

PRIJENOS I DISTRIBUCIJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

**3. KABELSKI ELEKTROENERGETSKI
VODOVI**

dr.sc. Vitomir Komen, dipl.ing.el.

3. KABELSKI ELEKTRONIKA
VOLDV)

- 3.1 KONSTRUKCIJA EE KABELA
- 3.2 ZAGRAJIVANJE I HLAĐENJE KABELA
- 3.3 KONSTRUKCIJSKE TEKNURE KABELA
- 3.4 PODNOŠAJ PRIMENJE EE KABELA
- 3.5 Izbor i dimenzioniranje ee kabela
- 3.6 Poljopravne i muntars ee kabela

3. KABELSKI ELEKTROENERGETSKI VODOVI

ELEKTROENERGETSKI KABEL - JE VODIČ ŠIJI ŠIJI
 VODIČI IZ DOBRO VODIĆNOG MATERIJALA (BAKAR, ALUMINIJ) ELEKTRIČKI ISOLIRANI I SNIJEŠTENI U ZAJEDNIČKI VANJSKI OMOTAČ ZA ZAŠTITU KABELA OD VANJSKIH UTJECAJA (VLAGA, MEH. OŠTEĆENJA, KOROZIJA I SL.) VAZIVNOG NAPONA $U_0/U \geq 0,6/1$ KV, A NAMJENJEN ZA TRAJNO POLAGANJE U:

- IZRAVNO U ZEMU
- KABELSKE KONDE
- VODU

3.1 KONSTRUKCIJA EL. EN. KABELA | DEFINICIJE POJMOMA

KONSTRUKCIJA KABELA OVASI O:

- NAZIVNOM NAPONU KABELA
- UMETNA SREDINE U KOJU JE POLOŽEN

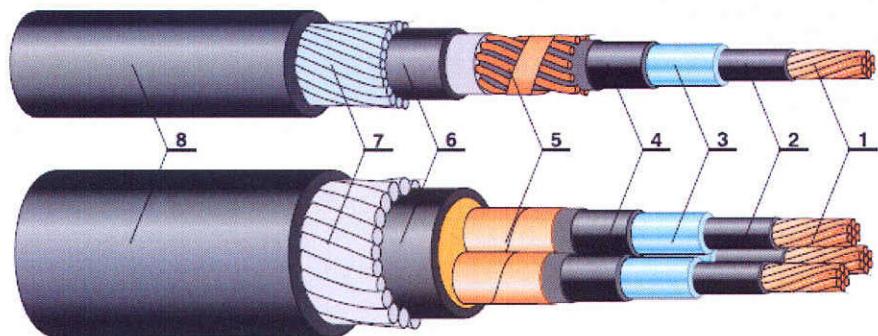
ŽILA - VODIČ SA SVOJOM IZLACIJOM UČUČUJUĆI I POLUVODIĆNE SLOJEVE AKO POSTOJE

- a) JEDNOŽILNI KABELI - KABELI SA JEDNOM ŽILOM
 - SREDNUJ, VISOKI I NOJVISI NAPONI
- b) VIŠEŽILNI KABELI - KABELI SA 2 DO 5 ŽILA
 - TRŠEŽILNI KABELI - SREDNUJ I VISOKI NAPONI
 - ČETVEROŽILNI KABELI - NISKI NAPON
- c) MNOGOŽILNI KABELI - KABELI SA NAJMANJE 6 ŽILA ISTOG PRESJEKA

VODIČ - AKTIVNI ELEMENT KABELA (OD JEDNE I LI VIŠE METALNIH ŽICA) ŠIJA JE FUNKCIJA DA VEDI EL. STRUJU

VRSTE VODIČA:

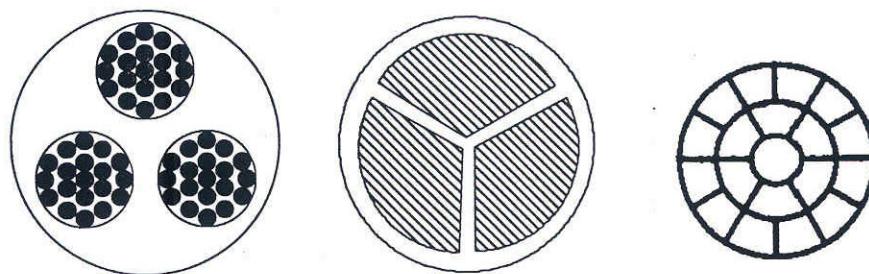
- a) JEDNOŽIČNI VODIČ
- b) VIŠEŽIČNI VODIČ
- c) FINOŽIČNI VODIČ
- d) HELIKOIDNO POUŽENI VODIČ
- e) OBLIKOVANI VODIČ - POPREČNI PRESJEK SE RAZLIKUJE OD KRUGA
- f) SEKATORSKI VODIČ - OBLIKOVANI VODIČ ŠIJI JE POPREČNI PRESJEK Približen sektoru kruga
- g) KOMPATIRANI VODIČ - POUŽENI VODIČ KAD KOLEG SU MEDUSOBNI PROSTORI između pojedinih žica smanjeni poprečni mehaničkih prešanja ili izvlačenja ili prikladnim izborom profila žica i njihovim rasporedom



- 1. vodič
- 2. ekran vodiča
- 3. izolacija
- 4. ekran izolacije

- 5. električna zaštita/ekran
- 6. unutarnji plašt
- 7. armatura
- 8. vanjski plašt

okrogli vodnik	sektorski vodnik	zg. sekt. vodnik	okrogli vodnik	sektorski vodnik	votli vodnik
polni vodnik			vrv		



MATERIALI ZA VODIČE:

- ALUMINIJ VIŠOKE ŽRSTODE
- ELEKTROLITSKI BAKAR

OSNOVNI PODACI I PARAMETRI VODIČA

- NAZIVNI PRESJEK VODIČA - STANDARDNI NIZ
10 - 16 - 25 - 35 - 50 - 70 - 95 - 120 - 150 - 185 - 240 -
- 300 - 400 - 500 - 630 - 800 - 1000 mm^2
- ELEKTRIČNI OTPOR VODIČA KOD $V_{max} = 20^\circ\text{C}$ [Ω/km]
- MAX. VRJEDNOST
- DIMENZIJE VODIČA
- PRIMJER VODIČA - MAX. I MIN. VRJEDNOST
- PRECUDNA ŽRSTOĆA VODIČA [N/mm^2]
DOZVOljENA MEHANIČKA OPTEREĆENJA

IZOLACIJA

- IZOLACIJA POSTAVljENA IZRAVNO NA VODIČ ILI NA ELEKTRIČNU ZAŠTITU VODIČA (POLIVODLJIVI SLOJ OKO VODIČA).

VESTE IZOLACIJA:

- NAMOTANA IZOLACIJA - IZOLACIJA NAMOTANA TEKOMA SPIRALNO OKO VODIČA
- EKSTRUDIRANA IZOLACIJA - IZOLACIJA, KOJA SE UGLAVNOM SASTOI OD JEDNOG SLOJA TERMOPLASTIČNOG ILI TERMOELASTIČNOG MATERIJALA NANIJETOG POSTUPKOM EKSTRUZIJE
- IZOLACIJA OD UMJEĆNE MASE - IZOLACIJA IZ TERMOPLASTIČNOG ILI TERMOELASTIČNOG UMJEĆNEG MATERIJALA
- TERMOPLASTIČNA IZOLACIJA - IZOLACIJA IZ TERMOPLASTIČNIH MATERIJALA ILI KOPOLIMERA
- PVC IZOLACIJA - IZOLACIJA IZ MJEŠAVINE NA BAZI POLIVINILKLORIDA (PVC) ILI KOPOLIMERA
- UMREŽENA IZOLACIJA - IZOLACIJA IZ TERMOPLASTIČNIH MATERIJALA ILI KOPOLIMERA KOJA NAKON OBLIKOVANJA KEMIJSKIM ILI FIZIKALnim POSTUPCIMA POSTAJE UMREŽENA I TIME TERMOELASTIČNA
- VPE IZOLACIJA - UMREŽENA IZOLACIJA IZ POLIETILENA ILI KOPOLIMERA ILI MJEŠAVINE NA BAZI POLIETILENA
- IZOLACIJA OD IMPREGNIRANOG PAPIRA (MI) - IMPREGNIRANA PAPIRNA IZOLACIJA, KOD KOJE SU PAPIRNE TRAKE (DEBLINE 0,1 mm, ŠIRINE 15-25 mm) NAKON NJIHOVOG NAMOTANJA, IMPREGNIRANE NORMALNIM (TEKUDIM) KOMPONENTOM (UHEM).
- NAROŽITO IMPREGNIRANA IZOLACIJA OD PAPIRA (MIN) - PAPIRNA IZOLACIJA IMPREGNIRANA U POLIŽVRSTOJ MASI, KOJA NIJE TEKUĆA KOD MOKSIMALNO DOZVOljENE RADNE TEMPERATURE.

VRSTE IZOLACIJA KABELA

- 1. PAPIR**
 - VIŠESLOJNI PAPIRNI NAMOT IMPREGNIRAN ULEM
 - PAPIRNA TRAKA DEBYINE 0,4 - 0,2 mm, ŠIRINE 15 - 25 mm
 - SUHA PAPIRNA TRAKA NAMATA SE POSEBnim strojem u potrebnom broju slojeva oko vodica, a zatim se u vakuumu ($100 - 120^{\circ}\text{C}$) oslobada, zadržavajući ostatak ulage i impregnira uljem. Odmait po impregnaciji kabel dobiva metalni plasti, da se sprječi prodir u vlage.
 - PRIMJENA: do najviših napona.

- 2. UMJETNI MATERIJALI**
 - Nisu higroskopni, te nisu potrebna zaštita od vlage. otporni su na kemijske dejstvije. Imaju manju težinu i fleksibilni su.
 - MATERIJALI:
 - SINTETIČKI MATERIJALI | EKSTRUĐIRANI KABELI
 - POLIMERI

ELASTOMERI: ETILEN - PROPYLEN, BUTIL
PLASTOMERI:
 - POLIVINIL-KLORID PVC (HRN: P)
 - POLIETILEN PE (HRN: E)
 - UMREŽENI PE XLPE
 - NEUMREŽENI PE

U UPORABI:
 - KETIJSKI UMREŽENI POLIETILEN XLPE
 - ETILENSKOPROPYLENSKI KAMUK EPR

 - PRIMJENA:
 - PVC - niski i srednji napon
 - PE - do najviših napona (500 kV)

3. ULE ili PLIN (N_2, SF_6) POD TLAKOM kod cijevnih kabela

- KABELI:
 - FLEKSIBILNO SAVITLJIVI
 - PAPIR
 - UMJETNI MATERIJAL
 - CUBYNI KABELI
 - ULE
 - PLIN POD TLAKOM (N_2, SF_6)

IZOLACIJA KABELA:

- 1. TERMički nestabilna** - do 60 kV
 - PAPIR IMPREGNIRAN KABELSKOM MASOM
 - GUMA, PVC
- 2. Termički stabilna** - do najviših napona
 - PAPIR IMPREGNIRAN ULEM POD STALnim tlakom
 - PAPIR U PLINU POD TRAJnim tlakom
 - POLIETILEN
 - PLIN POD TLAKOM jedina izolacija

VRSTE KABELA S OBZIROM NA IZOLACIJU:

- a) "KLASIČNI" KABELI - izolacija je višeslojni
- PAPIRNI NAPLOT
- b) KABELI S IZOLACIJOM NA BAZI UNUTRNJIH MASA:
 - ELASTOMERI - koji nakon određenog
termičkog postupka ostaju konstantno
elastični: - ETILEN - PROPYLEN
- BUTIL
 - PLASTOMERI - koji su plastični kod nekih
temperatura: - POLIETILEN MREŽASTI (PET)
- POLIVINILKLORID (PVC)

PROBOJNA VREDNOSTA IZOLACIJE - osnovno svojstvo

	$E [kV/mm]$ ZA IZNIJENIĆI NAPON	$E [kV/mm]$ ZA UDARNI NAPON
PAPIR IMPREGNIRAN MUM	45	100 - 120
PET	30	100
PVC	8	-

VODIČI VI ZASLON

POLUVODSIVI SLOJ

- sloj od poluvodivog materijala (na bazi grafita) ili metala (aluminijска folija), a služi za kontrolu električnog polja u izolaciji i za uklanjanje praznina na granicama izolacije.
- unutarnji poluvodivi sloj - postavljen preko vodiča.
- vanjski poluvodivi sloj - postavljen preko izolacije.

POPUNA

- materijal za popunu župina medu žilama višezlinskih kabela:
- kabeli s papirnom izolacijom: - UPREDENI PAPIR
- JUTA
- kabeli > PET ili PVC izolacijom: - PVC masa
- NEVLUKANIZIRANA GUMA.



ZAŠTITNI DIO KABELA

1. ELEKTRIČNA ZAŠTITA (EKRAN, ZASLON)

METALNI SLOJ iz bakrenih žica ili bakrenih trava, a u posebnim slučajevima i iz upletenih bakrenih žica.

2. METALNI PLAŠT - zaštita od propora vode ili vode
 - KABELI S PAPIRNOJ ISOLACIJOM -
 - olovo, aluminijski, bakar
 - KABELI S PET, PVC ISOLACIJOM -
 - TERMOPLASTIČNE MASE, olovo
3. BANDAŽA - kompenzacija unutarnjih pritiska
 - izvodi se u obliku metalne trake omotane iznad plašta
 - materijal: čelik, bakrene legure
4. ARMATURA - zaštita od mehaničkih naprezanja i oštete
 - izvodi se iz čeličnih podinčanih žica okruglog ili pravokutnog presjeka i spirala ovija oko kabela iznad bandaže
5. MEKANI SLOJEVI - između plašta, bandaže, armature
 - materijal: - juta
 - plastične mase
6. ANTI KOROZIONA ZAŠTITA - vanjski plašt
 - materijali: - juta nasložena katom, asfaltom ili bitumenom
 - ekstrudirani plašt iz termoplastičnih materijala (PET, PVC).

KONSTRUKCIJE KABELA:

1. Pojasni kabel - višežilni kabel (sa izolacijom od impregniranog papira) kod kojeg je jedan dio izolacije natopan na svaku vodiču pojedinačno, a preostali dio izolacije natopan je preko poluženih žila
2. kabel sa posebnom električnom zaštitom žila (kabel sa radijalnim poljem) - jednožilni, ili višežilni kabel kod kojeg svaka žila ima posebnu vanjsku el. zaštitu
3. kabel sa zajedničkom el. zaštitom - višežilni kabel kod kojeg je el. zaštita postavljena preko žila koncentrično u odnosu na os kabela
4. kabel sa troolovnim plastirom - trožilni kabel sa olovnim plastirom oko svake žile
5. kabel sa izolacijom od umjetne mase - kabel sa ekstrudiranim izolacijom od umjetne mase npr. PVC, VPE i dr.

3.2 ZAGRIJAVANJE I HLAĐENJE KABELA

GUBICI U KABELU

Električna izolacija kabela predstavlja ujedno otpor odvođenju topline nastale uslijed gubitaka. S tim otporom spojen je u seriju i toplinski otpor okoline kabela, koji na sebe preuzima i dalje odvodi nastalu toplinu sve do dovoljno udaljene hladne sredine, odnosno sredine koja ima prirodnu temperaturu okoline.

Gubici u kabelu mogu se po uzroku nastanka podijeliti na dvije osnovne grupe:

1. GUBICI USLJED NAPONA
2. GUBICI USLJED STRUJE

a. Gubici uslijed napona (P_{diel})

Ovi gubici imaju više komponenata, ali se ukratko mogu nazvati gubicima u dielektriku, u kojemu i nastaju. Pri opterećenosti izmjeničnim poljem definirani su formulom:

$$P_{\text{diel}} = V_f^2 \omega C \operatorname{tg}\delta \quad [\text{W po fazi}]$$

gdje je:

P_{diel} = dielektrični gubici po fazi (žili)

V_f = fazni napon

ω = kružna frekvencija, $2\pi f$

C = kapacitet žile kabela prema zemlji

$\operatorname{tg}\delta$ = faktor gubitaka

Treba uzeti u obzir da faktor gubitaka raste s temperaturom kod praktički svih tehničkih dielektrika (osim plinova), pa će gubici P_{diel} pri višim temperaturama kabela biti veći, što je nepovoljno. Nadalje se dade zaključiti:

- Gubici u dielektriku rastu s kvadratom napona; uslijed toga su oni kod niskog, pa i srednjih napona, praktički beznačajni u odnosu na gubitke uslijed struja, a s dalnjim porastom napona postaju sve značajniji. To se može vidjeti iz slijedeće tablice (vrijednosti su orijentacijske):

U_n	P_{diel}
110 kV	0,04 P_{cu}
220 kV	0,13 P_{cu}
380 kV	0,40 P_{cu}

gdje je:

U_n = nazivni linijski napon

P_{cu} = gubici uslijed struje kod nazivnog opterećenja

- Gubici u dielektriku su proporcionalni kapacitetu kabela, pa će u dielektriku s manjom relativnom dielektričnošću ϵ_r gubici biti manji,
- Faktor gubitaka treba biti što manje ovisan o temperaturi.

Slijedeća tablica daje za tipične kabelske dielektrike osnovne podatke značajne za gubitke:

Izolacija	ϵ_r	$\operatorname{tg}\delta$
butil guma	2,1 2,3	0,004
silikonska guma	2,8 3,5	0,0013 0,002
PVC	3 6	0,02 0,08
PE i XLPE	2,2 2,4	0,0001 0,0005
suhı papir	2 2,5	0,002 0,004
izolacijsko ulje	2,2 2,8	0,001 0,002
papir impregniran uljem	3,3 3,8	0,001 0,005
plinoviti dielektrici	1,0	0,0000

S ekonomskog stanovišta gubici u dielektriku kabela su beznačajni, osim u dugim kabelskim vezama za visoke i najviše napone.

Kod kabela za istosmjerni napon gubici u dielektriku su neznatni u usporedbi s gubicima kod izmjeničnih kabela, i ovise samo o specifičnoj vodljivosti dielektrika.

b. Gubici uslijed struje P_{cu}

Prolaz izmjenične struje kroz kabel izaziva više tipova gubitaka:

- gubici u bakru, povećani uslijed skin-učinka, učinka blizine i vrtložnih struja, a nastaju u vodiču;
- gubici u metalnim omotačima kabela (plašt, bandaža, armatura), koji u širokim granicama ovise o konstrukciji kabela, a nastaju u tim omotačima uslijed induciranih i vrtložnih struja. Znatno su manji kod trofaznih trožilnih nego kod jednožilnih kabela, a i kod jednožilnih ovise još i o međusobnom prostornom odnosu pojedinih žila, a pogotovo o materijalu metalnog omotača.

Gubici uslijed prolaza struje u jednoj žili mogu se prikazati formulom

$$P_{cu} = I^2 (R_0 + \Delta R)$$

gdje je:

R_0 = omski otpor vodiča mjerен istosmjernom strujom

ΔR = prividni prirast otpora. R_0 uslijed svih ostalih komponenata gubitaka P_{cu} (ovisan i o struci, ako u omotačima ima feromagnetskih materijala).

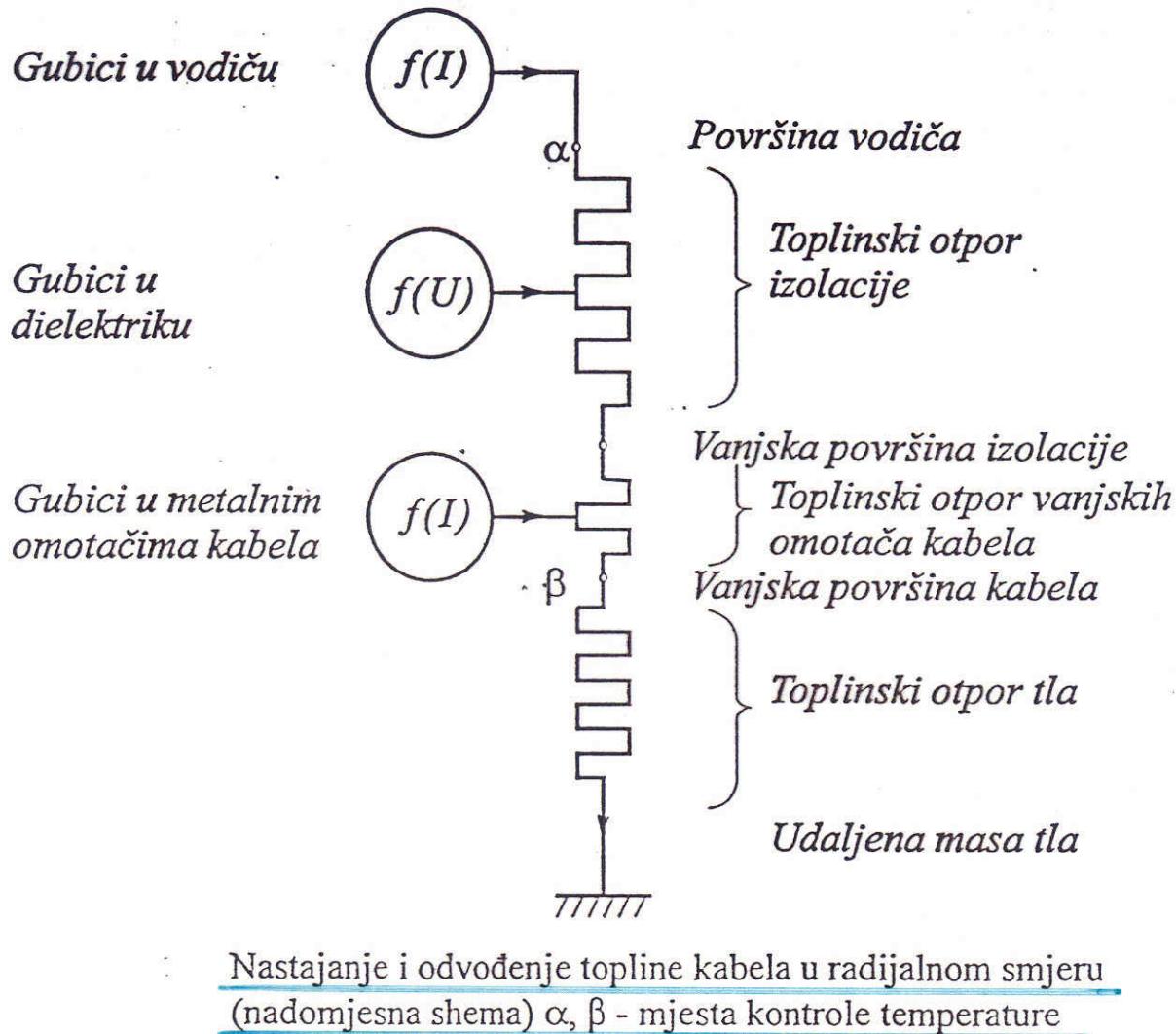
ΔR se kod kabela s barem jednim metanim omotačem može kretati u granicama:

$$\Delta R = 0,08 R_0 \dots 0,80 R_0$$

Smanjenje prirasta ΔR može se postići odgovarajućom konstrukcijom kabela, izborom materijala vanjskih omotača, međusobnim prostornim odnosom jednožilnih kabela u trokutu uz cijenu lošijeg hlađenja, samo jednostranim uzemljenjem omotača kabela (često nedopustivo iz sigurnosnih razloga), primjenom trožilnih umjesto jednožilnih kabela i konačno električnim preplitanjem metalnih omotača jednožilnih kabela (Sl. 5.15).

Prijenosna moć i strjuna opteretivost kabela ograničeni su najvišom dopuštenom temperaturom, koju izazivaju gubici. Pri tome su kritične dvije točke kabela: površina vodiča, čija je temperatura uvjetovana najvišom dopuštenom temperaturom izolacije (pojava dilatacije, opasnost od toplinskog probroja), te vanjska površina kabela koja predstavlja mjesto predaje nastale topline okolini. Maksimalna trajna temperatura papirne izolacije uljnog kabela može biti oko 80°C , PE oko 65°C , a papirne izolacije masenog kabela i PVC oko 55°C . Maksimalne temperature vodiča koje se dozvoljavaju kratkotrajno kreću se prema vrsti izolacije uglavnom između 100 i 150°C , a mogu nastupiti uslijed kratkog spoja.

Kod kabela neposredno ukopanih u zemlju s prirodnim hlađenjem (tako se polaže velika većina kabela) površina ne smije biti toplija od 40°C . Smatra se naime, da već temperatura od 40°C kroz duže vrijeme dovodi do potpunog isušenja tla, i time do povećanja njegovog termičkog otpora, odnosno do pogoršanja uvjeta prirodnog hlađenja kabela.



Na Sl. u vidu ekvivalentne sheme prikazani su generatori topline na odgovarajućem mjestu kabela, te radijalno odvođenje topline prema udaljenoj okolini kroz serijski spojene toplinske otpore pojedinih slojeva. Vidi se da u procesu hlađenja kabela toplinski otpor tla igra bitnu ulogu, jer utječe na prijenosnu moć kabela. Kritično mjesto je neposredna okolina kabela, gdje je toplinski tok najgušći i temperaturni gradijent najstrmiji. Dobra svojstva odvođenja topline (mali toplinski otpor) od prirodnih, jeftinih i prikladnih materijala ima pjesak, pogotovo ako se (po potrebi) suho pomiješa s oko 10% cementa. Prirodno hlađenje slobodno položenih kabela (u cijevima koje nisu ujedno vanjski omotač kabela, u kanalima, u tunelima i tome slično) je lošije od hlađenja kabela neposredno položenih u tlo i ovisi kako o temperaturi okoline, tako i o mogućnostima prirodne cirkulacije zraka. U tom slučaju se dio topline prenosi i toplinskim zračenjem. Vrlo dobre uvjete prirodnog hlađenja imaju

podvodni kabeli, bez obzira jesu li položeni na dno ili ukopani u dno vodotoka, jezera ili mora. Pošto su krajevi podvodnih kabela položeni na kopnu, te dionice moraju biti dimenzionirane za (lošije) kopnene uvjete hlađenja (veći presjek vodiča ili Cu umjesto Al vodiča).

Katkada su kabelske instalacije ekonomičnije ako se primijeni prisilno hlađenje. Prisilno hlađenje može biti unaprijed predviđeno projektom, a može se primijeniti i naknadno, da se poveća prijenosna moć već postojećih kabela. U načelu se prisilno hlađenje može izvesti:

- prisilnom cirkulacijom svježeg zraka kod kabela položenih u cijev, kanale i tunele;
- prisilnom cirkulacijom ulja kod uljnih kabela (potreban dovoljan presjek uljnih kanala);
- polaganjem kabela u cijevi ili kanale, kojima cirkulira voda;
- polaganje cijevi s tekućom vodom neposredno u tlo tik uz kabel.

Instalacije s prisilnim hlađenjem zahtijevaju postavljanje odgovarajućih uređaja (pumpe, ventilatori) a u zatvorenom rashladnom ciklusu i odgovarajuća hladila rashladnog sredstva. Rashladne uređaje treba trajno nadzirati i njihov prestanak rada mora automatski izazvati isključenje kabela. Time se umanjuje pogonska sigurnost instalacije.

Ranije je spomenuto da i dilatacije uslijed promjena temperature ograničavaju najvišu dozvoljenu temperaturu vodiča. Kod nekih tipova kabela (maseni kabeli) mogu uslijed dilatacije nastati šupljine među slojevima papirne izolacije, koje su ispunjene zrakom. Pošto je ϵ_r zraka samo 1, električno polje je u tim šupljinama 3-4 puta jače nego u okolnom kompaktnom dielektriku. Uslijed toga nastaje tinjavo izbijanje, koje može nakon stanovitog vremena dovesti do termičkog i kemijskog (ozon) razaranja kabela. Takve šupljine mogu nastati i kod uljnih ili plinskih kabela, koji također imaju slojevitu papirnu izolaciju. Tu se šupljine popunjavaju uljem, odnosno plinom pod tlakom, kojima je probojna čvrstoća tolika, da do tinjanja ne dolazi.

Ako je više kabela položeno na maloj međusobnoj udaljenosti, prijenosna moć kabela se smanjuje. Koeficijent smanjenja se za kabele niskih i srednjih napona nalazi i u priručnicima, dok je kod kabela visokih i najviših napona potrebno konzultirati isporučitelja kabela.

Pri izboru trase kabela treba naročito izbjegavati križanje, a pogotovo paralelno vođenje s toplovodima. Ako su takva križanja neizbjježna, treba ih uzeti u obzir pri izboru i dimenzioniranju kabela na mjestu križanja, odnosno približenja toplovodu, ili čitav problem drukčije rješiti.

ELEKTRIČNI I TOPLINSKI PROCESI KOD STRUJNOG OPTEREĆENJA ELEKTROENERGETSKIH KABELA

ZAGRIJAVANJE I HLAĐENJE ELEKTROENERGETSKIH KABELA

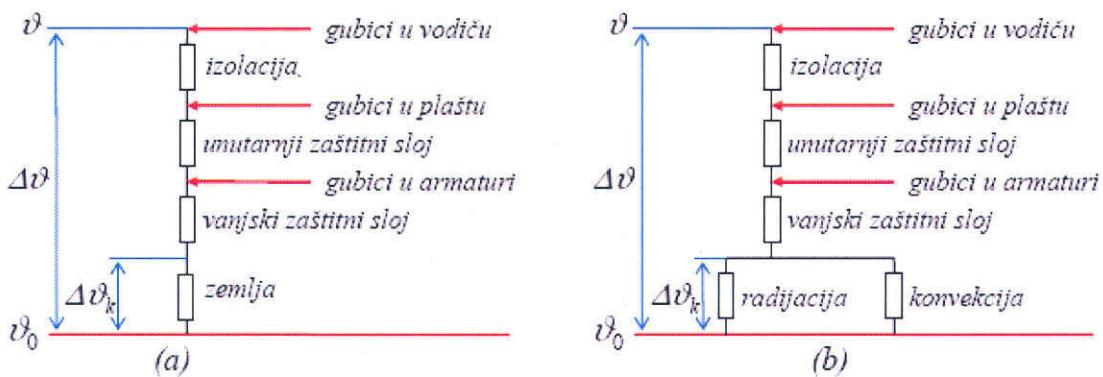
Električni vodovi u pogonskom stanju su permanentni izvori topline u skladu s Jouleovim zakonom. Prije puštanja u pogon oni imaju temperaturu jednaku temperaturi svoga okoliša. Nakon puštanja u pogon, temperatura vodiča se povisuje i počinje prijenos topline na okoliš. Prema zakonu termodinamike, prijenos je intenzivniji što je temperaturna razlika između vodiča i okoliša veća. To prijelazno stanje traje sve dok se ne postigne tako visoka temperatura vodiča u vodu da novoproizvedena toplina postane jednaka toplini koja se prenese na okoliš. Ta ravnoteža se ne mijenja dok se ne promijeni struja u vodu, pa govorimo o radnoj (pogonskoj) temperaturi voda. Ovakvu dopuštenu temperaturu proizvođač naglašava kao bitan uvjet za ispravno funkcioniranje voda. Zaštita voda se dimenzionira tako da se osiguraju uvjeti koji neće dopustiti trajno povišenje temperature iznad dopuštene. Toplina koja je bila potrebna da se vod zagrije sa temperature okoliša na dopuštenu temperaturu naziva se toplinski kapacitet voda i on bitno određuje ponašanje voda u prijelaznim režimima rada.

Proizvođači redovito navode nominalne uvjete koji podrazumijevaju stacionarno opterećenje voda, konstantnu temperaturu okoliša (obično $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$) i specifični toplinski otpor sredine u koju se vod postavlja (primjerice za polaganje kabela u zemlju obično se uzima $100\text{ K}\cdot\text{cm}/\text{W}$). Isključen je bilo kakav utjecaj drugih izvora topline, pa tako i drugih vodova. Kako prilike kod stvarnih rješenja rijetko odgovaraju uvjetima koje je proizvođač definirao, ostaje da izračunamo potrebne korekcije i izbjegnemo temperature iznad dopuštene.

Iako se toplina proizvodi po cijelom presjeku vodiča, radi njegove dobre toplinske vodljivosti zanemaruјemo otpor prijenosu unutar vodiča i računamo kao da se ukupna toplina izvorno pojavljuje na površini vodiča.

Prijenosna moć i strujna opteretivost kabela ograničeni su najvišom dopuštenom temperaturom, koju izazivaju gubici. Pri tome su kritične dvije točke kabela: površina

vodiča, čija je temperatura uvjetovana najvišom dopuštenom temperaturom izolacije (pojava dilatacije, opasnost od toplinskog probaja), te vanjska površina kabela koja predstavlja mjesto predaje nastale topline okolini. Maksimalne temperature vodiča koje se dozvoljavaju kratkotrajno kreću se prema vrsti izolacije uglavnom između 100 i 150 °C, a mogu nastupiti uslijed kratkog spoja. Kod kabela neposredno ukopanih u zemlju s prirodnim hlađenjem površina ne smije biti toplija od 40 °C. Smatra se naime, da već temperatura od 40 °C kroz duže vrijeme dovodi do potpunog isušenja tla, i time do povećanja njegovog toplinskog otpora, odnosno do pogoršavanja uvjeta prirodnog hlađenja kabela.



Slika Nadomjesna shema - nastajanje i odvođenje topline kabela u radijalnom smjeru; a) u zemlji, b) u zraku

Na slici u vidu ekvivalentne sheme prikazani su generatori topline na odgovarajućem mjestu kabela, te radijalno odvođenje topline prema udaljenoj okolini kroz serijski spojene toplinske otpore pojedinih slojeva. Vidi se da u procesu hlađenja kabela toplinski otpor tla igra bitnu ulogu, jer utječe na prijenosnu moć kabela. Kritično mjesto je neposredna okolina kabela, gdje je toplinski tok najgušći i temperaturni gradijent najstrmiji. Dobra svojstva odvođenja topline od prirodnih, jeftinih i prikladnih materijala ima pijesak, pogotovo ako se suho pomiješa sa oko 10% cementa. Kad su kabelske instalacije ekonomičnije ako se primjeni prisilno hlađenje. Prsilno hlađenje može biti unaprijed predviđeno projektom, a može se

primijeniti i naknadno, da se poveća prijenosna moć već postojećih kabela. U načelu se prisilno hlađenje može izvesti:

- prisilnom cirkulacijom svježeg zraka kod kabela položenih u cijev, kanale i tunele
- prisilnom cirkulacijom ulja kod uljnih kabela (potreban dovoljan presjek uljnih kanala)
- polaganjem kabela u cijevi ili kanale, kojima cirkulira voda
- polaganje cijevi s tekućom vodom neposredno u tlo tik uz kabel.

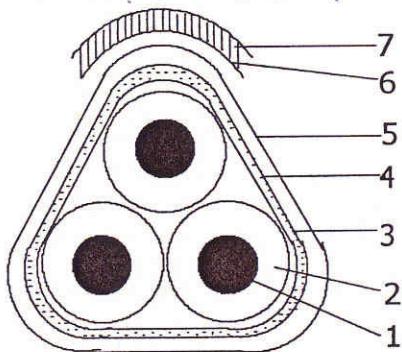
Instalacije s prisilnim hlađenjem zahtijevaju postavljanje odgovarajućih uređaja (pumpe, ventilatori) a u zatvorenom rashladnom ciklusu i odgovarajuća hladila rashladnog sredstva. Rashladne uređaje treba trajno nadzirati i njihov prestanak rada mora automatski izazvati isključenje kabela. Time se umanjuje pogonska sigurnost instalacije.

3.3 KONSTRUKCIJSKE IZVEDBE KABELA

1. KABELI IZOLIRANI PAPIROM I S OLOVNIM PLAŠTOM (MASENI KABELI)
2. ULJNI KABELI
3. PLINSKI KABELI
4. TERMOPLASTIČNI KABELI
5. CIJEVNI KABELI SA PLINOM POD TLAKOM JEDINOM IZOLACIJOM
6. KABELI VELIKIH SNAGA

1. KABELI IZOLIRANI PAPIROM I S OLOVNIM PLAŠTOM - MASENI KABELI
 - POJASNI KABELI
 - H-KABELI
 - TROOLOVNI KABELI

1.1 POJASNI KABELI



1. Vodič
2. Izolacija
3. Pojasna izolacija
4. Metalni plašt
5. Olovna obloga
6. Armatura
7. Vanjska obloga

Vodič

Papirna izolacija

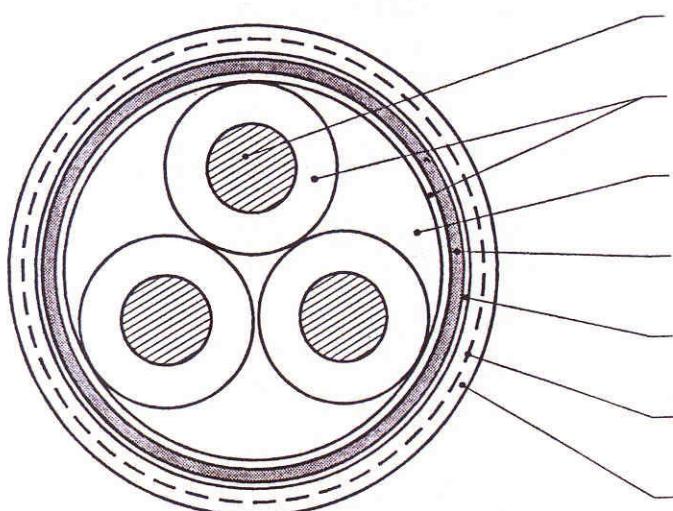
Papir

Olovni plašt

Impregnirana papirna traka

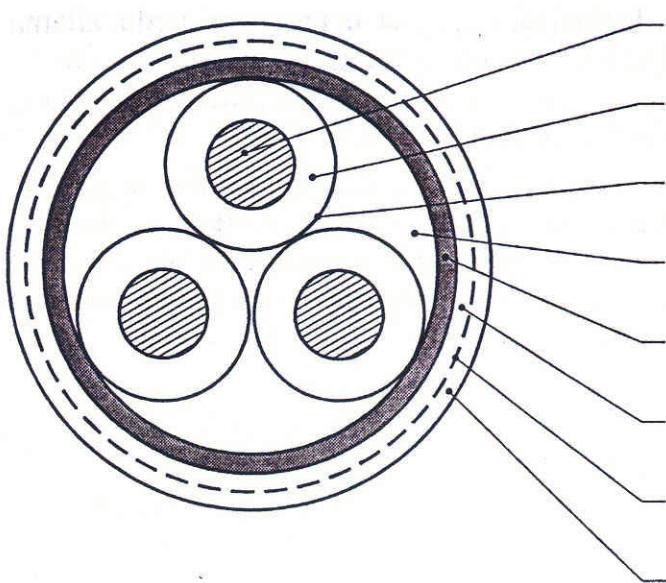
Čelična traka (bandaža)

Impregnirana juta



PRIMJENA : DO 15 kV

1.2 ZAŠTICENI KABELI
H-KABELI (HÖCHSTÄDTER)
KABELI S RADIJALNIM PASEM



Vodič

Papirna izolacija

Metalizirani papir (zaslon)

Papir (popuna)

Olovni plašt

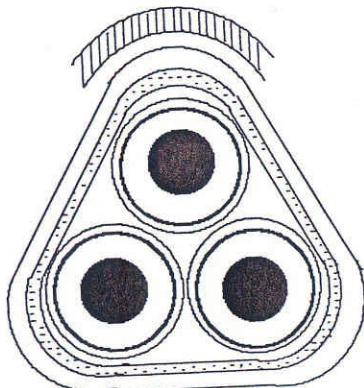
Impregnirana papirna traka

Čelična traka (bandaža)

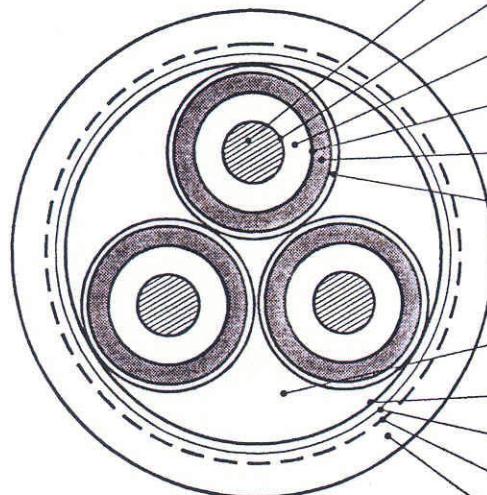
Impregnirana juta

PRIMJENA : DO 60 KV

1.3 TROOLOVNJI KABELI



PRIMJENA : DO 60 KV



Vodič

Poluvodljivi papir

Papirna izolacija

Metalizirani papir (zaslon)

Olovni plašt

Impregnirana papirna traka

Impregnirana juta (popuna)

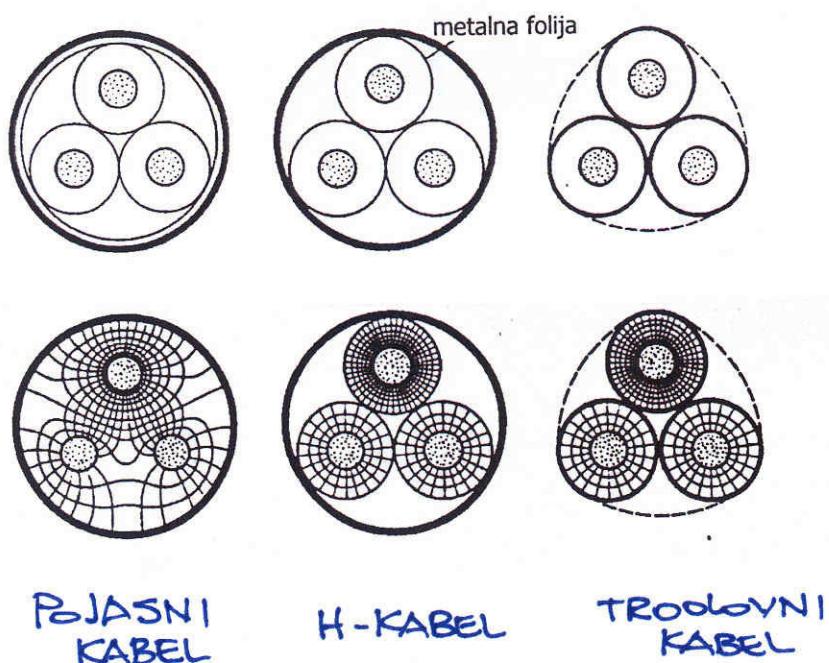
Papirna traka

Impregnirana juta

Čelična traka (bandaža)

Impregnirana juta

USPOREDBA ELEKTRIČKIH ROLA:



2. ULJNI KABELI

- NISKOTLAČNI ULJNI KABELI
- VISOKOTLAČNI ULJNI KABELI

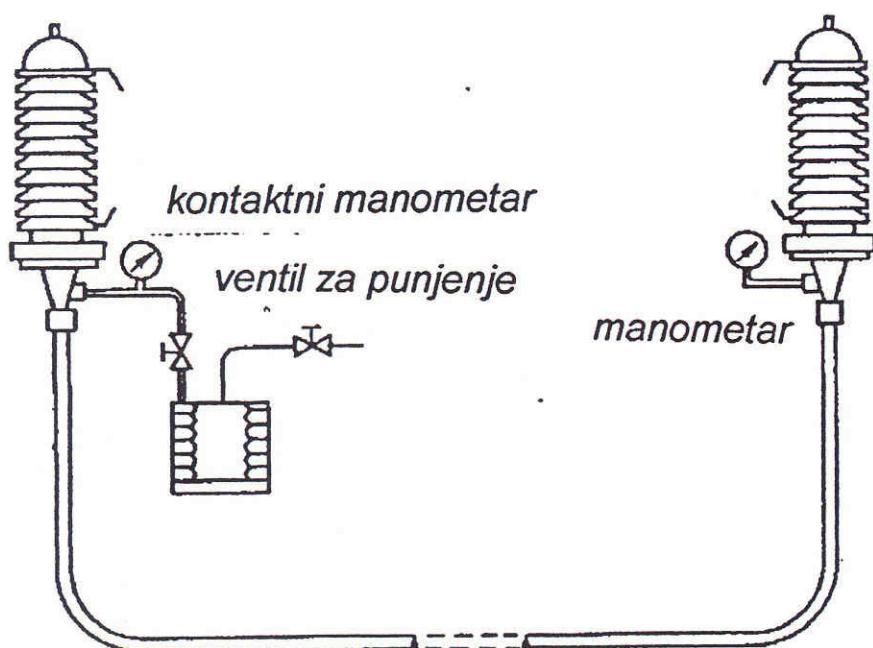
PRVI TOPUNSKI STABILIZIRANI
KABEL - 1927. GOD.

$$E_{max} = 40 \text{ kV/mm}$$

$$E_{max} = 60 \text{ kV/mm}$$

2.1 NISKOTLAČNI ULJNI KABELI

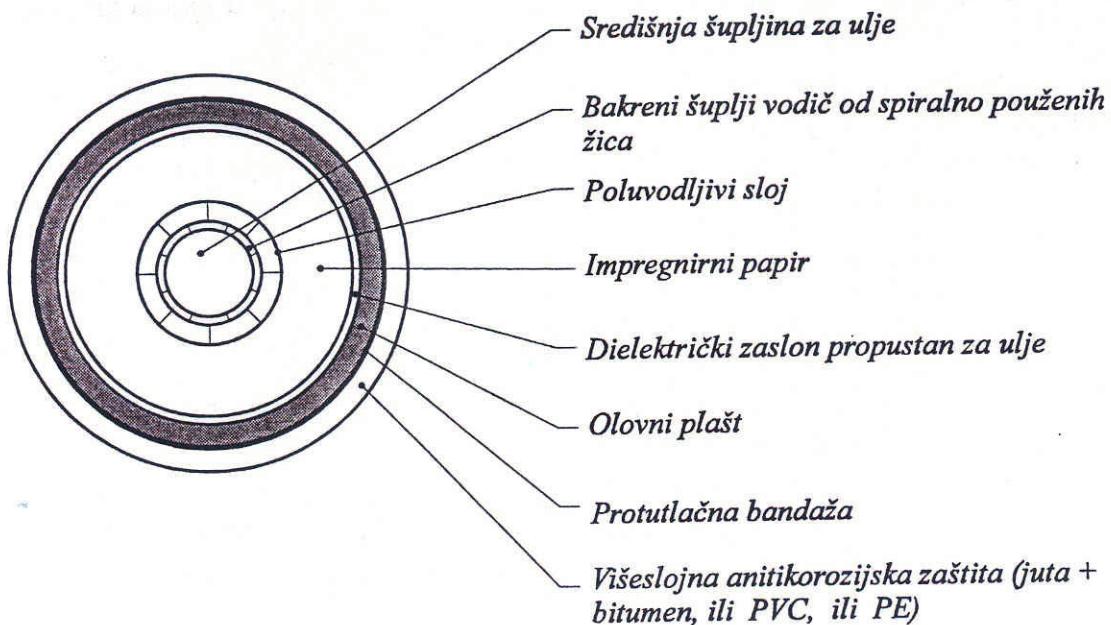
PRETLAK ULA : 0,03 - 0,6 MPa (1,5 - 6 bar)



Shematski prikaz sistema s uljnim kablom

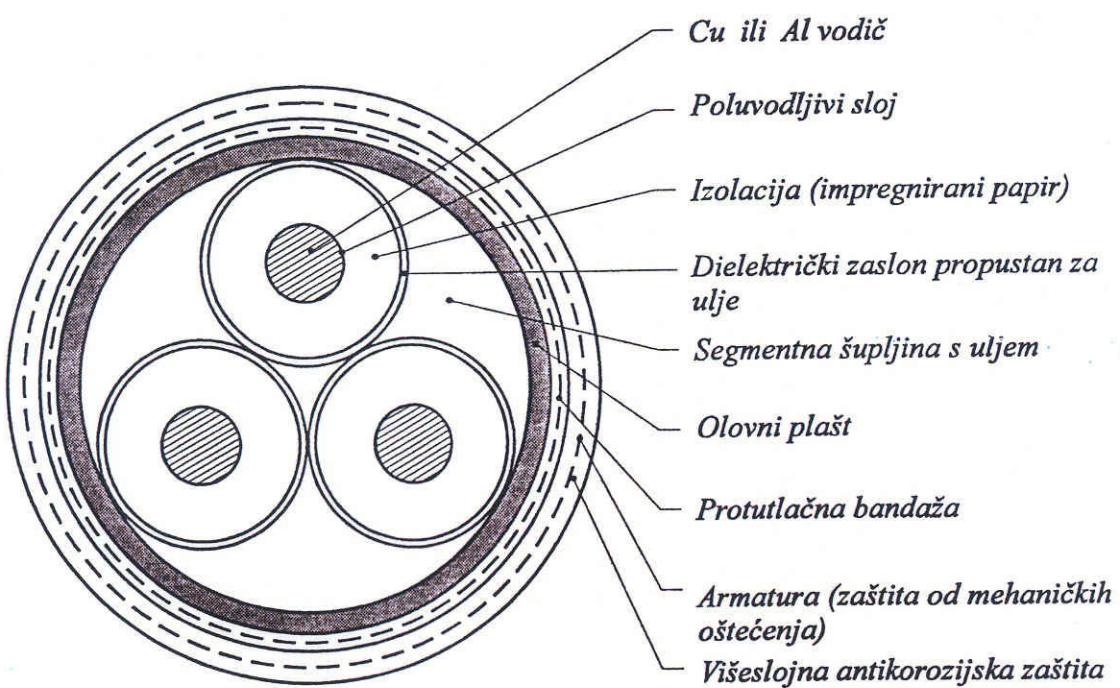
JEDNOŽIJNI NISKOTLAČNI UYNI KABELI

PRIMJENA : DO 500 kV



TROŽILNI NISKOTLAČNI UYNI KABELI

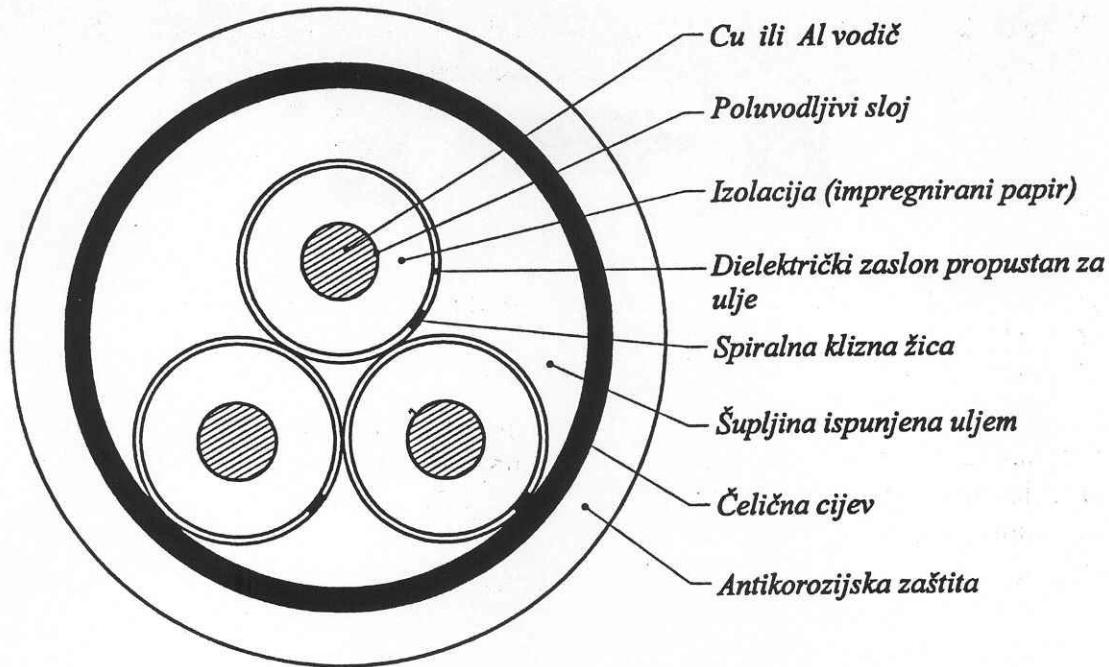
PRIMJENA : DO 132 kV



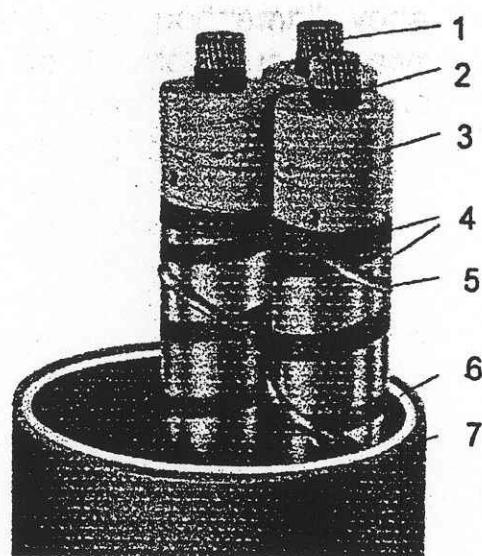
2.2 VISOKOTLAČNI UYNI KABELI

PRETTLAK UYD : 1-2,5 MPa (14-16 bar)

- KONSTRUKCIJE :
- KAO I NISKOTLAČNIH S POKRZBOM BANDAŽOM ZA VEĆE TLAKOVE
 - TROŽILNI CIJEVNI KABELI - ČELENO CIJEV



Visokotlačni uljni kabel u cijevnoj izvedbi



- 1 - Cu- ili Al-vodič
- 2 - papir s čađom za glađenje vodiča
- 3 - impregnirana papirnata izolacija
- 4 - zaštita žile (papir s čađom i Cu-trakom)

- 5 - klizna žica od CU ili nemagnetskog čelika
- 6 - čelična cijev
- 7 - zaštita od korozije od PE

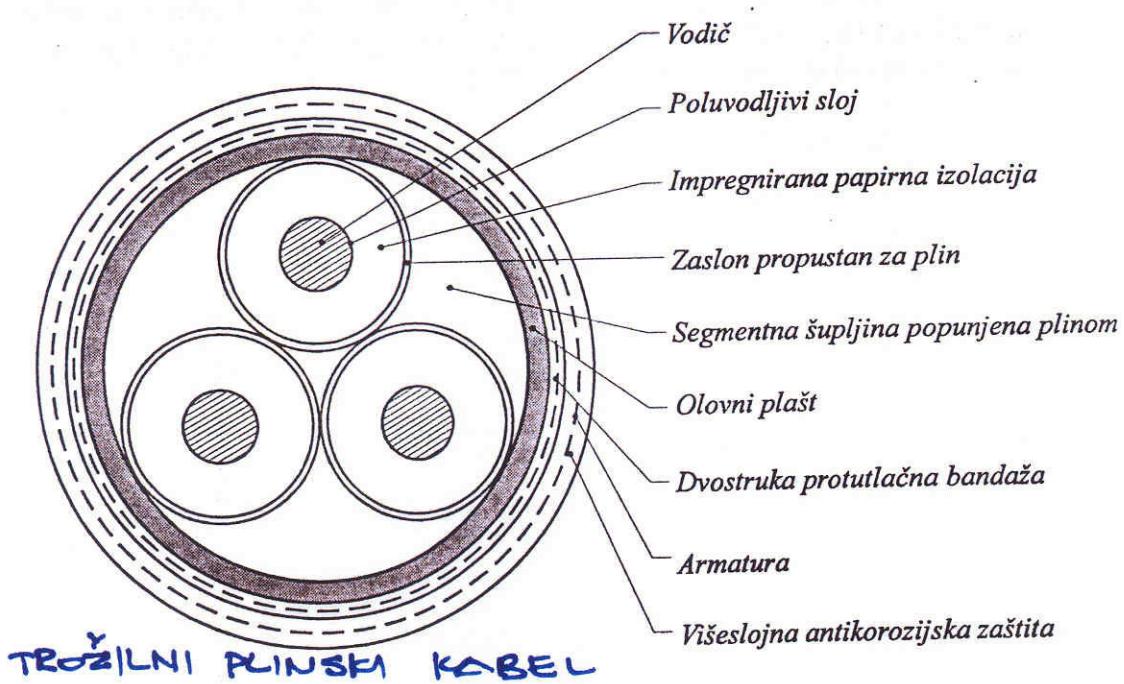
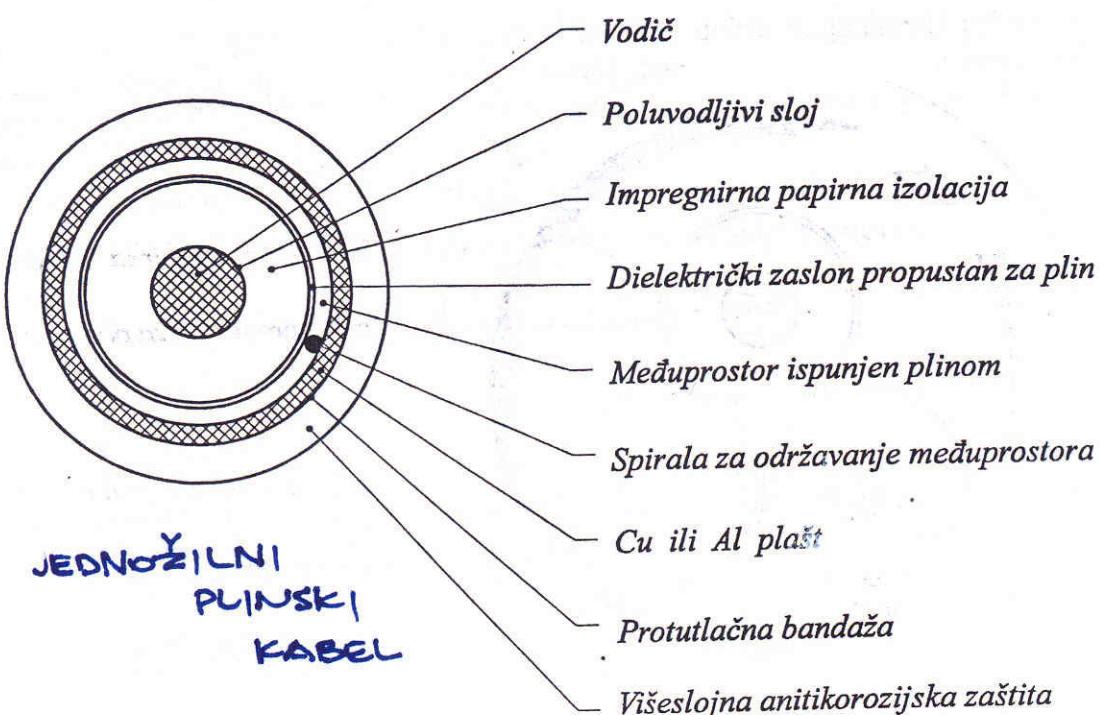
110-kV visokotlačni uljni kabel u čeličnoj cijevi

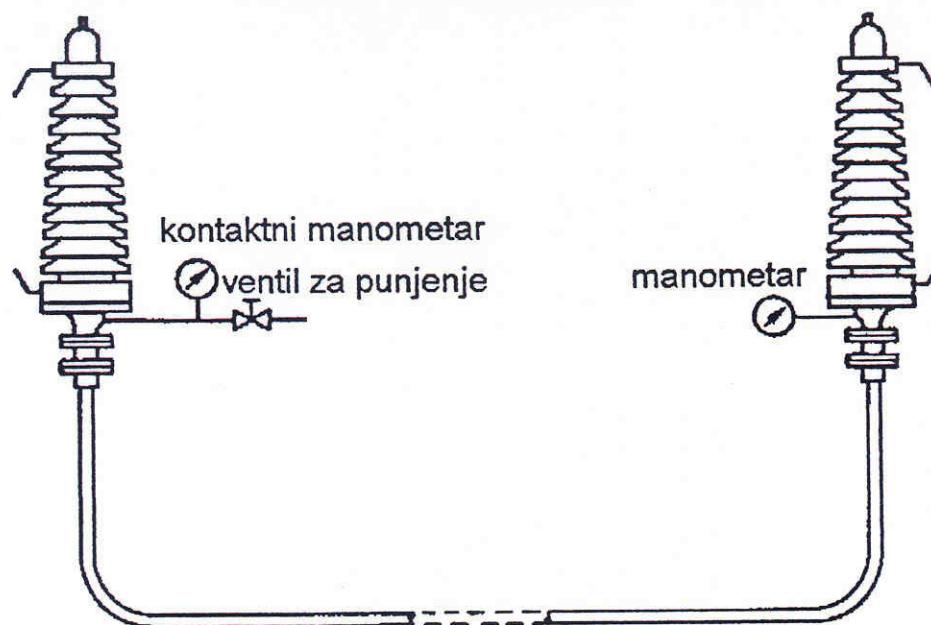
3. PLINSKI KABELI

PUN: DUŠIĆ, DUŠIĆ S DODATKOM SF₆
PRETLAK PUNA: 1-1,5 MPa (15-16 bar)

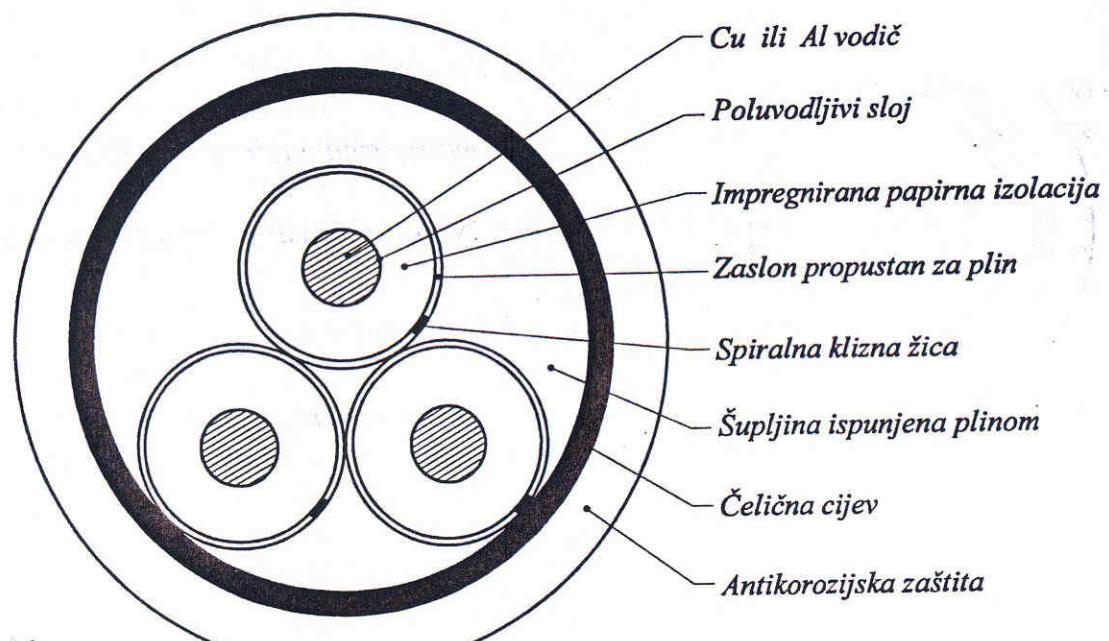
PRIMJENA: DO 300 kV

- KONSTRUKCIJE:
- SAVITSIVI KABELI S PLAŠTOM
 - KABELI S UNUTARNJIM PLINSKIM TLAČEM
 - KRUTI CIJEVNI KABELI
 - KABELI S VANJSKIM PLINSKIM TLAČEM

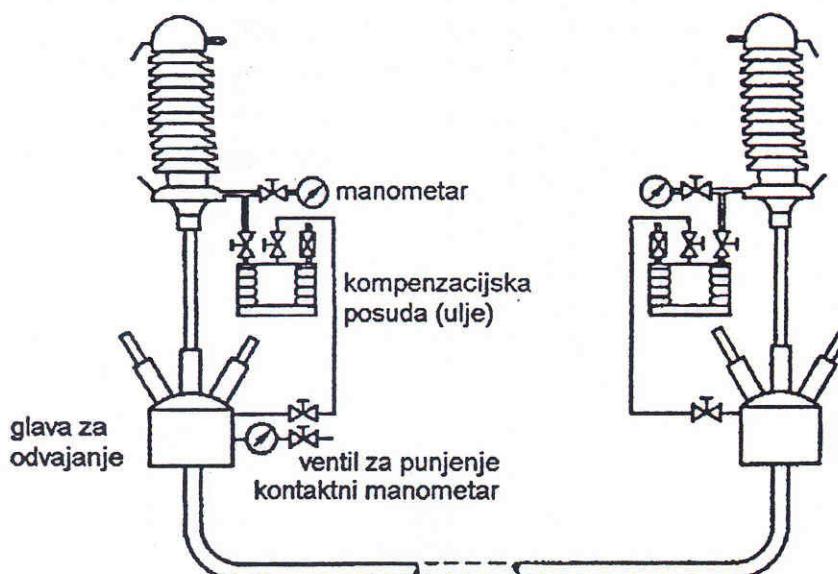




Shematski prikaz sistema kablova s unutarnjim plinskim tlakom

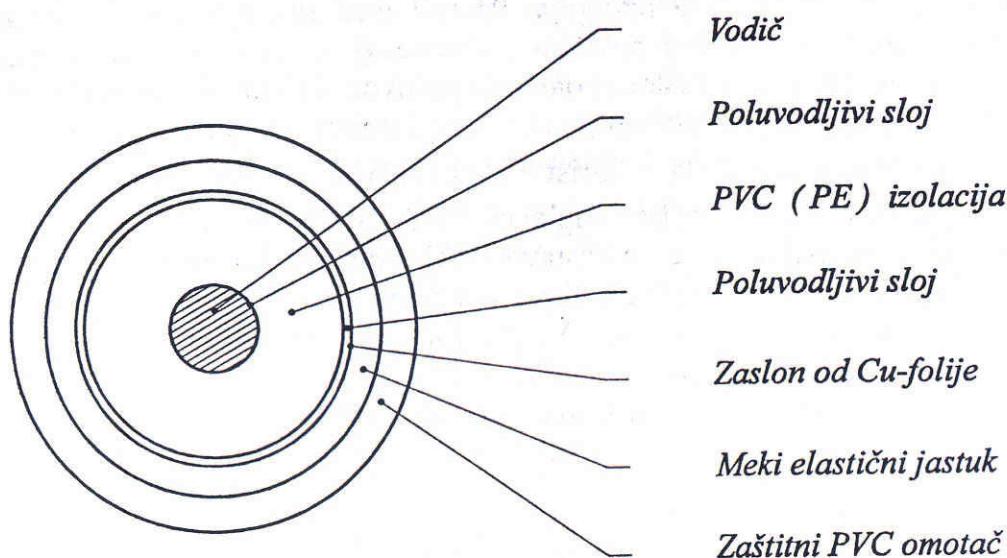
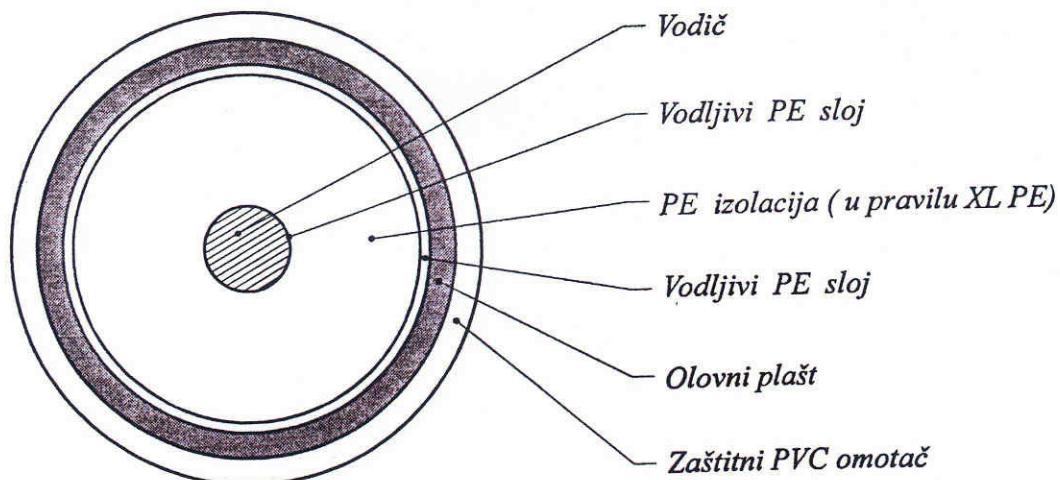


TROŽILNI PLINSKI KABEL U ODEVU

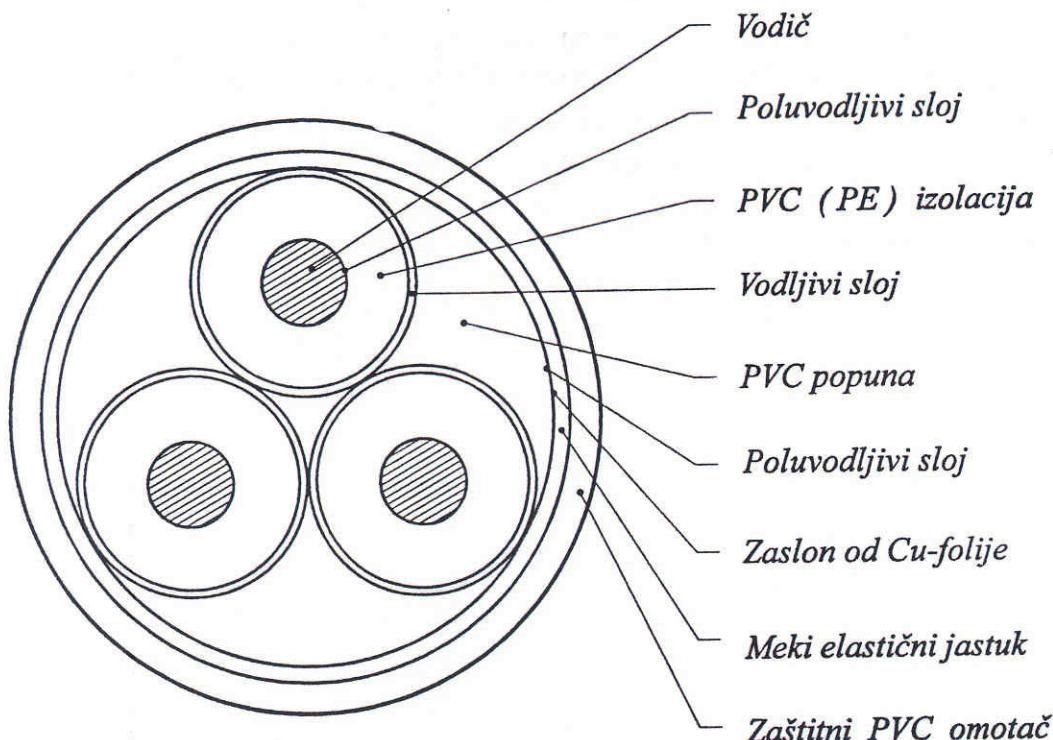


shematski prikaz sistema plinskih kablova s vanjskim tlakom

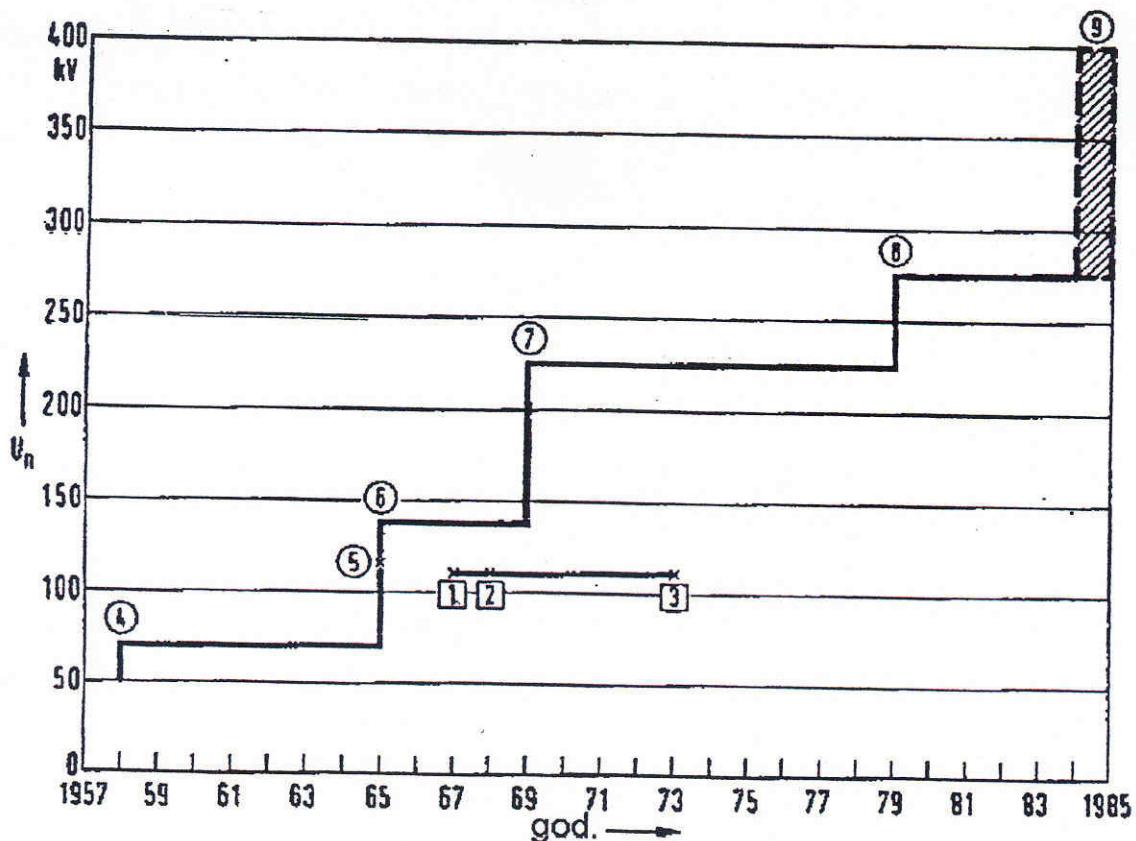
4. TERMOPLASTIČNI KABELI



Jednožilni PVC ili PE kabel srednjeg napona



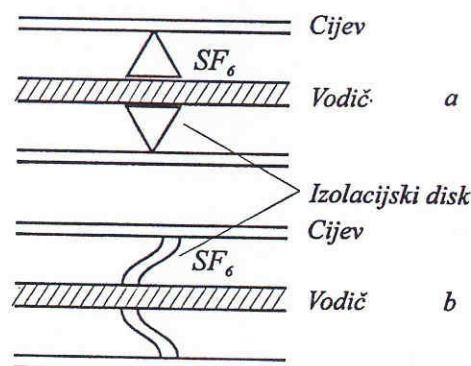
Trožilni PVC ili PE kabel srednjeg napona

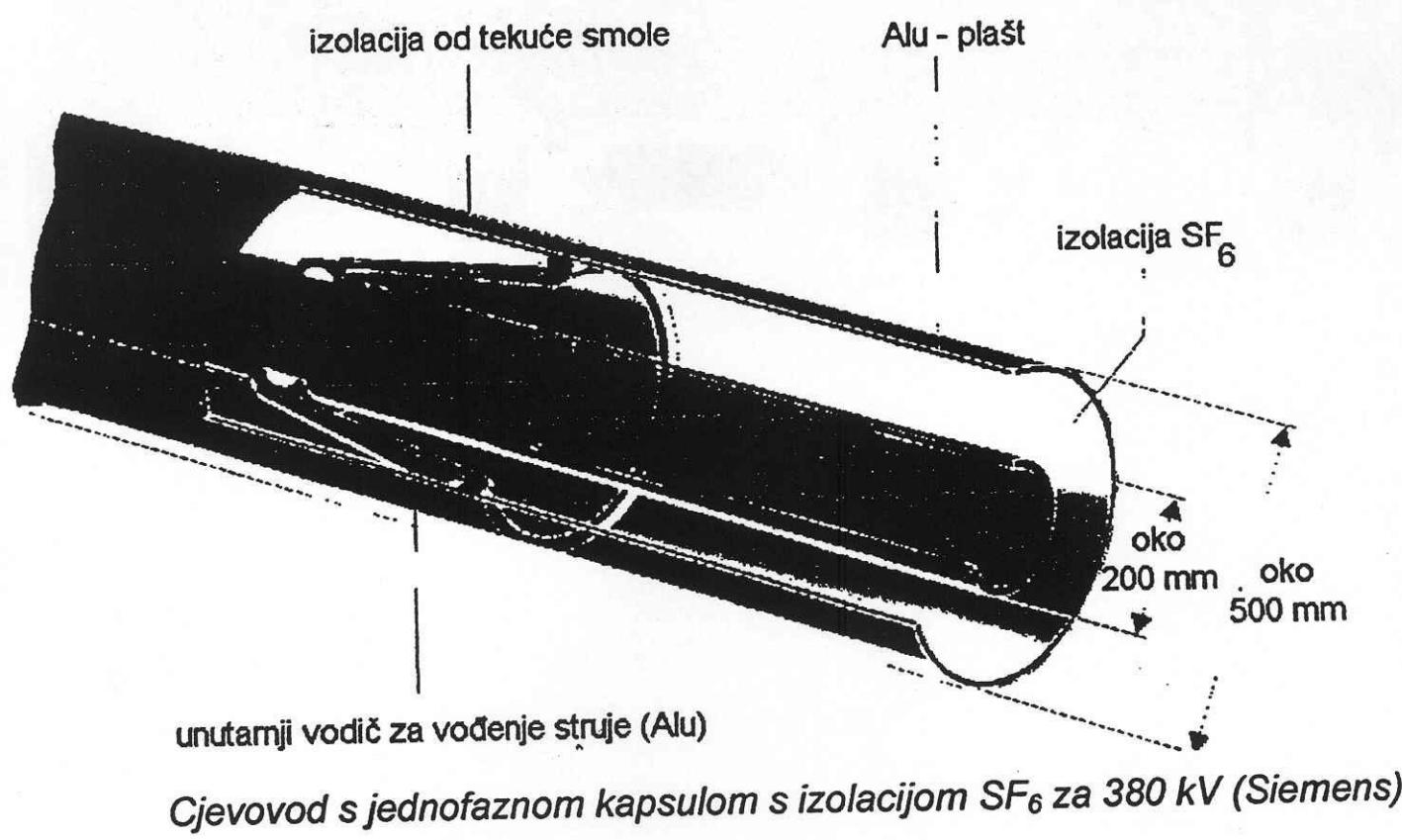


Najvažnije godine uvođenja novih razina napona kod visokonaponskih kablova s PE- odnosno VPE-izolacijom

5. CIJEVNI KABELI SA PLINOM POD TLAKOM JEDINOM IZOLACIJOM

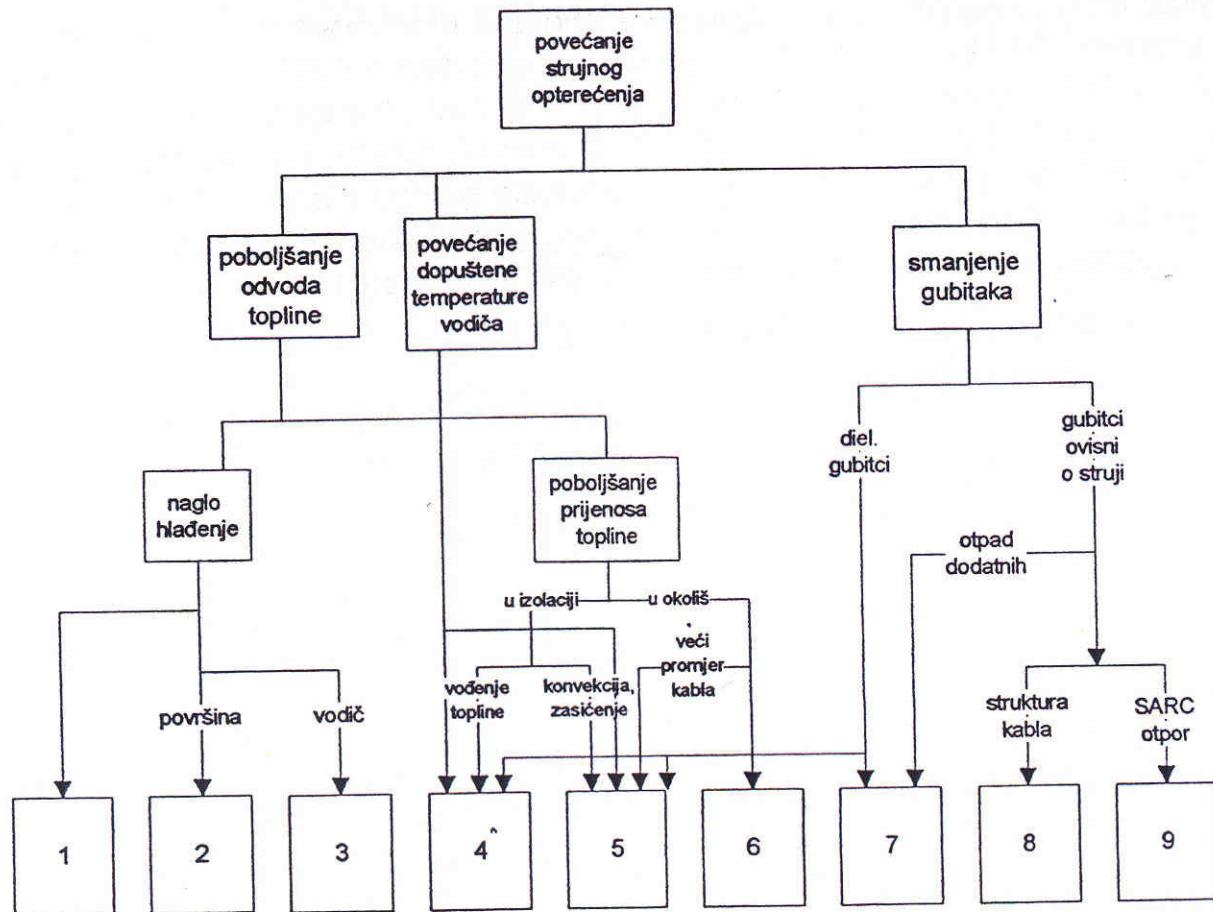
PLIN: SF_6 POD TLAKOM
GOJI VODIČ NOSIĆE NOSIĆE NA IZOLATORIMA





6. KABELI VELIKIH SNAGA HIPERVODIČI I SUPRAVODIČI KABELI

DOPUŠTENO TRAJNO STRUJNO (TERMičKO) OPTEREĆENJE
KABELA



Mogućnosti povećanja strujnog opterećenja kablova

1. Paralelno položena rashladna cijev u tlu, kanalu ili tunelu
2. Kabel u cijevi ili u koritu s rashladnom vodom. Optok rashladnog ulja kod uljnih kablova u čeličnoj cijevi. Hlađenje na zraku kod kablova u tunelu.
3. Hlađenje vodom ili uljem. Hlađenje parom s freonom.
4. Kablovi s plastičnom izolacijom. Kablovi s novim izolacijskim materijalom (smanjena nabojsna struja)
5. Kablovi s plinovitom izolacijom (veoma mala nabojsna struja)
6. Termički stabilno punjenje kanala. Zračno polaganje.
7. Kabel za istosmjeru struju (bez nabojsne struje)
8. Veliki presjek vodiča.

Mali dodatni gubitak pomoću efekta skin i Proximity

Mali dodatni gubitak plaštem (gubitci preko zaštite, armature i preko cijevi)

9. Dubinsko hlađenje normalnih vodiča (Kryo kabel)

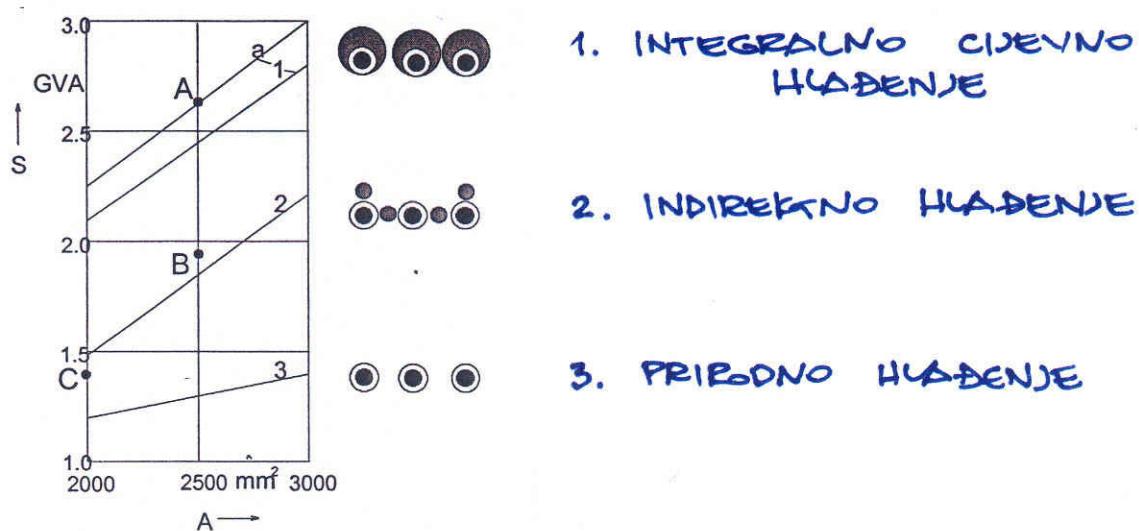
Kabel sa supra vodičem

6.1 CIJEVNI KABELI SA PLINOM SF₆ POD TLAKOM

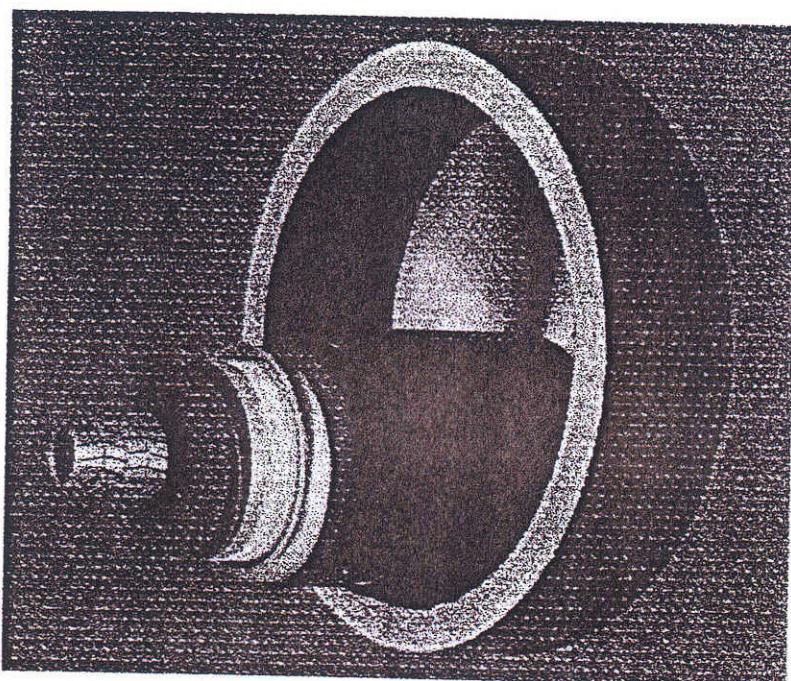
DOPUŠTENO TRAJNO OPTEREDENJE ~ 2000 MW

6.2 KLASIČNI KABELI S PRISILNIM HLAĐENJEM

a) VANJSKO HLAĐENJE KABELA VODOM

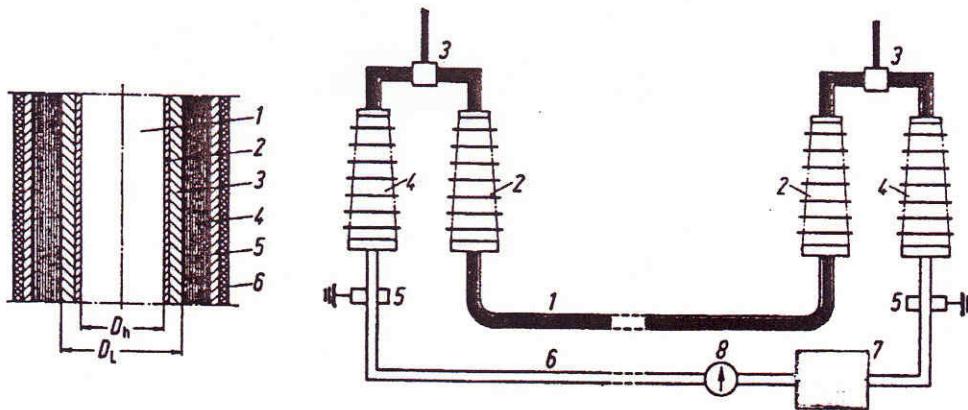


OPTEREDENJE 400 KV UYNOG KABELA
PRI TEMPERATURI VODIĆA 90°C



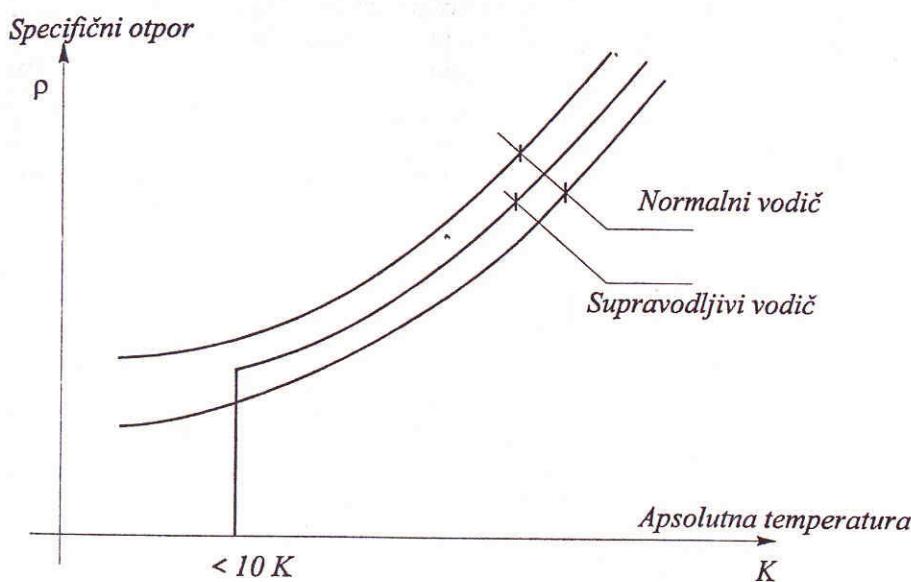
380-kV niskotlačni uljni kabel s direktnim hlađenjem vode izvana,
rashladna cijev od azbestcementa (Siemens/Bewag)

b) UNUTARNJE HLAĐENJE VODIČA KABELA



1. KANAL ZA HLAĐENJE
- VODA
- DOBRO TEKUĆE UYE
2. UNUTARNA CIJEV VODIČA
3. VODIČ AL
4. IZOLACIJA (IMPREGNIRANI PAPIR)
5. AL. PLAST
6. TERMIČKA IZOLACIJA

6.3 HIPERVODLJIVI I SUPRAVODLJIVI KABELI KRIOKABELI



PONAŠANJE VODIČA PRI NISKIM TEMPERATURAMA

HIPERVODLJIVI KABELI - KRIOKABELI

- izolacija kabela PE; rashladno sredstvo je tekući dušik ($70 K$) uz prisilnu uzužnu cirkulaciju u zatvorenom krugu (potrebna povratna cijev); vodič čisti aluminijski
- trofazna cijevna izvedba

SUPRAVODLJIVI KABELI

- materijali pri ekstremno niskim temperaturama postaju supravodlјivi, tj. $R_{\text{Vod.}} = 0$

KRIOKABELI

KABELI S VODIČIMA OHLADENIM NA VRLO NISKE TEMPERATURE

$$R_{\text{Vod.}} = f(\text{TEMP.})$$

- MATERIJALI : Nb NIOBIJ , $Nb_3 Sm$
- NISKO TEMPERATURA SE ODRŽAVA TEKUĆIM HELIJEM (4 K)
- POUZDANOST : - SUPRAVODSIVI VODIČ HLAĐEN SA TEKUĆIM VODIKOM (20 K)
 - SUPRAVODSIVI VODIČ NA NORMALNOJ TEMPERATURI
- SUPRAVODSIVI KABELI : 60 - 150 (220) KV
VRLO VELIKO DOZVOLJENO STRUJNO OPTERETEĆENJE

PONIJESNI RAZVOJ KABELA :

GOD.	1897.	5 KV	MASENI
GOD.	1906.	50 KV	ISTOSMJERNI (MASENI)
GOD.	1913.	30 KV	MASENI
GOD.	1921.	60 KV	MASENI
GOD.	1924.	150 KV	ISTOSMJERNI (MASENI)
GOD.	1936.	220 KV	UZN
GOD.	1952.	380 KV	UZN
GOD.	1963.	735 KV	UZN

3.4 PODRUČJA PRIMJENE KABELSKIH ELEKTROENERGETSKIH VODOVA

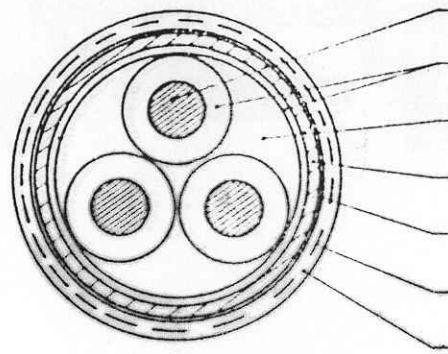
- PODRUČJA PRIMJENE KABELSKIH I NADZEMNIH EL. EN. VODOVA
- PODRUČJA PRIMJENE - VAPONSKIE RAZINE I RAZVOJ
 - KABELA SA IMPREGNIRANIM PAPIROM
 - KABELA SA ISOLACIJOM OD UNUTRŠNJIH MASA

1. KABELI ZA NISKI NAPON I EL. INSTALACIJE

- IZOLIRANI VODOVI - EL. INSTALACIJE
- OTVEROŽILNI KABELI - NISKONAPONSKE MREŽE

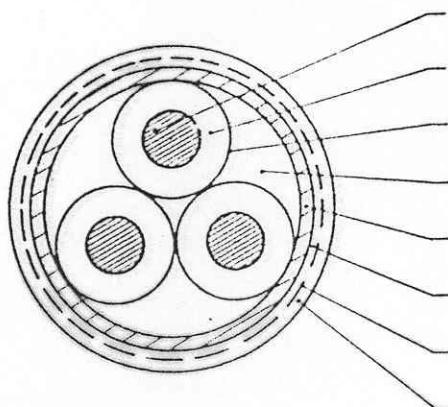
2. KABELI ZA SREDNJVENAPONSKE MREŽE

- a) MASENI KABELI - ISOLACIJA JE PAPIR IMPREGNIRAN KABELSKOM MASSOM
 - POJASNI KABELI
 - ZAŠTIDENI LI KABELI
 - TRUDLJIVI KABELI
- b) ULJNI KABELI - ISOLACIJA JE PAPIR IMPREGNIRAN ULJEM
- c) KABELI SA PET ILI PVC ISOLACIJOM



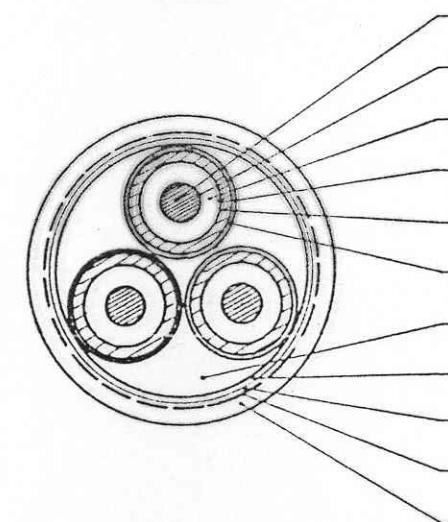
Pojasni kabel

- Vodič
- Papirna izolacija
- Papir
- Olovni plašt
- Impregnirana papirna traka
- Čelična traka (bandaža)
- Impregnirana juta



H-kabel

- Vodič
- Papirna izolacija
- Metalizirani papir (zaslon)
- Papir (popuna)
- Olovni plašt
- Impregnirana papirna traka
- Čelična traka (bandaža)
- Impregnirana juta

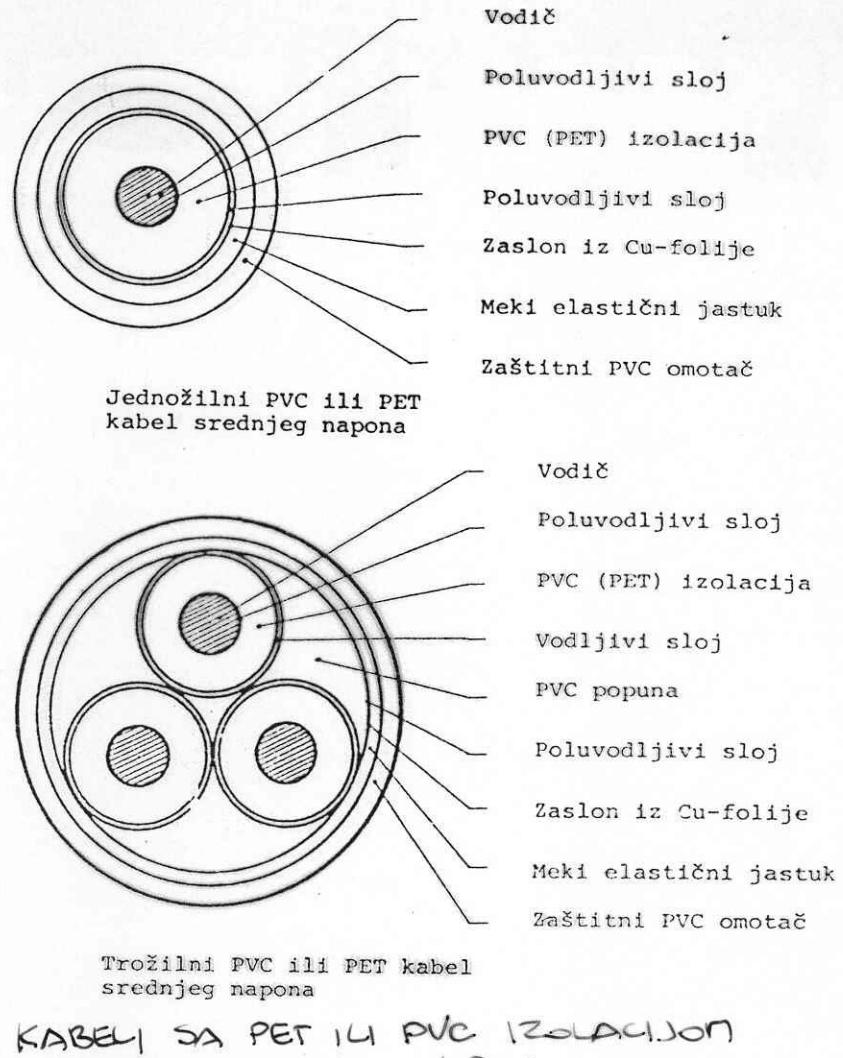


Trooolovni kabel

- Vodič
- Poluvodljivi papir
- Papirna izolacija
- Metalizirani papir (zaslon)
- Olovni plašt
- Impregnirana papirna traka
- Impregnirana juta (popuna)
- Papirna traka
- Impregnirana juta
- Čelična traka (bandaža)
- Impregnirana juta

SLIKA 2.45

MASENI KABELI ZA SREDNJI NAPON



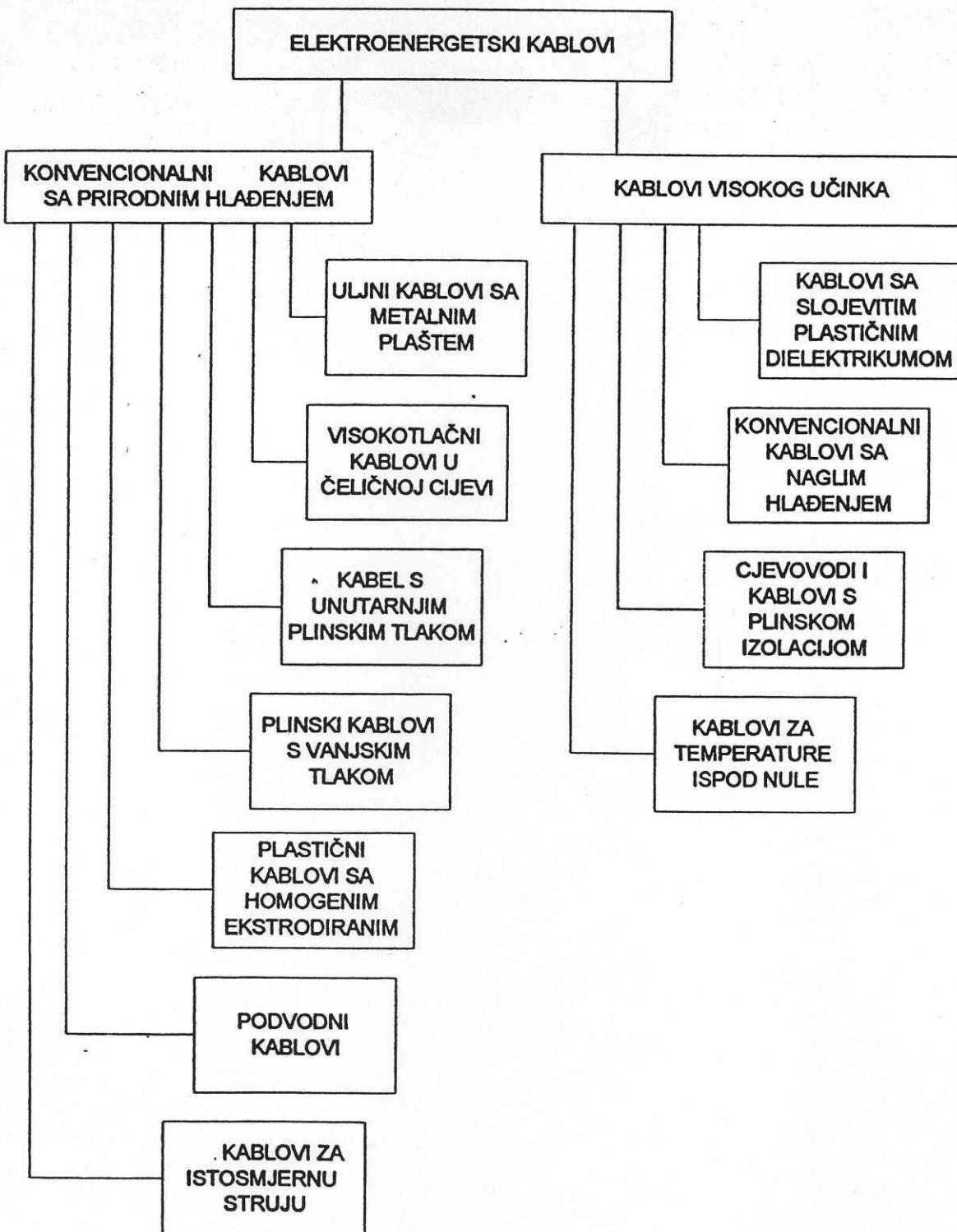
SLIKA 2.46 KABELI SA PET I LI PVC IZOLACIJOM
ZA SREDNJI NAPON

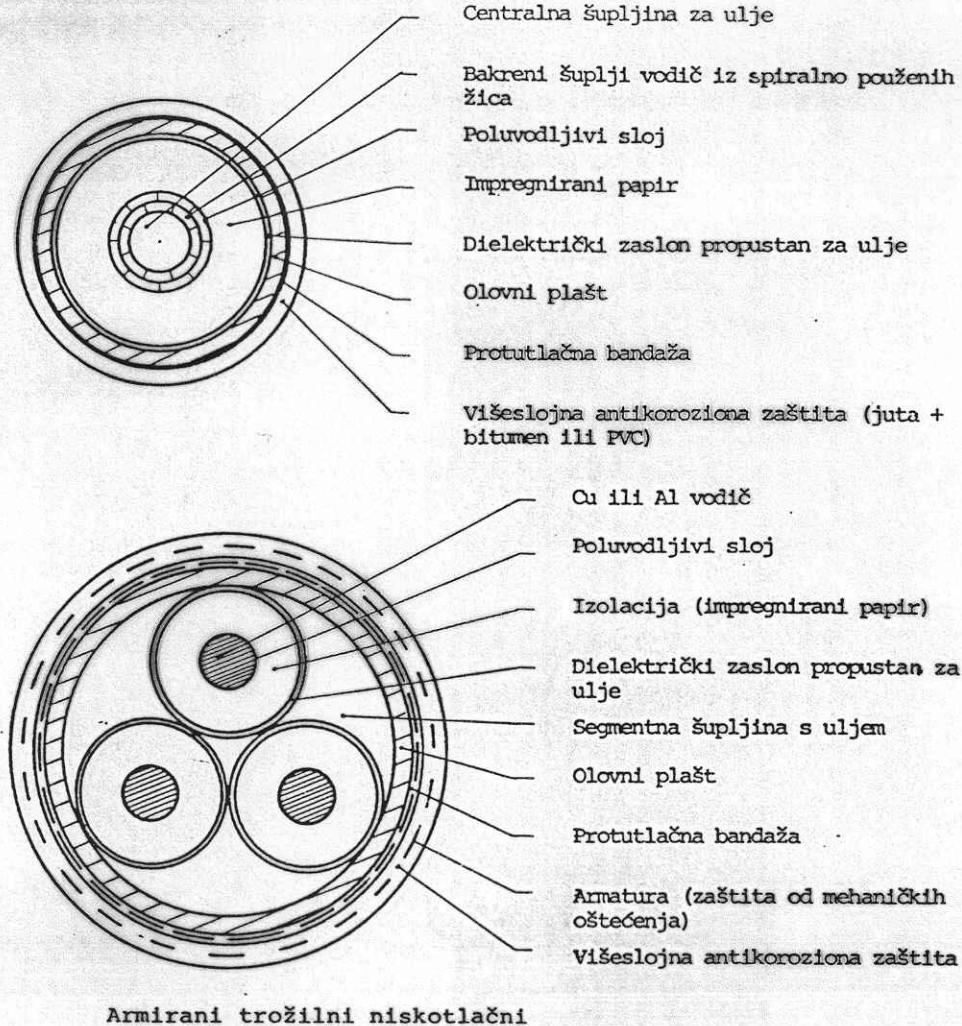
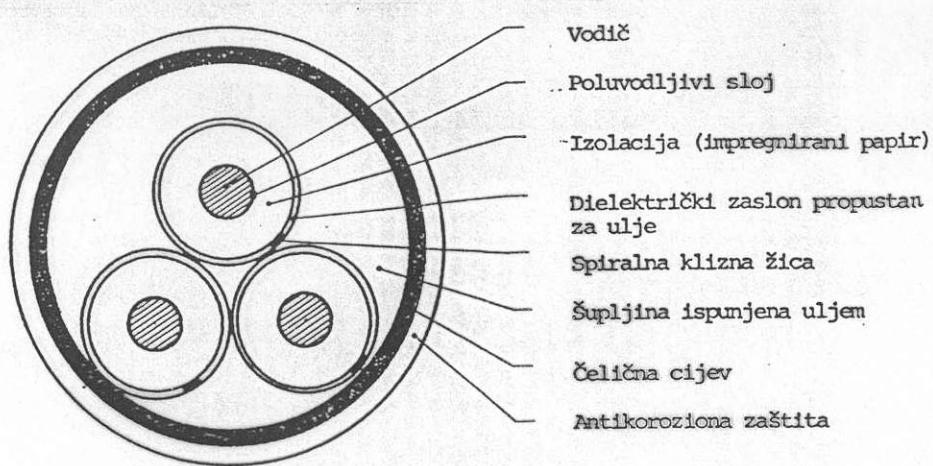
3. KABELI ZA VISOKE I NAIVIŠE NAPONE

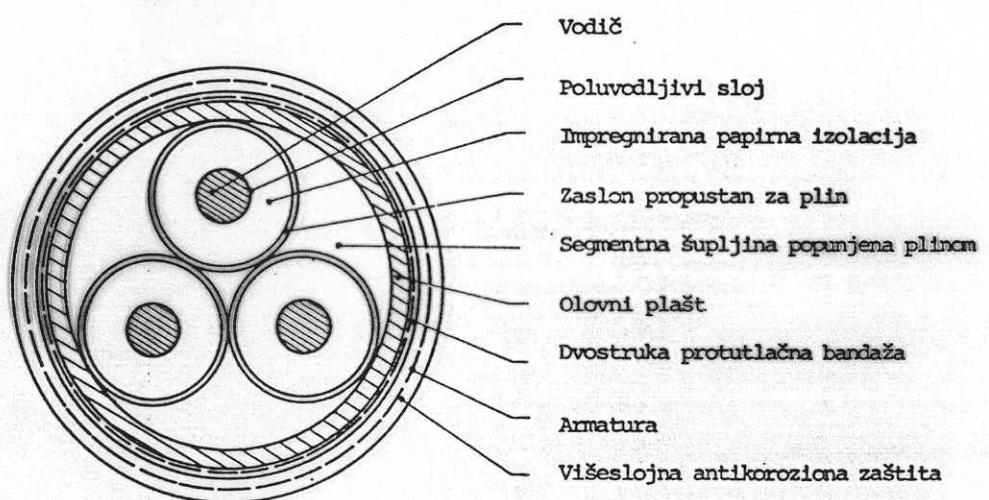
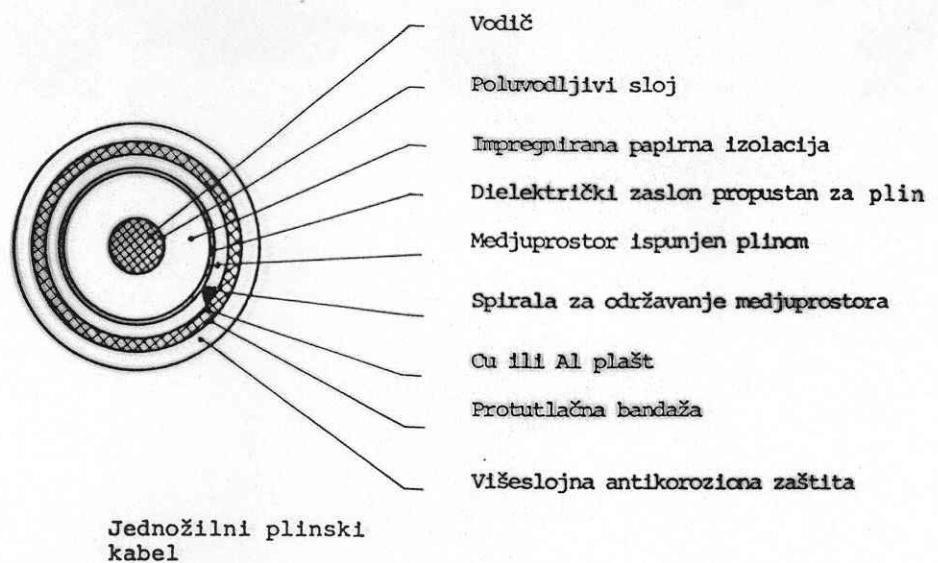
- a) ULJNI KABELI
 - NISKOTLAČNI
 - VISOKOTLAČNI
- b) PLINSKI KABELI (DUŠIK)
- c) POLIETILENJSKI KABELI
- d) KABELI PUNJENI SA SF₆

RAZNOJNE KONSTRUKCIJE KABELA

- KRIOKABELI
- HIPERVODSIVI KABELI
- SUPRAVODSIVI KABELI

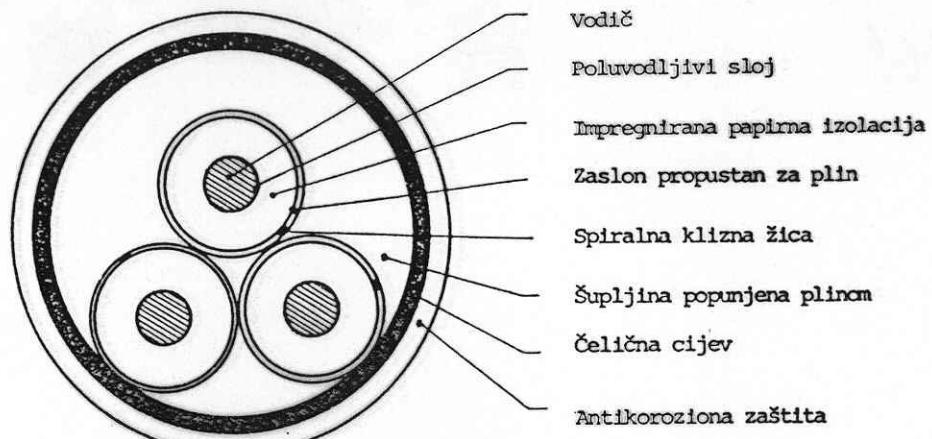


SLIKA 2.47**NISKOTLAČNI UJUNI KABELI**SLIKA 2.48**VISOKOTLAČNI UJUNI KABEL**

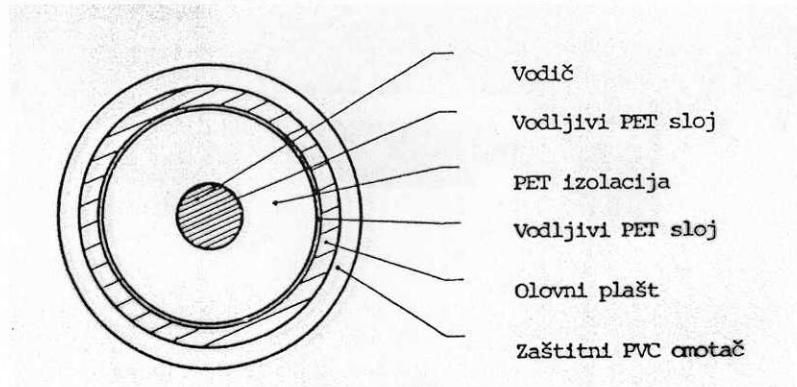


SLIKA 2.49

PLINSKI KABELI



Trožilni plinski kabel u cijevi

SLIKA 2.50 PLINSKI KABEL I

Kabel izoliran polietilenom napona 225 KV

SLIKA 2.51 POLIETILENSKI KABEL

3.5 IZBOR I DIMENZIONIRANJE ELEKTROENERGETSKIH KABELA

• OSNOVNI PARAMETRI TE KABELA:

- NISINI NAPON KABELA
- KONSTRUKCIJA KABELA
- MATERIJAL I PRESEG KABLOVA KABELA

KRITERIJI ZA IZBOR TE KABELA

1. MEHANIČKI KRITERIJI

- MJESTO I UNJETI TRASE
- MJESTO I NOĆIN POGOGRADJA
- OČEKIVANA MEHANIČKA OPTEREGENDA
- UTjecaj korozije
- očekivane vibracije
- zahtjevi na savitljivost
- sfernost trase

ZAHTJEVI NA
KONSTRUKCIJU
KABELA

2. ELEKTRICKI KRITERIJI

2.1 NAZIVNI NAPON KABELA UN (kV)

- određen nazivnim naponom te voda / mreže
- očekivana naponska naprezanja kabela
- zahtjevi na izbor i dimenzioniranje izabrane

2.2 MATERIJAL I PRESEG KABLOVA KABELA

- potrebna pridjeljiva snaga (moć) kabela Sp [MVA]
određuje potrebnu stvaru pridjeljiva kabela Ip [A]
- STVARNA NAPREZANJA KABELA

- TUDINA POGONSKA STVARA OPTEREGENDA JPr [Δ]
- STVARA KRATKOG SPOJA Iks [Δ]

- KVALITET PRIDJELJIVA EL. ENERGIJE
doveđeni pad napona $\Delta M\%$

- NAZIVNA TRAJNO DOPUSTNA STVARA OPTEREGENDA KABELA In [Δ]

- NAZIVNO TRAJNO DOPUSTNA STVARA OPTEREGENDA KABELA UZ NEZNE UNJETE POGOGRADJA:

- TEMPERATURA ZEMJE 20°C
- TEMPERATURA ZECKA 35°C
- TEMPERATURA KABOLA 95°C

- SPECIFIČNI TOPLINSKI OTPOR ZEMJE $1,0 \text{ Km/W}$
- SPECIFIČNI TOPLINSKI OTPOR VPE $3,5 \text{ Km/W}$
- SPECIFIČNI TOPLINSKI OTPOR PVC 60 Km/W
- SPECIFIČNI TOPLINSKI OTPOR PE 35 Km/W

- DUINA POGOGRADJA $0,7 \text{ m}$
- NAJIN POGOGRADJA U POKY JEDON VISEZAVNI KABEL TRI JEDNAZAVNI KABEL UTRADUT

- POMAK KABELA U ZEMI $0,07 \text{ m}$
- POMAK KABELA U ZECKI PROMJER KABELA

KONTAKTNI, TOPLINI PODACI PROIZVODA KABELA

- STVARNI UVJETI PREGOGLAŠUJE KABELA ODSTUPOM
OD NOŽNIH UVJETA PREGOGLAŠA PA JE
TRGOVSKO DOZVOLJENA STRUSS OPTEREDENJA KABELA
U STVARNIM UVJETIMA PREGOGLAŠA I_{opt} [A]
- TRGOVSKO DOZVOLJENA STRUSS OPTEREDENJA KABELA U
STVARNIM UVJETIMA PREGOGLAŠA I_{opt} [A] ODREĐUJE SE:

1. PREDMETNOVSENIM POSTUPKOM - za kabele
 $U_m < 110 \text{ kV}$

$$I_{opt} = k I_N [\Delta]$$

POIČENI SE $k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4$
ODREĐUJE IZ KOREKCIJSKIH FAKTORA TABULIRANO
ZADANIH ZA PREDMETNI TIP KABELA, KOJIMA SE UZIMA
U OBZIR ODSTUPANJE STVARNIH OD NOŽNIH
UVJETA PREGOGLAŠA.

TABULIRANI PODACI KOREKCIJSKIH FAKTORA

k_1 - utjecaj temperature okoline

k_2 - utjecaj dubine pregoščenja

k_3 - utjecaj deljina uspoređeno položenih kabala

k_4 - utjecaj topninskog otpora tla

2. POTPUNI (TOČNI) POSTUPAK PROČIĆA

DIZAJNEMOG STRUSSA OPTEREDENJA KABELA

za kabele $U_m \geq 110 \text{ kV}$ IEC 287

Za kabel se nadhvata ekvivalentnom shemom za
topninsku pregoščenu kabelu - izdavanja se
topninske struje kabela i razvijene topninske
gubitke kabala u stvarnim uvjetima pregoščenja
te izdavanja trgovsko dozvoljena struva opteredjenja

$$I_{opt} = f(V, R_T, P_T) [\Delta]$$

- Za trgovsko dozvoljenu struva opteredenu kabelu
 I_{opt} [A] izrađe se presvet kabala (matrica) iz
kabloskih prezboljeva
 - Kompleksne rezistive vrednosti na struju opteredenu
za razne kraćke struje na kabalu:
- a) termičko naprezanje
 - za kabele $T_{max,ks} = 250^\circ\text{C}$ - preizvedeni da su
kabloski prezboljevi za I_{opt} [A] - struje ks koje kabel
može izdržati u trgovskoj $t=1\text{s}$
 - za stvarno trudnoće ks t_k (s) određuje se iznos
struje ks koju kabel može izdržati

$$I_k = \frac{I_1}{T_{t_k}} [\text{kA}]$$

uspoređuje sa stvarnom
strujom ks na kabelu

b) DINAMIČKI NAPREZANJE KABELA

$$F = \frac{\sigma_2}{s} I_F^2 [N/m] \quad \text{SILU NAPREZANJA}$$

S - MASEMST IZMEĐU SIMETRICAL VODIĆA (m)

$$I_F = 2,5 I_k [\text{k}\Omega]$$

- KONTROLIRANA PREDSTAVLJENOG VODIĆA NA KVALITETU PRIMENJENE
ELEKTRIČNE ENERGIJE - DODVOLJENI RAD NAPRENJA

$$\Delta M_{\%} \leq \Delta M_{\%, \text{ doz}}$$

$$\Delta M = \frac{P_l}{U_{IN}^2} (R_1 + X_1 \tan \varphi) \cdot 100 \%$$

3. EKONOMSKI KATERISI

- MINIMIZACIJE (OPTIMIZACIJE) UKUPNITI TROŠKANA
KABELA PREDSTAVLJAJUĆI SVAKOG ELVOTMOG VODEKA

3.5.1 POJEDNOSTAVLJENI POSTUPAK PRORAČUNA DOZVOLJENE STRUJNE OPTERETIVOSTI KABELA

Dio električne energije koja se prenosi kabelom, pretvara se u samom kabelu u toplinsku energiju. U tijeku normalnog pogona kabela, toplina se razvija u vodičima i u izolaciji. Izmjenična struja stvara elektromagnetsko polje i u vodljivim slojevima, metalnom plaštu i armaturi. Na određenoj temperaturi uspostavlja se toplinska ravnoteža između razvijene i odvođene topline. Razvijena toplina uzrokuje isušenje okolnog zemljišta, te može dovesti do kolapsa kabela. S tog razloga potrebno je ograničiti veličinu struje protjecanu kabelom ovisno o uvjetima pogona u kojem kabel radi. Dopušteno strujno opterećenje kabela izračunato je 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

Dopušteno strujno opterećenje izračunato uvažavanjem navedenih podataka, nalazi se u tablicama za odgovarajući tip i presjek kabela, a ovisno o mjestu (zemlja, zrak) i načinu (paralelno, trokut) polaganja kabela.

Ukoliko se stvarni uvjeti polaganja kabela razlikuju od navedenih, potrebno je nazivno strujno opterećenje iz tablice množiti sa korekcijskim faktorima, tj. najveća struja kojom se smije trajno opteretiti kabel a da ne nastupi preveliko ugrijavanje iznosit će:

$$I_t = k_n \cdot I_n$$

gdje je:

k_n faktor utjecaja okoliša i vrste opterećenja kabela

I_n dopušteno strujno opterećenje (iz tablice za odgovarajući tip i presjek)

Faktor utjecaja okoliša k_n umnožak je više faktora:

$$k_n = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4$$

pri čemu su:

k_1 utjecaj temperature okoline

k_2 utjecaj dubine polaganja

k_3 utjecaj drugih usporedno položenih kabela

k_4 utjecaj toplinske otpornosti tla

Tablica Korekcijski faktor za različite temperature okoline

Temperatura okoline, °C	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Polaganje u zemlju	1,07	1,04	1,00	0,96	0,93	0,89	0,85	0,80	0,76	0,71	0,65	0,60
Polaganje u zraku	1,15	1,12	1,08	1,04	1,00	0,96	0,91	0,87	0,82	0,76	0,71	0,65

Tablica Korekcijski faktor za različite dubine polaganja

Dubina polaganja, m	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
Korekcijski faktor	1,00	0,90	0,98	0,96	0,95

Tablica Korekcijski faktor za različiti broj kabela ili sistema u istom prokopu

Broj kabela (sistema)	2	3	4	5	6	8	10	
Razmak između kabela (sistema) položenih u zemlju	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
	25 cm	0,87	0,78	0,74	0,71	0,67	0,64	0,62

Tablica Korekcijski faktor za različite specifične toplinske otpornosti tla

Presjek vodiča	Specifični toplinski otpor tla						
	K·m/W						
mm ²	0,70	1,00	1,20	1,50	2,00	2,50	3,00
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

ALGORITAM ZA IZBOR PRESJEKA VODIČA KABELA

U_N - NAZIVNI NAPON VODA ODNOŠENO KABELA	$U_N [kV]$
S_{PR} - TRAŽENA PRIJENOSNA SNAGA $P_{PR}, \cos\phi$ KABELA	$S_{PR} [MVA]$ $P_{PR} [MW], \cos\phi$
I_{PR} - STRUJA PRIJENOSA	$I_{PR} [A]$
I_N - NAZIVNA TRAJNO DOZVOLENA STRUJA OPTERECENJA KABELA	$I_N [A]$
I_{opt} - TRAJNO DOZVOLENA STRUJA OPTERECENJA KABELA U STVARNIM UVJETIMA POLAGANJA	$I_{opt} [A]$

1. ULAZNI PODACI :

- U_N S_{PR} $P_{PR}, \cos\phi$
- KATALOG KABELA IZABRANOG PO MELANIČKIM KRITERIJIMA
- TRASA KABELA I STVARNI UVJETI POLAGANJA

2. ODREĐIVANJE I_{PR} :

$$I_{PR} = \frac{S_{PR}}{\sqrt{3} U_N} \quad I_{PR} = \frac{P_{PR}}{\sqrt{3} U_N \cos\phi}$$

3. IZBOR KABELA : TIP, MATERIJAL, PRESJEK PO KRITERIJU $I_N \geq I_{PR}$

4. ODREĐIVANJE I_{opt} :

$$I_{opt} = k \cdot I_N \quad k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4$$

STVARNI UVJETI POLAGANJA

5. KONTROLA : $I_{opt} \geq I_{PR}$

AK JE $I_{opt} < I_{PR}$ POTREBNO IZABRATI YEDI PRESJEK

6. KONTROLE IZABRANOG PRESJEKA

- KONTROLA PADA NAPONA
- KONTROLA ZAGRIJAVANJA ZA VRIDETE KROTKEG SLOJA
 - MOŽEBITNO POVEĆANJE PRESJEKA

7. IZBOR TIPIZIRANOG KABELA

3.5.2 TOČNI POSTUPAK PRORAČUNA DOZVOLJENE STRUJNE OPTERETIVOSTI KABELA

Elektroenergetski kabeli predstavljaju specijalnu vrstu izoliranih vodiča kod kojih se, bez obzira na raznovrsnost, kao osnovni konstrukcijski elementi mogu izdvojiti: vodiči, izolacija, jezgra kabela, metalni omotač, mehanička zaštita. Pošto su spomenuti konstrukcijski elementi od različitih materijala, analiza zagrijavanja kabela se pojednostavljuje korištenjem odgovarajućih toplinskih otpora. Kod kabela se, ovisno o konstrukciji, mogu definirati sljedeći toplinski otpori:

R_{T1} – toplinski otpor izolacije, tj. termički otpor između vodiča i metalnog omotača (metalnog plašta ili električne zaštite),

R_{T2} – toplinski otpor sloja između metalnog omotača i mehaničke zaštite (armature),

R_{T3} – toplinski otpor omotača preko mehaničke zaštite.

Toplinski otpori odgovarajućih izolacijskih slojeva kabela, po jedinici dužine, mogu se u slučaju vodiča kružnog presjeka računati pomoću relacije:

$$R_{Ti} = \frac{\rho_{Ti}}{2\pi} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}$$

gdje je:

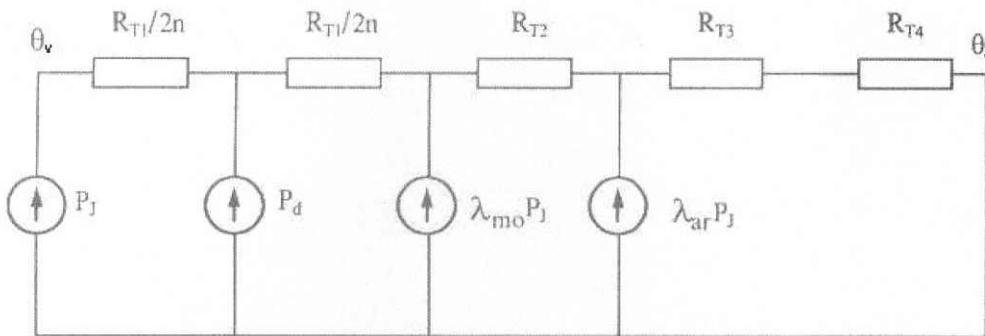
ρ_{Ti} – specifični toplinski otpor i -tog izolacijskog sloja,

d_i, d_{i+1} – unutarnji i vanjski presjek i -tog izolacijskog sloja.

Određivanje iznosa termički trajno dozvoljene struje zasniva se na činjenici da je temperatura izolacije, odnosno temperatura na površini vodiča jednaka trajno dozvoljenoj vrijednosti temperature. Zagrijavanje elemenata kabela je posljedica pojave gubitaka. Ti gubici su posljedica uspostavljene u vodiču i priključenog napona. Gubici koji su posljedica uspostavljene struje locirani su u vodiču, metalnom omotaču i mehaničkoj zaštiti. Sa termičkog aspekta ovi elementi kabela se, s obzirom da metali imaju veliku vrijednost koeficijenta toplinske vodljivosti, mogu promatrati kao izotermička tijela zanemarivog toplinskog otpora. Dielektrični gubici, koji su

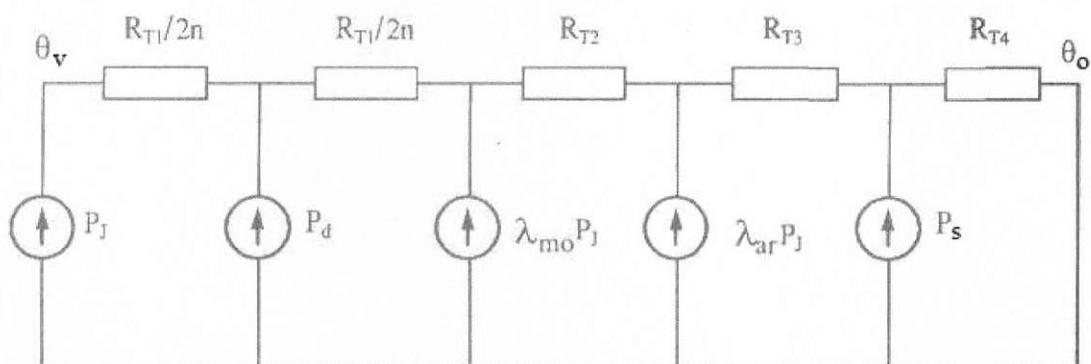
posljedica djelovanja napona, raspodijeljeni su po cijeloj površini izolacije, ali se može smatrati da su locirani na mjestu koje toplinski otpor izolacije dijeli na dva jednaka dijela.

Na osnovu iznesenog na slici 3.1 prikazana je ekvivalentna shema za toplinski proračun kabela.



Slika Ekvivalentna shema za toplinski proračun kabela *ploženog u zemlju*

Na slici je sa θ_v označena temperatura na površini vodiča (praktično temperatura vodiča, s obzirom na konstrukciju da se on može promatrati kao izotermičko tijelo), sa θ_o temperatura okoline, a sa n broj vodiča kabela. Za temperaturu okoline se uzima temperatura onog dijela okoline koji je dovoljno daleko od površine kabela, tako da ne osjeća bilo kakve temperaturne promjene u kabelu ili njegovoj okolini. Sa λ_{mo} i λ_{ar} označeni su faktori gubitaka u metalnom plaštu i armaturi kabela (predstavljaju odnose gubitaka snage u ovim elementima i gubitaka snage u vodiču kabela). Pored toplinskih otpora R_{T1} , R_{T2} , R_{T3} u nadomjesnoj shemi se pojavljuje i toplinski otpor R_{T4} koji predstavlja toplinski otpor okoline koja okružuje kabel.



Slika Ekvivalentna shema za toplinski proračun kabela postavljenog u zraku

trešnje dozvoljena struja opterećenja prema

a) položenog u zemlji

$$I_t = \sqrt{\frac{\Theta_v - \Theta_o - P_d (R_{TKd} + R_{Tx}) + \frac{\delta_{txi} - \delta_{tz}}{\delta_{tz}} \Delta \Theta_{xz}}{m R^1 (R_{TKi} + R_{Ty})}}$$

b) položenog u zraku

$$I_t = \sqrt{\frac{\Theta_v - \Theta_o - P_d (R_{TKo} + R_h) - P_s R_{Ty}}{m R^1 (R_{TKi} + R_h)}}$$

3.5.3 PRIMJER PRORAČUNA DOZVOLJENE OPTERETIVOSTI SREDNJENEPONSKOG KABELA STRUJNE

1. PODACI O KABELU

Energetski kabel s XLPE izolacijom i PE plaštom s vodonepropusnom izvedbom električne zaštite; XHE 49, XHE 49-A

Tipска ознака по HRN HD: N2XS(F)2Y, NA2XS(F)2Y

Standardi i norme: HRN HD 620 S1 Part 5C-1

IEC 60502-2

DIN VDE 0276 T 620

Nazivni napon: 35 kV

Materijal vodiča: aluminij (Al)

Presjek vodiča: 185 mm²



Slika 5.1: Elektroenergetski kabel XLPE, 35 kV

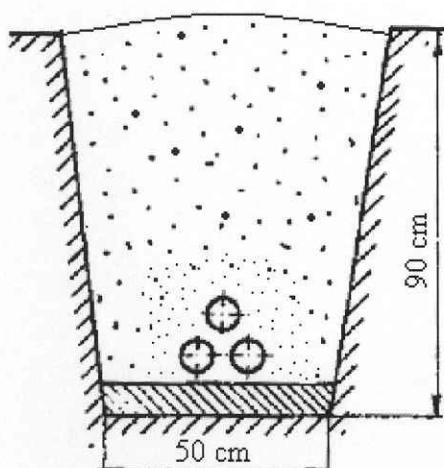
Tablica 5.1: Tehničke karakteristike 35 kV kabela

Presjek vodiča i el. zaštite	Promjer vodiča	Debljina izolacije	Promjer preko izolacije	Promjer kabela cca.	Masa kabela cca.		Najmanji polumjer savijanja
					bakar	aluminij	
mm ²	mm	mm	mm	mm	kg/km	kg/km	mm
1x35/16	7,2	8,8	27,8	36	1400	1180	540
1x50/16	8,3	8,8	28,9	37	1650	1350	550
1x70/16	10,3	8,8	30,9	39	1900	1450	580
1x95/16	11,3	8,8	31,9	41	2200	1600	610
1x120/16	12,7	8,8	33,3	43	2500	1750	640
1x150/25	14,1	8,8	34,7	45	3000	2050	670
1x185/25	15,7	8,8	36,3	47	3300	2150	700
1x240/25	18,0	8,8	38,6	49	4000	2500	730
1x300/25	20,0	8,8	40,6	52	4700	2850	780
1x400/35	23,8	8,8	44,4	56	5700	3200	840
1x500/35	26,7	8,8	47,3	58	6600	3500	870

Tablica 5.2: Dopušteno strujno opterećenje 35 kV kabela

Mjesto polaganja i vrsta vodiča	Zemlja				Zrak			
	Bakar		Aluminij		Bakar		Aluminij	
Način polaganja	paralelno	trokut	paralelno	trokut	paralelno	trokut	paralelno	trokut
Presjek vodiča	Strujno opterećenje							
mm ²	A							
35	200	195	155	150	230	205	170	160
50	245	230	195	185	280	250	220	195
70	305	290	235	225	350	310	270	240
95	760	350	280	270	400	370	330	290
120	415	390	315	300	470	425	370	330
150	445	430	355	335	530	490	420	380
185	490	490	390	385	595	555	470	435
240	565	570	455	450	695	655	545	515
300	630	640	510	510	780	730	630	590
400	720	730	580	585	910	860	710	700
500	805	830	650	655	1025	935	860	790

Elektroenergetski kabel s izolacijom od umreženog polietilena, nazivnog napona 35 kV, nazivnog presjeka aluminijskog vodiča 185 mm² te ukupnog vanjskog promjera kabela 47 mm biti će položen u kabelski rov prikazan na slici 5.2. Ukupno je predviđeno polaganje tri žile u jednu trojku, u obliku trokuta. Dopušteno strujno opterećenje predmetnog voda prema IEC 287 je 385 A, odnosno dopuštena prijenosna snaga 23,3 MVA.



Slika 5.2: Kabelski rov

2. PRORAČUN DOZVOLJENE STRUJNE OPTERETIVOSTI TOČNIM POSTUPKOM

Ulagani podaci za proračun su sljedeći:

- nazivni napon: 35 kV
- najviši napon mreže: 42 kV
- materijal vodiča: aluminij (Al)
- presjek vodiča: 185 mm²
- promjer vodiča: 15,7 mm
- debljina izolacije: 8,8 mm
- promjer preko izolacije: 36,3 mm
- promjer kabela cca.: 47 mm
- težina kabela cca.: 2150 kg/km
- najmanji polumjer savijanja: 700 mm
- dozvoljena temperatura vodiča: 90 °C
- maksimalna temperatura vodiča pri kratkom spoju: 250 °C
- dopuštena struja kratkog spoja ($t_{ks}=0,5$ s): 24,2 kA
- raspored polaganja: trokut
- dubina polaganja: 0,90 m
- temperatura tla: 20 °C
- električni otpor vodiča: 0,164 Ω/km
- specifični toplinski otpor tla: 1,0 K · m/W
- specifični toplinski otpor isušenog tla: 2,5 K · m/W
- faktor opterećenja: 0,7
- faktor gubitaka u metalnom plaštu: 0,9
- faktor gubitaka u armaturi kabela: 0,95

Proračun strujne opteretivosti izvršit će se pomoću relacije

$$I = \sqrt{\frac{\theta_v - \theta_z - P_d (R_{Tkd} + R_{Tx}) + \frac{\rho_{iz} - \rho_{tz}}{\rho_{tz}} \Delta \theta_{xz}}{n R' (R_{Tki} + R_{Txy})}}$$

gdje je:

θ_v – temperatura vodiča

$$\theta_p = 90^\circ C$$

θ_z – temperatura zemljišta

$$\theta_z = 20^\circ C$$

P_d – gubici u dielektriku (vodiču, metalnom omotaču i mehaničkoj zaštiti)

$$P_d = \omega C U_0^2 \tan \delta \quad [\text{W/m}]$$

pri čemu je:

U_0 – fazni napon kabela, kV

$$U_0 = 35 \text{ kV}$$

$\tan \delta$ – faktor gubitaka izolacije

$$\tan \delta = 0,004$$

ω – kružna frekvencija

$$\omega = 314,1592 \quad [1/\text{s}]$$

C – kapacitivnost kabela po jedinici duljine

$$C = \frac{\epsilon_r}{18 \ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} \quad [\text{F/m}]$$

gdje je:

ϵ_r – relativna dielektrična konstanta izolacijskog materijala

$$\epsilon_r = 2,5$$

D_i – promjer preko izolacije

$$D_i = 36,3 \text{ mm}$$

d_c – promjer preko vodiča

$$d_c = 15,7 \text{ mm}$$

odakle slijedi:

$$P_d = 0,2550 \text{ W/m}$$

R_{Tk} – fiktivni toplinski otpor za dielektrične gubitke

$$R_{Tk} = \frac{R_{T1}}{2n} + R_{T2} + R_{T3} \text{ [K}\cdot\text{m/W]}$$

pri čemu je:

R_{T1} – toplinski otpor izolacije, tj. termički otpor između vodiča i metalnog omotača (metalnog plašta ili električne zaštite)

$$R_{T1} = 3,5 \text{ K}\cdot\text{m/W}$$

R_{T2} – toplinski otpor sloja između metalnog omotača i mehaničke zaštite (armature)

$$R_{T2} = 6,0 \text{ K}\cdot\text{m/W}$$

R_{T3} – toplinski otpor omotača preko mehaničke zaštite

$$R_{T3} = 3,5 \text{ K}\cdot\text{m/W}$$

n – broj paralelno položenih kabela u istom prokopu

$$n = 1$$

odakle slijedi:

$$R_{Tk} = 11,25 \text{ K}\cdot\text{m/W}$$

ρ_{tzi} – specifični toplinski otpor isušenog sloja zemlje

$$\rho_{tzi} = 2,5 \text{ K}\cdot\text{m/W}$$

ρ_{tz} – specifični toplinski otpor zemlje

$$\rho_{tz} = 1,0 \text{ K}\cdot\text{m/W}$$

R_{Tx} – toplinski otpor isušenog zemljишta

$$R_{Tx} = \frac{\rho_{tzi}}{2\pi} \ln k \text{ [K}\cdot\text{m/W]}$$

pri čemu je:

k – faktor geometrije kabela

$$k = \frac{4h}{d_k}$$

gdje su:

h – dubina polaganja kabela

$$h = 0,90 \text{ m}$$

d_k – promjer kabela

$$d_k = 47 \text{ mm}$$

odakle slijedi:

$$R_{Tx} = 1,7262 \text{ K}\cdot\text{m/W}$$

$\Delta\theta_{xz}$ – pad temperature u neisušenom sloju zemljišta

$$\Delta\theta_{xz} = 15 + \frac{100(1-m)}{3}$$

pri čemu je:

m – faktor opterećenja

$$m = 0,7$$

odakle slijedi:

$$\Delta\theta_{xz} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

R' - fiktivni električni otpor vodiča

$$R' = 0,164 \cdot 10^{-3} \text{ [}\Omega/\text{m}\text{]}$$

R_{Tki} – fiktivni toplinski otpor za gubitke izazvane strujom

$$R_{Tki} = \frac{\frac{R_{T1}}{n} + (1 + \lambda_{mo}) R_{T2}}{1 + \lambda_{mo} + \lambda_{ar}} + R_{T3} \text{ [K}\cdot\text{m/W]}$$

pri čemu je:

λ_{mo} - faktor gubitaka u metalnom plaštu

$$\lambda_{mo} = 0,9$$

λ_{ar} - faktor gubitaka u armaturi kabela

$$\lambda_{ar} = 0,95$$

odakle slijedi:

$$R_{Tki} = 8,7280 \text{ K}\cdot\text{m/W}$$

R_{Txy} – toplinski otpor pri promjenjivom dijagramu opterećenja i isušivanju tla

$$R_{Txy} = \frac{\rho_{tz}}{\rho_{tz}} R_{Tzy} \text{ [K·m/W]}$$

pri čemu je:

R_{Tzy} - toplinski otpor zemljišta pri promjenjivoj dijagramu opterećenja

$$R_{Tzy} = \frac{\rho_{tz}}{2\pi} (\ln k + (\mu - 1) \ln k_y) \text{ [K·m/W]}$$

gdje je:

μ – faktor gubitaka

$$\mu = Am + (1 - A)m^2$$

A – konstanta

$$A = 0,2$$

k_y – faktor geometrije kabela

$$k_y \approx \frac{4h}{d_y}$$

d_y – presjek sloja zemljišta oko kabela koje prati promjenu opterećenja

$$d_y = \frac{0.103 + 0.246\sqrt{\mu}}{\rho_{tz}^{0.4} \sqrt{f_t}}$$

f_t - učestalost promjene dnevnog opterećenja

$$f_t = 1$$

odakle slijedi:

$$R_{Txy} = 1,2522 \text{ K·m/W}$$

Uvrstimo li sve dobivene podatke u relaciju dobijemo iznos dozvoljenog strujnog opterećenja za zadani elektroenergetski kabel:

$$I = \sqrt{\frac{90 - 20 - 0,2550(11,25 + 1,7262) + \frac{2,5-1}{1} 25}{1 \cdot 0,164 \cdot 10^{-3} (8,7280 + 1,2522)}} \text{ [A]}$$

$$I = 252,304 \text{ A}$$

3. PRORAČUN DOZVOLJENE STRUJNE OPTERETIVOSTI POJEDNOSTAVLJENIM POSTUPKOM

Dopušteno strujno opterećenje zadanog kabela, za raspored polaganja u trokut prema tablici 5.2 iznosi $I_n = 385 \text{ A}$, a izračunato je prema IEC 287.

Kako se uvjeti polaganja zadanog kabela razlikuju od uvaženih normom, moramo izvršiti postupak proračuna.

Ulazni podaci za proračun su sljedeći:

- nazivni napon: 35 kV
- materijal vodiča: aluminij (Al)
- presjek vodiča: 185 mm^2
- dozvoljena temperatura vodiča: $90 \text{ }^\circ\text{C}$
- raspored polaganja: trokut
- temperatura tla: $20 \text{ }^\circ\text{C}$
- dubina polaganja: 0,90 m
- specifični toplinski otpor isušenog tla: $2,5 \text{ K} \cdot \text{m/W}$

Potrebno je nazivno strujno opterećenje iz tablice množiti sa korekcijskim faktorima, tj. najveća struja kojom se smije trajno opteretiti kabel a da ne nastupi preveliko ugrijavanje iznosit će prema relaciji

$$I_t = k_n \cdot I_n \text{ [A]}$$

pri čemu je:

$$k_n = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4$$

gdje je:

k_1 - korekcijski faktor za različite temperature okoline

$$k_1 = 1,0$$

k_2 - korekcijski faktor za različite dubine polaganja

$$k_2 = 0,90$$

k_3 - korekcijski faktor za različiti broj kabela ili sistema u istom prokopu

$$k_3 = 1,0$$

k_4 - korekcijski faktor za različite specifične toplinske otpornosti tla

$$k_4 = 0,69$$

odakle slijedi:

$$k_n = 0,621$$

Uvrstimo li podatke u relaciju dobijemo iznos dozvoljenog strujnog opterećenja
za zadani elektroenergetski kabel:

$$I_t = 0,621 \cdot 385 \text{ [A]}$$

$$I_t = 239,085 \text{ A}$$

3.5.4 PRIMJER PRORAČUNA DOZVOLJENE OPTERETIVOSTI VISOKONAPONSKOG KABELA

1. PODACI O KABELU

Nazivni napon: 110 kV

Materijal vodiča: aluminij (Al)

Presjek vodiča: 1000 mm²



Slika 6.1: Elektroenergetski kabel XLPE, 110 kV

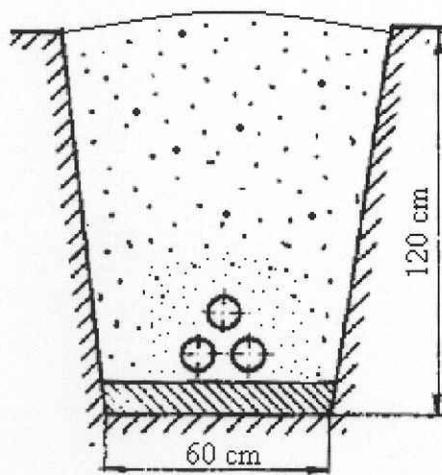
Tablica 6.1: Tehničke karakteristike 110 kV kabela

Presjek vodiča i el. zaštite	Promjer vodiča	Debljina izolacije	Promjer preko izolacije	Presjek ekrana	Promjer kabela	Masa kabela	
						aluminij	bakar
mm ²	mm	mm	mm	mm ²	mm	kg/m	kg/m
185	15,9	16	49,4	95	60	3,8	4,9
240	18	15	49,7	95	62	3,9	5,4
300	20,5	14	50	95	62	4,1	5,9
400	23,1	13	50,8	95	62	4,3	6,8
500	26,4	13	54,4	95	66	4,8	7,9
630	30,2	13	58	95	69	5,4	9,3
800	33,7	13	61,9	95	74	6,2	11,1
1000	37,9	13	66,1	95	79	7	13,2
1200	44	13	74	95	85	7,9	15,3
1400	49	13	79	95	93	9,1	17,8
1600	52	13	82	95	96	9,9	19,8
2000	56	13	86	95	100	11,2	23,6
2500	66	13	96	95	111	13,3	28,8
3000	72	13	102	95	117	15,2	33,8

Tablica 6.2: Dopušteno strujno opterećenje 110 kV kabela, izraženo u amperima (A)

Nazivni napon 110 – 500 kV, Al vodič, ekran 95 mm ²								
Presjek vodiča	Kabeli u zemlji							
	Paralelno polaganje				Polaganje u trokut			
	Prepleteni ekran	Uzemljena oba kraja	Prepleteni ekran	Uzemljena oba kraja	Prepleteni ekran	Uzemljena oba kraja	Prepleteni ekran	Uzemljena oba kraja
mm ²	65 °C	90 °C	65 °C	90 °C	65 °C	90 °C	65 °C	90 °C
300	415	495	365	445	395	475	385	460
400	470	565	410	500	450	540	435	525
500	540	645	455	555	515	620	490	595
630	620	740	500	610	590	710	550	670
800	700	845	540	665	670	805	610	745
1000	785	950	585	720	745	900	670	820
1200	850	1025	610	755	805	970	710	870
1400	910	1100	635	785	855	1040	745	915
1600	960	1165	655	815	900	1095	775	955
2000	1050	1275	685	855	975	1190	820	1015

Elektroenergetski kabel s izolacijom od umreženog polietilena, nazivnog napona 110 kV, nazivnog presjeka aluminijskog vodiča 1000 mm², bakrenog ekrana 95 mm² te ukupnog vanjskog promjera kabela 79 mm biti će položen u kabelski rov prikazan na slici 6.2. Ukupno je predviđeno polaganje tri žile u jednu trojku, u obliku trokuta. Kabel se uzemljuje obostrano. Dopušteno strujno opterećenje predmetnog voda prema IEC 287 je 820 A, odnosno dopuštena prijenosna snaga 156,2 MVA.



Slika 6.2: Kabelski rov

2. PRORAČUN DOZVOLJENE STRUJNE OPTERETIVOSTI TOČNIM POSTUPKOM

Ulagani podaci za proračun su sljedeći:

- nazivni napon: 110 kV
- najviši napon mreže: 123 kV
- materijal vodiča: aluminij (Al)
- presjek vodiča: 1000 mm²
- promjer vodiča: 37,9 mm
- debljina izolacije: 13 mm
- promjer preko izolacije: 66,1 mm
- presjek ekrana: 95 mm²
- promjer kabela cca.: 79 mm
- težina kabela cca.: 7 kg/m
- dozvoljena temperatura vodiča: 90 °C
- maksimalna temperatura vodiča pri kratkom spoju: 250 °C
- raspored polaganja: trokut
- električna zaštita: obostrano uzemljenje kabela
- dubina polaganja: 1,2 m
- temperatura tla: 20 °C
- električni otpor vodiča: 0,0291 Ω/km
- specifični toplinski otpor tla: 1,0 K · m/W
- specifični toplinski otpor isušenog tla: 2,5 K · m/W
- faktor opterećenja: 0,7
- faktor gubitaka u metalnom plaštu: 0,9
- faktor gubitaka u armaturi kabela: 0,95

Proračun strujne opteretivosti izvršit će se pomoću relacije

$$I = \sqrt{\frac{\theta_v - \theta_z - P_d (R_{Tkd} + R_{Tx}) + \frac{\rho_{tzl} - \rho_{tz}}{\rho_{tz}} \Delta \theta_{xz}}{nR' (R_{Tki} + R_{Txy})}}$$

gdje je:

θ_v – temperatūra vodiča

$$\theta_p = 90^\circ C$$

θ_z – temperatūra zemljišta

$$\theta_z = 20^\circ C$$

P_d – gubici u dielektriku (vodiču, metalnom omotaču i mehaničkoj zaštiti)

$$P_d = \omega C U_0^2 \tan \delta \quad [\text{W/m}]$$

pri čemu je:

U_0 – fazni napon kabela, kV

$$U_0 = 110 \text{ kV}$$

$\tan \delta$ – faktor gubitaka izolacije

$$\tan \delta = 0,001$$

ω – kružna frekvencija

$$\omega = 314,1592 \quad [1/\text{s}]$$

C – kapacitivnost kabela po jedinici duljine

$$C = \frac{\epsilon_r}{18 \ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} \quad [\text{F/m}]$$

gdje je:

ϵ_r – relativna dielektrična konstanta izolacijskog materijala

$$\epsilon_r = 2,5$$

D_i – promjer preko izolacije

$$D_i = 66,1 \text{ mm}$$

d_c – promjer preko vodiča

$$d_c = 37,9 \text{ mm}$$

odakle slijedi:

$$P_d = 0,9492 \text{ W/m}$$

$R_{T_{kd}}$ – fiktivni toplinski otpor za dielektrične gubitke

$$R_{T_{kd}} = \frac{R_{T_1}}{2n} + R_{T_2} + R_{T_3} \text{ [K·m/W]}$$

pri čemu je:

R_{T_1} – toplinski otpor izolacije, tj. termički otpor između vodiča i metalnog omotača (metalnog plašta ili električne zaštite)

$$R_{T_1} = 3,5 \text{ K·m/W}$$

R_{T_2} – toplinski otpor sloja između metalnog omotača i mehaničke zaštite (armature)

$$R_{T_2} = 6,0 \text{ K·m/W}$$

R_{T_3} – toplinski otpor omotača preko mehaničke zaštite

$$R_{T_3} = 3,5 \text{ K·m/W}$$

n – broj paralelno položenih kabela u istom prokopu

$$n = 1$$

odakle slijedi:

$$R_{T_{kd}} = 11,25 \text{ K·m/W}$$

ρ_{tzi} – specifični toplinski otpor isušenog sloja zemljišta

$$\rho_{tzi} = 2,5 \text{ K·m/W}$$

ρ_{tz} – specifični toplinski otpor zemlje

$$\rho_{tz} = 1,0 \text{ K·m/W}$$

R_{Tx} – toplinski otpor isušenog zemljišta

$$R_{Tx} = \frac{\rho_{tzi}}{2\pi} \ln k \text{ [K·m/W]}$$

pri čemu je:

k – faktor geometrije kabela

$$k = \frac{4h}{d_k}$$

gdje su:

h – dubina polaganja kabela

$$h = 1,2 \text{ m}$$

d_k – promjer kabela

$$d_k = 79 \text{ mm}$$

odakle slijedi:

$$R_{Tx} = 1,6341 \text{ K}\cdot\text{m/W}$$

$\Delta\theta_{xz}$ – pad temperature u neisušenom sloju zemljišta

$$\Delta\theta_{xz} = 15 + \frac{100(1-m)}{3}$$

pri čemu je:

m – faktor opterećenja

$$m = 0,7$$

odakle slijedi:

$$\Delta\theta_{xz} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

R' - fiktivni električni otpor vodiča

$$R' = 0,0291 \cdot 10^{-3} \text{ } [\Omega/\text{m}]$$

R_{Tki} – fiktivni toplinski otpor za gubitke izazvane strujom

$$R_{Tki} = \frac{\frac{R_{T1}}{n} + (1 + \lambda_{mo}) R_{T2}}{1 + \lambda_{mo} + \lambda_{ar}} + R_{T3} \text{ [K}\cdot\text{m/W]}$$

pri čemu je:

λ_{mo} - faktor gubitaka u metalnom plaštu

$$\lambda_{mo} = 0,9$$

λ_{ar} - faktor gubitaka u armaturi kabela

$$\lambda_{ar} = 0,95$$

odakle slijedi:

$$R_{Tki} = 8,7280 \text{ K}\cdot\text{m/W}$$

R_{Txy} – toplinski otpor pri promjenjivom dijagramu opterećenja i isušivanju tla

$$R_{Txy} = \frac{\rho_{tz}}{\rho_{tz}} R_{Tzy} \text{ [K·m/W]}$$

pri čemu je:

R_{Tzy} - toplinski otpor zemljišta pri promjenjivoj dijagramu opterećenja

$$R_{Tzy} = \frac{\rho_{tz}}{2\pi} (\ln k + (\mu - 1) \ln k_y) \text{ [K·m/W]}$$

gdje je:

μ – faktor gubitaka

$$\mu = Am + (1 - A)m^2$$

A – konstanta

$$A = 0,2$$

k_y – faktor geometrije kabela

$$k_y \approx \frac{4h}{d_y}$$

d_y – presjek sloja zemljišta oko kabela koje prati promjenu opterećenja

$$d_y = \frac{0.103 + 0.246\sqrt{\mu}}{\rho_{tz}^{0.4} \sqrt{f_t}}$$

f_t - učestalost promjene dnevnog opterećenja

$$f_t = 1$$

odakle slijedi:

$$R_{Txy} = 0,9571 \text{ K·m/W}$$

Uvrstimo li sve dobivene podatke u relaciju dobijemo iznos dozvoljenog strujnog opterećenja za zadani elektroenergetski kabel:

$$I = \sqrt{\frac{90 - 20 - 0,9492(11,25 + 1,6341) + \frac{2,5-1}{1} 25}{1 \cdot 0,0291 \cdot 10^{-3} (8,7280 + 0,9571)}} \text{ [A]}$$

$$I = 581,408 \text{ A}$$

3. PRORAČUN DOZVOLJENE STRUJNE OPTERETIVOSTI POJEDNOSTAVLJENIM POSTUPKOM

Dopušteno strujno opterećenje zadanog kabela, za raspored polaganja u trokut prema tablici 6.2 iznosi $I_n = 820 \text{ A}$, a izračunato je prema IEC 287.

Kako se uvjeti polaganja zadanog kabela razlikuju od uvaženih normom, moramo izvršiti postupak proračuna.

Ulazni podaci za proračun su sljedeći:

- nazivni napon: 110 kV
- materijal vodiča: aluminij (Al)
- presjek vodiča: 1000 mm^2
- dozvoljena temperatura vodiča: 90°C
- raspored polaganja: trokut
- temperatura tla: 20°C
- dubina polaganja: 1,2 m
- specifični toplinski otpor isušenog tla: $2,5 \text{ K} \cdot \text{m/W}$

Potrebno je nazivno strujno opterećenje iz tablice množiti sa korekcijskim faktorima, tj. najveća struja kojom se smije trajno opteretiti kabel a da ne nastupi preveliko ugrijavanje iznosit će prema relaciji

$$I_t = k_n \cdot I_n \quad [\text{A}]$$

pri čemu je:

$$k_n = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4$$

gdje je:

k_1 - korekcijski faktor za različite temperature okoline

$$k_1 = 1,0$$

k_2 - korekcijski faktor za različite dubine polaganja

$$k_2 = 0,96$$

k_3 - korekcijski faktor za različiti broj kabela ili sistema u istom prokopu

$$k_3 = 1,0$$

k_4 - korekcijski faktor za različite specifične toplinske otpornosti tla

$$k_4 = 0,69$$

odakle slijedi:

$$k_n = 0,6624$$

Uvrstimo li podatke u relaciju dobijemo iznos dozvoljenog strujnog opterećenja za zadani elektroenergetski kabel:

$$I_t = 0,6624 \cdot 820 \text{ [A]}$$

$$I_t = 543,168 \text{ A}$$

3.6

POLAGANJE I MONTAŽA KABELSKIH VODOVA

- OPĆE ODREĐEDE O POLAGANJU
- TEHNOLOGIJA POLAGANJA
- KABELSKI RAV NA SLOBODNIM POVRIŠINAMA
- KRIŽANJA KABELA
- PARALELNO VODENJE KABELA
- POLAGANJE NA KOŠIM I STENIM TERENIMA
- PRVEČAS KABELSKOG VODA U NADZELJNIM
- PODMORSKI KABELI
- SPĐUDANJE I ZDVRŠAVANJE KABELA
- ISPITIVANJA KABELA

KABELSKI PRIBOR

KABELSKI PRIBOR - NUŽNI SASTAVNI ELEMENTI I APARATI POTREBNI ZA POGON KABELA

- a) KABELSKI ZAVRŠETAK
- b) KABELSKE SPOJNICE
- c) PRIBOR ZA SPAJANJE VODIČA

1. KABELSKI ZAVRŠETAK - GARNITURA koja krej jednožilnog ili višežilnog kabela električki, mehanički i ako je potrebno hidraulički ili pneumatski završava i omogućuje prikupljanje na el. en. postrojenja

- a) KAB. ZAVRŠETAK ZA UNUTRAŠNJI MONTAŽU
- b) KAB. ZAVRŠETAK ZA VANJSKU MONTAŽU
- c) UTIČNI PRIBOR
 - APODATNA VODNICA
 - KABELSKI UTIKAC
 - RASPOVŠIVI ZAVRŠETAK

2. KABELSKA SPOJNICA - GARNITURA koja neputobno spaja dva ili više kabela.

- a) RAYNA SPOJNICA
- b) PRIJELAZNA SPOJNICA
- c) ODSEJEPNA SPOJNICA
- d) ZAVRŠNA SPOJNICA

3. PRIBOR ZA SPAJANJE VODIČA

- a) SPOJNA ČAHURA - smjži za električno spajanje vodiča
 - ČAHURA ZA LEMSENJE
 - ČAHURA ZA PREŠANJE
 - VIJČANA ČAHURA
- b) KABELSKA STOPICA - smjži za električno završavanje vodiča
 - STOPICA ZA LEMSENJE
 - STOPICA ZA PREŠANJE
 - VIJČANA STOPICA

OZNAČIVANJE KABELA

OZNAKA KABELA :

1. KONSTRUKCIJONA OZNAKA - vrsta materijala izolacije i plasti, osobine konstrukcije
2. BROJ ŽILA X NAZIVNI PRESJEK VODIČA U mm^2
3. OZNAKA ZA OBLIK I VRSTU VODIČA
4. NAZIVNI PRESJEK EL. ZAŠTITE
5. NAZIVNI NAPON U_0/U [KV]

PRIMJER : XHE 49-A 1x185 RM/25 12/20 KV

LITERATURA:

1. MAREK I KRELO OŽEGOVIĆ:
ELEKTRIČNE ENERGETSKE TREŽE I,
FESE ŠPUT
2. KARABOL I WEB STRANICE PROIZVODA
ELKA, ABB