

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**SUSTAV ZA ZAŠTITU NADZEMNIH VODOVA OD
ATMOSFERSKOG PRAŽNENJA**

Rijeka, rujan 2015.

Nikola Kosić

0069057431

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**SUSTAV ZA ZAŠTITU NADZEMNIH VODOVA OD
ATMOSFERSKOG PRAŽNENJA**

Mentor: mr. sc. Marijana Živić Đurović, v.pred.

Rijeka, rujan 2015.

Nikola Kosić

0069057431

TEHNIČKI FAKULET

Povjerenstvo za završne ispite
preddiplomskog stručnog studija elektrotehnike
Br.: 602-04/15-14/21
Rijeka, 06.03.2015.

Z A D A T A K

za završni rad

Pristupnik: Nikola Kosić

Matični broj: 0069057431

Lokalni matični broj: 12800008

Naziv zadatka: **SUSTAV ZA ZAŠTITU NADZEMNIH VODOVA OD ATMOSFERSKOG PRAŽNJENA**

Naziv zadatka na engleskom jeziku: **PROTECTION OF THE OVERHEAD POWER LINES FROM ATMOSPHERIC DISCHARGES**

Sadržaj zadatka:

Razvoj sustava za zaštitu od atmosferskih pražnjenja. Putni valovi. Zaštita nadzemnih vodova sa i bez zaštitnog užeta od atmosferskih pražnjenja. Odvođenje struje groma.

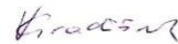
Zadano: 17.03.2015.

Mentor:



V. pred. mr. sc. Marijana Živić-Đurović

Predsjednica Povjerenstva:



Izv. prof. dr. sc. Vera Gradišnik

Zadatak preuzeo dana: 17.03.2015.



(potpis pristupnika)

Dostaviti:

- Predsjednica Povjerenstva
- Mentor
- Djelovođa Povjerenstva
- Evidencija studija
- Pristupnik
- Arhiva Zavoda

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Stručni studij elektrotehnike

Smjer: Elektroenergetika

IZJAVA:

Sukladno članku 9. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku stručnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci od lipnja 2011. godine izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad prema zadatku broj 602-04/15-14/21. pod naslovom „Sustav za zaštitu nadzemnih vodova od atmosferskog pražnjenja“, uz konzultacije sa mentorom mr.sc. Marijanom Živić Đurović, v.pred.

Nikola Kosić

Rijeka, rujan 2015.

Matični broj:

0069057431

Sadržaj :

1. UVOD	1
2. RAZVOJ SUSTAVA ZAŠTITE OD ATMOSFERSKOG PRAŽNJENJA.....	2
2.1. Izokeraunička razina i gustoća udara groma	2
2.2. Nastanak i razvoj atmosferskog pražnjenja	4
2.3. Strujne karakteristike groma	6
2.3.1. Tjemena vrijednost	6
2.3.2. Strmina	7
2.3.3. Naboj	8
2.3.4. Kvadratni impuls	8
2.4. Nadomještanje udarne struje groma	9
2.5. Posljedice prolaska udarne struje	11
3. PUTNI VALOVI.....	14
3.1. Oblici valova	15
3.2. Petersenovo pravilo	16
3.3. Razdvajanje vodova	17
3.3.1. Struje i naponi kod transformatorskih stanica	18
3.4. Utjecaj induktiviteta na putni val	23
3.5. Utjecaj kapaciteta na putni val	32
3.6. Titrajni krug.....	41
4. ZAŠTITA NADZEMNIH VODOVA SA I BEZ ZAŠTITNOG UŽETA OD ATMOSFERSKOG PRAŽNJENJA	46
4.1. Udar groma u nadzemni vodič bez zaštitnog užeta	46
4.2. Udar groma u nadzemni vodič sa zaštitnim užetom.....	49
4.2.1 Elektrogeometrijska metoda.....	49
5. ODVODNJA STRUJE GROMA	54
5.1. Utjecaj induktiviteta uzemljenja.....	56
6. ZAKLJUČAK	60
7. LITERATURA.....	61

1. UVOD

Atmosfersko pražnjenje je prirodna pojava u obliku velikog bljeska i njemu prateće grmljavine. Posljedice atmosferskog pražnjenja ili udara groma su razne direktno uočljive materijalne štete razaranja i požara, a među glavnim uzrocima ovih materijalnih šteta je pojava prenapona koji uzrokuje oštećenje električnih vodova i opreme. Prenaponi se javljaju između dviju točaka kao povišen napon koji stvara jako električno polje. Ukoliko je električno polje dovoljno jako dolazi do proboja izolacije odnosno oštećenja, a među glavnim uzročnicima prenapona je upravo udar groma.

Najčešći kvarovi kod električne opreme posljedice su prenapona koji se javlja zbog :

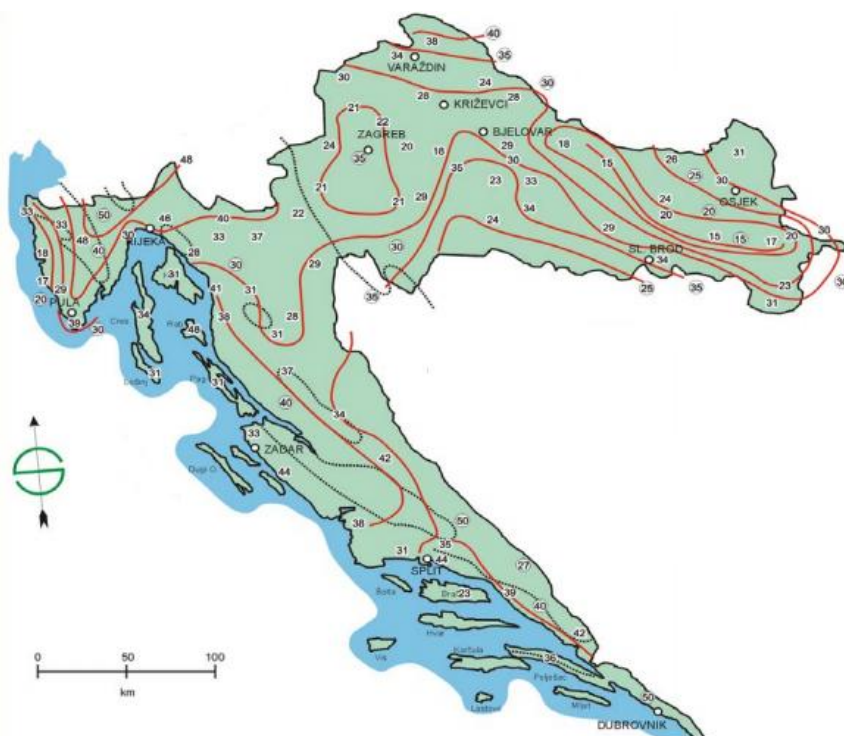
- Udara groma
- Raznih elektrostatskih pražnjenja
- Sklopnih djelovanja na elektroenergetskoj mreži (uklop/isklop, kratki spoj voda, priključenje i isključenje velikih induktivnih trošila)
- Smetnji elektroenergetskih instalacija
- Nuklearne eksplozije
- Frekvencijskih odašiljača (visokih i niskih frekvencija)

Atmosferski prenaponi su uzrokovani atmosferskim pražnjenjem na elemente elektroenergetskih sustava ili u njihovoj neposrednoj blizini. Uslijed direktnog atmosferskog pražnjenja javljaju se velike struje koje stvaraju visoke napone odnosno prenapone, a kod atmosferskog pražnjenja u blizini elektroenergetskih sustava javljaju se induktivni prenaponi koji su posebno štetni za mreže srednjeg i visokog napona. Zbog ovakvih prenapona potreban je sustav koji bi zaštitio elemente i opremu postrojenja.

2. RAZVOJ SUSTAVA ZAŠTITE OD ATMOSFERSKOG PRAŽNJENJA

2.1. Izokeraunička razina i gustoća udara groma

Puno faktora utječe na pojavu atmosferskog pražnjenja i nemoguće je točno predvidjeti kada će doći do njega. Međutim ako se promatra izokeraunička karta zemlje i usporedi godišnji broj grmljavinskih dana s obzirom na položaj u kojem se nalaze, dolazi se do zaključka da prosječan broj grmljavina raste ili pada ovisno o zemljopisnom položaju. Područje u blizini ekvatora ima veći broj godišnjih grmljavina, a područja koja su bliže polovima zemlje imaju manji broj godišnjih grmljavina. Konfiguracija tla kao i sastav zemljišta ne utječu bitno na mjesto udara groma. Pomoću ovih spoznaja okvirno se može odrediti očekivani broj atmosferskog pražnjenja u godini.



Sl. 2.1. Izokeraunička karta Hrvatske

Sa slike 2.1.[1] moguće je očitati broj grmljavinskih dana u godini za određena područja u Republici Hrvatskoj sa 50% vjerojatnosti.

Osim što je moguće predvidjeti broj grmljavinskih dana u godini, također je utvrđeno detaljnom analizom da su udari groma učestaliji za vrijeme proljetnih i ljetnih mjeseca, i to u poslijepodnevnim satima. Prikupljanjem ovakvih podataka omogućuje bolju organizaciju održavanja objekata i njihove sigurnosti.

Za projektiranje zaštite važno je znati broj udara groma na površini od 1 km^2 , a proučavanjem gromova utvrđeno je da se za vrijeme grmljavine na nekom području mijenja jakost električnog polja. Prilikom udara groma električno polje naglo oslabi, međutim antene koje bilježe jakost električnog polja su nepouzdana jer se električno polje ne mijenja samo udarom groma već i drugim atmosferskim aktivnostima.

Kako bi se točnije odredilo mogućnost udara groma uvode se optički brojači gromova. Oni slikaju olujno nebo te sa podacima o broju udara na nekom području, daju zaključak odnosa svih izbijanja i izbijanja prema želji. Taj odnos je na području umjerene klime 2 ili 3, dok kod tropskih krajeva iznosi 7. Pa prema ovim saznanjima izraz pomoću kojeg bi se mogao odrediti broj udara groma je:

$$N_s = N_i(0,1 + 0,35\sin\alpha) \cdot (0,4 \mp 0,2). \quad (2.1)$$

U formuli N_s je broj udara groma na 1 km^2 tijekom godine, α kut geografske širine, N_i je razina izokerauničke vrijednosti određenog područja. Za naše prostore se uzima vrijednost od 6 do 7 udara groma tijekom godine. Međutim ovakav podatak nije dovoljno precizan pa se za projektiranje zaštite koriste i druge metode.

2.2. Nastanak i razvoj atmosferskog pražnjenja

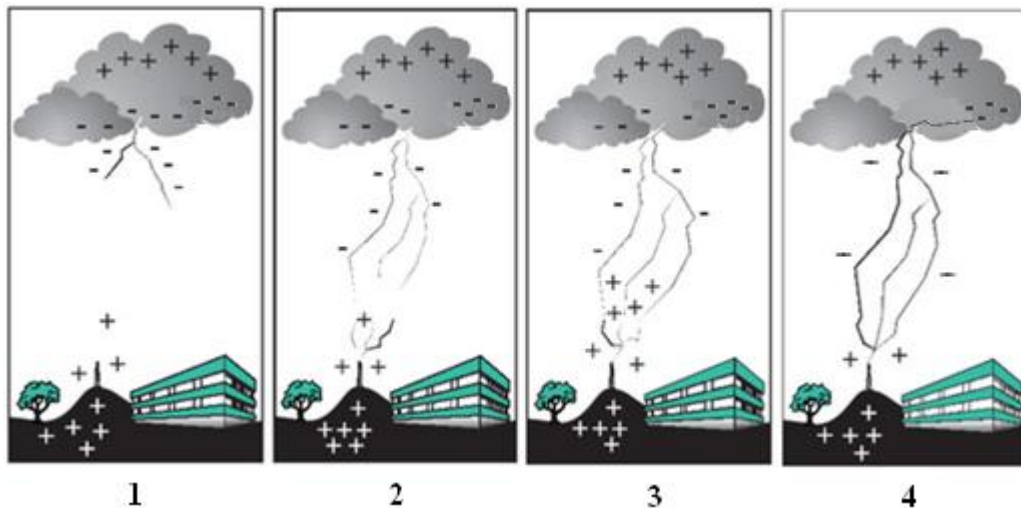
Grom je naziv za tok atmosferskog pražnjenja koje se pojavi između naelektriziranog oblaka i zemlje. Olujni oblaci pod nazivom kumulonimbus (lat. kišna gomila) nastaju za vrijeme toplog vremena kada se sa zagrijanog tla diže topao zrak. Taj zrak se hladi u višim slojevima atmosfere te se javlja kondenzacija vodene pare koja se potom može pretvoriti u vodene kapi i led. Prilikom dizanja toplog zraka prema kišnom oblaku dolazi do sudaranja kapljica i komadića leda sa toplim zrakom. To uzrokuje usitnjavanje kapi i njihovo negativno naelektriziranje i povratak u gornje slojeve oblaka.

Obično su veće kapi smještene u donjem djelu oblaka i one su uglavnom negativno nabijene, dok su manje kapi smještene u gornjem djelu oblaka i pozitivno nabijene. U oblaku se tako sakupljaju negativni i pozitivni naboji. Na slici 2.2.[2] pojednostavljeni je prikaz smještaja elektriciteta u oblaku te pozicija neutralne točke N u samom središtu oblaka.



Sl. 2.2. Olujni oblak

U središtu oblaka je neutralno polje, a kad se negativno ili pozitivno nabijen dio oblaka spoji sa neutralnom zemljom dolazi do pražnjenja. Ovakvim oblacima vlada jako električno polje i visoki naponi, a do pražnjenja će doći kada jakost električnog polja prekorači određene granice. Smatra se da je električno polje između naelektriziranog oblaka i zemlje homogeno, a razlika napona poprima vrijednost i do nekoliko desetaka milijuna volti. Konfiguracija tla također ima utjecaj na jakost električnog polja. Razvoj izbijanja groma može se podijeliti na četiri faze. Na slici 2.3.[2] su prikazane razvojne faze izbijanja groma koje su detaljno opisane u nastavku.



Sl. 2.3. Podjela atmosferskog pražnjenja na faze

- Prva faza

Ukoliko se neki objekt ili predmet nalazi na nekoj visini na zemlji u obliku elipsoide, jakost električnog polja raste u ovisnosti o omjeru velikog i malog polumjera elipsoide (ako je omjer 30, jakost električnog polja može rasti i do 300 puta). Kada je probojna čvrstoća zraka nadmašena od strane električnog polja dolazi do ionizacije zraka. Kada slobodni elektroni prijeđu kritičnu granicu stvaraju se lokalna pojačanja električnog polja koja su popraćena pražnjenjem sa tankim kanalima u obliku razgranate lepeze trajanja nekoliko minuta. Ovakvu pojavu nazivamo korona i ona obično prethodi konačnom pražnjenju. Jačina struje u ovoj fazi je vrlo mala, reda veličine mA .

- Druga faza

Ovakvim pražnjenjem energija protjecanja struje kroz tanke kanale pretvara se u toplinu, pomoću koje se povećava ionizacija zraka. Tako pojačavajući provodljivost stvara se predvodnik, odnosno jako naelektriziran svjetlosni kanal dužine od 5 do 50 m . Na vrh predvodnika nakon nekoliko trenutaka započinje novi skok u promijenjenom smjeru. Jačina struje u predvodniku je reda nekoliko stotina ampera. Uvjet za stvaranje predvodnika je dovoljno velika struja pražnjenja u prvoj fazi.

- Treća faza

Kada se predvodnik dovoljno približi nekom objektu ili zemlji javljaju se lepeze tankih kanala od glave predvodnika do objekta, odnosno zemlje. Kako se predvodnik približava zemlji privlači suprotne naboje sa nekog uzemljenog objekta. U tom trenutku dolazi do spajanja kanala sa uzlaznim izbijanjem i u kanalu se neutraliziraju naboji suprotnog predznaka. To pražnjenje traje dok se potpuno neutralizira količina elektriciteta u kanalu (70 do 100 μ s), a popraćeno je svjetlosnim bljeskovima. Tada zemljom protječe jaka udarna struja groma (smjera od zemlje prema oblaku) i električno polje naglo slabi.

- Četvrta faza

Obično je nedovoljno jedno glavno pražnjenje da bi se ispraznio elektricitet nakupljen u oblaku pa nakon jednog slijedi više uzastopnih udara groma. Ukoliko se sljedeći predvodnici formiraju nakon desetina *ms* od prestanka prvog, uspostavljanje kanala je puno brže. Takav predvodnik se kreće po već ioniziranom kanalu, i njegov je intenzitet slabiji od prvog. Čak 40 % pražnjenja se sastoji od višestrukih udara, sa tri do četiri uzastopnih udara.

2.3. Strujne karakteristike groma

Vrijednost struje groma je najvažnija veličina prilikom projektiranja zaštite jer ona protječe objektom za vrijeme udara. Ona može biti, ovisno o naboju oblaka koji se ispraznio, pozitivnog ili negativnog polariteta. Poznavajući osnovne karakteristike struja, može se kvalitetnije pristupiti projektiranju zaštite. Postoje više značajnih karakteristika struja udara, a najvažnije su opisane u nastavku.

2.3.1. Tjemena vrijednost

Valove koje stvara negativna struja razlikuju se po obliku. Tjemena vrijednost negativnog vala prilikom drugog izbijanja je manja od prvog izbijanja. Struja pozitivnog udara se najčešće sastoji od samo jednog izbijanja koje traje od 0,1 do 0,2 s te njezina tjemena vrijednost poprima jačinu veću i od 1000 *kA*. Upravo je tjemena vrijednost ili amplituda jedan od značajnijih veličina strujnog vala. Dakle ta vrijednost struje je maksimalna trenutna vrijednost i označavamo je sa *I_g*.

Svaki udar groma ima drukčiju vrijednost struje I_g i teško ju je predvidjeti pa se zbog toga svakoj tjemenoj vrijednosti dodaje određena vjerojatnost da će one biti prekoračene, odnosno koliko će puta trebati udariti grom da se vrijednost prekorači. Vjerojatnost za ovu pojavu je dobivena prikupljanjem podataka i promatranjem. Pa tako kod pozitivnih struja udara groma amplitude iznad 150 kA su očekivane u 10% slučajaja, a kod negativnih struja će premašiti vrijednost 50 kA u 10% slučajaja. Dakle negativne struje imaju veću amplitudnu vrijednost od pozitivnih. Ovakve vrijednosti vjerojatnosti dobivaju se izrazom :

$$\log y = 2 - \frac{I_g}{60}. \quad (2.2)$$

Podatak o vrijednosti struje udara I_g omogućuje izračun maksimalnog pada napona koji se može očekivati na nekom otporniku R na zemlji izrazom:

$$U_R = I_g \cdot R. \quad (2.3)$$

2.3.2. Strmina

Budući da struja udara groma ima impulsni oblik, ona vrlo brzo postigne svoju maksimalnu vrijednost te se nakon toga postepeno smanjuje. Takve nagle promjene su pogodne za stvaranje promjenjivih magnetskih polja, uslijed čega se stvaraju opasni samoindukcijski naponi. Zbog različitih promjena brzina struja, kaže se da postoje struje sa velikom i malom strminom. Upravo negativne struje imaju manju amplitudu a veću strminu, dok pozitivne imaju nešto manju strminu. Računanje strmine se izvodi operacijom derivacije:

$$s = \frac{di}{dt} \left[\frac{kA}{\mu s} \right]. \quad (2.4)$$

Pomoću saznanja strmina pojedinih struja groma moguće je odrediti induktivni pad napona kroz pogođeni vodič izrazom:

$$U_L = L \left(\frac{dI_g}{dt} \right). \quad (2.5.)$$

2.3.3. Naboj

Kako bi se valjano dimenzionirala instalacija za odvodnju groma, potrebno je poznavati i naboj koji će se osloboditi prilikom atmosferskog pražnjenja. Ta količina naboja je reda veličine nekoliko desetaka do nekoliko stotina kulona i ona prikazuje količinu energije koja se stvara na mjestu udara u obliku pojave električnog luka. Dakle ova energija se pretvara u toplinsku i tali vrh gromobrana ili mjesta udara a računamo je izrazom:

$$W = Q \cdot U_{AK}, \quad (2.6.)$$

gdje je pretvorena energija W , umnožak oslobođenog naboja Q i pad katodnog napona označenog sa U_{AK} . Udar groma relativno kratko traje i rijetko možemo naći vidljivo mjesto udara na gromobranskoj zaštiti jer je energija pretvorbe vrlo mala. Prilikom dimenzioniranja gromobranske zaštite uzima se niža vrijednost naboja od 50 As, dok se kod strožih zahtjeva uzima vrijednost od 300 As.

2.3.4. Kvadratni impuls

Prolaskom struje groma kroz vodiče gromobranske instalacije, poraste temperatura vodiča zbog visoke struje i otpornosti vodiča. Energija koja će se trošiti na vodiču računa se kao umnožak između kvadrata impulsa udarne struje I_g , i otpora vodiča R izrazom:

$$W = R \cdot \int I_g^2 dt [Ws]. \quad (2.7.)$$

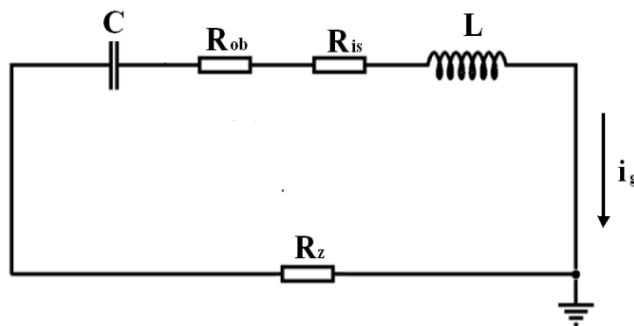
Prilikom proračuna zaštite uzima se još i vrijednost trajanja struje groma (s), otpor valnog kanala (Ω) te broj udara. Odabir ovih vrijednosti uvelike određuje sigurnost i ekonomičnost zaštite. U tablici 2.1. navedene su karakteristične vrijednosti struja udara, s time da su podaci u prvim redovima namijenjeni za srednje vrijednosti, a u trećem za visoke vrijednosti.

Postotak vjerojatnosti prekoračenja	Tjemena ili amplitudna vrijednost struje	Oslobođeni naboj	Strmina	Kvadratni impuls	Trajanje udara
$P\%$	$I_g [kA]$	$Q[As]$	$s \left[\frac{kA}{\mu s} \right]$	$[kA^2]$	$[s]$
50	26	9	38	0,54	0,09
10	73	69	54	1,5	0,56
1	180	330	97	35	2,7

Tablica 2.1 Karakteristične vrijednosti struje udara.

2.4. Nadomještanje udarne struje groma

Kako bi se moglo bolje shvatiti razvoj struja groma, potrebno je stvoriti uvjete koji se javljaju prilikom udara pomoću neke sheme. Takve sheme omogućuju da se u laboratorijskim uvjetima promatraju i proučavaju prilike struje groma. Sheme se sastoje od kondenzatora C , koji nadomještaju izvor struje jakog električnog polja koje se javlja između zemlje i oblaka. Kondenzator je napajan induktivitetom L , kojim se struja groma probija kroz zrak prema zemlji, a u krugu se još javljaju otpori uzemljenja R_z koji se toj struji suprotstavlja zajedno sa otporom oblaka R_{ob} i otporom puta groma R_{is} .



Sl. 2.4. Shema nadomještanja puta prilikom izbijanja

Prve reprezentativne nadomjesne sheme se pojavljuju šezdesetih godina dvadesetog stoljeća i to od strane C.F.Wagnera. Njegova se shema sastoji od vodilice sa velikim unutarnjim otporom koji je nadomještao otpor izvora struje udara groma.

Takve vodilice se sastoje od kondenzatora i induktiviteta koji tvore četveropol. Za otpor izvora struje groma Z_0 se uzima vrijednost od 1500Ω . Ako struja groma naiđe na otpor manje vrijednosti od ovog, ona se neće bitno promijeniti. Pa tako prilikom udara groma struja pogodi objekt koji se nalazi na iznosu specifičnog otpora od $200 \Omega m$, a njegov otpor uzemljenja $R_Z = 30 \Omega$ sa uzemljenim štapom duljine $3 m$. Uz pretpostavku da je $Z_0 = 1500 \Omega$ te da je struja groma $i_g = 100 kA$. Prilikom računanja uzima se u obzir da je R_Z pogođene zgrade u paraleli sa otporom vala Z_0 .

Prema ovome računamo da je pad napona na uzemljenju pogođenog objekta strujom groma i_g jednak:

$$iR_Z = i_g \cdot \frac{R_Z \cdot Z_0}{Z_0 + R_Z}, \quad (2.8.)$$

a struja:

$$i = i_g \cdot \frac{Z_0}{Z_0 + R_Z}. \quad (2.9.)$$

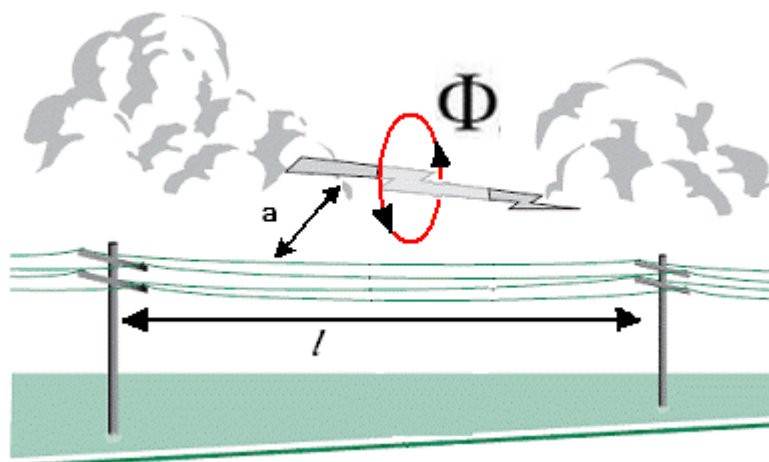
Odnosno, vidi se da ako je zanemaren (zbog njegove male vrijednosti) otpor uzemljenja R_Z (u odnosu na Z_0), struja kroz otpor uzemljenja je jednaka struji groma ($i=i_g$). Ako uvrstimo vrijednosti dobijemo iznos struje od $98 kA$. Ukoliko bi otpor uzemljenja bio veći tada bi struja groma potekla i drugim dijelovima šticeenog objekta, a ne samo uzemljenjem. Pa tako prilikom dimenzioniranja opreme uzemljenja treba paziti pri proračunu kod velikih vrijednosti otpor uzemljenja. Udarnu struju u laboratoriju nadomještamo strujnim generatorom koji imitira pravi način stvaranja struje groma, a kondenzator nabijen na neki napon se izbija prema nekom objektu preko omskog otpornika i induktiviteta. Upravo se namještanjem L i R dobiva željeni oblik struje koji bi odgovarao udarnoj struji groma.

2.5. Posljedice prolaska udarne struje

Usljed prolaska struje groma javljaju se električna i magnetska polja koja imaju dobre i loše osobine. Dobro je što omogućuju da na određenoj udaljenosti od kanala udarne struje saznaju njezine karakteristike. Pa tako jačinom električnog polja moguće je saznati vrijeme početka i način nastanka udara, a na osnovu jačine magnetske indukcije moguće je saznati jakost struje .

Prilikom dodira groma sa zemljom nestaje nastalo električno polje (između zemlje i nabijenih oblaka), a struja udara oko sebe stvara magnetsko polje koje djeluje magnetskom indukcijom na metalne dijelove koji se nalaze u blizini. Magnetizirajuće djelovanje, u nekoj blizini magnetskog polja indukcijom, se koristi za mjerenje udarne struje, a moguće je i bilježiti broj udara pomoću releja.

Iznos magnetskog polja je izrazito promjenjiv i ovisi o okolini kroz koju protječe udarna struja. Posljedica brzih promjena velikih iznosa magnetskog polja izaziva negativnu pojavu inducirana napona na metalnim zamkama koje se nalaze pod djelovanjem magnetskog polja. Zatvorena zamka može biti sačinjena od dalekovoda i zemlje te ukoliko u određenoj blizini teče struja groma koja stvara promjenjivo magnetsko polje kroz zamku. Tada se javlja inducirani napon, odnosno promjenjivo magnetsko polje između dalekovoda i zemlje. Na slici 2.5.[3] vidimo primjer stvaranja zamke sačinjene od dalekovoda i zemlje uslijed prolaska kanala struje groma.



Sl. 2.5. Primjer inducirana napona zbog prolaska struje groma

Jačina induciranog napona u zamci ovisi ponajprije o udaljenosti kanala struje groma i izoliranog vodiča kao i njezinoj duljini. Zamka se često pojavljuje u praksi između zaštitne cijevi i gromobranskog odvoda na zavojima transformatora te relejima.

Osim ovakvih električnih djelovanja atmosfersko izbijanje ima i druga djelovanja kao što su mehaničko, toplinsko, optičko te akustičko.

- Mehaničko djelovanje

Često se dogode slučajevi kada se uslijed atmosferskog pražnjenja zabilježe razaranja te oštećenja krova, dimnjaka i ostalih dijelova kuća kao i deformiranje instalacija. Zbog toga se kaže da struja groma ima silu koja je u mogućnosti mehanički pogubno djelovati na objekte. Upravo prolasku struje udara stvara se tlak koji kad se nađe u zatvorenom prostoru (kao što su pukotine u zidu i stupovima...) postaje puno jači i mehanička čvrstoća pogođenog objekta popusti. Postoji i drugi način mehaničkog djelovanja, kada struja udara vlastitim magnetskim poljem djeluje na zamku. Takva sila P je ovisna o razmaku između vodiča zamke a i duljine l , a iznosi približno kvadratu vrijednosti struje udara I_g :

$$P = \frac{\mu_0}{2\pi a} I_g^2 \cdot l \left[\frac{N}{m} \right]. \quad (2.10.)$$

- Toplinsko djelovanje

Kada predvodnik dotakne mjesto udara na zemlji, oslobađa se velika toplina koja rastali metalnu površinu mjesta udara. Međutim to nisu velika taljenja i često ih se u prirodi i ne nalazi jer se veći dio energije potroši zračenjem i tlačenjem okoline. Oslobađanje topline je upravo mjesto velikog prijelaznog otpora na koje naiđe udarna struja groma i rezultira jakim zagrijavanjem, pa i iskrenjem u početku, a razvojem uvjeta mogući su i požari te eksplozije.

- Optičko djelovanje

Svjetlosno djelovanje struje groma se sastoji od vodljive plazme koja je zagrijana na otprilike 3 000 °C, i tako isijava svjetlost. Plazma koja zrači svjetlošću je dimenzije od 5 do 30 *cm*, a struja groma prolazi kanalom promjera jednog milimetra.

- Akustično djelovanje

Vodljiva plazma je zapravo kanal prolaska udarne struje groma, zagrijan visokom temperaturom i stlačen pod visokim tlakom. Uslijed prestanka protjecanja struje zatočene vlastitim magnetskim poljem na mali presjek, radijalno se oslobađa tlak plazme. To oslobađanje je akustično djelovanje atmosferskog pražnjenja.

3. PUTNI VALOVI

Prilikom udara groma u nadzemni vod određenog elektroenergetskog sustava, javlja se raspodjela struje groma na desnu i lijevu stranu voda. Takva raspodjela struje čini putne valove promjenjivih napona i struja u ovisnosti o vremenu. Nadzemni vodovi po kojemu prolaze putni valovi sastoje se od omskog, kapacitivnog i induktivnog otpora te od odvoda voda. Međutim radi lakšeg i jednostavnijeg računanja, pretpostavljeno je da se valu suprotstavlja samo induktivni i kapacitivni otpor. Takav otpor nadzemnog voda označavamo sa Z i računa se izrazom $Z = \sqrt{L/C}$.

Ovaj način promatranja omogućuje da se neki putni valovi bilježe kao kretanje magnetskog polja, a neki kao kretanje električnog polja. Pa tako se za magnetska polja kaže da su strujni, a za električna da su naponski valovi.

Energija polja mijenja oblik iz magnetskog u električno i obrnuto, a to se dešava upravo na mjestima prijelaza između dva različita otpora. Ako se putni val kreće vodom valnog otpora Z_1 i prijelazi na vod valnog otpora Z_2 , on može promijeniti svoju vrijednost i oblik u točki njihovog spoja odnosno mjesta diskontinuiteta.

Razlikuju se tri vrste putujućih vala :

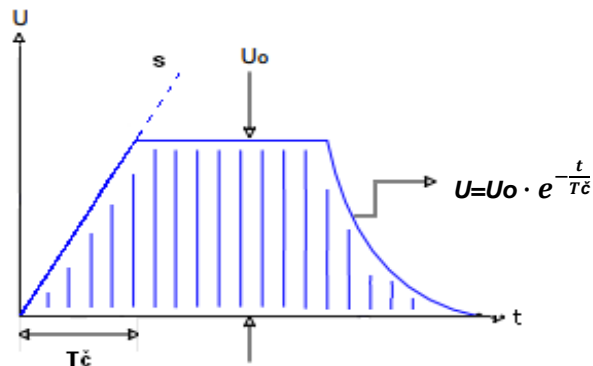
- Upadni ili nailazeći val (U_1), je onaj koji putuje prvim vodom prema drugom vodu,
- Reflektirajući val (U_r), je dio vala koji nije prešao u drugi vod već se odbio,
- Prolazni val (U_2), je dio upadnog vala koji je prešao u drugi vod.

Kolika će se vrijednost pretvoriti iz jednog u drugi oblik, odnosno kolika će se vrijednost upadnog vala podijeliti na reflektirani i prolazni val, ovisi o otporima vodova Z_1 i Z_2 . Ovakva podjela se koristi samo za jednostavnije računanje, dok su fizičke veličine u drugom vodu zapravo jednake izrazima: $U_2 = U_1 + U_r$, $i_2 = i_1 + i_r$.

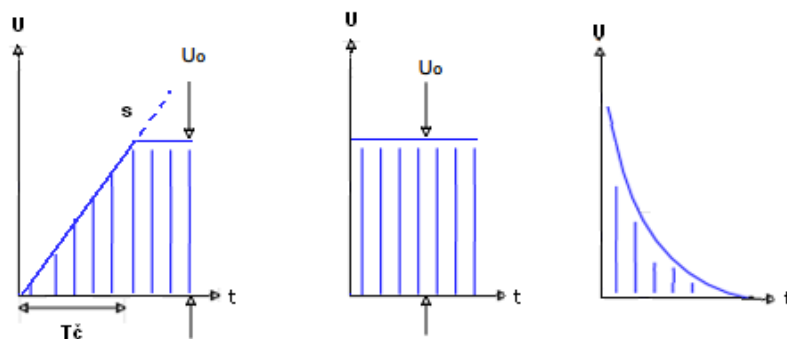
3.1. Oblici valova

Na vrijednosti putnih valova utjecat će i njihov izgled, odnosno njihove strujne i naponske vrijednosti će se mijenjati tijekom vremena. Zbog toga se razmatraju valovi koji imaju različite oblike, a može ih se opisati pomoću vrijednosti strmine čela, amplitude i položajem hrbata. Takva izobličenja nastaju zbog otpornosti vodova te djelovanja korone i skin efekta. S obzirom da postoje razno rani oblici proračuni su vrlo zahtjevni pa ih se pokušava nadomjestiti poznatim geometrijskim oblicima [4].

Slika 3.1. prikazuje česti oblik putujućeg vala kojeg možemo podijeliti na tri dijela, a svaki se analizira posebno radi lakšeg proračuna. Prvi dio prikazan je vremenom $T\check{c}$, koje označuje vremenski interval u kojem raste vrijednost vala do vrijednosti amplitude U_0 , koja čini središnji dio vala te vrijednost vala u trećem djelu kada vrijednost U opada.



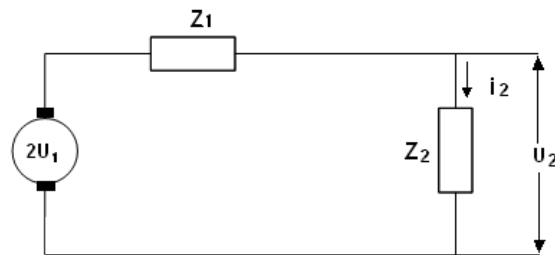
Sl. 3.1. Prikaz putnog vala sa karakterističnim djelovima



Sl. 3.2. Rastavljanje vala na tri dijela

3.2. Petersenovo pravilo

Prema Petersenovom pravilu lakše se promatraju odnosi napona i struja u vodu za vrijeme putnih valova. Pravilo se zasniva na činjenici da je struja prolaznog vala zapravo kvocijent dvostrukog upadnog vala i zbroju otpornika. Iz ovog saznanja možemo napraviti strujni krug koji će nadomjestiti valne otpore sa radnim, istih vrijednosti kao što su valni otpori Z_1 i Z_2 . Slika 3.3. pokazuje shemu kojom se može pristupiti računanju strujnih i naponski vrijednosti valova.



Sl. 3.3 Nadomjesna shema valnih otpora

Nailazeći val U_1 nadomješta se vanjskim priključenim naponom. Ovakve zamjene otpora u shemama se izvode po Petersenovu pravilu, a omogućuju određivanje vrijednosti napona i struja kao i njihovih oblika iza i ispred točke u kojoj se javlja diskontinuitet.

Kod udara groma na nekom vodu često se električki zamišlja da je na tom mjestu nekakav generator koji generira dvostruko veću vrijednost naponskog vala U_1 pa ta generirana vrijednost EMS-a iznosi $2U_1$ sa unutarnjim otporom Z_1 . Vod sa otporom Z_2 zapravo je potrošač o kojem ovise prilike naponskih i strujnih valova na kraju prvog voda. Dakle, ako je $Z_2 = \infty$ (otvorne stezaljke voda) onda je na kraju prvog voda vrijednost upadnog vala $2U_1$, isto tako ako je $Z_2 = 0$ (kratki spoj na vodu) tada je vrijednost strujnog vala na kraju prvog voda $2i_2$.

Vrijednosti naponskih i strujnih valova koji se pojavljuju na drugom vodu Z_2 , su izrazito važne za vršenje dimenzioniranja zaštitne izolacije vodova, a računamo ih pomoću faktora prolaska:

$$\alpha = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (3.1.)$$

Što je ovaj faktor veći to će veći dio nailazećeg vala preći u prolazni val, a to vidimo i iz izraza za prolazni val:

$$U_2 = \alpha U_1 = U_1 \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (3.2.)$$

Nadalje reflektirajući se računa prema izrazu:

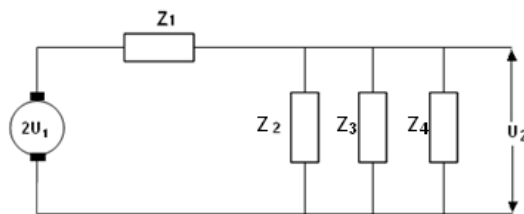
$$U_r = U_2 - U_1 = U_1 \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = \beta U_1, \quad (3.3.)$$

gdje je β faktor refleksije kojega se može računati poznavanjem faktora prolaska ili obrnuto jer vrijedi da je $\alpha - \beta = 1$. Struja drugog vala je također značajna veličina, a računa se po izrazu:

$$i_2 = \frac{U_2}{Z_2} = \frac{2 U_1}{Z_1 + Z_2}. \quad (3.4.)$$

3.3. Razdvajanje vodova

U praksi se na mjestima diskontinuiteta obično vod grana na više vodova ili se priključuje na elemente iz kojih slijedi još dodatnih grana. Važno je znati vrijednost putnih valova kad oni prijeđu točku grananja, odnosno kad val prijeđe na druge vodove. U ovakvim slučajevima koristi se također Petersenovo pravilo samo sa više otpornika u poprečnim granama koji su paralelni jedni s drugim, a njihov broj ovisi o broju vodova na kojih se dijeli putni val. Na slici 3.4 vidi se raspodjela otpornika prilikom grananja vodova.



Sl. 3.4. Shema grananja valnih otpora

U ovakvom slučaju struja i napon poslije grananja računa se po prijašnjoj formuli sa dodatkom Z_K :

$$i_2 = \frac{2 U_1}{Z_1 + Z_K} ; \quad U_2 = i_2 \cdot Z_K . \quad (3.5.)$$

Vrijednost Z_K je zbroj paralelnih otpora valova. Njihova vrijednost u praksi je najčešće jednaka pa ako se to uzme u obzir konačan izraz za napon i struju nakon grananja je:

$$i_2 = \frac{2 U_1}{Z \left(1 + \frac{1}{n-1}\right)} ; \quad (3.6.)$$

$$U_2 = i_2 \cdot Z_K = i_2 \cdot \frac{Z}{n-1} = \frac{2U_1}{n} . \quad (3.7.)$$

Vrijednost n je broj svih vodova koji se spajaju sa čvorom grananja (na Sl.3.4. $n = 4$).

3.3.1. Struje i naponi kod transformatorskih stanica

Na pogođenom nadzemnom vodu valnog otpora Z , prostire se putni val amplitude U_0 sa okomitim čelom i ravnim hrptom amplitude U_0 , koji nailazi na transformatorsku stanicu valnog otpora Z_{TS} . Transformatorska stanica se sastoji od nekoliko vodova koji imaju takav smjer da odlaze od stanice, i na tim vodovima će se javiti napon U_{TS} kojeg se računa prema gore navedenom izrazu 3.7. :

$$U_{TS} = \frac{2U_0}{n} , \quad (3.8.)$$

pa kad se na ovaj izraz nadoda da će vrijednost napona na stanici biti ovisna o faktoru prolaska $U_{TS} = \alpha U_0$, dobiva se izraz za faktor prolaska u obliku:

$$\alpha = \frac{2}{n} . \quad (3.9.)$$

Napon na transformatorskoj stanici je dakle ovisan o broju vodova koji izlaze iz nje te će biti manji što je broj vodova n veći.

Pri računanju reflektiranog vala uvodi se spoznaja o odnosima između faktora refleksije i prolaska, pa ako je $\alpha - \beta = 1$, tada je vrijednost reflektiranog vala:

$$U_r = \beta U_o = U_o \frac{2 - n}{n} . \quad (3.10.)$$

Ovim izrazom vidi se da je faktor refleksije β ovisan o broju priključenih vodova te da će se za broj vodova veći od 2 biti negativan i manji od 1. To znači da će valni otpor transformatorske stanice biti manji od otpora voda koji dolazi na stanicu. Ovakav razvoj je povoljan jer će prolazni val biti manji za reflektirajući val, međutim ukoliko nema spojenih vodova ($\beta = 1$) na sabirnicama transformatora, tada upadni val raste za vrijednost reflektiranog.

U slučaju kada na stanicu nailazi putni val koji ima strmo čelo i beskonačno dug hrpat iste amplitude U_o , njegove vrijednosti se mijenjaju linearno od čela pod određenim kutem u vremenskom intervalu od $t = 0$ do $t = T\check{c}$, pa iznos vala u prvomvodu iznosi:

$$U_1 = \frac{U_o}{T\check{c}} \cdot t . \quad (3.11.)$$

Ovdje se uvodi strmina vala, odnosno promjena napona u jedinici vremena jednaka izrazu:

$$s = \frac{U_o}{T\check{c}} , \quad (3.12.)$$

pomoću koje se dobiva vrijednost u prvom dijelu vala, a tada će izraz za napon na stanici biti:

$$U_{TS} = \frac{2U_1}{n} = \frac{2 \cdot U_o \cdot t}{T\check{c} \cdot n} , U_{TS} = \alpha \cdot U_o \rightarrow \alpha = \frac{2t}{n \cdot T\check{c}} . \quad (3.13.)$$

Može se primijetiti da je faktor prolaska ovisan o vremenu, kao i strmina koja se dobiva derivacijom napona u jedinici vremena:

$$s' = \frac{dU_{TS}}{dt} = \frac{2 \cdot U_o}{T\check{c} \cdot n} . \quad (3.14.)$$

Strmina će također ovisiti o broju priključenih vodova i to tako da će biti povoljnija situacija ako je broj vodova veći. Drugi dio vala koji nailazi nakon što vrijeme t prijeđe vrijednost $T\check{c}$, hrpat je ravan i amplitudna vrijednost U_o je neovisna o vremenu. Na sljedećem primjeru će biti prikazano kako utječe broj vodova grananja i amplituda upadnog vala na prilike napona i strmine nakon grananja vodova.

Ako se za primjer uzme da prema stanici putuje strmi val amplitude $U_0 = 1\,500\text{ kV}$, koji sadrži strmo čelo trajanja $T\check{c} = 50\text{ s}$. Stanica se sastoji od četiri nadzemna voda približno istih vrijednosti valnih otpora od $300\ \Omega$. Izračunati: a) kolika je vrijednost napona U_{ST} na stanici odnosno vodovima, nakon $30\ \mu\text{s}$ nakon što je val naišao; b) promjenu strmine vala nakon ulaska i prije ulaska u stanicu; c) vrijednost U_{ST} nakon $50\ \mu\text{s}$ od njegovog nailaska.

Rješenje:

a) Napon U_{ST} nakon $30\ \mu\text{s}$:

$$U_{TS} = \frac{2 \cdot U_0 \cdot t}{T\check{c} \cdot n} = \frac{2 \cdot 1\,500 \cdot 30}{50 \cdot 5} = 360\text{ kV}.$$

b) Strmina vala koji nailazi na stanicu:

$$s = \frac{U_0}{T\check{c}} = \frac{1\,500}{50} = 30\text{ kV}/\mu\text{s}.$$

I strmina vala na vodovima poslije stanice:

$$s' = \frac{2 \cdot U_0}{T\check{c} \cdot n} = \frac{2 \cdot 1\,500}{50 \cdot 5} = 12\text{ kV}/\mu\text{s}.$$

c) Napon U_{ST} nakon $50\ \mu\text{s}$:

$$U_{TS} = \frac{2 \cdot U_0}{n} = \frac{2 \cdot 1\,500}{5} = 600\text{ kV}.$$

U tablici 3.1. prikazane su vrijednosti valova za različiti broj vodova i amplituda upadnih valova koje se računaju prema postupku prikazanome u prethodnom primjeru.

Amplituda upadnog vala 1500 kV				
Broj vodova	Napon stanice nakon 30 μs	Napon stanice nakon 50 μs	Strmina vala prije stanice	Strmina vala poslije stanice
2	600 kV	1000 kV	30 kV/ μs	20 kV/ μs
4	360 kV	600 kV	30 kV/ μs	12 kV/ μs
6	257,142 kV	428,571 kV	30 kV/ μs	8,571 kV/ μs
10	163,636 kV	272,727 kV	30 kV/ μs	5,454 kV/ μs

Tablica 3.1. Prikaz vrijednosti napona i strmine na vodu

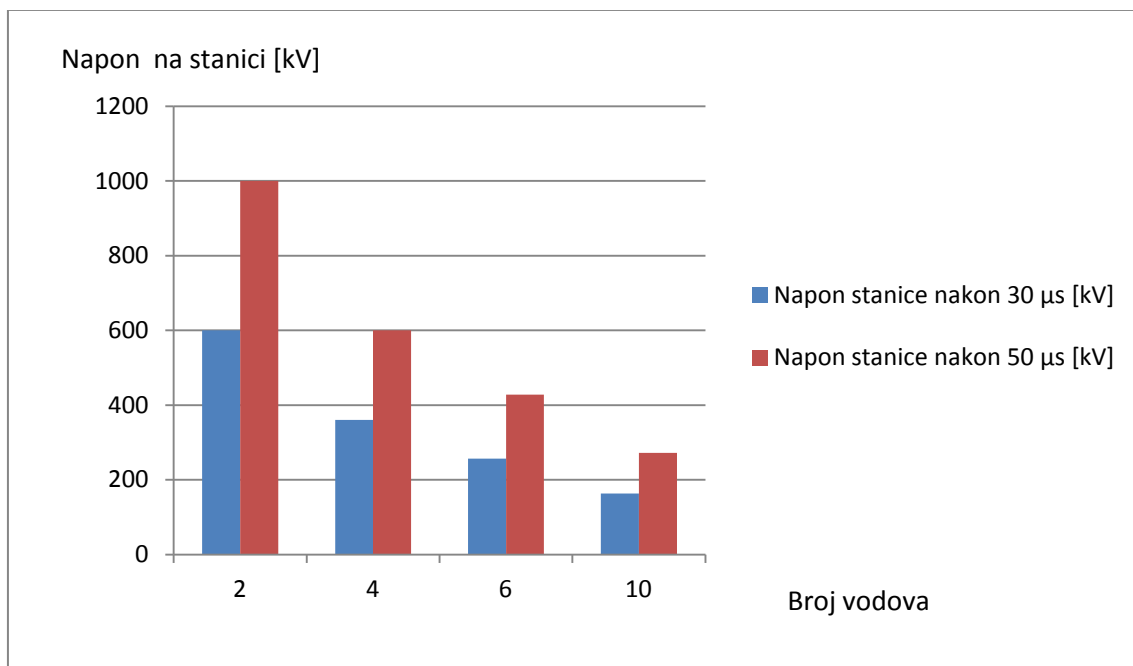
Nadalje, u tablicama 3.2 i 3.3. unesena su rješenja koja pokazuju kako će utjecati amplitudna vrijednosti upadnog vala na napone i strminu ako je mijenjamo prema vrijednostima 500 kV i 2500 kV.

Amplituda upadnog vala 500 kV				
Broj vodova	Napon stanice nakon 30 μs	Napon stanice nakon 50 μs	Strmina vala prije stanice	Strmina vala poslije stanice
2	200 kV	333,333kV	10 kV/ μs	6,666 kV/ μs
4	120 kV	200 kV	10 kV/ μs	4 kV/ μs
6	85,714 kV	142,857 kV	10 kV/ μs	2,857 kV/ μs
10	54,545 kV	90,909 kV	10 kV/ μs	1,818 kV/ μs

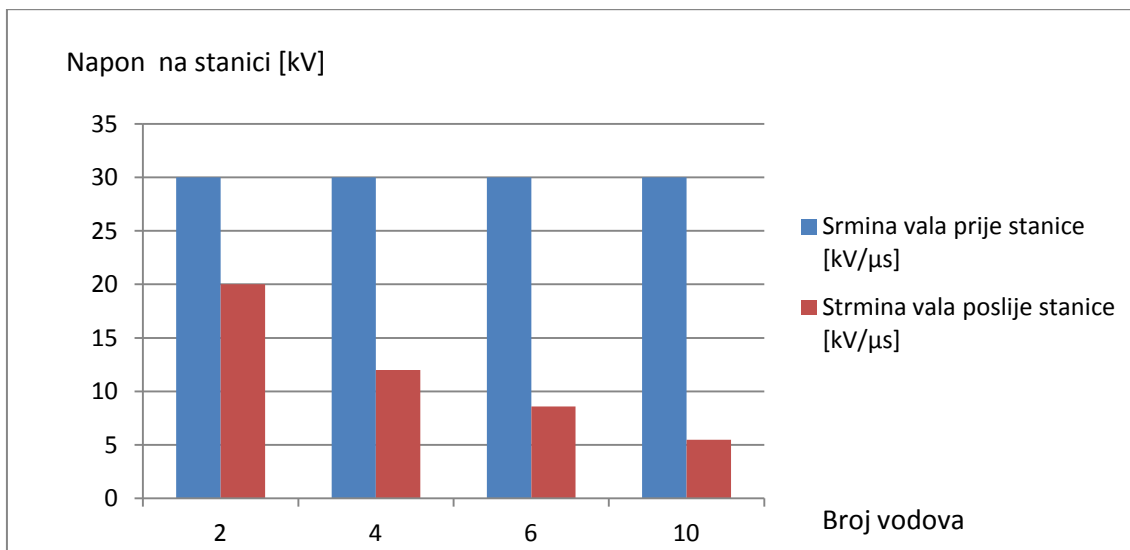
Tablica 3.2. Prikaz vrijednosti napona i strmine na vodu

Amplituda upadnog vala 2500 kV				
Broj vodova	Napon stanice nakon 30 μs	Napon stanice nakon 50 μs	Strmina vala prije stanice	Strmina vala poslije stanice
2	1000 kV	1666,66 kV	50 kV/ μs	33,333 kV/ μs
4	600 kV	1000 kV	50 kV/ μs	20 kV/ μs
6	428,571 kV	714,285 kV	50 kV/ μs	14,285 kV/ μs
10	272,727 kV	454,545 kV	50 kV/ μs	9,09 kV/ μs

Tablica 3.3. Prikaz vrijednosti napona i strmine na vodu



Graf 3.1. Promjene napona na stanici pri upadnom valu $U_0=1500$ kV



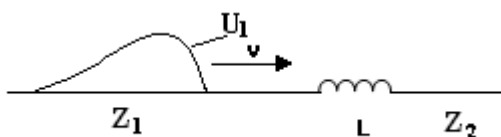
Graf 3.2. Promjene strmine na stanici pri upadnom valu $U_0=1500$ kV

Iz grafa 3.1 vidi se da će se povećanjem broja vodova smanjiti vrijednosti napona kao i vrijednosti strmine na grafu 3.2.. Time se dolazi do zaključka da je veći broj grananja zapravo povoljna okolnost kojom smanjujemo opasne prolazne valne napone .

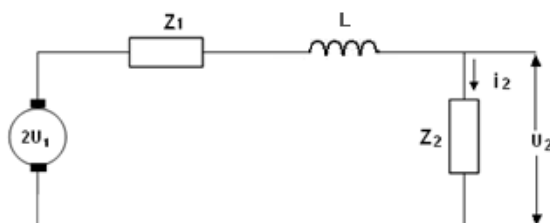
3.4. Utjecaj induktiviteta na putni val

U sklopu elektroenergetskih sistema postoje spojevi sa raznim induktivitetima kroz koje također putuju putni valovi kako je prikazano na sljedećoj slici 3.5.. Induktivitet se može naći u transformatorskim stanicama (prigušnicama), generatorskim svicima, vodovima, raznim uzemljivačima, zapravo na gotovo svim elementima elektroenergetskog postrojenja. Kao i u prijašnjim analizama i u ovom slučaju tražimo vrijednosti valova U_2 , kada val U_1 prijeđe induktivitet L i naiđe na otpor vala Z_2 .

Kada se promatra prolazak valova kroz induktivitet, uzima se obzir samo induktivitet, ali ne i kapacitet koji se javlja između zavoja prigušnica i između zavoja i zemlje. U ovom poglavlju razmatrat će se nailazak valova koji imaju okomito čelo i konstantnu amplitudu U_0 .



Sl. 3.5. Nailazak vala na induktivitet



Sl.3.6. Nadomjesna shema sa induktivitetom

Ovakva shema sa slike 3.5. osim što omogućuje računanje induktiviteta prigušnice spojene serijski između vodova, ona može poslužiti i za analizu udara groma u gromobran, kada će gromobran imati induktivitet L , otpor Z_2 a otpornik Z_1 predstavljat će otpor kanala groma. Promatranjem sheme Petersenovog pravila može se izvesti vrijednost napona $2U_2$ izrazom:

$$2U_1 = i_2(Z_1 + Z_2) + L \frac{di_2}{dt}. \quad (3.15.)$$

Dakle pad napona na prvomvodu $2U_1$, je zbroj pada napona na otpornicima i napona na zavojnici koji je ovisan o vremenu. Primjenjujući izraz da je struja i_2 jednaka omjeru napona U_2 i valnog otpora Z_2 , i Laplasovom transformacijom dobiva se izraz:

$$2U_1(p) = \frac{U_2(p)}{Z_2} (Z_1 + Z_2) + L(p) \frac{U_2(p)}{Z_2}. \quad (3.16.)$$

Ako se iz ovog izraza izvadi U_2 dobiva se:

$$U_2(p) = U_1(p) \frac{2Z_2}{L} \cdot \frac{1}{\frac{Z_1 + Z_2}{L} + p}, \quad (3.17.)$$

$$U_2(p) = U_1(p) \frac{\alpha_{12}}{T} \frac{1}{\frac{1}{T} + p}$$

Promatranjem ovih izraza α_{12} je zapravo faktor prolaska koji vrijedi da nema induktiviteta, a u jednadžbi 3.16. zamjenjuje $2Z_2/(Z_1+Z_2)$. Isto tako je $T = L/(Z_1+Z_2)$, konstanta kruga.

Nadalje, ako se za nailazeći val umjesto $U_1(p)$ uvrsti zadanu ($U_0(p)$) vrijednost, te transformacijom izraza dobiva se konačni izraz za napon vala U_2 koji prolazi vodom Z_2 :

$$U_2 = \frac{2Z_2U_0}{Z_1 + Z_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right). \quad (3.18.)$$

Izraz 3.18. se sastoji od dvije komponente. Prva komponenta ovisi o iznosu upadnog vala i otporima vodova, dok druga je promjenjiva u ovisnosti o vremenu i superponira tijekom vremena suprotnim predznakom prvoj komponenti. Bitna su ta dva trenutka koji se posebno promatraju:

- Trenutak $t = 0$, tada će vrijednost napona U_2 biti nula, a to govori da struja ne prodire odmah kroz cijeli induktivitet nego je potrebno određeno vrijeme. Isto tako i vrijednost vala U_2 raste postepeno. U trenutku $t = 0$ induktivitet se ponaša kao veliki otpor, pa će upadni napon na početku svitka poprimiti veliku vrijednost. Kako prolazi vrijeme struja prodire sve jače pa će i taj napon na početku svitka opadati, a napon U_2 će rasti.
- Drugi trenutak je $t = \infty$ u kojem napon U_2 poprima maksimalnu vrijednost.

Dakle induktivitet nema utjecaj na vrijednost prolaznog vala kad je hrbat vala ravna, čelo vala će iz okomitog prijeći u eksponencijalni oblik po kojemu će rasti dok ne dostigne maksimalnu vrijednost amplitude. Ovakva izobličenja manipuliramo vremenskom konstantom kruga T (u izrazu 3.18.), koja će utjecati na promjene druge komponente (položaj čela, strmina) i to obrnuto proporcionalno.

Zaključak je da će zavojnica, smještena između dva voda, omogućiti podešavanje brzine podizanja napona prolaska U_2 , i to tako da ne prekorači graničnu vrijednost izolacije postrojenja. Odnosno moguće je regulirati strminu prolaznog vala. S obzirom da je poznato da je strmina s zapravo derivacija napona po vremenu, pa ćemo deriviranjem izraza 3.18. dobiti konačni izraz za strminu:

$$s = \frac{dU_2}{dt} = \frac{2U_2Z_2}{L} e^{-\left(\frac{t}{T}\right)} \left[\frac{V}{s}\right]. \quad (3.19.)$$

Za računanje strmine koristi se još i izraz koji sadrži brzinu svjetla v , jer je strmina nekog vala koji se giba zapravo i promjena vrijednosti napona po jedinici prijeđenog puta:

$$s_{\max} = \frac{dU_2}{dt} = \frac{2U_2Z_2}{vL} e^{-\left(\frac{t}{T}\right)} \left[\frac{V}{m} \right]. \quad (3.20.)$$

Strmina dakle ovisi o vremenu, pa će tako u trenutku $t = 0$ biti najveća ili maksimalna strmina s_{\max} , a ovisi još i o vrijednosti induktiviteta L , naponu U_2 i vrijednosti otpora Z_2 . Zbog ovisnosti o valnom otporu (odnosno trošilu) vrlo je teško osigurati zaštitu nekom velikom potrošaču sa zavojnicom.

Osim napona U_2 , i struja i_2 nailazi na ulaz svitka baš kao i odbijeni val U_r . Njegovu vrijednost moguće je dobiti iz relacije:

$$U_0 + U_r = U_2 + L \frac{di_2}{dt}, \quad (3.21.)$$

te ako u se nju uvrsti od prije sredene vrijednosti za U_2 i pad napona na induktivitetu, odbijeni val računa se izrazom:

$$U_r = U_0 \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} + \frac{2U_0Z_2}{Z_1 + Z_2} e^{-(t/T)}. \quad (3.22.)$$

Iz izraza 3.22. uočljivo je da faktor odbijanja β koji je također ovisan o vremenu, u $t = 0$ biti 1 a daljnjim porastom vremena poprimat će maksimalnu vrijednosti:

$$\beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}. \quad (3.23.)$$

Također se izraz za struju prolaznog vala dobiva dijeljenjem izraza za napon U_2 i valnog otpora Z_2 :

$$i_2 = \frac{2U_0}{Z_1 + Z_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right). \quad (3.24.)$$

Ako vodom valnog otpora $Z_1 = 450 \Omega$, putuje val sa beskonačnom duljinom, okomitim čelom i ravnim hrptom. Njegova amplituda iznosi $U_0 = 600 \text{ kV}$, a nailazi na induktivitet $L = 14 \cdot 10^{-3} \text{ H}$, pa zatim i na vod valnog otpora $Z_2 = 300 \Omega$. Potrebno je odrediti konstantu kruga T , vrijednost odbijenog U_r i prolaznog vala U_2 , iznos struje i_2 i strmine s u trenutku $t = 0 \mu\text{s}$.

Rješenje:

Konstanta kruga :

$$T = \frac{L}{Z_1 + Z_2} = \frac{14 \cdot 10^{-3}}{450 + 300} = 18,8 \mu\text{s}.$$

Vrijednosti u trenutku $t = 0$.

Napon na drugom vodu:

$$U_2 = \frac{2Z_2U_0}{Z_1 + Z_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) = \frac{2 \cdot 300 \cdot 600}{450 + 300} \cdot (1 - 1) = 0.$$

Odbijeni val:

$$U_r = U_0 \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} + \frac{2U_0Z_2}{Z_1 + Z_2} e^{-(t/T)} = 600 \cdot \frac{300 - 450}{450 + 300} + \frac{2 \cdot 600 \cdot 300}{450 + 300} \cdot 1 = 360 \text{ kV}.$$

Struja i_2 :

$$i_2 = \frac{2U_0}{Z_1 + Z_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) = i_2 = \frac{2 \cdot 600}{450 + 300} (1 - 1) = 0.$$

Strmina s :

$$s = \frac{dU_2}{dt} = \frac{2U_0Z_2}{L} e^{-\left(\frac{t}{T}\right)} = \frac{2 \cdot 600 \cdot 300}{14 \cdot 10^{-3} \cdot 300} \cdot 1 = 85,714 \frac{\text{kV}}{\text{m}}.$$

Napon na induktivitetu:

$$U_0 + U_r = U_2 + L \frac{di_2}{dt} \rightarrow L \frac{di_2}{dt} = \Delta U_L = 2U_L \cdot e^{-\frac{t}{T}} = 2 \cdot 600 \cdot 1 = 1200 \text{ kV}.$$

Napona na prvom vodu:

$$U_0 + U_r = U_2 + L \frac{di_2}{dt} = \Delta U_L = 1200 \text{ kV}.$$

Zatim istim postupkom dobijemo vrijednosti u trenucima $t = 18,8 \mu s$ i $t = \infty \mu s$ prikazane u tablici 3.4.

	Trenutak :		
	$t = 0 \mu s$	$t = 18,8 \mu s$	$t = \infty \mu s$
Napon prolaznog vala U_2	0 kV	303,417 kV	480 kV
Napon odbijenog vala U_R	360 kV	174,303 kV	-120 kV
Prolazna struja i_2	0 kA	1,011 kA	1,6 kA
Strmina s	85,714 kV/m	31,532 kV/m	0 kV/m
Napon na induktivitetu ΔU_L	1200 kV	441,455 kV	0 kV
Napon na prvom vodu $U_0 + U_L$	1200 kV	774,303 kV	480 kV

Tablica 3.4. Prikaz vrijednosti napona i strmine u različitim vremenskim trenucima sa serijski spojenim induktivitetom

Na temelju proračuna za različite vrijednosti vremena dolazi se do zaključka da će induktivitet u početku ($t = 0$) pružiti veliki otpor i neće propuštati struju, a strmina će biti najveća. Tada je nailazeći val maksimalan, a prolazni je jednak nuli.

Kad se postigne vrijeme T_C , porasti će napon i struja na induktivitetu. Tada će vrijednosti napona i struje na drugom vodu ovisiti samo o omjeru valnih otpora i upadnog napona. Napon odbijanja će biti vrlo veliki u $t = 0$, pa se obično osigurava izolacija induktivnog svitka sa odvodnikom prenapona koji odvodi dio struje groma prije ulaska u svitak. Ovakvim priključkom induktiviteta moguće je određivati strminu prolaznog vala.

Ukoliko se mijenja vrijednost induktiviteta na veću vrijednost $L_2 = 0,4 \text{ H}$ i na manju vrijednost $L_3 = 10 \cdot 10^{-6} \text{ H}$, istim postupkom kao u prethodnom računu dobivaju se vrijednosti prilika na vodu za induktivitet L_2 ispisane u tablici 3.5., te za induktivitet L_3 ispisane u tablici 3.6.

- Povećanje induktiviteta

	Trenutak :		
	$t = 0 \mu s$	$t = 18,8 \mu s$	$t = \infty \mu s$
Napon prolaznog vala U_2	0 kV	16,626 kV	480 kV
Napon odbijenog vala U_R	360 kV	652,27 kV	-120 kV
Prolazna struja i_2	0 kA	0,0554 kA	1,6 kA
Strmina s	3 kV/m	2,894 kV/m	0 kV/m
Napon na induktivitetu ΔU_L	1200 kV	1 158,434 kV	0 kV
Napon na prvom vodu $U_0 + U_L$	1200 kV	1 252 kV	480 kV

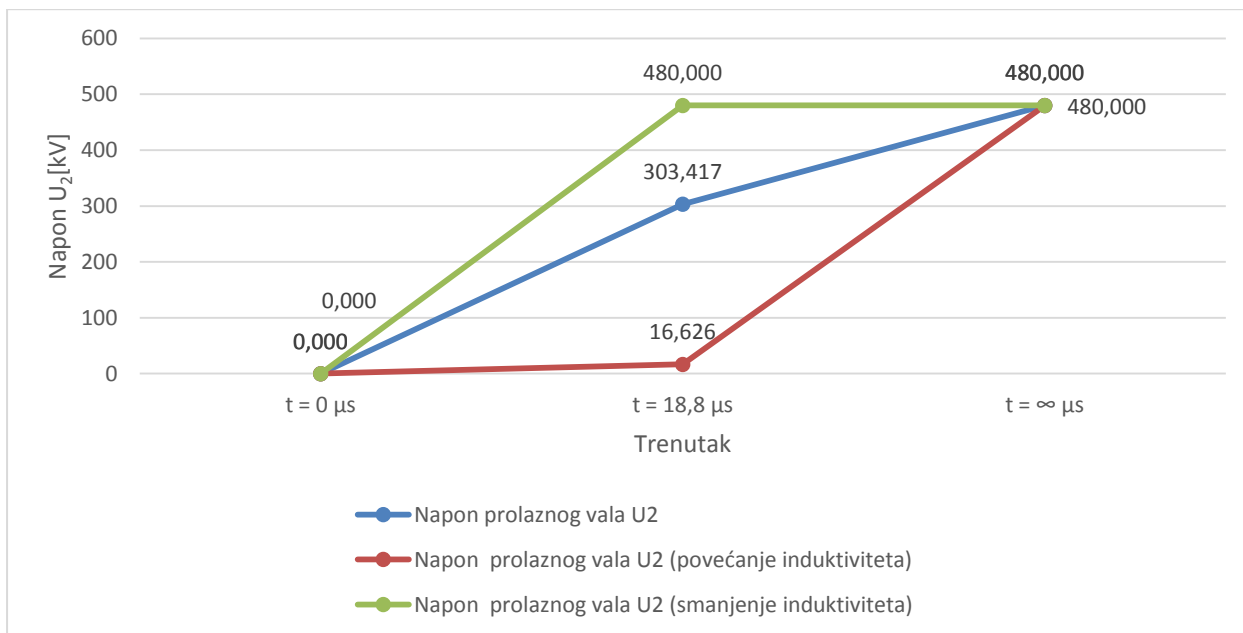
Tablica 3.5. Prikaz vrijednosti napona i strmine u različitim vremenskim trenucima sa serijski spojenim induktivitetom vrijednosti $L_2 = 0,4 \text{ H}$ (vremenska konstanta kruga za induktivitet L_2 je $T = 5,33 \cdot 10^{-4} \text{ s}$)

- Smanjivanje induktiviteta

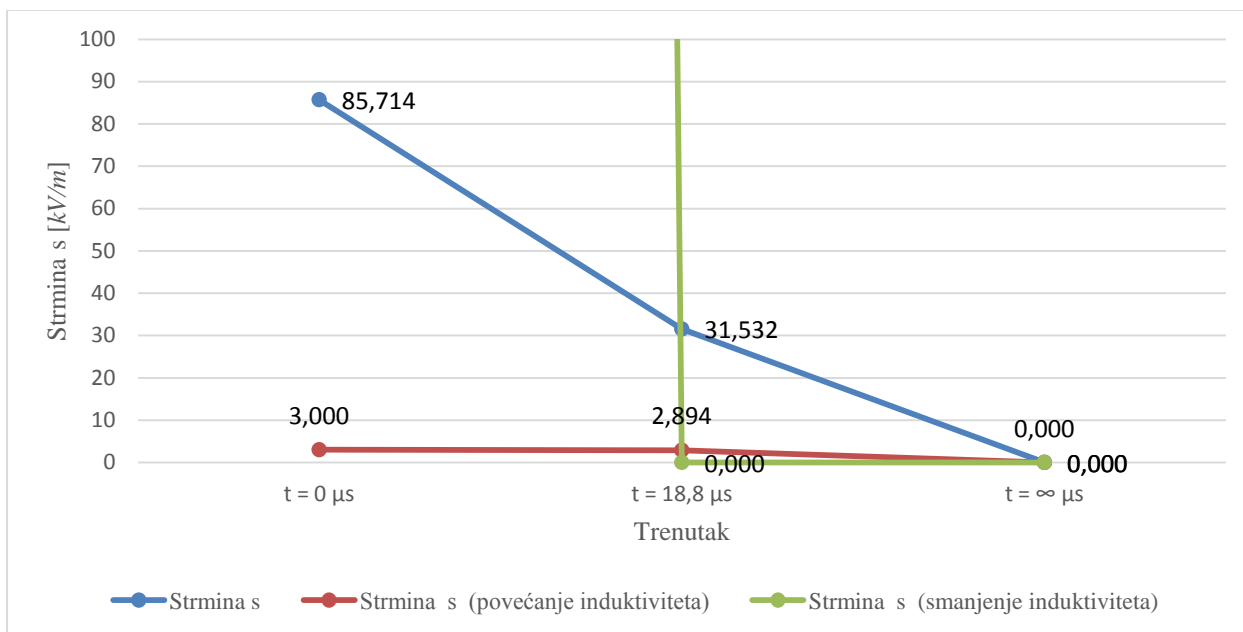
	Trenutak :		
	$t = 0 \mu s$	$t = 18,8 \mu s$	$t = \infty \mu s$
Napon prolaznog vala U_2	0 kV	480 kV	480 kV
Napon odbijenog vala U_R	360 kV	-120 kV	-120 kV
Prolazna struja i_2	0 kA	1,6 kA	1,6 kA
Strmina s	120 000 kV/m	0 kV/m	0 kV/m
Napon na induktivitetu ΔU_L	1200 kV	0 kV	0 kV
Napon na prvom vodu $U_0 + U_L$	1200 kV	480 kV	480 kV

Tablica 3.6. Prikaz vrijednosti napona i strmine u različitim vremenskim trenucima sa serijski spojenim induktivitetom vrijednosti $L_3 = 10 \cdot 10^{-6} \text{ H}$ (vremenska konstanta kruga za induktivitet L_3 je $T = 1,33 \cdot 10^{-8} \text{ s}$)

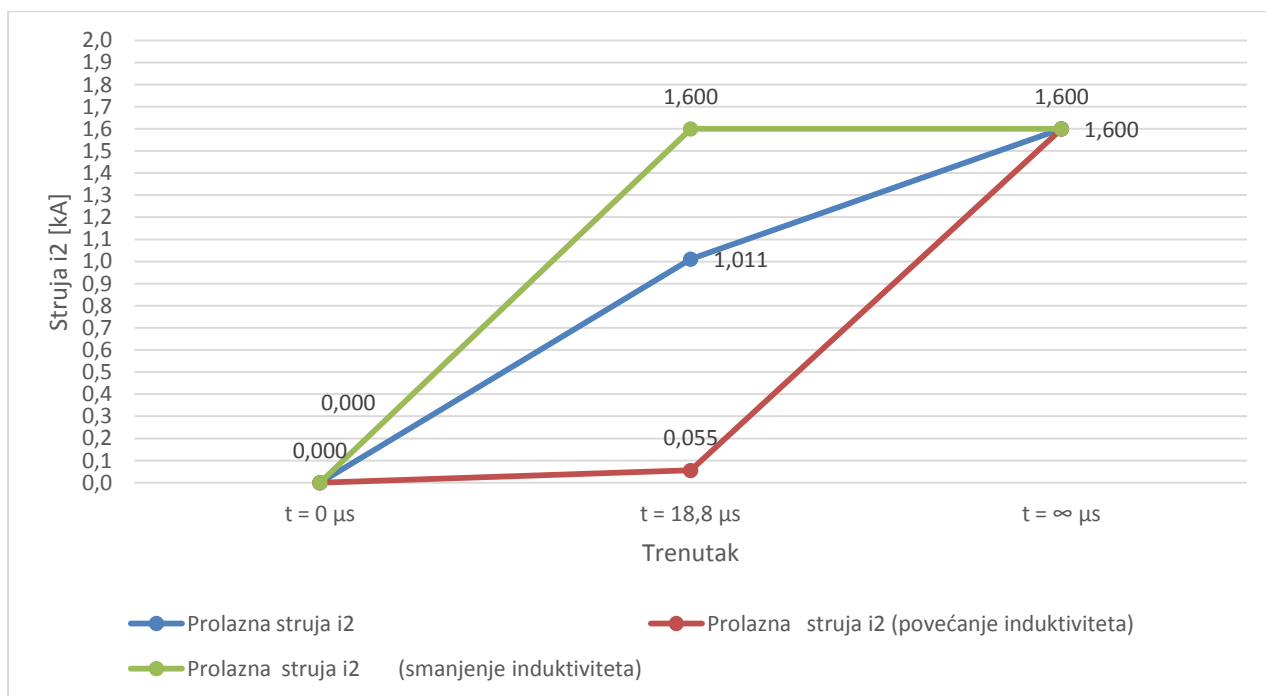
Iz proračuna je vidljiv da se promjenom vrijednosti induktiviteta svitka utječe na vremensku konstantu kruga T , koja određuje prilike napona, struje i strmine. Dakle, povećanjem induktiviteta raste i vremenska konstanta kruga T te će vrijednost napona i struje na drugom vodu u trenutku promatranja ($t = 18,8 \cdot 10^{-6} \text{ s}$) narasti za vrlo malu vrijednost, a smanjivanjem induktiviteta smanjuje se i vremenska konstanta u odnosu na vrijeme promatranja pa će napon i struja na drugom vodu konačnu vrijednost poprimiti prije vremena promatranja što se vidi iz grafa 3.3. i grafa 3.5.. Strmina će biti daleko većeg iznosa sa malim induktivitetom u trenutku promatranja nego sa većim induktivitetom što se vidi na grafu 3.4., pa se dolazi do zaključka da je povoljnije imati veću vrijednost induktiviteta kako bi strmina bila što manja odnosno kako bi napon na drugom vodu poprimio konačnu vrijednost što kasnije.



Graf 3.3. Prikaz kako promjena induktiviteta utječe na napon prolaznog vala U₂



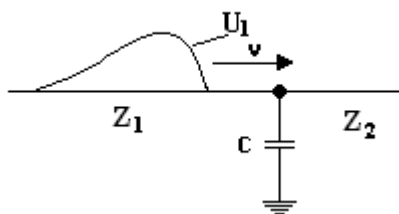
Graf 3.4. Prikaz kako promjena induktiviteta utječe na napon strminu prolaznog vala



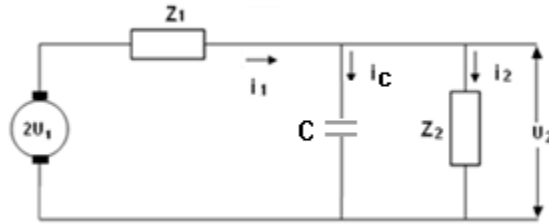
Graf 3.5. Prikaz kako promjena induktiviteta utječe na struju prolaznog vala i_2

3.5. Utjecaj kapaciteta na putni val

Osim induktiviteta u električnim postrojenjima nalaze se i kapaciteti, i to kapaciteti na raznim sabirnicama koje čine kapacitet sa zemljom pa i na ulazima transformatora itd.. Taj kapacitet koristi se za zaštitu postrojenja. Na slici 3.7. i nadomjesnoj shemi 3.8. vidi se da je kapacitet C spojen između čvorišta dva voda i zemlje.



Sl.3.7. Nailazak vala na kapacitet



Sl.3.8. Nadomjesna shema prolaska vala kroz kapacitet

Nailaskom vala u čvorišnu točku započinje postupak pretvorbe električne energije (U_0) u magnetsku, a struja koja teče prema zemlji i_2 postiže duplu vrijednost. Upravo će struja poteći prema zemlji kroz kapacitet jer je njegov otpor (dok je nenabijen) mali, a nabijanjem kondenzatora će rasti napon, dok će struja opadati. Tek kad na kondenzatoru naraste napon onda će se javiti napon i struja na drugomvodu. Iz poznatih relacija o zamkama vrijedi:

$$2U_1 = i_1 Z_1 + i_2 Z_2, \quad (3.25.)$$

$$\frac{1}{C} \int i_C dt = i_2 Z_2 \quad (3.26.)$$

pa uvrštavanjem i_C u ovaj 3.25. izraz dobiva se:

$$2U_1 = i_2(Z_1 + Z_2) + Z_1 Z_2 \frac{di_2}{dt} C. \quad (3.27.)$$

Ako se u ovaj izraz zamjeni i_2 sa U_2/Z_2 i Laplaceovim transformacijama, izraz za napon vala U_2 će biti:

$$U_2(p) = U_1(p) \frac{\alpha_{12}}{T} \frac{1}{\frac{1}{T} + p}. \quad (3.28.)$$

Razlika između izraza 3.28. i izraza 3.17. je da se vremenska konstanta računa izrazom

$T = [Z_1 Z_2 C / (Z_1 + Z_2)]$, a faktor prolaska je isti kao i kod prolaska kroz induktivitet $\alpha = 2Z_2 / (Z_1 + Z_2)$.

Ukoliko se razmatra da nailazi val okomitog čela, konstantne amplitude i beskonačno dug, izraz za napon će biti:

$$U_2 = \frac{2Z_2 U_0}{Z_1 + Z_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right). \quad (3.29.)$$

Uočljivo je da će napon prodiranja U_2 u vremenu $t = 0$ biti isto 0, a u beskonačnosti će ovisiti o valnim otporima vodova (Z_1, Z_2) i amplitudi U_0 . Čelo naponskog vala će se promijeniti, jer na kondenzatoru vrijednost napona može narasti i za dupli iznos u odnosu na vrijednost U_0 , a to je zapravo ovisno o veličini Z_2 u slučaju da je puno veća od Z_1 . Zbog tih promjena čela računa se strmina isto kao i kod induktiviteta:

$$s = \frac{dU_2}{dt} = \frac{2U_0}{CZ_1} e^{-\left(\frac{t}{T}\right)}, \quad (3.30.)$$

koja u $t = 0$ ima max vrijednost

$$s_{MAX} = \frac{2U_0}{CZ_1}. \quad (3.31.)$$

Uspoređujući ovaj izraz 3.31. i izraz za maksimalnu strminu kod induktivnog 3.20. vidljivo je da će kod kapaciteta strmina ovisiti o vrijednosti kapaciteta C i otpora prvog voda Z_1 , za razliku kad je kod induktivnog ovisila o valnom otporu Z_2 . Upravo zato većim kapacitetom kondenzatora smanjuje se s_{MAX} , neovisno o vrijednosti otpora objekta kojeg se štiti. To je glavna prednost kondenzatora pred induktivnim svicima. Izraz za računanje napona refleksije U_r je:

$$U_0 + U_r = U_2, \quad (3.32.)$$

i uvrštavanjem izraza 3.29. za prolazni napon U_2 dobiva se konačni izraz:

$$U_r = U_0 \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} + \frac{2U_0 Z_2}{Z_1 + Z_2} e^{-(t/T)}. \quad (3.33.)$$

Razlika s obzirom na serijski spojeni svitak je u vremenskoj konstanti kruga T . Kod serijski spojenog svitka zbog velikog otpora ($t = 0$) val se reflektira pozitivnim predznakom, a kod kondenzatora u paraleli je otpor mali ($t = 0$) pa je val reflektiranja negativan. Na sljedećem će primjeru biti prikazani iznosi napona te njihova usporedba sa rezultatima kojih se dobilo kod induktivnog proračuna

U slučaju da nekim vodom valnog otpora $Z_1 = 450 \Omega$, putuje val sa beskonačnom duljinom, okomitim čelom i ravnim hrptom, njegova amplituda iznosi $U_0 = 600 \text{ kV}$, a prolazi pokraj paralelno priključenog kondenzatora kapaciteta $C = 0,0606 \mu\text{F}$, a zatim i na vod valnog otpora $Z_2 = 300 \Omega$. Potrebno je odrediti konstantu kruga T , vrijednost odbijenog U_r i prolaznog vala U_2 , iznos struje i_2 i strmine s u trenutku $t = 0 \mu\text{s}$, $t = 18,8 \mu\text{s}$, $t = \infty$. Također je potrebno izračunati pad napona na prvom vodu nakon refleksije u zadanim trenucima.

Rješenje:

Konstanta kruga :

$$T = \frac{Z_1 Z_2 C}{Z_1 + Z_2} = \frac{450 \cdot 300 \cdot 0,0606 \cdot 10^{-6}}{450 + 300} = 10,9 \mu\text{s}.$$

Vrijednosti u trenutku $t = 0$.

Napon na drugomvodu:

$$U_2 = \frac{2Z_2 U_0}{Z_1 + Z_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) = \frac{2 \cdot 300 \cdot 600}{450 + 300} \cdot (1 - 1) = 0.$$

Odbijeni val:

$$U_r = U_0 \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{2U_0 Z_2}{Z_1 + Z_2} e^{-(t/T)} = 600 \cdot \frac{300 - 450}{450 + 300} - \frac{2 \cdot 600 \cdot 300}{450 + 300} \cdot 1 = -600 \text{ kV}.$$

Struja na drugomvodu i_2 :

$$i_2 = \frac{U_2}{Z_2} = 0.$$

Strmina s :

$$s = \frac{dU_2}{dt} = \frac{2U_0}{Z_1 C} e^{-\left(\frac{t}{T}\right)} = \frac{2 \cdot 600}{450 \cdot 0,0606 \cdot 300} \cdot 1 = 0,146 \frac{\text{kV}}{\text{m}}, \left(44 \frac{\text{kV}}{\mu\text{s}}\right).$$

Napon na prvom i drugomvodu:

$$U_0 + U_r = 600 - 600 = 0.$$

Vrijednosti dobiveni proračunom prikazani su u tablici 3.7.

	Trenutak :		
	$t = 0 \mu s$	$t = 18,8 \mu s$	$t = \infty \mu s$
Napon prolaznog vala U_2	0 kV	394 kV	480 kV
Napon odbijenog vala U_R	-600 kV	-514 kV	-600 kV
Prolazna struja i_2	0 kA	1,314 kA	1,6 kA
Strmina s	0,146 kV/m	7,842 kV/m	0 kV/m
Napon na prvom vodu U_O+U_R	0 kV	86 kV	0 kV

Tablica 3.7. Prikaz vrijednosti napona i strmine u različitim vremenskim trenucima sa paralelno spojenim kondenzatorom

Primjećuje se da kod paralelno spojenog kondenzatora napon prolaznog vala također postepeno raste kao i struja dok strmina pada sa prolaskom vremena. Međutim strmina ne ovisi o vrijednosti valnog otpora drugog voda već o vrijednosti prvog voda, ali i o vrijednosti kondenzatora.

U praksi se prilikom zaštite vodova velikih vrijednosti češće upotrebljuju kondenzatori jer strmina ne ovisi o šticeu vodu, za razliku od induktivne zaštite kada je za zaštitu velikih valnih otpora potrebno upotrijebiti velike induktivne svitke.

Ukoliko se mijenja vrijednost kapaciteta na veću vrijednost $C_2 = 0,8 \cdot 10^{-3} F$ i na manju vrijednost $C_3 = 0,3 \cdot 10^{-9} F$, istim postupkom kao u prethodnom računu dobivaju se vrijednosti prilika na vodu za kapacitet C_2 ispisane u tablici 3.8., te za induktivitet C_3 ispisane u tablici 3.9.

- Povećanje kapaciteta

	Trenutak :		
	$t = 0 \mu s$	$t = 18,8 \mu s$	$t = \infty \mu s$
Napon prolaznog vala U_2	0 kV	0,0626 kV	480 kV
Napon odbijenog vala U_R	-600 kV	-120,062 kV	-600 kV
Prolazna struja i_2	0 kA	0,208 kA	1,6 kA
Strmina s	$1,111 \cdot 10^{-5} \text{ kV/m}$	$1,11 \cdot 10^{-5} \text{ kV/m}$	0 kV/m
Napon na prvomvodu U_0+U_R	0 kV	479,938 kV	0 kV

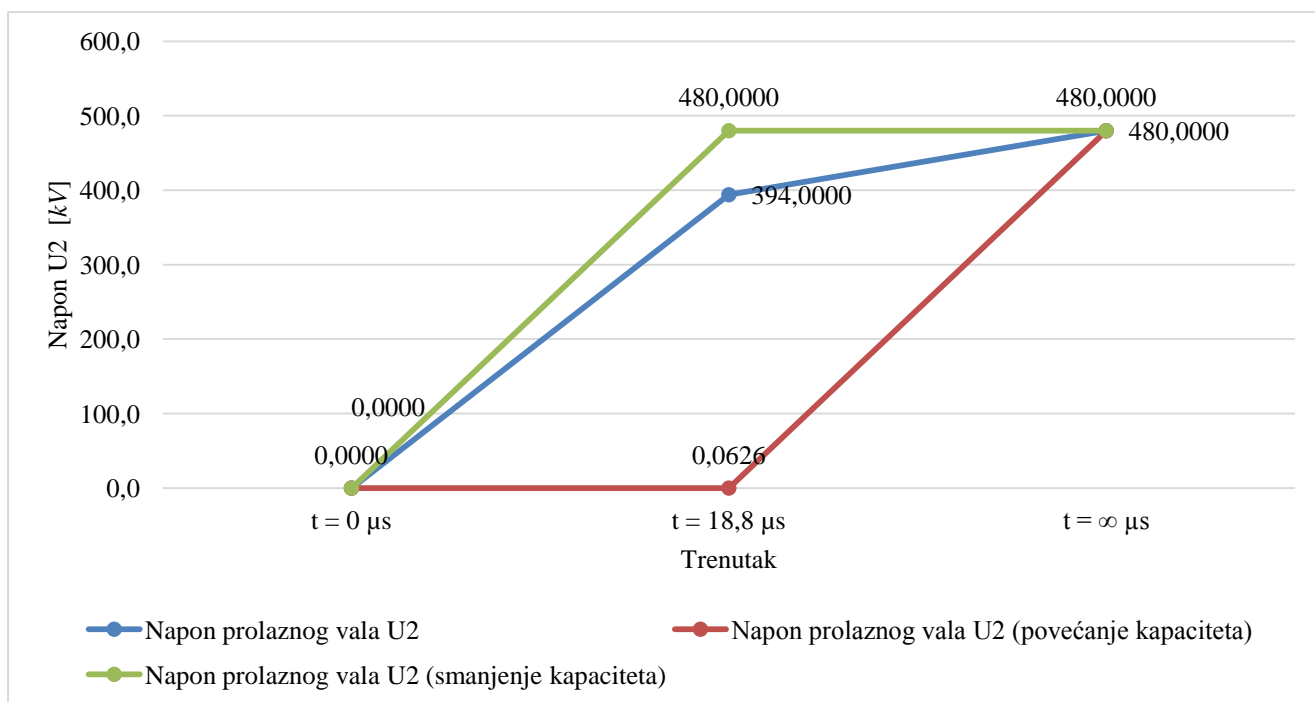
Tablica 3.8. Prikaz vrijednosti napona i strmine u različitim vremenskim trenucima sa paralelno spojenim kondenzatorom vrijednosti $C_2=0,8 \cdot 10^{-3} \text{ F}$ (vremenska konstanta kruga za kapacitet C_2 je $T=0,144 \text{ s}$)

- Smanjivanje kapaciteta

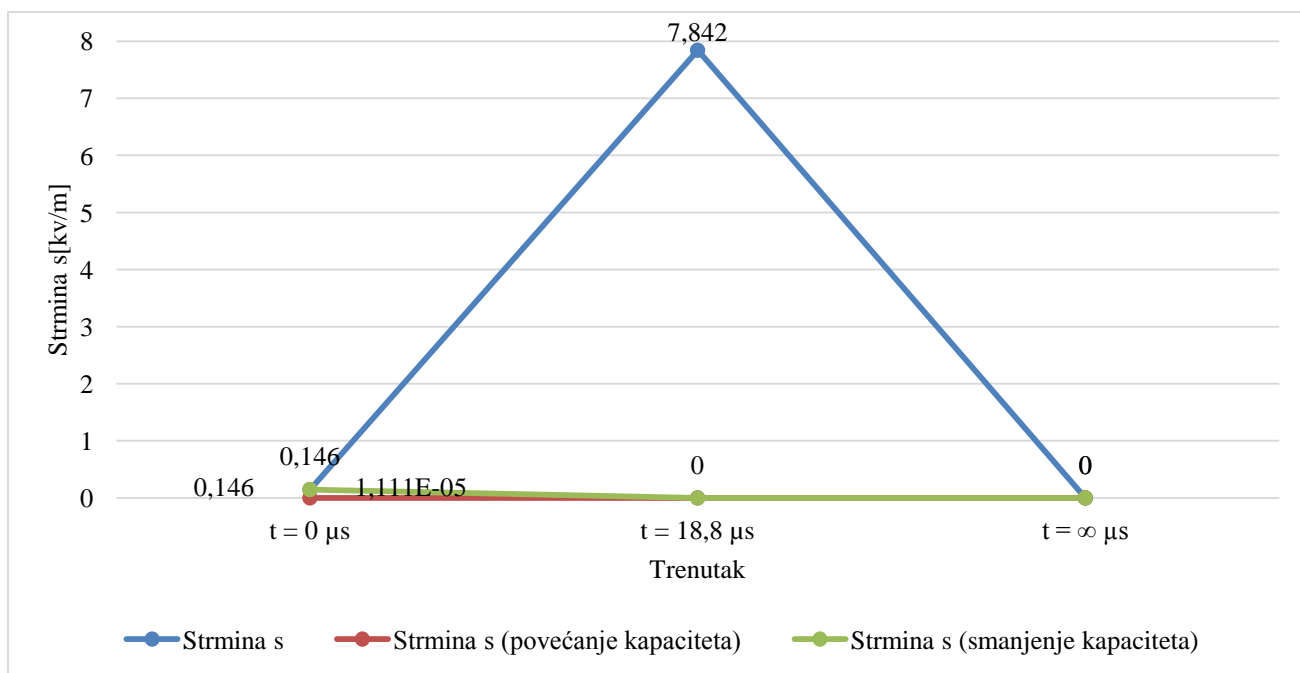
	Trenutak :		
	$t = 0 \mu s$	$t = 18,8 \mu s$	$t = \infty \mu s$
Napon prolaznog vala U_2	0 kV	480 kV	480 kV
Napon odbijenog vala U_R	-600 kV	-600 kV	-600 kV
Prolazna struja i_2	0 kA	1,6 kA	1,6 kA
Strmina s	0,146 kV/m	0 kV/m	0 kV/m
Napon na prvom vođu U_0+U_R	0 kV	0 kV	0 kV

Tablica 3.9. Prikaz vrijednosti napona i strmine u različitim vremenskim trenucima sa paralelno spojenim kondenzatorom vrijednosti $C_3=0,3 \cdot 10^{-9} F$ (vremenska konstanta kruga za kapacitet C_3 je $T=5,4 \cdot 10^{-8} s$)

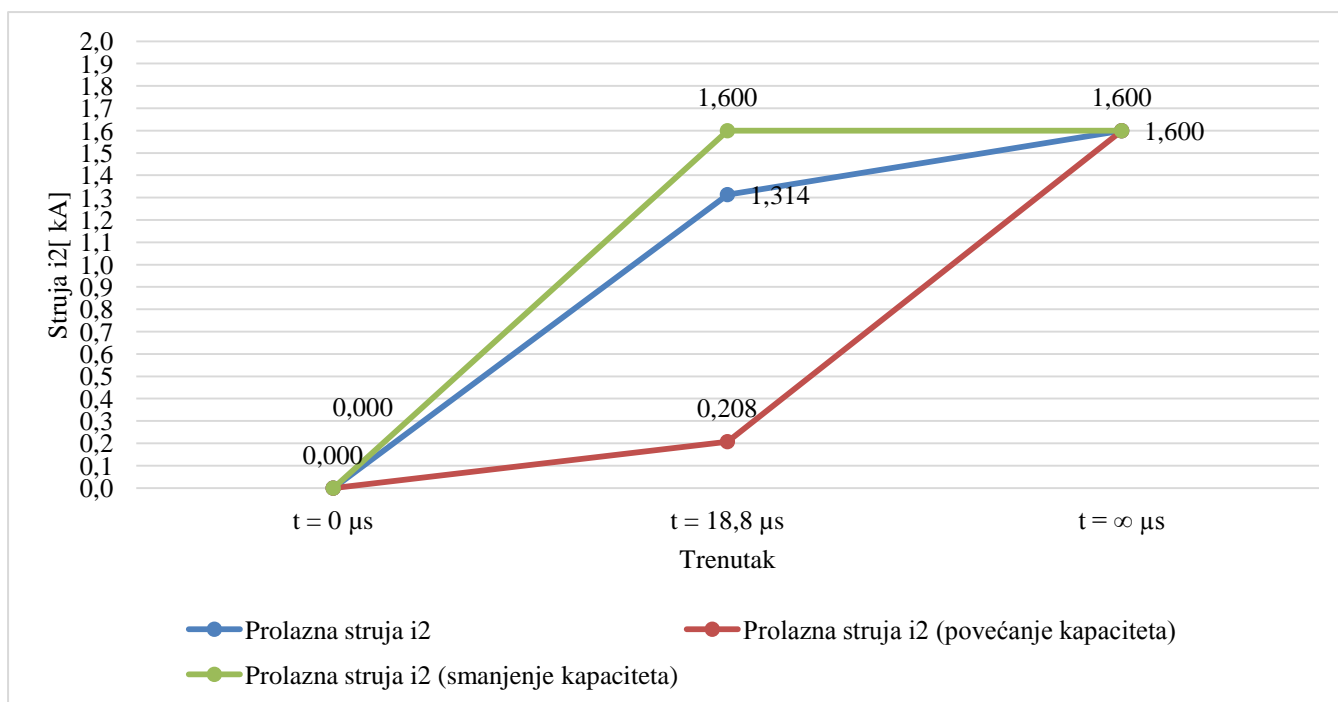
Iz proračuna je vidljivo da se promjenom vrijednosti kapaciteta utječe na vremensku konstantu kruga T slično kao i kod induktiviteta. Dakle, povećanjem kapaciteta raste i vremenska konstanta kruga T , te će vrijednost napona i struje na drugom vođu u trenutku promatranja ($t=18,8 \cdot 10^{-6} s$) narasti za vrlo malu vrijednost, a smanjivanjem kapaciteta smanjuje se i vremenska konstanta u odnosu na vrijeme promatranja pa će napon i struja na drugom vođu konačnu vrijednost poprimiti prije vremena promatranja što se vidi iz grafa 3.6. i grafa 3.8.. Strmina će biti većeg iznosa sa malim kapacitetom u trenutku promatranja nego sa većim kapacitetom kako je prikazano i na grafu 3.7, pa dolazi se do zaključka istog kao i kod serijski induktivnog svitka, da je povoljnije imati veću vrijednost kapaciteta za manju strminu i što kasnije vrijeme poprimana konačne vrijednosti prolaznog vala.



Graf 3.6. Prikaz kako promjena kapaciteta utječe na napon prolaznog vala U_2



Graf 3.7. Prikaz kako promjena kapaciteta utječe na strminu prolaznog vala



Graf 3.8. Prikaz kako promjena kapaciteta utječe na struju prolaznog vala i_2

Ako se želi zamijeniti serijski spojeni svitak kondenzatorom, onda je potrebno postići iste vremenske konstante $T_C = T_L$. Ovakav postupak biti će prikazati sljedećim primjerom.

Na električni motor valnog otpora $Z_2 = 500 \Omega$ dolazi val vodom valnog otpora $Z_1 = 300 \Omega$, okomita čela beskonačnog trajanja i iznosa $U_0 = 170 \text{ kV}$. Koliki induktivitet je potrebno priključiti da napon na prvim zavojima motora ne naraste više od 800 V , ako je duljina zavoja 3 m , kojim se val kreće brzinom $6 \cdot 10^7 \text{ m/s}$? Zatim koliki kondenzator treba upotrijebiti za isto ograničenje napona?

Rješenje:

Strmina koja je dopuštena iznosi:

$$s_{(\text{dop})} = \frac{800}{3} = 0,266 \frac{\text{kV}}{\text{m}}.$$

Iz izraza za maksimalnu strminu izlučujemo i računamo vrijednost induktiviteta:

$$s = \frac{dU_2}{dt} = \frac{2U_0Z_2}{L} \rightarrow L = \frac{2U_0 \cdot Z_2}{v \cdot S_{(\text{dop})}} = \frac{2 \cdot 170 \cdot 500}{6 \cdot 10^7 \cdot 0,266} = 10,651 \cdot 10^{-3} \text{ H.}$$

Vremenska konstanta se ne mijenja kad zamijenimo induktivitet sa kondenzatorom pa će izraz za kapacitet biti:

$$T_L = T_C = \frac{L}{Z_1 + Z_2} = \frac{Z_1 Z_2 C}{Z_1 + Z_2} \rightarrow C = \frac{L}{Z_1 \cdot Z_2} = \frac{10,651 \cdot 10^{-3}}{300 \cdot 500} = 7,1 \cdot 10^{-8} \text{ F.}$$

Maksimalna strmina kod kondenzatora iznosi:

$$s_{\text{MAX}} = \frac{2U_0}{vCZ_1} = \frac{2 \cdot 170}{300 \cdot 7,1 \cdot 10^{-8} \cdot 6 \cdot 10^7} = 0,266 \frac{\text{kV}}{\text{m}}.$$

Iz dobivenih rezultata vidi se da je maksimalna strmina jednaka induktivno spojenom svitku i kondenzatoru s time da je za isto ograničenje postignuto malim kapacitetom i većim induktivitetom.

3.6. Titrajni krug

Kombinacije induktiviteta i kondenzatora na koje nailazi val okomitog čela i stalnom amplitudom, čine titrajni krug. To je zapravo pojava titraja energije koja se prikupi u induktivitetu, a zatim se isprazni pa se nakupi u kapacitetu.

Poznato je da induktivitet u prvim trenucima ima veliki otpor odnosno malu struju, veliki napon. Kako vrijeme prolazi struja će rasti do i_{max} i puniti kondenzator na kojemu će rasti napon U_c . Kad se kondenzator napuni tada je opet prekinuta struja, pa će se akumulirana magnetska energija svitka pretvoriti u električnu i povisiti napon na kondenzatoru do U_{max} . Ta akumulacija električne energije i porast napona uzrokuje pražnjenje kondenzatora, odnosno opadanje napona na njemu i električne energije. Kad se isprazni kondenzator svitkom opet počinje teći struja i nastaje ponovni postupak pretvorbe energije.

Napon na kondenzatoru određuje se jednačbom:

$$U = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = L \frac{di}{dt} + U_c. \quad (3.34.)$$

Derivacijom člana jednačbe $U_c = (1/C) \int i dt$, dobiva se struja $di/dt = C(d^2U_c/dt^2)$, koju uvrštavamo u izraz 3.34. :

$$\frac{U}{LC} = \frac{d^2U_c}{dt^2} + \frac{U_c}{LC}, \quad (3.35.)$$

a ako se postavi uvjet da je $t = 0$, i Laplaceovom transformacijom izraz 3.35. poprima oblik :

$$\frac{U(p)}{LC} = d^2U_c(p) + \frac{U_c(p)}{LC}. \quad (3.36.)$$

Izvlačenjem napona U_c i uvrštavanje izraza za brzinu $\omega = 1/\sqrt{LC}$, dobiva se izraz:

$$U_c(p) = \frac{U(p)\omega^2}{\omega^2 + p^2}. \quad (3.37.)$$

U ovom slučaju promatra se pravokutni impuls pa je $U(p) = U_o/p$ i konačni izraz za promjenu napona u vremenu je:

$$U_c = U_o(1 - \cos\omega t). \quad (3.38.)$$

Izraz se sastoji od dviju komponenti od koje je druga ovisna o promjeni kosinusa, pa će se tako val na kondenzatoru u vremenu kad je $\tau/2$ (τ je period oscilacije titrajnog kruga), imati dvostruko veću amplitudu od upadnog vala. Strmina na kondenzatoru poprima vrijednost po formuli:

$$s_{\max} = U_o\omega = U_o \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (3.39.)$$

Iz izraza 3.39. vidi se da je strmina ovisna o vrijednostima induktiviteta, kapaciteta i o amplitudi nailazećeg vala. Međutim u praksi valovi imaju položeno čelo strmine $s = U_o/T\check{c}$, pa se u izraz 3.37. uvrštava za $U(p) = U_o/T\check{c}p^2$, i nakon sređivanja izraza napon u vremenu $t < T\check{c}$:

$$U_c = s \left(t - \frac{\sin\omega t}{\omega} \right). \quad (3.40.)$$

Opet se izraz za napon sastoji od dvije komponente, od kojih jedna ovisi o vremenu a druga o promjeni sinus funkcije. Napon na kondenzatoru je viši sa većom strminom s i vremenom titrajnog kruga τ ($\omega = 2\pi / \tau$). Ovo vrijedi za interval od 0 do $T\check{c}$, a vrijednosti napona poslije vremena $T\check{c}$ određujemo drugačijom metodom.

Ako po principu superpozicije, napon koji nailazi ima dva vala od kojih je jedan pozitivan, a drugi negativan i koji su vremenski pomaknuti za $T\check{c}$. Pozitivan val je izveden izrazom 3.38. a negativnog se izvodi tim izrazom i pomiče ga se u vremenu za $T\check{c}$:

$$U_c = -s \left((t - T\check{c}) - \frac{\sin \omega(t - T\check{c})}{\omega} \right), \quad (3.41.)$$

pa se izrazi 3.41. i 3.40. zbroji (te uvrsti $\omega = 2\pi / \tau$ i $\tau = 2\pi / \omega$) i dobiva se vrijednost napona za $t > T\check{c}$:

$$U_c = U_o \left[1 - \frac{\sin \frac{\pi T\check{c}}{\tau}}{\frac{\pi T\check{c}}{\tau}} \cos \left(2\pi \frac{t}{\tau} - \pi \frac{T\check{c}}{\tau} \right) \right]. \quad (3.42.)$$

U trenutku $t = \frac{\tau + T\check{c}}{2}$ cos član će biti -1 a najveći napon na kondenzatoru računa se izrazom:

$$U_{cmax} = U_o \left[1 + \frac{\sin \frac{\pi T\check{c}}{\tau}}{\frac{\pi T\check{c}}{\tau}} \right]. \quad (3.43.)$$

U slučaju da strmi val amplitude $U_o = 400 \text{ kV}$ i strmine $s = 600 \text{ kV}/\mu\text{s}$, nailazi na titrajni krug od induktiviteta $L = 12,2 \cdot 10^{-6} \text{ H}$ i kapaciteta $C = 4 \cdot 10^{-9} \text{ F}$. Izračunaj maksimalan napon na kapacitetu.

Rješenje:

Trajanje čela vala:

$$T\check{c} = \frac{U_o}{s} = \frac{400}{600} = 0,666 \mu\text{s}.$$

Period titrajnog kruga iznosi:

$$\tau = 2\pi\sqrt{LC} = 2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{12,2 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{-9}} = 1,388 \mu\text{s}$$

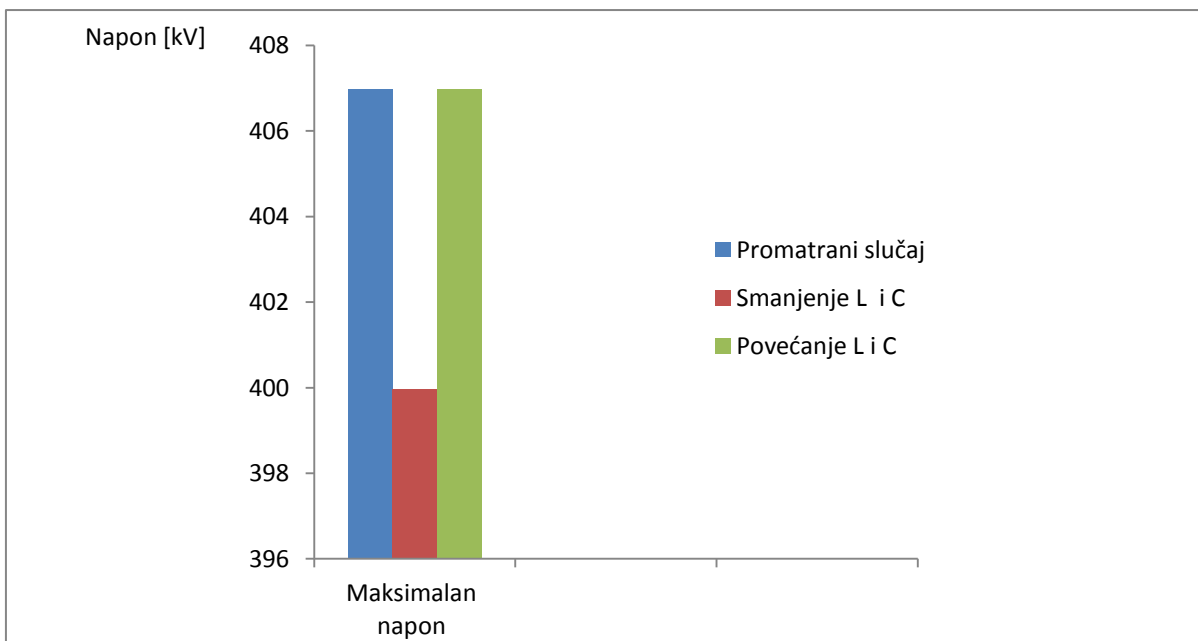
Maksimalan napon je:

$$U_{\text{cmax}} = U_0 \left[1 + \frac{\sin \frac{\pi T \check{c}}{\tau}}{\frac{\pi T \check{c}}{\tau}} \right] = 400 \cdot \left[1 + \frac{\sin \frac{\pi \cdot 0,666}{1,388}}{\frac{\pi \cdot 0,666}{1,388}} \right] = 406,98 \text{ kV}.$$

Smanjivanjem vrijednosti induktiviteta i kapaciteta na $L = 6 \cdot 10^{-6} \text{ H}$, $C = 3 \cdot 10^{-12} \text{ F}$, a zatim i povećanje na vrijednosti $L = 6 \cdot 10^{-3} \text{ H}$ i $C = 3 \cdot 10^{-6} \text{ F}$ promatra se promjena napona. Istim postupkom kao i u prethodnom primjeru računamo maksimalan napon. Rezultati su prikazani u tablici 3.10..

Induktivitet L i kapacitet C titrajnog kruga	Promatrani slučaj $L = 12,2 \cdot 10^{-6} \text{ H}$ $C = 4 \cdot 10^{-9} \text{ F}$	Smanjenje $L = 6 \cdot 10^{-9} \text{ H}$, $C = 10^{-12} \text{ F}$	Povećanje $L = 6 \cdot 10^{-3} \text{ H}$ $C = 3 \cdot 10^{-6} \text{ F}$
Maksimalan napon U_{cmax}	406,98 kV	399,967 kV	406,98 kV

Tablica 3.10. Prikaz vrijednosti maksimalnog napona prilikom smanjivanja ili povećavanja induktiviteta i kapaciteta



Graf 3.9. Utjecaj promjene vrijednosti induktiviteta i kapaciteta na maksimalan napon

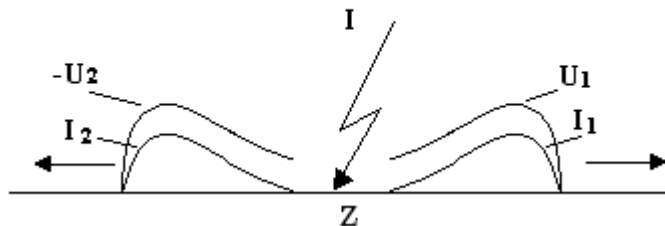
Iz primjera zaključuje se da što je manji omjer $T\check{c}/\tau$, to će maksimalan napon na kondenzatoru biti veći, odnosno produljenjem $T\check{c}$, U_{cmax} se smanjuje. Isto tako smanjivanjem kapaciteta i induktiviteta smanjuje se τ , a samim time i omjer $T\check{c}/\tau$ je veći pa će napon U_{cmax} pasti, dok se kod povećanja induktiviteta i kapaciteta napon povećao vrlo malo što možemo vidjeti na grafu 3.3. Takve promjene induktiviteta i kapaciteta služe za smanjivanje maksimalnog napona.

4. ZAŠTITA NADZEMNIH VODOVA SA I BEZ ZAŠTITNOG UŽETA OD ATMOSFERSKOG PRAŽNJENJA

U praksi za većinu dalekovoda inducirani prenaponi ne predstavljaju problem, jer inducirani naponi postižu vrijednosti do 400 kV, a takve vrijednosti napona nisu opasne za izolaciju vodova većih napona od 110 kV. Međutim za ostale nadzemne vodove pojava prenapona je štetna pa je potrebno zaštititi fazne vodove od udara groma. Najčešća zaštita je postavljanje zaštitnog užeta iznad faznih vodiča koji odvede struju groma. Za postavljanje zaštitnog užeta potrebno je posvetiti pažnju na puno faktora iako se i u slučaju zaštite užetom može pojaviti direktni udar u fazni vodič ili stup, što svakako želimo izbjeći, vjerojatnost je vrlo mala.

4.1. Udar groma u nadzemni vodič bez zaštitnog užeta

U slučaju direktnog udara groma u dalekovod bez zaštitnog užeta, struja groma i se dijeli na lijevu i_2 i desnu i_1 stranu voda valnog otpora Z (faznog vodiča), kako je prikazano na slici 4.1.



Sl. 4.1. Udar groma u fazni vodič

Izrazi za struje su:

$$i_1 = \frac{1}{2}i \quad i_2 = \frac{1}{2}i, \quad (4.1)$$

ukoliko se pretpostavi da nema refleksije tada će struje i_2 i i_1 na vodu valnog otpora Z stvarati naponske putne valove:

$$U_1 = \frac{1}{2}i \cdot Z \quad U_2 = -\frac{1}{2}i \cdot Z. \quad (4.2.)$$

U izrazu 4.2. naponi U_1 i U_2 biti će iste amplitude i strmine, ali su suprotnog smjera jedan od drugog pa nam jedan ima negativnim predznak. Ako struja groma i_g prilikom udara naiđe na mali otpor voda, vrijednost će struje i na vodu biti najveća i u tom slučaju imamo dva otpora.

Prvi je otpor pogođenog vodiča Z_k , a drugi je valni otpor kanala groma Z_g . Struju računamo sljedećim izrazom:

$$i = i_g \frac{Z_g}{Z_g + Z_k} . \quad (4.3.)$$

Ako je poznato da se grom na vodu dijeli na dvije strane tada će i otpor Z_k biti jednak polovici otpora, odnosno $Z/2$. Kad to uvrstimo u izraz 4.3. dobije se struja na pogođenom vodu izrazom:

$$i = i_g \frac{2Z_g}{2Z_g + Z_k} , \quad (4.4.)$$

a uvrštavanjem izraza za struju 4.4. u izraz za napon 4.2. dobiva se izraz za računanje napona putujućeg vala izrazom:

$$U_1 = U_2 = \frac{1}{2} i \cdot Z = i_g \frac{2Z_g \cdot Z}{2Z_g + Z} = \frac{i_g}{\frac{2}{Z} + \frac{1}{Z_g}} . \quad (4.5.)$$

U praksi se za valni otpor voda Z uzima vrijednost od 400Ω , dok se za valni otpor kanala groma Z_g ne može utvrditi točan iznos pa ga pretpostavimo da može iznositi od 300Ω do 1000Ω . Struja groma neka iznosi $i_g = 50 \text{ kA}$. Izračunate vrijednosti struje i i napona na vodu iznose:

$$i = i_g \frac{2Z_g}{2Z_g + Z} = 50 \cdot 10^3 \frac{2 \cdot 200}{2 \cdot 200 + 400} = 30 \text{ kA} ,$$

$$U_1 = U_2 = \frac{i_g}{\frac{2}{Z} + \frac{1}{Z_g}} = \frac{50 \cdot 10^3}{\frac{2}{400} + \frac{1}{300}} = 6 \text{ 000 kV} .$$

Promjenom iznosa struje groma na vrijednosti $i_g = 80 \text{ kA}$ istim postupkom dobiveni su rezultati struja i napona zapisani u tablici 4.1.

Vrijednosti otpori Z i Z_g	$Z = 400\Omega, Z_g = 300 \Omega$	$Z = 400\Omega, Z_g = 1000 \Omega$
Struja voda i $I_g = 50 \text{ kA}$	30 kA	41,666 kA
Struja voda i $I_g = 80 \text{ kA}$	48 kA	66,666 kA
Napon na vodu U_1, U_2 $I_g = 50 \text{ kA}$	6 000 kV	8 333 kV
Napon na vodu U_1, U_2 $I_g = 80 \text{ kA}$	9 600 kV	13 333 kV

Tablica 4.1. Promjena vrijednosti valnog otpora kanala i struje groma

Iz tablice se vidi da će struja i koja teče vodom biti sličnija struji i_g što je valni otpor kanala veći, odnosno da se napon više mijenja promjenom struje groma nego li valnim otporom kanala groma. Uslijed ovako velikih napona doći će do preskoka ili do proboja izolacije voda čime će struja teći prema zemlji uzemljivačem na kojem će biti velika razlika u naponu, opasna za ljude u pogonu. Također postoji velika vjerojatnost i za prijelaz struje groma na susjedne vodiče i njihovo iskapčanje iz pogona. U slučaju da se preskok dogodi sa voda na metalni ili armirani stup, postoji mogućnost da nakon struje groma nastavi teći pogonska struja od 50 Hz. Tada struja stvara električni luk koji oštećuje izolaciju. Dakle uslijed direktnog udara u fazni vodič može se očekivati pojava zemljospoja, jednopolnog i trolnog kratkog spoja. Zbog ovih neželjenih posljedica koristi se upotreba zaštitnog užeta za zaštitu pogona kao i sigurnost ljudi [6].

4.2. Udar groma u nadzemni vodič sa zaštitnim užetom

Glavna uloga zaštitnog užeta je da zaštiti fazne vodiče od struje groma, odnosno da prihvati struju groma i provede je u zemlju preko uzemljivača koji je smješten u temelju svakog stupa nadzemnih vodova. Zapravo, potrebno je osigurati da se ne dogodi preskok na fazne vodove. Zbog toga potrebno je obratiti pažnju na dobro uzemljenje stupova, tako da otpor uzemljenja ne prelazi vrijednost od 15Ω (mjerjenje izvršeno izmjeničnom strujom).

Prilikom udara u blizini voda nastaju jaka električna polja, kao i magnetska polja koja stvaraju visoke napone koji dostižu i do 400 kV. U tom slučaju vodovi 30 i 35 kV mreže se nalaze u opasnosti dok za više naponske razine ovakvi udari ne stvaraju kvarove. I u ovakvim slučajevima vodovi sa zaštitnim užetom su zaštićeniji jer se prilikom induciranja napona na užetu inducira napon i na faznom vodu. U tom slučaju isti potencijal imaju i zaštitno uže (stup) i fazni vodič pa se ne događa preskok sa faznog vodiča na stup. U slučaju bez zaštitnog užeta doći će do proboja sa faznog vodiča na stup ako je izrađen od metalne ili armiranobetonske konstrukcije.

Zaštitno uže mora biti pravilno smješteno iznad faznih vodova, tako da ih zaklanja svojim položajem koji ćemo odrediti pomoću elektrogeometrijske metode [4].

4.2.1 Elektrogeometrijska metoda

U praksi u nadzemni vod mogu udariti struje groma koje će imati vrijednosti manje od kritične preskočne vrijednosti izolacije lanca, a označava se sa U_{pr} . U tom slučaju $U_{pr} > (i/2) \cdot Z$, te takvi putni valovi ne predstavljaju problem i neće stvarati preskoke na vodovima. Drugi slučaj je kada vrijednost struje groma izaziva vrijednosti vala veće od kritične preskočne vrijednosti izolacije lanca odnosno kada je $U_{pr} < (i/2) \cdot Z$. Dakle postoje dvije vrste udara groma i potrebno je odrediti u kojem slučaju će struja groma izazivati preskoke na izolaciji dalekovoda. U tablici 4.2. prikazane su vrijednosti struja groma koje su granične za pojedine nazivne vrijednosti napon dalekovoda, te vjerojatnosti da se pojavi veća vrijednost struje groma od granične i_g , kada će nastati preskok izolacije. Kada vrijednost struje groma premaši tu graničnu vrijednosti struje i_g doći će do preskoka izolatorskog lanca.

Nazivni napon dalekovoda (kV)	Granična struja i_g (kA)	Vjerojatnost preskoka %
225	5 ili 6	95
400	8 ili 9	87
750	18 ili 20	62
1000	25 ili 30	48
1300	35 ili 40	35

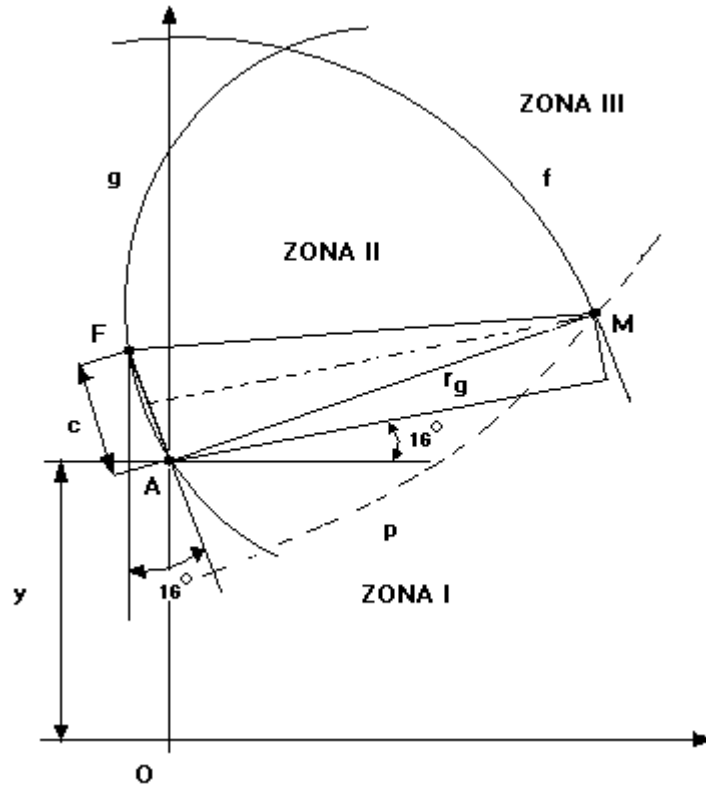
Tablica 4.2. Vrijednosti graničnih struja i vjerojatnosti preskoka kod pojedinih naponskih razina

Iz tablice 4.2. jasno je da će vrijednost struje groma premašiti graničnu vrijednost i_g češće kod manjih naponskih razina koji podnose manja naprezanja od vodova većih naponskih razina sa jačom izolacijom. Za vrijednosti struje udara manje od granične vod će provesti struju bez štetnih posljedica. Zbog već spomenutih neželjenih posljedica postavlja se zaštitno uže raznim metodama, a jedna od takvih je i elektrogeometrijska metoda. Osnove ove metode postavili su E. R. Whitehead i R. H. Golde. U ovoj metodi zaštitno uže sprječava udare groma koji su štetni za izolaciju vodova, odnosno kod kojih je $U_{pr} < (i/2) \cdot Z$, kada je struja groma jača od granične struje proboja izolacije voda i_g . Ovakvo „povremeno“ djelovanje zaštitnog užeta je moguće primijeniti zbog poznavanja činjenice da će struja udara groma imati veću vrijednost što je veći razmak između glave groma i objekta na zemlji. Takav razmak zove se „posljednja probojna udaljenost“ i označava se sa r . U slučaju kada struja groma prijeđe graničnu vrijednost i_g , posljednja probojna udaljenost računa se zasebno za svaki nadzemni vod i označava se sa r_g a računa se prema izrazu dobiven iz grafičke analize:

$$r_g = 6,7 \cdot i_k^{0,8}. \quad (4.6.)$$

Ukoliko je razmak $r < r_g$, struja neće predstavljati opasnost za vod zbog svoje male vrijednosti ili zbog toga što će grom udariti u zemlju i tada je riječ o prvoj zoni kako je naznačeno na slici 4.4.. Kada je $r > r_g$ struja će biti veća od granične i tada je opasna za fazni vod, odnosno riječ je o trećoj zoni. U tom slučaju zaštitno uže djeluje svojom pozicijom, odnosno položajem kojime će biti bliže glavi groma od faznog vodiča i na taj način preuzeti udar groma na sebe prilikom jačih udara.

Kako raste udaljenost r tako se smanjuje udaljenost udara groma i zaštitnog užeta u odnosu na fazni vodič koji se udaljava od glave groma. Druga zona je prostor u kojem će izolacija voda izdržati struju groma.



Sl. 4.2. Geometrijska konstrukcija modela zaštite vodiča označenog sa točkom A pomoću zaštitnog užeta označenog sa točkom F

Na slici luk p označuje parabolu koja predstavlja istu udaljenost okoline od vodiča i zemlje, ispod nje se nalazi zona 1 u kojoj će svi udari završiti u zemlji koja je označena ishodištem. Zonu 2 predstavlja prostor omeđen lukom p , lukovima kružnica f i g koji su dobiveni povlačenjem kružnice iz točke M i F polumjerom jednakim r_g . Iznad tih polumjera nalazi se zona 3. Naznačen je i kut zaštite dobiven između pravca koji prolaze faznim vodičem i zaštitnim užetom te se zatvara sa okomicom zaštinog užeta.

Za izračun kuta φ koristimo izraz dobiven grafičkom analizom:

$$\varphi = \arcsin\left(1 - \frac{y}{r_g}\right) - \arcsin\frac{c}{2r_g} . \quad (4.7.)$$

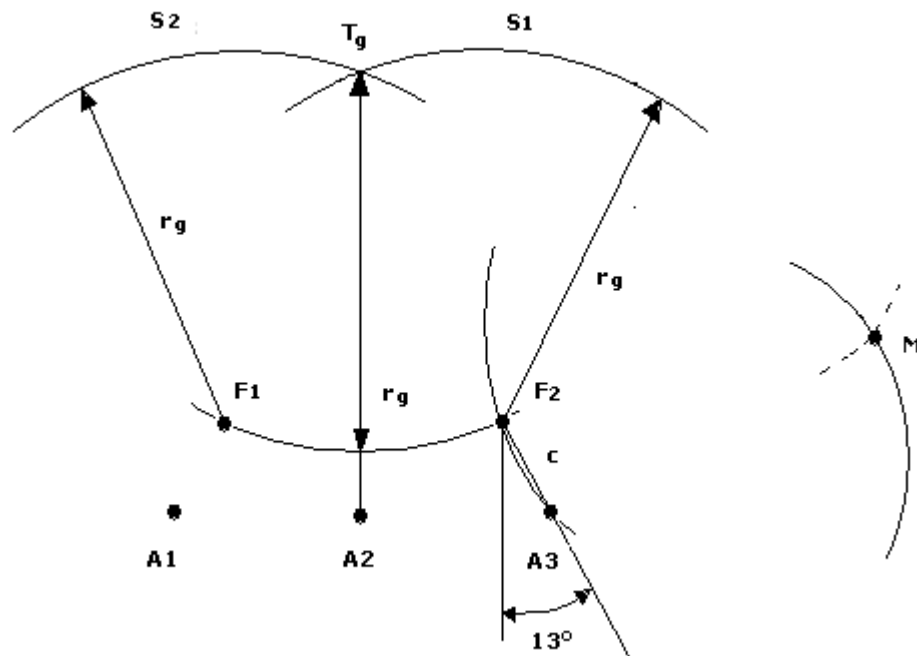
U izrazu 4.7. kao i na slici 4.2. φ je kut zaštite dalekovoda na ravnoj površini zemlje, c je udaljenost zaštitnog užeta i faznog vodiča, a y je visina vodiča nad zemljom.

U slučaju da je $y = 18 \text{ m}$, $c = 5 \text{ m}$, $i_k = 5 \text{ kA}$ te $r_k = 28 \text{ m}$, potrebno je izračunati kut zaštite :

Rješenje:
$$\varphi = \arcsin\left(1 - \frac{18}{28}\right) - \arcsin\frac{5}{2 \cdot 28} = 15,802^\circ .$$

Kut je približno 16° , kako je prikazano na slici 4.2..

Često se zbog raznih vremenskih faktora uzima 10 % veća vrijednost visine faznog vodiča od zemlje i tada se kut smanjuje, a stupanj zaštite postaje veći. U praksi se više faznih vodiča štiti sa više zaštitnih užadi.



Sl. 4.3. Prikaz određivanja zaštitnog kuta pri zaštiti tri fazna vodiča sa dva zaštitna užeta

Sa slike 4.3. točke A_1, A_2, A_3 označavaju vodove koje treba zaštititi, a točke F_1 i F_2 predstavljaju zaštitnu užad pomoću kojih trebamo zaštititi vodove.

Iz točkaka F_1 i F_2 iscrtani su lukovi kružnica S_1, S_2 polumjera r_g , koji se sijeku u točki T_g kako je prikazano na slici 4.3..

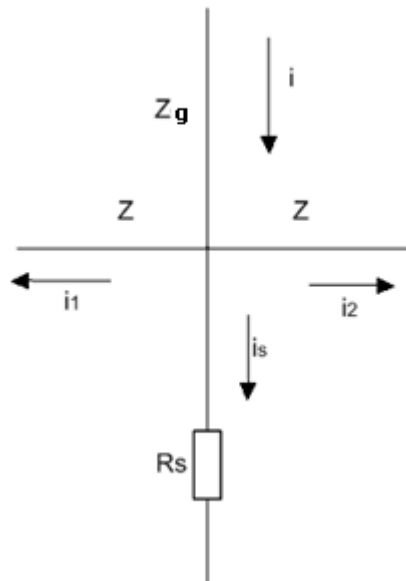
Da bi bila dovoljna zaštita sa samo dva zaštitna užeta za tri fazna vodiča potrebno je zadovoljiti uvjet:

$$TgA_2 \geq 1,1 r_g . \quad (4.8.)$$

U izrazu 4.8. TgA_2 je udaljenost faznog vodiča i točke sjecišta kružnice, dok je r_g posljednja probojna udaljenost izračunata za ovaj vodič. Ako je duljina TgA_2 manja od $1,1 \cdot r_g$ tada se povećava razmak između zaštitnih vodiča, a ukoliko je duljina manja onda se smanjuje udaljenost, ali sa pažnjom da istureni vodiči A_1, A_3 budu zaštićeni. Treba se postići što manji kut zaštite φ , kao i o najpogodnijim vrijednostima y/r_g i c/r_g . U praksi se smanjuju kvarovi za čak 50 puta u odnosu na vodove bez zaštitnog užeta postavljeni pod kutom, izračunat ovom metodom[4].

5. ODVODNJA STRUJE GROMA

Odvodnja struje groma od vrha nadzemnog stupa do zemlje je složen postupak zbog jakih i vremenski promjenjivih vrijednosti struja koje uzrokuju jednako tako jaka i promjenjiva magnetska polja. U praksi za odvodnju struje koriste zaštitne užadi koje moraju biti dobro uzemljene kako bi sprovele struje jačine i do 60 kA. Na slici 5.1. prikazana je nadomjesna shema pomoću koje se lakše promatra odvodnja struje groma. Na slici Z_0 je valni otpor kanala groma, Z predstavlja valni otpor zaštitnog užeta kojeg pogodi grom te R_s koji predstavlja otpor uzemljenja stupa. U trenutku udara struja groma i se grana na tri dijela. Dvije struje i_2 i i_1 kreću se po zaštitnom užetu dok je struja i_s struja koja se kreće prema zemlji po uzemljivaču.



Sl.5.1. Nadomjesna shema udara groma u vrh nadzemnog stupa

Vrijednosti napona koji će se pojaviti ovise o vrijednostima otpora pa kako su grane otpora Z na zaštitnom užetu jednake tako će i napon na njima biti jednak, a posebno je značajan napon koji će se pojaviti prema zemlji jer će on naprezati izolaciju nadzemnog voda. Izraz za taj napon je:

$$U_s = i_s R_s . \quad (5.1)$$

Od prethodnog razmatranja struja koja će proteći zaštitnim užetom i_s računamo prema relaciji:

$$i = i_g \frac{Z_g}{Z_g + Z_k} . \quad (5.2.)$$

Kod ovog slučaja ukupni otpor Z_k je kombinacija triju otpora:

$$Z_k = i \frac{Z/2 \cdot R_s}{Z/2 + R_s}, \quad (5.3.)$$

pa je konačni izraz za struju koja će teći zaštitnim užetom dobiven iz slike 5.1. jednak:

$$i_s = i \frac{Z/2}{\frac{Z}{2} + R_s}. \quad (5.4.)$$

Uvrštavanjem izraza za struju 5.4. u izraz 5.1. dobiva se izraz za napon na vrhu stupa:

$$U_s = i_g R_s = i \frac{Z}{\frac{Z}{2} + R_s} \cdot R_s = I_g \frac{Z_g}{Z_g + Z_k} \cdot \frac{Z}{\frac{Z}{2} + R_s} \cdot R_s. \quad (5.5.)$$

Zamjenom paralelnog otpora pogođenog objekta Z_k iz izraza 5.3. uvrštavanjem u izrazu 5.5. dobivamo konačan izraz za napon na vrhu pogođenog stupa:

$$U_s = \frac{i_g}{\frac{1}{R_s} + \frac{2}{Z} + \frac{1}{Z_g}}. \quad (5.6.)$$

Ako je dalekovod pogođen strujom groma $i_g = 40 \text{ kA}$ u zaštitno uže, otpor uzemljenja iznosi $R_s = 10 \Omega$. Za valni otpor zaštitnog užeta uzima se vrijednost $Z = 400 \Omega$, a za otpor kanala groma $Z_g = 200 \Omega$. Potrebno je odrediti vrijednost napona na vrhu stupa.

Rješenje:

$$U_s = \frac{40 \cdot 10^3}{\frac{1}{10} + \frac{2}{400} + \frac{1}{200}} = 363,636 \text{ kV}.$$

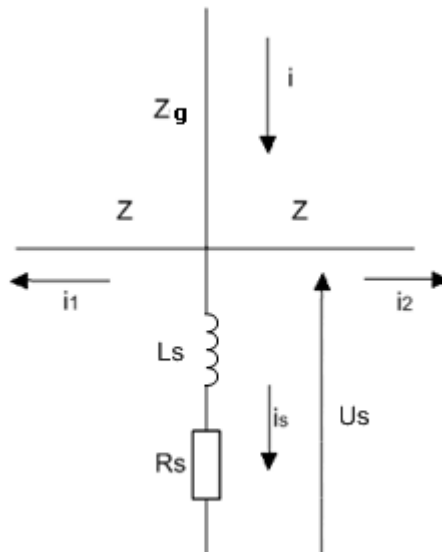
Ukoliko se računa vrijednost napona za udara groma u fazni vodič pri istoj vrijednosti struje groma, uvrštava se iznos otpora uzemljenja $R_s = \infty$. Tada valna vrijednost napona iznosi :

$$U_s = \frac{40 \cdot 10^3}{0 + \frac{2}{400} + \frac{1}{200}} = 4\,000 \text{ kV}.$$

Dakle vidi se da će biti manja vrijednost napona ukoliko je otpor uzemljenja zaštitnog užeta male vrijednosti, zbog grananja struje groma na tri dijela i njezine brze odvodnje u zemlju.

5.1. Utjecaj induktiviteta uzemljenja

Prilikom udara groma najveći dio struje groma zbog malog otpora poteći će granom zaštitnog užeta koja je usmjerena prema zemlji zbog njezinog malog otpora. Na toj grani se odvija promjena električne u magnetsku energiju, koja je vrlo jaka zbog jačine struje groma. Zbog toga se na uzemljenju od stupa do zemlje javljaju i gubitci koji su induktivnog karaktera. Zato se radi lakšeg promatranja dodaje induktivitet L_s kako je prikazano na slici:



Sl. 5.2. Nadopunjena nadomjesna shema 5.1.

Obično se uzima da je vrijednost induktiviteta uzemljenja vrlo mala reda veličine nekoliko mili Henrija po jednom metru duljine vodiča koji spaja zaštitno uže i uzemljivač. Međutim zbog jakih i promjenjivih struja potrebno je uzeti u obzir i induktivitet uzemljivača.

U ovom slučaju napon će ovisiti i o padu napona na induktivitetu, a ne samo o otporu vodiča, pa će se napon na vrhu stupa računati izrazom :

$$U_s = i_s R_s + L_s \frac{di_s}{dt}, \quad (5.7.)$$

a sređivanjem dobivamo izraz:

$$U_s(p) = i_s(p) \cdot (R_s + L_p) = i_s(p) \cdot Z_s(p). \quad (5.8.)$$

U izrazu 5.8. $Z_s(p)$ je impedancija grane koja je povezana sa uzemljivačem i stupom.

Prema prije izvedenom izrazu 5.2. za struju groma koja se grana, uvođenjem u izraz 5.8. dobiva se izraz:

$$U_s(p) = i_s(p) \cdot Z_k(p) = i_g(p) \frac{Z_g \cdot Z_s(p)}{Z_g + Z_s(p)}, \quad (5.9.)$$

u kojem je :

$$Z_k(p) = \frac{\frac{Z}{2} \cdot Z_s(p)}{\frac{Z}{2} + Z_s(p)} ; \quad Z_s(p) = R_s + L_s p. \quad (5.10.)$$

Budući da struja groma i_g ima ravnu amplitudu i okomito čelo, u izrazu 5.9. za $i_g(p)$ uvrštava se (i_g/p) a sa R_2 označava se paralelna kombinacija otpora zaštitnog užeta ($Z/2$). Kad se uvrste jednadžbe 5.10. u izraz 5.9. i transformacijom konačan izraz za napon u određenom vremenu računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$U_s(t) = i_g \frac{Z_g \cdot R_2}{Z_g + R_2} e^{-\left(\frac{t}{T}\right)} \cdot \frac{i_g \cdot Z_g \cdot R_s}{Z_g \left(\frac{R_s}{R_2} + 1\right) + R_s} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)}\right). \quad (5.11.)$$

Konstanta kruga je:

$$T = \frac{L_s(Z_g + R_2)}{R_2 Z_g + R_s Z_g + R_s R_2}. \quad (5.12.)$$

Prilikom analize izraza 5.11. posebno su zanimljiva dva stanja, prvo je u trenutku $t = 0$, kada grom udari u stup, izraz za napon je :

$$U_s(0) = i_g \frac{Z_g \cdot R_2}{Z_g + R_2}. \quad (5.13.)$$

Prema ovom izrazu vidi se da će napon na vrhu stupa biti visok u prvim trenucima, odnosno imamo prilike kao da zaštitno uže nije povezano sa uzemljenjem.

Do toga dolazi zbog induktiviteta vodiča koji ne propušta struju odmah, već se postepeno odvija pretvorba električne u magnetsku energiju.

Kako vrijeme prolazi struja će rasti prolazeći kroz induktivitet i teče prema zemlji, to će utjecati na snižavanje napon na vrhu stupa, a izraz za napon u trenutku $t = \infty$ je :

$$U_s(\infty) = \frac{i_g \cdot Z_g \cdot R_s}{Z_g \left(\frac{R_s}{R_2} + 1 \right) + R_s} \quad (5.14.)$$

Ako je dalekovod pogođen strujom groma $i_g = 40 \text{ kA}$ u zaštitno uže, otpor uzemljenja iznosi $R_s = 10 \Omega$. Za valni otpor zaštitnog užeta uzima se vrijednost $Z = 400 \Omega$ ($R_s = Z/2 = 200\Omega$), a za otpor kanala groma $Z_g = 200 \Omega$. Potrebno je odrediti vrijednost napona na vrhu stupa u trenutku $t = 0$ i $t = \infty$.

Rješenje:

$$U_s(0) = i_g \frac{Z_g \cdot R_2}{Z_g + R_2} = \frac{40 \cdot 10^3 \cdot 200 \cdot 200}{200 + 200} = 4\,000 \text{ kV}.$$

$$U_s(\infty) = \frac{i_g \cdot Z_g \cdot R_s}{Z_g \left(\frac{R_s}{R_2} + 1 \right) + R_s} = \frac{40 \cdot 10^3 \cdot 200 \cdot 10}{200 \left(\frac{10}{200} + 1 \right) + 10} = 363,636 \text{ kV}.$$

Dakle samo nakon nekoliko trenutaka napon na stupu će poprimiti vrijednost koju je imao kod računanja bez induktiviteta stupa, tada na napon utječe samo otpor uzemljenja. Induktivitet stvara nepoželjni visoki napon u prvim trenucima pri kojima može doći do preskoka pa treba obratiti pažnju da je vrijednost induktiviteta mala.

Stupovi koji se nalaze u blizini pogođenog stupa malim otporima uzemljenja povećavaju grananje struje groma i smanjuju vrijednost napona jer se valovi odbijaju od uzemljivača suprotnim predznakom. U proračunu za najveći mogući napon na stupu ova se okolnost ne uzima u obzir kako bi dobili najnepovoljniju situaciju odnosno najveći mogući napon.

Stoga napon koji će se javiti na stupu ovisiti će o obliku i jačini struje groma, ali i o parametrima uzemljenja R_s i induktiviteta L_s na koje možemo utjecati za razliku od parametara struje. Konstrukcijom stupa i vrstom uzemljenja moguće je utjecati na sigurnost postrojenja, međutim prilikom određivanja vrijednosti R_s i L_s nailazi se na puno poteškoća.

Mjerenja koja se obavljaju za određivanje otpora uzemljenja ne izvode se jačinom struje groma (od 5 do 50 Hz) već izmjeničnom strujom 50 Hz. Zbog toga će iznos otpora uzemljivača R_s prilikom udara biti različit od mjerenog [6].

Također i kod određivanja induktiviteta L_s , prilike magnetskih tokova između zaštitnog užeta i faznog vodiča su složene i teško ih je predvidjeti. Dakle stvarne vrijednosti će se razlikovati od izračunatih pa će i mogućnost za pogrešnu procjenu parametara i pojave povratnog preskoka postojati.

6. ZAKLJUČAK

Kvarovi dalekovoda uglavnom su posljedica atmosferskih pražnjenja, a uzrok može biti udar munje u stup, zaštitno uže ili direktan udar u fazni vodič . Prilikom projektiranja sustava zaštite od atmosferskog pražnjenja treba obratiti pažnju na parametre kao što su gustoća udara groma na trasi dalekovoda, specifična otpornost tla i karakteristike stupova. Ovakvi parametri su osnova za izbor nivoa izolacije i tip uzemljenja koji će direktno utjecati na pojavu prenapona na vodu. Također položaj zaštitnih užeta kao i njihov broj ovisiti će o podnosivoj udarnoj struji opreme koju želimo zaštititi.

Uobičajena prenaponska zaštita dalekovoda se sastoji od uzemljivača i zaštitnog užeta koji sprječavaju izravan udar u fazni vodič dalekovoda kod udara struje groma većih amplituda od podnošljive izolacijske vrijednosti. Najčešće se događa udar u vrh stupa dalekovoda ili u zaštitno uže te dolazi do prenapona između stupa i faznog vodiča. Preskok izolatora će ovisiti o amplitudi i strmini struje groma, otporu uzemljenja, preskočnom razmaku izolatorskog lanca, atmosferskim uvjetima, vrijednosti faznog napona te mjestu udara. Vjerojatnost preskoka može se smanjiti odvodnicima prenapona koji osim ove uloge služe za sprječavanje dvostrukog ispadanja dalekovoda i poboljšavaju zaštitu transformatorskih stanica. Uloga kondenzatora i prigušnica na dalekovodima bez zaštitnog užeta je da smanji strminu odnosno da produži vrijeme trajanja čela naponskih valova koji nailaze na odvodnike. Time se postavljaju uvjeti za bolju i efikasniju prorađu odvodnika, a u konačnici i za veću sigurnost šticećenih elemenata.

Vrlo bitan faktor je i cijena investicije prilikom postavljanja zaštite, odnosno potrebno je provesti analizu isplativosti. Prilikom zaštite dalekovoda sa dva zaštitna užeta dolazi do povećanja troškova u odnosu na zaštitu sa samo jednim zaštitnim užetom, međutim efikasnost zaštite i njezina dugoročna isplativost potvrđuje i činjenica da je zaštita prijenosnih vodova sa dva zaštitna užeta zapravo svjetska praksa.

Pravilnim projektiranjem sustava zaštite na vodovima i ostalim objektima električne opreme će utjecati na životni vijek šticećenih postrojenja. Kod zaštite od atmosferskog pražnjenja na dalekovodima, kvaliteta izvedbe zaštite će smanjiti broj pojave smetnji u elektroenergetskoj mreži, povećati radni vijek opreme i pouzdanost elektroenergetskog sustava te smanjiti rizik od gubitka opskrbe električne energije.

7. LITERATURA

- [1] Uglešić I. i dr.: “Izabrana poglavlja tehnike visokog napona“ s interneta http://www.fer.unizg.hr/download/repository/IPTVN_predavanja_III_i_IV_dio.pdf , 15.03.2015.
- [2] “Barijere za prenaponsku zaštitu“, s interneta <http://mehatronika.gomodesign.rs/barijere-za-prenaponsku-zastitu/>. 18.03.2015.
- [3] “CVaristori“ s interneta <http://resonator1.blogspot.com/2013/07/varistori.html>. 18.03.2015.
- [4] Mario Padelin, “ Zaštita od groma“, Školska knjiga, Zagreb, 1987.
- [5] V.Milardić, M. Fištrić i K.Špoljarić: “Analiza prenaponske zaštite 110 kv dalekovoda primjenom EMTP programa“ s interneta https://bib.irb.hr/datoteka/654653.C4-03_R20130012.pdf. 24.05.2015.
- [6] G.Justinić :“Zaštita nadzemnih visokonaponskih vodova od atmosferskih prenapona“, s interneta, http://www.fer.unizg.hr/download/repository/KDI_Goran_Justinic.pdf. 02.06.2015.
- [7] B. Franc, M.Šturlan, I. Uglešić, Z. Hebel: “Primjena sustava za lociranje munja u vođenju elektroenergetskog sustava“, 10. savjetovanje HRO CIGRE, Cavtat, 6.-10. studenoga 2011.
- [8] B.Franc:“Primjena podataka o atmosferskim pražnjenjima u vođenju elektroenergetskog sustava“ s interneta http://www.fer.unizg.hr/download/repository/KDI_Bojan_Franc.pdf , 13.4.2015.
- [9] M.Podpecan, I.Juricev i A.Golob:“ Catalogues “ <http://www.etigroup.lv/files/userfiles/eti-lv/Catalogues/ETITEC-Guide.pdf>, s interneta 1.5.2015.
- [10] A.Piantini: “Lightning protection of overhead power distribution lines “, s interneta <http://www.iclp-centre.org/pdf/Invited-Lecture-4.pdf> , 21.4.2015.