

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE
Specijalistički diplomski stručni studij Elektrotehnika

ELEKTROENERGETSKI KABELI
-PREDAVANJA-



Split, listopad 2023.

SADRŽAJ

1. Uvod.....	5
1.1. Povijesni razvoj kabela.....	5-6
1.2. Definicije pojmova.....	7
1.3. Označavanje kabela.....	8-10
1.3.1. Primjeri označavanja kabela.....	11-12
1.3.2. Izbor tipskih kabela.....	13
1.4. Električni parametri kabela.....	14-15
1.5. Naprezanja kabela.....	16
1.6. Primjena kabela.....	16
2. Sastavni dijelovi kabela.....	17
2.1. Fazni vodič.....	18-19
2.2. Poluvodljivi zaslovi vodiča i izolacije.....	20
2.3. Izolacija.....	21-23
2.4. Plašt i električna zaštita.....	24-26
2.5. Armatura.....	26
2.6. Vanjski omotač.....	26
2.7. Izvedba kabela.....	27-28
3. Vrste kabela.....	29
3.1. Niskonaponski kabele.....	29
3.2. Srednjenaponski kabele.....	30-31
3.3. Visokonaponski kabele.....	32-34
4. Kriteriji za izbor kabela.....	35
4.1. Gubici kablenskog prijenosa.....	36
4.1.1. Gubici u izolaciji.....	36-39
4.1.2. Jouleovi gubici.....	39
4.1.2.1. Gubici u faznom vodiču.....	39-44
4.1.2.2. Gubici u metalnom plaštu ili metalnom ekranu.....	45-46
4.1.2.3. Uzemljenje metalnih plašteva elektroenergetskih kabela.....	47-51
4.1.2.4. Gubici u armaturi.....	52
5. Prijenos topline kondukcijom.....	53
6. Toplinski otpori i kapaciteti.....	54
6.1. Unutrašnji toplinski otpor.....	54
6.1.1. Jednožilni kabele s okruglim vodičima.....	54-57
6.1.2. Trožilni kabele s okruglim vodičima.....	58-60
6.2. Vanjski toplinski otpori.....	61
6.2.1. Vanjski toplinski otpor jednog samog kabela položenog u zemlju.....	61-62
6.2.2. Vanjski toplinski otpor grupe razmaknutih kabela položenih u zemlju.....	63-64
6.2.3. Vanjski toplinski otpor voda položenog u zemlju u dodirnom rasporedu.....	64-65
6.2.4. Vanjski toplinski otpor grupe kabela u cijevima položenim u zemlju.....	66
6.3. Toplinski kapaciteti.....	67

7. Strujna opteretivost energetskih kabela.....	68
7.1 Dozvoljena strujna opteretivost i zagrijavanje kabela pri stacionarnim uvjetima.....	68-69
7.2. Strujna opteretivost energetskih kabela u normalnom pogonu.....	70-71
7.3. Korekcionni faktor.....	72-74
7.4. Strujna opteretivost kabela u kratkom spoju.....	75-76
7.5. Proračun strujnog opterećenja i odabir presjeka elektroenergetskog kabela.....	77-89
7.6. Sustav uzemljenja TS 110/20(10) kV.....	90-92
7.6.3. Reducirane struje narinute na sustav uzemljenja.....	93-95
8. Nove tehnologije u izradi kabela.....	96
8.1. Supravodiči i supravodljivost.....	96-97
8.2. Primjena supervodiča u elektroenergetskim postrojenjima.....	98
8.2.1. Energetski kabeili sa HTS supervodičima.....	98
8.2.2. Magnetsko spremište energije na osnovi supervodiča.....	99
8.3. Prvi visokonaponski supravodič u pogonu.....	99-100
9. Polaganje kabela.....	101
9.1. Transport kabela.....	101
9.2. Zemljani radovi.....	102
9.3. Odmatanje i polaganje kabela.....	103-108
9.4. Polaganje kabela na slobodnim površinama.....	108-111
9.5. Međusobni utjecaj elektroenergetskog sustava i drugih podzemnih instalacija.....	112-114
9.5.1. Križanje s prometnim putevima.....	114-116
9.5.2. Križanje s vodovodom i kanalizacijom.....	117-118
9.5.3. Paralelno vođenje i križanje energetskih kabela s telefonskim instalacijama.....	119
9.5.4. Polaganje kabela u odnosu na druge objekte.....	120
9.5.5. Prijelaz kablenskog voda u nadzemni.....	120
9.6. Polaganje podmorskih elektroenergetskih kabela.....	121
9.6.1. Polaganje, popravak i vađenje podmorskih kabela.....	122-126
9.6.2. Priobalna zaštita podmorskih energetskih kabela.....	126-128
10. Kabelski pribor za spajanje i završavanje energetskih mreža.....	129
10.1. Spajanje i završavanje kabela.....	130-131
10.2. Sustav kablenskog pribora „Raychem“.....	132
10.2.1. Raychem niskonaponski sustav spajanja.....	132-134
10.2.2. Srednjenaponske kablenske spojnice do 42 kV.....	135-136
10.2.3. VN kablenske spojnice EHVS od 123 do 170 kV.....	137
10.3. Kabelski završeci.....	138
10.3.1. Niskonaponski i srednjenaponski kabelski završeci.....	138-140
10.3.2. Visokonaponski kabelski završeci.....	141
10.4. Utični priključci.....	142
10.4.1. Sustav priključivanja na metalom oklopljena i plinom izolirana postrojenja ili transformatore 10, 20, 35 kV.....	142
10.4.2. Utičnički priključci, punjeni uljem, za postrojenja SHVT od 72 do 170 kV.....	143
10.5. Kontrola električnog naprežanja u kablskom priboru.....	144-145
10.6. Otpornost na atmosferilije i starenje.....	146-147
10.7. Tehnologija toplioskupljajućih materijala.....	148

11. Eksploatacija i ispitivanje elektroenergetskih kabela.....	149-151
11.1. Uzroci kvarova.....	151
11.1.1. Pogonska naprezanja elektroenergetskih kabela.....	152
11.1.2. Vanjska naprezanja elektroenergetskih kabela.....	153
11.1.3. Ljudski faktor.....	154
11.2. Tipični kvarovi na izolaciji.....	155
11.2.1. Smanjena razina izolacijskog ulja.....	155
11.2.2. Izbočine na spojevima vodiča.....	156
11.2.3. Prodiranje vlage.....	156-157
11.2.4. Šupljine.....	158
11.2.5. Onečišćenja.....	158
11.2.6. Loše stvrdnuta smola.....	158
11.2.7. Nesimetrično raspoređeni vodiči.....	159
11.2.8. Sušenje impregniranog papira.....	159
11.2.9. Problemi sa spajanjem vodiča.....	160
11.2.10. Ostaci poluvodljivog sloja.....	160
11.2.11. Nejednolika raspodjela električnog polja.....	161
11.2.12. Vodena stabla.....	162
11.3. Mehanizmi propadanja izolacije.....	163
11.3.1. Unutarnja izbijanja.....	163
11.3.2. Površinska izbijanja.....	164
11.3.3. Električno grananje.....	165-166
11.4. Pokazatelji propadanja izolacije.....	167
11.5. Dijagnostika izolacije kabelskih sustava.....	168
11.5.1. Dijagnostika na terenu.....	169-170
11.5.2. Svojstva parcijalnih izbijanja.....	170-172
11.6. Ispitivanje stanja 10 kV kabela u TS 35/10 kV Gripe.....	172-174
11.7. Zaključno o parcijalnim izbijanjima.....	175-176
12. Ispitivanje elektroenergetskih kabela.....	177
12.1. Greške na kabelima.....	177
12.2. Osnovni mjerni uređaji.....	178
12.3. Reflektometri.....	179
12.3.1. Impulsna reflektometrija.....	179-180
12.3.2. Prigušenje vodova.....	181
12.3.3. Princip mjerenja i dijelovi impulsnog reflektometra.....	181-184
12.3.4. Pogreške reflektometra.....	185
12.4. Mjerni postupci.....	186
12.4.1. Predlokacija.....	186-187
12.4.2. Mikrolokacija.....	188-191
12.4.2.1. Postupak distance.....	192
12.4.2.2. Postupak napona koraka.....	193
12.4.2.3. Tonfrekventna metoda preplitanja.....	194
12.4.2.4. Postupak poremećaja minimuma.....	195
12.5. Kabelska mjerna kola.....	196-197
12.6. Zaključno o ispitivanju energetskih kabela.....	197
Literatura.....	198
Popis slika.....	199-203
Popis tablica.....	204-205

1. UVOD

1.1. Povijest i tehnološki razvoj (ELKA)

1927. Osnovana je Elka – društvo za elektrotehniku i tvornica kabela d.d. Zagreb.

1940. Uvođenje aluminija za vodiče energetskih kabela.

1947. Proizvodni asortiman proširuje se na lakiranu i dinamo žicu, te brodske kabele s gumenom izolacijom i olovnim plaštem.

1951. Razvijena je proizvodnja niskonaponskih vodova i kabela izoliranih termoplastičnim materijalima.

1966. U Elki je proizveden prvi 10 kV energetski kabel s aluminijskim vodičem i PVC izolacijom.

1970. Usvojena je proizvodnja telekomunikacijskih kabela izoliranih termoplastikom za centrale i mjesne mreže, te su puštena u rad nova mikserverska postrojenja za izradu gume.

1972. Pušten je u rad pogon za proizvodnju mikrokabela i specijalnih kabela u Tugonici, općina Zlatar Bistrica.

1977. Puštanje u rad novih linija za kontinuiranu vulkanizaciju i početak proizvodnje niskonaponskih (do 1 kV) i srednjenaponskih (do 35 kV) kabela izoliranih umreženim polietilenom.

1979. Elka je u suradnji s talijanskim industrijskim divom Pirellijem proizvela i položila podmorski kabel naponskog nivoa 20 i 35 kV u dužini 120 kilometara žila kabela za energetske povezivanje otoka sjevernog i srednjeg Jadrana.

Povećava se proizvodnja čelične, aluminijske i aluminijsko-čelične užadi novim kapacitetima pogona Metalne užarije u Zadru.

1985. Proizvodnja vlastitog umreživog polietilena prema licenci američke tvrtke General Electric Co.

1988. Elka je počela proizvodnju svjetlovodnih (optičkih) kabela i setova za magistralne, mjesne i interne mreže, a u Zagrebu je instalirana prva telekomunikacijska veza svjetlovodnim kabelom u Hrvatskoj. Tvrtka je i na tržištima Slovenije i Bosne i Hercegovine bila prvi proizvođač svjetlovodnih kabela.

1996. Počela proizvodnja brodskih bezhalogenih teško gorivih i vatrootpornih kabela.

1997. Certificiran je Sustav upravljanja kvalitetom prema normi ISO 9001.
Umreženje izolacije SN kabela suhim postupkom (u dušiku).

2002. Certificiran je Sustav upravljanja okolišem prema normi ISO 14001.

2003. Odlukom Nadzornog odbora Elke d.d. osnovano je društvo Elka kabeli d.o.o. kao tvrtka kćer u 100-postotnom vlasništvu Elke d.d. U novoosnovanu tvrtku preneseno je cjelokupno kabelsko poslovanje Elke d.d., te imovina vezana uz proizvodnju kabela.
Elka d.d. i Končar distributivni i specijalni transformatori (Končar D&ST) osnovali su Elkakon, tvrtku za proizvodnju okruglih i profilnih industrijskih vodiča.

2004. Razvijena i testirana nova generacija xDSL paričnih telekomunikacijskih kabela s poboljšanim prijenosnim karakteristikama. Kabeli omogućavaju mnogo veću brzinu prijenosa podataka pomoću ADSL i VDSL tehnologije.
Testirani i isporučeni specijalni bezhalogeni, teškogorivi i vatrootporni 1 kV BXO kabeli za tunele. Počela proizvodnja xDSL kabela
Elka kabeli su projektirali, testirali i proizveli najnoviju generaciju kabela koja može zadovoljiti današnje potrebe ADSL tehnologija.

2005. Proizveden srednjenaponski 20 kV kabel s mogućnošću optimizacija prijenosne snage kabela mjerenjem temperature kabela.
Uspješno završeno testiranje, proizvodnja i isporuka svjetlovodnog nemetalnog samonosivog ADSS antibalističkog kabela.

2006. Proizveden višenamjenski srednjenaponski energetska kabel pogodan za polaganje u zemlju, nad zemljom i pod vodom.
Započela proizvodnja nove generacije teškogorivih i vatrootpornih brodskih kabela.

2007. Krajem listopada obilježena 80-ta godina uspješnog poslovanja Elka kabela.

Konstruiran specijalni srednjenaponski energetska kabel prema standardu Britanskih željeznica.

Uspješno razvijen i testiran Elkallex sa komunikacijskom paricom koji omogućuje daljinsku komunikaciju s električnim brojilima

Elka konstruirala kabel za Končarev vjetroagregat KO-VA 57/1 snage 1000 kVA.

2009. Proizvedene i certificirane nove konstrukcije kabela za graditeljstvo

2010. Započela proizvodnja visokonaponskih 110 kV energetskih kabela.
Proizvedeni novi kabeli za solarne panele. [1]

1.2. Definicije pojmova

- **Kabelski vod** ili kraće „kabel“ je vrsta voda s jednim ili više vodiča. Svaki od vodiča je po cijeloj svojoj duljini prekriven slojem izolacijskog materijala, a potom svi zajedno su obuhvaćeni s jednim ili više zaštitnih slojeva.
- **Jednožilni kabel** sastoji se od jedne žile i odgovarajućih zaštitnih slojeva.
- **Višežilni kabel** sastoji se od dvije do pet žila uključujući i žile upotrebljene kao neutralni ili zaštitni vodič s odgovarajućim zaštitnim slojevima.
Mnogožilni kabel ima najmanje šest žila jednakog presjeka.
- **Žila** je osnovni sastavni element kabela, koji se sastoji od vodiča, izolacije te poluvodljivog sloja.
- **Vodič** je vodljivi dio žile izveden od jedne ili više žica, čija je funkcija da provodi električnu struju.
- **Nazivni presjek vodiča** kabela je vrijednost izražena u mm².
- **Izolacija** postavljena na vodič ili poluvodljivi sloj oko vodiča može biti:
 - ekstrudirana izolacija (izolacija od umjetnih masa npr. polivinil klorid, termostabilni umreženi polietilen i slično)
 - vulkanizirana izolacija na temelju gume ili toploskupljajućih materijala
- **Poluvodljivi sloj** (zaslon) čini sloj od poluvodljivog materijala, a služi za kontrolu električnog polja u izolaciji i za uklanjanje neravnina na vanjskim površinama izolacije.
- **Zaštitni slojevi kabela** sastoje se od:
 - električne zaštite – ekrana (metalni sloj iz bakrenih žica ili bakrenih traka),
 - armature od metalne košuljice (okruglih žica ili čelične trake, a služi kao mehanička zaštita od vanjskog djelovanja)
 - vanjskog plašta, izrađenog od ekstrudirane termoplastične mase i postavljenog preko električne zaštite ili armature kabela
 - ispune, koja služi za oblikovanje kabela i uklanjanje međusobno štetnih utjecaja između različitih sastavnih elemenata kabela (npr. između izolacije i plašta)
- **Dopušteno strujno opterećenje kabela** je struja, koja može trajno proticati vodičem kabela, određenog tipa u normalnim uvjetima bez opasnosti da će se kabel prekomjerno ugrijati.
- **Lutajuća struja** je struja, koja izlazi iz vodiča u okolni prostor. Može teći vodljivim (metalnim) predmetima, koji su u okolnom prostoru postavljeni u druge svrhe (metalne cijevi, armature kabela i drugo). Svojim protjecanjem lutajuća struja može prouzročiti korozijska oštećenja. [2]

1.3. Označavanje kabela

Kabeli se prema granskim normama označavaju grupom simbola (slovni i brojčani) slijedećim redom:

- slovni simboli za vrstu izolacije i plašt,
- brojčani simbol za konstrukciju kabela,
- slovni simbol za materijal i oblik vodiča,
- slovni simbol za označavanje prisustva zaštitnog vodiča (zeleno/žuta žila - ako postoji),
- broj žila i nazivni presjek vodiča i
- brojčani simbol za nazivni napon.

Slovni simboli za vrstu izolacije, plašta kabela i poluvodljive slojeve su:

P - polivinilklorid (PVC)

X - umreženi polietilen (XLPE)

H - zaslon vodiča i zaslon izolacije (poluvodljivi XLPE) za ograničenje električnog polja u izolaciji

E - termoplastični polietilen (PE)

h - poluvodljivi plašt.

Označavanje **zaštitnih obilježja konstrukcije kabela** brojčanim simbolima:

00 - konstrukcija bez posebne mehaničke zaštite,

44 - armatura od pocinčane okrugle čelične žice, obavijena u suprotnom smjeru pocinčanom čeličnom trakom, nalazi se ispod vanjskog plašta od termoplastične mase,

49 - električna zaštita u obliku omota ili opleta od bakrenih žica ili traka, postavljenih oko svake žile posebno i izvedbom uzdužne vodonepropusne zaštite ispod vanjskog plašta od termoplastične mase,

91 - elementi konstrukcije kabela jednaki su kao i kod brojčanog simbola 49, s tim da se na vanjskom (poluvodljivom) plaštu koncentrično nalazi dodatna električna zaštita.

Oznaka za **vrstu materijala vodiča**, njegova oblika i prisustvo zaštitnog vodiča označava se tako da se prvo označi materijal, a potom oblik vodiča:

- za vodiče iz bakra oznaka se izostavlja,
- za vodiče iz aluminija stavlja se simbol »A«,
- za višežične vodiče okruglog presjeka simbol je »OV«,
- za višežične vodiče sektorskog presjeka stavlja se simbol »SV«,
- za jednožične vodiče sektorskog presjeka stavlja se simbol »SJ«,
- za jednožične okrugle vodiče simbol je »OJ«.

Izolirani vodovi i kabeili, koji sadrže **zaštitni vodič** obilježen zeleno/žutom bojom, označavaju se slovnim simbolom »Y«.

Broj žila i nazivni presjek vodiča označavaju se brojem žila puta nazivni presjek vodiča u mm^2 kako slijedi:

- oznaka presjeka (u mm^2) stavlja se poslije oznake tipa vodiča,
- presjek koncentričnog vodiča ili električne zaštite izražava se u mm^2 , a razdvaja se kosom crtom od oznake presjeka faznih vodiča,
- četverožilni kabeili, kod kojih jedna žila ima smanjeni presjek vodiča (neutralni ili zaštitni vodič), označavaju se tako da se iza presjeka faznih vodiča stavlja znak plus (+), a potom presjek neutralnog ili zaštitnog vodiča.

Nazivni napon energetskog kabela označava se brojem i izražava se u kV.

Nazivni napon kabela se označava naponom između vodiča i zemlje (U_0 -fazni napon) naponom između dva vodiča (U - linijski napon), koji se razdvajaju kosom crtom U_0 / U najvišim naponom (U_m), a izražavaju se u kV.

Najviši napon kabela je za 20 % viši od linijskog napona i označava se oznakom U_m .

Tablica 1.1. Vrijednosti nazivnih napona kabela

Nazivni napon mreže U_n (kV)	Nazivni napon kabela $U_0/U(U_m)$ (kV)	Najviši napon kabela U_m (kV)
1	0,6/1 (1,2)	1,2
10	12/20 (24)	24
20	12/20 (24)	24
30	20,8/36 (42)	42
35	20,8/36 (42)	42

Obilježavanje žila bojama izvodi se na kabelima nazivnog napona 0,6/1 kV radi međusobnog raspoznavanja žila. Boje izolacije moraju biti postojane, odnosno ne smiju se lako brisati i moraju se uočavati. Žile višežilnih kabela nazivnog napona $U_0 / U = 0,6/1$ kV obilježavaju se bojama, koje su sastavni dio izolacijskog materijala, prema *Tablici 1.2.*

Tablica 1.2. Označavanje žila višežilnih kabela $U_0 / U (U_m) = 0,6/1 (1,2)$ kV

Broj žila	Kabeli sa zaštitnom žilom	Kabeli bez zaštitne žile
2	zeleno-žuta; crna	crna; plava
3	zeleno-žuta; crna; plava	crna; plava; smeđa
4	zeleno-žuta; crna; plava; smeđa	crna; plava; smeđa; crna
5	zeleno-žuta; crna; plava; smeđa; crna	crna; plava; smeđa; crna; crna

Žile kabela nazivnog napona jednakog ili većeg od 6/10(12) kV izrađuju se u izolaciji prirodne boje i nije potrebno njihovo dodatno tvorničko obilježavanje.

Standardna boja vanjskog plašta od PVC je crna, za sve kabele nazivnog napona $U_0 / U = 0,6/1(1,2)$ kV.

Standardna boja vanjskog plašta od PE je crna za sve kabele nazivnih napona $U_0 / U (U_m)$ od 0,6/1(1,2) kV do 20,8 /36 (42) kV.

Na **vanjskom plaštu kabela** je obilježje:

- naziv proizvođača kabela ili njegov zaštitni znak,
- godina proizvodnje,
- konstrukcijska oznaka kabela prema važećem standardu,
- broj žila, nazivni presjek vodiča i električne zaštite,
- nazivni napon kabela U_0 / U za 0,6/1 kV kabele i $U_0 / U (U_m)$ za kabele višeg nazivnog napona, u kV. Oznake se moraju ponavljati najmanje svakih 50 cm.

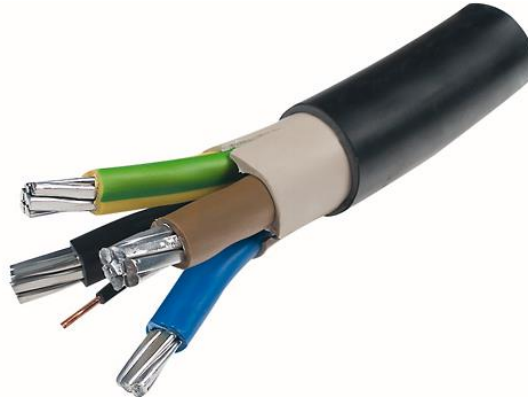
Kabeli vanjskog promjera većeg od 10 mm sadrže, uz spomenute oznake, i oznaku duljine u metrima. Označavanje se izvodi u razmaku po 1 m slijedom rasta prirodnih brojeva.

Boja plašta i oznake na plaštu moraju biti postojane, odnosno nesmiju se lako brisati i moraju se uočavati. [2]

1.3.1. Primjeri označavanja kabela:

a) Četverožilni kabel s izolacijom i plaštom od polivinilklorida, konstrukcije bez posebne mehaničke zaštite; aluminijskim faznim vodičima presjeka 50 mm^2 klase 2, sektorskog oblika i neutralnim vodičem jednakog presjeka, za nazivni napon 0,6/1 kV označava se:

PP00-A, 4 x 50/SV mm^2 0,6/1 kV.



Alternativno označavanje prema HRN HD 603 S1, Poglavlje 3G-2....**NAYY- 4x50 SM mm^2 0,6/1 kV.**

Primjenjuje se u distribucijskim trofaznim mrežama za polaganje u zemlju, u kabelaške kanale, u zraku na policama i drugim nosivim konstrukcijama, u suhim i vlažnim prostorijama i slično.

b) Četverožilni kabel s izolacijom od umreženog polietilena i plaštom od polivinilklorida, konstrukcije bez posebne mehaničke zaštite, aluminijskim faznim vodičima sektorskog presjeka 150 mm^2 i neutralnim vodičem jednakog presjeka, za nazivni napon 0,6/1 kV, označava se:

XP 00-A, 4 x 150/SV mm^2 0,6/1 kV

Alternativno označavanje prema HRN HD 603 S1, Poglavlje 5G-2...**NA2XY- 4x150 mm^2 SM 0,6/1 kV.**

Primjenjuje se u distribucijskim trofaznim mrežama za polaganje u zemlju, u kabelaške kanale, u zraku na policama i drugim nosivim konstrukcijama, u suhim i vlažnim prostorijama i slično, kod većih strujnih opterećenosti kabelaškog voda.

c) Četverožilni kabel s izolacijom i vanjskim plaštom od polivinilklorida, mehaničkom zaštitom od okruglih pocinčanih čeličnih žica, obavijenih u suprotnom smjeru pocinčanom čeličnom trakom, aluminijskim faznim vodičima sektorskog presjeka 185 mm^2 i neutralnim vodičem jednakog presjeka, za nazivni napon 0,6/1 kV, označava se:

PP 44 - A, 4 x 185/ SV mm^2 0,6/1 kV

Primjenjuje se za polaganje u zemlju, kabelaške kanale, vodu i slično. To je mehanički zaštićeni kabel. Posebno je pogodan za kosa i okomita polaganja, kao i kod terena koji poniru ili klize.

d) Kabel s izolacijom od umreženog polietilena (XLPE) i vanjskim plaštom od polivinilklorida (PVC), mehaničkom zaštitom od okruglih pocinčanih čeličnih žica, obavijenih u suprotnom smjeru pocinčanom čeličnom trakom, aluminijskim faznim vodičima sektorskog presjeka 185 mm^2 i izoliranim neutralnim vodičem jednakog presjeka, za nazivni napon 0,6/1 kV, označava se:



XP 44 - A, 4 x 185/ SV mm^2 0,6/1 kV.

Primjenjuje se na mjestima kao i kabel iz prethodne točke c.

e) Jednožilni kabel s izolacijom od umreženog polietilena, poluvodljivim slojem oko vodiča i oko izolacije, uzdužno vodonepropusnom električnom zaštitom u obliku omota od bakrenih žica presjeka 25 mm^2 , plaštom od polietilena, aluminijskim okruglim vodičem presjeka 150 mm^2 , za nazivni napon $U_0/U = 12/20 \text{ kV}$, označava se:

XHE 49-A, 1 x 150 OV/25 mm^2 12/20(24) kV.



Alternativno označavanje prema HRN HD 620 S1, Poglavlje 5C-1, **NA2XS(F)2Y 1x150/25 RM mm^2 12/20(24) kV**, odnosno za napon 20,8/36(42) kV - HRN HD 620 S1, Poglavlje 5B-1.

Primjenjuje se u distribucijskim trofaznim mrežama za polaganje u zemlju, u kabelaške kanale, u zraku na policama i drugim nosivim konstrukcijama i slično.

f) U posebnim slučajevima, kada se kabel polaže u iznimno grmljavinskim zonama ili području visokog izolacijskog otpora tla, preporuča se primjena kabela za nazivne napone 12/20(24) kV i 20,8/36(42) kV, oznake: XHEh 91-A, koji je jednake konstrukcije kao i XHE 49-A, s tim da ima vanjski plašt od poluvodljivog polietilena, a preko plašta dodatnu električnu zaštitu/uzemljivač od bakrenih žica.

Uporedba označavanja kabela prema HRN N.C0.006 i HRN HD 603 S1, odnosno HRN HD 620 S1 prikazana je u *Tablici br.1.3.* [2]

1.3.2. Izbor tipskih kabela

- Kabeli nazivnog napona U_0/U 0,6/1 kV upotrebljavaju se u mrežama izmjenične struje, u kojima najviši napon pod normalnim uvjetima rada (pogona) nije veći od nazivnog napona kabela povišen za 20 %, odnosno $U_m = 1,2 \times U$ (kV).
- U mrežama nazivnog napona $U_n = 10$ kV i $U_n = 20$ kV, upotrebljava se kabel nazivnog napona $U_0 / U (U_m)$ 12/20(24) kV, u mrežama nazivnog napona $U_n = 30$ kV i $U_n = 35$ kV koriste se kabeli nazivnog napona $U_0 / U (U_m) = 20,8/36(42)$ kV, prema *Tablici 1.1*.

Tablica 1.3. Način označavanja energetskih kabela [2]

Svojstvo konstrukcije	Oznaka prema HRN N.C0.006	Oznaka prema HD 603 S1	HRN HD 620 S1
Standardizirani tip	.....	N	N
Materijal vodiča aluminij	A	A	A
Jednožični okrugli vodič	OJ	RE	RE
Višežični okrugli vodič	OV	RM	RM
Jednožični sektorski vodič	SJ	SE	.....
Višežični sektorski vodič	SV	SM	.....
Izolacija ili plašt od PVC	P	Y	Y
Izolacija od XLPE	X	2X	2X
Zaštitni vodič zeleno/žute boje	Y	J	.....
Bez zaštitnog vodiča	.....	O	.....
Poluvodljivi slojevi oko izolacije	H	.....	.....
Plašt od termoplastičnog PE	E	2Y	2Y
Plašt od poluvodljivog PE	Eh	.....	.....
Bez mehaničke zaštite	00	.....	.....
Armirani Če okruglom žicom	44	.....	.....
Vodonepropusna električna zaštita	49	.....	S(F)
Vanjski zaštitni omotač	91	.....	.....

1.4. Električni parametri kabela

1.4.1. Električni otpor vodiča

Istosmjerni otpor vodiča na temperaturi θ različitoj od 20°C izračunava se prema izrazu:

$$R_{\theta} = R_{20} [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)] \quad (\Omega/\text{km})$$

gdje je:

R_{20} – vrijednost otpora vodiča iz *Tablice 1.4.*

α_{20} – temperaturni koeficijent otpora

- $\alpha_{20} = 3,93 \times 10^{-3}$ za bakar (Cu)
- $\alpha_{20} = 4,03 \times 10^{-3}$ za aluminij (Al)

Tablica 1.4. Električni otpor vodiča

Presjek vodiča / Conductor cross-section	mm ²		25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	400	500
Istosmjerni otpor na 20 °C / Direct resistance at 20 °C	Ohm/km	Cu	0,727	0,524	0,387	0,268	0,193	0,153	0,124	0,0991	0,0754	0,0601	0,0470	0,0366
		Al	1,20	0,868	0,641	0,443	0,320	0,253	0,206	0,164	0,125	0,100	0,0778	0,0605

1.4.2. Pogonski induktivitet

Podaci u *Tablici 1.5.* dani su za nearmirane kabele. Za armirane trožilne kabele 6/10 kV potrebno je vrijednosti iz stupca ☺ pomnožiti s faktorom 1,3.

Tablica 1.5. Pogonski induktivitet

Presjek vodiča / Conductor cross-section	Nazivni napon kabela U ₀ /U _i /, Nominal voltage of cables U ₀ /U _i									
	6/10 kV		12/20 kV		18/30 kV		20/35 kV			
	☺	☺☺☺	☺☺	☺☺☺	☺☺	☺☺☺	☺☺	☺☺☺	☺☺	☺☺☺
mm ²	Induktivitet (mH/km) / Inductance (mH/km)									
25	0,44	0,65	0,46	0,68	0,51	-	-	-	-	-
35	0,42	0,63	0,45	0,66	0,49	0,69	0,51	0,76	0,53	
50	0,40	0,61	0,43	0,64	0,46	0,66	0,49	0,73	0,50	
70	0,38	0,59	0,41	0,61	0,43	0,63	0,47	0,69	0,47	
95	0,37	0,57	0,39	0,59	0,41	0,61	0,44	0,67	0,45	
120	0,36	0,55	0,37	0,58	0,40	0,59	0,43	0,65	0,44	
150	0,35	0,54	0,36	0,56	0,39	0,57	0,42	0,63	0,43	
185	0,34	0,53	0,35	0,55	0,39	0,56	0,40	0,61	0,41	
240	0,33	0,52	0,34	0,53	0,36	0,54	0,38	0,59	0,39	
300	0,33	0,51	0,33	0,52	0,35	0,53	0,37	0,58	0,38	
400	0,32	0,49	0,31	0,50	0,34	0,51	0,36	0,55	0,37	
500	0,32	0,47	0,30	0,49	0,33	0,50	0,34	0,52	0,36	

1.4.3. Pogonski kapacitet

Radni kapacitet kabela ovisi o geometrijskim veličinama kabela i relativnoj konstanti izolacije

$$C = \frac{\varepsilon_r}{18 \ln \frac{D}{d}} \left[\frac{\mu F}{km} \right]$$

gdje je:

$\varepsilon_r = 2,5$ za XLPE

D - promjer preko izolacije (mm)

d – promjer preko vodiča uključivo poluvodljivi sloj (mm)

Tablica 1.6. Pogonski kapacitet

Presjek vodiča / Conductor cross-section mm ²	Nazivni napon kabela U ₀ /U / Nominal voltage of cables, U ₀ /U			
	6/10 kV	12/20 kV	18/30 kV	20/35 kV
	Kapacitet (μF/km) / Capacity (μF/km)			
25	0,208	0,149	-	-
35	0,236	0,161	0,126	0,118
50	0,246	0,175	0,137	0,127
70	0,284	0,202	0,156	0,144
95	0,365	0,215	0,166	0,153
120	0,342	0,233	0,178	0,164
150	0,371	0,251	0,190	0,175
185	0,401	0,272	0,205	0,188
240	0,450	0,302	0,226	0,207
300	0,492	0,327	0,243	0,223
400	0,551	0,376	0,277	0,253
500	0,629	0,413	0,303	0,276

1.4.4. Kapacitivna struja kabela

Određuje se prema izrazu:

$$I_C = \omega \cdot C \cdot U_0 \cdot 10^{-3} [A/km/ fazu]$$

U₀ – fazni napon (kV)

ω – kružna frekvencija

C – kapacitet kabela (μF/km) prema Tablici 1.6.

1.4.5. Impedancija kabela

Impedancija kabela je kompleksna veličina i ovisi o otporu vodiča, induktivnom i kapacitivnom otporu kabela. Općenito može se dati izrazom:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (\Omega/km)$$

R – otpor vodiča (Ω/km)

ω – kružna frekvencija

L – induktivitet kabela (mH/km) prema Tablici 1.5. [13]

1.5. Naprezanja kabela

Tablica 1.7. Naprezanja kabela (normalan rad/rad tijekom kvara) [10]

	Normalan rad		Rad tijekom kvara		
Uzročnik naprezanja	Struja	Napon	Kratki spoj	Zemljospoj	Tranzijentni valovi
Vrsta naprezanja	Termičko naprezanje	Električno naprezanje	Termičko naprezanje Mehaničko naprezanje	Termičko naprezanje	Električno naprezanje

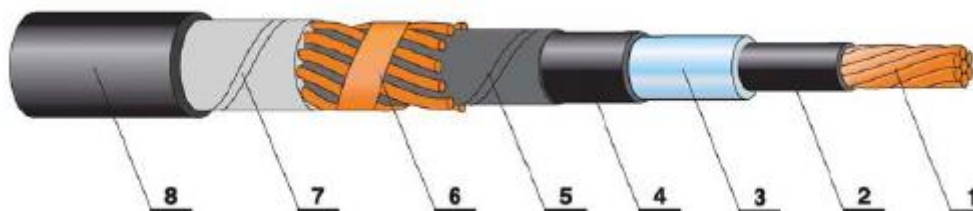
1.6. Primjena elektroenergetskih kabela

Prijenos električne energije elektroenergetskim kabelima prvenstveno se primjenjuje:

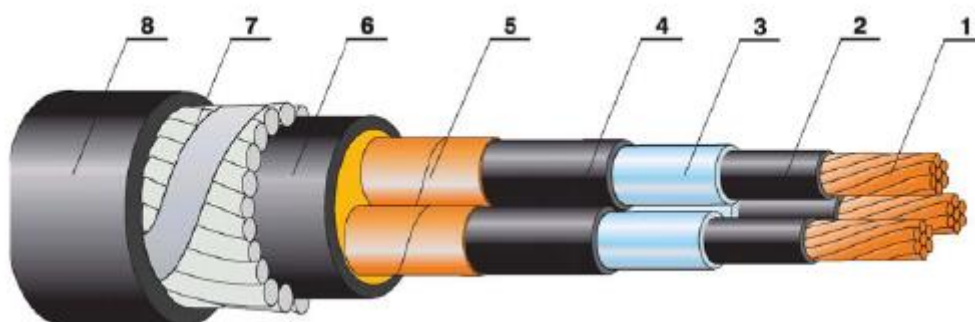
- u opskrbi velikih gradova električnom energijom, jer u njima nije moguće zamisliti zračne vodove visokog napona,
- kod prijelaza širokih rijeka i morskih kanala,
- u blizini zračnih luka,
- kod HE velikih snaga,
- u okolišu velikih transformatorskih stanica često neće biti dovoljno prostora za rasplet zračnih vodova koji zauzimaju široke pojaseve terena, pa se u trafostanicu ulazi kabelom (npr. TS 380/220/110 kV)
- kod važnih vojnih instalacija i baza.

2. SASTAVNI DIJELOVI KABELA

Osnovni sastavni dijelovi energetskih kabela, nabrojani od središta prema obodu kabela, su: fazni vodič, poluvodljivi zaslon vodiča, izolacija, poluvodljivi zaslon izolacije, električna zaštita ili plašt, armatura i vanjski omotač. Presjek jednog jednožilnog srednjenaponskog energetskog kabela vidljiv je na *slici 2.1*, ispod koje su označeni sastavni dijelovi kabela, dok je na *slici 2.2* prikazan trožilni armirani srednjenaponski kabel.



Slika 2.1: Sastavni dijelovi jednožilnog srednjenaponskog energetskog kabela:
1 - fazni vodič; 2 - poluvodljivi zaslon vodiča; 3 - izolacija od umreženog polietilena;
4 – poluvodljivi zaslon izolacije; 5 – poluvodljiva bubriva vrpca;
6 – električna zaštita (metalni ekran) od bakrenih žica i trake; 7 – bubriva vrpca;
8 – polietilenski vanjski omotač



Slika 2.2: Sastavni dijelovi trožilnog armiranog srednjenaponskog energetskog kabela:
1 - fazni vodič; 2 - poluvodljivi zaslon vodiča; 3 - izolacija od umreženog polietilena;
4 – poluvodljivi zaslon izolacije; 5 – električna zaštita (metalni ekran) od bakrene trake;
6 – unutrašnji omotač od PVC-a; 7 – armatura od čeličnih pocinčanih okruglih žica i pocinčane čelične trake; 8 – vanjski omotač od PVC-a

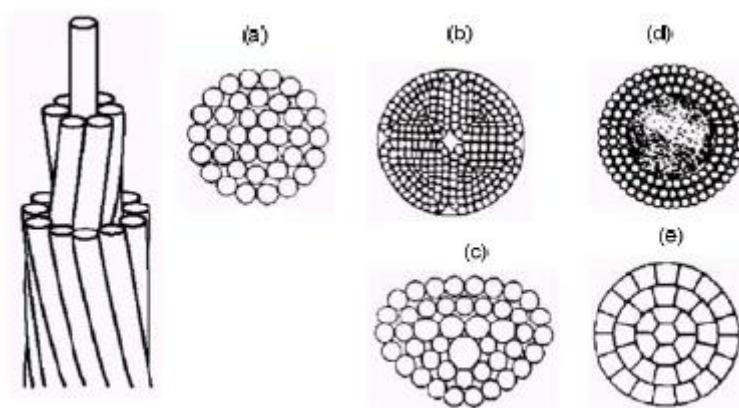
2.1 Fazni vodič

Fazni vodič neizbježan je dio svakog kabela, jer je namjenjen vođenju struje. Najčešće je izrađen od bakra ili aluminija, te je sastavljen od žica radi veće fleksibilnosti.

Može biti presvučen nekim metalom, npr. kositrom radi bolje otpornosti na koroziju. Ako se radi o manjem poprečnom presjeku, može se pronaći i jednožičani vodič. Odabir poprečnog presjeka faznog vodiča ovisi o očekivanim strujnim opteretivostima, te mogućnostima odvoda generirane topline s kabela u okolinu.

Kako je cijena aluminija osjetno manja od cijene bakra, korištenjem aluminija je moguće uštediti u početnoj cijeni kabelaške investicije. Ipak, uzimajući u obzir da je električna otpornost aluminija oko 64% veća od otpornosti bakra, znatno veći gubici aluminijskog vodiča u odnosu na bakreni vodič istog presjeka dovode do odabira većeg presjeka aluminijskog vodiča za istu strujnu opteretivost. Time se povećava volumen vodiča, a s njim i potrebni volumen izolacije. Veći potrebni volumeni vodiča i izolacije posljedično povećavaju i cijenu kabela te kabelaškog pribora. Tako se odabir poprečnog presjeka vodiča može izvršiti temeljem proračuna početne cijene instalacije i cijene gubitaka energije za vrijeme očekivane životne dobi kabela. Veći presjek povećava početnu cijenu instalacije, ali na drugoj strani dovodi do manjih iznosa gubitaka za vrijeme pogona.

Tipične konstrukcije faznih vodiča, prikazane na *slici 2.3*, su: **okrugli upredeni, segmentni, sektorski, prstenasti, kompaktni okrugli**.



Slika 2.3: Konstrukcije faznih vodiča: (a) okrugli upredeni, (b) segmentni, (c) sektorski, (d) prstenasti, (e) kompaktni okrugli

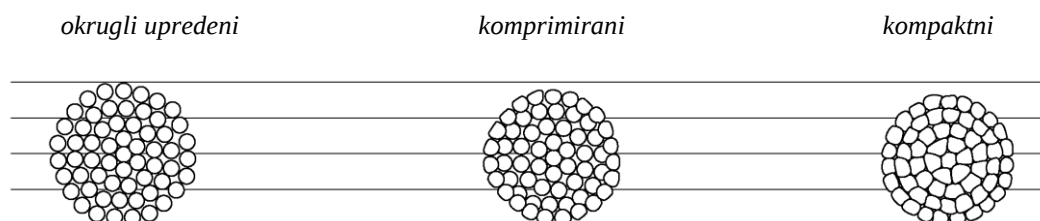
Okrugli upredeni vodič sastoji se od centralne žice okružene s jednim ili više slojeva helikoidalno namotanih žica. Svaki sloj, počevši od drugog, ima šest žica više od prethodnog.

Segmentni tip predstavlja okrugli, upredeni vodič sastavljen od tri ili četiri sektora slabo izolirana jedan od drugog. Ovakav vodič ima prednost nešto nižeg izmjeničnog otpora u odnosu na okrugli upredeni vodič istog presjeka, zbog manjeg skin efekta i efekta blizine. Savitljiviji je od okruglog upredenog vodiča istog presjeka te se koristi kod faznih vodiča velikih presjeka (uglavnom preko 1000 mm^2).

Sektorski vodič ima oblik blizak kružnom isječku, zbog čega trožilni kabeli sa sektorskim vodičima u pravilu imaju manji dijametar od onih s okruglim upredenim vodičima istog presjeka.

Za **prstenasti vodič** svojstveno je postojanje jezgre od električki nevodljivog materijala. U slučaju energetskih kabela najčešće se radi o uljnom kanalu kao jezgri. I ovaj tip vodiča ima smanjeni kvocijent izmjeničnog i istosmjernog otpora.

Kompaktni vodič dobija se krajnjom kompresijom okruglog upredenog ili sektorskog vodiča, što rezultira prilično glatkom vanjskom površinom bez zračnih međuprostora u unutrašnjosti. Prednost mu je odličan faktor ispune, koji se definira kvocijentom ukupne površine poprečnog presjeka svih žica od kojih je sastavljen fazni vodič i površine kruga koji obuhvaća vodič. Ukoliko se okrugli upredeni vodič ne zbije potpuno dobija se okrugli komprimirani vodič, kao prijelazni stupanj između okruglog upredenog i kompaktnog vodiča, *slika 2.4*. Faktor ispune kod okruglog upredenog vodiča je oko 76%, kod komprimiranog od 81% do 84%, a kompaktnog od 91% do 97%.



Slika 2.4: Usporedna veličina upredenog, komprimiranog i kompaktnog vodiča

Veći poprečni presjek faznog vodiča vodi ka većoj dozvoljenoj strujnoj opteretivosti (eng. ampacity). Može se aproksimativno ustvrditi da **povećanje dozvoljene opteretivosti za dva puta zahtijeva povećanje poprečnog presjeka za četiri puta.**

2.2. Poluvodljivi zaslon vodiča i izolacije

Poluvodljivi zaslon vodiča (*slika 2.1. - dio označen s 2*) sastavni je sloj srednjenaponskih i visokonaponskih energetskih kabela (većina standarda propisuje njegovo postojanje za kabele naponskih razina iznad 2 kV)

Treba napomenuti da poluvodljivi zaslon znači da je materijal po svojoj električnoj vodljivosti između vodiča i izolatora, te nema nikakve veze s pojmom poluvodiča.

Izrađuje se od plastičnih materijala s određenim sadržajem ugljika. Na višim naponima ponaša se poput glatke vodljive površine. Poluvodljivi zaslon vodiča služi da izgladi neravnu površinu upredenog vodiča i omogući glatki jednolični međuspoj s izolacijom, te time stvori strogo radijalno električno polje u području granice vodiča i izolacije. To smanjuje električna naprezanja na međuspoju fazni vodič/izolacija, što vodi mogućnosti upotrebe tanje izolacije nego što bi se inače morala koristiti, te produžuje životni vijek kabela.

Poluvodljivi zaslon izolacije (*slika 2.1. - dio označen s 4*) se nanosi iznad izolacije i obvezan je, sukladno većini standarda, za kabele iznad 5 kV. Materijali za izradu zaslona izolacije vrlo su slični materijalima zaslona vodiča. Zaslon izolacije služi da ograniči električno polje na prostor unutar izolacije (čime se izbjegava interferencija s elektromagnetskim poljima u okolišu), te da se dobije radijalna raspodjela električnog polja (čime se izbjegavaju područja lokalnog povećanja električnog polja). Može se reći da predstavlja drugu “ploču” kondenzatora s izolacijom kabela kao dielektrikom.

2.3. Izolacija

Izolacija je, pored faznog vodiča, drugi neizbježni dio svakog energetskog kabela. Svrha električne izolacije je spriječavanje prijelaza struje s vodiča pod naponom prema zemlji, obližnjem vodiču ili nekom drugom objektu. Izolacija mora biti sposobna izdržati električne udare proizvedene izmjeničnim naponima i bilo kojim superponiranim prijelaznim naponskim stanjima. Odabir vrste izolacije ovisi o velikom broju faktora kao što su: duga životna dob, dielektrična svojstva, otpornost na ionizaciju i parcijalna izbijanja, stabilnost na visokim temperaturama, otpornost na vlagu, mehanička snaga, fleksibilnost, itd. Treba napomenuti da ne postoji izolacija koja je u svakom od faktora superiorna svim ostalim vrstama izolacije.

U današnje vrijeme najčešće korištene izolacije su: papir, polietilen (PE – polyethylene), umreženi polietilen (XLPE – cross-linked polyethylene), WTR umreženi polietilen (WTR XLPE – water tree retardant XLPE), etilen-propilen-guma (EPR – ethylene-propylene-rubber) i polivinil-klorid (PVC – polyvinyl chloride).

Polietilen (PE - polyethylene) je polimer (materijal sastavljen od makromolekula koje se sastoje od velikog broja osnovnih jedinica, u ovom slučaju molekula etilena) koji ima odlična električna svojstva (visoku dielektričnu čvrstoću i mali kut gubitaka), te veliku otpornost na vlagu. Mana PE izolacije je omekšavanje, a nakon toga i topljenje na višim temperaturama, što ograničava njegovu primjenu.

Umreženi polietilen (XLPE – cross-linked polyethylene) dobija se dodavanjem određenih aditiva (dikumil-peroksida) koji dovodi do poprečnog povezivanja (umrežavanja) makromolekula polietilena. Tako se dobija materijal znatno manje osjetljivosti na zagrijavanje, odnosno materijal boljih mehaničkih karakteristika od “običnog” polietilena. Električna svojstva ostaju slična polietilenu.

WTR umreženi polietilen (WTR XLPE – water tree retardant XLPE) je suvremena izolacija komercijalizirana početkom 80-ih godina kojoj je svojstvena vrlo velika otpornost na prodor vlage. Dobija se ili modifikacijom polimerne građe materijala ili dodavanjem određenih aditiva. WTR XLPE zadržava odlična električna svojstva umreženog polietilena. Na slici 2.5 prikazana je XLPE izolacija u kojoj je došlo do penetracije vlage od strane poluvodljivog zaslona vodiča (lijevo), te izolacije (desno).



Slika 2.5: Prodor vlage u izolaciju od umreženog polietilena

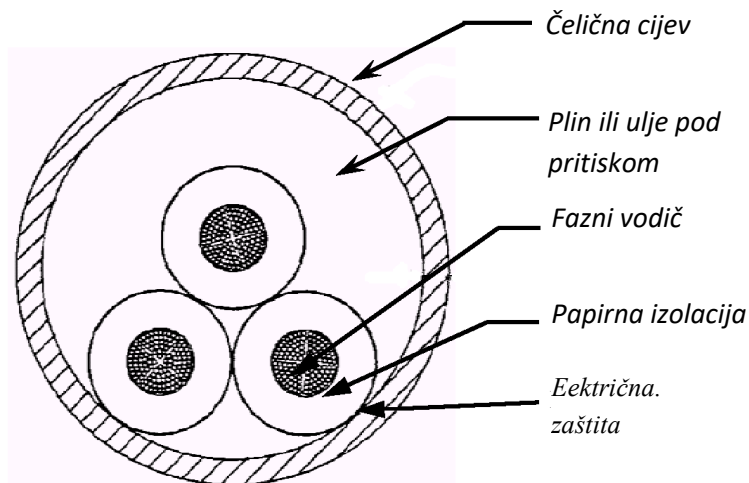
Etilen-propilen-guma (EPR – ethylene-propylene-rubber) je fleksibilna izolacija s vrlo dobrom otpornošću na toplinu i vlagu, ali traži vanjski omotač za zaštitu od mehaničkih i kemijskih utjecaja.

Polivinil-klorid (PVC – polyvinyl chloride) se koristi uglavnom kao vanjski omotač za energetske kabele s obzirom na mehaničku otpornost, te otpornost na vlagu i kemijske utjecaje. Kao izolacija većinom se upotrebljava za napone do 600 V.

Papirna izolacija je najstarija vrsta izolacije energetskih kabela. Još uvijek se mogu naći u pogonu kabelski vodovi položeni 20-ih godina dvadesetog stoljeća.

Kabeli s papirnom izolacijom mogu se podijeliti na:

- a) masene kabele, gdje je izolacija papir impregniran vrlo viskoznim fluidom,
- b) niskotlačne uljne kabele (LPFF – low-pressure fluid filled ili SCOF – self-contained oil-filled), gdje su dijelovi kabela ispunjeni uljem pod praktično atmosferskim pritiskom, koji se održava s posebnim spremnicima duž trase,
- c) visokotlačne uljne kabele (HPFF – high-pressure fluid filled ili HPOF – high-pressure oil-filled) kod kojih su fazni vodiči s papirnom izolacijom postavljeni u čeličnu cijev ispunjenu s uljem pod visokim pritiskom, *slika 2.6*. Pritisak se održava specijalnim pumpama koje se aktiviraju u trenutku kada pritisak padne ispod dozvoljene granice,
- d) plinske kabele (HPGF – high-pressure gas-filled), *slika 2.6*, gdje se kabelski vod nalazi unutar čelične cijevi ispunjene pod visokim pritiskom sumpornim heksafloridom, SF₆, vrlo inertnim, nezapaljivim i netoksičnim plinom, kojeg karakterizira visoka dielektrična čvrstoća u odnosu na zrak ili dušik.



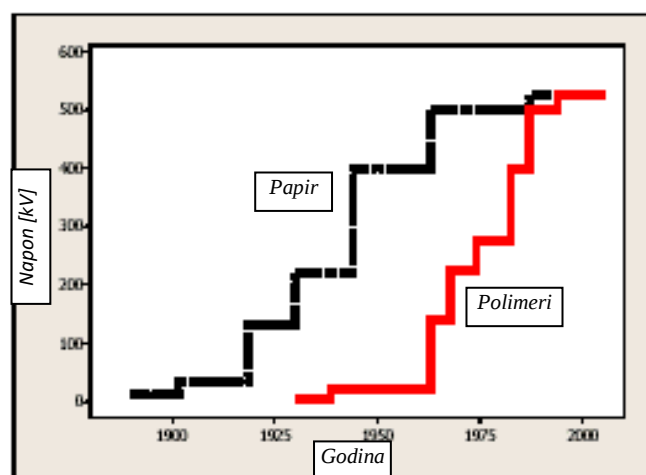
Slika 2.6: Visokotlačni uljni ili plinski kabelski vod

Iako je prednost kabela s papirnom izolacijom veća dielektrična čvrstoća u odnosu na XLPE kabele, treba napomenuti da potonji imaju veću otpornost na vlagu i toplinska naprezanja, osjetno manji kut gubitaka te time manje dielektrične gubitke, jednostavnije kabelske spojnice i završetke, lakše održavanje, manju težinu, itd.

Kvarovi na kabelima s papirnom izolacijom najčešće se događaju zbog prodora vlage, zračnih šupljina unutar izolacije, gubitka ulja ili toplinskih naprezanja.

Papir-polipropilen (PPL – paper-polypropylene) je izolacija razvijena da ujedini dobro svojstvo papirne izolacije, odnosno visoku dielektričnu čvrstoću, s mnogim prednostima XLPE izolacije. Uglavnom se koristi na vrlo visokim naponima (400 kV i više).

Na slici 2.7 prikazan je vremenski hod usvajanja tehnologije izrade energetskih kabela sve viših napona za papirnu i polimerne izolacije. Može se primijetiti brz razvoj tehnologije izrade polimernih izolacija sve viših napona od cca 1965. godine, koji je doveo do izjednačenja razine napona kojom su ovladala oba tipa izolacije.

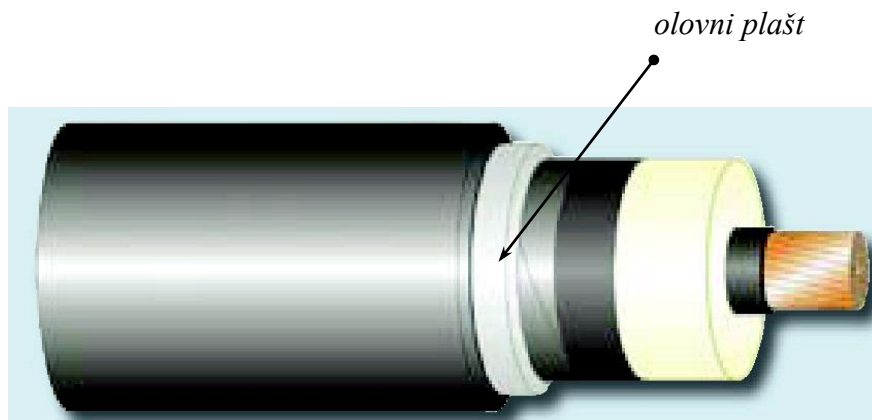


Slika 2.7: Vremenski razvoj usvajanja tehnologije izrade energetskih kabela

2.4 Plašt i električna zaštita

Metalni plašt osnovni je dio kabela s papirnom izolacijom (iako se može naći i kod ostalih tipova izolacije), a predstavlja šuplji tanki metalni cilindar postavljen iznad poluvodljivog zaslona izolacije. Prvenstvena namjena metalnog plašta kod kabela s papirnom izolacijom je zaštita impregniranog papira od vlage i sprječavanje istjecanja ulja. Pored toga, plašt koji se uzemljuje na barem jednom kraju kabela služi i da: zaštititi kabel od mehaničkog oštećenja, omogućiti odvođenje struja kvara, zaštititi od indirektnog dodira i ograničiti električno polje unutar kabela. Također može poslužiti i za vođenje neutralne struje.

Plaštevci se uglavnom izrađuju od olova, *slika 2.8*, i aluminijsa, premda se u praksi mogu pronaći i brončani, te bakreni plaštevci. Olovni plaštevci koriste se kod kabela s papirnom izolacijom još od početka razvoja tehnologije izrade energetskih kabela. Zbog znatno veće električne otpornosti imaju manje gubitke nego aluminijski ili bakreni plaštevci. Jednostavniji su i jeftiniji u proizvodnji od plaštevca izrađenih od ostalih materijala.



Slika 2.8: Visokonaponski kabel s olovnim plaštem

Težinski lakši aluminijski plaštevci proizvode se od 40-ih godina dvadesetog stoljeća.

U današnje vrijeme uglavnom se izrađuju u korugiranom (valovitom, narebrenom) obliku, što ima povoljan utjecaj na savitljivost, *slika 2.9*. Zbog niske električne otpornosti može se koristiti kao neutralni vodič, te ima veliku sposobnost odvođenja struje kvara.

Interferencija s komunikacijskim kabelima je, zbog dobrog zaslanjanja, manja nego u slučaju olovnog plašta. Ne trebaju armaturu kao zaštitu zbog mehaničke stabilnosti aluminijsa, što može biti prilično važno zbog visoke cijene nemagnetskih armaturnih materijala.

Nije osjetljiv na vibracije, te se često nalazi kao dio instalacija gdje se očekuju snažne vibracije (mostovi, blizina željezničkih tračnica, rudnici, itd.), ali je podložniji koroziji od olovnog plašta.



Slika 2.9: Visokonaponski kabel s korugiranim aluminijskim plaštem

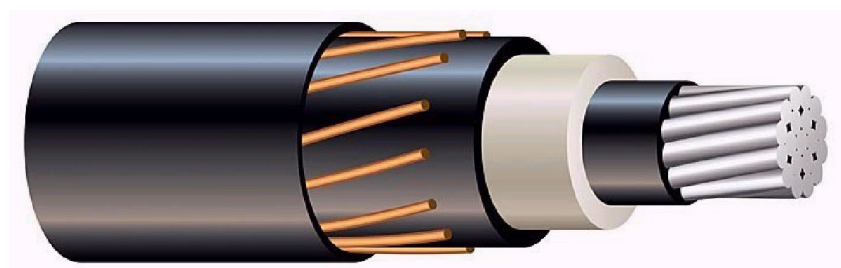
Električna zaštita služi za ograničenje električnog polja, za odvođenje struje kvara u zemlju i zaštitu od indirektnog dodira. Može voditi i neutralnu struju sustava.

Kod jednožilnih kabela ona se postavlja iznad poluvodljivog zaslona izolacije, dok se kod trožilnih kabela može postaviti oko svake žile ili zajednički za sve žile.

Postoje mnoge verzije izvedbe električne zaštite između kojih su:

Koncentrični vodiči koje su helikoidalno namotani iznad zaslona izolacije, *slika 2.10*. Vodiči su najčešće izrađeni od bakra. Ukupni presjek može se odabrati tako da vodiči imaju sposobnost vođenja neutralne struje, kao i odvođenja struje kvara. Helikoidalno namotana bakrena traka, koja zbog svog presjeka ima malu sposobnost odvođenja struje kvara ili vođenja neutralne struje, ali joj je svojstven dobar faktor zaslanjanja električnog polja, *slika 2.11*.

Kombinacija koncentričnih vodiča i trake, čime se postižu dobra svojstva obe verzije električne zaštite.



Slika 2.10: Električna zaštita – koncentrični vodiči



Slika 2.11: Električna zaštita – bakrena traka

Električna zaštita može biti nadstavljena i/ili podstavljena s bubrivim vrpčama za longitudinalnu i radijalnu zaštitu od prodora vlage, *slika 2.1*.

2.5 Armatura

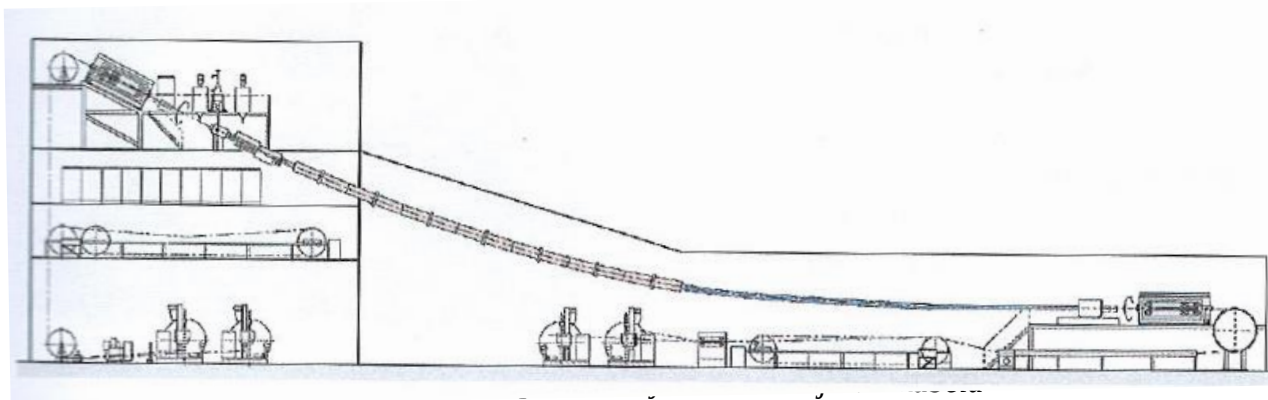
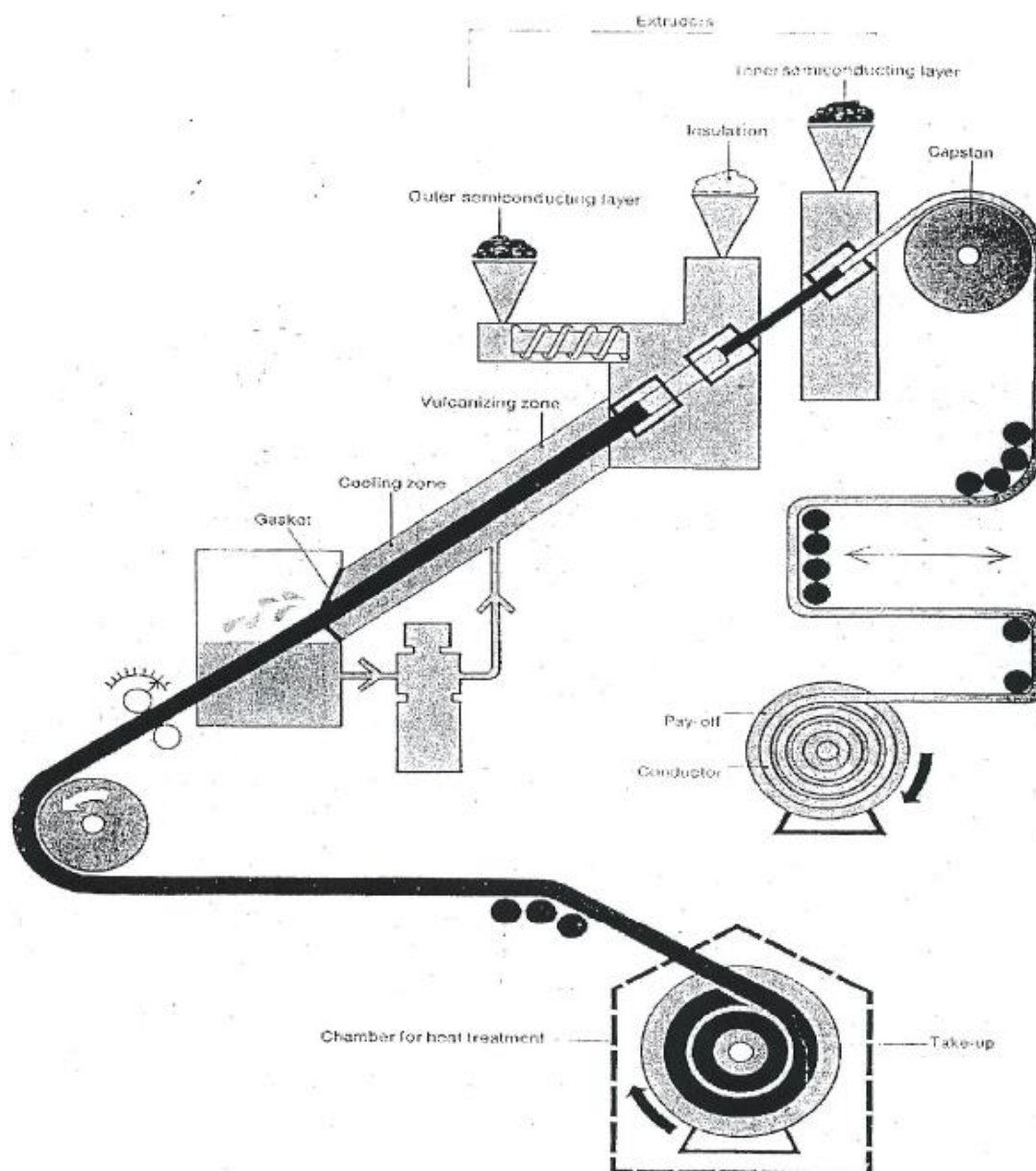
Zaštitna armatura je sloj od metalnih traka ili žica (ili oboje) koja štiti kabel od prekomjernih mehaničkih naprezanja i oštećenja, *slika 2.2*. Armatura se često izrađuje od čeličnih žica ili traka. Upotrebljava se kod kabela kod kojih su moguća veća mehanička naprezanja (npr. polaganje na kosim terenima), odnosno kod kojih postoji veća mogućnost oštećenja zbog vanjskih mehaničkih utjecaja (npr. sidrenje ili povlačenje mreža na trasi podmorskih kabela).

Primjena čelične konstrukcije na jednožilne kabele može rezultirati velikim gubitcima usljed histereze i vrtložnih struja, što smanjuje dozvoljenu strujnu opteretivost kabela. Da bi se smanjili magnetski gubici koriste se i nemagnetski materijali kao što su bakar i aluminij.

2.6 Vanjski omotač

Vanjski omotač predstavlja zaštitni sloj koji izolira plašt ili električnu zaštitu od okoline, te štiti energetske kabele od korozije i ostalih kemijskih utjecaja, a u određenoj mjeri i od mehaničkih oštećenja. Većina energetskih kabela proizvodi se s vanjskim zaštitnim omotačem, koji se nalazi iznad plašta/električne zaštite ili armature. Najčešće korišteni materijali su polietilen (PE) i polivinilklorid (PVC). [3]

2.7. Izvedba kabela



Slika 2.12: Proizvodna linija elektroenergetskih kabela

Vodiči

Vodiči kabela se izrađuju prema zahtjevima standarda IEC 60228. Koriste se okrugli bakreni i aluminijski vodiči klase 2, kompaktirani, a za veće presjeke segmentni (Miliken). Prema zahtjevu vodiči mogu biti u vodonepropusnoj izvedbi koja se postiže ugradnjom materijala koji u dodiru s vodom nabubre i na taj način spriječe uzdužno prodiranje vode kroz vodič.

Žile

Žile kabela izrađuju se istovremenim ekstrudiranjem tri sloja XLPE na vodiče, u jednoj glavi (triple extrusion)-poluvodljivog sloja na vodič, izolacije, poluvodljivog sloja na izolaciji. Ti slojevi su međusobno čvrsto zalijepljeni. Pri tome prostor između njih niti u jednom trenutku proizvodnje nije izložen u smislu onečišćenja. Materijali visoke čistoće, postupanje s tim materijalima u super čistom okruženju, trostruka ekstruzija, suhi postupak umrežavanja i hlađenja garantiraju proizvod visoke kvalitete.

Postoji više tehnologija proizvodnje kabela sa umreženim polietilenom ali zajednički zadatak im je dobijanje što homogenije izolacije te onemogućavanje stvaranja šupljina, zračnih uključaka i unutarnjih naprezanja sve u cilju smanjenja efekta korone – parcijalnih pražnjenja i povećanja dielektrične čvrstoće izolacije.

Izolacija koja se postavlja preko poluvodljivog sloja izrađuje se od umreženog polietilena visoke čistoće i velike dielektrične i termičke stabilnosti. Jedna od najvažnijih tehnoloških operacija u proizvodnji ovih kabela je proces vulkanizacije pod visokom temperaturom (200-300°C) i visokim pritiskom (15-25 atm.). Kontinuirano se poslije procesa vulkanizacije nastavlja proces hlađenja pod pritiskom (10-20 atm.).

Električna zaštita (ekran)

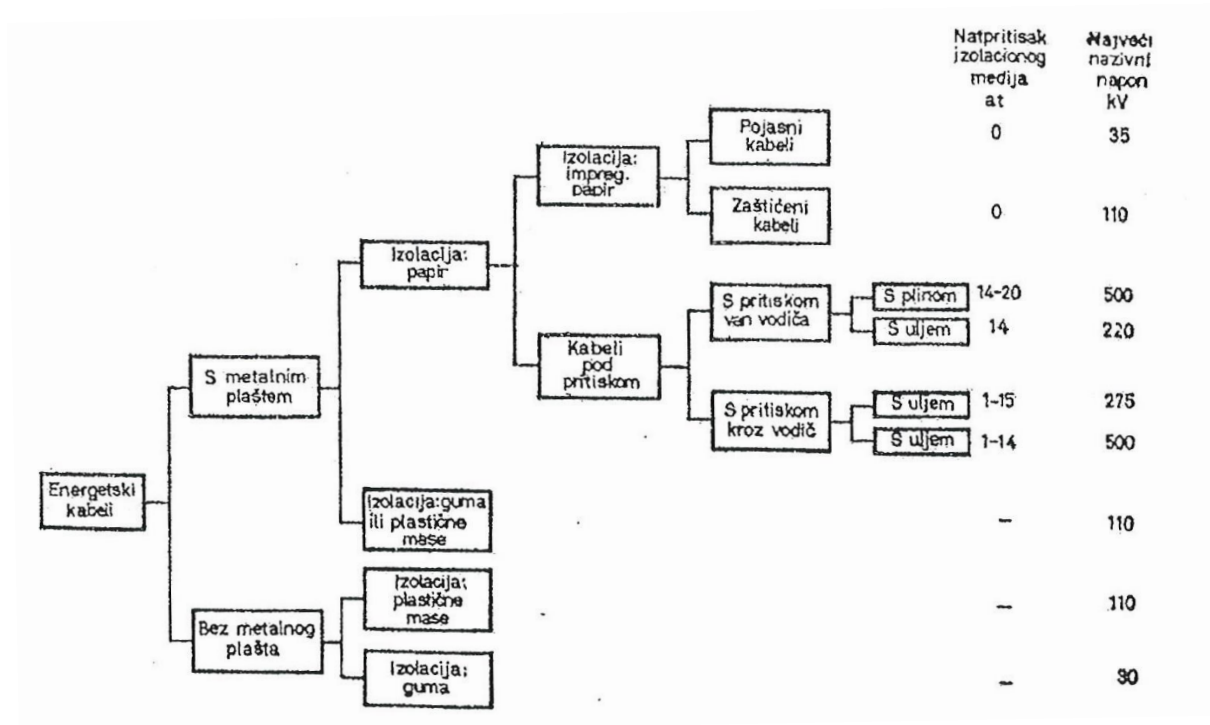
Standardne je izvedbe-izvodi se helikoidalno omotanim bakrenim žicama sa kontra spiralom od bakrene trake. Da bi se postigla uzdužna vodonepropusnost, ispod i iznad žica omataju se trake sa materijalom bubrivim u vodi ili se u tu svrhu koriste drugi materijali. Poprečna vodonepropusnost postiže se polaganjem aluminijske trake sa slojem kopolimera koja se zalijepi za plašt. U području ekrana mogu se ugraditi svjetlovodne niti za prijenos podataka ili mjerenje temperature u kabelu tijekom rada.

Plašt

Obično se izrađuje ekstrudiranjem PE. Prema zahtjevu, mogu se koristiti i drugi materijali tako da kabel može biti bezhalogen i vatrootporan. Debljina plašta se određuje prema preporuci IEC 60502 ($t=0,035 \times D + 1$ mm, gdje je D promjer ispod plašta), ali za korištenje kabela u težim uvjetima preporučuje se da plašt bude deblji.

Plašt može biti izveden i sa dodatnim ekstrudiranim tankim slojevima poluvodljivog materijala (skin). To omogućuje ispitivanje plašta naponom, u tvornici, nakon transporta, odmah nakon polaganja ili kod periodičkih ispitivanja.

3. VRSTE KABELA



Slika 3.1. Vrste energetskih kabela

3.1 Niskonaponski kabe

Kod **niskonaponskih kabela** razlikujemo **izolirane vodove** koji glavnu primjenu nalaze u stambenim zgradama i zatvorenim prostorima. Ovi kabe se ne smiju polagati u zemlju jer nemaju mehaničku zaštitu. Izolacija izoliranih vodova je PVC, guma ili kombinirano, s tim da je izolacija od gume danas istisnuta i uglavnom se za izolaciju koriste umjetni materijali.

Kod prijenosa većih snaga koriste se kabe s **papirnom, gumenom ili plastomernom izolacijom** te metalnim plaštom.

Za zračne kabe ske vodove koriste se samonosivi kabe (SKS). Obično se sastoje od tri fazna vodiča (aluminij) i nul-vodiča (aluminijaska slitina) koji ima i funkciju nosivog užeta. Kabe ska izolacija je obično **polietilen**.

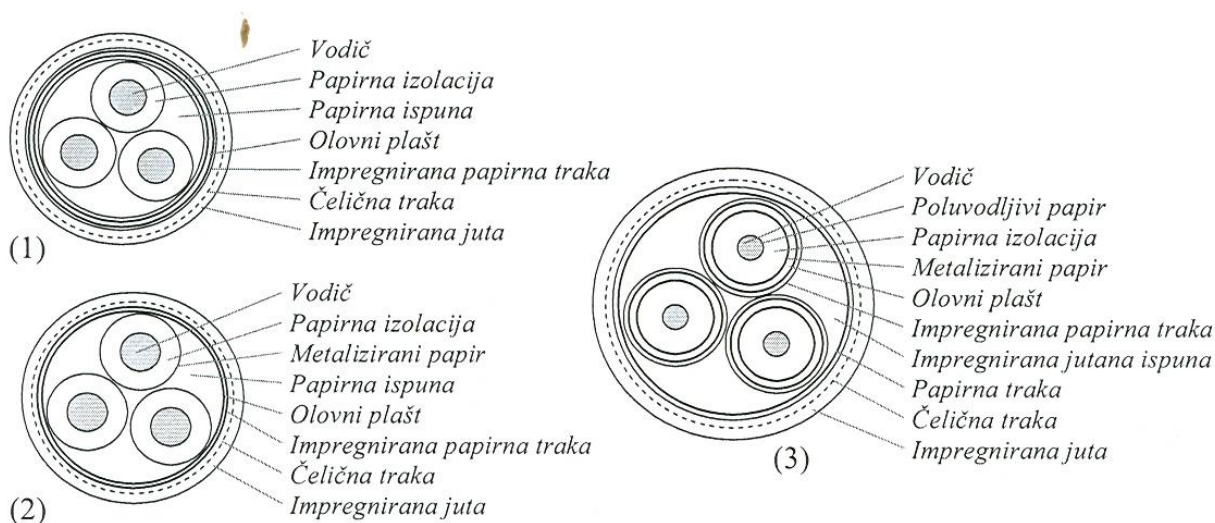
3.2. Srednjenaponski kabeli

Kod **srednjenaponskih kabela** su zbog cijene najzastupljeniji **maseni kabeli** (slika 3.2.). Obzirom na konstrukciju razlikujemo tri vrste ovih kabela s izolacijom od papira impregniranom kabelskom masom.

Prvi su **pojasni kabeli** koji pored posebne izolacije svake žile imaju zajedničku pojasnu izolaciju na koju dolazi metalni plašt.

Drugi su **H-kabeli** kod kojih izolacija vodiča ima zaslone od metaliziranog ili grafitnog papira koji su međusobno spojeni. Prostor do metalnog plašta ispunjen je papirnom popunom.

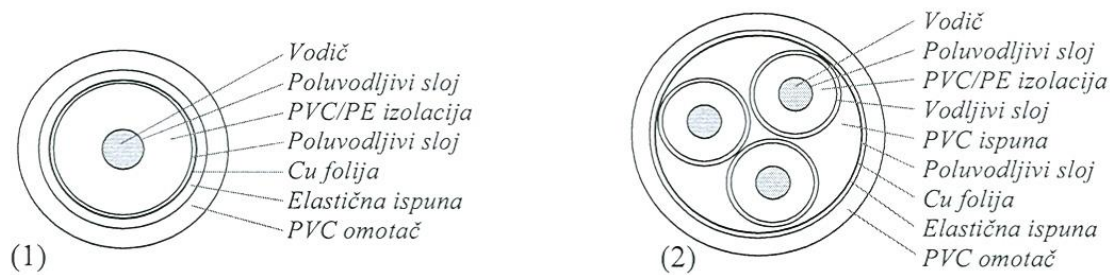
Treći su **troolovni kabeli** s olovnim plaštovima na zaslonima svakog od vodiča, a popuna je juta. Maseni kabeli imaju bandažu (čelična traka) i antikorozijsku zaštitu (impregnirana juta). Pojasni kabeli se izrađuju za napone do 15 kV, a H i troolovni kabeli do 40 kV.



Slika 3.2. Maseni kabeli (1) pojasni kabel, (2) H-kabel, (3) troolovni kabel

Kabeli s izolacijom iz plastomera imaju **PE ili PVC** izolaciju vodiča i na njoj vodljivi sloj. Popuna je iz PVC omotana bakrenom folijom, na koju dolazi meki sloj i PVC omotač. Vodiči i popuna su obloženi poluvodljivim slojem radi izbjegavanja pojave šupljina kod velikih savijanja.

PVC kabeli se koriste za napone do 20 kV, skuplji su od masenih, ali jeftiniji od kabela s izolacijom od gume. Imaju prednost pred masenim kabelima kod kratke trase (jeftinije i sigurnije glave), strme trase (nema impregnacijske mase koja se cijedi) i oštrog savijanja, a lakši su, savitljiviji i otporniji na kemijske utjecaje.



Slika 3.3. PVC/PE kabele: (1) srednjenaponski jednožilni, (2) srednjenaponski trožilni

Kod masenih kabela povećanje nazivnog napona dovodi do debelih slojeva izolacije, kod kojih već postoji opasnost od toplinskog proboja. Takve izolacije nazivaju se još i **termički nestabilnim**. Njihova krajnja granica leži kod 60 kV nazivnog linijskog napona. Ovo je svladano primjenom **termički stabilnih** izolacija koje ćemo obraditi u slijedećem poglavlju VN kabele.

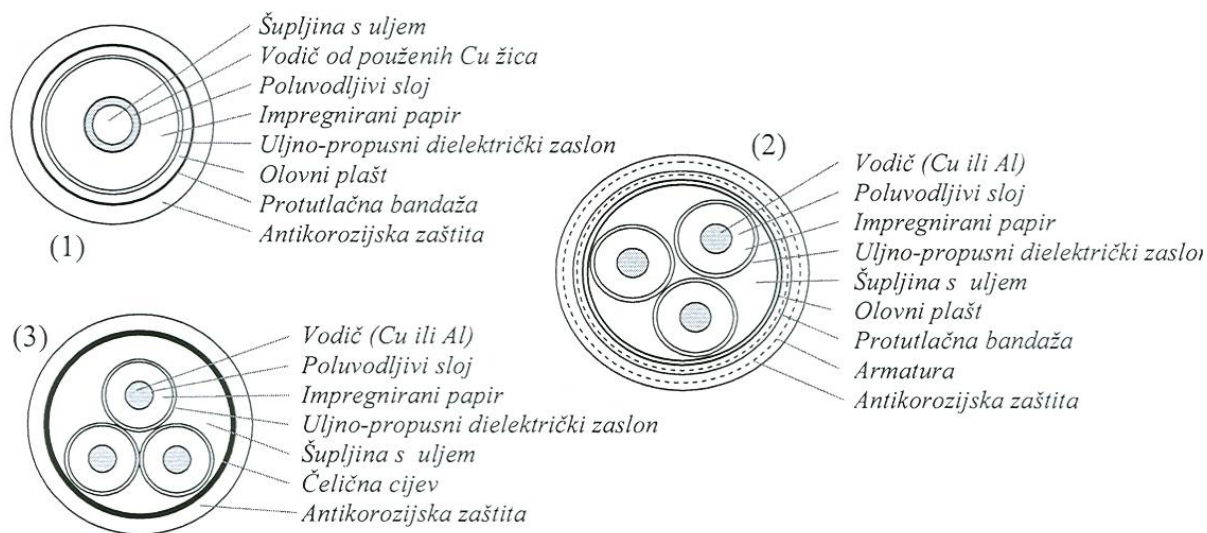
3.3. Visokonaponski kabeli

Kabeli za visoke i vrlo visoke napone zahtjevaju termički stabilne izolacije kakve su papir impregniran uljem pod trajnim tlakom, papir u plinu pod trajnim tlakom, novi neumreženi polietilen (PE) i SF₆ plinom izolirani vodovi.

Niskotlačni uljni kabel ima uzdužnu šupljinu koja je ispunjena uljem male viskoznosti pod pretlakom 0,03-0,6 Mpa. Ovo ulje je zapaljivo i ekološki štetno. Kod zagrijavanja se ulje širi i višak ulazi u posude za izjednačavanje tlaka na krajevima kabela. Razmak između posuda je nekoliko kilometara, ukopane su uz kabel i dostupan je samo manometar za kontrolu tlaka ulja. Trožilni kabeli se proizvode za napone do 132 kV. Kabeli su u normalnoj izvedbi neprikladni za veće visinske razlike, pa se dodaju vanjske bandaže zbog povećanja tlaka na manjoj visini. Za visinske razlike preko 250 m koriste se zaporne spojke za ulje koje dijele kabel na manje sektore u kojima visinska razlika ne prelazi navedenu granicu.

Kod podmorskih kabela ovog tipa problema nema ako dubine ne prelaze cca 1500 m, jer se tlak ulja dobrim dijelom kompenzira tlakom morske vode. (slika 3.4. (1) i (2))

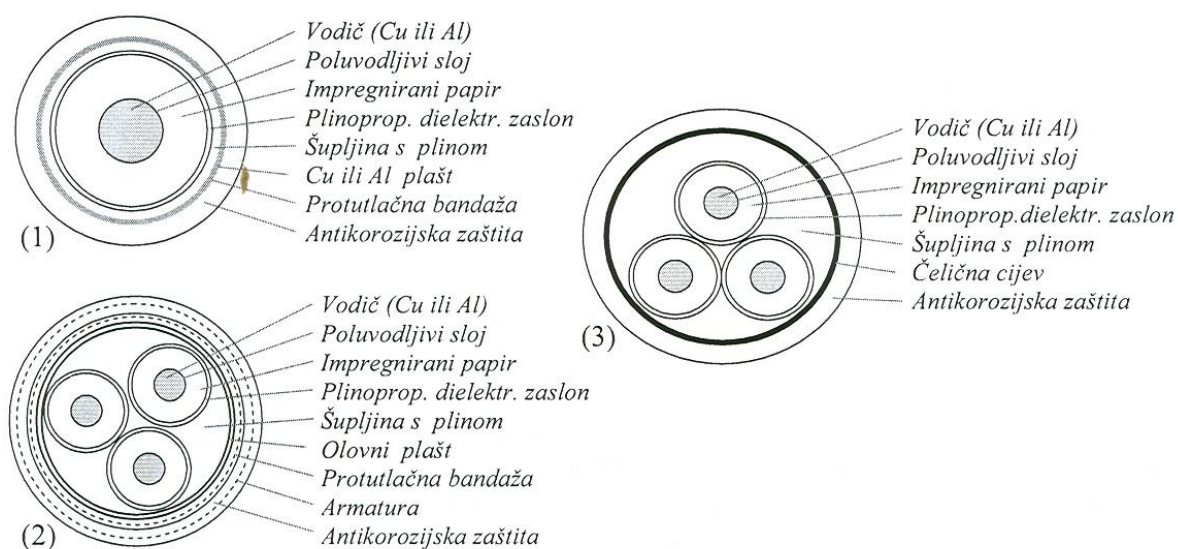
Visokotlačni uljni kabeli imaju veće tlakove ulja (1-2,5 Mpa) i jače bandaže, ali i veći razmak između posuda za izjednačenje tlaka. Tlak se održava povećanim posudama za izjednačavanje tlaka ili automatskim pumpama. Povećanje tlaka ulja povećalo je malo podnosivi udarni napon kabela. (slika 3.4. (3))



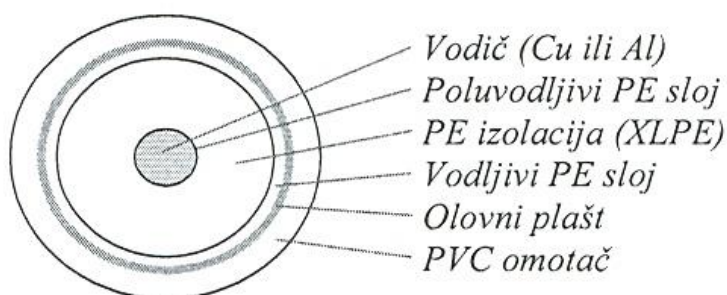
Slika 3.4. Uljni kabeli (1) jednožilni, (2) armirani niskotlačni trožilni, (3) visokotlačni cijevni trožilni

Plinski kabeli su slično građeni a koriste se tamo gdje se ne mogu koristiti uljni kabeli zbog posuda za izjednačavanje. Kod plina (dušik sumporni heksafluorid ili njihova mješavina) su dovoljne posude na krajevima, praktično bez obzira na dužinu kabela. Jasno je da plinski kabel nema visinskih ograničenja kao uljni. Tlak plina je 1-1,5 Mpa, a umjesto bandaža se može koristiti ojačani aluminijski plašt. Izvode se i kao trožilni cijevni kabeli (tlak u čeličnoj cijevi iznosi oko 1,5 Mpa). Plinski kabeli se koriste za napone do 300 kV (slika 3.5.).

PE kabeli polako ulaze u područje visokih napona, a prednost im je da su suhi i ne trebaju složeno održavanje i trajan nadzor. (slika 3.6.).



Slika 3.5. Plinski kabeli (1) jednožilni, (2) trožilni s plaštom, (3) cijevni trožilni



Slika 3.6. Jednožilni polietilenski kabel

SF₆ plinom izolirani vodovi nisu kabeli u klasičnom smislu, a u nas se ne koriste. Konstruirani su na istim principima kao sabirnice u plinom izoliranim postrojenjima, a koriste se i za najviše napone. Vodiči su aluminijske cijevi učvršćene u aluminijskom oklopu pomoću aralditnih izolatora. Razmak izolatora ograničen je progibom vodiča zbog vlastite težine. Vod je podijeljen na plinonepropusne sektore koje se nadzire na visinu tlaka plina (računalni monitoring). Kod vrlo niskih temperatura postoji mogućnost kondenzacije plina, što se sprječava dodavanjem dušika sumpornom heksafluoridu. Antikorozijska zaštita oklopa ovisi o načinu polaganja voda. Polaganje ovih vodova je tehnički vrlo zahtjevan posao, posebice što treba osigurati besprijeckornu čistoću unutar oklopa i punjenje plina na terenu.

Prednosti ovih kabela koje prijenose veliku snaga su:

- može se primijeniti vrlo veliki presjek vodiča,
- može se svladati vrlo visoki napon povećanjem promjera cijevi i tlaka,
- plin SF₆ je stabilan kod visokih temperatura,
- SF₆ bolje odvodi toplinu nego čvrsta izolacija,
- dielektrični gubitci su zanemarivi,
- manji mu je pogonski kapacitet.

S povećanjem tlaka raste visina podnosivog udarnog napona, ali se s tlakom ne smije pretjerivati. Budućnost ovog kabela je u jednofaznoj ili trofaznoj izvedbi u plaštu od valovitog lima ili u cijevi. [7]

4. KRITERIJI ZA IZBOR KABELA

Osnovni kriteriji pri izboru elektroenergetskih kabela su **mehanički i električni kriteriji**.

Mehanički kriteriji uzimaju u obzir mjesto polaganja kabela te način njegovog polaganja, a s tim u vezi mogu se javiti slijedeći utjecaji:

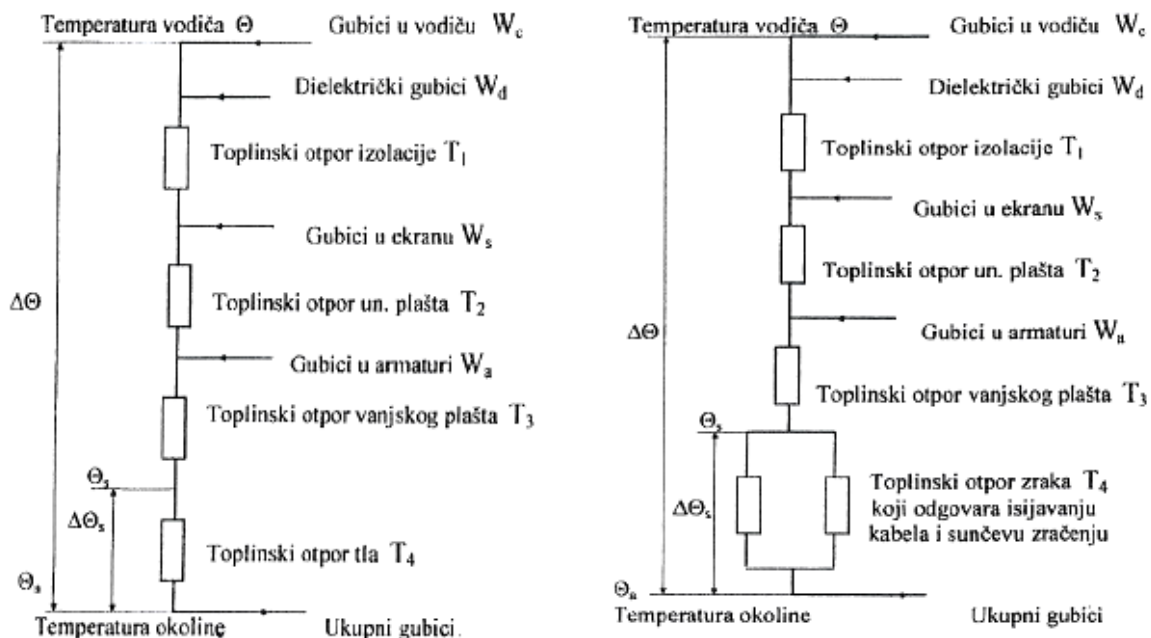
- opasnost od mehaničkog oštećenja,
- opasnost od korozije u kemijski agresivnim sredinama ili morskoj vodi,
- izloženost vibracijama,
- izbjegavanje velikog broja spojnica kod dužih kabelskih trasa,
- savitljivost i otpornost na savijanje,
- mogućnost strmog ili okomitog polaganja što izaziva uzdužni vlak u kabelu i hidrostatski tlak viskoznih sastojaka kabela.

Električni kriteriji se svode na dva osnovna, a to su:

- nazivni napon iz kojeg proizilaze i sve ostale vrijednosti mjerodavne za naprezanje izolacije, a rješava se izborom i dimenzioniranjem izolacije
- strujna opteretivost; rješava se izborom materijala i presjeka vodiča, vodeći računa o konstrukciji kabela i odvođenju topline.

Oba kriterija zajedno daju prijenosnu moć kabela odnosno prividnu snagu koju kabel može prenijeti. Prijenosna moć kabela je ograničena zagrijavanjem usljed gubitaka.

Shematski prikaz ukupnih gubitaka koji nastaju protjecanjem struje u vodiču kabela, kod polaganja u tlo odnosno zrak, dat je na *slici 4.1*.



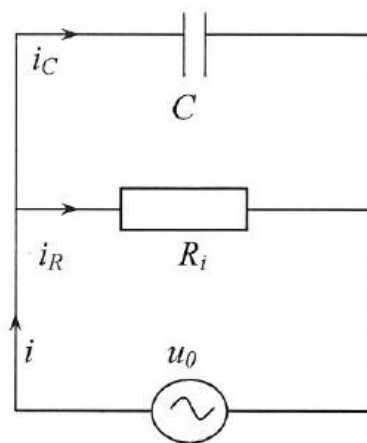
Slika 4.1. Toplinska slika kabela položenog u zemlju i u zrak

4.1. Gubici kabelskog prijenosa

Gubici kabelskog prijenosa generiraju se u vodljivim dijelovima (Jouleovi gubici) i izolaciji (dielektrični gubici). Poznavanje gubitaka jedan je od nužnih uvjeta određivanja zagrijavanja, odnosno dozvoljene strujne opteretivosti kabla. Da bi se povećalo strujno opterećenje kabla potrebno je između ostalog smanjiti **gubitke** koji nastaju u: vodiču kabla, gubitke u dielektriku izolacije i plaštu kabla, te gubitke u metalnoj armaturi i metalnom plaštu kabla. Pri tom se mora voditi računa o izvedbi konstrukcijskih elemenata kabla, kao i o toplinskim i električnim svojstvima ugrađenih materijala.

4.1.1. Gubici u izolaciji

Gubici u izolaciji ili dielektrični gubici mogu imati značajan utjecaj na zagrijavanje ako se radi o visokonaponskim kabelima. Izolacija kabla se može nadomjestiti sa shemom paralelno spojenog kapaciteta C i otpora R_i , po jedinici duljine kabla, *slika 4.2.*



Slika 4.2. Nadomjesna shema izolacije kabla

Na slici 4.2 prikazan je vektorski dijagram nadomjesne sheme. Komplement faznog kuta φ je kut gubitaka δ . Iznos radne komponente struje kod izolacijskih materijala je mnogostruko manji od iznosa kapacitivne komponente. Iz *slike 4.2* slijedi:

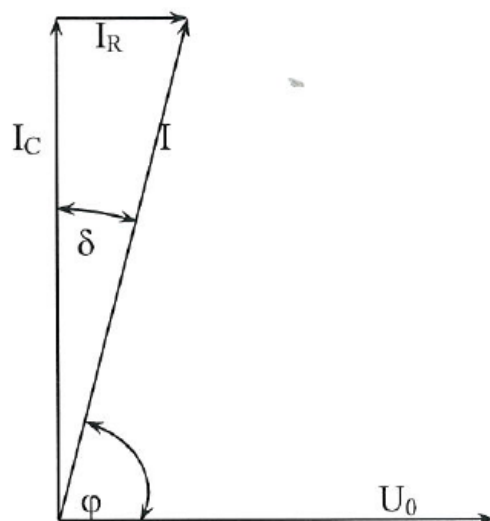
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C}, \quad (4.1a)$$

gdje su:

$$I_R = U_0 / R_i, \quad (4.1b)$$

$$I_C = \omega C U_0, \quad (4.1c)$$

efektivne vrijednosti radne i kapacitivne komponente struje.



Slika 4.3. Vektorski dijagram nadomjesne sheme

Kapacitet kabela po jedinici duljine može se izračunati pomoću izraza za kapacitet cilindričnog kondenzatora:

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{D_i}{d_c}} \approx \frac{\epsilon_r}{18 \ln \frac{D_i}{d_c}} 10^{-9} \left[\frac{F}{m} \right], \quad (4.2)$$

gdje su:

D_i [mm] – vanjski promjer izolacije,

d_c [mm] – promjer vodiča,

ϵ [As/Vm] – dielektrična konstanta izolacije,

ϵ_r – relativna dielektrična konstanta izolacije.

Uvrštenjem (4.1b) i (4.1c) u (4.1a), dobije se:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{R_i C \omega}, \quad (4.3a)$$

odnosno:

$$R_i = \frac{1}{C \omega \operatorname{tg} \delta}. \quad (4.3b)$$

Niža vrijednost za $\tan \delta$ svojstvena je boljim izolatorima. U *tablici 4.1.* prikazane su vrijednosti relativne dielektrične konstante i kuta gubitaka za pojedine vrste izolacijskih materijala.

Tip kabela	ϵ_r	$\tan \delta$
Papirna izolacija		
Maseni kabeli	4	0.01
Niskotlačni uljni kabeli		
do $U_0 = 36 \text{ kV}$	3.6	0.0035
do $U_0 = 87 \text{ kV}$	3.6	0.0033
do $U_0 = 160 \text{ kV}$	3.6	0.0030
do $U_0 = 220 \text{ kV}$	3.6	0.0028
Visokotlačni uljni kabeli u cijevi	3.7	0.0045
Plinski kabeli		
plin u dodiru s plaštem ili vanjskim omotačem	3.6	0.0040
plin u dodiru s izolacijom	3.4	0.0045
Butil - guma	4	0.050
Etilen-propilen-guma (EPR)		
do uključujući 18/30 (36) kV	3	0.020
iznad 18/30 (36) kV	3	0.005
Polivinil klorid (PVC)	8	0.1
Polietilen (PE)	2.3	0.001
Umreženi polietilen (XLPE)		
do uključujući 18/30 (36) kV (bez aditiva)	2.5	0.004
iznad 18/30 (36) kV (bez aditiva)	2.5	0.001
iznad 18/30 (36) kV (s aditivima)	3.0	0.005
Papir-polipropilen (PPL)	2.8	0.0014

Tablica 4.1. Relativna dielektrična konstanta i kut gubitaka za različite materijale

Gubici u izolaciji po jedinici duljine kabela su:

$$W_d = \frac{U_0^2}{R_i}. \quad (4.4)$$

Uvrštenjem (4.3b) u (4.4) slijedi:

$$W_d = U_0^2 \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (4.5)$$

Gubici u izolaciji mogu biti značajan uzrok zagrijavanja kabela na visokim naponskim razinama. Fazni naponi prema IEC propisima kod i iznad kojih je potrebno uzeti u obzir i dielektrične gubitke, pri proračunu zagrijavanja ili dozvoljene strujne opteretivosti, prikazani su u tablici 4.2.

Tip kabela	U_0 [kV]
Papirna izolacija	
<i>maseni kabe</i> li	38
<i>plinski ili uljni kabe</i> li	63.5
Butil - guma	18
Etilen-propilen-guma (EPR)	63.5
Polivinil klorid (PVC)	6
Polietilen (PE)	127
Umreženi polietilen (XLPE)	
<i>bez aditiva</i>	127
<i>s aditivima</i>	63.5

Tablica 4.2. Fazni naponi kod i iznad kojih se uzimaju u obzir dielektrični gubici

4.1.2. Jouleovi gubici

Joule-ovi gubici u energetskeim kabelima dijele se na gubitke u faznom vodiču i gubitke u ostalim metalnim dijelovima kabela (plaštevi, električne zaštite, armature, metalne cijevi).

4.1.2.1. Gubici u faznom vodiču

Gubici u faznom vodiču, W_c , funkcija su strujne opteretivosti, I , i izmjeničnog otpora vodiča, R , pri radnoj temperaturi, odnosno:

$$W_c = I^2 R. \quad (4.6)$$

Proračun otpora faznog vodiča prema IEC standardu počinje s odabirom odgovarajućeg maksimalnog dozvoljenog otpora, R_0 , pri istosmjernoj struji i $20^\circ C$ na temelju poznatog poprečnog presjeka vodiča, S , *tablica 4.3.*

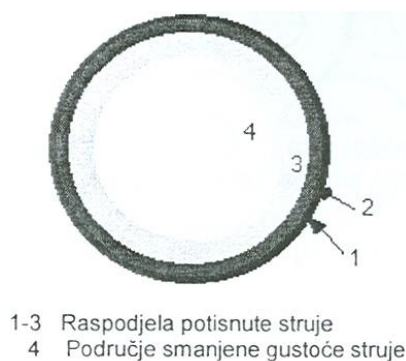
S	d_c	$R_0 [\Omega/km]$	
$[mm^2]$	$[mm]$	<i>aluminij</i>	<i>bakar</i>
25	5.8	1.20	0.727
35	7.0	0.868	0.524
50	8.0	0.641	0.387
70	9.6	0.443	0.268
95	11.2	0.320	0.193
120	12.8	0.253	0.153
150	14.2	0.206	0.124
185	15.9	0.164	0.0991
240	18.0	0.125	0.0754
300	20.5	0.100	0.0601
400	23.1	0.0778	0.0470
500	26.4	0.0605	0.0366
630	30.2	0.0469	0.0283
800	33.9	0.0367	0.0221
1000	37.9	0.0291	0.0176
1200	44	0.0247	0.0151
1400	49	0.0212	0.0129
1600	52	0.0186	0.0113
2000	56	0.0149	0.0090
2500	66	0.0120	0.0072
3000	72	0.0100	0.0060

Tablica 4.3. Maksimalni dozvoljeni otpor pri istosmjernoj struji i $20^\circ C$

Otpor pri izmjeničnoj struji, R , je većeg iznosa od otpora pri istosmjernoj struji zbog efekta potiskivanja (*eng. skin effect*) i efekta blizine (*eng. proximity effect*).

Faktor skin efekta (efekt potiskivanja) - y_s

Skin efekt (*eng. skin effect*) se odnosi na pojavu da se strujni tok velike gustoće u vodiču potiskuje prema vanjskoj površini vodiča uslijed djelovanja od struje nastalog magnetskog polja u vodiču.



Slika 4.4. Skin efekt u vodiču

Efekt potiskivanja (skin efekt) struje prema obodu vodiča posljedica je činjenice da su dijelovi faznog vodiča, koji su smješteni u blizini centra, obuhvaćeni s većim brojem silnica magnetskog polja u odnosu na dijelove koji se nalaze u blizini vanjskog oboda.

Efekt potiskivanja raste s frekvencijom i radijusom faznog vodiča. Potiskivanje struje povećava iznos otpora pri izmjeničnoj struji u odnosu na vrijednost otpora pri istosmjernoj struji, gdje konstantni magnetski tok ne inducira napon u faznom vodiču.

Smanjenje utjecaja skin efekta postiže se izradom vodiča iz više žica. Struja sada protiče razdjeljena po svakoj žici, potiskivanje struje postoji, ali je ukupna raspodjela struje unutar vodiča jednolična.

Faktor skin efekta za okrugle fazne vodiče dobiva se iz:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8x_s^4}, \quad (4.7)$$

gdje je:

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_s, \quad (4.8)$$

f – frekvencija, (Hz)

k_s – koeficijent skin efekta, prema *tablici 4.4*.

Faktor efekta blizine (eng. proximity effect). – y_p (za dvožilni kabel ili za dva jednožilna kabela)

Efekt blizine odnosi se na pojavu razmicanja ili približavanja središta strujnog toka u vodičima kabela ovisno o smjeru strujnog toka. Ako su struje u susjednim vodičima istog smjera, strujni tokovi se udaljuju, a za struje suprotnog smjera se približavaju.

To se tumači međusobnim djelovanjem magnetnog polja od oba vodiča, pri čemu se kod struja istog smjera povećava, a kod struja suprotnog smjera smanjuje aktivni otpor vodiča u bliskom području, te se tako ponašaju i težišta strujnog toka u vodičima *slika 4.5*.



Slika 4.5. Efekt blizine

Faktor efekta blizine – y_p za trožilni kabel ili za tri jednožilna kabela

Izračunava se prema:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0.312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} + 0.27} \right] \quad (4.9)$$

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p \quad (4.10)$$

d_c [mm] - promjer faznog vodiča,

s [mm] - udaljenost između osi faznih vodiča

k_p – koeficijent faktora blizine (*tablica 4.4.*)

Za kabele položene u ravnini, „ s “ je razmak između susjednih faza.

Ako razmak između faza nije jednak za razmak se uzima da je: $s = \sqrt{s_1 + s_2}$

Gornji izraz za y_p može se upotrijebiti samo ako mu vrijednost x_p ne prelazi 2.8, što vrijedi u većini praktičnih slučajeva.

Tip faznog vodiča	Da li je suho-impregnirani ili ne?	k_s	k_p
Bakar			
Okrugli, upredeni	Da	1	0.8
Okrugli, upredeni	Ne	1	1
Okrugli, segmentni ^a		0.435	0.37
Šuplji, helikoidalno upredeni	Da	b	0.8
Sektorski	Da	1	0.8
Sektorski	Ne	1	1
Aluminij			d
Okrugli, upredeni	Da/Ne	1	
Okrugli, 4 segmenta	Da/Ne	0.28	
Okrugli, 5 segmenata	Da/Ne	0.19	
Okrugli, 6 segmenata	Da/Ne	0.12	
Segmentni s perifernim žicama	Da/Ne	c	
^a Date vrijednosti se primjenjuju na vodiče koji imaju četiri segmenta (sa ili bez centralne šupljine) i presjeke manje od 1600 mm^2 . Ove vrijednosti koriste se za vodiče kod kojih svi slojevi žice imaju isti smjer pružanja. Provizorne su i još pod razmatranjem.			
^{b,c} Proračun za k_s u ovim specijalnim slučajevima može se naći u IEC standardima vezanim za kabele.			
^d Iako ne postoje prihvaćeni eksperimentalni rezultati u vezi s koeficijentom k_p za aluminijske vodiče, preporučuje se da se za upredene Al vodiče koriste vrijednosti date za bakrene vodiče.			

Tablica 4.4. Eksperimentalne vrijednosti za koeficijente k_s i k_p

U nastavku se, zbog složenosti pratećih matematičkih postupaka, iznose samo primjenljive relacije za faktor skin efekta i faktor efekta blizine, pomoću kojih se izračunava izmjenični otpor faznog vodiča energetskog kabela.

Izmjenični otpor faznog vodiča po jedinici duljine računa se pomoću slijedećeg izraza, osim u slučaju kabela u metalnim cijevima:

$$R = R' (1 + y_s + y_p), \quad (4.11)$$

gdje su:

$R' [\Omega/m]$ - otpor pri istosmjernoj struji na radnoj temperaturi faznog vodiča,

y_s - faktor skin efekta,

y_p - faktor efekta blizine.

Otpor pri istosmjernoj struji na radnoj temperaturi je:

$$R' = R_0 [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)], \quad (4.12)$$

gdje je:

$R_0 [\Omega/m]$ - otpor pri istosmjernoj struji i 20°C , *tablica 4.3*,

$\alpha_{20} [1/^\circ\text{C}]$ - temperaturni koeficijent materijala pri 20°C , *tablica 4.5*,

$\theta [^\circ\text{C}]$ - radna temperatura faznog vodiča.

Materijal	ρ_{20}	α_{20}
<i>a) Fazni vodiči</i>	$[\Omega m]$	$[1/^\circ\text{C}]$
<i>Bakar</i>	$1.7241 \cdot 10^{-8}$	$3.93 \cdot 10^{-3}$
<i>Aluminij</i>	$2.8264 \cdot 10^{-8}$	$4.03 \cdot 10^{-3}$
<i>b) Plaševi/e.zaštite i armatura</i>		
	$21.4 \cdot 10^{-8}$	$4.0 \cdot 10^{-3}$
<i>Olovo ili olovna legura</i>	$13.8 \cdot 10^{-8}$	$4.5 \cdot 10^{-3}$
<i>Čelik</i>	$3.5 \cdot 10^{-8}$	$3.0 \cdot 10^{-3}$
<i>Bronca</i>	$70 \cdot 10^{-8}$	Zanemariv
<i>Nekorodirajući čelik</i>		
<i>Aluminij</i>	$2.84 \cdot 10^{-8}$	$4.03 \cdot 10^{-3}$

Tablica 4.5. Električne otpornosti i temperaturni koeficijenti

4.1.2.2. Gubitci u metalnom plaštu ili metalnom ekranu

Gubitci nastali u metalnom plaštu ili ekranu kabela (λ) sastoje se od gubitaka nastalih uslijed kružnih struja (λ_1) i gubitaka nastalih uslijed vrtložnih struja (λ_2), a iznose:

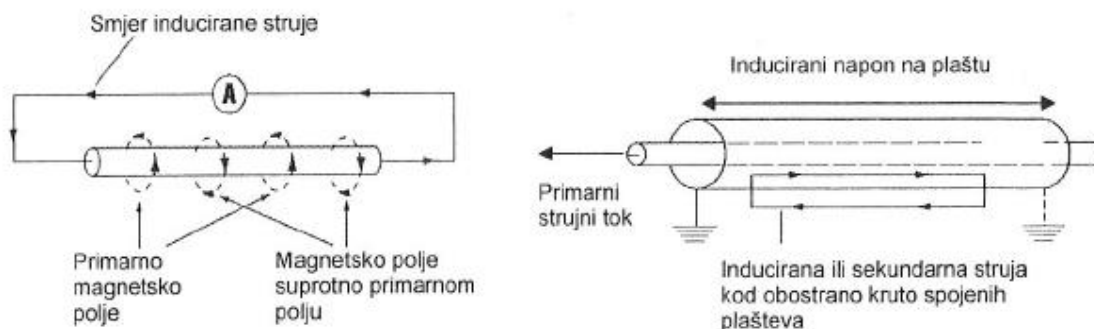
$$W_s = I^2 \cdot R \cdot \lambda = I^2 \cdot R \cdot (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (\text{W/m}) \quad (4.13)$$

Kružna struja

Prolaskom izmjenične struje kroz vodič stvara se elektromagnetsko polje oko kabela, koje u metalnom plaštu kabela inducira izmjenični napon.

Ako su metalni plaševi kabela kruto spojeni na oba kraja, kroz plaševe kabela će proteći sekundarna struja (slika 4.6.) koja stvara svoje magnetsko polje i suprotavlja se primarnom magnetskom toku.

Efekt se očituje u smanjenju primarne struje, odnosno prividnog povećanja otpora vodiča kabela, tj. porasta toplinskih gubitaka u kabeu.

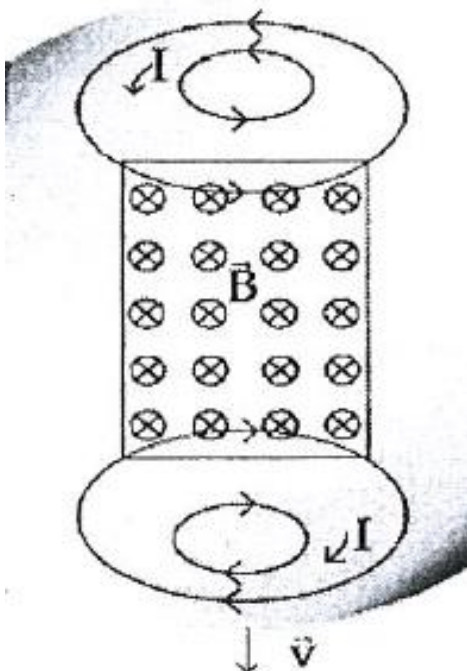


Slika 4.6. Shema nastanka kružne struje u plaštu kabela

Vrtložna struja, poznata kao Foucault-ova struja, je električna pojava oblika strujnog vrtloga, koja nastaje kad se promjenjivo magnetsko polje premješta preko vodiča ili obrnuto, kad se vodič pomiče u magnetskom polju.

U ovom slučaju magnetsko polje nastalo protjecanjem struje kroz vodiče kabela inducira površinske struje u metalnom plaštu kabela. Jakost struje je najveća na površini plašta i naglo opada s dubinom plašta.

Ovi strujni vrtlozi stvaraju elektromagnetsko polje koje se suprotavlja primjenjenom primarnom magnetskom polju (slika 4.7.).



Slika 4.7. Shematski prikaz nastanka vrtložne struje u plaštu kabela

Vrtložne struje stvaraju gubitke u metalnom plaštu, poznate kao Jouleovi gubici, u vidu oslobođene topline. Ovi gubici se evidentiraju u smislu povećanja otpora vodiča kabela.

Gubici nastali zbog kružnih struja imaju obično znatno veće iznose od gubitaka usljed vrtložnih struja, te se potonji zanemaruju kada plaštevima ili električnim zaštitama teku kružne struje. Gubici u plaštu ili električnoj zaštiti jednožilnih kabela mogu značajno utjecati na zagrijavanje i dozvoljenu strujnu opteretivost.

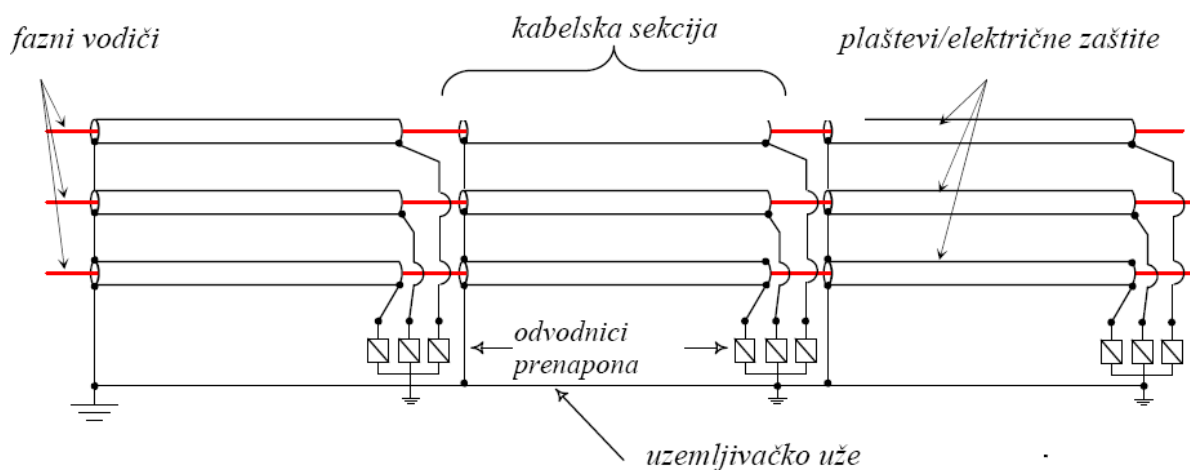
Kod izračunavanja gubitaka u metalnom plaštu kabela navesti ćemo tri karakteristična slučaja obzirom na njihovu konstrukciju i način polaganja:

- a) Tri jednožilna kabela (u trokutnoj formi), plaštevima spojeni na oba kraja
- b) Tri jednožilna kabela položena u ravnini, s pravilnim prepletom, plaštevima spojeni na oba kraja
- c) Tri jednožilna kabela položena u ravnini, bez izmjene, plaštevima spojeni na oba kraja

4.1.2.3. Uzemljenje kabela

Postoje tri osnovna načina spajanja plašteva/električnih zaštita kabljske sekcije, tj. dijela kabljske trase: spajanje i uzemljenje na jednom kraju (*eng. single-point bonding*), spajanje i uzemljenje na oba kraja (*eng. solid bonding*) i električno preplitanje (*eng. cross bonding*).

Spajanje i uzemljenje na jednom kraju, slika 4.8, dovodi potencijal jednog kraja praktično na nulu, ali se veličina induciranog napona (promjenljivi magnetski tok ulančuje plašteve/električne zaštite inducirajući u njima napone) povećava s udaljenošću od uzemljene točke, strujom faznog vodiča i razmakom među fazama. Kroz plašteve teku samo vrtložne struje, stvarajući dodatne gubitke koji negativno utječu na dozvoljenu strujnu opteretivost. Na otvorenom (slobodnom) kraju priključuju se odvodnici prenapona, slika 4.8, čiji zadatak je da ograniče inducirani napon na dozvoljenu vrijednost. Dozvoljene vrijednosti napona određuju duljinu kabljske sekcije kod ovog tipa uzemljenja.



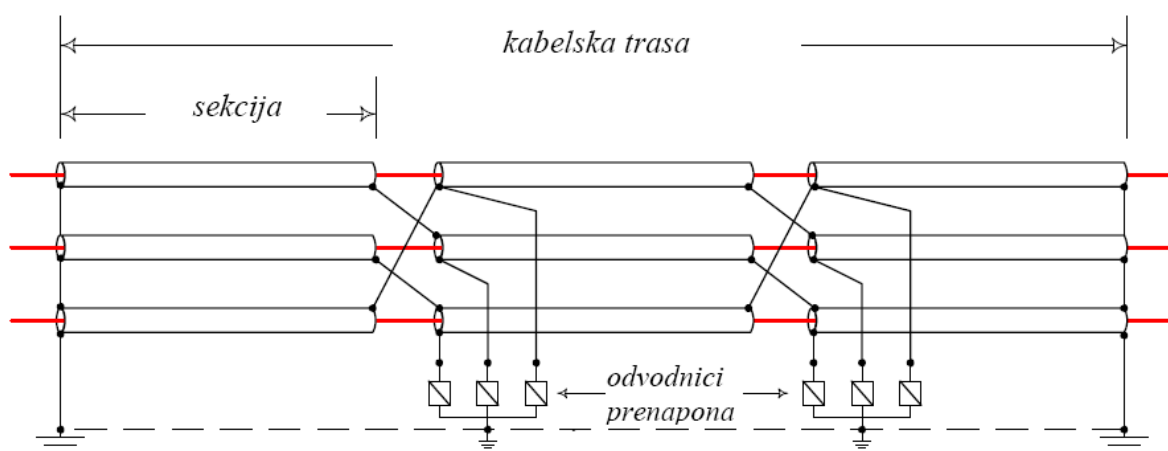
Slika 4.8: Spajanje i uzemljenje na jednom kraju

Spajanje i uzemljenje na oba kraja dovodi krajeve kabljske sekcije praktično na potencijal zemlje, ali se zato kroz plašteve/električne zaštite i zemlju, koji zajedno tvore zatvoreni strujni krug, zatvaraju kružne struje, koje su znatno veće od vrtložnih struja. One na otporu plašta/električne zaštite stvaraju gubitke u plaštu, koji dodatno zagrijevaju kabel, te mu na taj način osjetno smanjuju dozvoljenu strujnu opteretivost.

Električno preplitanje predstavlja metodu koja osjetno reducira inducirane napone, a time i kružne struje, pritom ne ograničavajući duljinu kabljskog voda. Kabljska trasa dijeli se na tri jednaka dijela (sekcije), slika 4.9, pri čemu se plaštevi/električne zaštite prekidaju na svakoj spojnici. Plaštevi/električne zaštite se međusobno vodljivo povezuju ili električki prepleću na način prikazan na slici 4.9.

Ako su kabele položeni u trolisnoj konfiguraciji, inducirani naponi u plaštevima/električnim zaštitama koje su međusobno povezane sastavljaju u teoretskom slučaju simetrični sustav (naponi istih amplituda, međusobno fazno pomaknuti za 120°), odnosno napon petlje koju čine povezani dijelovi s uzemljivačkim užetom ili zemljom jednak je nuli. Posljedično su i kružne struje jednake nuli, te u plaštevima/električnim zaštitama postoje samo gubici zbog vrtložnih struja.

Ipak, presjeci, duljine i razmaci u svakoj sekciji nisu potpuno identični zbog čega kružne struje u praksi neće biti u potpunosti eliminirane. Duljina svake sekcije ograničena je naponom na njenom kraju, koji se javlja između pojedinog plašta i zemlje, odnosno između plašteva. U slučaju dugih kablskih vodova, trasa se može podijeliti na nekoliko dijelova, od kojih se svaki sastoji od tri sekcije prikazane na slici 4.9.



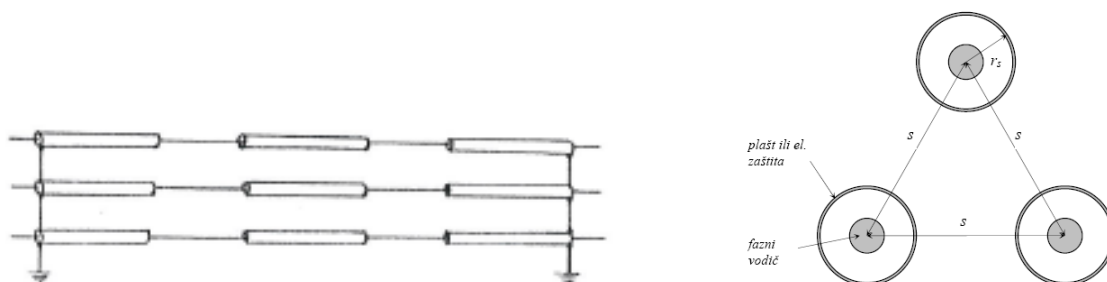
Slika 4.9: Električno preplitanje

Ako kabljski vod nije položen u trolisnom već u ravnom rasporedu, tada se u međusobno povezanim plaštevima/električnim zaštitama neće inducirati naponi koji tvore simetrični sustav, jer kabele nisu prostorno simetrično raspoređeni, te se u tom slučaju kabele moraju i transponirati. Transponiranje se sastoji od fizičkog premještanja svakog kabela na način da zauzima svaki od tri moguća položaja dužinom koja obuhvaća tri sekcije. Treba napomenuti da je električno preplitanje i bez transponiranja tehnički komplicanije i financijski zahtjevnije od spajanja i uzemljivanja na jednom ili oba kraja. U praksi se transponiranje koristi uglavnom u slučaju dugih i visoko opterećenih kabljskih vodova.

U tranzijentnim stanjima mogu se pojaviti nedozvoljeno visoki naponi na plaštevima/električnim zaštitama kabela bez obzira na električno preplitanje. Takvi naponi se ne mogu izbjeći, ali bi upotreba odgovarajućeg odvodnika prenapona trebala spriječiti oštećenja kablskog sustava.

a) Tri jednožilna kabela (u trokutnoj formi), plaševi spojeni na oba kraja

Ako su plaševi/električne zaštite spojeni na oba kraja u slučaju polaganja kablenskog voda u trokutnom rasporedu, struje u plaševima/električnim zaštitama tvore simetrični sustav, jer se svaki kabel nalazi u istom položaju u prostoru u odnosu na preostala dva kabela, *slika 4.10*. Zato ne postoji razlika potencijala među zvjezdištima plašteva, te se kroz zemlju (ako su plaševi uzemljeni na oba kraja) teoretski neće zatvarati nikakva struja.



Slika 4.10. Shema rasporeda i spajanja plašteva jednožilnih kabela

$$X = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2s}{d} = 2\omega 10^{-7} \ln \frac{2s}{d} \quad (4.14)$$

Konačno se za faktor gubitaka zbog kružnih struja za vod u trokutnom rasporedu dobiva:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} \quad (4.15)$$

gdje je:

R_s - otpor plašta ili električne zaštite na najvišoj radnoj temperaturi (Ω/m)

X – induktivni otpor metalnog plašta ili električne zaštite (Ω/m)

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – kutna frekvencija 1/s

d – srednji promjer plašta (mm)

$$R_s = \frac{\rho_{s20}}{d\pi_s} [1 + \alpha_{20}(\theta_s - 20)], \quad (4.16)$$

gdje su:

ρ_{s20} – električna otpornost plašta na temperaturi $20^\circ C$,

α_{s20} [$1/^\circ C$] – temperaturni koeficijent plašta pri $20^\circ C$,

θ_s [$^\circ C$] – radna temperatura plašta.

Radna temperatura plašta ili električne zaštite θ_s može se izračunati pomoću sljedeće relacije:

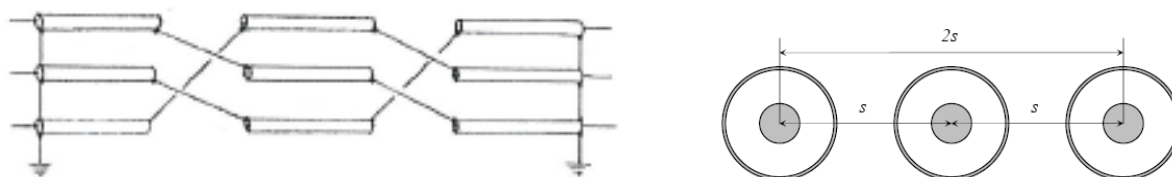
$$\theta_s = \theta - (I^2 R + 0.5 W_d) T_1, \quad (4.17)$$

gdje je T_1 toplinski otpor između faznog vodiča i plašta/električne zaštite.

Pri čemu je $\lambda_1'' = 0$, tj. vrtložne struje su zanemarive, osim za kabele velikih presjeka vodiča.

b) Tri jednožilna kabela položena u ravnini, s pravilnim prepletom, plaševi spojeni na oba kraja

Ako su plaševi/električne zaštite spojeni na oba kraja u slučaju polaganja kabelskog voda u ravnom rasporedu, njihove struje ne tvore simetrični sustav, jer se vanjski i srednji kabel ne nalaze u istom položaju u prostoru u odnosu na preostale kabele, *slika 4.11*. Zato bi postojala razlika potencijala među zvjezdištima neuzemljenih plašteva/električnih zaštita. Poznato je da uzemljenje na oba kraja ne uzrokuje osjetno drugačiju distribuciju struja u plaštevima/električnim zaštitama u odnosu na struje koje bi tekle u slučaju neuzemljenih plašteva/električnih zaštita.



Slika 4.11. Shema rasporeda s prepletom spajanja plašteva jednožilnih kabela

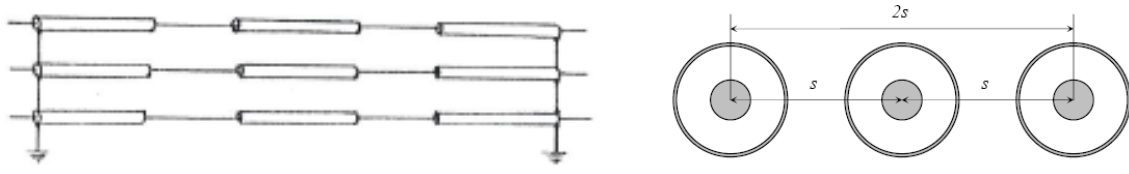
Faktor gubitaka se izračunava prema:

$$\lambda_1' = \frac{R_e}{R} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_1} \right)^2} \quad (4.18)$$

$$X_1 = 2\pi f \cdot 10^{-7} \ln \left[2\sqrt[3]{2} \cdot \left(\frac{s}{d_s} \right) \right] \quad (4.19)$$

Pri čemu je $\lambda_1'' = 0$, tj. vrtložne struje su zanemarive, osim za kabele velikih presjeka vodiča.

c) Tri jednožilna kabela položena u ravnini, bez izmjene, plaševi spojeni na oba kraja



Slika 4.12. Shema rasporeda spajanja plašteva jednožilnih kabela

Faktor gubitaka za vanjske kabele je:

$$\lambda_{11}' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0.75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0.25Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right], \quad (4.20)$$

$$\lambda_{12}' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0.75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0.25Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right], \quad (4.21)$$

a za srednji kabel:

$$\lambda_{1m}' = \frac{R_s}{R} \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2}, \quad (4.22)$$

gdje su:

λ_{11}' – faktor gubitaka u plaštu ili električnoj zaštiti vanjskog kabela čija faza slijedi fazu srednjeg kabela,

λ_{1m}' – faktor gubitaka srednjeg kabela,

λ_{12}' – faktor gubitaka u plaštu ili električnoj zaštiti vanjskog kabela čija faza prethodi fazi srednjeg kabela.

$$P = X + X_m, \quad (4.23)$$

$$Q = X - \frac{X_m}{3}. \quad (4.24)$$

$$X = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2s}{d} = 2\omega 10^{-7} \ln \frac{2s}{d}, \quad (4.25)$$

$$X_m = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln 2, \quad (4.26)$$

Pri čemu je $\lambda_1'' = 0$, tj. vrtložne struje su zanemarive, osim za kabele velikih presjeka vodiča.

4.1.2.4. Gubici u armaturi

Gubici u armaturi jednožilnih kabela, ako je ona izrađena od nemagnetskih materijala, računaju se koristeći izraze za gubitke u plaštu/električnoj zaštiti (*odjeljak 4.1.2.2*), ali se umjesto otpora plašta/električne zaštite uzima ekvivalentni otpor paralelne kombinacije otpora armature R_A i otpora plašta/električne zaštite R_s :

$$R_e = \frac{R_A R_s}{R_A + R_s}. \quad (4.27)$$

Također, srednji dijametar plašta/električne zaštite d se u navedenim izrazima mijenja i iznosi:

$$d' = \sqrt{\frac{d^2 + d_2^2}{2}}, \quad (4.28)$$

gdje je d_2 srednji dijametar armature.

Radna temperatura armature θ_{ar} jednožilnih kabela može se izračunati koristeći sljedeći izraz:

$$\theta_{ar} = \theta_s - [I^2 R(1 + \lambda_1) + W_d] n T_2, \quad (4.29)$$

gdje je T_2 toplinski otpor između plašta/električne zaštite i armature, a n broj žila. Odgovarajuće vrijednosti toplinskih otpornosti i temperaturnih koeficijenata materijala koji se koriste za izradu armatura dani su u *tablici 4.5*. Otpor armature na radnoj temperaturi je:

$$R_A = R_{A0} [1 + \alpha_{20} (\theta_{ar} - 20)], \quad (4.30)$$

gdje je R_{A0} otpor armature na 20°C .

IEC norme vezane za gubitke u armaturi koja je izrađena od nemagnetskih traka daju sljedeće smjernice za proračun djelatnih otpora armature:

- Ako traka ima vrlo dug korak helikoide, odnosno traka je gotovo longitudinalna, otpor trake se uzima ekvivalentnim otporu šupljeg cilindra volumena jednakog volumenu trake po jedinici dužine.
- Ako je kut uspona oko 54° s obzirom na os kabela, uzima se otpor trake u dvostrukom iznosu u odnosu na slučaj pod a), odnosno otpor trake dva puta je veći od otpora šupljeg cilindra pod a).
- Ako traka ima vrlo kratak korak helikoide, otpor trake uzima se beskonačno velikim, odnosno gubici u armaturi uzimaju se jednakim nuli.

Gubici vrtložnih struja i histereze u čeličnim žicama ili trakama mogu imati vrlo visoke iznose. Proračun gubitaka u „magnetskoj armaturi“ prelazi okvir nastavnog programa kolegija „Energetski kabele“. [3]

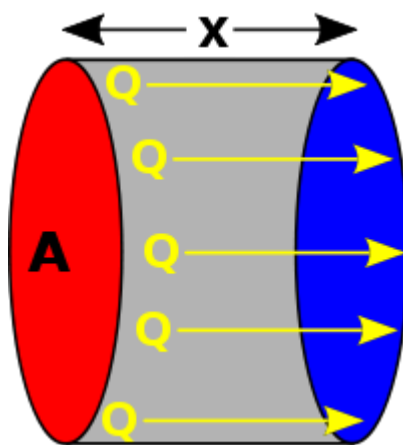
5. PRIJENOS TOPLINE KONDUKCIJOM

Toplina, kao jedan od oblika energije, prenosi se od područja više prema području niže temperature. Tri su načina prijenosa topline:

- kondukcija (vođenje),
- konvekcija (strujanje),
- radijacija (zračenje).

Prijenos topline u čvrstim tijelima na način da zagrijane molekule predaju dio energije susjednim molekulama naziva se kondukcija. U fluidima, odnosno plinovima i tekućinama, toplina se većim dijelom prenosi procesom nazvanim konvekcija. Fluid koji se nalazi u blizini izvora topline se širi, odnosno specifična gustoća mu pada u odnosu na hladniji fluid. Kao posljedica, topliji fluid se uzdiže. Hladniji fluid pada i zauzima njegovo mjesto, te se proces ponavlja. Dakle, prijenos topline u plinovima i tekućinama odvija se gibanjem fluida.

Pri prijenosu topline zračenjem, toplinska energija tijela pretvara se u elektromagnetsko zračenje, koje tijelo emitira u okolni prostor. Dominantni način prijenosa topline u domenama s podzemnim kabelskim vodovima, položenim direktno u zemlju, posteljicu ili cijevni blok, je kondukcija. [3]



Slika 5.1. Kondukcija topline ili termalna kondukcija je spontani prijenos toplinske energije kroz tvar, iz područja više temperature u područje niže temperature, i stoga djeluje u svrhu izjednačavanja temperaturnih razlika.

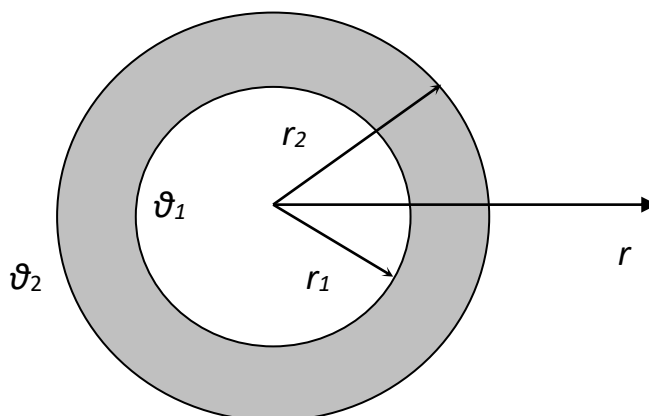
6. TOPLINSKI OTPORI I KAPACITETI

Proračuni dozvoljenih strujnih opteretivosti i zagrijavanja energetskih kabela u stacionarnim i tranzijentnim stanjima provode se korištenjem relacija za odgovarajuće toplinske otpore i kapacitete. **Toplinski otpor** je fizikalna veličina koja ukazuje na sposobnost tijela da se **opire** prijenosu topline, dok je **toplinski kapacitet** veličina koja predstavlja sposobnost tijela da **spremi** toplinsku energiju. Unutrašnji toplinski otpori su otpori koji se odnose na dijelove energetskih kabela. Vanjski toplinski otpor odnosi se na domene izvan vanjske površine kabela. Vanjski otpor osjetno je veći od unutrašnjih otpora kabela te ima najveći utjecaj na dozvoljenu strujnu opteretivost i zagrijavanje kabela.

6.1. Unutrašnji toplinski otpor

6.1.1. Jednožilni kabeli s okruglim vodičima

Toplinski otpori metalnih dijelova kabela su vrlo mali jer su metali odlični vodiči topline, te se u proračunima zanemaruju. Jednožilni energetski kabeli imaju dva izolacijska sloja (izolaciju i vanjski omotač), odnosno tri ukoliko kabel ima armaturu (postoji izolacijski sloj smješten između plašta/električne zaštite i armature). Svakom izolacijskom sloju pripada odgovarajući toplinski otpor. Izolacijski slojevi unutar kabela imaju oblik šupljeg cilindra, ako se radi o kabelima s okruglim vodičima koji se najčešće susreću u praksi na srednjim i visokim naponskim razinama, *slika 6.1*. Pritom se poluvodljivi zasloni smatraju dijelom izolacije pri proračunima toplinskog otpora izolacije.



Slika 6.1: Izolacijski sloj u obliku šupljeg cilindra

Za prijenos topline kondukcijom, slijedi:

$$W = \frac{2\pi}{\rho \ln \frac{r_2}{r_1}} (\theta_1 - \theta_2). \quad (6.1)$$

Toplinski otpor izolacijskog cilindričnog sloja može se odrediti koristeći toplinski ekvivalent Omovog zakona:

$$W = \frac{\theta_1 - \theta_2}{T}, \quad (6.2)$$

gdje je T toplinski otpor izolacijskog sloja. Uspoređujući (6.1) i (6.2), toplinski otpor izolacijskog sloja kod prijenosa topline kondukcijom je:

$$T = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (6.3)$$

Prvi izolacijski sloj energetskog kabela, polazeći od faznog vodiča, obuhvaća samu izolaciju i poluvodljive zaslone vodiča i izolacije. Ako je ukupna debljina sloja t_1 , kvocijent radijusa iz (6.3) može se zapisati i kao kvocijent dijametara, pri čemu se manji dijametar odnosi na fazni vodič, a veći izražava kao zbroj dijametra faznog vodiča d_c i dvostruke debljine izolacijskog sloja $2t_1$. Za toplinski otpor dijela kabela između faznog vodiča i plašta/električne zaštite slijedi:

$$T_1 = \frac{\rho_{T1}}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_1}{d_c} \right), \quad (6.4)$$

gdje je ρ_{T1} – toplinska otpornost izolacije. Toplinske otpornosti materijala koji se koriste u domenama s energetskim kabelima iznesene su u *Tablici 6.1*.

MATERIJAL	TOPLINSKA OTPORNOST ρ [K·m/W]
<i>IZOLACIJSKI MATERIJALI *</i>	
Papirna izolacija masenog kabela	6.0
Papirna izolacija uljnog kabela	5.0
Papirna izolacija u plinskim kabelima kod kojih je plin u dodiru s plaštem ili vanjskim omotačem	5.5
Papirna izolacija u plinskim kabelima kod kojih je plin u dodiru s izolacijom koja je:	
a) prethodno impregnirana	5.5
b) impregnirana kabelskom masom	6.0
Polietilen (PE)	3.5
Umreženi polietilen (XLPE)	3.5
Papir-polipropilen (PPL)	5.5
Polivinil klorid (PVC)	
≤ 3 kV	5.0
> 3 kV	6.0
Etilen-propilen-guma (EPR)	
≤ 3 kV	3.5
> 3 kV	5.0
Butil - guma	5.0
Guma	5.0
<i>MATERIJALI ZAŠTITNIH OMOTAČA</i>	
Kombinacija jute i vlaknastih materijala	5.0
Gumena slojevitá zaštita	6.0
Polikloropren	5.5
Polivinil klorid (PVC)	
≤ 35 kV	5.0
> 35 kV	6.0
PVC/bitumen na korugiranim aluminijskim plaštevima	6.0
Polietilen (PE)	3.5
<i>MATERIJALI ZA CIJEVNE BLOKOVE</i>	
Beton	1.0
Vlaknasti materijali	4.8
Azbest	2.0
Zemljani materijali	1.2
Polivinil klorid (PVC)	6.0
Polietilen (PE)	3.5
* Zbog jednostavnosti proračuna dozvoljenih strujnih opteretivosti i zagrijavanja pretpostavlja se da su toplinska svojstva poluvodljivih zaslona jednaka svojstvima izolacije.	

U slučaju da jednožilni kabel ima korugirani plašt, debljina izolacije t_1 izračunava se na temelju srednjeg unutrašnjeg dijametra plašta, te vrijedi:

$$t_1 = \frac{D_{it} + D_{oc}}{2} - t_s, \quad (6.5)$$

gdje su:

D_{it} - vanjski dijametar imaginarnog cilindra koji dodiruje dolove narebrenog plašta,

D_{oc} - unutrašnji dijametar imaginarnog šupljeg cilindra koji dodiruje brijegove narebrenog plašta,

t_s – debljina plašta.

Analogno izvodu za T_1 , izvodi se i toplinski otpor vanjskog omotača:

$$T_3 = \frac{\rho_{T3}}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_3}{D_s} \right), \quad (6.6)$$

gdje su:

ρ_{T3} – toplinska otpornost vanjskog omotača,

t_3 – debljina vanjskog omotača,

D_s – vanjski dijametar plašta/električne zaštite.

U slučaju korugiranog plašta vrijedi:

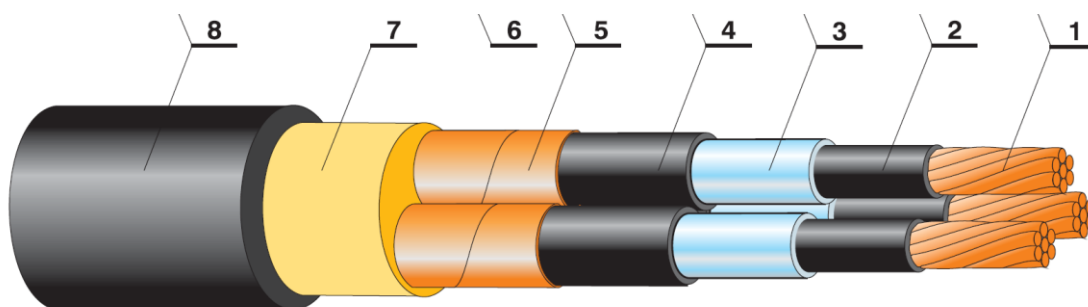
$$T_3 = \frac{\rho_{T3}}{2\pi} \ln \left(\frac{D_{oc} + 2t_3}{\frac{D_{oc} + D_{it}}{2} + t_s} \right). \quad (6.7)$$

Toplinski otpor između plašta/električne zaštite i armature kabela, T_2 , postoji samo u slučaju **armiranih kabela**. Računa se pomoću relacije (6.6) uz odgovarajuće promjene debljine sloja i toplinske otpornosti ($t_3 \rightarrow t_2$ i $\rho_{T3} \rightarrow \rho_{T2}$). Otpor vanjskog omotača, T_3 , tada se dobiva zamjenom vanjskog dijametra plašta/električne zaštite u izrazu (6.6) s dijametrom preko armature D_a' .

6.1.2. Trožilni kabele s okruglim vodičima

Za razliku od jednožilnih kabela, čiji su unutrašnji toplinski otpori određeni analitičkim putem, relacije za unutrašnje otpore višezilnih kabela mogu se dobiti samo korištenjem numeričkih metoda ili eksperimentalnim načinom.

Za trožilne kabele s čvrstom izolacijom (XLPE, WTR XLPE, PE, EPR, PVC) i okruglim vodičima, koji imaju metalne trake kao električnu zaštitu (*slika 6.2*), ili metalni plašt oko izolacije svakog okruglog faznog vodiča, toplinski otpor T_1 računa se na isti način kao za jednožilne kabele, relacija (6.4), jer trake ili plaševi doprinose boljem odvođenju topline.



1 fazni vodič; 2 poluvodljivi zaslon vodiča; 3 izolacija od umreženog polietilena; 4 poluvodljivi zaslon izolacije; 5 električna zaštita (metalni ekran) od bakrene trake; 6 ispuna od PVC-a; 7 vanjski omotač od PVC-a

Slika 6.2: Trožilni kabel s električnom zaštitom oko svake žile i ispunom od PVC-a

U nastavku su dane konačno primjenjive relacije za unutrašnji otpor izolacije T_1 u slučajevima nekoliko različitih konstrukcija trožilnih kabela. Za trožilne kabele koji: a) nemaju plašt/električnu zaštitu oko izolacije svakog okruglog faznog vodiča, već zajednički plašt/električnu zaštitu oko sve tri žile (pojasni kabel), *slika 6.3*, ili b) imaju električnu zaštitu oko izolacije svakog okruglog faznog vodiča, ali izvedenu od razmaknutih žica, toplinski otpor izolacije se računa koristeći izraz:

$$T_1 = \frac{\rho_i}{2\pi} G + 0.031(\rho_f - \rho_i) e^{0.67 \frac{t_1}{d_c}}, \quad (6.8)$$

gdje su:

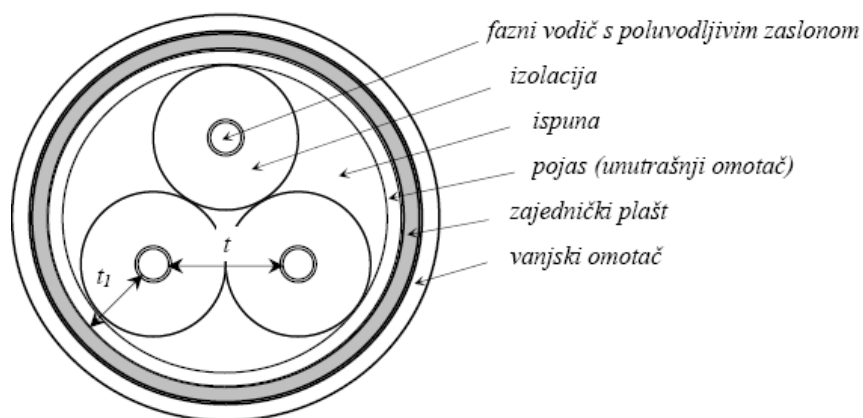
ρ_i [Km/W] – toplinska otpornost izolacije,

ρ_f [Km/W] – toplinska otpornost ispune,

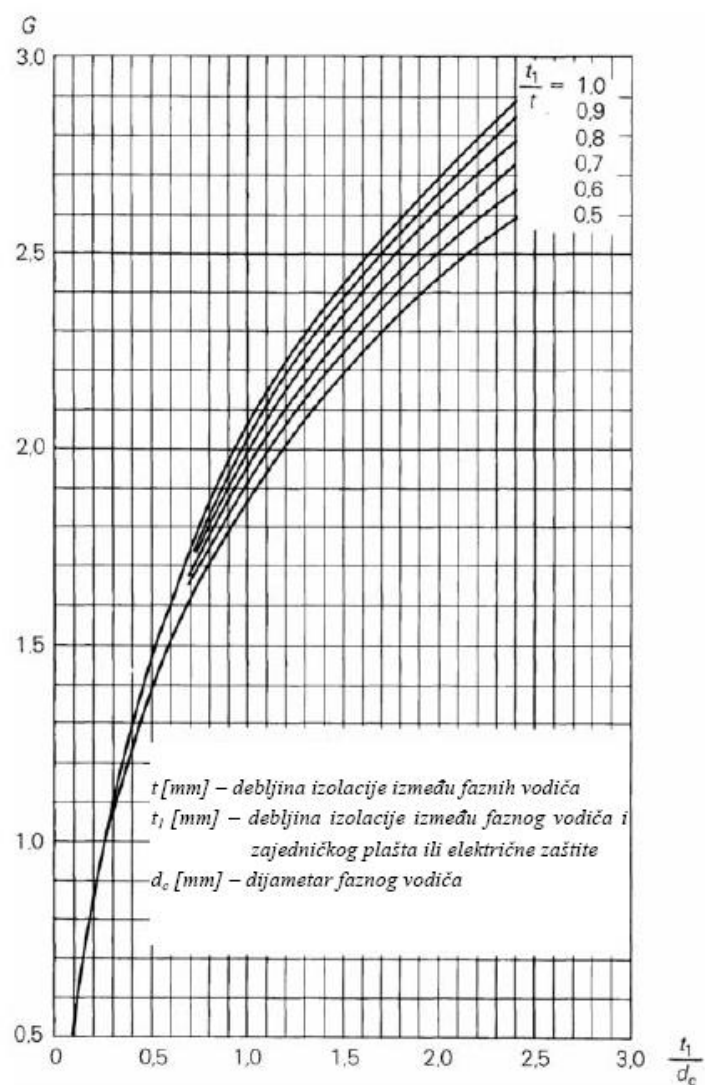
t_1 [mm] – debljina izolacije između faznog vodiča i zajedničkog plašta/električne zaštite, *slika 6.3*,

d_c [mm] – dijametar faznog vodiča,

G – geometrijski faktor, *slika 6.4*.



Slika 6.3: Pojasni kabel

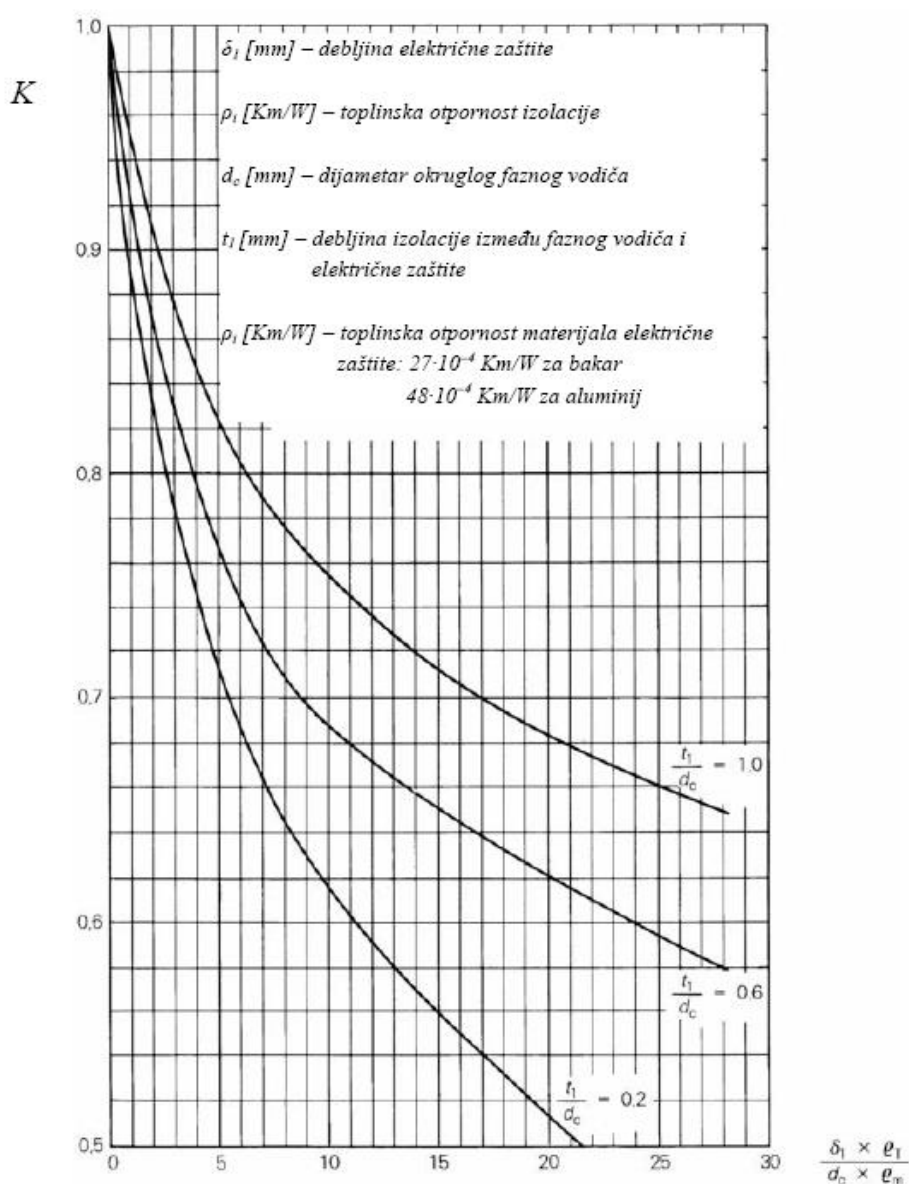


Slika 6.4: Geometrijski faktor za pojasne kabele ili za kabele kod kojih je električna zaštita izvedena od razmaknutih žica

Za trožilne kabele s okruglim faznim vodičima i papirnom izolacijom, koji imaju metalne trake kao električnu zaštitu oko izolacije svakog okruglog faznog vodiča, uzima se da je $t_1/t = 0.5$, a toplinski otpor se izračunava uzimajući u obzir geometrijski faktor G i faktor zaslanjanja K :

$$T_1 = K \frac{\rho_i}{2\pi} G. \quad (6.9)$$

Geometrijski faktor G očitava se sa slike 6.4, kao i za kabele koji nemaju plašt/električnu zaštitu oko izolacije svakog okruglog faznog vodiča, dok se utjecaj metalnih traka uzima u obzir s faktorom zaslanjanja K , slika 6.5.



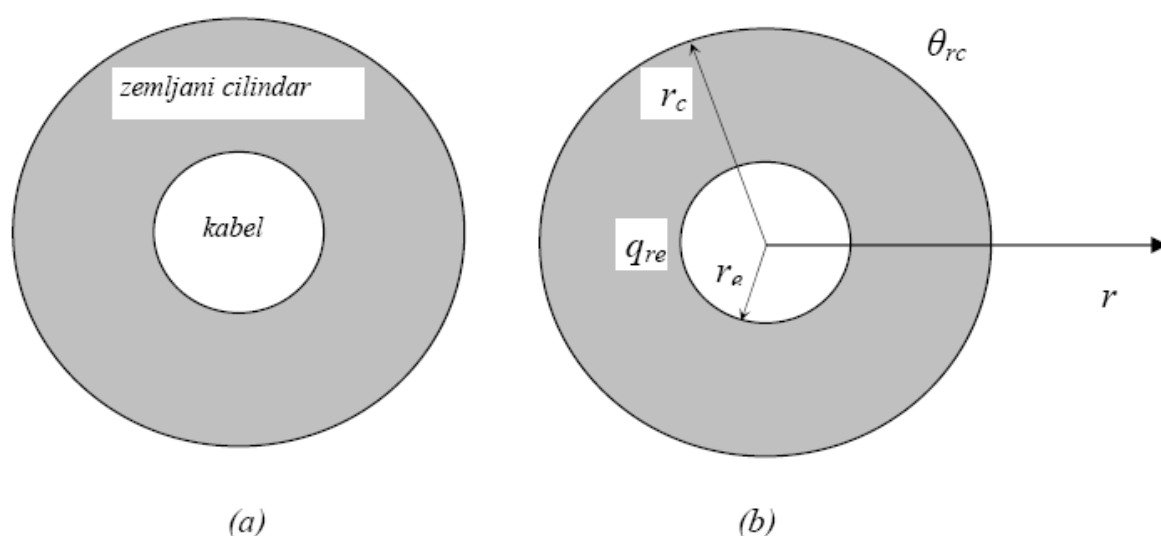
Slika 6.5: Faktor zaslanjanja za trožilni kabel s papirnom izolacijom koji ima električnu zaštitu u obliku metalnih traka oko izolacije svakog faznog vodiča

6.2. Vanjski toplinski otpori

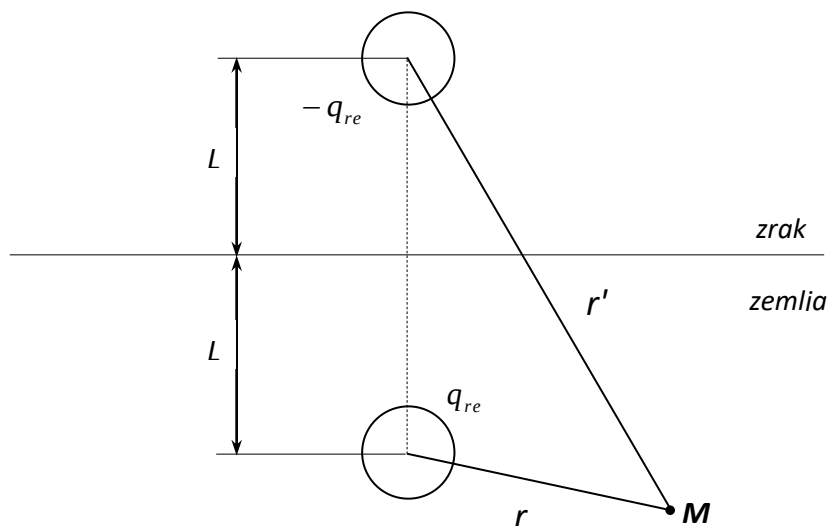
Dozvoljena strujna opteretivost i zagrijavanje energetskog kabela u velikoj mjeri ovise o vanjskom toplinskom otporu T_4 . Vanjski toplinski otpor funkcija je: a) toplinskih značajki materijala koji okružuju kabel, b) vanjskog dijametra kabela, c) dubine polaganja, d) toplinskih polja susjednih kabela koja su funkcija i e) načina uzemljenja njihovih plašteva/električnih zaštita.

6.2.1. Vanjski toplinski otpor jednog samog kabela položenog u zemlju

Vanjski toplinski otpor samo jednog kabela položenog u zemlju određuje se uz pretpostavku da je toplinska otpornost zemlje ρ_s konstantna, odnosno neovisna o: količini vlage, zbijenosti i granulaciji zemlje, temperaturi, itd. Rješenje za vanjski otpor može se izvesti pomoću analitičkog rješenja jednostavnog problema zagrijavanja zemljanog cilindra koji obuhvaća energetski kabel, *slika 6.6a* i metode odslikavanja *slika 6.7*. Utjecaj energetskog kabela na zemljani cilindar se može uzeti u obzir pomoću zadane gustoće toplinskog toka q_{re} na unutrašnjem radijusu zemljanog cilindra koji je jednak vanjskom radijusu kabela r_e , *slika 6.6b*. Na vanjskom radijusu cilindra r_c zadana je temperatura θ_{rc} .



Slika 6.6: Zemljani cilindar koji obuhvaća energetski kabel



Slika 6.7: Metoda odslikavanja

Iz relacije (6.2) slijedi izraz za vanjski toplinski otpor jednog samog kabla položenog u zemlju:

$$T_4 = \frac{\Delta\theta_e}{W_t}. \quad (6.10)$$

$$\Delta\theta_e = \frac{\rho_s}{2\pi} W_t \ln(2u). \quad (6.11)$$

Uvrštavajući (6.11) u (6.10) dobiva se:

$$T_4 = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln(2u). \quad (6.12)$$

Uvođenjem površine zemlje kao izoterme, problem više nije radijalno simetričan, odnosno izoterme više nisu idealne kružnice, a gustoća toplinskog toka q_{re} na površini kabla nije konstantna. U tom slučaju vrijedi:

$$\Delta\theta_e = \frac{\rho_s}{2\pi} W_t \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}), \quad (6.13)$$

dok za vanjski toplinski otpor na temelju (6.12) slijedi:

$$T_4 = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}). \quad (6.14)$$

Ako je $u > 10$ proračun vanjskog toplinskog otpora jednog samog kabla može se računati pomoću izraza (6.12). U praksi je u uglavnom veće od 10.

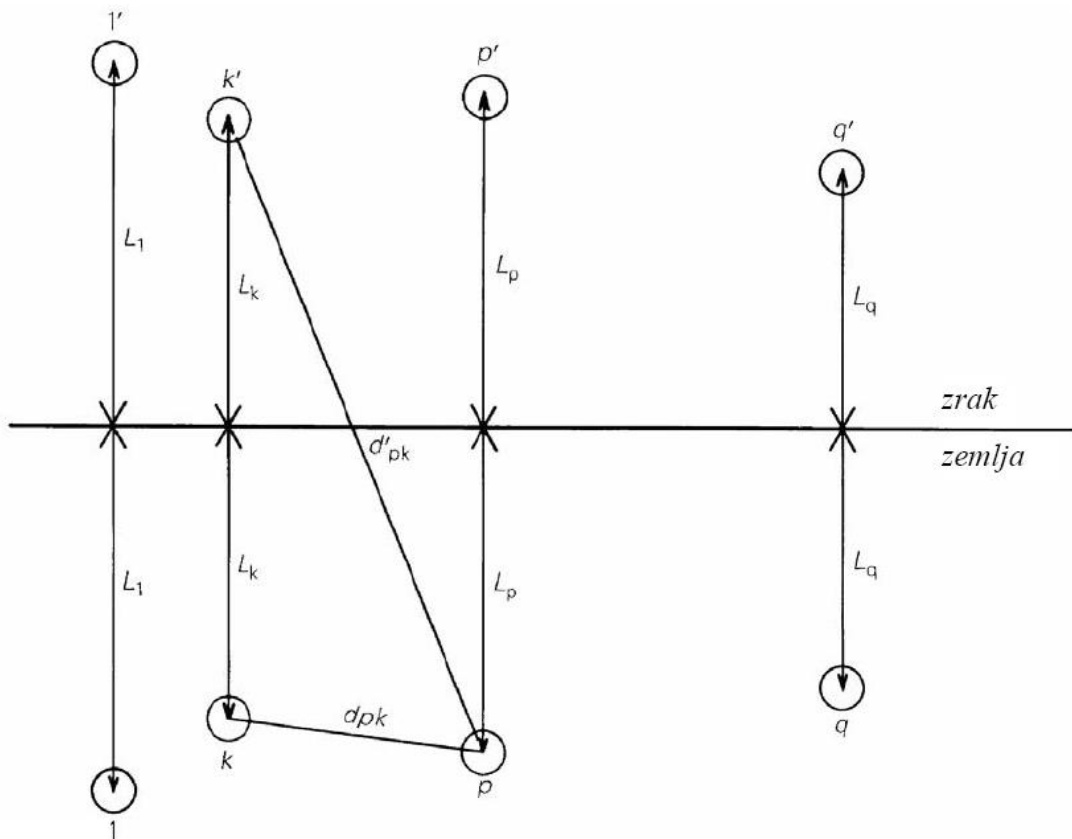
6.2.2. Vanjski toplinski otpor grupe razmaknutih kabela položenih u zemlju

Izraz za toplinski otpor grupe razmaknutih kabela položenih u zemlju izvodi se uz pretpostavku da su kabele dovoljno međusobno udaljeni jedan od drugog (najmanje dva dijametra, $s \geq 2D_e$) kako bi se primijenio zakon superpozicije bez unošenja većih pogrešaka u proračun. U tom slučaju je ukupni porast temperature u nekoj točki jednak zbroju porasta temperatura koje su posljedica gubitaka u svakom kabelu.

Neka je potrebno odrediti zagrijavanje ili dozvoljenu strujnu opteretivost kabela p u grupi razmaknutih kabela položenih u zemlju.

$$\Delta\theta_p = \Delta\theta_{p1} + \dots + \Delta\theta_{pk} + \dots + \Delta\theta_{pp} + \dots + \Delta\theta_{pq}, \quad (6.15)$$

$$T_4^p = \frac{\Delta\theta_p}{W_p}. \quad (6.16)$$

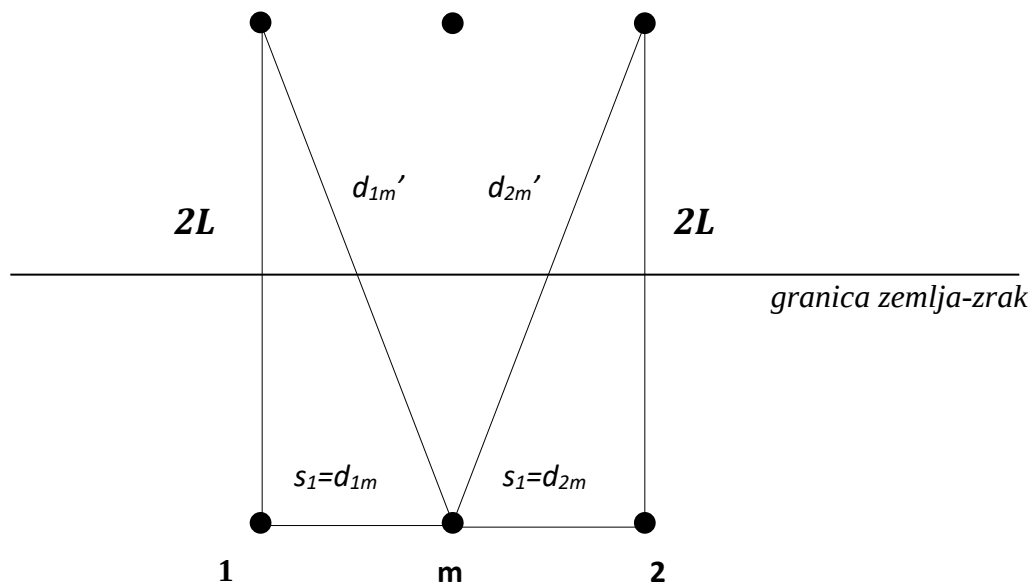


Slika 6.8: Grupa od q razmaknutih kabela sa svojim slikama

U slučaju grupe identičnih, jednako opterećenih kabela, proračuni se mogu pojednostavniti tako da se odredi samo zagrijavanje ili dozvoljena strujna opteretivost najtoplijeg kabela. U najvećem broju slučajeva se može iz same geometrijske konfiguracije grupe procijeniti koji kabel će se najviše zagrijavati.

Za vanjski toplinski otpor srednjeg kabela u razmaknutom ravnom rasporedu slijedi:

$$T_4^p = \frac{\rho_s}{2\pi} \left\{ \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) + \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right\}. \quad (6.17)$$



Slika 6.9: Kabelski vod u razmaknutom ravnom rasporedu

6.2.3. Vanjski toplinski otpor voda položenog u zemlju u dodirnom rasporedu

Ako je udaljenost između kabela manja od dva dijametra ($s < 2D_e$) ili su kabele postavljeni u dodirnom rasporedu, princip superpozicije nije primjenjiv jer je toplinsko polje jednog kabela narušeno (izobličeno) poljima ostalih kabela. Vanjski toplinski otpori kabela u dodirnom ravnom ili trolisnom (trokutnom) rasporedu dobiveni su primjenom složenih analitičkih metoda. Zato se iznose samo konačno primjenjive relacije koje su prihvaćene u IEC standardima.

Vanjski toplinski otpor kabelskog voda položenog u ravnom dodirnom rasporedu

Za kabelski vod položen u ravnom dodirnom rasporedu pri čemu kabeli imaju metalne plašteve (plašt praktično predstavlja izotermu), koristi se sljedeća relacija:

$$T_4 = \rho_s [0.475 \ln(2u) - 0.346], \quad \text{za } u \geq 5. \quad (6.18)$$

Ako kabeli nemaju metalne plašteve, već električnu zaštitu, upotrebljava se sljedeći izraz za vanjski toplinski otpor:

$$T_4 = \rho_s [0.475 \ln(2u) - 0.142], \quad \text{za } u \geq 5. \quad (6.19)$$

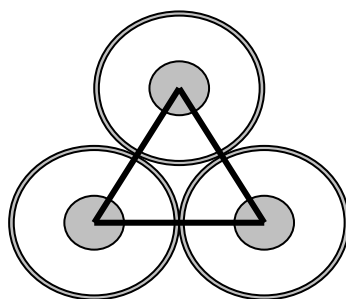
Prethodna relacija uvijek se koristi za kabele s električnim zaštitama izrađenim od bakrenih žica.

Vanjski toplinski otpor kabelskog voda položenog u dodirnom trolisnom rasporedu

Dubina polaganja L se u ovoj konfiguraciji mjeri do centra trolisnog rasporeda. Za kabele s metalnim plaštevima vrijedi:

$$T_4 = \frac{1.5}{\pi} \rho_s [\ln(2u) - 0.630], \quad (6.20)$$

pri čemu se toplinski otpor vanjskog omotača T_3 , izraz (6.6), mora pomnožiti s faktorom 1.6 kojim se uzima u obzir slabije odvođenje topline na dijelu vanjskog omotača kabela koji se nalazi unutar i u blizini istostraničnog trokuta koji povezuje kabelske osi, slika 6.10.



Slika 6.10: Kabelski vod u dodirnom trolisnom rasporedu

Za kabele čija je električna zaštita izvedena od razmaknutih bakrenih žica, kada iznad izolacije ne postoji izotermalna površina, vanjski toplinski otpor je:

$$T_4 = \frac{\rho_s}{2\pi} [\ln(2u) - 2 \ln u]. \quad (6.21)$$

Prethodna relacija može se koristiti i kada je kabelski vod položen u nemetalne cijevi u dodirnom trokutnom rasporedu.

6.2.4. Vanjski toplinski otpor grupe kabela u cijevima položenim u zemlji

U domenama s kabelima u cijevima, koje su položene u zemlju, dominantni način prijenosa topline je kondukcija. Međutim, s površine kabela na unutrašnju stijenku cijevi toplina se u fluidu, koji okružuje kabel, uglavnom prenosi konvekcijom i radijacijom. Vanjski toplinski otpor sastoji se od tri dijela, *slika 6.11*:

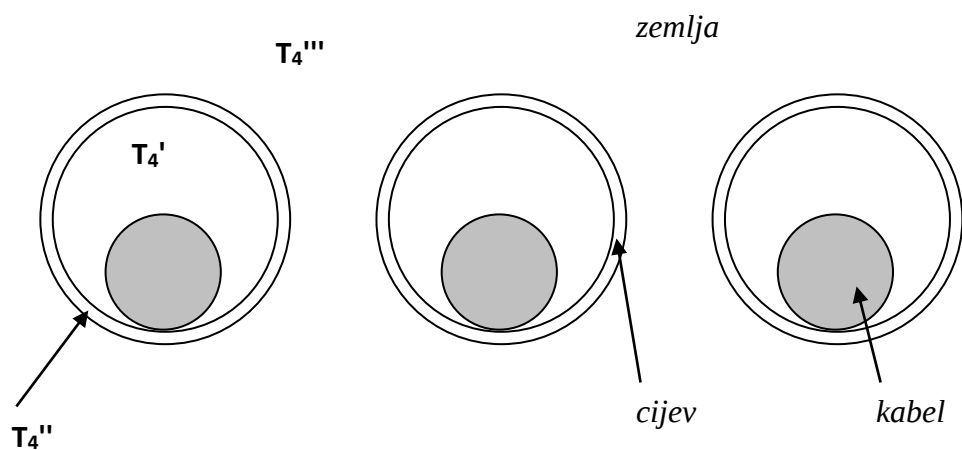
a) toplinski otpor fluida koji se nalazi u prostoru između vanjske površine kabela i unutrašnje stijenke cijevi, T_4' ,

b) toplinski otpor same cijevi, T_4'' ,

c) toplinski otpor dijela domene izvan cijevi, T_4''' .

Ukupni toplinski otpor je:

$$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4''' \quad (6.22)$$

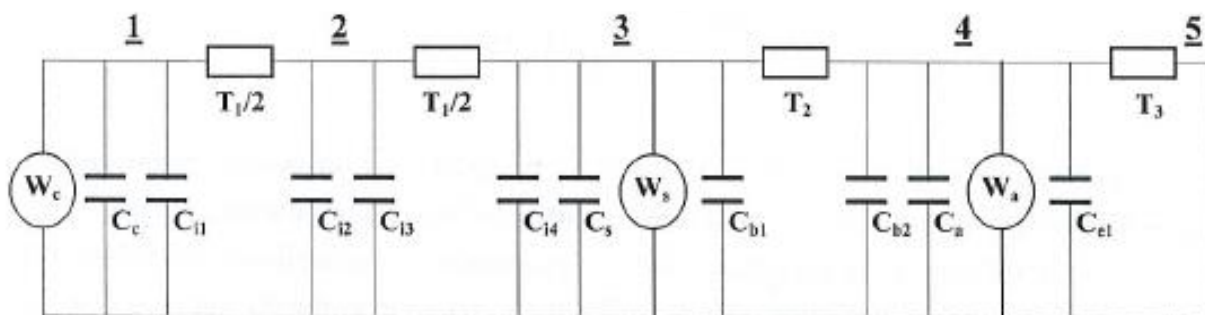


Slika 6.11: Kabelski vod u cijevima položenim u zemlji

6.3. Toplinski kapaciteti

Vremenska ovisnost promjene temperature u točkama energetskih kabela funkcija je toplinskih kapaciteta, koji predstavljaju sposobnost tijela da spremi toplinsku energiju.

Primjenom koncentriranih parametara vremenska promjena temperature može se dobiti u diskretnim točkama (npr. 1 - fazni vodič, 2 - pola debljine izolacije, 3 - vanjska površina izolacije, 4- armatura, 5 - vanjska površina kabela), što je vidljivo na slici 6.12, koja predočava primjer lančane mreže toplinskih otpora i kapaciteta armiranog kabela za prijelazne pojave kratkog trajanja (uglavnom od 10 do 60 min). Toplinski otpor izolacije je podijeljen na dva dijela da se smanji promjena temperature između točaka na koje su priključeni odgovarajući toplinski kapaciteti. [3]



Slika 6.12.: Primjer lančane mreže toplinskih otpora i kapaciteta armiranog kabela za prijelazne pojave kratkog trajanja

7. STRUJNA OPTERETIVOST ENERGETSKIH KABELA

7.1. Dozvoljena strujna opteretivost i zagrijavanje kabela pri stacionarnim uvjetima

Dozvoljena strujna opteretivost i zagrijavanje energetskih kabela funkcija su nekoliko faktora: a) broj i izvedba kabela (materijali i dimenzije), b) materijal/materijali unutar koje su kabela položeni, c) položaj kabela jedan spram drugog te u odnosu na površinu zemlje, d) način uzemljenja plašteva/električnih zaštita, e) radni napon, f) temperatura ambijenta. Relacije za dozvoljenu strujnu opteretivost i zagrijavanje kabela pri stacionarnim uvjetima (konstantna opteretivost i temperatura) mogu se dobiti korištenjem izraza za unutrašnje i vanjske toplinske otpore koji su izneseni u prethodnom poglavlju i modifikacijom lančane mreže na slici 6.13. Dozvoljena opteretivost pri stacionarnim uvjetima I predstavlja najveću konstantnu struju koju izolacija energetskog kabela može podnijeti, a da se pritom ne zagrije na temperaturu koja prelazi maksimalnu dozvoljenu vrijednost (za XLPE kabele ona je u najvećem broju slučajeva 90°C).

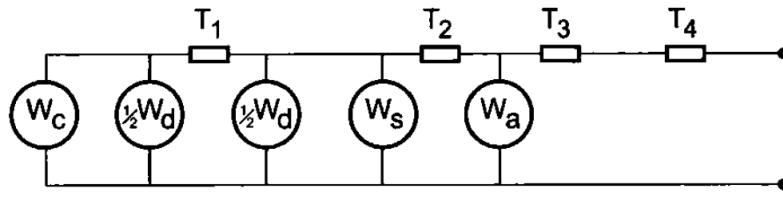
Toplinska otpornost zemlje ovisi o količini vlage. Pod određenim uvjetima može doći do migracije vlage od područja u neposrednoj okolini kabela u dalju okolinu. U neposrednoj blizini oblikuje se isušena zona čija je toplinska otpornost osjetno veća od otpornosti na većim udaljenostima od kabela. U slijedećem podpoglavlju 7.1.1 izvode se relacije za slučaj da ne dolazi do migracije vlage.

7.1.1. Energetski kabele u domenama bez migracije vlage

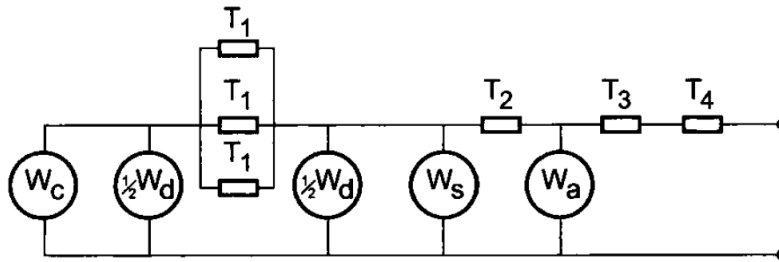
U stacionarnom uvjetima nema promjene temperature s vremenom te se toplinski kapaciteti, prikazani na slici 6.12, mogu zanemariti (analogno električnim kapacitetima nakon nabijanja kondenzatora). Ako se mreži toplinskih otpora sa slike 6.12 pridoda i vanjski toplinski otpor T_4 , (domena izvan samog kabela), dobiva se lančana mreža u stacionarnim uvjetima, slika 7.1. Dielektrični gubici su raspodijeljeni po cijeloj izolaciji. Kako je lančana mreža sastavljena od koncentriranih parametara, dielektrični gubici koncentrirani su aproksimirajući da se polovica gubitaka razvija na unutrašnjoj, a polovica na vanjskoj površini izolacije, slika 7.1. Dielektrični gubici nisu bili dio lančane mreže na slici 6.12, jer oni nemaju utjecaj na promjenu temperature.

Nepoznata, odnosno tražena veličina je dozvoljena strujna opteretivost I ili temperatura faznog vodiča θ (temperatura granice fazni vodič – izolacija).

U prvom slučaju zadaje se maksimalna dozvoljena temperatura, a u drugom strujna opteretivost. Odgovarajuće jednadžbe se jednostavno mogu dobiti razmatranjem sheme na slici 7.1.



(a)



(b)

Slika 7.1: Lančana mreža jednožilnog (a) i trožilnog (b) kabela pri stacionarnim uvjetima

Za ukupne Jouleove gubitke u kabelu se može pisati:

$$W_t = W_c + W_s + W_a = W_c(1 + \lambda_1 + \lambda_2). \quad (7.1)$$

Na temelju slike 7.1, za povećanje temperature kabela iznad temperature okoline se dobiva:

$$\Delta\theta = \left(W_c + \frac{1}{2} W_d \right) T_1 + [W_c(1 + \lambda_1) + W_d] n T_2 + [W_c(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] n (T_3 + T_4), \quad (7.2)$$

gdje je n broj vodiča u kabelu.

Temperatura faznog vodiča, odnosno unutrašnje površine izolacijskog sloja je $\theta = \Delta\theta + \theta_{amb}$.

Dozvoljena strujna opteretivost izvodi se iz jednadžbe (7.2), uzimajući u obzir da su Jouleovi gubici u faznom vodiču $W_c = I^2 \cdot R$:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0.5 T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{R [T_1 + n(1 + \lambda_1) T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4)]} \right]^{0,5} \quad (7.3)$$

Pritom se u relaciji (7.3) za vrijednost $\Delta\theta$ uvrštava maksimalni dozvoljeni porast temperature. Npr. ako je maksimalna dozvoljena temperatura izolacije 90°C , slijedi da je $\Delta\theta = 90^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 70^\circ\text{C}$. [3]

7.2. Strujna opteretivost kabela u normalnom pogonu (kabel XLPE 12/20 kV)

Strujna opteretivost kabela u **normalnom pogonu** treba biti tako ograničena da ni na jednom mjestu kabela ne bude prekoračeno dopušteno zagrijavanje (okolna temperatura + povećanje temperature vodiča zbog strujne opteretivosti) vodiča kabela (*Tablica 7.1.*).

Temperatura vodiča, na određenoj strujnoj opteretivosti, zavisit će od hlađenja (odvođenja toplote) kabela, tj. od:

- Toplinske vodljivosti izolacije i zaštitnih slojeva kabela;
- Toplinske vodljivosti tla, tj. od njegova sastava i vlažnosti;
- Smanjenja toplinske vodljivosti tla zbog sušenja zemlje kroz trajnu i punu opteretivost kabela;
- Načina polaganja i pokrivanja kabela;
- Broja kabela koji se paralelno polažu;
- Temperature okolnog zemljišta odnosno zraka i sl.

Tablica 7.1. Maksimalne dopuštene temperature vodiča

Vrste kabela		Nazivni napon kV	Temperatura vodiča °C	
			Normalno (trajno) pogonsko stanje*	Kratki spoj
S papirnom izolacijom	Pojasni kabela	1 i 6 10	80 (60 + 20) 65 (45 + 20)	180 165
	Jednožilni kabela	10	70 (50 + 20)	170
	Kabela sa tri metalna plašta	20	65 (45 + 20)	155
	H-kabela	30 (35)	60 (40 + 20)	140
Kabela sa PVC-izolacijom		1 i 6 10 20	70 (50 + 20) 65 (45 + 20) 60 (40 + 20)	160 160 140
Kabela sa PE izolacijom		od 10	70 (50 + 20)	150
Kabela sa XPE izolacijom		od 10	90 (70 + 20)	250
Kabela sa EPDM izolacijom		1 do 35	90 (70 + 20)	250

* Vrijednosti u zagradi označavaju nadtemperaturu vodiča uslijed strujne opteretivosti kabela + okolna temperatura 20°C.

Dopuštena strujna opterećenja kabela (Tablica 7.2.) izračunata su prema IEC 287 pri čemu je uvaženo slijedeće:

- temperatura zemlje 20°C
- temperatura zraka 30°C
- temperatura vodiča 90 °C
- specifični toplinski otpor zemlje 1,0 K·m/W
- specifični toplinski otpor XLPE 3,5 K·m/W
- specifični toplinski otpor PVC 6,0 K·m/W
- specifični toplinski otpor PE 3,5 K·m/W
- dubina polaganja u zemlju 0,7 m
- razmak kabela u zemlji 0,07 m
- razmak kabela u zraku promjer kabela

Tablica 7.2. Strujno opterećenje energetskog kabela s XLPE izolacijom napona 12/20 kV

Mjesto polaganja i vrsta vodiča / Place of laying and conductor type	Zemlja / Ground				Zrak / Air			
	Bakar / Copper		Aluminij / Aluminium		Bakar / Copper		Aluminij / Aluminium	
Način polaganja / Way of laying	○○○	○○	○○○	○○	○○○	○○	○○○	○○
Presjek vodiča / Conductor cross-section	Strujno opterećenje / Current ratings							
mm ²	A							
25	170	160	135	125	190	170	150	130
35	220	200	170	160	220	200	175	155
50	255	240	195	185	260	245	210	190
70	310	295	240	230	320	300	255	235
95	370	350	385	270	390	370	310	285
120	415	400	320	310	450	420	360	330
150	450	440	360	345	500	475	400	375
185	505	505	400	390	570	550	455	430
240	575	585	460	455	660	645	525	505
300	640	650	510	510	760	730	590	570
400	700	750	580	600	880	840	680	670
500	770	810	640	660	1025	930	845	755

7.3. Korekcionni faktor

U *Tablici 7.2.* date su vrijednosti strujnog opterećenja kabela (kabel s XLPE izolacijom napona 12/20 kV) u **normalnom radu** kroz duže vremensko razdoblje.

Radi li kabel u uvjetima koji se **razlikuju** od normalnih nazivno strujno opterećenje se množi korekcionim faktorima.

$$I_{opt} = k \cdot I_n$$

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5$$

Korekcionni faktori (energetski srednjenaponski kabeli s XLPE izolacijom za napone do 36 kV- katalog ELKA) dati su u slijedećim tablicama:

Tablica 7.3. Korekcionni faktor za različite temperature okoline

Temperatura okoline, °C / Ambient temperature, °C	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Polaganje u zemlju / <i>Laying in ground</i>	1,07	1,04	1,00	0,96	0,93	0,89	0,85	0,80	0,76	0,71	0,65	0,60	0,53
Polaganje u zraku / <i>Laying in air</i>	1,15	1,12	1,08	1,04	1,00	0,96	0,91	0,87	0,82	0,76	0,71	0,65	0,58

Tablica 7.4. Korekcionni faktor za različite dubine polaganja

Dubina polaganja, m / <i>Depth of laying, m</i>	0,50 do 0,70	0,71 do 0,90	0,91 do 1,10	1,11 do 1,30	1,31 do 1,50
Korekcionni faktor / <i>Correction factor</i>	1,00	0,90	0,98	0,96	0,95

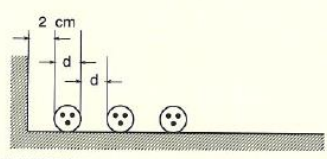
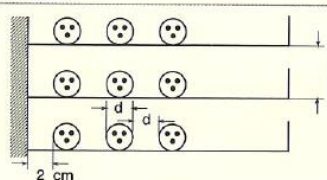
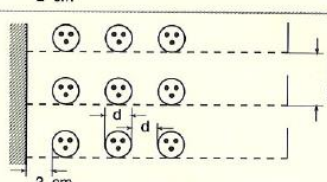
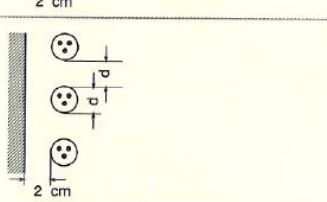
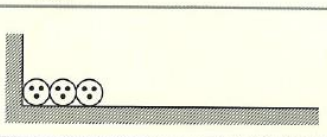
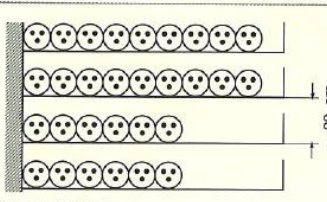
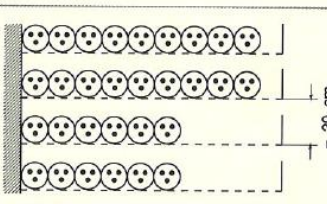
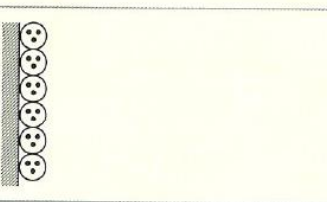
Tablica 7.5. Korekcionni faktori za različite toplinske otpornosti tla

Presjek vodiča / <i>Conductor cross-section</i> mm ²	Specifični toplinski otpor tla / <i>Specific thermal resistance of ground</i> K x m/W						
	0,70	1,00	1,20	1,50	2,0	2,0	3,0
25	1,11	1,00	0,94	0,87	0,78	0,72	0,67
35 do 95	1,13	1,00	0,93	0,86	0,76	0,70	0,64
120 do 240	1,14	1,00	0,93	0,85	0,76	0,69	0,63
300 do 500	1,15	1,00	0,92	0,85	0,75	0,68	0,63

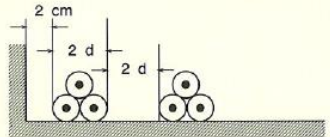
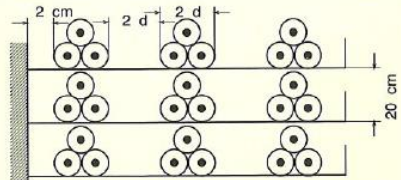
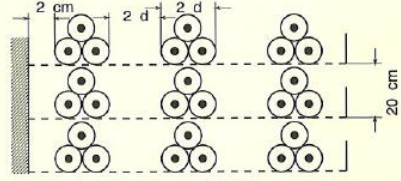
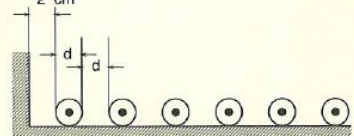
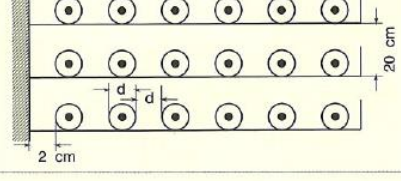
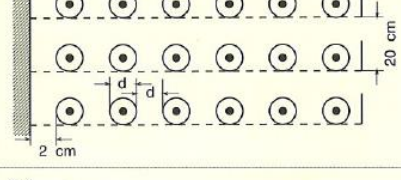
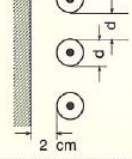
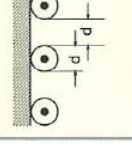
Tablica 7.6. Korekcionni faktor za različiti broj kabela ili sistema u istom prokopu

Broj kabela (sistema) / <i>Number of cables (systems)</i>		2	3	4	5	6	8	10
Razmak između kabela (sistema) položenih u zemlju / <i>Spacing between cables (system) laid in ground</i>	Dodir / <i>Touch</i>	0,79	0,69	0,63	0,58	0,55	0,50	0,46
	7 cm	0,85	0,75	0,68	0,64	0,60	0,56	0,53
	15 cm	0,86	0,77	0,72	0,68	0,64	0,61	0,58
	25 cm	0,87	0,78	0,74	0,71	0,67	0,64	0,62

Tablica 7.7. Korekcionni faktori za trožilne kabele u zraku

Broj kabela / Number of cables		1	2	3	6	9	
Faktor za preračunavanje: Kabeli položeni na zemlji <i>Conversion factor:</i> <i>Cables laying on the ground</i>		0,95	0,90	0,88	0,85	0,84	
Faktor za preračunavanje: Kabeli položeni u pregradama (cirkulacija zraka spriječena) <i>Conversion factor:</i> <i>Cables laying in racks</i> <i>(prevented air circulation)</i>	Broj pregrada / Number of racks						
	1	0,95	0,90	0,88	0,85	0,84	
	2	0,90	0,85	0,83	0,81	0,80	
	3	0,88	0,83	0,81	0,79	0,78	
Faktor za preračunavanje: Kabeli položeni na policama <i>Conversion factor:</i> <i>Cables laying on trays</i>	Broj polica / Number of trays						
	1	1,0	0,98	0,96	0,93	0,92	
	2	1,0	0,95	0,93	0,90	0,89	
	3	1,0	0,94	0,92	0,89	0,88	
Faktor za preračunavanje: Kabeli položeni na nosačima ili su pričvršćeni uza zid <i>Conversion factor:</i> <i>Cables laying on supports or fastened</i> <i>against wall</i>	Broj polica / Number of trays						
	1	1,0	0,93	0,90	0,87	0,86	
	2	1,0	0,95	0,93	0,90	0,89	
	3	1,0	0,94	0,92	0,89	0,88	
Faktor za preračunavanje: Kabeli položeni na zemlji <i>Conversion factor:</i> <i>Cables laying on the ground</i>		0,90	0,84	0,80	0,75	0,73	
Faktor za preračunavanje: Kabeli položeni u pregradama (cirkulacija zraka spriječena) <i>Conversion factor:</i> <i>Cables laying in racks</i> <i>(prevented air circulation)</i>	Broj pregrada / Number of racks						
	1	0,95	0,84	0,80	0,75	0,73	
	2	0,95	0,80	0,76	0,71	0,69	
	3	0,95	0,78	0,74	0,70	0,68	
Faktor za preračunavanje: Kabeli položeni na policama <i>Conversion factor:</i> <i>Cables laying on trays</i>	Broj polica / Number of trays						
	1	0,95	0,84	0,80	0,75	0,73	
	2	0,95	0,80	0,76	0,71	0,69	
	3	0,95	0,78	0,74	0,70	0,68	
Faktor za preračunavanje: Kabeli položeni na nosačima ili su pričvršćeni uza zid <i>Conversion factor:</i> <i>Cables laying on supports or fastened</i> <i>against wall</i>	Broj polica / Number of trays						
	1	0,95	0,78	0,73	0,68	0,66	
	2	0,95	0,80	0,76	0,71	0,69	
	3	0,95	0,78	0,74	0,70	0,68	

Tablica 7.8. Korekcionni faktori za jednožilne kabele u zraku

Broj kabela / Number of cables		1	2	3	
Faktor za preračunavanje: Kabeli položeni na zemlji <i>Conversion factor:</i> <i>Cables laying on the ground</i>		0,95	0,90	0,88	
Faktor za preračunavanje: Kabeli položeni u pregradama (cirkulacija zraka spriječena) <i>Conversion factor:</i> <i>Cables laying in racks</i> <i>(prevented air circulation)</i>	Broj pregrada / Number of racks				
	1	0,95	0,90	0,88	
	2	0,90	0,85	0,83	
	3	0,88	0,83	0,81	
	6	0,86	0,81	0,79	
Faktor za preračunavanje: Kabeli položeni na policama <i>Conversion factor:</i> <i>Cables laying on trays</i>	Broj pregrada / Number of racks				
	1	1,0	0,98	0,96	
	2	1,0	0,95	0,93	
	3	1,0	0,94	0,92	
	6	1,0	0,93	0,90	
Faktor za preračunavanje: Kabeli položeni na zemlji <i>Conversion factor:</i> <i>Cables laying on the ground</i>		0,92	0,89	0,88	
Faktor za preračunavanje: Kabeli položeni u pregradama (cirkulacija zraka spriječena) <i>Conversion factor:</i> <i>Cables laying in racks</i> <i>(prevented air circulation)</i>	Broj pregrada / Number of racks				
	1	0,92	0,89	0,88	
	2	0,87	0,84	0,83	
	3	0,84	0,82	0,81	
	6	0,82	0,80	0,79	
Faktor za preračunavanje: Kabeli položeni na policama <i>Conversion factor:</i> <i>Cables laying on trays</i>	Broj pregrada / Number of racks				
	1	1,0	0,97	0,96	
	2	0,97	0,94	0,93	
	3	0,96	0,93	0,92	
	6	0,94	0,91	0,90	
Faktor za preračunavanje: Kabeli položeni na nosačima ili su pričvršćeni uza zid <i>Conversion factor:</i> <i>Cables laying on supports or fastened</i> <i>against wall</i>		0,94	0,91	0,89	
Faktor za preračunavanje: Kabeli položeni na nosačima ili su pričvršćeni uza zid <i>Conversion factor:</i> <i>Cables laying on supports or fastened</i> <i>against wall</i>		0,89	0,86	0,84	

7.4. Stujna opteretivost kabela u kratkom spoju (kabel XLPE 12/20 kV)

Otpornost izolacije na visoki toplinski učinak struje kratkog spoja određena je graničnom temperaturom vodiča koja za XLPE izolaciju (Tablica 7.1.) iznosi 250°C.

Dopuštena struja kratkog spoja **faznog vodiča kabela** dodatno je uvjetovana temperaturom vodiča na početku kratkog spoja, u pravilu 90°C, i trajanjem kratkog spoja najviše 5 sekundi (Tablica 7.9).

Tablica 7.9. Dopuštena struja kratkog spoja za vodiče kabela

Presjek vodiča / Conductor cross-section mm ²	Vrijeme trajanja katkog spoja (sekunde) / Short circuit duration (seconds)											
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	0,1	0,2	0,5	1	2	5
	Struja kratkog spoja za bakrene vodiče / Short circuit current for copper conductors						Struja kratkog spoja za aluminijске vodiče / Short circuit current for aluminium conductors					
	kA						kA					
25	11,4	8,2	5,1	3,6	2,5	1,6	7,3	5,2	3,3	2,3	1,64	1,04
35	15,9	11,2	7,1	5,1	3,5	2,2	10,2	7,2	4,6	3,2	2,3	1,5
50	22,7	16,1	10,2	7,2	5,0	3,2	14,7	10,4	6,7	4,6	3,3	2,1
70	31,8	22,5	14,2	10,1	7,0	4,5	20,5	14,5	9,2	6,5	4,6	2,9
95	43,1	30,5	19,3	13,7	9,6	6,1	27,8	19,7	12,4	8,8	6,2	3,9
120	54,5	38,5	24,4	17,3	12,1	7,7	35,2	24,8	15,7	11,1	7,8	5,0
150	68,1	48,1	30,5	21,6	15,2	9,6	44,0	31,1	19,7	13,9	9,8	6,2
185	84,0	59,4	37,6	26,6	18,7	11,8	54,2	38,3	24,2	17,1	12,1	7,7
240	109,0	77,0	48,7	34,6	24,2	15,4	70,3	49,7	31,4	22,2	15,7	9,9
300	136,2	96,3	60,9	43,2	30,3	19,2	87,9	62,1	39,3	27,8	19,6	12,4
400	181,6	128,4	81,2	57,6	40,4	25,6	117,2	82,8	52,4	37,0	26,2	16,6
500	227,0	160,5	101,0	72,0	50,5	32,0	146,5	103,5	65,5	46,3	32,7	20,7

Dopuštena struja kratkog spoja **električne zaštite kabela** uvjetovana je temperaturom električne zaštite na početku kratkog spoja, pretpostavljeno 70°C, i najvišom dozvoljenom temperaturom bakrenih žica ili vrpce električne zaštite, pretpostavljeno 350°C, uz trajanje kratkog spoja najviše 5 sekundi (Tablica 7.10.).

Tablica 7.10. Dopuštena struja kratkog spoja za električnu zaštitu kabela

Presjek električne zaštite / Electric protection cross-section mm ²	Vrijeme trajanja kratkog spoja (sekunde) / Short circuit duration (seconds)					
	0,1	0,2	0,5	1	2	5
	Struja kratkog spoja (kA) / Short circuit current (kA)					
6	4,2	2,9	1,9	1,3	0,9	0,6
10	7,0	4,9	3,1	2,2	1,6	1,0
16	11,1	7,9	5,0	3,5	2,5	1,6
25	17,4	12,3	7,8	5,5	3,9	2,5
35	24,3	17,2	10,9	7,7	5,4	3,4
50	34,8	24,6	15,6	11,0	7,8	4,9

Za vrijeme trajanja kratkog spoja različitog od vrijednosti navedenih u *Tablicama br.7.9 i br.7.10.*, vrijednosti struje kratkog spoja za 1 sekundu potrebno je pomnožiti s faktorom $1/\sqrt{t}$

$$I_k = \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot I_{kn}$$

gdje je:

I_k – dozvoljena struja kratkog spoja

I_{kn} – dozvoljena struja kratkog spoja (na početku kratkog spoja prema *Tablicama 7.9 i 7.10.*)

t -vrijeme trajanja kratkog spoja u sekundama

7.4. Kontrola kabela na pad napona

Dozvoljeni pad napona definira se prema slijedećem izrazu:

$$\Delta u\% = \frac{P \cdot l}{U^2} \cdot (R_1 + X_1 \cdot \tan\varphi) \cdot 100\% (\%)$$

gdje je:

P – djelatna snaga (MW; kW)

l – duljina kabela (km)

U – nazivni napon (kV)

R_1 – vrijednost jediničnog djelatnog otpora (Ω/km)

L_1 – vrijednost jediničnog induktiviteta (H/km) [13]

7.5. Proračun strujnog opterećenja i odabir presjeka elektroenergetskog kabela

Kao primjer izračuna trajno podnosivog strujnog opterećenja kabela, uz faktor opterećenja 100%, a u skladu s normom IEC 60287, dat je izračun za visokonaponski kabel nazivnog napona $U_0/U = 64/110$ kV kako slijedi:

KONSTRUKCIJA KABELA

Opis kabela (slika br.1.)

Jednožilni kabel:

- aluminijski kompaktni vodič presjeka 1000 mm²;
- izolacija od umreženog polietilena –XLPE, s nemetalnim ekranom od brizganog poluvodljivog sloja iznad vodiča i iznad izolacije;
- električna zaštita od bakrenih žica, s obavijenom bakrenom trakom oko žica, ukupnog presjeka električne zaštite 95 mm²;
Prostor električne zaštite je uzdužno vodonepropusne izvedbe, s bubrivom poluvodljivom vrpcom ispod i bubrivom izolacijskom vrpcom iznad bakrenih žica;
- plašt od polietilena visoke gustoće - HDPE



Slika br.1 Konstrukcija 110 kV kabela s XLPE izolacijom

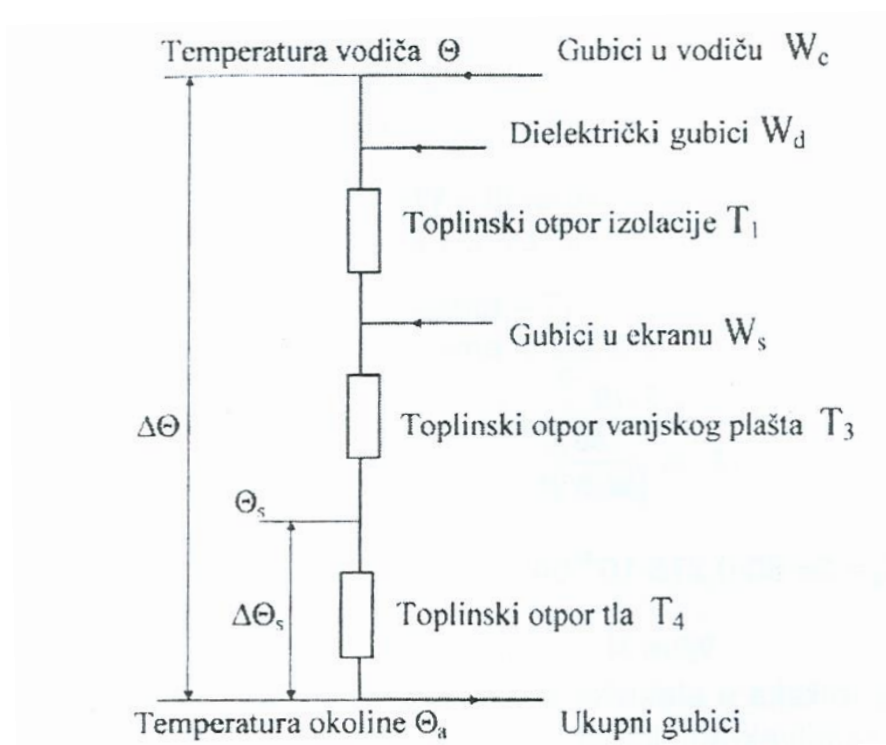
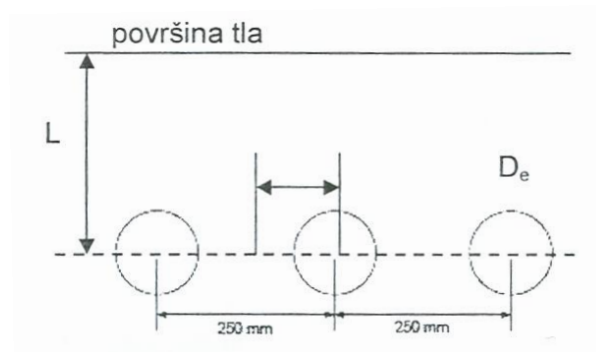
Konstruktivski elementi kabela

- Vodič:
 - aluminijско kompaktirano uže, kl.2,
 - presjek 1000 mm^2
 - konstrukcija, $61 \times 4,70 \text{ mm}$
 - promjer užeta, $d_c=37,9 \text{ mm}$
- Izolacija:
 - debljina izolacije $t_i=13,0 \text{ mm}$
 - promjer preko izolacije $D_i=66,1 \text{ mm}$
 - debljina brizganih poluvodljivih slojeva $t_{scl}=1,1 \text{ mm}$
- Električna zaštita:
 - presjek električne zaštite $S = 95 \text{ mm}^2 (60 \times 1,4 \text{ mm} + 60 \times 0,15 \text{ mm})$
 - promjer preko električne zaštite $D_s = 72,6 \text{ mm}$ (vodobubrive vrpce su uključene)
- Vanjski plašt:
 - debljina plašta $t_s=3,6 \text{ mm}$
 - vanjski promjer kabela $D_e=80,0 \text{ mm}$

Uvjeti polaganja kabela

- Nazivni napon kabela: $U_0/U (U_m) = 64/110 \text{ kV} (123 \text{ kV})$
- Mjesto polaganja: zemlja
- Temperatura tla: $\Theta_a=20^\circ\text{C}$
- Specifični otpor tla $\rho_w = 1,0 \text{ K.m/W}$
- Dubina polaganja: $L=1200 \text{ mm}$
- Način polaganja: u ravnini na razmaku osi $s_1=250 \text{ mm}$
- Dopuštena temperatura vodiča u trajnom radu $\Theta=90^\circ\text{C}$
- Uzemljenje ekrana: na oba kraja kabela

Raspored i toplinska slika kabela



Slika br.2. Raspored i toplinska slika kabela

$$I = \left\{ \frac{\Delta\theta - W_d \cdot [0,5 \cdot T_1 + n(T_3 + T_4)]}{R \cdot T_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1)(T_3 + T_4)} \right\}^{0,5} \quad (A)$$

Izračun izmjeničnog otpora vodiča – R

Izmjenični otpor vodiča R se računa prema sljedećoj formuli:

$$R = R'(1 + y_s + y_p), (\Omega/m)$$

a) Istosmjerni otpor vodiča na najvišoj radnoj temperaturi

$$R' = R_0[1 + \alpha_{20}(\theta - 20)] = 0,03731 \cdot 10^{-3} (\Omega/m)$$

b) Faktor skin efekta

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4} = 0,05642$$

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_s = 3,3681$$

c) Faktor blizine

$$y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0,8 \cdot X_p^4} \cdot \left[\frac{d_c}{s} \right]^2 \cdot 2,9 = 0,002446$$

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p = 2,6945$$

$$R = 0,00003731(1 + 0,05642 + 0,002446) = 0,0394957 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{m}$$

Izračun dielektričnih gubitaka u izolaciji - W_d

Izračun dielektričnih gubitaka vrši se prema formuli:

$$W_d = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot U_0^2 \cdot \operatorname{tg} \delta \left(\frac{W}{m} \right)$$

$$C = \frac{\varepsilon_r}{18 \cdot \ln \frac{D_i}{d_c}} \cdot 10^{-9} = 0,275 \cdot 10^{-9} \left(\frac{F}{m} \right)$$

$$W_d = 0,353 \cdot 10^{-6} \left(\frac{W}{m} \right)$$

Izračun faktora gubitaka u električnoj zaštiti/ekranu - λ

Na faktor gubitaka λ u električnoj zaštiti/ekranu kabela utječu samo gubici λ' uzrokovani kružnom strujom budući da je ekran uzemljen na oba kraja, te nema utjecaja vrtložnih struja.

Dakle, ukupni gubitci u ekranu su:

$$\lambda_1 = \lambda'_1$$

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_1}\right)^2}$$

$$X_1 = 2 \cdot \omega \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(2\sqrt[3]{2} \cdot \frac{2s}{d_s}\right) = 2\pi \cdot 50 \cdot \ln\left(2,52 \cdot \frac{2 \cdot 250}{(72,6 - 1,55)}\right) \cdot 10^{-7}$$

$$X_1 = 0,09034 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\Omega}{m}\right)$$

$$R_s = R_{s0}[1 + \alpha_{20}(\theta_{sc} - 20)]$$

$$R_{s0} = \frac{\rho_{20(Cu)} \cdot l}{S} = \frac{1,7241 \cdot 10^{-8} \cdot l}{95} = 0,01815 \cdot 10^{-2} \left(\frac{\Omega}{m}\right)$$

$$R_s = R_{s0}[1 + \alpha_{20}(\theta_{sc} - 20)] = 0,01815 \cdot [1 + 0,00393(70 - 20)] \cdot 10^{-2}$$

$$R_s = 0,02172 \cdot 10^{-2} \left(\frac{\Omega}{m}\right)$$

pa je:

$$\lambda_1 = \lambda'_1 = 5,5 \cdot 0,1475 = 0,8112$$

Izračun toplinskog otpora izolacije – T_1

Toplinski otpor izolacije izračunava se prema:

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \cdot \ln\left(1 + \frac{2 \cdot t_1}{d_c}\right) \left[\frac{K \cdot m}{W}\right]$$

$$T_1 = \frac{3,5}{2\pi} \cdot \ln\left[1 + \frac{2 \cdot (13 + 1 + 1)}{37,9}\right] = 0,3248 \left[\frac{K \cdot m}{W}\right]$$

Izračun toplinskog otpora plašta – T_3

Toplinski otpor plašta izračunava se prema:

$$T_3 = \frac{\rho_T}{2\pi} \cdot \ln \left(1 + \frac{2 \cdot t_3}{D'_a} \right) \left[\frac{K \cdot m}{W} \right]$$

$$T_3 = \frac{3,5}{2\pi} \cdot \ln \left[1 + \frac{2 \cdot 3,6}{72,6} \right] = 0,05267 \left[\frac{K \cdot m}{W} \right]$$

Izračun toplinskog otpora prema okolini – T_4

Toplinski otpor plašta izračunava se prema:

$$T_4 = \frac{\rho_T}{2\pi} \cdot \left\{ \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) + \ln \left[1 + \left(\frac{2 \cdot L}{s_1} \right)^2 \right] \right\} \left[\frac{K \cdot m}{W} \right]$$

$$u = \frac{2L}{D_e} = \frac{2 \cdot 1200}{80} = 30$$

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln(30 + \sqrt{30^2 - 1}) + \ln \left[1 + \left(\frac{2 \cdot 1200}{250} \right)^2 \right] \right\} = 1,373 \left[\frac{K \cdot m}{W} \right]$$

Trajno dopušteno strujno opterećenje 110 kV-nog kabela presjeka 1000 mm², s faktorom opterećenja 100% iznosi:

$$I = \left\{ \frac{\Delta\theta - W_d \cdot [0,5 \cdot T_1 + n(T_3 + T_4)]}{R \cdot T_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1)(T_3 + T_4)} \right\}^{0,5} (A)$$

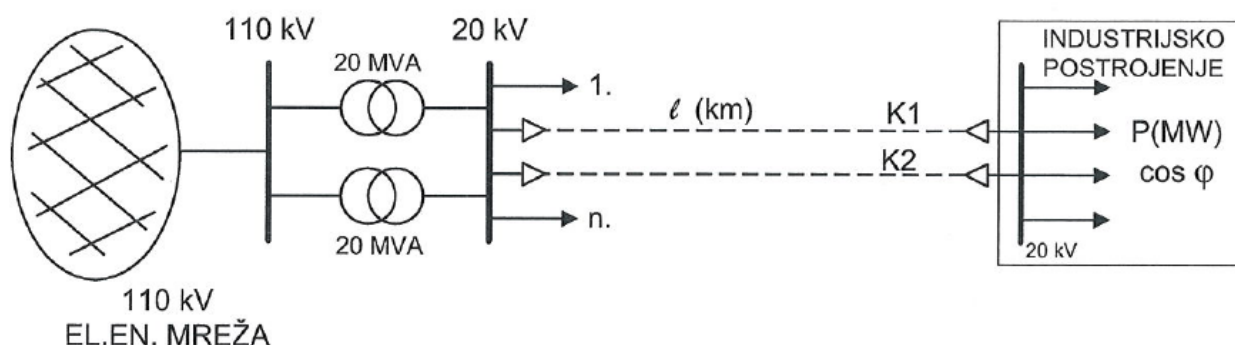
a uvrštavanjem izračunatih vrijednosti Jouleovih, dielektričnih i toplinskih gubitaka dobiva se:

$$I = \left\{ \frac{(90 - 20) - 0,353 \cdot 10^{-6} [0,5 \cdot 0,3248 + 1 \cdot (0,05267 + 1,1562)]}{0,0394957 \cdot 10^{-3} [0,3248 + (1 + 0,8112) \cdot (0,05267 + 1,1562)]} \right\}^{0,5} = 780,8 \text{ A}$$

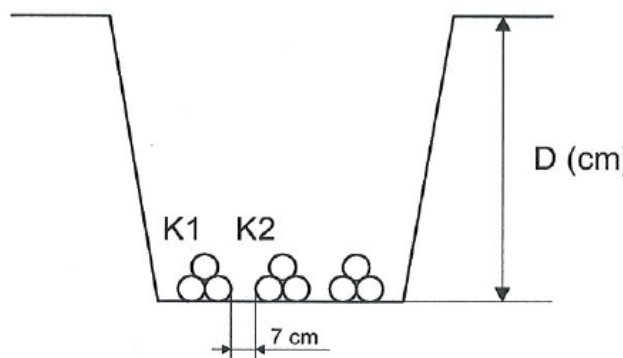
PRIJENOS I DISTRIBUCIJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

1. KONSTRUKCIJSKI RAD - IZBOR PRESJEKA ELEKTROENERGETSKOG KABELA

Kabelskim elektroenergetskim vodom ELPEX-20 XHP 48-A $3 \times (1 \times S) \text{ mm}^2$, 20 kV, napaja se električnom energijom industrijsko postrojenje. Potrebno je odrediti presjek kabela K1 i kabela K2 koji predstavlja toplu rezervu kabele K1 i koji mora biti dimenzioniran za iste uvjete kao i kabel K1. Zadani su sljedeći podaci:



nazivni napon $U_n = 20 \text{ kV}$
duljina kabela $\ell = 9,5 \text{ km}$
potrebna prijenosna snaga kabela $P = 10,5 \text{ MW}$
 $\cos \varphi = 0,8$
najveća temperatura vodiča $T_{\max} = 90^\circ \text{C}$
temperatura okoline kod polaganja u zemlju $T_{\text{tla}} = 15^\circ \text{C}$
temperatura zraka $T_{\text{zr}} = 25^\circ \text{C}$
dubina polaganja u zemlju $D = 90 \text{ cm}$
razmak između kabela u ravnini $d = 7 \text{ cm}$
termički otpor zemlje $\rho_{\text{tla}} = 100^\circ \text{C cm/W}$
raspored polaganja - trokut
kabeli položeni u zemlju
broj kabela u istom rovu $n = 3$
određena struja kratkog spoja $I_{\text{KS doz}} = 12 \text{ kA}$
trajanje kratkog spoja $t_{\text{KS}} = 0,3 \text{ s}$
dozvoljeni pad napona $u_{\text{doz}} = 5\%$



KABEL ELPEX-20 XHP 48-A 3×(1×S) mm², 20 kV

Standardna tvornička oznaka kabela je ELPEX - 20 za 20kV kabele izolirane s umreženim polietilenom.

Standardna oznaka kabela je:

- X - oznaka za izolaciju od umreženog polietilena (XPE),
- H - oznaka za poluvodljive slojeve preko vodiča i preko izolacije,
- P - oznaka za vanjski PVC plašt, 48 - oznaka za električnu zaštitu,
- A - oznaka za aluminijski vodič,
- 3×(1×S) mm² - broj žila × nazivni presjek vodiča u mm²

TEHNIČKI PODACI

Uvjeti prema kojima su izračunati izmjenični otpor vodiča, pogonski induktivitet i strujno opterećenje:

- najveća temperatura vodiča $T_{\max} = 90^{\circ}\text{C}$
- temperatura okoline kod polaganja u zemlju $T_{\text{tla}} = 20^{\circ}\text{C}$
- temperatura zraka $T_{\text{zr}} = 30^{\circ}\text{C}$
- dubina polaganja u zemlju $D = 70 \text{ cm}$
- razmak između kabela u ravni $d = 7 \text{ cm}$
- termički otpor zemlje $\rho_{\text{tla}} = 100^{\circ}\text{C cm/W}$
- termički otpor XPE izolacije $\rho_i = 350^{\circ}\text{C cm/W}$
- termički otpor PVC plašta $\rho_p = 600^{\circ}\text{C cm/W}$
- električna zaštita je na oba kraja spojene i uzemljena
- raspored polaganja - trokut
- kabeli položeni u zemlju

Tablica 1. Karakteristike kabela ELPEX-20

presjek vodiča (mm ²)	izmjenični otpor vodiča (Ω/km)	pogonski induktivitet vodiča (mH/km)	strujno opterećenje I_N (A)	promjer preko plašta d_v (mm)
25	1,540	0,54	126	28,0
35	1,100	0,46	160	28,0
50	0,804	0,42	185	30,0
70	0,557	0,40	230	32,0
95	0,401	0,38	270	33,0
120	0,318	0,37	310	35,0
150	0,259	0,36	345	37,0
185	0,206	0,35	390	39,0
240	0,156	0,33	455	42,0
300	0,125	0,32	510	44,0
400	0,0977	0,31	600	48,0
500	0,0776	0,37	616	52,5
630	0,0601	0,36	712	56,0

KOREKCIONI FAKTORI

Tablica 2. Faktor k_1 u ovisnosti o dubini polaganja

dubina polaganja (m)	faktor k_1
0,50 do 0,70	1,00
0,71 do 0,90	0,99
0,91 do 1,10	0,98
1,11 do 1,30	0,96
1,31 do 1,50	0,95

Tablica 3. Faktor k_2 u ovisnosti o toplinskom otporu tla

Presjek Vodiča mm ²	faktor k_2 za razne toplinske otpore tla dane u $^{\circ}\text{C cm/W}$						
	70	100	120	150	200	250	300
35 – 95	1,08	1,00	0,95	0,90	0,80	0,74	0,69
120 – 400	1,09	1,00	0,95	0,89	0,79	0,73	0,68

Tablica 4. Faktor k_3 u ovisnosti o temperaturi zemljišta

najveća radna temperatura vodiča °C	faktor k_3 za različite temperature t _{la} °C							
	-5	0	5	10	15	20	25	30
90	1,17	1,14	1,10	1,07	1,04	1,0	0,97	0,92
80	1,19	1,16	1,11	1,08	1,04	1,0	0,96	0,91
70	1,22	1,19	1,14	1,09	1,05	1,0	0,94	0,89
65	1,24	1,20	1,16	1,10	1,05	1,0	0,93	0,88

Tablica 5. Faktor k_4 u ovisnosti o temperaturi zraka

najveća radna temperatura vodiča °C	faktor k_4 za različite temperature zraka °C							
	10	15	20	25	30	35	40	45
90	1,17	1,13	1,09	1,05	1,0	0,94	0,89	0,84
80	1,20	1,14	1,10	1,05	1,0	0,93	0,88	0,81
70	1,26	1,20	1,13	1,07	1,0	0,92	0,85	0,76
65	1,29	1,22	1,15	1,07	1,0	0,91	0,83	0,73

Tablica 6. Faktor k_5 u ovisnosti o broju kabela (sistema) u istom rovu

broj kabela (sistema) u istom rovu		faktor k_5						
		2	3	4	5	6	8	10
razmak	dodir	0,79	0,69	0,63	0,58	0,55	0,50	0,46
	7 cm	0,85	0,75	0,68	0,64	0,60	0,56	0,53
	15 cm	0,86	0,77	0,72	0,68	0,64	0,61	0,58
(sistema)	25 cm	0,87	0,78	0,74	0,71	0,67	0,64	0,62

STRUJE KRATKOG SPOJA

Tablica 7. Dozvoljene struje kratkog spoja

presjek vodiča (mm ²)	struja (kA) uz temperaturu vodiča na početku kratkog spoja °C		
	20	30	90
25	3,00	2,90	2,30
35	4,10	3,90	3,20
50	5,50	5,30	4,40
70	8,00	7,80	6,30
95	11,10	10,80	8,80
120	14,00	13,60	11,10
150	17,40	16,90	13,80
185	21,60	21,00	17,10
240	28,70	27,80	22,60
300	35,70	34,60	28,20
400	45,60	44,30	36,00
500	60,00	58,00	47,00
630	75,60	73,10	59,20

1. PROVJERA STRUJNOG OPTEREĆENJA KABELA

U prvom koraku određuje se struja prijenosa:

$$I_{pr} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 0,8} = 360,84 \text{ A}$$

Iz struje prijenosa i tablice 1. određujemo presjek kabela. Iz tablice uzimamo prvu veću vrijednost od izračunate struje prijenosa.

$$I_{pr} = 360,84 \text{ A} \quad \rightarrow \quad I_N = 390 \text{ A, za presjek kabela } 185 \text{ mm}^2$$

Nakon što je odabran početni presjek kabela s odgovarajućom dozvoljenom trajnom strujom, određujemo stvarno opterećenje kabela uzimajući u obzir uvjete polaganja odnosno korekcijske faktore.

Struja opterećenja računa se prema izrazu:

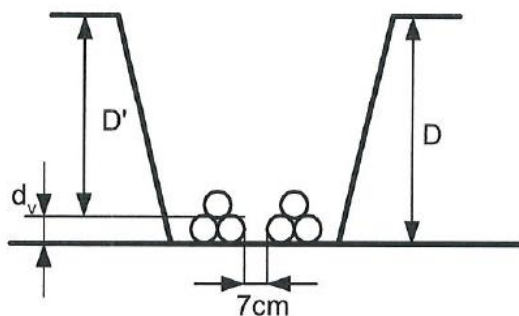
$$I_{opt} = k \cdot I_N$$

Korekcijski faktor k , koji ovisi o stvarnim uvjetima polaganja kabela računa se kao umnožak nekoliko faktora. Faktori su zadani u tablicama 2-6. Dakle:

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5$$

Faktor k_1 uzima u obzir dubinu polaganja kabela. Obzirom da su kabeli položeni u trolistu (slika 1.), stvarnu dubinu polaganja dobivamo ako od dubine polaganja $D = 90 \text{ cm}$ oduzmemo vanjski promjer jedne žile kabelskog voda, odnosno:

$$D' = D - d_v = 90 - 3,9 = 86,1 \text{ cm}$$



Slika 1. Određivanje stvarne dubine polaganja kabela – raspored u trolistu

U slučaju da su kabeli položeni u ravnini dubinu polaganja nije potrebno korigirati. Slijedom navedenog iz tablice 2. očitavamo vrijednost faktora k_1 .

$$k_1 = 0,99$$

Faktor k_2 uzima u obzir toplinski otpor okolnog tla. Za zadani otpor tla od $100 \text{ }^\circ\text{C cm/W}$, iz tablice 3. očitavamo vrijednost 1,00.

$$k_2 = 1,00$$

Faktor k_3 ovisi o temperaturi okolnog zemljišta i maksimalnoj radnoj temperaturi vodiča. Za zadanu temperaturu okolnog tla od 15 °C i maksimalnu radnu temperaturu od 90 °C, iz tablice 4. očitavamo vrijednost 1,04.

$$k_3 = 1,04$$

Faktor k_4 ovisi o temperaturi okolnog zraka i maksimalnoj radnoj temperaturi vodiča. Za zadanu temperaturu okolnog zraka od 25 °C i maksimalnu radnu temperaturu od 90 °C, iz tablice 5. očitavamo vrijednost 1,05.

$$k_4 = 1,05$$

Faktor k_5 ovisi o broju sistema (kabela) u istom rovu i njihovoj međusobnoj udaljenosti. Obzirom da je zadatkom zadano da su 2 kabelska sistema na međusobnoj udaljenosti od 7 cm u istom rovu iz tablice 6. očitavamo vrijednost 0,85.

$$k_5 = 0,85$$

Ukupni korekcijski faktor iznosi:

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 = 0,99 \cdot 1,00 \cdot 1,04 \cdot 1,05 \cdot 0,85 = 0,91892$$

Uvažavajući korekcijske faktore, određujemo struju opterećenja kabela:

$$I_{opt} = k \cdot I_N = 0,91892 \cdot 390 = 358,4 \text{ A}$$

Izračunatu struju uspoređujemo sa strujom prijenosa. Ako se pokaže da je struja prijenosa veća od struje opterećenja kabela, moramo odabrati veći presjek kabela i ponovno provjeriti vrijednost svih korekcijskih faktora. Dakle,

$$I_{opt} = 358,4 \text{ A} < I_{pr} = 360,84 \text{ A}$$

Budući da je potrebna struja prijenosa veća od dozvoljene struje opterećenja kabela, odabiremo prvi veći presjek kabela i provjeravamo korekcijske faktore, tj. računamo novu struju prijenosa, odnosno vraćamo se na početak točke 1.

Prvi standardni veći presjek kabela kojega odabiremo je **240 mm²**. Dozvoljena struja vodiča za ovaj presjek iznosi 455 A.

Od korekcijskih faktora, mijenja se samo k_1 budući jedino on ovisi o geometriji kabelskog voda, a mijenja se vanjski promjer, što za posljedicu ima promjenu stvarne dubine polaganja kabela.

$$D' = D - d_v = 90 - 4,2 = 85,8 \text{ cm}$$

Iz tablice 2. očitavamo vrijednost faktora k_1 , koja se nije promijenila obzirom da se stvarna dubina polaganja i dalje nalazi u rasponu od 0,5 do 0,7 m.

$$k_1 = 0,99$$

Struja opterećenja novog presjeka računa se po istom obrascu i iznosi:

$$I_{opt} = k \cdot I_N = 0,91892 \cdot 455 = 418,1 \text{ A}$$

Struja opterećenja sada je veća od potrebne struje prijenosa te možemo nastaviti s dimenzioniranjem kablenskog voda.

$$I_{opt} = 418,1 \text{ A} > I_{pr} = 360,84 \text{ A}$$

2. KONTROLA KABELA NA KRATKI SPOJ

Struju kratkog spoja koju kabel mora podnijeti bez trajnih oštećenja, računamo iz podataka o trajanju kratkog spoja, dozvoljenoj struji kratkog spoja i temperaturu vodiča na početku kratkog spoja, a sve prema tablici 7. i sljedećem izrazu:

$$I_k = \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot I_{KN}$$

Uz zadane podatke $t_{KS}=0,3 \text{ s}$; $I_{KSdoz}=12,0 \text{ kA}$; $T_{MAX}=90 \text{ °C}$, proizlazi vrijednost struje I_{KN} .

$$I_{KN} = 22,6 \text{ kA}$$

Dakle,

$$I_k = \frac{1}{\sqrt{0,3}} \cdot 22,6 = 41,26 \text{ kA}$$

Struja od 41,26 kA veća je od 12,0 kA koliko je zadatkom definirana struja kratkog spoja. U slučaju da se pokazalo kako je struja kratkog spoja koju kabel može izdržati u definiranom vremenu trajanja kratkog spoja manja od izračunate struje I_k , morali odabrati prvi veći presjek kabela i ponoviti proračun s novim vrijednostima od točke 1. Bilo bi potrebno provjeriti i korekcijske faktore odnosno struju opterećenja, međutim sigurno je da, ako je struja opterećenja bila manja od struje prijenosa za manji presjek, da će biti i za veći presjek.

3. KONTROLA KABELA NA PAD NAPONA

Dozvoljeni pad napona definiran zadatkom iznosi 5%, a računa se prema sljedećem izrazu:

$$\Delta u_{\%} = \frac{P \cdot l}{U^2} \cdot (R_l + X_l \cdot \tan \varphi) \cdot 100\% [\%]$$

Iz tablice 1., za presjek kabela od 240 mm² očitavamo vrijednosti djelatnog otpora i induktiviteta:

$$R_l = 0,156 \, \Omega/\text{km}$$

$$L_l = 0,33 \, \text{mH}/\text{km}$$

Faktor snage $\cos \varphi$ zadan je zadatkom i iznosi 0,8

Djelatna snaga također je zadana i iznosi $P=10 \, \text{MW}$

Duljina kablenskog voda zadana je i iznosi $l=9,5 \, \text{km}$

$$\Delta u_{\%} = \frac{10 \cdot 9,5}{20^2} \cdot (0,156 + 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,33 \cdot 10^{-3} \cdot \tan(\arccos 0,8)) \cdot 100\% = 5,55\%$$

Dobivena vrijednost od 5,55% veća je od, tekstom zadatka, dozvoljenih 5%. Odabiremo prvi veći presjek i ponavljamo proračun od točke 1.

Dakle, u trećem pokušaju računamo s presjekom kablenskog voda od 300 mm². Dozvoljena struja odabranog presjeka iznosi 510 A.

U nastavku su samo navedene nove vrijednosti struje opterećenja, kratkog spoja i pada napona bez ponavljanja prethodnih objašnjenja pojedinih koraka proračuna.

$$I_{\text{opt}} = 468,33 \, \text{A}$$

ZADOVOLJAVA !

$$I_k = 51,586 \, \text{kA}$$

ZADOVOLJAVA !

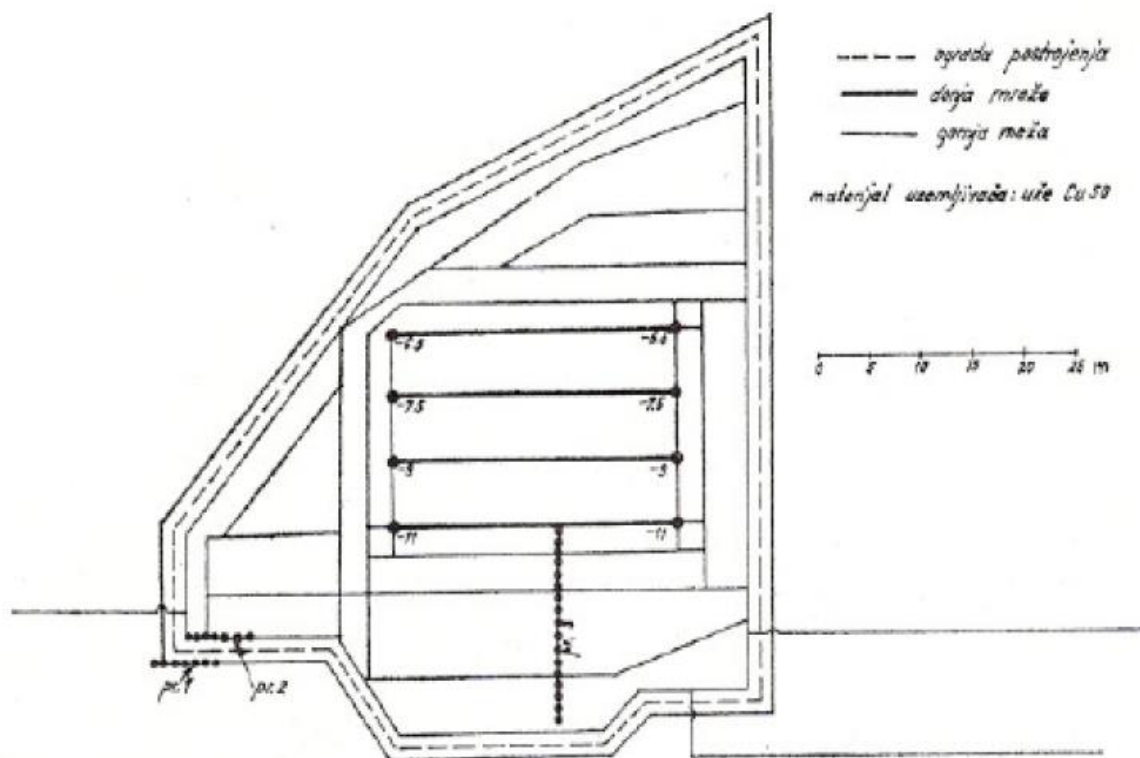
$$\Delta u_{\%} = 4,76\%$$

ZADOVOLJAVA !

Obzirom da su sva tri kriterija zadovoljena, možemo utvrditi kako odabrani presjek od 300 mm², u potpunosti zadovoljava sve postavljene uvjete te definiramo 20 kV kabel:

ELPEX-20 XHP 48-A 3×(1×300) mm², 20 kV

7.6. Sustav uzemljenja TS 110/20(10) kV



Slika 7.2. Uzemljivač TS 110/20(10) kV

- Uzemljivač postrojenja (mrežasti)
- Nadzemni vodovi priključeni na postrojenje
- Kabelski vodovi priključeni na postrojenje

Sustav uzemljenja TS 110/10(20) kV sastoji se od sljedećih elemenata:

- uzemljivača same TS 110/10(20) kV;
- bakrene užadi položene u kabelske trase (110 kV i 10(20) kV);
- uzemljivača priključenih TS 10(20)/0,4 kV koji su vezani na osnovni uzemljivač TS 110/10(20) kV putem ekrana kabela 10(20) kV;
- impedancije uzemljenja nadzemnog voda (ovisi o vrsti zaštitnog vodiča, rasponu stupova, izvedbi uzemljivača, specifičnom otporu tla).

7.6.1. Ukupna impedancija sustava uzemljenja

Veoma je teško uzeti u obzir sve elemente sustava uzemljenja. To se naročito odnosi na mrežu srednjeg napona, zbog izraženog međutjecaja susjedno položenih kabela 10(20) kV, ali i susjednih mreža niskog napona u sustavu uzemljenja.

Zato se daljnji proračun temelji na sljedećim pretpostavkama:

- uzimaju se u obzir 4 bakrena užeta $\text{Cu } 50 \text{ mm}^2$, koja se razilaze u kabelskim trasama 110 kV i 10(20) kV u različitim smjerovima;
- u obzir se uzimaju samo 4 kabela 10(20) kV, sa samo jednom priključnom TS 10(20)/0,4 kV.

Gornji pristup je restriktivan, a proračun se dovodi na stranu sigurnosti.

Impedancija ukupnog sustava uzemljenja računa se kao:

$$\frac{1}{Z_s} = \frac{1}{R_{TS}} + \frac{n}{Z_{uze}} + \frac{m}{Z_{SN}} + \frac{k}{Z_{DV}}$$

gdje je:

R_{TS} - otpor uzemljenja TS 110/20(10) kV

Z_{uze} - impedancija uzemljenja uzemljivačkog užeta

n – broj bakrene užadi u rovovima VN i SN kabela

Z_{SN} – impedancija sredjenaponske distribucijske mreže

m – broj SN kabela čija se impedancija uzemljenja uzima u obzir

Z_{DV} – otpor uzemljenja nadzemnog voda (zaštitni vodič + uzemljeni dalakovodni stup)

k – broj VN nadzemnih vodova čija se impedancija uzemljenja uzima u obzir

Proračun utjecaja uzemljenja mreža niskog napona koje su priključene na pripadne TS 10(20)/0,4 kV vrlo je teško egzaktno modelirati. Zato se njihov utjecaj nastoji obuhvatiti aproksimativnim putem, ali tako da bude na strani sigurnosti.

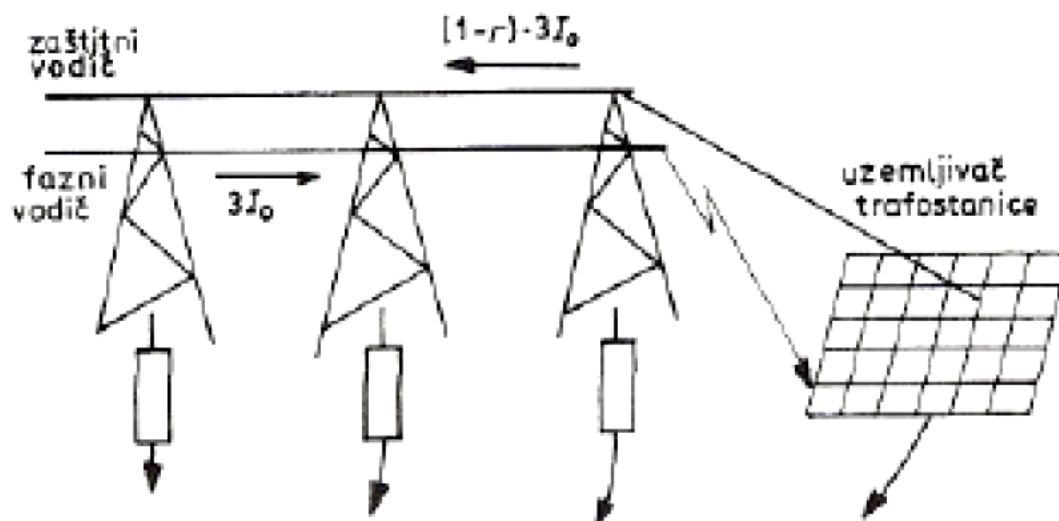
Krajnje pojednostavljeni model, koji pretpostavlja da je na svakom kabelu 10(20) kV priključena samo jedna transformatorska stanica poslužit će za određivanje otpora SN kabela i pripadnih NN mreža.

Dakako, u stvarnosti je situacija povoljnija zbog većeg broja priključenih TS 10(20)/0,4 kV iako njihov doprinos smanjenju ukupne impedancije ne može biti linearan. Jasno, dobiveni rezultat je na strani sigurnosti.

Ostale TS 10(20)/0,4 kV u daljnjem proračunu su zanemarene. Osim toga uzeta su u obzir samo 4 kabela koja se razilaze u različitim smjerovima.

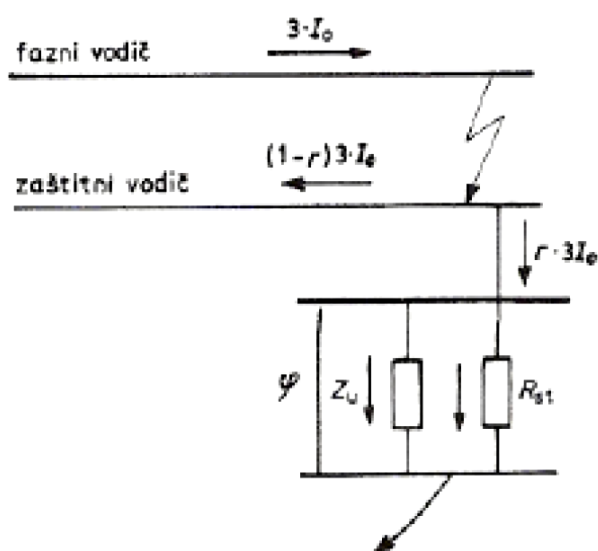
7.6.2. Potencijalne prilike na uzemljivaču TS 110/20(10) kV i grananje struja pri nastanku jednopolnog kratkog spoja

Kod određivanja potencijalnih prilika na uzemljivaču TS 110/10(20) kV treba razmotriti osim jednopolnog kratkog spoja (JKS) unutar stanice i JKS izvan nje tj. u ostalim transformatorskim stanicama 110 kV mreže.



Slika 7.3. Raspodjela struja jednopolnog kratkog spoja

Odvođenje struje kvara kroz nekoliko susjednih stupova – impedancija uzemljenja nadzemnog voda (ovisi o vrsti zaštitnog vodiča, rasponu stupova, izvedbi uzemljivača, specifičnom otporu tla).



Slika 7.4. Povratna struja obuhvaća se preko redukcionog faktora

7.6.3. Reducirane struje narinute na sustav uzemljenja

Redukcijski faktori vodova 110 kV

Struje koje kroz zemlju odlaze (ili dolaze) na sustav uzemljenja mjerodavne su za određivanje potencijala. To u pravilu nije ukupna struja jednopolnog kvara jer se jedan dio te struje najčešće vraća metalnim vezama pa ne odlazi u zemlju i ne utječe na potencijal uzemljivača. Struja narinuta u nekom m-tom čvoru sustava uzemljenja koja u zemlju odlazi kroz sustav uzemljenja (**tzv. reducirana struja**) definira se općenito kao:

$$I_{rm} = I_{kam} - I_{TRm} - I_{indm}$$

gdje je:

I_{kam} - ukupna (dovedena) struja JKS u m-tom čvoru;

I_{TRm} - suma struja odvedenih preko uzemljenih transformatora u m-tom čvoru;

I_{indm} - suma induciranih struja odvedena zaštitnim vodičima priključenim na m-ti čvor (ekrani/plaštevci visokonaponskih vodova, plaštevci TK kabela i dr.).

Uzemljivači postrojenja u mreži 110 kV mogu biti povezani metalnim ekranima kabelskih vodova 110 kV, 3x(1x1000 Al/95 Cu) mm², koji se polažu ili u ravnini ili u trolist formaciji, odnosno preko zaštitne užadi na dalekovodnim stupovima. Kabelski vodovi imaju nizak otpor ekrana i jaku elektromagnetsku spregu faznih vodiča prema vodičima ekrana pa se u slučaju pojave JKS u jednom od postrojenja 110 kV, preko ekrana tih kabela prenosi jaka strujna reakcija prema uzemljivačima ostalih postrojenja pripadne kabelske mreže 110 kV.

Redukcijski faktori kabela

Jakost elektromagnetske sprege faznih vodiča i ekrana može se procijeniti koristeći redukcijske faktore vodova. Redukcijski faktor sustava od tri jednožilna kabela ili šest jednožilnih kabela (slučaj dva kabela u jednom rovu) računa se kao:

$$r = \frac{R_{ek}}{R_z + R_{ek} + j \cdot X_{ek}}$$

gdje je:

R_{ek} – radni otpor paralelno vezanih ekrana (3, 6 ili više) (Ω/km)

R_z – jedinični otpor povratnog puta kroz zemlju (Ω/km)

X_{ek} – reaktancija paralelno vezanih (3, 6 ili više) ekrana (Ω/km)

Za slučaj jednog kabela (tri žile) u rovu veličina R_{ek} iznosi jednu trećinu jediničnog otpora ekrana jedne žile. Za slučaj dva kabela (šest žila) u rovu veličina R_{ek} iznosi jednu šestinu jediničnog otpora ekrana jedne žile.

Otpor R_z iznosi:

$$R_z = 0,05 \, \Omega/\text{km}$$

Reaktancija X_{ek} računa se kao:

$$X_{ek} = 0,145 \cdot \log \frac{93 \cdot \sqrt{\rho}}{SGU}$$

gdje je:

ρ – specifični otpor tla (Ωm)

SGU – srednji geometrijski polumjer paralelno vezanih ekrana.

Za tri ekrana (1 kabel u rovu) vrijedi:

$$SGU = \sqrt[3]{r_e \cdot r_{12} \cdot r_{13}} = \sqrt[3]{r_e \cdot D^2}$$

r_e – srednji polumjer jednog ekrana (m);

r_{12}, r_{13} – udaljenost vodiča 1-2, 1-3; kod kabela u trolistu to je veličina jednaku promjeru žile kabela (D).

Za šest ekrana veličina SGU računa se kao:

$$SGU = \sqrt[6]{r_e \cdot r_{12} \cdot r_{13} \cdot r_{14} \cdot r_{15} \cdot r_{16}} \approx \sqrt[6]{r_e \cdot D^2 \cdot D_{1-2}^3}$$

D_{1-2} – razmak između dva kabela trolista; uz pretpostavku da vrijedi $D_{1-2} \gg D$

Ukoliko se želi obuhvatiti i prijelazni otpor na krajevima kabela i plašteva odnosno otpore uzemljenja susjednih postrojenja, tada treba vrijednosti R_{ek} dodati otpore uzemljenja stanica na oba kraja kabela.

Struje inducirane u ekranima kabela proporcionalne su s $(1-r)$, a zbog relativno malog iznosa r može se zaključiti da će kabeli 110 kV imati izrazito jaku elektromagnetsku spregu.

Kabel SN, ekran 16 mm², $r = 0,51$

Kabel SN, ekran 25 mm², $r = 0,37$

Kabel 110 kV, ekran 95 mm², $r = 0,10$

Redukcijski faktori nadzemnih vodova

Jakost elektromagnetske sprege faznih vodiča i zaštitnog vodiča može se procijeniti koristeći redukcijske faktore nadzemnih vodova. Redukcijski faktor sustava od tri fazna vodiča i jednog zaštitnog vodiča računa se kao:

$$r = \frac{R_{z.u.} - R_{uz} + j \cdot X_m}{R_z + R_{z.u.} + j \cdot X_{z.u.}}$$

$R_{z.u.}$ - radni otpor jednog, odnosno dva zaštitna užeta (Ω/km);

R_z - jedinični otpor povratnog puta kroz zemlju (Ω/km);

R_{uz} - serijski zbroj otpora uzemljenja stanica priključenih na kraj zaštitnog užeta (Ω/km);

X_m - međusobna reaktancija zaštitne užadi i faznih vodiča (Ω/km);

$X_{z.u.}$ - vlastita reaktancija zaštitne užadi (1 ili 2) (Ω/km).

Za slučaj nadzemnog voda s dva zaštitna užeta veličina $R_{z.u.}$ iznosi jednu polovinu jediničnog otpora jednog zaštitnog užeta.

Ukoliko se prijelazni otpori na krajevima zaštitnih užeta odnosno otpori uzemljenja susjednih postrojenja, ne uzimaju u obzir, tada je iz izraza za odeđivanje redukcijskog faktora potrebno izostaviti vrijednost R_{uz} .

Struje inducirane u zaštitnim užetima proporcionalne su s $(1-r)$, a zbog relativno velikog iznosa r može se zaključiti da će nadzemni vodovi 110 kV imati manju elektromagnetsku spregu od kabela.

Reducirana struja za slučaj jednopolnog kratkog spoja u TS 110/20(10) kV

Primjenom redukcijskih faktora određuje se reduciona struja za slučaj jednopolnog kratkog spoja u TS 110/20(10) kV:

$$I_r = \sum_{i=1}^n r_i \cdot 3I_{0i}$$

Konačno, potencijal uzemljivača TS 110/10(20) kV prilikom jednopolnog kratkog spoja na strani 110 kV jednak je umnošku reducirane struje JKS i ukupne impedancije uzemljenja stanice 110/10(20 kV) i iznosi :

$$\varphi = I_r \cdot Z_e$$

8. NOVE TEHNOLOGIJE U IZRADI KABELA

8.1. Supravodiči i supravodljivost

Što su supravodiči i čemu služe?

Supravodiči su materijali koji vode električnu struju bez električnog otpora. Električni otpor je uzrok gubitka energije pri protjecanju struje, pa stoga supravodiči mogu služiti za savršeno prenošenje električne energije. Nažalost, supravodljivost je pojava vezana uz niske temperature. Najviša temperatura do koje je opažena supravodljivost je oko -250°C . Dakle, da bi neki materijal postao supravodljiv treba ga hladiti tekućim helijem, koji je vrlo skup i nepraktičan.

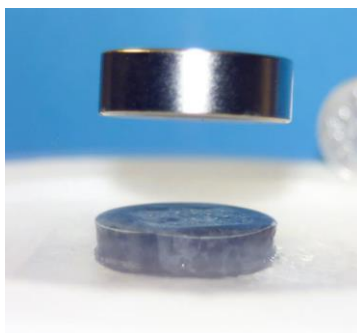
Zbog čega visokotemperaturni supravodiči još uvijek nisu doživjeli značajniju primjenu?

Prvi razlog je u njihovoj slaboj kovnosti, što znači da je teško oblikovati ih u žice. Drugi razlog je u tome što su supravodljivi samo ako struje kroz njih nisu prevelike. U supravodičima vrlo jake struje uništavaju supravodljivost.

S druge strane, postoje supravodiči koji su prilično **neosjetljivi na jake struje**. Kroz njih se mogu propustiti puta veće struje, i to bez grijanja, koje stvaraju i puno jača magnetska polja. Naravno, supravodič se ne grije, jer mu je električni otpor nula.

Zanimljivo je da kad supravodičom jednom potekne struja, ona će teći "do vječnosti", bez da je potreban strujni izvor - jer nema nikakvog gubitka energije. Ako materijal nije supravodljiv, električni otpor uzrokuje stalne gubitke energije, pa da bi se održala struja stalne vrijednosti energija mora biti dobavljena iz strujnog izvora. Znanstvenici su bili mjerili struju kroz jednu supravodljivu petlju bez strujnog izvora, i bili našli da se struja nije bila promijenila petnaest godina. Onda im je bilo dosadilo mjeriti, jer se očito nije ništa mijenjalo, pa su prekinuli pokus i zaključili da je **protok struje kroz supravodič zaista savršen**.

Sljedeće važno svojstvo supravodiča je da oni odbijaju magnetsko polje, to jest ponašaju se kao **savršeni dijamagneti**. Pokus koji to pokazuje nije teško načiniti, te se na predavanjima iz fizike na fakultetima često pokazuje studentima. Potrebno je u neku zdjelicu staviti mali magnet, naliti tekućeg dušika, i iznad magneta staviti tableticu načinjenu od nekog od visokotemperaturnih supravodiča. Pare tekućeg dušika ohladit će tableticu na -196°C , što je dovoljno da se u njoj pojavi supravodljivost. Kako supravodič odbija magnetsko polje, tabletica će lebdjeti iznad magneta.



Slika 8.1. Levitacija (savršena dijamagnetičnost supravodiča)

To se svojstvo koristi kod tzv. "levitirajućih vlakova", koji postoje u Japanu (rekordna izmjerena brzina 2003 godine 581 km/h). Ti vlakovi doslovce lebde iznad tračnica. Kad se takav vlak giba, ne dolazi do trenja, koje se uvijek javlja kad su dva materijala (kotač i tračnica) u kontaktu. Trenje je izvor grijanja. Ono rezultira gubitkom energije, ali i ograničava brzinu vlakova zbog opasnosti za materijal od kojeg su načinjeni kotači. U slučaju levitirajućih vlakova trenja nema, pa se vlakovi gibaju brže i s manje gubitaka. Nezgodno je jedino što se pritom koriste supravodiči hlađeni tekućim helijem, pa su takvi vlakovi jako skupi te ih zbog toga malo ima.



8.2. Levitirajući vlak u Japanu

Nadalje, supravodiči se koriste za izradu najosjetljivijeg poznatog instrumenta za mjerenje magnetskih polja (SQUID - superconducting quantum interference device). Ti su uređaji tako osjetljivi da mogu mjeriti magnetska polja nastala aktivnošću mozga.

8.2. Primjena super vodiča u Elektroenergetskim postrojenjima

Supervodljivost je poznata dugo vremena ali nije našla praktičnu primjenu zbog visoke cijene izrade materijala i sistema koji bi održavali niske temperature. Poznato je da se supervodljivost može održati pri temperaturama blizu apsolutne nule -273.15 Celzijusa. U 1988 godini dva naučnika IBM otkrivaju potpuno novi materijal čija se supervodljiva svojstva mogu održati na temperaturama 20 puta višim od apsolutne nule. Materijal je nazvan HTS - High Temperature Superconductor (Supervodič pri visokim temperaturama. Visoka temperatura je još uvijek niska temperatura 20 puta viša od apsolutne nule). Ranije materijale su potom prozvali Nisko temperaturni supervodiči (LTS - Low Temperature Superconductor).

Materijal koji se koristi za izradu supervodiča je vrsta keramike sa inherentnim lomljivim svojstvima. Februara 28, 2001, javno je objelodanjeno, da je porodica materijala iz kojih se HTS proizvodi, nazvana "boridi", jer sadrže magnezijum bora). Da bi se materijal mogao praktično koristiti, trebalo je riješiti pitanje lomljivosti. To je riješeno posebnom metodom izrade vodiča. Tanka vlakna mikronskih dimenzija supervodiča obloženo je sa srebrnom legurom, koja je dala potrebnu čvrstoću i omogućila laku i dobru izmjenu kisika, koja je potrebna u proizvodnji tog istog materijala. Firma koja proizvodi vodič, American Superconductor Corporation je proizvod patentirala 1987 godine i nazvala ga 1G HTS, prva generacija HTS supervodiča.

Supervodič provodi istosmjernu struju bez otpora a izmjeničnoj struji pruža mali otpor, koji nastaje prolazom struje sa vlakna na vlakno, koji su složeni u obliku slično cigli u zidu. Prijelaz sa jedne "cigle" na drugu, očituje se kao otpor ili nečistoća supervodiča. Druga generacija 2G, supervodiča koja je razvijena 1995 godine, ima još bolje osobine a cijena je pet puta jeftinija, što će doprinijeti masivnoj upotrebi u skoroj budućnosti. Novi supervodič može prenositi od 100 do 140 puta veću struju od bakrenog vodiča istih dimenzija. U ispitivanjima, vodiči su protjecani strujama gustoće $27,000 \text{ A/cm}^2$. Smatra se, da je za praktične svrhe potrebno proizvesti vodič koji će bez problema prenositi gustoće od $14,000 \text{ A/cm}^2$ i imati mehanička svojstva "klasičnih" kabela. Za sada je primjena ograničena na samo neka područja kao na pr. u izradi energetskih kabela i magnetskih spremišta energije.

8.2.1. Energetski kabele sa HTS supervodičima

Kabele sa HTS supervodičima mogu praktički prenositi pet puta veću energiju koristeći jednaki fizički prostor kao kabele sa bakarnim vodičima (uz iste, postojeće kabelske cijevi, kanale i tome slično). To je praktično i dokazano u projektu koji je nedavno završen u Detroitu, USA. Za taj projekt, proizvođač kabela, firma Pirelli, proizvela je HTS kabel koji će zamijeniti postojeće kabele (9 jednožilnih kabela, Cu) koji prenose 100 MW snage. Ta ista snaga prenijeti će se sa samo tri jednožilna HTS kabela. Oslobođeni prostor u kabelskom kanalu se nakon toga, bez dodatnih građevinskih radova, može koristiti za polaganje novih kabela za prijenos, po istom računu, narednih 200 MW snage (računajući samo broj kabela). Ovdje treba napomenuti da u velikim gradovima sa velikom gustoćom infrastrukture, građevinski radovi predstavljaju veliku stavku u cijeni elektroenergetskog projekta.

8.2.2. Magnetsko spremište Energije na osnovi Supervodiča

Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES), je proizvod ili bolje rečeno skup proizvoda koji čine jednu cjelinu: spremište električne energije

Komercijalni proizvod je spremište električne energije koji se sastoji od namotaja LTS vodiča, koji može spremiti 3 MJ energije ($1\text{J}=1\text{Nm}$; $1\text{kWh}=3600\text{kJ}$, znači 3MW energije za jednu sekundu), HTS vodiča za spoj spremišta sa korisnikom (kabeli ulaz, izlaz) te sklopom pomoćnih naprava za upravljanje i održanje sistema. Sve je to spremljeno u traileru (prikolici) i zauzima minimalni prostor.

Iz spremišta se može koristiti radna i jalova energija. Radna energija je spremljena u supervodljivom namotaju. Istosmjerna struja "pun" namotaj od LTS supervodiča dok se spremište ne napuni energijom. Pošto nema električnog otpora u LTS vodiču, struja neprekidno teče unutar namotaja, praktički beskonačno dugo, ako je LTS vodič na dovoljno niskoj temperaturi. Istosmjerna struja se može koristiti iz spremišta, "ubrizgati" u sistem koristeći odgovarajuće elektronske sklopove. Ta se istosmjerna struja konverterima pretvara u izmjeničnu i koristi za potrebu za koju je spremište predviđeno. Trenutno se taj proizvod koristi za regulaciju padova napona izazvanih kvarovima u mreži, isključivanju i uključivanju velikih kondenzatorskih baterija, atmosferskog prenapona. Kratki padovi napona (sags) u mreži, uzrokom su preko 90% zastoja u proizvodnji i katkada izazivaju nestabilnost čitavog energetskog sustava.

8.3.Prvi visokonaponski supravodič u pogonu

Krajem travnja Long Island je dobio prvu komercijalnu primjenu supravodiča u prijenosu električne energije. Biti će mi izuzetno drago ako činjenicu o 7-10% gubitaka energije u prijenosnom sustavu više nećemo smatrati pod normalno.



8.3. HTS kabeli u pogonu

Long Island Power Authority (LIPA) i American Superconductor Corporation pustili su u pogon prvi svjetski prijenosni vod koji u komercijalnom sustavu koristi visokotemperaturni supravodič (*high temperature superconductor* – HTS). HTS kabel provodi električnu energiju skoro bez gubitaka omogućujući da više proizvedene energije stigne do potrošača, što ga razlikuje od postojećih bakrenih vodiča. Veća učinkovitosti HTS kabela tako postaje sredstvo za smanjenje gubitaka i emisija stakleničkih plinova uz osiguravanje dovoljnih kapaciteta za povećanje potražnje za energijom.

Instalirani sustav od 138 kV sastoji se od tri HTS fazna kabela u paraleli a pušteni su u pogon 22. travnja i uspješno rade na prijenosnom sustavu. Sustav kabela je spojen na postojeću prijenosnu mrežu sa posebnim prenosnicama koje je proizveo i instalirao Nexans a cjelokupni kabelski sustav je hlađen tekućim dušikom. Kabeli su u biti cijevi, kojima cirkulira tekući dušik, na koje je omotan plašt sastavljen od tankih HTS niti koje provode 150 puta više električne energije nego slični sustav temeljen na bakrenim žicama. Pod punim kapacitetom postavljeni HTS kabel može prenijeti do 574 MW električne energije. Za lakšu usporedbu, na slici iznad tri HTS vodiča koji ulaze u zemlju mogu prenijeti više energije nego cjelokupni dalekovod u pozadini.



8.4. Izgled HTS Supravodiča

US Department of Energy (DOE) financirao je dio projekta sa \$27,5 milijuna do ukupnih \$58,5 milijuna troškova projekta. DOE planira ovakvim potezima omogućiti razvijanje modernih elektroenergetskih sustava koji će omogućiti revoluciju u prijenosu električne energije. Već postojeći HTS prijenosni vodovi rasteretiti će opterećene vodove i zagušenost mreže. Postavljenjem ovakvih sustava, koji mogu prihvatiti velike količine električne energije, na strateškim pozicijama može se ostvariti dodatna sigurnost opskrbe u slučaju kvarova. Zbog takvog svojstva samoprilagodbe očekuje se da će HTS vodiči postati ključne komponente u novim, sigurnijim i učinkovitijim elektroenergetskim sustavima.

Opširnije: [American Superconductor Corporation](https://www.americansuperconductor.com/)

9. POLAGANJE KABELA

Kabeli obuhvaćeni ovim granskim normama (Vjesnik HEP Distribucije d.o.o. Bilten br.130) namijenjeni su trajnom polaganju: u zemlju, u vodu, na otvoreni prostor, u kabelaške kanale i zatvorene prostorije.

Prigodom polaganja kabela posebno treba obratiti pozornost na:

- dimenzioniranje presjeka vodiča prema očekivanom strujnom opterećenju,
- utjecaj grupe kabela ili susjednih izvora topline,
- specifičnu toplinsku vodljivost medija u koju je kabel položen,
- zaštitu od Sunčevog zračenja,
- dopuštenu struju kratkog spoja,
- zaštitu od lutajućih struja i korozije,
- stabilnost terena i vibracije,
- zaštitu od mehaničkih oštećenja kabela,
- zaštitu od kemijskih utjecaja,
- glatkoću i čvrstoću podloge na koju se kabel polaže.

9.1. Transport kabela

Kabeli se transportiraju na bubnjevima. Krajevi kabela moraju biti vodonepropusno zaštićeni odgovarajućim kapama. Za transport kabelaških bubnjeva, smiju se koristiti samo prikladna vozila s osiguranjem bubnjeva za prijevoz.

Kabelaški bubnjevi se ne smiju pri istovaru, odnosno utovaru, bacati. Za istovar se može koristiti dizalica, (kranovi) pomoćne rampe ili kosina. Kada uvjeti dopuštaju, kabele treba uskladištiti na natkritom mjestu, osigurati od izravnog utjecaja Sunčevog svjetla, atmosferilija, truljenja.

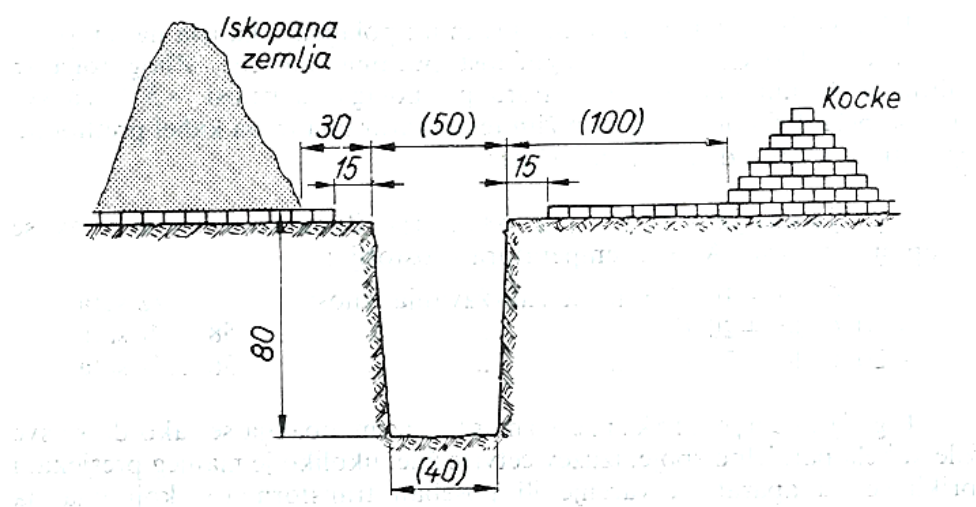
Svaki kabelaški kolut ili kabelaški bubanj mora imati natpisnu pločicu s utisnutim podacima o kabeu: tip kabela, broj i presjek žila, nazivni napon, težinu i duljinu kabela, godinu proizvodnje i broj kabelaškog koluta.

9.2. Zemljani radovi

Trasa kabela, određena položajem krajnjih točaka koje kabel treba povezati, mora ispuniti uvjet najekonomičnijeg i najsvrsishodnijeg pravca u skladu sa zahtjevima projektiranja, građenja i eksploatacije. Pri tome treba izbjegavati klizišta i agresivan teren (sol, kiseline itd.).

Nakon što se ispita ima li drugih instalacija pod zemljom (kabeli, cjevovodi itd) kopa se rov.

Profil kabelskog rova na slobodnom zemljištu prikazuje *slika 9.1.* dok način razbijanja asfalta i betona upotrebom pneumatskog ili motornog čekića prikazuje *slika 9.2.* Za iskop rova upotrebljavaju se univerzalni strojevi za iskop, zatrpavanje i planiranje zemljišta.



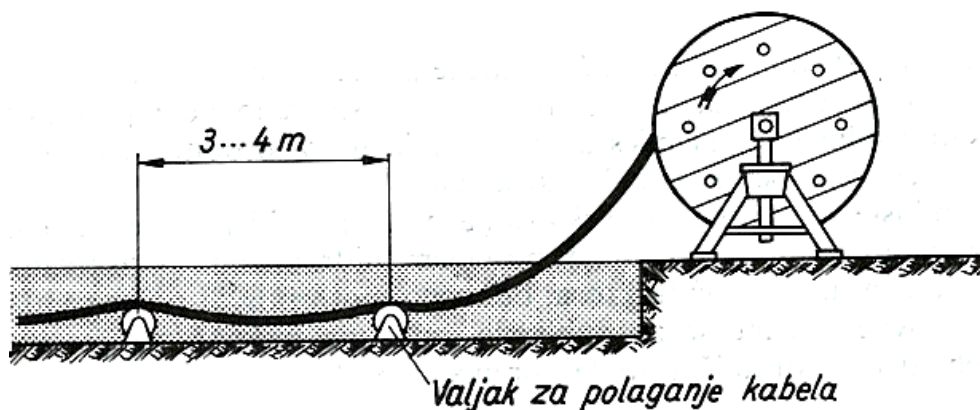
Slika 9.1. Iskop kabelskog rova (u popločanoj ulici)



Slika 9.2. Motorni čekić za razbijanje asfalta i betona [5]

9.3. Odmatanje i polaganje kabela

Kabel se odmotava laganim i jednolikim potezanjem s gornje strane bubnja, tako da je smjer odmotavanja suprotan smjeru strelice na bubnju (Slika 9.3.).



Slika 9.3. Odmatanje kabela sa bubnja

Polaganje kabela u rov može se obaviti na više načina.

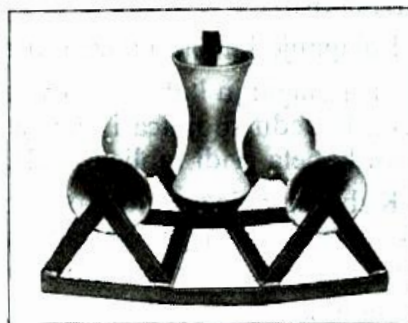
Ručno polaganje kabela (kraće dionice do 300 m):

- odmotani kabel radnici nose na rukama - broj radnika treba odrediti tako da opterećenje na jednog radnika iznosi do 20 kg, a pri tomu treba uvažiti minimalne dopuštene polumjere savijanja kabela te se **kabel ne smije vući po tlu**. Na težim mjestima treba postaviti veći broj radnika.

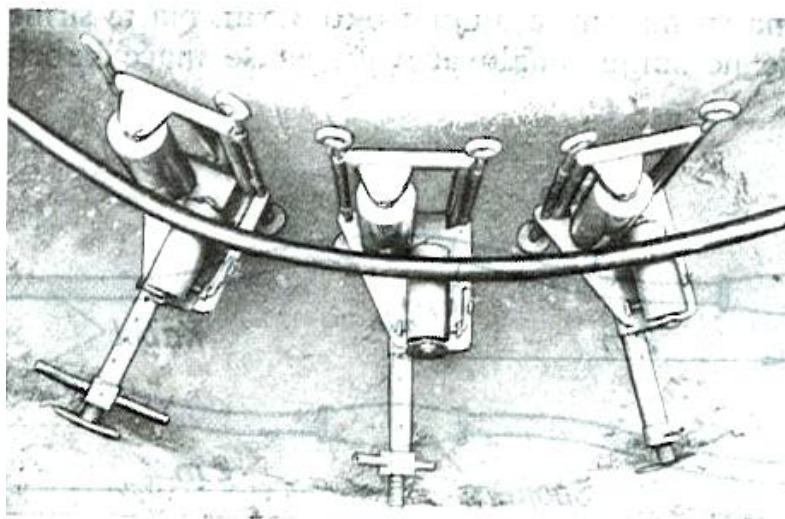
Kod ručnog polaganja kabela moguća je i upotreba valjaka (Slika 9.4.) Raspored valjaka određuje trasa, odnosno uvjet da se kabel ne smije vući po tlu, niti da se smije smanjiti dopušteni polumjer savijanja.



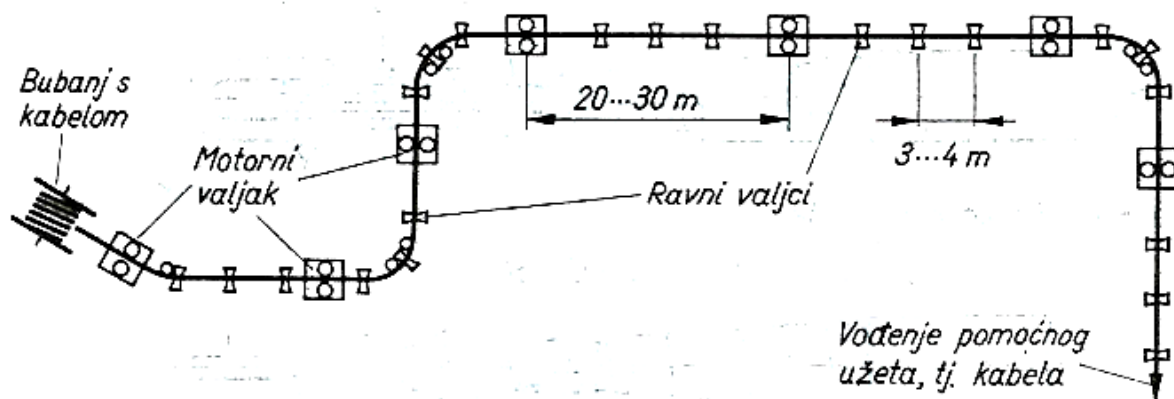
a) Ravni valjak



b) Kutni valjak



c) Kutni valjci s podupiračima



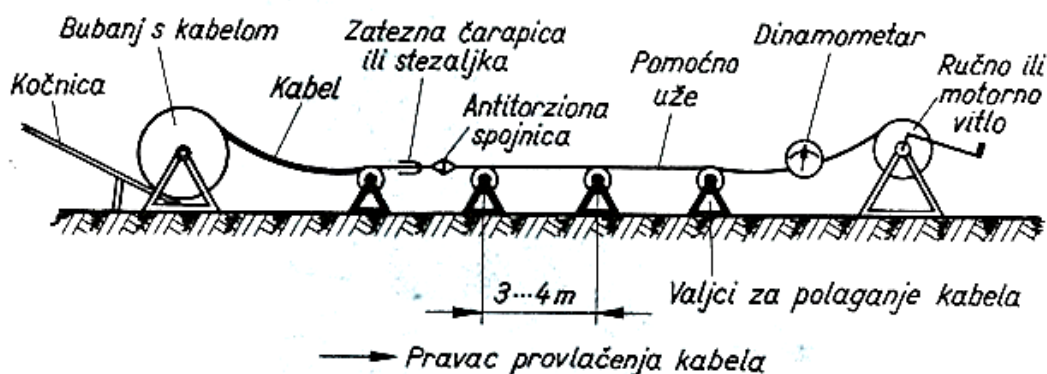
Slika 9.4. Polaganje kabela pomoću valjaka

Odmotavanje kabela s pokretnog vozila duž trase te ručno polaganje u rov dopušta se na prohodnim terenima (slika 9.5.). Kod ovog postupka treba uzeti u obzir sve napomene za odmotavanje i polaganje kabela.



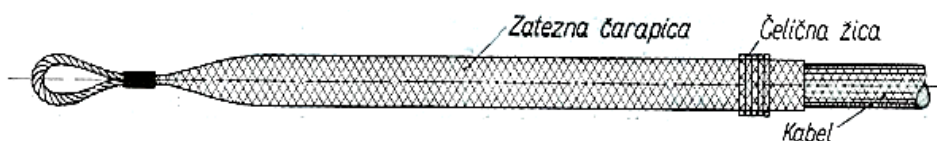
Slika 9.5. Polaganje kabela sa vozila [5]

Kabel ne smije biti vučen preko tvrdih oštih predmeta ili bridova. **Polaganje kabela pomoću vitla** (strojno polaganje kabela) dopušta se na trasi gdje nema prepreka i zakrivljenja. Kabel se vuče preko samorotirajućih valjaka, koji su postavljeni na dnu rova (slika 9.6.).

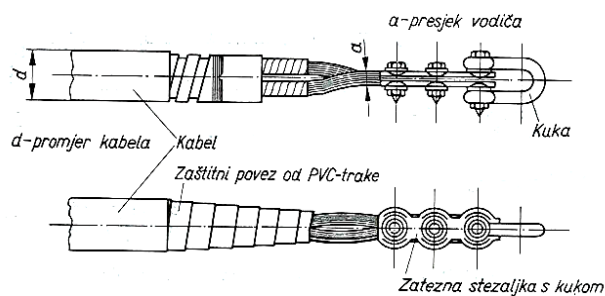


Slika 9.6. Povlačenje kabela pomoću motornog vitla i pomoćnog užeta

Potezno uže vezano je za kraj kabela pomoću zateznečarapice (slika 9.7.a) (koja se odabire prema promjeru kabela). Nakon polaganja, duljina kabela obuhvaćena “čarapom” mora se odstraniti te ponovno zabrtviti kraj kabela.



a) Zatezna čarapica



b) Zatezna stezaljka-vučna glava



c) Antitorzione spojnice

Slika 9.7. Elementi za međusobno spajanje kabela i pomoćnog užeta [5]

Kod polaganja kabela pomoću vitla (na duljim ili težim trasama), gdje se pojavljuju veće zatezne sile, kabel treba prihvatiti zateznom stezaljkom za vodiče (Slika 9.7.b).

Za slučaj polaganja kabela na izlomljenoj trasi, treba koristiti kutne valjke (Slika 9.4.c). Prije strojnog polaganja kabela potrebno je izračunati silu potezanja kabela s obzirom na: duljinu kabela, koeficijent trenja, skretanje u trasi i nagib trase.

Kod mehaniziranog načina polaganja kabela potrebno je kontrolirati poteznu vlačnu silu pomoću dinamometra, a njenu vrijednost treba snimati tijekom polaganja.

Za spriječavanje torzijskog (torzija-uvijanje tijela zbog djelovanja momenta) opterećenja kabela, ugrađuje se između poteznog užeta i zatezne čarape-antitorzijska spojnica (slika 9.7.c).

Vučna sila ne smije prekoračiti dopušteno mehaničko naprezanje kabela, odnosno vrijednosti u Tablici 9.1., gdje je:

D - vanjski promjer kabela (mm),

A - presjek vodiča (mm²),

n - broj vodiča (kabela).

	Tip kabela	Dopuštena sila potezanja (N)
Primjenom zatezne čarape	PP00-A, XP00-A, PP44-A, XP44-A XHE 49-A, XHEh 91-A	$F_d = 5 \times D^2$
Primjenom vučne stezaljke	Vodič Cu	$F_d = n \times A \times 50$
	Vodič Al	$F_d = n \times A \times 30$

Tablica 9.1. Dopuštene sile potezanja

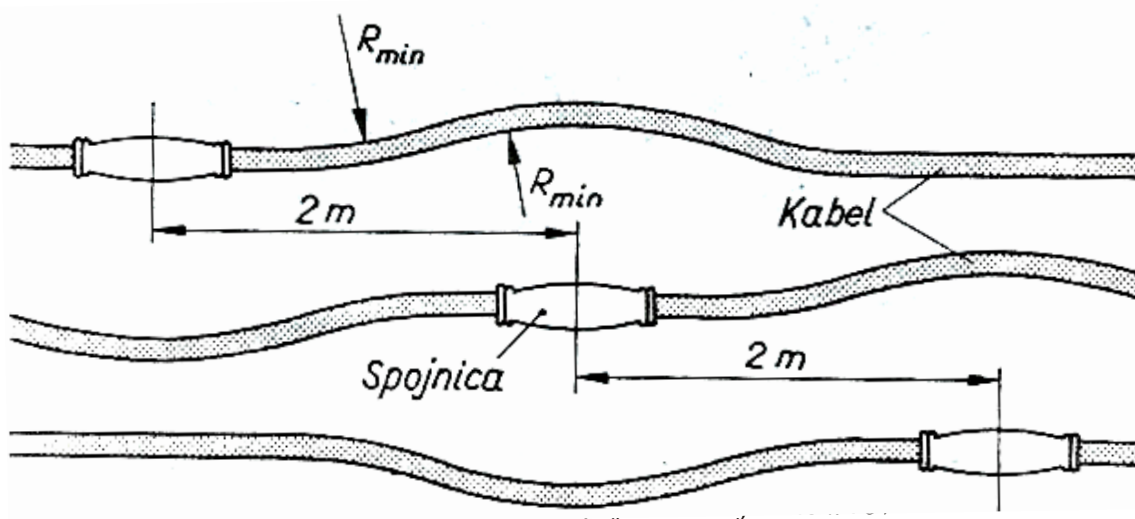
Skidanje kabela s valjaka nakon završenog polaganja treba započeti od bubnja u smjeru vučenog kraja kabela.

Pri odmotavanju i transportu kabela treba uzeti u obzir najmanji dopušteni polumjer savijanja kabela prema Tablici 9.2.

Kabeli	Nazivni napon	Vrsta izolacije	
		PVC	PE-X
Jednožilni kabeli	1-35 kV	-	15 x D
Višežilni kabeli	1 kV	12x D	10 x D

Tablica 9.2. Dopušteni polumjeri savijanja kabela kod polaganja

Kabel treba polagati u rov valovito - vijugavo, kako bi se izbjegla naknadna naprezanja kabela zbog njegovog zagrijavanja ili pomicanja zemljišta. Radi toga duljina položenog kabela mora biti veća za 1 do 3 % od duljine trase. Na mjestima predviđenim za kableske spojnice treba ostaviti kabel duži oko 1 m da bi se kabel mogao naknadno saviti blago na ulazu u kablesku spojnicu, a mora postojati i rezerva za slučaj proboja spojnice (slika 9.8). [5]



Prije zatrpavanja kabela, potrebno je obaviti :

- ispitivanje položenog kabela,
- snimiti točnu trasu i duljinu kabela,
- označiti križanja s ostalim objektima i spojna mjesta.

Na krajeve položenog kabela obvezno treba postaviti pločice za označavanje kabela.

Na položeni kabel treba postaviti sloj usitnjene zemlje debljine najmanje 10 cm, sloj od pijeska ili sloj drugog odgovarajućeg materijala, ako se time uspostavljaju bolji uvjeti hlađenja.

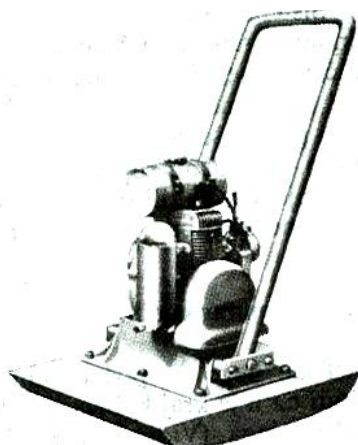
Iznad kabela treba postaviti mehaničko upozoravajuću zaštitu kabela-sintetičke štitnike ili štitnike od drugih materijala (primjerice opeka).

Iznad kabela 40-60 cm (ovisno o dubini polaganja kabela) postavlja se cijelom duljinom trase plastična upozoravajuća traka. Traka je izrađena od folije mekog polivinilklorida ili polietilena crvene boje. Uzduž trake po sredini stoji upozorenje velikim crnim slovima: **POZOR ENERGETSKI KABEL**. Natpis se ponavlja nakon razmaka od 100 mm.

Rov se zatrpava otkopom tako da se prvo baca rastresita zemlja bez komada kamenja, betona, opeke i sličnog. Zatrpavanje treba obaviti u slojevima s opreznim nabijanjem i to osobito neposredno iznad kabela. Nabijanje materijala izvodi se motornim nabijačem (slika 9.9)

Sloj do 30 cm iznad kabela mora se nabiti ručno.

Ako je zemlja previše suha, treba je navlažiti. Nije dopušteno zatrpavanje rova sa smrznutom zemljom.



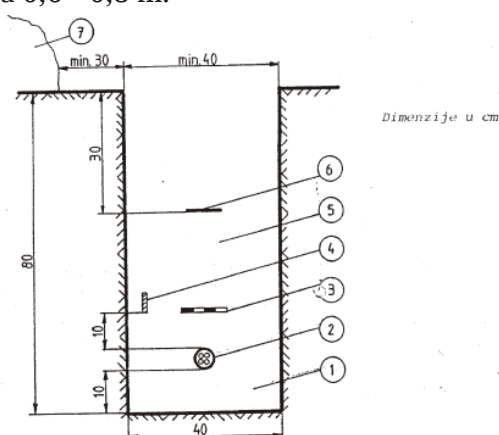
Slika 9.9. Motorni nabijač zemlje [5]

9.4. Polaganje kabela na slobodnim površinama

Zemljane radove treba obavljati u skladu s općim zahtjevima građevinskih normi i drugih postojećih propisa, koji se odnose na ovu vrstu radova. Širina i dubina kablenskog rova prema ili u pravilu se određuju prema **nazivnom naponu i broju paralelno polaganih kabela**.

Normalna dubina rova u zemlji gdje nema ostalih instalacija prema pravilu iznosi za:

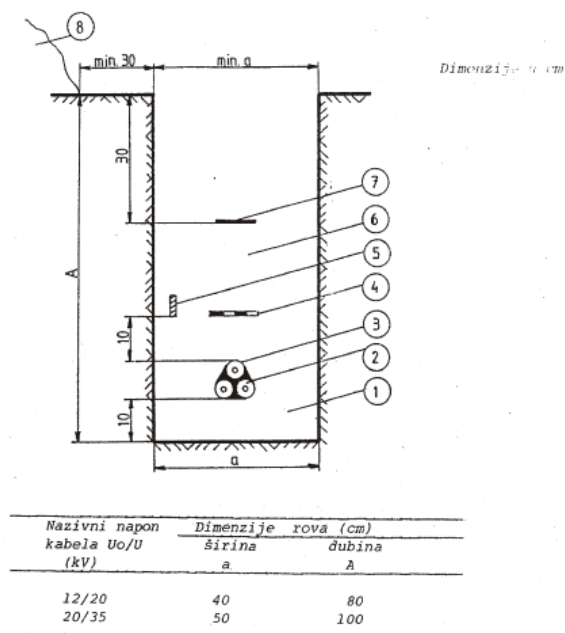
- $U_0/U = 0,6/1$ i $12/20$ kV – kabel **dubina rova 0,8 m**,
- $U_0/U = 20/35$ kV - kabel, dubina rova 1,0 m,
- signalni - kabel, dubina rova 0,6 - 0,8 m.



KAZALO:

- 1 - fino usitnjena zemlja ili pijesak
- 2 - kabel $U_0/U = 0,6/1$ kV
- 3 - dodatna mehanička - upozoravajuća zaštita
- 4 - uzemljivač (ako postoji)
- 5 - nabijena zemlja
- 6 - upozoravajuća traka
- 7 - iskopana zemlja

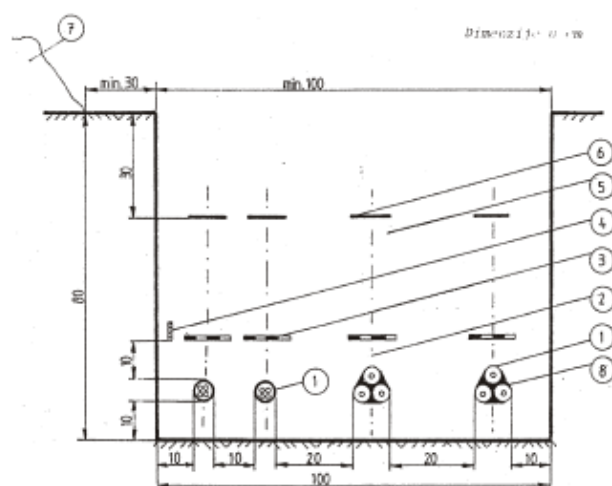
Slika 9.10. Presjek kablenskog rova za polaganje kabela nazivnog napona U_0/U (0,6/1 kV)



KAZALO:

- 1 - fino usitnjena zemlja ili pijesak
- 2 - kabel $U_0/U = 12/20$ i $20/35$ kV
- 3 - držač kabela
- 4 - dodatna mehaničko-upozoravajuća zaštita
- 5 - uzemljivač (ako postoji)
- 6 - nabijena zemlja
- 7 - upozoravajuća traka
- 8 - iskopana zemlja

Slika 9.11. Presjek kabelskog rova za polaganje tri jednožilna kabela u jedan kabelski vod, nazivnog napona U_0/U (12/20 kV ili 20/35 kV)

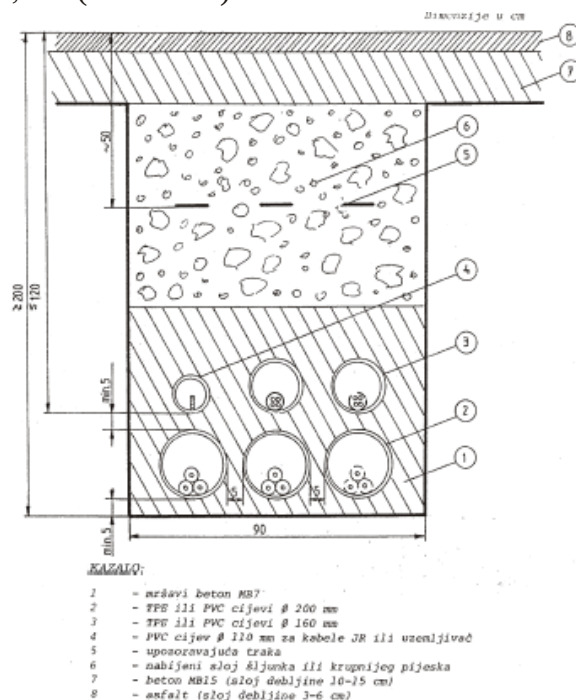


KAZALO:

- 1 - kabel $U_0/U = 0,6/1$ kV i
kabel $U_0/U = 12/20$ kV
- 2 - fino usitnjena zemlja ili pijesak
- 3 - dodatna mehaničko-upozoravajuća zaštita
- 4 - uzemljivač (ako postoji)
- 5 - nabijena zemlja
- 6 - upozoravajuća traka
- 7 - iskopana zemlja
- 8 - držač kabela

Slika 9.12. Presjek kabelskog rova za polaganje kabela, nazivnog napona U_0/U (0,6/1 kV) i U_0/U (12/20 kV) u zajednički rov

Moguće su i manje dubine ako se poduzmu posebne zaštitne mjere, odnosno posebni uvjeti polaganja. Kod prijelaza cesta i ulica s frekventnim prometom, potrebno je povećati dubinu ukapanja na najmanje 1,2 m (*slika 9.13.*).

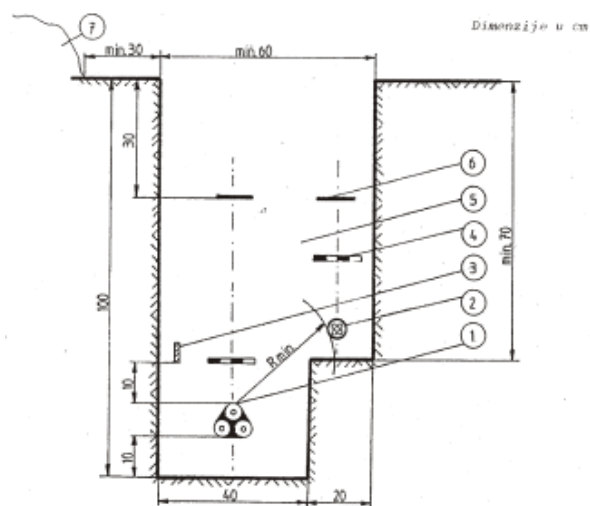


Slika 9.13. Presjek kabelskog rova na križanju s prometnim putevima

Odstupanje od normalne dubine ukapanja kabela dopušteno je na mjestima križanja s drugim podzemnim instalacijama te kod paralelnog polaganja kabela različitih naponskih razina u zajedničkom rovu i slično. Za smanjenje međusobnog utjecaja paralelno položenih kabela, potrebno je pridržavati se najmanje dopuštene međusobne udaljenosti kabela prema *Tablici 9.3.*

Vrsta kabela	Prema pravilu međusobna udaljenost (cm)
Telefonski pokraj telefonskog	0 cm
Signalni pokraj signalnog	0 cm
Signalni pokraj svjetlovodnog	0 cm
Signalni pokraj telefonskog	5 cm
Energetski NN kabele međusobno	10 cm
Energetski kabele 10 kV pokraj drugih energetskih kabela	15 cm
Energetski kabele 20 kV i 35 kV pokraj drugih energetskih kabela	20 cm

Tablica 9.3. Najmanje dopuštene međusobne udaljenosti kabela



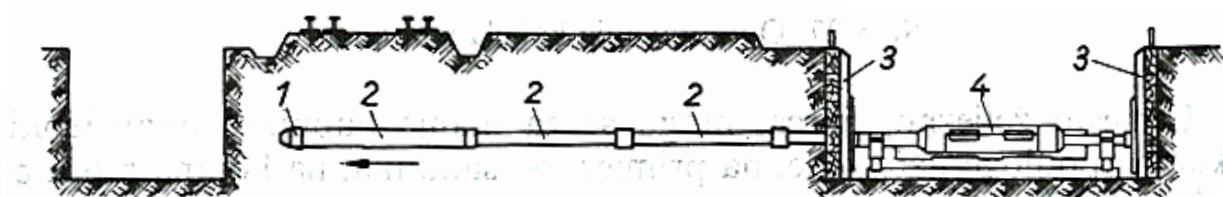
$R_{min} = 30 \text{ cm}$

KAZALO:

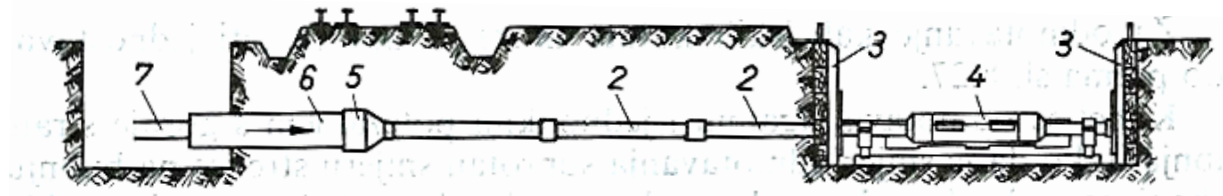
- 1 - kabel nazivnog napona $U_0/U = 20/35 \text{ kV}$
- 2 - signalni kabel
- 3 - uzemljivač (ako postoji)
- 4 - dodatna mehaničko-upozoravajuća zaštita
- 5 - nabijena zemlja
- 6 - upozoravajuća traka
- 7 - iskopana zemlja

Slika 9.14. Presjek kabelskog rova za polaganje kabela nazivnog napona U_0/U (20/35 kV) i signalnog kabela u zajednički rov

U slučajevima prijelaza trase kabela ispod željezničkih, tramvajskih pruga ili kolnika važnih prometnica, na kojima se promet ne smije ometati, obavlja se bušenje ili probijanje otvora s naknadnim provlačenjem kabela kroz cijev (slika 9.15.) Na jednoj strani prometnice iskopa se pogodna jama u koju se montira stroj za bušenje, koji okretanjem svojih svrdla izbacuje zemlju i stvara prostor za uvlačenje plastične cijevi (najčešće $\Phi 110 \text{ mm}$).



a) Bušenje postupkom dubljenja



b) Uvlačenje zaštitne cijevi i pomoćnog užeta ili kabela ispod prometnica

Slika 9.15. Hidraulički uređaj za bušenje tla [5]

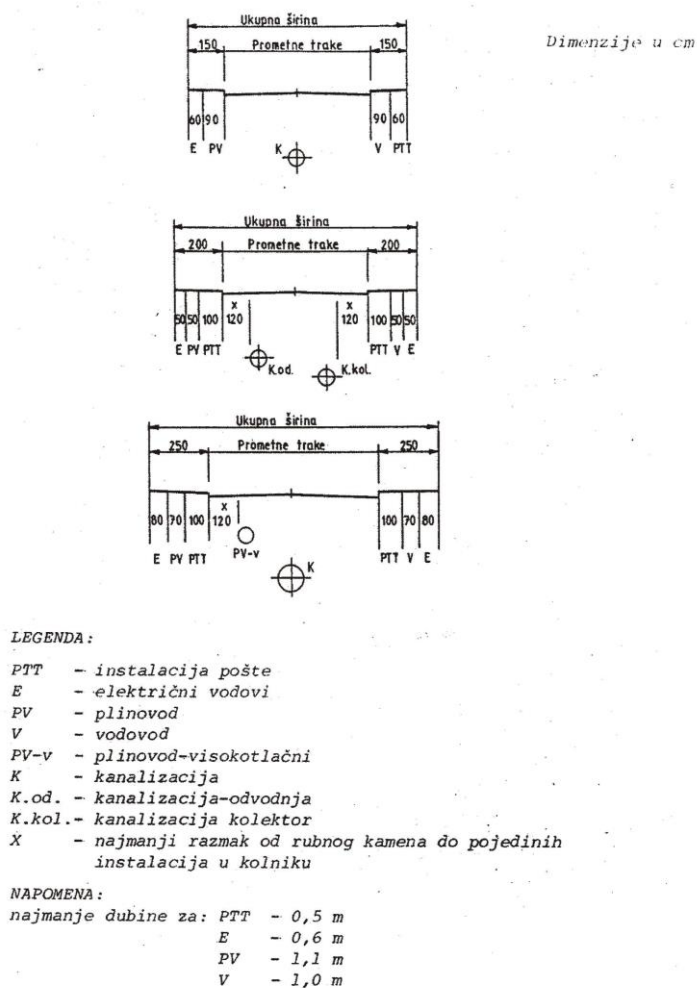
9. 5. Međusobni utjecaj elektroenergetskih kabela i drugih podzemnih instalacija

Kabeli za opskrbu potrošača električnom energijom mogu se polagati u suhe i vlažne prostorije, u zemlju, u javno-prometnu površinu, u vodu i na otvoreni prostor. Pod javno prometne površine podrazumijevaju se općenito: javno prometni putovi, raskrižja, trgovi, vodotoci, mostovi, prolazi, nadvožnjaci, podvožnjaci i slično.

Način izrade i sadržaj investicijsko – tehničke dokumentacije za polaganje kabela propisan je važećim zakonom za izgradnju objekata.

Trasa kabela mora biti usklađena s postojećim stanjem različitih opskrbnih postrojenja, uz potpuno pridržavanje propisa mjerodavnih organa (primjerice: organizacija za prostorno planiranje, vodovodnih instalacija, kanalizacije, plina, telefona, toplovoda, - mjesnog prometa, **elektro distribucije**, željeznice, uprave za puteve, vodoprivrede).

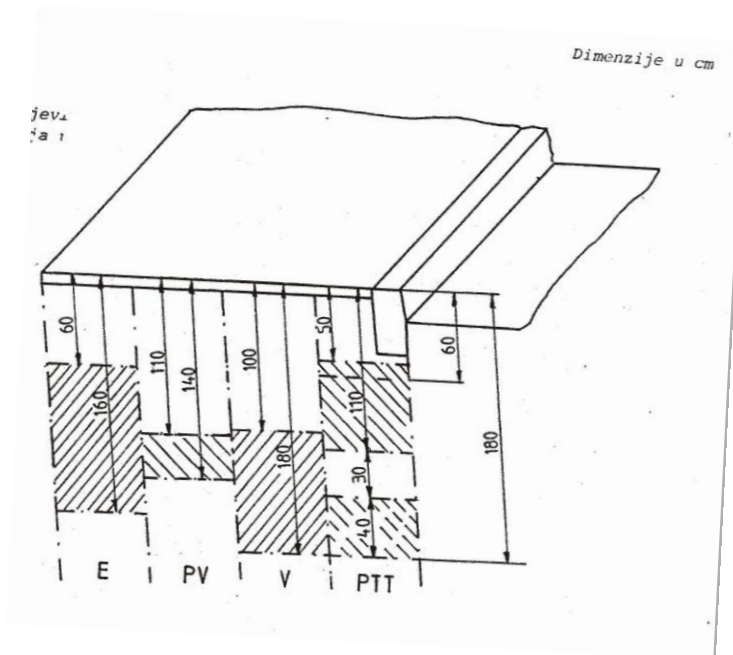
Kod planiranja i izgradnje javnoprometnih puteva te ugradnje različitih instalacija, preporuča se pridržavati rasporeda elektroenergetskih kabela u odnosu na različita opskrba postrojenja (slika 9.16).



Slika 9.16. Načelni smještaj vodova i postrojenja u javnim površinama

U skladu s prethodno rečenim, preporučuju se načela za smješta podzemnih instalacija na urbaniziranom području:

- u pravilu postrojenja za opskrbu trebaju biti izvan kolnika, a kanalizacija i plinovod visokog tlaka u kolniku,
- kod podjele treba uzeti u obzir uzajamni utjecaj različitih postrojenja, te nužni prostor za rad, izgradnju i eksploataciju postrojenja,
- pješački hodnik dijeli se počevši od linije granice ulice na zone (uvažavajući dubinu polaganja *slika 9.17.*).



Kazalo:

E - zonu (elektrovodovi)

PV - zonu (plin)

V - zonu (vodovod)

PTT - zonu (pošta),

Slika 9.17. Načelna raspodjela hodnika u zone

Uobičajeni način polaganja vodova za opskrbu **elektroenergijom** (E - zona).

Ovdje ubrajamo: srednjenaponske (do 35 kV) i niskonaponske kabele, signalne kabele, kabele za opskrbu javno-prometnih sredstava, kabele ulične rasvjete.

- uobičajena širina zone 0,7 m,
- pokrivač 0,6 m,
- dubina do 1,6 m.

Unutar zone kabeli mogu biti raspoređeni u okomitom smjeru prema svrsi primjene i razini napona. Kod prijelaza treba predvidjeti cijevi.

U slučaju nedostatka točnih podataka o položaju podzemnih instalacija, potrebno je predvidjeti mjestimično kopanje probnih jama duž projektirane (planirane) trase.

Prije početka radova na trasi, izvođačka organizacija treba imati kopiju katastarskog plana podzemnih instalacija tog područja te pisano mišljenje i uvjete radnih organizacija čije se podzemne instalacije nalaze na tom području.

Bez takve prethodne dokumentacije, ulice smiju biti prekopane samo u slučaju kvara, uz poduzimanje propisanih sigurnosnih mjera za zaštitu postojećih podzemnih instalacija.

U slučaju da ipak dođe do oštećenja bilo kojeg podzemnog objekta duž trase, potrebno je odmah izvijestiti zainteresiranu organizaciju. Sve objekte i postrojenja, investitor je dužan vratiti u prvobitno stanje.

Lomljenje trase ili promjenu dubine rova zbog zaobilaženja drugih podzemnih objekata, treba obaviti blago, uzimajući u obzir minimalno dopušteni polumjer savijanja kabela.

Dno rova treba izravnati i očistiti od kamenja i drugih oštih materijala, koji bi mogli izazvati oštećenje plašta kabela. Na dno rova treba postaviti sloj usitnjene zemlje debljine 10 cm (kao posteljica za kabel), odnosno sloj pijeska ili sloj drugog odgovarajućeg materijala.

9.5.1. Križanje s prometnim putevima

Na prijelazima preko prometnica, kao i na mjestima gdje se mogu očekivati veća mehanička naprezanja sredine, odnosno mogućnost mehaničkog oštećenja, kabelski vodovi polažu se u kabelsku kanalizaciju.

Kabelska kanalizacija izrađuje se od: betonskih, plastičnih, azbestno cementnih cijevi ili iz gotovih betonskih elemenata.

Zaštita kabela uvlačenjem u cijevi izvodi se u slučajevima:

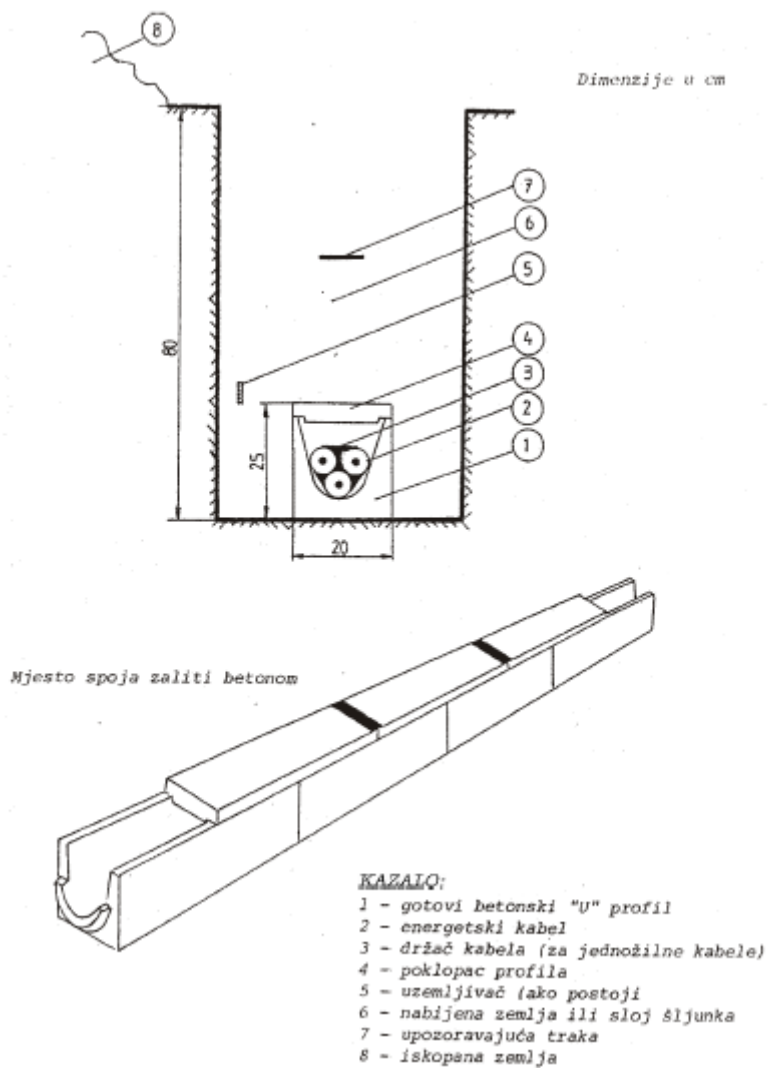
- pri križanju trase kabela s putevima, tramvajskim i željezničkim prugama,
- u slučaju prekoračenja dopuštenog minimalnog odstojanja kabela,
- pri mogućem mehaničkom oštećenju kabela,
- u cilju zaštite kabela od lutajućih struja.

Minimalni (unutrašnji) promjer cijevi mora biti za 1,5 puta veći od promjera kabela, a preporučuju se promjeri cijevi:

- 160 mm za kabele nazivnog napona U_0/U 0,6/1 kV,
- 200 mm za kabele nazivnog napona $U_0/U(U_m)$ 12/20(24) kV i 20/36(42) kV
- 110 mm za signalne kabele te za uzemljivače.



Slika 9.18. Cijevni blok prije betoniranja



Slika 9.19. Mehanička zaštita kabela sa gotovim betonskim profilom

Za kabelsku kanalizaciju od cijevi postavi se najprije posteljica od mršavog betona (MB 10), na koji se polažu cijevi. Cijevi treba oprezno spojiti (vodonepropusno i bez mehaničkih rubova), a spojeve zaliti cementnim mlijekom.

Kabelsku kanalizaciju treba postaviti prema pravilu okomito na os prometnice u pravcu produžetka trase kabela. Širina i dubina rova za kabelsku kanalizaciju ovisi o broju polaganih kabela, odnosno cijevi, koje mogu biti položene u jednoj ili više razina.

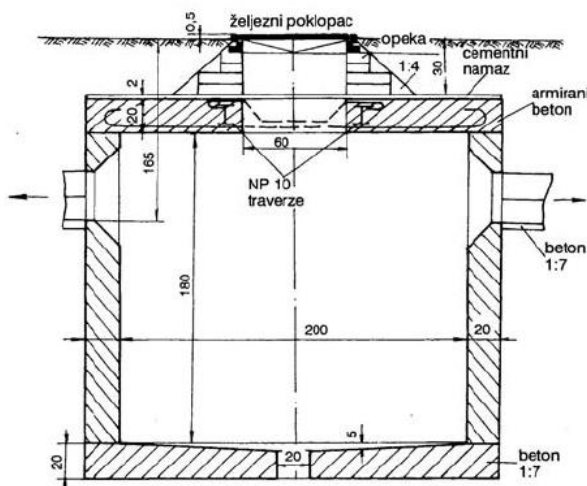
Ako se u kabelsku kanalizaciju polažu kabele različitih naponskih razina, tada se kabele nižeg napona polažu na manjoj dubini, odnosno u višim stajevima kanalizacije.

Polaganje cijevi ispod prometnica dopušta se na više načina: izravnim kopanjem rova u prometnici, bušenjem i tuneliranjem prometnice. Kod prvog načina polaganja, radove treba izvoditi u više etapa-većinom u dvije - tako da se promet izvodi po slobodnoj polovici ceste.

Strojna ugradnja prolaznih cijevi obavlja se u slučajevima u kojima nije dopušteno ni djelomično ometanje prometa. Strojna ugradnja može se obavljati hidrauličkim prešama, čeličnim trnom, svrdlom za zemlju i sličnim.

Da bi se kabelska kanalizacija mogla koristiti, na određenim se razmacima (60-100 m) grade zdenci. Lokacija zdenaca prilagođuje se mjestima račvanja kabela.

Konstrukciji se kabelski zdenci izводе prema statičkom proračunu. Minimalni ulazni otvor pokriven željeznim poklopcem iznosi 65 x 65 cm. Na dnu treba postojati drenažni otvor, a na bočnom zidu postavljaju se silazne stubbe od željeznih šipki ili drugog materijala. Bočni zidovi mogu biti od betona ili opeke.



Slika 9.20. Zdenac kabelske kanalizacije

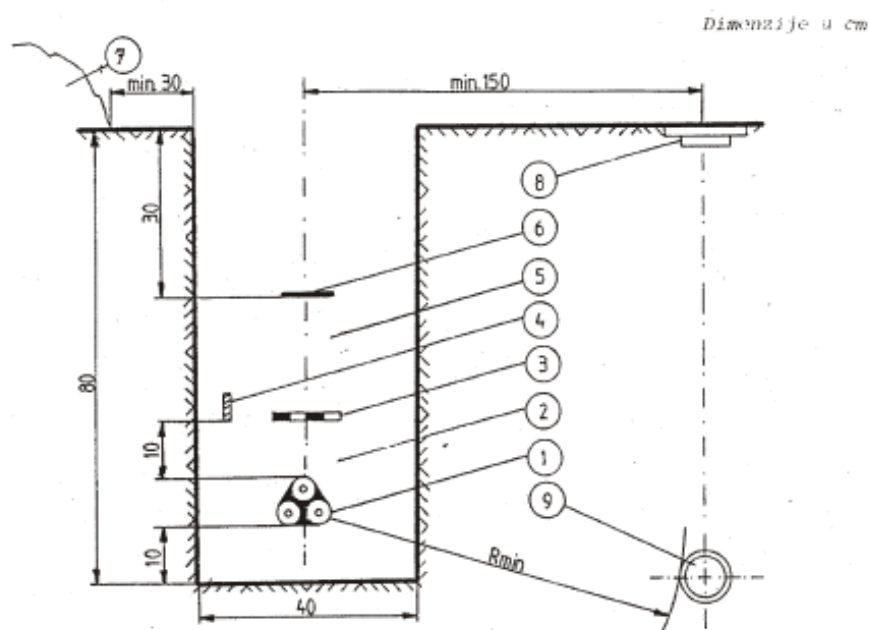
Za prijelaz kabela ispod važnih prometnica, križanja i sličnog, odnosno kod polaganja većeg broja kabela - mogu poslužiti prohodni i neprohodni kanali, izvedeni prema statičkom proračunu.

9.5.2. Križanje i paralelno polaganje kabela s vodovodom i kanalizacijom

Polaganjem energetskih kabela postojeća postrojenja ne smiju biti ometana ni oštećena. Za eliminiranje međusobnih utjecaja i oštećenja, potrebno je pridržavati se minimalnih razmaka kod križanja, približavanja i paralelnog vođenja energetskih kabela s ostalim objektima.

Polaganje energetskih kabela ispod ili iznad vodovodnih odnosno kanalizacijskih cijevi - osim križanja - **nije dopušteno**.

Minimalni vodoravni razmak pri paralelnom polaganju energetskog kabela i vodovoda iznosi 0,5 m, odnosno 1,5 m za magistralni vodoopskrbni cjevovod . Ovo rastojanje se može i smanjiti do 30 posto ako se obje instalacije zaštite specijalnom mehaničkom zaštitom (slika 9.21).



$R_{min} \geq 150$ cm za magistralne cjevovode

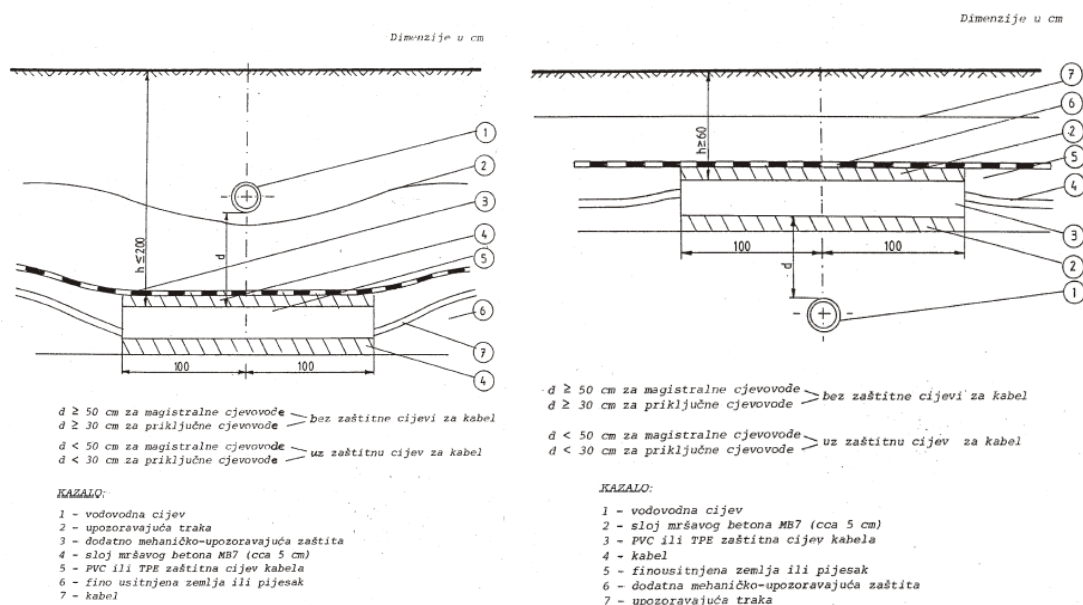
$R_{min} \geq 50$ cm za cjevovode nižeg tlaka te
za kućne priključke

KAZALO:

- 1 - energetski kabel
- 2 - fino usitnjena zemlja ili pijesak
- 3 - dodatna mehaničko-upozoravajuća zaštita
- 4 - uzemljivač (ako postoji)
- 5 - nabijena zemlja
- 6 - upozoravajuća traka
- 7 - iskopana zemlja
- 8 - zdenac vodovoda
- 9 - vodovodna cijev

Slika 9.21. Paralelno vođenje i približavanje energetskih kabela i vodovoda

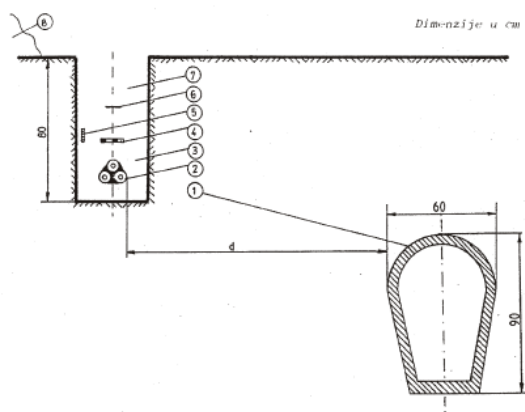
Na mjestu križanja kabel može biti položen iznad ili ispod vodovoda, ovisno o visinskom položaju cijevi. Kod križanja potrebno je energetski kabel zaštititi od mehaničkog oštećenja, postavljajući ga u zaštitnu cijev tako da je cijev dulja za 1 m sa svake strane mjesta križanja (slika 9.22).



a) Križanje vodovod-kabel (ispod vodovoda) b) Križanje vodovod-kabel (iznad vodovoda)

Slika 9.22. Križanje energetskih kabela i vodovoda

Minimalni vodoravni razmak pri paralelnom polaganju energetskog kabela i kanalizacije iznosi 0,5 m za manje kanalizacijske cijevi ili kućne priključke, odnosno 1,5 m za magistralni kanalizacijski cjevovod – slika 9.23).



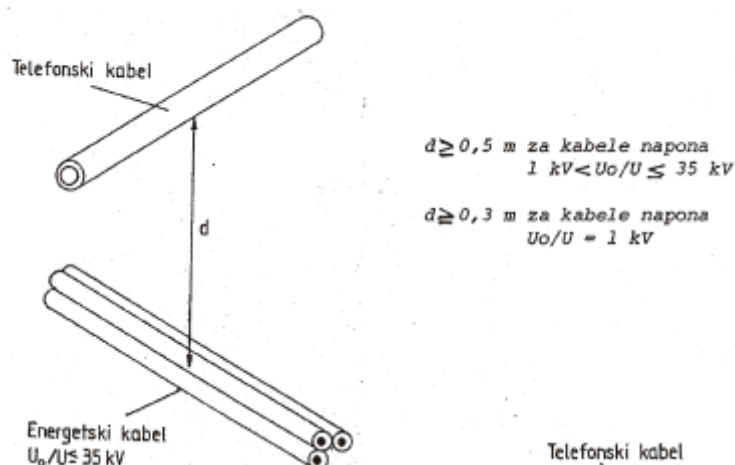
Slika 9.23. Paralelno vođenje i približavanje energetskih kabela i kanalizacije

Na mjestu križanja, kabel može biti položen samo iznad kanalizacijskog cjevovoda i to u zaštitnim cijevima čija je duljina 1,5 m sa svake strane mjesta križanja.

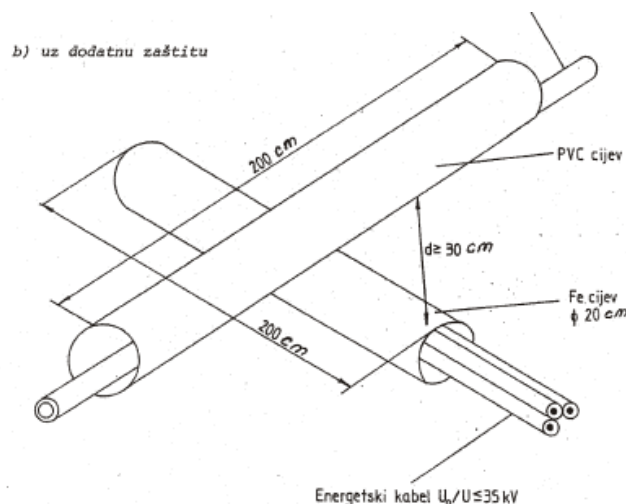
U slučaju da se minimalni razmaci kod paralelnog vođenja kabela s vodovodom ili kanalizacijom na dijelu trase ne mogu postići, kabele je potrebno zaštititi polaganjem u kabelsku kanalizaciju.

9.5.3. Paralelno vođenje i križanje energetskih kabela s telefonskim instalacijama

Križanje energetskih kabela sa tt podzemnim kabelima treba se izvesti u pravilu pod kutem od 90° , s razmakom od 30 cm i to za energetske kabele 1 kV, a 50 cm za energetske kabele između 1 kV i 35 kV (slika 9.24a).

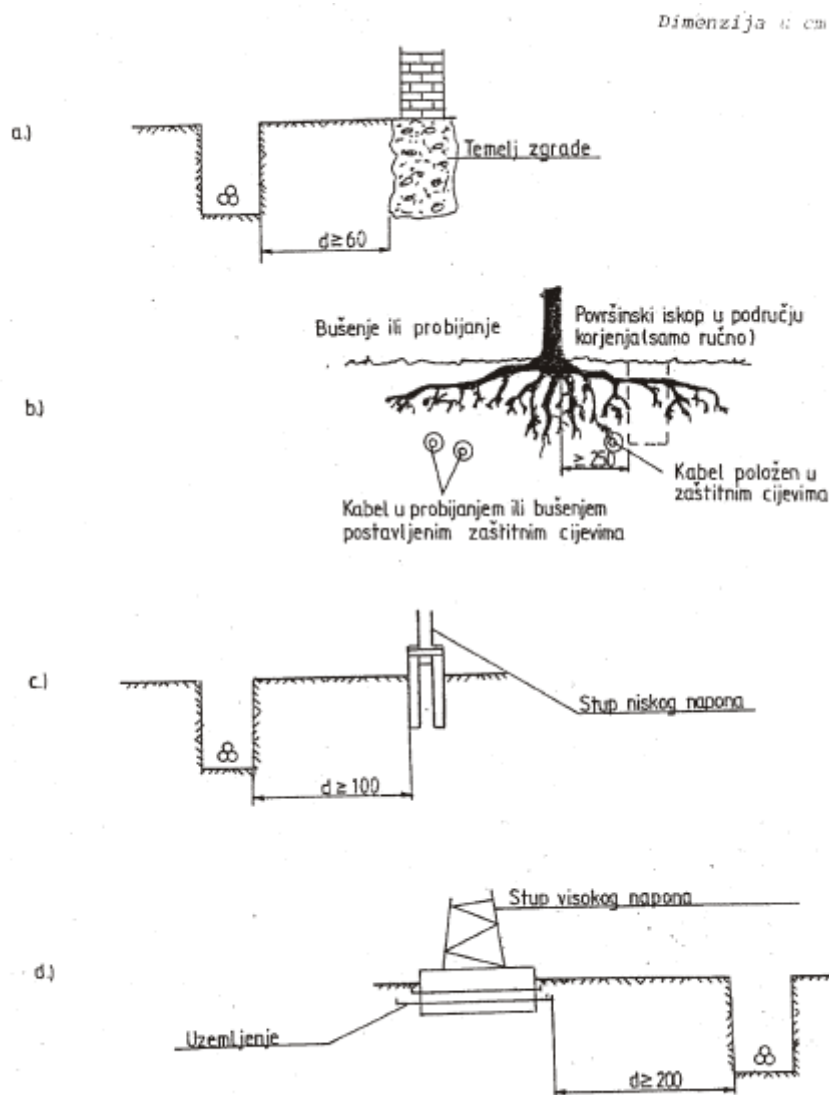


Ako se okomiti razmak od 50 cm ne može održati, kabeli se na mjestu križanja odvajaju materijalima otpornim na termički utjecaj, primjerice, postavljanjem u zaštitne cijevi, uz uvjet da razmak ne bude manji od 30 cm. Duljina zaštitnih cijevi, ne smije biti manja od 1 m s obje strane mjesta križanja. Zaštitne cijevi za energetske kabele moraju biti od dobro vodljivog materijala (primjerice, željezne), a za tt kabele od nevodljivog materijala (betonske ili plastične - slika 9.24b).



Nije dopušten prolaz energetskih kabela kroz zdence tt kabelaške kanalizacije. Udaljenost najbližeg energetskog kabela do 20 kV od najbližeg telekomunikacijskog kabela kod paralelnog približavanja iznosi najmanje 50 cm, odnosno 1 m za energetske kabele iznad 20 kV. Ako se spomenute udaljenosti ne mogu održati, na tim mjestima se između energetskih kabela i tt kabela postavlja pregrada od materijala otpornog na termički utjecaj.

9.5.4. Polaganje kabela u odnosu na druge objekte



Slika 9.25. Položaj kabela u odnosu na druge objekte

9.5.5. Prijelaz kablenskog voda u nadzemni

Kod prijelaza podzemnog kablenskog voda u nadzemni, potrebno je još u zemlji formirati kabel tako da polumjer zakrivljenosti ne prelazi najmanje dopuštene vrijednosti.

Kabel mora biti zaštićen od mehaničkih oštećenja najmanje 0,3 m u zemlji te najmanje 2,2 m iznad zemlje.

Mehanička zaštita izvodi se štitnicima, odgovarajućeg promjera te pričvršćen je obujmicama na najmanje dva mjesta.

Ako je zračna duljina kabela veća od 10 m, pri dimenzioniranju presjeka kabela treba uzeti u obzir zagrijavanje kabela zbog izloženosti Suncu.

Na mjestu prijelaza nadzemnog voda u kablenski treba primijeniti odgovarajuću zaštitu od atmosferskog pražnjenja. [2]

9.6. Polaganje podmorskih elektroenergetskih kabela



Odredbama granskih normi (N.034.03 klasa br. 4.35/02) propisuju se tehnički uvjeti i osnovne smjernice za izbor, izvedbu, projektiranje, transport, polaganje, spajanje, završavanje, ispitivanje i održavanje podmorskih energetskih kabelskih vodova.

Tehničkim uvjetima obuhvaćeni su kabelski vodovi nazivnog izmjeničnog napona: 0,6/1 kV, 12/20 kV, 20,8/36 kV i 64/110 kV pogonske frekvencije 50 Hz.

Podmorski energetski kabele (u daljnjem tekstu: podmorski kabel) obuhvaćeni ovom granskom normom namijenjeni su trajnom polaganju u more, rijeke i jezera.

Tehnički uvjeti u posebnom poglavlju obrađuju i problematiku priobalne kableske zaštite kao elementa kablenskog voda.

Tehnički uvjeti ove norme u dijelu propisa primjenjuju se i za telekomunikacijske kabele, (kao i integrirane u energetski kabel), a vezano za: transport, polaganje i priobalnu zaštitu.

Za podmorske kabele odabiru se vodiči od bakra, zbog svojih električnih i mehaničkih svojstava.

Za podmorske kabele preporuča se:

- | | |
|--|--------------------|
| - za nazivni napon $U_0/U=0,6/1\text{kV}$ | četverožilni kabel |
| - za nazivni napon $U_0/U=12/20\text{kV}$ i $20,8/36\text{kV}$ | trožilni kabeli |
| - za nazivni napon $U_0/U=64/110\text{kV}$ | jednožilni kabeli |

9.6.1. Polaganje, popravak i vađenje podmorskih kabela

Opće odredbe

Polaganje podmorskih kabela obavlja se: između kopna i otoka, između dva otoka, premoštenjem duboko usječenih uvala, te preko rijeka i jezera. Priobalna zaštita smatra se početnom i krajnjom točkom podmorskog dijela kabelske trase.

Kabelska trasa sastoji se od sljedećih elemenata:

- priobalna zaštita;
- podmorski dio kabelske trase.
- kopneni dio trase (kabelski kanal, kabelska stanica, prijelazna spojnica ili prijelaz kabelskog u zračni vod);

Lomna točka podmorske trase predstavlja mjesto gdje kabelska trasa mijenja smjer svrhom izbjegavanja podvodnih hridi ili zbog drugih razloga. Najveća dubina mora duž podmorske trase bitan je element o kojem ovisi: konstrukcija kabela, način polaganja te duljina kabela i pogonske pričuve. Bitni elementi koji utječu na ispravan odabir podmorske trase te izradu kvalitetne projektne dokumentacije su: hidrološka izmjera, geologija podmorja, magnetometrijski premjer te meteorološki i oceanografski podaci.

Pakiranje i transport podmorskih kabela

Poželjno je kabel isporučiti u jednoj neprekinutoj duljini.

Na svakom bubnju mora se nalaziti natpisna pločica sa sljedećim podacima:

- oznaka tipa, presjeka i nazivnog napona kabela;
- duljina kabela;
- bruto masa kabela;
- naziv proizvođača ili njegov zaštitni znak;
- broj bubnja.

Svi podaci s natpisne pločice trebaju biti trajno vidljivi. Transport podmorskog kabela moguće je kopnenim ili morskim putem.

Kopneni prijevoz obavlja se:

- kamionima;
- labudicama;
- vlakom.

Transport vlakom preporuča se za kabele koji se izrađuju u jednoj duljini.

Za utovar i istovar potrebno je ispuniti sljedeće:

- kod proizvođača je potrebno imati tehnologiju koja će slagati kabel u jednoj duljini;
- na mjestu iskrcaja kabela iz vlaka potrebno je izraditi konstrukciju za prekrcaj kabela na brod polagač. Transport morskim putem omogućuje isporuku kabela u jednoj neprekinutoj duljini.

Opremanje broda polagača

Prije početka opremanja broda potrebno je izraditi precizan nacrt smještaja uređaja i opreme za polaganje na brod polagač.

Opremanje broda polagača obavlja se u luci koja mora ispuniti sljedeće:

- luka mora biti zaštićena tako da je za slučaj vremenskih nepogoda moguć nesmetan rad;
- operativna obala mora imati dovoljno prostora za manevar dizalica, kamiona s bubnjevima te smještaj svih bubnjeva;
- prostor za izradu podmorskih spojnica mora imati mogućnost natkrivanja, a može se nalaziti na operativnoj obali ili na brodu polagaču.

Brod polagač treba biti opremljen najmanje sljedećom opremom i uređajima:

- pogonski hidraulički stroj;
- kompresor;
- pomoćni dizelski agregati;
- sidra za učvršćivanje broda u početnim i krajnjim točkama prigodom polaganja;
- vinčevi za sidra;
- zračni jastuci za izvlačenje krajeva kabela;
- geodetska oprema za navođenje broda te snimanje izvedenog stanja;
- metalne konstrukcije koje su nužne pri polaganju kabela;
- ostali nužni uređaji i alati.

Oprema i uređaji na brodu moraju biti osigurani od pomicanja.

Polaganje podmorskih kabela

Polaganje podmorskih kabela iznimno je zahtjevna radna operacija. Pri tomu treba zadovoljiti sljedeće:

- besprijekornu koordinaciju svih sudionika;
- meteorološki povoljne uvjete;
- ispravnost svih uređaja na brodu i kopnu;
- profesionalnost ronilačke ekipe;
- flotu iznimnih maritimnih sposobnosti;
- precizno navođenje broda polagača duž trase.

Meteorološki uvjeti moraju biti zadovoljavajući te je potrebno:

- pratiti tjednu i dnevnu prognozu vremena prije početka polaganja;
- u dogovoru s meteorologom odrediti dan početka polaganja;
- za početnu točku polaganja odabire se strana na kojoj su oceanografski i meteorološki uvjeti lošiji.

Maritimna svojstva broda polagača i uvježbanost posade uvjet su preciznosti polaganja I smanjuju mogućnost pogreške i oštećenja kabela. Preporuča se korištenje brodova koji su bili više puta na polaganju podmorskih kabela.

Geodetska ekipa mora biti specijalizirana za obavljanje ovih poslova te posjedovati profesionalnu opremu. Preporuča se paralelno korištenje pričuvne opreme za slučaj kvara na glavnom sustavu.

Ronilačka ekipa mora biti specijalizirana za obavljanje ovih poslova.

Preporuča se:

- da imaju profesionalnu opremu;
- ekipa mora brojiti najmanje tri profesionalna ronioca; - svi ronioci, oprema i brodovi moraju imati odgovarajuće i važeće dokumente.

Prije početka polaganja uz pomoć ronioca potrebno je postaviti plutače koje označavaju:

- lomne točke duž podmorske trase;
- krajeve priobalnih zaštita u moru;
- mjesta približavanja drugih instalacija (cjevovodi, telekomunikacijski kabele, kanalizacija I sličnim).

Voditelj radova treba izraditi precizan plan polaganja koji utvrđuje: vremenski plan, razmještaj ljudi, razmještaj brodova, način sidrenja broda u početnoj točki, način izvlačenja krajeva kabela na obalu i slično.

S tim planom treba upoznati:

- voditelja flote;
- voditelja geodetske ekipe;
- voditelja ronilačke ekipe;
- voditelja radnih skupina na brodu i kopnu;
- nadzornog inženjera;
- osiguravatelja radova i opreme.

Nakon polaganja kabela, a temeljem uputa iz projekta treba preroniti priobalne dijelove trase ili cijelu trasu ukoliko dubine mora to dopuštaju te izmjestiti kabel s neravnina gdje je moguće njegovo oštećenje. Projektom mogu biti navedene kritične dionice. Polaganje kabela završava završnim naponskim ispitivanjem izolacije i vanjskog plašta kabela.

Utvrđivanje mjesta kvara podmorskih kabela

U slučaju kvara, temeljem projekta i elaborata izvedenog stanja, treba pristupiti ispitivanjima i mjerenjima kako bi se pronašlo mjesto i svojstva kvara, te utvrdila dubina na mjestu kvara. Ispitivanjima treba pristupiti na oba kraja podmorskog kabela, da se sa sigurnošću potvrdi mjesto kvara i smanji mogućnost pogreške ili utvrdi postojanje dva ili više kvarova na kabelu.

Kvar u podmorskom kabelu može biti:

- na dubinama dostupnim roniocima
- na dubinama gdje je pristup ronilaca opasan te zahtijeva posebnu pripremu.

Ukoliko je kvar kabela na manjim dubinama, potrebno je hitno organizirati rezanje kabela na mjestu kvara, podizanje na površinu te naponsko ispitivanje obiju dionica kabela. Potom se krajevi kabela zatvaraju, kako bi se spriječio prodor mora te spuštaju na morsko dno.

Za slučaj kvara kabela na većim dubinama, gdje je pristup ronilaca opasan, potrebno je ispitivanjima i mjerenjima utvrditi mjesto kvara, označiti ga plutačama te u što kraćem vremenu organizirati popravak kabela.

Popravak podmorskih kabela

Prije početka ovih radova, potrebno je još jedanput naponski ispitati dionice kabela, a za uljne kabele obaviti uljnu probu, te odstraniti ovlaženi dio kabela.

Popravak kabela na manjim dubinama može se obaviti na brodu koji ima slobodan radni prostor od minimalno 10 x 10 m. Na tom prostoru postavlja se rezervni bubanj, oprema i šator za izradu podmorskih spojnica.

Početak popravka je učvršćivanje (sidrenje) broda u četverovez na mjestu kvara kabela.

Pričuvni kabel mora imati minimalnu dvostruku duljinu u odnosu na dubinu mora na mjestu kvara kabela. Na brodu za popravak kabela prvo se radi podmorska spojnica koja povezuje pričuvni kabel i jedan kraj kabela iz mora. Nakon toga, spojnica i pričuvni kabel se spuštaju u more do mjesta spajanja s drugim krajem kabela.

Nakon završenog popravka i spuštanja kabela na morsko dno, obavlja se naponsko ispitivanje te se kabel pušta u redoviti pogon.

Vađenje podmorskih kabela

Vađenje dotrajalih i napuštenih podmorskih kabela uobičajeno se obavlja u sljedećim slučajevima:

- kada po postojećoj trasi moramo položiti zamjenski kabel, koristeći postojeću dokumentaciju;
- kada kod polaganja novih kabela dolazi do jednog ili više križanja s napuštenim kabelom;
- zbog naloga Lučke kapetanije – (zapinjanje sidra i mreža za kabel);
- zbog ekoloških razloga – (zaštita mora od curenja ulja, katrana te čišćenje morskog dna od nepotrebnog kabela i slično).

9.6.2. Priobalna zaštita podmorskih energetske kabela

Opće napomene

Priobalnom zaštitom u prvom redu štitimo podmorske energetske kabele od mogućih oštećenja nastalih kao posljedica djelovanja erozijskih i razornih sila uzrokovanih valovanjem.

Međutim, moguća su oštećenja podmorskih kabela i od kobilica brodova, od ljudskog nemara kod transporta, odlaganja teških tereta i sličnoga.

Projektiranje priobalne zaštite

Priobalna zaštita mora ispunjavati sljedeće zahtjeve:

- vijek trajanja priobalne zaštite uskladiti s vijekom trajanja energetske kabela,
- vijek trajanja ne smije biti kraći od 50 godina,
- posebno uvažavati zahtjeve zaštite okoliša,
- koristiti tipiziranu koncepciju priobalne zaštite.

Izvedba priobalne zaštite

Izvedbu priobalne zaštite uvjetuje:

- intezitet valovanja,
- mjesto ulaska kabela u more,
- zahtjevi zaštite okoliša,
- nazivni napon i promjer kabela.

Osnovni tipove priobalne zaštite dijelimo prema načinu izvedbe:

- zaštita izvedena vrećama punjenim pijeskom cementom ili betonom,
- zaštita izvedena iskopom i betoniranjem zaštitnog utora,
- zaštita izvedena gotovim betonskim elementima,
- zaštita izvedena strojnim bušenjem priobalja.

Znakovi zabrane sidrenja

Znakovi zabrane sidrenja postavljaju se na mjestu ulaska, odnosno izlaska kabela iz podmorja.

Mjesto postavljanja znaka treba biti dobro uočljivo s mora, uzdignuto i neobraslo raslinjem.

Usmjerenje znakova treba biti u pravcu polaganja kabela.

Veličinu i izvedbu treba uskladiti sa zahtjevima nadležnih pomorskih vlasti, a prema

- Pomorskom zakoniku N.N. 17/94.,
- Pravilniku o oznakama na plovnom putu N.N. 40/94.

Znak zabrane sidrenja treba izraditi iz nerđajućeg materijala ili betona.

Periodični pregledi

Sa svrhom stalne informacije o stanju priobalne zaštite, a u funkciji poduzimanja aktivnosti preventivnog održavanja podmorskih kabela periodični pregledi se obavljaju (Vjesnik HEP Distribucije d.o.o. Bilten 100 tablice 13. i 14.), te dodatno:

- jedanput godišnje uz pomoć broda i stakla za gledanje podmorja,
- jedanput u pet godina zaronjavanjem,
- nakon izrazitih nepogoda na priobalnim zaštitama izloženim jakom valovanju. [4]





10. Kabelski pribor za spajanje i završavanje energetskih mreža

Kabelski pribor, kao nužni sastavni element za pogon kabela sačinjava:

- pribor za spajanje vodiča,
- kabelska spojnica i
- kabelski završetak.

Spojna čahura je kovinski dio koji služi za međusobno spajanje vodiča, te se razlikuje:

- čahura za lemljenje,
- čahura za prešanje i
- vijčana čahura.

Kabelska stopica je kovinski dio koji služi za spajanje vodiča na drugi električni uređaj, a može biti:

- stopica za lemljenje,
- stopica za prešanje i
- vijčana stopica.

Kabelska spojnica je pribor koji međusobno spaja dva kabela jednake ili različite konstrukcije te na mjestu spajanja preuzima električnu i mehaničku funkciju kabela.

Kabelski završetak je sklop postavljen na kraju kabela koji omogućuje električni spoj s drugim dijelom električne mreže i koji održava jednaku razinu izolacije na mjestu spoja.

Utični pribor je vrsta kabelskog pribora koji svojom konstrukcijom omogućuje spajanje kabela na metalno-oklopljena postrojenja. Prema funkciji i terminu postoji: sklopna uvodnica, kabelski utikač, rastavljivi završetak. [6]

10.1. Spajanje i završavanje kabela

Opće odredbe

Kabelski pribor za spajanje i završavanje kabela čini:

- pribor za spajanje vodiča, stopice, čahure, različite stezaljke,
- kabelske spojnice: ravne, prijelazne, završne,
- kabelski završeci: za unutrašnju montažu, za vanjsku montažu, utični pribor.

Kabelski pribor mora biti pogonski siguran, kao i sam kabel. Mora biti dimenzioniran, ne samo za električna i mehanička naprezanja, nego i za očekivane utjecaje okoline kao što su: vlaga, korozija, ozon, ultra-ljubičasto zračenje, različite nečistoće.

Svaki kabelski pribor mora imati odgovarajući atest o provedenom ispitivanju.

Montažne radove na ugradnji kabelskog pribora mogu obavljati samo kvalificirane osobe koje poznaju funkcije pojedinih elemenata kabela i kabelskog pribora.

Prije montaže kabelskog pribora provjerava se prisutnost vlage u kabelu.

Kod skidanja pojedinih slojeva kabela, obvezno treba slijediti uputstva proizvođača kabela, kabelskog pribora te koristiti odgovarajući alat.

Spajanje i završavanje vodiča

Spajanje i završavanje vodiča kabela izvodi se jednom od metoda:

- prešanjem (šesterokutno prešanje ili prešanje s dubokim utiskivanjem),
- vijčanim spojevima,
- varenjem i
- lemljenjem.

Nije dopušteno spajanje vodiča kabela lemljenjem ako se na vodiču kabela očekuju temperature pri kratkom spoju više od 160°C.

Svi prijelazi aluminijskih vodiča na bakrene, kao i priključivanje aluminijskih vodiča na električna postrojenja i aparate, moraju biti izvedeni odgovarajućim Al-Cu spojnim čahurama i stopicama.

Spajanje i završavanje vodiča postupkom prešanja izvodi se specijalnim hidrauličkim ili ručnim prešama, uz primjenu odgovarajućih alata propisanih od strane proizvođača pribora za spajanje vodiča.

Spajanje kabela

Spajanje kabela izvodi se odgovarajućim kabelskim spojnicama, ovisno o konstrukciji i izolaciji kabela.

Vrstu i tip spojnice određuje:

- nazivni napon kabela,
- konstrukcija i vrsta izolacije kabela i
- položaj spojnice u mreži.

Spojnica mora biti tako izvedena da trajno osigura spojno mjesto od prodora vlage, te da ga zaštiti od eventualnih mehaničkih oštećenja. Kod izrade kabelske spojnice treba osigurati i neprekinutost metalnih plašteva.

Završavanje kabela

Završavanje kabela izvodi se odgovarajućim kabelskim završecima, ovisno o konstrukciji i izolaciji kabela.

Vrstu i tip kabelskog završetka određuje:

- nazivni napon kabela,
- konstrukcija i vrsta izolacije kao i mjesto ugradnje (unutrašnja ili vanjska montaža),
- stupanj zagađenosti okoline u kojoj se izvodi ugradnja i način priključka na električno postrojenje, uređaje ili vodove.

Za završavanje kabela koriste se: kabelski završetak za vanjsku montažu i kabelski završetak za unutrašnju montažu u zatvorenim prostorijama.

U nečistim atmosferama preporuča se koristiti kabelski završetak s povećanim stupnjem izolacije. Metalni plašt kabela, kao i sve metalne dijelove kabelskog završetka, koji u normalnom pogonu nisu pod naponom – treba uzemljiti.

Kod izrade kabelskog završetka, spoj električne zaštite kabela s uzemljenjem mora biti rastavno i pristupačno na naponsko ispitivanje plašta kabela.

Za završavanje kabela s izolacijom od umjetne mase, koriste se kabelski završeci:

a) za niskonaponske kabele s PVC ili PE-X izolacijom:

- toploskupljajući i hladnoskupljajući završeci,
- kabelski završeci s dvokomponentnim zaljevnim masama,
- završeci na temelju elektroizolacijskih traka i
- gotovi elementi;

b) za srednjenaponske kabele sa PE-X izolacijom :

- toploskupljajući i hladnoskupljajući završeci,
- završeci u tehnici navlačenja i
- završeci na bazi elektroizolacijskih traka. [6]

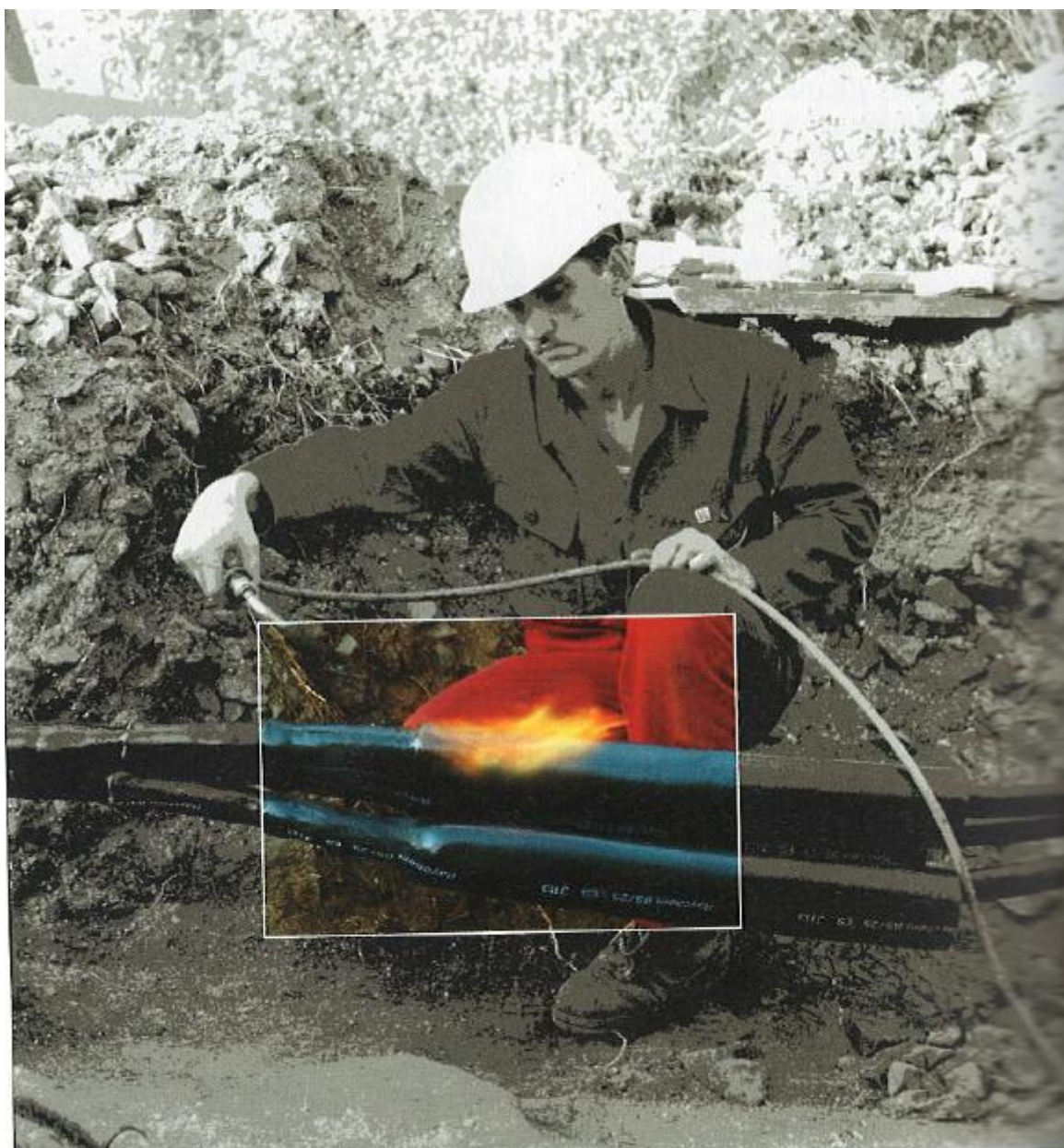
10.2. Sustav kabelskog pribora „Raychem“

Paleta proizvoda ovog proizvođača kabelskog pribora uključuje završetke za unutarnju i vanjsku ugradnju, ravne i prijelazne spojnice kao i univerzalne sustave izoliranja, brtvljenja i popravaka, koji se koriste u kabelskoj mreži.

Cjelokupni srednjenaponski pribor sadrži sustav za kontrolu i razdiobu električnog polja.

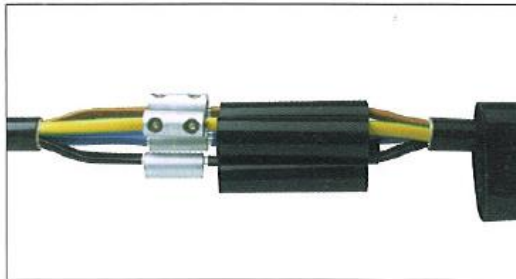
Zajednička osnova tehnologije za cijeli Raychem toploskupljajući kabelski pribor su molekularno umreženi polimeri s elastomjernim pamćenjem oblika. Oni pružaju značajno poboljšanu mehaničku, kemijsku i termičku otpornost u usporedbi s neumreženim materijalima.

10.2.1. Raychem niskonaponski sustav spajanja

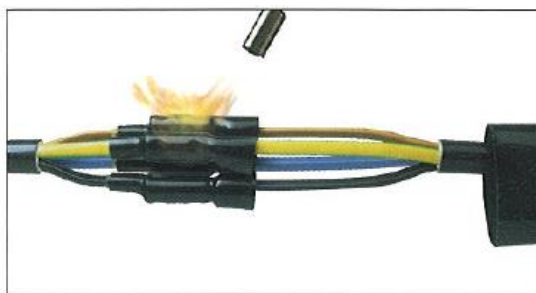


Primjer **montaže** spojnice za 1 kV plastični kabel.

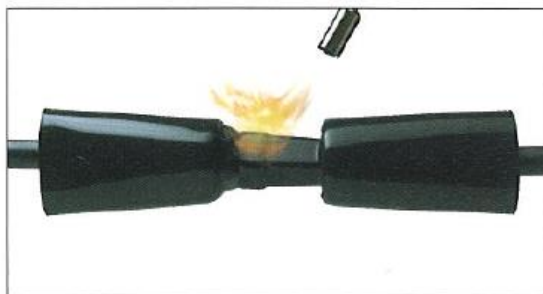
Nakon pripreme krajeva kabela, manje unutarnje cijevi kao i zajednička vanjska cijev, navuku se preko žila kabela. Vodiči se tada spoje čahurama za prešanje ili vijčanim čahurama.

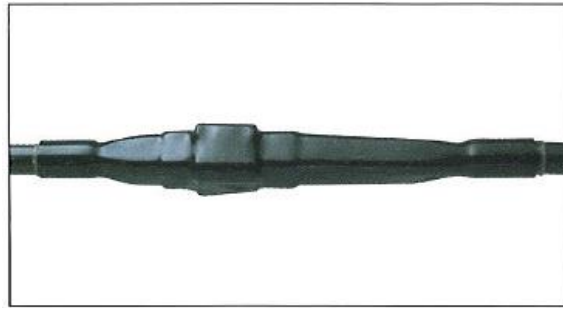


Unutarnje cijevi se postave preko čahura i zagriju tako da usko prionu na čahuru i izolaciju žila, osiguravajući pri tome odgovarajuću debljinu stjenke čak i kod krupnih vijčanih čahura. Istovremeno, toplina grijanja uzrokuje da se predhodno oslojeno ljepilo po unutarnjoj stjenci cijevi topi i da teče. Rezultirajuća veza ljepila i izolacije brtvi od ulaska vlage i korozije, te se prilagođava toplinskom širenju kabela u pogonu.



Vanjska cijev se postavi simetrično preko područja spojnice i zagrije. Mehanička i brtvena funkcija vanjskog plašta osigurana je sada s ovom debelostijenkastom cijevi. Trajno brtvenje ostvaruje se posredstvom termotopivog ljepila, koje je iznutra predhodno oslojeno po cijeloj dužini cijevi.





Spojnica je završena i istog trenutka se može pustiti u pogon.

Konstrukcija

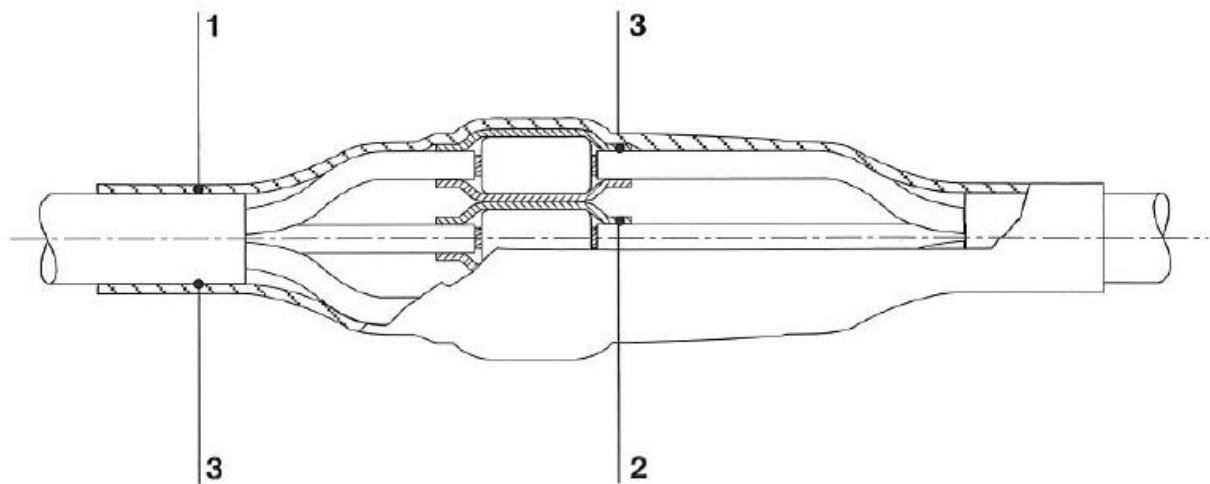
1 Vanjska cijev:

Debelostjenkasta zaštita od mehaničkih naprezanja i zaštita od vlage, brtvljenje na vanjskom plaštu kabela.

2 Unutarnje cijevi

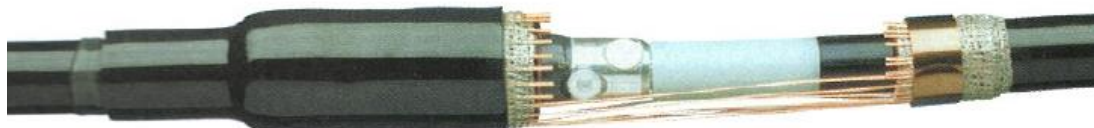
Debelostjenkaste cijevi, koje pružaju električnu izolaciju i zaštitu u području spojnih čahura od vlage koja može dospjeti u unutrašnjost kabela

3 Termotopivo ljepilo

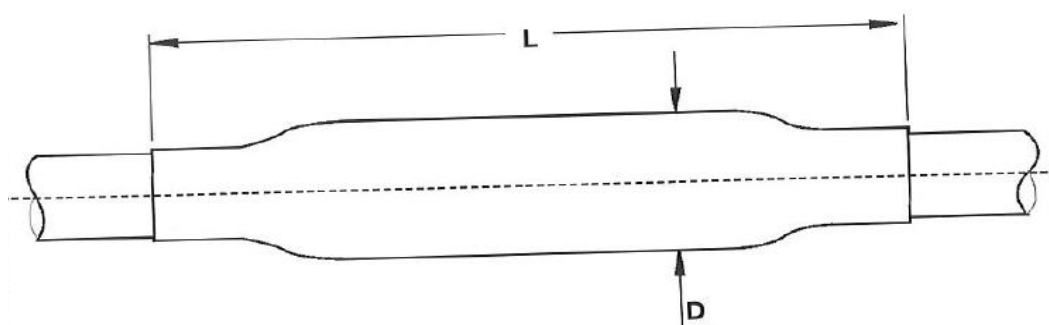


10.2.2. Srednjenaponske kabelske spojnice do 42 kV

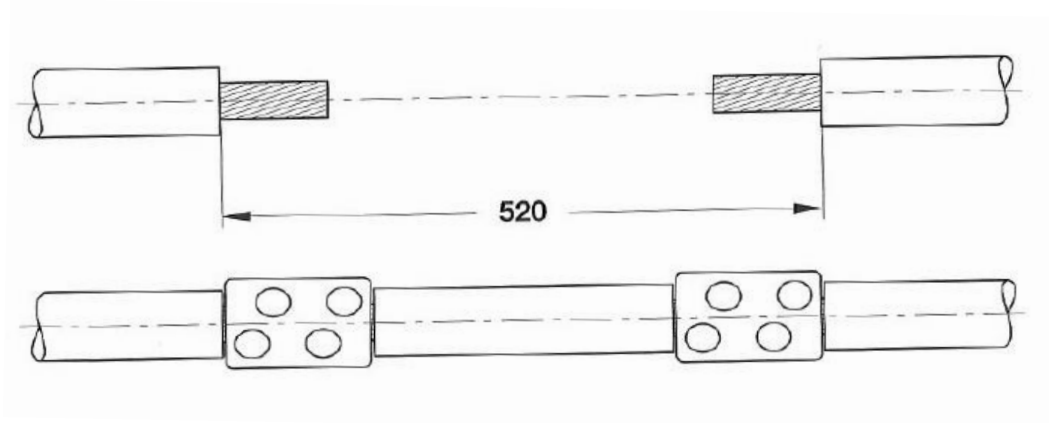
Primjer spojnice i servisne spojnice za 1-žilne ekranizirane kabele 10 kV, 20 kV i 35 kV



Spojnica



Dimenzije L i D vidi tablicu



Servisna spojnica

Kabel

Ove spojnice su konstruirane za spajanje 10, 20 i 35 kV jednožilnih plastičnih kabela kao npr: XHE 49-(A), XHP 48-(A), EHP 48-(A), N(A)2XS(F)2Y, N(A)2XSY, NFC 33-223 itd.

Konstrukcija spojnice s vijčanim čahurama

Za kabele s električnim oklopom od žica ili traka

Oko krajeva zaslona izolacije omota se žuta traka, a preko tako pripremljenih krajeva postave se i zagriju cijevi za kontrolu električnog polja.

Vodiči se međusobno spoje vijčanom čahuricom iz kompleta. Čahura se premota krpom za kontrolu električnog polja a preko nje se sada simetrično postavi toploskupljajuće trostruko ekstrudirano tijelo spojnice, koje osigurava ispravnu debljinu izolacije a ujedno ima na sebi ugrađen i vanjski zaslon izolacije.

Obnova električnog oklopa kabela započinje najprije motanjem bakrene mrežice, a povrhu se rasporede žice iz kabela i međusobno spoje kontaktnim prstenima priloženim u kompletu.

Za kabele s električnim oklopom od traka, spojica sadrži pribor za bezlemno spajanje uzemljenja. Vanjsko brtvljenje i zaštita izvodi se ljepljivom oslojenom debelostjenkastom toploskupljajućom cijevi.

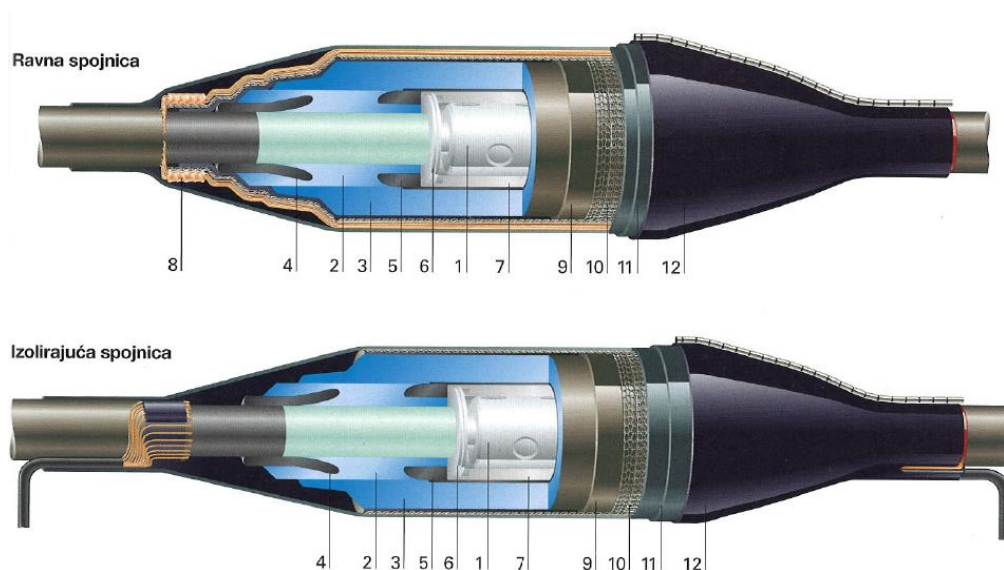
Servisna spojica

Konstrukcija i sastav servisne spojnice slični su kao i kod ravne spojnice. Veća dužina servisne spojnice omogućava izrezivanje oštećenog dijela kabela, te na njegovom mjestu ugradnju komada žile na kojem je ostavljen zaslon izolacije.

Spajanje vodiča se obavlja s dvije vijčane čahure. Ovo rješenje omogućava popravak oštećenja kabela u dužini od 520 mm (10 i 20 kV) ili 420 mm (35 kV). [6]

Spojnice s vijčanim čahurama					
Za kabele s el. oklopom od žica ili traka					
Nazivni napon U_0/U (kV)	Presjek vodiča (mm ²)	Narudžbena oznaka za kabele s el. oklopom od žica od traka i žica*		Dimenzije (mm)	
				L	D
6/10	25– 70	POLJ 12/1x 25– 70	POLJ 12/1x 25– 70-CEE01	450	45
	70–150	POLJ 12/1x 70–150	POLJ 12/1x 70–150-CEE01	450	55
	120–240	POLJ 12/1x120–240	POLJ 12/1x120–240-CEE01	450	65
	240–400	POLJ 12/1x240–400	–	500	75
	500	POLJ 12/1x500	–	500	85
	630	POLJ 12/1x630	–	500	85
	800	POLJ 12/1x800-Al-C**	–	550	90
12/20	25– 70	POLJ 24/1x 25– 70	POLJ 24/1x 25– 70-CEE01	500	55
	70–150	POLJ 24/1x 70–150	POLJ 24/1x 70–150-CEE01	500	65
	120–240	POLJ 24/1x120–240	POLJ 24/1x120–240-CEE01	500	70
	240–400	POLJ 24/1x240–400	–	550	80
	500	POLJ 24/1x500	–	550	90
	630	POLJ 24/1x630	–	550	90
20/35	35– 70	POLJ 42/1x 35– 70	POLJ 42/1x 35– 70-CEE01	800	65
	70–120	POLJ 42/1x 70–120	POLJ 42/1x 70–120-CEE01	850	70
	120–240	POLJ 42/1x120–240	POLJ 42/1x120–240-CEE01	850	75
	300–400	POLJ 42/1x300–400	–	900	85
	500	POLJ 42/1x500	–	900	95
	630	POLJ 42/1x630	–	900	95
* Spojnice su konstruirane za kabele s el. oklopom od bakrenih traka ili aluminijskim laminatima npr. tipa AHXAMK-W, a mogu se također koristiti i za kabele s el. oklopom od žica. Za prijelaz kabela s el. oklopom od žica na kabele s el. oklopom od Al-laminata, koristite standardnu spojinicu za kabele s el. oklopom od žica.					
** Ova spojica sadrži DIN čahuru za prešanje, za Al-vodiče, a ugrađuje se hidrauličnom prešom i matricom br. 58.					
Servisne spojnice za kabele s el. oklopom od žica ili traka					
Nazivni napon U_0/U (kV)	Presjek vodiča (mm ²)	Narudžbena oznaka	Najveća dužina popravka (mm)	Dimenzije (mm)	
				L	D
6/10	25– 70	REPJ-24/1x 25– 70	520	1200	50
	70–150*	REPJ-24/1x 70–150	520	1200	55
12/20	120–240	REPJ-24/1x120–240	520	1200	70
20/35	70–120	REPJ-42/1x 70–120	420	1200	55
	120–240	REPJ-42/1x120–240	420	1200	70
* za 10 kV kabele područje korištenja 95–150 mm ²					

10.2.3. Visokonaponske kableske spojnice s ili bez mogućnosti prekidanja električnog oklopa kabela EHVS od 123 kV do 170 kV



Presjek EHVS spojnice

- 1 Vijčana čahura
- 2 Adapter krajeva izolacije
- 3 Glavno izolacijsko tijelo
- 4 Stožac za oblikovanje el. polja
- 5 VN elektrode
- 6 Prsteni za učvršćenje izolacije
- 7 Metalni oklop vijčane čahure
- 8 Spoj uzemljenja (bez lemljenja)
- 9 Vodljiva cijev
- 10 Bakrena mrežica
- 11 Izolacijska cijev
- 12 Vanjska zaštita s ugrađenom vodonepropusnom barijerom

Primjena

Spojnice je tvornički predgotovljena u obliku tri glavna izolacijska elementa za naponske razrede do 170 kV. Obuhvaća najrazličitije konstrukcije plastičnih kabela s električnim oklopom od žica ili traka u kombinaciji s ili bez kovinskih plašteva.

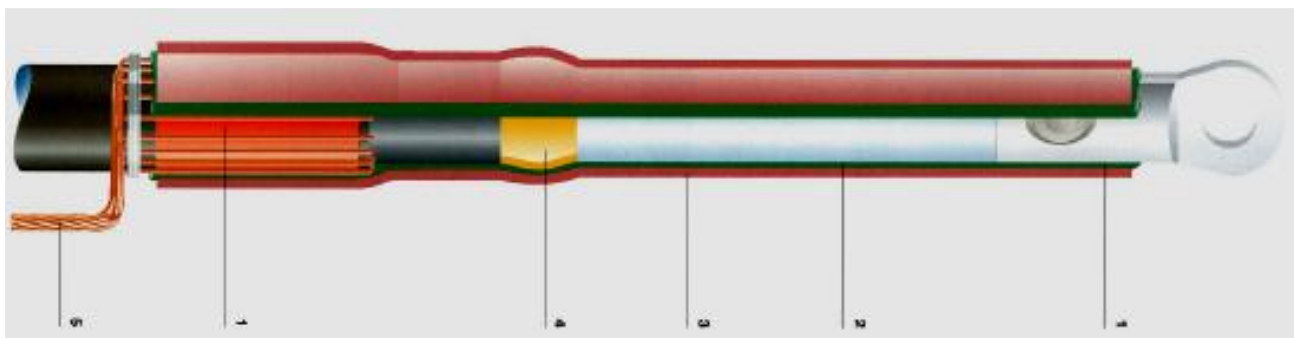


10.3. Kabelski završeci

10.3.1. Niskonaponski i srednjenaponski kabelski završeci



Rayhem je tijekom 60-tih godina razvio seriju novih polimernih materijala za korištenje na niskom, srednjem i visokom naponu. Rezultat toga su materijali koji posjeduju izuzetnu otpornost na dugotrajna električna naprezanja i vremenske utjecaje, te posjeduju svojstvo da se kod grijanja brzo skupe i prionu oko kabela te ga tako brtve. Rayhem pruža univerzalni sustav za unutarnje i vanjsko završavanje na plastičnim ili uljnim kabelima za jednožilne ili 3-žilne kabele, za kabele s okruglim ili sektorskim oblikovanim vodičima.



Karakteristične komponente srednjenaponskog završetka sa slike su:

1 Vodonepropusno brtvljenje

Trajno brtvljenje postiže se pomoću specijalnih Rayhemovih ljepila, kojima je oslojena unutrašnjost izolacionih dijelova.

U isto vrijeme dok monter grije cijev, akcija skupljanja i toplina, uzrokuju topljenje ljepila i njegovo otjecanje na potrebno mjesto.

2 Kompaktna i učinkovita kontrola električnog polja

Rayhem je razvio materijal s brižljivo kontroliranom nelinearnom impedancijom, baziran na tehnologiji keramičkih poluvodiča (ZnO) koji je nanesen u obliku obloge po unutarnjoj stijenci cijevi. Obloga za kontrolu električnog polja je omekšana grijanjem, te stlačena i na neravne površine izolacije, čime je osiguran kontakt bez ikakvih zračnih šupljina.

3 Izolacijska cijev otporna na stvaranje tragova

Svojstvo otpornosti na stvaranje tragova i dugotrajna otpornost na eroziju Rayhem završetaka dokazani su u ispitnim laboratorijima. Rezultati nastalim praćenjem stabilnih karakteristika od preko milijun završetaka instaliranih u tropskim, pustinjским, arktičkim i industrijski zagađenim klimama, pokazali su da Rayhem završetci nemaju tragova čak i u najtežim uvjetima pogona i dokazuju njihovu izvrstnu otpornost na eroziju i visoku pouzdanost.

4 Žuta traka za ispunu

Poluvodljiva žuta ispunu je jednostavno primjenjiva u obliku kratke ljepljive trake. Ona osigurava da neovisno o tipu ili postupku skidanja poluvodljivog sloja na kabelu nikakve zračne šupljine ne mogu prouzročiti parcijalna izbijanja u području jakih električnih naprežanja na kraju vanjskog poluvodljivog sloja kabela.

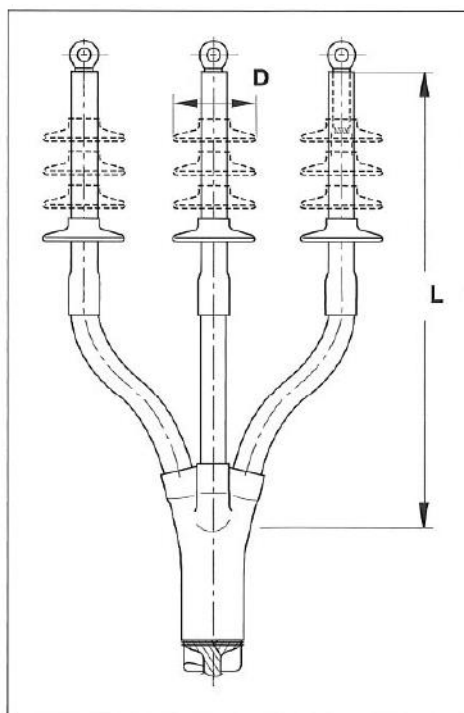
5 Uzemljenje

Žice uzemljenja ili pletenice su utopljene u brtvenu masu da se spriječi bilo kakva korozija ulaskom vlage. [6]

Unutarnji završetci za 3-žilne ekranizirane plastične kabele 10 kV, 20 kV i 35 kV



Vanjski završetci za 3-žilne ekranizirane plastične kabele 10 kV, 20 kV i 35 kV



Konstrukcija i montaža je ista kao i za unutarnje završetke. Kao dodatak preko žila se ugrađuju izolacijski šesirići. Dodatni šesiri produžuju potrebnu kliznu stazu, a omogućavaju i reverzibilnu ugradnju završetaka.

10.3.2. Visokonaponski kabelski završeci



Vanjski kompozitni završeci OHVT od 123 kV do 170 kV



Vanjski samostojeći suhi završeci OHVT za 145 kV

10.4. Utični priključci

10.4.1. Sustav priključivanja na metalom oklopljena i plinom izolirana postrojenja ili transformatore 10, 20 i 35 kV

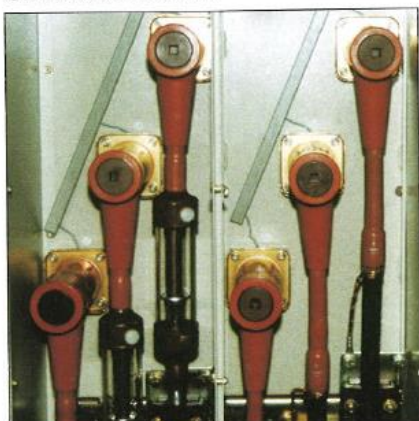
AREVA FBA



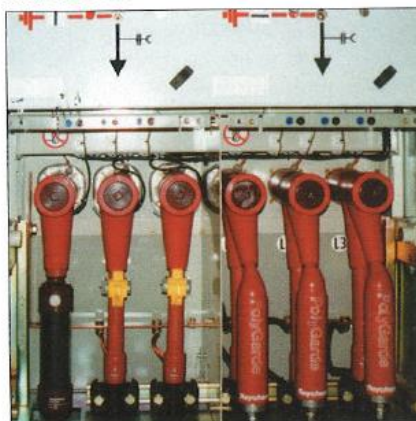
Groupe Schneider RM6



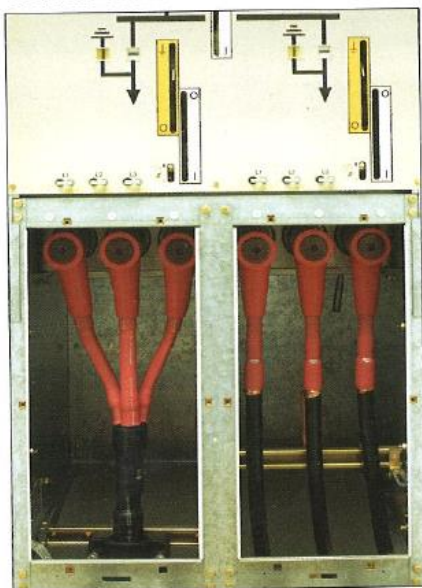
Ormazabal F&G GA



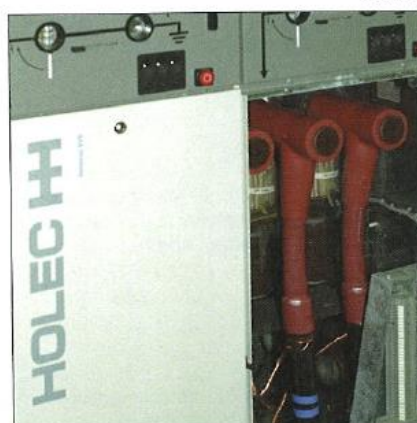
AREVA FBA



Siemens 8DJ10



Holec



10.4.2. Utičnički priključci, punjeni uljem, za postrojenja SHVT i transformatore THVT od 72 kV do 170 kV



Primjena

Ovi završeci su konstruirani za naponske razrede do 170 kV i za ugradnju na mjestu priključka plastičnih kabela na metalom oklopljena i plinom izolirana postrojenja (GIS) ili na transformatore koji u cijelosti ispunjavaju zahtjeve normi IEC 60859 i IEEE 1300, koji određuju oblik međuveze između kablaskog završetka i postrojenja.

Završeci normalno rade direktno u dodiru s plinom ali mogu raditi također uronjeni i u okruženju izolacijske tekućine kao što je npr. transformatorsko ulje.

Zaštitna metalna kapa na vrhu završetka za transformatore, čini traženi zaslon koji sprječava pojavu korone.

Karakteristike

Ispuna silikonskim uljem, dimenzije prema IEC 60859 i IEEE 1300, kućište od epoksidne mase otporno na pritisak, predviđeno za rad u okruženju plina ili izolacijskog ulja, stožac za oblikovanje električnog polja predgotovljen (od silikonske gume), priključak vodiča kabela ostvaren vijčanim spojem na svornjaku, s kontroliranim momentom pritezanja vijka, tipski ispitano prema IEC 60840, IEC 60859 i IEEE 1300 normama.

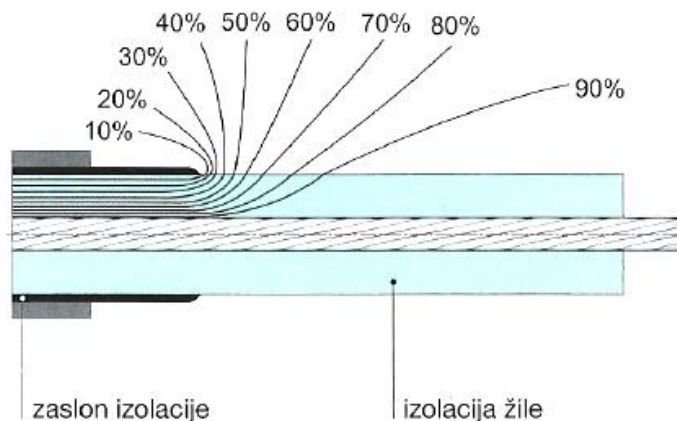
10.5. Kontrola električnog naprezanja u kablskom priboru

Nekontrolirano električno polje na kraju kabela

Na kraju srednjenaponskog kabela, gdje je zaslon izolacije skinut, ekvipotencijalne linije su vrlo guste i izazivaju visoka električna naprezanja. Ovo naprezanje je dovoljno visoko, da ionizira zrak na površini izolacije kabela izazivajući parcijalna izbijanja.

Temperatura i popratni efekti ove ionizacije će, kroz određeno vremensko razdoblje, uništiti površinu izolacije. Ovome treba još dodati, da je naprezanje na kraju zaslona izolacije tako visoko, da će čak i najmanji zarez u izolaciji prouzročiti električni proboj i ispad iz pogona.

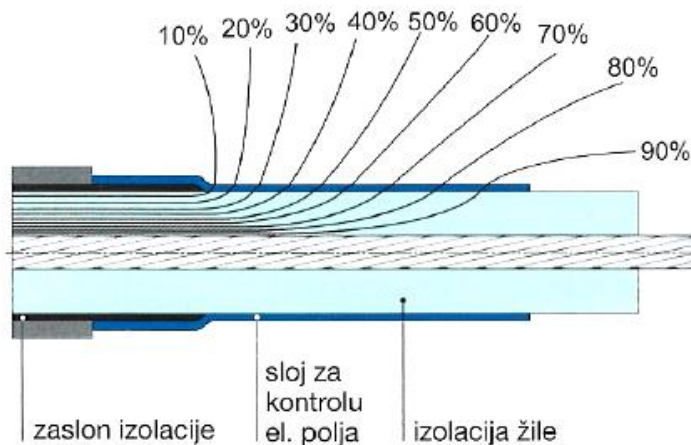
Bez kontrole el. polja



Električno polje s ugrađenim sustavom za kontrolu (cijev ili obloga)

Za kontrolu električnog naprezanja u kablskim završecima, Raychem koristi obloge ili cijevi s brižljivo kontroliranom volumnom otpornošću i dielektričnom permitivnošću, kako bi izgladio područja visokih električnih naprezanja. Jakost električnog polja na kraju zaslona izolacije smanjena je ispod gornje granice, koja jamči dugotrajan životni vijek u pogonu. Ovaj vitak (ne zahtjeva povećanje promjera) sustav za kontrolu električnog polja može se koristiti na različitim tipovima kabela uključujući i kabele izolirane papirom.

S kontrolom el. polja

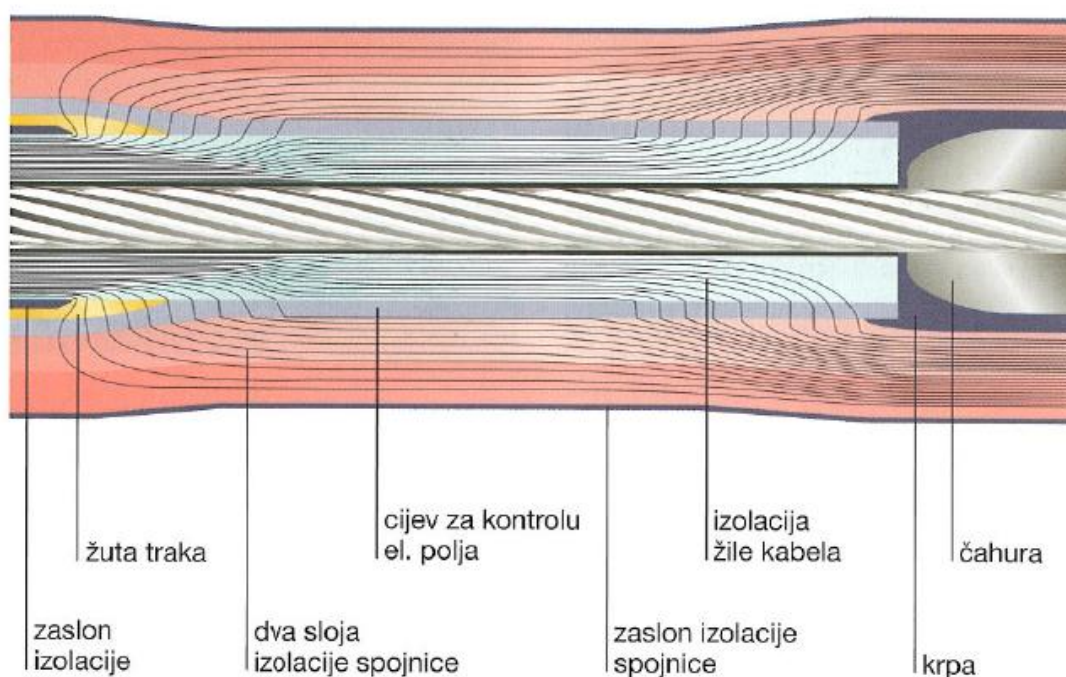


Razdioba električnog naprezanja unutar spojnice

Cijev za kontrolu električnog polja dodiruje i preklapa zaslon izolacije kabela na svakoj strani spojnice i kontrolira opterećenje na ovim područjima, na isti način kao i u završecima.

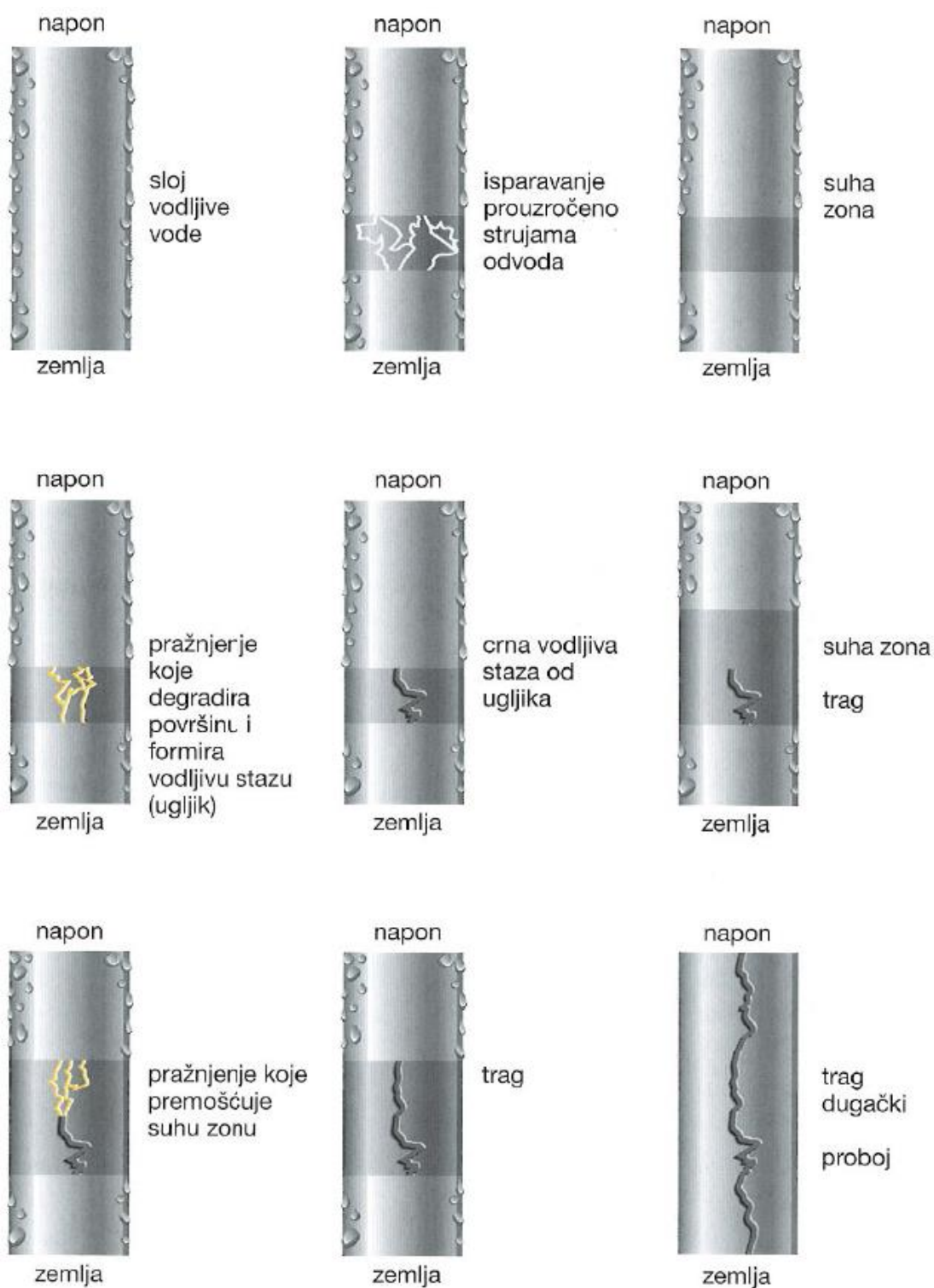
Zajedno s visokom dielektričnom permitivnošću žute trake za ispunu, cijev za kontrolu električnog polja odvaja ekvipotencijalne linije i tako smanjuje električna naprezanja na krajevima spojne čahure.

Dva sloja izolacije koji su nerazdvojno vezani na vanjski vodljivi sloj, imaju svoju točno određenu debljinu prema nazivnom naponu spojnice, a istovremeno ova tehnika sprječava bilo kakva parcijalna izbijanja na spojnoj površini. Ovaj sustav kontrole električnog naprezanja u spojnici ne zahtjeva izradu konusa na krajevima izolacije niti korištenje spojnih čahura sa specijalno profiliranim oblikom. [6]



10.6. Otpornost na atmosferilije i starenje

Izvrсна otpornost na atmosferilije i starenje Raychem kabelskog pribora, stalno se dokazuje prirodnim i ubrzanim ispitivanjima na starenje. Ova ispitivanja uključuju čak i 10-godišnje ispitivanje pogonske izdržljivosti s intenzivnim UV zračenjem. [6]



Fenomen stvaranja tragova i erozije

Prirodno će s vremenom, vanjska površina završetka, posebno kod vanjskog korištenja, postati onečišćena, a u vlažnim uvjetima će se razviti struje odvoda.

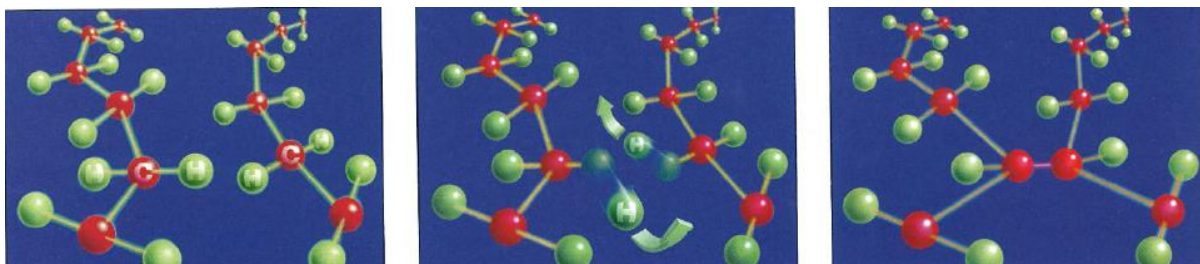
U nepovoljnim uvjetima okoline, struje odvoda mogu pogoršati površinu izolacije završetka, stvarajući po njoj tragove ili erozione kanale. Oboje bi konačno prouzročilo proboj na završetku i njegovo uništenje.

Raychem je razvio specijalno formulirani izolacijski materijal za toploskupljajući kabelski pribor, koji se odupire naprijed opisanom fenomenu stvaranja tragova, kao i drugim pogoršavajućim faktorima kao što su erozija, UV zračenje ili drugi utjecaji okoliša.

Ova formulacija sastoji se od smjese polimera i sofisticiranih aditivnih dodataka, koji su konstruirani da zadrže svoje značajke tijekom dugog životnog vijeka čak i u najoštrijim utjecajima okoliša. [6]

10.7. Tehnologija toploskupljajućih materijala

Umrežavanje i pamćenje oblika



Termoplastični materijali su sastavljeni od izuzetno dugih i vrlo tankih molekula u nepravilnom rasporedu. Čvrstoća takvog materijala ovisi o razmaku između njegovih molekula i kristalinoj prirodi njegove molekularne strukture.

Kad se materijal zagrije, kristali nestaju a molekule mogu tako lagano kliziti jedna pored druge a materijal teče.

Dok je u tom zagrijanom stanju, materijal može biti oblikovan u skoro svaki željeni oblik.

Nakon što se materijal ohladi, kristali se iznova formiraju, stvarajući silu koja će zadržati plastiku u obliku u kojem je bila upravo formirana.

Dolaskom atomske energije učinjeno je otkriće koje kaže: izlaganjem određenih plastičnih materijala visokoenergetskim snopovima elektrona može izazvati trajno poprečno vezivanje ili međusobno spajanje njihovih molekula.

Jednom, kad je materijal umrežen, on se više na bilo kojoj temperaturi neće topiti i neće teći.

Kad se materijal zagrije, njegovi kristali će nestati kao i prije, ali on sada više neće teći ili mijenjati oblik, jer poprečne veze drže međusobno čvrsto povezane molekule.

Umrežena struktura je elastična, tako da kad se zagrije na temperaturu kod koje se kristali tope, materijal se ponaša kao guma. [6]

11. Eksploatacija i ispitivanje elektroenergetskih kabela: (pouzdanost kabela)

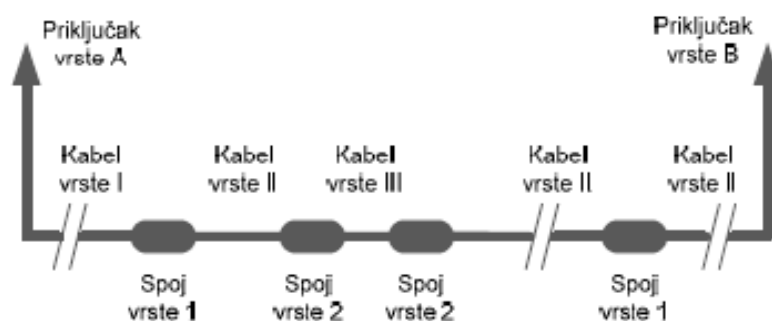
U distributivnim mrežama osnovu za prijenos energije čine podzemni energetski kabeli, pogotovo u većim naseljima. Kabelski sustavi sastavljeni su od starijih kabela s papirnom izolacijom i olovnim plaštevima, te novijih s izolacijom od umreženog polietilena. Kabeli se često nalaze izvan pogona, dijelom zbog vanjskih oštećenja (npr. nastaju prilikom kopanja), te zbog kvarova koji nastaju na njihovoj izolaciji (najčešći uzroci ispada kabela iz pogona).

Kvarovi na izolaciji mogu biti različiti, a nastaju zbog **termičkih, električnih i vanjskih** utjecaja.



Slika 11.1. Različiti kvarovi na izolaciji kabela u distributivnoj mreži

Kabelski sustavi mogu se promatrati kao izolirani sustavi, sastavljeni od dijelova: kabela, spojki i priključaka. Zbog popravaka na kabelima ili promjenama u topologiji mreže, s vremenom kabelski sustav često postane sastavljen od kabela različitih tipova i različite starosti, kao što je prikazano na slijedećoj slici 11.2.

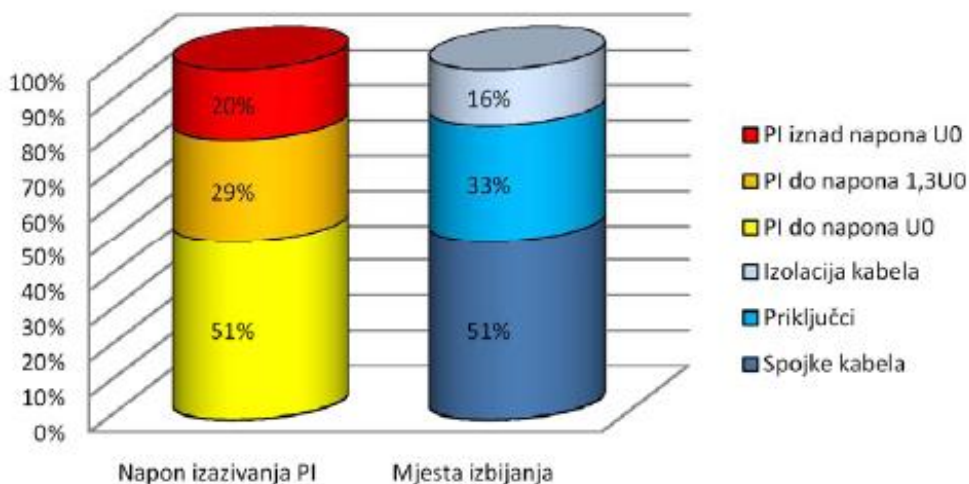


Slika 11.2. Primjer kabelskog sustava sastavljenog od različitih tipova kabela

Kvaliteta kablenskog sustava određena je kvalitetom njihovih sastavnih dijelova. Česte promjene topologije mreže dovode do toga da se kablenski sustavi sastoje od kabela s različitim tipovima izolacije na kojima se događaju različite vrste kvarova.

Ako se kvar dogodi na jednom od tih dijelova, moguće ga je otkloniti s nekoliko metara novog kabela i dvije spojke, ali to je skup posao, koji oduzima dosta vremena. Preventivne radnje na kabelima koji mogu imati oštećenja mogu se planirati, bez gubitka napajanja, ekonomski su isplativije i oduzimaju manje vremena.

Zbog složenosti kablenskih sustava i njihove izolacije javlja se potreba za sustavnim ispitivanjem kvarova na izolaciji kabela u distributivnim mrežama. Ispitivanjem stanja izolacije moguće je predvidjeti i ukloniti uzroke zbog kojih dolazi do kvarova. Na taj se način povećava sigurnost opskrbe potrošača električnom energijom.



Slika 11.3. Prikaz mjesta na kojima se javljaju parcijalna izbijanja i naponi pri kojima se javljaju

Dijagnostički uređaj koji ćemo ovdje opisati može locirati i razlikovati stupanj propadanja različitih izolacijskih materijala distributivnih energetske kabela. Njihovom upotrebom se ne skraćuje životni vijek kabel. U oštećenim dijelovima izolacije javljaju se parcijalna izbijanja, koja su pokazatelj da bi se na tim mjestima mogao dogoditi proboj.

Parcijalna izbijanja mogu se promatrati kao pulsni strujni izvor, koji u trajanju nekoliko nanosekundi proizvede elektromagnetski val. Taj val je moguće detektirati u vremenskoj domeni i na taj način locirati mjesto na kojem je nastao. [11]

Dijagnostika parcijalnih izbijanja u energetskim kabelima na terenu može se izvoditi on-line i off-line. U slučaju on-line mjerenja ispitivani kabel ostaje u pogonu i napaja se pogonskim naponom. Mi ćemo proučiti off-line metodu parcijalnih izbijanja.

Da bi se provela off-line dijagnostika, potrebno je kabel isključiti iz pogona, a parcijalna izbijanja izazivati pomoću vanjskog izvora napajanja. Za potrebe napajanja ispitivanih kabela razvijene su posebne metode, kao što su DAC (Damped AC) naponi, koji rade na frekvencijama od 50 do nekoliko stotina Hz. Uređaji koji proizvode DAC ispitne napone su energetski efikasni i lako prenosivi. OWTS (Oscilating Wave Test System) uređaj u svom radu koristi DAC napone za izazivanje parcijalnih izbijanja u izolaciji kabela, a prikazan je na slijedećoj slici 11.4.



Slika 11.4 OWTS uređaj za ispitivanje parcijalnih izbijanja u izolaciji kabela

11.1. Uzroci kvarova

Tijekom godina dolazi do promjena u strukturi kabela i njegovoj izolaciji. Ove promjene mogu dovesti do različitih poremećaja u elektroenergetskoj mreži. Zbog složenosti kabelskih sustava i njegove izolacije javlja se potreba za sustavnim ispitivanjem kvarova na izolaciji kabela u distributivnim mrežama.

Postoji nekoliko vrsta naponskih napreznja zbog kojih dolazi do proboja u izolaciji kabela. Ta napreznja mogu se podijeliti u tri osnovne skupine:

- pogonska napreznja
- vanjska napreznja
- ljudski faktor.

Moguće su i kombinacije ovih napreznja. [11]

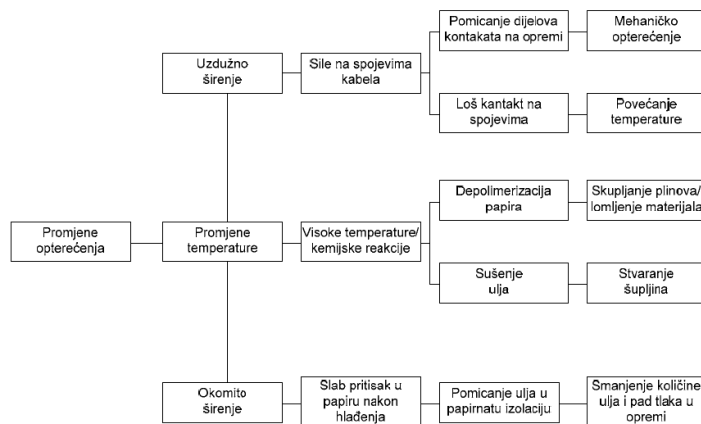
11.1.1 Pogonska naprezanja

Vrsta naprezanja	Uzroci	Uzrokovani kvar
- Promjene opterećenja - Visoke temperature	- Toplinsko širenje (okomito i uzdužno) - Kemijske reakcije	- Povećano pomicanje materijala - Sušenje papirnate izolacije - Depolimerizacija papira - Povećanje volumena → stvaranje praznina - Lomljivost materijala - Skupljanje plinova

Ovisno o pogonskim uvjetima kablskih sustava, različiti mehanizmi mogu utjecati na stanje izolacije. Istraživanja su pokazala da naprezanja papirnate izolacije nakon nekoliko desetaka godina uzrokuju povećanu lomljivost i slabljenje mehaničke čvrstoće papira, što je popraćeno povećanjem dielektričnih gubitaka. Kao posljedica kemijskih reakcija u celulozi, stvaraju se plinovi CO, CO₂ i drugi. Zbog lomljenja papira pojavljuje se i voda.

Potrošači veće snage povećavaju temperaturu u kablskim sustavima i rezultiraju širenjem vodiča u istima. Uzdužne sile na spojevima kabela mogu dovesti do pomicanja dijelova opreme, pa se udaljenost između vodiča smanjuje, uzrokujući povećano mehaničko opterećenje izolacijskih materijala. Struje kratkog spoja ili struje preopterećenja isto tako mogu prouzročiti mehanička naprezanja na spojevima kabela. Zbog tih sila konektori kabela nakon nekog vremena izgube čvrstoću, pa na prijelazima iz jednog kabela u drugi poraste otpor, što uzrokuje lokalni porast temperature u izolaciji.

Nadalje, dnevne promjene opterećenja uzrokuju termo-mehaničko širenje i skupljanje vodiča u kabelu, što ima reperkusije na papirnatu izolaciju. Dok traju visoka opterećenja, vodiči se šire, a papir se skuplja zbog velikih okomitih sila. Kako se opterećenje smanjuje, vodiči se hlade i skupljaju. Izolacijsko ulje popunjava pritom praznine koje su nastale u papirnatu izolaciji, pa na tim mjestima poraste količina ulja. U težim slučajevima može doći do oštećenja na spojevima kabela ili priključcima. Ovaj termo-mehanički efekt je štetan i za vodonepropusne dijelove. [11]



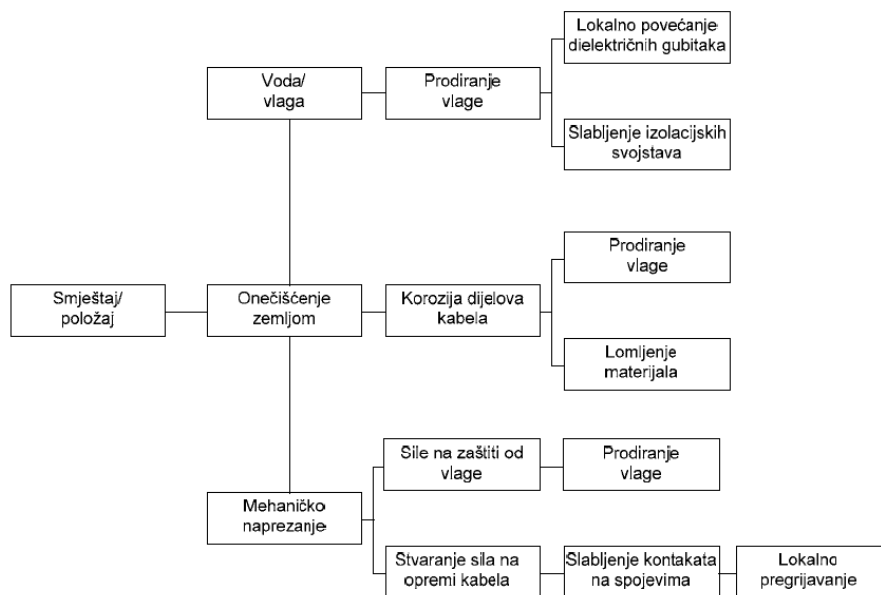
Slika 11.5. Pregled pogonskih naprezanja i uzrokovanih kvarova

11.1.2 Vanjska naprezanja

Vrsta naprezanja	Uzroci	Uzrokovani poremećaj
- Voda/vlaga - Onečišćenje zemljom - Mehaničko naprezanje	- Prodiranje vlage - Korozija - Dielektrični gubici - Stvaranje sila	- Slabljenje izolacijskih svojstava - Prodor vlage kroz olovni plašt kabela - Lokalno pregrijavanje - Stvaranje sila na opremi kabela - Starenje opreme zbog pregrijavanja - Slabije prijanjanje - Pucanje materijala

Okoliš u koji je kabelski sustav položen ima velik utjecaj na poremećaje koji se javljaju u izolaciji. Često su energetski kabeli smješteni blizu vodovodnih cijevi, a zbog nesavršenosti vanjskog omotača voda može prodrijeti u izolaciju. Vanjsko djelovanje može rezultirati pukotinama u vanjskom omotaču. Prodiranje vlage dovodi do korozije armature i olovnog plašta. Korozija ovih slojeva kabela uzrokuje prodiranje vlage u unutarnju izolaciju kabela.

Kabelski sustavi koji su smješteni blizu istosmjernih izvora za napajenje željeznica i tramvaja mogu imati pukotine na olovnom plaštu. Lutajuće struje, koje nastaju zbog povratka struje kroz zemlju mogu prouzročiti lokalnu koroziju na olovnom plaštu. Lokalne pukotine na olovnom plaštu propuštaju vlagu u unutrašnju izolaciju, posebno ako se radi o kabelima bez PVC izolacijske zaštite.



Slika 11.6. Pregled vanjskih naprezanja i uzrokovanih kvarova

Pomicanje kabela u mekanj zemlji može izazvati mahanička naprezanja u kabelskom sustavu ili na kabelskoj opremi. Mehanička naprezanja mogu uzrokovati pucanje zaštite od vode opremi kabela ili slabljenje kankakata na spojevima. Vanjska naprezanja u novoizgrađenim kabelskim sustavima u većini slučajeva se ne mogu predvidjeti za duži period. [11]

11.1.3 Ljudski faktor

Vrsta naprezanja	Uzroci	Uzrokovani poremećaj
- Loši priručnici/ uputstva - Pogreške pri montiranju - Loša konstrukcija	- Kritične konstrukcije - Kritično spajanje izolacijskih dijelova - Nesavršena zaštita od vlage - Izbijanje kvarova zbog parcijalnih izbijanja - Oštećenje plašta kod polaganja - Loši spojevi vodiča	- Šupljine - Loše stvrdnuta smola - Prodiranje vlage → porast temperature, slabljenje izolacijskih svojstava - Nagrizanje izolacije - Probijanje olovnog plašta, curenje ulja, stvaranje vode - Lokalno pregrijavanje

Kod instalacije novih kablskih sustava ili zamjene pokvarenih i oštećenih dijelova mogu se javiti određene poteškoće, posebno kod kablске opreme koja je smještena na otvorenom prostoru. Nepravilnosti pri montiranju i neprimjetne greške u konstrukciji mogu dovesti do naknadnih poremećaja u radu. Rad na kablima je posao koji zahtjeva preciznost, a na njega utječu mnogi vanjski faktori (vremenski uvjeti, vrsta terena, rokovi...). Čak i ako je posao brižljivo odrađen, moguće su sitne pogreške koje mogu dovesti do kvarova nakon određenog vremena.

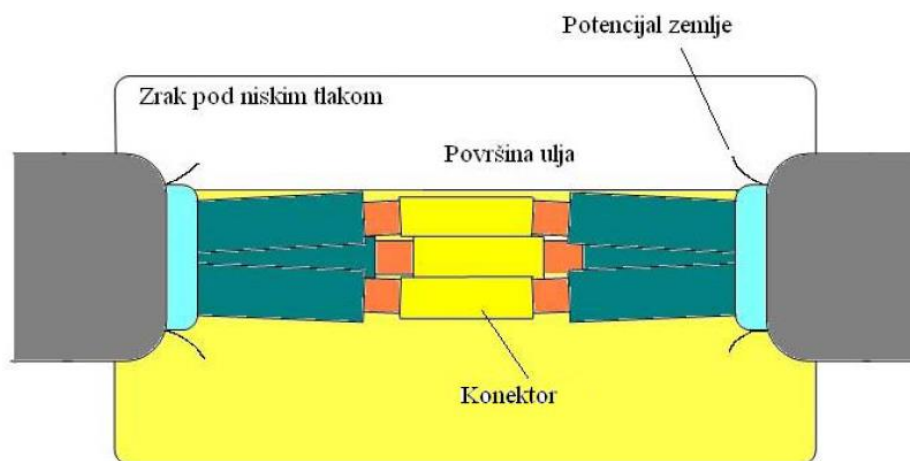
Ljudske pogreške mogu se smanjiti boljom obukom radnika. Proizvodnja i sastavljanje dijelova kabela su djelatnosti koje se isto mogu unaprijediti. Nepravilno rukovanje je uzrok kvarova u visokonaponskim mrežama u oko 15% slučajeva. [11]

11.2 Tipični kvarovi na izolaciji

Pregledom oštećenih komponenata kabela možemo zaključiti da različiti poremećaji dovode do kvarova. Pomoću forenzičkih istraživanja tijekom mnogo godina, otkriveni su ponavljajući uzroci kvarova, koji su opisani u ovom podpoglavlju. Neki od kvarova su opisani hipotetski.

11.2.1 Smanjena razina izolacijskog ulja

Stalno kretanje izolacijskog ulja iz spojeva kabela u izolaciju zbog promjena opterećenja smanjuje razinu ulja u kabelskim spojevima, što dovodi do stvaranja prostora ispunjenog zrakom pod niskim tlakom u gornjem dijelu spoja, kao što je prikazano na slici 11.7. Zrak je pod niskom tlakom do 0.3 bara.



Slika 11.7. Prikaz situacije kada se smanji razina ulja u spoju kabela

U određenom trenutku jedan od konektora visokonaponskih vodiča naći će se na granici između zraka pod niskim tlakom i ulja. Zrak pod niskim tlakom nalazi se između površine tekućine i stijenke kućišta spoja. Iznos probojnog napona potrebnog za parcijalno izbijanje smanjuje se s smanjenjem tlaka zraka. Zbog jakog električnog polja na rubovima spoja vodiča, doći će do proboja na površini ulja.

Proboji na površini ulja rezultiraju plutanjem karboniziranih čestica ulja, koje se šire po cijeloj površini, što pojačava električno polje. Karbonizirane čestice mogu stvoriti most između visokonaponskog vodiča i uzemljenog olovnog plašta kabela, prije nego što se na površini kabela uspostavi probojna čvrstoća. Još nepovoljniji slučaj je ako razina ulja padne na nivo između dva paralelno položena fazna vodiča u kabelskom spoju. Tada se proboj događa zbog jačeg električnog polja i manje udaljenosti. [11]

11.2.2 Izbočine na spojevima vodiča

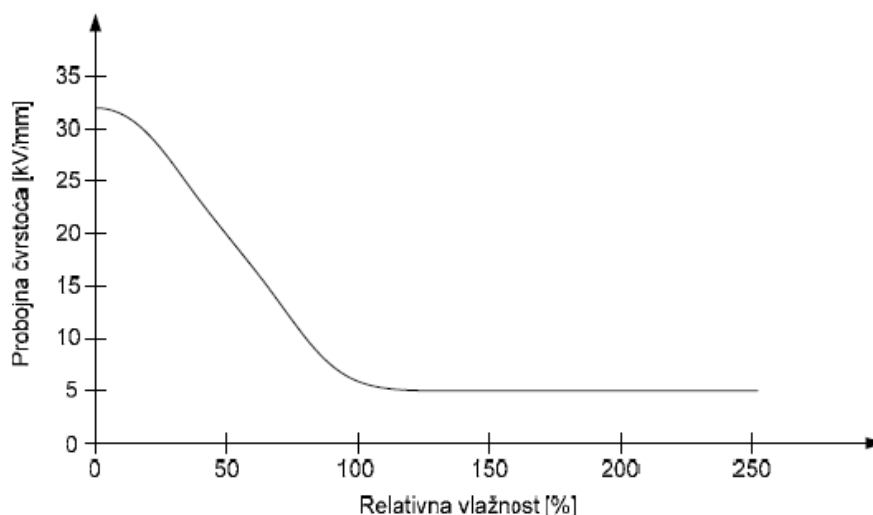
Izbočine na spojevima vodiča uzrokuju lokalno povećanje električnog polja. Od točke koja je od ravne plohe udaljena 5cm, a između se nalazi ulje, probojni napon potreban za parcijalno izbijanje iznosi 32 kV. Ova vrijednost je manja 10 puta, ako se točka od ravne plohe izolirana zrakom. Ako se radi o zraku pod niskim tlakom, koji je nastao u kabelskom spoju zbog smanjene razine ulja, u kombinaciji s oštrim rubovima na spojevima vodiča, postoji mogućnost da dođe do parcijalnog izbijanja. Probojni napon potreban za parcijalno izbijanje u ulju opada ovisno o količini otopljenih plinova, vlazi i ostalim onečišćenjima.

Nakon parcijalnog izbijanja u ulju, karbonizirane čestice i plinovi koji pritom nastaju slabe izolacijska svojstva ulja. Karbonizirane čestice se polariziraju zbog utjecaja električnog polja. U nehomogenom električnom polju, privlačne sile između čestica su jače od odbojnih sila. Ove sile mogu od čestica formirati lanac u smjeru električnog polja između elektroda. Takvi lanci osjetno povećavaju vjerojatnost nastanka proboja u izolaciji.

Izbočine na vodičima s izolacijom od krutih umjetnih materijala mogu uzrokovati male pukotine u izolaciji, na čijim se vrhovima skupljaju plinovi. Naknadna parcijalna izbijanja u pukotini će oslabiti svojstva izolacije. Ako se pukotine nastave širiti, može doći do proboja među elektrodama.

11.2.3 Prodiranje vlage

Vjerojatnost prodiranja vlage u izolaciju kabela ovisi o okolišu u kojem se kabel nalazi. Ako je vanjski omotač kabela probijen, voda lako prodire u izolaciju. Vlaga u dijelovima kabela smanjuje dielektričnu čvrstoću i izaziva povećanje dielektričnih gubitaka. Ako količina vlage u uljnoj izolaciji prijeđe određenu vrijednost, stvaraju se kapljice vode, koje predstavljaju vodljive nečistoće. Proboj se može dogoditi i pri slabijim električnim poljima, kao rezultat povećanih električnih gubitaka.



Slika 11.8. Ovisnost probojne čvrstoće izolacijskog ulja o postotku vlage

Na slici 11.8 korištena je relativna vlažnost, zbog toga što je maksimalna količina otopljene vode u ulju temperaturno ovisna. Vidljivo je kako probojna čvrstoća opada dok ulje nije zasićeno relativnom vlažnošću od oko 100%. U ovoj točki dosegnuta je maksimalna razina vode otopljene u ulju i počinju se pojavljivati kapljice vode. Iznad te točke s porastom relativne vlažnosti, probojna čvrstoća se stabilizira na oko 5 kV/mm.

Prodiranje vlage u izolaciju događa se zbog pukotina na vanjskoj zaštiti kabela ili zbog korozije na zaštitnom zaslonu. Ulazak vlage u papirnatu/uljnu izolaciju prouzročiti će promjene dielektrične čvrstoće i veće dielektrične gubitke. Dielektrična svojstva se pogoršavaju, kako vlažnost papira raste.

Probojna čvrstoća impregniranog papira je stalna do razine od oko 1% relativne vlažnosti. Ako je količina vode u impregniranom papiru veća od 1%, probojna čvrstoća se naglo smanjuje. Dielektrični gubici u impregniranom papiru su gotovo stalni do razine vlažnosti od oko 0.1%. Ako je količina vode u impregniranom papiru veća od 0.1%, dielektrični gubici se povećavaju. Porast dielektričnih gubitaka zbog porasta razine vlage uzrokovan je nastajanjem novih slobodnih nosioca naboja.

Slojevi papira će upiti vodu koja je probila u izolaciju. Zbog ovog higroskopskog procesa, izolacija prije ili poslije postaje vodljivija. To dovodi do lokalnog porasta dielektričnih gubitaka, koji uzrokuju porast temperature. Zbog lokalnog pregrijavanja, struktura celuloze papira će biti oštećena nakon nekog vremena. Papir tako postaje lomljiviji i njegova izolacijska svojstva slabe. Slojevi papira su tada manje otporni prema parcijalnim izbijanjima i vlaga lakše prodire u njih.

U dijelove izolirane smolom, voda prodire najviše zbog procesa difuzije, koji se događa kroz duže vremensko razdoblje. Vlaga prodire izvana prema vodiču. Vanjski dio smolne izolacije zato će biti vodljiviji od unutarnjeg dijela. Kao rezultat toga, mijenja se raspodjela električnog polja, koje može porasti u blizini vodiča, što može dovesti do kvara. [11]

11.2.4 Šupljine

Kabeli s izolacijom od smole mogu sadržavati šupljine. Uzrok tome su mjehurići zraka koji se nađu u smoli, a koji se pri povišenoj temperaturi šire i na kraju ostaju zarobljeni nakon što se smola stvrdne.



Slika 11.9. Prikaz šupljina u izolaciji od smole, koje se pojavljuju u procesu stvrdnjavanja smole

Šupljine u tvrdim izolacijskim materijalima mogu se pojaviti prilikom izrade u tvornici ili kod instalacije na terenu. Tangencijalna komponenta električnog polja u ovim šupljinama može izazvati parcijalna izbijanja. Šupljine mogu nastati i na mjestima gdje se spajaju konektori i izolacija.

11.2.5 Onečišćenja

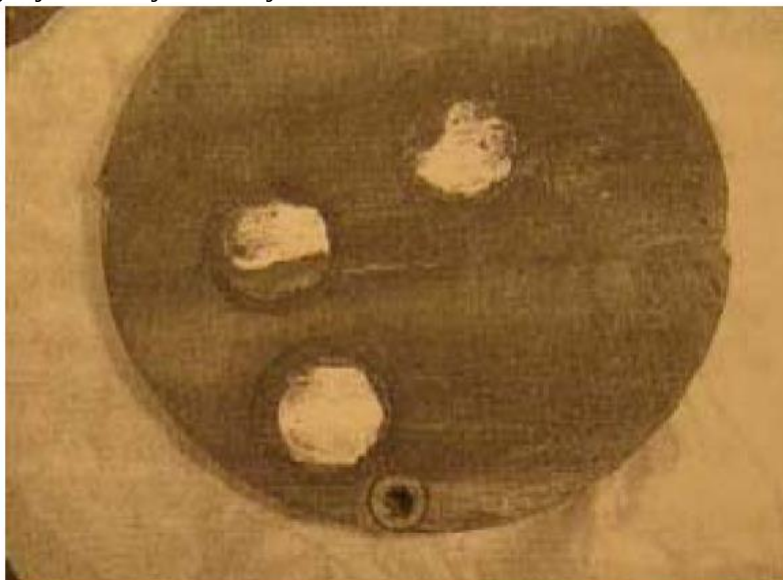
Onečišćenja u izolaciji su najčešće vodljivi dijelovi. Vodljiva pasta za čišćenje na spojevima je tipičan primjer vodljivih onečišćenja u opremi. Paste se koristi za poboljšanje kontakta između dva vodiča i dijelova koji ih spajaju. Dok se vodiči spajaju, dio paste iscuri vani, pa se taj višak treba u potpunosti odstraniti. U protivnome, ako pasta nije uklonjena, dolazi do nastajanja jačih električnih polja i može se dogoditi parcijalno izbijanje.

11.2.6 Loše stvrdnuta smola

Smolna izolacija kabela obično se sastoji od više različitih komponenata koje su međusobno pomiješane. Ako komponente nisu pravilno pomiješane, bilo zbog odstupanja u omjeru sastojaka ili vremenu miješanja, dobivena smola se neće dobro stvrdnuti ili će doći do odvajanja komponenata. Pukotine i šupljine koje se pritom javljaju dovode do povećane opasnosti od parcijalnih izbijanja. Ako smola ima funkciju zaštite od prodiranja vode, voda može prodrijeti u opremu vrlo lako. Ove posljedice koje nastaju zbog nepravilno pomiješanih komponenata imaju loš učinak na kvalitetu izolacijskog materijala. [11]

11.2.7 Nesimetrično raspoređeni vodiči

Nesimetrično raspoređeni vodiči u kabelima uzrokuju pojačano električno polje. U distribucijskim mrežama je kabelska oprema obično predimenzionirana, pa su posljedice pojačanog električnog polja minimalne. Ali, u kombinaciji s drugim poremećajima, kao što su šupljine u izolaciji ili prodiranje vlage, pojačano električno polje može na nekim mjestima uzrokovati slabljenje izolacijskih svojstava.



Slika 11.10. Nesimetrično raspoređeni vodiči u izolaciji od smole

11.2.8 Sušenje impregniranog papira

Povećana opterećenja uzrokuju u energetskim kabelima lokalno isušivanje impregniranog papira. Zbog povećanih temperatura papir se isušuje, a ulju se povećava viskoznost, što uzrokuje stvaranje šupljina između slojeva papira. Najviše se isušuju slojevi neposredno uz vodič, jer su tamo najveće temperature. Zbog parcijalnih izbijanja, šupljine se počinju granati i šire se sloj po sloj, da bi konačno došle do vanjskog sloja papirnate izolacije i do uzemljenog vanjskog plašta. Primjer takve aktivnosti je prikazan na slici 11.11. [11]



Slika 11.11. Oštećenja na papirnoj izolaciji uzrokovana isušivanjem zbog povišenih temperatura

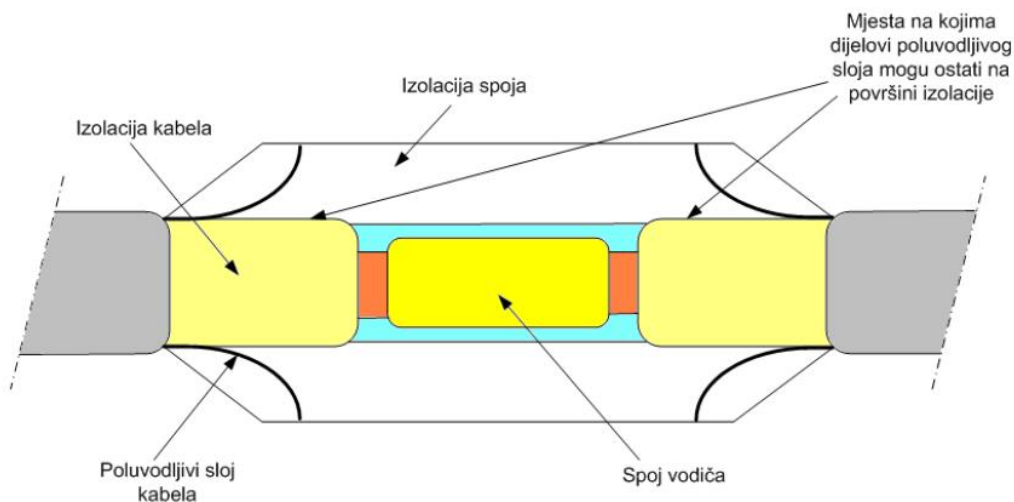
11.2.9 Problemi sa spajanjem vodiča

Press-konektori se koriste za spajanje dvaju vodiča. Ovi spojevi mogu biti nesavršeni zbog mehaničkih naprezanja uzrokovanih radom ili djelovanjem okoline. Loši spojevi mogu uzrokovati zagrijavanje vodiča zbog povećanog omskog otpora. Izolacijski materijal koji se nalazi oko spoja može se pregrijati. Pregrijavanje, osobito ako se radi o krutim izolacijskim materijalima, izaziva pucanje izolacije i parcijalna izbijanja, zbog čega slabe izolacijska svojstva.

11.2.10 Ostaci poluvodljivog sloja

Sintetički elektroenergetski kabele su konstruirani s poluvodljivim slojevima između vodiča, polietilenske izolacije i uzemljenog plašta. Pri montiranju spojeva kabela ili priključaka, poluvodljivi zaslon između izolacije i uzemljenog plašta mora biti odstranjen da bi se mogao priključiti plašt za izjednačavanje polja. Može se dogoditi da mali dijelovi poluvodljivog sloja ostanu na površini polietilenske izolacije.

Ovi dijelovi se nalaze na granici između izolacije kabela i izolacije spoja, kao što je vidljivo na slici 11.12. Poluvodljivi dijelovi na ovim mjestima dovode do povećane koncentracije električnog polja, rezultirajući parcijalnim izbijanjima, jer su tu tangencijalne komponente električnog polja jake. Zbog parcijalnih izbijanja na tim mjestima doći će do propadanja izolacije. [11]



Slika 11.12. Prikaz mjesta na kojima mogu ostati mali dijelovi poluvodljivog sloja na polietilenskoj izolaciji

11.2.11 Nejednolika raspodjela električnog polja

Zbog malih dimenzija kabela, posebno onih s polimernom izolacijom, raspodjela električnog polja je vrlo bitna. Dimenzije opreme kabela su veće od dimenzija kabela, pa raspodjela električnog polja u izolaciji varira. Pri spajanju kabela potrebno je precizno postaviti priključnu opremu, kako bi raspodjela polja bila optimalna. Loše spojen konektor može izazvati lokalno povećanje električnog polja na mjestima gdje je prekinut poluvodljivi sloj. Ako je uklonjen veći dio poluvodljivog sloja, nego što je potrebno, stvara se praznina između konektora i poluvodljivog sloja, kao što je prikazano na *slici 11.13*. Na tim mjestima zbog povećanog električnog polja može doći do parcijalnih izbijanja.

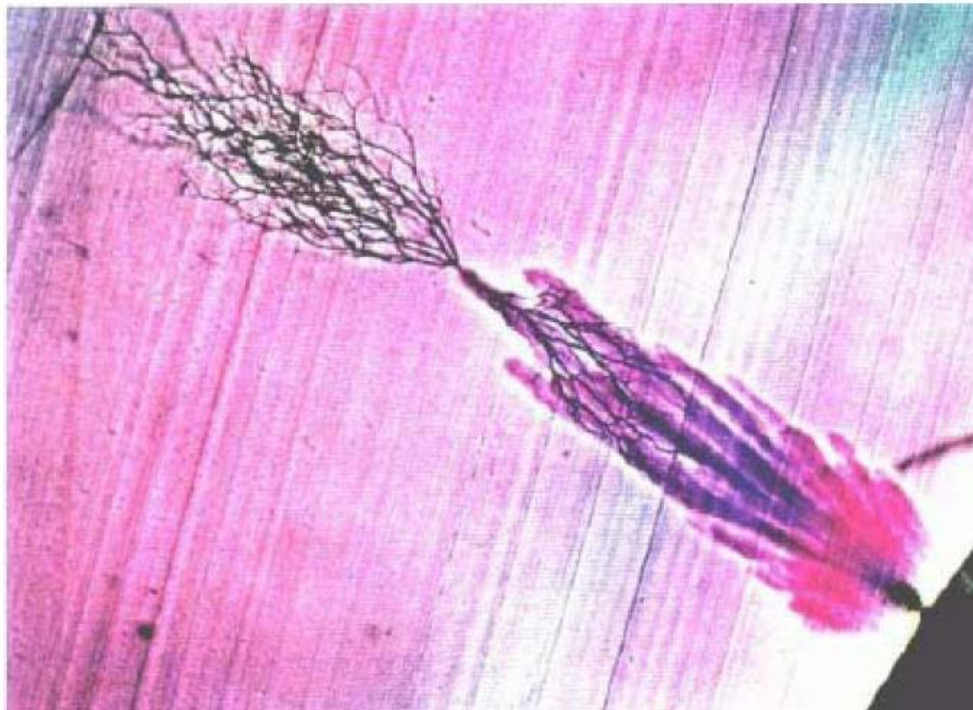
Nepovoljan je slučaj i ako konektor prelazi preko izolacije više nego je potrebno, pa izolacija ne omogućava jednoliku raspodjelu električnog polja. Pojačano električno polje u ovom slučaju će se pojaviti između kabela i spoja.



Slika 11.13. Prikaz loše povezanih kabela, gdje je uklonjeno previše poluvodljivog sloja, pa dolazi do povećanja električnog polja na tom mjestu

11.2.12 Vodena stabla

Kao rezultat prisustva vlage, električnog polja i povišene temperature u izolaciji kabela, dolazi do kemijskih promjena u sintetskim materijalima, što dovodi do nastanka vodenih stabala. Vodena stabla se šire u smjeru širenja električnog polja brzinom od približno 0.2mm/h i imaju lepezast oblik. Kada se približe vanjskom rubu izolacijskog materijala, pojavljuju se električna stabla, koja nakon nekoliko minuta izazivaju proboj u izolaciji. U vodenim stablima se ne javljaju parcijalna izbijanja, pa se za njihovo otkrivanje koriste dielektrične dijagnostičke metode.



Slika 11.14. Prikaz vodenog stabla i električnog stabla koje je nastalo na njegovom vrhu i izazvalo proboj u izolaciji

11.3 Mehanizmi propadanja izolacije

U mnogim slučajevima parcijalna izbijanja prethode proboju u izolaciji. U ovom poglavlju opisana su četiri glavna mehanizma propadanja izolacije.

11.3.1 Unutarnja izbijanja

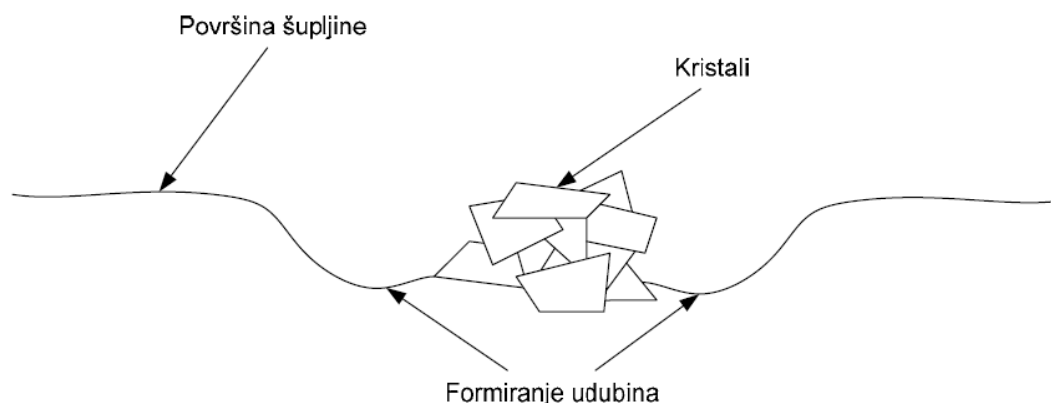
Unutarnja izbijanja u energetskim kabelima mogu biti prouzročena **šupljinama u izolaciji** ili **lošim spojevima**. Električna naprezanja u šupljinama ovise o obliku i mjestu na kojem se nalaze. Probojna čvrstoća ovisi o dimenzijama, vrsti i pritisku plinova u njima. Šupljine punjene plinovima mogu nastati zbog lokalnih izbijanja, uzrokovanih jakim električnim poljima oko vodljivih dijelova. Šupljine u izolacijama od čvrstih materijala se mogu dalje granati, a u uljnim izolacijama iz vodljivih dijelova mogu nastati parcijalna izbijanja.

Proces propadanja izolacije zbog parcijalnih izbijanja u šupljinama je popraćen kemijskim procesima. U kemijskim reakcijama sudjeluju plinovi koji se nalaze u šupljini, kao i sastavni dijelovi polimerne izolacije.

U prvom stupnju propadanja, nakon kratkog vremena izloženosti parcijalnim izbijanjima, pojavljuje se tanki sloj kapljica na stjenkama šupljine. Te kapljice su po sastavu kiseline.

U drugom stupnju, nakon nekog vremena, kapljice se kristaliziraju na mjestima na kojima se dogodilo parcijalno izbijanje. Kristali su oštih rubova, a pomiješani s vlagom su vodljivi, pa postoji povećana vjerojatnost da se na tim mjestima dogodi parcijalno izbijanje. Ponovna izbijanje dovode do stvaranja novih kristala na stjenkama šupljine, pa se tako povećava i vjerojatnost nastanka novih izbijanja.

U zadnjem stupnju nakupine kristala se formiraju na površini šupljine u polimernoj izolaciji. Na rubovima ovih nakupina intenzivira se električno polje, pojačavajući parcijalna izbijanja, koja nagrizaju površinu dielektrika. Tako nastaju udubine na mjestima gdje se nakupljaju kristali. Na *slici 11.15.* prikazana je nakupina kristala s nagriženom površinom stijenke šupljine.



Slika 11.15. Shematski prikaz propadanja površine u šupljinama izolacije od polimernih materijala

Udubine oko kristala postaju sve dublje, dok se ne stvori mali kanal. Kanal se počinje granati pod utjecajem električnog polja i može doći do proboja u izolaciji. [11]

11.3.2 Površinska izbijanja

Površinska izbijanja javljaju se na granicama različitih materijala, blizu elektroda.

U energetske kablama, to mogu biti granice između papira, ulja, zraka i polimera.

Na granici između ulja i čvrstih izolacijskih materijala, kod parcijalnih izbijanja oslobađa se energija, zbog koje se ulje u blizini elektrode karbonizira. Na površini čvrste izolacije, na mjestima gdje se skupljaju karbonizirane čestice, češće dolazi do parcijalnih izbijanja, zbog jačeg električnog polja na tim mjestima.

Parcijalna izbijanja na granici ulja i zraka će, kao i u prethodnom slučaju, voditi do karbonizacije ulja. Karbonizirane čestice plutaju na površini ulja. Njihov broj će biti veći, što je veći broj parcijalnih izbijanja. Između viskonaponskog vodiča i uzemljenog plašta kabela mogu nastati mostovi od karboniziranih čestica u ulju, koji smanjuju probojnu čvrstoću izolacije i mogu dovesti do proboja.



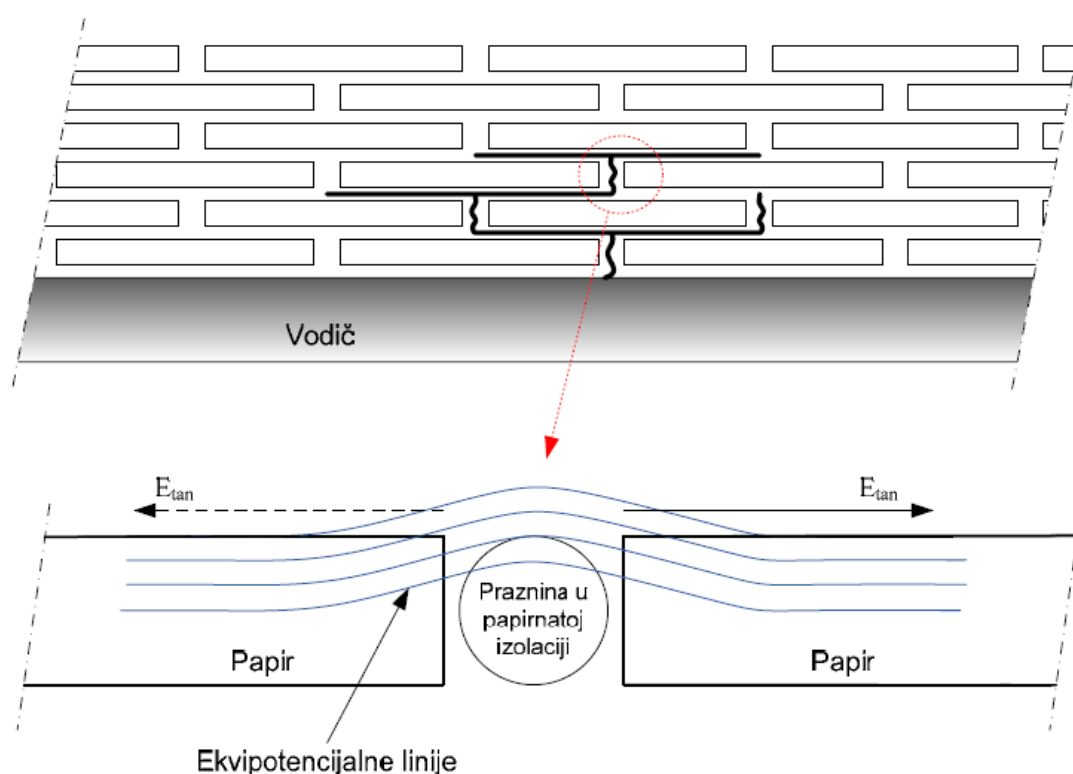
Slika 11.16. Pojavljivanje pukotina na površini polimernog izolatora

Propadanje polimerne izolacije zbog parcijalnih izbijanja, na granici sa zrakom, popraćeno je kemijskim reakcijama. Kemijske promjene rezultiraju formiranjem kristala na površini polimera. Guste nakupine velikih kristala se formiraju u blizini vodiča, odnosno u blizini poluvodljivog sloja. Dalje od vodiča, smanjuje se gustoća i veličina kristala. Na mjestima gdje se skupljaju kristali, električno polje će biti jače, što će izazvati povećan broj parcijalnih izbijanja. Nakon nekog vremena, zbog parcijalnih izbijanja, na površini izolacijskog materijala će se pojaviti razgranate pukotine. Pukotine se mogu širiti po površini polimernog materijala i stvoriti most između elektroda. [11]

11.3.3 Električno grananje

Električno grananje u izolacijama od čvrstih materijala počinje od šupljina ili izbočina na vodiču. Nakon relativno dugog vremena, izolacijski materijal postaje nagrižen zbog parcijalnih izbijanja koja se u njemu događaju. Na mjestima gdje je izolacija nagrižena nastaju kanali. Na vrhovima kanala pojavljuje se pojačano električno polje, što dovodi do novih električnih proboja na malom razmaku u izolaciji. Pukotine se šire neravnomjerno, u smjerovima gdje najlakše dolazi do proboja. Šire se sve dok ne premoste razmak između elektroda.

Grananje u papirnatj izolaciji se razlikuje od onoga u izolaciji od čvrstih materijala. Parcijalna izbijanja u šupljinama blizu viskonaponskog vodiča će oštetiti prvi sloj papirnatj izolacije, koji se nalazi uz vodič. Nakon nekog vremena, na ovom sloju će se dogoditi proboj. Nakon toga, početi će parcijalna izbijanja na drugom sloju, u smjeru okomitom na smjer širenja električnog polja. Površina impregniranog papira će se karbonizirati i nastat će vodljiva staza između slojeva papira. U šupljinama, na mjestima gdje se spajaju dva komada papirnatj izolacije, nastaju nove pukotine koje se šire na sljedeći sloj papira, što je prikazano na slici 11.17.

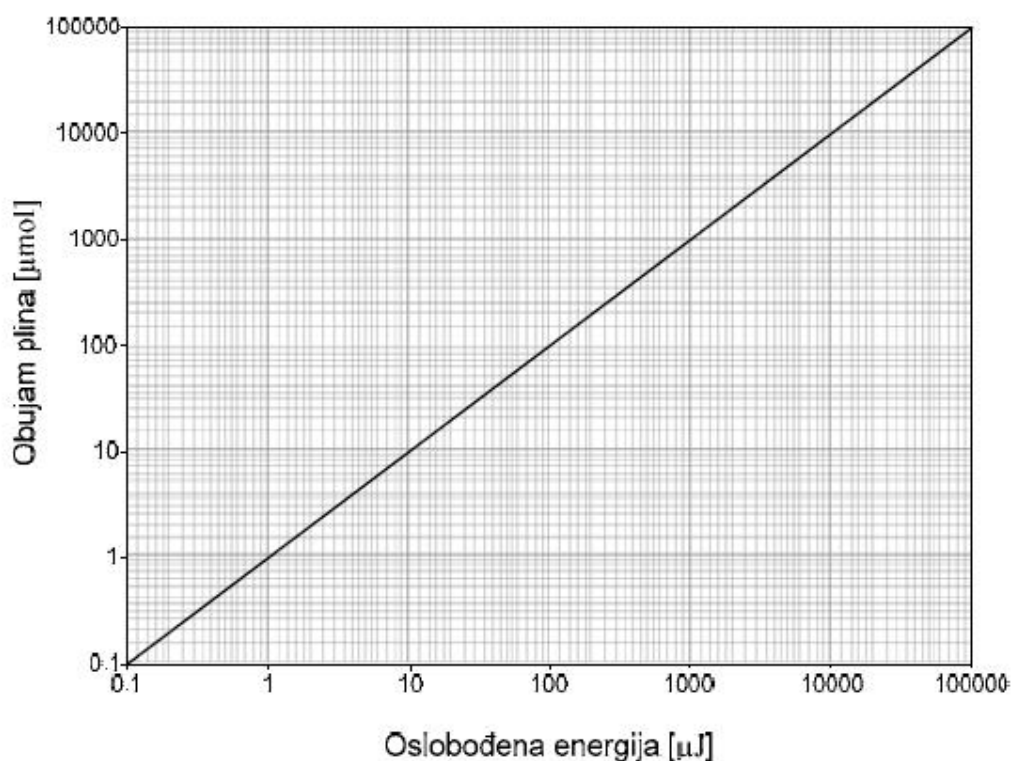


Slika 11.17. Prikaz propadanja papirnatj izolacije. Vidljivo je kako nastaje tangencijalna komponenta električnog polja u šupljinama, gdje se spajaju dva komada papira

Vodljiva staza će se širiti u suprotnim smjerovima, kako se mijenja smjer električnog polja svakih pola periode, zbog promjene smjera napona. Kada je dosegnut sljedeći sloj, ovaj proces se ponavlja i tako sve dok vodljiva staza ne probije kroz sve slojeve papirnate izolacije. Nakon što se to dogodi, dolazi do proboja između vodiča i uzemljenog plašta kabela.

Probojna čvrstoća uljne izolacije uvelike ovisi o količini nečistoća koje se u njoj nalaze. Komadići metala, celuloze i otopljeni plinovi imaju velik značaj za izolacijsku kvalitetu ulja, jer smanjuju dielektričnu čvrstoću. Osim onečišćenja, i oštri rubovi vodiča mogu biti uzrok nastanku parcijalnih izbijanja u ulju.

Zbog utjecaja parcijalnih izbijanja i karbonizacije čestica uslijed pregrijavanja dolazi do stvaranja kapljica kiselina u ulju. Na broj parcijalnih izbijanja utječe i količina vlage u ulju. Zbog parcijalnih izbijanja oslobađaju se i neki plinovi, a to su najčešće: dušik (N_2), kisik (O_2), vodik (H_2), acetilen (C_2H_2), metan (CH_4), etilen (C_2H_4) i etan (C_2H_6). Količina nastalih plinova ovisi o oslobođenoj energiji iz parcijalnih izbijanja.



Slika 11.18. Ovisnost količine plinova nastalih nakon parcijalnog izbijanja i oslobođene energije

Osim smanjenja probojne čvrstoće izolacije, oslobođeni plinovi se mogu nakupljati u mjehuriće u kutovima konstrukcije, gdje stvaraju šupljine u izolaciji, što može dovesti do parcijalnih izbijanja.

11.4. Pokazatelji propadanja izolacije

Proučavanja tipičnih kvarova na izolaciji energetskih kabela i čimbenika koji ih uzrokuju, pokazuju da parcijalna izbijanja mogu biti uzrok propadanja izolacije.

Parcijalna izbijanja su zaslužna za srednji ili završni stadij propadanja izolacije.

Kvarovi mogu biti popraćeni parcijalnim izbijanjima, koja ne moraju uzrokovati uništavanje izolacije, nego samo upućuju na kvarove u izolaciji. Npr. zbog mehaničkog naprezanja mogu nastati pukotine, u kojima mogu nastati parcijalna izbijanja, kao što je prikazano na slici 11.19. Parcijalna izbijanja su osjetljiv parametar za otkrivanje i lokaliziranje kvara u oštećenim dijelovima kabela.



Slika 11.19. Presjek kabela s velikom pukotinom na sredini

11.5. Dijagnostika izolacije kablskih sustava

Kao što je opisano većina kvarova na izolaciji je povezana s parcijalnim izbijanjima. U kablskim sustavima koji rade u visoko-rizičnim uvjetima moguće je u ranom stadiju otkriti i locirati parcijalna izbijanja. Na sumnjivim dijelovima kablskog sustava često se ponavljaju mjerenja, kako bi se na vrijeme otkrili kvarovi i kako bi se mogli obaviti popravci i zamjena oštećenih dijelova. Detekcija parcijalnih izbijanja u energetske kablama na terenu može se provesti *on-line* ili *off-line* metodom:

1) Da bi se provela *off-line* dijagnostika, potrebno je spojiti vanjski izvor na kablski sustav, koji izaziva parcijalna izbijanja.

2) U slučaju *on-line* detekcije, kablski sustav ostaje spojen na mrežu, dok traju mjerenja. Na ovaj način je moguće otkriti sve lokacije parcijalnih izbijanja u pogonskim uvjetima, u svim fazama, ali je teško odrediti u kojoj se točno fazi parcijalno izbijanje dogodilo.

Ako je sustav kabela koji se ispituje direktno zakopan u zemlju, moguće mu je pristupiti samo preko priključaka. Kod ispitivanja stanja izolacije više se koristi *off-line* metoda.

Za *on-line* ispitivanja se koristi vanjski VHF senzor (*eng.* Very High Frequency sensor), koji se spaja oko neutralnog vodiča, na kraju kablskog sustava.

On-line metoda nije učinkovita kao *off-line* metoda zbog sljedećih razloga:

- Nije moguće točno otkrivanje parcijalnih izbijanja u sustavu, potrebni su dodatni impulsi, da bi se odredilo u kojoj se fazi dogodilo izbijanje.
- *On-line* mjerenjima ne može se provesti dubinska analiza kvarova, kao s *off line* metodom, gdje se mjerenja provode na različitim naponskim razinama, a ne samo pri pogonskom naponu.

Dakle, *off-line* mjerenjima mogu se dobiti informacije o parcijalnim izbijanjima na različitim naponskim razinama u kablskom sustavu.

- Kalibracija *on-line* VHF sustava za detekciju parcijalnih izbijanja još nije moguća, pa se otkrivena parcijalna izbijanja ne mogu ocijeniti. Nadalje, nije moguće uspoređivati svojstva parcijalnih izbijanja u različitim kablskim sustavima.
- Mogućnost *on-line* mjerenja uvelike ovisi o pristupačnosti neutralnog vodiča, o opterećenju kabela u određenom trenutku i prigušenju impulsa (koje je veće nego kod *off-line* mjerenja).

Iz ovoga se može zaključiti da je *on-line* metoda učinkovita kao priprema za *off-line* ispitivanje. Imajući na umu važne činjenice, kao npr. cijenu ispitivanja i vrijednost dobivenih informacija, *off-line* metoda je točnija i učinkovitija. U ovom poglavlju su opisani alati za *off-line* ispitivanja pomoću prigušenih izmjeničnih napona.

11.5.1 Dijagnostika na terenu

Ispitivanje istosmjernom strujom je dugi niz godina bila jedina metoda korištena u srednje-naponskim mrežama, ali danas se koristi i izmjenična struja. Za ispitivanje spojeva (posebno onih punjenih smolom), najbolje je koristiti istosmjernu struju.

Prodiranje vlage u smolnu izolaciju, izvana prema unutra, obično ne uzrokuje parcijalna izbijanja. Zbog veće vodljivosti vlažnog dijela izolacije, suhi dio je opterećen s gotovo 99% korištenog istosmjernog napona. Zato je ispitivanje istosmjernom strujom učinkovito za otkrivanje prodiranja vlage u izolaciji, ali i drugih kvarova, kao što su šupljine u izolaciji ili izbočine na vodiču u ovakvim spojevima.

Za druge vrste spojeva i priključaka bolje je koristiti ispitivanje izmjeničnom strujom. Parcijalna izbijanja ukazuju na oslabljena mjesta u izolaciji. Kod starijih kabela koji su ispucali i u koje je prodrla vlaga, koriste se metode temeljene na dielektričnim ispitivanjima, npr. ispitivanje povratnim naponom, mjerenje faktora dielektričnih gubitaka, dielektrična spektroskopija i slično.

U posljednjih nekoliko desetaka godina, razvijeno je nekoliko metoda napajanja za izazivanje parcijalnih izbijanja u energetske kablama, a navedene su u *tablici 11.1*. Da bi se izazvala parcijalna izbijanja, potreban je vanjski izvor napajanja. Oprema za detekciju je s vodičima spojena direktno ili preko prekidača. Na ovaj način mogu se pojedinačno ispitivati pojedine faze kabela.

Tablica 11.1: Različite metode napajanja parcijalnih izbijanja

	Off-line narinuti napon	On-line narinuti napon
Stalno napajanje	20-200Hz istosmjerni napon	Linijski napon 50Hz
	Napon vrlo niske frekvencije (VLF)	
Privremeno napajanje	Prigušeni izmjenični napon (DAC)	-----
	Impulsni napon	

Snaga P potrebna da bi se izazvala parcijalna izbijanja u kabelskom sustavu ovisi o ispitnoj frekvenciji f , kapacitetu kabela C_{kabela} i ispitnom naponu U_{isp} :

$$P = 2\pi \cdot f \cdot C_{kabela} \cdot U_{isp}^2$$

Izmjenični naponi iz tablice 11.1 su podešeni tako da bi se smanjila potrebna reaktivna snaga. Naponi vrlo niske frekvencije pri 0.1Hz smanjuju potrebnu snagu 500 puta.

DAC (Damped AC) metoda koristi linearnu istosmjernu struju punjenja, nakon čega napon počinje oscilirati u zavojnici bez feromagnetske jezgre, u kojoj nema gubitaka reaktivne snage.

Potrebne karakteristike napona koji izaziva parcijalna izbijanja su:

- 1) Mora izazvati parcijalna izbijanja na onim mjestima u kabelu, priključcima i spojevima, na kojima bi se parcijalna izbijanja pojavila i u pogonskim uvjetima ili uvjetima rutinskih ispitivanja kod proizvođača, a koja mogu biti štetna za izolaciju;
- 2) Izvor napona ne smije uzrokovati oštećenja na kabelskom sustavu dok traju mjerenja;
- 3) Amplituda mora imati mogućnost podešavanja;
- 4) Sustav mora biti otporan na smetnje i pozadinske šumove, koji se javljaju tijekom mjerenja.

11.5.2 Svojstva parcijalnih izbijanja

Za ocjenjivanje stanja izolacije važno je nekoliko svojstava parcijalnih izbijanja, koja se u njoj javljaju. To su: napon izazivanja i gašenja parcijalnih izbijanja, amplituda ispitnog napona, uzorak parcijalnih izbijanja, razmještaj i intenzitet parcijalnih izbijanja itd.

Neki podaci o parcijalnim izbijanjima mogu se dobiti direktno iz mjerenja, a neki se računaju naknadno, nakon što se provede analiza dobivenih podataka.

Napon izazivanja i napon gašenja su izravno povezani s procesom nastanka parcijalnih izbijanja i među najvažnijim parametrima za ocjenjivanje stanja izolacije.

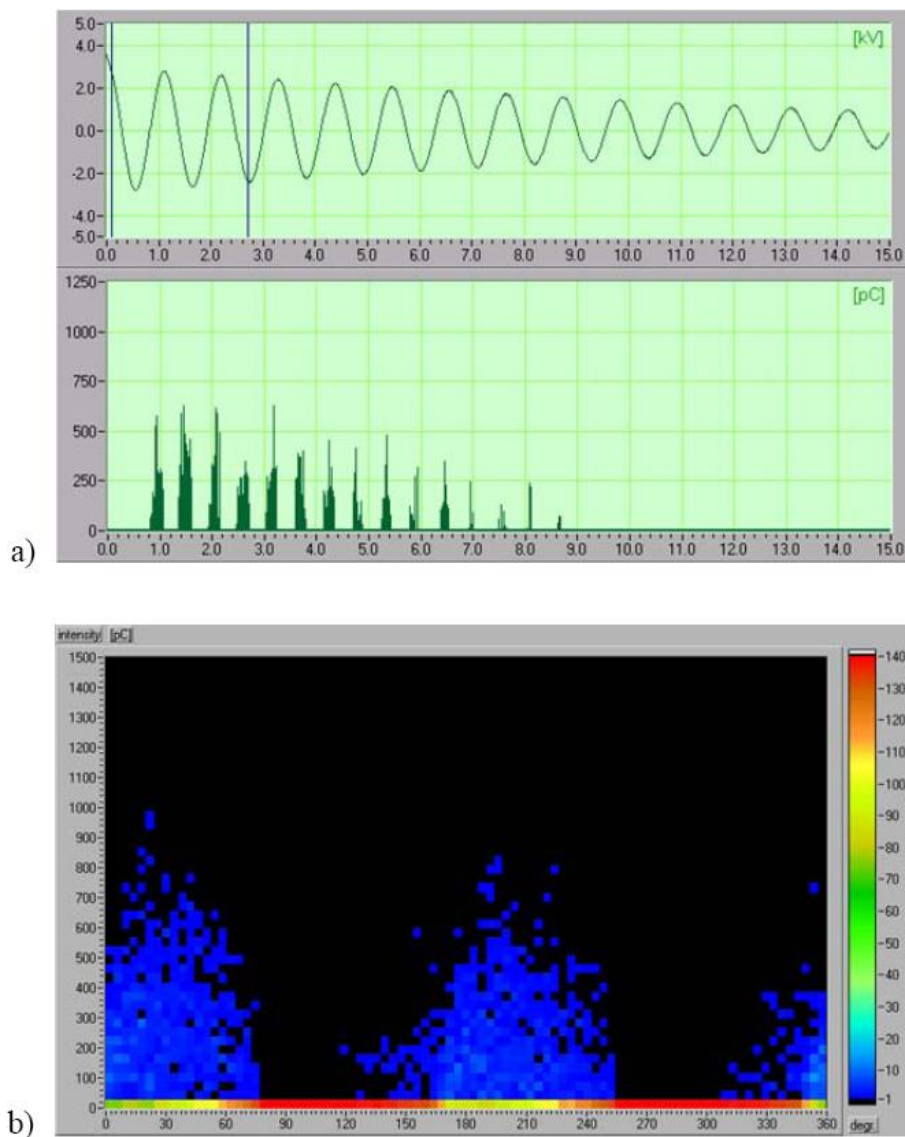
Prilikom ispitivanja, napon na ispitivanom objektu se postepeno povećava od neke niske vrijednosti, pri kojoj nema parcijalnih izbijanja. Napon izazivanja parcijalnih izbijanja je napon kod kojeg se javljaju prva parcijalna izbijanja. Napon gašenja parcijalnih izbijanja je napon kod kojeg se parcijalna izbijanja prestaju pojavljivati, kada se ispitni napon postepeno smanjuje od neke visoke vrijednosti prema nižima.

Kod terenskih ispitivanja važno je uspoređivati trendove amplituda parcijalnih izbijanja. Poremećaji se mogu uspoređivati između različitih kabelskih sustava ili se za jedan kabelski sustav mogu promatrati vremenski.

Uzorak parcijalnih izbijanja prikazuje parcijalna izbijanja kao funkciju faznog kuta Φ_i korištenog ispitnog napona. [11]

Kod ispitivanja parcijalnih izbijanja DAC ispitnim naponom dobivaju se dvije vrste uzoraka:

1. 2-dimenzionalni uzorak prikazuje korišteni DAC napon i parcijalna izbijanja koja su se pojavila u identičnim vremenskim intervalima.
2. 3-dimenzionalni uzorak prikazuje amplitude parcijalnih izbijanja kao funkciju faznog kuta Φ_i . Na slici 11.20. prikazan je primjer 2D i 3D uzorka.

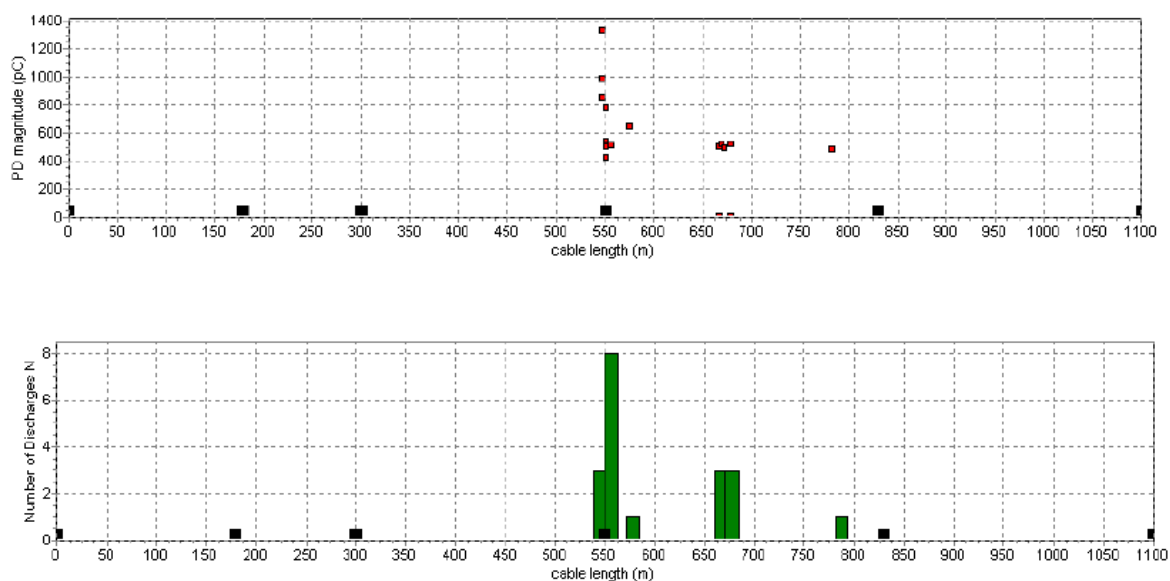


Slika 11.20. Uzorak parcijalnih izbijanja: a) 2D uzorak prikazuje napon u kV i amplitude parcijalnih izbijanja u pC; b) 3D uzorak prikazuje odnos amplituda parcijalnih izbijanja i faznog kuta, te broj parcijalnih izbijanja (po boji)

Kako se kabelski sustavi sastoje od različitih vrsta kabela, spojeva i priključaka, prije ispitivanja je nužno odrediti na kojim se točno mjestima nalaze određene komponente.

Na temelju mjerenja direktnih i reflektiranih valova u vremenskoj domeni, mogu se locirati parcijalna izbijanja. Nakon obrade podataka,OWTS daje prikaz broja nastalih parcijalnih izbijanja i njihove amplitude, na mjestima na kojima su se dogodili. [11]

Na slici 11.21. prikazani su dijagrami koji ukazuju na postojanje parcijalnih izbijanja u kabeu.



Slika 11.21. Primjer dijagrama koji sadrže podatke o parcijalnim izbijanjima: gornji dijagram prikazuje iznose pojedinih parcijalnih izbijanja (različite faze prikazane su različitim bojama), a donji broj parcijalnih izbijanja u ovisnosti o duljini kabela

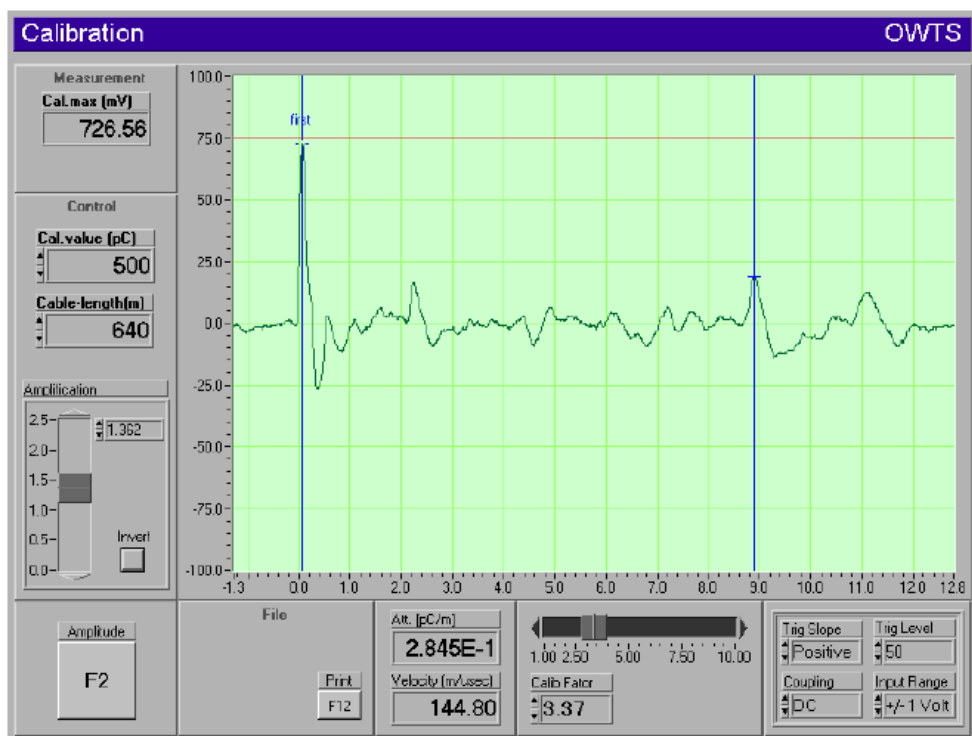
11.6. Ispitivanje stanja 10 kV kabela u TS 35/10 kV GRIPE

Praktični primjer ispitivanja KB na parcijalna izbijanja proveden je na 10 kV-nom kabeu (VP 10 kV Gripe 8) u TS 35/10 kV Gripe.



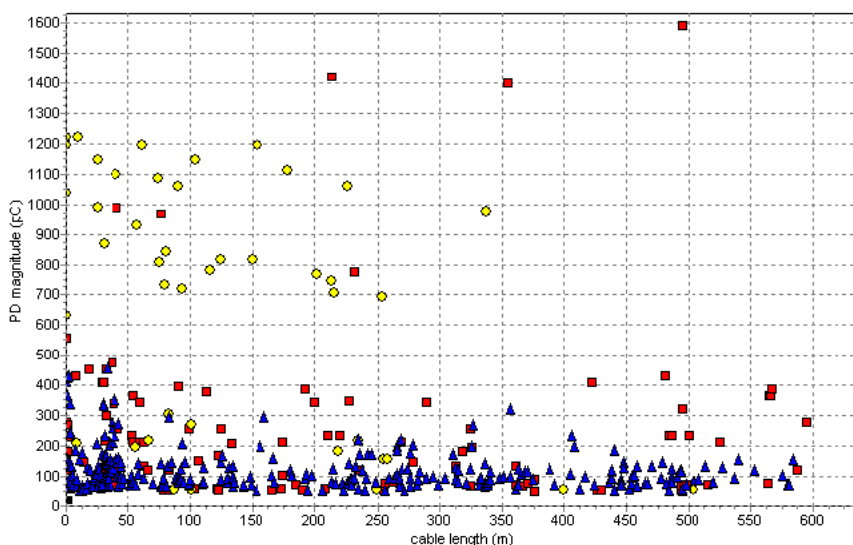
Slika 11.22. Trožilni 10kV kabel na kojem je izvršeno ispitivanje stanja izolacije pomoću OWTS uređaja

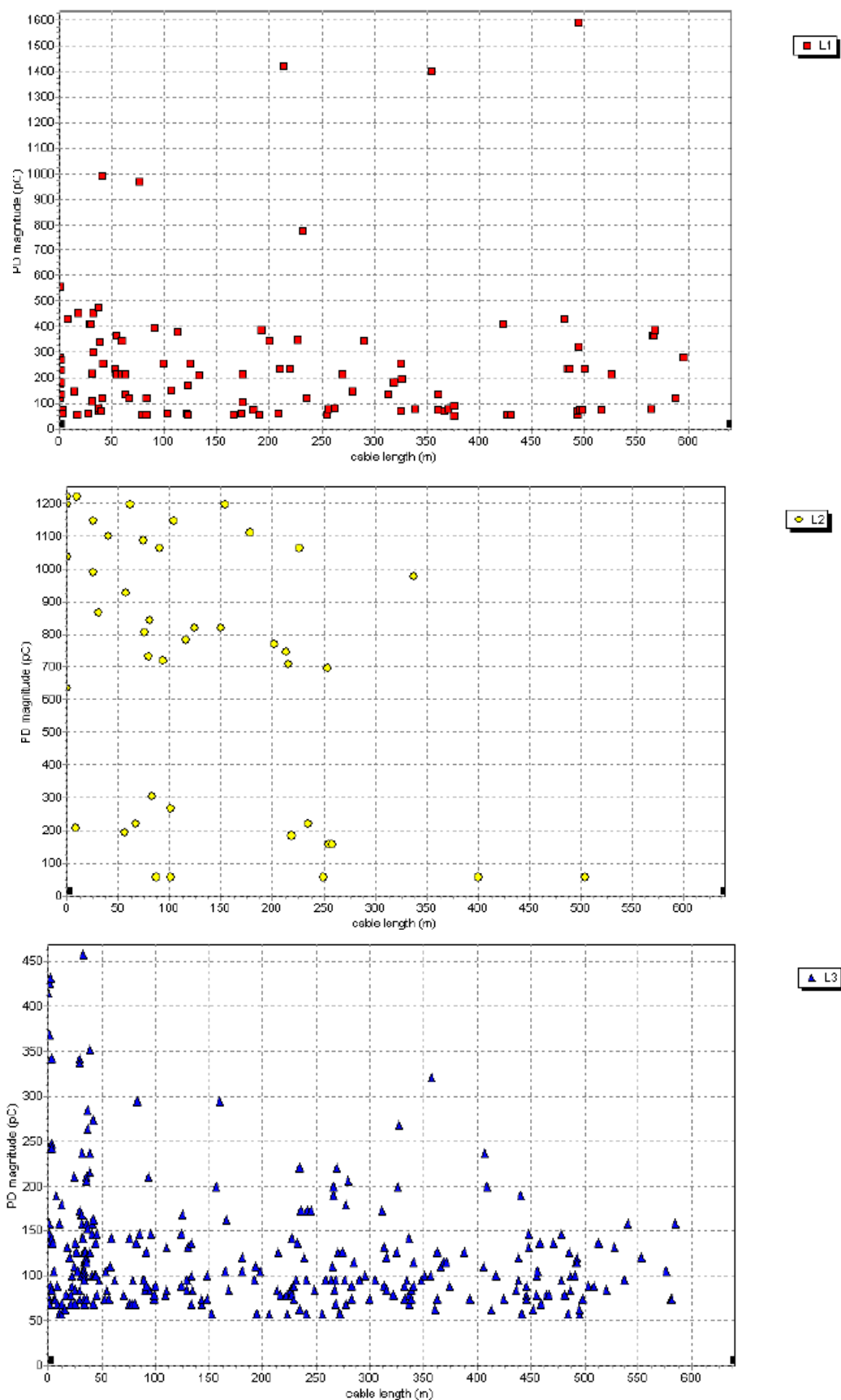
Nakon isključenja kabela s mreže, provedena je kalibracija na jednoj fazi kabela. Kalibraciju je dovoljno provesti na jednoj fazi, jer su odstupanja kapaciteta između faza zanemariva, a jednaka je i duljina. Kalibrirana je amplituda u pC i brzina širenja valova, kao što je prikazano na slici 11.23.



Slika 11.23. Kalibracija kabela

Nakon kalibracije, započeto je ispitivanje stanja izolacije, tj. lociranje parcijalnih izbijanja, na način da se prvo ispitivanje provelo u beznaponskom stanju, a zatim se povećavao iznos napona u koracima od 1 kV do nazivnog napona od 10 kV. Prva parcijalna izbijanja pojavila su se pri naponu od 5 kV, a kako se povećavao iznos napona, rastao je i broj parcijalnih izbijanja. Nakon provedenog ispitivanja na sve tri faze, dobiveni podaci su obrađeni i dobiveni su rezultati prikazani na slici 11.24. Rezultati ukazuju da je kabel u dobrom stanju.





Slika 11.24. Prikaz parcijalnih izbijanja u pC u ovisnosti o duljini kabela. Na prvoj slici prikazane su sve tri faze, a na ostalima parcijalna izbijanja po pojedinim fazama

11.7. Zaključno o parcijalnim izbijanjima

Danas se velik dio distributivnih mreža sastoji od kabelskih sustava. Statistički pokazatelji pokazuju da broj kvarova na kabelima raste sa porastom starosti kabela.

Zamjena svih starih kabela nije ekonomski prihvatljiva, pa se pristupa njihovom popravku, ako je to moguće. Kako bi se na vrijeme otkrili kvarovi na kabelima, u posljednjih 20-ak godina razvijaju se metode, koje na temelju monitoringa parcijalnih izbijanja u kabelima, uz odgovarajuće prateće alate za analizu izmjerenih podataka daju uvid u njihovo stanje.

Svrha takvih ispitivanja je optimalno korištenje postojećih kabelskih resursa, smanjenje sveukupnog rizika u elektrenergetskom sustavu, identifikacija i lociranje kabelskih dionica sa visokim rizikom od kvarova s ciljem zamjene i revitalizacije, razvoj sustava, metoda i alata za dijagnostiku kabela koji se kasnije mogu koristiti i za druge probleme...

Kabeli sa visokim parcijalnim izbijanjima se ocjenjuju kao kabeli visokog rizika kvara, za razliku od kabela koji nemaju parcijalnih izbijanja. Kada se na nekom kabelu otkrije visok stupanj parcijalnih izbijanja potrebno je lokalizirati mjesto kvara i sanirati kabel.

OWTS uređaj, koji koristi prigušene izmjenične napone (DAC), u frekvencijskom području od 50 do nekoliko stotina Hz se primjenjuje na terenu, na način da se priključi na jedan kraj kabela, a zatim se kroz kabel pušta izmjenična struja, čija frekvencija ovisi o induktivitetu uređaja i kapacitetu kabela. Takva struja je potpuno bezopasna za izolaciju kabela, ali dovoljno velika da izazove parcijalna izbijanja, koja uređaj bilježi, pohranjuje i obrađuje. Kada dođe do parcijalnog izbijanja, impuls putuje u dva smjera s mjesta izbijanja.

Prvi ili direktni impuls putuje s mjesta izbijanja do kraja kabela gdje se nalazi mjerna oprema. Reflektirani impuls ide s mjesta izbijanja do drugog kraja kabela i tu dolazi do refleksije s kojom se impuls vraća do kraja kabela gdje se nalazi mjerna oprema. Vrijeme razlike između ova dva impulsa nam pomaže da odredimo lokaciju mjesta izbijanja.

Dijagnostika parcijalnih izbijanja u energetskeim kabelima na terenu se može izvoditi off-line i on-line. Da bi se provela off-line dijagnostika, potrebno je kabel isključiti iz pogona, a parcijalna izbijanja se izazivaju pomoću vanjskog izvora napajanja. U slučaju on-line mjerenja ispitivani kabel ostaje u pogonu i napaja se pogonskim naponom.

On-Line i Off-Line ispitivanje parcijalnih izbijanja su metode koje se dopunjavaju. Kombinacija obaju metoda će dati najbolji rezultat.

U tablici 11.2. dan je pregled prednosti i nedostataka obaju metoda.

Tablica 11.2: Prednosti i nedostaci On-Line i Off-Line metoda

ON-LINE	OFF-LINE
Prednosti	Prednosti
Kod instalacije nije potrebno odspojiti kabel	Provjerena tehnologija
Za vrijeme ispitivanja je mreža u pogonu	Veća osjetljivost
Ekonomičan i nedestruktivan	Nedostaci
T spojnice ne smetaju	Za vrijeme ispitivanja mreža nije u pogonu
Nedostaci	Ispad napajanja
Interpretacija podataka može biti teška	T spojnice nije jednostavno ispitati
Sistem mora imat prikladno uzemljenje	

Kako je broj kvarova na starim distribucijskim kabelima iz godine u godinu sve veći, ova ispitivanja su vrlo korisna, kako bi se prepoznali dijelovi kabela na kojima su potrebni popravci. Promjena trenda ili dozvoljene granične vrijednosti su dobar orijentir za ocjenu stanja izolacije. Vrlo je korisno pratiti trend promjene parcijalnih izbijanja u intervalu od 3 do 6 mjeseci. Ako izmjerene veličine prijeđu dozvoljene granice, tada imamo upozorenje o mogućem kvaru kabela prije nego se dogodi.

Prednost ispitivanja OWTS uređajem je u tome što ispitni napon ne oštećuje kabel, jer je prisutan samo nekoliko stotina milisekundi. Ispitni napon na kabelu koji se ispituje određuje se tako da se dobiju slični uvjeti kao pri normalnom stanju kabela u pogonu.

Analizom parcijalnih izbijanja ne može se odrediti koliko će kabel još dugo biti u funkciji, ali se mogu dati opće smjernice o stanju izolacije kabela i stupanj rizika od neželjenog kvara. Na ovaj način se obavlja preventivno održavanje i omogućava planiranje investicija u održavanju kabela mreže. [11]

12. Ispitivanje elektroenergetskih kabela

Elektroenergetski kabele upotrebljavaju se za efikasnu distribuciju električne energije. Distribucija se mora kroz dulji vremenski period odvijati sa visokom pouzdanošću i sigurnošću. U Hrvatskoj elektroenergetskoj mreži moguće je naći tri vrste kablova:

- 1) Elektroenergetski i signalni kabele s izolacijom i plaštem od PVC, armirani s dvije čelične trake. Postoje dva tipa ovog kabela PP41 (žica ili uža od bakra) i PP41-A (uže od aluminija).
- 2) Energetski kabele s XLPE izolacijom i PVC plaštem armirani s okruglim čeličnim žicama. Oznaka im je XHP. Kabele sa aluminijskim (a ne bakrenim) vodičem imaju u oznaci i slovo A.
- 3) Uljni kabele (IPO). Više se ne koriste, ali mogu se naći na mjestima gdje je stara infrastruktura. Oni su izolirani impregniranim papirom natopljenim u ulje (i jako masni, tako da iz njih često kapa ulje). Sadrže olovni plašt.

12.1. Greške na kablama

Način određivanja mjesta kvara određuje se prema vrsti nastalog kvara. Pri tome se razlikuju sljedeće vrste kvarova:

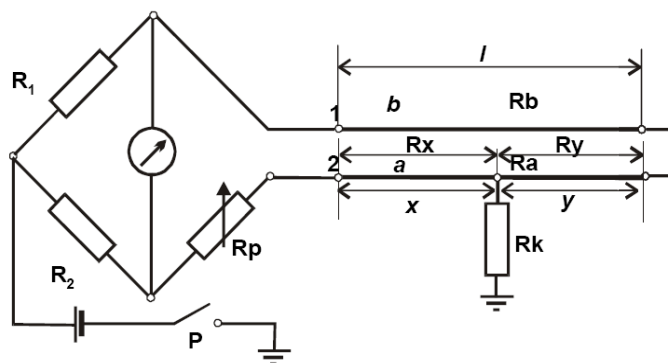
- a) Greška vodič-vodič (paralelna greška).** Kod ove greške dolazi do spoja između dva ili više vodiča. Pri tome vrijednost otpora izolacije može biti između nula oma (niska otpornost) i nekoliko megaoma (visoka otpornost).
- b) Greška vodič-plašt.** Javlja se kao spoj između vodiča i plašta ili nekoliko vodiča međusobno i plašta. Pri tome vrijednost otpora izolacije može biti između nula oma (niska otpornost) i nekoliko megaoma (visoka otpornost). Istraživanja pokazuju da većina kvarova nastaje u ovoj skupini.
- c) Interminirajući kvarovi (paralelna greška).** Greška uoči visokog otpora. Pri tome dolazi do preopterećenja kabela. Preopterećenje se događa pri nekoliko kV i mjesto kvara se najčešće nalazi na mjestu spoja sa drugim kablom. Događaji u kablom mogu se usporediti sa električnim lukom pri čemu razmak između elektroda određuje razina napona. Otpornost izolacije pri tome raste u beskonačnost sve do prekidnog napona.
- d) Serijska greška (otvoreni prekid).** Greške ovog tipa mogu se pojaviti uslijed velikog porasta otpornosti u beskonačnost (potpuni odcjepa). One su često splet nekoliko vrsta paralelnih i serijskih otpora izolacije. Razlog tomu može biti potpun prekid kabela, ili njegovo izvlačenje na mjestu spoja, što potpuno prekida opskrbu električnom energijom, kao i dozvoljeno preopterećenje u svim mogućim varijantama. Ukoliko je vodič sklon pregorijevanju (aluminijski), onda je riječ o longitudinalnoj grešci.
- e) Zemljospoj, greške na plaštu.** Greške između metalnog plašta i okolne zemlje u slučaju plastičnog izolacionog materijala. Greške između vodiča i okolne zemlje kod niskonaponskih kabela sa plastičnom izolacijom. Kod ove greške je potrebna najveća opreznost, pogotovo kad je riječ o visokom naponu, kada dolazi do izboja u zemlju. To predstavlja potencijalnu opasnost za ljude i životinje.
- f) Greške uslijed prodiranja vlage.** Ovu vrstu greške je najteže locirati. Kod višezilnih kabela položenih u zemlju zahvaća sve vodove. Kvar se ne javlja uvijek tamo gdje voda ulazi u kabel. Otpor greške je reda nekoliko kilooma. Na mjestu kvara, javlja se promjena impedancije. Ovisno od konstrukcije kabela ove greške mogu biti centrirane ili raširene duž kabela. Imaju svojstvo promjene mjesta za vrijeme određivanja mjesta kvara, sklone su drastičnom ponašanju, pogotovo na spojevima, mogu postati visoko otporne nakon jednog ili dva izboja i nakon toga se više ne mogu locirati. Voda iščezava iz spoja i isušuje se. Druga skupina ovih greški su greške na podvodnim kablom. Pri tome tlak vode otežava efektivno paljenje kroz visokonaponski kabel. [14]

12.2. Osnovni mjerni uređaji

Brzi razvoj telekomunikacijske i energetske mreže ima za posljedicu povećanje broja kvarova, pogotovo u urbanim sredinama, što je dovelo do razvoja uređaja i metoda mjerenja kvarova na kabelima. U ovom poglavlju biti će ukratko objašnjenje mosna metoda i određivanje mjesta kvara pomoću reflektometra. Mjesto kvara se može odrediti i tragačem kabela, ali se oni u praksi ne koriste jer su jako osjetljivi i znaju ukazivati na kvar tamo gdje i ne postoji.

Mosna metoda

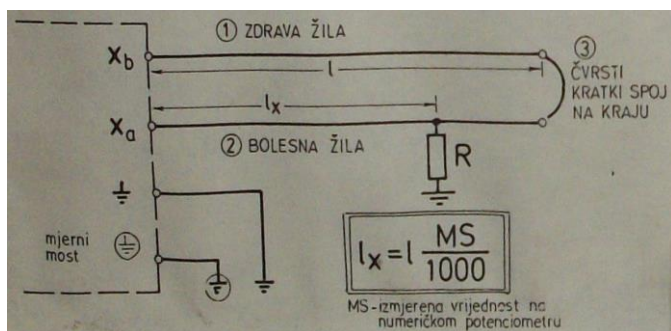
Prema novim standardima, osim ispravnosti vodiča, potrebno je testirati i ispravnost plašta kabela. Ova metoda je jako stara, ali i dalje efikasna pri pronalaženju kvara na izolaciji ili plaštu kabela. Mjerni most (slika 12.1.) sličan je Wheatstonovom.



Slika 12.1. Wheatstonova metoda mjerenja

Za mjerenje je neophodno, pored bolesne žile, imati i barem jednu zdravu žilu (slika 12.2.). Neispravnu i zdravu žilu potrebno je čvrsto spojiti na kraju i provjeriti ispravnost spoja. Uzemljenje, i ako postoji druga neispravna žila, spojiti na uzemljenje. Numeričkim potencijetrom kazaljku nulindikatora dovesti na nulu. Kada je most u ravnoteži očitati vrijednost sa numeričkog potencijetra (MS) i izračunati udaljenost do mjesta kvara preko (12-1). Ponoviti postupak s drugog kraja voda. Ukoliko se mjesto kvara ne podudara – kvar se nalazi između izmjerene dvije duljine.

$$l_x = l \frac{MS}{1000} \quad (12-1)$$



Slika 12.2. Mosna metoda mjerenja

12.3. Reflektometri

Danas postoje brži i jednostavniji uređaji za određivanje mjesta kvara koji se temelje na impulsnoj reflektometriji, a nazivaju se reflektometri.

12.3.1. Impulsna reflektometrija

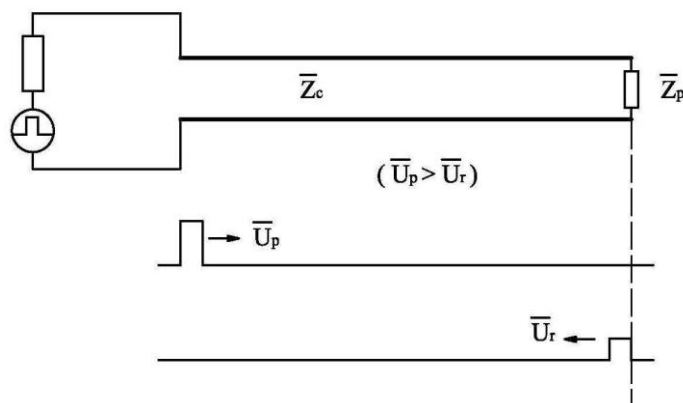
Impulsna reflektometrija se temelji na refleksiji koja se javlja na mjestima diskontinuiteta impedancije duž kabela. **Diskontinuiteti** su mjesta na kojima se ulazna impedancija voda i ostatka voda razlikuju od njegove karakteristične impedancije. Diskontinuitet može biti kvar na kabelu, ali i spojnica, prelazak s kabela jedne impedancije na kabel druge impedancije, itd.

Karakteristična impedancija voda (Z_c) jednaka je (12-2) u općem slučaju, ili (12-3) u slučaju voda s malim gubitcima ili pri visokoj frekvenciji (generiranih impulsa u reflektometru).

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (12-2)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (12-3)$$

Veću karakterističnu impedanciju imaju deblji vodiči na maloj udaljenosti, a manju tanki vodiči na velikoj udaljenosti. Na slici 12.3. prikazana je refleksija voda zatvorenog impedancijom Z_p . Reflektometar šalje impuls $\bar{U}_p$ koji putuje kroz vod karakteristične impedancije Z_c sve do impedancije Z_p . Z_p je različita od Z_c zbog čega ona predstavlja diskontinuitet, te se jedan dio energije progresivnog impulsa reflektira, a drugi dio se apsorbira u impedanciji Z_p .

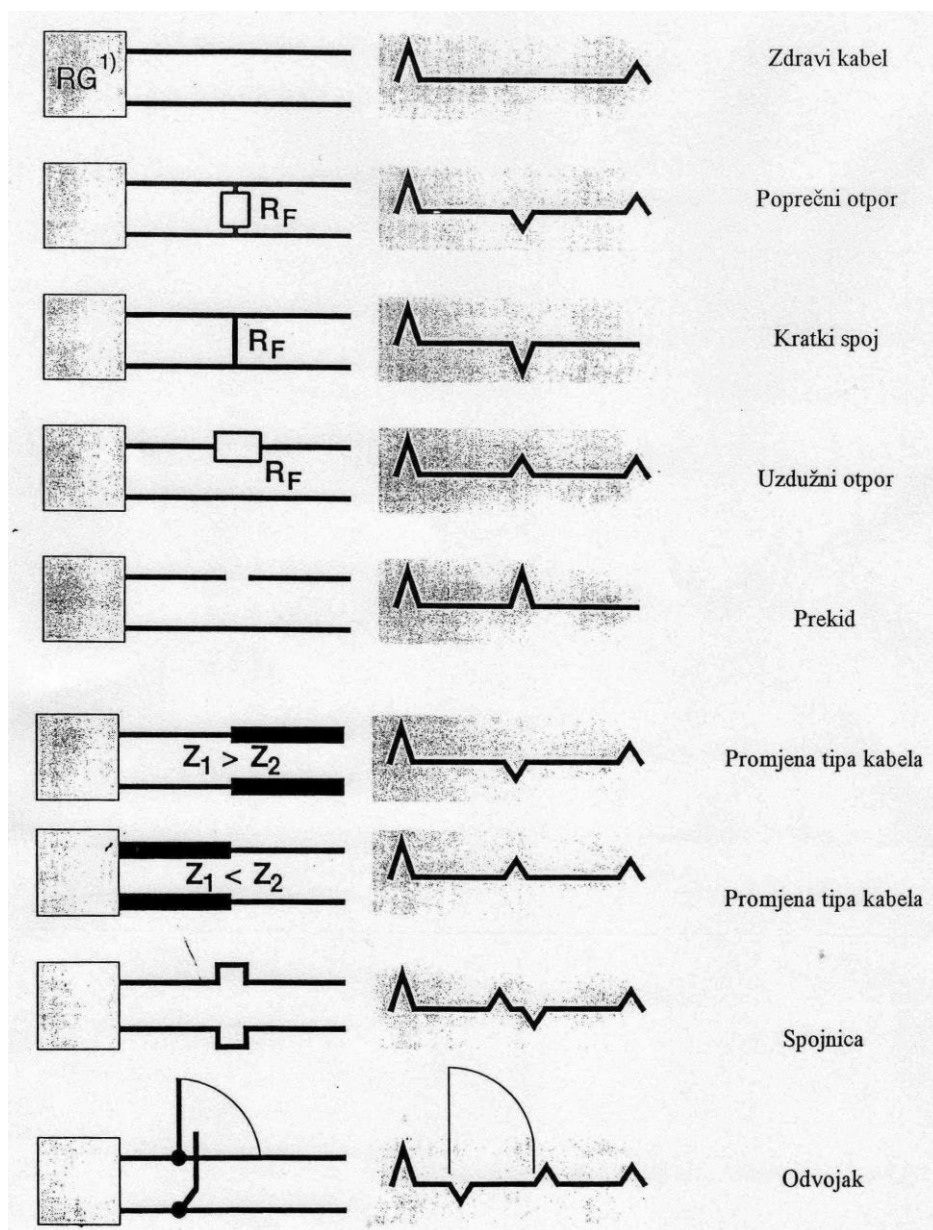


Slika 12.3. Refleksija voda zatvorenog impedancijom Z_p

Reflektirani dio impulsa po svojoj je apsolutnoj vrijednosti manji od impulsa generiranog u reflektometru, a odnos njihovih amplituda naziva se **koeficijent refleksije** (12-4) i kreće se u granicama $0 \leq |\bar{r}| \leq 1$.

$$\bar{r} = \frac{\bar{U}_r}{\bar{U}_p} = \frac{Z_c - Z_p}{Z_c + Z_p} \quad (12-4)$$

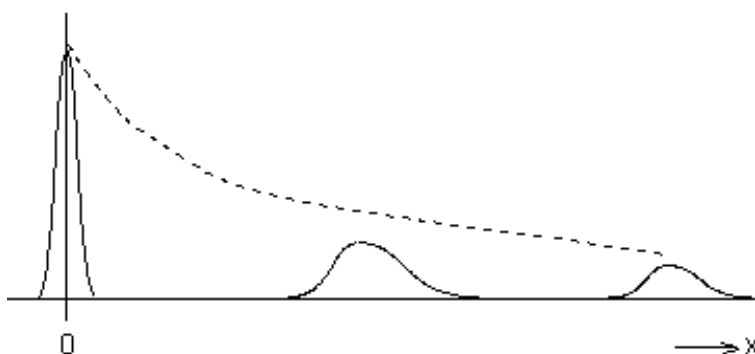
Kao u primjeru sa priključenom impedancijom Z_p na vod karakteristične impedancije Z_c , dio energije progresivnog impulsa se reflektira, a drugi dio apsorbira pri svakom diskontinuitetu na vodu. Nekoliko primjera faktora refleksije prikazano je slikom 12.4.



Slika 12.4. Faktor refleksije (idealizirano)

12.3.2. Prigušenje vodova

U analizi impulsnih metoda treba uzeti u obzir prigušenje koje bitno utječe na karakteristike vodova i koje je jako značajno u impulsnoj reflektometriji. Radi prigušenja voda, amplituda progresivnog impulsa na putu do mjesta kvara opada eksponencijalno s udaljenosti, kako je to prikazano na *slici 12.5*. Isprekidana crta prikazuje amplitudu generiranog impulsa bez refleksije na vodu ukoliko se u obzir uzme prigušenje voda.



Slika 12.5. Opadanje impulsa po vodu

Prigušenje voda se definira kao (12-5):

$$\alpha l_x = -20 \log \frac{U_x}{U_0} \quad (12-5)$$

Gdje su:

- α - koeficijent vlastitog prigušenja voda,
- l_x - udaljenost od početka voda do mjesta x na vodu,
- U_x - napon na udaljenosti l_x od početka voda i
- U_0 - napon na početku voda.

12.3.3. Princip mjerenja i dijelovi impulsnog reflektometra

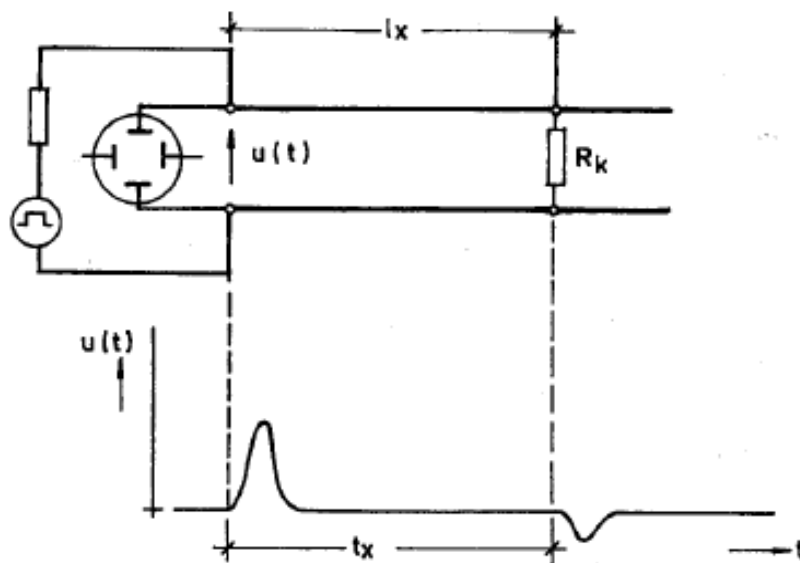
Kako bi reflektometar mogao prikazati refleksiju voda on mora imati osciloskop. Da bi generirao progresivni impuls mora imati generator impulsa. A pored ovih dijelova sadrži i točnu vremensku bazu, sklop za predaju i prijam impulsa s mogućnošću odgovarajućeg prilagođavanja, sklop za proračunavanje udaljenosti od mjesta mjerenja do mjesta kvara te sklop za memoriju slike.

Na njega se može priključiti писаč ili osobno računalo, kako bi se analizirali rezultati mjerenja i definiralo stanje u kabelu. Usporedbom rezultata omogućuje se detekcija svake promjene na karakteristici, a takva promjena je pokazatelj početne faze kvara na određenom mjestu duž kabela.

Moderne impulsne reflektometre proizvode firme poput **Tectre** i **Sebe KMH**. Njihov se princip rada temelji na tehnici uzimanja uzoraka (*sampling*), imaju i slijedeće prednosti:

- udaljenost od početka voda do mjesta kvara pokazuje se digitalno u metrima,
- vrijeme prostiranja impulsa se direktno očitava na osciloskopu ili ekranu,
- moguće je za određene vremenske intervale skokovito ili kontinuirano pomicanje impulsa na pokazivaču do početka progresivnog impulsa
- standardizirani uzorci mogu se prenijeti, pohraniti i obraditi na osobnom računalu.

Priključenjem instrumenta na mjerni kabel, na ekranu se pokazuje tijek prostiranja impulsa duž voda, a pritom reflektirani impulsi kasne u odnosu na progresivni impuls. Kašnjenje t_x je vrijeme koje je potrebno da impuls od početka voda dođe do mjesta kvara i vrati se na početak voda. Ako se udaljenost od početka voda do mjesta kvara označi s l_x , ukupni put koji je impuls prešao od početka voda do mjesta kvara i natrag iznosi $2 \cdot l_x$ (slika 12.6). Uzimajući u obzir brzinu prostiranja impulsa, nepoznata udaljenost l_x od početka voda do mjesta kvara dobiva se iz (12-6).



Slika 12.6. Princip mjerenja pomoću impulsnog reflektometra

$$2 \cdot l_x = v \cdot t_x \Rightarrow l_x = \frac{v}{2} t_x \quad (12-6)$$

Pri čemu je t_x vrijeme prostiranja impulsa. Kod starijih reflektometara ono se očitava s osciloskopa i potom računa udaljenost l_x . Noviji reflektometri imaju u sebi sklop za preračunavanje i automatski proračunavaju udaljenost do mjesta kvara. Pri tome se polovina brzine prostiranja elektromagnetskog vala $v/2$ podešava na odgovarajućem numeratoru. Ona se razlikuje od tipa do tipa kabela i daju je proizvođači.

Za elektroenergetske kabele u Hrvatskoj (navedene u uvodu poglavlja 12) i PP00 kojim se vrši razvod do stambenih i sličnih objekata manje potrošnje i nazivnog napona 230/400V) ona je prikazana u *tablici 12.1*.

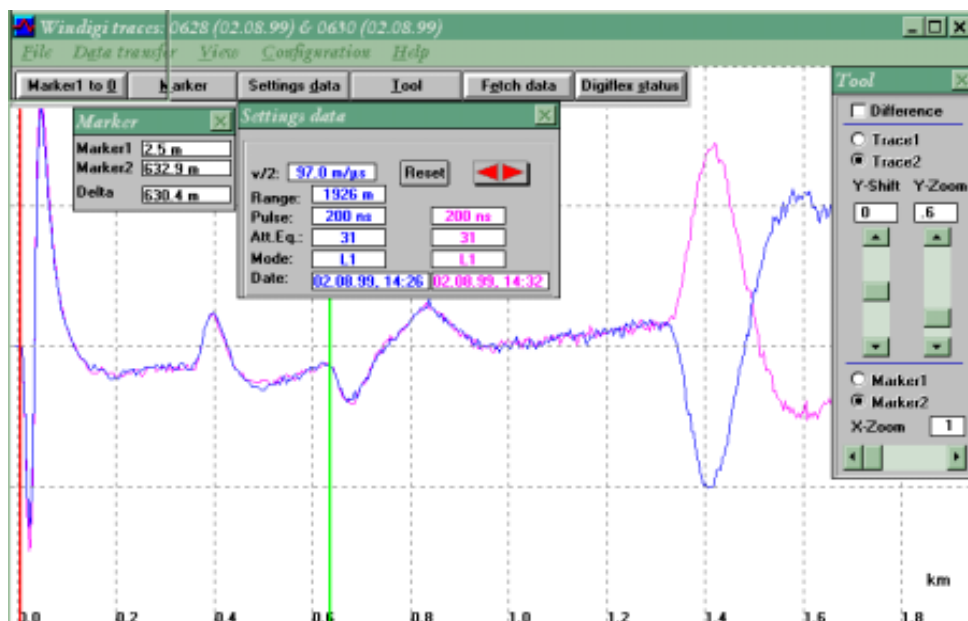
Vrsta kabela	$v/2$
XHE, XHP	84,00 m/ μ s
IPZO	80,00 m/ μ s
PP00, PP41	75,00 m/ μ s

Tablica 12.1. Polovina brzine rasprostiranja za elektroenergetske kabele u Hrvatskoj

Ukoliko se mjereni kabel sastoji iz više dionica sa različitim brzinama prostiranja potrebno je mjeriti pojedinačne duljine kabela i potom ih sve zbrojiti. Ukoliko se instrument spaja preko spojnog kabela na kabel potrebno je od ukupne izmjerene duljine oduzeti duljinu spojnog kabela. U slučaju da se kvar nalazi na početku kabela dolaze u obzir samo kratkotrajni predajni (generirani) impulsi, jer bi u suprotnom reflektirani impuls od mjesta kvara, koji se nalazi u neposrednoj blizini početka mjerenog voda, bio u području predajnog impulsa, a to bi znatno otežalo jasno određivanje položaja reflektiranog impulsa.

Kod većeg broja snopova u kabelu, pri čemu je barem jedan ispravan i jedan u kvaru, i mnogo spojnih mjesta koristi se diferencijska metoda. Pri tome se snima reflektogram (prikaz odziva kabela na generirani impuls reflektometra na osciloskopu) zdravog snopa i uspoređuje sa reflektogramom bolesnog snopa. Reflektogram bolesnog snopa može se usporediti i sa reflektogramom prethodnog mjerenja (ukoliko isti postoji). Kvar je tamo gdje postoji znatno odstupanje u reflektogramima. Ova metoda je praktična i pri određivanju kvara u NN mreži u kojoj postoji mnogo račvanja kabela.

Primjer je dan na *slika 12.7.* gdje je na kraju kabela vidljivo odstupanje u reflektogramima. Reflektogrami su spremljeni u *Softwareu* za obradu i spremanje reflektograma *Windigi*. Pored njega postoji i *Waveview*.



Slika 12.7. Odstupanje u reflektogramima (kvar na kabelu) u Softwareu Windigi

Kvarovi s velikim prelaznim otporom predstavljaju značajan problem u impulsnoj reflektometriji. Izuzetak je kvar zbog prodiranja vlage. Iako najčešće ima prijelazni otpor oko 100 k Ω , ovaj kvar može se još uvijek mjeriti pomoću impulsnog reflektometra, jer voda koja je prodrla u kabel, znatno utječe na promjenu relativne dielektrične konstante, koja je uzrokom odgovarajućih promjena primarnih parametara, a time i promjene karakteristične impedancije.

U ovom specifičnom slučaju može se odrediti početak i kraj segmenta kabela koji je zahvaćen vodom, ali ne i samo mjesto prodiranja vode u kabel.

Kod kvarova sa velikim prijelaznim otporom, primjenom udarnih generatora može se na energetskim kabelima postići mali prelazni otpor uz priključivanje energetskih razdvojnih filtera - zbog zaštite impulsnog reflektometra od generatora visokog napona.

Na kraju treba ukazati kako su i brzina prostiranja, kao i vrijeme kašnjenja između progresivnog i reflektiranog impulsa, podložni utjecaju, zbog čega se javlja relativna pogreška prilikom određivanja udaljenosti do mjesta kvara.

12.3.4. Pogreške reflektometra

Relativna pogreška udaljenosti do mjesta kvara jednaka je zbroju relativnih pogrešaka brzine prostiranja i vremena kašnjenja.

Podatke o brzini prostiranja za različite tipove kabela, koji se dobiju od proizvođača kabela, treba prihvatiti kao orijentacijske vrijednosti, jer su moguća odstupanja za nekoliko postotaka. Prema tome vrijeme prostiranja može se razlikovati od jednog do drugog vodiča čak i više od $\pm 1\%$, a prosječna pogreška iznosi $\pm 5\%$.

Vrijeme kašnjenja između progresivnog i reflektiranog impulsa mora se mjeriti (zbog izobličenog boka reflektiranog impulsa) od podnožja progresivnog impulsa do podnožja reflektiranog impulsa. Pogreška u mjerenju vremena kašnjenja se sastoji od pogreške koju unosi sam instrument i pogreške određivanja točke podnožja reflektiranog impulsa. Suvremeni elektronički sustavi za mjerenje vremena, koji su ugrađeni u moderne impulsne reflektometre, čine sasvim neznatnu pogrešku, tako da se ona može zanemariti.

Ukupna pogreška u određivanju vremena prostiranja i točke podnožja reflektiranog impulsa, uz određene mjere korekcije, prosječno iznosi $<2\%$, dok kod mjerenja na koaksijalnim kabelima i četvorkama za rad u visokofrekventnom području treba očekivati pogrešku $< 5\%$.

12.4. Mjerni postupci

Duljine elektroenergetskih kabela mjeri se u kilometrima. Usporedbe radi najdulji elektroenergetski kabel na području Slavonije je 22 km, dok je prosječna duljina kabela između 5 km i 10 km. Najdublji kabel je na dubini od 5,5 m a najplići na dubini od samo 5 cm (odmah ispod asfalta).

Pri određivanju mjesta kvara instrumentom koji unosi grešku od samo $\pm 5 \%$ na duljini od 10 km dobije mjerna nesigurnost ± 50 m. Fizički, to bi značilo u krajnjem slučaju raskopavanje trase kabela na dužini od 100 m.

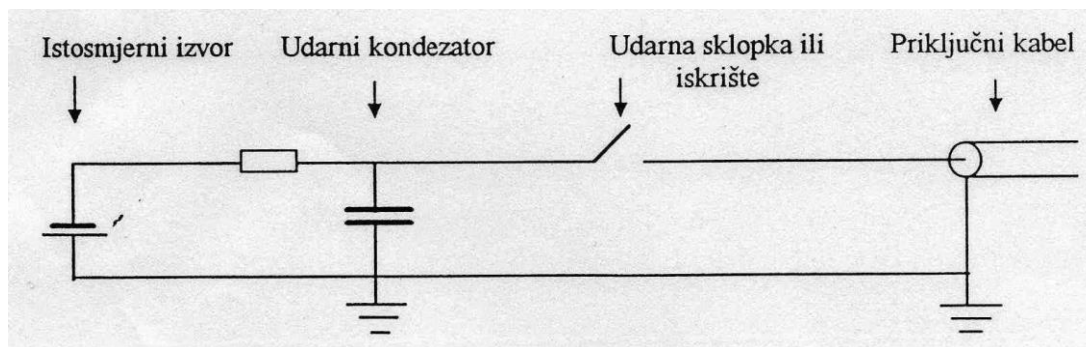
Sukladno tome određivanje mjesta kvara može se podijeliti u dva dijela: **predlokaciju i mikrolokaciju**. Prije predlokacije potrebno je izvršiti mjerenje izolacionog otpora ili naponsko ispitivanje.

12.4.1. Predlokacija

Predlokacija služi za određivanje mjesta kvara elektroenergetskog kabela s određenom mjernom nesigurnošću (kod HEP ODS-a je to najčešće ± 100 m ili ± 200 m). Ona koristi činjenicu da se impuls na mjestu greške reflektira. Cjelokupni postupak moguće je promatrati na ekranu (osciloskopu) reflektometra.

Niskoomske greške čak je često moguće odrediti i samo predlokcijom. Određivanje visokoomskih greški je kompliciranje i za njih je potrebno provesti i mikrolokaciju.

- **Lučna udarna metoda (LBS).** U ovom slučaju reflektometar omogućuje da se na ekranu kao refleksije uoče niskoomske graške kabela, dok visokoomske greške ne daju refleksiju impulsa. Mjesto greške na ekranu uređaja se ne uočava. Lučna udarna metoda (kontinuirano i istovremeno se šalju visokofrekventni impulsi koji izazivaju luk na mjestu greške) može privremeno visokoomsku grešku pretvoriti u niskoomsku. Tada je moguće locirati grešku sa normalnim postupkom refleksije.
- a) **Mjerna metoda sa električnim lukom (ARM)** prazni energiju kondenzatora na kabel s greškom preko jedne udarne sklopke (*slika 12.8*). Davanje VN impulsa na kabel s greškom izaziva na mjestu greške proboj. Na taj način moguće je obuhvatiti visokoomske i interminirajuće kvarove. Mjesto greške za vrijeme proboja (odnosno luka) na tom mjestu predstavlja niskoomsku petlju. Reflektometrom koji je sinkroniziran s udarnim impulsom moguće je vidjeti grešku na ekranu i odrediti udaljenost s pogreškom od 5 m.



Slika 12.8. Način rada udarnih generatora

- a) **Postupak istitravanja.** Primjenjuje se ukoliko se udarni napon kod ARM metode nije dovoljno velik da bi postigao proboj kabela. Kod ove, za razliku od ARM metode, metode kabel se direktno nabija sa prikladnog naponskog nivoa (VN ispitni uređaj) dok se ne dosegne probojni napon na mjestu greške. Pražnjenje kod proboja uzrokuje širenje putnih valova koji se reflektiraju na početku kabela i istitravaju između početka kabela i mjesta greške.
- b) **Udarna predlokacija.** Istitravanje između početka kabela i mjesta greške pri sinkroniziranom promatranju na ekranu daje karakterističnu sliku raspodjele napona. Takve slike mogu se kod iterirajućih grešaka koristiti za predlociranje.

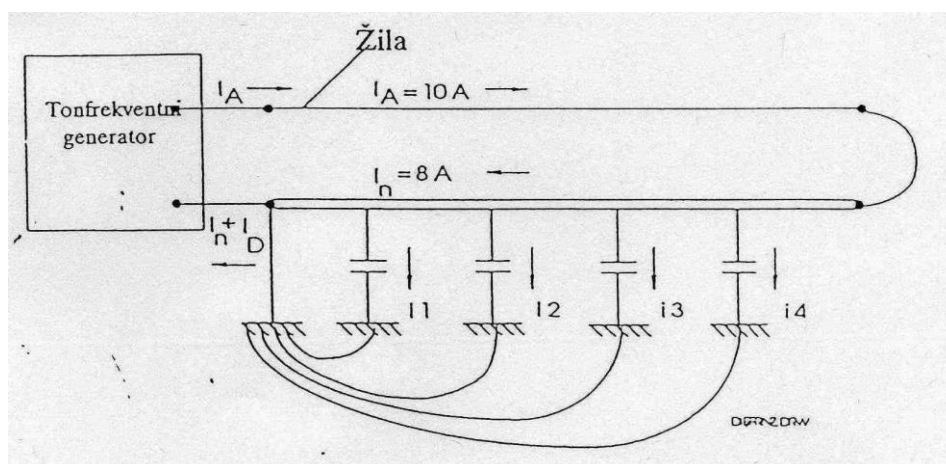
Potrebno je primijetiti da se pri određivanju mjesta kvara visokoomske greške uz reflektometar koristi i neki udarni generator pomoću kojeg se kabel propaljuje (daju mu se udarni impulsi).

12.4.2. Mikrolokacija

Najvažniji dio određivanja mjesta kvara je mikrolokacija. U odnosu na troškove mjesto kvara treba odrediti u što kraćem vremenu. Jedan od najčešće korištenih postupaka za mikrolokaciju je tonfrekventna metoda u različitim varijantama. Korištenjem odašiljača tona i prijemnika koji je opremljen slušalicama i svitkom za traženje, izaziva se tonfrekventnom strujom magnetsko polje oko kabela koje je moguće svitkom izmjeriti.

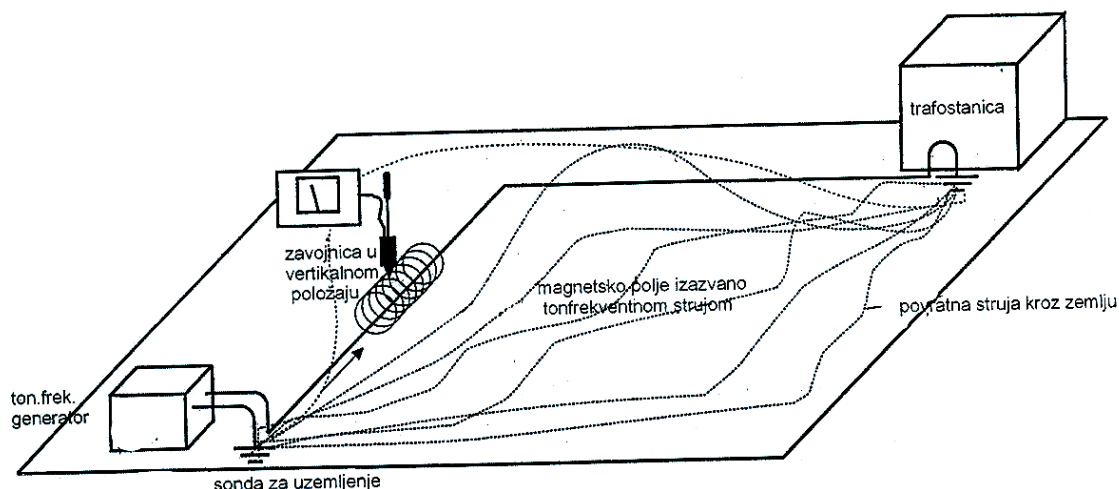
Metode preplitanja i praćenja minimuma treba radi nedovoljne točnosti koristiti samo ako nisu provedive metoda distance i metoda napona koraka. Ukoliko frekvencija leži u čujnom području moguće je maksimum i minimum magnetskog polja odrediti pomoću slušalica. Pri tome treba dati prednost metodi minimuma jer je ona jače izražena. Van čujnog područja se maksimum i minimum određuju prikladnim mjernim instrumentom. Kod toga se primjenjuje isti prijemnik koji se koristio kod udarne predlokacije. Trasa kabela i dubina polaganja daju se dobro odrediti, međutim kod lokacije greške mogu nastati poteškoće. Uzrok je u paralelnim vodovima, cjevovodima za vodu i plin, te tračnicama koje se nalaze u blizini i time mogu izazvati deformaciju polja.

Kod tonfrekventnog postupka se u ispitni kabel pušta izmjenična struja tonske frekvencije. Snaga generatora treba bit takva da u kabelu teče što veća struja, kako bi se ostvario što veći razmak od smetnje. To je važno jer ta struja mora izazvati magnetsko polje oko kabela, koje je moguće sondama mjeriti.. Prikladnim priključenjem na mjerni objekt treba izazvati što jače magnetsko polje. Pri tome treba osigurati da između vodiča i plašta teče struja razlike. U koliko u dva vodiča teče ista struja ali suprotno polarizirana struja prema vani se ne stvara nikakvo magnetsko polje. Međutim korištenjem dozemnih struja (oprez: javlja se naponski ljevak) moguće je dobiti jedno diferentno polje koje se da mjerno tehnički odrediti (slika 12.9.). Lociranje magnetskog polja vrši se indukcionim svitcima, kojima se na propisan način ide po trasi.



12.9. Princip formiranja magnetskog polja uslijed razlike struja

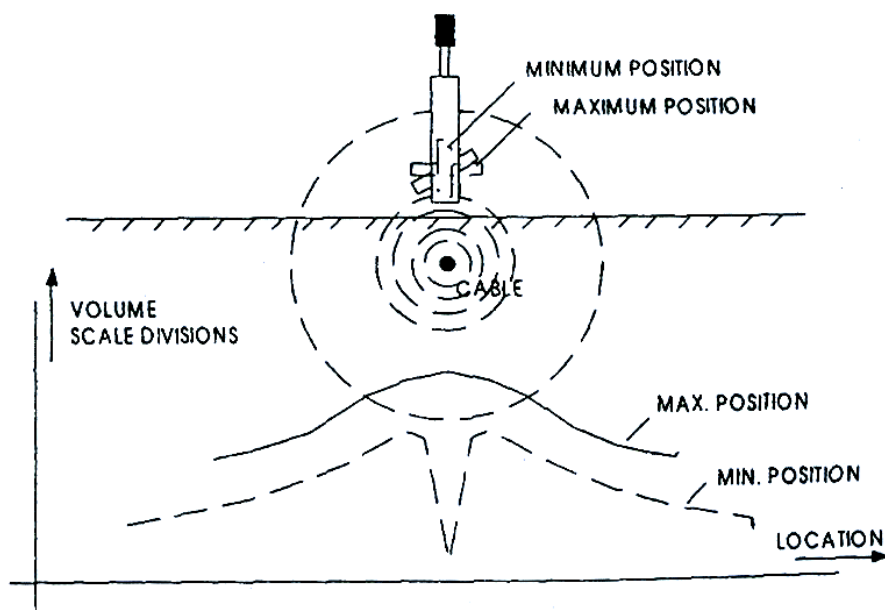
Trasiranje kabela



Slika 12.10 Trasiranje kabela pomoću tonfrekventnog generatora

Uređaj za trasiranje kabela kao i uređaj za identifikaciju kabela (slika 12.10) sastoji se od odašiljača struje i njemu odgovarajućeg prijemnika.

Kod lokacije kabela pomoću magnetnog polja koncentriranog oko kabela protjecanog strujom. Jakost magnetnog polja ovisi o jakosti električne struje koja protječe kroz kabel i udaljenosti točke mjerenja i centra kabela (slika 12.11).



Slika 12.11. Mjerni principi kod lociranja kabela

Prijemnik mjeri komponentu magnetskog polja horizontalno ili vertikalno (ovisno o položaju zavojnice na kabel) u odnosu na uzdužnu os kabela. Jačina (veličina) magnetskog polja može se očitati na displeju ili čuti u slušalicama.

U daljem text-u ćemo nešto reći o **pasivnoj i aktivnoj lokaciji kabela**.

Kod *pasivne lokacije* za određivanje trase kabela protjecanom strujom frekvencije 50 Hz odašiljač odnosno generator nije potrebno spajati.

Međutim kod tzv. *aktivne lokacije* (koristi se za određivanje trase i dubine kabela, a može se čak koristiti i za mikrolokaciju kvara na kabelu) signal se odašilje pomoću tonfrekventnog generatora po izboru dvije frekvencije: 1,09 kHz i 9,80 kHz.

To ovisi o načinu spajanja kabela i tonfrekventnog generatora pa možemo reći da razlikujemo tzv. direktni spoj (1,09 kHz) i induktivnu spregu (9,80 kHz).

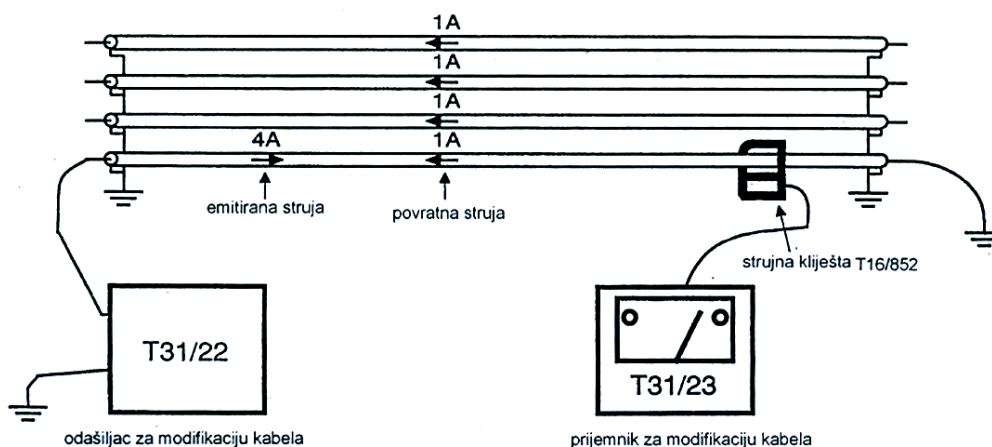
Direktni spoj je omsko povezivanje ispitnog kabela i odašiljača. Ova metoda se koristi za pristupačne i iskopčane kabele. Da bi bili sigurni da će proteći struja moramo kraj kabela kratko spojiti i uzemljiti (vidi *sliku 12.10*).

U slučaju da ne možemo iskopčati kabel za odašiljanje mjernog signala koristimo induktivnu spregu. Induktivnu spregu ostvarujemo korištenjem strujnih obuhvatnih kliješta.

Koristeći transmisiju strujnih kliješta kabel se napaja signalom koji inducira napon u kabelu.

Ovaj napon uzrokuje struju kroz vodič čija jakost ovisi o kombinaciji otpora u zatvorenoj strujnoj petlji. Petlja mora imati što je moguće manji otpor.

Identifikacija kabela



Slika 12.12. Identifikacija kabela

U pogonu kabela postoje često slučajevi da je potrebno identificirati kabel na kojem želimo izvršiti određene radnje (presjecanje, popravljjanje, prespajanja kabela i sl.).

U tu svrhu kabel koji identificiramo moramo prvo isključiti iz pogona te na njegovom kraju ga uzemljiti kako bi zatvorili strujni krug (slika 12.12).

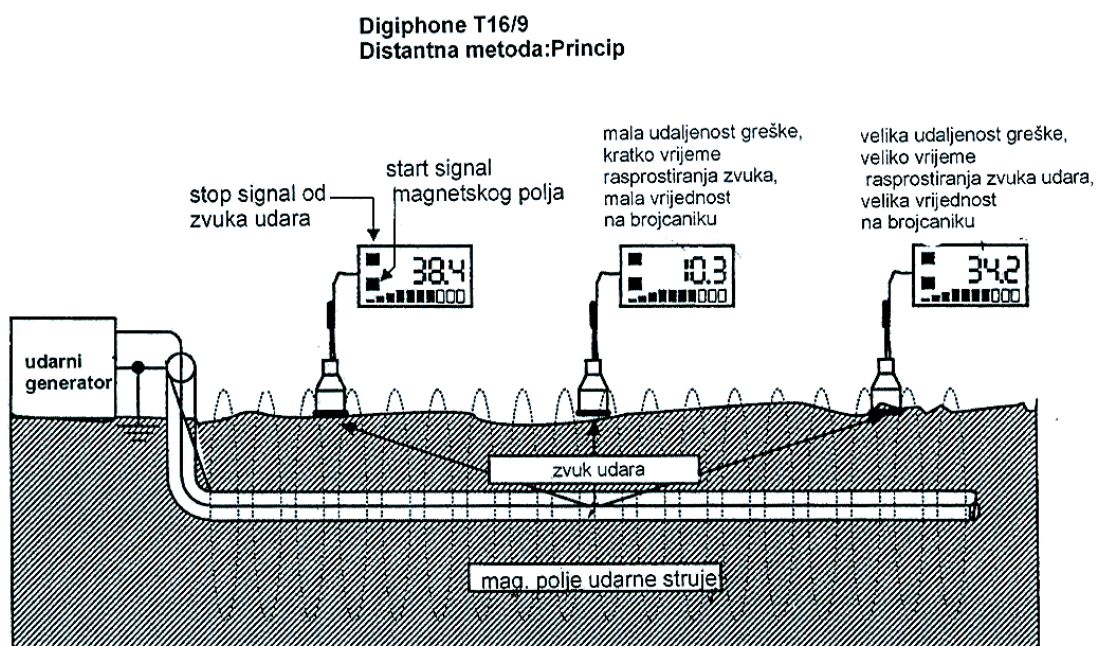
Kao što vidimo na slici 12.12 za identifikaciju kabela potreban nam je odašiljač koji emitira struju kroz kabel te njemu odgovarajući prijemnik. Prijemnik odašlanog impulsa preko obuhvatnih strujni kliješta (na njima postoji strelica koja pokazuje smjer emitirane struje) u slučaju da se nalazimo na traženom kabelu daje otklon u smjeru emitirane struje (u našem slučaju udesno) te u slučaju da strujna kliješta okrenemo u suprotnom smjeru od smjera emitirane struje daje suprotan otklon tj. otklon u lijevo.

Obuhvatimo li neki drugi kabel na koji nismo spojeni na prijemniku neće biti nikakvog otklona što znači da se ne radi o kabelu kojeg tražimo.

12.4.2.1. Postupak distance

Najvažniji dio kod lociranja visokoomskih i intermitirajućih grešaka na kabelima je mikrolokacija. Pritom se koristi udarni generator sa vremenski kraćim impulsima (mikrolokacijskim udarima). Ovisno o udarnoj energiji, ali i naravi kvara, na mjestu greške dolazi do proboja (pri čemu se čuje pucanj), koji izaziva zvučni val u tlu. Za vrijeme prolazanja impulsa kroz kabel mjeri se iznad kanala, pomoću jednog svitka, elektromagnetsko polje udarnog impulsa i registrira zvuk proboja koji se prima preko podnog mikrofona. Samo ako su obje mjerne veličine istovremeno registrirane (koincidencija) sigurno je da: se mjerenje vrši direktno na trasi, i da je došlo do proboja i ne radi se o stranom akustičnom signalu.

Metoda distance (*slika 12.13.*) daje informaciju o vremenskoj razlici između magnetskog polja udarnog impulsa i akustičnog signala proboja. Najmanja razlika vremena daje najmanju udaljenost od greške, dok su kod većih udaljenosti te međusobne razlike gotovo iste. To je važno kad se greška nalazi u asfaltu ili među cijevima.



Slika 12.13. Princip mikrolokacije metodom distance

12.4.2.2. Postupak napona koraka

Upotrebljava se za lokaciju zemljospoja. Može se provesti istosmjernim naponom, udarnim impulsom ili tonfrekventnim signalima. Pri tome se generator (istosmjerni, udarni ili tonfrekventni) priključuje između plašta, odnosno snopa vodiča, i zemlje. Spoj sa zemljom po mogućnosti se ostvaruje sondom.

Na površini zemlje mjeri se pad napona u zemlji kojeg izaziva struja između mjesta greške i sonde. Mjerenje se vrši galvanski (kod istosmjernog napona i udarnih impulsa) ili kapacitivno (kod tonfrekventnog signala). Direktno iznad mjesta greške postoji jaka koncentracija struja, a time i veliki pad napona u zemlji.

Galvanska mjerna metoda sa istosmjernim naponom najčešće se primjenjuje. Ona pruža uočljivu promjenu polariteta na mjestu greške. Smetnje je moguće skoro potpuno eliminirati niskofrekventnim filtrom. Kod udarne i tonfrekventne metode može kapacitivna sprega stranih struja (npr. na nekom drugom vodiču u zemlji) dovesti do pogrešnih mjernih rezultata. Radi toga se te metode koriste često paralelno samo radi potvrde rezultata provedene mikrolokacije. Udarne metode koristi se kod akustične mikrolokacije, a tonfrekventna metoda kod različitih tonfrekventnih metoda mikrolokacije.

Ispitivanje vanjskog plašta kabela

Poslije polaganja kabela preporuča se i ispitivanje vanjskog plašta koja ima za cilj provjeru izolacijskih svojstava plašta. Ispitivanje plašta se vrši se sa nazivnim naponom od 5 kV u trajanju od 5 min.

Pri ispitivanju moraju biti odspojena sva uzemljenja električne zaštite i armature kabela (ako postoji). Svrha ovog ispitivanja je provjera ispravnosti plašta, jer njegovo oštećenje može izazvati prodor vode u kabel te oksidaciju električne zaštite, samim tim i povećanje redukcionog faktora kabela, a isto tako i degradaciju poluvodljivog sloja koja može dovesti do pojave površinskih pražnjenja i erozije izolacije, što vodi proboju kabela.

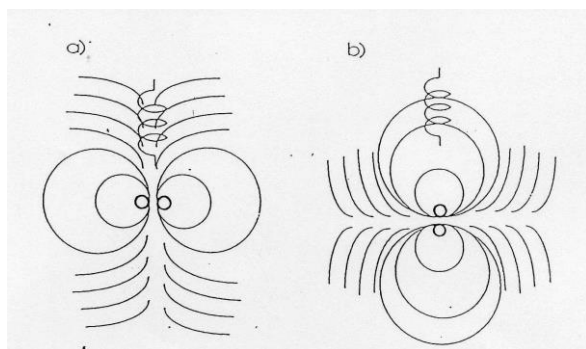
Jedan od pokazatelja ispravnosti plašta je i preskok koji se javlja kada se neposredno poslije odvajanja ispitnog uređaja, električne zaštite kratko spoje sa klemama za uzemljenje.

Ukoliko do ovog preskoka ne dođe, sigurno je da dolazi do pražnjenja preko kvara na spoljnom plaštu. Struja odvoda kroz plašt ne smije biti veća od 0,8 mA po km.

12.4.2.3. Tonfrekventna metoda preplitanja

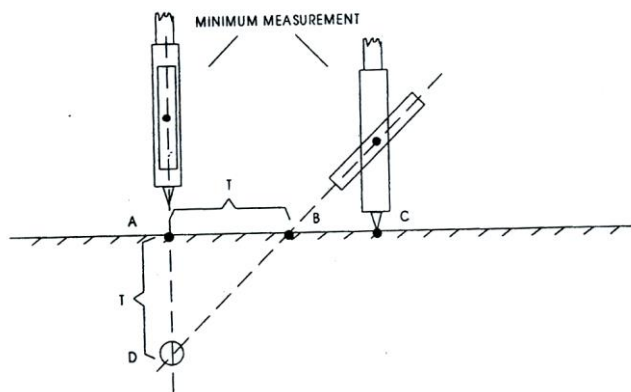
Ako se tonfrekventni generator priključi na dvije žice nekog kabela i te dvije na drugom kraju spoje, ili ako su niskoomskom greškom u kabeu premoštene, tada dolazi do stvaranja polja preplitanja. Pod tim pojmom se podrazumijeva rezultirajuće magnetsko polje izazvano strujom suprotnog smjera kroz dva prostorno paralelna vodiča. Ako vodiči leže u ravnini onda će u svitku koji je okomit na njih inducirati napon (slika 12.14.a).

Ako vodiči u odnosu na svitak stoje jedan iznad drugog ne može se inducirati nikakav napon (slika 12.14.b). Pošto se duž trase kabela to preplitanje stalno i pravilno izmjenjuje, kod mjerenja sa svitkom za traženje dobivat će se na mjernom instrumentu i u pravilnim razmacima minimum i maksimum otklona. Na samom mjestu greške dolazi do izraženog maksimuma. Kod direktnog kratkog spoja taj efekt nakon mjesta kratkog spoja nestaje. Otklon uslijed toga ravnomjerno se smanjuje. Ovom metodom može se odrediti i dubina kabela.



Slika 12.14. Mjerenje metodom preplitanja sa svitkom za traženje na dvožilnom kabeu

Kada određujemo dubinu kabela „mjernu zavojnicu“ postavljamo pod kut 45° , te mjernim postupkom (slika br.12.15.) precizno izmjerimo dubinu kabela. Prema slici 12.15. prvo metodom minimuma odredimo točku A (mjerna zavojnica pod kutom 90°), nakon čega mjernu zavojnicu postavljamo pod kut 45° i pomičemo je ulijevo ili udesno do točke minimuma dok ne dobijemo maksimalni otklon (točka B). Udaljenost između točaka A i B predstavlja traženu dubinu kabela.

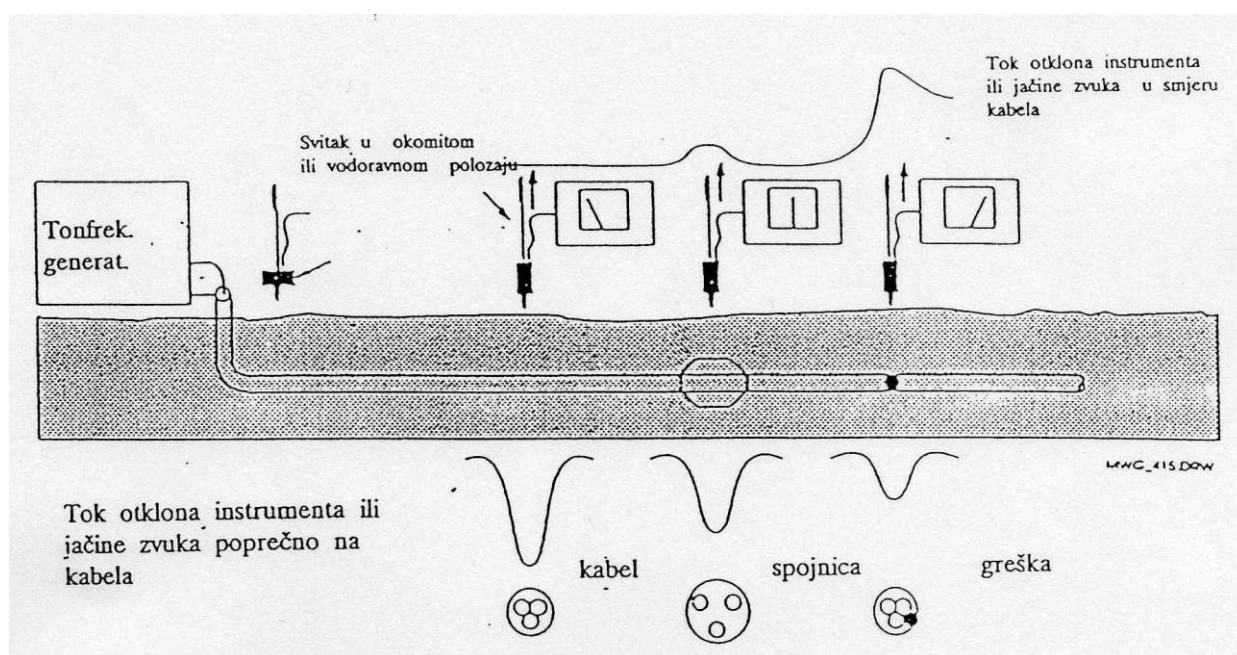


Slika 12.15. Mjerenje dubine kabela

12.4.2.4. Postupak poremećaja minimuma

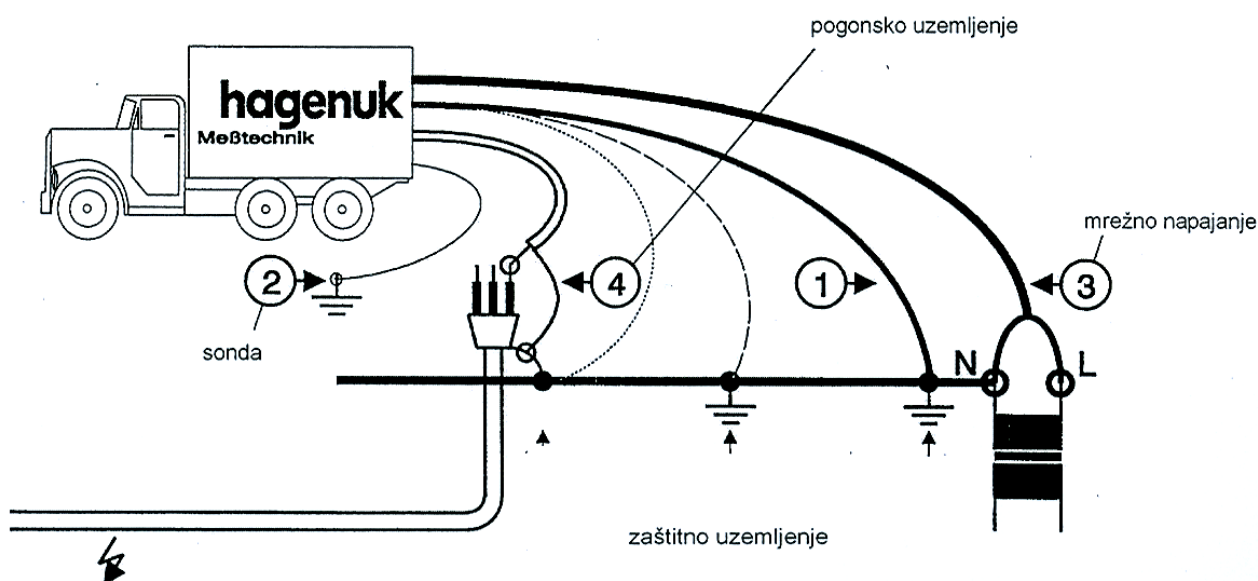
Kod određivanja mjesta greške na kabelima za koje je dobro poznata trasa, kao i karakteristike tla, daje se prednost metodi poremećaja minimuma (slika 12.16) za greške zemlja-plašt. Uzrok poremećaj polja mogu biti i druge metalne mase u zemlji (npr. cjevovodi, drugi kabeli i sl.). Mjerna metoda poremećaja minimuma predstavlja relativno niskoomsku grešku.

Kod greške žila-plašt dolazi do stvaranja polja razlike radi toga što je tonfrekventni generator priključen između žile i uzemljenog plašta kabla. Koraćanjem po trasi kabla mora svitak prijemnika biti u okomitom položaju iznad kabla da bi se upravo iznad kabla dobio minimum otklona. Laganim njihanjem svitka za traženje iznad trase kabla, moguće je točno odrediti položaj tog minimuma. Na mjestu greške doći će do poremećaja tog minimuma, uslijed struje žila-plašt na tom istom mjestu. Tada nije više moguće dobiti minimalan otklon koji je bio prije greške. To se naziva poremećaj minimuma. Tu promjenu minimuma treba pažljivo promatrati i ocijeniti. Poremećaj minimuma mogu izazvati strana tijela u tlu, ali i promjena smjera trase. Radi toga se zaključci o mjestu greške donose tek nakon uzimanja u obzir svih faktora i uvažavajući veličinu poremećaja minimuma.



Slika 12.16. Mikrolokacija prema postupku poremećaja minimuma

12.5. Kabelska mjerna kola



Slika 12.17. Mjernih kola Hagenuk R30 i način priključka na ispitivani kabel

Za određivanje mjesta kvara elektroenergetskih kabela potrebno je više uređaja. Zbog toga se koriste kabelska mjerna kola koja u sebi sadrže sve potrebne instrumente i omogućuju brz dolazak na svako mjerno mjesto.

Određivanjem mjesta kvara na elektroenergetskim kabelima bavi se HEP-ODS. Mjerna kola sa gornje (slike 12.17.) služi kao mobilna mjerna stanica. Za predlokaciju koriste metodu refleksije, a za mikrolokaciju metodu udarnog napona (generator impulsa i uređaj za akustični prijem). Osim toga moguća je primjena mjernih metoda sa induktivnom i kapacitivnom spregom signala.

Potrebni ispitni naponi predviđeni su u granicama od 1 do 80 kV, a udarni naponi do 35kV.

Pošto se na mjestu kvara mogu pojaviti dozemne struje i samim time naponski ljevak kabelska mjerna kola moraju se obavezno uzemljiti kao i izvršiti izjednačenje potencijala (vodom presjeka 16 mm² ili većim) ukoliko su mjerni objekt i pojna mreža priključeni na dva odvojena uzemljivačka sustava.

Kabelska mjerna kola *Hagenuk R30* sadrže:

- Kabele (za uzemljenje, izjednačenje potencijala, priključak na pojnu mrežu 230/400 V, te koaksijalne kabele za priključak na elektroenergetske kabele)
- Reflektometar
- Centralno računalo za pohranu podataka i izradu izvještaja.
- Propaljivač nazivnog napona 15 kV
- Udarni generator za propaljivanje pri ARM metodi
- VN ispitni uređaj sa generatorom za impulse do 80 kV (metoda istitravanja)
- VLF jedinica za ispitivanje na 0,1 Hz i nazivnom naponu do 52 kV (klasična metoda istitravanja izmjeničnim naponom)
- Tonfrekventni generator (tonfrekventna metoda preplitanja)
- Mjerne uređaje sa svitkom i slušalicama, te voltmetrom
- Mjerni most
- Tipkala za isključenje u slučaju nužde na vratima i u kolima.

12.6. Zaključno o ispitivanju energetskih kabela

Određivanje mjesta kvara elektroeneretskog kabela složen je mjerni postupak. Iako se radi sa instrumentima velike točnosti, zbog velike duljine kabela, mjerna nesigurnost može iznositi i ± 200 m. Stoga se određivanje mjesta kvara može podijeliti u dva dijela: predlokaciju (približno određivanje mjesta kvara) i mikrolokaciju (tačno određivanje mjesta kvara).

Kojom se mjernom metodom određuje mjesto kvara ovisi o nastaloj grešci.

Prilikom predlokacije koristi se reflektometar, sam (niskoomski kvar) ili u kombinaciji sa udarnim generatorom (visokoomski kvar). Prilikom mikrolokacije koristi se neka od tonfrekventnih metoda.

Pošto je za određivanje mjesta kvara, osim osnovnih mjernih instrumenata, potrebno imati i prateću opremu koriste se kabelska mjerna kola koja su opremljena sa svom potrebnom opremom. Ona omogućuju brz dolazak na svako mjesto kvara te brzo i učinkovito pronalaženje greške. [14]

LITERATURA

- [1] History and technological development – Elka d.o.o.
- [2] Tehnički uvjeti za izbor i polaganje elektroenergetskih kabela nazivnog napona 1 kV do 35 kV - Hep Distribucija d.o.o. – Vjesnik (Bilten br. 130) – 31. prosinac 2003. godine
- [3] Energetski kabele – Sveučilište u Splitu (FESB) – Nikša Kovač 2021. godina
- [4] Kriteriji za izbor i polaganje podmorskih elektroenergetskih kabela – Hep Distribucija i Prijenos – Vjesnik (Bilten br.100) – 12.lipanj 2002. godine
- [5] Elektromonterski priručnik – Tehnička knjiga Zagreb – Drago Keler, Miljenko Marinčević, Vjekoslav Srb – studeni 1987. godine
- [6] Kabelski pribor za energetske mreže – Tyco electronics (katalog 2008.-2009. godina)
- [7] Električne energetske mreže I – Sveučilište u Splitu (prof.dr.sc. Marija Ožegović, pred.Karlo Ožegović) – Split, 1996. godina
- [8] Electric Cables Handbook (Third Edition) – G.F.Moore Bsc,FInctP,FIEEE Formerly Director of Tehnology University of Liverpool (1997, 2006)
- [9] Submarine Power Cables – Design, Installalation, Repair, Environmental Aspects – Thomas.Worzyk (Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009)
- [10] Nadzemni vodovi i kabele – Sveučilište u Zagrebu (FER) prof.dr.sc.Zdravko Hebel (2009/2010)
- [11] Procjena stanja izolacije energetskih kabela na temelju analize parcijalnih izbijanja – Sveučilište u Splitu - Diplomski rad Čedo Šiškov 2011.godina
- [12] Energetski i signalni kabele za napone do 1 kV – Elka d.d. katalog 1994. godina
- [13] Energetski srednjenaponski kabele s XLPE izolacijom za napone do 36 kV – Elka d.d. katalog 1994. godina
- [14] Kabelska mjerna kola Hagenuk R30 - katalog

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Sastavni dijelovi jednožilnog srednjenaponskog energetskeg kabela.....	17
Slika 2.2. Sastavni dijelovi trožilnog armiranog srednjenaponskog energetskeg kabela.....	17
Slika 2.3. Konstrukcije faznih vodiča.....	18
Slika 2.4. Usporedna veličina upredenog, komprimiranog i kompaktnog vodiča.....	19
Slika 2.5. Prodor vlage u izolaciju od umreženog polietilena.....	22
Slika 2.6. Visokotlačni uljni ili plinski kabelski vod.....	23
Slika 2.7. Vremenski razvoj usvajanja tehnologije izrade energetskeg kabela.....	23
Slika 2.8. Visokonaponski kabel s olovnim plaštem.....	24
Slika 2.9. Visokonaponski kabel s korugiranim aluminijskim plaštem.....	25
Slika 2.10. Električna zaštita – koncentrični vodiči.....	25
Slika 2.11. Električna zaštita – bakrena traka.....	26
Slika 2.12. Proizvodna linija elektroenergetskih kabela.....	27
Slika 3.1. Vrste energetskeg kabela.....	29
Slika 3.2. Maseni kabeli (1) pojasni kabel, (2) H-kabel, (3) troolovni kabel.....	30
Slika 3.3. PVC/PE kabeli: (1) srednjenaponski jednožilni, (2) srednjenaponski trožilni.....	31
Slika 3.4. Ulni kabeli (1) jednožilni, (2) armirani niskotlačni trožilni, (3) visokotlačni cijevni trožilni.....	32
Slika 3.5. Plinski kabeli (1) jednožilni, (2) trožilni s plaštem, (3) cijevni trožilni.....	33
Slika 3.6. Jednožilni polietilenski kabel.....	33
Slika 4.1. Toplinska slika kabela položenog u zemlju i u zrak.....	35
Slika 4.2. Nadomjesna shema izolacije kabela.....	36
Slika 4.3. Vektorski dijagram nadomjesne sheme.....	37
Slika 4.4. . Skin efekt u vodiču.....	41
Slika 4.5. Efekt blizine.....	42
Slika 4.6. Shema nastanka kružne struje u plaštu kabela.....	45

Slika 4.7. Shematski prikaz nastanka vrtložne struje u plaštu kabla.....	46
Slika 4.8. Spajanje i uzemljenje na jednom kraju.....	47
Slika 4.9. Električno preplitanje.....	48
Slika 4.10. Shema rasporeda i spajanja plašteva jednožilnih kabla.....	49
Slika 4.11. Shema rasporeda s prepletom spajanja plašteva jednožilnih kabla.....	50
Slika 4.12. Shema rasporeda spajanja plašteva jednožilnih kabla.....	51
Slika 5.1. Kondukcija topline ili termalna kondukcija.....	53
Slika 6.1. Izolacijski sloj u obliku šupljeg cilindra.....	54
Slika 6.2. Trožilni kabel s električnom zaštitom oko svake žile i ispunom od PVC-a.....	58
Slika 6.3. Pojasni kabel.....	59
Slika 6.4. Geometrijski faktor za pojasne kabele ili za kabele kod kojih je električna zaštita izvedena od razmaknutih žica.....	59
Slika 6.5. Faktor zaslanjanja za trožilni kabel s papirnom izolacijom koji ima električnu zaštitu u obliku metalnih traka oko izolacije svakog faznog vodiča.....	60
Slika 6.6. Zemljani cilindar koji obuhvaća energetski kabel.....	61
Slika 6.7. Metoda odslikavanja.....	62
Slika 6.8. Grupa od q razmaknutih kabla sa svojim slikama.....	63
Slika 6.9. Kabelski vod u razmaknutom ravnom rasporedu.....	64
Slika 6.10. Kabelski vod u dodirnom trolisnom rasporedu.....	65
Slika 6.11. Kabelski vod u cijevima položenim u zemlju.....	66
Slika 6.12. Primjer lančane mreže toplinskih otpora i kapaciteta armiranog kabla za prijelazne pojave kratkog trajanja.....	67
Slika 7.1. Lančana mreža jednožilnog (a) i trožilnog (b) kabla pri stacionarnim uvjetima...	69
Slika 7.2. Uzemljivač TS 110/20(10) kV.....	90
Slika 7.3. Raspodjela struja jednopolnog kratkog spoja.....	92
Slika 7.4. Povratna struja obuhvaća se preko redukcionog faktora.....	92
Slika 8.1. Levitacija (savršena dijamagnetičnost supravodiča).....	97
Slika 8.2. Levitirajući vlak u Japanu.....	97

Slika 8.3. HTS kabeli u pogonu.....	99
Slika 8.4. Izgled HTS Supravodiča.....	100
Slika 9.1. Iskop kabelskog rova (u popločanoj ulici).....	102
Slika 9.2. Motorni čekić za razbijanje asfalta i betona.....	102
Slika 9.3. Odmatanje kabela sa bubnja.....	103
Slika 9.4. Polaganje kabela pomoću valjaka.....	104
Slika 9.5. Polaganje kabela sa vozila.....	104
Slika 9.6. Povlačenje kabela pomoću motornog vitla i pomoćnog užeta.....	105
Slika 9.7. Elementi za međusobno spajanje kabela i pomoćnog užeta.....	105
Slika 9.8. Položeni kabeli s izrađenim kabelskim spojnica.....	107
Slika 9.9. Motorni nabijač zemlje.....	108
Slika 9.10. Presjek kabelskog rova za polaganje kabela napona U ₀ /U (0,6/1 kV).....	108
Slika 9.11. Presjek kabelskog rova za polaganje tri jednožilna kabela u jedan kabelski vod, nazivnog napona U ₀ /U (12/20 kV ili 20/35 kV).....	109
Slika 9.12. Presjek kabelskog rova za polaganje kabela, nazivnog napona U ₀ /U (0,6/1 kV) i U ₀ /U (12/20 kV) u zajednički rov.....	109
Slika 9.13. Presjek kabelskog rova na križanju s prometnim putevima.....	110
Slika 9.14. Presjek kabelskog rova za polaganje kabela nazivnog napona U ₀ /U (20/35 kV) i signalnog kabela u zajednički rov.....	111
Slika 9.15. Hidraulički uređaj za bušenje tla.....	111
Slika 9.16. Načelni smještaj vodova i postrojenja u javnim površinama.....	112
Slika 9.17. . Načelna raspodjela hodnika u zone.....	113
Slika 9.18. Cijevni blok prije betoniranja.....	115
Slika 9.19. Mehanička zaštita kabela sa gotovim betonskim profilom.....	115
Slika 9.20. Zdenac kabelske kanalizacije.....	116
Slika 9.21. Paralelno vođenje i približavanje energetskih kabela i vodovoda.....	117
Slika 9.22. Križanje energetskih kabela i vodovoda.....	118
Slika 9.23. Paralelno vođenje i približavanje energetskih kabela i kanalizacije.....	118

Slika 9.24. Križanje energetskih i telekomunikacionih kabela.....	119
Slika 9.25. Položaj kabela u odnosu na druge objekte.....	120
Slika 11.1. Različiti kvarovi na izolaciji kabela u distributivnoj mreži.....	149
Slika 11.2. Primjer kabelskog sustava sastavljenog od različitih tipova kabela.....	149
Slika 11.3. Mjesta parcijalnih izbijanja i naponi pri kojima se javljaju.....	150
Slika 11.4. OWTS uređaj za ispitivanje parcijalnih izbijanja u izolaciji kabela.....	151
Slika 11.5. Pregled pogonskih naprezanja i uzrokovanih kvarova.....	152
Slika 11.6. Pregled vanjskih naprezanja i uzrokovanih kvarova.....	153
Slika 11.7. Prikaz situacije kada se smanji razina ulja u spoju kabela.....	155
Slika 11.8. Ovisnost probojne čvrstoće izolacijskog ulja o postotku vlage.....	156
Slika 11.9. Šupljine u izolaciji od smole u procesu stvrdnjavanja smole.....	158
Slika 11.10. Nesimetrično raspoređeni vodiči u izolaciji od smole.....	159
Slika 11.11. Oštećenja na papirnatoy izolaciji uzrokovana isušivanjem zbog povišenih temperatura.....	159
Slika 11.12. Mjesto na kojem mogu ostati mali dijelovi poluvodljivog sloja.....	160
Slika 11.13. Prikaz loše povezanih kabela, gdje je uklonjeno previše poluvodljivog sloja, pa dolazi do povećanja električnog polja na tom mjestu.....	161
Slika 11.14. Prikaz vodenog stabla i električnog stabla koje je nastalo na njegovom vrhu i izazvalo proboj u izolaciji.....	162
Slika 11.15. Shematski prikaz propadanja površine izolacije od polimernih materijala.....	163
Slika 11.16. Pojavljivanje pukotina na površini polimernog izolatora.....	164
Slika 11.17. Prikaz propadanja papirnate izolacije.....	165
Slika 11.18. Ovisnost količine plinova nastalih nakon parcijalnog izbijanja i oslobođene energije.....	166
Slika 11.19. Presjek kabela s velikom pukotinom na sredini.....	167
Slika 11.20. Uzorak parcijalnih izbijanja.....	171

Slika 11.21. Primjer dijagrama koji sadrže podatke o parcijalnim izbijanjima.....	172
Slika 11.22. SN KB na kojem je izvršeno ispitivanje stanja izolacije OWTS uređajem.....	172
Slika 11.23. Kalibracija kabela.....	173
Slika 11.24. Prikaz parcijalnih izbijanja u pC u ovisnosti o duljini kabela.....	174
Slika 12.1. Wheatstonova metoda mjerenja.....	178
Slika 12.2. Mosna metoda mjerenja.....	178
Slika 12.3. Refleksija voda zatvorenog impedancijom	179
Slika 12.4. Faktor refleksije (idealizirano).....	180
Slika 12.5. Opadanje impulsa po vodu.....	181
Slika 12.6. Princip mjerenja pomoću impulsnog reflektometra.....	182
Slika 12.7. Odstupanje u reflektogramima (kvar na kabelu) u Softwareu Windigi.....	184
Slika 12.8. Način rada udarnih generatora.....	187
Slika 12.9. Princip formiranja magnetskog polja uslijed razlike struja.....	188
Slika 12.10. Trasiranje kabela pomoću tonfrekventnog generatora.....	189
Slika 12.11. Mjerni principi kod lociranja kabela.....	189
Slika 12.12. Identifikacija kabela.....	191
Slika 12.13. Princip mikrolokacije metodom distance.....	192
Slika 12.14. Mjerenje metodom preplitanja.....	194
Slika 12.15. Mjerenje dubine kabela.....	194
Slika 12.16. Mikrolokacija prema postupku poremećaja minimuma.....	195
Slika 12.17. Mjernih kola Hagenuk R30 i način priključka na ispitivani kabel.....	196

POPIS TABLICA

Tablica 1.1. Vrijednosti nazivnih napona kabela	9
Tablica 1.2. Označavanje žila višezilnih kabela $U_0/U (U_m) = 0,6/1 (1,2) \text{ kV}$	10
Tablica 1.3. Način označavanja energetskih kabela	13
Tablica 1.4. Električni otpor vodiča	14
Tablica 1.5. Pogonski induktivitet	14
Tablica 1.6. Pogonski kapacitet.....	15
Tablica 1.7. Naprezanja kabela (normalan rad/rad tijekom kvara).....	16
Tablica 4.1. Relativna dielektrična konstanta i kut gubitaka za različite materijale.....	38
Tablica 4.2. Fazni naponi kod i iznad kojih se uzimaju u obzir dielektrični gubici	39
Tablica 4.3. Maksimalni dozvoljeni otpor pri istosmjernoj struji i 20°C	40
Tablica 4.4. Eksperimentalne vrijednosti za koeficijente k_s i k_p	43
Tablica 4.5. Električne otpornosti i temperaturni koeficijenti	44
Tablica 6.1. Toplinske otpornosti materijala u domeni energetskih kabela.....	56
Tablica 7.1. Maksimalne dopuštene temperature vodiča	70
Tablica 7.2. Strujno opterećenje energetskog kabela s XLPE izolacijom napona 12/20 kV..	71
Tablica 7.3 Korekcioni faktor za različite temperature okoline	72
Tablica 7.4. Korekcioni faktor za različite dubine polaganja.....	72
Tablica 7.5. Korekcioni faktori za različite toplinske otpornosti tla.....	72
Tablica 7.6. Korekcioni faktor za različiti broj kabela ili sistema u istom prokopu.....	72
Tablica 7.7. Korekcioni faktori za trožilne kabele u zraku	73
Tablica 7.8. Korekcioni faktori za jednožilne kabele u zraku.....	74
Tablica 7.9. Dopusštena struja kratkog spoja za vodiče kabela	75
Tablica 7.10. Dopusštena struja kratkog spoja za električnu zaštitu kabela	75
Tablica 9.1. Dopusštene sile potezanja.....	106

Tablica 9.2. <i>Dopušteni polumjeri savijanja kabela kod polaganja</i>	106
Tablica 9.3. <i>Najmanje dopuštene međusobne udaljenosti kabela</i>	110
Tablica 11.1. <i>Različite metode napajanja parcijalnih izbijanja</i>	169
Tablica 11.2 <i>Prednosti i nedostaci On-Line i Off-Line metoda</i>	176
Tablica 12.1. <i>Polovina brzine rasprostiranja za elektroenergetske kabele u Hrvatskoj</i>	183