



SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



## **MODELIRANJE PODMORSKIH ELEKTROENERGETSKIH KABELA**

**KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT**

**IVO ZLATUNIĆ**

Mentor:

Izv.prof. dr.sc. Ranko Goić

Rujan, 2015.

Sadržaj	Str
<b>1 UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2 PODMORSKI KABELI – IZVEDBA I NAČIN UPOTREBE</b>	<b>2</b>
2.1 Upotreba podmorskih kablskih vodova	2
2.2 Izvedba podmorskih kabela	3
2.3 Sastavni dijelovi podmorskih kablskih vodova	5
2.3.1 Vodič	5
2.3.2 Izolacija podmorskog kabela	6
2.3.3 Poluvodljivi slojevi	6
2.3.4 Metalni plašt kabela	6
2.3.5 Armatura	6
2.3.6 Vanjska izolacija	7
2.3.7 Dodatni elementi	7
<b>3 OPĆENITO O RASPODJELI STRUJA U HVAC PODMORSKIM KABELIMA</b>	<b>8</b>
3.1 Kružne struje	8
3.2 Vrtložne struje	10
<b>4 RAČUNSKIH MODELI PODMORSKIH KABLSKIH VODOVA</b>	<b>12</b>
4.1 Frekvencijski modeli	12
4.1.1 Ulazni podaci	13
4.1.2 Formiranje matrica impedancija – općeniti pristup	14
4.1.3 Formiranje matrica admitancija – općeniti pristup	17
4.1.4 Primjena različitih frekvencijskih modela kabela za vremenske simulacije	19
4.2 Numeričke metode modeliranja kablskih vodova	27
4.3 Modeli za pogonsku frekvenciju od 50 Hz	29
4.3.1 Jednožilni podmorski kabela	29
4.3.2 Trožilni podmorski kabela	29
4.4 Modeli za izračune karakteristika uzemljivača i uzemljivačkih sustava	32
<b>5 ZAKLJUČAK</b>	<b>37</b>
<b>POPIS KRATICA</b>	<b>39</b>
<b>LITERATURA</b>	<b>40</b>

# 1 UVOD

Podmorski kabelski vodovi su u upotrebi gotovo cijelo stoljeće, a dijele se u dvije osnovne skupine ovisno o sustavu u kojem se koriste na AC (eng. alternating current) i DC (eng. Direct current) podmorske kabele. Istosmjerni podmorski kabeli se koriste u situacijama kada primjena izmjeničnih kabelskih vodova nije moguća, a ograničena primjena AC podmorskih kabela su vezana za visoke kapacitivne struje, visoke struje kratkih spojeva, povezivanje dvaju elektroenergetskih sustava različitih frekvencija, visoki gubici i slično.

Zbog svoje široke primjene pojavila se potreba intenzivnijeg razvoja računskih modela podmorskih kabelskih vodova u cilju ispravnog odabira, dimenzioniranja i održavanja istih. Prethodno uključuje široki spektar računskih modela za analizu svih mogućih pojava od atmosferskih i sklopnih prenapona do normalnih pogonskih stanja (zagrijavanje, tokovi snaga, kratki spojevi, uzemljivački sustavi itd.).

Slijedom navedenog u zadnjih 20 godina intenzivno su se razvijali razni računski modeli koji su većinom vezani za modeliranje kabelskih vodova za široki spektar frekvencija za potrebe vremenskih simulacija, a isti se primijenjeni u većini EMTP programa. Pristup modeliranju je temeljen na cijevnom modelu ili modelu šupljeg valjka. Iako konstrukcijski elementi kabela ne odgovaraju u potpunosti prethodno navedenom, u nedostatku boljih i jednostavnih analitičkih izraza modeli su široko prihvaćeni. Kao primjeri najnaprednijih modela mogu se navesti ULM (eng. Universal line model) ili WBD (eng. Wide Band model), te FDQ (eng. frequency dependent cable) ili FDLine (eng. frequency dependent line) modeli, koji se podjednako primjenjuju kako za kabelske tako i za zračne vodove.

Gubici u kabelskim vodovima su povezani sa kružnim i vrtložnim strujama koji se u istima javljaju, a izračun istih ovisi o korištenom modelu. U općenitom slučaju izračun kružnih struja je značajno jednostavniji od izračuna vrtložnih struja. U složenim modelima kabela gubici se ponekad zbog nedostatka odgovarajućih i jednostavnih analitičkih modela određuju eksperimentalno. Skup svih modela (eksperimentalni, polu-empirijskih ili analitičkih) se objedinjuju u općeprihvaćene norme koje su podložne stalnim revizijama i nadopunama.

U ovom radu prvenstveno će se obraditi računski modeli AC podmorskih kabela s istraživanjem postojećih modela i literature povijesnog razvoja modela. U drugom poglavlju dat će se osnovni podaci povezani sa sastavnim komponentama podmorskih kabela i mogućim primjenama istih. U trećem poglavlju dana su osnovna objašnjenja kružnih i vrtložnih struja.

Četvrtim poglavljem razrađeni su danas poznati frekvencijski modeli, modeli za pogonsku frekvenciju i numerički modeli kabela s osvrtom na mogućnosti primjene.

## 2 PODMORSKI KABELI – IZVEDBA I NAČIN UPOTREBE

### 2.1 Upotreba podmorskih kablinskih vodova

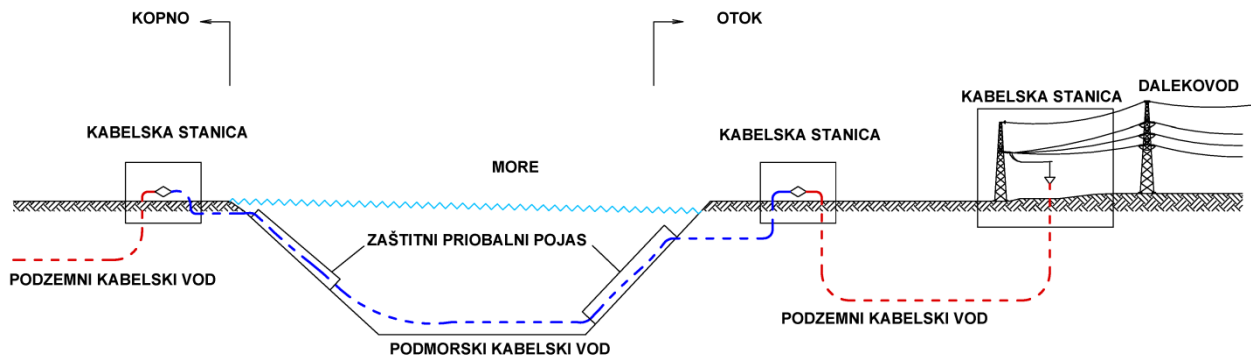
Od početka prošlog stoljeća razvio se čitav niz tehničkih i tehnoloških rješenja podmorskih kablinskih vodova. Zbog zastarjelosti tehnologije veliki broj tipova kabela se danas povukao sa tržišta ili se još koriste do isteka životnog vijeka. U prošlosti su se podmorski kabele koristili za energetska povezivanje kopnenih i otočnih elektroenergetskih sustava, a danas se intenzivno koriste i za potrebe elektroenergetskog povezivanja velikih pomorskih vjetroelektrana u elektroenergetski sustav. U tom slučaju mogu se koristiti različiti koncepti priključka vjetroelektrane na mrežu [38] i [41] koji prvenstveno ovise o blizini kopna i snage vjetroelektrane. U slučaju kratkih udaljenosti (5-20 km) i manjih snaga najčešće se koriste srednjenaponski kablinski vodovi nazivnih napona od 10-36 kV kojima se vjetroagregati direktno povezuju s trafostanicom na kopnu, a u slučaju većih udaljenosti izgrađuju se pomorske platforme s trafostanicom za povećanje naponskog nivoa, a veza s kopnom se ostvaruje visokonaponskim (>110 kV) podmorskim kablinskim vodovima. Danas se zbog velikih udaljenosti od kopna, velikih instaliranih snaga vjetroelektrana, potrebe smanjenja gubitaka i smanjenja investicijskih troškova, polažu i visokonaponski DC (HVDC-eng. High voltage direct current) kablinski vodovi s ugrađenim pretvaračima na pomorskim platformama i na kopnu [38]. Također, za istaknuti je da se razvijaju pomorske vjetroelektrane s plutajućim vjetroagregatima (nisu fiksirane za podmorsko dno) što predstavlja izazov u načinu kablinskog povezivanja vjetroagregata s obzirom na mogućnost stalnog pomicanja. Osim prethodno navedenih upotreba, podmorski kabele se često koriste i za povezivanje elektrana na plimu i oseku, valove, morske struje, te napajanje vlastite potrošnje naftnih ili plinskih platformi, a posebno u slučajevima kad izgradnja vlastite elektrane nije opravdana zbog ograničenosti prostora i visokih troškova održavanja. Također isti se polažu na prijelazima rijeka, jezera, kanala i slično.

Odabir HVDC i HVAC podmorskih kabela su primarno vezane za udaljenosti. Ako je riječ o kratkim udaljenostima do 80-100 km uobičajeno je, zbog nižih investicijskih troškova i tehničkih karakteristika, polagati HVAC podmorske kabele i obrnuto u slučaju većih udaljenosti HVDC podmorski kabele pokazuju niz prednosti. Osim prethodno navedenog za istaknuti je da udaljenosti ovisi i o kapacitivnim strujama koja na određenim duljinama postaju ograničavajući faktor upotrebe HVAC kabela. Prednosti upotrebe HVDC kabela se očituje pri povezivanju sustava koji rade na različitim pogonskim frekvencijama, smanjenja struje kratkog spoja, smanjenja gubitaka i slično.

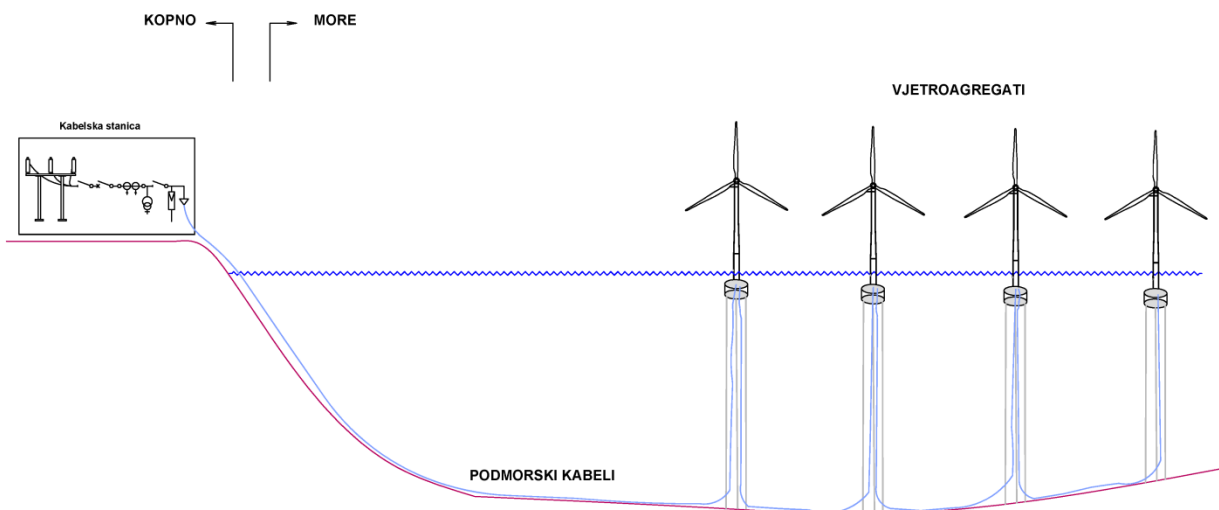
Prvi istosmjerni HVDC podmorski kabele su položeni 1954. na duljini od 98 km od otoka Gotland do obale Švedske. Najdulja dionica položenog istosmjernog kabela je duga 580 km (2008.) između Norveške i Nizozemske sa ukupnim kapacitetom od 700 MW, a bez zapreka mogu se polagati na znatno veće udaljenosti zbog čega su iznimno interesantni za vjetroelektrane na moru. Velika Britanija i ostale zemlje imaju značajan broj podmorskih veza sa Francuskom, Irskom, Nizozemskom, Sjevernom Irskom itd.

U Republici Hrvatskoj postoji značajan broj kratkih podmorskih veza prema otocima, a u upotrebi su dominantno stari uljni podmorski kabele (većinom predviđeni za skoriju zamjenu), ali i novi tipovi AC podmorskih kabela s XLPE izolacijom.

Na slikama 2-1 i 2-2 shematski su prikazani najčešći načini upotrebe podmorskih kabela u elektroenergetskom sustavu.



Slika 2-1 Shematski prikaz mogućih konfiguracija podmorsko – podzemne – zračne veze za povezivanje kopna-otoka



Slika 2-2 Shematski prikaz priključka pomorskih vjetroelektrana na elektroenergetski sustav

## 2.2 Izvedba podmorskih kabela

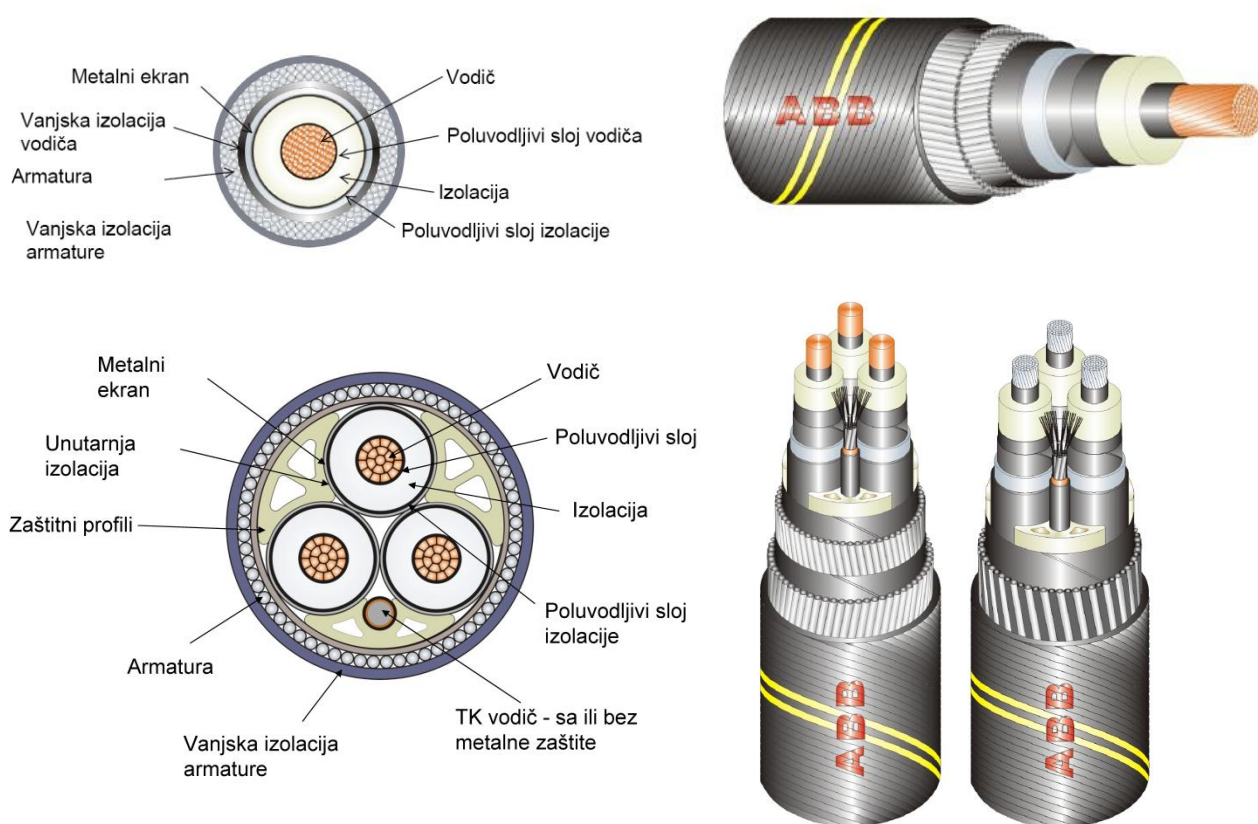
U osnovi podmorski kabeli se mogu podijeliti u tri osnovne kategorije:

- jednožilni AC podmorski kabeli položeni u morskome dnu na međusobnim razmacima od 20-30 m (nerijetko su moguće veće i manje udaljenosti).
- trožilni AC podmorski kabeli sa zajedničkom armaturom,
- istosmjerni visokonaponski podmorski kabeli (dvožilni ili jednožilni).

Odabir trožilnih ili jednožilnih AC kabela ovisi o više faktora koji uključuju karakteristike trase na podmorskom dnu, duljini kabela trase, mogućnostima polaganja i slično. Trožilni kabelski vodovi su poželjniji u slučaju zahtjeva za smanjenjem koridora zauzimanja površine podmorskog dna koji kod jednožilnih kabelskih vodova može zahtijevati i preko 20-30 m razmaka između pojedinačnih žila. Moguće je i polaganje i na manjim razmacima, ali isto se u praksi najčešće ne primjenjuje prvenstveno zbog mogućnosti

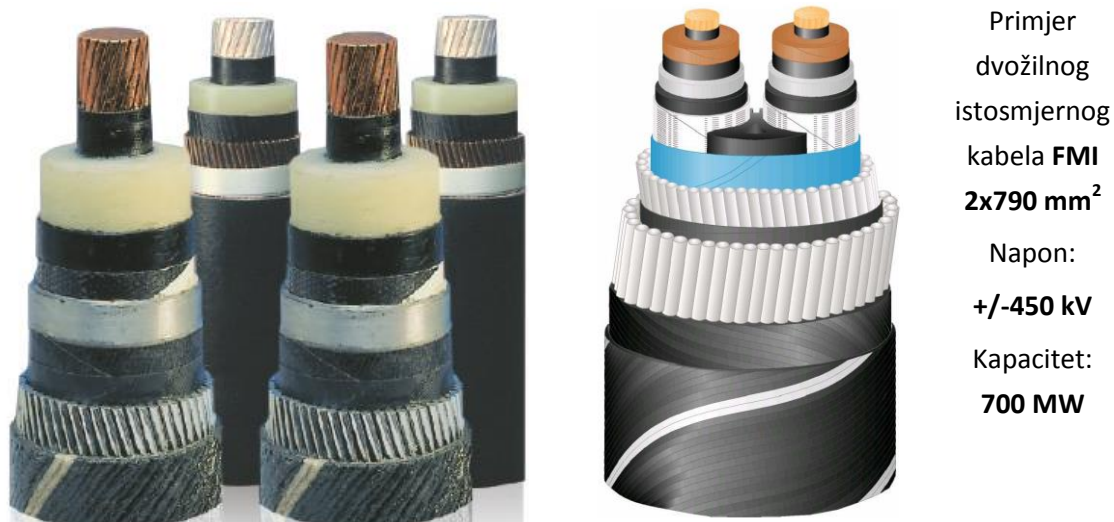
istovremenog oštećenja dvaju ili više kabela. S druge strane polaganje trožilnih kabela je zahtjevnije zbog većih dimenzija (promjera) – slika 2-3. Prednost trožilnih kabela sa zajedničkom armaturom su i manji gubici prvenstveno zbog simetričnog rasporeda faznih vodiča. Kod jednožilnih podmorskih kabela ovi gubici mogu biti izraženi što će biti detaljno opisano u slijedećim poglavljima. Ova prednost dijelom se kompenzira pojačanim zagrijavanjem uzrokovanim blizinom faznih vodiča. Prema sadašnjem stanju tržišta trožilni AC kabele su značajno skuplji od jednožilnih.

Prije 25 godina trožilni kabele su se mogli isporučivati samo na manjim udaljenostima zbog ograničenosti proizvodnje kabela u jednom komadu. Danas proizvođači omogućuju isporuku istih za naponske nivoe između 100-170 kV na duljinama većim od 50 km što povećava mogućnosti primjene.



**Slika 2-3 Primjeri jednožilnih i trožilnih podmorskih kabela [59]**

Za istosmjernu podmorsku kabele danas su dostupne jednožilne i dvožilne izvedbe. Jednožilne izvedbe najčešće koriste dokazanu izolaciju od impregiranog papira i dostupne su za napone veće i od 500 kV.



Slika 2-4 Primjeri jednožilnih i dvožilnih visokonaponskih istosmjernih kabela [59]

## 2.3 Sastavni dijelovi podmorskih kablaskih vodova

### 2.3.1 Vodič

Vodič podmorskog kablaskog voda izrađuje se od aluminija ili bakra. Iako je bakar znatno skuplji od aluminija u podmorskim kablaskim vodovima bakar se često koristi. Razlog ovome leži u činjenici da se bakar može koristiti sa značajno manjim presjecima što rezultira upotrebi manje materijala za vanjske elemente (izolacija, armatura, plašt), te time i niz prednosti (lakše i jeftinije polaganje, održavanje itd.). Međutim općenito ne postoji najbolji izbor materijala vodiča i čak se često koriste i kombinacije aluminij-bakar na pojedinim dionicama. Često se aluminij koristi na dubljim odnosno hladnijim dionicama trase, a bakar na krajnjim dijelovima trase gdje se očekuje veće zagrijavanje.

Kao i kod podzemnih kablaskih vodova vodiči podmorskog kabela imaju različite oblike [33], [59] i [60]. Mogu biti izrađeni od:

- jednog masivnog vodiča (općenito ne više od 400 mm<sup>2</sup>),
- od većeg broja međusobno zbijenih i upredenih okruglih žica (najčešća izvedba kod podmorskih kabela),
- vodiči sastavljeni od segmentiranih polukružnih profila (najčešće se koriste za izradu HVDC kabela),
- vodiči u obliku šupljeg valjka sastavljeni od segmentiranih polukružnih profila (zabilježeni kod podmorskih uljnih kablaskih vodova).
- Millikenovi vodiči – Segmentirani vodiči u kojem svaka pojedinačna žica mijenja poziciju u cilju smanjenja utjecaja gubitaka zbog efekta potiskivanja. Često mogu biti izvedeni s izolacijom između segmenta ili u obliku šupljeg valjka. Zbog visokih troškova proizvodnje ekonomski ih je isplativo proizvoditi samo za presjeke veće od 1200 mm<sup>2</sup>.

### 2.3.2 Izolacija podmorskog kabela

Izolacija podmorskog kablenskog voda osigurava potencijalnu pregradu između visokog potencijala vodiča i okoline. Danas se kao materijal za izradu izolacije podmorskih kabela koristi umreženi polietilen (XLPE) dok se polietilen (PE) najčešće ne koristi prvenstveno zbog ograničene temperature zagrijavanja (70-80°C). XLPE se koristi kao izolacija u podmorskim kabelima od 1973. godine. Postoje i razni napredci u tehnologiji i aditivi koji se dodaju XLPE izolaciji radi poboljšanja svojstava (npr. WTR XLPE- water tree retardant XLPE)). Izolacija od etilen propilen-gume (EPR) se pretežito koristi za podzemne kabele premda su zabilježeni srednjenaponski podmorski kabelski vodovi s ugrađenom EPR izolacijom [60].

Ostale zastarjele tehnologije poput uljnih kabela ili kabela s plinom se danas uglavnom izbjegavaju (premda se i dalje ponekad koriste) zbog potrebe regulacije tlaka ulja, onečišćenja okoliša u slučaju istjecanja ulja i slično.

Za podmorske DC kabele najčešće se upotrebljava dokazana tehnologija izolacije s impregiranim papirom. Iako se ova izolacija dosta primjenjivala za srednjenaponske podmorske trožilne kabele danas se pretežito koristi za HVDC podmorske kabele.

### 2.3.3 Poluvodljivi slojevi

Poluvodljivi slojevi izolacije se postavljaju kako bi stvorili glatku površinu oko vodiča i izolacije i spriječili pojavu jačih lokalnih električnih opterećenja izolacije uzrokovanih izbočinama ili površinskim efektima. Najčešće su debljine 1-2 mm.

### 2.3.4 Metalni plašt kabela

Plašt podmorskih kabela je najčešće izrađen od olovnog, rjeđe aluminijskog ili bakrenog materijala. Njihova uloga je u kvalitetnoj zaštiti od prodora vlage i mehaničkih oštećenja, te ima bitnu ulogu u odvođenju struja kvara. Negativan utjecaj je prvenstveno vezan za pojavu kružnih struja odnosno dodatnog zagrijavanja u slučaju uzemljenja plašta na oba kraja. Debljina varira u rasponu 2-5 mm ovisno o upotrebi. Specifičnost trožilnih kabela je u tome što mogu imati zasebne metalne plašteve (takozvani SL- Single lead sheath) ili jedan zajednički metalni plašt. Najčešće se koriste SL tipovi podmorskih kabela.

### 2.3.5 Armatura

Svrha ugradnje armature je prvenstveno vezana za zaštitu od mehaničkih oštećenja ili naprezanja kojima podmorski kabel može biti izložen u morskoj sredini (npr. sidrenje, stijenje i slično.). Najčešće se izrađuje od čeličnih žica, a nerijetko i od čeličnih traka. Pri tome se vrlo često ugrađuju po dva sloja međusobno helikoidalno namotanih žica. Materijal koji se koristi najčešće je izrađen od čelika što rezultira visokim gubicima zbog pojave vrtložnih struja i histereze. U plićim vodama vrlo često se ugrađuju armaturne žice međusobno razmaknute, što olakšava ne samo polaganje i manji utrošak materijala, nego i značajno smanjuje gubitke zbog vrtložnih struja. U jednožilnim podmorskim kabelima gubici zbog vrtložnih i kružnih struja značajno smanjuju prijenosnu moć dok je u slučaju trožilnih podmorskih kabela isto značajno manje izraženo.



Ponekad se kao armatura koristi i ne-magnetski materijali (bakar, aluminij) kako bi se smanjili gubici i povećala prijenosna moć kabela. Međutim takva rješenja često ne osiguravaju dovoljnu mehaničku čvrstoću i kabeli su podložni mehaničkim oštećenjima. Kod jednožilnih kabela zbog visokih gubitaka uzrokovanim kružnim i vrtložnim strujama vrlo često se ugrađuje armatura od aluminija ili aluminijskih legura, a nerijetko i od bakra. Kod trožilnih podmorskih kabela ugrađuje se armatura od međusobno helikoidalno namotanih čeličnih žica.

### 2.3.6 Vanjska izolacija

Za vanjsku izolaciju podmorskog kabela najčešće se ugrađuje polietilen (HDPE- High density polyethylene ili LDPE-Low density polyethylene) koji iako nije otporan na visoke temperature ima visoku otpornost na prodor vlage. Glavna mu je svrha zaštita armature i plašta od prodora vlage i djelovanja korozije. Kao materijal se može koristiti i polivinil-klorid (PVC), međutim njegova upotreba u podmorskim kabelima nije zabilježena.

### 2.3.7 Dodatni elementi

Kao dodatni elementi u trožilnim i jednožilnim podmorskim kabelima ugrađuju se optički kabeli za telekomunikacijsko povezivanje. Isti često mogu imati metalni plašt ili zaštitu od mehaničkih opterećenja unutar kablenskog voda. U trožilnim kabelima najčešće se ugrađuju na rubovima uz fazne vodiče unutar zajedničke armature, a izbjegava se polaganje u središte zbog mogućih jačih mehaničkih naprezanja. U slučaju ugradnje metalne zaštite mogu se stvoriti dodatni gubitci i zagrijavanje kablenskog voda. Kod jednožilnih kabela mogu se integrirati unutar armature jednožilnog kabela ili se polažu u odvojenoj trasi.

Optički kabeli osim za telekomunikacijsko povezivanje mogu se koristiti i za druge svrhe poput mjerenja temperature u kabelima, mjerenja vibracija, detekcija kvara, detekcija pomicanja kablenske trase i slično.

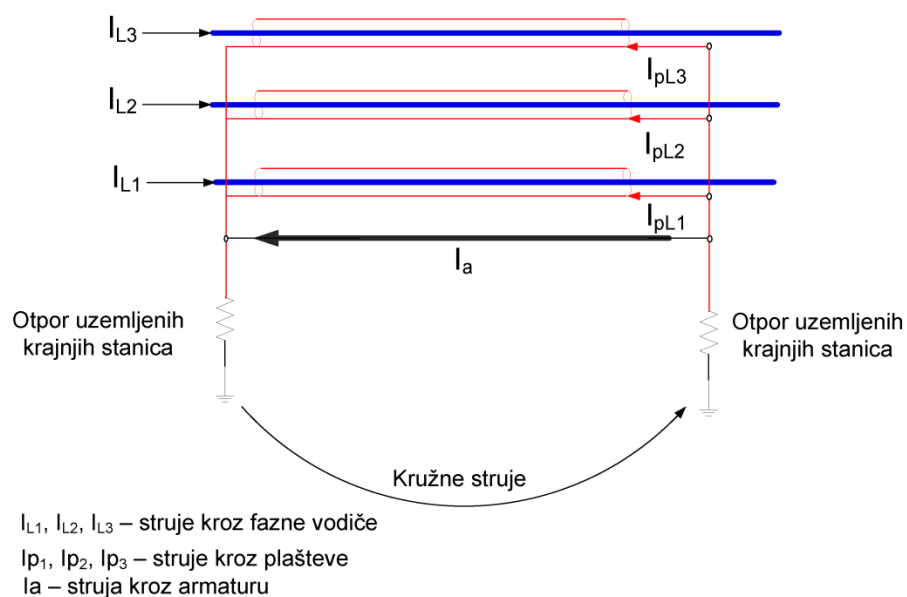
### 3 OPĆENITO O RASPODJELE STRUJA U HVAC PODMORSKIM KABELIMA

U kabelskim vodovima osim struja u faznim vodičima javljaju se i struje u metalnim komponentama kao posljedica promjenjivog magnetskog toka koji inducira napone na električnim zaštitama, plaštevima ili armaturi.

#### 3.1 Kružne struje

Kružne struje koje uzrokuju radne gubitke u ekranima/plaštevima i armaturi nastaju kao posljedica indukcije, u slučaju kad je strujni krug zatvoren uzemljenjem metalnog plašta ili armature na oba kraja. U slučaju odspajanja plašta ili armature na jednom kraju kružne struje ne postoje, međutim tada su nužne dodatne zaštite od prenapona, ali i dodatne provjere utjecaja na sustav uzemljenja. Osim odspajanja ekrana na jednom ili oba kraja moguće je i preplitanje ekrana čime se osiguravaju manji iznosi kružnih struja, a posljedično tome i gubici.

Iako su navedene mjere općenito primjenjive u kopnenim dijelovima trase iste se ne primjenjuju pri polaganju podmorskih kabela. Razlozi su prvenstveno vezani za otežano polaganje kabelskih vodova na podmorsko dno pri čemu se mogu primijeniti jednostavna rješenja odspajanja na jednom kraju ili obostrano uzemljenje.

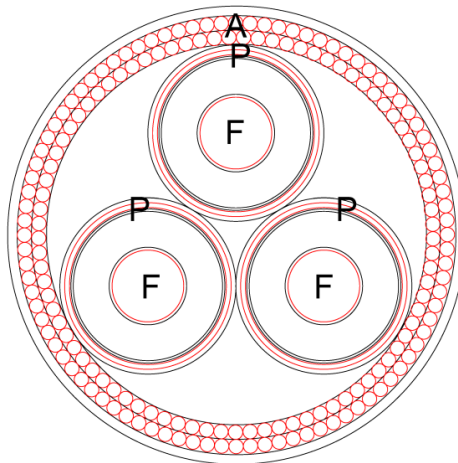


**Slika 3-1 Osnovna shema raspodjele kružnih struja u metalnim plaštevima i armaturi podmorskih kabelskih vodova**  
U slučaju jednožilnih podmorskih kabela, međusobno razmaknutih na velikim razmacima, kružne struje u normalnom pogonu mogu imati visoke vrijednosti, a u armaturi podmorskog kabela i preko 90% fazne struje (tablica 3-1).

Tablica 3-1 Očekivani postotni iznosi kružnih struja za jednožilne podmorske kabela u normalnom pogonu

Oznaka vodiča	Struja [% od fazne struje]
Faza	100%
Plajt	20-30%
Armatura	70-95%

Kod trožilnih podmorskih kabela sa zajedničkom armaturom zbog simetričnog rasporeda faznih vodiča kružna struja je u načelu uvijek zanemariva (slika 3-3). Kružnu struju u armaturi mogu uzrokovati nesimetrije u faznoj struji, nesimetričnost u izvedbi trolisnog rasporeda faznih vodiča i postojanje metalnih zaštita optičkog kabela. Također dodatno je potrebno ispitati utjecaj helikodalnog namatanja žica i žica faznih vodiča.



Oznaka vodiča	Struja [% od fazne struje]
F-Faza	100%
P-Plašt	5-20%
A-Armatura	0%

Slika 3-2 Najčešća konfiguracija trožilnih podmorskih kabela i očekivani postotni iznosi struja kroz metalne komponente

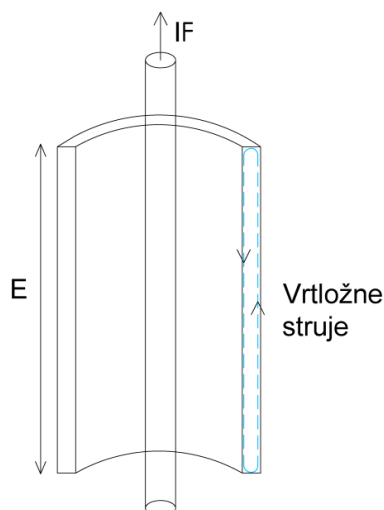
U slučajevima nastanka jednopolnih kratkih spojeva zbog izrazito nesimetričnih tokova struja kroz fazne vodiče dolazi do značajne promjene struja kroz plaštve i armaturu pri čemu se javljaju visoki iznosi struja koje ulaze u uzemljivače krajnjih uzemljenih stanica (trafostanice, kabelačke stanice i sl.). U takvim situacijama može doći do značajnog iznošenja potencijala na susjedne kabelačke stanice što je nužno zasebno razmotriti pri dimenzioniranju uzemljivača stanica. Posebno se kod podmorskih kabela ponekad treba razmatrati situacija prodora vode u armaturu zbog čega armatura u područjima nižeg specifičnog otpora

morske vode odvodi i ispušta značajnu struju u morsku vodu (niski specifični otpor), te značajno mijenja potencijalnu sliku na površini tla uzemljenih stanica.

### 3.2 Vrtložne struje

Vrtložne struje u podmorskim kabelskim vodovima su specifične zbog postojanja debelog sloja armature i vrlo ih je teško računati zbog čega se najčešće koriste polu-empirijske relacije koje daju najčešće nepouzdan rezultate [37], [43], [48], [57] i [58] i značajno odstupaju od rezultata zabilježenih mjerenjem ili proračunima korištenjem numeričkih metoda. Vrtložne struje nastaju u metalnim komponentama kabela kao posljedica različitih iznosa induciranog napona na unutarnjoj i vanjskoj površini metalnog plašta ili armature. U metalnim plaštovima, u slučaju primjene obostranog uzemljenja, najčešće se ne razmatraju jer su značajno manjeg iznosa u odnosu na kružne struje. Međutim nužno ih je razmatrati ako su metalni plaštevovi odspojeni ili prepleteni. Za razliku od plašteva primarne publikacije [5], [6], [37], [48] i dr. pokazuju da ih je nužno razmatrati.

U načelu u podmorskim kabelima s čeličnom armaturom (najčešće trožilni podmorski kabeli) magnetsko polje se izobličuje i ojačava djelovanjem magnetskog materijala od kojeg je izrađena armatura. S obzirom da je čelik vrlo dobar feromagnetski materijal ovi gubici mogu biti visoki, a prema određenim publikacijama ipak su značajno niži od gubitaka uzrokovanim vrtložnim strujama [5] i [6]. Također iste publikacije naglašavaju da idealan materijal za armaturu ili cijev kabela pruža, ne samo dobre mehaničke karakteristike, nego i niske gubitke zbog vrtložnih struja i niske gubitke zbog histereze. U svakom slučaju istraživanja na ovom području su oskudna i ne pružaju kompletni uvid u udio pojedinih gubitaka (vrtložne struje, kružne struje i gubici zbog histereze) za nove tipove trožilnih podmorskih kabela sa zajedničkom armaturom. Posebno su nužna istraživanja utjecaja magnetske permeabilnosti, razmaka između žica, debljine žica i drugih faktora na iznose vrtložnih struja.



Slika 3-3 Shematski prikaz vrtložnih struja u plaštu kabelskog voda

Jednožilni kabelski vodovi s čeličnom armaturom rijetko se koriste u praksi zbog visokih iznosa vrtložnih struja i struja magnetiziranja zbog čega im je prijenosna moć ograničena najčešće do 400 A. Zbog toga se za armaturu primjenjuju materijali od aluminijskih legura ili bakra.

Za trožilne podmorske kabele vrlo je kompleksno računati vrtložne struje na temelju analitičkih izraza koji su prema objavljenim publikacijama vrlo često aproksimirani, koriste se polu-empirijske relacije ili numeričke metode (FEM- Finite element method) [57], [48], [37]. Prethodno navedeno će biti predmet razrade u slijedećim poglavljima uključujući i kompletni pregled danas dostupnih računskih modela kabela, a posebno s osvrtom na podmorske kabelske vodove.

## 4 RAČUNSKIH MODELI PODMORSKIH KABELSKIH VODOVA

Za ispravno dimenzioniranje, polaganje i upotrebu podmorskih kabela nužan je razvoj odgovarajućih računskih modela koji omogućuju analizu normalnih pogonskih stanja, kvarove i prijelaznih pojave.

Računski modeli kabelskih vodova se u osnovi mogu podijeliti u dvije kategorije:

- prva kategorija obuhvaća složene frekvencijske modele namijenjene za analizu atmosferskih i sklopnih prenapona odnosno za vremenske simulacije i implementirani su u većini EMTP programa,
- druga kategorija obuhvaća pogonsku frekvenciju 50 Hz, a primjena navedenih modela obuhvaća široki raspon od proračuna tokova snaga, naponskih prilika, zagrijavanja kabelskih vodova, analiza uzemljivačkih sustava i pojava iznošenja potencijala.

### 4.1 Frekvencijski modeli

Frekvencijska teorija kabela je prvenstveno bazirana na modelima šupljeg valjka ili cijevnog modela (eng. pipe type cables) koji su danas implementirani u većini EMTP programa (EMTP Works, PSCAD, EMTP-ATP). Početke razvoja frekvencijskih modela kabelskih vodova predstavljaju radovi Carsona (1926.) [3] i Pollaczek (1926.) [2], a povezani su razvojem formula za rješavanje povratnog puta zemlje za nadzemne i kabelske vodove. U ranijem razdoblju od značajnijih radova za istaknuti je rad Dwight [1], a povezani su sa razmatranjima efekta blizine u žicama i tankim cijevima.

Cijevni model podrazumijeva da se ekran kabela i armatura modeliraju vodičem u obliku šupljeg valjka. Razlog upotrebe ovakvog pristupa leži u jednostavnosti teorijskih razmatranja i mogućnost analitičkom pristupu rješavanja problema koji je prvi uveo Schelkunoff [4].

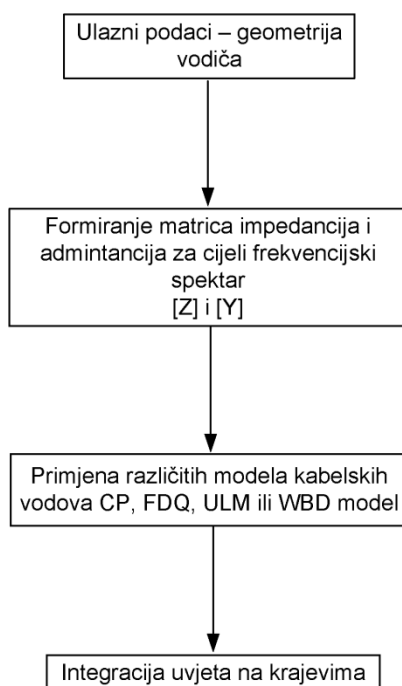
Wiesman, Meyerhoff i Eager (1949.) [5], [6] i [7], razvili su niz polu-empirijskih formula za proračune izmjeničnog otpora kabela položenih u cijevima. Rađen je niz eksperimentalnih mjerenja koja su prvenstveno vezani za gubitke u kabelima i pogonsku frekvenciju (60 Hz), a detaljnije će biti opisan u poglavlju 4.3.

Intenzivniji razvoj frekvencijskih modela kabela zabilježen je 70/80-tih godina prošlog stoljeća, a obilježili su ih radovi [6], [9]-[18] koji su uključivali analitičko i numeričko modeliranje za fazni vodič, izolaciju, poluvodljive slojeve, ekrane, plašteve ili armature kabela. Od prethodno navedenih radova za istaknuti je radove Wedephol-a (1973.) [12] i Ametani-a (1980.) [16] koji uvode poopćene matrične modele za modeliranje kabelskih vodova uključujući i modele šupljeg valjka. U kasnijem razdoblju ističe se veliki broj radova povezanih s razvojem modela i integraciju istih u mreži. Prethodno navedeni modeli obuhvaćaju različite pristupe, a poznati su pod nazivima:

- J-Marti modeli,
- CP modeli – modeli s konstantnim parametrima,
- FDQ modeli,

- ULM ili WBD modeli – univerzalni modeli kabela ili dalekovoda (danas najnapredniji frekvencijski modeli kabela u EMTP teoriji).

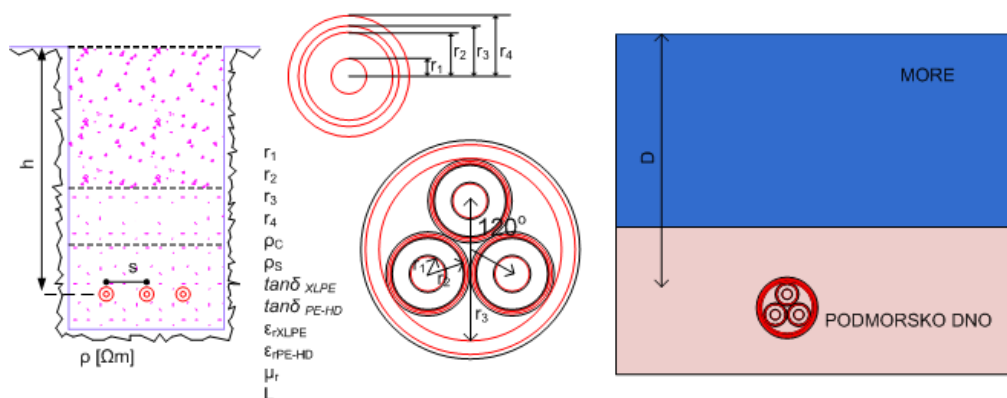
Treba naglasiti da je teorija razvoja frekvencijskih ovisnih modela kablinskih vodova za potrebe vremenskih simulacija blisko vezana s razvojem frekvencijskih ovisnih modela dalekovoda odnosno pojedine modele uz određena ograničenja i prilagodbe algoritama je moguće primijeniti kako za kablinske tako i za zračne vodove. Značajan doprinos razvoju EMTP programa kablinskih i zračnih vodova pridonijeli su J. Marti (1982.) [18], L. Marti (1988.) [21], Castellanos (1997.) [28], Gustavsen (1995.) [25], Noda (1996.) [27] i drugi. Modeliranje kablinskih vodova se može podijeliti u nekoliko koraka načelno prikazanih u nastavku.



**Slika 4-1 Osnovni koncept formiranja frekvencijskog modela kabela**

#### 4.1.1 Ulazni podaci

Prije upotrebe odgovarajućih modela nužan je izračun parametara kabela koji obuhvaćaju čitav frekvencijski spektar (najčešće od 10 mHz – 10 MHz). Izračun matrica impedancija i admintancija se izvodi na osnovu geometrijskih karakteristika i svojstava materijala. Modeli su identični za podzemne i podmorske kablinske vodove.



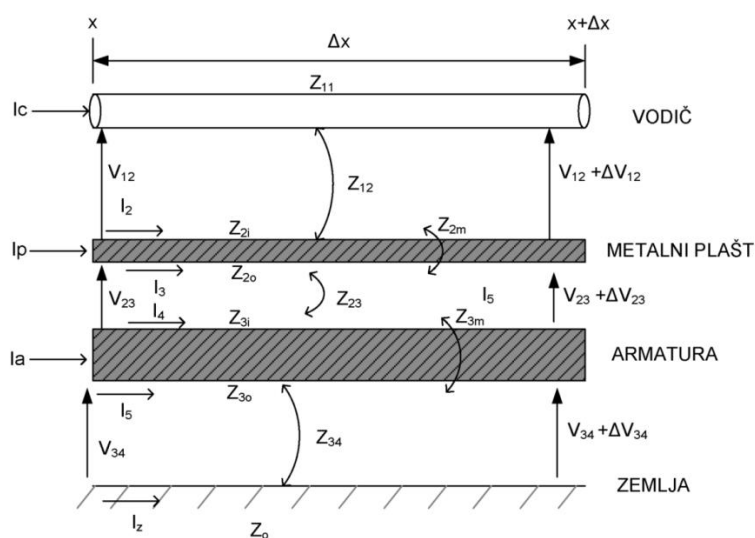
Slika 4-2 Geometrija kablskih vodova i karakteristike materijala – ulazni podaci za frekvencijske modele

#### 4.1.2 Formiranje matrica impedancija – općeniti pristup

Općeniti pristup formiranja matrica impedancija i admitancija uveli su Wedephol [12] i Ametani [16] koji su integrirali dotadašnja znanja na području izrade računskog modela kabela u općenite matrične jednadžbe. S obzirom da je riječ o opsežnoj tematici u nastavku će se prikazati osnovne formulacije kako bi se dobio uvid u način formiranja matrica kako za jednožilne tako i za trožilne kablanske vodove uključujući cijevni model armature.

U općenitom pristupu formira se sustav jednadžbi na osnovu pojednostavljene sheme za jednožilne kablanske vodove prikazane na slici 4-3. Formiraju se sustavi jednadžbi na početku i kraju voda odnosno formiraju se telegrafске jednadžbe. Za istaknuti je da je moguće modelirati i kablanske vodove položene u zraku ili zemlji uz odgovarajuće prilagodbe u dijelu matrica povratnog puta zemlje. Prethodno navedeno je posebno interesantno za kabele položene u tunelima. Općenitim matričnim sustavom jednadžbi omogućuje se pojednostavljenje izračuna bez obzira je li riječ o generiranju matrica impedancija za pogonsku frekvenciju (50 Hz/60 Hz) ili za cijeli frekvencijski spektar.

#### Jednožilni kablanski vodovi



Slika 4-3 Ekvivalentni krug impedancija jednožilnih podmorskih kabela – cijevni model



Na prethodnoj slici označene su sljedeće veličine:

$I_c, I_p, I_a, I_z$  – struje kroz središnji vodič, plašt, armaturu i zemlju.

$I_2, I_3, I_4$  i  $I_5$  – struje unutarnje i vanjske površine plašta i armature.

$V_{12}, V_{23}, V_{34}$  – napon između jezgre, plašta, armature i zemlje na udaljenosti  $x$ .

$V_{12+\Delta x}, V_{23+\Delta x}, V_{34+\Delta x}$  – napon između jezgre vodiča, plašta, armature i zemlje na udaljenosti  $x+\Delta x$ .

Na osnovu slike 4-3 mogu se formirati sljedeće jednačbe:

$$I_2 = -I_c; I_3 = -I_4; I_5 = -I_z \quad (1)$$

$$I_p = I_2 + I_3 = -(I_c + I_4) \quad (2)$$

$$I_a = I_4 + I_5 = I_4 - I_z \quad (3)$$

Iz prethodno navedenih jednačbi izdvaja se:

$$I_4 = -(I_c + I_p) \quad (4)$$

$$I_z = -(I_c + I_p + I_a) \quad (5)$$

Za svaku od petlji moguće je formirati niz jednačbi (primjer za petlju 1):

$$\frac{V_{12}}{\Delta x} - \frac{V_{12}}{\Delta x} - \frac{\Delta V_{12}}{\Delta x} = z_{11} \cdot I_c - z_{12} \cdot I_2 - z_{2i} \cdot I_2 - z_{2m} I_3 \quad (6)$$

Slijedom primjera (6) izvode se jednačbe za sve petlje i u konačnici dobije se opće poznati matični izraz telegrafskih jednačbi:

$$\frac{\Delta V}{\Delta x} = -[Z] \cdot [I] \quad (7)$$

gdje je:

$[Z]$  – matrica međusobnih i vlastitih impedancija jednožilnog kabela  $[Z_i]$ , te povratnog puta zemlje  $[Z_o]$

$$[Z] = [Z_i] + [Z_o] \quad (8)$$

$$[Z_i] = \begin{bmatrix} Z_{cc} & Z_{cp} & Z_{ca} \\ Z_{cp} & Z_{pp} & Z_{pa} \\ Z_{cp} & Z_{pa} & Z_{aa} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[Z_o] = \begin{bmatrix} Z_o & Z_o & Z_o \\ Z_o & Z_o & Z_o \\ Z_o & Z_o & Z_o \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$Z_{cc} = z_{11} + z_{12} + z_{2i} + z_{2o} + z_{23} + z_{3i} + z_{3o} + z_{34} - 2(z_{2m} + z_{3m}) \quad (11)$$

$$Z_{pp} = z_{2o} + z_{23} + z_{3i} + z_{3o} + z_{34} - 2z_{3m} \quad (12)$$

$$Z_{cp} = z_{2o} + z_{23} + z_{3i} + z_{3o} + z_{34} - 2z_{2m} - 2z_{3m} \quad (13)$$

$$Z_{pa} = z_{3o} + z_{34} - z_{3m} \quad (14)$$

Detaljna pojašnjenja po pitanju načina izračuna vlastitih i međusobnih impedancija, te povratnog puta zemlje odnosno impedancija navedenih u izrazima (11)–(14) dani su u [12] i [16].

### Trožilni kabelski vodovi

Za tri jednožilna kabela sa zajedničkom armaturom/cijevi i plaštom formiraju se matrice impedancija dimenzija  $9 \times 9$  (općenito vrijedi i za  $n$  vodiča) koje obuhvaćaju sve fazne vodiče, armaturu i metalne plašteve, a uzimaju u obzir i međusobne impedancije između vodiča. Općenito za  $n$  jednožilnih vodiča formiraju se matrice vlastitih, međusobnih impedancija i povratnog puta zemlje s blok matricama.

$$[Z] = [Z_i] + [Z_p] + [Z_c] + [Z_o] \quad (15)$$

$$[Z_i] = \begin{bmatrix} [Z_{i1}] & [0] & \dots & [0] & 0 \\ [0] & [Z_{i2}] & \dots & [0] & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots \\ [0] & [0] & \dots & [Z_{in}] & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$[Z_{PT}] = \begin{bmatrix} [Z_{p11}] & [Z_{p12}] & \dots & [Z_{p1n}] & 0 \\ [Z_{p12}] & [Z_{p22}] & \dots & [Z_{p2n}] & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots \\ [Z_{p1n}] & [Z_{p2n}] & \dots & [Z_{pnn}] & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$[Z_c] = \begin{bmatrix} [Z_{c1}] & [Z_{c1}] & \dots & [Z_{c1}] & Z_{c2} \\ [Z_{c1}] & [Z_{c1}] & \dots & [Z_{c1}] & Z_{c2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots \\ [Z_{c1}] & [Z_{c1}] & \dots & [Z_{c1}] & Z_{c2} \\ Z_{c2} & Z_{c2} & \dots & Z_{c2} & Z_{c3} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$[Z_o] = \begin{bmatrix} [Z_o] & [Z_o] & \dots & [Z_o] & Z_o \\ [Z_o] & [Z_o] & \dots & [Z_o] & Z_o \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots \\ [Z_o] & [Z_o] & \dots & [Z_o] & Z_o \\ Z_o & Z_o & \dots & Z_o & Z_o \end{bmatrix} \quad (19)$$

Gdje su:

$[Z_i]$  – impedancija međusobnih i internih impedancija  $n$ -vodiča unutar šuplje cijevi,

$[Z_{PT}]$  – matrica unutarnjih impedancija cijevi,

$[Z_c]$  – matrica impedancija unutarnjih i vanjskih površina cijevi,

$[Z_o]$  – matrica povratnog puta zemlje.

$[Z_{pjk}]$  – blok matrica impedancije između  $j$ -tog i  $k$ -tog unutarnjeg vodiča u odnosu na unutarnju površinu cijevi.

$[Z_{c1}]$  – blok matrica impedancija između unutarnje i vanjske površine cijevi.

### 4.1.3 Formiranje matrica admitancija – općeniti pristup

Matricu admitancija  $[Y]$  moguće je formirati na osnovu proračuna potencijalnih koeficijenata  $[P]$ :

$$[Y] = j\omega \cdot [P]^{-1} \quad (20)$$

$$[P] = [P_i] + [P_{PT}] + [P_c] + [P_o] \quad (21)$$

gdje je:

$[P_i]$  – matrica unutarnjih potencijalnih koeficijenata,

$[P_o]$  – matrica potencijalnih koeficijenata sustava u zraku (u slučaju kablskih vodova u zemlji matrica se izostavlja),

$[P_{PT}]$  – matrica potencijalnih koeficijenata za trožilne kabele s armaturom modeliranom šupljim valjkom (za jednožilne kabele se izostavlja),

$[P_c]$  – matrica potencijalnih koeficijenata između unutarnje i vanjske površine cijevnog modela armature (za jednožilne kabele se izostavlja).

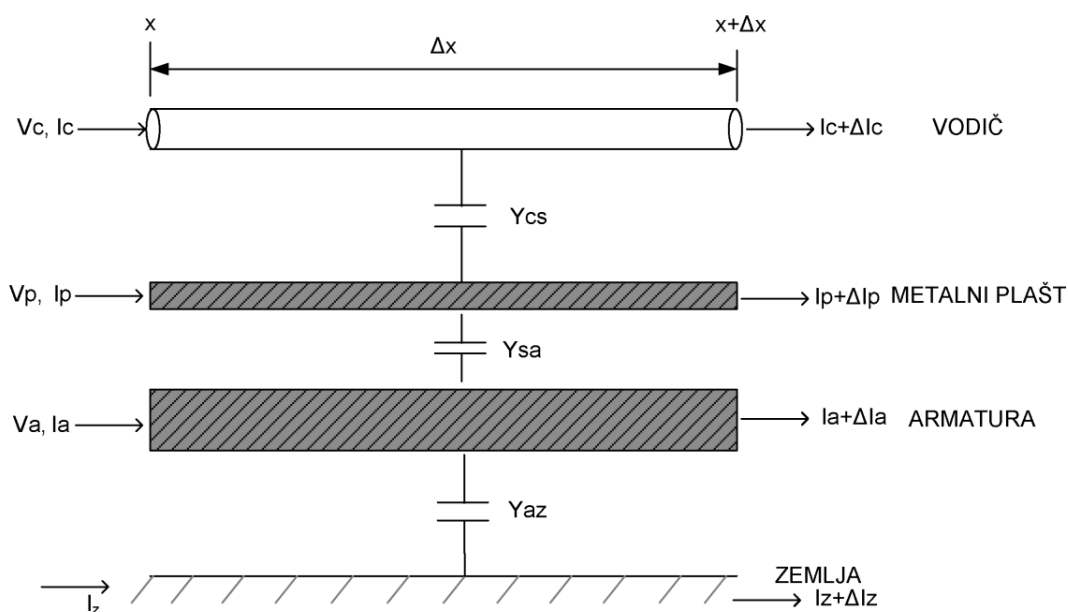
#### Jednožilni podmorski kabele

Osnovna shema i jednadžbe prikazane su ispod.

$$I_c = y_{cs} \cdot \Delta x (V_c - V_p) + I_c + \Delta I_c \quad (22)$$

$$I_p = y_{cs} \cdot \Delta x (V_p - V_c) + y_{sa} \cdot \Delta x \cdot (V_s - V_a) + I_s + \Delta I_s \quad (23)$$

$$I_a = y_{sa} \cdot \Delta x (V_a - V_s) + y_{az} \cdot \Delta x \cdot V_a + I_a + \Delta I_a \quad (24)$$



Slika 4-4 Ekvivalentni krugovi za proračun admitancije jednožilnih kabela

Prethodno navedena jednadžba se može napisati matrično:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta I_c}{\Delta x} \\ \frac{\Delta I_p}{\Delta x} \\ \frac{\Delta I_a}{\Delta x} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} y_{cs} & -y_{cs} & 0 \\ -y_{cs} & y_{cs} + y_{sa} & -y_{sa} \\ 0 & -y_{sa} & y_{sa} + y_{az} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_c \\ V_p \\ V_a \end{bmatrix} \quad (25)$$

Ako se uvede matrica potencijalnih koeficijent ista se može pisati kao:

$$[P_i] = \begin{bmatrix} [P_{i1}] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [P_{i2}] & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & [P_{in}] \end{bmatrix} \quad (26)$$

gdje se svaka pojedinačna blok matrica računa preko slijedećeg izraza:

$$[P_{ij}] = \begin{bmatrix} P_{cj} + P_{sj} + P_{aj} & P_{sj} + P_{aj} & P_{aj} \\ P_{sj} + P_{aj} & P_{sj} + P_{aj} & P_{aj} \\ P_{aj} & P_{aj} & P_{aj} \end{bmatrix} \quad (27)$$

Uz ovakav način modeliranja moguće je računati i kableske vodove položene u zraku:

$$[P_o] = \begin{bmatrix} [P_{o11}] & [P_{o12}] & \dots & [P_{o1n}] \\ [P_{o12}] & [P_{o22}] & \dots & [P_{o2n}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [P_{o1n}] & [P_{o2n}] & \dots & [P_{onn}] \end{bmatrix} \quad (28)$$

Dijagonalne blok matrice se računaju preko slijedećeg izraza:

$$[P_{ojk}] = \begin{bmatrix} P_{ojk} & P_{ojk} & P_{ojk} \\ P_{ojk} & P_{ojk} & P_{ojk} \\ P_{ojk} & P_{ojk} & P_{ojk} \end{bmatrix} \quad (29)$$

gdje je:

$P_{cj}$ ,  $P_{sj}$ ,  $P_{aj}$  – potencijalni koeficijent ovisan o omjerima polumjera izolacije i permitivnosti sredine,

$P_{ojk}$  – potencijalni koeficijenti samo za slučaj ako je kabel položen u zraku.

Detaljnija objašnjenja pojedinačnih izraza u gornje navedenim matricnim jednadžbama mogu se pronaći u [12] i [16].

### Trožilni podmorski kabelski kabel

Za trožilne podmorske kabele potencijalni koeficijenti su određeni slijedećim matricama:

$$[P_i] = \begin{bmatrix} [P_{i1}] & [0] & \dots & [0] & 0 \\ [0] & [P_{i2}] & \dots & [0] & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots \\ [0] & [0] & \dots & [P_{in}] & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$[P_{PT}] = \begin{bmatrix} [P_{p11}] & [P_{p12}] & \cdots & [P_{p1n}] & 0 \\ [P_{p12}] & [P_{p22}] & \cdots & [P_{p2n}] & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \cdots \\ [P_{p1n}] & [P_{p2n}] & \cdots & [P_{pnn}] & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$[P_c] = \begin{bmatrix} [P_c] & [P_c] & \cdots & [P_c] & P_c \\ [P_c] & [P_c] & \cdots & [P_c] & P_c \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \cdots \\ [P_c] & [P_c] & \cdots & [P_c] & P_c \\ P_c & P_c & \cdots & P_c & P_c \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$[P_o] = \begin{bmatrix} [P_o] & [P_o] & \cdots & [P_o] & P_o \\ [P_o] & [P_o] & \cdots & [P_o] & P_o \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \cdots \\ [P_o] & [P_o] & \cdots & [P_o] & P_o \\ P_o & P_o & \cdots & P_o & P_o \end{bmatrix} \quad (33)$$

Detaljnija objašnjenja pojedinačnih izraza u gornje navedenim matričnim jednadžbama mogu se pronaći u [12] i [16].

Uvidom u korištene relacije [12] i [16] i postojeće programske EMTP programe (EMTP Works i sl.) utvrđeno je sljedeće:

- 1) Za proračun impedancije zemlje može se koristiti samo jednoslojni model tla odnosno nije moguće uključiti otpor podmorskog dna i mora. Relacije koje se mogu primijeniti za integraciju dvoslojnog modela tla su objavljene u publikacijama [32], [34], [36], [40], [42] i [50].
- 2) Zbog kompleksnosti izračuna efekti blizine najčešće nisu integrirani u modele. Identično vrijedi i za vrtložne struje. Određene metode i istraživanja za integraciju efekta blizine i vrtložnih struja se mogu naći u [46], a temeljena su na istraživanjima navedenim u [9], [10] i [11].
- 3) Mogućnost primjene cijevnih modela trožilnih kabelskih vodova ne ograničava se samo na podmorske kabelske vodove nego i tunele za što najčešće nisu postojali odgovarajući modeli [39]. Međutim dodatna istraživanja u ovom polju po pitanju načina primjene su nužna.

#### 4.1.4 Primjena različitih frekvencijskih modela kabela za vremenske simulacije

Postoji čitav niz frekvencijskih modela kabelskih vodova (CP, J-Marti, FDQ, ULM ili WBD), a u nastavku će se prikazati osnovni koncept danas najčešće korištenih modela FDQ i ULM modeli. Dva osnovna tipa računskih modela kabela su razvijena u zadnjih nekoliko desetljeća i implementirana su u većini naprednih EMTP programa (PSCAD, EMTP Works i sl.). U osnovi svi modeli se dijele u dvije kategorije (vremenska i frekvencijska domena). U frekvencijskoj domeni linijski modeli (kabeli i dalekovodi) se modeliraju za svaku frekvenciju, a frekvencijski odziv se prebacuje u vremensku domenu korištenjem transformacija poput diskretne Laplaceove transformacije. S druge strane u vremenskoj domeni diferencijalne jednadžbe se rješavaju korištenjem diskretnih vremenskih intervala (npr. trapezno pravilo). Detaljniji podaci o načinu modeliranja FDQ i ULM modela mogu se naći u [21], [39], [44], [45], [47], [49] i drugi.

## FDQ modeli kablskih vodova

Na temelju formiranih matrica impedancija i admitancija, telegrafске јednadžbe voda se prebacuju u modalnu domenu. Upotreba modalne domene je vrlo korisna jer se sustav međusobno spregnutih vodiča (fazna domena) prebacuje u sustav јednadžbi u kojem se svaki vodič može promatrati zasebno. Prethodno navedeno se može vrlo јednostavno koristiti i za izračune inverzne, nulte i direktne komponente impedancije vodova na temelju poznate spregnute matrice međusobnih i vlastitih impedancija.

$$\left[\frac{d^2V_f}{dx^2}\right] = [Z_f] \cdot [Y_f] \cdot [V_f] \quad (34)$$

$$\left[\frac{d^2I_f}{dx^2}\right] = [Y_f] \cdot [Z_f] \cdot [I_f] \quad (35)$$

Dakle izrazi (34) i (35) za telegrafске јednadžbe prebacuju u modalnoj domeni u obliku:

$$\left[\frac{d^2V_m}{dx^2}\right] = [T_v]^{-1} \cdot [Z_f] \cdot [Y_f] \cdot [T_v] \cdot [V_m] \quad (36)$$

$$\left[\frac{d^2I_m}{dx^2}\right] = [T_i]^{-1} \cdot [Y_f] \cdot [Z_f] \cdot [T_i] \cdot [I_m] \quad (37)$$

gdje je:

f, m – označavaju modalnu odnosno faznu domenu,

$T_i$  – svojstveni vektor struje

$T_v$  – svojstveni vektor napona

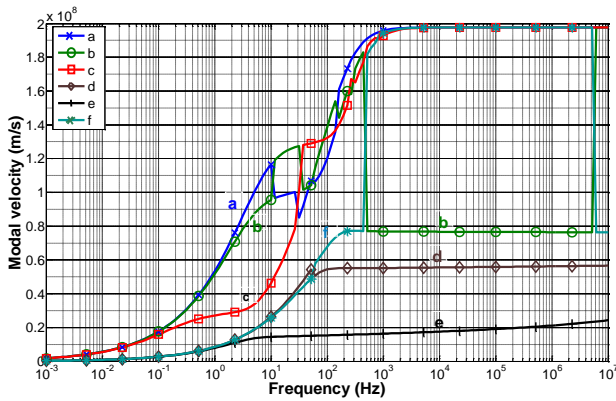
$$\Lambda = [T_v]^{-1} \cdot [Z_f] \cdot [Y_f] \cdot [T_v] – \text{svojstvena vrijednost.} \quad (38)$$

Modalna analiza se zasniva na matricnoj transformaciji telegrafskih matricnih јednadžbi iz područja faza u područje modova na način da postanu elektromagnetski nespregnute odnosno u terminu matricnog računa da matrice (YZ odnosno ZY) postanu dijagonalne. To se postiže proračunom svojstvene vrijednosti i svojstvenog vektora [19] i [24]. Pronaći matricu  $[T_v]$  koja dijagonalizira matricu  $[Z_f][Y_f]$  je matricni problem pronalaženja svojstvene vrijednosti i svojstvenog vektora. U modalnoj domeni sustav faza se zamjenjuje sustavom modova, a broj vodiča odgovara broju modova. Kao primjer na slici 4-5 prikazana je ovisnost modalne brzine o frekvenciji za raspon od 1 mHz do 10 MHz. Prikazano je 6 modova koji odgovaraju 6 vodiča u faznoj domeni (3 fazna vodiča+3 plašta kabela). Mod a je nulti mod širenja, a generira se јediničnom strujom narinutom kroz sve fazne vodiče te izdvajanjem iste iz plašteva kabela. Mod b i c predstavljaju među-fazne modove širenja nastale strujom narinutom kroz fazni vodič i izdvajanjem јedne polovine struje kroz prvi, a druge polovine kroz drugi fazni vodič. Mode e je nulti mod širenja kroz plašt ili ekran kabela, a modovi f i d su modovi širenja između plašteva kabela.

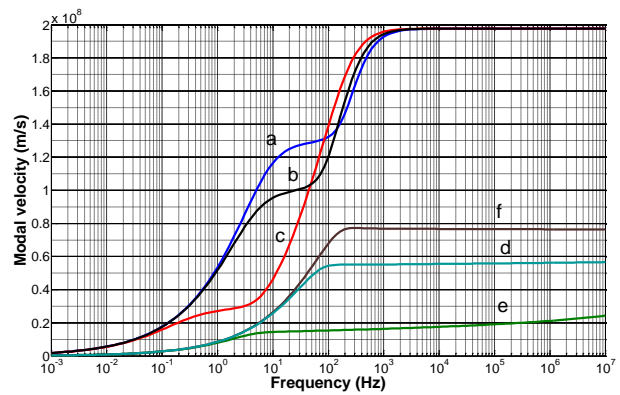
Postoje razne metode za proračun svojstvene vrijednosti i svojstvenog vektora primjerice QR metoda, metoda potencija, inverzna iteracija itd... Međutim, za potrebe frekvencijskih modela kabela nije moguće koristiti standardne metode proračuna svojstvenih vrijednosti i svojstvenog vektora, odnosno nužna su odgovarajuća poboljšanja [48]. Razlog leži u numeričkoj pojavi zamjene modova (slika 4-5) odnosno zamjene svojstvene vrijednosti i pripadnog svojstvenog vektora na određenim frekvencijama, a što u konačnici

rezultira nemogućnosti fitanja krivulja u modalnoj domeni za cijeli frekvencijski raspon. Na slici 4-5 prikazana je pojava zamjene modova a i b pri frekvenciji od 10 Hz, moda f i b pri frekvenciji od 300 Hz itd. Naime osnovni uvjet pri fitanju funkcija leži u zahtjevu da funkcije moraju biti kontinuirane i blage kroz cijeli frekvencijski spektar. Za ispunjenje ovih uvjeta nužno je koristiti specifične metode izračuna svojstvenih vrijednosti i svojstvenih vektora matrice produkta [YZ] kroz cijeli frekvencijski spektar primjenom:

- iteracijskih metoda poput Newton-Raphsonove metode,
- modificirane Jacobijeve metode uz korištenje svojstvenih vektora izračunatih za prethodnu frekvenciju,
- tracking algoritama odnosno prepoznavanja zamjene modova i korekcija modova.



s pojavom zamjene modova



bez pojave zamjene modova

Slika 4-5 Primjer zamjene modova u modalnoj analizi

Prethodno navedene relacije mogu se raspisati matricno za n vodiča (39), a rješenje diferencijalne jednačbe drugog reda za struje i napone dano je jednačbama (40) i (41):

$$\begin{bmatrix} \frac{d^2 V_{m1}}{dx^2} \\ \frac{d^2 V_{m2}}{dx^2} \\ \vdots \\ \frac{d^2 V_{mn}}{dx^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{m1}^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \gamma_{m2}^2 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \gamma_{mn}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \\ \vdots \\ V_{mn} \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$[I_m] = [Z_m]^{-1} \cdot \sqrt{[Z_m] \cdot [Y_m]} \cdot (V^+ e^{-x \cdot \sqrt{[Z_m] \cdot [Y_m]}} - V^- e^{x \cdot \sqrt{[Z_m] \cdot [Y_m]}}) \quad (40)$$

$$[V_m] = V^+ e^{-x \cdot \sqrt{[Z_m] \cdot [Y_m]}} + V^- e^{x \cdot \sqrt{[Z_m] \cdot [Y_m]}} \quad (41)$$

gdje je:

$$[Z_m] = [T_v]^{-1} \cdot [Z_f] \cdot [T_i] \quad (42)$$

$$[Z_m] = [T_i^t] \cdot [Z_f] \cdot [T_i] \quad (43)$$

$$[Y_m] = [T_i]^{-1} \cdot [Y_f] \cdot [T_v] \quad (44)$$

$$[Y_m] = [T_v^t] \cdot [Y_f] \cdot [T_v] \quad (45)$$

U konačnici se formira ekvivalentni strujni krug s prienosnim funkcijama (detaljnije u nastavku). Rješenje u vremenskoj domeni se dobije na temelju transformacija. Ekvivalentni krug s uvjetima na krajevima voda se implementira u EMTP programe.

### Univerzalni model kabel

Frekvencijsko modeliranje kabljskih vodova i izračun odziva na početku i kraju voda u načelu se zasniva na telegrafskim jednačbama:

$$\frac{dV}{dx} = -ZI \quad (46)$$

$$\frac{dI}{dx} = -YV \quad (47)$$

Općenito rješenje jednačbi (46) i (47) detaljno je obrađeno literaturom [40], a dano je slijedećim relacijama za napon i struju:

$$I(x) = C_1 \cdot e^{-\sqrt{Y \cdot Z} \cdot x} + C_2 \cdot e^{\sqrt{Y \cdot Z} \cdot x} \quad (48)$$

$$V(x) = Z_c \cdot (C_1 \cdot e^{-\sqrt{Y \cdot Z} \cdot x} - C_2 \cdot e^{\sqrt{Y \cdot Z} \cdot x}) \quad (49)$$

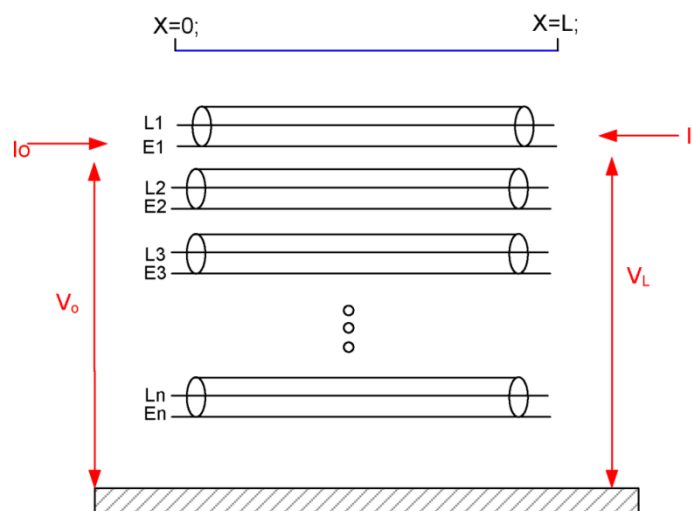
Frekvencijski modeli su bazirani na rješavanju matematičkih jednačbi i primjeni modalne analize (svojtvenih vrijednosti i svojtvenih vektora).

Pri tome se koriste slijedeći izrazi:

$$Z_c = Y^{-1} \cdot \sqrt{Y \cdot Z} - \text{karakteristična impedancija} \quad (50)$$

$$Y_c = (\sqrt{Y \cdot Z})^{-1} \cdot Y - \text{karakteristična admitancija} \quad (51)$$

Konstante  $C_1$  i  $C_2$  se mogu odrediti na osnovu poznatih početnih uvjeta na početku i kraju voda.  $I_0$  i  $V_0$  predstavljaju struje i napone na početku voda dok  $I_L$  i  $V_L$  predstavljaju struje i napone na kraju voda. Pri tome kabel može biti različito konfiguriran (trožilni kabel s plaštevima, trožilni kabel s plaštevima i armaturom, jednožilni kabel s plaštevima itd..).



Slika 4-6 N-jednožilnih kabela dužine L



Za koordinate  $x=0$  i  $x=L$ , naponi i struje na početku i kraju voda dobiju se iz slijedećih izraza na temelju jednadžbi (48) i (49).

$$I(0) = I_0 = C_1 + C_2 \quad (52)$$

$$V(0) = V_0 = Z_c \cdot (C_1 - C_2) \quad (53)$$

$$I(L) = -I_L = -C_1 e^{-\sqrt{Y}ZL} - C_2 e^{\sqrt{Y}ZL} \quad (54)$$

$$V(L) = V_L = Z_c \cdot (C_1 e^{-\sqrt{Y}ZL} - C_2 e^{\sqrt{Y}ZL}) \quad (55)$$

Iz jednadžbi (52) i (53) dobije se:

$$C_1 = \frac{I_0 + Y_c V_0}{2} \quad (56)$$

Množenjem jednadžbe (56) s  $Y_c$  i oduzimanjem jednadžbe (54), te uvrštenjem u (55) dobije se

$$I_L - Y_c \cdot V_L = -2C_1 e^{-\sqrt{Y}ZL} \quad (57)$$

$$I_L - Y_c \cdot V_L = -e^{-\sqrt{Y}ZL} (I_0 + Y_c V_0) \quad (58)$$

Izraz  $(I_0 + Y_c V_0)$  označava putujući val struja koji se širi od početka voda ( $x=0$ ) u pozitivnom smjeru osi  $x$ , a izraz  $I_L - Y_c \cdot V_L$  označava širenje putujućeg vala struja od kraja voda  $x=L$ .

Na identičan način se mogu izvesti i jednadžbe za struje na početku voda:

$$I_0 - Y_c \cdot V_L = -e^{-\sqrt{Y}ZL} (I_L + Y_c V_0) \quad (59)$$

Jednadžbe (58) i (59) se mogu napisati kao:

$$I_L = I_{sh,L} - I_{aux,L} \quad (60)$$

gdje je:

$$I_{sh,L} = Y_c \cdot V_L - \text{struje shunta proizvedene na kraju } L \text{ s narinutim naponom } V_L \quad (61)$$

$$I_{aux,L} = H \cdot I_{rf,L} - \text{vektor pomoćnih struja koje se sastoje od reflektiranih struja s početka voda } L=0 \text{ i prijenosne funkcije } H, \quad (62)$$

$$H = e^{-\sqrt{Y}Z} - \text{prijenosna funkcija } H \quad (63)$$

$$I_{rf,0} = I_0 + Y_c \cdot V_0 - \text{reflektirane struje s početka voda } L=0 \quad (64)$$

Na isti način se mogu prikazati i struje s početka voda:

$$I_0 = I_{sh,0} - I_{aux,0} \quad (65)$$

gdje je:

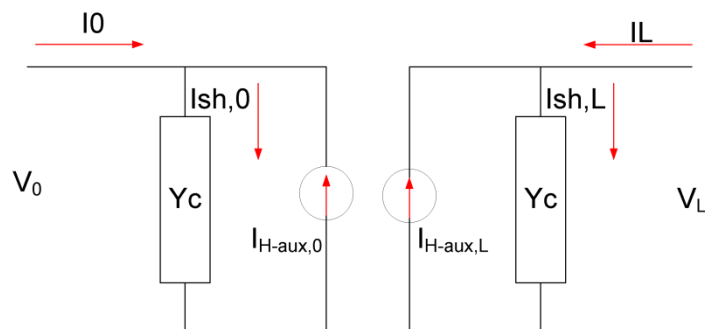
$$I_{sh,0} = Y_c \cdot V_0 - \text{struje šanta proizvedene na početku voda s narinutim naponom } V_0, \quad (66)$$

$$I_{aux,0} = H \cdot I_{rf,L} - \text{vektor pomoćnih struja koje se sastoje od reflektiranih struja s kraja voda } L \text{ i prijenosne funkcije } H, \quad (67)$$

$$H = e^{-\sqrt{Y \cdot Z}} - \text{prijenosna funkcija H} \quad (68)$$

$$I_{rf,L} = I_L + Y_c \cdot V_L - \text{reflektirane struje s kraja voda L} \quad (69)$$

Na temelju prethodno navedenog vod se shematski može prikazati prema slici 4-7.



Slika 4-7 Shema voda u tranzijentnoj analizi

Izrazi (59) i (60) su navedeni u frekvencijskoj domeni i za potrebe analiza nužno ih je prebaciti u vremensko područje. Transformacija izraza (60) u vremensko područje se može izvesti prema slijedećim izrazima:

$$i_0 = i_{sh,0} - i_{aux,0} \quad (70)$$

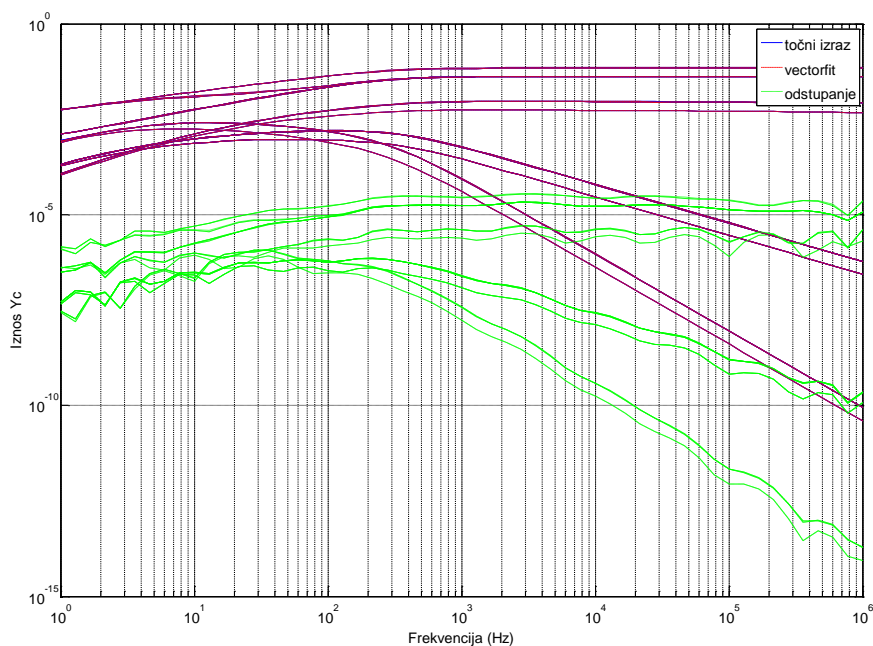
$$i_{sh,0} = y_c * v_0 \quad (71)$$

$$i_{aux,0} = h * i_{rf,L} \quad (72)$$

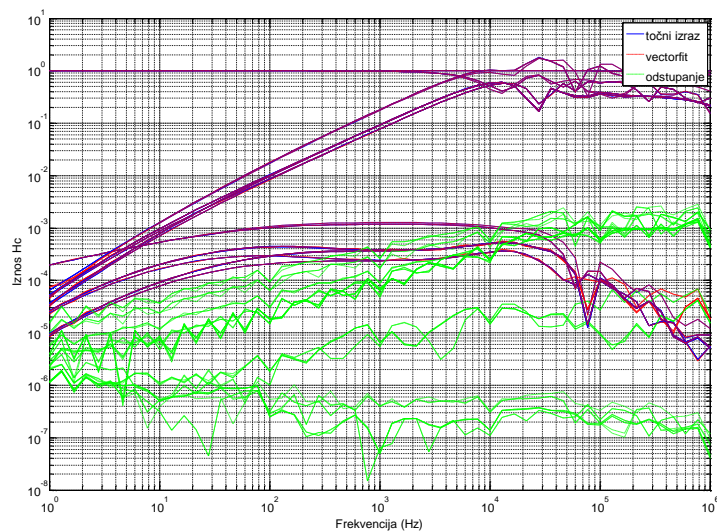
$$i_{rf,L} = 2 \cdot i_{sh,L} - i_{aux,L} \quad (73)$$

U relacijama (70) do (73) operator \* označava konvoluciju.

Relacije (70) do (73) označavaju rješenje struja u vremenskoj domeni za početak voda  $x=0$ . Na isti način se izvode relacije za kraj voda  $x=L$  odnosno zamjenom znaka 0 sa L u relacijama (70) do (73). U ULM modelu prema literaturi [47] konvoluciju je najlakše provesti primjenom varijabli stanja. Pri tome je nužno karakterističnu matricu  $Y_c$  i prijenosnu funkciju  $H$  prikazati kao racionalnu funkciju, a zatim je fitati primjenom algoritama „vectorfit“ [56]. U procesu fitanja svi elementi karakteristične matrice se izdvajaju za cijeli frekvencijski spektar i primjenjuje se algoritam vektorskog fitanja kroz cijeli frekvencijski spektar (slika 4-8). Općenito fitanje karakteristične impedancije je značajno jednostavnije od prijenosne funkcije  $H_c$ , a posebno zbog naglih lomova funkcije na većim frekvencijama. Na slici 4-9 prikazan je primjer vektorskog fitanja na kabelskim vodovima (bez armature). Usporedno su prikazane točni izrazi i odstupanja.

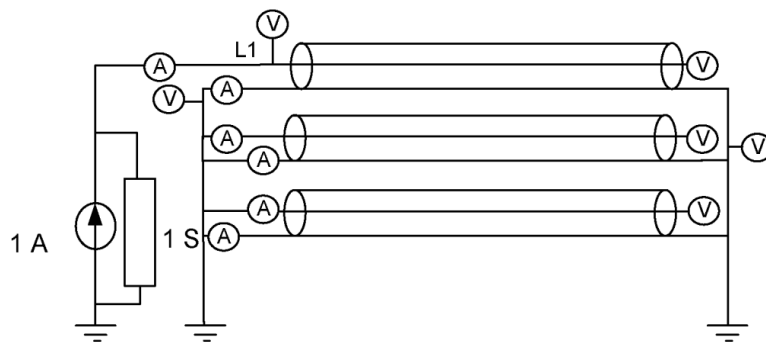


Slika 4-8 Primjer vektorskog fitanja karakteristične matrice  $Y_c$



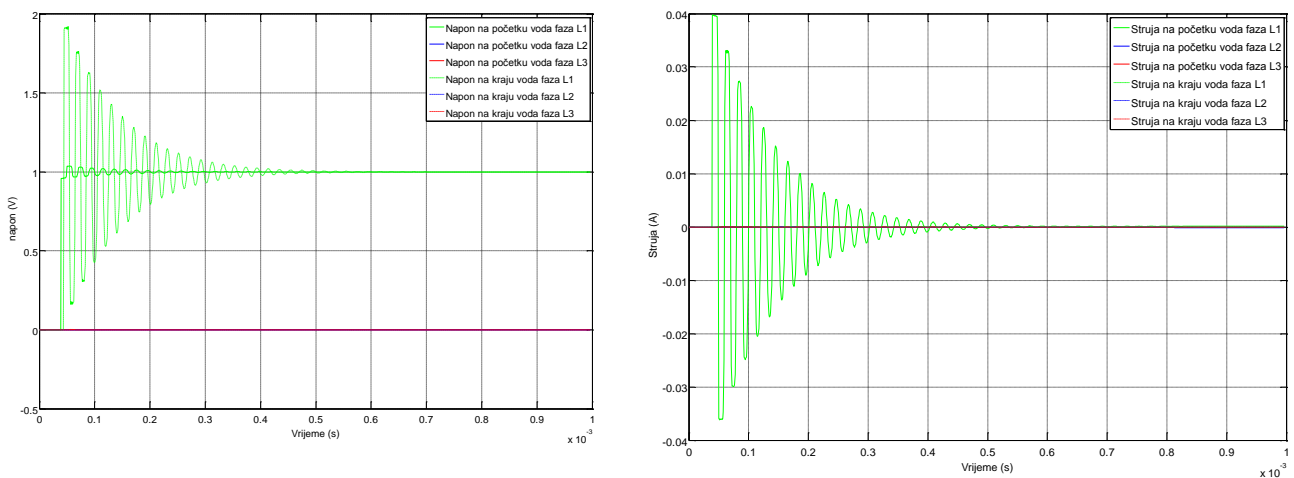
Slika 4-9 Primjer vektorskog fitanja prijenosne funkcije  $H_c$

U konačnici na model voda primjenjuju se uvjeti na krajevima i moguće je računati naponska i strujna stanja na svim elementima voda (naponska i strujna stanja na početku i kraju voda za fazne vodiče, metalne plašteve i armaturu). Kao primjer na slici 4-10 prikazan je vlastiti ULM model kabela implementiran u Matlabu, te naponska i strujna stanja na vodičima.

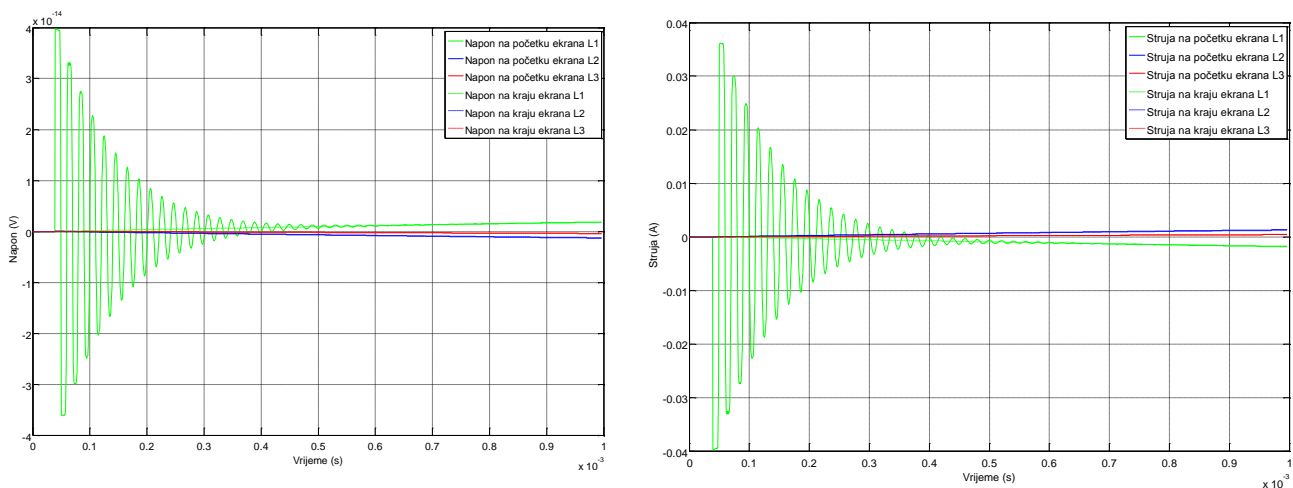


Slika 4-10 Model kabela za simulacije

Ilustrativni primjer simulacije naponskih i strujnih stanja na početku i kraju voda za jedinični signal narinut na fazu L1 na početku voda prikazani su na slikama ispod. Zelenom bojom na slici 4-11 je prikazan napon na početku i kraju voda iz kojeg je vidljivo da ulazni jedinični napon na početku voda faze L1 poprima vrijednost blizu 2 V na otvorenom kraju. Za ostale faze napon je očekivano jednak 0. Napon na krajevima plašta (slika 4-12) je jednak 0 (mali iznosi napona reda veličine  $10^{-14}$  posljedica su numeričkih odstupanja koja se razvojem modela trebaju ukloniti). Na temelju prethodno navedenog jasno je da ovakav način modeliranja omogućuje praćenje stanja naponskih i strujnih prilika na kabelskomvodu i istodobno omogućuje integraciju modela s ostalim elementima mreže.



Slika 4-11 Naponska i strujna stanja na početku i kraju voda za jedinični signal narinut na početku voda faze L1 – vlastite simulaciju na temelju ULM modela kabelskog voda implementiranog u Matlabu



**Slika 4-12 Naponska i strujna stanja na početku i kraju metalnih plaštova za jedinični signal narinut na početku voda – vlastite simulaciju na temelju ULM modela kabelskog voda implementiranog u Matlabu**

## 4.2 Numeričke metode modeliranja kabelskih vodova

Osim kompleksnih frekvencijskih modela kabela za vremenske simulacije koji se danas koriste u EMTP programima vrlo često se primjenjuju i numerički modeli bazirani na metodi konačnih elemenata. Numeričke metode se primjenjuju za proizvoljne oblike kabelskih vodova za razliku od jednostavnih cijevnih modela za koje postoje relativno jednostavna analitička rješenja i većinom se koriste za proračune gubitaka. Često se koriste za kontrolu proračuna odnosno za provjeru analitičkih aproksimacijskih modela kabelskih vodova kako za frekvencijske modele tako i za modele pogonske frekvencije 50 Hz.

Prednost numeričkih metoda zasnovana je na mogućnosti modeliranja proizvoljnih oblika kabelskih vodova sa svim elementima (izolacija, ekrani, armatura, ...). Nedostatak numeričkih metoda (FEM i dr.) leži u činjenici da su računski i vremenski izrazito zahtjevne i kompleksne, zahtijevaju relativno velik broj konačnih elemenata, te korisnik mora ispravno postaviti problem što ih čine teško primjenjivim u komercijalnim programima.

Značajnije istraživanje u ovom polju zabilježena su početkom ovog stoljeća kada započinje jača proizvodnja i primjena trožilnih podmorskih kabela sa zajedničkom armaturom (izgradnja velikih podmorskih vjetroelektrana i proizvodnja trožilnih XLPE podmorskih kabela sa zajedničkom armaturom), a za istaknuti je radove Stolan (2009.) [37], Sturm (2015.) [57], Palmgren (2013.) [43] i [48]. Prethodno navedeni radovi uspoređuju gubitke uzrokovane vrtložnim i kružnim strujama za različite tipove podmorskih kabela, uz dodatna laboratorijska mjerenja na podmorskim trožilnim kabelima. Gubici se uspoređuju s IEC normama 60287 [58] koje propisuju izraze za proračun gubitaka (poglavlje 4.3). Zaključci vezani za navedena istraživanja su slijedeća:

- Gubici u trožilnim podmorskim kabelima sa zajedničkom armaturom su uzrokovani vrtložnim strujama, a ovise o materijalima koji se koriste za armaturu (magnetski ili ne-magnetski materijali, specifični električni otpor itd...). Ako je riječ o magnetskim materijala gubici u armaturi ( $\lambda_2$ ) mogu imati značajni udio u odnosu na gubitke u faznim vodičima, ali su značajno manji od gubitaka

izračunatih prema IEC normi – slika 4-13. Zbog ovoga se smatra da su IEC relacije pre-konzervativne i netočne iako dodatna istraživanja su nužna. Uzimajući u obzir da je polaganje podmorskih kabela izrazito skupo, a razlike u odabiru presjeka mogu imati značajan utjecaj na ukupne investicijske troškove.

- Kako su fazni vodiči i armaturne žice često helikoidalno namotane ili upredene izračun vrtložnih struja je kompleksan zbog čega se najčešće primjenjuju numeričke metode, a izvođenje odgovarajućih analitičkih izraza koji će što je moguće bolje aproksimirati stvarno stanje dobiveno numeričkim metodama i mjerenjem je predmet današnjih istraživanja.
- Očekivano, kružne struje u slučaju uzemljenja na oba kraja su zanemarive, ali u specijalnim slučajevima dodatno treba istražiti njihov utjecaj (nesimetrija u faznim strujama i geometriji izvedbe kabela unutar armature, ugradnja metalne zaštite optičkog kabela unutar armature i dr.).
- Svi radovi zaključuju da se primjenom metode konačnih elemenata (2D i 3D FEM) dobiju značajno manji gubici u odnosu na polu-empirijske izraze navedene IEC normama.

Za izračun impedancija za širi frekventijski spektar moguće je koristiti FEM metodu, ali najviše se koristi u smislu kontrole rezultata dobivenih analitičkim putem. Također moguće su i druge numeričke metode koje su vremenski značajno brže [51], ali i dalje zbog kompleksnosti izračuna i vremenskog trajanja zaostaju za analitičkim izrazima.

Osim prethodno navedenog za istaknuti je niz eksperimentalnih mjerenja navedenih u publikacijama [37], [43] i [48]. Prethodno navedena istraživanja također ukazuju na potrebu revizije IEC norme za proračun gubitaka u armaturi podmorskih kabela i potreba razvoja točnijih analitičkih izraza za pogonsku frekvenciju 50 Hz.

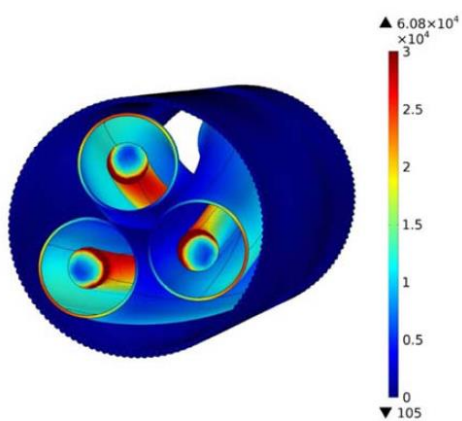
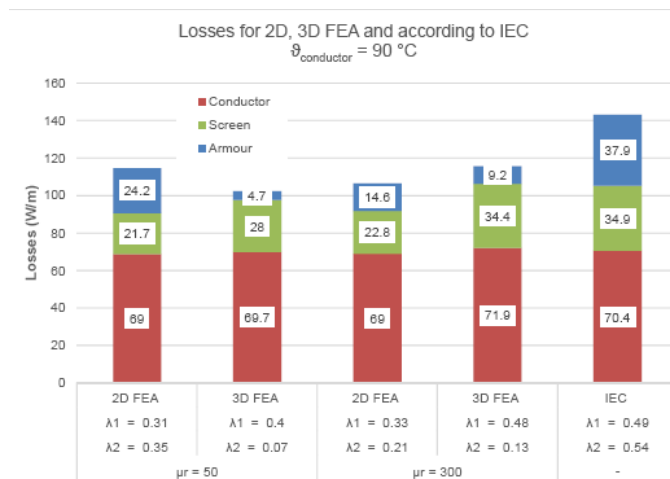


Fig. 6: Calculated distribution of three-dimensional loss density ( $W/m^3$ )  $\mu_r = 50$



Slika 4-13 Izračunati gubici i trodimenzionalna distribucija gubitaka u plaštevima i armaturi podmorskog kabela na osnovu IEC formulacija i primjenom 2D/3D metode konačnih elemenata prema literaturi [57]

### 4.3 Modeli za pogonsku frekvenciju od 50 Hz

#### 4.3.1 Jednožilni podmorski kabeli

Za jednožilne podmorske kabelske vodove dostupni su teoretski razrađeni modeli izračuna gubitaka u armaturi i plaštevima, te izračuna vrtložnih i kružnih struja tako da se isti neće detaljnije razmatrati. Bitno je napomenuti da kružne i vrtložne struje mogu poprimiti visoke vrijednosti u jednožilnim kabelima, ali postojeće teoretske podloge su opsežne [1], [13], [29] i [34].

#### 4.3.2 Trožilni podmorski kabeli

Modeli kabelskih vodova za pogonsku frekvenciju 50 Hz najčešće se koriste za izračune gubitaka u plaštevima, električnim zaštitama, armaturi ili cijevima. Početak razvoja modela seže u prošlo stojeće, a temeljeno je na eksperimentalnim radovima Meyerhoff, Wiesman i Eager (1949.) [5] i [6]. Riječ je o eksperimentalnim ispitivanjima gubitaka za kabelske vodove položene u cijevima u trolisnom rasporedu, te kabela naslonjenih na unutarnju podlogu cijevi. Na temelju eksperimentalnih ispitivanja Meyerhoff je izveo polu-empirijske relacije za izračun gubitaka u kabelima, cijevi i plaštevima/ekranima kabela i cijevi. Rezultati ispitivanja su pregledno prikazani u izvještaju AIEEE u 1952. [7].

Na osnovu eksperimentalnih ispitivanja Meyerhoff i Eager su izveli relaciju za izračun gubitaka u cijevima sa zajedničkom cijevi. Dakle, riječ je o polu-empirijskim relacijama dobivenim na temelju slijedećih pretpostavki:

- pretpostavljeno je da kroz fazne vodiče prolazi trofazna simetrična struja,
- struja je koncentrirana u središte jednožilnih kabela,
- vodiči su segmentiranog oblika,
- metalni plaštev i cijevi ne utječu na gustoću i raspodjelu toka.
- povratna struja za sve tri faze je pretpostavljena u središtu cijevi.

Detaljni izvod se može naći u [5], a u nastavku će se prikazati konačno izvedene relacije.

$$\lambda_{2-nemagnetski} = \frac{25,8\pi\omega^2 \cdot r \cdot t \cdot (CI) \cdot Q \cdot 10^{-6}}{3,82 \cdot \rho \cdot \rho_c} \quad (74)$$

$$\lambda_{2-magnetski (60 \text{ Hz i } 30 \text{ oC})} = 0,02 \cdot p \cdot (CI) \cdot Q \quad (75)$$

gdje je:

$\omega$  – kutna frekvencija.

$r$  – polumjer središta između unutarnje i vanjske površine cijevi.

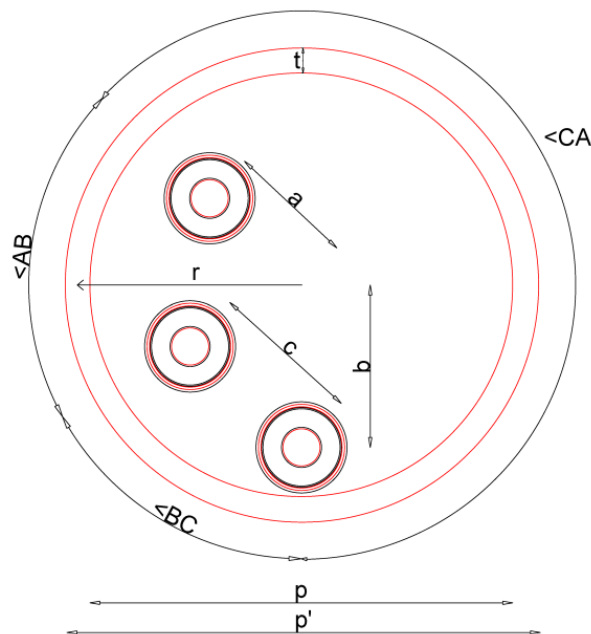
$t$  – debljina cijevi.

$CI$  – površina vodiča iskazana u cirkularni inčima, (1 CI = 506,7 mm<sup>2</sup>).

$\rho_c$  – specifični otpor vodiča.

$\rho$  – specifični otpor cijevi.

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{2n} + b^{2n} + c^{2n} - a^n b^n \cos n\angle AB - b^n c^n \cos n\angle BC - c^n a^n \cos n\angle CA}{n^2} \quad (76)$$



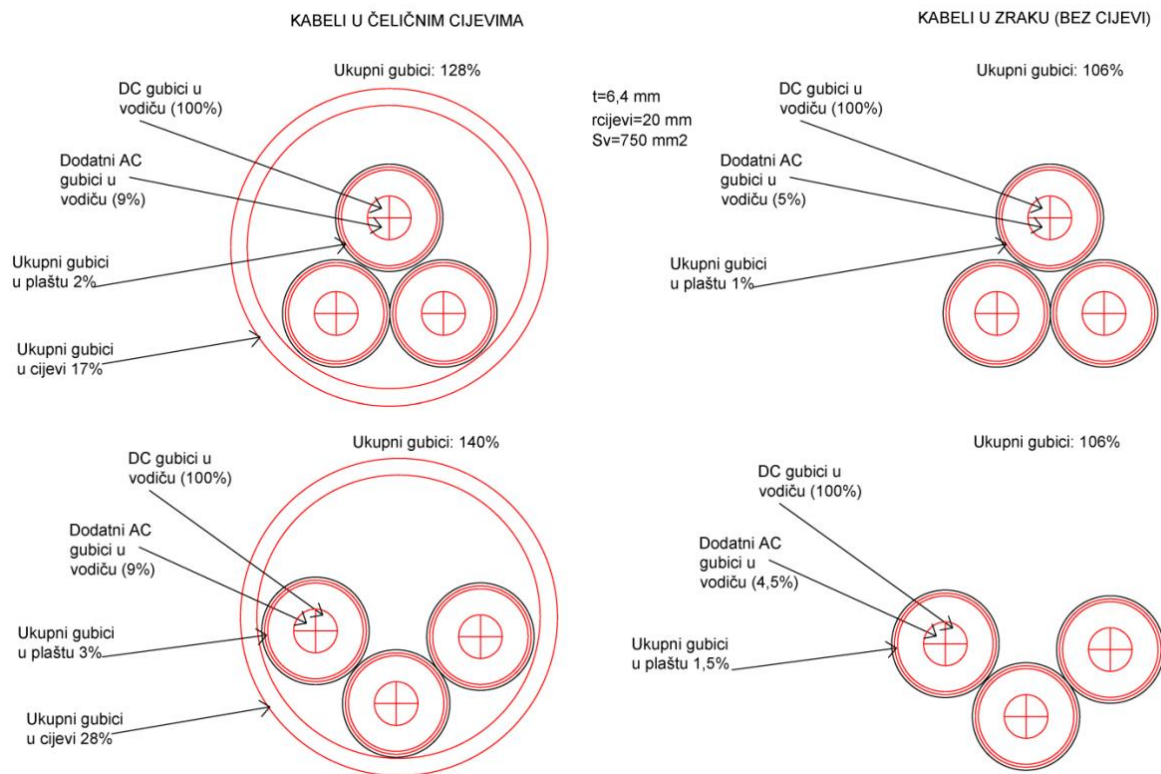
Slika 4-14 Konfiguracija rasporeda kabela u cijevi prema literaturi [5]

Za slučaj trolisnog rasporeda kabela relacije se pojednostavljaju prema [5]. Općenito u kabelima položenim u cijevima gubici su uzrokovani izraženim djelovanjem skin efekta i efekta blizine na središnji vodič, gubici zbog kružnih i vrtložnih struja u plaštu ili električnoj zaštiti, te gubicima u cijevima zbog histereze i vrtložnih struja koje teku na površinama cijevi.

Kada je kabel položen u metalne cijevi s izraženijim magnetskim svojstvima utjecaj na gubitke je izražen prvenstveno jer se magnetsko polje izobličuje utjecajem magnetskog materijala cijevi što rezultira daljnjim povećanjem gubitaka. Prema eksperimentalnim mjerenjima u [5], a ovisno o rasporedu kabela u cijevima gubici se mogu značajno povećati, a povećavaju i gubitke u metalnim plaštovima. Primjer rezultata mjerenja sa čeličnim cijevima i segmentiranim vodičima prikazani su na slikama ispod zajedno s usporedbom gubitaka kabela raspoređenih bez cijevi. Isto ukazuje na značajan udio gubitaka u cijevi.

Iako na temelju prethodnih mjerenja nije moguće dobiti uvid u utjecaj pojedine komponente na gubitke (vrtložne i kružne struje) ipak pionirski radovi Meyerhoff, Eager i Wiesman jasno ukazuju na problem, te daju osnovne formulacije koje se uz određene aproksimacije mogu koristiti u izračunima. Također ukazuju na značajan porast gubitaka u armaturi u slučajevima povećanja presjeka kabela. Određena teoretska razmatranja prethodno navedenog mogu se naći i u [17].





**Slika 4-15 Rezultati dobiveni mjerenjima i usporedbe s kabelima u zraku bez cijevi – prema [5] i [6]**

Istraživanjem literature i formulacija za proračun gubitaka prema IEC standardima, ne može se utvrditi primarni izvori relacija primijenjenih u IEC normama [58] – izrazi (77), (78) i (79).

$$\lambda_2 = 1,23 \cdot \frac{R_a}{R} \cdot \left(\frac{2c}{d_a}\right)^2 \cdot \frac{1 - \frac{R}{R_S} \lambda'_1}{\left(\frac{2,77 R_a \cdot 10^6}{\omega}\right)^2 + 1} \text{ (masivni vodič u obliku kruga)} \quad (77)$$

$$\lambda_2 = 0,358 \cdot \frac{R_a}{R} \cdot \left(\frac{2r_1}{d_a}\right)^2 \cdot \frac{1 - \frac{R}{R_S} \lambda'_1}{\left(\frac{2,77 R_a \cdot 10^6}{\omega}\right)^2 + 1} \text{ (segmentirani vodič)} \quad (78)$$

$$\text{gdje je : } \lambda'_1 = \frac{R_S}{R} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_S}{X}\right)^2} \quad (79)$$

Za proračun gubitaka u plaštu koristi se slijedeća formula:

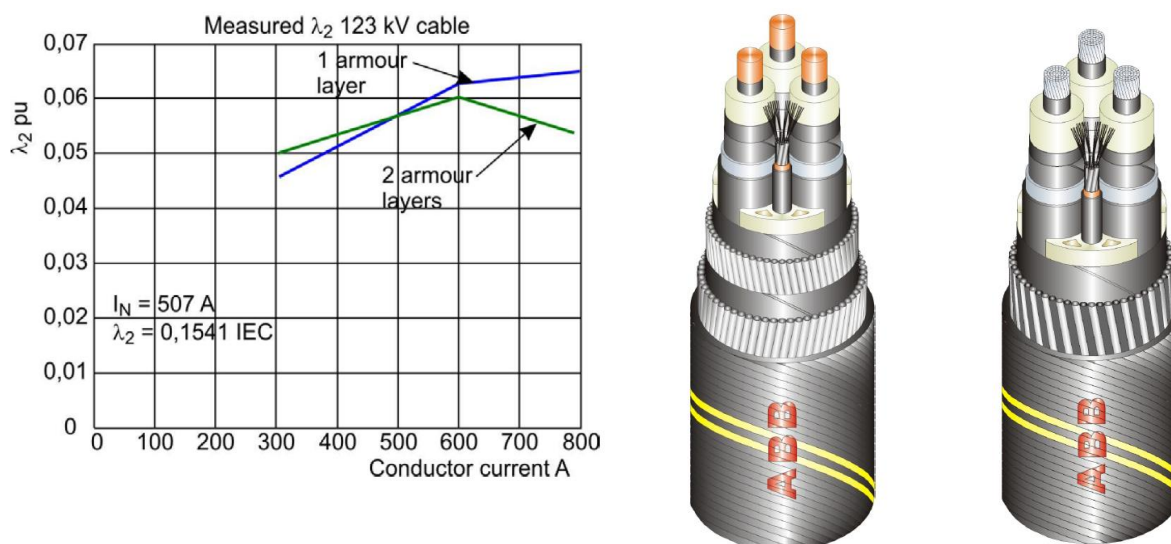
$$\lambda'_1 = \frac{R_S}{R} \cdot \frac{1,5}{1 + \left(\frac{R_S}{X}\right)^2} \text{ prema [58]} \quad (80)$$

U drugim publikacijama preporuča se upotreba slijedećih formulacije za povećanje gubitaka u metalnim plaštevima:

$$\lambda'_1 = \frac{R_S}{R} \cdot \frac{1,7}{1 + \left(\frac{R_S}{X}\right)^2} \text{ prema [48]} \quad (81)$$

Proizvođač kabela ABB [48] prema svojim ispitivanjima navodi da je umjesto koeficijenta 1,5 (prema IIEC normi) za proračune gubitaka u plaštevima u trožilnim podmorskim kabelima sa zajedničkom armaturom povoljnije koristiti koeficijente 1,3-1,5 u slučaju jednoslojne armature odnosno 1,7-1,9 za dvoslojnu armaturu.

Dakle, postoji nesklad između definiranih aproksimacijskih relacija i provedenih mjerenja, te analiza rađenih na temelju metode konačnih elemenata. Primjerice prema provedenim mjerenjima gubitaka od strane ABB na 123 kV podmorskim kabelima prema [48] dobiveni su nezanemarivo manji gubici u armaturi od IEC normi. Ispitivanja su rađena na novim tipovima podmorskih kabela sa jednoslojnim i dvoslojnim armaturama, a rezultati su prikazani na slici 4-16. Na isto upućuju i mjerenja provedena u [37] i drugim objavljenim istraživanjima.

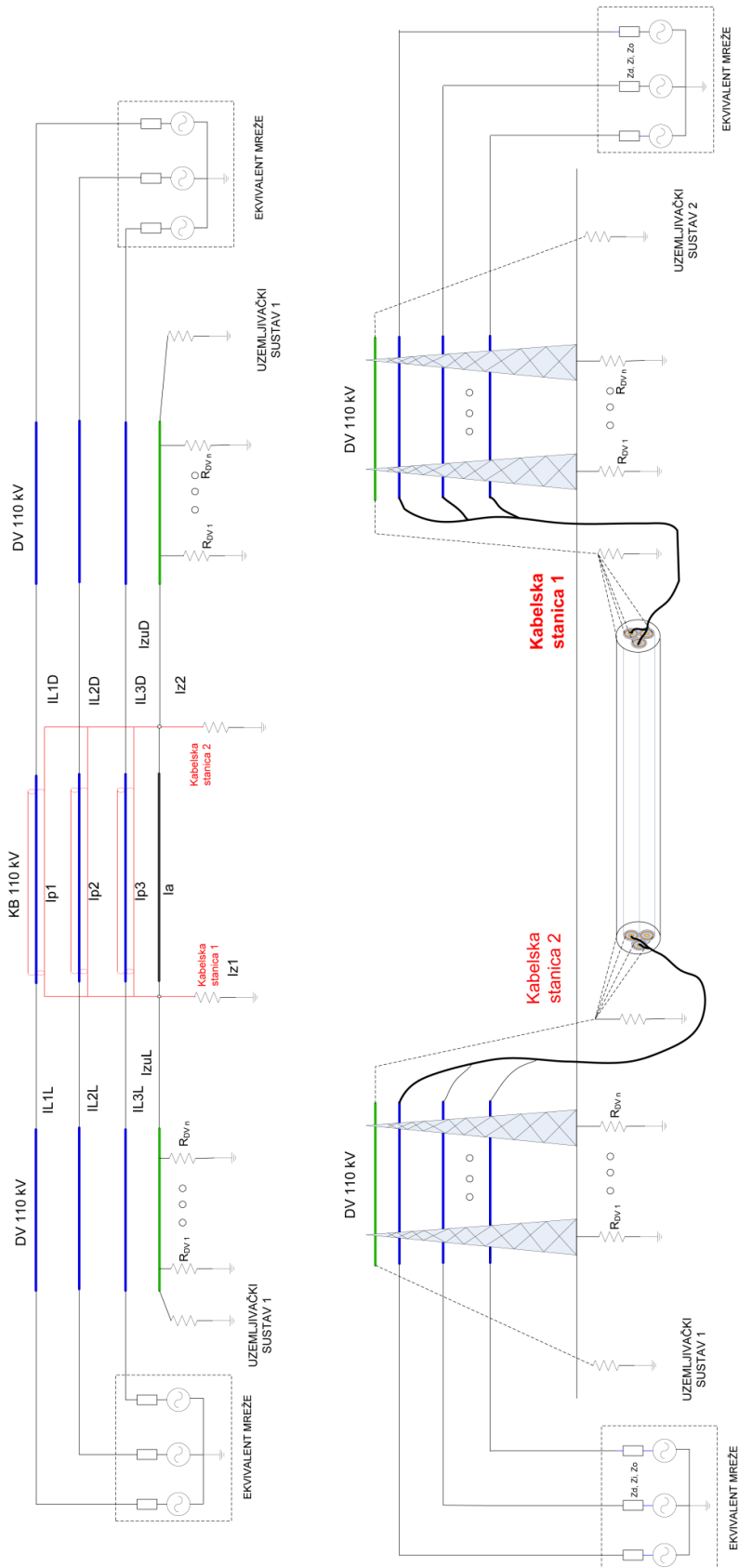


**Slika 4-16 Gubici prema [48] skalirani na temperaturu 90 °C radi usporedbe s IEC normom**

Osim prethodno navedenog treba naglasiti da većina danas dostupnih programskih alata za analizu zagrijavanja koriste IEC relacije npr. CYME Cymcap, Etap i dr. što predstavlja nedostatak pri ispravnom dimenzioniranju i odabiru presjeka kablinskih vodova i nužna je revizija i unapređenje korištenih relacija.

#### 4.4 Modeli za izračune karakteristika uzemljivača i uzemljivačkih sustava

Osim primjene računskih modela podmorskih kabela za vremenske simulacije i zagrijavanja u praksi je često nužna računaska provjera i modeliranje istih za proračune ulaznih struja u sustave uzemljenja i problematika iznošenja potencijala. Kao primjer na slici 4-17 je prikazan shematski prikaz mreže sa sustavom uzemljenja koji uključuje podmorske kabele i uzemljenja kablinskih stanica smještenih u blizini mora.



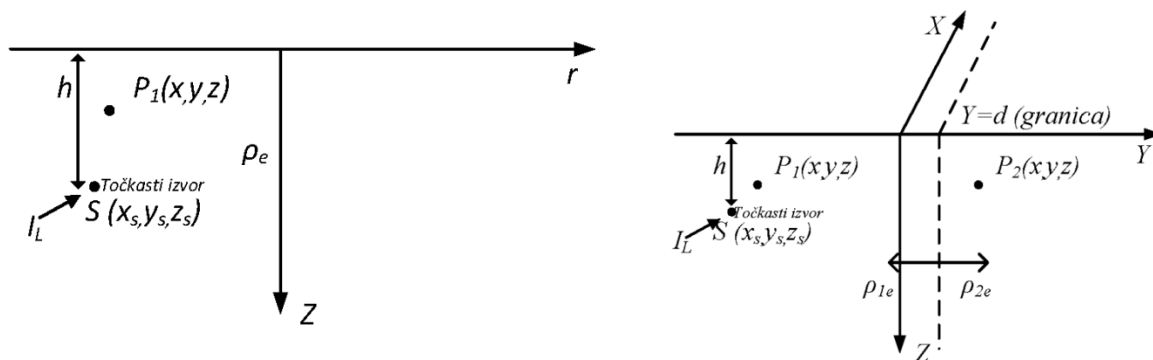
Slika 4-17 Shematski prikaz analize uzemljivača sa podmorskim kabelskim vodom

U ovakvim slučajevima osim redukcijskog djelovanja kabela za odvođenje struje kvara nužno je razmatranje i iznošenje potencijala u sustavima uzemljenja za što je nužna integracija modela kablenskog voda u modelima ne-ekvipotencijalnih uzemljivača. Prema provedenim istraživanjima u ovom području najčešće se proračunavaju redukcijски faktori za odvođenje struje kvara elektromagnetskom spregom, a zatim se odvojeno razmatra iznošenje potencijala metalnim komponentama kablenskih vodova na susjedne uzemljene stanice, što je nepraktično i vrlo često podložno greškama zbog izostavljanja kompleksnih geometrija metalnih komponenta kabela.

Istraživanje primarnih, sekundarnih i tercijarnih publikacija je pokazalo da se danas za modeliranje uzemljivača većinom primjenjuju jednoslojna, dvoslojna ili višeslojna horizontalna slojevitost tla koje omogućuju analizu uvjeta bezopasnosti i specifičnih otpora tla. Proračuni i analize vezani za uzemljivače se dijeli u dvije kategorije:

- Ekvipotencijalni uzemljivači – primjenjivo za male uzemljivače, a analiza je temeljena na pretpostavci istog potencijala na svim uzemljivačkim vodičima.
- Ne-ekvipotencijalni uzemljivači – općenita primjena za male i velike uzemljivače. Posebnu primjenu ima za analizu iznošenja potencijala na susjedne uzemljene stanice i sl., a temelji se na izračunu potencijala u svakom čvoru mreže uzemljivačkih vodiča.

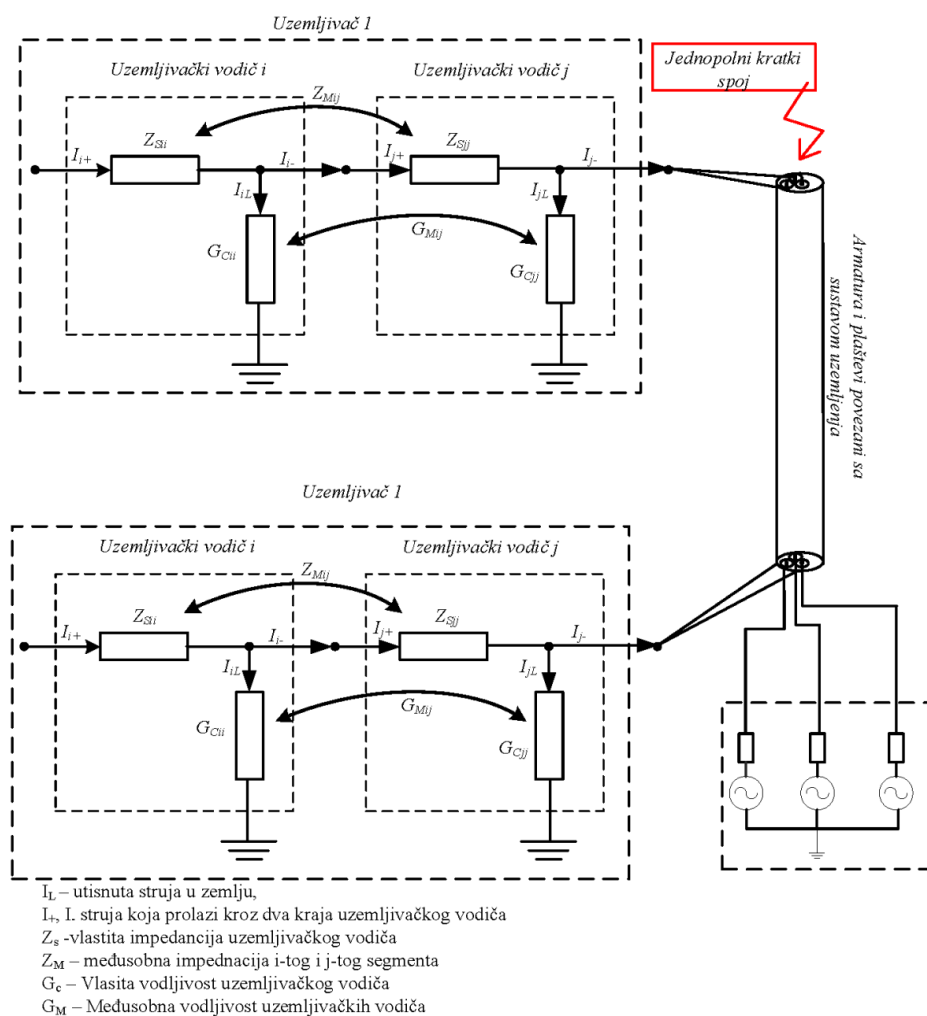
Općenito analiza je temeljena na podijeli uzemljivačkih vodiča na manje segmente, te primjene metode odslikavanja ili drugih metoda na točkastima izvorima smještenim u vertikalnim ili horizontalnim strukturama tla (slika 4-20). Osim prethodno navedenog računaju se struje koje prolaze kroz galvanski povezane segmente uzemljivača (slika 4-18), a naponske prilike se računaju u svakom čvoru koji predstavlja vezu između uzemljivača.



Slika 4-18 Dvoslojni vertikalni model tla (desno) i jednoslojni model tla (lijevo) s točkastim izvorom

U takvim analizama glavni problem je formirati matrične jednadžbe i pronaći struje koje svaki vodič ispušta u tlo. Na temelju poznatih struja računa se potencijal na površini tla i primjenjuju se standardne metode izračuna napona dodira i koraka, te otpora rasprostiranja uzemljivača. S obzirom da je ova problematika vrlo stara postoji veliki broj publikacija koje vrlo opsežno obuhvaćaju tematiku, a iste zbog opsežnosti nisu detaljno popisane ovim radom. Međutim kao nedostatak općenito se pokazao manjak publikacija po pitanju

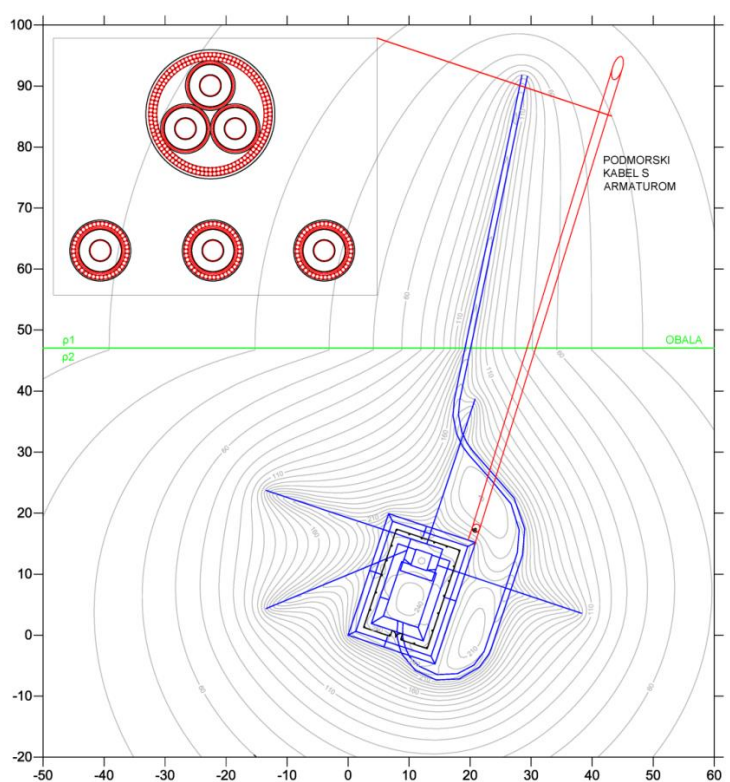
povezivanja metalnih komponenti kabela (slično i za zračne vodove) u sustave uzemljenja i nedostatak istraživanja utjecaja vertikalnih struktura tla s bitno različitim specifičnim otporima tla. Na slici 4-18 shematski je prikazan osnovni koncept povezivanja uzemljivačkih vodiča i metalnih komponenti kabela (armature i plašteva) u sustave uzemljenja. Uzemljivački segmenti „i“ i „j“ su određeni koordinatama uključujući i dubinu, duljine materijal vodiča. Svaki od segmenata ima uzdužnu (vlastitu) impedanciju, međusobne impedancije  $Z_M$ , vlastite i međusobne vodljivosti  $G_C$  i  $G_M$  (prema oznakama na slici 4-18). U takvom sustavu računaju se matrice incidencije i segmenti se međusobno povezuju matričnim jednadžbama. U konačnici moguće je izračunati svaku komponentu struje (struja koja se utiskuje u zemlju od i-tog i j-tog segmenta  $I_L$  i struja koja prolazi uzdužno na početku i kraju segmenta ( $I_{j-}$  i  $I_{j+}$ ). Na kraju se u određeni čvor utiskuje struja nastala jedнопolnim kratkim spojem i promatraju se naponske i strujne prilike duž uzemljivačkih vodiča. Pri tome metalni plaštevci kabela ne ispuštaju struju u zemlju odnosno imaju samo uzdužnu komponentu struje, a armatura ovisno o stanju izolacije (zbog oštećenja morska voda može ući u armaturu) može biti izolirana ili može sudjelovati u ispuštanju struje u morsku vodu odnosno podmorsko dno. Pri tome dio struje ulazi u susjedne uzemljivačke stanice koje su međusobno galvanski povezane, te ih je nužno razmotriti radi provjere najnepovoljnijih uvjeta za provjeru bezopasnosti napona dodira i koraka.



Slika 4-19 Integracija kablinskih vodova u sustav uzemljenja

Dakle, specifičnost integriranja podmorskih kabela u uzemljivačke sustave leži u slijedećem:

- 1) Vrlo često zbog proboja ili istrošenosti izolacije armatura podmorskog kabela može doći u kontakt s vodom čime se omogućuje ispuštanje struje kvara u okolnu morsku vode, te odvođenje velikog iznosa struje kvara iz susjednih uzemljenih kabelskih stanica ili trafostanica. Naime, morska voda ima nizak specifični električni otpor  $<1 \Omega\text{m}$  čime značajno smanjuje otpor rasprostiranja krajnjih stanica.
- 2) S obzirom da se kabelske stanice nalaze blizu mora poželjno je polaganje uzemljivačkih vodiča u more čime se značajno smanjuje otpor. Naime, vrlo često kabelske stanice su smještene u blizini mora na kamenitim tlima sa visokim specifičnim otporima tla, što ih čini vrlo problematičnim po pitanjima dimenzioniranja uzemljivača. Slične situacije se javljaju u drugim mjestima poput trafostanica blizu jezera, rijeka i slično. Dakle, prethodno navedeno podrazumijeva integriranje modela ne samo horizontalnih slojeva tla, nego i vertikalnih struktura tla s bitno različitim otporima tala/mora, ali i integriranja i razmatranje utjecaja podmorskog kabelskog voda s armaturom. Na slici 4-19 prikazane su ekvipotencijalne linije na površini tla/mora u dvoslojnoj vertikalnoj strukturi mora i kopna. Ekvipotencijalne linije na površini tla su računane bez podmorskog kabelskog voda, a integracija istoga omogućila bi detaljniji uvid u promjene potencijalnih linija na površini tla i provjere uvjeta bezopasnosti.



**Slika 4-20 Model uzemljivača u blizini mora s položenim podmorskim kabelom – vlastite simulacije**

- 3) Primjena mjera odspajanja plašteva ili armature nije moguća bez analize utjecaja na uzemljivačke sustave i provjere uvjeta bezopasnosti za što je nužan razvoj odgovarajućih modela.

## 5 ZAKLJUČAK

Prethodno navedenim poglavljima prezentirano je istraživanje literature o podmorskim kabelima i trenutno dostupnim najnaprednijim računskim modelima za potrebe tranzijentnih analiza i analiza za pogonsku frekvenciju 50 Hz.

Istraživanjem je pokazalo da su frekvencijski modeli kabela korišteni za vremenske simulacije u visokom stupnju razvoja, ali odgovarajući manji napredci su mogući glede:

- provjere opravdanosti upotrebe modela šupljeg valjka ili cijevi u odnosu na modeliranje međusobno spojenih odnosno razdvojenih žica armature,
- dodatnih istraživanja i integracija efekata blizine i vrtložnih struja u trožilnim podmorskim kabelima s armaturom,
- integracija ostalih elementa podmorskog kabela (npr. metalna zaštita optičkog kabela),
- istraživanja modeliranja DC podmorskih kabela.
- integracija modela dvoslojnog ili višeslojnog modela tla.

Istraživanje na modelima podmorskih kabela pokazalo je nedovoljnu razinu razvijenosti modela za upotrebu u analizama zagrijavanja kablinskih vodova i izračune vrtložnih i kružnih struja. Naime, specifičnost u ovom slučaju su trožilni podmorski kabeli za koje je prema numeričkim proračunima i eksperimentalnim mjerenjima utvrđena visoka odstupanja proračuna gubitaka u armaturi od relacija definiranih opće prihvaćenim normama. S obzirom da većina dostupnih programskih alata koriste relacije propisane normama, napredak po pitanju pronalaženja točnijih analitičkih izraza su nužna.

Osim prethodno navedenog, integracija modela kabela u složene sustave uzemljenja ima svoju primjenu u proračunima iznošenja potencijala, odvođenja struje kvara i proračuna otpora rasprostiranja uzemljenih stanica.

Na temelju dosadašnjih vlastitih istraživanja i implementacije pojedinih modela pokazalo se slijedeće:

- Implementacijom najnaprednijih frekvencijskih modela kabela za vremenske simulacije pokazalo se da isti imaju mogućnost široke primjene ne samo za vremenske simulacije nego korišteni koncept modela, teoretska razmatranja i pojednostavljenost prikaza matričnih jednadžbi omogućuje primjenu i u drugim segmentima poput integracije modela složenih geometrija kabela u sustave uzemljivača.
- Pri implementaciji frekvencijskih modela posebno kompleksno se pokazalo slijedeće:
  - o s obzirom da je riječ o numeričkom pristupu za modeliranje FDQ modela kabela ističu se numerički izračuni svojstvenih vrijednosti i svojstvenih vektora za što su napravljena istraživanja i implementirane su metode koje uključuju poboljšanja standardnih rutina za izračun svojstvenih vrijednosti i svojstvenih vektora. Riječ je proceduri manipulacije s umnoškom matricom impedancije i admitancije za izračun svojstvenih vrijednosti i pripadnih vektora kroz cijeli

frekvencijski spektar, a da se omogući efikasnu integraciju metoda u FDQ modele kabela. Iako su pojedine publikacije obuhvaćale ovu tematiku ipak ista nije dovoljno obrađena i ne ukazuje detaljno na problem. U sklopu ovoga objavljena je publikacija za IPST konferenciju – Cavtat 2015. (International Conference on Power System Transients),

- s obzirom na različitu geometriju podmorskih kabela postavlja se pitanje opravdanosti korištenja cijevnih modela kabela što će biti obuhvaćeno daljnjim istraživanjima,
  - implementacija modela dvosloja, efekata blizine, vrtložnih struja u ULM i FDQ modele kabela na temelju dosad objavljenih publikacija se čini interesantnom za podmorske kabelske vodove i bit će predmet daljnjih istraživanja.
- Vlastitim izračunima na tipskim trožilnim podmorskim kabelima pokazalo se da IEC norme mogu imati i 40-50% udio u ukupnim gubicima što pokazuje navode postojećih publikacija točnim i ukazuje na potrebu revizije korištenih izraza, ali i ukoliko to bude moguće istraživanje primarnih publikacija iz kojih su preuzeti navedeni izrazi. Također neovisno za načine izračuna nužno je sistematski razmotriti udio pojedinih gubitaka (vrtložne i kružne struje, gubici zbog histereze) za različite tipove kabela, a posebno u slučaju pronalaženja novih/točnijih analitičkih izraza.
- Razvoj modela podmorskih kabela i integracija istih u sustave uzemljenja je nužna za analizu uzemljivača, a zahtjeva modeliranje složenih struktura tala, te geometrija podmorskih kabela. Dosadašnjim istraživanjima napravljeni su jednostavni modeli vertikalnih struktura tala i integrirani su u dobro poznatu teoriju ne-ekvipotencijalnih uzemljivača. Buduća istraživanja su moguća u smjeru integracije modela podmorskih kabelskih vodova kao i, ako bude moguće, potvrde rezultata proračuna mjerenjem na terenu.

Iako su prethodno navedene teme obrađene u raznim publikacijama ipak su nužna unapređenja u pojedinim segmentima modeliranja i povezivanja dosad poznatih spoznaja povezanih sa predmetnim temama. S obzirom na opsežnost tematike nužan je kompletan povijesni pregled postojećih primarnih, sekundarnih i tercijarnih publikacija čime će se lakše povezati postojeća znanja i integracija spoznaja u modele podmorskih kabela.



## **POPIS KRATICA**

HVDC – High voltage DC

HVAC – High voltage AC

SL - Single lead sheath

HDPE – High density polietilen

LDPE – Low density polietilen

EPR – Etilen propilen guma

WTR – Water tree retardant XLPE)

XLPE – Umreženi polietilen

FEM – Finite element method

ULM – Universal line model

WBD - Wide band model

FDQ – Frequency dependent cable model

CP – Constant parameters

## LITERATURA

- [1] H. B. Dwight, Proximity effect in wires and thin tubes, June 1923.
- [2] F. Pollaczek, Uber das feld einer unendlich langen wechsel stromdurchflossenen einfachleitung (On the field produced by an infinitely long wire carrying alternating current), E.N.T., vol. 3, no. 9, pp. 339-360, 1926.
- [3] J. R. Carson, Wave propagation in overhead wires with ground return, Bell System Technical journal, vol. 5, pp. 539-554, 1926.
- [4] S. A. Schelkunoff, The electromagnetic theory of coaxial transmission lines and cylindrical shields, Bell System Technical Journal, 532-578, 1934.
- [5] L. Meyerhoff, G.S. Eager, AC Resistance of segmental cables, AIEEE Transactions, Paper 9-135, April, 1949.
- [6] R. J. Wiseman, A.C. resistance of large size conductors in steel pipe or conduit, AIEEE Transactions, August, 1948.
- [7] AC resistance of pipe –cable systems with segmental conductors, AIEEE Committee report, Jan 1952.
- [8] J. D. Jackson, Classical electrodynamics, 1962.
- [9] J. A. Tegopoulos, E. E. Kriezis, Eddy current distribution in cylindrical shells of infinite length due to axial currents Part I: Shells of one boundary, Power Aparatus and Systems, IEEE Transaction on, vol. PAS-90, pp. 1278-1286, 1971.
- [10] J. A. Tegopoulos, E. E. Kriezis, Eddy current distribution in cylindrical shells of infinite length due to axial currents – Part II: Shells of finite thickness, Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. PAS-90, pp. 1287-1294, 1971.
- [11] J. A. Tegopoulos, E. E. Kriezis, Eddy current distribution in cylindrical shells of finite length and of one cylindrical boundary due to axial currents – Part I: Cylindrical hole with symmetrical excitation, 1971.
- [12] L. M. Wedepohl, D.J. Wilcox, Transients analysis of underground power-transmission systems, IEEE, Vol. 120, No. 2, Feb 1973.
- [13] G. Bianchi, G. Luoni, Induced currents and losses in single – core submarine cables, IEEE Transactions on Power Aparatus and Systems, Vol. PAS-95, No. 1, Jan/Feb 1976.
- [14] R. Schinzinger, A. Ametani, Surge propagation characteristics of pipe enclosed underground cables, IEEE Transaction on power Apparatus and systems, Vol. PAS-97, No. 5, 1978.
- [15] K. O. Abledu, Impedance calculation of cables using subdivisions of the cable conductors, Ph.D. dissertation, University of British Columbia, Sept 1979.
- [16] A. Ametani, A general formulation of impedance and admittance of cables, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 3, May/June 1980.

- [17] K. Kawasaki, M. Inami, T. Ishikawa, Theoretical considerations on eddy current losses in non-magnetic and magnetic pipes for power transmission systems, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 2, Feb 1981.
- [18] J. R. Marti, Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, No. 1, pp. 147-157, Jan 1982.
- [19] G. H. Golub, C. F. Van Loan, Matrix computation, Third edition, 1983.
- [20] N. Srivallipuranandan, Series impedance and shunt admittance matrices of underground cable system, University of British Columbia, Nov 1986.
- [21] L. Marti, Simulation of transients in underground cables with frequency-dependent modal transformation matrices, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, no. 3, pp. 1099-1110, July 1988.
- [22] D. Labridis, P. Dokopoulos, Finite element computation of eddy current losses in nonlinear ferromagnetic sheaths of three – phase power cables, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, July 1992.
- [23] D. H. Zhou, Numerical methods for frequency dependent line parameters with applications to microstrip lines and pipe-type cables, The University of British Columbia, Sep 1993.
- [24] W. S. Meyer, Electro-magnetic transients program (theory book, Branch of system engineering, Portland, USA, July 1995.
- [25] B. Gustavsen, J. Sletbak, T. Henriksen, "Calculation of electromagnetic transients in transmission cables and lines taking frequency dependent effects accurately into account," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 2, pp. 1076-1084, 1995.
- [26] K. Ferkal, M. Poloujadoff, E. Dorison, Proximity effect and eddy current losses in insulated cables, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996.
- [27] T. Noda, N. Nagaoka, A. Ametani, Phase domain modeling of frequency dependent transmission lines by means of an ARMA model, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 11, no. 1, pp. 401-411, Jan 1996.
- [28] F. Castellanos, J. R. Marti, F. Marcano, Phase-domain multiphase transmission line models, Electrical Power & Energy Systems, vol. 19, no. 4, pp. 241-248, 1997.
- [29] G. J. Anders, Rating of electric power cables, 1997.
- [30] H. E. Knoepfel, Magnetic fields – A comprehensive theoretical treatise for practical use, John Wiley&Sons, 2000.
- [31] R. A. Rivas, Calculation of frequency – dependent parameters of power cables with digital images and partial subconductors, The University of British Columbia, July 2001.

- [32] D. A. Tsiamitros, G. K. Papagiannis, D. P. Labirdis, P. S. Dokopoulos, Earth return path impedances of underground cables for the two-layer earth case, IEEE Transactions on power delivery, Vol. 20, No. 3, July 2005.
- [33] W. Thomas, Submarine power cables – Design, installation, repair and environmental aspects, Springer London, Limited, 2008.
- [34] D. A. Tsiamitros, G. K. Papagiannis, P. S. Dokopoulos, Earth return impedances of conductor arrangements in multilayer soils – part I: Theoretical model, IEEE Transactions on power delivery, Vol. 23, No. 4, Oct. 2008.
- [35] Y. Du, X. H. Wang, Z.H. Huan, Induced voltages and power losses in single – conductor armored cables, Industry Applications Society Annual Meeting, Oct. 2008.
- [36] D. A. Tsiamitros, G. K. Papagiannis, P. S. Dokopoulos, Earth return impedances of conductor arrangements in multilayer soils – part II: Numerical results, IEEE Transaction on power delivery, Vol. 23, No. 4, Oct 2008.
- [37] R. Stolan, Losses and inductive parameters in subsea power cables, NTNU – Norwegian University of Science and Technology, July 2009.
- [38] T. Worzyk, Submarine power cables – Design, installation, repair, environmental aspects, Springer, 2009.
- [39] J. A. Martinez-Velasco, Power system transients – Parameter determination, Taylor&Francis Group, 2010.
- [40] T. A. Papadopoulos, D.A. Tsiamitros, G. K. Papagiannis, Earth return admittances and impedances of underground cables in non-homogeneous earth, IET Generation, Transmission&Generation, July 2010.
- [41] R. L. King, Electrical transmission systems for large offshore wind farms, Cardiff University, Feb 2011.
- [42] T. A. Papadopoulos, D. A. Tsiamitros, G. K. Papagiannis, Earth return admittances and impedances of underground cables in non-homogeneous earth, IET Gener. Transm. Distrib. Vol. 5, Iss. 2, 161-171, 2011.
- [43] D. Palmgren, J. Karlstrand, G. Henning, Armour loss in three – core submarine XLPE cables, 8th International Conference on Insulated Cables, Jicable'11, France, June 2011.
- [44] J. L. Naredo, J. Mahseredjan, J. A. G. Robles, Improving the numerical performance of transmission line models in EMTP, IPST2011, June, 2011.
- [45] O. R. Leanos, J. L. Naredo, J. A. G. Robles, An advance transmission line and cable model in Matlab for the simulation of power-system transients, INTECH, 2012.
- [46] A. Pagnetti, Cable modelling for electromagnetic transients in power systems, Universita di Bologna, 2012.

- [47] R. O. Leanos, An Advanced Transmission Line and Cable Model in Matlab for the Simulation of Power-System Transients, 2012.
- [48] D. Palmgren, Armour loss in three – core submarine XLPE cables, April 2013.
- [49] J. Pilgrim, S. Catmull, R. Chippendale, R. Tyreman, P. Lewin, Offshore Wind farm export cable current rating optimisation, EWEA Offshore Wind, 2013.
- [50] A. Pagnetti, A. Xemard, A method for the evaluation of the sea return impedance and application of the stochastic collocation technique to take into account the uncertainty of input parameters, International Conference on Power Systems Transients (IPST2013), Vancouver, July 2013.
- [51] U. R. Patel, B. Gustavsen, P. Triverio, Fast computation of the series impedance of power cables with inclusion of skin and proximity effects, IEEE Transaction on Power Delivery, March, 2013.
- [52] R. O. Leanos, Wideband line/cable models for real-time and off-line simulations of electromagnetic transients, Université de Montréal, April, 2013.
- [53] I. Zlatunić, S. Vodopija, R. Goić, Mode switching in modal domain models of overhead lines and underground cables, IPST -International Conference on Power System Transients, Paper number 15IPST203, Croatia, June 2015.
- [54] I. Lafaia, Y. Yamamoto, A. Ametani, J. Mahseredjian, Propagation of intersheath modes of underground cables, IPST -International Conference on Power System Transients, Paper number 15IPST022, Croatia, June 2015.
- [55] A. Tavighi, J. R. Marti, J. A. G. Robles, Comparison of the fdLine and ULM frequency dependent EMTP line models with reference laplace solution, IPST -International Conference on Power System Transients, Paper number 15IPST092, Croatia, June 2015.
- [56] B. Gustavsen Vector fitting user guide, <http://www.sintef.no/Projectweb/VECTFIT/>
- [57] S. Sturm, J. Paulus, K. L. Abken, F. Berger, Estimating the losses in three – core submarine power cables using 2D and 3D FEA simulations, Jicable'15, France, June 2015.
- [58] IEC 60287-1-1, Calculation of the current rating - Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses
- [59] ABB, XLPE submarine cable systems – brochure, 2015.
- [60] Nexans, XLPE submarine cable systems – brochure, 2015.