





Analisi e calcolo delle impedenze di sequenza delle linee di trasmissione sotterranee



Análisis y cálculo de las impedancias de secuencia de líneas de transmisión subterráneas

Aguilar-Marin, Jorge Luis ^a, Cisneros-Villalobos, Luis * ^b, Sánchez-Jaime, Jorge ^c e Vera-Dimas, José Gerardo ^d

^a  Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería •  0000-0002-0235-6946

^b  Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería •  0000-0002-9409-1374

^c  Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Toluca •  0000-0002-4674-8247

^d  Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería •  0000-0002-3880-3568

Classificazione:

DOI: <https://doi.org/10.35429/P.2025.1.20.34>

Area: Ingegneria

Campo: Scienze tecnologiche

Disciplina: Tecnologia elettrica

Sottodisciplina: Grandezze elettriche e loro misurazione

Punti chiave del manuale

Questo capitolo contribuisce alla scienza e alla tecnologia consolidando una metodologia integrata e riproducibile per il calcolo delle impedenze di sequenza nelle linee di trasmissione sotterranee con circuiti in parallelo, articolando le equazioni di Carson, la costruzione e la partizione della matrice primitiva, la riduzione di Kron e la trasformazione in componenti simmetriche; formalizza il trattamento matriciale di configurazioni con neutri concentrici e conduttore di continuità e incorpora la modellizzazione del GMR equivalente e della resistenza del neutro, collegando geometria, materiali e ritorno a terra con Z_0 , Z_1 e Z_2 . Per la generazione di conoscenza universale, gli aspetti chiave sono esplicitare ipotesi e limiti [frequenza, resistività, trasposizione], garantire la tracciabilità dei dati [GMR, distanze, resistenze] con tabelle standardizzate, utilizzare trasformazioni invarianti, favorire la riproducibilità e la validazione sperimentale, effettuare analisi di sensibilità e incertezza e generalizzare a terreni stratificati, linee non trasposte e modelli dipendenti dalla frequenza. In sintesi, la procedura proposta è coerente, modulare e applicabile, la sequenza zero è fortemente governata dal ritorno a terra e dal neutro/schermi, in linee completamente trasposte si verifica $Z_1=Z_2$, e le impedenze dipendono dalla geometria, dai materiali e dal mezzo, si raccomanda di caratterizzare il terreno, valutare gli schemi di collegamento degli schermi e supportare la progettazione con la convalida e l'analisi probabilistica.

Area: Promozione della ricerca all'avanguardia e della scienza di base in tutti i campi del sapere.

Citazione: Aguilar-Marin, Jorge Luis, Cisneros-Villalobos, Luis, Sánchez-Jaime, Jorge e Vera-Dimas, José Gerardo. 2025. Analisi e calcolo delle impedenze di sequenza delle linee di trasmissione sotterranee. 20-34. PIREQA.

* ✉ [\[luis.cisneros@uaem.mx\]](mailto:luis.cisneros@uaem.mx)

URL dello scaffale del manuale: <https://www.pireqa.org/proceedings.php>



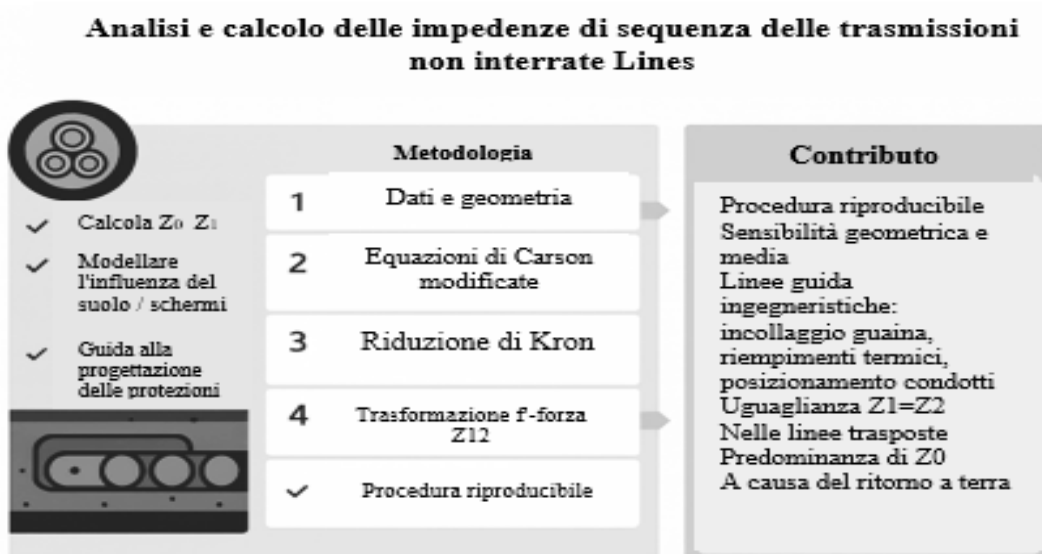
ISBN 978-607-8948-70-3 /©2009 Autore/i. Pubblicato da PIREQA-México, S.C. per la sua Holding Mexico per conto dell'Proceeding PIINI. Questo è un libro ad accesso libero con licenza CC BY-NC-ND [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]

Revisione tra pari sotto la responsabilità del Comitato Scientifico MARVID®- nel contributo al processo di revisione tra pari in ambito scientifico, tecnologico e dell'innovazione attraverso la formazione delle risorse umane per la continuità nell'analisi critica della ricerca internazionale.



Sommario

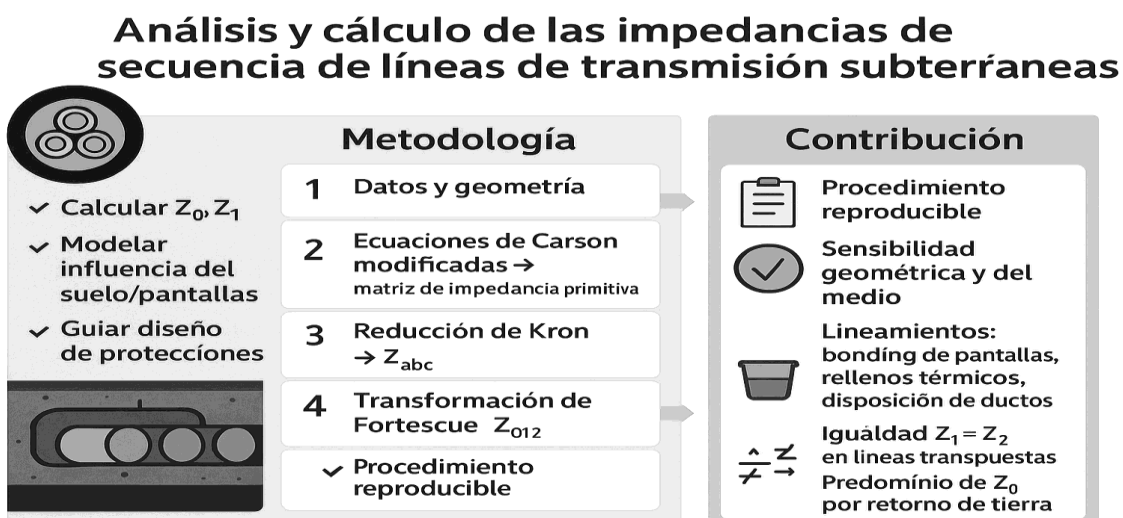
Questo capitolo presenta una metodologia rigorosa per la modellizzazione e il calcolo delle impedenze di sequenza [zero, positive e negative] nelle linee di trasmissione sotterranee con circuiti paralleli. Vengono descritte le parti costitutive del cavo di potenza e le principali alternative di installazione, evidenziandone l'impatto elettrico e termico. Il calcolo si basa sulle equazioni di Carson, sulla formazione della matrice di impedenza primitiva e sulla riduzione di Kron per ottenere la matrice di fase Z_{abc} , e la trasformazione in componenti simmetriche per ricavare Z_{012} . Viene utilizzato il metodo della distanza media geometrica [GMD], che incorpora parametri geometrici e ambientali [GMR, spaziatura dei conduttori, resistività del suolo e messa a terra della schermatura]. Il ruolo dominante del ritorno di terra e del neutro concentrico in Z_0 e l'uguaglianza $Z_1 = Z_2$ in fase di recepimento, con implicazioni per il coordinamento dei guasti e della protezione.



Impedenze di sequenza, Equazioni di Carson, Riduzione di Kron

Resumen

Este capítulo presenta una metodología rigurosa para modelar y calcular las impedancias de secuencia [cero, positiva y negativa] en líneas de transmisión subterráneas con circuitos en paralelo. Se describen las partes constitutivas del cable de potencia y las principales alternativas de instalación, destacando su impacto eléctrico y térmico. El cálculo se fundamenta en las ecuaciones de Carson, la formación de la matriz de impedancia primitiva, la reducción de Kron para obtener la matriz de fase Z_{abc} y la transformación a componentes simétricas para derivar Z_{012} . Se emplea el método de distancias medias geométricas [GMD] y se incorporan parámetros geométricos y del medio [GMR, separación entre conductores, resistividad del suelo, puesta a tierra de pantallas]. Se discute el rol dominante del retorno por tierra y del neutro concéntrico en Z_0 y la igualdad $Z_1 = Z_2$ bajo transposición, con implicaciones para fallas y coordinación de protecciones.



Impedancias de secuencia, ecuaciones de Carson, reducción de Kron

Introduzione

Lo sviluppo e la crescita dei sistemi elettrici di potenza hanno portato alla necessità di un costante ammodernamento delle infrastrutture di trasmissione dell'energia. In questo contesto, le **linee di trasmissione sotterranee** hanno acquisito un'importanza sempre maggiore, non solo per ragioni tecniche, ma anche per fattori estetici, ambientali e di disponibilità di spazio nelle aree urbane densamente popolate. Queste linee, essendo interrato, presentano caratteristiche elettriche significativamente diverse da quelle delle loro controparti aeree, soprattutto per quanto riguarda i parametri di funzionamento in condizioni normali e di guasto.

Uno degli aspetti fondamentali nello studio di qualsiasi linea di trasmissione, e in particolare di quelle sotterranee, è l'analisi delle loro **impedenze di sequenza**. Queste impedenze: positiva, negativa e zero, sono fondamentali per comprendere il comportamento della linea in caso di **guasti asimmetrici**, nonché per la progettazione e il corretto coordinamento dei sistemi di protezione. Le differenze geometriche, dielettriche e di configurazione del ritorno di terra che esistono tra le linee aeree e quelle sotterranee rendono il calcolo di queste impedenze nei cavi sotterranei più rigoroso e dettagliato, tenendo conto non solo dei parametri del conduttore, ma anche dell'influenza della schermatura, della resistività del terreno e dell'effetto di prossimità tra le fasi.

Il **modello di linee di trasmissione mediante matrici di parametri longitudinali** [resistenza, induttanza, capacità e conduttanza per unità di lunghezza] consente di rappresentare con precisione il comportamento di una linea trifase, sia in regime permanente che in condizioni transitorie. Tuttavia, ai fini dell'analisi dei guasti, questo modello viene solitamente trasformato mediante la **trasformazione di sequenza**, che consente di disaccoppiare il sistema in tre componenti simmetriche: **sequenza positiva**, **sequenza negativa** e **sequenza zero**. Ciascuna di queste sequenze risponde in modo diverso a diversi tipi di disturbi e la loro analisi individuale consente di semplificare notevolmente lo studio di fenomeni complessi.

Il presente capitolo ha come obiettivo principale quello di presentare il **processo di analisi e calcolo delle impedenze di sequenza** nelle linee di trasmissione sotterranee, affrontando sia i fondamenti teorici che i metodi pratici per la loro determinazione. Verrà studiata l'influenza di diversi fattori fisici sul comportamento dell'impedenza di sequenza zero, che di solito rappresenta la sfida maggiore per la necessità di modellare il ritorno a terra e gli effetti della schermatura metallica dei cavi. Verranno inoltre discusse le metodologie più comuni utilizzate in ingegneria per eseguire questi calcoli. Attraverso questa analisi, si cerca di fornire al lettore una comprensione completa del comportamento elettrico delle linee sotterranee in caso di guasti, nonché gli strumenti necessari per modellarle adeguatamente negli studi di protezione, coordinamento e stabilità dei sistemi elettrici. La padronanza di questi concetti è essenziale per gli ingegneri e gli specialisti dei sistemi di potenza che partecipano alla progettazione, al funzionamento e alla manutenzione di infrastrutture di trasmissione moderne e affidabili.

Linee di trasmissione sotterranee

Cavi di potenza.

I cavi di potenza sono il componente essenziale di una linea di trasmissione sotterranea. La loro principale differenza rispetto ai cavi nudi utilizzati nelle linee aeree risiede nell'incorporazione di un materiale isolante, poiché nelle linee aeree l'isolamento è fornito dall'aria. Questo materiale isolante ne consente l'installazione sottoterra, dove le condizioni operative richiedono maggiore robustezza e affidabilità.

La corretta progettazione, installazione, funzionamento e manutenzione del cavo di potenza è determinante per garantire il funzionamento efficiente del sistema elettrico a cui appartiene. A seconda del livello di tensione e delle condizioni ambientali, come ambienti umidi, sottomarini o altamente corrosivi, il cavo può acquisire diversi livelli di complessità strutturale.

La Figura 1 illustra le parti principali che compongono un cavo di potenza [Allkabel, 2013].

Scatola 1

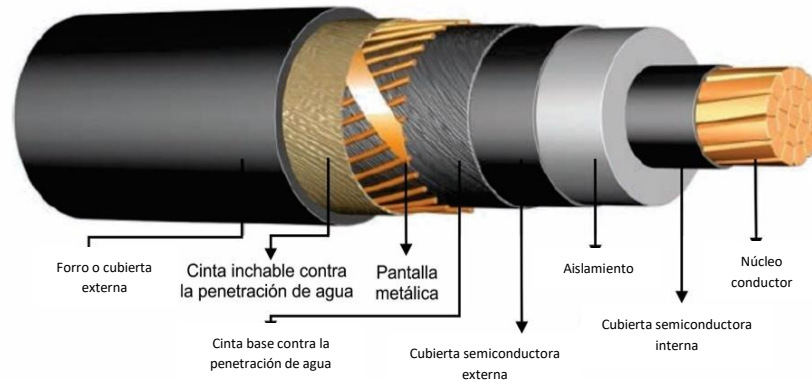


Figura 1

Elementi principali che compongono un cavo di alimentazione.

[Allkabel, 2013]

Parti costitutive del cavo di alimentazione.

- *Anima conduttrice*: ha il compito di trasportare l'energia elettrica e deve farlo in modo efficiente. I materiali più utilizzati sono il rame e l'alluminio, anche se quest'ultimo ha recentemente guadagnato popolarità grazie al suo costo relativamente inferiore rispetto alla volatilità del prezzo del rame [Moore, 2007]. Nei sistemi di trasmissione ad alta potenza, dove le sezioni trasversali superano i 1200 mm², si preferisce l'uso di conduttori intrecciati per migliorare la flessibilità e ridurre gli effetti pelle e di prossimità [Heinhold, 2010].
- *Strato semiconduttore sul conduttore*: applicato per estrusione o mediante nastri, questo strato evita irregolarità che provocano concentrazioni del campo elettrico nell'isolamento, riducendo rischi quali la formazione di arborescenza e guasti dielettrici [Dorf, 2015].
- *Isolamento*: è il dielettrico incaricato di confinare le cariche elettriche. Può essere solido estruso o nastrato e deve soddisfare requisiti rigorosi quali resistenza alle sollecitazioni elettriche, stabilità termica e flessibilità per la sua installazione [Henao & Mesa, 2023].
- *Strato semiconduttore sull'isolamento*: fornisce una superficie cilindrica uniforme e funge da transizione tra l'isolamento attivo e lo schermo metallico collegato a terra. Contribuisce alla corretta distribuzione del campo elettrico [Dorf, 2015], [Grigsby, 2007].
- *Schermo metallico*: la sua funzione principale è quella di eliminare il campo elettrico esterno e condurre sia le correnti capacitive normali che quelle di guasto. A seconda del design, può essere composto da fili di rame, nastri elicoidali o rivestimenti metallici completi. Questi schermi devono essere collegati a terra per proteggere il personale e preservare l'integrità del cavo [Grigsby, 2007], [Nexans France S.A.S., n.d.], [CIGRE, 2001], [Electric Power Research Institute, 2006].
- *Barriera contro l'umidità*: viene utilizzata per impedire la penetrazione dell'acqua all'interno del cavo. Può essere costituita da nastri o rivestimenti metallici in piombo, alluminio o rame. Può anche includere nastri di alluminio con plastica, integrati con materiali espansivi che impediscono la penetrazione dell'umidità.
- *Rivestimento protettivo esterno*: è la prima linea di difesa contro danni meccanici, chimici e ambientali. Deve offrire un'elevata resistenza meccanica, isolamento elettrico, rigidità dielettrica e resistenza al fuoco. Questo strato è fondamentale per determinare la durata utile del cavo [Henao & Mesa, 2023].

Tipi di installazione dei cavi sotterranei

La corretta installazione dei cavi di potenza è fondamentale per garantire le prestazioni termiche ed elettriche del sistema sotterraneo. Esistono diverse tecniche a seconda del tipo di terreno, delle restrizioni fisiche, economiche e ambientali.

1. *Riempimento termico*. Consiste nel sostituire il terreno naturale estratto durante lo scavo con materiali a bassa resistività termica, con l'obiettivo di migliorare la dissipazione del calore generato dai cavi. Questi materiali devono essere termicamente stabili, facili da installare ed economici.

Inoltre, i riempimenti termici offrono una soluzione semplice ed efficace per aumentare la capacità di trasmissione dei cavi. La scelta del materiale dipenderà dal tipo di terreno e dalle condizioni climatiche del luogo del progetto.

2. *Banco di condotti*. Si tratta di una canalizzazione che raggruppa più condotti in cui sono alloggiati i cavi di potenza. Questa configurazione consente di eseguire i lavori di ingegneria civile indipendentemente dall'installazione elettrica, facilita la manutenzione e permette di incorporare altri servizi come la fibra ottica.

Le configurazioni possono essere triangolari, verticali o orizzontali. La scelta del design dipende da fattori quali lo spazio disponibile, il tipo di terreno, i costi e l'impatto ambientale.

3. *Perforazione orizzontale guidata [HDD]*. Questa tecnica è ideale in zone dove esistono ostacoli superficiali che impediscono lo scavo convenzionale. Mediante sistemi di perforazione elettronica, è possibile installare condotti sotterranei con una minima alterazione del terreno [Krames, Rodenbaugh, & Conroy, 1994].

Il metodo HDD consente di evitare le installazioni esistenti e di seguire traiettorie programmate con precisione. Questa tecnologia è particolarmente utile in ambienti urbani densamente popolati.

4. *Trincee*. Le trincee sono strutture superficiali utilizzate in aree dove non è possibile effettuare scavi profondi. Consentono un facile accesso ai cavi, facilitando la manutenzione, e offrono un migliore comportamento termico nei terreni asciutti.

Questo metodo è comunemente utilizzato all'interno di impianti industriali o protetti, dove il cavo può essere facilmente ispezionato tramite coperture rimovibili in cemento o metallo.

5. *Tunnel e gallerie*. Consigliati quando è necessario installare più circuiti elettrici, specialmente in aree urbane dove non è possibile effettuare scavi estesi. Questa soluzione è adatta anche quando non è possibile utilizzare tubi interrati o banchi di condotte.

Il loro principale vantaggio è che consentono di mantenere un'elevata capacità di trasmissione e un accesso sicuro per l'ispezione e la manutenzione [CIGRE, 2001].

Metodologia

Per calcolare le **impedenze di sequenza** nelle linee di trasmissione con **circuiti in parallelo** si utilizzano le **equazioni di Carson**, oggi ampiamente utilizzate per ottenere i parametri delle linee aeree e sotterranee [Kersting, 2001]. Le equazioni di Carson sono le seguenti:

Impedenza propria:

$$\hat{Z}_{ii} = r_i + 4wP_{ii}G + j \left(X_i + 2wG \cdot \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} + 4wQ_{ii}G \right) \frac{\Omega}{km} \quad [1]$$

Impedenza reciproca:

$$\hat{Z}_{ij} = 4wP_{ij}G + j \left(2wG \cdot \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} + 4wQ_{ij}G \right) \frac{\Omega}{km} \quad [2]$$

Nelle equazioni di Carson, l'impedenza propria del conduttore \hat{Z}_{ii} e l'impedenza reciproca \hat{Z}_{ij} tra i conduttori i e j , in Ω/km sono espressi in funzione della resistenza del conduttore r_i in Ω/km , della frequenza angolare w in rad/s , e del termine costante $G: 0.1609344 \times 10^{-3}$ in Ω/km che cattura parte degli effetti di ritorno via terra. Il contributo geometrico viene incorporato tramite il raggio del conduttore RD_i in m e il suo raggio medio geometrico $[[GMR]]_i$ in m , mentre l'accoppiamento tra i conduttori dipende dalla resistività del terreno ρ in Ω/m , della distanza immagine S_{ij} in m — ovvero la separazione tra il conduttore i e l'**immagine** del conduttore j sul piano di terra — e dalla **distanza tra i conduttori** D_{ij} in m . Nel complesso, questi parametri consentono di descrivere con precisione le componenti reali e immaginarie di \hat{Z}_{ii} e \hat{Z}_{ij} , integrando perdite ohmiche, effetti di induttanza e influenza dell'ambiente circostante.

Considerando una frequenza di linea di 60 Hz e una resistività del suolo di $100 \Omega \cdot m$, si ottengono le seguenti equazioni di Carson modificate.

$$\hat{Z}_{ii} = r_i + 0.0953 + 0.12134j \left(\ln \frac{1}{GMR_i} + 7.93402 \right) \frac{\Omega}{km} \quad [3]$$

$$\hat{Z}_{ij} = 0.0953 + 0.12134j \left(\ln \frac{1}{D_{ij}} + 7.93402 \right) \frac{\Omega}{km} \quad [4]$$

Le **equazioni 3 e 4** vengono utilizzate per calcolare gli elementi della **matrice di impedenza primitiva** del sistema. In un **segmento di linea sotterranea** collegata a terra che dispone di **tre neutri concentrici** [uno per ogni fase], la matrice primitiva risultante è 6x6. Nel caso generale di una **linea trifase** con conduttori neutri associati, la **matrice di impedenza primitiva** assume la forma strutturata in blocchi che raggruppano **autoimpedenze** e **impedenze reciproche** tra fasi, neutri e, se del caso, conduttori di continuità.

$$[\hat{Z}_{primitivo}] = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{ac} & & \hat{Z}_{an1} & \hat{Z}_{an2} & \hat{Z}_{anm} \\ \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{bc} & \vdots & \hat{Z}_{bn1} & \hat{Z}_{bn2} & \hat{Z}_{bnm} \\ \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{cc} & \dots & \hat{Z}_{cn1} & \hat{Z}_{cn2} & \hat{Z}_{cnm} \\ \hat{Z}_{n1a} & \hat{Z}_{n1b} & \hat{Z}_{n1c} & & \hat{Z}_{n1n1} & \hat{Z}_{n1n2} & \hat{Z}_{n1nm} \\ \hat{Z}_{n2a} & \hat{Z}_{n2b} & \hat{Z}_{n2c} & \vdots & \hat{Z}_{n2n1} & \hat{Z}_{n2n2} & \hat{Z}_{n2c} \\ \hat{Z}_{nma} & \hat{Z}_{nmb} & \hat{Z}_{nmc} & & \hat{Z}_{nmn1} & \hat{Z}_{n2n2} & \hat{Z}_{n2nm} \end{bmatrix} \quad [5]$$

Nella sua forma suddivisa, l'equazione 5 può essere riscritta per distinguere chiaramente le relazioni tra i diversi sottoinsiemi di conduttori:

$$[\hat{Z}_{primitivo}] = \begin{bmatrix} [\hat{Z}_{ij}] & [\hat{Z}_{in}] \\ [\hat{Z}_{nj}] & [\hat{Z}_{nn}] \end{bmatrix} \quad [6]$$

Per ottenere le impedenze di sequenza [zero, negativa e positiva] dei segmenti di linea, vengono prima calcolate le autoimpedenze e le impedenze reciproche mediante le equazioni di Carson modificate; quindi, viene applicata la riduzione di Kron per eliminare i conduttori ausiliari e ottenere la matrice di impedenza di fase. In particolare, la matrice di impedenza primitiva viene ridotta a una matrice 3x3 che rappresenta l'equivalente delle impedenze tra le tre fasi. Questa procedura di condensazione effettuata mediante la riduzione di Kron è espressa nell'equazione 7, dalla quale si procede infine alla trasformazione delle sequenze per calcolare Z_0 , Z_1 e Z_2 .

$$[Z_{abc}] = [Z_{ij}] - [Z_{in}] \cdot [Z_{nn}]^{-1} \cdot [Z_{nj}] \quad [7]$$

L'equazione 7 costituisce l'espressione finale della tecnica di riduzione di Kron. Di conseguenza, la matrice di impedenza di fase si ottiene tramite l'equazione 8.

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \frac{\Omega}{\text{km}} \quad [8]$$

Il rapporto tra le tensioni di fase a terra e le tensioni di sequenza a terra è definito dalla seguente espressione:

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a_s^2 & a_s \\ 1 & a_s & a_s^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} VLG_0 \\ VLG_1 \\ VLG_2 \end{bmatrix} \quad [9]$$

Dove $a_s: 1 < 120$ e $a_s^2: 1 < 240$.

Nella sua forma condensata, l'equazione 9 può essere scritta come:

$$[VLG_{abc}] = [A_s] \cdot [VLG_{012}] \quad [10]$$

Donde:

$$[A_s] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a_s^2 & a_s \\ 1 & a_s & a_s^2 \end{bmatrix} \quad [11]$$

Le correnti di linea in ciascuna fase sono definite in modo analogo, seguendo la stessa formulazione utilizzata per le tensioni:

$$[I_{abc}] = [A_s] \cdot [I_{012}] \quad [12]$$

L'equazione 10 consente di determinare le componenti di sequenza delle tensioni linea-terra, esprimendole come funzione delle tensioni fase-terra.:

$$[VLG_{012}] = [A_s]^{-1} \cdot [VLG_{abc}] \quad [13]$$

Dove:

$$[A_s]^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a_s & a_s^2 \\ 1 & a_s^2 & a_s \end{bmatrix} \quad [14]$$

Pertanto:

$$[VLG_{012}]_n = [VLG_{012}]_n + [Z_{012}] \cdot [I_{012}] \quad [15]$$

Dove:

$$[Z_{012}] = [A_s]^{-1} \cdot [Z_{abc}] \cdot [A_s] = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad [16]$$

Pertanto, l'espressione delle tensioni si sviluppa nel modo seguente:

$$\begin{bmatrix} VLG_0 \\ VLG_1 \\ VLG_2 \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} VLG_0 \\ VLG_1 \\ VLG_2 \end{bmatrix}_m + \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad [17]$$

Z_{00} è l'impedenza di sequenza zero, Z_{11} impedenza di sequenza positiva e Z_{22} impedenza di sequenza negativa.

Per **determinare le impedenze di sequenza** si utilizza il metodo delle **distanze geometriche medie [GMD]**. In questo approccio, la **GMD tra le fasi** e la **GMD tra i neutri concentrici** sono definite a partire dai prodotti geometrici delle rispettive separazioni [elevati alle potenze frazionarie corrispondenti], come indicato di seguito:

$$D_{ij} = GMD_{ij} = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ca}} \text{ m} \quad [18]$$

Il GMD tra le fasi e il conduttore di continuità è definito come:

$$D_{in} = GMD_{in} = \sqrt[3]{D_{an} \cdot D_{bn} \cdot D_{cn}} \text{ m} \quad [19]$$

I GMD vengono sostituiti nelle equazioni 3 e 4 per calcolare le autoimpedenze e le reciproche della linea, ottenendo così le espressioni risultanti.

$$\hat{Z}_{nn} = r_n + 0.0953 + 0.12134j \left(\ln \frac{1}{GMR_n} + 7.93402 \right) \frac{\Omega}{\text{km}} \quad [20]$$

$$\hat{Z}_{in} = 0.0953 + 0.12134j \left(\ln \frac{1}{D_{in}} + 7.93402 \right) \frac{\Omega}{\text{km}} \quad [21]$$

Applicando la riduzione di Kron e la trasformazione in componenti simmetriche, si ottengono le espressioni corrispondenti alle impedenze di sequenza zero, positiva e negativa della linea.

$$\hat{Z}_{00} = \hat{Z}_{ii} + 2 \cdot \hat{Z}_{ij} - 3 \left(\frac{\hat{Z}_{in}}{\hat{Z}_{nn}} \right) \frac{\Omega}{\text{km}} \quad [22]$$

$$\hat{Z}_{11} = Z_{22} = \hat{Z}_{ii} - \hat{Z}_{ij} \frac{\Omega}{\text{km}} \quad [23]$$

$$\hat{Z}_{11} = Z_{22} = r_i + 0.12134j \left(\ln \frac{D_{ij}}{GMR_i} + 7.93402 \right) \frac{\Omega}{\text{km}} \quad [24]$$

La Figura 2 mostra la configurazione tipica di tre cavi sotterranei [tre fasi] con conduttore di continuità. In questa configurazione, le equazioni di Carson sono pienamente applicabili e il circuito equivalente porta a una matrice di impedenza primitiva di 7x7 [tre fasi + tre neutri concentrici + conduttore di continuità]. Al contrario, per i circuiti sotterranei senza conduttore di continuità, la matrice primitiva risultante è di 6x6 [tre fasi + tre neutri].

Scatola 2

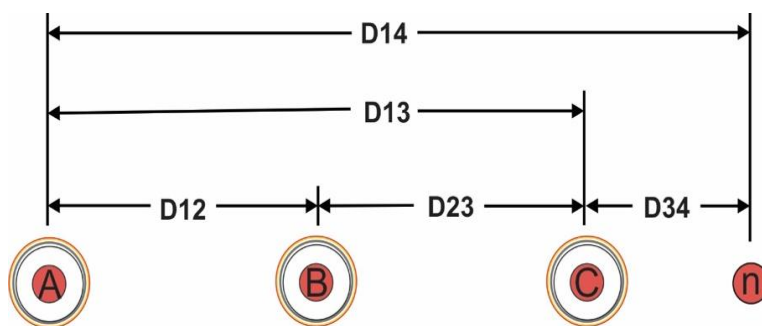


Figura 2

Circuito trifase con neutro aggiuntivo.

Elaborazione propria

I raggi geometrici medi [GMR] dei conduttori di fase e di ciascun filo del neutro sono ricavati dalle tabelle standardizzate del produttore o dalla norma. Il GMR equivalente del neutro concentrico per conduttori raggruppati viene calcolato mediante l'equazione 25, in funzione del numero di fili, del GMR individuale di ciascun filo e del raggio del cerchio che passa per i loro centri [vedere l'equazione 26].

Determinazione del raggio del cerchio che passa per i centri dei fili del neutro concentrico, applicando l'equazione 26.

$$R = 0.039407 \text{ m}$$

Ottenimento del GMR equivalente del neutro concentrico secondo l'equazione 25.

$$GMR_{cn} = \sqrt[k]{GMR_s \cdot k \cdot R^{k-1}} = \sqrt[32]{0.0006339 \cdot 32 \cdot 0.039407^{32-1}} = 0.03859 \text{ m}$$

Calcolo della resistenza equivalente del neutro concentrico, secondo l'equazione 27:

$$r_{cn} = \frac{r_s}{k} = \frac{23.93}{32} = 0.7478 \frac{\Omega}{km}$$

I **conduttori di fase del circuito 1** sono identificati come **A, B e C**; quelli del **circuito 2** come **A', B' e C'**. I corrispondenti **neutri concentrici** sono indicati con **A'', B'', C''** [circuito 1] e **A''', B''', C'''** [circuito 2]. Inoltre, si considera un **conduttore di continuità N**. Con questa nomenclatura, e dopo aver calcolato le **distanze** rilevanti [fase-fase, neutro-fase, neutro-neutro, fase-N e neutro-N], l'**applicazione delle equazioni di Carson modificate** porta a una **matrice di impedenza primitiva di ordine 13x13** [6 fasi + 6 neutri + 1 conduttore di continuità]. In base all'equazione 6, tale matrice è espressa in **forma partizionata**, distinguendo gli accoppiamenti tra sottoinsiemi di conduttori:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{ij} & | & Z_{in} \\ - & - & - \\ Z_{nj} & | & Z_{nn} \end{bmatrix}$$

Z_{ij} è l'impedenza reciproca tra le fasi, in Ω/km , Z_{in} impedenza reciproca tra le fasi e il conduttore di continuità, in Ω/km , Z_{nj} impedenza reciproca tra il conduttore di continuità e le fasi, in Ω/km , Z_{nn} impedenza propria del conduttore di continuità, in Ω/km .

Dove:

$$Z_{ij} = \begin{bmatrix} Z_a & | & Z_b \\ - & - & - \\ Z_c & | & Z_d \end{bmatrix}$$

$$Z_a = \begin{bmatrix} 0.1521 + 1.4915j & 0.0953 + 1.1201j & 0.0953 + 1.1201j & 0.0953 + 0.9307j & 0.0953 + 0.9419j & 0.0953 + 0.9595j \\ 0.0953 + 1.1201j & 0.1521 + 1.4915j & 0.0953 + 1.1201j & 0.0953 + 0.9419j & 0.0953 + 0.9595j & 0.0953 + 0.9728j \\ 0.0953 + 1.1201j & 0.0953 + 1.1201j & 0.1521 + 1.4915j & 0.0953 + 0.9595j & 0.0953 + 0.9728j & 0.0953 + 0.9974j \\ 0.0953 + 0.9307j & 0.0953 + 0.9419j & 0.0953 + 0.9595j & 0.1521 + 1.4915j & 0.0953 + 1.1201j & 0.0953 + 1.1201j \\ 0.0953 + 0.9419j & 0.0953 + 0.9595j & 0.0953 + 0.9728j & 0.0953 + 1.1201j & 0.1521 + 1.4915j & 0.0953 + 1.1201j \\ 0.0953 + 0.9595j & 0.0953 + 0.9728j & 0.0953 + 0.9974j & 0.0953 + 1.1201j & 0.0953 + 1.1201j & 0.1521 + 1.4915j \end{bmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

$$Z_b = \begin{bmatrix} 0.0953 + 1.3551j & 0.0953 + 1.1054j & 0.0953 + 1.1182j & 0.0953 + 0.9307j & 0.0953 + 0.9409j & 0.0953 + 0.9595j \\ 0.0953 + 1.1357j & 0.0953 + 1.3551j & 0.0953 + 1.1357j & 0.0953 + 0.9426j & 0.0953 + 0.9595j & 0.0953 + 0.9741j \\ 0.0953 + 1.1182j & 0.0953 + 1.1054j & 0.0953 + 1.3551j & 0.0953 + 0.9595j & 0.0953 + 0.9713j & 0.0953 + 0.9972j \\ 0.0953 + 0.9307j & 0.0953 + 0.9409j & 0.0953 + 0.9595j & 0.0953 + 1.3551j & 0.0953 + 1.1054j & 0.0953 + 1.1182j \\ 0.0953 + 0.9426j & 0.0953 + 0.9595j & 0.0953 + 0.9741j & 0.0953 + 1.1357j & 0.0953 + 1.3551j & 0.0953 + 1.1357j \\ 0.0953 + 0.9595j & 0.0953 + 0.9713j & 0.0953 + 0.9972j & 0.0953 + 1.1182j & 0.0953 + 1.1054j & 0.0953 + 1.3551j \end{bmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

$$Z_c = \begin{bmatrix} 0.0953 + 1.3551j & 0.0953 + 1.1357j & 0.0953 + 1.1182j & 0.0953 + 0.9307j & 0.0953 + 0.9426j & 0.0953 + 0.9595j \\ 0.0953 + 1.1054j & 0.0953 + 1.3551j & 0.0953 + 1.1054j & 0.0953 + 0.9409j & 0.0953 + 0.9595j & 0.0953 + 0.9713j \\ 0.0953 + 1.1182j & 0.0953 + 1.1357j & 0.0953 + 1.3551j & 0.0953 + 0.9595j & 0.0953 + 0.9741j & 0.0953 + 0.9972j \\ 0.0953 + 0.9307j & 0.0953 + 0.9426j & 0.0953 + 0.9595j & 0.0953 + 1.3551j & 0.0953 + 1.1357j & 0.0953 + 1.1182j \\ 0.0953 + 0.9409j & 0.0953 + 0.9595j & 0.0953 + 0.9713j & 0.0953 + 1.1054j & 0.0953 + 1.3551j & 0.0953 + 1.1054j \\ 0.0953 + 0.9595j & 0.0953 + 0.9741j & 0.0953 + 0.9972j & 0.0953 + 1.1182j & 0.0953 + 1.1357j & 0.0953 + 1.3551j \end{bmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

$$Z_d = \begin{bmatrix} 0.8431 + 1.3576j & 0.0953 + 1.1201j & 0.0953 + 1.1201j & 0.0953 + 0.9307j & 0.0953 + 0.9419j & 0.0953 + 0.9595j \\ 0.0953 + 1.1201j & 0.8431 + 1.3576j & 0.0953 + 1.1201j & 0.0953 + 0.9419j & 0.0953 + 0.9595j & 0.0953 + 0.9728j \\ 0.0953 + 1.1201j & 0.0953 + 1.1201j & 0.8431 + 1.3576j & 0.0953 + 0.9595j & 0.0953 + 0.9728j & 0.0953 + 0.9974j \\ 0.0953 + 0.9307j & 0.0953 + 0.9419j & 0.0953 + 0.9595j & 0.8431 + 1.3576j & 0.0953 + 1.1201j & 0.0953 + 1.1201j \\ 0.0953 + 0.9419j & 0.0953 + 0.9595j & 0.0953 + 0.9728j & 0.0953 + 1.1201j & 0.8431 + 1.3576j & 0.0953 + 1.1201j \\ 0.0953 + 0.9595j & 0.0953 + 0.9728j & 0.0953 + 0.9974j & 0.0953 + 1.1201j & 0.0953 + 1.1201j & 0.8431 + 1.3576j \end{bmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

$$Z_{in} = \begin{bmatrix} 0.0953 + 1.0834j \\ 0.0953 + 0.9793j \\ 0.0953 + 0.9947j \\ 0.0953 + 1.0834j \\ 0.0953 + 1.1890j \\ 0.0953 + 1.1425j \\ 0.0953 + 0.9596j \\ 0.0953 + 0.9791j \\ 0.0953 + 0.9964j \\ 0.0953 + 1.0911j \\ 0.0953 + 1.1833j \\ 0.0953 + 1.1655j \end{bmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

$$Z_{nj} = \begin{bmatrix} 0.0953 + 1.0834j & 0.0953 + 0.9793j & 0.0953 + 0.9947j & 0.0953 + 1.0834j & 0.0953 + 1.1890j & 0.0953 + 1.1425j \\ 0.0953 + 0.9596j & 0.0953 + 0.9791j & 0.0953 + 0.9964j & 0.0953 + 1.0911j & 0.0953 + 1.1833j & 0.0953 + 1.1655j \end{bmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

$$Z_{nm} = [0.3275 + 1.5580j] \frac{\Omega}{km}$$

Una volta ottenuti gli elementi della matrice primitiva, si applica la riduzione di Kron per eliminare i conduttori ausiliari e ottenere la matrice delle impedenze serie di fase. Z_{abc} , secondo l'equazione 7:

$$[Z_{abc}] = [Z_{ij}] - [Z_{in}] \cdot [Z_{nm}]^{-1} \cdot [Z_{nj}]$$

Dove:

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z_A & | & Z_B \\ - & - & - \\ Z_C & | & Z_D \end{bmatrix}$$

$$Z_A = \begin{bmatrix} 0.1757 + 0.7489i & 0.1104 + 0.4481i & 0.1116 + 0.4377i & 0.1189 + 0.1881i & 0.1275 + 0.1277i & 0.1237 + 0.1768i \\ 0.1104 + 0.4481i & 0.1601 + 0.8835i & 0.1044 + 0.5026i & 0.1104 + 0.2699i & 0.1176 + 0.2226i & 0.1144 + 0.2645i \\ 0.1116 + 0.4377i & 0.1044 + 0.5026i & 0.1622 + 0.8644i & 0.1116 + 0.2771i & 0.1190 + 0.2245i & 0.1158 + 0.2781i \\ 0.1189 + 0.1881i & 0.1104 + 0.2699i & 0.1116 + 0.2771i & 0.1757 + 0.7489i & 0.1275 + 0.3059i & 0.1237 + 0.3374i \\ 0.1275 + 0.1277i & 0.1176 + 0.2226i & 0.1190 + 0.2245i & 0.1275 + 0.3059i & 0.1943 + 0.5988i & 0.1331 + 0.2620i \\ 0.1237 + 0.1768i & 0.1144 + 0.2645i & 0.1158 + 0.2781i & 0.1237 + 0.3374i & 0.1331 + 0.2620i & 0.1857 + 0.6666i \end{bmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

$$Z_B = \begin{bmatrix} 0.1088 + 0.6965i & 0.1104 + 0.4336i & 0.1118 + 0.4346i & 0.1195 + 0.1829i & 0.1270 + 0.1305i & 0.1255 + 0.1612i \\ 0.1020 + 0.5398i & 0.1033 + 0.7472i & 0.1045 + 0.5172i & 0.1109 + 0.2659i & 0.1172 + 0.2261i & 0.1160 + 0.2517i \\ 0.1030 + 0.5130i & 0.1043 + 0.4880i & 0.1056 + 0.7269i & 0.1122 + 0.2723i & 0.1186 + 0.2266i & 0.1174 + 0.2636i \\ 0.1088 + 0.2721i & 0.1104 + 0.2691i & 0.1118 + 0.2759i & 0.1195 + 0.6073i & 0.1270 + 0.2950i & 0.1255 + 0.3199i \\ 0.1157 + 0.2204i & 0.1175 + 0.2228i & 0.1192 + 0.2245i & 0.1282 + 0.3158i & 0.1369 + 0.4666i & 0.1353 + 0.2605i \\ 0.1126 + 0.2653i & 0.1144 + 0.2632i & 0.1159 + 0.2767i & 0.1244 + 0.3300i & 0.1326 + 0.2513i & 0.1310 + 0.5138i \end{bmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

$$Z_C = \begin{bmatrix} 0.1088 + 0.6965i & 0.1020 + 0.5398i & 0.1030 + 0.5130i & 0.1088 + 0.2721i & 0.1157 + 0.2204i & 0.1126 + 0.2653i \\ 0.1104 + 0.4336i & 0.1033 + 0.7472i & 0.1043 + 0.4880i & 0.1104 + 0.2691i & 0.1175 + 0.2228i & 0.1144 + 0.2632i \\ 0.1118 + 0.4346i & 0.1045 + 0.5172i & 0.1056 + 0.7269i & 0.1118 + 0.2759i & 0.1192 + 0.2245i & 0.1159 + 0.2767i \\ 0.1195 + 0.1829i & 0.1109 + 0.2659i & 0.1122 + 0.2723i & 0.1195 + 0.6073i & 0.1282 + 0.3158i & 0.1244 + 0.3300i \\ 0.1270 + 0.1305i & 0.1172 + 0.2261i & 0.1186 + 0.2266i & 0.1270 + 0.2950i & 0.1369 + 0.4666i & 0.1326 + 0.2513i \\ 0.1255 + 0.1612i & 0.1160 + 0.2517i & 0.1174 + 0.2636i & 0.1255 + 0.3199i & 0.1353 + 0.2605i & 0.1310 + 0.5138i \end{bmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

$$Z_D = \begin{bmatrix} 0.8485 + 0.7735i & 0.1020 + 0.5243i & 0.1031 + 0.5139i & 0.1093 + 0.2674i & 0.1153 + 0.2231i & 0.1141 + 0.2514i \\ 0.1020 + 0.5243i & 0.8511 + 0.7498i & 0.1045 + 0.5017i & 0.1109 + 0.2653i & 0.1172 + 0.2263i & 0.1159 + 0.2505i \\ 0.1031 + 0.5139i & 0.1045 + 0.5017i & 0.8535 + 0.7284i & 0.1123 + 0.2711i & 0.1188 + 0.2268i & 0.1175 + 0.2625i \\ 0.1093 + 0.2674i & 0.1109 + 0.2653i & 0.1123 + 0.2711i & 0.8679 + 0.6045i & 0.1277 + 0.3041i & 0.1262 + 0.3162i \\ 0.1153 + 0.2231i & 0.1172 + 0.2263i & 0.1188 + 0.2268i & 0.1277 + 0.3041i & 0.8842 + 0.4734i & 0.1347 + 0.2490i \\ 0.1141 + 0.2514i & 0.1159 + 0.2505i & 0.1175 + 0.2625i & 0.1262 + 0.3162i & 0.1347 + 0.2490i & 0.8809 + 0.4995i \end{bmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

Invertendo la matrice Z_{abc} si ottiene la matrice delle impedenze come mostrato di seguito:

$$(Z_{abc})^{-1} = \begin{bmatrix} Z_A & \vdots & Z_B & \vdots & Z_C & \vdots & Z_D \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_E & \vdots & Z_F & \vdots & Z_G & \vdots & Z_H \\ \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ Z_I & \vdots & Z_J & \vdots & Z_K & \vdots & Z_L \\ \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ Z_M & \vdots & Z_N & \vdots & Z_{\bar{N}} & \vdots & Z_O \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1.0949 - 1.9624i & 0.0605 + 0.6146i & 0.0167 + 0.5908i & 0.0536 + 0.0648i & 0.1842 - 0.0280i & 0.1151 + 0.0368i \\ 0.0605 + 0.6146i & 1.0078 - 1.9463i & 0.0685 + 0.5743i & 0.0353 + 0.1129i & 0.0378 + 0.1597i & 0.0358 + 0.1563i \\ 0.0167 + 0.5908i & 0.0685 + 0.5743i & 0.9321 - 1.9894i & 0.0280 + 0.1349i & 0.0313 + 0.1518i & 0.0202 + 0.2281i \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0.0536 + 0.0648i & 0.0353 + 0.1129i & 0.0280 + 0.1349i & 0.9302 - 1.9235i & 0.0771 + 0.5507i & 0.0251 + 0.5541i \\ 0.1842 - 0.0280i & 0.0378 + 0.1597i & 0.0313 + 0.1518i & 0.0771 + 0.5507i & 1.0971 - 2.1671i & 0.1113 + 0.4280i \\ 0.1151 + 0.0368i & 0.0358 + 0.1563i & 0.0202 + 0.2281i & 0.0251 + 0.5541i & 0.1113 + 0.4280i & 0.9502 - 2.0853i \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -0.9437 - 0.0202i & -0.1458 + 0.0617i & -0.0883 + 0.0583i & -0.0344 + 0.0097i & -0.0807 - 0.0188i & -0.0618 - 0.0019i \\ -0.0814 + 0.0585i & -0.9319 + 0.0357i & -0.0742 + 0.0546i & -0.0210 + 0.0159i & -0.0305 + 0.0211i & -0.0281 + 0.0195i \\ -0.0866 + 0.0544i & -0.1404 + 0.0544i & -0.8916 + 0.0221i & -0.0186 + 0.0154i & -0.0239 + 0.0184i & -0.0341 + 0.0221i \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -0.0033 + 0.0155i & -0.0164 + 0.0151i & -0.0188 + 0.0152i & -0.9024 + 0.0269i & -0.1334 + 0.0545i & -0.0793 + 0.0517i \\ 0.0148 + 0.0320i & -0.0342 + 0.0197i & -0.0300 + 0.0177i & -0.0709 + 0.0543i & -0.8850 + 0.0352i & -0.0445 + 0.0514i \\ 0.0143 + 0.0337i & -0.0262 + 0.0176i & -0.0351 + 0.0207i & 0.0758 + 0.0523i & -0.0961 + 0.0576i & -0.8632 + 0.0214i \\ -0.9437 - 0.0202i & -0.0814 + 0.0585i & -0.0866 + 0.0544i & -0.0033 + 0.0155i & 0.0148 + 0.0320i & 0.0143 + 0.0337i \\ -0.1458 + 0.0617i & -0.9319 + 0.0357i & -0.1404 + 0.0544i & -0.0164 + 0.0151i & -0.0342 + 0.0197i & -0.0262 + 0.0176i \\ -0.0883 + 0.0583i & -0.0742 + 0.0546i & -0.8916 + 0.0221i & -0.0188 + 0.0152i & -0.0300 + 0.0177i & -0.0351 + 0.0207i \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -0.0344 + 0.0097i & -0.0210 + 0.0159i & -0.0186 + 0.0154i & -0.9024 + 0.0269i & -0.0709 + 0.0543i & -0.0758 + 0.0523i \\ -0.0807 - 0.0188i & -0.0305 + 0.0211i & -0.0239 + 0.0184i & -0.1334 + 0.0545i & -0.8850 + 0.0352i & -0.0961 + 0.0576i \\ -0.0618 - 0.0019i & -0.0281 + 0.0195i & -0.0341 + 0.0221i & -0.0793 + 0.0517i & -0.0445 + 0.0514i & -0.8632 + 0.0214i \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1.2509 - 0.1450i & -0.0198 - 0.0165i & -0.0165 - 0.0140i & -0.0040 - 0.0056i & -0.0033 - 0.0171i & -0.0017 - 0.0150i \\ -0.0198 - 0.0165i & 1.2577 - 0.1754i & -0.0185 - 0.0147i & -0.0044 - 0.0027i & -0.0069 - 0.0055i & -0.0057 - 0.0037i \\ -0.0165 - 0.0140i & -0.0185 - 0.0147i & 1.2657 - 0.1620i & -0.0039 - 0.0015i & -0.0056 - 0.0039i & -0.0063 - 0.0042i \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -0.0040 - 0.0056i & -0.0044 - 0.0027i & -0.0039 - 0.0015i & 1.2640 - 0.1634i & -0.0181 - 0.0137i & -0.0149 - 0.0116i \\ -0.0033 - 0.0171i & -0.0069 - 0.0055i & -0.0056 - 0.0039i & -0.0181 - 0.0137i & 1.2614 - 0.1670i & -0.0157 - 0.0065i \\ -0.0017 - 0.0150i & -0.0057 - 0.0037i & -0.0063 - 0.0042i & -0.0149 - 0.0116i & -0.0157 - 0.0065i & 1.2676 - 0.1540i \end{bmatrix}$$

Per ottenere la matrice delle impedenze serie di fase equivalenti $[Z_{abc}]$ è necessario utilizzare la seguente equazione, che dipende a sua volta dalla matrice $(Z_{abc})^{-1}$ mostrato in precedenza.

$$Z_{abc} = (Z_A + Z_B + Z_C + Z_D + Z_E + Z_F + Z_G + Z_H + Z_I + Z_J + Z_K + Z_L + Z_M + Z_N + Z_{\bar{N}} + Z_O)^{-1}$$

Sviluppando l'equazione precedente, si ottiene la seguente matrice di impedenze serie di fase equivalente:

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} 0.1606 + 0.4376i & 0.1315 + 0.2650i & 0.1315 + 0.2836i \\ 0.1315 + 0.2650i & 0.1751 + 0.4450i & 0.1381 + 0.2872i \\ 0.1315 + 0.2836i & 0.1381 + 0.2872i & 0.1739 + 0.4841i \end{bmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

Successivamente, per una linea completamente trasposta vengono utilizzate le seguenti equazioni, con le quali si ottiene la matrice delle impedenze serie di fase equivalente Z_{abc} . Il calcolo dei suoi elementi è organizzato in due gruppi: [i] i termini diagonali e [ii] i termini fuori dalla diagonale principale, come mostrato di seguito.

- Elementi della diagonale principale:

$$Z_{11} = \frac{1}{3}(0.1606 + 0.4376i + 0.1751 + 0.4450i + 0.1739 + 0.4841i)$$

$$Z_{11} = 0.1698 + 0.4555j \frac{\Omega}{km}$$

- Elementi fuori dalla diagonale principale:

$$Z_{12} = \frac{1}{3}(0.1315 + 0.2650i + 0.1315 + 0.2836i + 0.1381 + 0.2872i)$$

$$Z_{12} = 0.1337 + 0.2786j \frac{\Omega}{km}$$

Sostituendo i valori ottenuti per ciascun elemento, si ottiene la matrice delle impedenze in serie di fase per una linea completamente trasposta, che è:

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} 0.1698 + 0.4555j & 0.1337 + 0.2786j & 0.1337 + 0.2786j \\ 0.1337 + 0.2786j & 0.1698 + 0.4555j & 0.1337 + 0.2786j \\ 0.1337 + 0.2786j & 0.1337 + 0.2786j & 0.1698 + 0.4555j \end{bmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

La matriz de las impedancias en secuencia para la línea trifase con neutro concéntrico viene determinada mediante la transformación de los componentes simétricos.:

$$Z_{012} = \begin{bmatrix} 0.4372 + 1.0127j & 0 & 0 \\ 0 & 0.0361 + 0.1769j & 0 \\ 0 & 0 & 0.0361 + 0.1769j \end{bmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

Conclusiones

Se ha establecido un procedimiento claro y reproducible para determinar las **impedancias de secuencia** en las líneas subterráneas con **circuitos en paralelo**, integrando: [i] **ecuaciones de Carson** [e la loro versión modificada para los parámetros operativos estabilizados], [ii] **reducción de Kron** para obtener la matriz de fase e [iii] **transformación en componentes simétricas** para derivar. Este flujo garantiza **trazabilidad** e **facilidad de implementación** en los instrumentos computacionales.

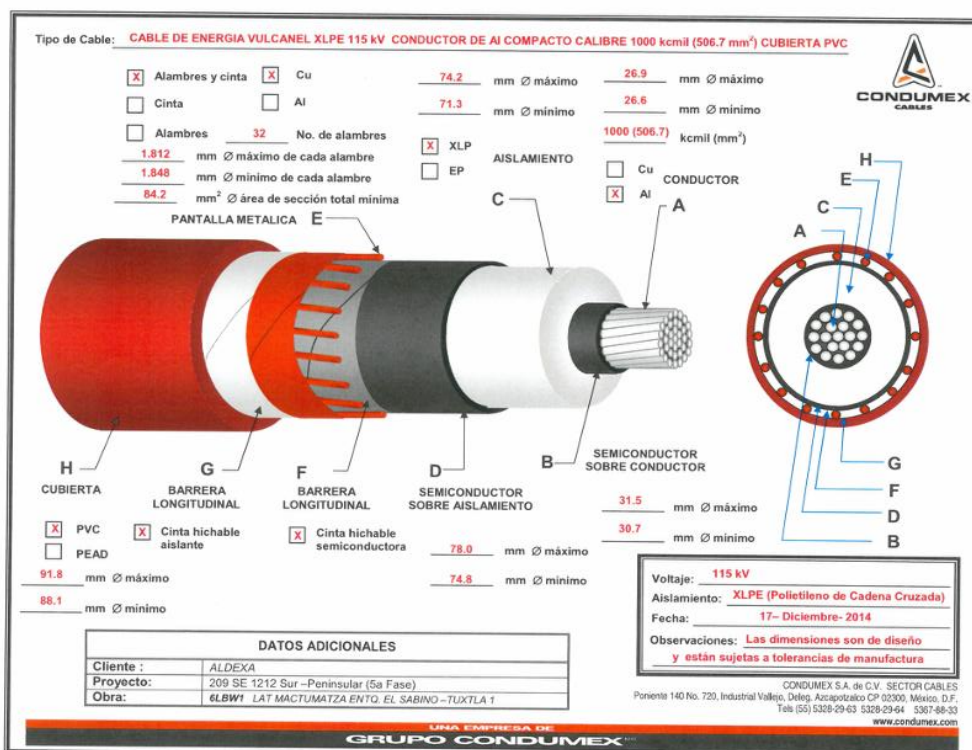
La **secuencia cero** es fuertemente condicionada por el **camino de retorno a tierra** y por las propiedades eléctricas/geométricas del **neutro concéntrico** [resistencia equivalente, GMR equivalente e disposición]. En términos cualitativos, resulta mayor de e, con un impacto directo sobre los **corrientes de guasto a tierra**, **sobre el coordinación de protecciones** e **sobre la seguridad** [tensiones de paso e de contacto].

Nell'ipotesi di una **línea completamente trasposta** e di una geometría uniformada, las impedancias de **secuencia positiva e negativa** son **iguales**, de acuerdo con la teoría de los **componentes simétricos**. Las impedancias dependen sensibilmente de: [i] **separaciones entre conductores** [], [ii] **GMR** de fase e **GMR equivalente** del neutro, e [iii] **resistencia equivalente** del neutro. Por tanto, la **proycción física** [disposición en conductos, galerías, trinchas o HDD] e la **elección de materiales** [pantallas, cubiertas, rellenos térmicos] son decisiones que inciden sobre **perdidas**, **acoplamientos** e **capacidades térmicas**.

La **resistividad del suelo** e lo **esquema de conexión de las pantallas** [un'extremidad, ambas las extremidades o **cross-bonding**] modifican de modo significativo la respuesta en **secuencia cero**, los **corrientes inducidos** e las **perdidas en las pantallas**. Se aconseja de considerar la **heterogeneidad** e la **stratificación** del terreno cuando el ambiente lo sugiere. La secuencia **Carson** → **matriz primitiva** → **reducción de Kron** → **secuencias** ofrece un **camino modular** que facilita la verificación, el reutilización e la extensión a diversos escenarios de instalación, sin depender de valores numéricos específicos en esta fase conclusiva.

Allegati

A]



Conflitto di interessi

Gli autori dichiarano di non avere alcun conflitto di interessi. Non hanno interessi finanziari o relazioni personali che potrebbero aver influenzato questo libro.

Contributo degli autori

Aguilar-Marin, Jorge Luis: Concettualizzazione, metodologia, redazione [revisione e edizione].

Cisneros-Villalobos, Luis: Concettualizzazione, metodologia, ricerca, supervisione.

Sánchez-Jaime, Jorge: Concettualizzazione, analisi formale, redazione [revisione e editing].

Vera-Dimas, José Gerardo: Concettualizzazione, analisi formale, ricerca.

Disponibilità di dati e materiali

I contributi originali presentati in questo studio sono inclusi nel capitolo. Per ulteriori informazioni, contattare l'autore corrispondente.

Finanziamento

Questa ricerca non ha ricevuto finanziamenti esterni.

Abbreviazioni

D_{ij}	Distanza tra i conduttori.
d_{od}	Diametro esterno del cavo sui neutri concentrici.
d_s	Diametro di un filo neutro concentrico.
GMD	Distanze geometriche medie.
GMR_s	Raggio geometrico medio di un filo neutro.
HDD	Perforazione orizzontale diretta.
k	Numero di fili neutri concentrici.
RD_i	Raggio del conduttore.
RMG	Raggio medio geometrico.
r_s	Resistenza di un filo neutro solido.
\hat{Z}_{ii}	Impedenza reciproca.
\hat{Z}_{ij}	Impedenza tra i conduttori i e j .
Z_{00}	Impedenza di sequenza zero.
Z_{11}	Impedenza di sequenza positiva.
Z_{22}	Impedenza di sequenza negativa.

Riferimenti

Elementari.

Allkabel. [2013]. *High-voltage cables 3.6–30 kV*. Allkabel.

Moore, G. F. [2007]. *Electric cables handbook* [3rd ed.]. Blackwell Science.

Heinhold, L. [2010]. *Power cables and their application* [Part 1, 3rd ed.]. Siemens AG.

Antecedenti.

Dorf, R. C. [Ed.]. [2015]. *The electrical power engineering handbook* [2nd ed.]. CRC Press.

Supporto.

Henao, A. M., & Mesa, R. L. [2023]. *Dimensionamiento de cables de potencia aislados*. Universidad Pontificia Bolivariana.

Grigsby, L. L. [Ed.]. [2007]. *Electric power generation, transmission, and distribution* [2nd ed.]. CRC Press/Taylor & Francis Group.

Differenze.

Nexans France S.A.S. [n.d.]. *60–500 kV high voltage underground power cables: XLPE insulated cables* [Brochure]. Nexans.

CIGRE. [2001, October]. *Construction, laying and installation techniques for extruded and self-contained fluid-filled cable systems* [Technical Brochure No. 194]. CIGRE.

Electric Power Research Institute. [2006]. *Underground transmission systems reference book* [2006 ed.]. EPRI.

Adapa, R. [2003, December]. *Increased power flow guidebook—Underground cables* [Report No. 1001818]. Electric Power Research Institute.

Krames, S. R., Rodenbaugh, T. J., & Conroy, M. W. [1994, April 10–15]. *The use of trenchless technologies for transmission and distribution projects*. In *Proceedings of the 1994 IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference* [pp. 123-128]. IEEE.

Kersting, W. H. [2001]. *Distribution system modeling and analysis*. CRC Press.