⇒ h_0 degradacija strukture upora zaradi E in

⇒ t_0 življenjska doba upora v primeru obremenitve samo z E .

Iz enačbe 3.7 je razvidno, da je življenjska doba ZnO prenapetostnega odvodnika pri obremenitvi s trajno obratovalno napetostjo odvisna le od temperature.

Priporočljiva vrednost ohmske komponente toka pri U_{cov} pri novem odvodniku naj bi bila manjša od 0,1 mA, kar pri površini ZnO upora 20 cm^2 pomeni tokovno gostoto $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Poleg meritve ohmske komponente toka pri U_{cov} je priporočljivo meriti tudi preostalo napetost, ki se od proizvajalca do proizvajalca zelo malo spreminja. Nekateri proizvajalci nimajo dovolj natančnega nabora ZnO uporov in sestavijo odvodnik z neustrezno nazivno napetostjo. Zato se odvodniki pogosto pregrevajo. Z meritvijo preostale napetosti bi se to takoj ugotovilo.

Standard ne predpisuje kolikšne so priporočljive vrednost ohmske komponente toka pri U_{cov} , pač pa le vrednost referenčnega toka, ki pa je večji od vrednost ohmske komponente toka pri U_{cov} . Referenčni tok se podaja zgolj iz razloga, da se določi referenčno napetost, ki mora ostati znotraj določenih mej tudi pri staranem odvodniku, tj. merilo za kvaliteto odvodnika, kar pa ni mogoče meriti pri obratovalni napetosti, ker je višja od te napetosti. Vrednost referenčnega toka se lahko giblje med $50,0 \mu\text{A}$ do $1,0 \text{ mA}$. Njegova vrednost je izbrana tako, da je njena vrednost toliko večja od kapacitivne komponente, da se jo da natančno določiti, (torej zelo blizu kolenu) medtem ko je vrednost ohmske komponente toka pri U_{cov} , ki določa kriterij za kvaliteto odvodnika bistveno nižje pod kolonom U - I karakteristike v katerem pa prevladuje kapacitivna komponenta.

Obremenitve, ki nastopajo ob prenapetostih

Ta vrsta obremenitev je raznolika, saj se težko napove v kakšnem številu in s kakšnimi amplitudami se bodo pojavile. Prav zaradi tega je njihov vpliv na degradacijo življenjske dobe odvodnika težko izraziti. Na osnovi izkušenj lahko te vplive le približno napovemo in jih označujemo z ΔJ , odvisni pa so od:

- ⇒ obratovalne napetosti,
- ⇒ oblike prenapetosti,
- ⇒ gostote odvodnega toka,
- ⇒ temperature elementa in
- ⇒ števila absorbiranih prenapetosti.

Enačba gostote ohmske komponente odvodnega toka dobi tako obliko:

$$J_r(t) = J_r(0)(1 + h\sqrt{t}) + \Delta J(t) \quad (3.8)$$

Enačbo delimo z začetno vrednostjo ohmske komponente odvodnega toka in tako dobi obliko:

$$\frac{J_r(t)}{J_r(0)} = (1 + h\sqrt{t}) + m \quad (3.9)$$

kjer je m indikator degradacije zaradi absorbcij energije in se podaja v tabelarično.

4. DOLOČITEV NAZIVNIH VELIČIN ODVODNIKA

Splošno

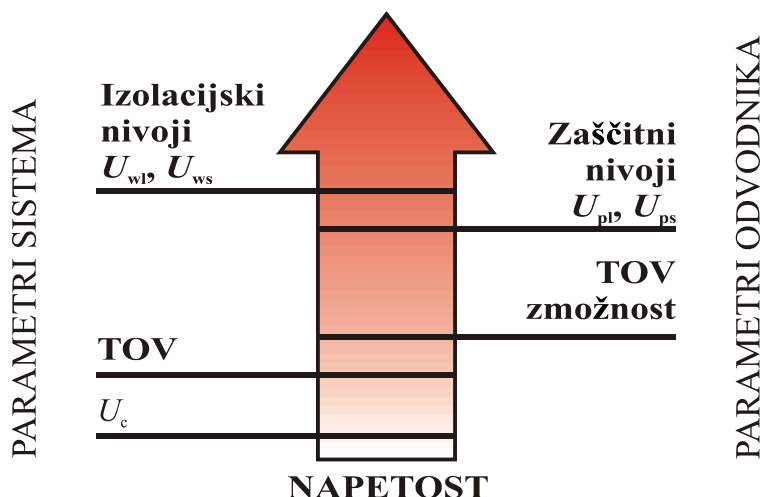
Pri izbiri ZnO odvodnika je potrebno določiti naslednje veličine:

- ⇒ Trajno obratovalno napetost U_c ,
- ⇒ Nazivno napetost odvodnika U_r ,
- ⇒ Nazivni odvodnik tok I_r ,
- ⇒ Razred praznitve dolgega voda v skladu z IEC 60094-4 in
- ⇒ Sposobnost absorpcije energije W' [kJ/kV].

4.1 Določitev trajne obratovalne U_c in nazivne napetosti U_r odvodnika

V tem poglavju bodo podane smernice in priporočila za pravilno izbiro odvodnika. Pri izbiri odvodnika je najprej potrebno razumeti, kako različne zahteve in parametri omrežja vplivajo na obratovalne lastnosti odvodnika. Le na podlagi poznavanja osnovnih principov delovanja ZnO odvodnika in veličin omrežja, ki vplivajo na njegovo delovanje, je možno pravilno izbrati odvodnik.

Odvodnik mora biti izbran tako, da na eni strani zagotavlja ustrezno pranapetostostno zaščito, na drugi strani pa da ni ogroženo njegovo stabilno trajno delovanje. Pod *ustrezno pranapetostno zaščito* se razume, da so prenapetosti, ki obremenjujejo izolacijo vgrajenih naprav ali postroja, vedno pod zdržno napetostjo (udarna, stikalna in izmenična) naprav in to z zadostno varnostno mejo. *Stabilno trajno obratovanje* odvodnika pa pomeni, da je odvodnik sposoben trajno zdržati termične obremenitve (električno in mehansko), ki so posledica časnih prenapetosti, udarov strel, kratkih stikov ali stikalnih manipulacij. Obe zahtevi pa sta tesno povezani med seboj, kot prikazuje slika 4.1



Slika 4.1: Parametri omrežja in odvodnika

kjer pomeni:

- ⇒ U_{wl} izolacijski nivo opreme za atmosferski udarni val,
- ⇒ U_{ws} izolacijski nivo opreme za stikalni udarni val,
- ⇒ U_{pl} zaščitni nivo odvodnika za atmosferski udarni val,
- ⇒ U_{ps} zaščitni nivo odvodnika za stikalni udarni val,

- ⇒ *TOV zmožnost* je vrednost časne prenapetosti, ki jo odvonik v določenem času zdrži brez trajnih posledic,
- ⇒ *TOV* je časna prenapetost, ki se pojavi ob nastanku zemeljskega stika in
- ⇒ U_c je trajna obratovalna napetost.

To pomeni, da znižanje zaščitnega nivoja odvodnika neposredno pomeni večje termične obremenitve odvodnika med trajno obratovalno napetostjo in obratno. Trajno obratovalno napetost U_c odvodnika ni mogoče povečati, ne da bi se pri tem zvišal zaščitni napetostni nivo odvodnika. Drugače povedano, izgube v odvodniku in zaščitni nivo odvodnika so tesno povezane z njegovo $U-I$ karakteristiko.

Da odvodnik štiti naprave učinkovito, mora pri trajni obratovalni napetosti omrežja delovati absolutno brez težav. Da bo ta pogoj izpolnjen, se najprej ugotovi trajno obratovalno napetost, s katero bo odvodnik obremenjen. To je v bistvu fazna obratovalna napetost omrežja, ki se jo poveča za 5 %. Razlog za to povečanje leži v možni prisotnosti višjeharmonskih komponent. Zaradi ekstremno nelinearne $U-I$ karakteristike, ima r.m.s. vrednost obratovalne napetosti manjši pomen, kot pa njena temenska vrednost, katera lahko neporocionalno poveča ohmsko komponento uhajavega toka v trenutku največje vrednosti obratovalne napetosti omrežja. ***Pod »obremenilno napetostjo odvodnika« se razume napetost (prenapetost), ki se pojavi znotraj neprekinjene periode v trajanju nekaj sekund ali pa celo do 120 min ali več in se imenuje časna prenapetost.*** Kakšna pa je ta obremenilna napetost, pa je predvsem odvisno od statusa nevtralne točke SN omrežja. To pa določa faktor zemeljskega stika k .

V standardu IEC 60071-2 je za faktor k navedena naslednja definicija: Faktor zemeljskega stika k je razmerje med najvišjo efektivno vrednostjo napetosti industrijske frekvence zdrave faze proti zemlji na določenem mestu med zemeljskim stikom in efektivno vrednostjo napetosti industrijske frekvence faze proti zemlji, ko ni zemeljskega stika.

Potrebno je poudariti, da se faktor zemeljskega stika k izračuna (lahko pa tudi izmeri) za določeno mesto, kjer nastane zemeljski stik. V določenih primerih (resonančno ozemljena omrežja) se lahko zgodi, da je faktor zemeljskega stika na mestu okvare višji kot v drugih točkah omrežja.

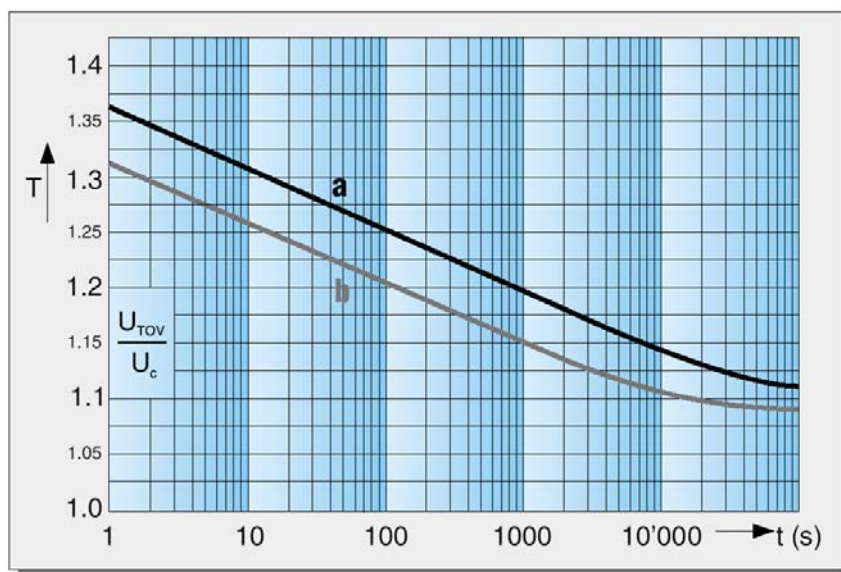
Za različne načine obratovanja nevtralne točke SN omrežja se tudi vrednosti faktorja zemeljskega stika k razlikujejo. Tako velja po IEC 60071:

- ⇒ Izolirana ali resonančno ozemljena nevtralna točka (faktor $k = 1,73-1,8$),
- ⇒ Nevtralna točka ozemljena preko malega upora ($k = 1,4-1,7$) in
- ⇒ Neposredno ozemljena nevtralna točka ($k = 1,4$).

Pri izbiri nazivne napetosti odvodnika je potrebno zadostiti dvema kriterijema in sicer:

- ⇒ Trajna obratovalna napetost odvodnika U_c mora biti v normalnih pogojih obratovanja višja od napetosti industrijske frekvence, ki je priključena na priključne sponke odvodnika in
- ⇒ Produkt odpornostnega faktorja odvodnika T (tega poda proizvajalec v obliki grafa) in U_c mora biti večji od pričakovane vrednosti časne prenapetosti, ki se lahko pojavi med obratovanjem omrežja ($U_{TOV} \leq T \cdot U_c$).

Večina proizvajalcev odvodnikov podaja odpornostni faktor T kot kvocient med časno prenapetostjo (U_{TOV}) in trajno obratovalno napetostjo (U_c) in sicer v odvisnosti od trajanja časne prenapetosti, kot je to prikazano na Sliki 4.2.

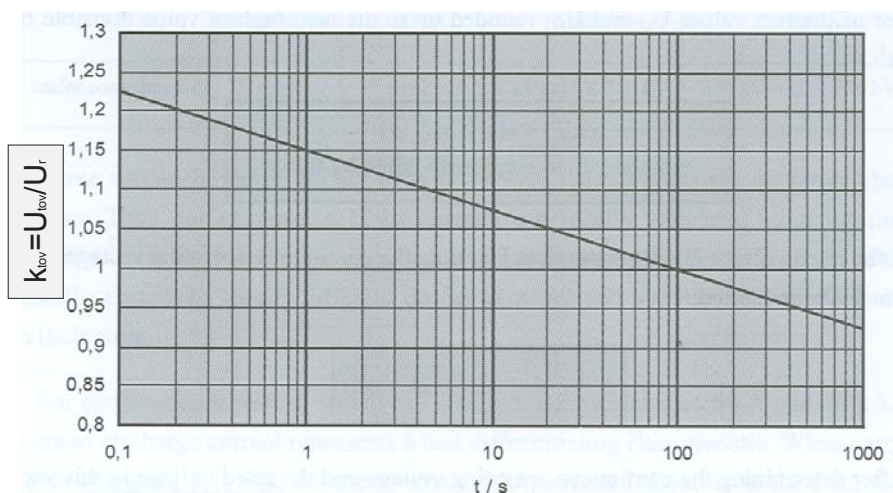
Slika 4.2: Potek odpornostnega faktorja T v odvisnosti od trajanja časne prenapetosti

kjer pomeni:

- ⇒ krivulja **a** ne upošteva predhodne termične obremenitve odvodnika in
- ⇒ krivulja **b** upošteva predhodno termično obremenitev odvodnika (termični obremenitvi odvodnika, ki je posledica udara strele še sledi termična obremenitev odvodnika, ki je posledica časne prenapetosti).

Vrednosti faktorja T (potek krivulje) se razlikujejo glede na proizvajalca odvodnikov, kakor tudi za posamezen tip odvodnika, ki ga ponuja isti proizvajalec. Proizvajalec odvodnika običajno poda za vsak tip odvodnika tudi krivuljo faktorja T . Včasih sta lahko na teh diagramih prikazni dve krivulji. Krivulja »a« prikazuje vrednosti faktorja T brez predhodne termične obremenitve odvodnika, med tem ko krivulja »b« prikazuje vrednosti faktorja T , ko je bil odvodnik predhodno termično obremenjen z nazivnim odvodnim tokom. V praksi to pomeni, da je odvodnik najprej termično obremenjen npr. z atmosfersko razelektritvijo kateri lahko sledi stikalna in časna prenapetost (padec vodnika na zemljo). Pri izbiri nazivne napetosti se praviloma upošteva krivulja »b«, saj predstavlja konzervativnejši (varnejši) pristop pri izbiri nazivne napetosti odvodnika.

Nekateri proizvajalci (npr. SIEMENS) pa podajajo odpornostni faktor odvodnika k_{tov} kot kvocient med časno prenapetostjo U_{tov} in nazivno napetostjo odvodnika U_n , kot je prikazano na Sliki 4.3.

Slika 4.3: Potek odpornostnega faktorja k_{tov} v odvisnosti od nazivne napetosti odvodnika

V tem primeru se postopek izbire nazivne napetosti nekoliko razlikuje, kar bo podrobneje opisano v naslednjem poglavju.

4.2 Postopek izbire nazivne napetosti odvodnika ko je odpornostni faktor odvodnika T (k_{tov}) podan na trajno obratovalno napetost U_C

Za izbiro nazivne napetosti odvodnika je potrebno zbrati naslednje podatke:

- ⇒ največjo napetost omrežja U_m ,
- ⇒ maksimalni čas trajanja časne prenapetosti (zemeljskega stika) t (s),
- ⇒ faktor zemeljskega stika k ,
- ⇒ faktor $k_0=0,8$ (vrednost faktorja je določena na izkustveni podlagi IEC 60099-4 in nima fizikalne osnove) in
- ⇒ odpornostni faktor T (k_{tov}) odvodnika.

V prvem koraku izračunamo trajno fazno obratovalno napetost omrežja (sistema):

$$U_C = \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad [\text{kV}] \quad (4.1)$$

Nato izračunamo predhodno trajno obratovalno napetost odvodnika U_{C1} , s katero bo odvodnik trajno obremenjen v normalnem obratovalnem stanju:

$$U_{C1} = \frac{U_C}{k_0} \quad [\text{kV}] \quad (4.2)$$

V naslednjem koraku izračunamo najvišjo pričakovano časno prenapetost U_{tov} , ki se zaradi zemeljskega stika pojavi v omrežju:

$$U_{tov} = k \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad [\text{kV}] \quad (4.3)$$

Na podlagi časne prenapetosti U_{tov} in odpornostnega faktorja T izračunamo trajno obratovalno napetost odvodnika U_{C2} , s katero bo ta obremenjen v trajanju zemeljskega stika:

$$U_{C2} = \frac{U_{tov}}{T} \quad [\text{kV}] \quad (4.4)$$

Trajno obratovalno napetost odvodnika izberemo glede na višjo vrednost med U_{C1} in U_{C2} .

$$U_C = \max\{U_{C1}, U_{C2}\} \quad (4.5.)$$

Na podlagi te izbrane napetosti nato iz kataloga proizvajalca izberemo prvo višjo trajno obratovalno napetost U_c pri kateri je tudi definirana nazivna napetost odvodnika.

4.3 Postopek izbire nazivne napetosti odvodnika ko je odpornostni faktor odvodnika T (po Siemensu k_{tov}) podan na nazivno napetost U_r

Tudi v tem primeru je za izbiro nazivne napetosti odvodnika potrebno zbrati naslednje podatke:

- ⇒ največjo napetost omrežja U_m ,

- ⇒ maksimalni čas trajanja časne prenapetosti (zemeljskega stika) t (s),
- ⇒ faktor zemeljskega stika k ,
- ⇒ faktor $k_0 = 0,8$ (vrednost faktorja je določena na izkustveni podlagi IEC 60099-4 ter nima fizikalne osnove) in
- ⇒ odpornostni faktor k_{tov} odvodnika.

V prvem koraku izračunamo trajno obratovalno napetost U_{Cl} s katero bo odvodnik trajno obremenjen. Za omrežja, ki so učinkovito ozemljena ali preko malega upora velja:

$$U_{Cl} \geq 1,05 \cdot \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad [\text{kV}] \quad (4.6)$$

Faktor 1,05 upošteva možnost prisotnosti višjeharmonskih komponent, ki lahko povečajo temensko vrednost trajne obratovalne napetosti.

Za izolirana ali resonančno ozemljena omrežja pa velja, da je:

$$U_{Cl} \geq U_m \quad [\text{kV}] \quad (4.7)$$

Na podlagi trajne obratovalne napetosti U_{Cl} se izračuna nazivna napetost odvodnika U_{r1} po naslednji enačbi:

$$U_{r1} = \frac{U_{Cl}}{0,8} \quad [\text{kV}] \quad (4.8)$$

V naslednjem koraku izračunamo najvišjo pričakovano časno prenapetost U_{tov} , ki se zaradi zemeljskega stika pojavi v omrežju:

$$U_{tov} = k \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad [\text{kV}] \quad (4.9)$$

Nato pa na podlagi časne prenapetosti U_{tov} izračunamo nazivno napetost odvodnika U_{r2} :

$$U_{r2} = \frac{U_{tov}}{k_{tov}} \quad [\text{kV}] \quad (4.10)$$

Nazivno napetost odvodnika izberemo glede na višjo vrednost med U_{r1} in U_{r2} .

$$U_r = \max \{U_{r1}, U_{r2}\} \quad [\text{kV}] \quad (4.11)$$

Na podlagi te izbrane napetosti nato iz tabele (kataloga proizvajalca) izberemo prvo višjo nazivno napetost U_r odvodnika.

Primer izbire odvodnika:

Potrebni podatki za izbiro odvodnika

- ⇒ Največja napetost omrežja: $U_m = 24 \text{ kV}$,
- ⇒ Nazivni zdržni izolacijski nivo vgrajene opreme: BIL = 125 kV,
- ⇒ Nazivni odvodni tok odvodnika: 10 kA,
- ⇒ Zahtevan razred praznitve dolgega voda: LD 1,
- ⇒ Največji kratkostični tok: npr. 20 kA,
- ⇒ Omrežje je ozemljeno preko malega upora 80 Ω . Iz tega sledi, da je faktor zemeljskega stika: $k = 1,73$,
- ⇒ Okvara se izklaplja (celotni čas U_{tov} s katero je odvodnik termično obremenjen je $3 \times 300 \text{ ms} = 900 \text{ ms}$, se zaokroži na 1 s.

⇒ Iz diagrama se določi odpornostni faktor T , ki za konkretni primer znaša 1,33.

$$U_c = \frac{U_m}{\sqrt{3}} = \frac{24,0}{\sqrt{3}} = 13,86 \text{ [kV]}$$

$$U_{c1} = \frac{U_c}{k_0} = \frac{13,86}{0,8} = 17,32 \text{ [kV]}$$

$$U_{iov} = k \frac{U_m}{\sqrt{3}} = 1,73 \frac{24,0}{\sqrt{3}} = 24,0 \text{ [kV]}$$

$$U_{c2} = \frac{U_{iov}}{T} = \frac{24,0}{1,33} = 18,1 \text{ [kV]}$$

$$U_c = \max\{U_{c1}, U_{c2}\} = \{17,32, 18,1\} \text{ [kV]}$$

Iz zadnje vrstice izračuna sledi, da je U_{c2} večja od U_{c1} . Napetosti U_{c2} in zahtevanim parametrom, npr. v katalogu ABB ustreza odvodnik POLIM D 20.

4.4 Izbira nazivne napetosti odvodnika U_r za slovenska distribucijska omrežja

Kot že zapisano, je za pravilno izbiro nazivne napetosti odvodnika potrebno najprej ugotoviti kakšne časne prenapetosti so dejansko prisotne v SN distribucijskih omrežjih. V ta namen so bile opravljene meritve časnih prenapetosti in izračuni faktorjev zemeljskega stika k za slovenska distribucijska omrežja.

Z analizo rezultatov meritev smo prišli do podatkov, ki so pomembni v zvezi s časnimi prenapetostmi. Zbrani so v Tabeli 4.1.

Daljnovid	Meritev	Ozemljitev [Ω]	U_f [kV]	Faktor k	Zemeljski stik na	I_{zs} [A]	t [ms]	APV
RTP Cerknica 26 383 m	7	80	15,3	1,37	ozemljitev	150	290	Ne
	8	80	17,5	1,62	ozemljitev	150	-	Ne
	9	80	15,4	1,35	sondo	80	-	Ne
	10	80	15,5	1,37	sondo	80	290	Da
	11	80	15,7	1,36	sondo	80	290	Da
	12	80	18,6	1,64	sondo	80	-	Ne
RTP Cerknica 3 773 m	13	80	18,0	1,57	ozemljitev	150	285	Ne
	14	80	19,2	1,67	ozemljitev	150	285	Ne
	15	40	17,0	1,51	ozemljitev	300	285	Ne
	16	40	18,9	1,66	ozemljitev	300	285	Ne
	17	40	17,6	1,54	ozemljitev	300	290	Ne
	18	40	14,2	1,26	sondo	100	290	Ne
	19	40	14,2	1,25	sondo	100	280	Da
RTP Logatec 6 265 m	20	80	19,0	1,64	ozemljitev	150	300	Ne
	21	80	15,4	1,35	sondo	80	295	Da
	22	80	15,7	1,36	sondo	80	295	Da
	23	80	15,6	1,33	sondo	80	290	Da
RTP Ljutomer	33	∞	19,9	1,68	ozemljitev	2	440	Ne
	34	∞	19,8	1,67	ozemljitev	2	440	Ne

2 051 m	35	∞	19,8	1,68	ozemljitev	2	440	Ne
	36	∞	19,8	1,69	ozemljitev	2	440	Ne

Tabela 4.1: Rezultati meritev prenapetosti ob zemeljskih stikih v različnih konfiguracijah SN distribucijskega omrežja.

Oznake v zgornji tabeli pomenijo:

- $\Rightarrow U_f$ je efektivna vrednost napetosti zdrave faze proti zemlji med enofaznim zemeljskim stikom,
- $\Rightarrow I_{zs}$ je tok zemeljskega stika okvarjene faze in
- $\Rightarrow t$ je čas trajanja zemeljskega stika.

Rezultati meritev pokažejo, da je po pričakovanju povprečna vrednost faktorja zemeljskega stika k najvišja oz. najbolj neugodna v omrežju z izolirano nevtralno točko, kjer je le nekoliko nižja od $\sqrt{3} \approx 1,73$ (medfazna napetost proti zemlji). Pri omrežju z ozemljeno nevtralno točko preko upora 80Ω je povprečna vrednost k nekoliko nižja od 1,73 za zemeljski stik na ozemljitev, najnižja pa je pri zemeljskem stiku na sondo. Najvišje izmerjene vrednosti se v obeh primerih zelo približajo vrednosti dobljeni v omrežju z izolirano nevtralno točko. Podobno moremo ugotoviti pri rezultatih za k ob zemeljskih stikih na ozemljitev v omrežju z ozemljeno nevtralno točko preko upora 40Ω .

Na podlagi dobljenih rezultatov meritev časnih prenapetosti lahko predpostavimo, da je vrednost faktorja zemeljskega stika za omrežja, ki so ozemljena preko malega upora, enaka vrednosti faktorju zemeljskega stika za omrežja, ki so izolirana ali resonančno ozemljena. Za to se predlaga, da se pri izbiri nazivne napetosti odvodnika U_r , ne glede na način obratovanja nevtralne točke, privzame vrednost faktorja zemeljskega stika na $k = 1,73$. Tako postane pri izbiri nazivne napetosti odvodnika U_r pomemben samo še čas trajanja časne prenapetosti U_{iov} . Za slovenska distribucijska omrežja, ki so ozemljena preko malega upora in se okvara izklaplja v času trajanja časne prenapetosti do 1 s (upošteva se HAPV in PAVP). Glede na to, da je trajna obratovalna napetost odvodnika U_c in s tem posredno tudi U_r izbrana z neko "rezervo" in da omrežje le izjemoma (npr. nagle razbremenitve) obratuje z največjo napetostjo omrežja (U_m), lahko ugotovimo, da odvodnik zdrži tudi termične obremenitve (2 do 3 s), ki nastopijo ob delovanju "shunt" odklopnika. Za izolirana distribucijska omrežja ali pa resonančno ozemljena, pa velja, da časna prenapetost lahko traja tudi do 2 h ali celo več. V tem primeru se smatra, da se okvara ne izklaplja in je odvodnik praktično trajno obremenjen z medfazno napetostjo, ki jo mora tudi zdržati.

Danes je na trgu veliko proizvajalcev odvodnikov, ki ponujajo različne tipe odvodnikov. Pri izbiri najustreznejšega ponudnika in s tem odvodnika, pogosto prihaja do nesporazumov. Eden izmed vzrokov za to je predvsem v različnem tolmačenju odpornostnega faktorja T, kar vodi pogosto do napačne izbire nazivne napetosti odvodnika. V Tabeli 4.2 a, b in c so navedene nazivne napetosti oz. tipi prenapetostnih odvodnikov za večino dobaviteljev v R. Sloveniji. Izračuni so bili opravljeni za 12 kV, 24 kV in 35 kV SN distribucijska omrežja.

PROIZVAJALEC	Najvišja napetost opreme [kV]	ODVODNIK		
		Nevtralna točka ozemljena preko malega upora $t = 1s$	Izolirana nevtralna točka $t = 7200 s^2$	Resonančno ozemljena nevtralna točka $t = 7200 s^2$
ABB	12	MWD 10	MWD 12	MWD 12
		MWK 10	MWK 12	MWK 12
		POLIM I..D 10	POLIM I..N 12	POLIM I..N 12
ETI	12	INZP 12 10 S	INZP 12 10 S	INZP 12 10 S
		INZP 12 10	INZP 12 10	INZP 12 10
IzoElektro	12	2SS15N kat. št.: 21-48-05	2SS15N kat. št.: 21-48-06	2SS15N kat. št.: 21-48-06

Raychem	12	HDA 08 MA	HDA 10 MA	HDA 10 MA
		RDA-9	RDA-12	RDA-12
Siemens	12	3EK7 120-4CC4	3EK7 150-4CC4	3EK7 150-4CC4
Tridelta GmbH	12	SBK-0 12/10.1	SBK-0 15/10.1	SBK-0 15/10.1
		SBK-I 12/10.1	SBK-I 15/10.1	SBK-I 15/10.1

¹ Okvara se izklaplja (HAPV in PAPV)² Okvara se ne izklaplja

Tabela 4.2 a: Nazivne napetosti in tipi odvodnikov za 12 kV slovenska distribucijska SN omrežja

PROIZVAJALEC	Najvišja napetost opreme [kV]	ODVODNIK		
		Nevtralna točka ozemljena preko malega upora $t = 1s^1$	Izolirana nevtralna točka $t = 7200 s^2$	Resonančno ozemljena nevtralna točka $t = 7200 s^2$
ABB	24	MWD 20	MWD 24	MWD 24
		MWK 20	MWK 24	MWK 24
		POLIM I..D 20	POLIM I..N 24	POLIM I..N 24
ETI	24	INZP 24 10 S	INZP 27 10 S	INZP 27 10 S
		INZP 24 10	INZP 27 10	INZP 27 10
IzoElektro	24	2SS15N kat. št.: 21-48-10	2SS15N kat. št.: 21-48-13	2SS15N kat. št.: 21-48-13
Raychem	24	HDA 16 MA	HDA 20 MA	HDA 20 MA
		RDA-18	RDA-24	RDA-24
Siemens	24	3EK7 240-4CE4	3EK7 300-4CF4	3EK7 300-4CF4
Tridelta GmbH	24	SBK-0 24/10.1	SBK-0 30/10.1	SBK-0 30/10.1
		SBK-I 24/10.1	SBK-I 30/10.1	SBK-I 30/10.1

¹ Okvara se izklaplja (HAPV in PAPV)² Okvara se ne izklaplja

Tabela 4.2 b: Nazivne napetosti in tipi odvodnikov za 24 kV slovenska distribucijska SN omrežja

PROIZVAJALEC	Najvišja napetost opreme [kV]	ODVODNIK
		Izolirana nevtralna točka $t = 7200 s^2$
ABB	38	MWD 35
		MWK 35
		POLIM I..N 35
ETI	38	INZP 42 10 S
		INZP 42 10
IzoElektro	38	2SS15N kat. št.: 21-48-18
Raychem	38	HDA 29 M
Siemens	38	3EK7 480-4CK4
Tridelta GmbH	38	SBK-0 48/10.1
		SBK-I 48/10.1

² Okvara se ne izklaplja

Tabela 4.2 c: Nazivne napetosti in tipi odvodnikov za 35 kV slovenska distribucijska SN omrežja

4.5 Postopek izbire nazivne napetosti odvodnika v zvezdišču transformatorja

Največja časna prenapietost v zvezdišču transformatorja je odvisna od največje napetosti omrežja U_m , statusa nevtralne točke omrežja, oziroma od faktorja zemeljskega stika k in faktorja p , ki se ga

izračuna po enačbi. Za omrežja ozemljena preko malega upora upoštevamo $k = 1,7$, za izolirana ali resonančno ozemljena omrežja pa $k = 1,73$. Največja časna prenapetost se izračuna po naslednji enačbi:

$$U_{iov} = \frac{U_m}{\sqrt{3}} \cdot p \quad [\text{kV}] \quad [4.12]$$

kjer je faktor:

$$p = \frac{k}{\sqrt{3}} \quad [4.13]$$

in pomeni zmanjšanje največje fazne časne prenapetosti glede na faktor zemeljskega stika.

Nato to izračunano napetost delimo z odpornostnim faktorjem T, ki ga proizvajalec poda v diagramu v odvisnosti od časa trajanja zemeljskega stika. Na podlagi tega faktorja, se nato izračuna največja obratovalna napetost (v času trajanja časne prenapetosti), da ne pride do termične porušitve odvodnika:

$$U_{mc} = \frac{U_c}{T} \quad [\text{kV}] \quad [4.14]$$

Nato se iz kataloga proizvajalca izbere odvodnik, kateremu ustreza ta napetost.

4.6 Nazivni odvodni tok odvodnika (Discharge Current)

Z definiranjem nazivnega odvodnega toka odvodnika, se odvodnike, po standardu IEC 60099-4, razvrsti v pet različnih razredov, ki so prikazani v Tabeli 4.3.

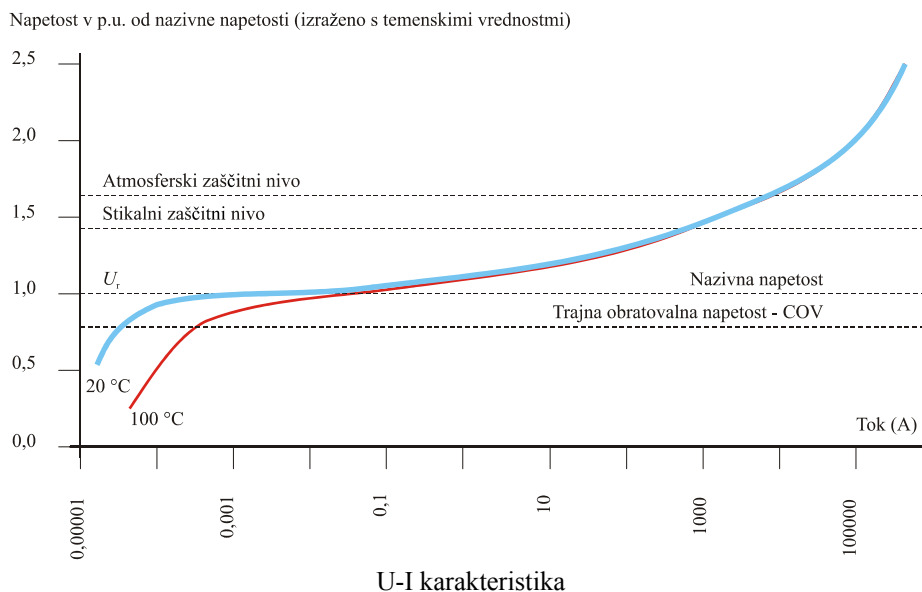
Nazivni tok [A]	1500	2500	5000	10.000	20.000
Nazivna napetost [kV]	v obdelavi	$U_r \leq 36$	$U_r \leq 132$	$3 \leq U_r \leq 360$	$360 \leq U_r \leq 756$

Tabela 4.3: Razvrstitev odvodnikov glede na nazivni odvodni tok po IEC 60099-4

Opozoriti je potrebno, da te vrednosti neposredno ne pokažejo nobenih obratovalnih karakteristik odvodnika. Npr., odvodnik z nazivnim odvodnim tokom 10 kA lahko brez težav zdrži tokovni impulz višje amplitude in to brez kakršnih koli poškodb. Osnovna naloga te razvrstitve je, da se določijo parametri za laboratorijsko preskušanje.

Za distribucijske odvodnike, ki imajo običajno nazivni odvodni tok 10 kA ali 5 kA, predstavlja nazivni odvodni tok resnično različno karakteristiko. Pri opravljanju preskusa obratovalne vzdržljivosti, je pri 5 kA odvodniku injicirana energija simulirana z dvema tokovnima udaroma s temensko vrednostjo 65 kA. Predhodno je potrebno odvodnik »segeti« z 20 tokovnimi udari s temensko vrednostjo 5 kA (nazivni odvodni tok). Pri 10 kA odvodniku pa se opravi preskus z dvema udaroma s temensko vrednostjo 100 kA, ki jima predhodi 20 tokovnih udarov s temensko vrednostjo 10 kA (nazivni odvodni tok). Ker so odvodniki, z nazivnim odvodnim tokom 10 kA, med preskusom bitveno bolj termično obremenjeni, morajo imeti ZnO bloki večji premer, kot je to pri odvodnikih s 5 kA odvodnim tokom. Zaradi stroškov kot so: razvoj, izdelava, skladiščenje odvodnikov, itd., ter majhne razlike v ceni 5 kA in 10 kA ZnO blokov, večina proizvajalcev izdeluje odvodnike samo z 10 kA nazivnim odvodnim tokom.

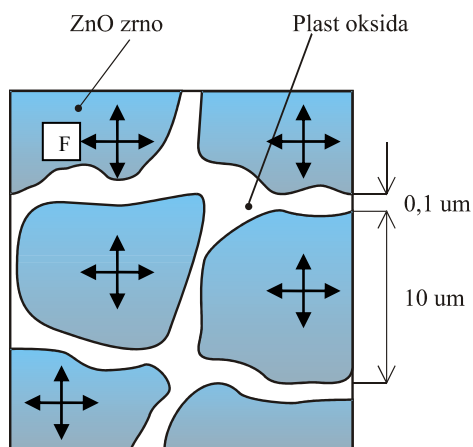
Zaščitni nivo odvodnika je definiran s preostalo napetostjo, ko skozi odvodnik teče nazivni odvodni tok. Vendar v praksi se lahko primeri, da je tok praznitve znatno večji od nazivnega, zato je tudi preostala napetost na odvodniku znatno višja. Kako velika bo preostala napetost na odvodniku, pa je odvisno samo od U - I karakteristike odvodnika.



Slika 4.4: U - I karakteristika odvodnika

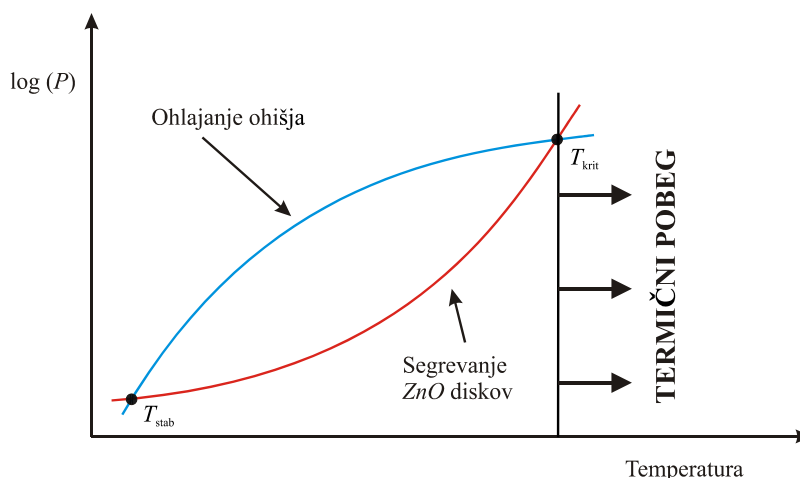
Za stabilno delovanje odvodnika ob normalnih obratovalnih pogojih (dovolj nizek uhajavi tok) in pri optimalnem zaščitnem nivoju odvodnika, je potrebno posvetiti posebno pozornost tudi energijski absorpciji odvodnika. Energijsko absorpcijo odvodnika se obravnava z dveh različnih vidikov.

Prvi vidik obravnava zmožnost absorpcije energije odvodnika pri posameznem tokovnem udaru (*Single Impulse Energy Absorption*). Odvodnik se termično preskusi tako, da se v odvodnik injicira tokovni impulz pravokotne oblike v trajanju 2 ms. Pri tem ne sme priti do termične nestabilnosti odvodnika. Sproščena energija v odvodniku povzroči ekstremen porast temperature in posledice tega so notranje raztezne in tlačne sile, ki lahko dosežejo zelo visoke vrednosti. Pri večjih tokovnih obremenitvah lahko te sile povzročijo drobne razpoke, v ekstremnih primerih pa celo zlom ZnO bloka. S tem preskusom se preverijo termične sposobnosti posameznega ZnO bloka.



Slika 4.5: Struktura ZnO bloka in sile, ki delujejo na ZnO zrna ob visokih temperaturah

Drugi vidik, ki se nanaša na energijsko sposobnost odvodnika (*Thermal Energy Absorption Capability*) pa ima popolnoma drug pomen. Ta definira največjo količino injicirane energije v odvodnik, pri kateri se še odvodnik ohladi na normalno delovno temperaturo. Slika 4.6 prikazuje neproporcionalno naraščanje električnih izgub ($\log P$) v odvisnosti od temperature. Po drugi strani pa lahko odvodnik skozi ohišje odda v okolico le omejeno količino energije. Res je, da tudi ta prenos toplote narašča z naraščanjem temperature, vendar je bistveno počasnejši od naraščanja električnih izgub. Kot je razvidno, se obe krivulji sekata v dveh točkah. V levi točki (T_{stab}) se vsa proizvedena toplota v odvodniku brez težav prenese v okolico, zato tej točki rečemo stabilno delovanje odvodnika. V trenutku, ko pride do razelektritve in s tem do dodatnega sproščanja energije v odvodniku, prične temperatura v odvodniku naraščati. Ohišje odvodnika je sposobno oddati dodatno proizvedeno toploto v okolico vse do točke T_{krit} . Ko pa temperatura odvodnika doseže točko T_{krit} , pa ohišje odvodnika ni več sposobno oddati takšne količine toplote v okolico. Zato pride do nestabilnega delovanja oz. do termičnega pobega odvodnika (uničenja).



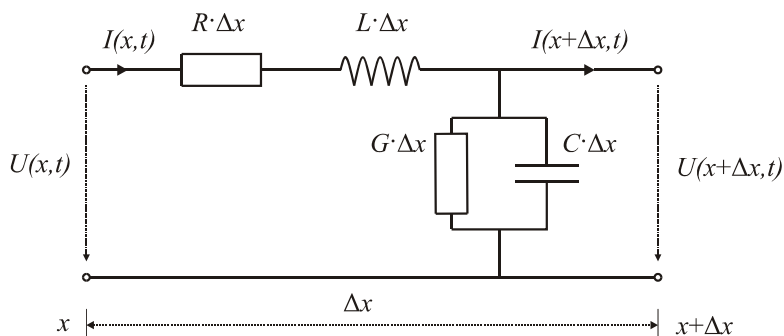
Slika 4.6: Termične razmere v ZnO odvodniku

Realna meja termične stabilnosti odvodnika je odvisna od konstrukcije odvodnika. Običajno se ta giblje med 170 in 200 °C.

Standard IEC 60099-4 ta dva vidika ne obravnava, temveč obravnava kriterij *razred praznitve voda* (*Line Discharge Class*) in ta pove, koliko energije je odvodnik sposoben absorbirati.

4.7 Izbira razreda praznitve voda (Line Discharge Class)

Razred praznitve voda dejansko določa karakteristiko odvodnika in je edina prava informacija, ki specificira sposobnost absorpcije energije odvodnika v skladu s standardom IEC 60099-4. Povezava med razredom praznitve voda in sposobnostjo absorpcije energije, je za razumevanje relativno zapletena. Definicija razreda praznitve dolgega voda temelji na predpostavki, da se dolgi vod, ki je nabit z elektrino zaradi stikalne manipulacije, sprazni preko odvodnika. Dolgi vod razdelimo na elementarne dele dolžine Δx . Nadomestno vezje dela voda je prikazano na Sliki 4.7, kjer predstavljajo parametri R , G , L in C upornost, prevodnost, induktivnost in kapacitivnost na enoto dolžine.



Slika 4.7: Nadomestno vezje dela voda

Po vodu teče nek tok I , ki je definiran z napetostjo U in z valovno impedanco voda Z . Idealno gledano, je oblika toka pravokotne oblike. Da se lahko določi razred praznitve voda odvodnika, je potrebno v laboratoriju simulirati ta proces. To se izvede s pomočjo tokovnega generatorja in nadomestnega vezja, ki je sestavljeno iz 20 do 30 elementov (serijskih dušilk in paralelno vezanih kondenzatorjev).

Standard IEC 60099-4 definira pet različnih razredov praznitve voda in sicer z naraščanjem obremenitev od 1 do 5. V Tabeli 4.4 so prikazane osnovne zahteve za izvedbo preskusa v laboratoriju (U_r je nazivna napetost odvodnika v r.m.s.).

Nazivni odvodni tok odvodnika [kA]	Razred praznitve voda	Valovna impedanca voda $Z [\Omega]$	Trajanje tokovnega vala pravokotne oblike $T [\mu s]$	Polnilna napetost U_L d.c. [kV]
10	1	$4,9 \cdot U_r$	2000	$3,2 \cdot U_r$
10	2	$2,4 \cdot U_r$	2000	$3,2 \cdot U_r$
10	3	$1,3 \cdot U_r$	2400	$2,8 \cdot U_r$
20	4	$0,8 \cdot U_r$	2800	$2,6 \cdot U_r$
20	5	$0,5 \cdot U_r$	3200	$2,4 \cdot U_r$

Tabela 4.4: Parametri za izvedbo preskusa praznitve dolgega voda

Iz preskusa praznitve dolgega voda pa ni možno neposredno ugotoviti, kako velika je bila energijska obremenitev odvodnika. To energijo se izračuna po naslednji enačbi:

$$W = U_p \cdot (U_L - U_p) \cdot \frac{1}{Z} \cdot t \quad [\text{kJ}] \quad (4.15)$$

ali

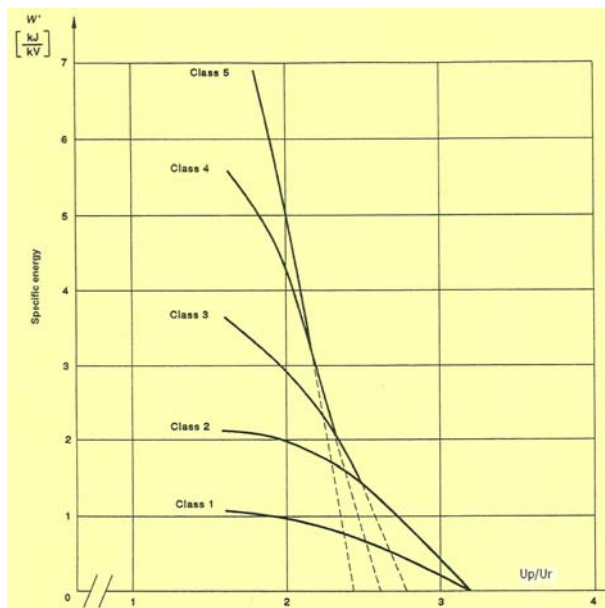
$$W' = \frac{U_p}{U_r} \left[\frac{U_L}{U_r} - \frac{U_p}{U_r} \right] \cdot \frac{U_r}{Z} \cdot t \quad [\text{kJ/kV}] \quad (4.16)$$

kjer je:

- $\Rightarrow U_p$ je izmerjena preostala napetost na odvodniku,
- $\Rightarrow U_L$ je enosmerna polnilna napetost,
- $\Rightarrow U_r$ je nazivna napetost odvodnika,
- $\Rightarrow W$ je absorbirana energija v odvodniku v kJ in
- $\Rightarrow W'$ je specifična absorbirana energija v odvodniku podana na enoto nazivne napetosti odvodnika.

Standard IEC 60099-4 navaja diagram (Slika 4.8), v katerem je prikazana specifična absorbirana energija v odvodniku v odvisnosti od nazivne napetosti odvodnika. Absorbirana energija v odvodniku

pa ni konstantna, temveč je odvisna od preostale napetosti odvodnika U_p . Višja ko je ta napetost, nižja je absorbirana energija v odvodniku.



Slika 4.8: Diagram specifične energije za nazivno napetost v odvisnosti od preostale napetosti odvodnika

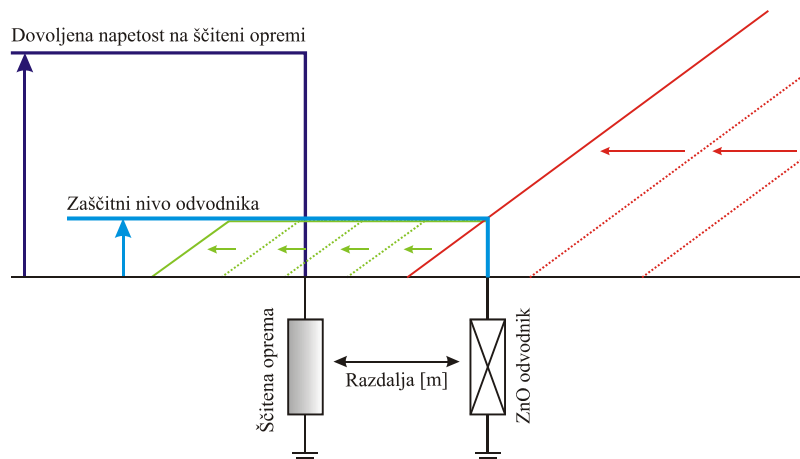
Iz diagrama, v katerem je prikazan razred praznitve voda odvodnika, se lahko enostavno ugotovi koliko energije je odvodnik sposoben absorbirati. Če je za odvodnik podana neka vrednost specifične absorpcije energije, potem lahko odvodniku (odvisno od njegove preostale napetosti U_p) določimo različen razred praznitve voda. Npr. odvodnik, ki je sposoben absorbirati energijo $W' = 2 \text{ kJ/kV}$, ima razred praznitve 2 pri razmerju $U_p/U_r = 2$. Toda istemu odvodniku pripada razred praznitve voda 3 pri razmerju $U_p/U_r = 2,35$. Navidezno "boljši" odvodnik z razredom praznitve voda 3, je lahko v resnici slabša izbira, ker je zaradi višje preostale napetosti njegov zaščitni nivo višji. Če se želi doseči razred praznitve voda 3 in ohraniti isto razmerje $U_p/U_r = 2$ (enak zaščitni nivo), je potrebno uporabiti odvodnik, ki je sposoben večje absorpcije energije. Iz diagrama se izbere, da je to odvodnik z vrednostjo $W' = 3 \text{ kJ/kV}$. Fizično to pomeni, da je potrebno izbrati večji radij ZnO blokov.

4.8 Zaščitna cona odvodnika (Protective Distance)

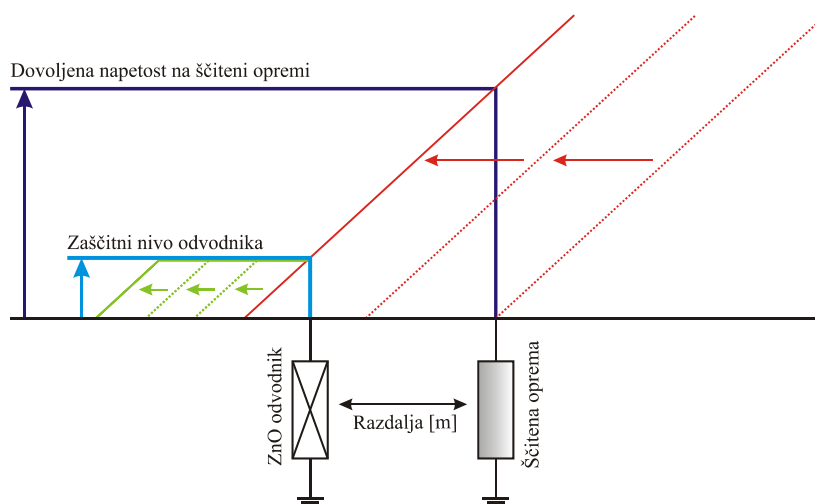
Potujoči val lahko opazujemo v točki voda kot funkcijo časa. Hitrost potujočega vala je za nadzemni vod $300 \text{ m/}\mu\text{s}$, med tem ko je za kablovod hitrost frekvenčno odvisna. Ta se giblje od 150 do $230 \text{ m/}\mu\text{s}$. To pomeni, da je za standardizirani udarni val z obliko $1,2/50 \mu\text{s}$, čelo udarnega vala dolgo od 180 do 360 m .

Predpostavimo, da val potuje po neskončno dolgem vodu s **konstantno valovno impedanco** (idealni primer), zato ni napetostnih odbojev. Sledita dve možnosti:

- ⇒ Val naleti najprej na odvodnik in nato na ščiteno opremo (Slika 4.9) in
- ⇒ Val naleti najprej na ščiteno opremo in nato odvodnik (Slika 4.10).



Slika 4.9: Odvodnik pred ščiteno opremo



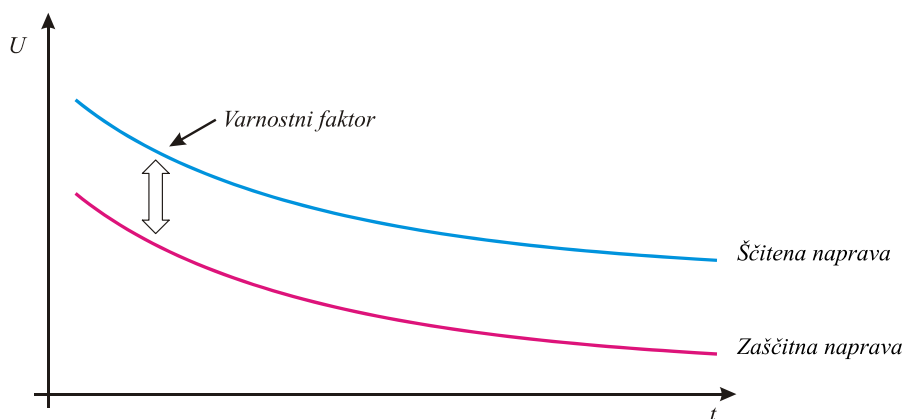
Slika 4.10: Odvodnik za ščiteno opremo

V prvem primeru je razdalja med odvodnikom in ščiteno opremo lahko poljubno dolga, v drugem pa je ta razdalja določena s strmino udarnega vala, zdržno napetostjo na ščiteni opremi in zaščitnim nivojem prenapetostnega odvodnika.

Realne razmere so bolj kompleksne, saj je potrebno v izračunu zaščitne cone odvodnika upoštevati veličine, ki vplivajo na zmanjšanje zaščitne cone prenapetostnega odvodnika. Vzroki za zmanjšanje zaščitne cone odvodnika so v:

- ⇒ odbojih zaradi sprememb valovnih impedanc ter vgrajene opreme (R , L in C) in
- ⇒ možnih višjih strminah udarnih valov.

Bolj ko osnovni izolacijski nivo (BIL) presega zaščitni nivo odvodnika, učinkoviteje je ščitena izolacija naprav pred atmosferskimi prenapetostmi. Sodobni odvodniki z zaščitnim nivojem $U_p = 3,33 \cdot U_C$ in pod to vrednostjo, lahko vzdržujejo $U_p \leq 4$ p.u., celo takrat, ko so nameščeni v omrežje, ki ima nevtralno točko izolirano. Za električno opremo, ki je izpostavljena atmosferskim prenapetostim predpisuje standard IEC 60071-1 osnovni izolacijski nivo, ki je podan v Tabeli 4.5. Prav tako za srednjenapetostna omrežja omenjeni standard predpisuje minimalno razmerje med osnovnim izolacijskim nivojem (BIL) in zaščitnim nivojem odvodnika, ki naj bo $U_{BIL} > 1,4 \cdot U_p$ in se imenuje varnostni faktor, ki je simbolno prikazan na Sliki 4.11.

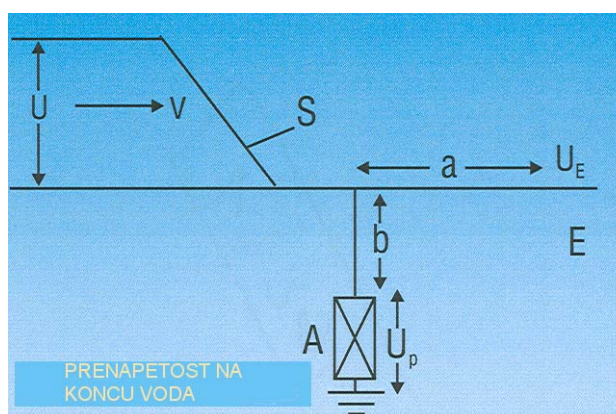


Slika 4.11: Varnostni faktor

Najvišja napetost opreme [kV]	Osnovni izolacijski nivo BIL [kV]	Zaščitni nivo odvodnika U_p [kV]	Razmerje med osnovnim izolacijskim nivojem in zaščitnim nivojem odvodnika BIL/U_p
3,6	40	12	3,33
7,2	60	24	2,5
12	75	40	1,88
17,5	95	58,3	1,63
24	125	79,9	1,56
36	170	119,9	1,42

Tabela 4.5: Varnostni faktor za napetost omrežja do 36 kV (ABB)

Varnostni faktor 1,4 je dobljen matematično in upošteva tudi odboje prenapetosti, do katerih pride zaradi sprememb valovnih impedanc. Če je razdalja med odvodnikom in ščiteno opremo prevelika, lahko v določenih primerih te prenapetosti presežejo zaščitni nivo odvodnika. Pod zaščitno cono odvodnika L se razume največjo razdaljo med odvodnikom in ščiteno opremo, pri kateri odvodnik še zagotavlja zadostno prenapetostno zaščito.



Slika 4.12: Potovanje prenapetostnega vala po vodu

- $\Rightarrow U$ amplituda prenapetostnega vala,
- $\Rightarrow s$ strmina čela prenapetostnega vala,
- $\Rightarrow v$ hitrost potovanja prenapetostnega vala ($300 \text{ m}/\mu\text{s}$),
- $\Rightarrow A$ prenapetostni odvodnik,
- $\Rightarrow U_p$ zaščitni nivo odvodnika, (preostala napetost na odvodniku),

- ⇒ a in b dolžina priključnih vodnikov med odvodnikom in ščiteno opremo,
- ⇒ E konec voda,
- ⇒ U_E prenapetost na koncu voda.

Na Sliki 4.12 je prikazano potovanje prenapetostnega vala po nadzemnem vodu proti točki E , v kateri je priključen bodisi transformator ali pa je vod odprt. Ker je vod zaključen z visoko ohmsko impedanco, se v točki E prenapetostni val odbije z dvojno vrednostjo. Če predpostavimo, da je strmina čela prihajajočega vala konstantna, potem lahko zapišemo enačbo:

$$U_E = U_P + \frac{2 \cdot s \cdot (a + b)}{v} \quad [\text{kV}] \quad (4.17)$$

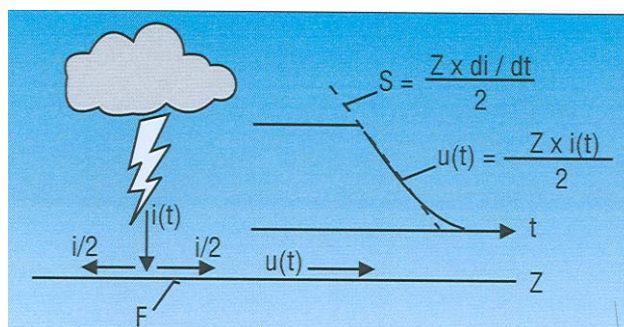
Dosedanje izkušnje so pokazale, da je vrednost varnostnega faktorja 1,2 več kot dovolj. Potem velja:

$$\frac{BIL}{1,2} \geq U_E = U_P + \frac{2 \cdot s \cdot (a + b)}{v} \quad [\text{kV}] \quad (4.18)$$

Če zapišemo, da je $L = a + b$, velja:

$$L = \frac{v}{2 \cdot s} \cdot \left[\frac{BIL}{1,2} - U_P \right] \quad [\text{kV}] \quad (4.19)$$

Če je vsota priključnih vodnikov $a + b$ manjša od zaščitne cone prenapetostnega odvodnika, potem je izolacija naprave v točki E učinkovito ščitena. Da se lahko izračuna zaščitna cona odvodnika, je potrebno poznati strmino čela prenapetostnega vala.



Slika 4.13: Udar strele

Na Sliki 4.13 je prikazan udar strele s tokom $i(t)$ v fazni vodnik SN voda. Na mestu udara strele se tok razdeli v obe smeri z amplitudo $i/2$. Nadzemni vodnik ima gledano proti zemlji neko valovno impedanco Z , s katero tok udara strele generira atmosfersko prenapetost $u(t)$ z določeno strmino čela $s(t)$. Iz slike je razvidno, da strmina čela s ni konstantna, temveč se spreminja s časom. V 10% vseh udarov strel lahko strmina čela udarnega vala doseže vrednost tudi do 32 kA/μs ali pa celo več. Za SN vod z valovno upornostjo $Z = 450 \Omega$, bi tak udar povzročil prenapetostni val s strmino $s \geq 7200 \text{ kV}/\mu\text{s}$. Tako veliko strmino udarnega vala pa lahko pričakujemo v TP (transformatorski postaji) samo, če gre za bližnji udar. Prenapetosti, ki jih povzročijo oddaljeni udari strel, pa v TP nimajo tako velikih strmin. Vzrok je v koroni, ki pri potovanju udarnega vala »obrusi« tako strmino vala, kakor tudi njegovo amplitudo. Kako velika bo strmina oddaljenega udara na nekem mestu pa opisuje naslednja enačba:

$$s = \frac{1}{\frac{1}{s_0} + K \cdot d} \quad [\text{kV}/\mu\text{s}] \quad (4.20)$$

kjer je:

- ⇒ K je faktor, ki je odvisen od geometrije SN voda. Njegova običajna vrednost je $5 \cdot 10^{-6} \mu\text{s/kVm}$,
- ⇒ d je oddaljenost udara strele od TP-ja in
- ⇒ s_0 je strmina čela udarnega vala na mestu udara strele.

Tako se lahko izračuna, da udar strele, ki je oddaljen $d \leq 135$ m od RTP povzroči strmino čela udarnega vala $s \geq 1500$ kV/ μs s katero je obremenjena izolacija električnih naprav. Potek prenapetosti je časovno odvisen s parabolično obliko, kar opisuje naslednja enačba:

$$u(t) = \frac{t^2 \cdot s^2}{4 \cdot U} \quad [\text{kV}] \quad (4.21)$$

Enačba 4.18 je definirana za časovni interval $0 \leq t \leq 2 \cdot U/s$. Na podlagi tega se lahko izračuna tok, ki bo stekel skozi odvodnik:

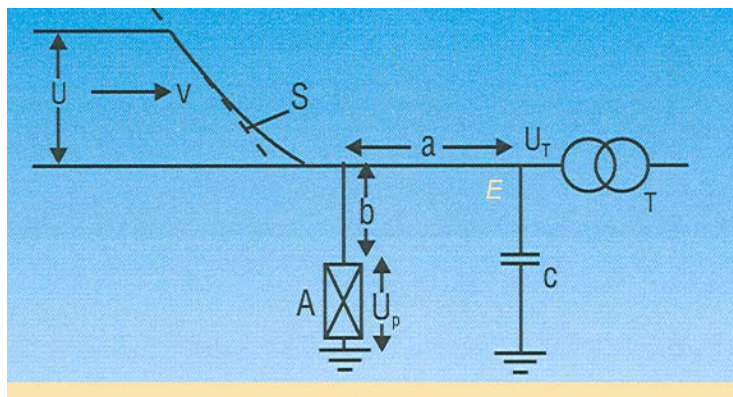
$$i = \frac{2 \cdot U - U_p}{Z} \quad [\text{A}] \quad (4.22)$$

kjer je:

- ⇒ U amplituda udarnega vala,
- ⇒ s strmina udarnega vala,
- ⇒ U_p zaščitni nivo odvodnika in
- ⇒ Z valovna impedanca.

4.9 Vpliv vgrajene opreme na zaščitno cono odvodnika

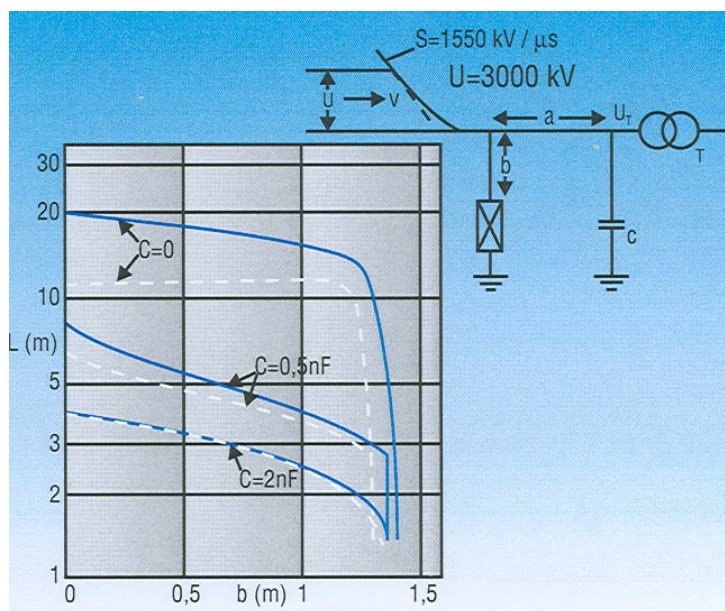
Električna oprema, ki je vgrajena v SN omrežje, lahko s svojimi električnimi lastnostmi bistveno vpliva na dolžino zaščitne cone odvodnika. Tipičen primer je transformator z neko dozemno kapacitivnostjo (0,5 do 2 nF), kot prikazuje Slika 4.14.



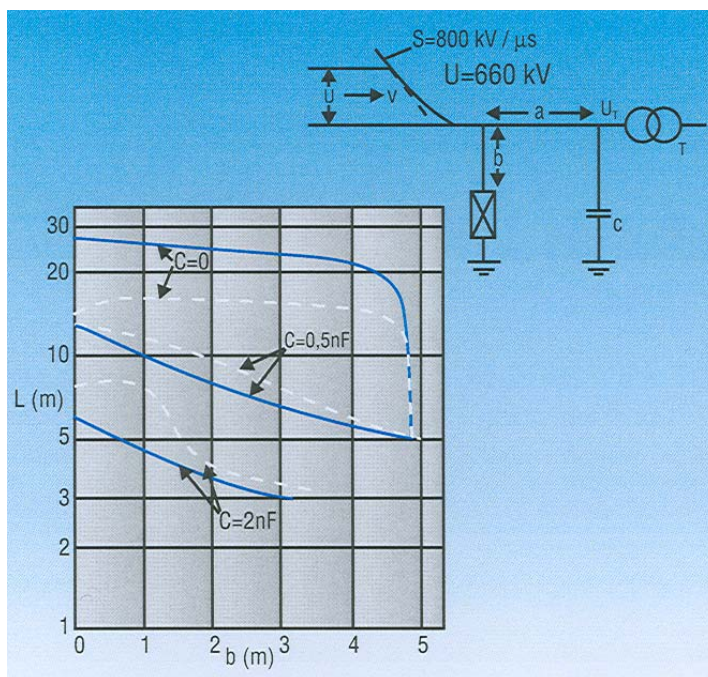
Slika 4.14: Vpliv transformatorja na zaščitno cono

- ⇒ U amplituda prenapetostnega vala,
- ⇒ s strmina čela prenapetostnega vala,
- ⇒ v hitrost potovanja prenapetostnega vala (300 m/ μs),
- ⇒ A prenapetostni odvodnik,
- ⇒ U_p zaščitni nivo odvodnika,
- ⇒ a in b dolžina priključnih vodnikov med odvodnikom in ščiteno opremo,
- ⇒ E konec voda,
- ⇒ C kapacitivnost VN navitja transformatorja proti zemlji in
- ⇒ U_T prenapetost na transformatorju.

Kapacitivnost transformatorja povzroča napetostne oscilacije na odseku a in b . Posledica tega so povišane prenapetosti na priključnih sponkah transformatorja. Večja, ko je kapacitivnost transformatorja, višje so oscilacije. Zaradi teh oscilacij je potrebno zmanjšati razdaljo med odvodnikom in transformatorjem. Na Sliki 4.15 (a in b) je za SN distribucijsko omrežje z $U_m=24$ kV prikazano, kako vpliva kapacitivnost transformatorja na dolžino zaščitne cone odvodnika. Razvidno je, da z naraščanjem kapacitivnosti transformatorja znatno pada dolžina zaščitne cone odvodnika. Na dolžino zaščitne cone odvodnika ima velik vpliv tudi dolžina priključka odvodnika. Iz primerjave Slik 4.15 a in 4.15 b je razvidno, da je dolžina zaščitne cone pri SN vodih s kovinskimi stebri bistveno daljša. Vzrok za to je v nižji strmini udarnega vala, ki lahko doseže vrednosti do $800 \text{ kV}/\mu\text{s}$ in pa v nižjih temenskih vrednostih; tja do 650 kV . Pri SN vodih z lesenimi drogovi pa strmine udarnih valov dosegajo bistveno višje vrednosti $s = 1500 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ter višje temenske vrednosti udarnih valov, tudi do 3000 kV . Za SN omrežja z $U_m = 12 \text{ kV}$ velja, da so zaščitne cone odvodnikov približno 10 % daljše, kot so prikazane na Sliki 4.15 a in b, za SN omrežja z $U_m = 36 \text{ kV}$ pa velja, da so zaščitne cone v primerjavi z omrežjem z $U_m = 24 \text{ kV}$ za 30 % krajše. Na dolžino zaščitne cone prav tako vpliva tudi polariteta udarnega vala in pa trenutna vrednost fazne napetosti. Zato si je potrebno prizadevati, da je razdalja $a + b$ kar se da kratka in L kar se da daljši. V tem primeru bo verjetnost nastanka poškodbe izolacije ščitene naprave najmanjša. V primeru, da je $b = 0$, postane zaščitna cona odvodnika L največja.

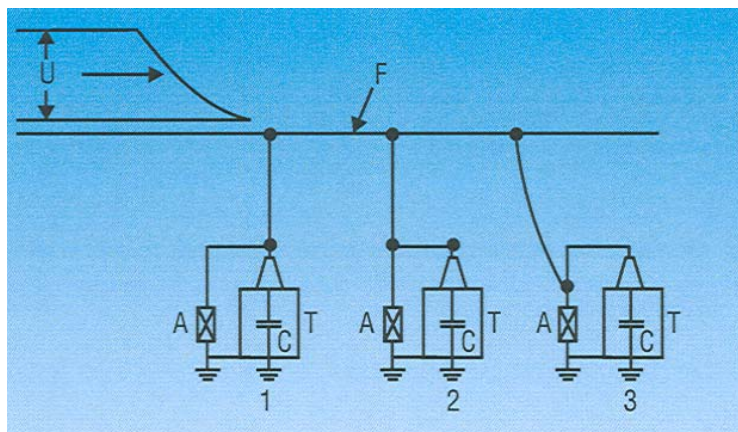


Slika 4.15 a: Vpliv kapacitivnosti tr. na zaščitno cono odvodnika za omrežje z lesenimi drogovi



Slika 4.15 b: Vpliv kapacitivnosti tr. na zaščitno cono odvodnika za omrežje s kovinskimi stebri

Na Sliki 4.16 so prikazani trije najpogostejši načini namestitve prenapetostnega odvodnika, ki ščiti izolacijo distribucijskega transformatorja. Primer »1« prikazuje slabo izvedbo prenapetostne zaščite, saj so povezave med odvodnikom in navitjem transformatorja nedopustno predolge. Primer »2« prikazuje boljšo izvedbo, med tem ko primer »3« prikazuje optimalno izvedbo povezav med odvodnikom in transformatorjem.

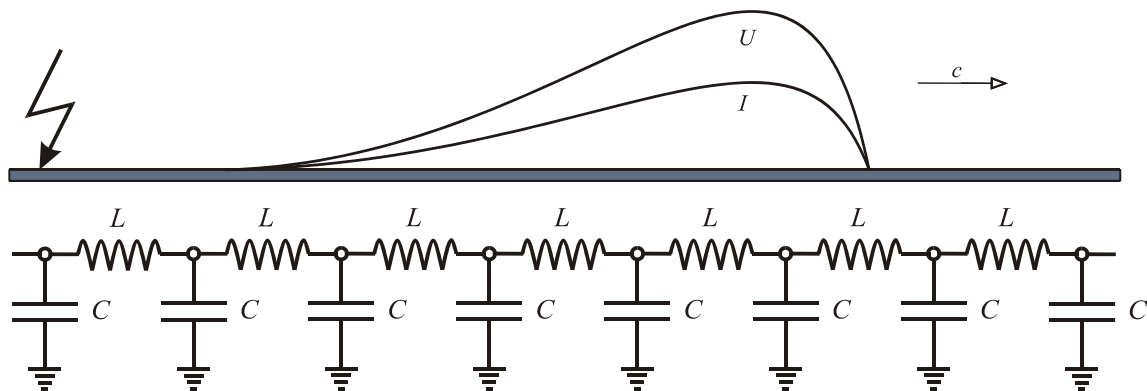


Slika 4.16: Primeri izvedbe povezav med faznim vodnikom tr. in odvodnikom

4.10 Zaščitna cona odvodnika pri prenapetostni zaščiti kablovodov

Bistvena razlika med zračnim vodom in kablovodom je v valovni impedanci vodnikov. Za zračni vod velja, da se vrednosti valovnih impedanc gibljejo med $Z = 300$ do 450Ω , med tem ko so pri kablovodu med $Z = 20$ do 60Ω .

Vod brez izgub lahko predstavimo kot serijo LC elementov. Potujoči napetostni val U potuje po vodu in preko induktivnosti L polni in prazni kondenzatorje v posameznih točkah modela voda. Po vodniku teče nek tok I , ki je v vsakem trenutku soracionalen napetosti (Slika 4.17)



Slika 4.17 : Potovanje valov po vodu

Konstanto proporcionalnosti imenujemo valovno impedanco Z in je razmerje med napetostjo in tokom kot je prikazano v enačbi:

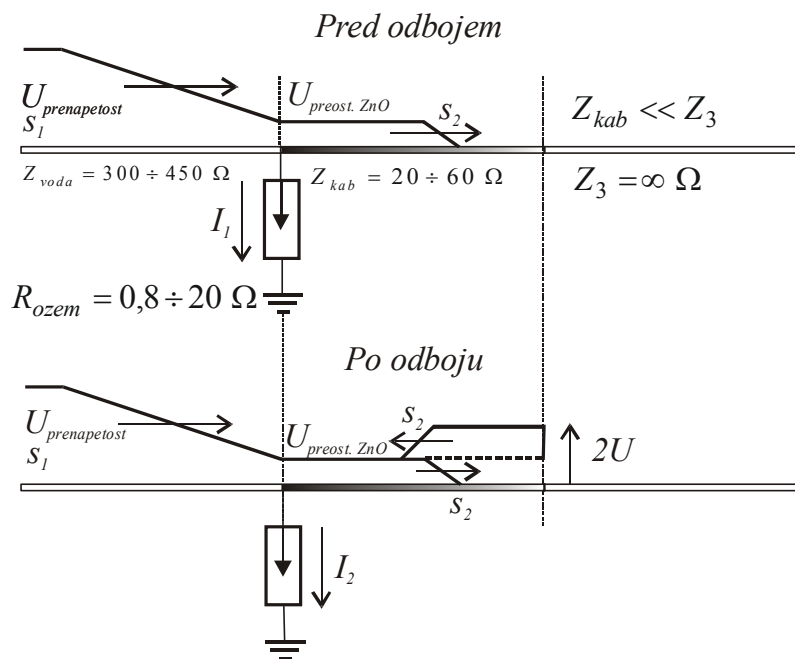
$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{\frac{L}{C}} = [\Omega] \quad (4.23)$$

kjer je:

- $\Rightarrow L$ induktivnost voda na enoto dolžine in
- $\Rightarrow C$ kapacitivnost voda na enoto dolžine.

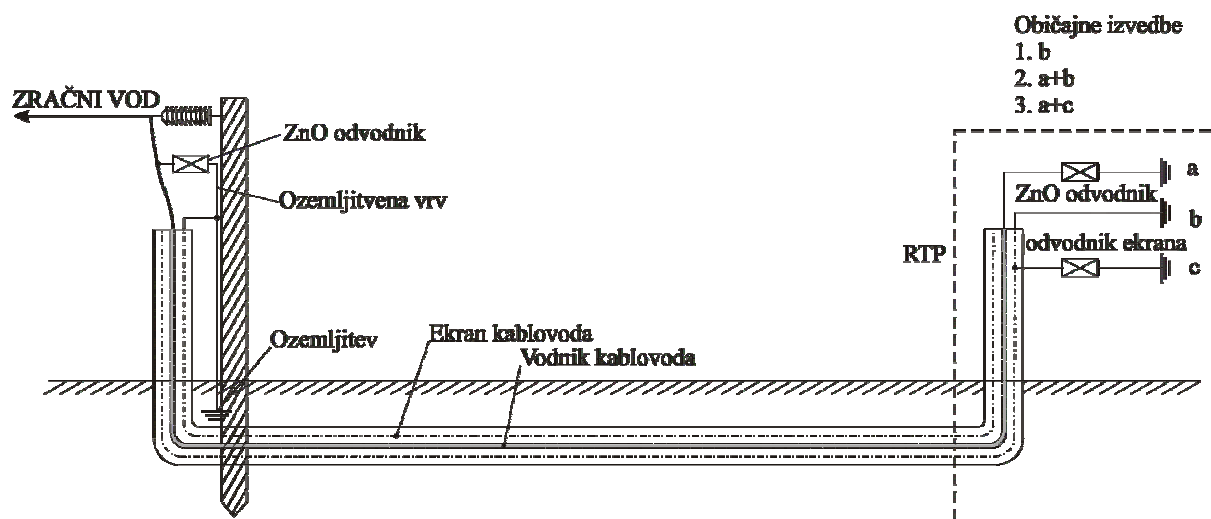
Za vod brez izgub ima impedanca Z realno vrednost. Napetostni in tokovni val potujeta vzdolž voda. Oblika napetosti in toka ostaneta nespremenjeni toliko časa, dokler se ne spremenijo parametri voda. Ko potojoči val naleti na točko, v kateri se spremeni valovna impedanca, se del napetostnega vala in toka odbije nazaj, preostali del pa potuje naprej.

Spremembo valovne impedance povzroči prehod nadzemnega voda v kablovod, odcep enega ali več vodov, paralelno priključen element (instrumentni tr., odvodnik, energetska transformator, itd.), odprta sponka (izklopljen odklopnik), itd. Vsaka sprememba valovne impedance Z na vodu povzroči, da iz enega vala nastaneta dva (odbiti in napredujoči), ki slej ko prej naletita na novo spremembo, novo razcepitev (podvojitev) vala itn. Kmalu dobimo množico valov, ki potujejo vse vprek in v vseh smereh. Vsak val, ki se v nekem trenutku pojavi na določenem mestu, prispeva k višini napetosti na tem mestu, zato postaja analiza prenapetosti v nekem analiziranem vezju ali sistemu zelo zapletena. Velja opozoriti, da se elementi v realnih razmerah ne obnašajo enostavno kot upornosti, temveč kot zapleteni sistemi, ki jih ponazorimo z nadomestnimi vezji. Posebna primera zaključitve voda ali kablovoda z upornostjo sta mejni vrednosti ko je $R = 0$ (kratek stik) in $R = \infty$ (odprta sponka). Izjemni primer imamo, če je kablovod v postroju odprt (odprt odklopnik). To pomeni, da tok I ne more teči, zato se tokovni val odbije z nasprotno polariteto, med tem ko ima odbiti napetostni val enako polariteto. Tako pride do znanega pojava podvojitve napetosti na koncu voda, kot je prikazano na Sliki 4.18.



Slika 4.18: Potovanje prenapetostnega vala v točki spremembe valovne impedance

Med tem ko v zračno izoliranih postrojih napetostni preskok z zbiralk ali faznega vodnika na potencial zemlje običajno predstavlja manjšo motnjo za sistem (tudi poškodbe vgrajene opreme so redke), pa preskok preko izolacije kablovoda običajno povzroči izpad kablovoda in zahteva njegovo popravilo. Kablovod se tretira kot oprema postroja, ki jo je potrebno ščititi s prenapetostnimi odvodniki. Prenapetostni odvodniki se namestijo neposredno h kabelski glavi. Povezave morajo biti čim krajše. Pri tem je potrebno opozoriti, da je ozemljitveni priključek odvodnika povezan s plaščem kablovoda. Če zaščitna cona odvodnika pokrije celotno dolžino kablovoda, potem zadošča, da se namesti odvodnik samo na eni strani. Če pa je kablovod daljši od zaščitne cone odvodnika, je potrebno prenapetostni odvodnik namestiti na obe strani kablovoda.



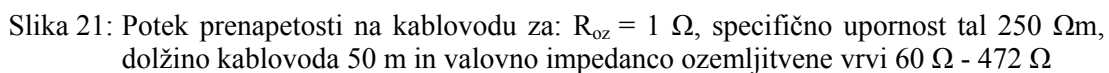
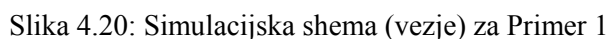
Slika 4.19: Shematski prikaz različnih izvedb prenapetostne zaščite kablovoda v TP

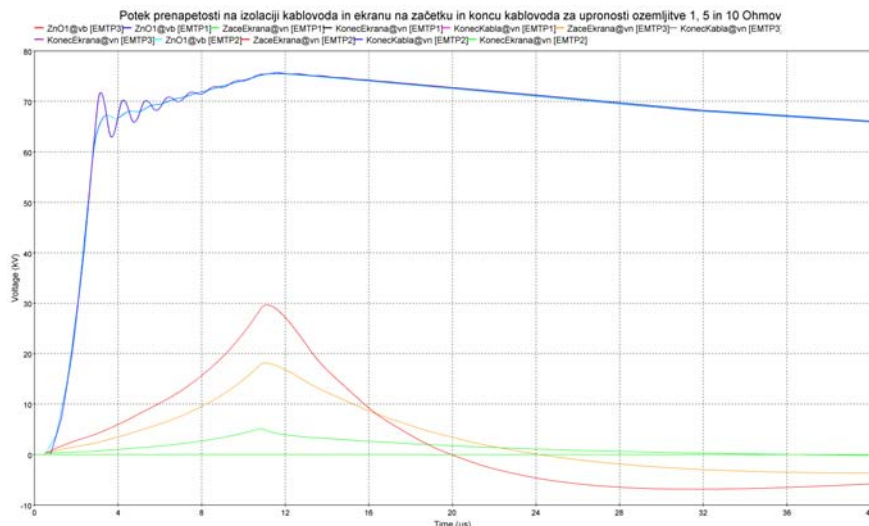
Na Sliki 4.19 je shematsko prikazana izvedba prenapetostne zaščite na koncu kablovoda v TP. Možnih je več variant in sicer:

⇒ brez odvodnika z ozemljenim ekranom (primer 1),

- Za Primer 1, ki se smatra z vidika prenapetostnih obremenitev kablovoda kot najbolj neugoden primer, so bile na simulacijskem modelu opravljene simulacije prenapetosti. Analizirane so bile prenapetosti, ki se pojavijo na izolaciji med vodnikom kablovoda in ekranom ter med ekranom in plaščem kablovoda. Med posameznimi simulacijami so se spreminjale naslednje veličine:

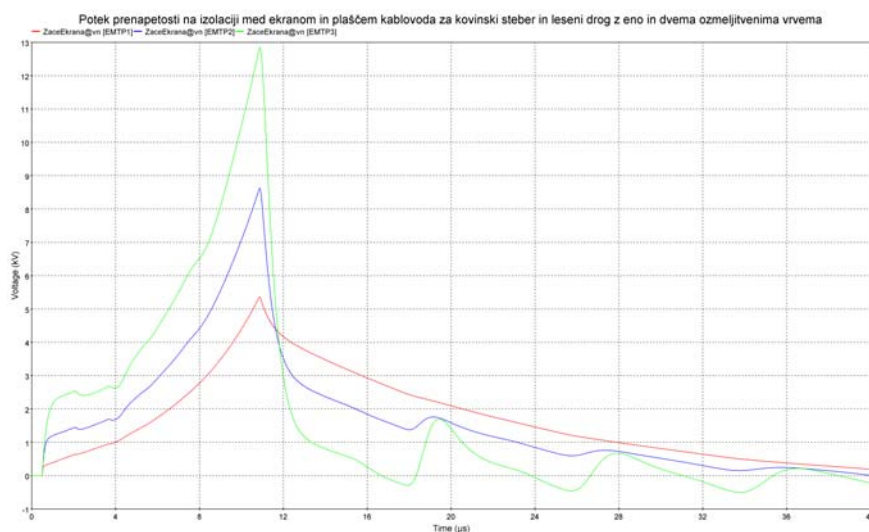
- ### Analiza prenapetostnih razmer za Primer 1





Slika 22: Potek prenapetosti na izolaciji kablovoda in ekranu za: $R_{oz}=1\ \Omega$, $5\ \Omega$ in $10\ \Omega$, pri specifični upornosti tal $250\ \Omega m$, dolžini kablovoda $50\ m$ in valovni impedanci kovinskega stebra $60\ \Omega$

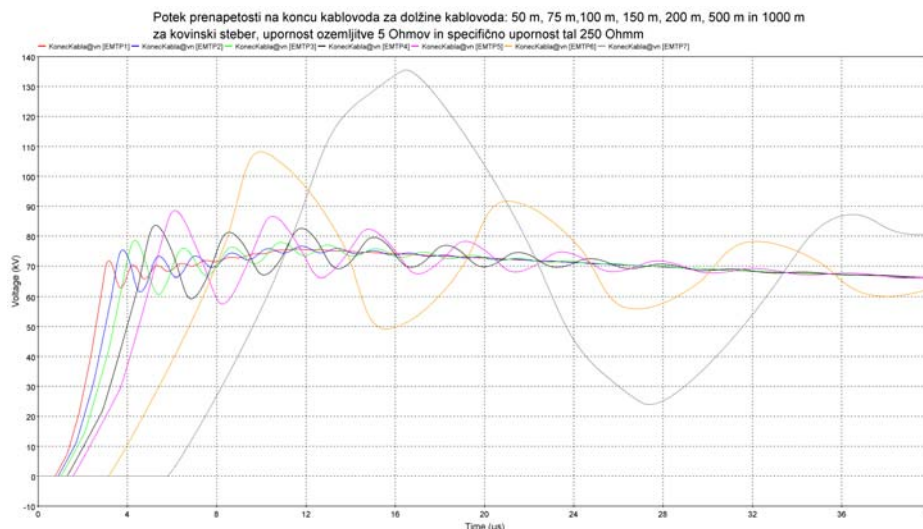
Na Sliki 22 je lepo razvidno, da upornost ozemljitve nima vpliva na zaščitni nivo odvodnika, ima pa velik vpliv na izolacijo med ekranom in plaščem kablovoda. Potek prenapetosti na izolaciji med ekranom in plaščem kablovoda v odvisnosti od upornosti ozemljitve prikazujejo: zelena, oranžna in rdeča krivulja.



Slika 23: Potek prenapetosti na izolaciji med ekranom in plaščem kablovoda pri: $R_{oz}=5\ \Omega$, pri specifični upornosti tal $250\ \Omega m$, dolžini kablovoda $150\ m$ za kovinski stebel ($60\ \Omega$) in leseni drog z eno ali dvema ozemljitvenima vrvema ($472\ \Omega$ in $236\ \Omega$)

Na podlagi rezultatov razvidnih iz Slike 23 je bilo ugotovljeno, da so pri enakih vrednostih upornosti ozemljitve (npr. $5\ \Omega$) dosežene ugodnejše prenapetostne razmere na izolaciji med ekranom in plaščem kablovoda pri kovinskem stebri v primerjavi z lesenim drogom. Vzrok temu je bistveno nižja valovna impedanca kovinskega stebra ($60\ \Omega$, rdeča krivulja) v primerjavi z lesenim drogom, kjer je ozemljitvena povezava med odvodnikom in ozemljilom izvedena z ozemljitveno vrvjo. Ta ima valovno impedanco približno $470\ \Omega$ (zelena krivulja). Za znižanje te vrednosti se predlaga, da se v primeru lesenega droga povezave izvedejo z dvema ozemljitvenima vrvema, ki sta do ozemljitve

speljani diametralno. S tem se pridobi na geometrijskem volumnu. Na ta način se vrednost valovne impedance prepolovi na prib. 235Ω (modra krivulja).



Slika 24: Potek prenapetosti na koncu kablovoda (RTP) za različne dolžine kablovoda: 50, 75, 100, 150, 200, 500 in 1000 m pri $R_{oz} = 5 \Omega$, pri specifični upornosti tal $250 \Omega m$ in valovno impedanco kovinskega stebra 60Ω

Na Sliki 24 pa je prikazan potek prenapetosti na koncu kablovoda (v RTP) v odvisnosti od dolžine kablovoda. Lepo je razvidno, da se s povečevanjem dolžine kablovoda bistveno slabšajo napetostne razmere na koncu kablovoda oz. manjša vpliv zaščitne cone odvodnika, ki je nameščen v točki prehoda zračni vod-kablovod. Za dani primer je izolacija kablovoda učinkovito ščitena še pri dolžini kablovoda $l = 200 m$.

Rezultati simulacij so pokazali, da je potrebno stremeti k doseganju čim nižjih vrednosti upornosti ozemljitve. V Tehničnih predpisih je predpisana največja dopustna vrednost ozemljitve na 5Ω , kar pa je npr. na kraškem terenu zelo težko dosegljivo. V takih primerih naj ta ne presega vrednosti 10Ω . Pri modeliranju hitrih prehodnih pojavov, je potrebno opozoriti, da se ozemljilo vede popolnoma drugače, saj je potrebno upoštevati tudi ionizacijo tal in induktivnost samega ozemljila.

Daljši kablovodi zahtevajo namestitev odvodnika na obeh koncih kablovoda. Kablovodi, ki so na eni strani priključeni na zračni vod, na drugi strani pa v RTP, so pogosto izpostavljeni atmosferskim prenapetostim, ki so posledica udara v zračni vod. Zato je potrebno na prehodu zračni vod-kablovod namestiti prenapetostni odvodnik. Na drugi strani kablovoda (RTP) ni potrebno namestiti odvodnika vse dotle, dokler niso presežene vrednosti kritičnih dolžin zaščitne cone L_k .

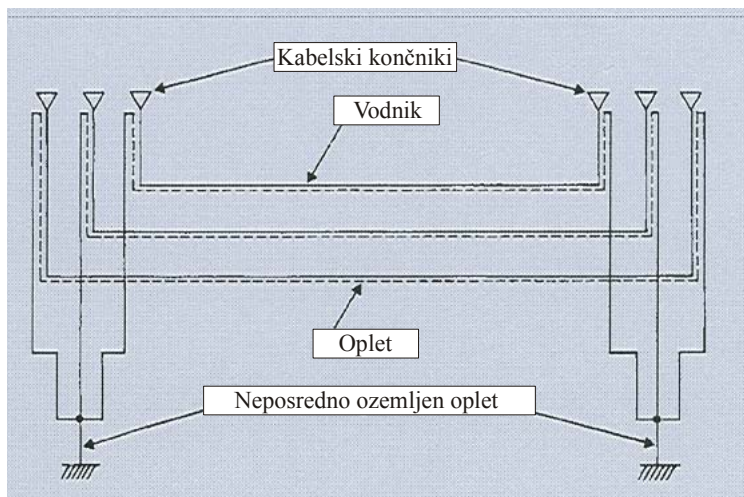
Kablovodi, ki so del nadzemnega voda (razna križanja cest, itd.), so tudi izpostavljeni atmosferskim prenapetostim. Ker je izolacija kablovoda ogrožena z obeh strani, je potrebno namestiti prenapetostne odvodnike na obe strani kablovoda.

4.11 Ozemljevanje in prenapetostna zaščita zunanega opleta (ekrana ali zaslona) kablovoda

Poznani so različni načini ozemljevanja zunanega opleta (zaslona ali ekrana) kablovoda. V naslednjih podpoglavjih so opisani trije najpogostejši načini.

4.11.1 Oplet ozemljen na obeh straneh kablovoda

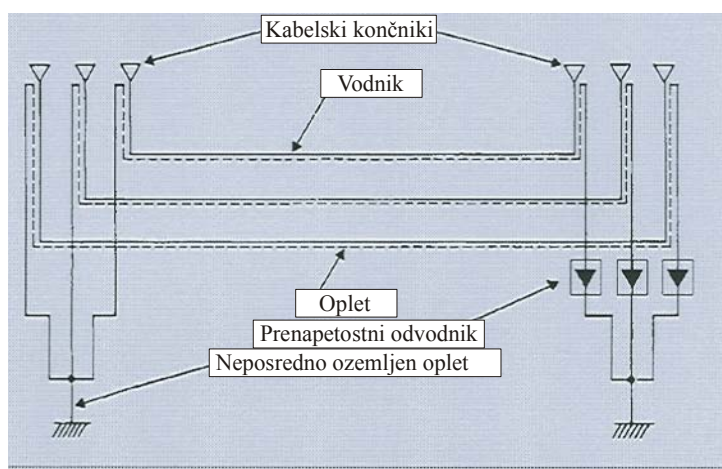
Je najbolj pogost način ozemljevanja opleta. Pri tako ozemljenem opletu se pri izmenični napetosti v njem inducirajo napetosti, ki so proporcionalne toku v vodniku, frekvenci, medsebojni induktivnosti med vodnikom in opletom ter dolžini kablovoda. Inducirane napetosti poženejo izenačevalne tokove, ki povzročajo izgube, zato se prenosna zmogljivost kablovoda zmanjša. Izgube so manjše pri kablovodih položenih v trikot in večje če so ti položeni drug poleg drugega (horizontalno).



Slika 4.25: Oplet ozemljen na obeh straneh kablovoda

4.11.2 Oplet ozemljen na eni strani kablovoda

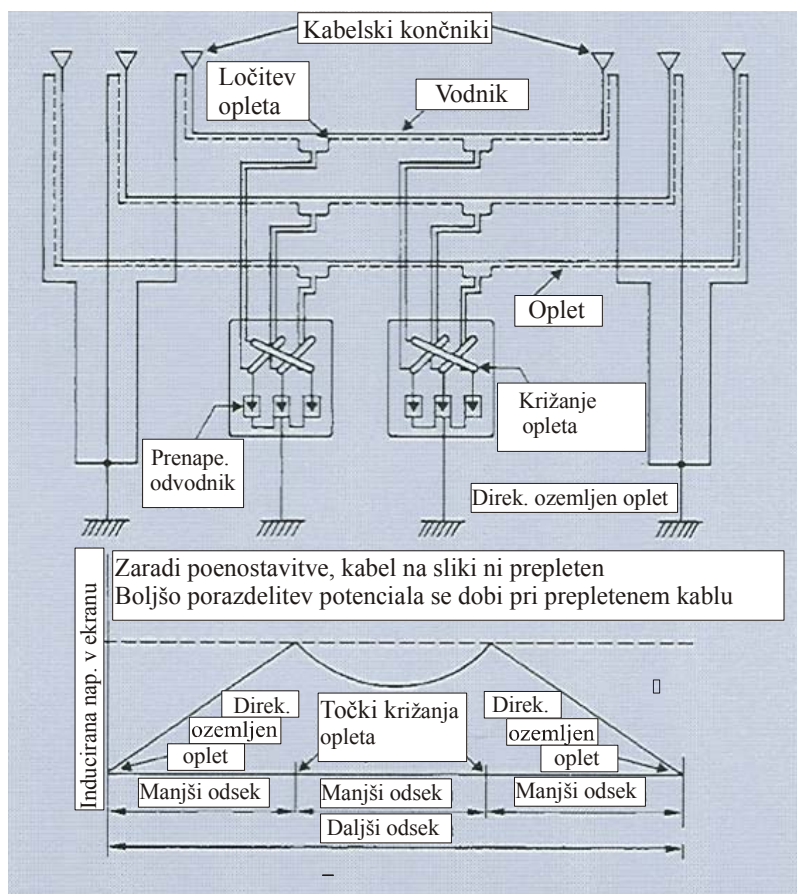
V primeru če želimo povečati obremenljivost kablovoda, je potrebno zmanjšati dodatne izgube, ki jih povzročajo izenačevalni tokovi, ki tečejo po opletu. To dosežemo tako, da oplet kablovoda ozemljimo samo na eni strani. V tem primeru po opletu ne teče nikakršen tok, se pa inducira napetost med zaslonom in zemljo, ki je proporcionalna toku in dolžini kablovoda, zato taka izvedba pride v poštev le pri krajših dolžinah kablovoda (do 500 m). Posebno nevarne so inducirane napetosti zaradi atmosferskih praznitev, kratkih stikov in stikalnih manipulacij, ki se lahko pojavijo na neozemljeni strani opleta. Pri daljših dolžinah kablovoda pa je potrebno na neozemljeni strani kablovoda na oplet namestiti posebne prenapetostne odvodnike, ki omejujejo te inducirane prenapetosti, kar je prikazano na sliki 4.26.



Slika 4.26: Oplet ozemljen na eni strani kablovoda

4.11.3 Oplet ozemljen na obeh straneh kablovoda z vmesnim navzkrižnim prevezovanjem

Pri tem načinu ozemljevanja oplete posameznih faz med seboj navzkrižno povežemo. Za prevezavo se uporabijo povezovalne omarice (Link boxes), v katerih se med seboj povežeta po dva in dva opleta različnih kablovodov (faz) tako, da ima na celotni kablovodni trasi vsak zaslon približno enako induktivnost do vseh vodnikov. Prepletamo lahko tudi same kablovode. Pri tem načinu ozemljevanja se inducira napetost med opletom in zemljo, z najvišjo vrednostjo v povezovalnih omaricah. V idealnem primeru po opletih ne teče noben tok, saj je celotna inducirana napetost med vodnikom in opletom pri popolni simetriji enaka nič. Ker imajo opleti z izjemo na začetku in koncu kablovoda proti zemlji nek potencial, morajo biti izolirani tako med seboj, kot proti zemlji. Za zaščito pred visokimi udarnimi prenapetostmi v zaslonu, se v povezovalnih omaricah vgrajujejo prenapetostni odvodniki (Slika 4.27). V kolikor je kablovod na celotni trasi položen na enak način, se prevezovanje izvede v prvi in drugi tretjini kablovodne dolžine. Če pa je kablovod na prvem delu trase položen na določen način (npr. vkopan), na drugem pa zopet na nek drug način (npr. položen v kanal), je potrebno določiti prevezovalna mesta za vsak konkreten primer posebej. Zaradi dodatnih spojk in prenapetostnih odvodnikov ter vzdrževanja, se predmetna izvedba uporablja le pri visokonapetostnih kablilih.



Slika 4.27: Oplet ozemljen na obeh straneh kablovoda z vmesnim navzkrižnim prevezovanjem

4.11.4 Izbira prenapetostnega odvodnika za prenapetostno zaščito opleta kablovoda

Da se zagotovi večja prenosna zmogljivost kablovoda, se oplet kablovoda ozemlji samo na eni strani. Slabost te izvedbe je, da se lahko na neozemljeni strani opleta pojavijo prenapetosti, ki lahko dosežejo tudi 50 % vrednost prenapetosti, ki obremenjuje kablovod. Zaradi tega je izolacija med opletom in plaščem kablovoda zelo obremenjena, kar pogosto vodi do preboja med opletom iz potencialom zemlje. Da se to prepreči, se na neozemljeni strani opleta med oplet in potencial zemlje namesti

posebni prenapetostni odvodnik (npr. POLIM-C..N, ABB), ki učinkovito ščiti izolacijo med opletom in plaščem kablovoda. Iz kataloga proizvajalca se izbere odvodnik na osnovi naslednje enačbe:

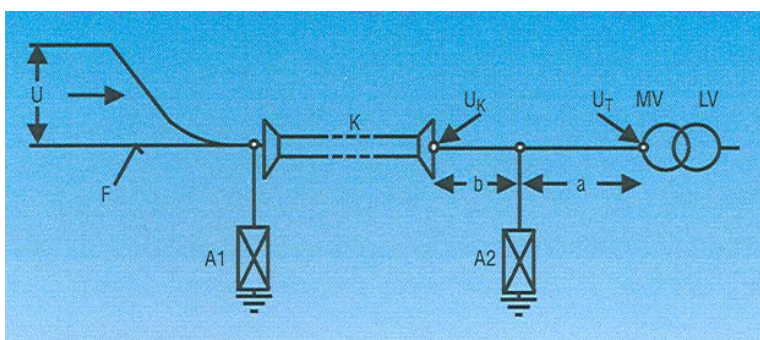
$$U_C \geq 0,24 \cdot I_k \cdot L_k \text{ [kV]} \quad (4.24)$$

kjer je:

- ⇒ U_C trajna obratovalna napetost odvodnika,
- ⇒ I_k največji kratkostični tok v kA, ki lahko teče po opletu kablovoda in
- ⇒ L_k dolžina kablovoda v km.

4.12 Transformator na koncu dolgega kablovoda

Na Sliki 4.28 je prikazan primer, ko je dolg kablovod ($l \geq 100$ m) na eni strani priključen na nadzemni vod, na drugi strani pa na sistem zbiralk na katere je priključen tudi transformator.



Slika 4.28: Transformator povezan preko dolgega kablovoda

- ⇒ U atmosferska prenapetost,
- ⇒ K dolžina kablovoda,
- ⇒ $A1$ in $A2$ prenapetostni odvodnik,
- ⇒ a in b dolžina priključnih vodnikov,
- ⇒ U_k maksimalna napetost na koncu kabla in
- ⇒ U_T maksimalna napetost na transformatorju.

Na strani nadzemnega voda odvodnik »A1« ščiti kablovod. Ker je dolžina kablovoda prevelika oz. zaščitna cona odvodnika »A1« prekratka, je potrebno na drugi strani kablovoda namestiti še en odvodnik »A2«, ki ščiti tako kablovod kakor tudi transformator. Odboji prenapetosti U na prehodu nadzemni vod-kablovod povzročijo na koncu kablovoda v točki U_k znatno povišanje napetosti. Z naraščanjem razdalje b prenapetosti dosežejo zelo visoke vrednosti, ki resno ogrožajo izolacijo kablovoda. Da se doseže optimalna prenapetostna zaščita, je potrebno prenapetostni odvodnik »A2« namestiti kar se da blizu konca kablovoda. Idealno bi bilo, če je razdalja b enaka nič. V področju a prenapetost počasneje narašča. Zato je izolacija transformatorja učinkovito ščitena, kljub temu, da je razdalja a precej velika. V Tabeli 4.6 so prikazane dovoljene največje razdalje med kablovodom in transformatorjem ob pogoju, da je razdalja $b = 0$. Privezeto je, da je kapacitivnost transformatorja 2 nF. Manjše vrednosti kapacitivnosti pomenijo večje razdalje a .

Prenapetostni odvodnik z $U_p = 3,8$ p.u. in $I_n = 10$ kA	Lesen drog		Kovinski steber	
Valovna impedanca kablovoda $Z [\Omega]$	30	60	30	60
Največja napetost sistema U_m [kV]	a [m]	a [m]	a [m]	a [m]

12	20	14	20	14
24	19	12	19	12
36	16	11	20	11

Tabela 4.6: Največje dovoljene razdalje med kablovodom in transformatorjem ob predpostavki, da je $b=0$

4.13 Kompenzacija jalove energije

Za kompenzacijo jalove energije se uporabljajo kondenzatorske baterije. Ko ni preklapov (stacionarno stanje) ni prenapetosti. Zaradi izklopa kondenzatorske baterije in spreminjanja obratovalne napetosti, pa lahko pride na odklopniku do prenapetosti, ki lahko dosežejo maksimalno vrednost tudi do 2,5 p.u. Lahko se primeri, da pri tej prenapetosti pride do ponovnega vklopa kondenzatorskih baterij. Če so kondenzatorske baterije vezane v zvezdo, se spraznijo med fazo in zemljo preko prenapetostnih odvodnikov, pri tem procesu pa so odvodniki termično zelo obremenjeni. Po enačbi 4.25 se izračuna energija, ki se sprosti v odvodniku:

$$W = \frac{Q}{\omega} \cdot \left[3 - \left(\frac{U_c}{U_m} \right)^2 \right] \quad [\text{kJ}] \quad (4.25)$$

kjer je:

- ⇒ Q tri fazna reaktivna moč kondenzatorske baterije,
- ⇒ W absorbirana energija v odvodniku,
- ⇒ ω je $2\pi f$,
- ⇒ U_c je trajna obratovalna napetost in
- ⇒ U_m je največja napetost opreme.

Ob upoštevanju da velja $U_c \geq U_m$ in da lahko zaradi APV pride do treh ciklov vklop-izklop, velja:

$$\frac{W}{U_c} \geq \frac{6 \cdot Q}{\omega \cdot U_m} \quad [\text{kJ/kV}] \quad (4.26)$$

Glede na reaktivno moč kondenzatorskih baterij je potrebno odvodniku določiti sposobnost absorpcije energije. V Tabeli 4.7 so navedene specifične energijske sposobnosti odvodnikov glede na reaktivno moč kondenzatorskih baterij.

Če po izklopu kondenzatorske baterije ostanejo ločene od omrežja, se te preko odvodnika hitro spraznijo na vrednost $\sqrt{2} \cdot U_c$. Pod to napetostjo je tok skozi odvodnik majhen, zato proces praznjenja kondenzatorskih baterij traja bistveno dlje in odvodnik nima nobenih težav z odvajanjem toplote v okolico.

Če je reaktivna moč kondenzatorskih baterij večja, kot je navedena v Tabeli 4.7, je potrebno namestiti dva odvodnika, ki sta vezana vzporedno z enako karakteristiko.

W/U_c [kJ/kV]	3,6	5,5	9,0	13,3
U_m [kV]	Q [MVA]	Q [MVA]	Q [MVA]	Q [MVA]
3,6	0,8	1,0	1,7	2,5
12	2,3	3,5	5,7	8,4
24	4,5	6,9	11,3	16,7
36	6,8	10,4	17,0	25,1

Tabela 4.7: Potrebne specifične energijske sposobnosti odvodnikov glede na reaktivno moč kondenzatorskih baterij

5. ANALIZA PRENAPETOSTNIH POJAVOV

5.1 Računalniške simulacije

Zelo dober način za analiziranje prenapetostnih pojavov oz. izvajanje koordinacije izolacije so računalniške simulacije. S primernim programom modeliramo določeno omrežje in ob določenih vhodnih podatkih izračunavamo željene veličine, kot so napetost U , tok I , moč P itd. V modelu omrežja lahko vhodne podatke določenih veličin smiselno spreminjamo in tako na enostaven način ugotovljamo vpliv teh na izhodne veličine. Za konkretni primer so bile analizirane veličine prenapetosti in nakopičena energija v prenapetostnih odvodnikih. Da bi se dobljeni rezultati ujemali z dejanskim stanjem v omrežju, je potrebno izdelati kakovostni nadomestni model za obravnavano omrežje oz. postroj.

Analize elektromagnetnih prehodnih pojavov v elektroenergetskem sistemu se izvajajo v širokem frekvenčnem pasu in sicer od 0-50 MHz, ali pa celo več. Kot vemo, so prehodni pojavi s frekvenco, ki je večja od 50 Hz, posledica različnih normalnih in izrednih obratovalnih stanj (dogodkov) v elektroenergetskem sistemu. Ta frekvenčni pas (0 - 50 MHz), za lažjo analizo na digitalnem računalniku, razdelimo na štiri frekvenčna območja, ki so prikazana v Tabeli 5.1.

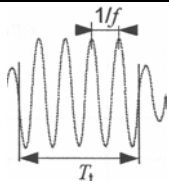
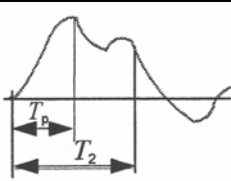
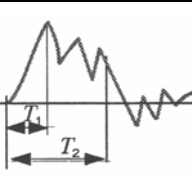
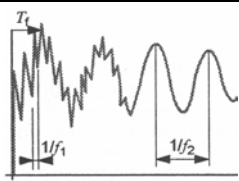
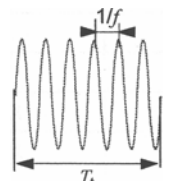
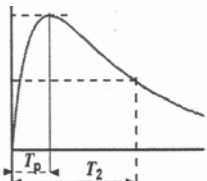
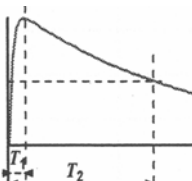
Vrsta prenapetosti	Časne prenapetosti	Prenapetosti s položnim čelom	Prenapetosti s strmim čelom	Prenapetosti z zelo strmim čelom
Oblika				
Običajni vzroki za nastanek	Zemeljski stiki, izpadi bremen, ferorezonanca	Stikalne manipulacije	Atmosferske razelektritve	Preklopi v GIS postajah, preklopi z vakuumskim odklopnikom
Lastnosti	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3600 \text{ s} \geq t \geq 0,03 \text{ s}$	$5000 \mu\text{s} \geq T_p > 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20 \mu\text{s} \geq T_1 > 0,1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$100 \text{ ns} \geq T_r > 3 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Standardne oblike napetosti	 $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	 $T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	 $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	/
Standardni preskus zdržnosti	Kratkotrajni preskus z izmenično napetostjo	Preskus s stikalno napetostjo	Preskus z atmosfersko udarno napetostjo	/

Tabela 5.1: Prenapetosti razdeljene v štiri frekvenčne razrede

5.1.1 Začetni pogoji

Rešitev prehodnega pojava je odvisna od začetnih pogojev, pred nastopom prehodnega pojava. Udar strele povzroči prehodni pojav v obliki napetosti, ki se prišteje napetosti v točki udara pred samim nastopom udara. Začetni pogoj obravnavanih simulacij je predvidel obratovalno napetost industrijske frekvence. V vseh izvedenih izračunih je bil upoštevan najbolj neugoden trenutek udara strele in sicer, ko je napetost izmeničnega vira dosegla maksimalno vrednost.

5.1.2 Časovni korak

Dolžina časovnega koraka je bistven parameter, ki ključno vpliva na točnost rezultata simulacije in čas računanja. Časovni korak mora biti dovolj kratek, da zajame prehodni pojav z najvišjo frekvenco in ga pravilno reproducira. Hkrati časovni korak ne sme biti prekratek, saj ne želimo po nepotrebnem podaljševati časa simulacije. Velikost časovnega koraka naj bo enaka eni desetini periode najhitrejšega prehodnega pojava. Prav tako je potrebno upoštevati, da mora biti časovni korak krajši od časa, ki ga katerikoli potujoči val potrebuje za prehod preko najkrajšega valovnega elementa. Po priporočilu naj bo časovni korak manjši od polovične vrednosti časa potovanja. Najhitrejši potujoči val potuje s hitrostjo svetlobe ($300 \text{ m}/\mu\text{s}$), zato je časovni korak pri kratkih valovnih elementih zelo kratek (cca. $1 \text{ ns}/\text{m}$). Ustreznost dolžine časovnega koraka se lahko preveri tako, da se med seboj primerja rezultat dobljen z določenim časovnim korakom in rezultat s polovičnim časovnim korakom. Če sta ta dva rezultata enaka, pomeni da je prvotni časovni korak dovolj kratek in ga zato ni potrebno skrajševati.

5.1.3 Trajanje simulacije

Simulacija mora trajati dovolj dolgo, da so v rezultatu zajete maksimalne prenapetosti, ki se lahko pojavijo. Upoštevati je potrebno čase širjenja valov in odboje, katerih posledica je, da se na napravah pojavijo največje prenapetosti kasneje, kot na napravah blizu udara.

5.1.4 Numerične oscilacije

Numerične oscilacije se lahko pojavijo zaradi:

- ⇒ uporabljene numerične metode za računanje prehodnih pojavov, zlasti če so uporabljene za računanje integracijske metode za rešitev v časovni domeni in
- ⇒ resnične nestabilnosti sistema za dane parametre.

Ko se v rezultatu simulacije pojavijo oscilacije, je potrebno preveriti, če so oscilacije odraz fizikalnega stanja ali so le numerične narave. Kadar so oscilacije odvisne od časovnega koraka ali če niso dušene, je zelo verjetno da gre za numerične oscilacije. Numeričnim oscilacijam se je mogoče izogniti na različne načine, eden izmed njih je uporaba implicitne Eulerjeve metode za nekaj časovnih korakov.

5.1.5 Predstavitev rezultatov

V simulacijskih programih je poleg časovnega koraka za izračun potrebno izbrati tudi časovni korak za prikaz podatkov. Dolžina tega koraka mora biti dovolj kratka, da so prikazane tudi oscilacije najvišje frekvence.

5.2 Program EMTP-RV

Program EMTP-RV je matematično orodje, ki se uporablja za analiziranje elektromagnetnih prehodnih pojavov v elektroenergetskih sistemih. EMTP-RV ima zmogljiv grafično uporabniški vmesnik (GUI) imenovan EMTPWorks, ki je hkrati tudi simulacijsko okolje. EMTPWorks omogoča delo na različnih nivojih, od enostavnih do izjemno velikih modelov.

EMTP-RV uporablja za analizo omrežja pristop, ki temelji na reševanju nelinearnih sistemov z Jacobijevo matriko in razporejanjem elementov redkih matrik ob diagonali. Ta način izloči vpliv topologije omrežja na končni rezultat, zato lahko EMTP-RV rešuje velike nelinearne sisteme ob majhnem številu iteracij.

V splošnem električnem omrežju EMTP-RV razlikuje med močnostnimi in kontrolnimi napravami. Močnostne naprave so električne naprave predstavljene z določenim modelom, kontrolne naprave pa temeljijo na blok diagramih, ki so predstavljeni z matematičnimi sli logičnimi enačbami. Kontrolne naprave se lahko uporabijo tudi za kreiranje enačb določenih modelov. Delovanje in povezovanje močnostnih in kontrolnih naprav omogoča poseben sprožilni vmesnik, ki deluje na podlagi meritev določene električne veličine, kot so npr.: tok, napetost, moč, energija, hitrost vrtenja, moment, itd. Več združenih kontrolnih naprav pa se imenuje kontrolni sistem, npr. regulator vzbujaanja, določene zaščite, itd.

EMTP omogoča štiri različne možnosti simuliranja:

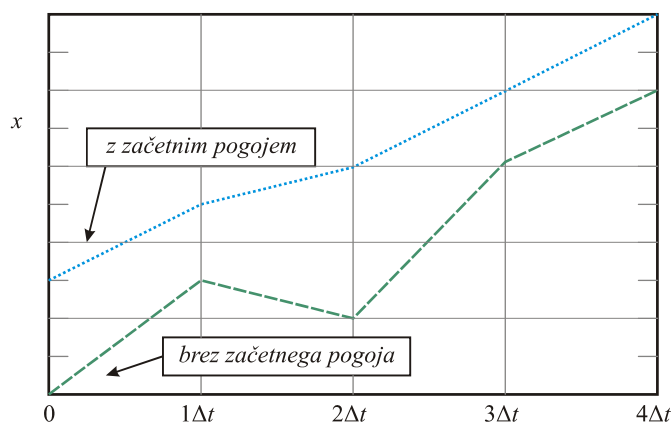
- ⇒ rešitev s pretoki moči (*Load – flow solution*),
- ⇒ rešitev s stacionarnim stanjem (*Steady – state solution*),
- ⇒ rešitev s časovno domeno (*Time – domain solution*) in
- ⇒ rešitev z iskanjem frekvence (*Frequency scan solution*).

Simulacije so bile opravljene z rešitvijo s časovno domeno. V vseh simulacijah je bilo potrebno predvideti najbolj neugoden čas nastopa udara strele in sicer ko je napetost v omrežju največja. V ta namen EMTP-RV omogoča, da se za inicializacijo rešitve s časovno domeno uporabi rešitev s stacionarnim stanjem, ki rešuje sistem s kazalci v kompleksni ravnini.

Na splošno gledano se pri rešitvi s časovno domeno išče rešitev sistema diferencialnih enačb danega z naslednjo enačbo in začetnim pogojem

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = f(\mathbf{x}, t) \quad , \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (5.1)$$

kjer odebeljene vrednosti označujejo vektorje. Sistem diferencialnih enačb se rešuje s pomočjo numerične integracije s fiksnim časovnim korakom (Slika 5.1).



Slika 5.1: Princip računanja s fiksnim časovnim korakom

Med dvema časovnima korakoma je rešitev linearno interpolirana. Rešitev pri $t = 0$ je lahko 0, določena s kompleksnim kazalcem (stacionarno stanje) ali določena ročno. Prva rešitev je izračunana pri $t = \Delta t$. Računanje s fiksnim časovnim korakom omogoča največjo učinkovitost računanja, vendar ne omogoča preverjanja natančnosti. Torej se ne more prilagoditi celotnemu območju frekvenc v analiziranem omrežju, zato je lahko ob predolgem koraku kakšen prehodni pojav spregledan. Argument, za uporabo fiksnega proti uporabi spremenljivega koraka je mnogo hitrejši izračun, obenem pa računalnik potrebuje veliko manj spomina ob enaki natančnosti rezultata.

EMTP omogoča tri načine numeričnega integriranja (Tabela 5.2). Osnovna je trapezna metoda, ki je A -stabilna metoda, kar pomeni, da je stabilna v primeru stabilnosti analiziranega sistema. Program EMTP-RV s pomočjo teh integracijskih metod diskretizira diferencialne enačbe posameznih naprav. Po diskretizaciji enačb vseh naprav, rešuje program sistem diferencialnih enačb v obliki:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (5.2)$$

Ta sistem enačb se nato reši za vsako točko časovnega koraka.

Ime integracijske metode	Formula	Lastnosti	
		Dobre	Slabe
Trapezna (T)	$x_t = x_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t}{2}(f_t + f_{t-\Delta t})$	Hitra in točna	Numerične oscilacije v točkah diskontinuitete
Implicitna Eulerjeva (IE)	$x_t = x_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t}{2} f_t$	Ni numeričnih oscilacij	Manj natančna od T
Uporaba dveh metod, T + IE	T ali IE v točkah diskontinuitete	Hitra, točna, ni numeričnih oscilacij	Počasnejša od T

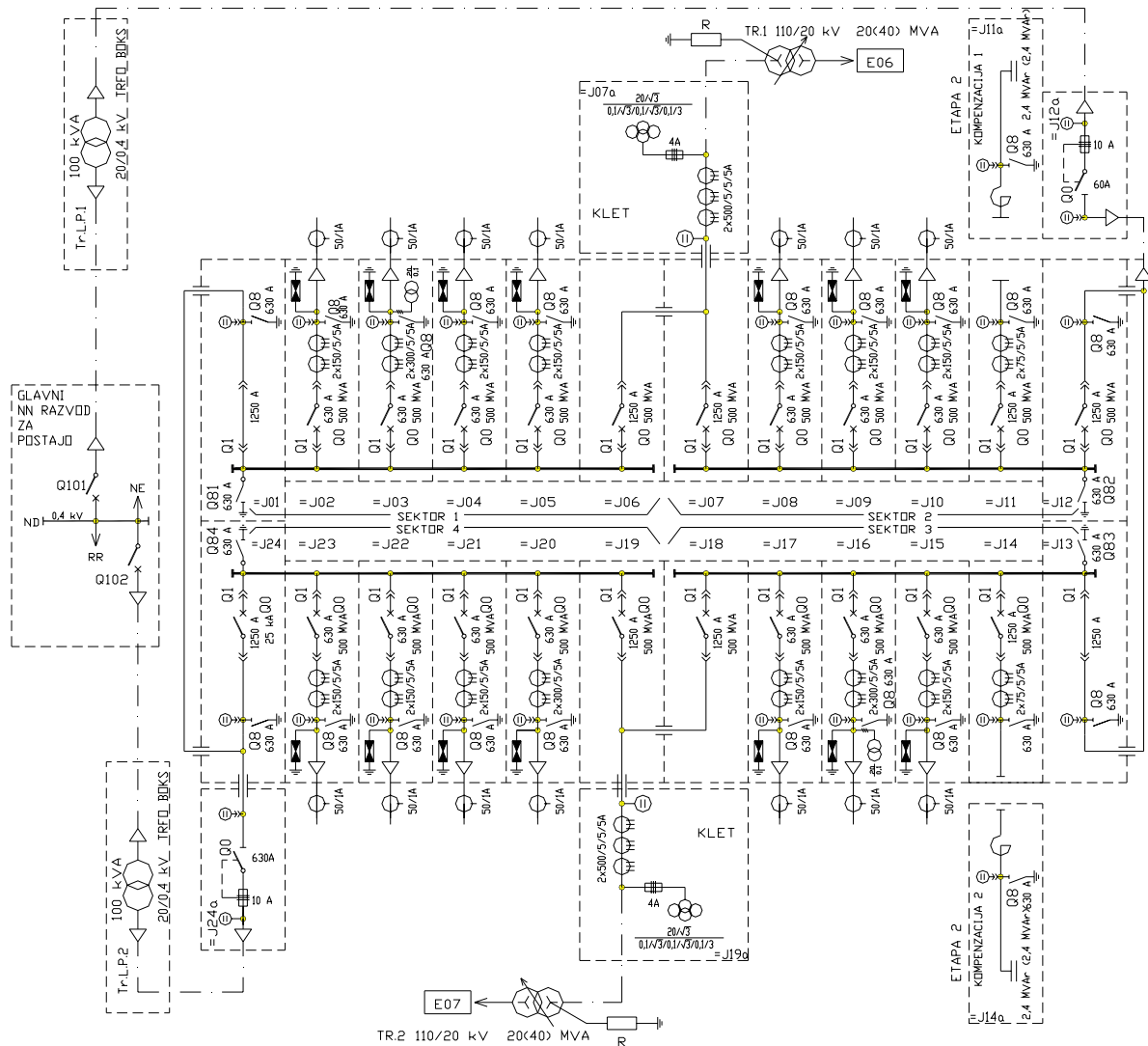
Tabela 5.2: Metode numerične integracije, uporabljene v EMTP-RV

Način reševanja po trapezni in implicitni Eulerjevi metodi je osnovni način. Ta za reševanje uporablja trapezno metodo, v točkah diskontinuitete pa implicitno Eulerjevo metodo. Ko program zazna točko diskontinuitete razpolovi časovni korak trapezne metode Δt , v dva koraka implicitne Eulerjeve metode $\Delta t/2$. Reševanje s trapezno metodo se nadaljuje takoj po diskontinuiteti.

5.3. Model omrežja

Izračuni prenapetosti in termičnih obremenitev ZnO prenapetostnih odvodnikov se je izvedla za objekt RTP 110/20 kV Radeče. Analizirane so bile napetostne razmere na SN strani RTP, zato je bilo privzeto, da se elektromagnetni vplivi ob prenapetostih na visokonapetostni strani RTP, ne prenesejo, preko transformatorja ali kakorkoli drugače, na SN stran RTP.

Izbrana RTP ima visokonapetostni del s transformatorji nameščen na odprtem prostoru, medtem ko je srednjenapetostni del nameščen v zgradbi v kovinsko oklopljenih z zrakom izoliranih izvlačljivih stikalnih celicah (Slika 5.2).



Slika 5.2: Enopolna shema 20 kV dela RTP Radeče 110/20 kV

Ime	Ime celice	Tip celice	Oprema
Sektor 1	= J01	povezovalna	del zbiralke in povezava
	= J02	vodna	merilni tokovni transformator, odvodnik, del zbiralke
	= J03	vodna	merilni tokovni in napetostni transformator, odvodnik, del zbiralke
	= J04	vodna	merilni tokovni transformator, odvodnik, del zbiralke
	= J05	vodna	merilni tokovni transformator, odvodnik, del zbiralke
	= J06	TR celica	del zbiralke in povezava
Sektor 2	= J07	TR celica	del zbiralke in povezava
	= J08	vodna	merilni tokovni transformator, odvodnik, del zbiralke

Ime	Ime celice	Tip celice	Oprema
	= J09	vodna	merilni tokovni transformator, odvodnik, del zbiralke
	= J10	vodna	merilni tokovni in napetostni transformator, odvodnik, del zbiralke
	= J11	kompensacija	merilni tokovni transformator, kablovod, dušilka in kondenzator
	= J12	povezovalna	del zbiralke in povezava
Sektor 4	= J13	povezovalna	del zbiralke in povezava
	= J14	kompensacija	merilni tokovni transformator, kablovod, dušilka in kondenzator
	= J15	vodna	merilni tokovni transformator, odvodnik, del zbiralke
	= J16	vodna	merilni tokovni transformator, odvodnik, del zbiralke
	= J17	vodna	merilni tokovni transformator, odvodnik, del zbiralke
	= J18	povezovalna	TR celica, del zbiralke in povezava
Sektor 3	= J19	povezovalna	TR celica, del zbiralke in povezava
	= J20	vodna	merilni tokovni transformator, odvodnik, del zbiralke
	= J21	vodna	merilni tokovni transformator, odvodnik, del zbiralke
	= J22	vodna	merilni tokovni transformator, odvodnik, del zbiralke
	= J23	vodna	merilni tokovni transformator, odvodnik, del zbiralke
	= J24	povezovalna	del zbiralke in povezava
Ostale celice	= J07a	dovodno merilna celica	merilni tokovni in napetostni transformator, povezava
	= J12a	celica lastne rabe	povezava
	= J19a	dovodno merilna celica	merilni tokovni in napetostni transformator, povezava
	= J24a	celica lastne rabe	povezava

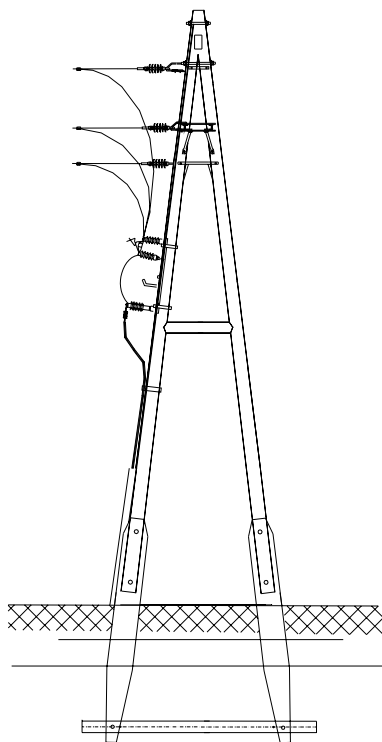
Tabela 5.3: oznake celic v SN delu RTP Radeče

Celice so nameščene v vrsti in skupaj sestavljajo srednjenapetostne zbiralke, ki so razdeljene na štiri sektorje. V celicah je glede na funkcijo celice nameščena različna srednjenapetostna oprema (Tabela 5.3).

Celice, ki so povezane na sekcije zbiralk, so nameščene v prvem nadstropju, ostale pa v pritličju ter so označene s črko a.

V postaji sta dva energetska transformatorja 110/20 kV, in dva transformatorja lastne rabe 20/0,4 kV. Srednjenapetostni del energetskega transformatorja je preko kabla povezan z dovodno merilno celico, ki je v pritličju. Ta je povezana s povezovalno celico, ki sklene povezavo srednjenapetostne strani energetskega transformatorja s srednjenapetostnimi zbiralkami. Transformator lastne rabe je povezan s celico lastne rabe, ki je v pritličju, ta pa je naprej povezana preko povezovalne celice s srednjenapetostnimi zbiralkami.

Vsaka vodna celica je povezana preko kablovoda z nadzemnim daljnovodom. Kabel preide v nadzemni daljnovod na posebnem stebru, ki je lahko narejen iz lesa ali kovine (Slika 5.3).



Slika 5.3: Prehod iz nadzemnega voda v kablovod na lesenem stebru

Pri spoju kablovoda z nadzemnim vodnikom je v vsaki fazi nameščen prenapetostni odvodnik. Ta ščiti izolacijo kablovoda pred prenapetostmi, nastalimi ob direktnem udaru strele v nadzemni daljnovod. Odvodnik na lesenem stebru je ozemljen preko ozemljitvenega voda iz pocinkanega železa, odvodnik na kovinskem pa preko armature stebra.

V SN omrežjih je izolacija naprav najbolj obremenjena ob direktnem udaru strele v nadzemni daljnovod. Ta povzroči nastanek potujočega napetostnega in tokovnega vala. Od točke udara potujeta dva vala in sicer v obeh možnih smereh po vodu. En val potuje proti postaji, ki naleti na različne elemente z različnimi električnimi lastnostmi. Potujoči val se zato razdeli na napredujoči in odbiti val. Prav tako tudi ta dva razdeljena vala naletita na spremembe valovnih impedanc, zato se znova vsak izmed njiju razdeli na dva vala. Tako nastane cel kup potujočih valov, ki se med seboj seštevajo. Val, ki potuje stran od postaje je bil v analizi zanemarjen.

Prenapetosti, nastale ob udaru strele v daljnovod ustrezajo prenapetostim s strmim čelom. Izdelan je bil model postaje (Slika 5.4), ki je primeren za analizo hitrih elektromagnetnih prehodnih pojavov, med katere spadajo tudi prenapetosti s strmim čelom, ki so posledica atmosferskih razelektritev.

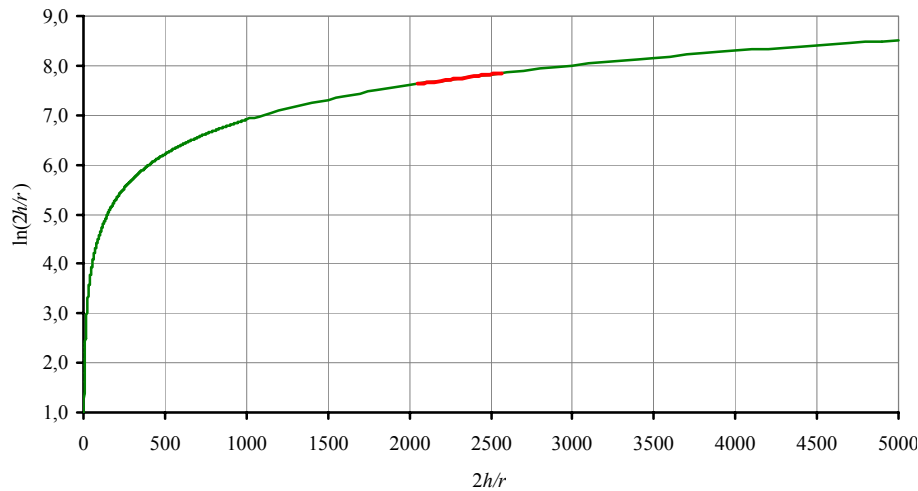
5.3.1 Vod in kablovod

- ⇒ valovna impedanca,
- ⇒ dolžina elementa in
- ⇒ hitrost širjenja elektromagnetnega valovanja.

Vodnik	h [m]	r [mm]	Z_v [Ω]	c [m/ μ s]
Al/Fe 70/12 mm ²	6,7	5,85	464	300

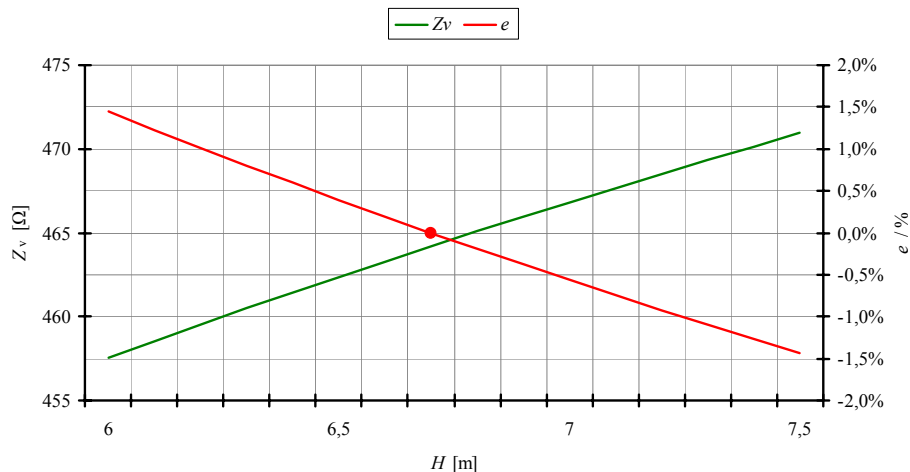
V Tabeli 5.4 predstavlja h ocenjeno povprečno višino vodnika nad zemljo, r pa je polmer vodnika. Ocenimo napako izračuna valovne impedance. Vrednost valovne impedance je odvisna od višine vodnika nad zemljo in njegovega polmera. Upoštevajoč poves vodnika je najnižja višina vodnika nad

zemljo približno 6 m, najvišja 7,5 m pa na stebru, kjer preide nadzemni daljnovod v kablovod. Valovna impedanca se spreminja po logaritemski funkciji (Slika 5.5).



Slika 5.5: Potek valovne impedance Z v odvisnosti od višine vodnika nad zemljo in radija vodnika

Lastnost logaritemske funkcije za argumente večje od ena je, da se ob relativno veliki spremembi argumenta funkcije vrednost le-te malo spremeni. Z rdečo krivuljo (Slika 5.6) je prikazano področje argumentov za višine vodnikov nad zemljo od 6 m do 7,5 m.



Slika 5.6: Valovna impedanca voda in relativni pogrešek

Relativni pogrešek je zaradi lastnosti logaritemske funkcije majhen (manj kot 1,5%), zato je ocenjena vrednost povprečne višine voda primerna za izračun valovne impedance voda.

$$e = \frac{Z_p - Z_{pr}}{Z_{pr}} \quad (5.3)$$

Srednjenapetostni daljnovod nima strel vodne zaščitne vrvi, ki bi ga ščitila pred direktnim udarom strele v fazni vodnik, zato lahko vanj udari strela s poljubno veliko temensko vrednostjo toka.

Predpostavimo, da strela udari v enega izmed faznih vodnikov. Udar strele v vod predstavlja v električnem smislu vozlišče, v katerega je injiciran tok strele, ki se odvaja iz vozlišča preko voda v obeh smereh. Ta tok povzroči dvig potenciala vodnika in s tem povečanje električne poljske jakosti med vodnikom v katerega je udarila strela in ostalima vodnikoma. V primeru, da ta jakost preseže vrednost prebojne trdnosti zraka, ki je v tem primeru izolator med njima, pride do preskoka in

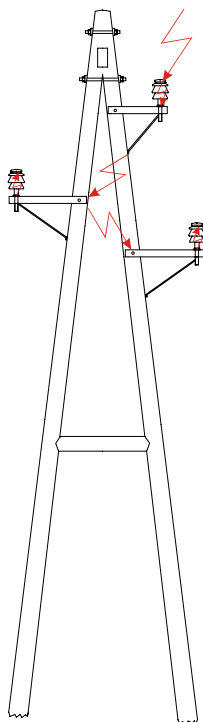
izenačitve potenciala med vodnikoma. Zanima nas, kako velik je tok strele, pri katerem pride do preskoka na ostala dva vodnika.

Izračun minimalnega toka, ki povzroči preskok na ostala dva vodnika zahteva poznavanje valovne impedance vodnika, razdalje med prevodnimi deli pod napetostjo in električne poljske jakosti pri kateri pride do preboja. Vrednost le te ni točno znana, vendar se jo glede na to da je polje okoli vodnika nehomogeno, oceni na 5 kV/cm do 10 kV/cm.

Najmanjši tok strele, ki je udarila na področju Radeč v zadnjih desetih letih je, 2,53 kA (vir SCALAR). V Tabeli (5.5) so prikazane vrednosti minimalnih tokov, ki povzročijo preskok na ostale vodnike. V modro obarvanih poljih so vrednosti višje od toka najmanjše strele na področju Radeč. Torej ob udaru na sredini razpetine, kjer so razdalje med vodniki 150 cm, za $E_{\text{preb}} \geq 8 \text{ kV/m}$ ne bi prišlo do preskoka. Napetostni val bi potoval do prvega droga, kjer bi prišlo do preskoka preko izolatorja na kovinske konzole in naprej preko izolatorjev na ostala dva vodnika (Slika 5.7).

$E_{\text{preb}} [\text{kV/cm}]$	$d_v = 150 \text{ cm}$ (med vodniki)		$d_k = 85 \text{ cm}$ (med konzolami)	
	$U_{\text{preb}} [\text{kV}]$	$I_{\text{min}} [\text{kA}]$	$U_{\text{preb}} [\text{kV}]$	$I_{\text{min}} [\text{kA}]$
5	750	1,62	425	0,91
6	900	1,94	510	1,09
7	1050	2,26	595	1,28
8	1200	2,59	680	1,46
9	1350	2,91	765	1,64
10	1500	3,23	850	1,83

Tabela 5.5: Minimalni tok strele pri katerem pride do preskoka na ostale vodnike



Slika 5.7: Preskoki na lesenem stebru na ostala vodnika preko izolatorjev in konzol

Na podlagi teh ugotovitev in po priporočilih iz standarda je bilo privzeto, da ob udaru strele v en fazni vodnik, vedno pride do preskoka tudi na ostala dva vodnika. Pri izdelavi nadomestnega modela je bilo predpostavljeno, da se po preskokih tok strele razdeli na šest enakih tokov, ki tečejo po vsaki fazi v obeh možnih smereh. Predpostavljeno je tudi, da enaki tokovi v faznih vodnikih povzročijo enake napetosti v vsaki fazi, zato je bil narejen enofazni model.

Prerez kablovoda	C [$\mu\text{F/km}$]	L [mH/km]	Z_v [Ω]	c [$\text{m}/\mu\text{s}$]
70 mm^2	0,20	0,42	45,83	109
150 mm^2	0,26	0,37	37,72	102
240 mm^2	0,31	0,35	33,60	96

Tabela 5.6: Valovna impedanca kablovoda in hitrosti potujočih valov

5.3.2 Stikalne celice

Izračun valovne impedance, ki je definirana s kapacitivnostjo in induktivnostjo vodnikov v celicah je zelo zahtevna naloga. Vodniki so pravokotnega prereza (Cu 60x10) in imajo zahtevno geometrijo. Kapacitivnost in induktivnost bi bilo potrebno izračunati numerično, vendar ta izračun presega okvir te naloge. Tudi če bi želeli pravokotni vodnik aproksimirati z okroglim bi naleteli na težave, saj je kovinski oklop celice ozemljen, kar pomeni, da za izračun kapacitivnosti in induktivnosti vodnikov ni možno uporabiti metode zrcaljenja vodnikov.

Zato so bile celice modelirane z dvema valovnim elementoma z različnima valovnim impedancama. Prvi predstavlja vzdolžni del, drugi pa prečni del celice, to je zbiralko.

Vrednost	Z_v	c [$\text{m}/\mu\text{s}$]	Dimenzija [m]
Vzdolžno	150	300	1
Prečno	100	300	2

Tabela 5.7: Valovna impedanca stikalne celice

5.3.3 Energetski transformator

Ob hitrih prehodnih pojavih na električnih elementih pridejo, zaradi frekvenčne pogojenosti, do izraza druge tokovne poti kot v normalnem obratovanju pri nizki frekvenci. V transformatorju se tedaj tokovi zaključujejo preko kapacitivnosti med ovoji, navitji in med posameznim navitjem in zemljo.

V primeru nastopa prenapetosti s strmim čelom na transformatorju, priporoča standard IEC 60071-4 predstavitev transformatorja s kapacitivnostjo do zemlje. V Tabeli 5.8 so prikazane izmerjene vrednosti kapacitivnosti sredjenapetostnega navitja do zemlje.

Transformator	Energetski	Lastne rabe
	TR1 in TR2	TR L.R.1 in TR L.R.2
C [nF]	4,2	0,9

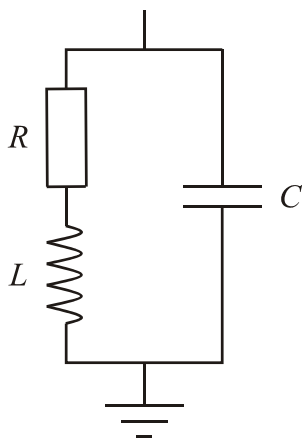
Tabela 5.8: Kapacitivnosti sredjenapetostnega navitja transformatorja do zemlje

5.3.4 Ozemljilo

Potujoči val, ki nastane ob udaru strele, zahteva modeliranje ozemljila kot valovnega elementa. Hkrati, pa zaradi velikega toka, ki se odvaja v zemljo preko ozemljila lahko pride do pojava ionizacije zemlje v okolici ozemljitvenih elektrod. V ioniziranem področju se ustvarjajo visoko prevodni kanali z upornostjo skoraj nič. Zaenkrat še ni modela, ki bi splošno zajel ta dva pojava, zato bo uporabljen poenostavljen model ozemljila, ki je prikazan na Sliki 5.8. Poleg poenostavljenega obstajajo tudi različni kompleksni modeli ozemljila, ki se predstavijo z ozemljitveno impulzno impedanco. Ta pa je nelinearna funkcija toka skozi ozemljilo:

$$Z_a = k \cdot I_p^\alpha \quad (5.4)$$

Parametra k in α sta odvisna od temperature in vlage zemlje, ter konfiguracije ozemljitvene elektrode. Z naraščanjem vlage in temperature zemlje k močno pada, medtem ko je njun učinek na α zanemarljiv. Ozemljitvena upornost raste s strmino tokovnega impulza. Potrebno bi bilo razviti metodo, s katero bi dobili vrednosti k in α za splošen primer.



Slika 5.8: Poenostavljen model ozemljila

Ozemljilo	Vrednosti		
	R [Ω]	L [μH]	C [pF]
Daljinovod	1, 10 in 20	5	2
Postaja	0,1	5	2

Tabela 5.9: Vrednosti R, L, C poenostavljenega modela ozemljila

5.3.5 ZnO odvodnik

Za potrebe simulacij je bil izdelan model ZnO odvodnik proizvajalca ABB in sicer MWK 20. Standard IEC 60071-4 priporoča, da se karakteristiko odvodnika poda kot preostala napetost na sponkah odvodnika ob odvodnem toku oblike 8/20.

Po navodilih proizvajalca odvodnikov je bil izbran prenapetostni odvodnik z naslednjo U - I karakteristiko (Tabela 5.10).

Udarni tokovni val oblike 8/20 I [kA]	Preostala napetost odvodnika U_{res} [kV]
0,001	22,9
0,01	28,2
0,1	31,8
1	33,0
10	35,6
100	37,7
1000	52,0
5000	58,0
10000	61,4
20000	68,0

Tabela 5.10: Nelinearna U - I karakteristika odvodnika

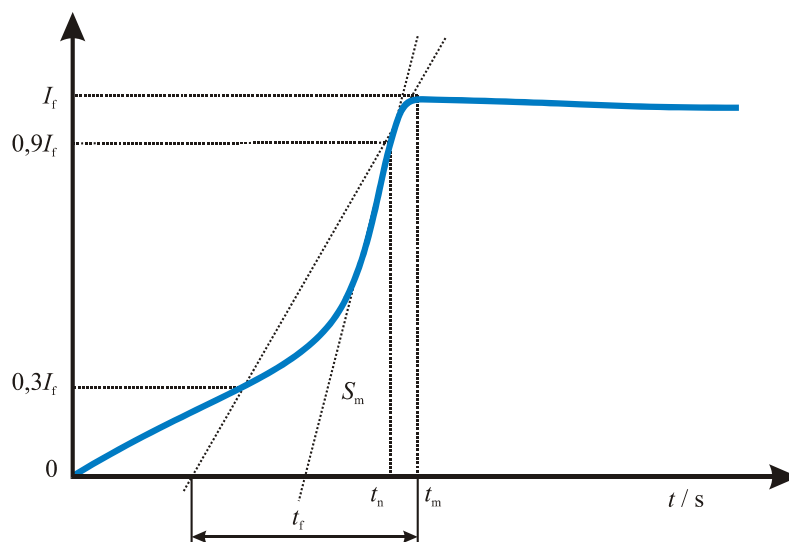
Novejše raziskave kažejo, da osnovni model prenapetostnega odvodnika ne more simulirati dinamičnega obnašanja odvodnika. Ta se sicer lahko uporabi za simuliranje hitrih prehodnih pojavov, vendar velja le v ozkem frekvenčnem območju.

5.3.6 Udar strele

Udar strele se najpogosteje simulira z idealnim tokovnim virom, vendar se uporablja tudi napetostni vir, z maksimalno vrednostjo enako zdržni napetosti izolacije.

Parametri idealnega tokovnega vira so:

- ⇒ temenska vrednost,
- ⇒ čas do čela,
- ⇒ čas hrbta in
- ⇒ maksimalna strmina čela,



Slika 5.9: CIGRE konkavna oblika udarnega tokovnega vala

kjer je I_f vrednost toka na temenu, S_m je maksimalna strmina čela, t_f pa čas trajanja čela.

Temenska vrednost toka	Vrednost [kA]	S_m [kA/ μ s]
Sredina populacije I_{srpop}	6,66	0,85
Stopnja tveganja 20 %, I_{s20}	7,67	0,97
Stopnja tveganja 10 %, I_{s10}	10,67	1,38
Stopnja tveganja 5 %, I_{s5}	14,33	1,85

Tabela 5.11: Temenske vrednosti in strmine čela udarnega tokovnega vala oblike 8/20 μ s

5.4 Simulacije

Srednjenapetostno izolacijo najbolj ogrožajo prenapetosti s strmim čelom, ki so posledica udara strele v nadzemni daljnovod. Predpostavili smo udar strele 50 m od končnega stebra in opazovali prenapetosti na kritičnih mestih. Raziskan je bil vpliv oblike in velikosti temenske vrednosti udarnega vala na velikost prenapetosti. Nato je bil izveden postopek koordinacije srednjenapetostne izolacije. Ta se ob v naprej določenem izolacijskem nivoju izvede, s pomočjo optimalne izbire števila in mesta postavitve cink-oksidnih prenapetostnih odvodnikov.

5.4.1 Izbira opazovanih veličin

Električne veličine se v modelu lahko opazuje na različnih mestih. V diagramih so prikazane le tiste veličine, za katere se smatra, da so najpomembnejše, sicer bi bili diagrami nepregledni.

Ob spoju nadzemnega daljnovoda s kablovodom naleti potujoči napetostni val na spremembo valovne impedance. Valovna impedance kablovoda je približno 10 krat manjša od valovne impedance nadzemnega voda, zato se v tej točki del prenapetostnega vala odbije nazaj proti točki udara strele,

preostali del vala pa potuje naprej po kablovodu. Zaradi relativno kratke dolžine kablovoda pride vzdolž kablovoda do številnih napetostnih odbojev. Vrednosti teh se lahko seštevajo, lahko pa tudi odštevajo. V določenem trenutku je lahko izolacija kablovoda zelo obremenjena. Iz tega razloga, se v točko spoja nadzemnega voda s kablom namesti prenapetostni odvodnik, ki na tem mestu omeji prenapetosti. Odvodniki nameščeni na stebru nadzemnega daljnovoda, v katerega je udarila strela, so napetostno in energijsko najbolj obremenjeni, zato so bili opazovani časovni poteki prenapetosti in termične obremenitve odvodnikov.

Energetski transformator je najdražji del vgrajene opreme v transformatorski postaji, zato je okvara transformatorja "težko" sprejemljiva. Zato so prenapetostni odvodniki nameščeni tudi v točki spoja kablovoda, ki povezuje transformator z zbiralkami in s priključki energetskega transformatorja.

Opazovana veličina	Napetost na spoju nadzemnega daljnovoda s kablom
	Energija odvodnika pri spoju nadzemnega daljnovoda s kablom
	Napetost na priključkih transformatorja

Tabela 5.12: Opazovane veličine

5.4.2 Vpliv velikosti temenske vrednosti in oblike udarnega vala

Raziskan je bil vpliv velikosti temenske vrednosti in oblike udarnega tokovnega in napetostnega vala, na prenapetosti in energijsko obremenjenost odvodnikov.

Ob privzeti temenski vrednosti, smo spreminjali obliko tokovnega udarnega vala (Tabela 5.13).

Udarni tokovni val	Temenska vrednost [kA]	Oblika [μ s]		
	14,33	4/10	8/20	12/30

Tabela 5.13: Oblike simuliranih udarnih tokovnih valov

Ugotovljeno je bilo, da oblika udarnega tokovnega vala ne vpliva bistveno na maksimalno prenapetost na priključkih transformatorja, medtem ko maksimalna prenapetost ob spoju nadzemnega daljnovoda s kablovodom močno raste s strmino udarnega tokovnega vala. Strmina udarnega vala se večja z naraščanjem temenske vrednosti in s krajšanjem čela udarnega vala. Vpliv strmine na velikost prenapetosti razloži Enačba (5.5), v kateri odvod toka po času predstavlja strmino udarnega tokovnega vala.

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (5.5)$$

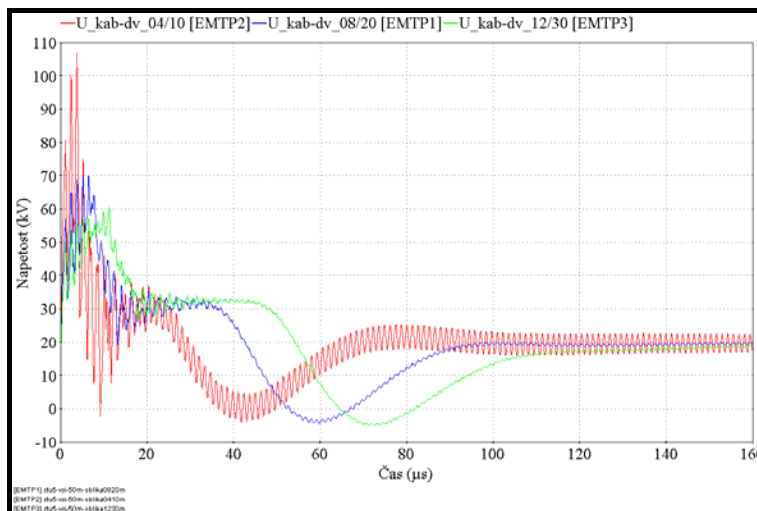
Absorbirana energija v odvodniku na stebru se večja z dolžino trajanja hrbta udarnega vala, vendar so razlike zelo majhne. Vrednost absorbirane energije (približno 750 J) je v primerjavi s kumulativno energijsko zmogljivostjo odvodnika $E=110$ kJ majhna (odvodnik z $U_r=20$ kV in energijsko sposobnostjo 5,5 kJ/kV $_{Ur}$). To pomeni, da udarni tokovni val, s temensko vrednostjo 14,33 kA, odvodnika termično ne ogroža.

Za nadaljnje simulacije je bila privzeta oblika udarnega tokovnega vala 8/20 μ s, ki je standardna oblika za preskušanje odvodnikov.

Temenske vrednosti udarnega tokovnega vala so povzete po Tabeli 5.11. Velikost temenske vrednosti udarnega tokovnega vala ne vpliva bistveno na maksimalno prenapetost na priključkih transformatorja, medtem ko maksimalna prenapetost ob spoju nadzemnega daljnovoda s kablovodom

močno raste s temensko vrednostjo udarnega tokovnega vala. Razlog je v naraščanju strmine s temensko vrednostjo udarnega tokovnega vala.

Absorbirana energija v odvodniku z amplitudo narašča in je za stopnjo tveganja 5% največja. Za nadaljnje simulacije je bil privzet udarni tokovni val oblike 8/20 μs , s temensko vrednostjo, ki ustreza stopnji tveganja 5%.



Slika 5.10: Prenapetost ob spoju nadzemnega daljnovoda s kablovodom, glede na obliko udarnega tokovnega vala

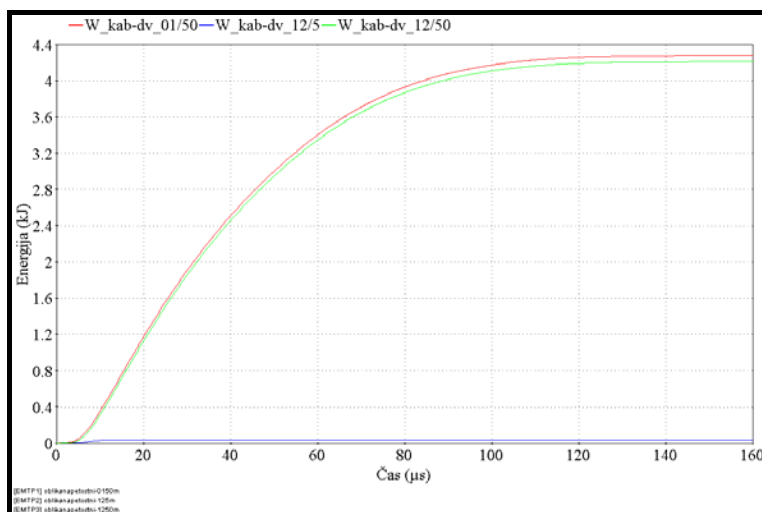
Opravljenе so bile tudi simulacije z napetostnim udarnim valom. Ob privzeti temenski vrednosti udarnega vala, ki je enaka zdržni napetosti izolacije (125 kV), se je spreminjala oblika napetostnega udarnega vala.

Udarni napetostni val	Temenska vrednost [kV]	Oblika [μs]		
	125	0,1/50	1,2/50	1,2/5

Tabela 5.14: Oblike simuliranih udarnih napetostnih valov

Oblika udarnega napetostnega vala ne vpliva bistveno na maksimalne prenapetosti na opazovanih kritičnih mestih. Zaradi zelo velike strmine čela udarnega vala 0,1/50, ki je skoraj pravokoten so časovni poteki prenapetosti zelo "kosmati".

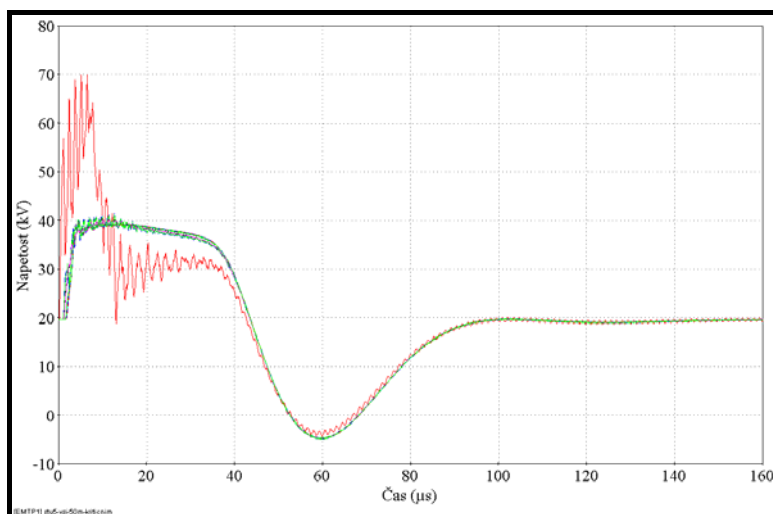
Absorbirana energija v odvodniku (Slika 5.11) je v največji meri odvisna dolžine trajanja hrbta udarnega vala. Energijska obremenjenost odvodnika (za konkretni primer je približno 4,2 kJ) je ob udarnem napetostnem valu 0,1/50 μs ali 1,2/50 μs mnogo višja, kot pri udarnem tokovnem valu, vendar manjša od njegove energijske sposobnosti E (110 kJ).



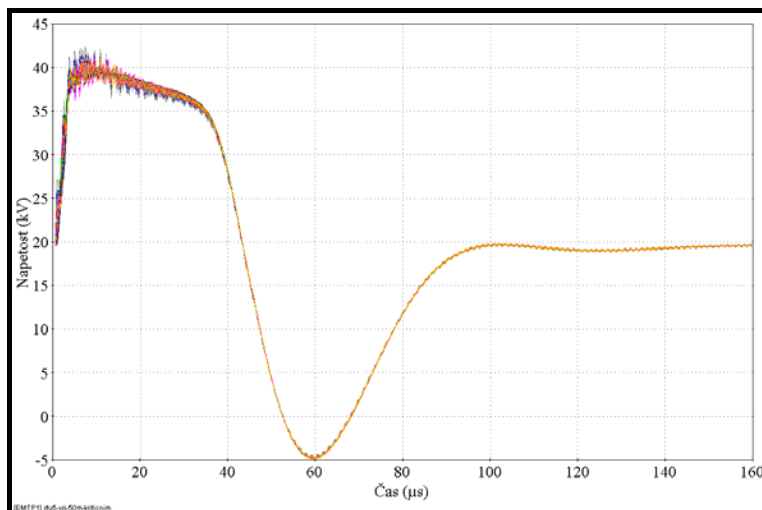
Slika 5.11: Absorbirana energija v odvodniku, na prehodu nadzemnega voda v kablovod v odvisnosti od oblike udranega vala

5.4.3 Vpliv števila odvodnikov na velikost prenapetosti in njihove termične obremenitve

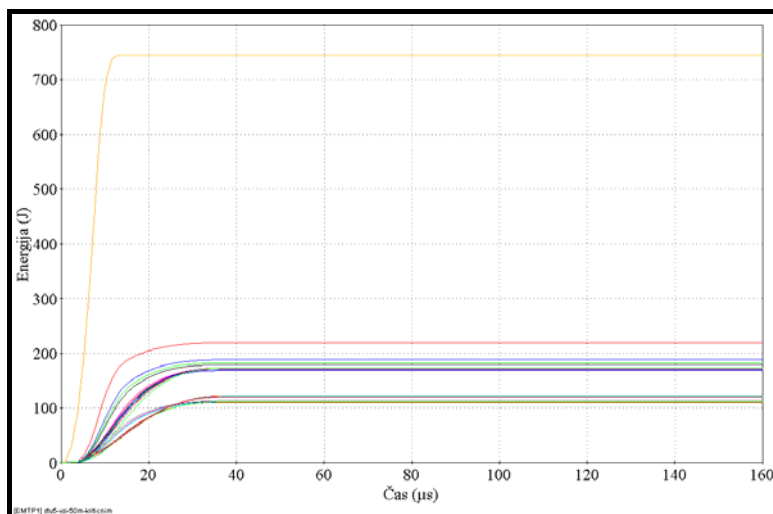
Odvodniki so običajno nameščeni ob prehodu nadzemnega voda v kablovod, v neposredni bližini transformatorja in pa v stikalni celicah. V tem poglavju je prikazano, kakšne so prenapetostne razmere znotraj 20 kV stikališča in kako se energija udarnega vala porazdeli v odvodniku na prehodu zračni vod-kablovod in v odvodnikih, ki so nameščeni v 20 kV stikališču. Odvodnik, ki je nameščen na prehodu zračni vod-kablovod, je ob atmosferski razelektritvi energijsko najbolj obremenjen, saj ta prevzame nase največji del energije. Preostala napetost na temu odvodniku potuje po kablovodu naprej vse do stikalnih celic. Zaradi sprememb valovnih upornosti, pride v stikalnih celicah do napetostnih odbojev, ki pa jih omejujejo odvodniki, ki so nameščeni v stikalnih celicah. Odvodniki, ki so nameščeni v stikalnih celicah, so si zaradi majhnih gabaritov stikalnih celic relativno blizu, zato se njihove zaščitne cone prekrivajo med seboj. Na Slikah od 5.12 do 5.14 so prikazane prenapetostne razmere in termične obremenitve odvodnikov za napetostni udar 125 kV 1,2/50 μ s, ko so v vsaki stikalni celici 20 kV stikališča nameščeni prenapetostni odvodniki. Iz slik je lepo razvidno, da so tako prenapetostne razmere, kakor tudi termične obremenitve največje na prehodu zračni vod-kablovod. V nobenem primeru pa ni ogrožena izolacija naprav, kakor tudi termična stabilnost odvodnikov.



Slika 5.12: Potek prenapetosti na prehodu zračni vod-kablovod

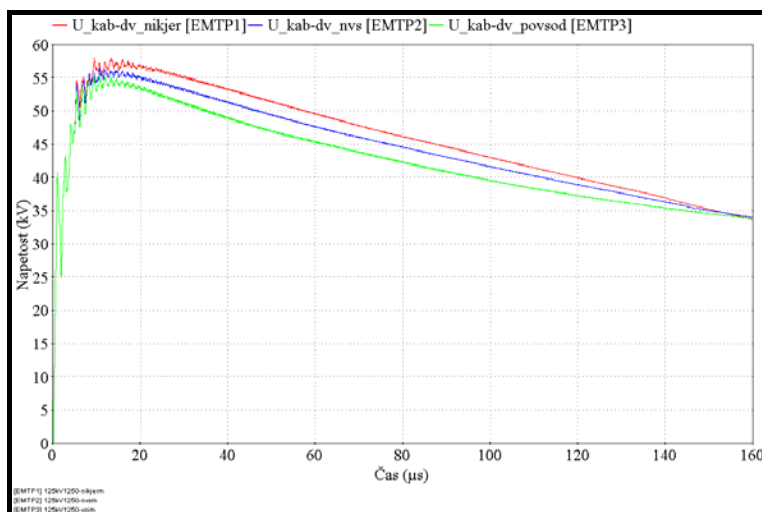


Slika 5.13: Potek prenapetosti v 20 kV stikališču (v vseh celicah so odvodniki)

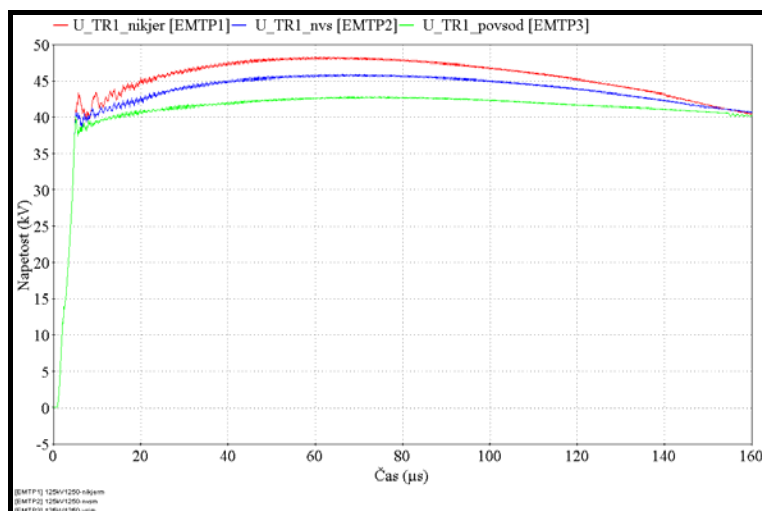


Slika 5.14: Absorbirana energija v odvodniku na prehodu zračni vod-kablovod in v odvodnikih v 20 kV stikališču

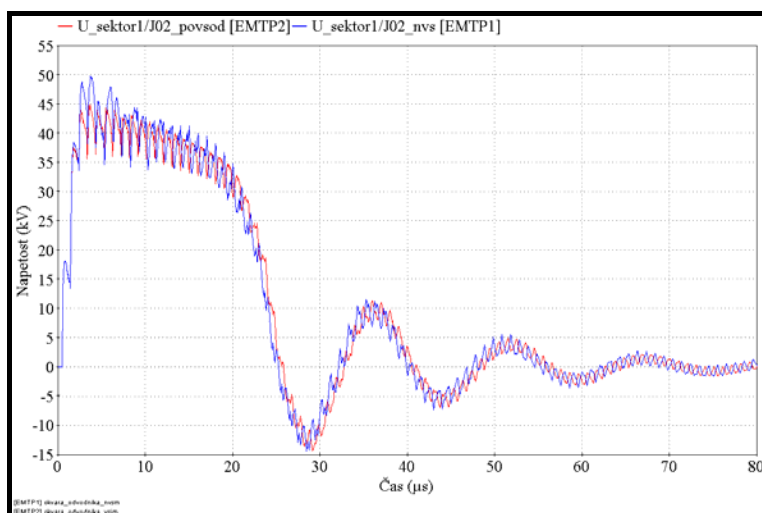
Na Slikah od 5.15 do 5.18 so prikazane primerjave prenapetostnih razmer in termičnih obremenitev za različno število prenapetostnih odvodnikov v 20 kV stikališču in napetostni udar 125 kV 1,2/50 μ s.



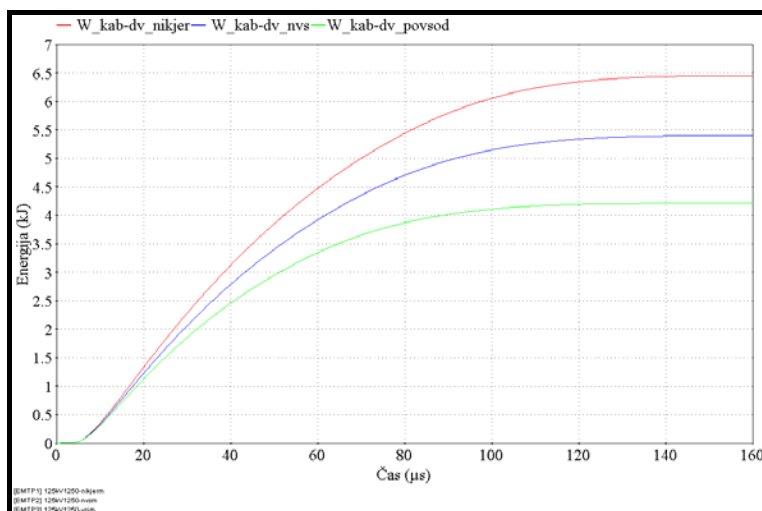
Slika 5.15: Potek prenapetosti na prehodu zračni vod-kablovod za različno št. odvod. v SN stikališču



Slika 5.16: Potek prenapetosti na transformatorju ob različnem št. odvod. v SN stikališču



Slika 5.17: Potek prenapetosti na sektorju zbiralk 1, ob okvari odvodnika na stebru, ko so odvodniki v vsaki stikalni celici in ko je na vsaki sekciji le en odvodnik na fazo



Slika 5.18: Absorbirana energija v odvodniku, na prehodu nadzemnega voda-kablovod, pri različnem številu celic z odvodniki

Rezultati računalniških simulacij so pokazali, da je izolacija SN naprav učinkovito ščiteni tudi takrat, ko v stikalnih celicah ni prenapetostnih odvodnikov. Razlog je v dovolj dolgi zaščitni coni odvodnika na stebru in pri transformatorju. Toda, zaradi možne odpovedi delovanja odvodnika na stebru, različnih obratovalnih stanj stikalnih celic (izključena) in pa relativno nizke cene odvodnikov, se priporoča, da se odvodnike vgradi v vse stikalne celice. Kot so pokazali rezultati simulacij, so termične obremenitve odvodnikov znotraj 20 kV stikališča relativno nizke. To pomeni, da je ob pravilni izbiri njihove nazivne napetosti njihova življenjska doba daljša od odvodnikov, kateri so vgrajeni na stebru.

	NIKJER		NVS		POVSOD	
Število odvodnikov	0		12		42	
Cena [EUR]	0		840		2940	
U_TR1_max [kV]	48	38%	46	37%	43	34%
U_kab-dv_max [kV]	57	46%	56	45%	54	43%
W_kab-dv_max[kJ]	6,4	29%	5,4	24%	4,2	19%

Tabela 5.15: Podatki o kritičnih veličinah glede na število odvodnikov

6. PRESKUŠANJE ODVODNIKOV

Da odvodniki izpolnjujejo določene obratovalne zahteve ter mehansko in izolacijsko trdnost, jih je potrebno preskusiti. V primeru, da gre za nov tip odvodnika je potrebno na njem opraviti tipske preskuse (*Type tests*). Ti so obsežni, zamudni in zahtevni glede merilne opreme. Običajno se opravijo v laboratoriju, ki je za te preskuse pooblaščen. Če tipski preskusi dajo pozitivne rezultate, lahko proizvajalec prične s serijsko proizvodnjo. Na koncu izdelave odvodnika, ga je potrebno kosovno (*Routine tests*) preskusiti. S kosovnimi preskusi se preveri kvaliteta izdelave odvodnika. Ti preskusi niso tako obsežni kot tipski preskusi. V primeru, da kupec zahteva prevzemne preskuse (*Acceptance tests*) na odvodnikih, se ti opravijo ob prisotnosti kupca oz. pooblaščen osebe v VN laboratoriju pri proizvajalcu odvodnikov. Prevzemni preskusi odvodnikov so enaki kosovnim preskusom. Vsi preskusi: tipski, kosovni in prevzemni se opravijo v skladu s standardom IEC 60099-4 v katerem so podrobno opisani postopki za vsako posamezno meritev.

6.1 Tipski preskusi (Type tests)

Na koncu razvoja konstrukcije nekega odvodnika, je potrebno s tipskimi preskusi preveriti, ali ta odvodnik ustreza določenemu standardu (npr. IEC 60099-4). Zato se v ta namen opravijo naslednji preskusi:

- ⇒ ***Dielektrični preskus ohišja odvodnika*** z udarno atmosfersko napetostjo v suhem in v mokrem z izmenično napetostjo industrijske frekvence (***Insulation withstand test on the arrester housing, IEC 60099-4, točka 10.8.2***) pokaže, ali zunanja izolacija odvodnika zdrži vse napetosti in prenapetosti, ki se bodo pojavile med obratovanjem odvodnika v omrežju.
- ⇒ ***Meritev preostale napetosti na odvodniku (Residual voltage test, IEC 60099-4, točka 10.8.3)*** potrdi, da zaščitni nivo odvodnika ni višji od garantiranega.
- ⇒ ***Preskus z dolgim tokovnim udarom (Long duration current impulse withstand test, IEC 60099-4, točka 10.8.4)*** je izveden z namenom, da se potrdi termična in dielektrična zdržnost odvodnika. Med preskusom ne sme priti do poškodb ohišja odvodnika, preskoka in porušitve odvodnika.
- ⇒ ***Preskus staranja v slani megli (Weather ageing test, IEC 60099-4, točka 10.8.14)***.
- ⇒ ***Preskus umetnega staranja (Accelerated ageing test of the resistor blocks, IEC 60099-4, točka 8.5.2)*** se izvede z namenom, da se potrdi pričakovana življenjska doba odvodnika. Preskus se izvede pri 115 °C v trajanju 1000 ur pri napetosti, ki je večja od trajne obratovalne napetosti U_c . V teh pogojih se opazuje, če in za koliko se povečujejo izgube v odvodniku v njegovi življenjski dobi. Če med preskusom ne pride do povišanja izgub v odvodniku, to pomeni, da ni prišlo do staranja odvodnika.
- ⇒ ***Pri preskusu med obratovanjem (Operating duty test, IEC 60099-4, točka 10.8.5)*** se analizirajo naslednje pomembne veličine odvodnika:
 - ***Referenčni tok (Reference current, I_{ref})***, to je temenska vrednost ohmske komponente toka pri katerem se meri *referenčna napetost*. Referenčni tok naj bo dovolj velik, da se pri meritvi referenčne napetosti odpravi vpliv stresane kapacitivnosti odvodnika. Referenčni tok določi proizvajalec odvodnika. Običanje vrednosti referenčnega toka za SN odvodnike znašajo od 1,0 do 5,0 mA.
 - ***Referenčna napetost (Reference voltage U_{ref})*** je definirana kot napetost industrijske frekvence pri kateri teče referenčni tok. U_{ref} je definirana kot temenska vrednost napetosti deljena s $\sqrt{2}$.

- **Nazivna napetost odvodnika (Rated Voltage U_r)** je najvišja dovoljena r.m.s. vrednost napetosti industrijske frekvence za katero je odvodnik dimenzioniran in zagotavlja, da bo odvodnik ob nastanku časne prenapetosti zanesljivo zdržal termične obremenitve.

Odvodnik uspešno prestane simuliran preskus obratovanja, če je med preskusom obratovanja dosežena termična stabilnost odvodnika, če se po preskusu obratovanja preostala napetost odvodnika ne poveča za več kot 5% in če ni prišlo do nobenih poškodb izolacije in preskokov čez ohišje odvodnika.

- ⇒ **Preskus z napetostjo industrijske frekvence v odvisnosti od časa** pokaže, ali je odvodnik odporen na časne prenapetosti (termična stabilnost).
- ⇒ **Preskus s kratkostičnim tokom (Short-circuit test procedure, IEC 60099-4, točka 10.8.7).**
- ⇒ **Merjenje delnih razelektritev (Internal partial discharge test, IEC 60099-4, točka 10.8.8).**
- ⇒ **Preskus z upogibnim momentom (Test of the bending moment, IEC 60099-4, točka 10.8.9).**
- ⇒ **Preskus tesnenja (Moisture ingress test, IEC 60099-4, točka 10.8.13).**
- ⇒ **Tlačni preskus (Pressure-relief)** je namenjen odvodnikom s porcelanskim ohišjem. Ti odvodniki imajo prigrajeno tlačno napravo katere naloga je uravnavanje tlaka znotraj ohišja odvodnika. Odvodniki, kateri imajo ohišje izdelano iz umetnih materialov nimajo tlačne naprave.
- ⇒ **Preskus onesnaženja odvodnika (Artificial pollution test)** nazorno pokaže, da onesnažena zunanost odvodnika (nelinearna porazdelitev potenciala) ne povzroči notranjih poškodb uporabnih blokov odvodnika. Pri ohišju iz silikonskega materiala se opravi dolgotrajni preskus.

6.2 Kosovni preskusi (Routine tests)

Kosovni preskusi se opravijo na vsakem odvodniku ali delu odvodnika, da se zagotovi kvaliteta izdelave odvodnika. Ti preskusi so naslednji:

- ⇒ **Meritev referenčne napetosti (Reference voltage measurement).** Merjena vrednost U_{ref} mora biti znotraj toleranc, ki jih predpiše proizvajalec odvodnika. Nižje vrednosti toleranc referenčne napetosti zagotavljajo boljšo termično stabilnost odvodnika ali povedano drugače. Višje kot so vrednosti U_{ref} pri rutinskih preskusih, manjše so izgube pri U_c , boljša je termična stabilnost odvodnika med obratovanjem v omrežju.
- ⇒ **Preostala napetost odvodnika (Residual voltage test)** se meri pri nazivnem odvodnem toku odvodnika in dokazuje, da ni prekoračen zaščitni nivo odvodnika.
- ⇒ **Meritev delnih razelektritev (Partial discharge test)** je namenjena, da se preveri ali so delne razelektritve znotraj odvodnika v predpisanih mejah. Meritev delnih razelektritev se opravi pri napetosti $1,05 \cdot U_c$. Dovoljen nivo delnih razelektritev je < 50 pC. Sicer pa kvalitetno izdelani odvodniki dosegajo nivo delnih razelektritev, ki je < 5 pC.
- ⇒ **Preskus tesnenja** se opravi samo pri odvodnikih, ki imajo porcelansko ohišje.

6.3 Posebni preskusi (Special tests)

V najnoveši izdaji standarda IEC 60099-4 so predpisani še posebni preskusi za odvodnike, ki imajo ohišje iz silikonskega materiala. Ti preskusi so naslednji:

- ⇒ **Preskus s preobremenitvijo (Overload test)** poteka tako, da se odvodnik obremeni s tako veliko napetostjo industrijske frekvence, da pride do termične porušitve odvodnika. Pri tej porušitvi ne sme priti do eksplozije in požara na odvodniku.
- ⇒ **Vremensko staranje odvodnika (Weather-aging test)** pokaže stanje izolacije odvodnika, ko je ta izpostavljena različnim vremenskim vplivom, kot so npr.: vročina, mraz, vlaga, dež, sneg, led, slana megla in UV sevanje. Preskus traja 5000 ur oz. 208 dni.
- ⇒ **Preskus na UV sevanje (UV radiation)** se opravi tako, da se navlažen izolacijski material (silikon) za 1000 ur izpostavi UV sevanju. Iskušnje so pokazale, da UV sevanje silikonu celo izboljšuje hidrofobičnost.
- ⇒ **Preskus na nizke temperature (Deep temperature)** se opravi pri temperaturi $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, pri tem pa ne sme priti do poslabšanja električnih in mehanskih lastnosti. Prav tako se opravi ciklični test odvodnika pri $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, ko se odvodnik obda z ledom. Tudi v tem primeru velja, da ne sme priti do poškodb silikonske izolacije.
- ⇒ **Preskus na vlago (Humidity test)** se opravi pri vlažnosti zraka 90 % in traja 2 leti. Preskus mora pokazati, da prisotnost vlage ne vpliva na električne lastnosti odvodnika ali celo na njegovo porušitev.

6.4 Prezemni preskusi (Acceptance test)

Če pogodbeni določila zahtevajo prevzemne preskuse, jih je proizvajalec dolžan opraviti. Za prevzemne preskuse se iz celotnega kontingenta odvodnikov naključno izbere n odvodnikov. Število n se izračuna po naslednji formuli $n = \sqrt[3]{N}$, pri čemer pomeni n število ponovno preskušanih odvodnikov, N pa je število celotnega kontingenta odvodnikov. Na izbranih odvodnikih se nato ponovijo naslednje meritve:

- ⇒ **Meritev referenčne napetosti (Reference voltage measurement),**
- ⇒ **Preostala napetost odvodnika (Residual voltage test),**
- ⇒ **Meritev delnih razelektritev (Partial discharge test),**
- ⇒ **Kontrola (meritev) ohmske komponente uhajavega toka,**
- ⇒ **Preskus tesnenja,** ki se opravi samo pri odvodnikih, ki imajo ohišje iz porcelana,
- ⇒ **Kontrola dimenzij odvodnika in pribora,**
- ⇒ **Kontrola napisne ploščice na odvodniku.** Preveri se ali se podatki na napisni ploščici ujemajo s podatki o naročilu odvodnika. Na napisni ploščici morajo biti navedeni vsaj naslednji podatki:
 - ⇒ Ime proizvajalca,
 - ⇒ Tip odvodnika,
 - ⇒ Trajna obratovalna napetost U_c ,

- ⇒ Nazivna napetost U_r ,
- ⇒ Nazivna frekvenca,
- ⇒ Nazivni praznilni tok I_r ,
- ⇒ Nazivni zdržni kratkostični tok,
- ⇒ Razred praznitve dolgih vodov,
- ⇒ Leto proizvodnje in
- ⇒ Serijsko številko (za odvodnike z nazivno napetostjo nad 60 kV).

Če so rezultati opravljenih meritev oz. preskusov pozitivni; to pomeni, da so rezultati v skladu s standardom (npr. IEC 60099-4), z internimi zahtevami proizvajalca in so tudi primerljivi z rezultati rutinskih preskusov, kupec oz. pooblaščen oseba sprejme obravnavan kontigent odvodnikov. Po uspešno opravljenih meritvah se sestavi zapisniki o prevzemu. Priloga zapisnika naj vsebuje naslednje dokumente:

- ⇒ Rezultate prevzemnih preskusov,
- ⇒ Rezultate kosovnih preskusov,
- ⇒ Rezultate tipskih in posebnih preskusov,
- ⇒ Izjavo o skladnosti izdelka (odvodnika),
- ⇒ Dokazila o kvaliteti vgrajene opreme,
- ⇒ Dokazila o kalibraciji merilne opreme,
- ⇒ Certifikat o zagotavljanju kvalitete pri načrtovanju, proizvodnji, preskušanju in skladiščenju odvodnikov (ISO 9001) in
- ⇒ Ekološki certifikat ISO 14000.

7. ZAKLJUČEK

Prenapetostni odvodnik je pomemben element pri zagotavljanju zaščite pred prenapetostmi (atmosferskimi in stikalnimi), zaradi tega je pomembno, da je njegovo delovanje zanesljivo. V nasprotnem primeru je ogrožena izolacija naprav oz. zanesljivost obratovanja omrežja. Za zagotovitev zanesljivega delovanja prenapetostnega odvodnika je pomembna predvsem pravilna izbira njegove nazivne napetosti in energijske absorpcije. Nazivna napetost odvodnika mora biti izbrana tako, da je zaščitni nivo odvodnika čim nižji, hkrati pa ohmska komponenta uhajavega toka ne sme preseči vrednosti 0,1 mA.

Priporočljiva vrednost ohmske komponente toka pri U_{cov} pri novem odvodniku naj bi bila manjša od 0,1 mA, kar pri površini ZnO upora 20 cm^2 pomeni tokovno gostoto $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

V nasprotnem primeru se v odvodniku znatno povečajo izgube, posledica teh pa je pospešeno staranje odvodnika. Izbira nazivne napetosti tako predstavlja kompromis med izbiro zaščitnega nivoja in velikostjo uhajavega toka.

Pri izbiri nazivne napetosti odvodnika za slovenska SN distribucijska omrežja, je bilo na podlagi opravljenih meritev časnih prenapetosti privzeto, da je faktor zemeljskega stika, tako za omrežja, ki so ozemljena preko malega upora, kakor tudi za izolirana ali resonančno ozemljena omrežja, enak tj. $k = 1,73$. Z minimalno povišanim zaščitnim nivojem odvodnika, se znatno skrči množica različnih odvodnikov, ki so potrebni za skladiščenje. Tako ima na izbiro nazivne napetosti odvodnika vpliv le še čas trajanja zemeljskega stika. Za omrežja, ki so ozemljena preko malega upora in se okvara izklaplja, se privzame čas $t = 1 \text{ s}$. Za omrežja, ki pa so izolirana ali resonančno ozemljena in se okvara ne izklaplja, pa se privzame čas $t = 7200 \text{ s}$ (2 uri).

	Omrežja ozemljena preko malega upora Okvara se izklaplja	Izolirana in resonančno ozemljena omrežja Okvara se ne izklaplja
Faktor zemeljskega stika k	1,73	1,73
Čas trajanja časne prenapetosti $t_{U_{tov}} [\text{s}]$	1	7200

Tabela 7.1: Potrebni podatki za določitev nazivne napetosti odvodnika

V primeru, da se načrtuje prehod obratovanja omrežja, ki je ozemljeno preko malega upora v izolirano ali resonančno ozemljeno omrežje, je smotno izbrati nazivno napetost odvodnika za čas trajanja časne prenapetosti 7200 s (2 uri).

Po podatkih sistema za avtomatsko registracijo atmosferskih razelektritev SCALAR, so slovenska SN distribucijska omrežja izpostavljena visokemu keravnicihnemu nivoju. Zato se priporoča, da je **nazivni odvodni tok odvodnika $I = 10 \text{ kA}$, energijska sposobnost absorpcije minimalno $W' = 3,5 \text{ kJ/kV}_{U_c}$ in razred praznitve voda 1**. Za območja, ki so bistveno bolj izpostavljena atmosferskim razelektritvam (priporoča se uporaba sistema SCALAR), pa se predlaga odvodnike z **nazivnim odvodnim tokom $I = 10 \text{ kA}$, energijsko sposobnostjo absorpcije vsaj $W' = 5,5 \text{ kJ/kV}_{U_c}$ in razred praznitve voda 2**.

Analiza prenapetostnih razmer in termičnih obremenitev odvodnikov je pokazala, da odvodniki, ki obratujejo v zgoščen konfiguraciji, več kot učinkovito ščitijo izolacijo naprav, pri tem pa so njihove termične obremenitve zelo nizke.

V primeru, da je izolacija kablovoda ščitena samo na eni strani (npr. v točki nadzemni vod-kablovod), je ocenjena zaščitna cona odvodnika na 200 m. V primeru, da gre za postroj izrednega pomena, pa

delovna skupina CIGRE WG33 priporoča namestitve odvodnika na obe strani kablovoda že takrat, ko dolžina kablovoda preseže 50 m.

Da se izkoristi nizek zaščitni napetostni nivo ZnO odvodnika, je potrebno pri postavitvi le teh poskrbeti, da so povezave med faznim vodnikom in odvodnikom ter odvodnikom in ozemljilom kar se da kratke. Prav tako je bilo ugotovljeno, da so prenapetostne razmere na prehodu zračni vod-kablovod bistveno boljše pri koviskih stebrih, kakor pa pri lesenih drogovi. Za doseganje učinkovitejše prenapetostne zaščite, se predlaga, da se pri lesenih drogovi ozemljitveni priključek odvodnika izvede z dvema ozemljitvenima vrvema, ki sta nameščeni diametralno. S tem se pridobi večji geometrijski volumen, ki zmanjša valovno impedanco. Prav tako je pomembno, da upornost ozemljitve ne presega vrednosti $5\ \Omega$, kot je zapisano v tehničnih predpisih. V izrednih pogojih (kraški teren, itd.), pa naj ne presega vrednosti $10\ \Omega$, saj so v nasprotnem primeru napetostne obremenitve izolacije med ekranom in plaščem kablovoda prevelike, še posebno takrat, ko je ekran kablovoda ozemljen samo na strani odvodnika v točki prehoda zračni vo-kablovod.

Na koncu je potrebno še opozoriti, da samo odvodniki, ki so kvalitetno projektirani, izdelani in preskušeni npr. v skladu s standardom IEC 60099-4, zagotavljajo učinkovito prenapetostno zaščito, hrati pa tudi dolgo življenjsko dobo.

LITERATURA

- ⇒ Siemens: Metal-Oxide Surge Arresters, Fundamentals, Volker Hinrichsen,
- ⇒ Siemens: Katalog 3EK7 Medium Voltage Silicone Insulated Surge Arresters,
- ⇒ ABB: Dimensioning, testing and application of metal oxide surge arresters in medium voltage networks,
- ⇒ ABB: Katalog Surge arresters for medium-voltage applications,
- ⇒ Raychem: Katalog Metalloxid-Überspannungsabläiter,
- ⇒ Eti Elektroelement, d.d.: Katalog prenapetostnih odvodnikov,
- ⇒ IzoElektro, d.o.o.: Katalog prenapetostnih odvodnikov,
- ⇒ Stane Vižintin, univ. dipl. inž.: »Registracija napetostnih pojavov v SN distribucijskih omrežjih«, EIMV Ref: 1329, december 1996,
- ⇒ Karol Grabner ml.: »Koordinacija srednjenapetostne izolacije v RTP 110/20 kV s pomočjo računalniškega programa EMTP-RV«, diplomsko delo, 2007,
- ⇒ Babuder M. Promjene naponsko-strujnih karakteristika metal-oksidnih odvodnika prenapona kao posljedica udarnih strujnih opterećenja, Doktorska disertacija, Zagreb 1993
- ⇒ Janša M.: »Raziskava spodnjega dela $U-I$ karakteristike ZnO odvodnikov za potrebe diagnostike stanja,« EIMV, referat št.1180, november 1992
- ⇒ Dr. Janko Kosmač: »Metodologija določanja ogroženosti nadzemnih distribucijskih vodov z vidika atmosferskih razelektritev«, EIMV, referat 1643, april 2004,
- ⇒ IEC 60071-1, Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules, 2006-1,
- ⇒ IEC 60071-2, Insulation co-ordination Part 2: Application guide, 1996-12,
- ⇒ IEC TR 60071-4, Insulation co-ordination Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks 2004-06
- ⇒ IEC 60099-4, Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems, 2006-07,
- ⇒ IEC 60099-5, Surge arresters – Part 5: Selection and application recommendations, 2000-03
- ⇒ P. Chowduri, Electromagnetic Transients in Power Systems, Research Studies Press, Taunton, 1996,
- ⇒ Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, Ref. št. 63, CIGRÉ CE/SC 33 GT/WG 01 (Lightning), Paris, 1991,
- ⇒ L. Milanković, Tehnika visokog napona, Naučna knjiga, Beograd, 1987,
- ⇒ Tehnički priručnik, Končar, Zagreb, 1991,
- ⇒ Electrical Transmission and Distribution Reference Book, Westinghouse Electric Corporation, East Pittsburgh, 1950,
- ⇒ ATP RULE BOOK, Canadian/American EMTP User Group,
- ⇒ EMTP Course, Barcelona, November 12-14, 1997,
- ⇒ Power systems elektromagnetic transients simulation, Neville Watson and Jos Arrillaga, The Institution of Electrical Engineers in
- ⇒ Simulation and Analysis of Power Systems Transients using EMTP-RV, Volume I: user's manual,
- ⇒ Simulation and Analysis of Power Systems Transients using EMTP-RV, Volume II: device documentation.