

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**MODELIRANJE KOMBINIRANOG ZRAČNO-KABELSKOG  
VODA**

Rijeka, rujan 2015

Emil Prpić

0069058764

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**MODELIRANJE KOMBINIRANOG ZRAČNO-KABELSKOG  
VODA**

Mentor: Prof. dr. sc. Srđan Skok

Rijeka, rujan 2015

Emil Prpić

0069058764

## TEHNIČKI FAKULET

Povjerenstvo za završne ispite  
preddiplomskog stručnog studija elektrotehnike  
Br.: 602-04/15-14/44  
Rijeka, 13.07.2015.

# Z A D A T A K

## za završni rad

Pristupnik: Emil Prpić

Matični broj:0069058764  
Lokalni matični broj: 12800022

Naziv zadatka: **MODELIRANJE KOMBINIRANOG ZRAČNO-KABELSKOG VODA**

Naziv zadatka na  
engleskom jeziku: **MODELLING OF COMBINED OVERHEAD CABLE LINE**

Sadržaj zadatka:

Potrebno je prikazati osnove zračnih i kabelskih vodova. Osnovni cilj rada je teorijski izraditi model kombiniranog zračno-kabelskog voda. Također je teorijski potrebno objasniti utjecaj kombiniranog voda na podešenje zaštite takvog voda. Za navedeno je potrebno dati primjer izrađen u programskom paketu NEPLAN.

Zadano: 15.07.2015.

Mentor:



Izv. prof. dr. sc. Srđan Skok

Predsjednica Povjerenstva:



Izv. prof. dr. sc. Vera Gradišnik

Zadatak preuzeo dana: 15.07.2015.



(potpis pristupnika)

Dostaviti:

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

## IZJAVA

Ja, Emil Prpić, izjavljujem da sam prema članku 10. Pravilnika o završnom radu i ispitu na preddiplomskim sveučilišnim i stručnim studijima SAMOSTALNO izradio zadatak broj 602-04/15-14/44: Modeliranje kombiniranog zračno-kabelskog voda.



## Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Nadzemni vodovi.....	2
2.1. Vodiči nadzemnog voda i sami vodovi .....	2
2.1.1. Vrste vodiča.....	2
2.2. Karakteristične veličine voda .....	3
2.3. Nadomjesne sheme voda .....	4
2.3.1. $\pi$ shema voda .....	4
2.3.2. T shema voda.....	6
3. Kabelski vodovi .....	7
3.1. Značajke podzemnih kabela .....	7
3.2. Podmorski kabeli .....	8
4. Kombinirani zračno-kabelski vodovi.....	10
4.1. Osnovni čimbenici gradnje vodova s „univerzalnim kabelom“ .....	10
4.1.1. Univerzalni kabel proizvođača Ericsson .....	10
4.1.2. Univerzalni kabel proizvođača ELKA .....	15
4.1.3. Srednjenaponski kabelski snop.....	16
4.1.4. Trožilni kabeli s nosivim užetom .....	18
5. Zaštita kombiniranog zračno-kabelskog voda .....	19
5.1. Zaštite u elektroenergetskom sustavu.....	19
5.1.1. Projektiranje zaštite .....	19
5.1.2. Distantna zaštita.....	20
5.1.2.1. Opća načela .....	21
5.1.2.2. Automatsko ponovno uključenje.....	23
5.1.3. Zaštita od gubitka sinkronizma .....	23
5.1.4. Zaštite sustava .....	24

5.2. Zaštita od atmosferskih prenapona – nadzemni vodovi .....	24
5.2.1. Nadzemni vodovi izvedeni kabelom .....	24
5.2.2. Nadzemni SN vodovi s izoliranim vodičima.....	28
5.2.2.1. Postojeće tehničke preporuke u HEP ODS-u .....	29
5.2.2.2. Strana iskustva.....	30
5.2.2.3. Procjena ugroženosti voda od atmosferskih prenapona .....	33
5.2.2.4. Primjena zaštite od atmosferskih prenapona .....	35
5.3. Zaštita podzemnih vodova.....	36
5.3.1. Normalna zaštita.....	36
5.3.2. Posebna zaštita.....	36
6. Program laboratorijskih mjerenja .....	38
6.1. Ispitivanja izoliranih vodiča .....	38
6.2. Ispitivanja univerzalnog kabela.....	40
6.2.1. Ispitivanje kabela.....	40
6.2.2. Ispitivanje kabelskog pribora i ovjesne opreme .....	41
6.2.3. Ostala ispitivanja .....	42
7. Programski paket NEPLAN.....	43
8. Zaključak.....	46
9. Literatura.....	47
Dodatak A .....	48
Dodatak B .....	49

## 1. UVOD

Nadzemni vodovi u kombinaciji s kablskim vodovima vrlo su detaljni i zamršeni dijelovi elektroenergetskog sustava, a služe za pouzdan prijenos i distribucijske usluge. Elektroenergetski sustav pretežno je u stabilnom stanju ili u stanju u kojem bi se s dovoljnom točnošću moglo smatrati kao stabilno stanje. No, u elektroenergetskom sustavu uvijek postoje male promjene opterećenja i prijelazne pojave tako da u matematičkom smislu većina varijabli varira s vremenom. Međutim, ove varijacije većinu vremena su vrlo male tako da je elektroenergetski sustav algebarski opravdan.

Veći kvarovi nadzemnih vodova mogu nastati zbog udara munje i padova grana. Vodovi i izolatori pod opterećenjem leda i snijega također mogu uzrokovati velike mehaničke probleme. Kvarovi na podzemnim kablovima mogu biti serija kvarova u kojima kabel može biti prerezan, bez oštećenja izolacije ili bez oštećenja vodiča. Određivanje mjesta kvara u vodovima električne energije vrlo je bitno za gospodarski pogon elektroenergetskih sustava. Točna lokacija kvara omogućuje brži popravak, poboljšanje dostupnosti sustava i performanse, smanjenje troškova poslovanja i uštedu vremena radnicima koji bi tražili kvar po lošem vremenu i terenu.

Kako bi se kvarovi sveli na najmanju razinu, potrebno je provesti kvalitetnu zaštitu. O zaštiti kombiniranih zračno-kablskih vodova kasnije će biti više govora.

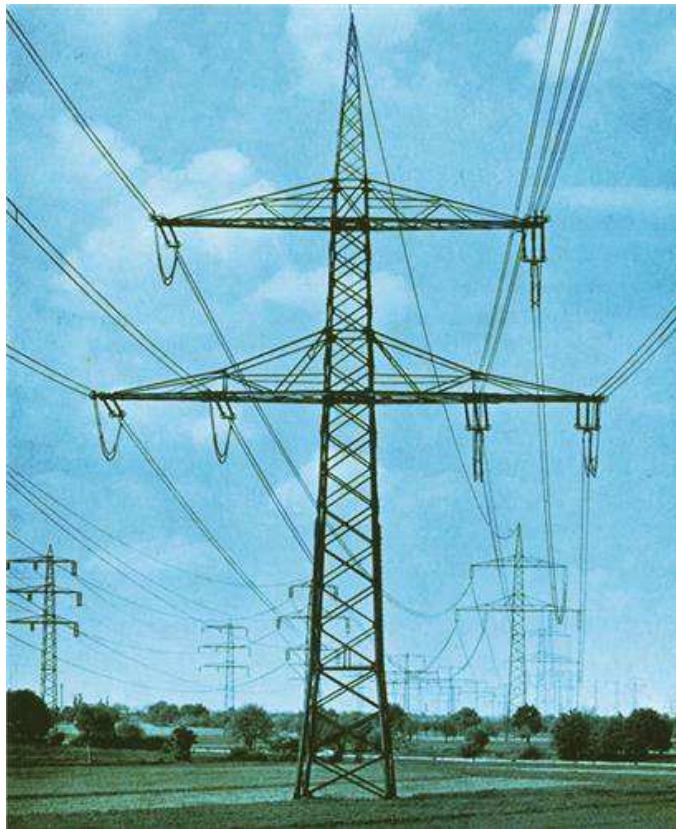


## 2. NADZEMNI VODOVI

### 2.1. Vodiči nadzemnog voda i sami vodovi

Vodiči u nadzemnom vodu jedini su aktivni dijelovi voda i imaju zadatak prenositi električnu energiju. Opterećeni su termički i mehanički. Vrsta i presjek vodiča odabiru se na temelju proračuna prijenosa tim vodom, tako se i za mehaničku izdržljivost provode mehanički proračuni.

Na slici 2.1. prikazan je dalekovod koji "nosi" nadzemne vodove.



Slika 2.1. Nadzemni vodovi

#### 2.1.1. Vrste vodiča

Vrste vodiča koje se rabe za potrebe razdiobe električne energije putem nadzemnih NN vodova jesu:

- Goli vodiči, tj. neizolirani vodiči kao što su bakreni vodiči (Cu) te tzv. alučelni vodiči (Al/Fe) tj. aluminijski vodiči s čeličnom jezgrom (aluminijske žice opletene oko čelične). Vodiči se zbog neizoliranosti moraju s pomoću izolatora odvojiti od konzola na stupovima.
- Usnopljeni vodiči tj. izolirani vodiči použeni u snop, katkad se nazivaju i kabelskim snopovima zbog sličnih elektrotehničkih značajki kao pri podzemnim kabelima. Postoje razne vrste tih snopova – svaka zemlja ima neku svoju vrstu konstrukcije snopa, pa tako i Hrvatska. Takvi vodovi obično su aluminijski s nosivim neutralnim ili nulvodičem od slitine AlMg 1 ili AlMgSi koji može podnijeti naprezanje zbog mase snopa i dodatnih tereta (vjetar, led). Taj se vodič negdje izvodi kao goli, a većinom kao i ostali vodiči tj. izoliran polietilenskom izolacijom (PE) ili izolacijom od umreženog polietilena (XLPE). Vodovi s izoliranim vodičima u snopu imaju znatne prednosti u odnosu na vodove s golim vodičima što se tiče veće pouzdanosti, manje impedancije, većeg dosega napajanja, manje opasnosti od električnog udara, manje potrebe održavanja. Osim toga ta tehnologija omogućuje i vođenje više elektroenergetskih snopova te telekomunikacijskih vodova na istim stupovima, što znatno smanjuje troškove za obje vrste mreža.

## 2.2. Karakteristične veličine voda

Konstante voda karakteristične su veličine pomoću kojih definiramo električne prilike na vodovima u svim pogonskim stanjima i slučajevima. Brojčane vrijednosti konstanti voda ovisne su o svojstvima materijala od kojih su napravljeni, o svojstvima sredine koja ih okružuje, te o geometrijskom odnosu dijelova voda međusobno i prema okolini.

Konstante voda:

- jedinični djelatni otpor  $R_1$  [ $\Omega$ /km]
- jedinični induktivitet  $L_1$  [H/km]
- jedinični kapacitet  $C_1$  [F/km]
- jedinični odvod  $G_1$  [S/km]

Struja koja teče kroz vod izaziva na otporu i odvodu toplinske gubitke, stoga konstante dijelimo na tople i hladne. Hladne konstante javljaju se u obliku koji ovisi o frekvenciji:

- jedinični uzdužni induktivni otpor ili jedinična reaktancija

$$\overline{X}_1 = \omega L_1 \text{ [}\Omega/\text{km]} \quad (2.1)$$

- jedinična poprečna kapacitivna vodljivost ili jedinična susceptancija  $\overline{B}_1 = \omega C_1$  [S/km]

- jedinični uzdužni prividni otpor ili jedinična impedancija  $\bar{Z}_1 = R_1 + jX_1 [\Omega/km]$
- jedinična poprečna prividna vodljivost ili jedinična admintancija  $\bar{Y}_1 = G_1 + B_1 [S/km]$

Za vod je važna i njegova duljina. Ako jedinične konstante voda pomnožimo s dužinom voda  $l$ , onda dobijemo:

- djelatni otpor ili rezistenciju  $R[\Omega]$
- induktivni otpor ili reaktanciju  $X[\Omega]$
- djelatni otpor voda ili konduktanciju  $G[S]$
- kapacitivnu vodljivost ili susceptanciju  $B[S]$
- prividni otpor ili impendanciju  $\bar{Z} = R + jX[\Omega]$
- prividnu vodljivost otpora ili admitanciju  $\bar{Y} = G + jB[S]$

Karakteristične veličine voda koje se još javljaju su:

- konstanta prodiranja ili valna konstanta  $\gamma = \sqrt{\bar{Z}_1 \bar{Y}_1} [1/km]$
- karakteristična impendancija  $\bar{Z}_c = \sqrt{\frac{\bar{Z}_1}{\bar{Y}_1}}$

Konstanta prodiranja sastavljena je od realnog i imaginarnog dijela

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{[(R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)]} \quad (2.2)$$

$\alpha$  – konstanta gušenja

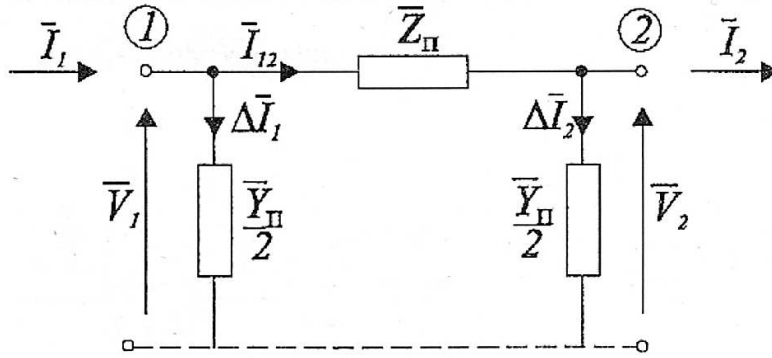
$\beta$  – fazna konstanta

### 2.3. Nadomjesne sheme voda

#### 2.3.1 $\pi$ shema voda

Zadana je struja  $\bar{I}_2$  i napon  $\bar{U}_2$  na kraju voda, a moramo odrediti prilike na početku voda: prema prijenosnim jednadžbama iz teorije prijenosa,  $x=1$ , napon  $V_1$  koji je na početku voda iznosi:

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 ch \gamma l + \bar{I}_2 \bar{Z}_c sh \gamma l \quad (2.3)$$



Slika 2.2. Nadomjesna  $\pi$  shema voda

$\bar{Z}_\pi$ -impedancija uzdužne grane

$\bar{Y}_\pi$ -admitancija poprečne grane

$$\Delta \bar{I}_2 = \bar{V}_2 \frac{\bar{Y}_\pi}{2} \quad (2.4)$$

$$\bar{I}_{12} = \bar{I}_2 + \Delta \bar{I}_2 = \bar{I}_2 + \bar{V}_2 \frac{\bar{Y}_\pi}{2}$$

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + \bar{I}_{12} \bar{Z}_\pi = \bar{V}_2 + \left( \bar{I}_2 + \bar{V}_2 \frac{\bar{Y}_\pi}{2} \right) \bar{Z}_\pi = \bar{V}_2 \left( 1 + \frac{\bar{Y}_\pi}{2} \bar{Z}_\pi \right) + \bar{I}_2 \bar{Z}_\pi$$

Usporedimo li sada 2.3 i 2.4 jednađbe i izjednačimo im koeficijente, onda dobijemo:

$$\bar{Z}_\pi = \bar{Z}_c \operatorname{sh} \gamma l$$

$$1 + \frac{\bar{Y}_\pi}{2} \bar{Z}_\pi = 1 + \frac{\bar{Y}_\pi}{2} \bar{Z}_c \operatorname{ch} \gamma l = \operatorname{ch} \gamma l$$

Tražene veličine su:

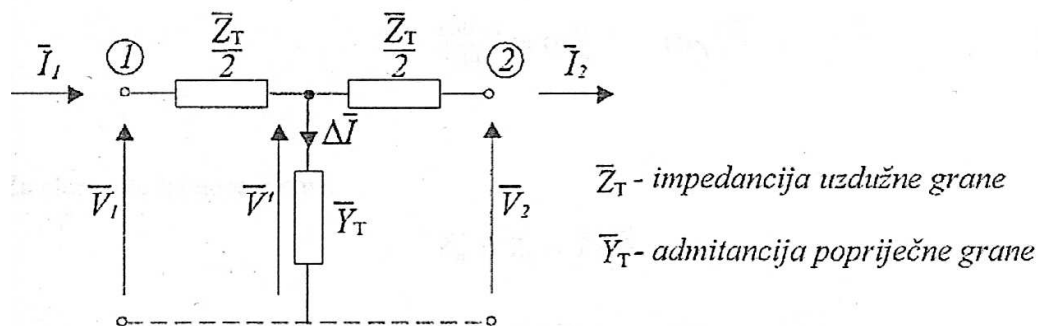
$$\bar{Z}_\pi = \bar{Z}_c \operatorname{sh} \gamma l \quad (2.5)$$

$$\frac{\bar{Y}_\pi}{2} = \frac{1}{\bar{Z}_c} \frac{\operatorname{ch} \gamma l - 1}{\operatorname{sh} \gamma l} \quad (2.6)$$

### 2.3.2 T shema voda

Trebamo odrediti prilike na početku voda, a zadane su prilike na kraju voda. Prema prijenosnim jednadžbama iz teorije prijenosa  $x=1$ , struja je:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 ch \gamma l + \bar{V}_2 \frac{1}{\bar{Z}_c} sh \gamma l \quad (2.7)$$



Slika 2.3. Nadomjesna T shema voda

$$\bar{V}' = \bar{V}_2 + \bar{I}_2 \frac{\bar{Z}_T}{2} \quad (2.8)$$

$$\Delta \bar{I} = \bar{V}' \bar{Y}_T = (\bar{V}_2 + \bar{I}_2 \frac{\bar{Z}_T}{2}) \bar{Y}_T$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 + \Delta \bar{I} = \bar{I}_2 + \bar{V}_2 \bar{Y}_T + \bar{I}_2 \frac{\bar{Z}_T}{2} \bar{Y}_T = \bar{I}_2 \left( 1 + \frac{\bar{Z}_T}{2} \bar{Y}_T \right) + \bar{V}_2 \bar{Y}_T$$

Usporedimo li 2.7 i 2.8 jednadžbe i izjednačimo koeficijente dobijemo:

$$\bar{Y}_T = \frac{1}{\bar{Z}_c} sh \gamma l$$

$$1 + \frac{\bar{Z}_T}{2} \bar{Y}_T = 1 + \frac{\bar{Z}_T}{2} \frac{1}{\bar{Z}_c} sh \gamma l = ch \gamma l$$

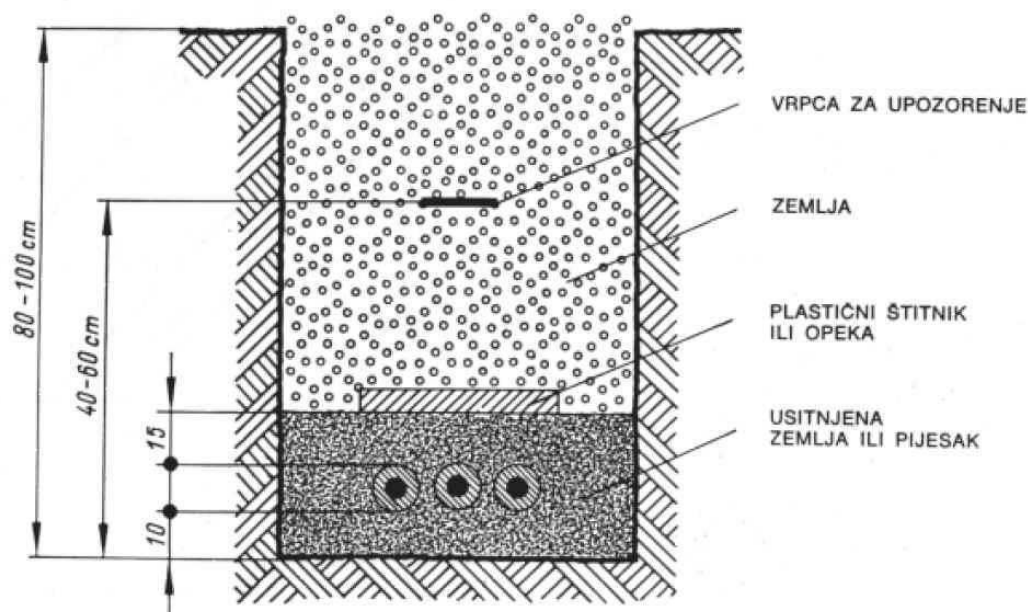
$$\bar{Y}_T = \frac{1}{\bar{Z}_c} ch \gamma l \quad (2.9)$$

$$\frac{\bar{Z}_T}{2} = \bar{Z}_c \frac{ch \gamma l - 1}{sh \gamma l} \quad (2.10)$$

### 3. KABELSKI VODOVI

#### 3.1. Značajke podzemnih kabela

Kada se govori o kabelskim vodovima za niski napon valja spomenuti da se oni izvode s vodičima od bakra (Cu) ili aluminija (Al). Aluminijski kabeleli imaju znatne gospodarske prednosti u odnosu na bakrene s obzirom na velike razlike u cijenama tih metala na tržištu, pogotovo u posljednje vrijeme. S obzirom da se kabel polaže u zemlju ili na kabelske police (u većim gradovima ili industriji), može se poprečni presjek vodiča povećati do veličine dvostruko ili trostruko veće od presjeka vodiča nadzemnih vodova. Time se dobiva velika prijenosna moć i znatna prednost kod zaštite od dodirnih napona uglavnom u gradskim mrežama. Ako se kabeleli polažu u zemlju, moraju se položiti na dubinu do koje ne dopire smrzanje tla, kako je i prikazano na slici 3.1, obično na dubinu od 0,7 do 0,9 m.



Slika 3.1. Polaganje kabela u zemlju

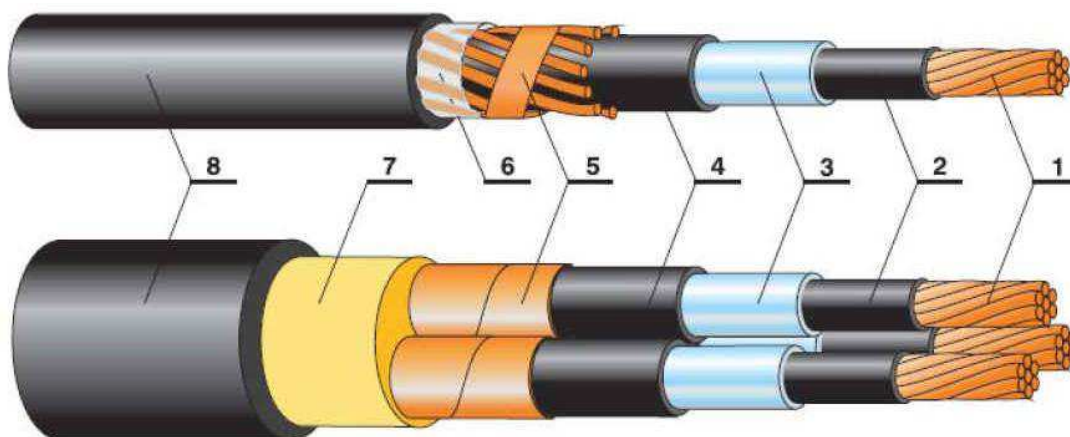
Polaganje kabela u zemlju može se izvesti na dva načina:

1. Polaganje u trokut – gdje su sva tri jednožilna kabeleli spojena i vezana vrpcom. Kod takvog polaganja dječomično se smanjuje prijenosna sanaga jer se vodiči više zagrijavaju.
2. Polaganje u ravnini – gdje je svaki jednožilni kabeleli udaljen od drugoga najmanje 7 cm.

Što se tiče konstrukcije kablskih podzemnih vodova, mora se najprije reći da se kao izolacija najčešće rabi izolacija od polivinilklorida (PVC) koji u području niskog napona do 1 kV ima male dielektrične gubitke, što je povoljno i s gospodarskog stajališta.

Konstrukcija kabela može zbog zahtjeva mehaničke otpornosti sadržavati i oklop (armaturu) koja se ujedno može rabiti i kao zaštita od prodora prenapona prema vodičima. Oklop s vanjske strane kabela može poslužiti kao uzemljivač.

Slično je i kod viših napona, samo su veće dimenzije i bolja zaštita. Detaljna konstrukcija kabela srednjeg napona prikazana je slikom 3.2.



Slika 3.2. Konstrukcija kabela

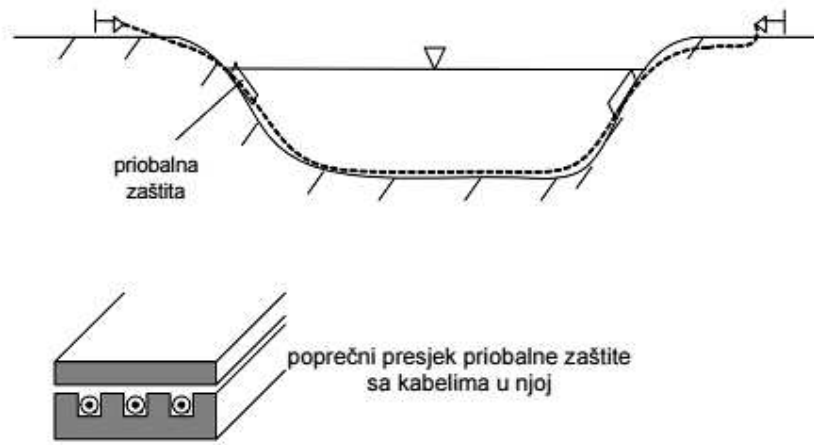
Gdje je:

1. Vodič, bakreno ili aluminijsko uže, zbijeno
2. Ekran vodiča, poluvodljivi sloj na vodiču
3. Izolacija, XLPE
4. Ekran izolacije, poluvodljivi sloj na izolaciji
5. Električna zaštita, od bakrene žice (jednožilni) ili bakrene trake (trožilni)
6. Separator, poliesterska vrpca
7. Ispuna, PVC
8. Vanjski plašt, PVC

### 3.2. Podmorski kabeli

Za polaganje podmorskog kabela na dno mora potrebni su posebni brodovi. Popravak takvih kabela vrlo je skup, te se radi toga oni polažu na dno mora s većim razmakom između njih, tako da u slučaju oštećenja (sidro broda) bude potrebno popraviti samo jedan jednožilni kabel. Dijelovi na mjestima ulaza i izlaza iz mora za podmorski kabel su najviše izloženi utjecaju valova te se ta mjesta moraju posebno zaštititi pomoću priobalne zaštite. Priobalna

zaštita načinjena je od betonskih blokova sa rupama u kojima su smješteni podmorski kabeli.  
Na slici 3.3 prikazan je podmorski kabel i priobalna zaštita.



Slika 3.3. Podmorski kabel i priobalna zaštita



## 4. KOMBINIRANI ZRAČNO-KABELSKI VODOVI

Kombinirani vodovi nisu ništa drugo nego kombinacija nadzemnih i kabelaških vodova. Stoga smo u ovoj studiji posebno opisivali nadzemne, a posebno kabelaške vodove. Kombinacija nadzemnih i kabelaških vodova obično se koristi kod transformatorskih stanica. Nadzemni vodovi visokog napona dolaze u blizinu trafostanice (200 do 300 m), te se spuštaju u zemlju i dalje do trafostanice putuju podzemnim putem. Kombinacija se također koristi i tamo gdje želimo prenijeti električnu energiju na otok ili tamo gdje nije moguće izgraditi stupove. U nastavku će biti opisani tzv. „univerzalni kabeli“ koji su namijenjeni za polaganje u zemlju, pod vodu i nadzemno, dakle kombinirano.

### 4.1. Osnovni čimbenici gradnje vodova s „univerzalnim kabelom“

Pojam „univerzalni kabel“ odnosi se na kabele koji su, prema tvrdnjama njihovih proizvođača, namijenjeni za polaganje u zemlju, pod vodu i nadzemno (na stupove nadzemne mreže). Kabele s tim nazivom proizvodi švedska tvrtka Ericsson Network Technologies. To su trožilni kabeli za mreže maksimalnog pogonskog napona 12, 24 i 36 kV.

Konstrukcija tih kabela se u određenoj mjeri razlikuje od klasičnih kabelaških konstrukcija koje su namijenjene isključivo za polaganje pod zemlju ili za polaganje u vodu. Nadzemno polaganje (na stupove) je u načelu bilo izvan opsega upotrebe klasičnih kabela. Ipak, univerzalni kabeli nisu prvi kabeli namijenjeni za nadzemnu ugradnju. Još od ranije na srednjem naponu postojala su rješenja sa sredjenaponskim kabelaškim snopom. U tom slučaju radilo se o snopu 3 jednožilna kabela s čeličnim nosivim užetom. Ovakvo rješenje je svojevremeno razvio i domaći proizvođač (ELKA) i takav kabel je položen na jednom probnom poligonu 80-tih godina. Na tome je međutim stalo, i takvo rješenje nije dalje ulazilo u primjenu, unatoč tome što su prema objavljenim podacima iskustva na probnom poligonu bila dobra. Osim opisanih rješenja postoje, kao treća varijanta nadzemnih kabela, i rješenja koja kombiniraju trožilni kabel s dodatnim čeličnim nosivim užetom.

#### 4.1.1. Univerzalni kabel proizvođača Ericsson

U ponudi ovog proizvođača nalazi se nekoliko kabelaških konstrukcija, za mreže maksimalnog pogonskog napona 12, 24 i 36 kV. Prema kataloškim podacima proizvođača, ponuđene su sljedeće kabelaške konstrukcije:

EXCEL 3x10/10 mm<sup>2</sup>, 12 kV i 24 kV (vodič od bakra)

FXCEL 3x16/10 mm<sup>2</sup>, 12 kV i 24 kV (vodič od bakra)

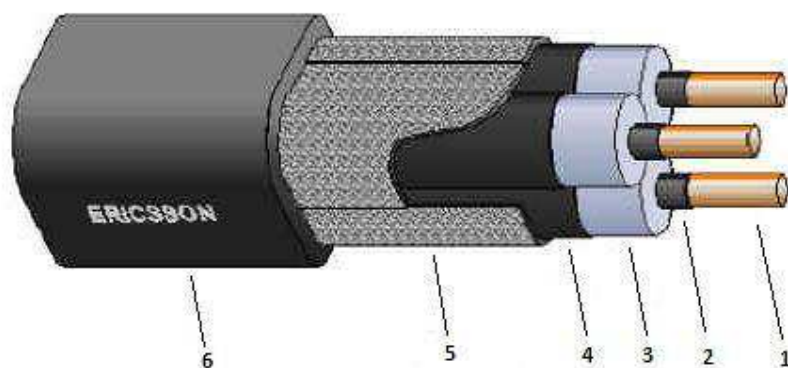
AXCES 3x70/16 mm<sup>2</sup>, 12 kV i 24 kV (vodič od aluminijske legure)

AXCES 3x70/25 mm<sup>2</sup>, 36 kV (vodič od aluminijske legure)

AXCES 3x95/25 mm<sup>2</sup>, 12 kV i 24 kV (vodič od aluminijske legure)

Već dulje vremena se u 10 kV-tne mreže, s obzirom na postupno napuštanje te naponske razine, ugrađuje oprema nazivnog napona 20 kV. Zbog toga kabeli za mreže s maksimalnim pogonskim naponom 12 kV nisu interesantni za novu ugradnju i neće ih se obrađivati u nastavku ove studije.

Svi nabrojani tipovi kabela imaju jednaku konstrukciju, prikazanu na slici 4.1.



Slika 4.1. Konstrukcija Ericssonovih univerzalnih kabela (EXCEL, FXCEL, AXCES)

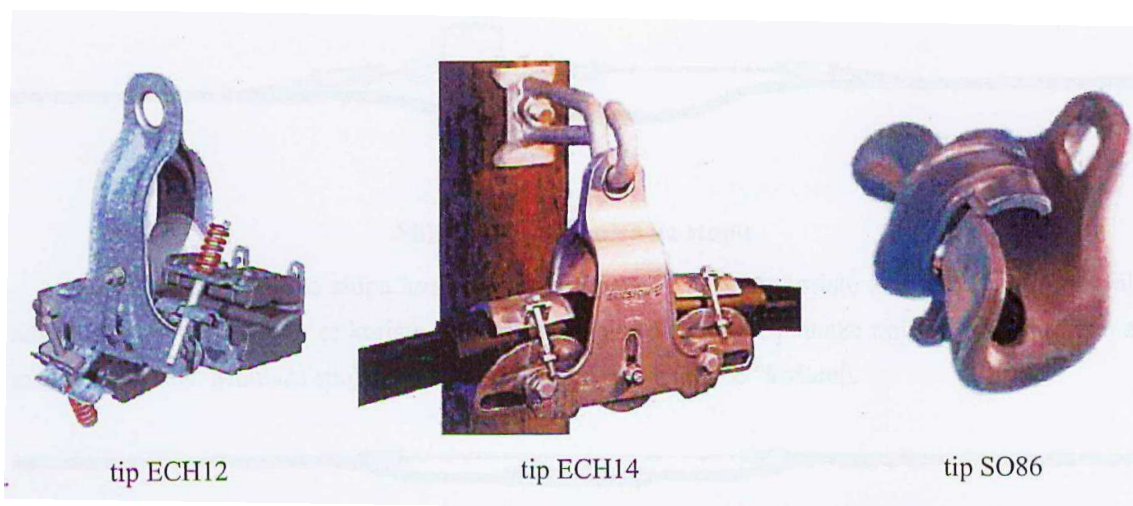
Gdje je:

- 1 – vodič
- 2 – poluvodljivi sloj preko vodiča (ekran vodiča)
- 3 – izolacija (XLPE)
- 4 – poluvodljivi sloj preko izolacije (ekran izolacije)
- 5 – metalni ekran (mrežica od pokositrenih bakrenih žica)
- 6 – vanjski plašt (PE)

Nadzemna ugradnja samonosivog kabela postavlja pred njegovu konstrukciju neke specifične zahtjeve. Kod tih kabela najveći dio vlačne sile kojoj su oni izloženi preuzimaju vodiči. Sila se na vodič mora prenijeti izvana, bez da pri tome dođe do oštećenja izolacije i drugih unutrašnjih elemenata kabela. Na nosivim i zateznim stezaljkama kabel može biti izložen znatnim silama kroz dulji vremenski period (npr. pri padu drveta na vod). Zbog toga konstrukcija kabela mora biti takva da ne dođe do proklizavanja pojedinih slojeva unutar kabela te da žice ekrana ne oštete poluvodljivi sloj preko izolacije. Ovakvi zahtjevi uvjetuju primjenu posebnih konstrukcijskih rješenja, zbog čega se ovi kabeli u nekim elementima razlikuju od klasičnih sredjenaponskih kabela.

Da bi kabelski vod mogao izdržati opterećenja koja se na njemu mogu pojaviti tokom pogona nužna je i primjena odgovarajućeg ovjesnog i spojnog pribora. Proizvođač kabela zbog toga inzistira isključivo na primjeni opreme koju je on odobrio. Posebno su pri tome bitne zatezne spirale i nosive stezaljke.

Tipovi nosivih stezaljki koje preporučuje proizvođač za 20 kV-tne kabele su prikazani na slici 4.2. Nosiva stezaljka tipa ECH12 je standardna za 20 kV-tne kabele EXCEL i FXCEL. Tip ECH14 se koristi za zahtjevne uvjete, za kabele većih presjeka – AXCES 3x70 i 3x95 te prema potrebi za kabele tipa EXCEL i FXCEL. Stezaljka SO86 je originalno namijenjena za niskonaponske kableske snopove ali se može koristiti i za 20 kV-tne kabele EXCEL i FXCEL.



Slika 4.2. Nosive stezaljke za 20 kV-tne kabele tipa EXCEL, FXCEL i AXCES

Zatezna spirala treba prenositi silu sa kuke pričvršćene za stup pri čemu ne smije oštetiti izolaciju kabela. To treba biti ostvareno ne samo za normalno opterećenje nego i u ekstremnim uvjetima, s dodatnim opterećenjem zbog leda, palih stabala i sl. Za svaki tip univerzalnog kabela proizvođač propisuje koju zateznu spiralu treba koristiti.

Ukoliko se želi smanjiti vjerojatnost puknuća kabela ili lomljenja stupova u slučaju pada stabla na vod moguće je koristiti i alke s kontroliranom silom trganja.

Rasponi koji se uobičajeno mogu ostvariti navedeni su u tablici 4.1.

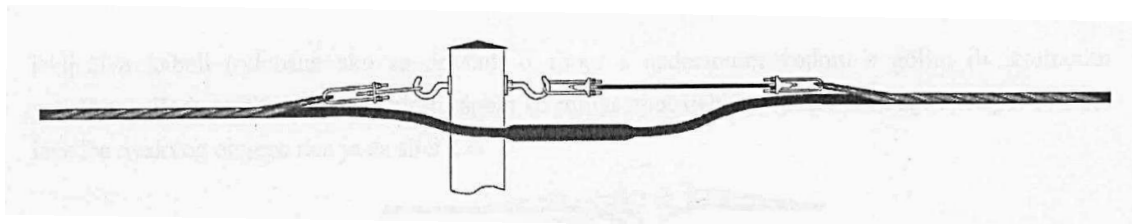
Tablica 4.1. Rasponi koji se ostvaruju s univerzalnim kabelom

Tip	Uobičajeni raspon	Maksimalni raspon
EXCEL 3x10/10	70 m	90 m
FXCEL 3x16/16	80-90 m	110 m
AXCES 3x70/16	110 m	140 m
AXCES 3x70/25 i 3x95/25	100 m	120 m

Ispitivanja ovih kabela provode se prema međunarodnoj normi IEC 60502 i švedskoj normi SS 424 14 16, tj. harmonizacijskom dokumentu HD 620 S1 + A1, dio 6M.

Kod nadzemnog polaganja univerzalnog kabela spojnice je moguće izvesti kod stupa ili u rasponu. Spajanje dviju duljina kabela se najčešće izvodi kod stupa, uz mehaničko rasterećenje oba kraja kabela.

Na sljedeće dvije slike prikazane su spojnice na stupu i spojnice u rasponu s mehaničkim rasterećenjem.



Slika 4.3. Spojnica na stupu

Za izradu spojnice na stupu koriste se iste spojnice kakve se koriste kod podzemnih trožilnih kabela. Spojne čahure koje se koriste za spajanje vodiča su također jednake onima koje se koriste za podzemne kabele. Montaža spojnice se obavlja na stupu, uz pomoć „košare“.



Slika 4.4. Spojnica u rasponu s mehaničkim rasterećenjem

U slučaju izrade spojnice u rasponu mehaničko rasterećenje mjesta spajanja se ostvaruje sa dvije zatezne spirale i čeličnim užetom. Kao i kod spojnice na stupu, tako se i u ovom slučaju mogu koristiti iste spojnice kao i za podzemne trožilne kabele. Izrada ove spojnice i montaža zateznih spirala i užeta za rasterećenje se obavljaju na tlu. To znači da se krajevi kabela koji se spajaju prije montaže trebaju spustiti na zemlju. Ovakva spojnica može biti ugrađena samo na onakvom mjestu u rasponu gdje je moguće proklizavanje kabela do njegovog spuštanja na tlo.

Ericsson u svojim kataloškim materijalima za onu opremu koju sam ne proizvodi, a koja je dio voda izgrađenog s univerzalnim kablom navodi proizvođače i njihove konkretne proizvode koji su prikladni za tu svrhu (npr. u slučaju kablinskih spojnice i završetaka su to proizvodi tvrtke Tyco-Raychem, a u slučaju spojnih čahura za vodiče je to npr. tvrtka Pfisterer). Ericsson navodi i da je moguća upotreba spojnog pribora drugih proizvođača koja ima odgovarajuće karakteristike.

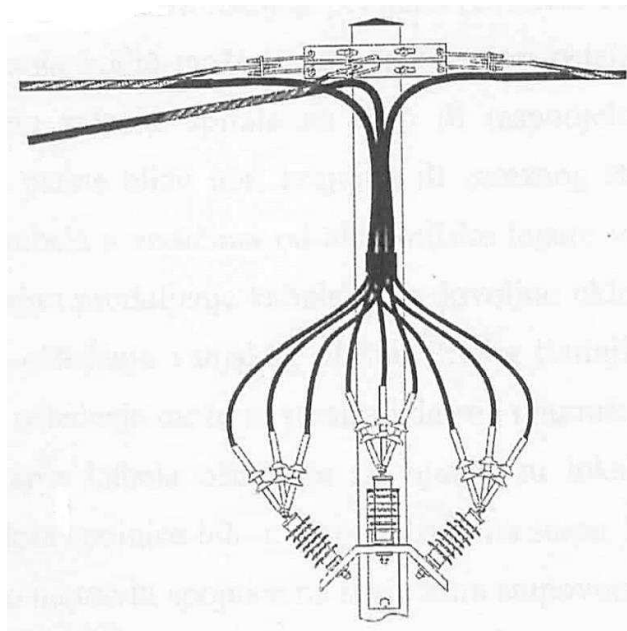
Mogući su različiti načini izvedbe otcjepa, a prema podacima proizvođača uobičajene metode su:

- direktno, s otcjepnom spojnicom u zemlji ili na stupu
- izradom kablskih završetaka postavljenih na potporne izolatore ili odvodnike prenapona
- izvođenje otcjepa s mogućnošću odvajanja uvođenjem kabela u metalni ormar na zemlji
- izvođenje otcjepa preko RMU-a (sklopne aparature u metalnom kućištu) priključivanjem kabela putem odgovarajućeg kutnog adaptera (uz mogućnost dodavanja odvodnika prenapona)

Odabir metode za izvedbu otcjepa ovisi o zahtjevima korisnika u konkretnom slučaju.

U slučaju izvedbe s otcjepnom spojnicom na stupu, mjesto spajanja treba biti mehanički rasterećeno pomoću zateznih spirala. Prednost izvedbe s otcjepnom spojnicom je u tome što je mjesto spoja kabela izolirano.

Izvedba otcjepa pomoću kablskih završetaka na stupu postavljenih na izolatore ili odvodnike prenapona omogućava jednostavnije odspajanje (za razliku od izvedbe s otcjepnom spojnicom). Proizvođač navodi da upotreba odvodnika prenapona nije potrebna ako su na mjesto otcjepa spojeni isključivo kabeli (odnosno ako se ne radi o spoju s nadzemnim vodom s golim ili izoliranim vodičima). Radi zaštite ptica na mjestu spoja se mogu upotrijebiti dodatne izolacijske kape. Primjer izvedbe ovakvog otcjepa dan je na slici 4.5.



Slika 4.5. Izvedba otcjepa na izolatorima ili odvodnicima prenapona

Izvedba otcjepa uvođenjem krajeva kabela u ormar s rastavljačem postavljen na tlu omogućava jednostavno odvajanje kabela na tom mjestu. Otcjep izveden na ovaj način također nema otvorenih dijelova koji su pod naponom.

Prema tvrdnjama proizvođača, svi tipovi njihovog univerzalnog kabela u stanju su u većini slučajeva izdržati pad stabla bez da dođe do pucanja kabela, što predstavlja prednost u šumskim predjelima. Kod kabela s vodičem od bakra manjeg presjeka (EXCEL i FXCEL) prilikom pada težih stabala nakon njihovog uklanjanja vodič može u određenoj mjeri ostati izdužen. To produljenje se može riješiti npr. postavljanjem zatezne spirale na stup ili raspodjelom produljenja na nekoliko susjednih raspona. Ako stablo padne blizu npr. krajnjeg ili zateznog stupa postoji opasnost da ovi kabeli ipak puknu. U slučaju kabela s vodičima od aluminijske legure većeg presjeka (AXCES) pad stabla u pravilu ne uzrokuje trajno produljenje kabela te je dovoljno ukloniti stablo i samo vizualnim pregledom provjeriti da nema oštećenja vanjskog plašta. Prema tvrdnji proizvođača, dokle god na kabelu nema vidljivih vanjskih oštećenja može se smatrati da su i unutrašnji slojevi kabela neoštećeni.

Ako ipak dođe do pucanja kabela oštećenja na njemu su lokalizirana na mjestu nastanka prekida. Popravak se vrši izradom spojnice bilo u rasponu bilo na stupu. Nekada može biti praktičnije zamijeniti cijeli raspon odnosno napraviti spojnice na susjednim stupovima.

Kod nadzemno položenih kabela kao i kod podzemno položenih svaki proboj izolacije predstavlja trajni kvar pa principi podešavanja relejne zaštite trebaju biti isti kao i kod podzemnih kabela. U skladu s time nema razloga vršiti automatski ponovni uklop nakon što je zaštita već jednom isklopila vod zbog kvara na kabelu.

#### 4.1.2. Univerzalni kabel proizvođača ELKA

Domaći proizvođač ELKA je također u svoj proizvodni program odnedavno uvrstio trožilni univerzalni kabel. Prema podacima proizvođača, konstrukcije u proizvodnom programu su:

XHE 48/0 – Ay 3x95/25 mm<sup>2</sup> (vodič od aluminijske legure)

XHE 48/0 – Ay 3x70/16 mm<sup>2</sup> (vodič od aluminijske legure)

XHE 48/0 3x16/10 mm<sup>2</sup> (vodič od bakra)

XHE 48/0 3x10/10 mm<sup>2</sup> (vodič od bakra)

Presjeci vodiča u ELKA-inoj ponudi su jednaki onima proizvođača Ericsson. Osnovni konstrukcijski parametri kabela temelje se na normi IEC 60502-2. Između Ericssonovih i ELKA-inih univerzalnih kabela postoje određene razlike u konstrukciji. Prvenstveno je to razlika u izvedbi ekrana, a također postoji i razlika u debljini izolacije kod nekih kabelskih konstrukcija. Posljedica toga je da se i neki tehnički parametri tih kabela razlikuju, što je vidljivo iz proizvođačkih tehničkih specifikacija. Osnovni nazivni podaci kabela oba proizvođača navedeni su u tablici 4.2.

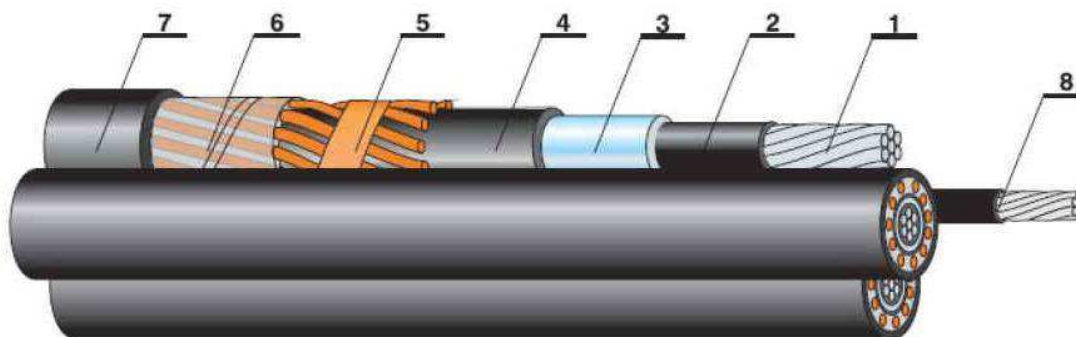
Tablica 4.2. Univerzalni kabeli proizvođača Ericsson i ELKA, 20 kV

Oznaka	Ericsson	EXCEL	FXCEL	AXCES	AXCES
	ELKA	XHE 48/0	XHE 48/0	XHE 48/0-Ay	XHE 48/0-Ay
Materijal vodiča	bakar		aluminijska legura		
Presjek vodiča [mm <sup>2</sup> ]	3x10	3x16	3x70	3x95	
Ekran vodiča	poluvodljivi sloj od umreženog polietilena				
Materijal izolacije	umreženi polietilen				
Nazivna debljina izolacije [mm]	5,5	5,5	4,5 (Ericsson) 5,5 (ELKA)	4,5 (Ericsson) 5,5 (ELKA)	
Ekran izolacije	poluvodljivi sloj od umreženog polietilena				
Izvedba i materijal metalnog ekrana	mrežica od pokositrenih bakrenih žica (Ericsson), zajednička za sve 3 žile pokositrena bakrena traka (ELKA), oko svake žile pojedinačno				
Presjek metalnog ekrana [mm <sup>2</sup> ]	10	10	16	25	
Materijal vanjskog plašta	polietilen				
Nazivna debljina vanjskog plašta [mm]	Ericsson	2,6	2,6	2,6	2,8
	ELKA	2,4	2,4	2,8	2,9

Proizvođač ELKA svoje univerzalne kabele ispituje prema zahtjevima norme IEC 60502-2. S obzirom da ta norma ne obuhvaća kabele za gradnju nadzemnih vodova, provedena su i dodatna ispitivanja vlačne čvrstoće u sklopu ispitivanja zateznih spirala, prema normi za ispitivanje pribora za nadzemne vodove IEC 612284/97.

#### 4.1.3. Srednjenaponski kabelski snop

Početak proizvodnje srednjenaponskih kabela s izolacijom od polietilena odnosno kasnije od umreženog polietilena, značio je da su kabeli postali lakši i savitljiviji od prijašnjih izvedbi. Zahvaljujući tome još prije 30-tak godina postalo je moguće graditi i nadzemne vodove sa srednjenaponskim kabelima. Pri tome se radilo o snopu tri jednožilna kabela i nosivog čeličnog užeta. I u Hrvatskoj je domaći proizvođač ELKA razvio takvo rješenje. Konstrukcija tog kabelskog snopa prikazana je na slici 4.6. Ovakve kabelske konstrukcije mogu se naći i u ponudi drugih proizvođača kabela (npr. Nexans).



Slika 4.6. Konstrukcija srednjenaponskog kablenskog snopa proizvođača ELKA

Gdje je:

1. Vodič: aluminijско užje, zbijeno
2. Ekran vodiča: poluvodljivi sloj na vodiču
3. Izolacija: XLPE
4. Ekran izolacije: poluvodljivi sloj na izolaciji
5. Električna zaštita/ekran: od bakrenih žica
6. Separator: toplinska izolacija, poliesterska vrpca
7. Vanjski plašt: PVC
8. Nosivo užje: čelično pocinčano užje  $50 \text{ mm}^2$ , zaštićeno s PE oblogom

Jednožilni kabeli koji čine ovaj snop su u osnovi konstrukcijski jednaki onima koji se koriste za podzemno polaganje.

Takav srednjenaponski kablenski snop nazivnog napona 10 kV, konstrukcije  $3 \times 1 \times 95/16 \text{ mm}^2$  s nosivim čeličnim zaštitnim užetom presjeka  $50 \text{ mm}^2$  bio je probno ugrađen na jednoj dionici još krajem 80-tih godina (na otoku Čiovu kraj Trogira). Duljina voda je približno 7 km. Prema objavljenim podacima, pogonska iskustva u više od 10 godina rada su bila vrlo dobra.

Probnu ugradnju pratio je višegodišnji rad na pripremi projektne dokumentacije, praćenju pogona i izradi tehničkih propisa kojima bi se regulirala takvo, tada potpuno novo rješenje. Realizacija samog projekta bila je rezultat suradnje HEP-a s domaćim proizvođačima – Elkom, Dalekovodom i TEP-om. Iako su, prema objavljenim podacima, aktivnosti radne skupine na izradi prijedloga tehničkih propisa za ovo rješenje bile daleko odmakle, one su sredinom devedesetih godina obustavljene iz nepoznatih razloga.

Unatoč svim provedenim aktivnostima, ovo rješenje kod nas nije dalje ušlo u primjenu i nije bilo daljnje izgradnje vodova s takvim kablom. Jedan od glavnih razloga bi mogla biti činjenica da ovakvi kabeli imaju relativno veliku masu što zahtijeva primjenu jačih stupova i kraćih raspona nego kod konkurentskih rješenja s trožilnim kablom i bez nosivog čeličnog užeta.



#### 4.1.4. Trožilni kabeli s nosivim užetom

Moguća izvedba kabela za nadzemno polaganje su i trožilni kabeli s nosivim čeličnim užetom. Primjer takve konstrukcije su kabeli tipa Exclight-H i Axclight-H proizvođača Nexans (Norveška).

Konstrukcije su npr. 3x10/10, 3x25/16, 3x50/16 i 3x95/16. U slučaju presjeka 10 mm<sup>2</sup> radi se o vodiču od bakra dok veći presjeci imaju aluminijske vodiče. Kabeli se izrađuju prema normi (tj. europskom harmonizacijskom dokumentu) HD 620-6M.

Ovakvi kabeli prema dostupnim podacima kod nas nisu u upotrebi i nema podataka da ih netko nudi.

## 5. ZAŠTITA KOMBINIRANOG ZRAČNO-KABELSKOG VODA

### 5.1. Zaštite u elektroenergetskom sustavu

Različiti tipovi zaštite se postavljaju da bi se zaštitila oprema u elektroenergetskom sustavu. Njihov zadatak je isključiti kvar ili preopterećenje opreme ili dijelove sustava da bi se izbjeglo nepotrebno oštećenje na opremi i osoblju. Svrha zaštite je također sprječavanje da kvar ne zahvati dijelove sustava koji rade ispravno. Posebni tipovi zaštite su „zaštite sustava“. Njihov zadatak je spriječiti raspad sustava (*eng. black out*) ili dijelove sustava.

Uređaji i programi za razvoj zaštite temeljeni na suvremenoj tehnologiji šire se u oba smjera. Na strani uređaja, mikroprocesori se koriste već duže vrijeme za provođenje različitih funkcija u zaštiti, a kako napreduje razvoj sve složenije i složenije funkcije mogu se provoditi na pouzdan način. Moćne metode kao što su obrada signala, stanje procjene, i „umjetna inteligencija“ integrirani su u sustav zaštite. Općenito, funkcije s odvojenim relejima sve se više integiraju s drugim funkcijskim jedinicama za kontrolu i upravljanje. Nadalje, još složeniji kriteriji mogu se primijeniti za aktivaciju zaštite. Ovaj sažetak koncentriran je na općim načelima zaštite.

#### 5.1.1. Projektiranje zaštite

Zaštite za elektroenergetski sustav sadrže sljedeće dijelove:

- Uređaj za mjerenje sa strujnim i/ili naponskim transformatorom i drugim sensorima za mjerenje bitnih veličina
- Relej koji, kada neki određeni uvjet bude ispunjen, šalje signale prekidaču ili nekom drugom sklopnom uređaju. Ranije, takav relej bio je zasebna jedinica, ali u suvremenim zaštitama može biti i dio veće jedinice za zaštitu, nadzor i upravljanje.
- Prekidači, koji izvršavaju dane naredbe od releja
- Telekomunikacijski sustav, uglavnom se koristi za distantnu zaštitu, brže djelovanje i pouzdaniji rad.
- Napajanje sustava, koje će osiguravati napajanje zaštitnog sustava, čak i kada je sustav u kvaru.

Zahtjevi koji bi trebali biti ispunjeni u sustavu zaštite su pouzdanost, sigurnost, selektivnost, osjetljivost i brzina.

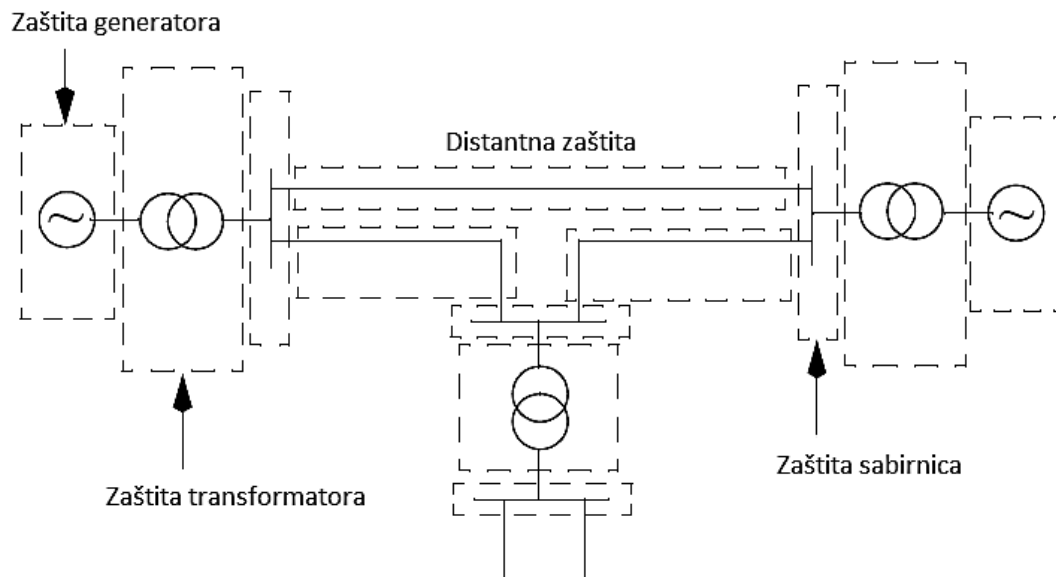
- Pouzdanost znači da bi zaštita trebala reagirati i obaviti svoju funkciju kada se pojavi kvar za koji je dizajnirana da reagira. Za postizanje željene pouzdanosti na duploj ili troduploj razini mogu biti potrebni neki dijelovi poput kompleta pojedinih dijelova zaštite ili signalnih putova. Smetnje mogu biti podijeljene u one koje se ne dogode (radnje koje su se trebale dogoditi, ali nisu) i neželjene smetnje (radnje koje su se

dogodile, a nisu trebale). Obično, smetnje koje se ne dogode mnogo su ozbiljnije od neželjenih smetnji.

- Sigurnost znači da zaštita ne bi trebala reagirati kada se kvar ne pojavi ili kada se kvar pojavi a zaštita nije namijenjena da reagira na taj kvar.
- Selektivnost znači da se ne isključuje nepotrebna oprema i uređaji, već samo oni koji su zahvaćeni kvarom.
- Osjetljivost treba otkriti kvarove koji inače uzrokuju male struje kvara, npr. kvar visoke impedancije. To podrazumijeva i povećani rizik rukovanja „malim“ poremećajima, npr. na transformatorima ili zbog preopterećenja.
- Zaštita bi također trebala djelovati brzo i osigurati da se ozljeda osoblja ili šteta na opremi spriječi ili ograniči.

Zaštite su često klasificirane prema objektima koje štite. Primjer je prikazan na slici 5.1. Ako kvar nastane na području kako je i prikazano na slici 5.1, to područje treba biti izolirano od ostatka mreže.

Mnoge zaštite koje štite odvojene dijelove opreme ili dijelove sustava koji zauzimaju neko područje su tzv. strujne diferencijalne zaštite. Takve zaštite mjere razlike između dvaju struja, koje bi u normalnom pogonu trebale biti jednake, i zaštita se aktivira ako odstupanje premaši unaprijed zadanu vrijednost. Obje razlike, u amplitudi i fazi, mogu okinuti relej. Princip za strujnu diferencijalnu zaštitu prikazan je slikom 5.2.



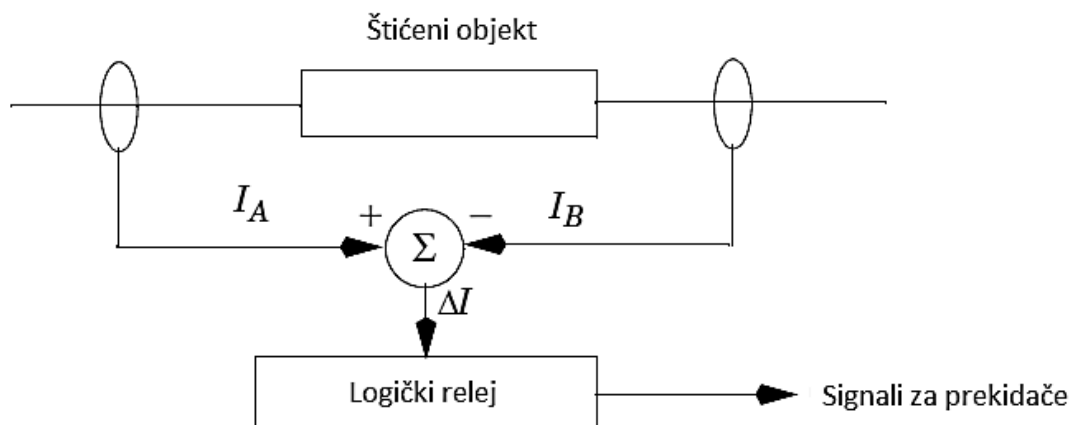
Slika 5.1. Različite zone zaštita u elektroenergetskom sustavu

### 5.1.2. Distantna zaštita

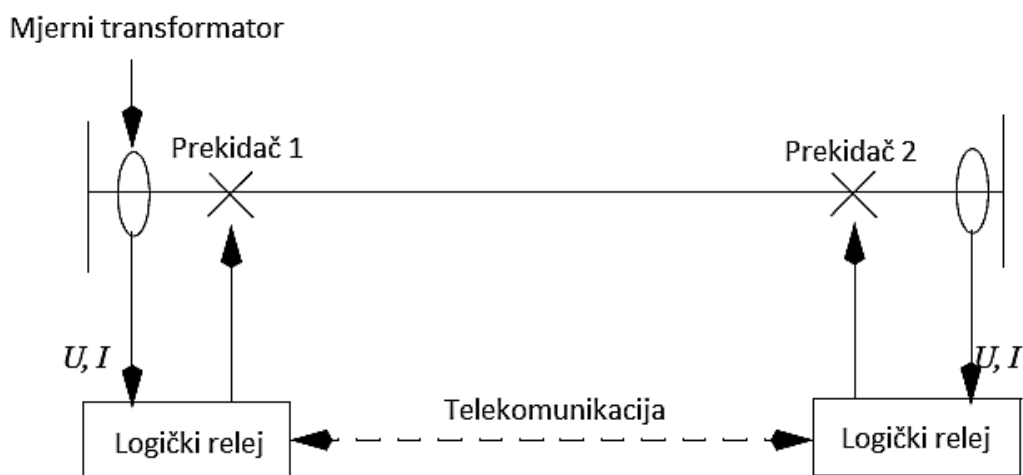
### 5.1.2.1. Opća načela

Takozvane distantne zaštite su važne zaštite u vezi stabilnosti i dinamike u elektroenergetskom sustavu. Njihov zadatak je da isključe vodove ili kabele koji su u kvaru.

Od velikih dijelova elektroenergetskog sustava koji sadrži vodove koji su izloženi raznim poremećajima, npr. udari munje, padovi stabala itd., važno je da se ti kvarovi mogu izolirati tako da minimalno utječu na ostatak sustava. Najčešći kvarovi su kvarovi uzemljenja, odnosno kratki spojevi između dvije ili više faza i zemlje (kvar shunt prekidača). Također se mogu pojaviti i prekidi linija (serije kvarova). Operativni princip distantne zaštite prikazan je na slici 5.3.



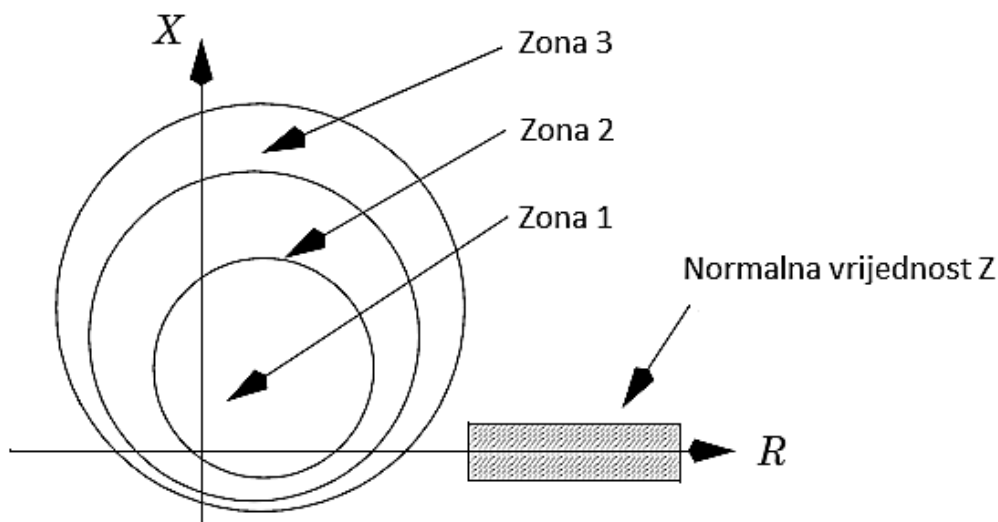
Slika 5.2. Načela strujne diferencijalne zaštite



Slika 5.3. Princip rada distantne zaštite

Struja i napon mjere se na oba kraja voda i iz toga je vidljiva impedancija pomoću:  $Z = U/I$ . U normalnom pogonu ta impedancija varira unutar određenog područja, ali ako se pojavi kvar, to će se drastično promijeniti. Dobivena vrijednost ovisi o tome gdje se na vodu dogodi kvar, od parametara u sustavu kao što su podaci voda i kapacitet kratkog spoja, može se izračunati gdje je došlo do kvara.

Za svaku distantnu zaštitu postoji nekoliko zona zaštite definirane u  $Z$  području prema slici 5.4. Niska vrijednost  $Z$  podrazumijeva da je kvar u blizini mjesta mjerenja. Iz podataka voda i kapaciteta kratkog spoja može biti određeno je li kvar na šticeu vodu, unutar zone 1, ili nije. Ako je takav slučaj, naredba se daje prekidačima na istom položaju u roku od nekoliko milisekundi, obično 10 ms, nakon što  $Z$  dosegne zonu 1. Istovremeno naredba se daje prekidačima na drugom kraju voda.



Slika 5.4. Različite zone u distantnoj zaštiti

Ako je izmjerena vrijednost na  $Z$  u zoni 2 ili 3, to znači da je kvar izvan stvarnog voda. To znači da se na slici 5.3 neće otvoriti niti prekidač 1 niti prekidač 2. Ako prekidači, koji prema zaštitnom principu trebaju izolirati kvar, ne odrade svoj posao iz nekog razloga, ostali prekidači koji su dalje od mjesta kvara moraju izolirati kvar. Pomoćni prekidači će se koristiti prvi nakon što je jasno da primarni prekidači nisu izolirali kvar. Dakle, ako je  $Z$  u zoni 2, prekidač neće reagirati dok obično ne prođe nekoliko stotina milisekundi.

Usklađivanje i udešavanje postavki zaštite da daje brzinu djelovanja, pouzdanost i selektivnost je kompliciran i vrlo važan zadatak u elektroenergetskom sustavu. U današnjim sustavima zaštite različita područja mogu se odrediti iz slike 5.4 sa glavnim proizvoljnim geometrijskim oblicima, što olakšava rad. Takva zamisao obuhvaća različita područja vremenske zaštite i takav plan se obično naziva selektivan plan. Napraviti i uspostaviti plan

selektivnosti je često vrlo dugotrajan posao jer bi trebao biti prikladan za svaku mogućnost stanja rada, odnosno za različit broj generatora i vodova spojenih na različite razine opterećenja.

#### 5.1.2.2. Automatsko ponovno uključenje

Kada dođe do zemljospoja ili kratkog spoja doći će do ionizacije (električni luk) koja nosi struju kvara. Taj električni luk ostaje ioniziran dok god struja teče kroz njega. Ako se struja kvara ugasi, to je obično dovoljno da se plazma od električnog luka ohladi tijekom nekoliko stotina milisekundi i da se izolacija obnovi, tako da se vod može ponovno uklopiti. Ovo se koristi u mnogim sustavima i vodovima s ponovnim uključanjem, gdje se kvar na vodovima od 400 kV ili više automatski ponovno uklopi nakon 400 ms. Ako kvar i dalje ostane, vod ostaje odspojen dulji period, obično oko 800 ms, dok se ne dogodi ponovno uključenje. Ponovnog uključanja više neće biti ako kvar i dalje ostane prisutan nakon drugoga ponovnog uključanja. U ovom zadnjem slučaju izolacija na vodu vjerojatno je trajno oštećena i mora se popraviti prije nego se vod ponovno pusti u pogon. Takav događaj je tipičan. Zbog specifičnih uvjeta u različitim zemljama, može doći do odstupanja.

Automatsko ponovno uključenje mora biti napravljeno s određenom pažnjom kada je napravljeno u neposrednoj blizini velikih termoelektrana, npr. nuklearnih elektrana. Veza u ovom slučaju može izazvati veliku napetost na osovini generatora ako dođe do određenih položaja faza. Ponovno uključenje u ovom slučaju može biti učinjeno daljinskim upravljanjem iz termoelektrane, a zatim se napravi sinkronizirano ponovno uključenje na drugom kraju linije. (Pod sinkroniziranim ponovnim uključanjem podrazumijeva se da je napon na prekidaču jednak nuli u trenutku njegovog zatvaranja.) Na taj način prijelazne pojave u sustavu su drastično smanjene, ali ponovno uključenje traje dulje vremena.

U nekim sustavima svi kvarovi na mreži visokog napona su na sve tri faze. U nekim sustavima je to samo jedna faza. To znači da je samo faza sa kvarom isključena i automatski ponovno uključena.

#### 5.1.3. Zaštita od gubitka sinkronizma

Sinkroni stroj koji ispadne iz sinkronizma, odnosno njegova kutna brzina se ne poklapa sa kutnom brzinom mreže, je izgubio sinkronizam sa sustavom i stroj se mora isključiti. Da bi opskrba električne energije dospjela u mrežu, kasnije se mora uspostaviti podudaranje u fazi sa mrežom. Tokom vremenskog perioda kada sinkroni stroj ispadne iz sinkronizma veliki impulsi struje proći će kroz generator, a ako te struje budu previsoke mogu ozbiljno oštetiti generator i tako ograničiti njegov životni vijek. Osim toga, vibracije koje nastaju također mogu oštetiti generator. Da bi se generator zaštitio od ispada iz sinkronizma, mora se opremiti sa relejem za ispad iz sinkronizma.

Također u tom slučaju impedancija se definira iz napona i struje. Odbrojavanje započne ako je radno stanje generatora u kritičnoj impedancijskoj zoni. Ako generator dolazi u kritičnu zonu u više navrata, to je kriterij da generator ispada iz sinkronizma, i zaštita daje naredbu prekidačima.

Generatori su također opremljeni sa drugim zaštitama za preopterećenja, prevelike uzbude generatora itd.

#### 5.1.4. Zaštite sustava

Zaštite sustava su posebne vrste zaštita, primarna zadaća iz koje se ne izolira oprema pod kvarom, nego se sprečava cijeli sustav ili veliki dijelovi sustava da se raspadnu. Zaštite sustava često koriste podatke iz nekoliko različitih točaka u sustavu ili količina koja može dati pouzdanu dijagnozu stanja u sustavu. Ovi sustavi često rade u vremenskoj ljestvici što je znatno duže nego više uređaja orijentirane zaštite, obično nekoliko sekundi ili čak minuta. Primjer zaštite sustava je strujno rasterećenje. To se koristi kako bi se izbjeglo da frekvencija padne ispod prihvatljive vrijednosti ako kapacitet proizvodnje padne u sustavu. Strujno rasterećenje zatim isključuje predodređeno opterećenje ovisno o tome koliko i kako brzo frekvencija pada. Zaštita pada napona je još jedna zaštita sustava, zadatak je da spriječi pad napona u sustavu. Strujno rasterećenje koristi samo frekvenciju kao ulazni signal, dok zaštita od pada napona često koristi nekoliko različitih veličina za ulazni signal.

## 5.2. Zaštita od atmosferskih prenapona – nadzemni vodovi

Nadzemni vodovi izloženi su pojavi atmosferskih prenapona. Oni mogu nastati direktnim udarom groma u vodič, uslijed povratnog preskoka sa stupa na vodič (nakon udara groma u zaštitno uže ili u stup) ili indukcijom u slučaju udara groma u blizini voda.

### 5.2.1. Nadzemni vodovi izvedeni kabelom

U pogledu pojava vezanih uz atmosferske prenapone situacija je u osnovi slična za sve izvedbe nadzemnih vodova pomoću kabela – bilo da se radi o univerzalnom kabelu u izvedbi trožilnog kabela bez nosivog užeta, o srednjenaponskom kabelskom snopu ili o trožilnom kabelu s nosivim čeličnim užetom. Svim srednjenaponskim kabelima je zajedničko da preko izolacije faznih vodiča imaju vodljivi metalni ekran koji je uzemljen. Električno polje koje se stvara oko vodiča pod naponom je zbog toga prisutno samo u izolaciji kabela i završava na ekranu. Posljedica toga je da izvan kabela nema električnog polja. Prema tvrdnjama proizvođača, nadzemno položeni kabel će biti manje izložen direktnim udarima groma nego što su to goli ili izolirani vodiči. To se obrazlaže činjenicom da izvan kabela nema električnog polja stvorenog pogonskim naponom zahvaljujući postojanju uzemljenog metalnog ekrana.

Prema navodima proizvođača univerzalnog kabela, višegodišnja pogonska iskustva su vrlo dobra a kvarovi nisu zabilježeni ni na područjima s jakom grmljavinskom aktivnošću. Ipak, u slučaju direktnog udara groma u kabel doći će do proboja vanjskog plašta a moguće je i oštećenje kabela na tom mjestu.

Osim od direktnog udara groma, atmosferski prenaponi na vodovima nastaju i kao inducirani naponi uslijed udara groma u blizini voda. S obzirom da kabel, za razliku od golih ili izoliranih vodiča, ima metalni ekran preko izolacije, prenaponi će se inducirati u njemu a ne u samom vodiču. Kako se ekran na oba kraja kabela uzemljuje, struja koja poteče zbog induciranih prenapona će preko ekrana otići u zemlju. U slučaju viših induciranih prenapona moguć je nastanak proboja vanjskog plašta prema ovjesnom priboru odnosno stupu. Prema tvrdnjama proizvođača univerzalnog kabela, u tom slučaju će na vanjskom plaštu nastati samo mala rupa što neće utjecati na svojstva kabela i neće predstavljati problem.

Svemu ovome se može dodati da su, prema informacijama dobivenim od proizvođača (Ericsson), na preko 10.000 km univerzalnog kabela ugrađenih u Europi u proteklih 10-ak godina zabilježena samo dva kvara vezana uz udar munje (prema posljednjim podacima dobivenim od Ericssona radi se o „nekoliko“ kvarova). Pri pregledu literature nismo naišli ni na kakve druge objavljene podatke u vezi takvih pogonskih iskustava.

U nastavku će biti razmotreno pitanje učestalosti udara munje u nadzemni vod s univerzalnim kabelom.

Vjerojatnost direktnog udara munje u neki objekt se može procijeniti na temelju srednje godišnje gustoće udara munje u tlo,  $N_g$ . Ta vrijednost se, u nedostatku točnijih podataka, može procijeniti iz broja grmljavinskih dana na nekom području,  $T_d$ , prema formuli:

$$N_g = 0,04 * T_d^{1,25}$$

Gdje je:

$N_g$  – gustoća udara munja u tlo [br. udara/(km<sup>2</sup>\*god)]

$T_d$  – broj grmljavinskih dana u godini

Ako se uzme da se radi o području s 30 grmljavinskih dana godišnje iz toga proizlazi 2,8 udara munje godišnje na 1 km<sup>2</sup>. Nakon toga treba procijeniti i vjerojatnost udara munje u nadzemni vod.

Za tu svrhu nećemo koristiti izraz koji se danas uobičajeno koristi za određivanje učestalosti direktnog udara u nadzemni vod – razlog za to je činjenica da je taj izraz određen na temelju promatranja vjerojatnosti udara groma u klasične vodove s neizoliranim vodičima. Prema tvrdnjama proizvođača univerzalnih kabela, vjerojatnost udara munje u vod s univerzalnim kabelom je manja nego u slučaju izoliranih i neizoliranih vodiča zbog nepostojanja ionizacije zraka u okolini kabela. O stvarnim učincima tog utjecaja nema drugih podataka. Zbog toga će se ovdje za procjenu koristiti izraz za određivanje srednje godišnje učestalosti izravnih udara munje u općeniti objekt:

$$N_d = N_g * A_e * C_d * 10^{-6}$$

Gdje je:



$N_g$  – gustoća udara munja u tlo [br. udara/(km<sup>2</sup>\*god)]

$A_e$  – ekvivalentna izložena površina objekta [m<sup>2</sup>]

$C_d$  – koeficijent utjecaja okoline

Ekvivalentna izložena površina objekta se uzima kao površina tla koja ima jednaku godišnju učestalost izravnih udara kao i sam objekt. Za usamljeni objekt oblika kvadra duljine L, širine W i visine H ekvivalentna izložena površina iznosi:

$$A_e = L * W + 6H * (L + W) + 9\pi * H^2$$

Za slučaj jedinične duljine voda s univerzalnim kabelom ekvivalentna izložena površina bi iznosila:

$$A_e = 6HL$$

Za vod prosječne visine 9 m i uz pretpostavku od 30 grmljavinskih dana godišnje (tj. 2,8 udara munje na 1 km<sup>2</sup>) i koeficijent  $C_d = 1$  broj direktnih udara po kilometru voda godišnje bi iznosio:

$$N_d = 2,8 * 6 * 9 * 1000 * 1 * 10^{-6} = 0,15$$

Navedena vrijednost odnosi se na vod u čijoj blizini nema drugih objekata koji bi ga štitili od direktnih udara munje. Topografske karakteristike terena i okolni objekti (npr. stabla) utječu na njegovu izloženu površinu. Može se uzeti da je utjecaj susjednih objekata na ekvivalentnu izloženu površinu značajan ukoliko se oni nalaze unutar udaljenosti 3H od promatranog objekta (u ovom slučaju nadzemnog voda s univerzalnim kabelom) – faktor  $C_d$  ja tada manji od 1. S druge strane, povišeni položaj objekta u odnosu na okolinu (npr. brijež, uzvisina i sl.) povećava vjerojatnost udara groma odnosno tada je  $C_d > 1$ . Pojednostavljeno se kod određivanja zaštite objekata od munje mogu uzeti vrijednosti prema tablici 5.1:

Tablica 5.1. Određivanje koeficijenta utjecaja okoline  $C_d$

Relativni položaj objekta	$C_d$
Objekt se nalazi unutar velikog područja objekata ili stabala iste ili veće visine (npr. šuma)	0,25
Objekt je okružen manjim objektima	0,5
Izolirani objekt: nema drugih objekata unutar udaljenosti 3H	1
Usamljeni objekt na uzvisini	2

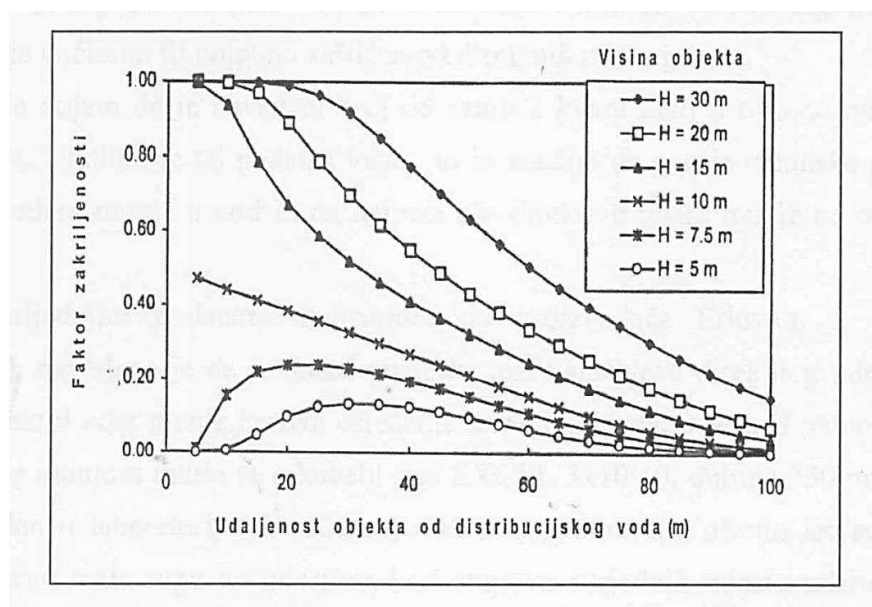
Ovakav način određivanja utjecaja okolnih objekata je naravno samo približan. Prema CIGRE preporukama utjecaj susjednih objekata na učestalost direktnih udara u nadzemni vod uzima se u obzir preko faktora zakrivljenosti,  $S_f$ . Faktor zakrivljenosti ima vrijednosti između 0 i 1 pri čemu vrijednost 1 odgovara potpunoj zakrivljenosti voda. Broj direktnih udara u vod je onda:

$$N_d^s = N_d * (1 - S_f)$$

Faktor  $S_f$  i faktor  $C_d$  nalaze se u odnosu:

$$C_d = 1 - S_f$$

U vezi vrijednosti faktora  $S_f$  može se kao primjer uzeti slika 5.5. Izvorno, slika je preuzeta iz radnih materijala CIGRE radne skupine WG C4.4.02.



Slika 5.5. Faktori zakrivljenosti distribucijskog voda prosječne visine 10m s nizom objekata različitih visina i udaljenosti od voda

Vidljivo je da prisutnost niza objekata paralelnih vodu (npr. vod u šumi) a koji su visine jednake ili veće od visine voda može djelovati tako da bitno smanji ili čak potpuno eliminira udare munje u vod (faktor  $S_f=1$ ).

Pozitivan utjecaj zakrivljenosti susjednim objektima (prvenstveno šumom) je u slučaju nadzemnog voda izvedenog kabelom vrlo značajan jer se susjedna stabla mogu nalaziti u neposrednoj blizini voda.

Ako pogledamo podatak dobiven od proizvođača (Ericsson) od 2 kvara na 12.000 km ugrađenog univerzalnog kabela, treba reći da se na temelju njega ne može nešto posebno zaključiti, s obzirom na to da nikakvi drugi podaci o načinima upotrebe i mjestu ugradnje tih vodova nisu poznati.

Ipak, radi dobivanja osjećaja o odnosima, može se napraviti sljedeće razmatranje. Uzmimo kabelski vod prosječne visine npr. 8 m iznad tla, položen nadzemno u području s malom grmljavinskom aktivnosti – npr. samo 10 grmljavinskih dana godišnje (to je inače prosječna vrijednost izokerauničke razine za Švedsku, u Hrvatskoj je ta vrijednost oko 35). Broj direktnih udara groma na 100 km voda, ukoliko vod prolazi ravnim otvorenim prostorom odnosno nije značajnije zakriljen susjednim terenom ili objektima te ne prolazi posebno

grmljavinski izloženim mjestima (kao što su npr. vrhovi uzvisina), bi prema prethodnim izrazima iznosio 0,034 direktna udara na 1 km voda godišnje. Na 100 km voda je to onda 3,4 udara godišnje.

Ako uzmemo da je promatrana količina od preko 10.000 km kabela ugrađena u mrežu u prosjeku 5 godina (Ericsson proizvodi takve kabele od sredine 90-tih godina prošlog stoljeća) to bi onda dalo ukupno više od 50.000 km x godina pogona. S druge strane, gore izračunata vrijednost od 3,4 direktna udara u 100 km voda godišnje za vrijeme od 5 godina daje 17 udara na 100 km voda.

Naravno, dio univerzalnih kabela je sigurno položen i podzemno (ili čak podvodno), ali za pretpostaviti je da je najveći dio ipak položen nadzemno. Veliki dio također sigurno prolazi šumskim područjima gdje je većinom ili potpuno zaštićen od direktnih udara groma.

Ipak, ostaje dojam da je navedeni broj od samo 2 kvara mali u odnosu na navedenu duljinu ugrađenih vodova. Ukoliko je taj podatak točan, to bi značilo da gornje računске procjene ili znatno precjenjuju broj udara munje u vod ili da najveći dio direktnih udara munje ne dovodi do nastanka kvara na vodu.

Prema posljednjim podacima dobivenim od proizvođača Ericsson u vezi atmosferskih prenapona, navedeno je da je do sada poznato „nekoliko“ slučajeva direktnog udara munje u kabel. Prema njima, direktni udar munje izaziva oštećenje samo na mjestu udara. U jednom od tih slučajeva kabela pogođenog munjom radilo se o kabelu tipa EXCEL 3x10/10, duljine 750 m, koji je nakon tog događaja pregledan u laboratoriju. Utvrđeno je da udar groma nije oštetiо izolaciju. Na vanjskom plaštu su pronađene male rupe na mjestima kod stupova susjednih mjestu udara – tu je došlo do proboja vanjskog plašta i odvođenja prenapona u zemlju.

Može se zaključiti da su mjere koje treba poduzimati radi zaštite univerzalnih kabela od atmosferskih prenapona u osnovi jednake onima za kabele položene pod zemlju. To znači da je na prijelazu sa kabelskog voda na nadzemni vod s golim ili izoliranim vodičima potrebno ugraditi odvodnike prenapona.

Električna zaštita (ekran) univerzalnog kabela treba biti uzemljena na oba kraja. Prilikom gradnje voda odnosno postavljanja kabela na stupove u slučaju prekida radova (npr. preko noći ili ako se čuje grmljavina) potrebno je vodiče sve tri faze i ekran međusobno spojiti i uzemljiti na oba kraja.

Uzemljivanje stupova duž trase kabela nije potrebno dok god nema prekida izolacije kabela (npr. zbog izvedbe otcjepa na izolatorima). U slučaju kvara tj. proboja izolacije na kabelu struja kvara će teći kroz ekran kabela u zemlju – zbog toga je bitno da su ekrani na oba kraja kabela uzemljeni.

#### 5.2.2. Nadzemni SN vodovi s izoliranim vodičima

Nadzemni SN vodovi s izoliranim vodičima zahtijevaju primjenu posebnih mjera u vezi zaštite od prenapona. U tom pogledu se može reći da su oni čak i osjetljiviji na atmosferske prenapone od vodova koji nemaju izolirane vodiče.

U slučaju udara groma u fazni vodič prenaponski val širi se po njemu u oba smjera. Kada prenapon dođe do stupa koji je uzemljen može doći do preskoka preko izolatora na stup. Formirat će se električni luk kroz koji će i nakon prolaska atmosferskog prenapona nastaviti teći struja jer će ga održavati pogonski napon mreže. Luk će trajati sve dok prorada zaštite ne isključi napon na vodu (u slučaju SN mreža uzemljenih preko malog otpora). Osim samog preskoka sa faznog vodiča na stup moguć je, ovisno o iznosu struje groma i impedanciji stupa prema zemlji, i preskok sa glave stupa na fazne vodiče koji nisu bili pogođeni gromom (povratni preskok).

Do opisanih pojava će doći i kod vodova s golim vodičima kao i kod vodova s izoliranim vodičima. Sam proboj izolacije izoliranog vodiča kod preskoka i nije toliko problem s obzirom da se oni nalaze na izolatorima predviđenim za puni pogonski napon voda. Međutim luk pogonske frekvencije koji nastavlja gorjeti zbog napona mreže može izazvati oštećenje vodiča izoliranog voda. Radi se o tome da prisutnost izolacije oko vodiča sprječava slobodno pomicanje luka po vodiču i on neprestano gori na istom mjestu. Zbog zagrijavanja koje nastaje na maloj površini vodiča moguć je nastanak oštećenja, a u najgorem slučaju i pucanje vodiča na tom mjestu. Kod golih vodiča to nije slučaj jer se luk po njima može slobodno pomicati dok zaštita ne isklopi kvar.

Rješenje tog problema je u postavljanju posebno konstruiranih zaštitnih iskrišta na stupove. Zadaća tih iskrišta je da na sebe preuzmu struju luka i na taj način spriječe oštećenje vodiča. Negativna strana takvog rješenja je u tome da vod na tom mjestu više nije izoliran pa npr. ptice mogu izazvati preskok na tom mjestu.

#### 5.2.2.1. Postojeće tehničke preporuke u HEP ODS-u

Tehničke preporuke predviđaju obavezno postavljanje iskrišta na stupove koji imaju uzemljene čelične ili betonske konzole. Kod vodova napajanih s jedne strane iskrište se postavlja na stranu opterećenja, dok se kod dvostrano napajanih vodova postavlja na obje strane izolatora. Dodatno, kod križanja vodova, objekata i prometnih puteva iskrišta se postavljaju na obje strane križanja. Osim o navedenom, raspored i broj iskrišta ugrađenih na vodu treba odgovarati uvjetima okoline a ovisi prvenstveno o:

- broju grmljavinskih dana na području voda (izokeraunička razina)
- prijelazu preko otvorenog terena, iznad višeg raslinja (grmlja) ili kroz šumu
- prijelazu preko gorskih prijevoja ili kroz doline
- sastavu i vodljivosti tla na kojem je vod izgrađen

Na mjestima gdje su ugrađena zaštitna iskrišta preporučuje se upotreba zaštite ptica.

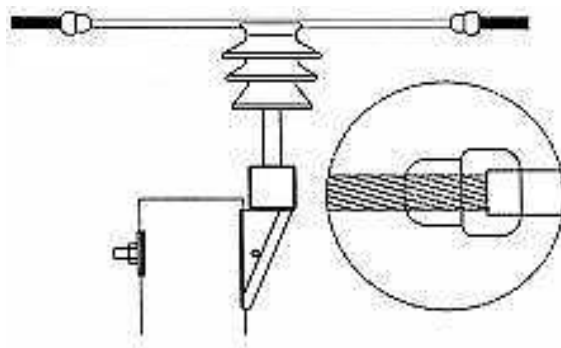
### 5.2.2.2. Strana iskustva

U počecima korištenja tehnologije izoliranih vodiča nije bila predviđena upotreba zaštitnih iskrišta na vodovima. Međutim s vremenom se pokazao negativan utjecaj atmosferskih prenapona na izolirane vodiče i počela su se tražiti rješenja kojima bi se problemi otklonili. Oštećenja izoliranih vodiča uzrokovana atmosferskim prenaponima sprječavaju se ugradnjom zaštitnih naprava: APD-a (*eng. arc protection devices*), PAD-a (*eng. power arc devices*), odvodnika prenapona ili kombinacije spomenutih naprava.

#### **APD**

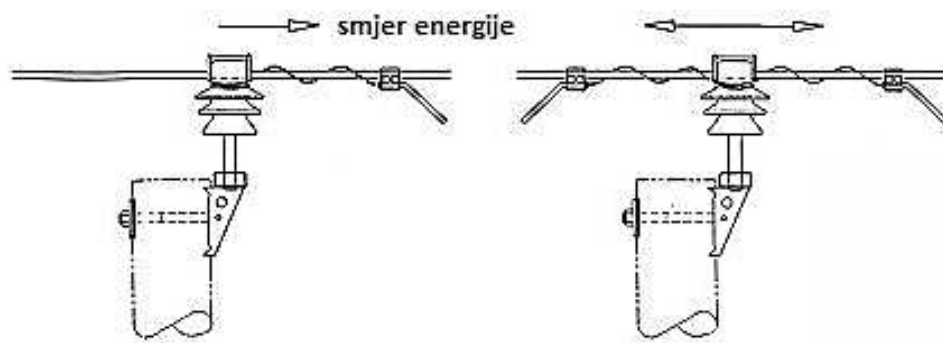
Prva rješenja za zaštitu od prenapona sastojala su se u tome da se izolacija vodiča skidala u blizini izolatora a na kraj izoliranog dijela postavljala se aluminijska spojnica, kako je prikazano na slici 5.6. Ovo rješenje imalo je više nedostataka:

- izolacija vodiča se mora skidati
- gorenje luka je nekontrolirano
- skupljanje izolacije može dovesti do toga da se rub izolacije izmakne iz spojke čime ona gubi svoju funkciju



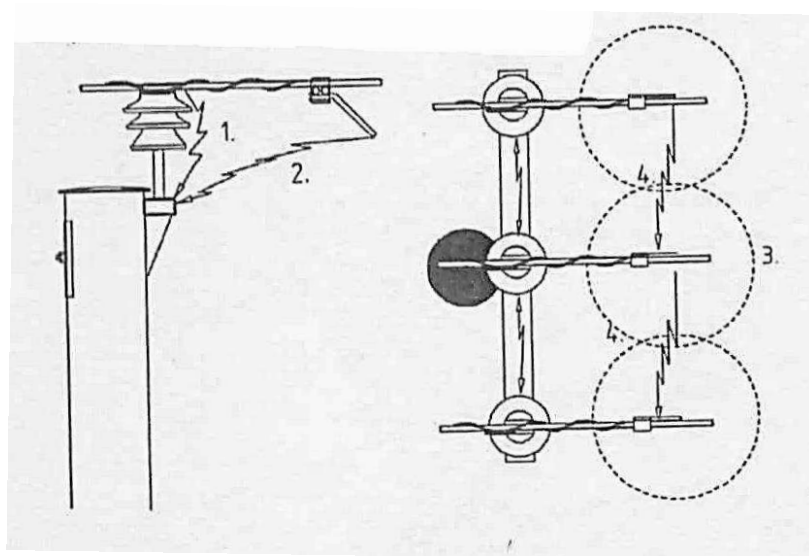
Slika 5.6. Prva izvedba APD-a

Nakon toga uvedena su nova rješenja koja su se sastojala od aluminijske spirale za odvođenje luka od izolatora i iskrišta koje preuzima luk (slika 5.7). U ovom slučaju nema potreba za skidanjem izolacije s vodiča jer sama stezaljka ima zube za probijanje izolacije.



Slika 5.7. Ugradnja APD-a

Princip djelovanja prikazan je na slici 5.8.



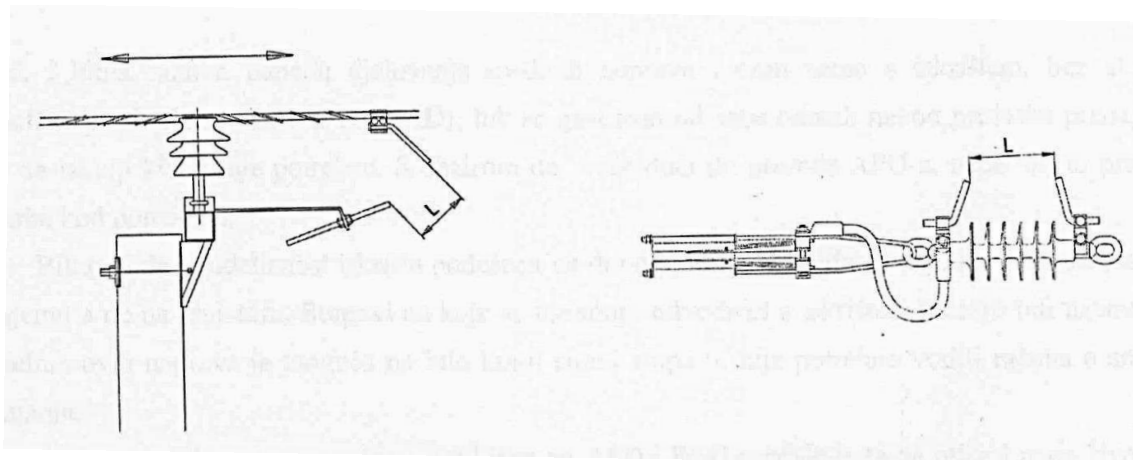
Slika 5.8. Princip djelovanja APD-a

U slučaju nailaska prenapona pojavit će se luk preko izolatora (1), nakon čega će se on odmicati duž aluminijske žice koja je na jednoj strani omotana oko vrha izolatora, a na drugom kraju spojena sa iskrištem. Dok luk gori na vrhu iskrišta (2) dolazi do ionizacije okolnog zraka (3) i nastanka kratkog spoja između faza (4). APD-ove je moguće ugraditi i naknadno, ako se za tim ukaže potreba. Ovakve naprave se u radijalnim mrežama ugrađuju na strani izolatora koja je u smjeru tereta a u prstenastim mrežama na obje strane izolatora. Također, ovakvi APD-ovi se mogu koristiti i kao mjesta za priključak naprava za privremeno uzemljenje prilikom radova na vodu. U mrežama s manjom strujom kratkog spoja koriste se izvedbe s dvije aluminijske žice omotane oko vodiča umjesto samo jedne. Na izoliranim vodovima na kojima je razmak između faznih vodiča veći od 60 cm zaštita primjenom APD-a

nije efikasna i trebaju se primijeniti drugačije mjere. APD se ugrađuje na potporne izolatore, dok se za izolatore sa zateznom funkcijom preporuča korištenje PAD-a.

### **PAD**

U slučaju manjih struja kratkog spoja luk se pomiče sporije. Kako bi se izbjeglo eventualno oštećenje izolatora, kod ovog rješenja se luk pali direktno u iskrištu (slika 5.9).



Slika 5.9. Ugradnja PAD-a na potporni i zatezni izolator

Na djelovanje i učinkovitost PAD-a za razliku od APD-a ne utječe smjer toka energije na vodu, tako da nije bitno na koju stranu izolatora ih se ugrađuje.

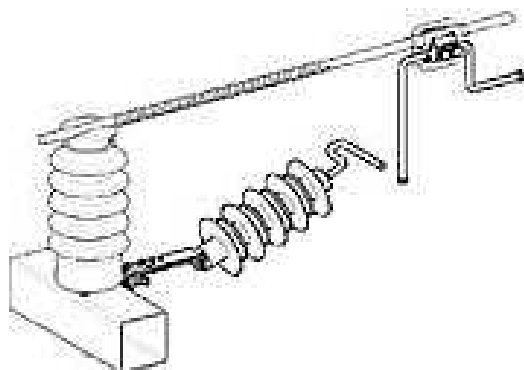
### **Naprave s elementima za ograničenje struje (CLAH, EGLA)**

Ove zaštitne naprave sastoje se od serijskog spoja zaštitnog iskrišta i elemenata za ograničenje struje – odvodnika prenapona. U literaturi se za takve naprave još mogu naći nazivi CLAH ili EGLA. Odvodnik prenapona se nalazi na strani stupa i u normalnom pogonu na njega nije priključen napon. U slučaju nailaska prenapona nastaje preskok na iskrištu i struja teče kroz odvodnik prenapona prema zemlji. Nakon prolaska struje groma, struju luka tjera pogonski napon mreže. Međutim, kako odvodnik ima izrazito nelinearnu strujno-naponsku karakteristiku, njegov otpor pri normalnom pogonskom naponu poraste na visoke vrijednosti. Zbog toga se struja kvara smanji, a luk u iskrištu ugasi sam od sebe. Gašenje luka slijedi unutar prve poluperiode mrežnog napona nakon prolaska prenapona. Odavdje slijedi i bitna razlika između djelovanja ovakvih naprava i onih samo s iskrištem, bez strujno ograničavajućih elemenata (APD i PAD): luk se gasi sam od sebe odmah nakon prolaska prenapona tako da isklop kvara nije potreban. S obzirom da neće doći do prorade APU-a, neće biti ni prekida opskrbe kod potrošača.

Bitno je da je udaljenost iskrišta podešena na dovoljno malu vrijednost tako da preskok nastane na njemu, a ne na izolatoru. Stupovi na koje se ugrađuju odvodnici s iskrištem moraju biti uzemljeni. Ugradnja ovih naprava je moguća na bilo kojoj strani stupa, tj. nije potrebno voditi računa o smjeru napajanja.

Dodatna prednost ovog rješenja u odnosu na APD i PAD uređaje je ta da ptice i male životinje koje eventualno premoste iskrište neće izazvati preskok jer vrh donjeg dijela iskrišta u normalnom pogonu nije spojen sa zemljom, odnosno između njega i zemlje se nalazi vrlo velik otpor odvodnika prenapona.

Naravno, moguće je na stupove ugraditi i same odvodnike prenapona, bez iskrišta (slika 5.10). Međutim takvo rješenje je skuplje jer treba odabrati odvodnike koji su u stanju cijelo vrijeme podnositi pogonski napon mreže. Osim toga, eventualni kvar odvodnika bi tada značio i ispad voda.



Slika 5.10. Zaštitno iskrište s odvodnikom prenapona

### 5.2.2.3. Procjena ugroženosti voda od atmosferskih prenapona

Poznavanje grmljavinske aktivnosti na nekom području bitan je preduvjet za ocjenjivanje ugroženosti objekata od udara munje. Danas u mnogim zemljama Europe i svijeta postoje sustavi senzora za praćenje i lociranje udara munja pomoću kojih je moguće dobiti podatke o gustoći udara munja u tlo u nekom području te različite druge statističke podatke (npr. udio negativnih i pozitivnih udara, podatke o amplitudama, broj udarnih valova). Sustavi petnaestak zemalja zapadne i središnje Europe su, radi poboljšanja točnosti i efikasnosti prikupljanja podataka povezani u jedinstvenu mrežu – EUCLID. U Hrvatskoj nažalost ne postoji takvo praćenje udara munja. U tom slučaju preostaje procjenjivanje gustoće udara munja u tlo na klasičan način, prema kerauničkoj razini odnosno broju grmljavinskih dana na nekom području. U nedostatku boljih podataka, za tu svrhu se obično koristi formula:

$$N_g = 0,04 * T_d^{1,25}$$

Gdje je:



$N_g$  – gustoća udara munja u tlo [br. udara/(km<sup>2</sup>\*god)]

$T_d$  – broj grmljavinskih dana u godini

Naravno, samo manji broj munja koje su udarile na nekom području površine 1 km<sup>2</sup> pogodit će i nadzemni vod koji prolazi tim područjem. Broj direktnih udara u distribucijski vod na ravnom terenu danas se obično određuje iz izraza:

$$N_d = K_0 * N_g * (b + 10,5 * H^{0,75})/10$$

Gdje je:

$N_d$  – očekivani broj direktnih udara godišnje na 100 km voda

$H$  – prosječna visina voda [m]

$b$  – horizontalni razmak između vanjskih vodiča [m]

$K_0$  – orografski koeficijent

Iznos koeficijenta  $K_0$  ovisi o tipu terena na kojem se vod nalazi (npr. da li je to dolina, padina brda ili neka uzvisina). U općenitom slučaju, kada vrsta terena nije poznata, preporučuje se korištenje vrijednosti  $K_0 = 1,8$ .

Za vod prosječne visine 9 m koji ima horizontalni razmak između vanjskih faznih vodiča 0,8 m i prolazi područjem s 30 grmljavinskih dana godišnje, iz gornjih formula se dobiva 28 direktnih udara groma godišnje u 100 km voda.

Navedeni broj direktnih udara u vod je manji ako vod prolazi pokraj objekata koji ga djelomično štite od direktnih udara (npr. kroz šumu). Efekt šticećenja se uzima u obzir preko faktora zakrivljenosti  $S_f$ . Broj direktnih udara groma u tako zaštićeni vod  $N_d^s$  je:

$$N_d^s = N_d * (1 - S_f)$$

Primjer iznosa faktora zakrivljenosti prikazan je na slici 5.1.

Osim direktnih udara u vod i udari u tlo pokraj voda stvaraju prenapone. U tom slučaju radi se o induciranim prenaponima. Njihov iznos znatno ovisi o položaju mjesta udara u odnosu na vod te o amplitudi struje munje. U usporedbi s prenaponima koji su izazvani direktnim udarom munje u vod inducirani prenaponi imaju manje iznose i kraće trajanje. Određivanje karakteristika induciranih prenapona još je bitno složenije nego kada se radi o direktnim udarima groma. Ipak, istraživanja u svijetu su pokazala da ti prenaponi ne prelaze iznos od nekoliko stotina kilovolti, u usporedbi s amplitudama od više megavolti u slučaju direktnog udara (u literaturi se može naći da inducirani prenaponi obično ne prelaze 300-400 kV). Trajanje hrpta vala do 50%-tne vrijednosti je kod induciranih prenapona u pravilu nekoliko mikrosekundi, u usporedbi s uobičajenim trajanjem od nekoliko desetaka mikrosekundi kod prenapona izazvanih direktnim udarom.

Kako se u slučaju induciranih prenapona u sve 3 faze javlja prenapon približno istog iznosa, praktički nema opasnosti od preskoka između faza (odnosno preskoka na stup i povratnog preskoka na druge faze) i pojave međufaznog kvara. Ovo je bitno različito od situacije s direktnim udarom u srednjenaponski vod gdje su takvi događaji vjerojatni zbog znatno većih iznosa napona.

#### 5.2.2.4. Primjena zaštite od atmosferskih prenapona

Zaštita od atmosferskih prenapona je bitan segment tehnologije nadzemnih vodova s izoliranim vodičima. U postojećoj granskoj normi HEP-a propisana je zaštita vodova pomoću zaštitnih iskrišta.

Jedini podatak o iskustvima u Hrvatskoj u pogledu broja kvarova uzrokovanih atmosferskim prenaponima kojima raspolažemo su ona iz ankete provedene u sklopu ove studije. Prema njima, na promatranom uzorku od 40 km vodova s pogonskim iskustvom od oko 200 km x godina, dva kvara su povezana s atmosferskim prenaponima. Pri jednom od ta dva kvara je došlo do pucanja vodiča na sredini raspona. To je neobično – jedino moguće objašnjenje jest da se radilo o direktnom udaru munje vrlo velike struje na tom mjestu. Ovakav kvar ne ovisi o prisutnosti zaštitnih elemenata na stupovima, tako da njega nećemo uračunati u razmatranje o učinkovitosti dosad ugrađene zaštite od prenapona. Osim tih kvarova u odgovorima na anketu evidentirana su još dva kvara na izolatorima čiji uzrok nije naveden.

Atmosferski prenaponi su dakle izazvali 1 do maksimalno 3 kvara koji se mogu dovesti u vezu s primijenjenom zaštitom od atmosferskih prenapona. Navedene brojke daju od 0,5 do 1,5 kvarova na 100 km voda godišnje što u svakom slučaju nije velik broj. Iz toga se može zaključiti da je zaštita od atmosferskih prenapona koja je korištena na vodovima obuhvaćenim anketom zadovoljavajuća, te da atmosferski prenaponi na tim vodovima ne izazivaju probleme u pogledu trajnih kvarova.

Nije nam poznato u kolikoj su mjeri pri gradnji ovih vodova korištene preporuke iz granske norme (a nije poznato ni u kolikoj je mjeri pri tome korištena procedura za određivanje razmaka zaštitnih iskrišta). Zbog toga se nažalost ne može zaključiti da li su navedene preporuke stvarno zaslužne za takav, relativno mali broj trajnih kvarova izazvanih atmosferskim prenaponima. Dodatno, iz odgovora na anketu se može primijetiti da su zapravo samo 2 voda ukupne duljine oko 3 km zaštićena isključivo zaštitnim iskrištima. Ostalih 8 vodova ukupne duljine oko 38 km zaštićeno je kombinacijom iskrišta i odvodnika i/ili CLAH elemenata.

Danas sve više dobiva na važnosti pitanje kvalitete električne energije isporučene potrošačima. Kratkotrajni ispadi uzrokovani proradom zaštite pri eliminaciji prolaznih kvarova su jedan od elemenata koji na to negativno utječu. Podataka o tome kakva je situacija s brojem prolaznih kvarova na našim vodovima s izoliranim vodičima nema. Takvi kvarovi su praktički isključivo povezani s preskocima na zaštitnim iskrištima jer ona predstavljaju jedina neizolirana mjesta na vodu s izoliranim vodičima. Broj takvih kvarova može se smanjiti tako da se umjesto zaštitnih iskrišta na vod ugrađuju odvodnici prenapona ili zaštitnih iskrišta sa serijski spojenim odvodnicima prenapona (CLAH). Pri tome ovo drugo rješenje ima prednost zbog niže cijene.

Dakle, ukoliko je na nekom vodu potrebno smanjiti broj preskoka uzrokovanih prolaznim kvarovima, potrebno je umjesto klasičnih iskrišta na stupove ugrađivati iskrišta sa serijski spojenim odvodnicima prenapona (CLAH). Pri tome, u pogledu smanjenja broja prolaznih kvarova ne smatramo da je dobro rješenje kombinacija CLAH elemenata i zaštitnih iskrišta na

istoj trasi. Naime, prisutnost odvodnika prenapona može povećati iznos prenapona na vodu i time izazvati i više preskoka na klasičnim zaštitnim iskrištima na tom istom vodu, nego što bi ih bilo da na vodu nema CLAH elementa odnosno odvodnika prenapona.

### **5.3. Zaštita podzemnih vodova**

Zbog atmosferskih pražnjenja i na podzemne vodove mogu utjecati udari munje, a posljedice su različite:

- udubljenje na plaštu izolacije
- proboj izolacije
- prekidanje vodiča
- taljenje vodiča

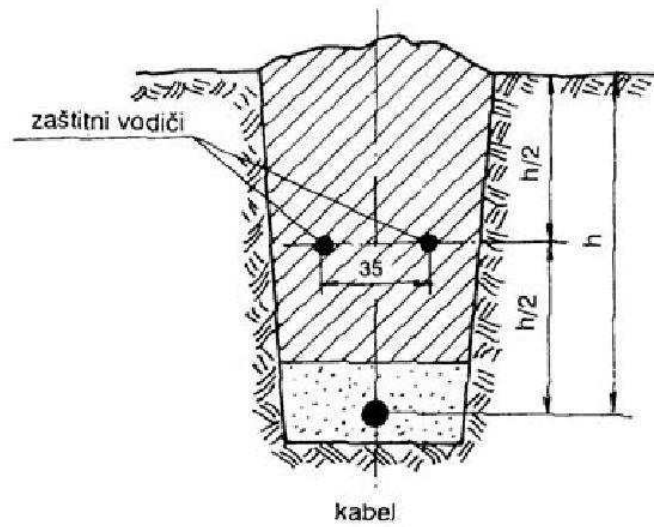
Kada munja udari u tlo, ako je otpor zemlje manji, struja se dijeli u više smjerova. Ako je tlo pješčano ili stjenovito, ono se pod utjecajem velike topline od munje topi i stvaraju se kanali do položenih kabela. Od samo jednog udara munje u tlo mogu nastati više oštećenja na kabelu na više mjesta. Razlikujemo normalnu zaštitu, koju provodimo pri polaganju kabela, te posebnu zaštitu gdje je velika izloženost atmosferskih pražnjenja.

#### **5.3.1. Normalna zaštita**

Ako se kabeli polažu u blizini drveća, treba se voditi računa o tome da drveće štiti kabele od izravnog atmosferskog pražnjenja na nekoj udaljenosti. No, može doći i do preskoka munje iz korjenja drveća ako se kabeli polože preblizu. Radi se i uzemljenje kablenskog plašta na svakih 2 km.

#### **5.3.2. Posebna zaštita**

Posebna zaštita najčešće uključuje polaganje zaštitnih vodiča iznad samih kabela u zemlji kako je i prikazano na slici 5.11.



Slika 5.11. Zaštitni vodiči položeni iznad kabela

Takvo rješenje je jeftino i dosta se koristi tamo gdje su duljine podzemnih kabela velike i tamo gdje broj grmljavinskih dana godišnje iznosi preko 20, a broj oštećenja kabela na dionici od 100 km je veći od dopuštenog.

## 6. PROGRAM LABORATORIJSKIH MJERENJA

### 6.1. Ispitivanja izoliranih vodiča

Ispitivanja izoliranih vodiča za srednjenaponske mreže propisana su u normi EN 50397-1/2006. Normom su propisana tipska ispitivanja, ispitivanja uzoraka i komadna ispitivanja.

Tipska ispitivanja se u načelu provode prije nego se započne s komercijalnim isporukama proizvoda određenog tipa. Cilj tih ispitivanja je pokazati da karakteristike proizvoda zadovoljavaju zahtjeve za predviđenu namjenu. Tipska ispitivanja se, nakon što su jednom napravljena, ne trebaju ponavljati, osim ako nije došlo do promjena u materijalu, konstrukciji ili proizvodnom procesu koje bi mogle promijeniti karakteristike proizvoda u primjeni.

Ispitivanja uzoraka se provode na određenom broju proizvoda iz neke isporuke ili proizvodne serije. Cilj tih ispitivanja je pokazati da su proizvodi izrađeni u skladu s proizvodnim specifikacijama, odnosno provjeriti kvalitetu materijala izrade.

Komadna ispitivanja se provode na cijeloj proizvedenoj količini kako bi se provjerila ispravnost proizvoda.

Pregled propisanih ispitivanja dan je u tablici 6.1. Napon  $U$  koji se spominje kod nekih ispitivanja je nazivni napon izoliranog vodiča.

Tablica 6.1. Program ispitivanja izoliranih vodiča prema EN 50397-1/2006

Br.	Ispitivanje	Kategorija ispitivanja
1.	Električna ispitivanja	
1.1	Mjerenje otpora vodiča	T, S <sup>(1)</sup>
1.2	Ispitivanje izmjeničnim naponom iznosa $U$ - za izolirane vodiče koji nemaju PV sloj na vodiču - za izolirane vodiče koji imaju PV sloj na vodiču	S (u trajanju 15 min.) i T (u trajanju 3) S (u trajanju 4 h) i T (u trajanju 48 h)
1.3	"Spark test" na izolaciji s izmjeničnim naponom iznosa $0,7*U$ ili istosmjernim naponom iznosa $U$ <sup>(2)</sup>	R
1.4	Mjerenje puzne struje pri naponu $0,7*U$	T
1.5	Otpornost na stvaranje vodljivih staza <sup>(3)</sup>	T
2.	Konstrukcija i dimenzije	
2.1	Usklađenost s konstrukcijskim zahtjevima	T, S, R
2.2	Debljina izolacije	T, S, R
3.	Konstrukcija i mehanička svojstva vodiča	

Br.	Ispitivanje	Kategorija ispitivanja
3.1	Ispitivanje prekidne čvrstoće	T, S <sup>(1)</sup>
3.2	Konstrukcija i dimenzije	T, S
4.	Ne-električna ispitivanja izolacije	
4.1	Mehanička svojstva izolacijskog materijala prije i poslije umjetnog starenja	T
4.2	Sadržaj čađe <sup>(4)</sup>	T
4.3	Otpornost na ultra-ljubičasto zračenje <sup>(5)</sup>	T
5.	Ispitivanje kompatibilnosti materijala umjetnim starenjem <sup>(6)</sup>	T
6.	Termička svojstva izolacije	
6.1	Skupljanje izolacije	T
6.2	Ispitivanje stupnja umreženja <sup>(7)</sup>	T, S
6.3	Ispitivanje pritiskom na povišenoj temperaturi <sup>(8)</sup>	T
7.	Dodatna ispitivanja izolacije	
7.1	Ispitivanje upijanja vode	T
7.2	Ispitivanje tvrdoće <sup>(8)</sup>	T
8.	Ispitivanje uzdužne vodonepropusnosti <sup>(6)</sup>	
8.1	S ciklusom zagrijavanja	T
8.2	Bez ciklusa zagrijavanja	S
9.	Kontrola oznaka	
9.1	Sadržaj, čitljivost	T, S, R
9.2	Neizbrisivost	T
10.	Ispitivanje klizanja izolacije	T

Gdje je:

T – tipsko ispitivanje

S – ispitivanje na uzorku

R – komadno ispitivanje

(1) – samo za kompaktirane vodiče

(2) – alternativno, može se provesti ispitivanje na cijeloj proizvedenoj duljini uranjanjem u vodu, uz primjenu napona od 4 kV u trajanju 5 minuta

(3) – samo za  $U \geq 30$  kV ili na zahtjev

(4) – ako se čađa koristi za UV-stabilizaciju

(5) – ako se za UV-stabilizaciju ne koristi čađa

(6) – samo za konstrukcije sa svojstvom uzdužne vodonepropusnosti

(7) – samo za umreženi polietilen

(8) – samo za termoplastični polietilen

## 6.2. Ispitivanja univerzalnog kabela

Za sada ne postoje posebne norme koje bi propisivale specifične zahtjeve u vezi ispitivanja univerzalnog kabela i pripadajućeg pribora. To i ne treba čuditi s obzirom da je primjena nadzemnih srednjenaponskih kabelskih mreža započela relativno nedavno (gledajući u vremenskim okvirima uobičajenim u elektroenergetici). Usporedbe radi, izolirani vodiči za srednjenaponske mreže se u Europi primjenjuju još od 70-tih godina ali je tek pred koju godinu izašlo prvo izdanje europske norme za njihovu konstrukciju i ispitivanje, a norma za ispitivanje pripadajućeg pribora je još uvijek u izradi.

Ispitivanja univerzalnog kabela bi se mogla promatrati u 2 dijela: ispitivanje pojedinih komponenti (kabela, kabelskog pribora, ovjesne opreme) i ispitivanja nadzemnog kabelskog sustava kao cjeline.

### 6.2.1. Ispitivanje kabela

Norme koje propisuju ispitivanja kabela namijenjenih za uobičajene načine polaganja postoje već odavno. U HEP-u su zahtjevi za SN kabele i njihovu primjenu regulirani i posebnim Granskim normama. U Hrvatskoj je do prije nekoliko godina za konstrukciju i ispitivanje kabela bila mjerodavna međunarodna IEC norma 60502-2. Međutim, u skladu s tendencijom preuzimanja europskih normi, 2001. godine je umjesto IEC norme kao hrvatska norma usvojena europska norma (točnije, harmonizirani dokument), HD 620 S1. Ta norma bi se pojednostavljeno mogla opisati kao skup različitih prijašnjih nacionalnih normi pojedinih zemalja članica CENELEC-a koje su „sastavljene“ u jedan dokument. Razlike koje su postojale između kabela po tim prijašnjim nacionalnim normama, riješene su tako da su oni uključeni u HD 620 kao posebni tipovi kabela, odnosno posebne „sekcije“ norme. Rezultat toga je da nema jedinstvenog pravila za konstrukciju, karakteristike materijala, ispitivanje i primjenu SN kabela za neku naponsku razinu i vrstu izolacijskog materijala, nego postoji velik broj različitih mogućnosti. Na primjer, za uobičajene jednožilne kabele s izolacijom od umreženog polietilena i vanjskim plaštem od polivinil-klorida ili termoplastičnog polietilena u HD 620 umjesto jednog postoji više od 10 tipova kabela, proizašlih iz različitih bivših nacionalnih normi. Razlike među većinom tipova nisu velike ali ipak postoje – od različitih zahtjeva o svojstvima ugrađenih materijala, nekih razlika u ispitnim zahtjevima i metodama, razlika u nekim dozvoljenim konstrukcijskim rješenjima itd.

Norma HD 620 je preuzeta i kao osnova za aktualni HEP-ov Bilten 130 koji propisuje zahtjeve koje moraju ispunjavati kabele koji se ugrađuju u distribucijske mreže HEP-a. Među velikim brojem sekcija norme HRN HD 620 odabrane su one koje imaju slične zahtjeve kao norme koje su kod nas prethodno vrijedile za SN kabele (pri tome se misli na IEC 60502-2 i

HEP-ov Bilten br. 22). Tako se propisani zahtjevi za 20 kV kabele iz Biltena 130 temelje na sekciji 5-C, a za 35 kV kabele na sekciji 5-B iz HD 620.

Ispitivanja kabela se općenito mogu podijeliti na električna i ne-električna. Neelektrična se pak mogu podijeliti na ispitivanja svojstva ugrađenih materijala i provjeru konstrukcije kabela.

S obzirom da u pogledu električnih naprezanja nema bitnih razlika između kabela položenih u zemlji i nadzemno, može se zahtijevati da kabeli za nadzemne mreže moraju zadovoljiti sva električna ispitivanja koja su propisana i za podzemne kabele. Što se tiče ispitivanja fizikalno-kemijskih svojstava ugrađenih materijala, u nedostatku specifičnih normi, kao osnovni zahtjev bi se moglo postaviti da korišteni materijali trebaju zadovoljiti barem zahtjeve koji su propisani postojećim normama. I norme (HD, IEC) koje se odnose na klasične primjene kabela imaju predviđenu mogućnost polaganja kabela na otvorenom pa u skladu s time propisuju i ispitivanja ponašanja materijala na npr. niskim temperaturama ili ispitivanja u vezi otpornosti na ultraljubičasto zračenje.

#### 6.2.2. Ispitivanje kablenskog pribora i ovjesne opreme

Ispitivanja kablenskog pribora propisana su europskom normom HD 629.1. Ta norma je preuzeta i kao hrvatska norma, a uključena je i u Bilten 130. U njoj se spominje upotreba kablenskog pribora pod zemljom i u zraku ali nigdje se izričito ne spominje ugradnja kabela na stupove nadzemne mreže. Vrste ispitivanja kablenskog pribora propisane u toj normi ipak upućuju na zaključak da ona zapravo ne uključuje takve primjene kabela (mogućnost da su kabeli položeni u zraku umjesto u zemlji je i prije bila pokrivena normama za kabele i kablenski pribor, ali se pri tome zapravo misli na ugradnju npr. na kablenske police i slične situacije gdje kabel nije izložen posebnim mehaničkim naprezanjima). Ovome se može dodati i to da su vrste ispitivanja koje propisuje HD 629.1 vrlo slične onima koje propisuje aktualna međunarodna IEC norma za kablenski SN pribor (IEC 60502-4:2005) a u kojoj je izričito navedeno da se ne odnosi na kabele za nadzemno polaganje.

S obzirom na postojeću situaciju, za ispitivanja kablenskog pribora je onda ipak najprikladnije kao minimum zahtijevati ispitivanje prema HRN HD 629.1. Popis ispitivanja i ispitnih zahtjeva za različite tipove kablenskog pribora dan je u Biltenu 130.

Za ispitivanja ovjesnog pribora, u nedostatku specifičnih normi za univerzalni kabel, također je za sada jedina mogućnost korištenje postojeće norme za ispitivanje ovjesnog pribora za VN vodove IEC 61284/1997 te normi za ovjesni pribor niskonaponskog kablenskog snopa (trenutno je u izradi europska norma za ispitivanje ovjesnog pribora za NN SKS, prEN 50483-2).



### 6.2.3. Ostala ispitivanja

S obzirom na nepostojanje odgovarajućih normi za kabele za SN nadzemne mreže, proizvođač univerzalnih kabela Ericsson je proveo razna dodatna ispitivanja na takvim kabelima. Tako su provedena i ova sljedeća dodatna ispitivanja:

- ispitivanja padom stabla na trasu s kabelom EXCEL 3x10/10 12 kV
- ispitivanja s dugotrajnim mehaničkim i termičkim preopterećenjem kabela AXCES 3x95/25 mm<sup>2</sup> 24 kV
- mehanička mjerenja na rasponima s ugrađenim kabelima EXCEL 3x10/10 12 kV i 24 kV pri različitim mehaničkim silama, temperaturama okoline, strujama kroz vodič i simuliranim opterećenjem - ledom
- ispitivanje kabela EXCEL 3x10/10 mm<sup>2</sup> 12 kV položenog u vodi u trajanju 4 godine, u 24 kV mreži (dvostruko više od nazivnog napona kabela)
- ispitivanja kabela 3x10/10 12 kV i AXCES 3x95/25 mm<sup>2</sup> sa strujama kratkog spoja

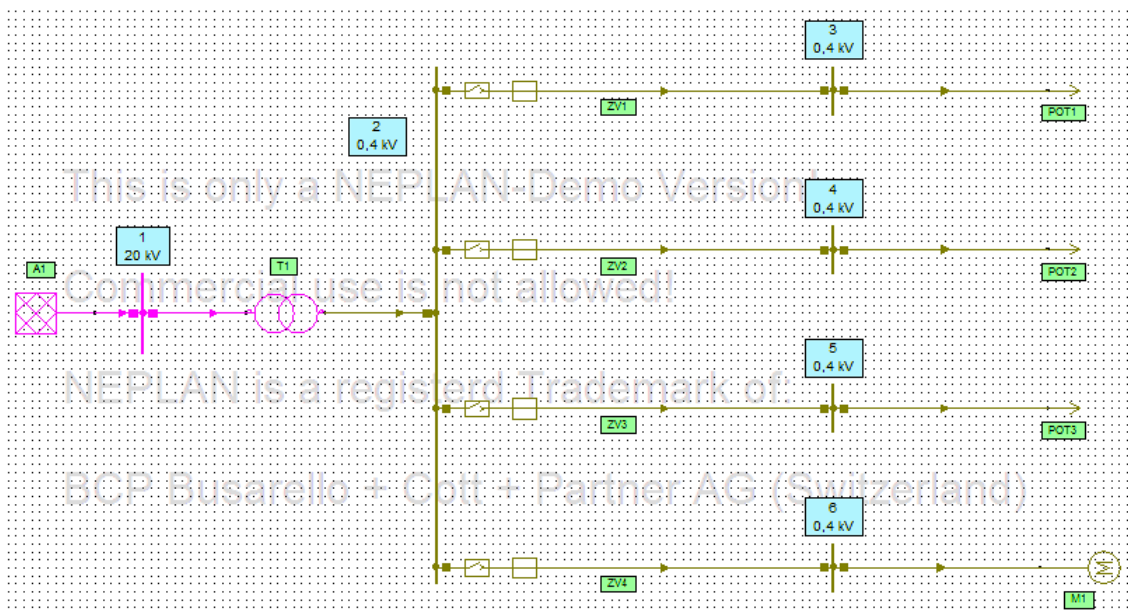
## 7. PROGRAMSKI PAKET NEPLAN

NEPLAN je softverski alat za analizu, planiranje, optimiziranje i simuliranje mreža. Razumljivo grafičko sučelje omogućuje korisniku da obavlja poslove vrlo učinkovito. Prilagodljiv softver ima modularni koncept i obuhvaća sve električne aspekte za prijenos, distribuciju i generaciju mreža. Najbolje odgovara za:

- Sustave s obnovljivim izvorima energije i
- Za primjenu u pametnim mrežama

Zato što su svi potrebni modeli i simulacijske metode integrirane s vrlo visokom točnošću i performansama. Osim stacionarnih izračuna, kvalitete električne energije i dizajniranje zaštite, NEPLAN omogućuje i modeliranje vjetroelektrana i solarnih elektrana sa svojim detaljnim upravljanjem za dinamičke simulacije (RMS/EMT), i također ima integrirane Matlab i Simulink modele.

U nastavku će biti prikazan i opisan dio niskonaponske mreže izrađene u NEPLAN-u (Slika 7.1), te prijenos i distribucija električne energije do potrošača.



Slika 7.1. Prikaz niskonaponske mreže izrađene u NEPLAN-u

Dakle, slika 7.1 prikazuje mrežu (A1) i sabirnicu (1) na visokonaponskoj strani transformatora (T1) nazivnog napona 20 kV. Transformator zatim transformira napon na sekundarnoj strani na 0,4 kV. Na sabirnicu (2) priključena su četiri izvoda koje štite prekidači i osigurači. Svaki od izvoda (ZV1, ZV2, ZV3, ZV4) ima svoju duljinu l. Na drugom kraju izvodi su priključeni na niskonaponske sabirnice 0,4 kV (3, 4, 5, 6). Nadalje, na krajevima prva tri izvoda prikazani su potrošači (POT1, POT2, POT3), što može biti obično kućanstvo

ili više njih. Na kraju četvrtog izvoda prikazan je jedan specifičan primjer potrošača, a to je asinkroni motor (M1).

Nakon ovako spojene mreže, kako i prikazuje slika 7.1, podešavaju se željeni parametri i mreža se provjerava da nema grešaka. Ako je sve dobro i uredno spojeno, program ima mogućnost sam izračunati sve potrebne parametre i stanja u mreži. Na tablici 7.1 možemo vidjeti radne i jalove snage na svim elementima u mreži.

*Tablica 7.1. Radne i jalove snage na elementima*

	P [kW]	Q [kVAr]
Mreža	154	94
Primar transformatora (T1)	154	94
Sekundar transformatora (T2)	154	82
Vod (ZV1)	89	42
Vod (ZV2)	10	5
Vod (ZV3)	7	5
Vod (ZV4)	48	30
Potrošač (POT1)	87	42
Potrošač (POT2)	9	5
Potrošač (POT3)	7	5
Potrošač (M1)	48	30

Sljedeća tablica prikazuje struje i gubitke u mreži.

*Tablica 7.2. Rezultati svih parametara*

Naziv čvora	Naziv elementa	Tip	I [A]	Kut [°]	P gubici [kW]	Q gubici [kW]
1	A1	mreža	5	148,7		
1	T1	2-namotni transformator	5	-31,3	0,6	12,2
2	T1	2-namotni transformator	246	151,5	0,6	12,2
2	ZV1	vod	140	-25,9	2,3	0,5
2	ZV2	vod	15	-25,8	0,2	0
2	ZV3	vod	12	-36,7	0,2	0
2	ZV4	vod	80	-32,2	0,4	0,1

3	POT1	opterećenje	140	-25,9		
3	ZV1	vod	140	154,1	2,3	0,5
4	POT2	opterećenje	15	-25,8		
4	ZV2	vod	15	154,2	0,2	0
5	POT3	opterećenje	12	-36,7		
5	ZV3	vod	12	143,3	0,2	0
6	M1	asinkroni motor	80	-32,2		
6	ZV4	vod	80	147,8	0,4	0,1

Također, iz programa još možemo izračunati i padove napona na čvorovima, odnosno sabirnicama, kako prikazuje tablica 7.3.

*Tablica 7.3. Padovi napona na čvorovima*

Naziv čvora	U [kV]	u [%]
1	19,6	98
2	0,408	102,04
3	0,399	99,7
4	0,4	99,89
5	0,402	100,51
6	0,405	101,32

## 8. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisani su nadzemni vodovi, podzemni vodovi, njihova kombinacija i zaštite u elektroenergetskom sustavu s posebnim osvrtom na grmljavinsku zaštitu, te razna ispitivanja vodova i kabela.

Također, opisani su i tzv. „univerzalni kabeli“ koji se mogu ugrađivati nadzemno i podzemno. Takvi kabeli su mehanički čvršći od običnih srednjenaponskih vodova i konstrukcija im je takva da ne dolazi do proklizavanja pojedinih slojeva unutar kabela, te žice ekrana ne oštećuju poluvodljivi sloj preko izolacije. U budućnosti će možda univerzalni kabeli u potpunosti zamijeniti obične srednjenaponske vodove.

Kvarovi u elektroenergetskom sustavu su realnost i potrebno je vrlo brzo djelovati u cilju očuvanja stabilnosti sustava. Također mora postojati koordinacija svih zaštita u elektroenergetskom sustavu kako bi se zadržala maksimalna raspoloživost sustava nakon otklanjanja kvara i stabilnost samog sustava.

Posebnu pažnju treba posvetiti proračunima u programskom paketu NEPLAN, na osnovu čega bi se mogli vrlo kvalitetno definirati parametri za udešenje zaštite i prijenosa električne energije vodovima i kabelima.

## 9. LITERATURA

- [1] Institut za elektroprivredu i energetiku d.d.; Usporedba tehnologija gradnje SN nadzemnih vodova s izoliranim vodičima i s univerzalnim kabelom uz posebni osvrt na grmljavinsku zaštitu, Zagreb, prosinac 2008.
- [2] Ernst Mihalek; Niskonaponske distribucijske mreže, Uvod u planiranje i zaštitu, Zagreb, 2014.
- [3] Goran Anderson; Modelling and Analysis of Electric Power Systems, Zurich, 2008.
- [4] Metal Product d.o.o.; Kabelski pribor za energetske mreže do napona 1 kV, Zagreb, 2010.
- [5] S. Mangione; Compact Model of a Combined Overhead-Cable Line for Ground Fault Application Transfer Analysis, Palermo, 2005.
- [6] Srđan Skok, Ivica Pavić, Ante Marušić, Atila Barta; Hibridni model proračuna estimacije stanja EES-a na temelju sinkroniziranih mjerenja fazora i scada mjerenja, Cavtat, 2008.
- [7] Metal Product d.o.o.; Spojna ovjesna oprema za NN nadzemne mreže s izoliranim vodičima u snopu, Zagreb, 2010.

## DODATAK A

### Popis slika

Slika 2.1 Nadzemni vodovi .....	2
Slika 2.2 Nadomjesna $\pi$ shema voda.....	5
Slika 2.3 Nadomjesna T shema voda .....	6
Slika 3.1 Polaganje kabela u zemlju.....	7
Slika 3.2 Konstrukcija kabela.....	8
Slika 3.3 Podmorski kabel i priobalna zaštita .....	9
Slika 4.1 Konstrukcija Ericssonovih univerzalnih kabela (EXCEL, FXCEL, AXCES) .....	11
Slika 4.2 Nosive stezaljke za 20 kV-tne kabele tipa EXCEL, FXCEL i AXCES.....	12
Slika 4.3 Spojnica na stupu .....	13
Slika 4.4 Spojnica u rasponu s mehaničkim rasterećenjem.....	13
Slika 4.5 Izvedba otcjepa na izolatorima ili odvodnicima prenapona.....	14
Slika 4.6 Konstrukcija srednjenaponskog kabelskog snopa proizvođača ELKA .....	17
Slika 5.1 Različite zone zaštita u elektroenergetskom sustavu .....	20
Slika 5.2 Načela strujne diferencijalne zaštite.....	21
Slika 5.3 Princip rada distantne zaštite.....	21
Slika 5.4 Različite zone u distantnoj zaštiti.....	22
Slika 5.5 Faktori zakrivljenosti distribucijskog voda prosječne visine 10m s nizom objekata različitih visina i udaljenosti od voda.....	27
Slika 5.6 Prva izvedba APD-a.....	30
Slika 5.7 Ugradnja APD-a.....	31
Slika 5.8 Princip djelovanja APD-a .....	31
Slika 5.9 Ugradnja PAD-a na potporni i zatezni izolator.....	32
Slika 5.10 Zaštitno iskrište s odvodnikom prenapona.....	33
Slika 5.11 Zaštitni vodiči položeni iznad kabela.....	37
Slika 7.1. Prikaz niskonaponske mreže izrađene u NEPLAN-u .....	43

## **DODATAK B**

### **Popis tablica**

Tablica 4.1. Rasponi koji se ostvaruju s univerzalnim kabelom .....	12
Tablica 4.2. Univerzalni kabeli proizvođača Ericsson i ELKA, 20 kV .....	16
Tablica 5.1. Određivanje koeficijenta utjecaja okoline $C_d$ .....	26
Tablica 6.1. Program ispitivanja izoliranih vodiča prema EN 50397-1/2006.....	38
Tablica 7.1. Radne i jalove snage na elementima .....	44
Tablica 7.2. Rezultati svih parametara .....	44
Tablica 7.3. Padovi napona na čvorovima .....	45