

IMPEDANCIJE SEGMENTA KABELA U ELEKTROMAGNETSKOM MODELU

CABLE SEGMENTS IMPEDANCE IN ELECTROMAGNETIC MODEL

Zdenko Balaž¹

¹Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split

Sažetak

U radu je prezentiran dio obrađene problematike u prihvaćenju i ocijenjenoj Doktorskoj disertaciji autora pod naslovom: “Elektromagnetski model za izračun raspodjele struje zemljospoja”. Originalno razvijeni model napredniji je od svih dosada razvijenih analitičkih i numeričkih modela koji su tijekom istraživanja ovog područja bili dostupni autoru. Elektromagnetski model u izračunima u kojima se koristi, uvodi cjelovitu spregu između svih sastavnica velikih elektroenergetskih sustava. Pod cjelovitom elektromagnetskom spregom u proračunima se uzimaju induktivna, kapacitivna i konduktivna, sprega. Razvoj modela, utemeljen je na hibridnom i numeričkom modelu. Koriste se metode potencijala čvorova, kombinacija s modelom prijenosnih vodova, uz primjenu tehnike konačnih elemenata. U ovom radu analiziraju se kabelski vodovi kao jedna od sastavnica svakog većeg elektroenergetskog sustava. Raspodjela skalarnog električnog potencijala za segmente ukopanih kabelskih vodova računa se na isti način kao i za segmente golih vodiča. Na raspodjelu potencijala u okolnom sredstvu utječu poprečne struje svih vodiča segmenata kabela. Segmenti kabela se modeliraju poprečnim i uzdužnim impedancijama. Razmatraju se vlastite i međusobne impedancije jednožilnih i trožilnih kabela u homogenom neograničenom sredstvu.

Ključne riječi: *elektromagnetski, model, konduktivna, sprega, uzdužne, poprečne, vlastite i međusobne impedancije kabela.*

Abstract

The paper presents a part that deals with the issues analysed in the accepted and the assessed doctoral dissertation written by this author

entitled “Electromagnetic Model for Computation of Ground Fault Current Distribution”.

Originally developed model is more advanced than all analytical and numerical research models that so far have been developed in this area and available to the author. Electromagnetic model calculations in which it was applied introduced a complete coupling between all components of large power systems. The complete electromagnetic coupling includes in the calculations as follows: inductive, capacitive and conductive coupling. The development model was based on the hybrid and numerical model. The combinations of Nodal analysis, transmission line model and finite element technique are applied. This paper analyses the cable lines as one of the components of every large power system. The distribution of the scalar electric potential for segments of buried cable lines is calculated in the same way as for segments of bare conductors. The allocation of resources in the nearby means is affected by cross-currents of all segments of the cable guide. Cable segments are modelled by transverse and longitudinal impedances. Own and mutual impedance of single – and three-wire cable in a homogeneous unlimited resources are analysed.

Keywords: *electromagnetic, model, conductive, coupling, longitudinal, transverse, own and mutual impedance of the cable*

1. Uvod

1. Introduction

Modeliranje tehnikom konačnih elemenata i to Galjerkin–Bubnovovom metodom, primjenjuje se na integralnu formulaciju problema u frekvencijskoj domeni, na način da se svaki

ukopani vodič dijeli na cilindrične segmente konačne duljine. Na tim osnovama u razvijenom elektromagnetskom modelu istraživanje je usmjereno na definiranje vlastitih i međusobnih impedancija segmenata. Izračun po toj metodi, svodi se na metodu srednjeg potencijala uz koju je uvedena aproksimacija struje segmenta. Uz primjenu tankožičane aproksimacije segmenta struje imaju uzdužnu i poprečnu komponentu. Prilikom izračuna vlastitih i međusobnih impedancija segmenata cilindričnih vodiča, (kabela) važno je uzeti u obzir da vanjski sloj kabela može biti u izravnom kontaktu s tlom, ili da vodič kabela od tla može biti odvojeni s jednim ili više izolacijskih slojeva, gdje neki od unutarnjih slojeva mogu biti vodljivi. Značajke tla su provodnost, dielektričnost i permeabilnost. Otpornost tla (recipročna vrijednost provodnosti) ima vrijednosti između Ωm i $\text{k}\Omega\text{m}$. Iznos provodnosti za jednu vrstu tla se znatno mijenja s vlažnošću i temperaturom zbog ovisnosti o rastvorljivosti prisutnih soli. Što je vlažnost tla veća, otpornost je veća i obratno. Kad temperatura padne značajno ispod nule, tlo se ledi do nekih dubina, pri čemu se provodnost naglo smanjuje jer otpornost tla poraste. Dielektričnost tla ovisi o vrsti tla i količini prisutne vlage. Ona se povećava s prisutnošću vlage u tlu. Dielektričnost tla varira u daleko manjem rasponu no provodnost tla. Može se uzeti da je magnetska permeabilnost tla jednaka magnetskoj permeabilnosti zraka, odnosno da je njihova relativna magnetska permeabilnost $\mu_r=1$. Za analizu u ovom radu je odabrano ponašanje segmenata kabela u homogenom neograničenom sredstvu, kompleksne provodnosti $\bar{\kappa}$ i permeabilnosti μ_0 . Svaki segment kabela ovisno o svojoj strukturi izolacijskih, vodljivih i poluvodljivih slojeva, u njima ima različitu provodnost i permeabilnost.

2. Poprečne impedancije segmenata vodiča

2. Conductor segments transverse impedance

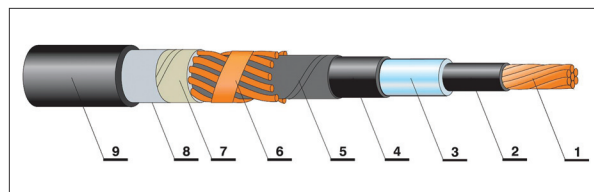
Cilindrični segment vodiča u tlu u ovom radu je segment kabela. Taj segment može biti jednožilni ili trožilni kabel. U samom kabelu on može biti vanjski metalni plašt energetskog kabela kao i bilo koji goli puni ili šuplji vodič ukopan u tlo koji je povezan na

uzemljivački sustav. Osim izolacijskih i poluvodljivih slojeva, jednožilni kabel, u općem slučaju, može imati jedan ili više metalnih ekrana, jedan fazni vodič te jedan ili više slojeva metalne armature, Slika 2. Za analizu i razvoj elektromagnetskog modela u prvom koraku uzima se da je jednožilni kabel goli vodič koji ima polumjer jednak vanjskom polumjeru kabela. U drugom se koraku uzima da samo poprečna struja metalnog ekrana i poprečna struja faznog vodiča teče od ekrana ili faznog vodiča prema rubu kabela, tj. da se poprečne struje drugih segmenata vodiča, koji ne pripadaju razmatranom segmentu kabela, ne mogu probiti do metalnih ekrana i faznog vodiča razmatranog segmenata kabela, [1].

2.1 Poprečne impedancije segmenata jednožilnih kabela

2.1 The transverse impedance of single-core cables segments

Na slikama 1 i 2, prikazani su svi slojevi jednožilnih kabela, tip XHE 49, koji ima vanjski izolacijski plašt i tip XHEh 91, koji ima vanjski vodljivi plašt, sa opisanim slojevima:

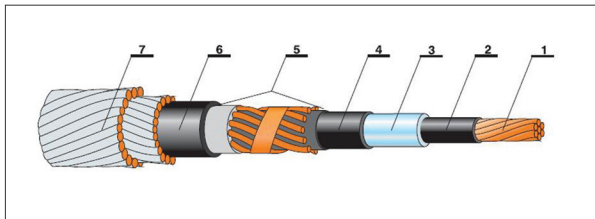


Slika 1 Jednožilni kabel XHE 49

Figure 1 Single core cable XHE 49

1. – Vodič koji može biti zbijeno aluminijsko ili bakreno uže
2. – Ekran vodiča od poluvodljivog sloj na vodiču
3. – Izolacija od umreženog polietilena (XLPE)
4. – Ekran izolacije od ekstrudiranog poluvodljivog sloja na izolaciji
5. – Unutarnji separator od poluvodljivih bubrivih traka
6. – Metalni ekran od bakrene žice s kontraspiralom od bakrene trake
7. – Vanjski separator od poluvodljivih bubrivih traka
8. – Laminirani plašt od aluminijske ili bakrene trake s kopolimerom

9. – Vanjski plašt od membranske polietilenske (HDPE) zaštite



Slika 2 Jednožilni kabel XHEh 91

Figure 2 Single core cable XHEh 91

1. – Vodič koji može biti zbijeno aluminijsko ili bakreno uže
2. – Ekran vodiča od poluvodljivog sloja na vodiču
3. – Izolacija od umreženog polietilena (XLPE)
4. – Ekran izolacije od ekstrudiranog poluvodljivog sloja na izolaciji
5. – Metalni ekran od bakra žice i kontraspiralne trake s vodonepropusnim slojem
6. – Plašt od poluvodljivog polietilena (PE)
7. – Dodatna električna zaštita od pokositrene bakrene žice u dva sloja

U razvijenom elektromagnetskom modelu, raspodjela skalarnog električnog potencijala uslijed poprečnih struja vodiča segmenta jednožilnih kabela računa se na isti način kao i za segmente golih vodiča, [2]. Pritom raspodjeli potencijala u okolnom sredstvu doprinose poprečne struje svih vodiča razmatranog segmenta jednožilnog kabela.

Što se tiče vlastitih i međusobnih impedancija, izolacijski, poluvodljivi i vodljivi slojevi jednožilnog kabela utječu samo na izračun vlastitih i međusobnih poprečnih impedancija vodiča razmatranog segmenta jednožilnog kabela. Osim toga, kvazistatičke slike segmenata vodiča jednožilnih kabela na isti način doprinose vlastitim i međusobnim poprečnim impedancijama kao da se radi o kvazistatičkim slikama golih vodiča.

To vrijedi i za međusobne poprečne impedancije segmenata vodiča koji pripadaju različitim segmentima jednožilnih kabela, tj. njih u elektromagnetskom modelu razmatramo kao da se radi o golim vodičima u homogenom neograničenom sredstvu pa se njihove međusobne impedancije računaju prema izrazima (1) i (2).

$${}^n \bar{Z}_{ks, is}^p = \bar{f}_{ks, is} \cdot {}^{qn} \bar{Z}_{ks, is}^p = \bar{f}_{ks, is} \cdot \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \bar{\kappa} \cdot \ell_{is} \cdot \ell_{ks}} \cdot (C_1 + C_2 - C_3 - C_4) \equiv {}^n \bar{Z}_{is, ks}^p \quad (1)$$

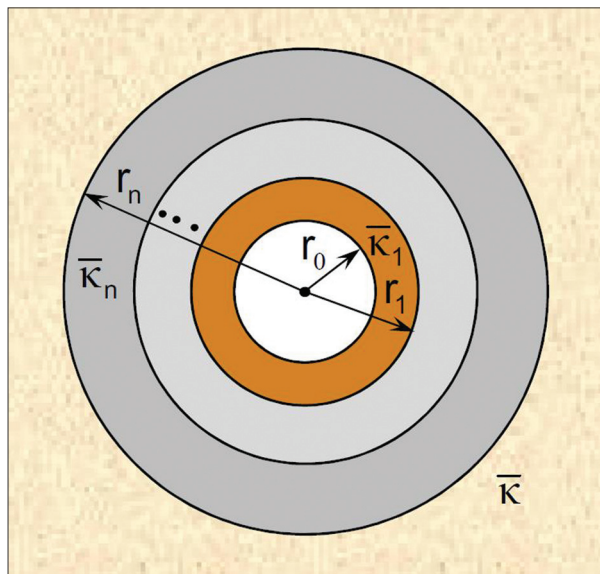
$${}^{qn} \bar{Z}_{ks, is}^p = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \bar{\kappa} \cdot \ell_{is} \cdot \ell_{ks}} \cdot [A(\xi_p, \eta_p) + A(\xi_k, \eta_k) - A(\xi_p, \eta_k) - A(\xi_k, \eta_p)] \quad (2)$$

2.1.1 Vlastita poprečna impedancija segmenta jednožilnog kabela u homogenom neograničenom sredstvu

2.1.1 Own transverse impedance of the single core cable segment in a homogeneous unlimited resources

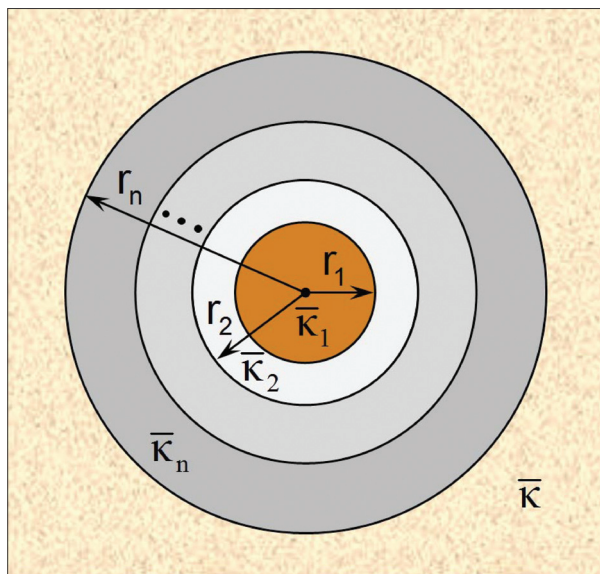
Neka se za segment jednožilnog kabela razmatra ukupno n izolacijskih, poluvodljivih ili vodljivih slojeva te neka se segment kabela nalazi u homogenom neograničenom sredstvu kompleksne provodnosti $\bar{\kappa}$, slike 3 i 4. U općem slučaju, razmatrani segment jednožilnog kabela može imati jedan fazni vodič i proizvoljan broj metalnih ekrana i metalnih armatura. Ako se u elektromagnetskom modelu razmatra i fazni vodič segmenta jednožilnog kabela, onda je fazni vodič prvi sloj razmatranog dijela segmenta jednožilnog kabela, koji se numerički modelira kao puni ili pak kao šuplji vodič. Ako se u elektromagnetskom modelu ne razmatra fazni vodič segmenta jednožilnog kabela, onda je unutarnji metalni ekran prvi sloj razmatranog dijela segmenta jednožilnog kabela, slika 3. U posebnom slučaju, kad se razmatra fazni vodič i kad se segment faznog vodiča numerički modelira kao puni cilindrični vodič, unutarnji polumjer razmatranog dijela segmenta jednožilnog kabela $r_0 = 0$, slika 4. U slučaju kad se za razmatrani fazni vodič segment faznog vodiča numerički modelira kao šuplji cilindrični vodič, unutarnji polumjer razmatranog dijela segmenta jednožilnog kabela $r_0 > 0$, slika 3.

Vlastita poprečna impedancija kv-tog vodiča segmenta jednožilnog kabela može se opisati izrazom izvorno dobivenim korištenjem metode srednjeg potencijala kao u [1]:



Slika 3 Poprečni presjek jednožilnog kabela u homogenom neograničenom sredstvu kompleksne provodnosti \bar{K} – prvi sloj je šuplji vodič

Figure 3 Cross-section of the cable with one conductor in a homogeneous unlimited resources complex conductivity \bar{K} – the first coat is hollow conductor



Slika 4 Poprečni presjek jednožilnog kabela u homogenom neograničenom sredstvu kompleksne provodnosti \bar{K} – prvi sloj puni vodič

Figure 4 Cross-section of the cable with one conductor in a homogeneous unlimited resources complex conductivity \bar{K} – the first coat is full conductor

$${}^n\bar{Z}_{kv,kv}^p = {}^q\bar{Z}_{kv,kv}^p = \frac{P(\ell_{kv}, r_n)}{2 \cdot \pi \cdot \bar{K} \cdot \ell_{kv}^2} + \sum_{i=ikv+1}^n \frac{P(\ell_{kv}, r_{i-1}) - P(\ell_{kv}, r_i)}{2 \cdot \pi \cdot \bar{K}_i \cdot \ell_{kv}^2} \quad (3)$$

gdje je $P(\ell, v)$ opisan izrazom (4), dok je ikv redni broj sloja razmatranog dijela segmenta jednožilnog kabela koji pripada kv -tom vodiču.

$$P(\ell, v) = \ell \cdot \ln \frac{\sqrt{\ell^2 + v^2} + \ell}{v} - \sqrt{\ell^2 + v^2} + v \quad (4)$$

2.1.2 Međusobna poprečna impedancija segmenta jednožilnog kabela u homogenom neograničenom sredstvu

2.1.2 Mutual transverse impedance of the single core cable segment in a homogeneous unlimited resources

Međusobna poprečna impedancija kd -tog i kg -tog vodiča ($kd < kg$) razmatranog segmenta jednožilnog kabela u homogenom neograničenom sredstvu (Slike 5. i 6.) opisana je izrazom:

$${}^n\bar{Z}_{kd,kg}^p = {}^q\bar{Z}_{kd,kg}^p = {}^n\bar{Z}_{kg,kg}^p = {}^q\bar{Z}_{kg,kd}^p \quad (5)$$

Dakle, međusobna poprečna impedancija kd -tog segmenta donjeg vodiča i kg -tog segmenta gornjeg vodiča, koji pripadaju istom segmentu jednožilnog kabela u homogenom neograničenom sredstvu, jednaka je vlastitoj poprečnoj impedanciji gornjeg segmenta vodiča u homogenom neograničenom sredstvu.

3. Uzdužne impedancije segmenata jednožilnih kabela

3. Longitudinal impedance of the single – core cables segments

Kao i kod izračuna poprečnih impedancija segmenata jednožilnih kabela, uzima se da je jednožilni kabel goli vodič s polumjerom jednakim vanjskom polumjeru kabela.

Raspodjela vektorskog magnetskog potencijala uslijed uzdužnih struja segmenata jednožilnih kabela računa se kao i za segmente golih vodiča. Pritom raspodjeli vektorskog magnetskog potencijala u okolnom sredstvu doprinose uzdužne struje svih vodiča razmatranog segmenta jednožilnog kabela. Što se tiče vlastitih i međusobnih impedancija, permeabilnosti izolacijskih, poluvodljivih i vodljivih slojeva razmatranog dijela segmenta jednožilnog

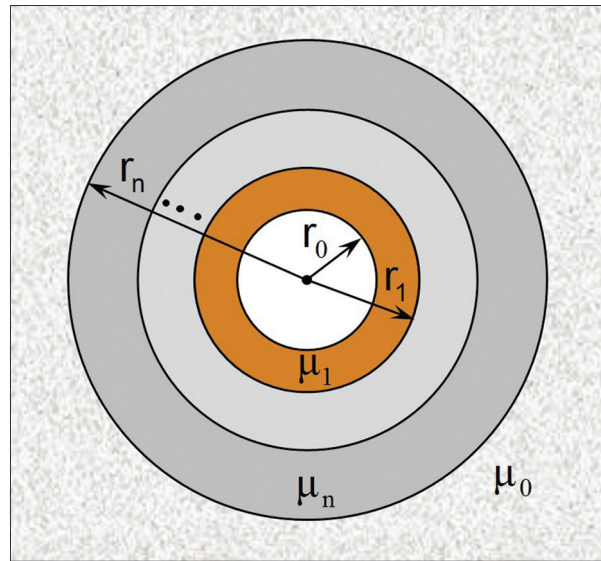
kabela utječu samo na izračun impedancija segmenata vodiča koji pripadaju istom segmentu jednožilnog kabela. To znači da uzdužne struje segmenata metalnih ekrana i faznih vodiča koji pripadaju različitim segmentima jednožilnih kabela na isti način doprinose vlastitim i međusobnim uzdužnim impedancijama kao da se radi o golim vodičima u homogenom neograničenom sredstvu.

3.1 Vlastita uzdužna impedancija segmenata jednožilnih kabela

3.1 Own longitudinal impedance of the single – core cables segments

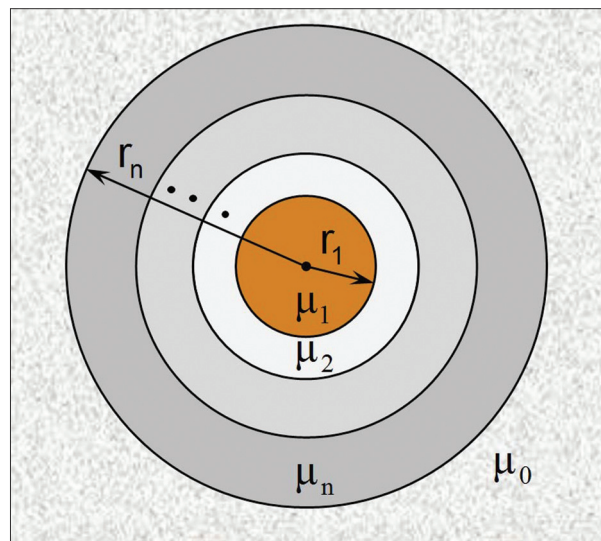
Slike 5 i 6, prikazuju segmente jednožilnih kabela s ukupno n izolacijskih, poluvodljivih ili vodljivih slojeva različitih permeabilnosti. Ako se segment kabela nalazi u homogenom neograničenom sredstvu permeabilnosti μ_0 on može imati jedan fazni vodič i proizvoljan broj metalnih ekrana i metalnih armatura. U elektromagnetskom modelu fazni vodič segmenta jednožilnog kabela, kao prvi sloj se numerički modelira kao puni ili kao šuplji vodič. Ako se u elektromagnetskom modelu ne razmatra fazni vodič segmenta jednožilnog kabela, onda je unutarnji metalni ekran prvi sloj razmatranog dijela segmenta jednožilnog kabela, slika 5. U posebnom slučaju, kad se razmatra fazni vodič i kad se segment faznog vodiča numerički modelira kao puni cilindrični vodič, unutarnji polumjer razmatranog dijela segmenta jednožilnog kabela $r_0 = 0$, slika 6. U slučaju kad se razmatra fazni vodič i kad se segment faznog vodiča numerički modelira kao šuplji cilindrični vodič, unutarnji polumjer razmatranog dijela segmenta jednožilnog kabela $r_0 > 0$ i vrijedi slika 5. Vlastita uzdužna impedancija kv-tog segmenta vodiča razmatranog segmenta jednožilnog kabela može se opisati izrazom izvorno dobivenim korištenjem metode srednjeg potencijala:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{kv,kv}^u &= q^n \bar{Z}_{kv,kv}^u = \bar{Z}_{kv}^1 \cdot \ell_{kv} \\ &+ j \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \frac{P(\ell_{kv}, r_n)}{2 \cdot \pi} + j \cdot \omega \cdot \sum_{i=ikv+1}^n \mu_i \cdot \\ &\frac{P(\ell_{kv}, r_{i-1}) - P(\ell_{kv}, r_i)}{2 \cdot \pi} \end{aligned} \quad (6)$$



Slika 5 Poprečni presjek jednožilnog kabela u homogenom neograničenom sredstvu permeabilnosti μ_0 – prvi sloj šuplji vodič

Figure 5 Cross-section of the cable with one conductor in a homogeneous unlimited resources permeability μ_0 – the first coat is hollow conductor



Slika 6 Poprečni presjek jednožilnog kabela u homogenom neograničenom sredstvu permeabilnosti μ_0 – prvi sloj puni vodič

Figure 6 Cross-section of the cable with one conductor in a homogeneous unlimited resources permeability μ_0 – the first coat is full conductor

gdje je $P(\ell, v)$ opisan izrazom (4), dok je ikv redni broj sloja razmatranog dijela segmenta jednožilnog kabela koji pripada kv-tom vodiču, a jedinična unutarnja impedancija segmenta kv-tog vodiča \bar{Z}_{kv}^1 opisana je izrazom (3).

3.2 Međusobna uzdužna impedancija segmenata jednožilnih kabela

3.2 *Mutual longitudinal impedance of the single – core cables segments*

Međusobna uzdužna impedancija k_d -tog i k_g -tog vodiča ($k_d < k_g$) razmatranog segmenta jednožilnog kabela u homogenom neograničenom sredstvu, slike 5 i 6, opisana je izrazom:

$$\begin{aligned} {}^n \bar{Z}_{k_d, k_g}^u &= {}^{qn} \bar{Z}_{k_d, k_g}^u = {}^n \bar{Z}_{k_g, k_g}^u - \bar{Z}_{k_g}^1 \cdot \ell_{k_g} \equiv \\ &\equiv {}^{qn} \bar{Z}_{k_g, k_d}^u \end{aligned} \quad (7)$$

Dakle, međusobna uzdužna impedancija segmenata vodiča, koji pripadaju istom segmentu jednožilnog kabela, u homogenom neograničenom sredstvu jednaka je vlastitoj uzdužnoj vanjskoj impedanciji gornjeg segmenta vodiča u homogenom neograničenom sredstvu. Drugim riječima, međusobna uzdužna impedancija segmenata vodiča, koji pripadaju istom segmentu jednožilnog kabela, u homogenom neograničenom sredstvu jednaka je vlastitoj uzdužnoj impedanciji gornjeg segmenta vodiča u homogenom neograničenom sredstvu umanjenoj za unutarnju impedanciju tog gornjeg segmenta vodiča.

4. Poprečne i uzdužne impedancije segmenata trožilnih kabela

4. *The transverse and longitudinal impedance of the three – wire cable segments*

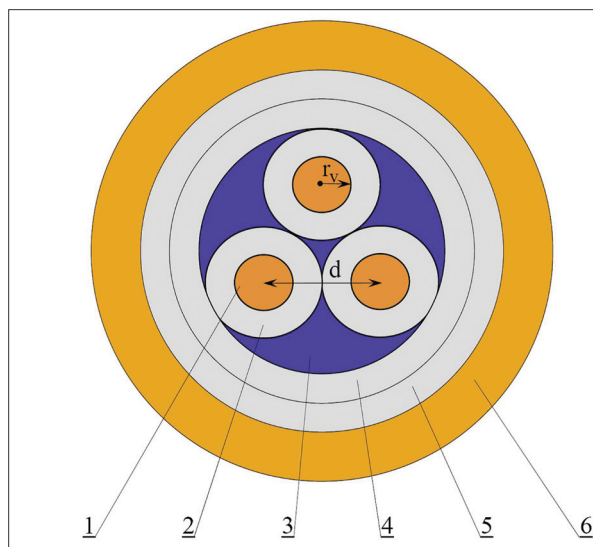
Trožilni kabele mogu imati različite izvedbe s obzirom na metalni ekran koji sudjeluje u raspodjeli struje zemljospoja. Najčešće su izvedbe trožilnih kabela:

- Kabel s vanjskim olovnim plaštem koji je ujedno i jedini metalni ekran, slika 7,
- Kabel sa zajedničkim metalnim ekranom slika 8,
- Kabel s metalnim ekranima oko svakog faznog vodiča, slika 9, i zajedničkim metalnim ekranima ili armaturom.

Dijelovi kabela sa slike 7, su:

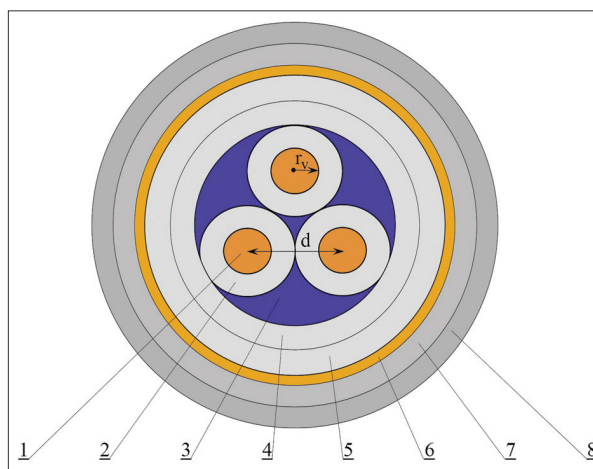
1. – Vodič od bakrenog ili aluminijskog zbijenog užeta,
2. – Slojevi izolacije oko vodiča

3. – Izolacija s unutarnjom ispunom
4. – Izolacija prvog sloja
5. – Slojevi završne izolacije
6. – Olovni plašt koji je i jedini metalni ekran



Slika 7 Trožilni kabel s vanjskim olovnim plaštem

Figure 7 Three wires cable with the outer screen of the lead

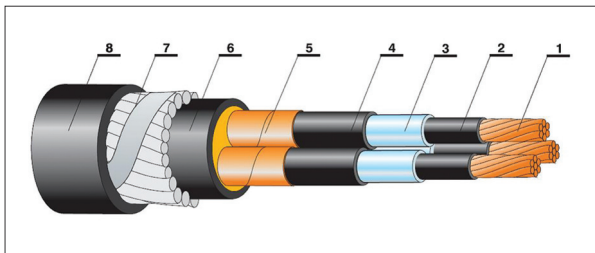


Slika 8 Trožilni kabel s jednim zajedničkim metalnim ekranom

Figure 8 Three wires cable with one common metal screen

Dijelovi kabela sa slike 8, su:

1. – Vodič od bakrenog ili aluminijskog zbijenog užeta,
2. – Slojevi izolacije oko vodiča
3. – Izolacija s unutarnjom ispunom
4. – Izolacija prvog sloja
5. – Slojevi završne izolacije
6. – Zajednički metalni ekran
7. – Slojevi izolacije iza ekrana
8. – Vanjski plašt izolacije



Slika 9 Trožilni kabel XHE49 s metalnim ekranima oko faznih vodiča i zajedničkom metalnom armaturom

Figure 9 Three wires cable – XHE49 with metal screens around the phase conductors and a metal armature

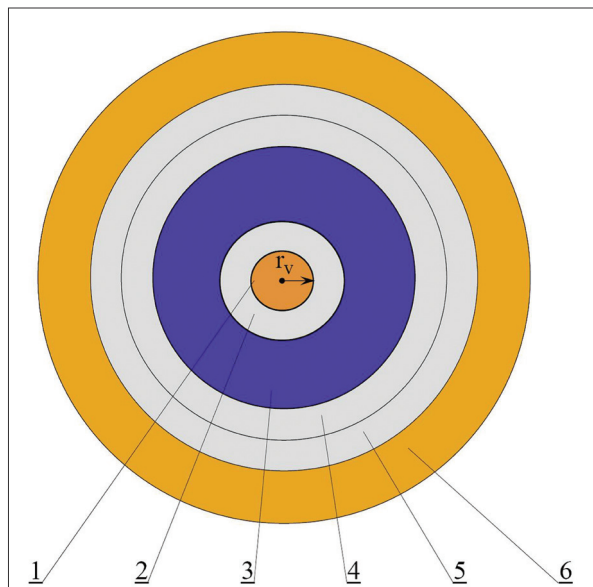
Dijelovi kabela sa slike 9, su:

1. – Vodič od zbijenog bakrenog užeta
2. – Ekran vodiča od poluvodljivog sloja na vodiču
3. – Izolacija od umreženog polietilena (XLPE)
4. – Ekran izolacije od poluvodljivog sloja na vodiču
5. – Električna zaštita/ekran od bakrene trake, uzdužno i poprečno vodonepropusne
6. – Unutarnji plašt od polietilenske (PE–HD) izolacije
7. – Armatura od čelične okrugle žice, vodonepropusne izvedbe
8. – Vanjski plašt od polietilenske (PE–HD) izolacije

Vlastite i međusobne poprečne i uzdužne impedancije segmenata vodiča trožilnog kabela s vanjskim olovnim plaštem koji je ujedno i jedini metalni ekran računaju se tako da se:

- Vanjski metalni plašt razmatra kao goli šuplji vodič,
- Kod izračuna vlastite impedancije pojedinog segmenta faznog vodiča i međusobne impedancije faznog vodiča i vanjskog metalnog plašta istog segmenta kabela koriste jednadžbe izvedene za jednožilni kabel, tj. razmatrani fazni vodič i njegova vlastita izolacija smještaju se u središte kabela, slika 10,
- Kod izračuna međusobne impedancije segmenata dvaju faznih vodiča istog segmenta kabela ta se impedancija računa kao vlastita vanjska impedancija segmenta faznog vodiča jednožilnog kabela kojemu je polumjer jednak razmaku između središta faznih vodiča “d”, a oko njega se nalaze cilindrični slojevi sa značajkama slojeva trožilnog kabela, slika 11.

Vlastite i međusobne poprečne i uzdužne impedancije segmenata vodiča trožilnog kabela s jednim zajedničkim metalnim ekranom računaju se po istom pravilu kao i vlastite i međusobne poprečne i uzdužne impedancije segmenata vodiča trožilnog kabela s vanjskim olovnim plaštem. Razlika je jedino u tome što zajednički metalni ekran nije goli vodič.

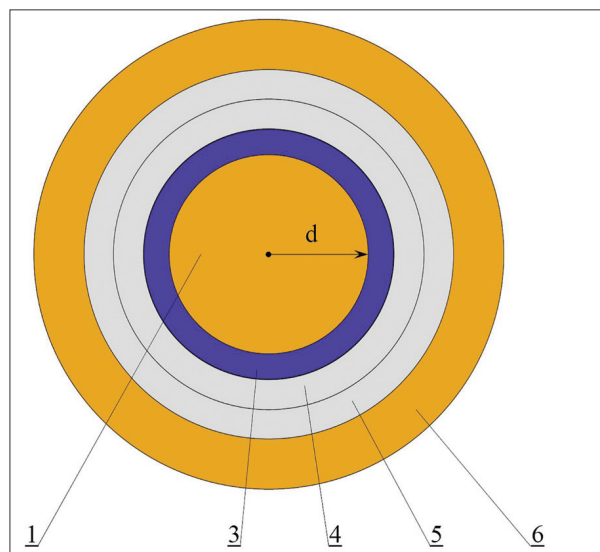


Slika 10 Trožilni kabel s vanjskim olovnim plaštem nadomješten faznim vodičem u središtu kabela (oznake slojeva kao na slici 7)*

Figure 10 Three wires cable with outside lead sheath replaced by phase conductor in the center of the cable (mark layers as shown in Figure 7)*

Vlastite i međusobne poprečne i uzdužne impedancije segmenata vodiča trožilnog kabela s metalnim ekranima oko svakog od tri fazna vodiča računaju se tako da:

- Kod izračuna vlastite impedancije segmenta pojedinog metalnog ekrana, vlastite impedancije pojedinog faznog vodiča i međusobne impedancije faznog vodiča i njemu pripadnog metalnog ekrana koriste jednadžbe izvedene za jednožilni kabel, a razmatrani fazni vodič, njegov metalni ekran i njegova vlastita izolacija smještaju se u središte kabela, slika 12,
- Kod izračuna međusobne impedancije segmenata dvaju faznih vodiča koji pripadaju istom segmentu kabela ta se impedancija računa kao vlastita vanjska impedancija segmenta faznog vodiča jednožilnog kabela kojemu je polumjer jednak razmaku između središta faznih vodiča d, a oko njega se



Slika 11 Trožilni kabel s vanjskim olovnim plaštem nadomješten faznim vodičem u središtu kabela čiji je polumjer jednak razmaku između središta dvaju faznih vodiča*

Figure 11 Three wires cable with outside lead sheath replaced by phase conductor in the center of the cable whose radius is equal to the distance between the centers of two phase conductors*

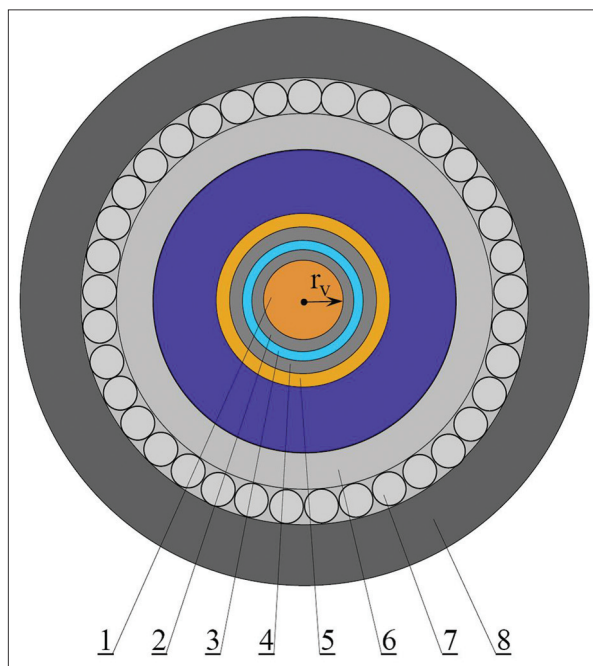
nalaze cilindrični slojevi sa značajkama zajedničkih slojeva faznih vodiča trožilnog kabela, slika 13.

- Međusobne impedancije jednog faznog vodiča i metalnog ekrana drugog faznog vodiča jednake su međusobnoj impedanciji dvaju faznih vodiča,
- Međusobne impedancije dvaju metalnih ekrana jednake su međusobnim impedancijama dvaju faznih vodiča.

U posebnom slučaju kad trožilni kabel ima metalne ekrane oko svakog od tri fazna vodiča koji ne napajaju mjesto zemljospoja, fazni vodiči se mogu zanemariti pa se tada, radi simetrije, sva tri metalna ekrana mogu nadomjestiti jednim metalnim ekranom, a vlastite impedancije nadomjesnog ke-tog segmenta metalnog ekrana opisane su izrazima:

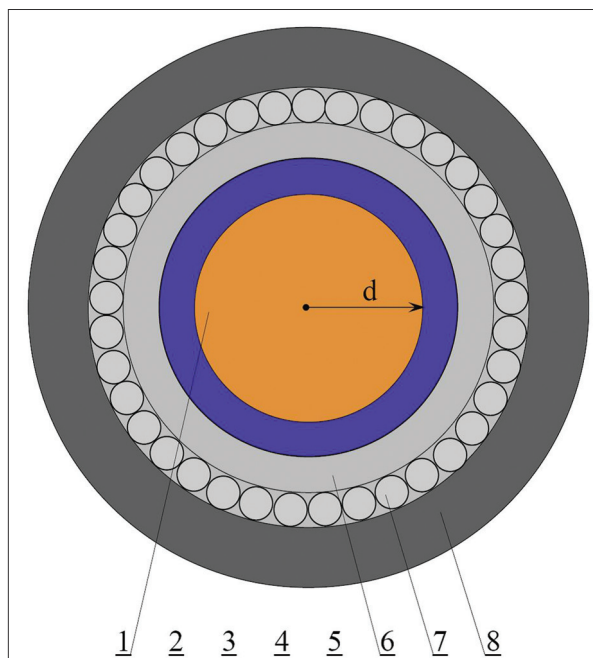
$${}^n \bar{Z}_{ke,ke}^p = {}^q n \bar{Z}_{ke,ke}^p = \frac{{}^n \bar{Z}_{vl}^{pt} + 2 \cdot {}^n \bar{Z}_{medj}^{pt}}{3} \quad (8)$$

$${}^n \bar{Z}_{ke,ke}^u = {}^q n \bar{Z}_{ke,ke}^u = \frac{{}^n \bar{Z}_{vl}^{ut} + 2 \cdot {}^n \bar{Z}_{medj}^{ut}}{3} \quad (9)$$



Slika 12 Trožilni kabel s metalnim ekranom oko svakog faznog vodiča nadomješten jednim faznim vodičem sa svojim ekranom u središtu kabela*

Figure 12 Three-wire cable with metal screen around each phase conductor replaced by one-phase conductor with its screen in the center of the cable*



Slika 13 Trožilni kabel s metalnim ekranom oko svakog faznog vodiča nadomješten faznim vodičem u središtu kabela čiji je polumjer jednak razmaku središta dvaju faznih vodiča*

Figure 13 Three-wire cable with metal screen around each phase conductor replaced by a phase conductor in the center of the cable whose radius is equal to the distance the center of two-phase conductors *

gdje je:

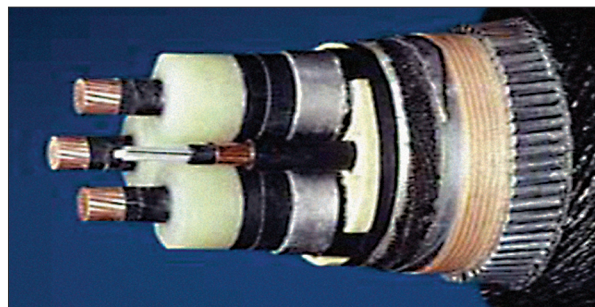
- ${}^n \bar{Z}_{vl}^{pt}$ – vlastita poprečna impedancija segmenta metalnog ekrana trožilnog kabela,
- ${}^n \bar{Z}_{medj}^{pt}$ – međusobna poprečna impedancija dvaju metalnih ekrana istog segmenta trožilnog kabela,
- ${}^n \bar{Z}_{vl}^{ut}$ – vlastita uzdužna impedancija segmenta metalnog ekrana trožilnog kabela,
- ${}^n \bar{Z}_{medj}^{ut}$ – međusobna uzdužna impedancija dvaju metalnih ekrana istog segmenta trožilnog kabela.

U praksi se može pojaviti i slučaj podmorskog trožilnog kabela s jednim ili više olovnih ekrana i vanjskom metalnom armaturom koja se uzemljuje na oba kraja i praktično je u izravnom električnom kontaktu s morem jer je oko nje morem natopljena mehanička zaštita, koja se u elektromagnetskom modelu zanemaruje. Pritom je moguće i da svaki od faznih vodiča ima svoj dodatni olovni ekran (Slika 14.). Vlastite i međusobne poprečne i uzdužne impedancije ovakvih trožilnih kabela s dva ili više zajednička metalna ekrana i eventualno s dodatnim metalnim ekranima faznih vodiča računaju se po istim pravilima kao i vlastite i međusobne poprečne i uzdužne impedancije trožilnog kabela s vanjskim olovnim plaštem, odnosno kao vlastite i međusobne poprečne i uzdužne impedancije jednožilnog kabela s dva metalna ekrana. Dakle, ista logika vrijedi bez obzira na ukupan broj i razmještaj metalnih ekrana, gdje se pod metalnim ekranom podrazumijeva i svaka na oba kraja uzemljena armatura. To znači da se metalna armatura uzemljena na oba kraja, u elektromagnetskom modelu, razmatra kao da je i ona metalni ekran uzemljen na oba kraja.

6. Reference

6. References

- [1] Balaž Z.; Elektromagnetski model za izračun raspodjele struje zemljospoja; Doktorska disertacija obranjena 14. rujna 2015.; Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje - FESB Split; Postdiplomski doktorski studij elektrotehnike i informacijske tehnologije; Split.



Slika 14 Trožilni kabel s olovnim ekranom oko svakog faznog vodiča i zajedničkim olovnim ekranom i armaturom koja se uzemljuje

Figure 14 Three wires cable with lead screen around each phase conductor and the joint lead screen grounded with armature

5. Zaključak

5. Conclusion

U razvijenom elektromagnetskom modelu, raspodjela skalarnog električnog potencijala uslijed poprečnih struja vodiča segmenta kabela računa se na isti način kao i za segmente golih vodiča, samo pritom raspodjeli potencijala u okolnom sredstvu doprinose poprečne struje svih vodiča razmatranog segmenta kabela. Što se tiče vlastitih i međusobnih impedancija, izolacijski, poluvodljivi i vodljivi slojevi jednožilnog kabela utječu samo na izračun vlastitih i međusobnih poprečnih impedancija vodiča razmatranog segmenta jednožilnog kabela. Osim toga, kvazistatičke slike segmenata vodiča jednožilnih kabela na isti način doprinose vlastitim i međusobnim poprečnim impedancijama kao da se radi o kvazistatičkim slikama golih vodiča. To vrijedi i za međusobne poprečne impedancije segmenata vodiča koji pripadaju različitim segmentima jednožilnih kabela, tj. njih u elektromagnetskom modelu razmatramo kao da se radi o golim vodičima u homogenom neograničenom sredstvu.

Znanstveni članak**AUTOR · AUTHOR**

Zdenko Balaž – nepromjenjena biografija nalazi se u časopisu Polytechnic & Design Vol. 2, No. 1, 2014.

Korespondencija:

zbalaz@tvz.hr