

**Impedanties van kabels**

09-146 pmo

20 augustus 2009

© Phase to Phase BV, Arnhem, Nederland. Alle rechten voorbehouden.

Dit document bevat vertrouwelijke informatie. Overdracht van de informatie aan derden zonder schriftelijke toestemming van of namens Phase to Phase BV is verboden. Hetzelfde geldt voor het kopiëren van het document of een gedeelte daarvan.

Phase to Phase BV is niet aansprakelijk voor enige directe, indirecte, bijkomstige of gevolgschade ontstaan door of bij het gebruik van de informatie of gegevens uit dit document, of door de onmogelijkheid die informatie of gegevens te gebruiken.

## INHOUD

1	Inleiding .....	4
2	Theoretische berekening zonder invloed van de omgeving .....	4
2.1	Normale impedantie.....	5
2.1.1	Normale weerstand .....	5
2.1.2	Normale inductie en reactantie.....	6
2.2	Homopolaire impedantie .....	7
2.2.1	Homopolaire weerstand.....	7
2.2.2	Homopolaire inductie en reactantie .....	8
2.3	Normale en homopolaire capaciteit .....	9
2.3.1	Normale capaciteit.....	9
2.3.2	Homopolaire capaciteit .....	10
3	Berekende parameters voor kabels uit het Vision typenbestand .....	11
3.1	Vier-aderige LS-kabels.....	11
3.2	Drie-aderige MS-gordelkabel met scherm .....	11
3.3	Enkel-aderige MS XLPE-kabel.....	13
3.4	Drie-aderige MS XLPE-kabel.....	15
4	Invloed aardelektrode en aarde .....	16
5	Meting van de homopolaire impedantie.....	17
6	Conclusie.....	19

## 1 INLEIDING

De impedanties van kabels zijn meestal redelijk beschreven in de brochures van de kabelfabrikanten. Soms ontbreken gegevens, die dan met behulp van de constructiegegevens redelijk te schatten zijn. Sommige impedanties zijn echter afhankelijk van omgevingsfactoren, waardoor het gedrag van een kabelverbinding in de praktijk in bepaalde gevallen moeilijk te voorspellen valt. Dit document geeft een toelichting op de berekening van de kabelimpedanties en de invloed van de omgeving.

Voor het uitvoeren van kortsluitberekeningen wordt meestal gebruik gemaakt van de methode van symmetrische componenten (Phase, 2009-1). Deze methode maakt het mogelijk om in een symmetrisch driefasensysteem met behulp van een transformatie gemakkelijker asymmetrische belastingen en verstoringen te berekenen.

Voor de gewone symmetrische berekeningen zijn de gegevens van het normale stelsel voldoende, maar voor het berekenen van asymmetrische verschijnselen, zoals fase-aardsluitingen, zijn ook de inverse en homopolaire gegevens van onder meer kabels en transformatoren noodzakelijk. De inverse gegevens zijn in de meeste gevallen gelijk aan de normale gegevens. De homopolaire gegevens zijn niet gelijk aan de normale gegevens en hangen bij kabels af van onder meer de aarding en de ligging in de grond. Ook de nabijheid van andere geleidende objecten, zoals stalen buizen of tramrails heeft invloed op de homopolaire impedantie. Om deze reden wordt de homopolaire impedantie van kabels meestal niet door de fabrikanten gespecificeerd.

## 2 THEORETISCHE BEREKENING ZONDER INVLOED VAN DE OMGEVING

Een kabel kan worden gemodelleerd met een normale, een inverse en een homopolaire impedantie. De normale impedantie is gelijk aan de bedrijfsimpedantie en is meestal wel bekend en kan worden afgeleid uit brochures en naamplaatgegevens. De inverse impedantie van kabels is gelijk aan de normale impedantie. De homopolaire impedantie kan meestal alleen door meting van het bestaande circuit verkregen worden. Hoogspanningslijnen worden altijd gemeten en de modelimpedanties zijn in die gevallen goed bekend bij de beheerder. De impedanties van MS-kabelverbindingen zijn in de meeste gevallen niet gemeten. Voor een kabel is slechts een beperkte algemene richtlijn te geven voor de waarde van de impedanties. Deze zijn onder meer afhankelijk van:

- uitvoering: drie éénfasekabels of één driefasenkabel
- ligging: onderlinge afstand in plat vlak of in driehoek
- aanwezigheid van andere geleidende objecten zoals andere kabels of pijpleidingen

Omdat de homopolaire gegevens worden beïnvloed door de liggingssomstandigheden en de omgeving, kunnen deze het best gemeten worden aan de bestaande verbinding. Voor planningsdoeleinden moeten deze waarden geschat worden. Indien geen betrouwbare waarden beschikbaar zijn, moet een schatting gemaakt worden.

Samenvattend zijn van de kabel te onderscheiden:

- normale impedantie :  $Z_1 = R_1 + jX_1$
- homopolaire impedantie :  $Z_0 = R_0 + jX_0$
- normale capaciteit :  $C_1$
- homopolaire capaciteit :  $C_0$

## 2.1 Normale impedantie

De impedantie voor de normale component bestaat uit de normale weerstand en de normale reactantie. De normale impedantie wordt gebruikt voor alle berekeningen.

### 2.1.1 NORMALE WEERSTAND

De normale weerstand  $R_l$  is gelijk aan de bedrijfsweerstand. Deze wordt meestal door de fabrikant gespecificeerd als  $R_{DC,20}$ , de gelijkstroomweerstand bij 20°C. Indien deze waarde niet bekend is, kan deze worden opgezocht in de standaard IEC 60228 “Conductors of insulated cables”, in de tabellen voor Class 1 (Solid conductors) en Class 2 (Stranded conductors). Soms geeft de fabrikant de wisselstroomweerstand voor de gegeven frequentie en de maximum bedrijfstemperatuur. Bij kortsluitberekeningen volgens IEC 60909 moet voor berekening van de initiële kortsluitstroom de weerstand bij 20°C gebruikt worden. Bij loadflowberekeningen kan daarvan afgeweken worden. Soms geeft de fabrikant de weerstand op bij maximum geleidertemperatuur. Het is echter niet altijd reëel om met de weerstand te werken bij de maximum geleidertemperatuur (50°C voor GPLK kabels, 55°C voor Alkudia kabels en 90°C voor XLPE kabels). De meeste kabels zijn immers niet continu vol belast, waardoor de temperatuur nooit de maximum waarde zal bereiken. Een bedrijfsspecifieke waarde kan door de organisatie van de gebruiker zelf worden vastgesteld. De geleiderweerstand wordt dan berekend met onderstaande formule.

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

waarin:

- $R_{DC,20}$  : geleider gelijkstroomweerstand bij 20 graden Celcius (opgave fabrikant)
- $\alpha_{20}$  : temperatuurcoëfficiënt (0,00403 K<sup>-1</sup> voor Aluminium; 0,00393 K<sup>-1</sup> voor Koper)
- $\theta$  : geleidertemperatuur (graden Celsius)

De berekende waarde voor  $R'$  is de voor de temperatuur gecorrigeerde gelijkstroomweerstand. Formeel moet deze berekende waarde nog gecorrigeerd worden voor het skin effect en het proximity effect om de wisselstroomweerstand te krijgen. Voor standaard kabels geldt:

$$R = R' (1 + y_s + y_p) \quad (2)$$

met:

- $y_s$  : skin effect factor
- $y_p$  : proximity effect factor

De skin effect factor kan berekend worden volgens IEC 60287 met onderstaande formule:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4} \quad (3)$$

met:

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

$f$ : frequentie [Hz]

Waarden voor  $k_s$  worden gegeven door IEC 60287. Voor geleiders van het type “Round, stranded” is  $k_s$  gelijk aan 1.

De proximity effect factor is afhankelijk van de ligging van de kabels en kan berekend worden volgens IEC 60287 met onderstaande formule:

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

met:

$$F_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_s^4}$$

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

$d_c$  : diameter van de geleider [mm]

$s$  : hart op hart afstand van naastgelegen geleiders

Waarden voor  $k_p$  worden gegeven door IEC 60287. Voor geleiders van het type "Round, stranded" is  $k_p$  gelijk aan 1.

### 2.1.2 NORMALE INDUCTIE EN REACTANTIE

De normale reactantie kan eenvoudig worden afgeleid uit de specificatie van de inductie in de brochure van de fabrikant. Deze is voor drie- en vieraderige kabels constant. Bij enkeladerige midden- en hoogspanningskabels is de ligging (driehoek of plat vlak) van belang.

In het geval dat de inductie niet gegeven is, kan deze berekend worden. De inductie  $L$  van een ideale ronde oneindig lange geleider, in het geval van twee parallelle geleiders, kan worden berekend volgens (Pirelli, 1999):

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 10^3 \ln \frac{s}{\rho} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 10^3 \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{2s}{d_c} \right) \quad [\text{H/km}] \quad (5)$$

waarin:

$\mu_0$  : permeabiliteitsconstante in vacuüm:  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  [H/m]

$s$  : hartafstand van de geleiders in driehoeksformatie [mm]

of  $\sqrt[3]{2} = 1.26$  maal de hartafstand van de geleiders in plat vlak

$\rho$  : geometrisch gemiddelde straal van de geleider:  $\rho = e^{-1/4} d_c/2 \cong 0,779 d_c/2$  [mm]

$d_c$  : geleiderdiameter [mm]

Invullen van de permeabiliteitsconstante en de factor voor de geometrisch gemiddelde diameter van de geleider levert:

$$L = 0,2 \ln \frac{2s}{0,779 \cdot d_c} \quad [\text{mH/km}] \quad (6)$$

Uiteindelijk wordt de normale reactantie berekend door de inductie te vermenigvuldigen met de hoekfrequentie:

$$X_1 = \omega \cdot L / 1000 = 2\pi f \cdot L / 1000 \quad [\Omega/\text{km}] \quad (7)$$

Indien de kabel geen scherm heeft, zoals bij LS-kabels, kan de normale impedantie worden berekend vanuit de resultaten van de finite-elementberekening, zoals beschreven in rapportage (Phase, 2008) en (Phase, 2009-2).

$$Z_1 = Z_c - (Z_{cc,n} + Z_{cc,t}) / 2$$

met:

$Z_c$  :  $Z_{11}$ , eerste diagonaalelement in de impedantiematrix

$Z_{cc,n}$  :  $Z_{12}$ , mutuele impedantie van de eerste geleider met de tweede geleider in de impedantiematrix

$Z_{cc,t}$  :  $Z_{13}$ , mutuele impedantie van de eerste geleider met de derde geleider in de impedantiematrix

## 2.2 Homopolaire impedantie

De impedantie voor de homopolaire component bestaat uit de homopolaire weerstand en de homopolaire reactantie. De homopolaire impedantie wordt gebruikt voor alle berekeningen waar een retourstroom langs andere weg vloeit dan de fasengeleiders, zoals nulgeleiders, afscherming en aarde.

### 2.2.1 HOMOPOLAIRE WEERSTAND

In het algemeen geldt voor een kabel dat de homopolaire weerstand per fase gelijk is aan de wisselstroomweerstand van de fasegeleider, zonder de invloed van het proximity effect maar met de invloed van het skin effect, waarbij de invloed van de retourgeleider wordt opgeteld (BICC, 1990):

- drieadelige kabels: drie maal de weerstand van de metalen afscherming, eventueel parallel aan de weerstand van de armering
- SL-type kabels (elke ader separaat afgeschermd): de weerstand van een metalen afscherming, parallel met drie maal de weerstand van de armering.
- enkeladerige kabels: de weerstand van de metalen afscherming (meestal geen armering).

Voor in Nederland veelvuldig gebruikte kabels betekent dit onderstaande.

LS drieadelige kabel:  $R_0 = R_F + 3R_A$

LS vieraderige kabel:  $R_0 = R_F + 3(R_N // R_A)$

MS GPLK drieadelige kabel:  $R_0 = R_F + 3(R_S // R_A)$

MS XLPE drieadelige kabel met gezamenlijk scherm:  $R_0 = R_F + 3(R_S // R_A)$

MS XLPE drieadelige kabel met afzonderlijke schermen (SL):  $R_0 = R_F + (R_S // 3R_A)$

MS XLPE enkeladerige kabel:  $R_0 = R_F + R_S$

waarin:

$$R_F = R'(1 + y_s)$$

$R_N$  : weerstand van de nulgeleider

$R_S$  : weerstand van het scherm

$R_A$  : weerstand van de armering

In het algemeen geldt het volgende. Sommige drieadelige kabels zijn per fase uitgerust met een afscherming die in staat is een éénfase kortsluitstroom te geleiden. In dat geval moet de weerstand van die afscherming worden gebruikt. Wanneer er sprake is van één afscherming, gezamenlijk voor de drie geleiders, moet drie maal de weerstand van die afscherming worden gebruikt. Indien beide typen

gecombineerd voorkomen, zoals een afscherming per fase en een gezamenlijke armering moet het voorbeeld van de SL-type kabel worden gebruikt. In principe moeten de weerstanden  $R_i$  van alle individuele retourpaden separaat worden berekend en moet de equivalente weerstand van al deze parallel geschakelde retourpaden worden bepaald. De homopolaire weerstand is dan  $R_F$  plus deze waarde, vermenigvuldigd met 3.

$$R_0 = R_F + \frac{3}{\sum \frac{1}{R_i}} \quad (8)$$

Hieruit blijkt dat de homopolaire weerstand nooit kleiner is dan de normale weerstand.

Bijvoorbeeld, een MS XLPE drieadrige kabel met afzonderlijke schermen, kent de drie schermen en de armering als retourpaden. Invullen in vergelijking (8) levert:

$$R_0 = R_F + \frac{3}{\frac{1}{R_{s1}} + \frac{1}{R_{s2}} + \frac{1}{R_{s3}} + \frac{1}{R_a}} = R_F + \frac{3}{\frac{3}{R_s} + \frac{1}{R_a}} = R_F + \frac{1}{\frac{1}{R_s} + \frac{1}{3R_a}} = R_F + (R_s // 3R_a) \quad (9)$$

De weerstanden worden berekend uit het geleidende oppervlak en de specifieke weerstand van de betreffende geleiders. Voor een scherm wordt het geleidende oppervlak berekend uit de diameter en de dikte. Voor afzonderlijke draden wordt de weerstand bepaald uit die van een enkele draad, gedeeld door het aantal draden en gecorrigeerd voor de spoed. Bij kabels met een meanderend scherm is de lengte van het scherm groter dan die van de totale kabel.

### 2.2.2 HOMOPOLAIRE INDUCTIE EN REACTANTIE

De homopolaire reactantie per fase van een enkeladerige kabel kan redelijk eenvoudig berekend worden voor het geval dat het retourcircuit bestaat uit alleen de eigen nul, scherm en armering. Door in de formule voor berekening van de normale inductie twee maal de geleiderafstand te vervangen door de diameter van de metalen afscherming, ontstaat de formule voor de homopolaire inductie per fase.

$$L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 10^3 \ln \frac{D_s}{\rho} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 10^3 \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{D_s}{d_c} \right) \quad [\text{H/km}] \quad (10)$$

waarin:

- $\mu_0$  : permeabiliteitsconstante in vacuüm:  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  [H/m]
- $D_s$  : gemiddelde diameter van de metalen afscherming [mm]
- $\rho$  : geometrisch gemiddelde straal van de geleider:  $\rho = e^{-1/4} d_c / 2 \cong 0,779 d_c / 2$  [mm]
- $d_c$  : geleiderdiameter [mm]

Invullen van de permeabiliteitsconstante en de factor voor de geometrisch gemiddelde diameter van de geleider levert de homopolaire inductie per fase van een enkeladerige kabel (BICC, 1990):

$$L_0 = 0,2 \ln \frac{D_s}{0,779 \cdot d_c} \quad [\text{mH/km}] \quad (11)$$



Voor drieadrige kabels met een gezamenlijke afscherming kan de homopolaire inductie per fase berekend worden met behulp van onderstaande vergelijking. Hierin komt een factor 3 voor om de reactantie van het gezamenlijke scherm om te rekenen naar reactantie per fase.

$$L_0 = 3 \cdot 0,2 \cdot \ln \frac{D_s}{gmd} \quad [\text{mH/km}] \quad (12)$$

waarin:

$D_s$  : gemiddelde diameter van de metalen afscherming over de gezamenlijke aders [mm]

$gmd$  : geometrische gemiddelde diameter van de geleiders in de kabel [mm].

De waarde van  $gmd$  mag gelijk genomen worden aan 0,75 maal  $D_{ogg}$ , de diameter van de cirkel die raakt aan de drie gezamenlijke geleiders in de kabel (ervan uitgaande dat de geleiders cirkelvormig zijn) (BICC, 1990). Zie bijlage B voor de precieze berekening. De diameter van de cirkel over de samengeslagen geleiders kan als volgt berekend worden uit de diameter over de geïsoleerde geleider ( $D_i$ ) en de geleiderdiameter ( $d_c$ ):

$$D_{ogg} = D_i / \sin(60^\circ) + d_c \cong D_i / 0,866 + d_c \quad [\text{mm}]$$

Uiteindelijk wordt de normale reactantie berekend door de inductie te vermenigvuldigen met de hoekfrequentie:

$$X_0 = \omega \cdot L_0 / 1000 = 2\pi f \cdot L_0 / 1000 \quad [\Omega/\text{km}] \quad (13)$$

Indien de kabel geen scherm heeft, zoals bij LS-kabels, kan de homopolaire impedantie worden berekend vanuit de resultaten van de finite-elementberekening, zoals beschreven in rapportage (Phase, 2008) en (Phase, 2009-2).

$$Z_{0,\text{int}} \approx Z_c - Z_{cc} + 3(Z_c - Z_{cc})$$

met:

$Z_c$  :  $Z_{11}$ , eerste diagonaalelement in de impedantiematrix

$Z_{cc}$  :  $Z_{12}$ , mutuele impedantie van de eerste geleider met de tweede geleider in de impedantiematrix

### 2.3 Normale en homopolaire capaciteit

De capaciteit speelt voornamelijk een rol in de blindvermogenshuishouding bij HS-netten. Ook bepaalt de capaciteit het diëlektrische verlies dat in verband met de warmteontwikkeling een beperkende factor is voor de maximale stroombelastbaarheid.

In geval van zwevende MS-netten met een geïsoleerd sterpunt speelt de capaciteit een rol bij de grootte van de stroom in geval van een fase-aardsluiting.

Bij LS-kabels is de capaciteit voor de meeste loadflow- en kortsluitberekeningen niet belangrijk.

#### 2.3.1 NORMALE CAPACITEIT

De normale capaciteit van kabels is doorgaans gespecificeerd door de kabelfabrikanten. Deze kan ook berekend worden met behulp van onderstaande formule voor enkeladerige kabels en meeraderige kabels met afzonderlijke schermen (Happoldt, 1978):

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} \cdot 10^9 \cong \frac{\epsilon_r}{18 \cdot \ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} \quad [\mu\text{F}/\text{km}] \quad (14)$$

met:

$\epsilon_0$  : absolute permittiviteit:  $8.854 \cdot 10^{-12}$  [F/m]

$\epsilon_r$  : relatieve permittiviteit van de isolatie (2,5 voor XLPE; 3,6 voor massa-geïmpregneerd papier)

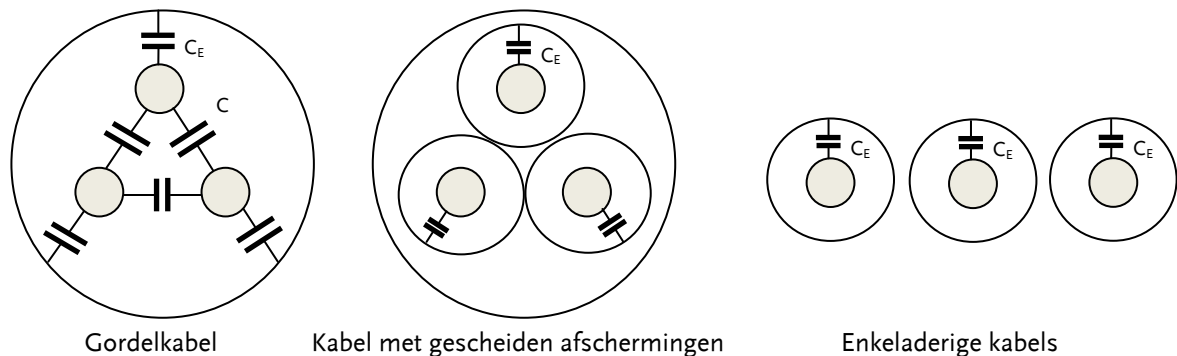
$D_i$  : diameter over de isolatie, exclusief isolatiescherm [mm]

$d_c$  : diameter over de geleider, inclusief geleiderscherm [mm]

De berekening voor kabels met gemeenschappelijk scherm en voor gordelkabels is de berekening vrij lastig. De literatuur (Heinhold, 1999) geeft een formule. Dit rapport volgt de opgave van de fabrikant.

### 2.3.2 HOMOPOLAIRE CAPACITEIT

De kleine afstanden tussen de geleiders onderling in een kabel en tussen geleiders en afscherming en de diëlektrische constante van het isolatiemedium zorgen ervoor dat de capaciteit groter is dan bij bovengrondse lijnen. De kabelcapaciteiten liggen in de grootte van 0,1 tot 1,2  $\mu\text{F}/\text{km}$ . De homopolaire capaciteit is afhankelijk van de constructie van de kabel.



Figuur 1 Capaciteiten in diverse kabelsoorten

De normale en homopolaire capaciteiten voor deze kabelsoorten zijn bij benadering (Happoldt, 1978):

Type kabel	$C_1$	$C_0$
Gordelkabel	$C_E + 3 C$	$0,6 C_1$
Gescheiden afschermingen	$C_E$	$C_1$
Enkeladerige kabel	$C_E$	$C_1$

Hieruit volgt dat de homopolaire capaciteit eenvoudig uit te drukken is in de normale capaciteit.

3 **BEREKENDE PARAMETERS VOOR KABELS UIT HET VISION TYPENBESTAND**

Het Vision typenbestand bevat onderstaande soorten kabels:

- 4-aderige LS-kabel zonder scherm (VMvK/Alk, VGVMvK/Alk)
- 4-aderige LS-kabel met scherm (VMvKsas, CPLK Curm, CPLK Cusvm, Vulto/a)
- 3-aderige MS-gordelkabel met scherm (GPLK)
- enkeladerige MS-kabel, ligging in driehoek of plat vlak (XLPE)
- 3-aderige MS-kabel (XLPE)

De impedanties van de MS-kabels zijn berekend volgens bovenstaand beschreven methode en zullen in de volgende paragrafen worden toegelicht. De impedanties van de LS-kabels zijn op een andere manier berekend. Aangezien sommige parameters situatieafhankelijk zijn, zijn de berekende resultaten niet algemeen geldig en dienen alleen ter informatie.

3.1 **Vier-aderige LS-kabels**

De impedanties van de 4-aderige LS-kabels zijn berekend vanuit de resultaten van de finit-elementsmethode voor het berekenen van de volledige impedantiematrix van alle geleiders in de kabel. De moeilijkheid bij LS-kabels is dat in sommige gevallen een scherm ontbreekt. Daarom is voor alle LS-kabels gekozen voor deze werkwijze. De procedure is beschreven in een rapport (Phase, 2009-2). Hieruit volgt dat de homopolaire impedantie van LS-kabels met alleen de nul als retour ongeveer 4 maal zo groot is als de normale impedantie. Dit geldt zowel voor de weerstand als voor de reactantie. Indien ook het scherm als retour wordt gebruikt, neemt de homopolaire impedantie af.

Type kabel	Retour nul		Retour nul + mantel	
	$R_o/R_1$	$X_o/X_1$	$R_o/R_1$	$X_o/X_1$
LS 4-ad kabel (25..300 mm)	4,0	3,5..4,0	2,5..3,0	1,5..2,0

3.2 **Drie-aderige MS-gordelkabel met scherm**

Onder deze noemer vallen kabels van het type GPLK.

- De normale bedrijfsweerstand  $R_1$  wordt ontleend aan de gelijkstroomweerstand bij 20 °C en het skin- en proximity-effect. De berekening volgt formules (1) en (2). De gelijkstroomweerstand is door de fabrikant gegeven.
- De normale reactantie  $X_1$  wordt berekend volgens formules (6) en (7). Benodigde constructiegegevens zijn geleiderdoorsnede, geleiderdiameter en isolatiedikte. De equivalente geleiderdiameter wordt als volgt berekend:

$$d_c = 2\sqrt{A_c / \pi}$$

De diameter over de isolatie is berekend uit de equivalente geleiderdiameter en de isolatiedikte:

$$D_i = d_c + 2t_i$$

- De homopolaire weerstand  $R_0$  wordt berekend volgens paragraaf 2.2.1 en is gelijk aan:

$$R_o = R_f + 3R_s = R_l + 3R_s$$

met:

$$R_s = 10^9 \rho_{20} / A_s \quad [\Omega/\text{km}]$$

De soortelijke weerstand van lood bij 20°C is  $21 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ .

Het oppervlak van het aardscherm  $A_s$  wordt berekend uit de diameter en de dikte van het scherm.

- De homopolaire reactantie  $X_0$  wordt berekend volgens formule (12). De schermdiameter  $D_s$  is door de fabrikant gegeven. De  $gmd$  wordt berekend uit de schermdiameter, de schermdikte  $t_s$  en de isolatiedikte  $t_i$  en is gelijk aan:

$$gmd = 0,75 D_{ogg} = 0,75 (D_s - 2(t_s + 2t_i))$$

- De normale capaciteit  $C_1$  wordt ontleend aan de opgave van de fabrikant.
- De homopolaire capaciteit  $C_0$  is bij benadering 0,6 maal  $C_1$ .

GPLK-kabels met aluminium geleider en spanningsniveau 8/10 kV

$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_c$ [mm]	$t_i$ [mm]	$D_i$ [mm]	$t_s$ [mm]	$D_s$ [mm]	$D_{ogg}$ [mm]	$R_s$ [Ω/km]	$R_1$ [Ω/km]	$X_1$ [Ω/km]	$R_0$ [Ω/km]	$X_0$ [Ω/km]
25	5,64	2,35	10,34	1,7	29	16,2	1,47	1,200	0,097	5,61	0,16
35	6,68	2,35	11,38	1,7	31	18,2	1,37	0,868	0,093	4,97	0,15
50	7,98	2,35	12,68	1,8	33	20,0	1,21	0,641	0,088	4,28	0,15
70	9,44	2,35	14,14	1,9	36	22,8	1,05	0,443	0,085	3,60	0,14
95	11,00	2,35	15,70	2,0	40	26,6	0,90	0,321	0,082	3,01	0,13
120	12,36	2,35	17,06	2,1	43	29,4	0,79	0,254	0,080	2,64	0,13
150	13,82	2,35	18,52	2,2	45	31,2	0,72	0,207	0,078	2,38	0,12
185	15,35	2,35	20,05	2,3	48	34,0	0,65	0,166	0,076	2,11	0,12
240	17,48	2,35	22,18	2,4	53	38,8	0,56	0,127	0,074	1,81	0,11
300	19,54	2,35	24,24	2,5	57	42,6	0,50	0,103	0,073	1,60	0,11
400	22,57	2,35	27,27	2,7	64	49,2	0,41	0,081	0,071	1,32	0,10

GPLK-kabels met aluminium geleider en spanningsniveau 10/10 kV

$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_c$ [mm]	$t_i$ [mm]	$D_i$ [mm]	$t_s$ [mm]	$D_s$ [mm]	$D_{ogg}$ [mm]	$R_s$ [Ω/km]	$R_1$ [Ω/km]	$X_1$ [Ω/km]	$R_0$ [Ω/km]	$X_0$ [Ω/km]
25	5,64	2,5	10,64	1,8	31	17,4	1,30	1,200	0,099	5,09	0,16
35	6,68	2,5	11,68	1,9	33	19,2	1,15	0,868	0,094	4,33	0,16
50	7,98	2,5	12,98	2,0	36	22,0	1,00	0,641	0,090	3,65	0,15
70	9,44	2,5	14,44	2,1	40	25,8	0,86	0,443	0,086	3,01	0,14
95	11,00	2,5	16,00	2,2	43	28,6	0,76	0,321	0,083	2,60	0,13
120	12,36	2,5	17,36	2,3	45	30,4	0,69	0,254	0,081	2,34	0,13
150	13,82	2,5	18,82	2,4	48	33,2	0,62	0,207	0,079	2,08	0,12
185	15,35	2,5	20,35	2,4	51	36,2	0,58	0,166	0,077	1,92	0,12
240	17,48	2,5	22,48	2,6	56	40,8	0,49	0,127	0,075	1,60	0,11
300	19,54	2,5	24,54	2,7	60	44,6	0,44	0,103	0,074	1,43	0,11
400	22,57	2,5	27,57	2,9	67	51,2	0,37	0,081	0,072	1,18	0,10

GPLK-kabels met koperen geleider en spanningsniveau 8/10 kV

A <sub>c</sub> [mm <sup>2</sup> ]	d <sub>c</sub> [mm]	t <sub>i</sub> [mm]	D <sub>i</sub> [mm]	t <sub>s</sub> [mm]	D <sub>s</sub> [mm]	D <sub>ogg</sub> [mm]	R <sub>s</sub> [Ω/km]	R <sub>l</sub> [Ω/km]	X <sub>l</sub> [Ω/km]	R <sub>0</sub> [Ω/km]	X <sub>0</sub> [Ω/km]
25	5,64	2,35	10,34	1,7	29	16,2	1,47	0,727	0,097	5,13	0,16
35	6,68	2,35	11,38	1,7	31	18,2	1,37	0,524	0,093	4,63	0,15
50	7,98	2,35	12,68	1,8	33	20,0	1,21	0,387	0,088	4,03	0,15
70	9,44	2,35	14,14	1,9	36	22,8	1,05	0,269	0,085	3,43	0,14
95	11,00	2,35	15,70	2,0	40	26,6	0,90	0,194	0,082	2,89	0,13
120	12,36	2,35	17,06	2,1	43	29,4	0,79	0,154	0,080	2,54	0,13
150	13,82	2,35	18,52	2,2	45	31,2	0,72	0,125	0,078	2,30	0,12
185	15,35	2,35	20,05	2,3	48	34	0,65	0,101	0,076	2,05	0,12
240	17,48	2,35	22,18	2,4	53	38,8	0,56	0,078	0,074	1,76	0,11
300	19,54	2,35	24,24	2,5	57	42,6	0,50	0,063	0,073	1,56	0,11
400	22,57	2,35	27,27	2,7	64	49,2	0,41	0,051	0,071	1,29	0,10

GPLK-kabels met koperen geleider en spanningsniveau 10/10 kV

A <sub>c</sub> [mm <sup>2</sup> ]	d <sub>c</sub> [mm]	t <sub>i</sub> [mm]	D <sub>i</sub> [mm]	t <sub>s</sub> [mm]	D <sub>s</sub> [mm]	D <sub>ogg</sub> [mm]	R <sub>s</sub> [Ω/km]	R <sub>l</sub> [Ω/km]	X <sub>l</sub> [Ω/km]	R <sub>0</sub> [Ω/km]	X <sub>0</sub> [Ω/km]
25	5,64	2,5	10,64	1,8	31	17,4	1,30	0,727	0,099	4,62	0,16
35	6,68	2,5	11,68	1,9	33	19,2	1,15	0,524	0,094	3,99	0,16
50	7,98	2,5	12,98	2,0	36	22,0	1,00	0,387	0,090	3,40	0,15
70	9,44	2,5	14,44	2,1	40	25,8	0,86	0,269	0,086	2,84	0,14
95	11,00	2,5	16,00	2,2	43	28,6	0,76	0,194	0,083	2,47	0,13
120	12,36	2,5	17,36	2,3	45	30,4	0,69	0,154	0,081	2,24	0,13
150	13,82	2,5	18,82	2,4	48	33,2	0,62	0,125	0,079	1,99	0,12
185	15,35	2,5	20,35	2,4	51	36,2	0,58	0,101	0,077	1,85	0,12
240	17,48	2,5	22,48	2,6	56	40,8	0,49	0,078	0,075	1,55	0,11
300	19,54	2,5	24,54	2,7	60	44,6	0,44	0,063	0,074	1,39	0,11
400	22,57	2,5	27,57	2,9	67	51,2	0,37	0,051	0,072	1,15	0,10

### 3.3 Enkel-aderige MS XLPE-kabel

Onder deze noemer vallen kabels van het type XLPE, ligging in driehoek of plat vlak.

- De normale bedrijfswaerstand R<sub>l</sub> wordt ontleend aan de gelijkstroomwaerstand bij 20 °C en het skin- en proximity-effect. De berekening volgt formules (1) en (2). De gelijkstroomwaerstand is door de fabrikant gegeven.
- De normale reactantie X<sub>l</sub> wordt berekend volgens formules (6) en (7). Benodigde constructiegegevens zijn geleiderdiameter en isolatiedikte. In driehoeksformatie raken de kabels elkaar. In plat vlak formatie liggen de kabels één kabeldiameter uit elkaar. Ook gebruikelijk is 70 mm. De afstand tussen de kabels is van grote invloed op de inductie, zodat voor die gevallen de reactantie opnieuw berekend moet worden.  
De geleiderdiameter is gegeven door de fabrikant.

- De homopolaire waerstand R<sub>0</sub> wordt berekend volgens paragraaf 2.2.1 en is gelijk aan:

$$R_0 = R_f + R_s = R_l + R_s$$

met:

$$R_s = 10^9 \rho_{20} / A_s \quad [\Omega/\text{km}]$$

De soortelijke waerstand van koper bij 20°C is 1,72·10<sup>-8</sup> Ωm.

De doorsnede van het scherm A<sub>s</sub> is door de fabrikant gegeven.

- De homopolaire reactantie X<sub>0</sub> wordt berekend volgens formule (11). De schermdiameter is door de fabrikant gegeven.

- De normale capaciteit  $C_1$  wordt ontleend aan de opgave van de fabrikant en is gecontroleerd met behulp van formule (14). De dikte van het geleiderscherm is geschat op 0,8 mm (volgens NEN 3620 minimaal 0,5). De diameter over de isolatie (zonder isolatiescherm) volgt uit de gegevens van de fabrikant. Meestal geeft de fabrikant de maat inclusief isolatiescherm. De relatieve permittiviteit is 2,5.
- De homopolaire capaciteit  $C_0$  is gelijk aan  $C_1$ .

YMeKrvas XLPE-kabels met aluminium geleider en spanningsniveau 6/10 kV,  
ligging in driehoeksformatie (∴ rakend) en in plat vlak (...  $D_e$  tussenruimte)

$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_c$ [mm]	$D_i$ [mm]	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$D_e$ [mm]	$R_s$ [Ω/km]	$R_1$ [Ω/km]	$X_1 ∴$ [Ω/km]	$X_1 …$ [Ω/km]	$R_0$ [Ω/km]	$X_0$ [Ω/km]
50	7,6	16,3	25	28	0,70	0,641	0,141	0,199	1,34	0,08
95	10,7	19,4	25	31	0,70	0,320	0,126	0,184	1,02	0,07
150	13,4	22,1	25	34	0,70	0,205	0,118	0,176	0,91	0,06
240	17,1	25,8	25	38	0,70	0,126	0,109	0,168	0,83	0,05
400	21,7	30,4	25	43	0,70	0,080	0,102	0,160	0,78	0,05
630	27,9	36,6	25	49	0,70	0,051	0,095	0,153	0,75	0,04

YMeKrvas XLPE-kabels met aluminium geleider en spanningsniveau 8,7/15 kV,  
ligging in driehoeksformatie (∴ rakend) en in plat vlak (...  $D_e$  tussenruimte)

$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_c$ [mm]	$D_i$ [mm]	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$D_e$ [mm]	$R_s$ [Ω/km]	$R_1$ [Ω/km]	$X_1 ∴$ [Ω/km]	$X_1 …$ [Ω/km]	$R_0$ [Ω/km]	$X_0$ [Ω/km]
50	7,6	19,0	25	30	0,70	0,641	0,146	0,204	1,34	0,09
95	10,7	22,0	25	33	0,70	0,320	0,130	0,188	1,02	0,07
150	13,4	24,7	25	36	0,70	0,205	0,121	0,179	0,91	0,07
240	17,1	28,4	25	40	0,70	0,126	0,113	0,171	0,83	0,06
400	21,7	33,1	25	45	0,70	0,080	0,105	0,163	0,78	0,05
630	27,9	39,2	25	52	0,70	0,051	0,098	0,156	0,75	0,04

YMeKrvas XLPE-kabels met aluminium geleider en spanningsniveau 10/20 kV,  
ligging in driehoeksformatie (∴ rakend) en in plat vlak (...  $D_e$  tussenruimte)

$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_c$ [mm]	$D_i$ [mm]	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$D_e$ [mm]	$R_s$ [Ω/km]	$R_1$ [Ω/km]	$X_1 ∴$ [Ω/km]	$X_1 …$ [Ω/km]	$R_0$ [Ω/km]	$X_0$ [Ω/km]
95	10,7	24,1	25	35	0,70	0,320	0,134	0,192	1,02	0,08
150	13,4	26,7	25	38	0,70	0,205	0,125	0,183	0,91	0,07
240	17,1	30,4	25	42	0,70	0,126	0,116	0,174	0,83	0,06
400	21,7	35,0	25	47	0,70	0,080	0,108	0,166	0,78	0,05
630	27,9	41,2	25	54	0,70	0,051	0,101	0,159	0,75	0,05

YMeKrvas XLPE-kabels met aluminium geleider en spanningsniveau 18/30 kV,  
ligging in driehoeksformatie (∴ rakend) en in plat vlak (...  $D_e$  tussenruimte)

$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_c$ [mm]	$D_i$ [mm]	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$D_e$ [mm]	$R_s$ [Ω/km]	$R_1$ [Ω/km]	$X_1 ∴$ [Ω/km]	$X_1 …$ [Ω/km]	$R_0$ [Ω/km]	$X_0$ [Ω/km]
150	13,4	31,7	25	44	0,70	0,205	0,134	0,192	0,91	0,08
240	17,1	35,4	25	47	0,70	0,126	0,123	0,181	0,83	0,07
400	21,7	40,0	50	53	0,35	0,080	0,115	0,173	0,43	0,06
630	27,9	46,2	50	59	0,35	0,051	0,106	0,164	0,40	0,05

3.4 Drie-aderige MS XLPE-kabel

Onder deze noemer vallen kabels van het type XLPE, waarvan alle aders individueel afgeschermd zijn.

- De normale bedrijfsweerstand  $R_1$  wordt ontleend aan de gelijkstroomweerstand bij 20 °C en het skin- en proximity-effect. De berekening volgt formules (1) en (2). De gelijkstroomweerstand is door de fabrikant gegeven.
- Van deze kabel is elke ader afgeschermd met een koperen folie. De normale reactantie  $X_1$  wordt berekend volgens formules (6) en (7). Benodigde constructiegegevens zijn geleiderdiameter, dikte van het geleiderscherm, geschat op 0,8 mm en isolatiedikte. De geleiderdiameter is gegeven door de fabrikant.

- De homopolaire weerstand  $R_0$  wordt berekend volgens paragraaf 2.2.1 en is gelijk aan:

$$R_o = R_f + 3R_s = R_l + 3R_s$$

met:

$$R_s = 10^9 \rho_{20} / A_s \quad [\Omega/\text{km}]$$

De soortelijke weerstand van koper bij 20°C is  $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ .

De doorsnede van het scherm  $A_s$  is door de fabrikant gegeven.

- De homopolaire reactantie  $X_0$  wordt berekend volgens formules (12) en (13). De doorsnede en diameter van de gecombineerde armering/scherm zijn door de fabrikant gegeven. De *gmd* wordt berekend uit de binnendiameter van armering/scherm, (uit de - en buitendiameter en de schermdikte  $t_s$ ), de dikte van de beddingslaag  $t_2$  tussen de aders en de armering/scherm en de isolatiedikte  $t_i$  en is gelijk aan:

$$gmd = 0,75 D_{ogg} = 0,75 (dA_i - 2(t_2 + t_i))$$

- De normale capaciteit  $C_1$  wordt ontleend aan de opgave van de fabrikant en is gecontroleerd met behulp van formule (14). De dikte van het geleiderscherm is geschat op 0,8 mm (volgens NEN 3620 minimaal 0,5). De diameter over de isolatie (zonder isolatiescherm) volgt uit de gegevens van de fabrikant. Meestal geeft de fabrikant de maat inclusief isolatiescherm. De relatieve permittiviteit is 2,5.
- De homopolaire capaciteit  $C_0$  is gelijk aan  $C_1$ .

VGYMvKrvas XLPE-kabels met koperen geleider en spanningsniveau 6/10 kV

$A_c$ $\text{mm}^2$	$d_c$ mm	$t_i$ mm	$D_i$ mm	$A_s$ $\text{mm}^2$	$D_{ogg}$ mm	$t_2$ mm	$dA_i$ mm	$dA$ mm	$R_s$ $\Omega/\text{km}$	$R_1$ $\Omega/\text{km}$	$X_1$ $\Omega/\text{km}$	$R_0$ $\Omega/\text{km}$	$X_0$ $\Omega/\text{km}$
50	8,3	3,4	17,0	25	34,2	3,5	48,0	53,0	0,70	0,387	0,110	2,50	0,14
95	11,7	3,4	20,4	25	41,2	3,5	55,0	60,0	0,70	0,194	0,099	2,30	0,13
150	14,6	3,4	23,3	25	47,2	3,5	61,0	66,0	0,70	0,126	0,093	2,24	0,12
240	18,7	3,4	28,0	25	57,2	3,5	71,0	76,0	0,70	0,078	0,088	2,19	0,11

VGYMvKrvas XLPE-kabels met koperen geleider en spanningsniveau 8,7/15 kV

$A_c$ $\text{mm}^2$	$d_c$ mm	$t_i$ mm	$D_i$ mm	$A_s$ $\text{mm}^2$	$D_{ogg}$ mm	$t_2$ mm	$dA_i$ mm	$dA$ mm	$R_s$ $\Omega/\text{km}$	$R_1$ $\Omega/\text{km}$	$X_1$ $\Omega/\text{km}$	$R_0$ $\Omega/\text{km}$	$X_0$ $\Omega/\text{km}$
50	8,3	4,5	19,2	25	37,6	3,5	53,6	58,1	0,70	0,387	0,117	2,50	0,14
95	11,7	4,5	22,6	25	44,2	3,5	60,2	64,7	0,70	0,194	0,105	2,30	0,13
150	14,6	4,5	25,5	25	51,4	3,5	67,4	71,9	0,70	0,126	0,098	2,24	0,12

VGyMvKrvas XLPE-kabels met koperen geleider en spanningsniveau 12/20 kV

A <sub>c</sub> mm <sup>2</sup>	d <sub>c</sub> mm	t <sub>i</sub> mm	D <sub>i</sub> mm	A <sub>s</sub> mm <sup>2</sup>	D <sub>ogg</sub> mm	t <sub>2</sub> mm	dAi mm	dA mm	R <sub>s</sub> Ω/km	R <sub>1</sub> Ω/km	X <sub>1</sub> Ω/km	R <sub>0</sub> Ω/km	X <sub>0</sub> Ω/km
50	8,3	5,5	21,2	25	40,0	2,0	55,0	60,4	0,70	0,387	0,123	2,50	0,13
95	11,7	5,5	24,6	25	47,3	3,5	65,3	69,7	0,70	0,194	0,110	2,30	0,13
150	14,6	5,5	27,5	25	52,3	4,5	72,3	76,8	0,70	0,126	0,103	2,24	0,13

YMeKrvas XLPE-kabels met aluminium geleider en spanningsniveau 6/10 kV (Kudi)

A <sub>c</sub> mm <sup>2</sup>	d <sub>c</sub> mm	t <sub>i</sub> mm	D <sub>i</sub> mm	A <sub>s</sub> mm <sup>2</sup>	D <sub>ogg</sub> mm	t <sub>2</sub> mm	dAi mm	dA mm	R <sub>s</sub> Ω/km	R <sub>1</sub> Ω/km	X <sub>1</sub> Ω/km	R <sub>0</sub> Ω/km	X <sub>0</sub> Ω/km
95	10,8	4,2	19,2	70	37,0	2,0	49,4	50,0	0,25	0,321	0,100	1,07	0,11
150	13,3	4,2	21,7	70	40,5	2,0	52,9	54,0	0,25	0,207	0,094	0,96	0,11
240	17,1	4,2	25,2	70	50,0	2,0	62,4	63,0	0,25	0,127	0,087	0,88	0,10

#### 4 INVLOED AARDELEKTRODE EN AARDE

De aardelektrode wordt gemodelleerd met een weerstand naar de 'verre aarde'. De weerstand van de aardelektrode is afhankelijk van de specifieke bodemweerstand ρ en de fysische afmetingen van de aardelektrode. Voor een enkele ronde penvormige aardelektrode geldt onderstaande formule voor berekening van de aardverspreidingsweerstand (Happoldt, 1978):

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{d} \quad [\text{Ohm}] \quad (15)$$

met:

- ρ : specifieke bodemweerstand [Ωm]
- L : lengte van de verticale elektrode in de grond [m]
- d : diameter van de aardelektrode [m]

De specifieke bodemweerstand is afhankelijk van het bodemmateriaal en de hoeveelheid vocht in en temperatuur van de bodem. Onderstaande tabel geeft een overzicht voor de materialen.

Bodemsoort	ρ minimaal [Ωm]	ρ maximaal [Ωm]
Veen	5	40
Klei	20	200
Zand	200	2500
Kiezel	2000	3000

Het verschil tussen de minimale en maximale waarden van de specifieke bodemweerstand wordt bepaald door het gewichtspercentage van het in het materiaal aanwezige vocht. Dit kan gemeten worden tijdens het slaan van de elektrode, ervan uitgaande dat de meting representatief is voor de laagste vochtigheid van de bodem.

In Nederland is de aardelektrode vaak een geslagen elektrode van rond koperdraad met een doorsnede van 50 mm<sup>2</sup> (d = 0,0075 m). Er worden ook meerdere soorten toegepast, zoals massief staal (rond, ster- of kruisvormig) voorzien van een goedhechtende koperlaag aan de oppervlakte en een verzinkte rond stalen variant.

Voor het maken van een aardelektrode met een aardverspreidingsweerstand kleiner dan 1 Ω moeten er vaak meerdere parallel elektroden geslagen worden, op ruime afstand van elkaar. Volgens formule



(15) is de aardverspreidingsweerstand voor een aardelektrode van 10 m en een diameter van 7,5 mm in bodem met een specifieke weerstand van 100 Ωm gelijk aan 13,7 Ω. De literatuur (Happoldt, 1978) geeft formules voor het berekenen van parallelle of andere vormen van aardelektroden.

Het retourpad bestaat uit het pad door de kabel (onder andere afscherming) met parallel het pad door de aarde. Het pad door de aarde bestaat uit de aardelektrodes (minimaal twee) en het pad door de aarde zelf. Het pad door de aarde loopt bij voorkeur zo dicht mogelijk langs de kabel. Dit is uitgelegd in bijlage A. Hierdoor is de weerstand van het pad door de aarde meestal anders dan puur theoretisch berekend. Bovendien heeft het retourpad door aarde een reactieve component, die bepaald wordt door elektromagnetische koppeling met andere geleidende voorwerpen in de bodem. Het is hierdoor niet goed te voorspellen hoe groot de invloed van de parallelschakeling van het retourpad door de aarde op de totale homopolaire impedantie is. In zijn algemeenheid geldt wel dat parallelschakeling van de aarde de homopolaire weerstand verkleint en de homopolaire reactantie vergroot.

## 5 METING VAN DE HOMOPOLAIRE IMPEDANTIE

Aangezien de homopolaire impedantie van sterkstroomkabels niet met grote nauwkeurigheid berekend kan worden, zijn metingen noodzakelijk. Met behulp van deze metingen uit de praktijk kan een schatting gedaan worden voor waarden die bij de planning van een nieuw tracé bruikbaar zijn. Overigens laten talrijke praktijkmetingen zien dat de spreiding in de resultaten aanzienlijk is.

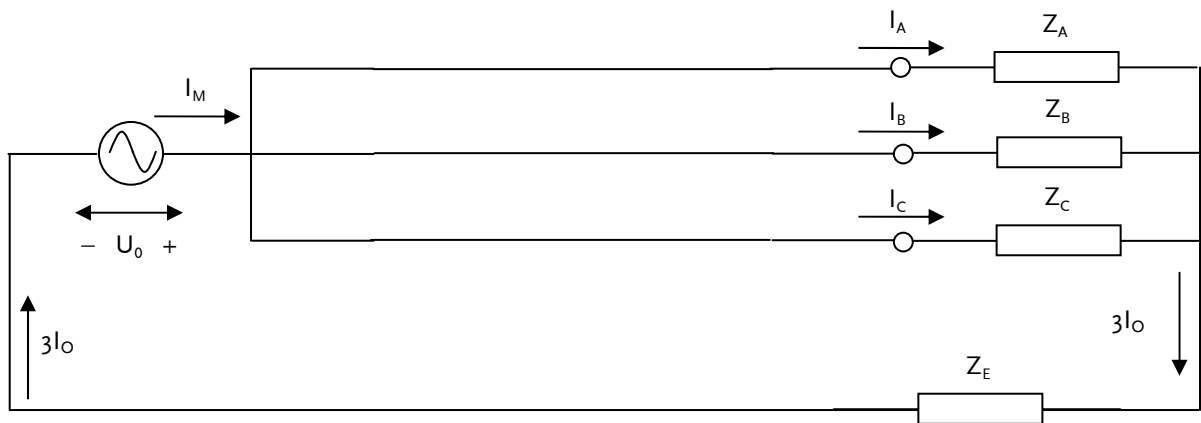
De homopolaire impedantie wordt gemeten met behulp van een voeding met een homopolair stelsel. Dit wordt bereikt door de fasen aan beide uiteinden parallel te schakelen. Aan het ene uiteinde wordt deze parallelschakeling geaard en aan het andere éénfasig tegen aarde gevoed. De homopolaire impedantie is dan het quotiënt van spanning en stroom. Indien de kabelmantels aan beide uiteinden geaard zijn, vindt een stroomopdeling plaats tussen de mantels en de aarde. Bij éénzijdige aarding (op de andere zijde zijn de mantels zwevend en niet doorverbonden met mantels van andere kabels) gaat de retourstroom alleen door de aarde. De stroom door de aarde wordt sterk beïnvloed door andere geleidende voorwerpen in of op de aarde, zoals andere kabelmantels, metalen gas- en waterleidingen en dergelijke. Omdat de homopolaire impedantie dus mede afhankelijk is van de omgeving van de kabel kan voor een bepaald kabeltype een algemeen geldige homopolaire impedantie niet worden aangegeven. Soms wordt een homopolaire impedantie aangegeven onder de voorwaarde dat de retourstroom alleen door de mantels vloeit. Bij drie éénfase-kabels zijn deze mantelstromen gelijk.

De symmetrische componenten transformatie beschrijft de relatie tussen de stromen in het componenten-netwerk en het fysieke stelsel:

$$\begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} \quad (7)$$

Hieruit blijkt dat de homopolaire stroom gelijk is aan één-derde van de som van de drie fasenstromen. In geval van een driefasensymmetrisch systeem, zal de homopolaire stroom nul zijn. Als gevolg van deze vergelijking is de stroom, die over het retourpad vloeit, gelijk aan de som van de drie fasenstromen en dus gelijk aan 3I<sub>0</sub>.

Hieruit volgt de manier om de homopolaire impedantie te meten, met alleen een het aanbrengen van een homopolaire spanning, zoals aangegeven in onderstaande afbeelding.



Figuur 6 Meting van de homopolaire impedantie

In een driefasensymmetrisch net is  $Z_A = Z_B = Z_C = Z_L$ , zodat  $I_A = I_B = I_C = I_0$ . Dan volgt voor de meting:

$$U_0 = Z_L I_0 + Z_E \cdot 3I_0 \quad (8)$$

Hieruit volgt voor de homopolaire impedantie:

$$Z_0 = Z_L + 3Z_E \quad (9)$$

en voor de meting:

$$Z_0 = \frac{U_0}{I_0} = 3 \frac{U_0}{3I_0} = 3 \frac{U_0}{I_M} \quad (10)$$

Voor planningsdoeleinden kan de homopolaire impedantie geschat worden, afhankelijk van de situatie als een constante waarde of als een factor van de normale impedantie.

6 CONCLUSIE

De homopolaire impedantie van een kabelverbinding wordt bepaald door het totale circuit van de homopolaire stroom. Het totale circuit bestaat uit de heenweg (de fasegeleiders) en de terugweg (de nulgeleiders, de afscherming en armering van de kabel plus de aarde via de aardelektrodes (onder andere in middenspanningsruimten) en eventueel ander contact met aarde. In de aarde aanwezige geleidende materialen (andere kabels, metalen pijpen en spoorrails) kunnen de homopolaire impedantie sterk beïnvloeden.

Het is mogelijk de homopolaire impedantie van een kabel te berekenen voor het geval dat het retourcircuit bestaat uit mantel en eventueel nulgeleider. Dit is ook de waarde die de fabrikant in de meeste gevallen opgeeft. Indien de retourstroom echter (zoals in de meeste praktische gevallen) ook door de aarde vloeit, kan de homopolaire weerstand afnemen en kan de homopolaire reactantie toenemen. De waarde is voor die gevallen zeer moeilijk te berekenen en de berekening is meestal onnauwkeurig.

Voor enkele kabeltypen en situaties zijn in de homopolaire impedanties berekend voor het geval het retourpad alleen via de kabel zelf loopt. Alle gegeven waarden dienen alleen ter informatie.

De verhoudingen van de homopolaire tot de normale impedanties zijn hieronder samengevat. De resultaten variëren voor kabels van kleine naar grote geleiderdiameter.

Type kabel	Retour nul		Retour nul + mantel	
	$R_o/R_1$	$X_o/X_1$	$R_o/R_1$	$X_o/X_1$
LS 4-ad kabel (25..300 mm)	4,0	3,5..4,0	2,5..3,0	1,5..2,0

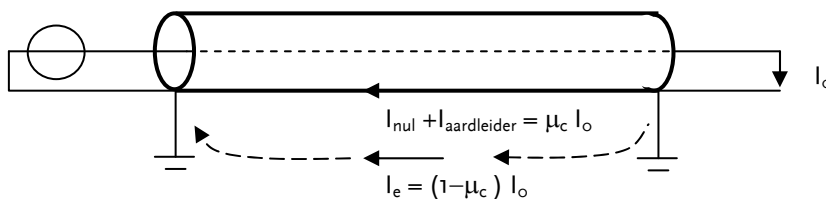
Type kabel	Retour mantel	
	$R_o/R_1$	$X_o/X_1$
MS gordelkabel (25..300 mm)	4..15	1,7..1,4
MS 3-ad XLPE (50..300 mm)	7..20	1
MS 1-ad XLPE (95..400 mm)	7..18	0,4..0,3

**BIJLAGE A INVLOED OMGEVING AARDE**

Bei de berekening van de homopolaire impedantie van kabels is het niet mogelijk een eenduidige formule aan te geven. Men moet ermee rekening houden dat de homopolaire stromen zich verdelen over de nulgeleider, afscherming en bewapening van de kabel zelf en over de aarde. Ook alle in de buurt van het retourpad liggende metalen geleiders, zoals gas- en waterleidingen en omhullingen van andere kabels spelen een rol bij de verdeling van de retourstroom. Overigens is de invloed van andere metalen geleiders op de homopolaire impedantie van kabels met een geleiderdoorsnede groter dan 70 mm<sup>2</sup> gering. Bij normale waarden van de specifieke weerstand van de grond, tussen 100 tot 500 Ωm, kan de invloed van andere geleiders verwaarloosd worden (Kloepfel, 1965).

De berekening van de homopolaire impedantie is naar verhouding complex en tijdrovend. Voor elke situatie betreffende het retourpad en grondweerstand verschillen de berekende waarden.

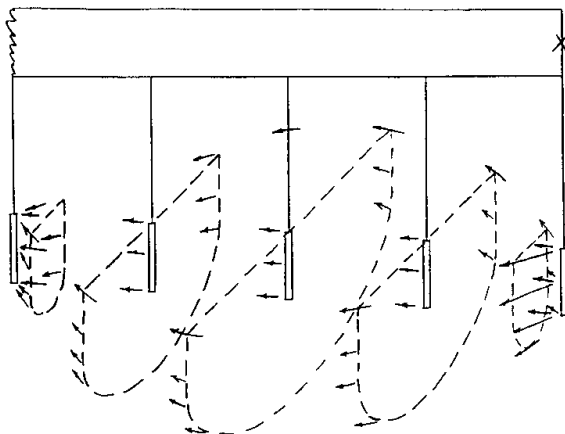
Het retourpad voor de homopolaire stroom is van grote invloed op de homopolaire weerstand en reactantie. De homopolaire gegevens van een kabel kunnen redelijk goed berekend worden voor het geval dat de homopolaire stroom volledig door de kabel (nul of afscherming) retour vloeit. Voor de meeste ondergronds geïnstalleerde kabelsystemen geldt dat echter niet, omdat de nul of aardgeleider op meerdere plaatsen geaard kan zijn. Het retourpad bestaat dan uit een parallelschakeling van nul, aardgeleider en aarde. Onderstaand diagram geeft een schematische representatie (Van Waes, 2003).



*Figuur 2 Retourpad bij een kabelverbinding*

Het circuit kan in drie gebieden worden opgesplitst:

- het gebied vlak bij de voeding; dit kan een onderstation zijn met eventueel een aardelektrode
- het gebied vlak bij de homopolaire belasting I<sub>o</sub> (of een asymmetrische fout); dit kan een onderstation zijn met eventueel een aardelektrode
- het tussengebied: ver van de voeding en ver van de homopolaire belasting; in dit gebied is interactie tussen de kabelstromen en aardstromen door eventueel toegepaste aardelektrodes en door ander contact tussen kabel en aarde (bijvoorbeeld de loodmantel).



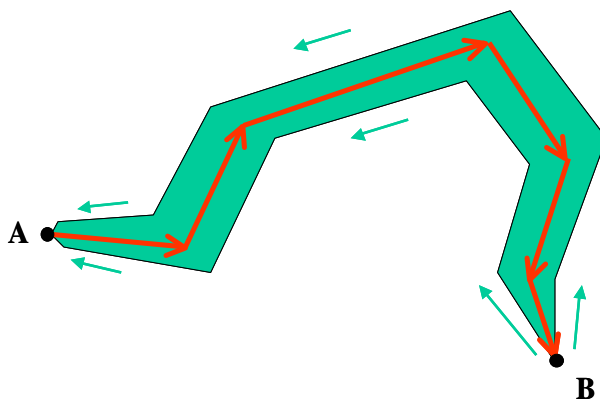
*Figuur 3 Contact afscherming kabeltracé met aarde en stroomverdeling van de aardstroom*

Bovenstaand diagram illustreert de interactie met de aarde langs een kabeltracé. Het diagram toont dat het kabeltracé op meerdere plekken (bij de middenspanningsruimten) via een aardelektrode geaard is. De retourstroom door de aarde volgt een pad van het punt van de aardelektrode aan het einde van het kabeltracé bij de homopolaire belasting, enigszins uitwaaierend langs het kabeltraject, retour naar het punt van de aardelektrode aan het begin van het kabeltracé (Van Waes, 2000).

In het geval van een tracé met kunststof kabels, dat alleen via aardelektrodes in contact met aarde kan staan, worden bij elke aardelektrode de stromen door mantel, bewapening en aarde opnieuw verdeeld.

In het geval dat het tracé alleen uit GPLK kabels bestaat, is er naast het aardcontact via elektrodes ook sprake van een aardcontact via de loodmantel langs het gehele tracé.

Het retourpad volgt het traject van de fasegeleider. In onderstaand diagram is dit afgebeeld voor een kabel die een gekromd pad volgt. Het retourpad van de homopolaire stroom door de aarde volgt een enigszins uitgewaaierd pad, maar blijft de contour van de heenweg volgen (Provoost, 2003). Dit is het gevolg van het feit dat voor elk ander retourpad de door het heen- en retourpad omvatte flux groter is en daardoor de homopolaire reactantie groter is, want als het heen- en retourpad dicht bij elkaar liggen, heffen hun velden elkaar op. De stroom neemt dan de weg van de minste impedantie.



Figuur 4 *Terug volgt heen*

De invloed van de aarde is in veel gevallen onvoorspelbaar vanwege de invloed van nabij gelegen geleidende materialen, zoals andere kabels, metalen pijpen en spoorrails. Afhankelijk van de grootte van het retourpad, worden de homopolaire weerstand en reactantie beïnvloed. Parallelschakeling via de aarde kan de homopolaire weerstand doen afnemen en de homopolaire reactantie doen toenemen (wegens toename van de omvatte flux).

**BIJLAGE B BEREKENING GMD VAN DRIEADERIGE KABELS MET EEN GEZAMENLIJKE AFSCHERMING**

Er is een algemene formule voor het geometrisch gemiddelde, ook wel bekend als het meetkundig gemiddelde. Deze is gelijk aan de n-de machtswortel van de producten van de afzonderlijke getallen.

$$\mu_g = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \dots \cdot x_n}$$

De  $GMR_i$  van geleiderbundel i wordt als volgt berekend (Happoldt, 1978):

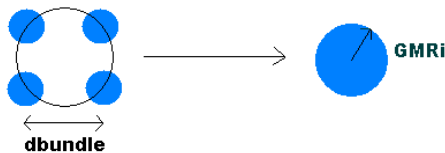
$$GMR_i = \sqrt[n]{n \cdot r_c \cdot r_{bundle}^{n-1}} \quad \text{mm}$$

met:

$n$  : aantal individuele geleiders in de geleiderbundel

$r_c$  : straal van enkele geleider c, in [mm]

$r_{bundle} = \frac{d_{bundle}}{2 \cdot \sin(\frac{\pi}{n})}$  : straal van de bundel, in [mm]



Bij toepassing op een kabel met 3 geleiders geldt:

$$n = 3$$

$$r_c = d_c/2 \quad \text{: geleiderstraal = halve geleiderdiameter}$$

$$d_{bundle} = D_i \quad \text{: diameter over de isolatie}$$

In een rekenvoorbeeld:

$$n = 3$$

$$d_c = 8 \text{ mm}$$

$$D_i = 11 \text{ mm}$$

$$d_{bundle} = D_i$$

$$r_{bundle} = 6,35 \text{ mm}$$

$$GMR = 7,85 \text{ mm}$$

De afstand  $t$  van het hart van een geleider tot het hart van de drie-aderige kabel is:

$$t = (0,5d_c + t_i) / \sin(60^\circ) = D_i / \sin(2\pi/6) \approx D_i / 0,866$$

De diameter over de geslagen geleiders ( $D_{ogg}$ ) is twee maal de afstand  $t$  plus de halve geleiderdiameter. Voor bovenstaande kabelafmetingen geldt:

$$D_{ogg} = D_i / 0,866 + d_c = 20,7 \text{ mm}$$

De verhouding tussen de  $GMR$  (straal) en de halve  $D_{ogg}$  is ongeveer 0,75:

$$GMR / (D_{ogg} / 2) = 0,7585$$

Ook voor andere waarden gaat dit op. Stel bijvoorbeeld  $D_i$  nu op 22 mm. Dan geldt:

$$r_{bundle} = 12,7017$$

$$GMR = 12,4634$$

$$D_{ogg} = 33,4034$$

$$GMR / (D_{ogg}/2) = 0,7462$$

**LITERATUUR**

- BICC, 1990 : "Electric cables handbook", E.W.G. Bungay, D. McAllister, 2nd edition, BICC Power Cables Limited, 1990
- EnergieNed, 2001 : "Elektriciteitsdistributienetten", EnergieNed, Kluwer Techniek, 1996, 2001
- Funk, 1962 : "Der Kurzschluss im Drehstromnetz", G. Funk, R. Oldenburg Verlag München, 1962
- Happoldt, 1978 : "Elektrische Kraftwerke und Netze", H. Happoldt & D. Oeding, Springer-Verlag, 1978
- Heinhold, 1999 : "Kabel und Leitungen für Starkstrom", L. Heinhold, R. Stubbe, Pirelli, Publicis MCD Verlag, 1999.
- Kloepfel, 1965 : "Kurzschluß in elektrischen Anlagen und Netzen", F.W. Kloepfel, H. Fiedler, VEB Verlag Technik Berlin, 1965.
- Phase, 2008 : "Parameters LS-kabels voor negengeleiderloadflow, Vulto en Volta", P.M. van Oirsouw, Phase to Phase document 08-075 pmo van 19 maart 2008.
- Phase, 2009-1 : "Methode symmetrische componenten", P.M. van Oirsouw, Phase to Phase document 09-069 pmo van 10 maart 2009, [www.phasetophase.nl/pdf/methodesyymmetrischecomponenten.pdf](http://www.phasetophase.nl/pdf/methodesyymmetrischecomponenten.pdf).
- Phase, 2009-2 : "Vaststellen homopolaire impedantie van LS-kabels", P.M. van Oirsouw, Phase to Phase document 09-148 pmo van 2 september 2009.
- Pirelli, 1999 : "Kabel und Leitungen für Starkstrom", L. Heinhold, R. Stubbe, Publicis MCD Verlag, Erlangen, 1999.
- Provoost, 2003 : "De kortsluitstroom op zijn retour", F. Provoost, Vision Gebruikersdag 16 december 2003
- Van Waes, 2000 : "Experimenteel onderzoek naar stroomverdeling bij kortsluitingen", Vision Gebruikersdag 14 december 2000
- Van Waes, 2003 : "Safety and EMC aspects of grounding", J.B.M. van Waes, Proefschrift TU Eindhoven, 2003