

9. savjetovanje HRO CIGRÉ
Cavtat, 8. - 12. studenoga 2009.

Antun Mateljan, dipl.ing.el.
Prompt d.o.o. Zagreb
prompt1@zg.t-com.hr

Josip Bošnjak, dipl.ing.el.
ENCRON d.o.o. Zagreb
josip.bosnjak@encron.hr

IZBOR I KONSTRUKCIJA 110 kV KABELA I KABELSKOG SPOJNOG PRIBORA

SAŽETAK

Kabeli naponskog nivoa 110 kV postaju sve više potreba obzirom na stalni porast konzuma koncentriranog na malom području (urbane sredine).

Ponegdje je potreba za uvođenje kabela naponskog nivoa 110 kV rezultat prirodnih prepreka, a sve češće zaštita čovjekove okoline i nemogućnost pronalaženja trasa za nadzemne vodove 110 kV.

Kabeli srednjeg napona već odavno su standard za povezivanje transformatorskih stanica, međutim i kabeli naponskog nivoa 110 kV postaju kabeli distributivnog tipa te se kod nas polažu za povezivanje transformatorskih stanica 110/x kV u gradskim sredinama kao i kod povezivanja transformatorskih stanica smještenih na otocima.

Kod izbora tipskog kabela za 110 kV distributivne mreže nekoliko je elemenata presudno.

Prvenstveno je važno znati kakve su perspektivne potrebe konzuma i kakvi se uvjeti postavljaju za kabel.

Pravilni izbor kabela 110 kV i pripadajućeg kabelskog spojnog pribora je vrlo važan čimbenik u izgradnji 110 kV distributivne mreže.

Ključne riječi: distributivni kabel 110 kV, elektromagnetska zaštita, feromagnetska trasa, dielektrični gubici

SELECTION AND CONSTRUCTION OF HIGH VOLTAGE CABLE AND CABLES ACCESSORIES

SUMMARY

Cables of 110 kV voltage level are becoming more necessary considering the permanent increase of consumption concentrated on a relatively small area (urban environment).

In some cases, the need for the introduction of cable voltage level 110 kV is a result of natural obstacles, and often the protection of human environment and the impossibility of finding the route for the overhead power lines of 110 kV.

Medium level voltage cables have been the standard for connecting substations for long time, however, cables of 110 kV voltage level are becoming a distributive type and are used to connect substations of 110 / x kV in urban areas as well as in connecting substations located on islands.

There are several important elements in selecting the cable type for 110 kV distribution network.

Primarily, it is important to know the future needs of consumption and to know the conditions set for the cable.

Adequate choice of cables of 110 kV voltage level and cable accessories is the most important factor in developing the 110 kV distribution network.

Key words: distribution cable 110 kV, electromagnetic protection, ferromagnetic raceway, dielectric losses

1. UVOD

1.1. Opis problema

Zbog sve veće urbanizacije koncentracije i povećanja opterećenja na jednom mjestu javlja se potreba za izgradnjom elektroenergetskih distributivnih kabela 110 kV kao veze između transformatorskih stanica 110/x kV smještenim u centre konzuma.

U našoj zemlji izbor kabela 110 kV kao i kablenskog pribora bazira se na usporedbi tehnoloških i ekonomskih karakteristika kabela 110 kV i kablenskog pribora proizvođača iz inozemstva jer za sada u našoj zemlji ne postoje proizvođači kabela i kablenskog pribora 110 kV.

Generalno gledano, izbor kabela mora biti takav da se može ostvariti maksimalna prijenosna moć kabela uz što manje gubitke. To je u praksi teško ostvariti ali ipak određenim zahvatima na samom kabeu kao i načinu polaganja kabela uz određena spajanja oklopa kabela, gubici se mogu smanjiti na ekonomski prihvatljivi minimum.

Nadalje, problem polaganja kabela 110 kV kroz gradske četvrti javlja se u obliku utjecaja elektromagnetskog polja kabela na okoliš te kada i kako se treba štititi od njih. Ne manji problem je i polaganje kabela kroz uske koridore između postojeće infrastrukturne mreže. U ovom referatu ograničit ćemo se na kabele napona 110 kV u XLPE izvedbi i načine rješavanja gore navedenih problema.

1.2. Primjena kabela u elektroenergetskim sistemima

Kabeli su vrlo važni dijelovi elektroenergetskog sustava. Koriste se za različite namjene ali sa zajedničkim ciljem a to je pouzdan i siguran prijenos električne energije na određenu udaljenost. U načelu najčešće se koristi šest različitih slučajeva primjene kabela u visokonaponskim (HV) i ekstra visokonaponskim (EHV) elektroenergetskim sustavima i to kao:

1. Generatorski priključci – za visoka i konstantna opterećenja.
2. Priključak pomoćnih transformatora – transformatori se uključuju u slučaju preopterećenja osnovnih transformatora i priključeni su za cijelo vrijeme trajanja preopterećenja –ostalo vrijeme su isključeni.
3. Priključak glavnih transformatora – približno konstantno opterećenje
4. Priključak visokonaponskog nadzemnog voda – prijelaz nadzemnog voda u kablenski vod
5. Kablenski sustav u mješovitim mrežama
6. Priključni kabel između dviju transformatorskih stanica

1.3. Tip i konstrukcija kabela

Kabeli s izolacijom u XLPE su izvedeni od umreženog polietilena i u upotrebi su od 1960 godine do danas. U početku su bili izrađivani za napone 10 kV i 20 kV ali danas se koriste za napone do 500 kV. XLPE kabeli imaju male dielektrične gubitke pa tako i manjenje ukupne gubitke.

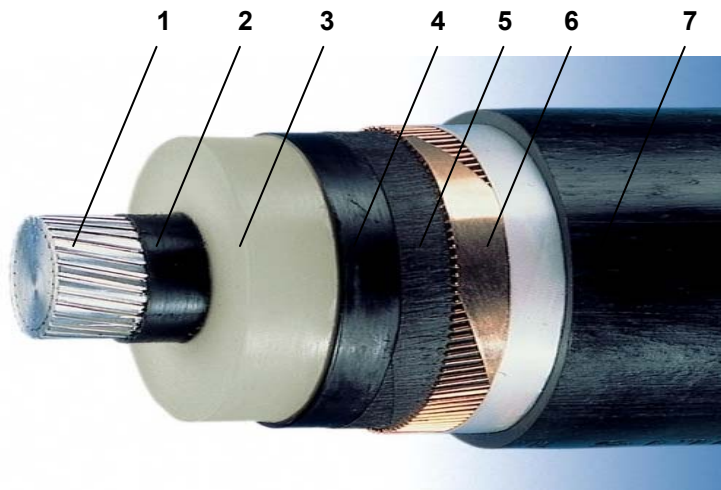
Maksimalnu prijenosnu dužinu kabela određuje kapacitivna struja nabijanja kabela.

Maksimalni napon, prijenosna moć i maksimalna dužina prijenosa električne energije za različite tipove kabela s obzirom na izolaciju dana je u Tablici 1.

Tablica 1. Maksimalni napon, prijenosna moć i maksimalna dužina prijenosa električne energije

Tip kabela	Maksimalni napon	Prijenosna moć	Dužina prijenosa električne energije
XLPE kabel (AC, 3 kabela)	500 kV	1200 MVA	60 – 100 km
Uljni kabel (AC, 3 kabela)	500 kV	1200 MVA	≈ 60 km
Uljni kabel (DC, 1 kabel)	600 kV	1000 MW	≈ 60 km
Impregnirajuća masa (DC, 1 kabel)	500 kV	1000 MW	neograničeno
HVDC polimer (DC, 1 kabel)	150 kV	300 MW	neograničeno

Sastavni dijelovi kabela: vodič, zaslon vodiča, izolacija, zaslon iznad izolacije, vodobubriva traka, električni oklop sukani od bakrenih žica ili olova i vanjski plašt najčešće od PE-a ili HDPE, a prikazani su na slici 1.



Slika 1. Konstrukcija kabela 110 kV (1-vodič, 2-zaslon vodiča, 3-izolacija, 4-zaslon iznad izolacije, 5-vodobubrivna traka za uzdužno brtvljenje, 6-električni oklop, 7-vanjski plašt s aluminijskom folijom za poprečno brtvljenje)

1.4. Funkcije pojedinih elemenata kabela

Vodič

Vodič kabela je prilagođen elektromehaničkim zahtjevima. Kabeli ovog tipa imaju okrugli vodič od sukanih aluminijskih odnosno bakrenih žica. Izvedba vodiča mora biti kvalitetna, jer je potrebno postići visoki stupanj ispunje. Potrebno je postići potrebnu elastičnost, ujednačenost profila. Za kabele iste prijenosne moći bakar je puno kvalitetnije rješenje i treba dobro razmotriti argumente za i protiv. Najvažniji faktor protiv bakra je dakako cijena pošto je skuplji od aluminijskog. Vodič presjeka iznad 1000 mm² izvodi se sektorski u svrhu reduciranja skin efekta.

Zaslon vodiča i zaslon iznad izolacije

Zaslon vodiča i zaslon iznad izolacije je poluvodljivi sloj se postavlja iznad vodiča i iznad izolacije. Često se susreće pojam ekran vodiča odnosno izolacije. Najvažnija funkcija ovog sloja je izjednačavanje električnog polja. Prilikom izvedbi vodiča moguće je postojanje neravnina i šiljaka koji bi ukoliko bi bili u izolacionom materijalu mogli izazvati razaranje izolacije, a ovo bi moglo imati za krajnju posljednicu proboj. Debljina ovog sloja nije velika, reda veličine milimetra. Sam postupak nanošenja poluvodljivog sloja ovisan je o tehnološkom postupku izrade kabela.

Zahtjevi za visoku preciznost i kvalitetu su identični onima kao i za ostale dijelove kabela obzirom da svaka nehomogenost, nečistoća, može imati za posljednicu proboj. Bitan tehnološki zahtjev je da postoji dobro prijanjanje između slojeva.

Izolacija

Kada se postupkom polimerizacije uspio dobiti iz polietilena termoplastični polietilen odnosno polietilen visoke gustoće (PE, HDPE) ili daljnjim postupkom kemijskog umreženja (peroksid, pritisak, temperatura) odnosno energetskim zračenjem umreženi polietilen (XPE) dobili su se materijali koji su pokazali dobra izolacijska svojstva.

Ispitivanja u institutu Waltz Mill dala su izvanredne rezultate. Problemi su se javljali najčešće na kabelskom priboru. Međutim važno je napomenuti da su svi uzroci proboja fiksirani na jednom mjestu jer je izolacija kruta.

Problemu proboja posvećena je velika pažnja u literaturi, pa se može naći mnogo članaka koji obrađuju taj problem.

Postupak nanošenja izolacije moguć je u kosim i vertikalnim ekstruderima koji omogućavaju brizganje sva tri sloja odjednom, tzv. postupkom trostruke ekstruzije (zaslon vodiča, izolacija izaslon izolacije). Sam proizvodni proces mora osigurati besprijekornu čistoću i kvalitetu.

Za ispravan pogon kabela, treba između ostaloga, uzeti u obzir i nekoliko važnih elemenata koji mogu dovesti do električnog proboja kao npr. nečistoće u izolaciji, nehomogenost izolacije, prisustvo vode u kabeu, postojanje šupljina u izolaciji i s tim u svezi tzv. *treeing efekt* – efekt grančica. Praksa je pokazala da se može računati na 0,03 proboja godišnje za kabele 110 i 220 kV što je ekvivalentno jednom proboju u 30 godina.

Električni oklop kabela

Električni oklop kabela sam po sebi ne bi bio toliko značajan dio kabela da ne rješava probleme polja kabela, a u slučaju kratkog spoja je odgovoran za raspodjelu struja. Električni oklop ovog tipa kabela je najčešće izveden od bakrenih žica sukanih oko kabela.

Obzirom na termička opterećenja, električni oklop mora biti tako dimenzioniran da se ne zagrije iznad maksimalno dozvoljene temperature pod utjecajem struje jednogpolnog i dvopolnog kratkog spoja. Proizvođači kabela obično odabiru nešto veći presjek električnog oklopa za odgovarajući presjek kabela tako da je danas već manje -više standardiziran presjek od 95 mm² Cu koji se u praksi pokazao dovoljnim za kabele naponskog nivoa 110 kV.

Vanjski plašt

Ovdje se podrazumijevaju svi dijelovi kabela koji dolaze iznad električnog oklopa kabela. Najjednostavniji i najstariji tip plašta je PVC plašt koji ima dobre izolacijske i vatrootporne osobine, no ponekad je potrebno zbog dodatne zaštite kabela (agresivna okolina, mogućnost mehaničkog oštećenja) kombinirati i druge elemente kao npr.: čelični oplet, valovite aluminijske cijevi i sl. Zahtjevi na plašt su dobar kontakt s okolinom zbog električnih i toplinskih razloga. Danas se uglavnom umjesto PVC plašta koristi PE (polietilen) ili HDPE (polietilen visoke gustoće) plašt. Zbog lakšeg ispitivanja vanjskog plašta kabela a prije njegovog zasipavanja pijeskom, vanjski plašt može dodatno sadržavati po vanjskom obodu i tanki vodljivi sloj (debljine 0,2 mm) koji služi kao vanjska elektroda kod naponskog ispitivanja plašta kabela.

1.5. Vrijednosti struja za dimenzioniranje XLPE kabela

Minimalni presjek vodiča XLPE kabela mora biti takav da omogućava potrebnu prijenosnu moć sustava. Gubici u vodiču se smanjuju korištenjem vodiča većeg presjeka.

Gubici kod opterećenog kabela su u osnovi omski gubici u vodiču i električnom zaslonu. Maksimalna temperatura vodiča XLPE kabela kod normalnog opterećenja je 90°C, no kako bi ipak zadržali neku rezervu opterećenja, smanjili gubitke te izbjegli moguću termičku nestabilnost kabela uslijed isušivanja okolne zemlje, poželjno je ograničiti temperaturu zagrijavanja vodiča na približno 65 °C.

Kada kabel nije opterećen već samo u praznom hodu, omskih gubitaka nema, no prisutni su dielektrični gubici u XLPE izolaciji. Dielektrični gubici u XLPE izolaciji ovise o nazivnom naponu, a razmatraju se kod nazivnih napona iznad 100 kV.

Dielektrični gubici su manji kod kabela s XLPE izolacijom nego kod kabela izoliranih EPR-om.

Trajne struje za dimenzioniranje trožilnih kabela prikazane su u Tablici 2, a za jednožilne u Tablici 3.

Vrijednost trajnih struja za dimenzioniranje kabele preuzete su iz dostupnih podataka proizvođača kabela.

Tablica 2. Vrijednosti struja za dimenzioniranje trožilnih kabela, izražene u amperima (A)

Nazivni napon do 220 kV								
Presjek kabela mm ²	Aluminijski vodič				Bakreni vodič			
	U zemlji		U zraku		U zemlji		U zraku	
	65 °C	90 °C	65 °C	90 °C	65 °C	90 °C	65 °C	90 °C
630	525	635	510	705	640	785	635	890
800	585	715	585	810	705	865	715	1000
1000	645	785	655	915	755	935	785	1100

Tablica 3. Vrijednosti struja za dimenzioniranje jednožilnih kabela, izražene u amperima (A)

Nazivni napon 110-500 kV, aluminijski vodič – električni oklop (EO) 95 mm ²								
Presjek vodiča	Kabeli u zemlji							
	Paralelno polaganje				Polaganje u trokut			
	Prepleteni EO		Uzemljena oba kraja		Prepleteni EO		Uzemljena oba kraja	
mm ²	65°C	90°C	65°C	90°C	65°C	90°C	65°C	90°C
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
Presjek vodiča	Kabeli u zraku							
	Paralelno polaganje				Polaganje u trokut			
	Prepleteni EO		Uzemljena oba kraja		Prepleteni EO		Uzemljena oba kraja	
mm ²	65°C	90°C	65°C	90°C	65°C	90°C	65°C	90°C
630	730	975	595	820	640	865	605	830
800	840	1130	660	910	735	995	685	940
1000	960	1295	720	1005	830	1135	765	1055

2. GUBICI U KABELU

Dozvoljeno strujno opterećenje

Dio energije koju kabel provodi pretvara se u samom kabelu u toplinsku energiju. Ta energija uvjetuje povećanje temperature. Na izvjesnoj temperaturi uspostavlja se kod određene struje toplinska ravnoteža između razvijene toplinske energije u kabelu i odvođenja topline, do koje dolazi zbog činjenice da je kabel smješten u mediju niže temperature od temperature vodiča u pogonu.

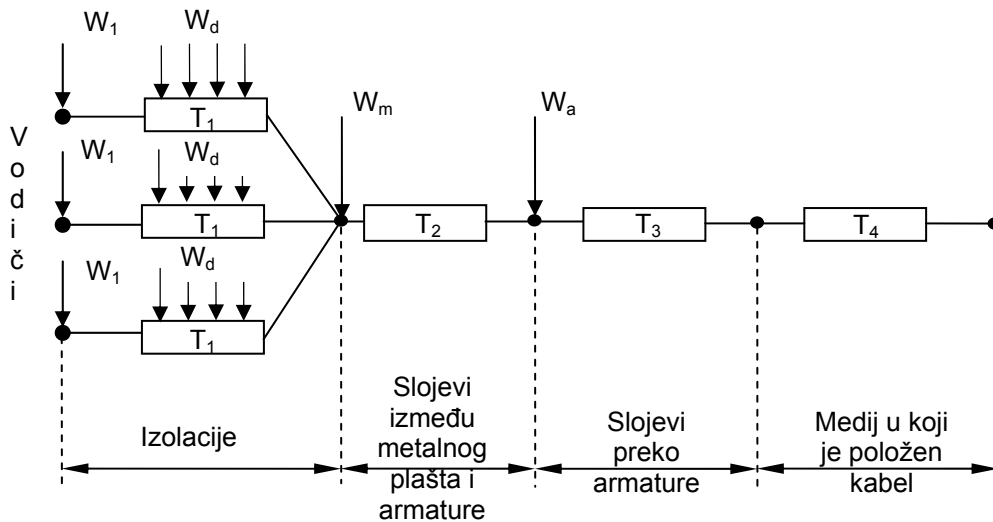
Odvođenje topline ovisi o konstrukciji i dimenzijama kabela, o temperaturi medija u koji je kabel položen i o toplinskom otporu tog medija.

U normalnom pogonu kabela toplina se razvija u slijedećim slojevima (idući od osi kabela):

- vodiču,
- izolaciji,
- vodljivim slojevima (zaslonu),
- metalnom oklopu i
- armaturi.

Kabeli za istosmjernu struju nemaju gubitke koje izaziva izmjenično elektromagnetsko polje. Prema tome može se zaključiti da količina razvijene topline i mjesto njenog razvijanja ovise o:

- konstrukciji kabela,
- vrsti električne energije (istosmjerna ili izmjenična),
- visini napona i struje



Slika 2. Ekvivalentna toplinska shema kabela

Slika 2. prikazuje ekvivalentnu toplinsku shemu kabela a pojedine oznake na njoj imaju slijedeće značenje:

- T_1 - toplinski otpor izolacije (*toplinski otpor između vodiča i plašta*) (K·m/W)
- T_2 - toplinski otpor između metalnog plašta i armature (K·m/W)
- T_3 - toplinski otpor sloja preko armature (*toplinski otpor vanjskog plašta po jedinici dužine*) (K·m/W)
- T_4 - toplinski otpor medija u koji je kabel položen (*toplinski otpor po jedinici dužine kabela između površine kabela i okolnog tla*) (K·m/W)
- W_1 - toplina razvijena u jednom vodiču, po jedinici dužine, (*Jouleovi gubici*) (W/m)
- W_d - toplina razvijena u izolaciji po jednom vodiču, po jedinici dužine, (*gubici u dielektriku*) (W/m)
- W_m - toplina razvijena u vodljivim slojevima i metalnom plaštu, po jednom vodiču, po jedinici dužine (W/m)
- W_a - toplina razvijena u armaturi, po jednom vodiču, po jedinici dužine (W/m)

Najveća struja vodiča a koju može trajno izdržati kabel određene konstrukcije, položen u mediju s toplinskim otporom T_4 , možemo izvesti iz prethodne jednadžbe i ona iznosi:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta \theta_{\max} - W_d \left[\frac{1}{2} T_1 + n (T_2 + T_3 + T_4) \right]}{R \left[T_1 + n T_2 (1 + \lambda_1) + n (T_3 + T_4) (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right]}}$$

gdje je:

$\Delta \theta_{\max}$ - najveći dozvoljeni porast temperature

n- broj žila u kabeu (n=1 za 1-žilne kabele, n=3 za 3-žilne kabele)

Proračun gubitaka

U pogonu kabela postoje dvije vrste gubitaka:

- Joulovi gubici ovisni o struji,
- Dielektrični gubici ovisni o naponu.

Joulovi gubici

Joulovi gubici koji nastaju protjecanjem struje kroz vodič kabela mogu se izračunati kako je prije navedeno u ekvivalentnoj toplinskoj shemi kabela prema formuli:

$$W_1 = I^2 R$$

I - struja kroz vodič,

R - ukupni djelatni otpor vodiča kabela, po jedinici dužine, na maksimalnoj radnoj temperaturi (Ω/m).

Dielektrični gubici

Dielektrični gubici po jedinici dužine u svakoj fazi računaju se prema formuli:

$$W_d = \omega C U_o^2 \tan \delta \text{ (W/m)}$$

gdje su:

ω = $2\pi f$ (1/s),

C - kapacitet kabela po jedinici dužine (F/m),

U_o - napon prema zemlji (V) i

$\tan \delta$ - faktor gubitaka u izolaciji kabela (dielektrik)

U tablici 4. prikazani su maksimalne struje i ukupni gubici kabela 110 kV AXLJ 1x1000/95 mm² u ovisnosti o načinu uzemljenja električnog oklopa i temperaturnih otpora tla dobiveni računskom kontrolom kabela pri maksimalnoj radnoj temperaturi.

Tablica 4. Maksimalne struje, ukupni gubici i temperature kabela 110 kV AXLJ 1x1000/95 mm² u ovisnosti o načinu uzemljenja električnog oklopa i temperaturnih otpora tla

Opis	Polaganje u trokut				Polaganje u ravninu			
	0,5	0,8	1	1,2	0,5	0,8	1	1,2
Temperatura otpora tla (K.m/W)	0,5	0,8	1	1,2	0,5	0,8	1	1,2
Temperatura tla (°C)	20							
Jednostrano uzemljenje oklopa								
Maksimalna struja (A)	1027	867	794	736	1057	894	819	761
Ukupni gubici (W/m)	43,27	30,79	25,82	22,24	44,99	32,19	27,06	23,34
Inducirani napon oklopa (V/km)	50	40	40	40	100	90	80	80
Dvostrano uzemljenje oklopa								
Maksimalna struja (A)	997	839	768	712	954	799	730	676
Ukupni Gubici (W/m)	44,24	31,27	26,16	22,49	49,53	34,65	28,87	24,75

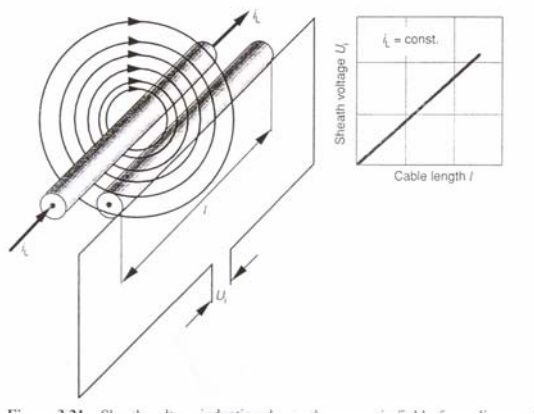
3. INDUCIRANI NAPONI I CIRKULACIJSKE STRUJE U ELEKTRIČNOM OKLOPU KABELA

3.1. Općenito

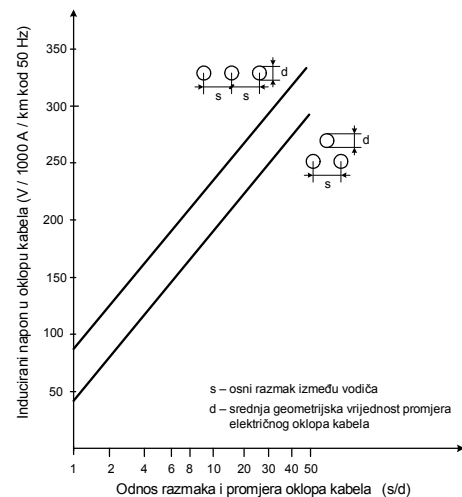
Kao što je to u toč. 1.4 već rečeno, visokonaponski kabeli svojom konstrukcijom sadrže između ostaloga i električni oklop kao vanjski uzemljeni metalni sloj koji ograničuje električno polje u kabelu i štiti kabel od vanjskih električnih utjecaja. Uloga metalnog oklopa u konstrukciji kabela je:

- osigurati kontrolu električnog polja u izolaciji kabela (zajedno sa zaslonom izolacije s kojim ostvaruje direktni kontakt duž kabela)
- osigurati povratni put za cirkulacijske i vrtložne struje u normalnom pogonu, te za struje u slučaju kvara
- osigurati vanjski oklop za elektromagnetsko zračenje
- osigurati zakriljenje potencijalno opasnog visokog napona s potencijalom zemlje zbog sigurnosnih razloga

Zbog protjecanja struje kroz vodič kabela i pri tome induciranog magnetskog polja, efektom "transformatora" u kojem vodič ima ulogu primara, a metalni oklop ulogu sekundara, dolazi do induciranja napona kako u oklopu kabela tako i u ostalim, paralelnim vodovima ili instalacijama koje se nalaze na određenoj udaljenosti (slika 3).



Slika 3. Induciranje napona u oklopu kabela uslijed magnetske indukcije uzrokovane protjecanjem struje kroz vodič



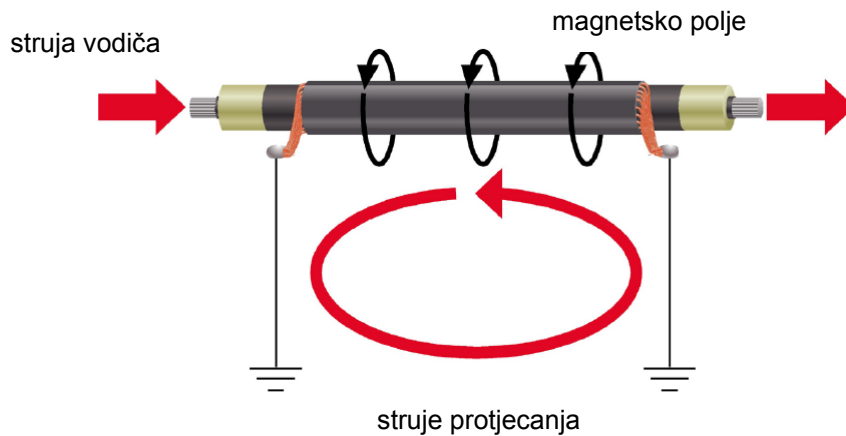
Slika 4. Inducirani napon u oklopu kabela u ovisnosti o konfiguraciji polaganja uz pretpostavljenu struju vodiča od 1000 A

Uz određenu frekvenciju i postavljenu konfiguraciju (način polaganja), vrijednost induciranog napona je direktno proporcionalna uzročnim strujama na primarnoj strani (strujama vodiča), po jedinici dužine kabela.

Na slici 4. prikazane su orijentacione vrijednosti induciranog napona u električnom oklopu kabela u ovisnosti o razmaku kabela (i promjeru preko električnog oklopa kabela) te načinu polaganja kabela uz pretpostavljenu nazivnu struju vodiča od 1000 A.

U slučaju nepovoljnih uvjeta pogona (npr. 1p ili 3p KS), vrijednosti induciranog napona mogu narasti na nekoliko kilovolti i time ugroziti osoblje ili opremu u električnim postrojenjima. Vrijednost max. dozvoljenog napona dodira u elektroenergetskim postrojenjima nazivnih izmjeničnih napona iznad 1 kV propisana je na 125 V unutar i 65 V van postrojenja, što znači da bi se i za najkraće dužine kabela, na neuzemljenim krajevima kabela mogao pojaviti nedozvoljeno visoki inducirani napon.

Kako bi se ovakva mogućnost izbjegla, oba kraja električnog oklopa kabela moraju se na odgovarajući način staviti pod kontrolu (npr. uzemljiti kao što je to redovita praksa kod SN kabela). Obostranim uzemljivanjem krajeva električnog oklopa kabela zatvara se petlja i tako omogućuje protjecanje cirkulacijske struje u oklopu kabela (slika 5.).



Slika 5. Zatvaranje strujne petlje u električnom oklopu kabela i protjecanje cirkulacijske struje preko obostrano uzemljenih krajeva

3.2. Izračun induciranih napona u električnom oklopu kabela

Vrijednost za inducirani napon (U_i) u električnom oklopu kabela, ovisi o međuinaktivnom otporu između vodiča i oklopa kabela, o struji protjecanja vodičem, te konačno o dužini dionice kabela koja se promatra.

Formule za izračun inducirane elektromotorne sile u električnom oklopu kabela prema [L7], [L8] i [L9] određene su slijedećim izrazima:

· za raspored kabela u ravnini:

$$E_{12} = j\omega \cdot I \ell \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{2(2)^{1/3} s}{d} \text{ (V)} \quad (1)$$

$$E_{23} = j\omega \cdot I \ell \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln 2^{2/3} \text{ (V)} \quad (2)$$

$$E_{31} = j\omega \cdot I \ell \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{4s}{d} \text{ (V)} \quad (3)$$

· za raspored kabela u trokutu:

$$E_{12} - E_{31} = j\omega \cdot I \ell \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{2s}{d} \text{ (V)} \quad (4)$$

$$E_{23} = 0$$

$$E_{31} = -E_{12}$$

gdje su:

I - struja vodiča (A)

ℓ - dužina kabela

s - osni razmak između vodiča (slika 3)

d = srednja geometrijska vrijednost promjera električnog oklopa kabela

Za jedan konkretan primjer XLPE kabela 64/110(123) kV, $1 \times 1000/95 \text{ mm}^2$ položen u trokutu, za nazivnu struju vodiča u redovnom pogonu $I_n = 750 \text{ A}$, dužinu kabela 1 km i geometrijske dimenzije kabela $s = 84,0 \text{ mm}$

$d = 74,0 \text{ mm}$

dobivaju se slijedeće vrijednosti induciranih napona prema zemlji:

$$U_i = \omega \cdot I \ell \cdot 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{2s}{d} = 314 \cdot 750 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ell \cdot \frac{2 \cdot 84}{74} = 38,6 \text{ V}$$

odnosno prema susjednim fazama:

$$U_i = \sqrt{3} \cdot 38,6 = 66,85 \text{ V}$$

ln (ispravak greške)

Za isti slučaj kabela ali za struju 1pKS u vodiču od 30 kA i $t=1 \text{ s}$, vrijednost za inducirani napon prema zemlji iznosi:

$$U_i = \frac{30 \cdot 10^3}{750} \cdot 38,6 \text{ V} = 1544 \text{ V}$$

odnosno prema susjednim fazama:

$$U_i = \sqrt{3} \cdot 1544 = 2674,30 \text{ V}$$

1.544 V (ispravak greške)

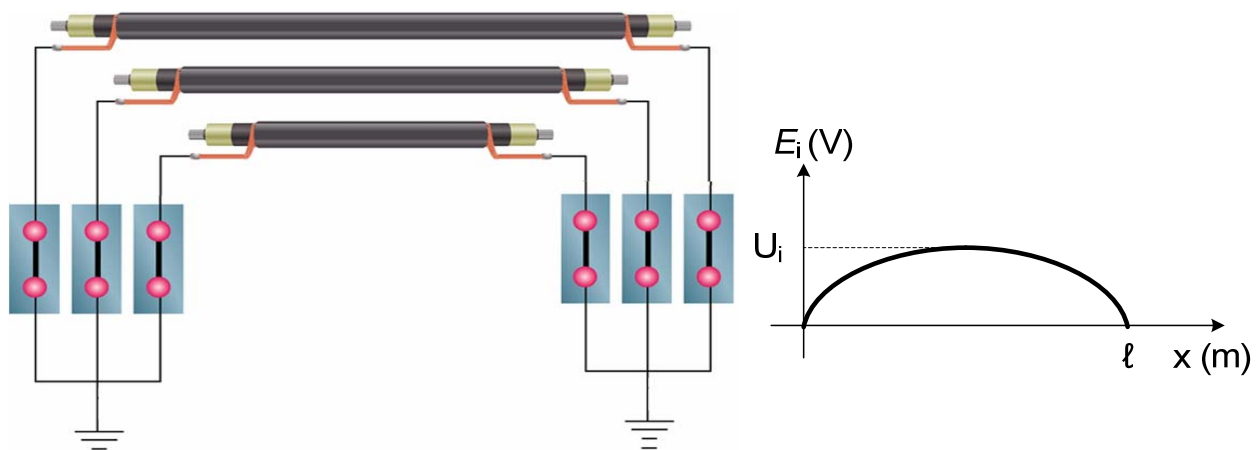
2.674,30 V (ispravak greške)

Kao što je prikazano gornjim primjerima, držanje otvorenog jednog ili oba kraja električnog oklopa kabela radi sprječavanja protjecanja cirkulacijskih struja, nije dozvoljeno obzirom na vrijednosti induciranog napona koje prelaze dopuštene vrijednosti obzirom na sigurnost pogona i osoblja (prema [L10] dozvoljeni napon dodira za trajanje struje $t = 0,72s$ iznosi $U_{TP} = 125 V$).

Kako bi se zadovoljila oba ova uvjeta, potrebno je primijeniti odgovarajuću metodu spajanja i uzemljivanja oklopa kabela kojim će se omogućiti zadržavanje induciranog napona unutar dozvoljene granice i ograničenje cirkulacijskih struja u oklopu unutar prihvatljivih vrijednosti.

3.3. Metoda obostranog uzemljivanja oklopa kabela (eng. *Both-ends bonding method*)

Ovom metodom se metalni oklop kabela direktno uzemljuje na obje strane kabela, čime je strujni krug za cirkulacijske struje zatvoren i one mogu nesmetano protjecati i zagrijavati oklop kabela. Na obje strane inducirani napon je jednak nuli, dok su inducirane cirkulacijske struje u oklopu kabela i pripadajući gubici proporcionalni s dužinom kabela i strujom protjecanja u vodiču (primarni dio kruga). Konfiguracija spoja kabela s obostrano uzemljenim oklopom te prikazom induciranog napona, prikazana je na slici 6.



Slika 6. Konfiguracija spoja s obostrano uzemljenim oklopima te prikaz induciranog napona duž kabela

Radi jednostavnijeg pristupa oklopima kabela u pogonu (npr. radi naponskog ispitivanja vanjskog plašta kabela) njihovo spajanje na uzemljenje izvodi se danas uglavnom preko spojnih kutija (*Link box*) u kojima su ugrađeni lagano demontažni spojevi, a sve je oklopljeno i vodotijesno izolirano u metalnoj kutiji od nehrđajućeg čelika i predviđeno kako za unutarnju tako i za vanjsku ugradnju. Kod standardnih kabelskih završetaka za vanjsku ugradnju, koriste se 1- polne izvedbe spojnih kutija (zbog relativno velikog razmaka između susjednih faza), dok se kod ugradnje na SF₆ postrojenja ili transformatore, gdje su završeci relativno blizu, koriste 3- polne izvedbe spojne kutije.

Prednosti metode obostranog uzemljivanja oklopa kabela su:

- minimalni zahtjevi na spojne kutije (jednostavna izvedba bez naponskih ograničivača (odvodnika prenapona)
- osiguran povratni put za struju KS-a i reducirane povratne struje kroz oklop kabela (koriste povratne putove i susjednih uzemljivača)
- polaganje usporednog dozemnog vodiča nije potrebno
- minimalno elektromagnetsko zračenje oko kabela

Nedostaci ove metode su:

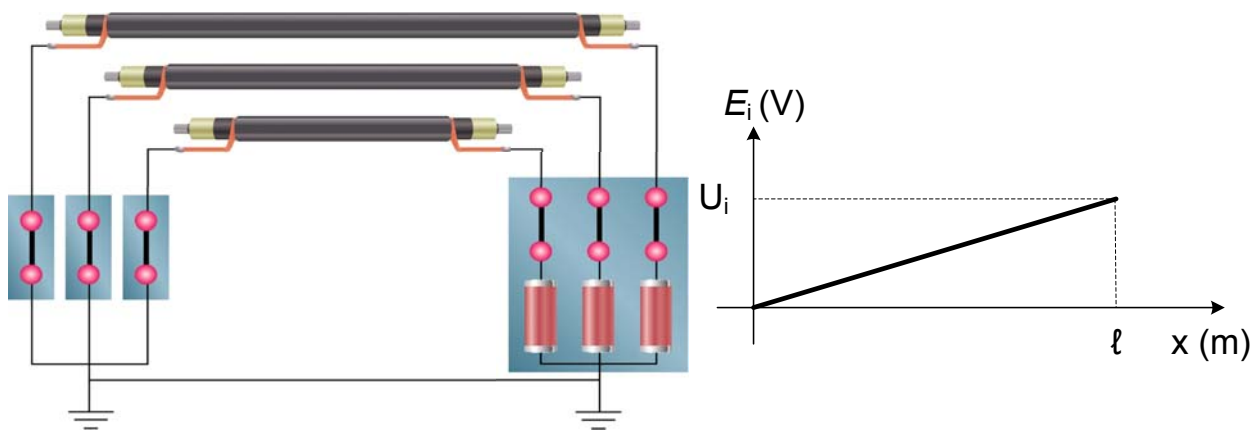
- osiguran put za protjecanje cirkulacijske struje u oklopu kabela
- efekt zagrijavanja u oklopu (uslijed cirkulacijske struje) generira povećane gubitke u kabele
- nazivno strujno opterećenje kabela mora se zbog gubitaka u zaslonu, značajno reducirati ili se mora odabrati kabel većeg presjeka i strujne podnosivosti

- omogućeno prenošenje pada napona na uzemljivaču (kod protjecanja struje kvara) s jedne na drugu stranu
- u praksi primjenjivo samo za kratke dionice kabela (nekoliko desetaka metara do max. 100 m)

3.4. Metoda jednostranog uzemljivanja oklopa kabela (eng. *Single - end bonding method*)

Ovom metodom metalni oklop kabela se direktno uzemljuje samo na jednoj strani čime je strujni krug za cirkulacijske struje otvoren. Na mjestu uzemljenja inducirani napon je nula, a na otvorenom kraju jednak je vrijednosti inducirano napona (prema izrazima 1 do 4) uvećan za pad napona na otporu uzemljenja na strani izvora (pretpostavlja se da je uzemljena strana uvijek ona na strani izvora napajanja).

Konfiguracija jednog takvog spoja prikazana je na slici 7.



Slika 7. Konfiguracija s jednostrano uzemljenim oklopima te prikaz inducirano napona duž kabela

Za ostvarivanje povratnog puta struje kvara potrebno je u trasi kabela položiti usporedni dozemni vodič čija je zadaća osigurati stalnu nisku impedanciju prema zemlji između sustava uzemljenja na krajevima kabela. Na otvorenom kraju oklopa kabela mora se koristiti spojna kutija s ugrađenim ograničivačima prenapona kao zaštite od nedozvoljeno visokih induciranih napona i tranzijentnih prenapona, a koji bi mogli ugroziti vanjski plašt kabela ili bi mogli predstavljati opasnost za osoblje unutar postrojenja.

Ovo je najekonomičnija metoda za eliminaciju gubitaka u metalnom oklopu kabela i dodatnog zagrijavanja kabela izvana ali ima određene nedostatke i ograničenja u korištenju i to:

- trajno inducirani napon na otvorenom kraju
- zahtijevanu ugradnju ograničivača prenapona na otvorenom kraju
- zahtijevani usporedni dozemni vodič između oba kraja kabela
- veće magnetsko polje oko kabela u usporedbi s obostrano uzemljenim krajevima oklopa kabela
- u praksi primjenjivo za relativno kratke dionice kabela (od 100 do 500 m), najčešće za interne veze unutar postrojenja

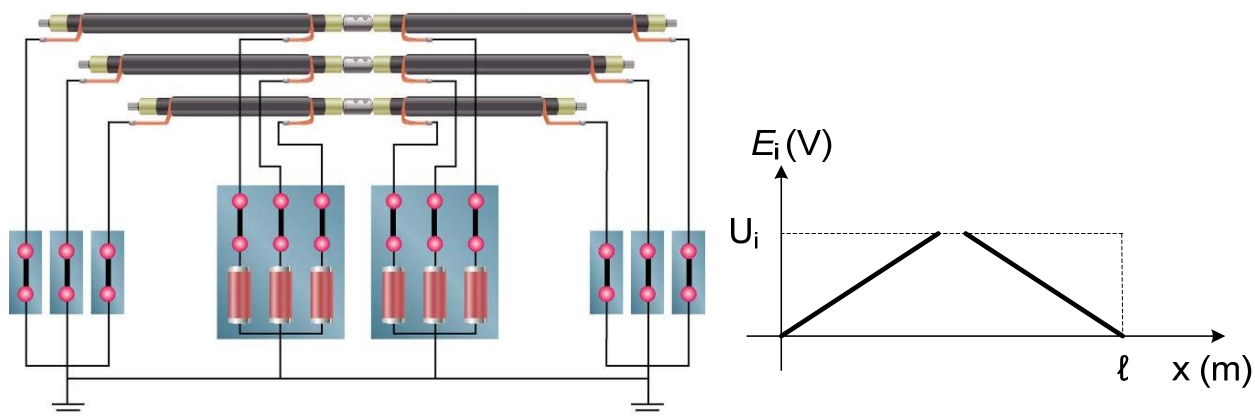
Za dužine kabela preko 500 m, potrebno je koristiti druge metode koje su u mogućnosti odgovoriti na gore navedena ograničenja jednostrano uzemljenog oklopa kabela.

3.5. Metoda međusobnog odvajanja obostrano uzemljenih oklopa kabela (eng. *Split - single end bonded system*)

Ovom metodom se oba kraja metalnog oklopa kabela direktno uzemljuju, a na sredini trase kabela se fizički izvodi njihovo odvajanje (naponsko izoliranje) čime je strujni krug za inducirane cirkulirajuće struje otvoren, a krajevi kabela se drže na potencijalu zemlje.

Ovom metodom se dobivaju zapravo dvije dionice jednostrano uzemljenih oklopa s time da su otvoreni krajevi sada smješteni u spojnoj kutiji s ugrađenim ograničivačima prenapona, a koja se nalazi u trasi kabela, a ne u elektroenergetskom postrojenju.

Primjer ovako izvedenih spojeva oklopa kabela, te raspored induciranog napona u oklopu, prikazan je na slici 8.

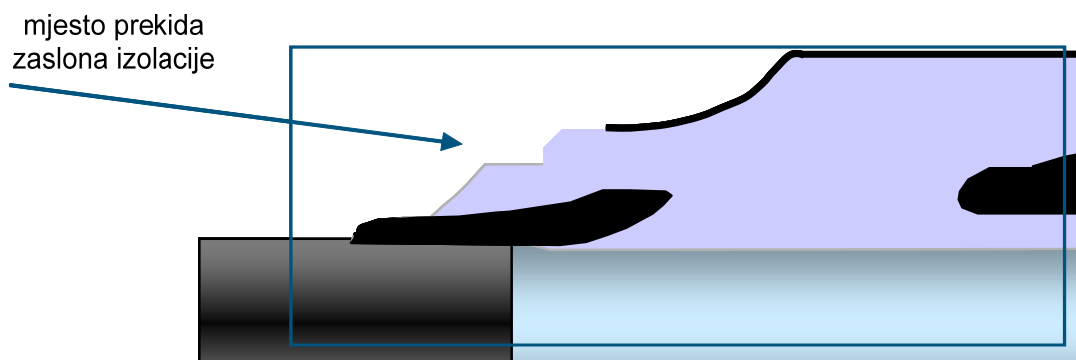


Slika 8. Primjer razdvojenih obostrano uzemljenih oklopa kabela te prikaz induciranog napona duž kabela

Ova metoda primjenjiva je na dionicama kabela koje su duže od dozvoljenih dužina kod jednostrano uzemljenih oklopa kabela, a u praksi se koristi za dužine od 300 do 1000 m.

I ovdje je potrebno u trasi kabela položiti usporedni dozemni vodič radi povratnog puta za struje kvara. Prekidanje oklopa kabela izvodi se ili originalnim izolirajućim spojnica (ako su predviđene za ugradnju) ili jednostavno izoliranim prekidanjem metalnog oklopa kabela i zaslona izolacije (tzv. kompletom za izolirano prekidanje). Izgled jedne izolirajuće VN spojnice s prikazom mjesta prekida zaslona izolacije kabela i električnog oklopa prikazan je na slici 9.

Za dužine trasa iznad 1000 m ova metoda nije prihvatljiva, jer bi se na otvorenim krajevima oklopa inducirali nedozvoljeno visoki naponi, pa se za takav slučaj koji je čest u praksi, koriste druge metode.

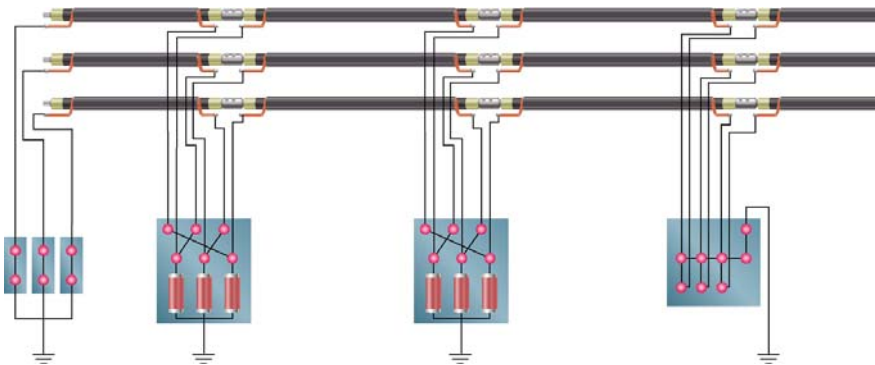


Slika 9. Izgled izolirajuće spojnice [L14] s prikazom mjesta prekida zaslona izolacije

3.6 Metoda međusobnog preplitanja oklopa kabela (eng. cross - bonding method)

Ovom metodom se krajevi metalnog oklopa kabela uzastopno križno prepliću, tako da pojedini oklop okružuje redom sve fazne vodiče na određenoj dionici (u pravilu preplet se izvodi u smjeru kazaljke na satu i to za jedno mjesto unaprijed u odnosu na fazni vodič). Jedna glavna dionica sadrži uvijek tri (tri) uzastopne temeljne dionice kabela (sekcije) od kojih je početna i krajnja direktno uzemljena, dok su mjesta prepleta oklopa kabela međusobno spojena u spojnoj kutiji i izolirana u odnosu na zemlju preko

ugrađenih ograničivača prenapona (odvodnika prenapona). Konfiguracija jednog takvog križnog preplitanja oklopa kabela prikazana je na slici br. 9.



Slika 10. Prikaz križnog prepleta oklopa kabela na prvoj dionici (glavnoj) trase kabela, koja se sastoji od ukupno tri temeljne dionice (sekcije)

Ovom metodom križnog prepleta oklopa kabela uvelike dolazi do kompenzacije induciranih napona u temeljnim dionicama kabela, tako da su cirkulacijska struja i s njom vezi gubici u oklopu svedeni na minimum, usprkos činjenici da su oba kraja glavne dionice direktno uzemljena.

Kao što je to vidljivo iz slike 10. glavna dionica je podijeljena u tri (ili multiplicirani broj broju tri) što je moguće jednakih dužina temeljnih dionica, čiji su oklopi na vanjskim krajevima međusobno spojeni i direktno uzemljeni.

Ciklička izmjena spajanja oklopa na dvjema unutarnjim spojnica, osigurava da je induksijska petlja izložena magnetskom polju struje vodiča u sva tri položaja vektorskog trokuta i na približno jednakim dužinama pojedinih sekcija. Na taj način, u idealnom slučaju, uzdužno inducirani napon unutar jedne dionice obostrano uzemljene, vektorski zbrojeni daju vrijednost nula ($E_{12} = E_{23} = E_{31}$) pa zbog toga nema niti mogućnosti pojavljivanja induciranih cirkulacijskih struja.

Unatoč tome, ovi idealni uvjeti su povezani s najmanje dva dodatna uvjeta uz prethodno navedeni uvjet o točno jednakoj udaljenosti između pojedinih točaka križnog spajanja oklopa i u praksi se ne mogu u potpunosti ispuniti:

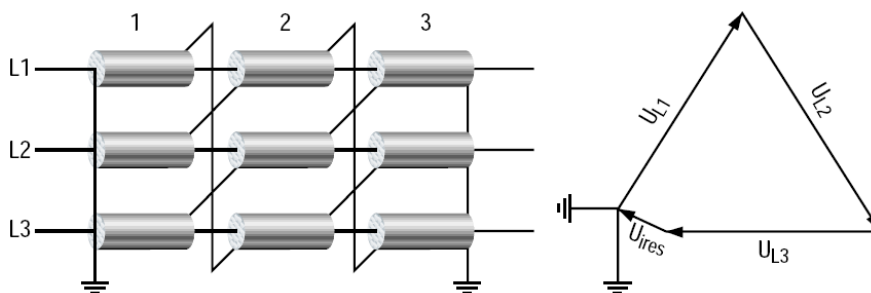
- induktivni otpor između oklopa kabela i susjednih induksijskih vodiča (kojima protječe struja) mora biti jednak za sve tri faze i na svakom mjestu, duž trase kabela. Ovaj uvjet je vrlo blizak aproksimaciji faznih vodiča u razmještau trokuta.

- struje vodiča moraju imati međusobno istu vrijednost i moraju međusobno imati fazni pomak od točno 120° (simetrični pogon)

Ovi uvjeti su temelj vektorskog prikaza induciranih napona unutar jedne glavne dionice s križno spojenim krajevima električnog oklopa kabela prema slici 11.

Vrijednost preostalog inducirano napona (U_{ires}) je upravo posljedica naprijed navedenih uvjeta i u praksi se teži da ova vrijednost bude što je moguće manja ili u idealnim uvjetima da bude jednaka nuli.

U tom slučaju, vektorski zbroj induciranih napona na jednoj od glavnih dionica trase kabela (može ih biti više) je nula, struja proticanja se ne može uspostaviti (nema razlike potencijala na krajevima) a krajevi dionice se mogu čvrsto uzemljiti.

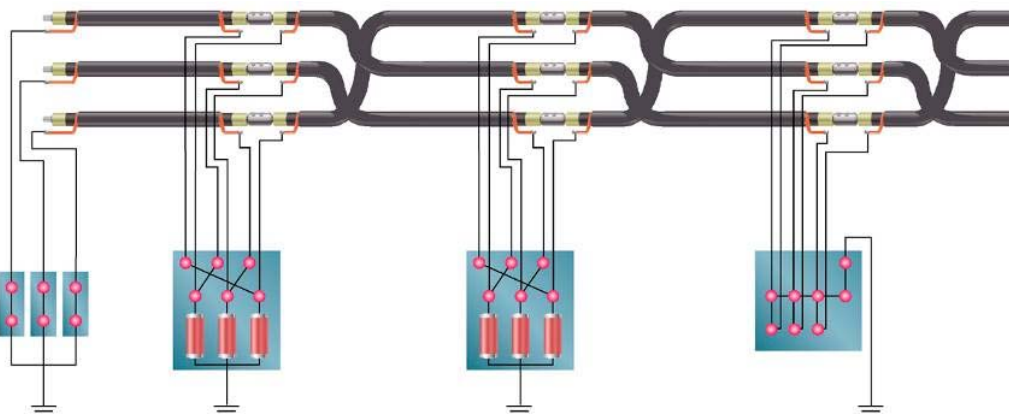


Slika 11. Vektorskog prikaza induciranih napona unutar jedne glavne dionice s križno spojenim krajevima električnog oklopa kabela

3.7 Metoda međusobnog prepleta vodiča i oklopa kabela (eng. cross – bonding and transposition method)

Kako bi se još više udovoljilo uvjetu simetričnosti sustava unutar jedne glavne dionice, a poglavito ukoliko je polaganje kabela izvedeno u ravnini (za napone veće od 123 kV polaganje u ravnini je standardni oblik polaganja zbog boljih uvjeta hlađenja kabela u odnosu na polaganje u trokut), na mjestu spajanja kabela izvode se istovremeno i preplet žila kabela kao i križno spajanje oklopa. Ovime se još više postiže simetričnost sustava i tako iznos preostalog induciranog napona smanjuje na minimalnu vrijednost ($U_{ind}=0$ -slika 11).

Primjer jedne konfiguracije s istovremenim prepletom faznih vodiča i križnim spajanjem oklopa kabela prikazan je na slici 12.



Slika 12. Primjer istovremenog prepleta faznih vodiča i križnog spajanja oklopa kabela

Na ovaj način je zapravo postignuto da metalni oklopi kabela prate kontinuiranu liniju, dok struja u vodičima mijenja svoje mjesto tvoreći vektorski trokut s pomakom faza od 120° .

Prednosti korištenja ove metode su:

- polaganje usporednog dozemnog vodiča nije nužno (može biti položen zbog drugih razloga)
- ostvaren električni kontinuitet metalnog zaslona za struju kvara (nema prekidanja)
- cirkulacijska struja u zaslonu približno jednaka nuli (nema razlike potencijala na krajevima dionica)
- induciran napon u zaslonu kabela je kontroliran (na krajevima glavnih dionica zaslon kabela uzemljen, a na mjestima unakrsnog spajanja spojen preko ograničivača prenapona na uzemljenje)
- tehnički superiorna metoda u odnosu na sve ostale metode
- promjenjiva i na dugačke dionice vođenja kabela kao i na sve naponske razine

Nedostaci ove metode su:

- tehnički komplicirana za izvođenje
- skuplja od ostalih metoda

4. ELEKTOMAGNETSKI UTJECAJ KABELA NA OKOLIŠ

Početak 2004.g. u hrvatskoj je na snazi Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja kojim se propisuju dozvoljeni iznosi električnih i magnetskih polja koje emitiraju elektroenergetski i drugi električni objekti u okolinu. Ovim pravilnikom definirane su granične razine električnog i magnetskog polja i to:

- a) područje povećane osjetljivosti $E = 2 \text{ kV/m}$, $B = 40 \text{ } \mu\text{T}$
- b) područje profesionalne izloženosti $E = 5 \text{ kV/m}$, $B = 100 \text{ } \mu\text{T}$

U našoj zemlji osim gore navedenog Pravilnika ne postoji Pravilnik kojim se definiraju granične razine električnih i magnetskih polja za podzemne kabele koji se polažu kroz različita područja (urbane

sredine, periferije grada i.t.d) kao u nekim zemljama. Tako na primjer gledajući na neka Američka i Europska iskustva dozvoljene razine magnetskih polja su kako slijede:

- ◆ New York – 20 μT pri maksimalnom opterećenju kabela
- ◆ Florida – 15 μT do 25 μT (u ovisnosti o naponskom nivou kabela)
- ◆ Italija – 3 μT na površini zemlje
- ◆ Švicarska – 1 μT na području povećane osjetljivost i duge izloženosti magnetskom polju kabela
- ◆ Austrija (Beč) – 3 μT na površini zemlje

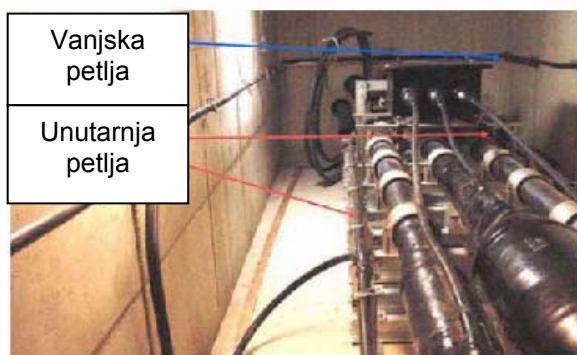
Kako smo u uvodu napomenuli kabeli 110 kV postaju sve više distributivnog tipa što znači da se polažu kroz gradove i urbane sredine tj. kroz područja povećane osjetljivosti.

Stupanjem na snagu Pravilnika o zaštiti od elektromagnetskih polja prilikom projektiranja kabela 110 kV Ministarstvo zdravstva i socijalne skrbi uvjetuje izradu procjene elektromagnetskog utjecaja kabela na okoliš.

Ova procedura zahtjeva da projektanti prilikom projektiranja kabela 110 kV riješe problem elektromagnetskog utjecaja kabela na okoliš ako računске kontrole elektromagnetskog polja to zahtijevaju.

Danas u svijetu postoji niz načina kojim se reducira utjecaj elektromagnetskog polja kabela na okoliš gdje su najčešći:

- 1) Izvedba pasivnih petlji (izvodi se obično u montažnim jamama) koje stvaraju neku vrstu Farraday-eva kaveza Slika 13.
- 2) Izvedba bakrenog oklopa iznad i ispod kabela (izvodi se obično u montažnim jamama) bakrenim pločama debljine cca 3mm koje stvaraju zaštitu od vrtložnih struja Slika 14.
- 3) Provlačenje kabela kroz čelične cijevi (izvodi se u trasi kabela) i spada u tipska projektantska rješenja Slika 15.
- 4) Izvedba feromagnetskih trasa (izvodi se u trasi kabela) i spada u skupa rješenja zaštite od elektromagnetskog utjecaja kabela Slika 16.



Slika 13. Pasivne petlje u montažnoj jami



Slika 14. Bakreni oklop u montažnoj jami



Slika 15. Provlačenje kabela kroz čeličnu cijev



Slika 16. Feromagnetska trasa

U Tablici 5. prikazane su tipske zaštite od elektromagnetskog utjecaja kabela na okoliš i vrijednosti elektromagnetskog polja te redukcija (% smanjenje) istih u ovisnosti o tipu elektromagnetske zaštite.

Tablica 5. Vrijednosti tipske zaštite od elektromagnetskog utjecaja

Opis	Razmak osi kabela (mm)	Bmax na površini zemlje ($\mu\text{T/kA}$)	Redukcija (%)
Polaganje kabela u ravnini	250	63,0	-
Polaganje kabela u ravnini – smanjeni razmaci	100	26,0	58,7
Polaganje kabela u trokut	100	19,5	69,0
Uzemljenje električnog oklopa na više mjesta (3 mm Al oklop)	250	15,0	76,2
Pasivna petlja (izvan kabela)	250	26,5	57,9
5 mm Aluminijska ploča širine 1 m, 50 mm iznad kabela	250	10,9	82,7
5 mm Al oklop „U“ oblika	250	7,6	87,9
Feromagnetska trasa, Polaganje kabela u trokut	100	3,0	95,2

5. ZAKLJUČAK

Izbor i konstrukcija kabela 110 kV postaju sve kompleksniji kada se počnu izvoditi kao distributivni 110 kV kabele.

U referatu su u kratkim crtama prikazani bitni elementi na koje projektanti moraju obratiti pozornost kod projektiranja kablenskog sustava 110 kV u gradskim sredinama. Vidljivo je da pored pravilnog izbora presjeka vodiča, a koji je danas manje-više tipiziran, nužnu pozornost treba obratiti i presjeku električnog oklopa kabela te metodama njegovog uzemljivanja, kako bi se gubici uslijed induciranih struja u njemu smanjili na tehnički prihvatljivu razinu. Odabranoj metodi uzemljivanja električnog oklopa, moraju biti prilagođene i kableske spojnice te odabrane spojne kutije (sa ili bez ograničivača prenapona).

Za proračun gubitaka u kabele koriste se danas moćni softverski paketi koji proizvođače kabela prisiljavaju na objavljivanje svih relevantnih podataka o konstrukciji kabela jer se sada na relativno lagani način mogu provjeriti podaci koje obično objavljuju u svojim katalozima i brošurama.

Na kraju, prikazana je još jedna vrlo bitna sastavnica VN kabelskog sustava glede elektromagnetskog utjecaja na okoliš. Granične razine za elektromagnetska polja koje su već pojedine zemlje definirale i koje se u praksi primjenjuju, postaju za projektante sve veći ograničavajući faktor kod izbora trase i načina polaganja kabela, tako da su u referatu prikazana moguća rješenja sprečavanja elektromagnetskih utjecaja VN kabela na okoliš a koja mogu bitno utjecati na ukupnu cijenu izgradnje jednog VN kabelskog sustava.

6. LITERATURA

- [1] IEC 60840:(1990) Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ($U_m = 36\text{kV}$) up to 150 kV ($U_m = 170\text{kV}$): Test methods and requirements.
- [2] IEC 60287-1-1:(2001) Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General.
- [3] IEC 60287-2-2:(2001) Electric cables – Calculation of the current rating – Part 2-1: Thermal resistance – Calculation of thermal resistance.
- [4] HRN IEC 60050-461:(2001) Međunarodni elektrotehnički rječnik - 461. poglavlje: Električni kabele
- [5] www.abb.com Tehnički i kataloški podaci proizvođača kabela
- [6] ABB: ABB Power Technologies High Voltage Cables (XLPE Cable Systems)
- [7] CIGRE-Working Group B1.18: Special bonding of high voltage power cable, October 2005.
- [8] CIGRE-Working group 07: Guide to the protection of special bonded cable systems against sheath overvoltages, Electra No.128,1990
- [9] ANSI/IEEE Std 575-1988: Guide for the application of sheath-bonding methods for single conductor cables and the calculation of induced voltages and currents in cable sheaths, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, NY 10017, 1987
- [10] HRN HD 637 S1: Električna postrojenja nazivnih izmjeničnih napona iznad 1 kV, ožujak 2002
- [11] E. Peschke, R. von Olshausen: Cable Systems for High and Extra-High Voltage, Publics-MCD Verlag Munich, 1999
- [12] Electric Cables Handbook, Chapter 34: Techniques for Increasing Current Carrying Capacity
- [13] Tyco Electronics: Cross bonding and sectionalisation for high-voltage cable systems, EPP 0865, Nov. 2006.
- [14] www.tycoelectronics.com Tehnički i kataloški podaci proizvođača spojne opreme