

INTRODUZIONE

L'integrazione di linee elettriche di trasmissione in infrastrutture di trasporti esistenti o in progetti offre l'opportunità di sfruttare le sinergie di molteplici utilizzazioni nello stesso spazio limitato; tuttavia pone problematiche che devono essere adeguatamente affrontate e risolte per un utilizzo efficiente, affidabile e sicuro degli impianti che sono in esercizio all'interno della comune struttura.

Le stesse tecnologie di trasmissione di alta e altissima tensione con isolante solido o gassoso, da utilizzare in questo ambito sono di tipo innovativo, inoltre se si deve trasmettere potenza su lunghe distanze diventa conveniente, per ragioni legate alle perdite o alla grande quantità di potenza reattiva messa in gioco dalla linea stessa, l'utilizzo della tecnologia in corrente continua i cosiddetti sistemi HVDC.

Questa scelta diventa quasi obbligatoria quando si vuole effettuare un collegamento sottomarino o diventa obbligatoria nel caso in cui si vuole interconnettere due sistemi elettrici con diversa frequenza di funzionamento.

Possiamo andar a catalogare i sistemi di conversione in:

- **Sistemi con tecnologia LCC** (*Line Commutated Converter*) i quali utilizzano convertitori con valvole a tiristore, sono utilizzati per la trasmissione su lunghe distanze via terra o sott'acqua.
- **Sistemi con tecnologia CCC** (*Capacitor Commutated Converters*) caratterizzati dall'utilizzo di condensatori commutatori inseriti in serie tra il trasformatore e il convertitore a valvole a tiristore, il condensatore riduce il rischio della mancata commutazione delle valvole nel caso di interconnessione a una rete debole.
- **Sistemi con tecnologia VSC** (*Voltage Source Converter*) in cui si utilizza convertitori a tensione impressa, impiegando valvole di tipo IGBT si ha la possibilità di aver un maggior controllo sui flussi di potenza in linea.

A causa dei convertitori a valvole si ha l'introduzione di armoniche sia sul lato in corrente continua che in quello in corrente alternata, queste devono avere un valore contenuto, ottenuto tramite l'introduzione di filtri, per il corretto funzionamento del sistema elettrico.

In questa tesi si affronta l'analisi armonica, andamento di tensioni e correnti armoniche, prodotte dalla stazione di conversione lungo la linea in corrente continua; si andrà quindi a studiare la propagazione armonica nei cavi HVDC (nel caso particolare di configurazione bipolare con ritorno metallico) con l'inserimento delle induttanze di spianamento (*smoothing reactor*), più eventuali filtri, in tal modo la tensione dovrebbe risultare priva di *ripple*.

Per la linea di trasmissione è molto importante sviluppare un modello che metta in relazione i vari componenti che la compongono e studiarne il comportamento in regime armonico.

Si è studiato un modello che rappresenti nel modo più accurato possibile il cavo per la trasmissione della potenza elettrica e i vari componenti presenti cioè il generatore armonico, l'impianto di messa a terra, l'induttanza di spianamento ed eventuali filtri.

Deciso lo schema per lo studio armonico si passa allo studio del cavo attraverso il *Metodo Multiconduttore* [1] dove si andranno calcolare tutte le grandezze elettriche.

Questo metodo permette di studiare il comportamento armonico di cavi in modo versatile, in quanto la procedura implementata è totalmente generale, applicabile a qualunque tipologia di cavi con qualsiasi tipo di posa.

Nei primi capitoli si descrive una panoramica delle tipologie di cavi e possibili infrastrutture (ponti e tunnel), si passa poi a una descrizione del principio di funzionamento dei sistemi di conversione e il loro contenuto armonico con esempi esistenti nel mondo (ricordiamo il SA.PE.I.).

Successivamente si passa prima alla modellizzazione del cavo e poi quella della linea (modello a π) attraverso l'approccio matriciale.

In fine si passa alla costruzione dell'intero sistema con il *Metodo Multiconduttore* e alla sua risoluzione.

CAPITOLO 1

Sistemi di trasmissione in cavo

Introduzione

Per quanto riguarda la trasmissione d'energia via cavo troviamo un'ampia gamma di possibilità; come prima grande distinzione possiamo dividere nelle due tipologie di trasmissione: l'HVDC e l'HVAC. Per la scelta dell'uno o dell'altro sistema dipende da numerosi fattori tra cui la potenza in gioco, la lunghezza della linea e, non meno importante, dall'aspetto economico.

In particolare si utilizza l'HVDC nel caso si voglia trasmettere su lunghe distanze, mentre l'HVAC si preferisce per collegamenti relativamente corti in quanto viene messa in gioco una grande quantità di potenza reattiva.

La continua ricerca nel settore dei cavi permette d'avere una ampia scelta sia per quanto riguarda l'HVDC che l'HVAC, in base al tipo di posa adottato.

Possiamo andar a distinguere innanzitutto cavi per posa sottomarina e per posa interrata, che a loro volta possono essere ancora distinti in base al loro diverso tipo d'isolante che è l'elemento che distingue l'evoluzione del cavo stesso e che più si è evoluto negli ultimi anni dai tradizionali cavi isolati in carta impregnata si è passati a quelli ad isolamento estruso XLPE (*Cross-Linked Polyethylene*), in gas, in olio o in PPL (*Paper Polypropylene Laminate*).

La figura 1.1 ci dà informazioni per quanto riguarda la tipologia di cavo odierna in funzione della lunghezza, del tipo di sistema adottato e della potenza.

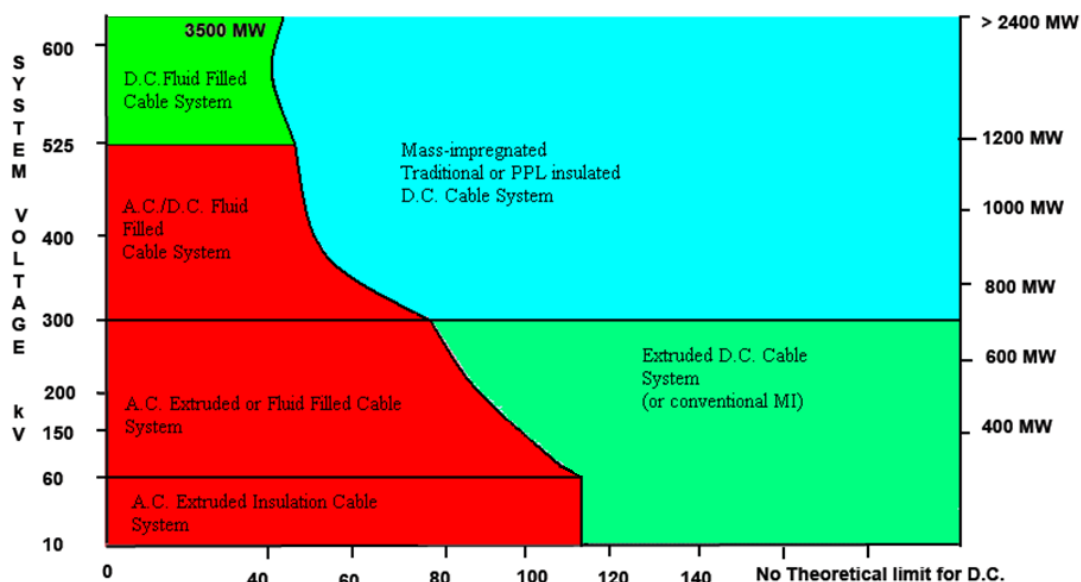


Figura 1.1 Tipologie di cavo odierne

1.1. Cenni storici

La nascita dei conduttori isolati per il trasporto di energia elettrica può essere collocata intorno al 1830; tuttavia perché il primo cavo fosse messo in esercizio passarono cinquant'anni.

All'epoca i materiali isolanti a disposizione erano gutta-percha, una sorta di gomma plastica, iuta impregnata e, successivamente, carta impregnata; grazie proprio quest'ultimo materiale che le richieste di rigidità dielettrica e resistenza al calore furono soddisfatte.

Ci furono cinque fattori che determinarono l'evoluzione del cavo di potenza per alta tensione con dielettrico in carta: il primo fu l'introduzione del dielettrico multistrato utilizzando la sovrapposizione di nastri di carta (*Ferranti* 1880); il secondo fu l'impregnamento dell'isolante sottovuoto di carta seccata utilizzando masse di resina riscaldata da qui il termine "*mass-impregnated-cable*".

Il terzo fattore fu l'incapsulamento anti umidità del cavo, utilizzando uno schermo in piombo (*Boreal*, 1897); il quarto fattore fu l'utilizzo di carta metallizzata, in questo modo si limita il campo elettrico dei conduttori andando a creare il campo radiale.

Ultimo fattore fu l'impregnamento del dielettrico di carta utilizzando olio isolante a bassa viscosità a pressione costante.

L'invenzione di *Ferranti* segnò la retta via da seguire anche se l'importanza fu riconosciuta molto più tardi e fu fondamentale per poter portare i cavi a tensione sempre più elevate infatti il dielettrico multistrato riduce i rischi e distribuisce i guasti.

Altro evento fondamentale per lo sviluppo dei sistemi per alte tensioni fu posata da *Hochstadter*, che per aver una buona distribuzione del campo elettrico, utilizzò carta metallizzata in questo modo la tensione di soglia di ionizzazione del cavo aumentò sensibilmente.

Questa tecnologia portò i cavi a raggiungere tensioni dell'ordine dei 60 kV.

Nel spingersi a tensioni più elevate venne messo in evidenza un problema fondamentale nella costruzione dei cavi: la formazione di vacuoli nell'isolante, questi sono causati dai continui cambiamenti termici del cavo, le scariche che si formavano all'interno di essi portava a un rapido deterioramento del dielettrico.

Il primo cavo senza scariche parziali e termicamente stabile, che superasse i 100 kV, fu ideato in un centro ricerche italiano ed era un cavo isolato in olio. Con stabilità termica indichiamo la capacità dell'isolante d'adattarsi ai cambiamenti termici durante il funzionamento, così da non formare vacuoli d'aria e di conseguenza provocare scariche anche con alti valori di campo elettrico presente alle alte tensioni.

La scoperta è da attribuirsi a *Emanueli* che raggiunse questo obiettivo impregnando l'isolante in carta stratificata con un mezzo impregnante a bassa viscosità a pressione costante, che fluisse nelle espansioni dal dielettrico dai serbatoi durante il riscaldamento e veniva respinto dentro durante il raffreddamento.

Questa tecnologia fu migliorata successivamente con la richiesta di utilizzare livelli di tensione sempre maggiori, partendo dai 220 kV degli anni '30, passando ai 400 kV degli anni '50 e successivamente ai 500 kV nel 1974.

Per dimostrare la potenzialità dei cavi a sopportare tensioni più elevate furono testati prima in Francia nel 1965 i 750 kV e nel 1980 in Italia (dalla *Pirelli*) i 1100 kV.

Altre tecniche permisero di stabilizzare termicamente l'isolamento in carta usando fluidi ad alta viscosità o anche mezzi non drenanti. In questi casi si evitò la ionizzazione attraverso la compressione di una sorgente esterna (cavo a gas a pressione esterna) o utilizzando gas o olio che penetrano nei vacuoli ad alta pressione (cavi in olio ad alta pressione o a pressione a gas interna).

La necessità di diminuire la manutenzione e di facilitare la posa del cavo spinsero i costruttori a ritornare al dielettrico a singolo strato senza mezzo impregnante molto simile ai cavi in gutta-percha.

Utilizzando specifiche plastiche sintetiche fu possibile ritornare al semplice processo di estrusione dell'isolamento del conduttore e così soppiantare la tecnologia in carta.

Questo polimero solido estruso rappresentò una soluzione totalmente differente per la stabilità termica dei cavi in alta tensione infatti se opportunamente lavorato, il dielettrico a singolo strato è intrinsecamente esente da vucoili e scariche parziali, dunque sparì la necessità d'impregnarlo con un componente fluido.

Il primo cavo con isolamento a polimero solido fu realizzato in PVC a metà degli anni '40, tuttavia il materiale isolante si dimostrò inadatto nel campo dell'alta tensione a causa delle elevate perdite dielettriche. La svolta arrivò con introduzione del polietilene termoplastico PE grazie alle sue eccellenti proprietà elettriche; la prima applicazione fu negli Stati Uniti nel 1944 a 3 kV e poi nel 1947 a 20 kV in Svizzera.

Nel 1966 fu realizzato il primo cavo in PE per alte tensioni a 138 kV, e tre anni dopo 220 kV per arrivare, nel 1986, ai 400 kV.

L'introduzione del polietilene reticolato (*cross-linked polyethylene XLPE*), tra cui ha la caratteristica fondamentale di termoelasticità, permise di raggiungere il funzionamento ottimale a temperature elevate (dai 70° ai 90°) in questo modo tutti gli altri tipi di polimeri solidi estrusi furono sostituiti dall'XLPE.

La prima utilizzazione fu nel 1960 per l'alta tensione e dal 1988 fu possibile utilizzarlo per cavi sopra i 500 kV. Il primo cavo in XLPE a 400 kV fu posato in Germania.

Per quanto riguarda la tecnologia HVDC il primo collegamento in continua fu effettuato nel 1882 a Monaco dalla *Miesbach power transmission* e il cavo trasmetteva una potenza di 2,5 kW.

Un metodo sperimentale di trasmissione in alta tensione in corrente continua fu sviluppato dall'ingegnere svizzero *Renè Thury* e in seguito fu messo in pratica nel 1889 in Italia dalla compagnia *Aquedotto De Ferrari-Galliera*.

Questo sistema utilizzava una serie di collegamenti tra motori-generatori per aumentare la tensione, ogni step era isolato da terra e guidato da un motore primo. La linea operava in corrente continua, con un massimo di 5 kV su ogni macchina; alcune macchine avevano il commutatore doppio per ridurre la tensione sul collettore. Questo sistema trasmetteva 630 kW a 14 kV in corrente continua per una distanza totale di 120 km.

Il sistema Moutiers-Lione trasmise 8,6 kW dalla centrale idroelettrica per una distanza di 200 km, inclusi 10 km di cavo interrato, il sistema utilizzava otto generatori collegati in serie con doppio collettore per un totale di 15 kV tra i poli. Il sistema funzionò dal 1906 al 1936.

Nel 1913 erano operativi 15 sistemi che utilizzavano il metodo dell'ingegnere svizzero.

Furono realizzati altri sistemi fino a 100 kV in c.c. utilizzando questo metodo fino al 1930, tuttavia i motori-generatori richiedevano manutenzioni elevate e avevano alte perdite.

Altri dispositivi elettromeccanici furono testati durante la prima metà del 20° secolo con scarso successo commerciale.

Un altro tentativo di conversione in corrente continua fu passare dall'alta tensione a una valore minore al fine di caricare banchi di batterie collegati in serie per poi passare a un collegamento in parallelo al servizio di distribuzione dei carichi.

Solamente due tipi di questo sistema furono realizzati utilizzando questo metodo a cavallo del 20° secolo per poi essere abbandonato a causa sia della limitata capacità delle batterie, sia per la difficoltà nel passaggio tra i collegamenti in serie e parallelo e per l'inefficienze energetica di un ciclo di carica-scarica.

Il controllo della rete tramite valvole a vapori di mercurio divenne disponibile per la trasmissione di potenza durante il periodo 1920-1940. A partire dal 1932, la *GE* testò delle valvole a vapore di mercurio per una linea a 12 kV in c.c., la quale serviva a connettere un generatore a 40 Hz a dei carichi che funzionavano a 60 Hz a *Mechanicville, New York*.

Nel 1941 fu progettato per la città di Berlino la trasmissione di 60 MW a ± 200 kV, con 115 km di cavo interrato (progetto *Elbe*) ma a causa del crollo del governo tedesco nel 1945 non fu completato.

La giustificazione ufficiale del progetto fu che in tempo di guerra, un cavo interrato sarebbe stato un obiettivo meno sensibile per un bombardamento.

La ricerca si spostò nell'Unione Sovietica dove l'introduzione della valvola a vapori di mercurio statica a servizio commerciale nel 1954 segnò l'inizio dell'era moderna di trasmissione HVDC.

Una connessione HVDC fu realizzata dall'ASEA tra la Svezia l'isola Gotland.

Dal 1975 le valvole a vapori di mercurio furono soppiantate definitivamente dai dispositivi a stato solido.

Il 15 marzo 1979, fu realizzato un collegamento in c.c. utilizzando valvole a tiristore tra Cabora Bassa e Johannesburg (1410 km, ± 533 kV, 1920 MW)

Dal 1975 al 2000 le valvole ad arco sono state sostituite dai cosiddetti sistemi di conversione convenzioni (LCC) con valvole a tiristore semplice dove l'impulso di gate viene dalla linea di alimentazione.

Secondo alcuni studiosi, i prossimi 25 anni potrebbero essere dominati dai convertitori a commutazione forzata.

Questa era è già iniziata con i sistemi con tecnologia CCC (*Capacitor Commutated Converters*), i quali sono formati da una semplice rete di tiristori con il gate gestito da un circuito esterno capacitivo.

Anche questi però stanno per essere sostituiti da i convertitori "auto commutanti" basati su dispositivi più complessi di commutazione (IGCT, GTO, IGBT).

Tutti questi dispositivi sono oggi utilizzati in sistemi HVDC di media potenza e molto probabilmente sostituiranno i tradizionali tiristori.

1.2. Tipi di cavi

Il tipo di cavo da installare nella trasmissione di potenza ad alta tensione dipende dal tipo di tecnologia adottata o HVDC o HVAC. Nel primo caso abbiamo il sistema a corrente continua i cavi sono alimentati da convertitori che possono essere LCC, CCC o VSC.

La tecnologia LCC (*line commutated converters*) utilizza sistemi di commutazione naturale o controllata tramite valvole di tipo SCR e caratterizzata dall'inversione di polarità del cavo, determinando in questo modo uno stress dielettrico dovuto alla variazione di tensione superiore rispetto alla tecnologia VSC.

La tecnologia VSC (*voltage source converters*), la quale non prevede l'inversione di polarità, è caratterizzata da sistemi auto-commutanti, che non necessitano della presenza della rete c.a. per il loro funzionamento ed il sistema di conversione risulta indipendente dalla frequenza del sistema di alimentazione.

Inoltre questo tipo di tecnologia offre innumerevoli vantaggi, in particolare permette di controllare ottimamente i flussi di potenza attiva e reattiva in una rete c.a., molto importante sia per la regolazione della rete sia per i vari contratti stipulati nel mercato elettrico, e risultano ottimali qualora si abbia la necessità di collegamenti via mare (per esempio le stazioni *offshore* o le *wind farm*).

Dalle prime applicazioni sottomarine si notò la necessità di rinforzare i cavi con un'armatura di protezione da ancore, dalle reti dei pescatori e da animali marini che possono danneggiare il materiale isolante. Di solito queste armature sono costruite da fili di acciaio ma ci sono casi in cui possiamo trovarle realizzate con piattina di rame; i cavi per le applicazioni sotterranee ne sono generalmente prive.

Per applicazioni HVAC possiamo utilizzare o cavi unipolari o cavi tripolari: nel primo caso a una fase corrisponde un cavo mentre nel secondo in un unico cavo troviamo le tre fasi (naturalmente isolate l'una dall'altra) con un unico schermo se in bassa tensione oppure ad ogni fase corrisponde uno schermo dalla media tensione in su.

Di solito questa tipologia di cavo non si utilizza nell'AAT, in quanto non riesce a smaltire in modo efficace le perdite, anche se i continui sviluppi lo sta spingendo a tensioni sempre più elevate.

Nelle installazioni in c.a., a causa dell'effetto di prossimità e dell'effetto pelle la resistenza r presentata dal cavo è più alta rispetto a quella corrispondente al funzionamento in c.c. ed il rapporto tra le due è in genere $1,2 \div 1,5$, questo determina un aumento delle perdite in AAT che non sono accettabili.

Per ridurle si costruisce il cavo in modo particolare, per esempio il *milliken* in cui la fase è costituita da trefoli, di rame o alluminio, cordati tra loro e smaltati e suddivisi in settori tra i quali si mette del materiale isolante. In questo modo si riesce ad ottenere un rapporto tra le resistenze circa unitario.

Per quanto riguarda la scelta delle sezioni bisogna tener conto delle seguenti considerazioni:

- **Caduta di tensione massima**
- **Corrente termicamente ammissibile** (cioè la corrente che porta il cavo alla sua temperatura d'esercizio)
- **Temperatura massima ammissibile per surriscaldamento dovuto a corto circuito**, ovvero temperatura massima oltre la quale il cavo si distrugge

Elenchiamo alcune tipologie di cavi utilizzati oggi:

- **Cavo isolato con carta impregnata M.I. (*mass impregnated*):** viene realizzato mediante continue fasciature di carta cellulosa fino a ottenere lo spessore desiderato dopodiché viene impregnato di particolari miscele o oli di base minerale ad alta viscosità per riuscire a riempire eventuali vuoti d'aria che si sono formati.

In questo modo si rende il comportamento dielettrico dell'isolante migliore e si deve rendere il tutto il più omogeneo possibile nello spazio in modo che il campo elettrico si ripartisca in maniera uniforme, con legge logaritmica essendo la configurazione cilindrica per evitare d'aver alti valori di campo solo in determinate zone.

Questo tipo d'isolante rende il cavo adatto alla tecnologia LCC che come detto in precedenza prevede l'inversione di polarità stressando maggiormente l'isolante.

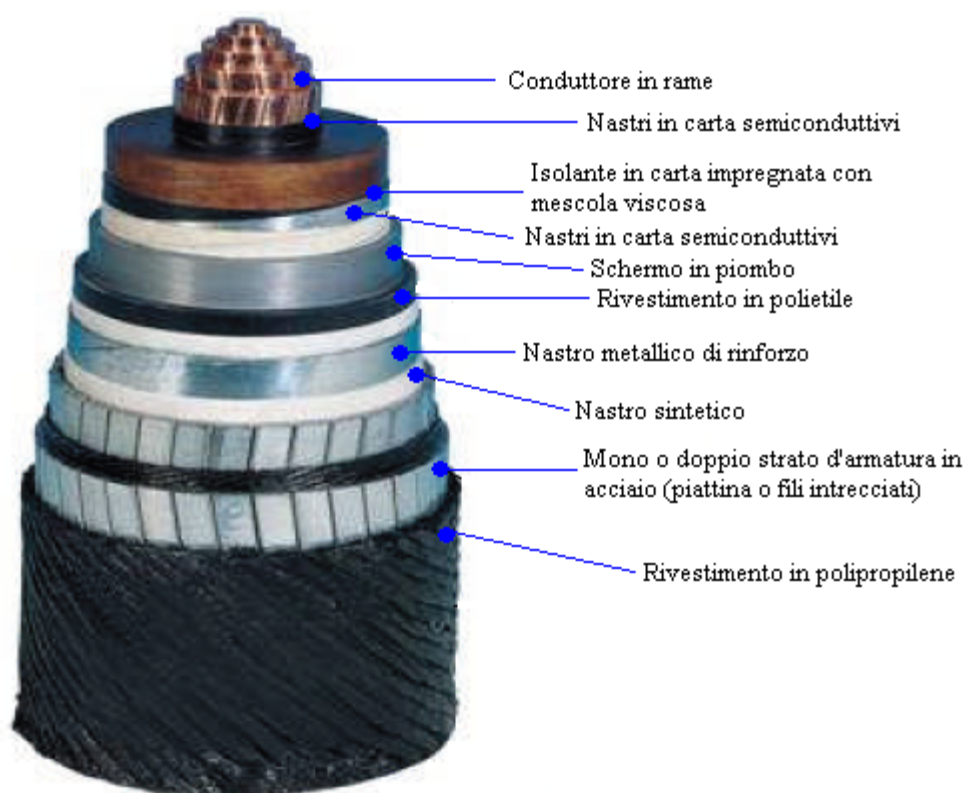


Figura 1.2 Cavo isolato con carta impregnata

- **Cavo ad isolamento estruso in XLPE:** l'isolante viene ottenuto con un processo di applicazione unica, all'interno del quale occorre evitare il più possibile la presenza di vuoti d'aria ovvero zone con minore rigidità dielettrica e soggette a ionizzazione con scariche parziali. Successivamente si applicano ulteriori strati di materiale metallico e isolante per migliorare la proprietà meccaniche.

Questa tipologia di isolante è molto più semplice da realizzare tuttavia è soggetta ad irregolarità lungo la sezione e quindi non è ottimale per cavi destinati a collegamenti LCC.

Vengono utilizzati per le applicazioni VSC in cui non è prevista l'inversione di polarità con tensioni fino ai 500 kV e potenze massime di 500 MW.

Nel caso di applicazioni in corrente alternata è possibile utilizzare una configurazione unipolare oppure una tripolare.

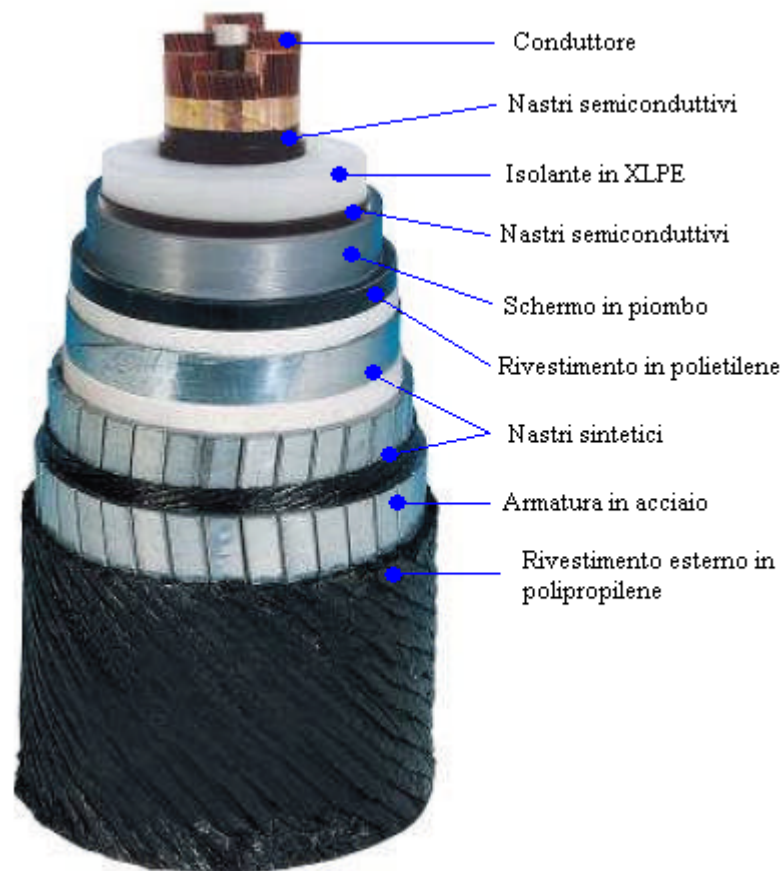


Figura 1.3 Cavo isolato in XLPE



Figura 1.4 Cavo isolato in XLPE tripolare

- Cavo riempito in olio SCFF (*self contained fluid filled*):** sono utilizzati per le grandi potenze a parità di tensione in quanto l'olio utilizzato da vettore termico all'interno del conduttore cavo riesce ad asportare l'energia dispersa per effetto joule. La tecnica di costruzione è uguale a quella per i *mass impregnated* però vengono utilizzati miscele di oli a bassa viscosità per impregnare la carta dell'isolamento.



Figura 1.5 Cavo riempito in olio SCFF

- **Cavi a pressione di gas esterna o interna:** l'isolante è realizzato come per quelli in carta impregnata, sono generalmente in configurazione tripolare con ogni conduttore isolato e schermato, con schermo di piombo, separatamente.

I tre conduttori sono inseriti in una struttura tubolare in acciaio contenente azoto gassoso ad una pressione di 15 bar. Grazie alla pressione esterna esercitata dal gas si evita la formazione di vuoli d'aria, ottenendo la rigidità dielettrica richiesta lungo tutta l'estensione del cavo. Analogo è il principio dei cavi a pressione interna, in cui l'azoto è parte dell'isolamento del conduttore singolo.

Con l'avvento dell'XLPE la richiesta di questa tipologia di cavi è in calo.

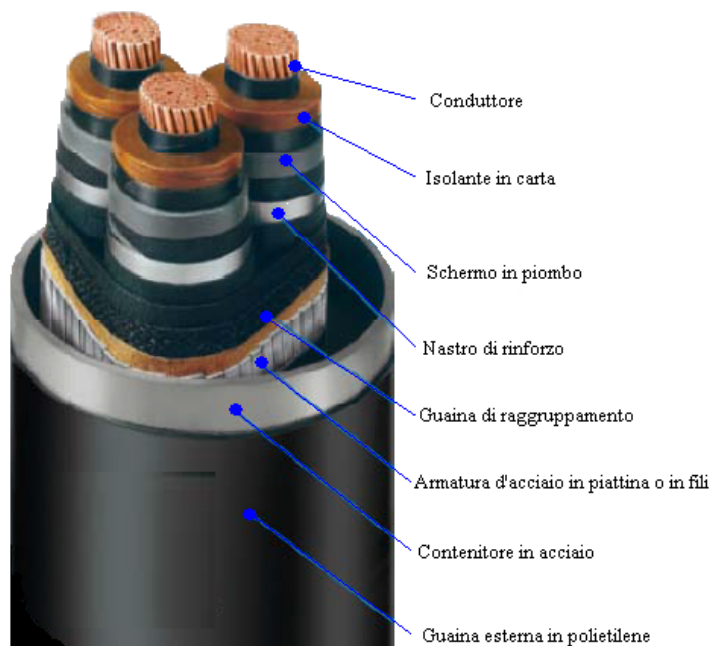


Figura 1.6 Cavo a pressione di gas esterna

- **Cavi isolati in PLL (*paper polypropylene laminate*):** sono l'ultima frontiera, indicati per collegamenti ad altissime tensioni e grandi potenze. Possiamo considerarli come l'evoluzione degli SCFF.

L'isolante è costituito da strati alternati di carta e polipropilene, ed attraverso questa struttura è possibile ottenere un aumento della rigidità dielettrica totale.

Si è inoltre ottenuto un miglior comportamento termico permettendo l'aumento della temperatura d'esercizio aumentando quindi la potenza trasmessa o a parità di potenza trasmessa la diminuzione della sezione utile del conduttore [2].

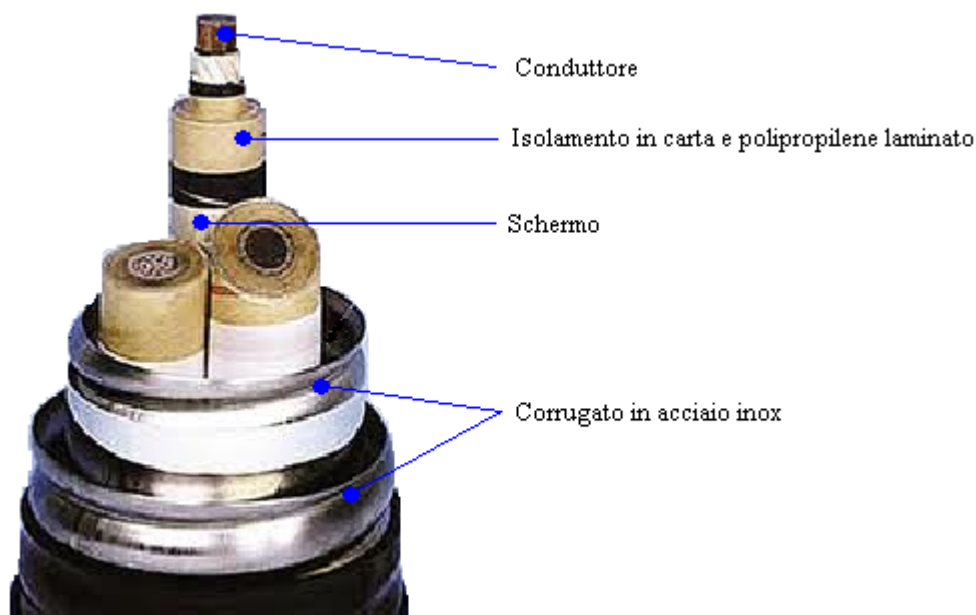


Figura 1.7 Cavo isolato in PLL

- **Gas insulated line GIL:** è costituito da un conduttore centrale in alluminio con sezioni tipiche che arrivano fino a 5300 mm²; questo poggia su isolatori in resina che hanno il compito, oltre naturalmente di isolarlo dall'involucro esterno, di sostenerlo e centerarlo. L'involucro esterno è formato da un tubo di alluminio robusto, che fornisce una solida protezione meccanica ed elettrica del sistema.

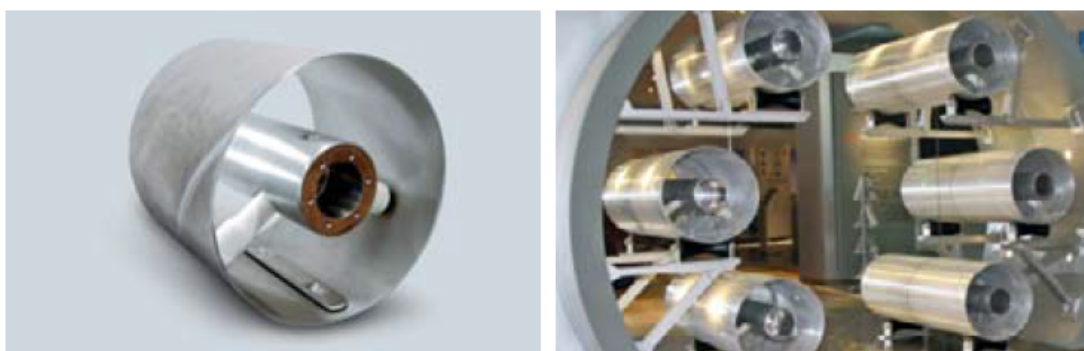


Figura 1.8 Sezione di un GIL e di una doppia terna di GIL

Per soddisfare gli aspetti ambientali e tecnici, i GIL sono riempiti con una miscela di gas isolante contenente prevalentemente azoto e una minor percentuale di SF₆. La saldatura degli involucri esterni viene realizzata mediante saldatura orbitale, accompagnata poi da tecniche di verifica a ultrasuoni, assicurando così la perfetta aderenza di tubi.

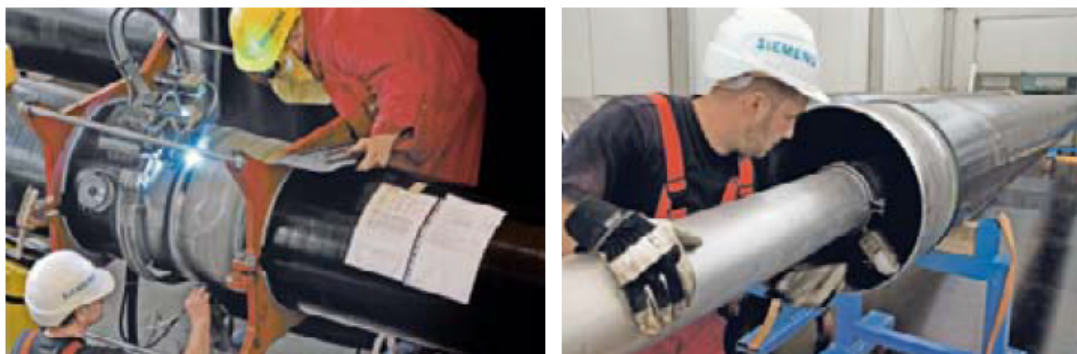


Figura 1.9 Operazione di saldatura orbitale e giunzione del conduttore

I sistemi GIL sono immuni ai rischi inerenti ad altri sistemi di trasmissione di potenza, possono essere toccati durante il servizio dato che la carcassa è francamente a terra, sono a prova di fuoco e a prova d'esplosione. Inoltre il sistema di isolamento elettrico non è soggetto a fenomeni d'invecchiamento, questo riduce i guasti interni praticamente a zero. Altro punto di forza dei GIL è il basso campo elettromagnetico generato (fino a 15 ± 20 volte più piccolo) rispetto ai convenzionali sistemi di trasmissione di potenza. Quindi le linee possono passare attraverso aree popolate o anche venir allocato in gallerie con altri sistemi estranei (esempio linee o apparecchiature di telecomunicazione).

1.2.1. Cenni sull'andamento del campo elettrico nei cavi HVDC

In un cavo in c.a. il campo elettrico ha una distribuzione puramente capacitiva, funzione della costante dielettrica relativa che non dipende né dal campo elettrico né dalla temperatura.

La non dipendenza dalla temperatura è una caratteristica importante perché nel passaggio da vuoto a carico con il salto termico che s'instaura tra parte a contatto con il conduttore di fase e parte più esterna, l'andamento del campo si modificherebbe.

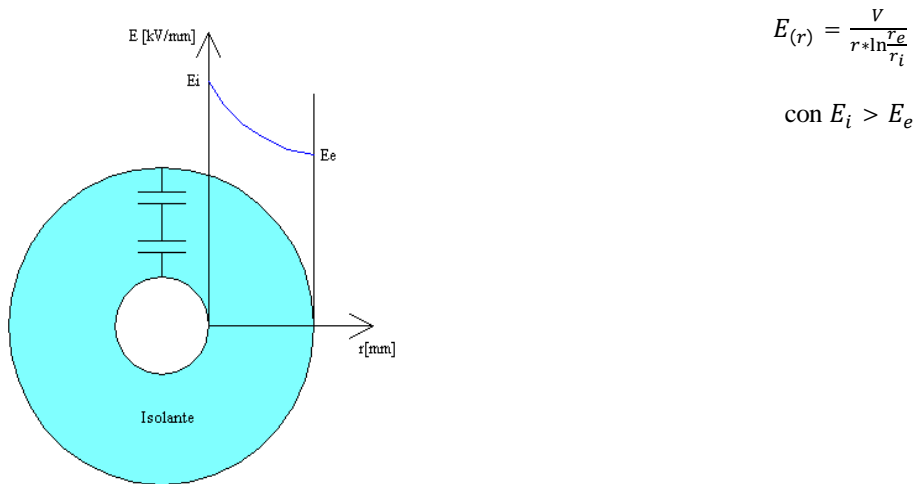
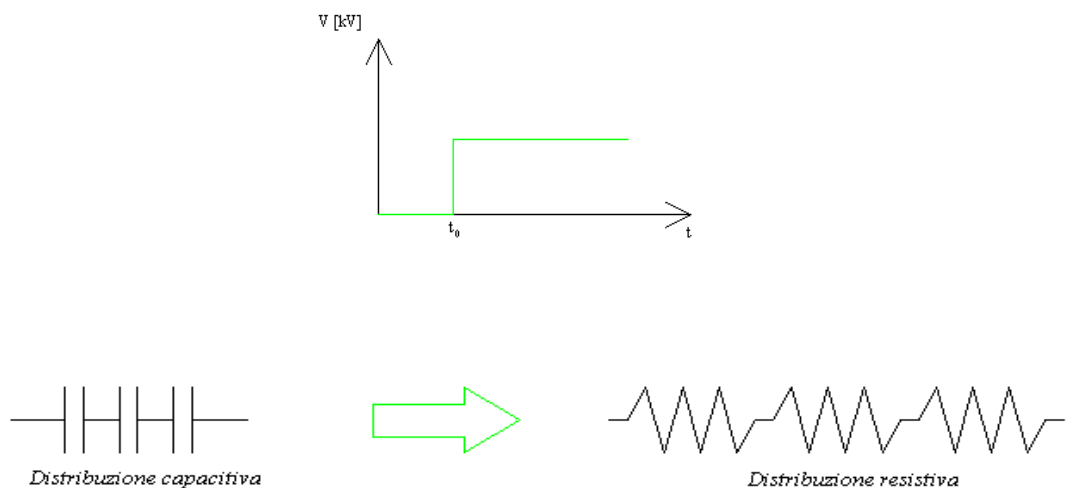


Figura 1.10 Andamento del campo elettrico in un cavo c.a.

Valori tipici di gradiente elettrico su cavi in c.a. in alta tensione sono $E_i=10\div14$ [kV/mm] $E_e=5\div7$ [kV/mm].

In corrente continua la situazione è differente.

Una volta applicata la tensione continua sul conduttore ci sarà un transitorio in cui il gradiente di tensione passerà da una distribuzione capacitiva ad una distribuzione puramente resistiva.



La distribuzione resistiva del gradiente risulta in funzione della conducibilità del materiale dielettrico σ , che a sua volta è funzione del campo elettrico E e della temperatura θ a cui si porta il materiale.

La relazione che lega la conducibilità del materiale dielettrico con temperatura e campo elettrico al quale è sottoposto è:

$$\sigma = \sigma_0 * e^{\alpha\theta + \beta E} \left[\frac{S}{mm} \right]$$

dove σ_0 è la conducibilità a 0°C, $E=0$ kV/mm, α e β sono rispettivamente i coefficienti di temperatura e di tensione, normalmente assumiamo $\alpha=0,1$ 1/°C e $\beta=0,03$ mm/kV.

La maggiore dipendenza della conducibilità è con la temperatura infatti formulazioni analitiche del campo elettrico in cavi HVDC si possono fare solo se si trascura la dipendenza della conducibilità dal campo elettrico.

La formula vista precedentemente si presta molto bene a spiegare l'inversione del campo elettrico nel passaggio del cavo da vuoto a carico.

Quando il cavo è a vuoto la temperatura è uniforme in tutto il dielettrico e la conducibilità è uguale in tutte le sue zone, quindi la distribuzione del campo elettrico è riconducibile a quella capacitiva con il massimo sulla superficie interna.

A carico il cavo, dopo un certo tempo raggiunge il regime termico e la superficie a contatto con il conduttore si troverà a temperatura maggiore di quella alla fine dello strato isolante.

Si viene a creare un salto termico $\Delta\theta$ nello strato isolante. La conducibilità dello strato più esterno rispetto a quello più prossimo al conduttore di fase.

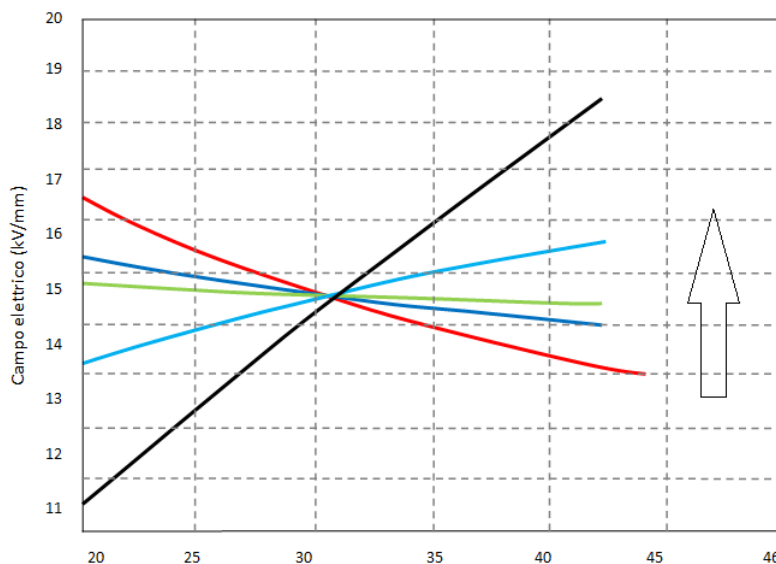


Figura 1.11 Distribuzione del campo elettrico nell'isolante di un cavo in c.c.

Gli stress subiti dal cavo per l'inversione del campo possono peggiorare se oltre all'inversione fisica del campo dovuta alle variazioni di temperatura, si aggiungono quelli dovuti ai sistemi di conversione ,tipo negli LCC, che prevedono l'inversione di polarità del cavo.

Gli isolanti in XLPE rispetto quelli in MI sono caratterizzati da un coefficiente β che può arrivare fino a 14 volte superiore, mentre il valore del coefficiente α risulta simile tra loro.

Questo comporta un incremento dell'intensità di campo elettrico sulla superficie esterna dell'isolamento, come riportato in figura.

L'inversione di campo nei cavi isolati in XLPE è quindi molto più severo rispetto a quelli isolati in carta impregnata.

Tale comportamento lo possiamo attribuire a un diverso contenuto di cariche libere negli isolanti estrusi, a causa di fattori esterni (per esempio l'iniezione di cariche dovuta alle interfacce semiconduttive) ed interni (cariche libere originate dall'orientamento o la deformazione dei dipoli, da impurità nel materiale).

1.3. Strutture dedicate o multifunzione

Con il continuo aumento della richiesta d'energia elettrica e la necessità di trasmetterla mediante linee in AT e AAT, la possibilità di utilizzare strutture come tunnels o ponti, ottenendo una sinergia tra tipi diversi di servizi, per esempio il trasporto ferroviario o stradale con la trasmissione dell'energia, sta diventando molto interessante.

Utilizzando tale approccio si può avere una riduzione dei costi complessivi, dell'impatto ambientale e meno disservizio per la comunità in caso di manutenzione della linea.

Possiamo catalogare le strutture nel seguente modo:

- **Strutture a servizio singolo:** con questa definizione si intende qualsiasi struttura continua contenente una o più sistemi di cavi che consenta l'installazione, la sostituzione o la manutenzione dei sistemi senza la necessità di scavare o distruggere la struttura. Questa viene chiamata anche struttura dedicata. Include anche la possibilità di transito di persone e di mezzi nella zona dell'installazione.
- **Strutture multi servizio:** qualsiasi struttura contenente sia un sistema in cavo sia altri sistemi e servizi che consenta l'installazione, la sostituzione, la manutenzione o la riparazione dei sistemi senza la necessità di scavare o distruggere qualsiasi altro servizio. Si può notare che una struttura originariamente a uso singolo può, successivamente diventare una struttura multi utilizzazione.
- **Strutture singolo utente:** la loro gestione e possesso sono di un unico soggetto
- **Strutture multi utente:** la loro gestione e possesso sono di più soggetti

Tunnels

La realizzazione di tunnels dedicati richiede l'uso di uno specifico e variegato tipo d'attrezzature; in base alla conformazione del terreno in cui il tunnel deve essere costruito è possibile decidere la tecnica migliore alla sua realizzazione, o eventualmente la combinazione di tecniche nel caso di lunghi percorsi con differenti tipologie di terreno.

In base alla costruzione possiamo individuare le seguenti tipologie di tunnels:

- **Cut and cover tunnels:** possiamo individuare due tipologie, *top-down* e *bottom-up* tunnel. I primi sono costruiti dove c'è la necessità d'avere tempi di costruzione brevi per liberare la viabilità in una strada nelle vicinanze dell'installazione. Il tunnel viene costruito al livello del terreno, con strutture forate prefabbricate, e si effettuano poi degli scavi poco profondi per ricoprirlo definitivamente, tranne in alcune zone destinate all'ispezione. Nel sistema *bottom-up* viene scavata una trincea, all'interno della quale viene poi costruito il tunnel e successivamente viene tutto ricoperto.

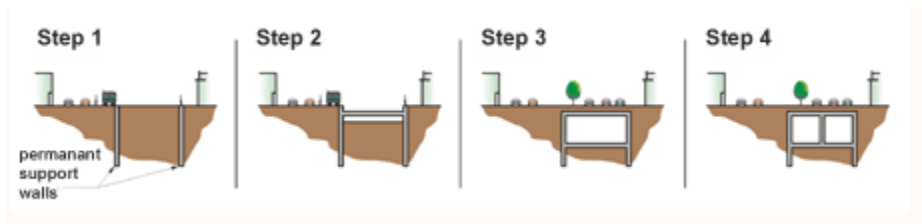


Figura 1.12 Sistema *top-down*

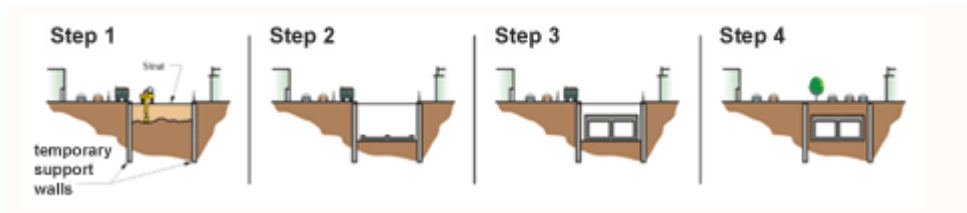


Figura 1.13 Sistema *bottom-up*

- Tunnels sommersi:** questa tecnica è molto simile alla *cut and cover*, con la differenza che siamo in ambito sottomarino. Viene prima scavata una trincea sul fondale, sulla quale sono posate sezioni di tunnel prefabbricate, che vengono appositamente sigillate e ancorate e all'interno delle quali vengono posati i cavi. Dopo di che il tunnel viene ricoperto con sabbia del fondale e successivamente da uno strato di materiale roccioso. Periodicamente viene asportato il materiale sedimentato in eccesso nelle zone interessate.

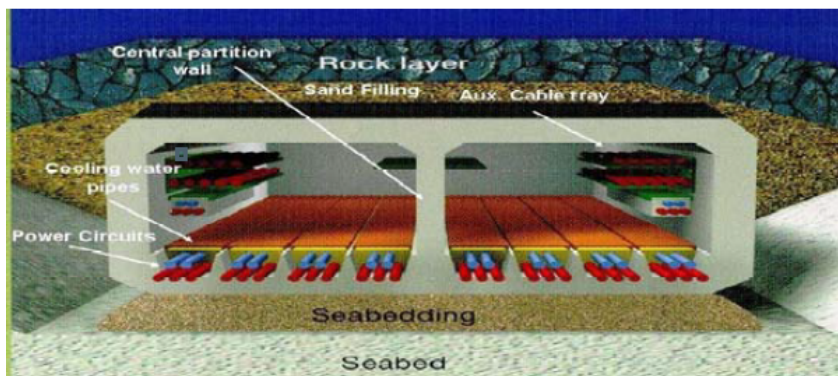


Figura 1.14 Tunnel sommerso

- Tunnel ricavati da alesatura:** mediante alesatrici rotanti si creano tunnel di sezione desiderata, automatizzando il processo di costruzione del tunnel. Le punte da taglio installate sulla testa dell'alesatrice andranno scelte in base al tipo di terreno in cui si dovrà lavorare. Le alesatrici possono essere realizzate apposta per la costruzione di un tunnel specifico, tuttavia ci sono macchine in grado di scavare tunnel di sezioni variabili con un certo range, abbattendo in tal modo i costi progettuali.

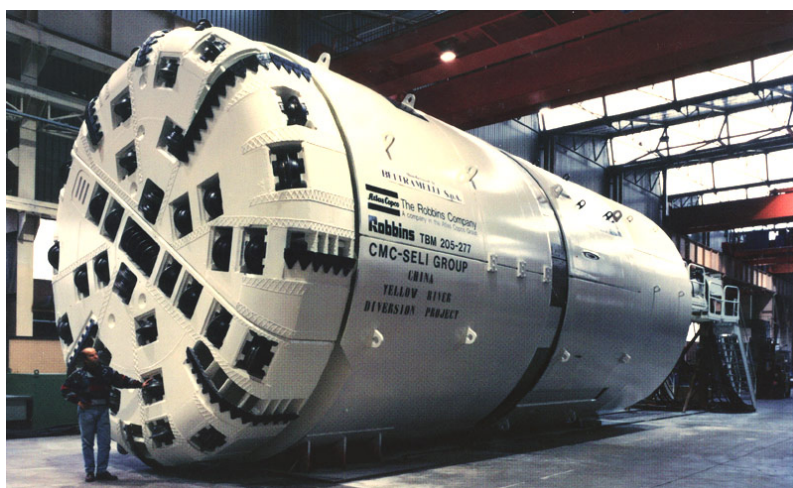


Figura 1.15 Dimensioni di un'alesatrice

Subito dopo l'alesatura le pareti del tunnel vengono rivestite da spessi pannelli prefabbricati di cemento armato che seguono perfettamente la forma circolare del tunnel e lo spazio tra la superficie del tunnel e i pannelli viene riempito di cemento.

Un'alternativa è posizionare subito dietro l'alesatrice delle sezioni di condotta (*pipe jacking*), guidate da cilindri pneumatici dalla sezione d'entrata fino alla sezione di scavo. Le singole sezioni che vanno a costituire la condotta sono prefabbricate in cemento armato e una volta che un segmento di cemento è stato posizionato, il sistema pneumatico rientra alla bocca della galleria per cominciare il suo ciclo di trasporto.



Figura 1.16 Esempio di posa *pipe jacking*

Utilizzando sistemi di guida computerizzati si può posizionare diverse sezioni in modo estremamente preciso.

- **Shotcrete and mesh:** in presenza di roccia molto dura per la costruzione del tunnel si utilizzano maglie in acciaio e cemento spruzzato (*shotcrete and mesh*) in alternativa al metodo di supporto strutturale. Il cemento viene inserito con appositi sistemi di pompaggio manuali o tramite robot a controllo remoto.
- **Altre tecniche:** dove la conformazione del terreno lo consente possono essere usate anche tecniche più tradizionali, o con la perforazione e la posa di materiale esplosivo all'interno dei fori oppure utilizzando dei particolari scavatori chiamati "*road header*" i quali consentono di ricavare tunnel di qualunque sezione utilizzando una sola macchina, non possibile con una alesatrice, tuttavia ha tempi di realizzazione più lunghi.

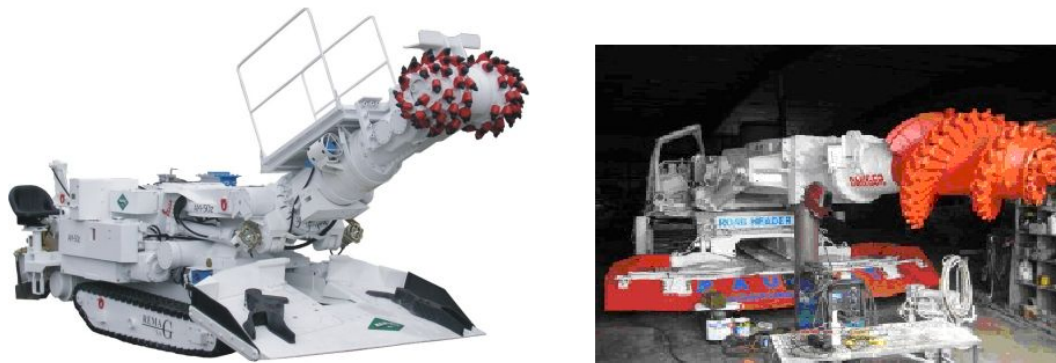


Figura 1.17 Due tipologie di road header

Gli esempi di tunnel multi utilizzazione sono quelli che sfruttano gli spazi destinati al trasporto ferroviario o stradale per la posa di cavi in alta tensione. Gli aspetti centrali sui quali occorre concentrare l'analisi per un servizio efficiente e che riesca a garantire la sicurezza sono:

- **Compatibilità geometrica e problemi d'installazione:** nelle strutture multi utilizzazione, la congestione di vari servizi presenti può presentare degli spazi veramente ridotti per la posa dei cavi di potenza. Risulta quindi fondamentale studiare la compatibilità geometrica tra la struttura e la linea valutando gli ingombri dei giunti e le possibilità offerte dal raggio di curvatura dei cavi stessi. Inoltre, gli spazi e i tempi di installazione fissano dei precisi vincoli sia all'ingombro delle macchine di posa sia alle procedure di fissaggio e di realizzazione dei giunti.

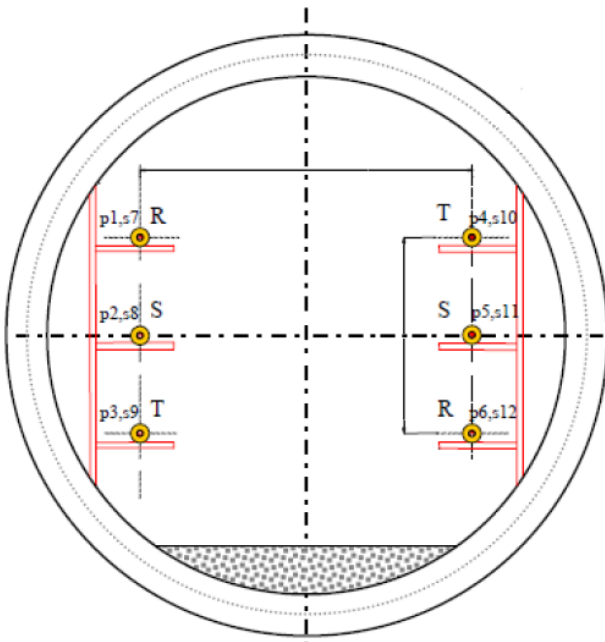


Figura 1.18 Doppia terna alloggiata in tunnel

- **Interferenze elettromagnetiche:** la compatibilità elettromagnetica delle diverse utilizzazioni ricopre un ruolo fondamentale; le tensioni indotte su parti metalliche poste in parallelismo devono essere studiate sia in regime permanente che in caso di guasto.

Bisogna porre attenzione alle apparecchiature elettroniche come per esempio i *pacemakers* cardiaci, i quali in genere non dovrebbero essere esposti a campi magnetici superiori a 0,5 mT.

Per i campi magnetici generati da linee in corrente alternata, si ricorda la Legge Quadro 36/01 del 22/02/2001. Nel caso vi fossero forti limitazioni ai valori di campo magnetico, può essere richiesto di studiare dei sistemi di mitigazione del campo.

Oltre ai calcoli del campo elettromagnetico si devono studiare le eventuali interferenze elettromagnetiche (EMI) tra i vari sistemi in parallelismo [3].

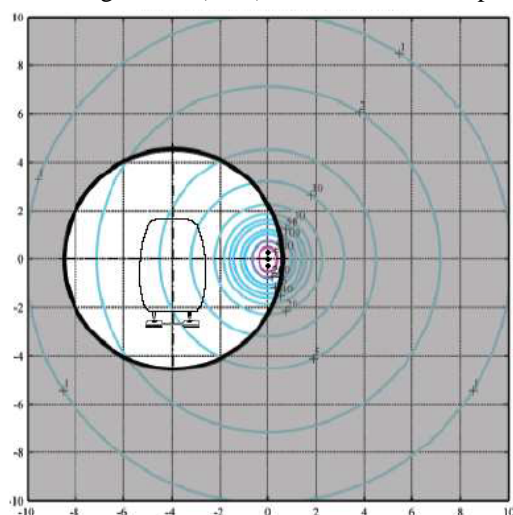


Figura 1.19 Possibile campo elettromagnetico prodotto da una terna di conduttori posti in galleria

- **Effetto di un possibile corto circuito fase schermo:** riveste estrema importanza in caso di linee inserite all'interno di strutture condivise studiare l'effetto di un possibile, ma improbabile, guasto fase-schermo nella conduttura in cavo. In presenza di trasmissione HVAC il valore della corrente di corto monofase varia da nodo a nodo della rete di trasmissione e la sua ampiezza dipende dal cosiddetto stato del neutro (ottenuto in funzione al rapporto tra impedenza sub transitoria alla sequenza diretta e quella alla sequenza omopolare). Il tempo di durata del guasto dipende dalle protezioni e può essere posto pari all'intervento del primo gradino delle protezioni distanziometriche.
- **Comportamento al fuoco:** bisogna porre particolare attenzione sul comportamento al fuoco e la prevenzione degli incendi se si considera i cavi posati in tunnel multi servizio. Dobbiamo considerare la possibilità di scarica elettrica dei cavi di potenza dovuta a cause sia endogene che esogene e la propagazione delle fiamme tra vari sistemi e il modo di bruciare dei cavi.

Ponti

Un'alternativa alle linee sottomarine è rappresentata dai ponti, dove possono essere costruiti, per la posa dei cavi. I ponti costituiscono un collegamento tra due diverse zone (per esempio città, isole, nazioni) e negli ultimi anni si è incrementata la loro costruzione naturalmente si è sviluppata anche la tecnologia alla base della loro costruzione, pertanto oggi le possibilità offerte da queste strutture sono molte.

La gran parte delle applicazioni di cavo su ponti si parla di strutture multi servizio, in quanto non sarebbe conveniente la costruzione di un ponte solamente per l'unica installazione di cavi per la trasmissione d'energia.

I problemi principali da considerare per le applicazioni di questo tipo sono:

- **Iterazioni del cavo con i movimenti longitudinali della struttura:** dobbiamo evitare la presenza di stress localizzati sul cavo nei punti in cui il ponte si espande o contrae. Una soluzione può essere quella di posare il cavo su delle strutture che compensino gli spostamenti del ponte utilizzando dei giunti universali che assorbano i movimenti dovuti alle deviazioni del ponte.

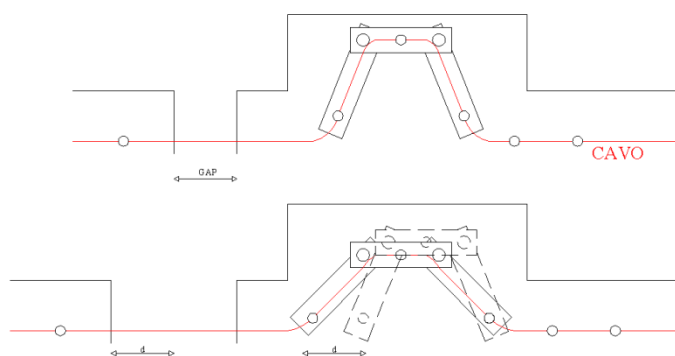


Figura 1.20 Sistema di compensazione per i movimenti longitudinali della struttura

Una soluzione a questi giunti, utilizzata soprattutto negli anni passati, consiste nell'utilizzare una struttura ad arco per supportare i cavi.



Figura 1.21 Struttura ad arco per il supporto dei cavi e la compensazione degli spostamenti

- **Vibrazioni dovute al traffico o cause esterne:** possono essere minimizzate ottimizzando l'intervallo dei supporti dei cavi e tenendo in considerazione la frequenza di risonanza dei cavi e della struttura.
- **La posizione del cavo nel momento dell'installazione:** molto importante rendere agevole anche la possibilità d'accesso per eventuali manutenzioni o controlli.
- **Stabilità rispetto al vento e protezione contro le radiazioni solari**
- **Comportamento al fuoco e protezione da atti vandalici**
- **Protezione dei cavi per telecomunicazioni dalle interferenze elettromagnetiche**
- **Progettazione di sistemi d'installazione e rimozione dei cavi dalla struttura**
- **Interferenza dei campi elettromagnetici sui sistemi di gestione del traffico**
- **Comportamento del ponte all'azione del peso delle linee in cavo**
- **Impatto ambientale del cavo nella struttura (per i cavi in olio)**
- **Nel caso di ponti che attraversino acque salate bisogna conoscere l'effetto corrosivo dell'ambiente salmastro**

Concludendo tunnels e ponti rappresentano soluzioni ottimali di sinergie tra diversi servizi, però è importante prendere in considerazione anche la possibilità di installazioni dei cavi su strade e autostrade.

Cavi sottomarini

I collegamenti sottomarini in tutto il mondo sta aumentando notevolmente, spinti dal desiderio di connettersi a fonti d'energia più economiche o rinnovabili. I progressi nella tecnologia dei cavi sottomarini, il veloce tasso di ritorno degli investimenti, comparabile con la costruzione di stazioni di potenza, e la capacità di ricavare energia da sistemi idroelettrici o eolici hanno reso i collegamenti subacquei molto attraenti.

La resistenza a sollecitazioni sia di tipo meccanico che elettrico di questi sistemi è rafforzata dalla possibilità di produrre spezzoni di cavo di lunghezza considerevole, diminuendo in tal modo la discontinuità lungo il collegamento dovute ai giunti di connessione. Tuttavia trattare cavi molto lunghi richiede strutture di produzione complesse, le quali devono isolare, schermare ed armare il cavo lungo tutta la sua estensione e la possibilità d'immagazzinarli e di trasportarli dalla fabbrica di produzione al sito di posa.

Le operazioni di posa del cavo sono state ottimizzate grazie ai progressi compiuti negli ultimi decenni dalle tecnologie sottomarine, spinte dalle esigenze sempre più complesse delle piattaforme *offshore*, che si sono molto diffuse negli ultimi anni. La posa di cavi in posti impensabili è stata realizzata grazie all'aiuto di sistemi di navigazione sottomarina elettronica, veicoli sottomarini comandabili a distanza, *remotely operated vehicle* (ROV's) sistemi di posizionamento dinamico computerizzato installati su navi specializzate nella posa dei cavi.



Figura 1.22 Nave posacavi italiana "Jules Verne"

Installare cavi in maniera precisa evitando possibili ostacoli del fondale o ad una distanza ben definita da una struttura sottomarina come per esempio una condotta o il suo attraversamento non rappresentano un problema oggi.

Lo sviluppo della tecnologia della posa sottomarina comprende anche le attrezzature per effettuare giunzioni sottomarine laddove il cavo eccede il peso massimo trasportabile della nave di posa e la capacità di mantenere o riparare i cavi in caso di guasti o eventuali danni. Infatti l'intervento delle navi può essere eseguito attraverso sistemi di localizzazione satellitari GPS che possono individuare la

loro esatta posizione rispetto ai cavi attraverso procedure ben consolidate e con l'ausilio di sistemi ROV's.

Nemmeno la profondità è più un problema, infatti test approfonditi affermano infatti che anche alla profondità di 2000 m la posa e manipolazione dei cavi può essere eseguita in maniera ottimale.

Per la posa di questi cavi lo studio approfondito del sito d'installazione ricopre un ruolo centrale, perché sono molteplici i fattori di rischio in questo tipo di applicazione. Pre-scandagliare il fondale, studiare il moto ondoso e le correnti marine, ricerche storiche su relitti di imbarcazioni o residui bellici sommersi devono essere svolte per comprendere la fattibilità tecnica e i vincoli del percorso scelto per il collegamento, così come la conoscenza dell'eventuale presenza di altri cavi o condotte sul fondo del mare.

La posa comporta l'utilizzo d'imbarcazioni particolari, di diverse tipologie in base alla profondità del fondale ed al tipo di operazioni da effettuare sulla linea, se di posa, riparazione, manutenzione o sostituzione, con a bordo gru, carroponti, macchinari per gli scavi sottomarini ed equipaggiamenti subacquei.

Un aspetto non trascurabile per l'operazione di posa è la condizione meteorologica la quale deve essere serena e per un periodo di tempo lungo per poter essere effettuata. Bisognerà dunque valutare attentamente le previsioni meteo per poter identificare il migliore periodo di tempo per effettuare i lavori.

I cavi possono essere posati direttamente sul fondale oppure all'interno di apposite trincee scavate sul fondale per aumentare il livello di protezione, con una profondità che varia da 0,5 a 1,5 m. Infatti le statistiche indicano che le cause principali dei guasti sui cavi sottomarini sono dovuti a cause esterne. Le tecniche per realizzare le trincee possono essere:

- **Aratura del fondale:** tramite un mezzo subacqueo, arando il fondale, va a creare la trincea in cui saranno posati i cavi, la copertura della trincea si formerà spontaneamente, con il deposito di sedimenti sopra i cavi anche se con materiale roccioso questo può creare danni agli stessi che spesso sono difficili da individuare anche attraverso un'ispezione e che possono diminuire la durata di vita del cavo.
Questa tecnica comporta la realizzazione della trincea e la posa del cavo siano fatti in due fasi diverse, comportando un aumento del tempo di posa e quindi dei costi.
- **Fresatura con asportazione di materiale:** anche in questo caso viene prima effettuata la scanalatura del fondale che va a costruire la trincea e successivamente il cavo viene posato e la ricopertura del cavo avviene in modo spontaneo con gli eventuali rischi sopra indicati.
- **Drenaggio del fondale:** si utilizza navi apposite specializzate nel dragare il fondale, successivamente il materiale asportato è utilizzato nel campo delle costruzioni.
- **Perforazione e posa:** mediante particolari mezzi tipo i ROV's è possibile scavare la trincea e allo stesso tempo posare i cavi, il materiale asportato dalla macchina durante l'operazione di perforazione viene poi ributtato sopra i cavi, contribuendo a farli sprofondare. Da un punto di vista dell'installazione questo sistema fa risparmiare molto tempo, ma chiaramente il mezzo necessario è molto costoso rispetto le tecniche precedenti, inoltre molti committenti preferiscono utilizzare altre tecniche per non correre il rischio di rovinare il cavo durante i lavori.

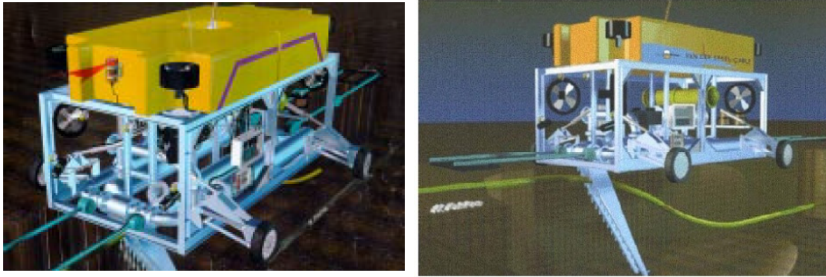


Figura 1.23 Mezzi ROV's per lo scavo e interrimento dei cavi

- Interramento mediante getto d'acqua (CAPJET o HYDRO PLOW):** è l'ultima procedura nata per l'insabbiamento di cavi sottomarini, viene utilizzata una macchina tipo ROV che segue il percorso dei cavi posati sul fondo e fluidifica il fondale attraverso potenti getti d'acqua, creando in tal modo la trincea dove i cavi sprofonderanno. Anche questa tecnologia consente di creare la trincea e posare i cavi allo stesso tempo, ed è la soluzione migliore per evitare possibili danni ai cavi durante i lavori.

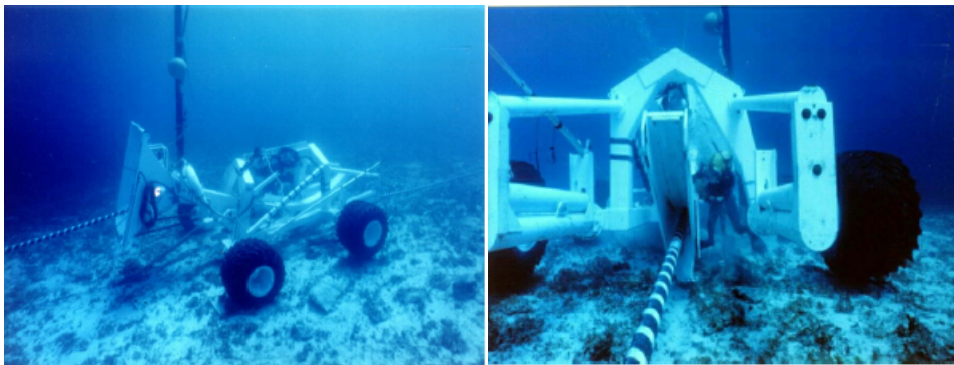


Figura 1.24 Mezzi ROV's per l'interramento del cavo mediante getto d'acqua

Per quanto riguarda i possibili danni ai cavi possiamo individuarli in:

- Variatione della marea in prossimità della terra:** questa zona, in condizioni di bassa marea e con grandi trasferimenti di potenza, la sabbia che ricopre il cavo può asciugarsi provocandone il surriscaldamento. Per contrastare tale effetto è possibile aumentare la profondità di posa nel fondale oppure, dove non fosse possibile, utilizzare un cavo di sezione maggiore.

Una volta in mare raggiunta una determinata profondità tale da poter usare le apposite navi di posa, il cavo potrà essere connesso con apposite giunzioni di sezione normalmente dimensionata.

- **Variazione del fondale:** l'azione delle onde e delle correnti in un sito con una bassa coesione del materiale sabbioso del fondo maggiore può causare lo spostamento di sedimenti. Mentre un loro accumulo determina un maggiore insabbiamento del cavo, con una conseguente maggior protezione, uno spostamento di sedimenti dal cavo causa erosione e sfregamento e quindi il danneggiamento della superficie. Un cambiamento dell'andamento del profilo del fondale può essere causato da moti ondosi e correnti diverse, con la formazione di dune di sabbia, le quali possono andare da qualche cm a diversi m, che nel tempo si spostano attraverso il fondale. Quindi un cavo installato in tale sito sarà soggetto ad interramenti e dissotterramenti nel corso del tempo, fonti di sfregamenti localizzati e generalizzati, piegature ed incurvamenti che introducono tensioni meccaniche e vibrazioni assenti in condizioni normali che possono portare ad una diminuzione della durata di vita del cavo o arrivare anche alla rottura per affaticamento.

I metodi di protezione del cavo per questo tipo di problemi possono essere molto dispendiosi e in alcuni casi richiedono la stabilizzazione del fondale, realizzata mediante la posa di materiale roccioso sul fondo.
- **Dragaggio del fondale:** è importante che la zona di posa non sia soggetta ad attività di dragaggio. Questa è specialmente intensa nelle zone in cui l'attività edilizia è accentuata e quindi la disponibilità di sabbia è importante, altre zone di dragaggio sono quelle soggette alla pesca di molluschi e crostacei, occorre dunque conoscere le rotte di queste imbarcazioni.
- **Calo di ancore in mare:** è possibile che in mare aperto le imbarcazioni, per motivi di emergenza o malfunzionamento dei motori o per condizioni di tempo molto avverso, gettino le ancore in questo modo strisciando sul fondale rallentano la marcia della nave.

C'è poi la possibilità che oggetti pesanti siano calati in mare, specie in prossimità di piattaforme *offshore*, danneggiando o seppellendo tratti di cavo. Questi imprevisti, difficilmente prevedibili, sono cause molto frequenti di danni alle linee sottomarine che per questo si costruiscono con doppia armatura.

Le condizioni climatiche durante la posa dei cavi sottomarini rappresenta una voce importante per la valutazione dei costi e dell'affidabilità del cavo. Se il prolungamento dei lavori di installazione, e quindi il loro costo, dovuto al mal tempo può essere contenuto a valori accettabili studiando il periodo migliore per la posa attraverso le previsioni meteorologiche, questo non può essere fatto durante la condizione di guasto. Nel caso peggiore di condizioni climatiche sfavorevoli con la presenza di un guasto allungano significativamente i tempi e quindi i costi. L'affidabilità delle linee di trasmissione sottomarine può essere aumentata con la posa, assieme alla linea, di cavi ausiliari di emergenza, naturalmente con un costo più elevato.

Vantaggio dei cavi sottomarini è che grazie alla presenza dell'acqua non sono soggetti a surriscaldamenti eccessivi, ed è possibile utilizzare sezioni più piccole rispetto alle applicazioni in cavo interrato, con una diminuzione del costo e del peso del cavo, ed una facilitazione per le operazioni di posa e trasporto e dunque con un'ulteriore riduzione dei costi.

Altri vantaggi riguardano l'isolamento dei cavi, infatti la pressione dell'acqua contribuisce a evitare la presenza di vuoti tra il dielettrico, che è meno sollecitato.

Una volta che il cavo raggiunge la costa è generalmente connesso a una linea aerea o a un altro cavo terrestre; il sito deciso per effettuare questa transizione dovrà essere accessibile per le operazioni di manutenzione e risultare protetto dalle onde, per cui la preparazione di questo tratto di spiaggia va ad incidere sui costi in maniera non indifferente.

CAPITOLO 2

Sistemi HVDC

Introduzione

L'aumento sempre maggiore della richiesta d'energia elettrica, la competitività accesa della liberalizzazione del mercato elettrico e quindi la relativa maggior complessità della gestione dei flussi di potenza in rete, hanno dato un enorme impulso a migliorare ed aumentare la capacità di trasporto della rete elettrica nel suo insieme.

Per risolvere questo tipo di problema si è fatto avanti l'impiego dei sistemi di trasmissione in corrente continua HVDC (*High Voltage Direct Current*) utilizzati in particolare per la trasmissione di potenze elevate su grandi distanze, e quindi l'impiego delle sue varianti tecnologiche quali:

- **LCC (*Line Commutated Converters*)** sistemi a commutazione naturale (impostata dalla frequenza di rete) o controllata tramite valvole tipo SCR.
- **CCC (*Capacitor Commutated Converters*)** caratterizzati dall'utilizzo di condensatori commutatori inseriti in serie tra il trasformatore e il convertitore con valvole a tiristore.
- **VSC (*Voltage Source Converter*)** sistemi auto-commutanti non necessitano della presenza della rete c.a. per il loro funzionamento, il sistema di conversione è indipendente dalla frequenza del sistema di alimentazione. Questi sistemi offrono grandi vantaggi, uno in particolare quello di controllare adeguatamente i flussi di potenza attiva e reattiva, cosa che risulta molto importante nel caso in cui si seguano logiche ottimizzanti di transito, sia per la regolazione in rete sia per i vari contratti stipulati grazie all'introduzione del mercato elettrico. Sono particolarmente utilizzati nel caso di collegamenti via mare, stretti marini (stazioni *offshore*, *wind farm* o collegamenti tra isole), oppure linee in cavo sottoterra quando si presenta l'impossibilità di costruire nuovi elettrodotti per cause legate all'impatto ambientale (riduzione inquinamento elettromagnetico e impatto visivo).

Oltre allo sviluppo dell'elettronica di potenza per la realizzazione dei ponti di conversione soprattutto per quanto riguarda le valvole altre principali parti innovative portate a questi sistemi vi è stato l'impiego di cavi c.c. con isolamento estruso tipo XLPE andando a sostituire i tradizionali cavi in carta impregnata.

Per le valvole del ponte di conversione si parte dai tradizionali SCR (tiristori) utilizzati nei sistemi LCC capaci di sopportare grandi valori di corrente (3000 A) e tensione (circa 5 kV), la chiusura è comandata in corrente, mentre l'apertura avviene quando la corrente che lo percorre passa per lo zero. Lo sviluppo delle valvole ha reso possibile l'accensione e lo spegnimento tramite segnale di comando, partendo dai dispositivi GTO fino all'arrivo delle valvole IGBT (*insulated gate bipolar transistor*) usate nei sistemi VCS, essi consentono di essere comandati in tensione, questo è un grande pregio rispetto a un controllo in corrente in cui si presentano elevate perdite. Un aspetto importante è che commutano a frequenza elevate, per tale motivo il contenuto armonico si presenta in maniera più "lieve" inoltre consentono di limitare le correnti in caso di corto circuiti a valle del convertitore, non richiedendo la presenza di circuiti di *snubber*, semplificando il circuito del ponte di conversione e diminuendo i costi.

Gli IGBT sono le valvole che presentano la maggior potenzialità di sviluppo.

Lo studio dei sistemi HVDC parte dalla valutazione di alcuni aspetti tra cui:

- La tecnologia di base impiegata (LCC, CCC, VSC)
- La qualità della fornitura (inquinamento armonico introdotto dai ponti di conversione)

Andiamo a focalizzarci sulle componenti armoniche introdotte dai ponti di conversione, in modo particolare analizziamo se inserendo l'induttanza di spianamento ed eventuali filtri si riduce il contenuto armonico nel lato c.c. cioè nei cavi di collegamento.

2.1. Linee di trasmissione HVDC

La distanza per la quale la trasmissione in corrente continua diventa economicamente conveniente, rispetto alle linee aeree tradizionali in c.a. a parità di energia trasmessa, è all'incirca 500÷600 km ed è molto più breve per linee in cavo sottomarino.

Naturalmente bisogna valutare economicamente se la convenienza della costruzione delle stazioni di conversione eguaglia i costi di realizzazione delle tradizionali linee,

Con questi tipi d'impianto si possono realizzare interconnessioni di due sistemi in c.a. aventi due frequenze diverse con scambio di potenza in entrambe le direzioni.

Vediamo un convertitore tipo LCC in figura mediante schema a blocchi. La tensione media V_d sul lato continua può essere variata da un valore massimo positivo ad un valore massimo negativo, mentre la corrente per ragioni tecniche di funzionamento delle valvole SCR può avere solo un verso.

Questo tipo di convertitore può operare in due quadranti nel piano $V_d - I_d$, funzionando da raddrizzatore con $V_d > 0$, $I_d < 0$ e flusso di potenza dal lato c.a. al lato c.c., mentre funziona da inverter con $V_d < 0$, $I_d > 0$ e flusso di potenza dal lato c.c. al lato c.a..

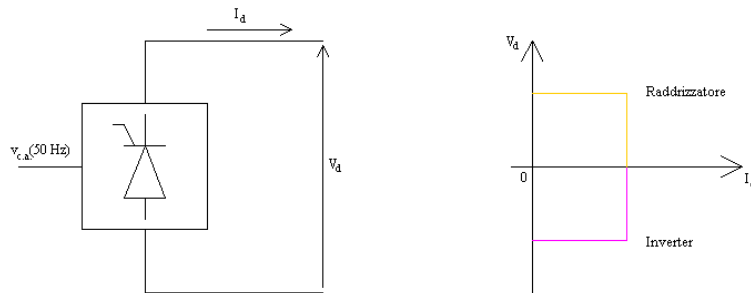


Figura 2.1 Convertitore a tiristori (campo di funzionamento)

In figura 2.2 riportiamo uno schema tipico di un sistema di trasmissione LCC HVDC che collega due sistemi in c.a. indipendenti tra loro.

Riferendoci allo schema supponiamo che il flusso di potenza vada dal sistema A al sistema B, individuiamo la stazione 1 (raddrizzatore), il collegamento via cavo, la stazione 2 (inverter).

Considerando la stazione 1 si ha due aree distinte, una lato corrente alternata e una lato corrente continua. La potenza viene prelevata dal lato c.a. in alta tensione per poi essere adattata ai valori idonei alla trasmissione in c.c. attraverso il trasformatore di conversione, poi viene raddrizzata dalla configurazione di ponti adottata. Nel punto di ricezione la potenza in continua viene resa alternata mediante la stazione 2 e la tensione abbassata a valori di ampiezza in modo da corrispondere alla tensione in alternata del sistema B.

Ogni stazione possiede un polo positivo e un polo negativo, a seconda della potenza da trasmettere si sceglie la configurazione di trasformazione più idonea, per esempio per grandi potenze ogni polo è formato da due convertitori trifase a 6 impulsi alla frequenza di rete, alimentati mediante un trasformatore a tre avvolgimenti oppure due trasformatori in parallelo uno Y/ Δ e uno Y/Y per realizzare la configurazione a 12 impulsi.

Sul lato c.a. vi sono dei filtri per ridurre le armoniche di corrente generate dai convertitori iniettate nel sistema c.a.. Inoltre accoppiati ai filtri vi sono i banchi di condensatori per compensare l'enorme richiesta di potenza reattiva da parte del convertitore, infatti per gli impianti tipo LCC la potenza reattiva necessaria raggiunge il 50% della potenza attiva trasmessa.

Nel lato c.c. mediante induttori di spianamento (*smooth reactor*) L_{sr} e filtri in c.c. si migliora la forma della corrente e della tensione rendendoli più costanti possibile.

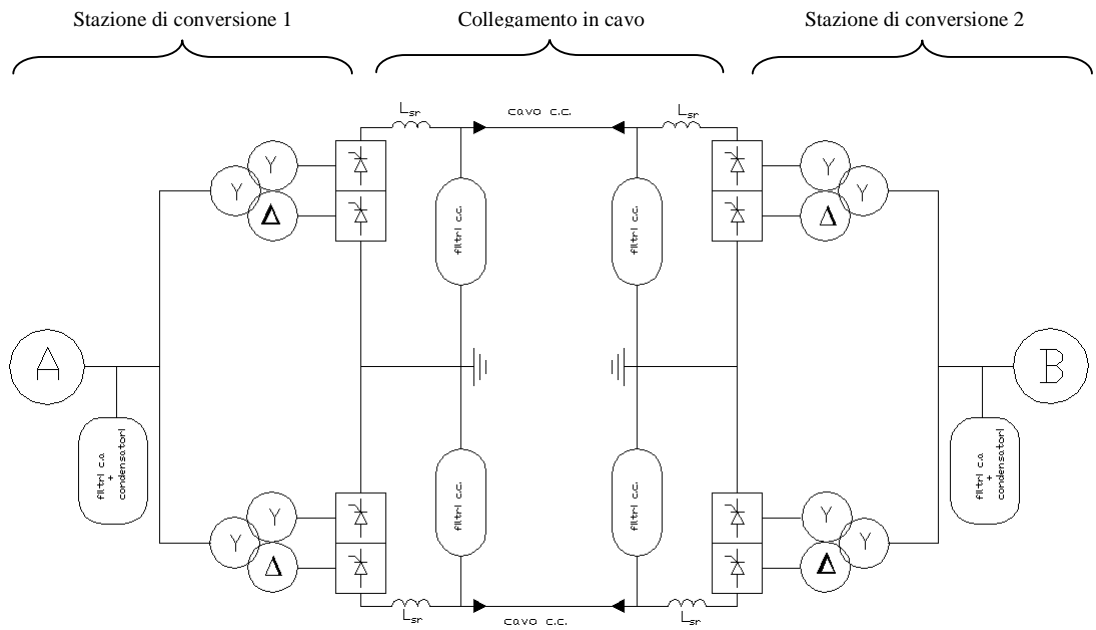


Figura 2.2 Schema di un sistema HVDC LCC

In base alla potenza da trasmettere e al funzionamento che si vuole garantire sono possibili diversi tipi di configurazione tecniche per quanto riguarda il collegamento in c.c., rappresentiamo qui di seguito gli schemi tipicamente utilizzati.

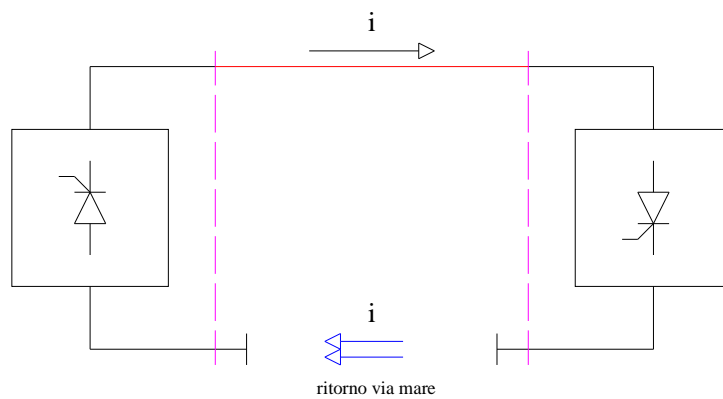


Figura 2.3 Schema monopolare con ritorno via mare

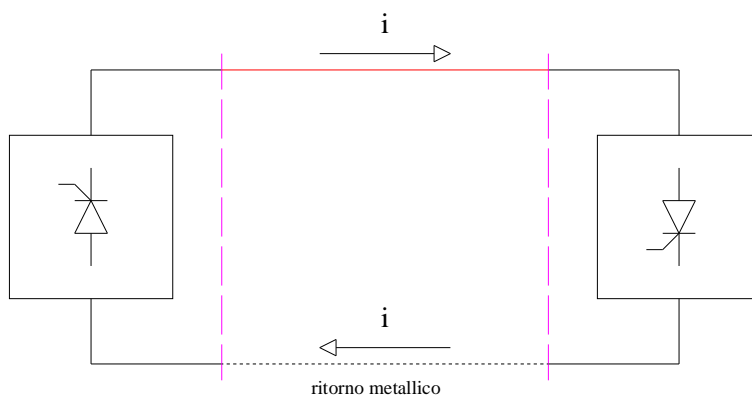


Figura 2.4 Schema monopolare con ritorno metallico

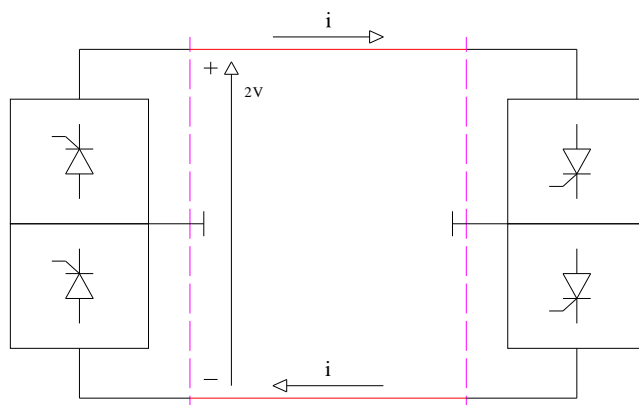


Figura 2.5 Schema bipolare con elettrodi d'emergenza

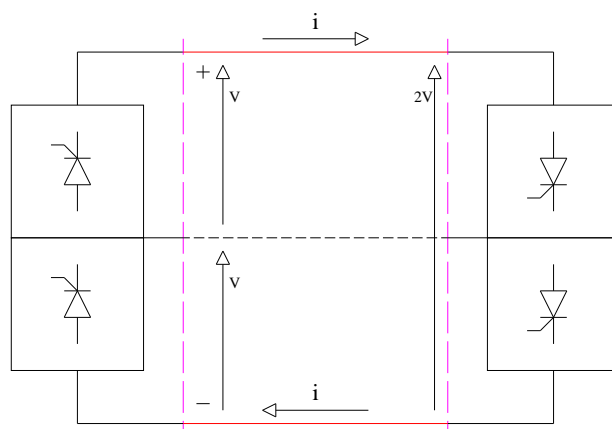


Figura 2.6 Schema bipolare con ritorno metallico

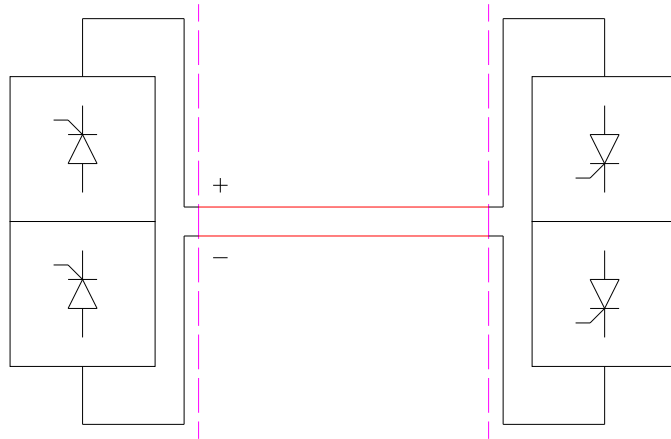


Figura 2.7 Schema bipolare senza ritorno

2.1.1 Convertitore trifase

Andremo ora a studiare il principio di funzionamento del convertitore trifase dispositivo fondamentale per la trasmissione HVDC, per capire il contenuto armonico messo in gioco in entrambi i lati del sistema elettrico e la possibilità di ridurlo tramite appositi accorgimenti.

Il circuito in figura 2.8 preso con $L_s=0$, $I_d=\text{cost}$ ipotesi semplificative per capire meglio il funzionamento, in seguito si introdurrà il parametro L_s e vedremo come si comporterà il convertitore [4].

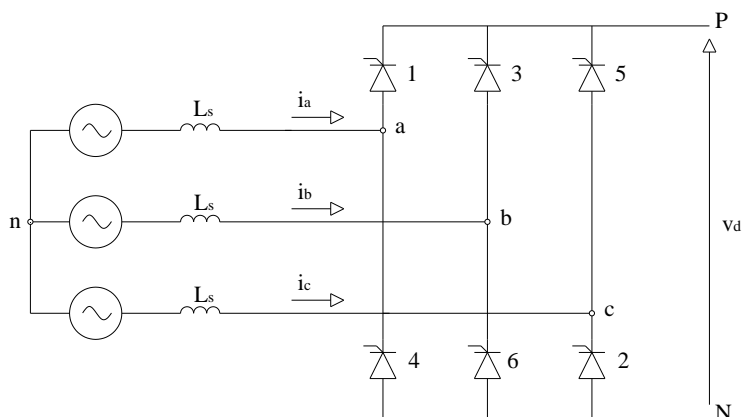


Figura 2.8 Convertitore a tiristori 3F

Ci sono 3 rami ognuno composto da 2 tiristori, il ponte viene anche chiamato convertitore a 6 impulsi. Lo scopo è ottenere sul lato c.c. una tensione e una corrente più costanti possibile, nella realtà sarà presente un certo *ripple* di conseguenza ci sarà un certo contenuto armonico.

In figura 2.5 riportiamo l'andamento delle tensioni sulle fasi e sui poli lato continua con un angolo d'innesco $\alpha=0$ e $L_s=0$. Nel gruppo di valvole superiore (1,3,5) conduce il tiristore che ha potenziale più alto (polarizzazione diretta), mentre gli altri due sono polarizzati inversamente. Nel gruppo inferiore (2,4,6) conduce il tiristore che ha potenziale più basso, mentre gli altri due non conducono. Il passaggio di conduzione della corrente da un diodo all'altro avviene istantaneamente, questo perché si è ipotizzato $L_s=0$.

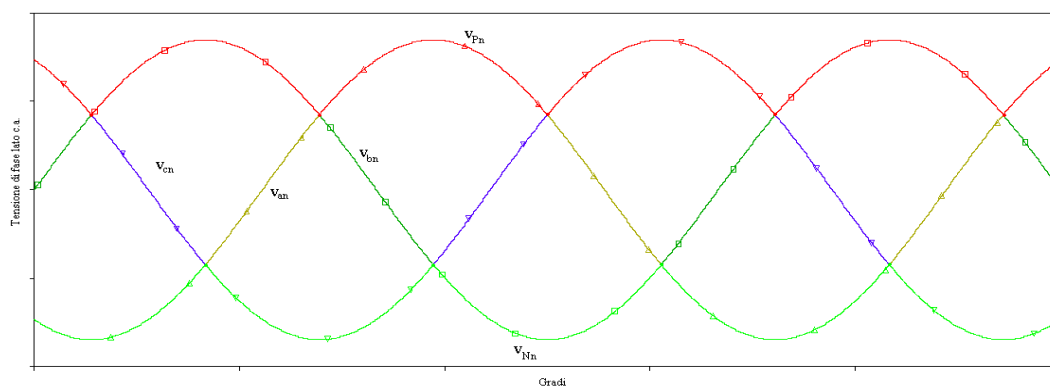


Figura 2.9 Andamento delle tensioni sulle fasi a b c e sui poli lato c.c.

In figura 2.9 si riporta l'andamento della tensione v_{pn} cioè l'andamento della differenza di potenziale tra il punto P e il punto di neutro n e l'andamento della differenza di potenziale tra il punto N e il punto di neutro n cioè la tensione v_{Nn} . La tensione v_d è data dall'equazione:

$$v_d = v_{pn} - v_{Nn}$$

L'andamento della tensione lato continua è mostrato in figura 2.10, si nota che v_d è composta da 6 onde ogni periodo $T=2\pi$, (360°) ecco perché viene chiamato convertitore a 6 impulsi. Ogni valvola conduce per 120° .

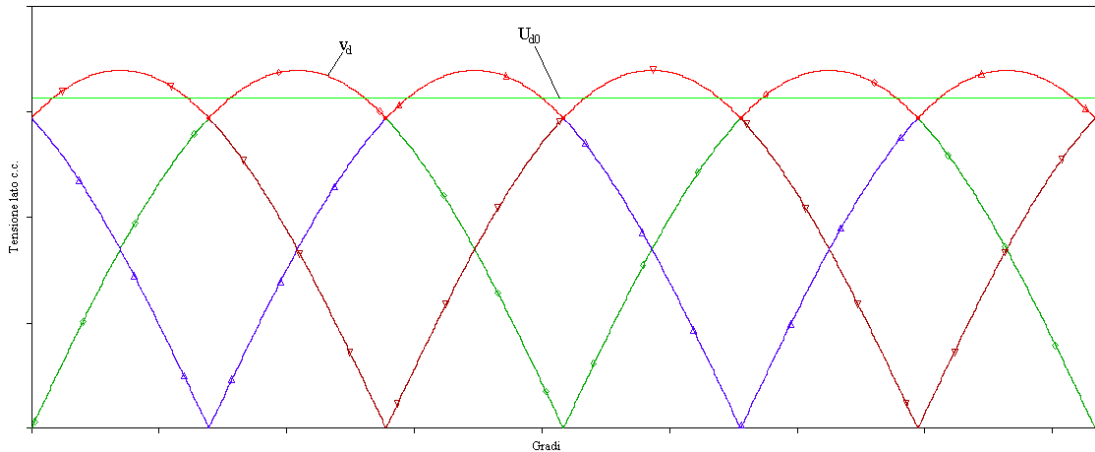


Figura 2.10 Tensione lato continua

Il valore medio della tensione continua U_{d0} è ricavato integrando la tensione v_d nell'intervallo tra $[\frac{\pi}{6} \div \frac{\pi}{2}]$ diviso per l'intervallo stesso $\frac{\pi}{3}$.

$$U_{d0} = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{2} V_{LL} \cos \omega t d(\omega t) = 1,35 V_{LL}$$

Dove V_{LL} è il valore efficace della tensione concatenata lato c.a. perché in ogni intervallo di 60° la tensione v_d è la differenza istante per istante delle tensioni stellate.

Andando ad aumentare l'angolo di innesco α di ogni valvola si andrà a ritardare a conduzione e quindi si ridurrà il valore medio della tensione in uscita dal convertitore.

L'area A_α [Vs] che compare ogni 60° , riportata in figura 2.11, comporta una riduzione del valore medio della tensione v_d in funzione dell'angolo di ritardo α .

Si ricava che:

$$V_{d\alpha} = 1,35 V_{LL} \cos \alpha = V_{d0} \cos \alpha$$

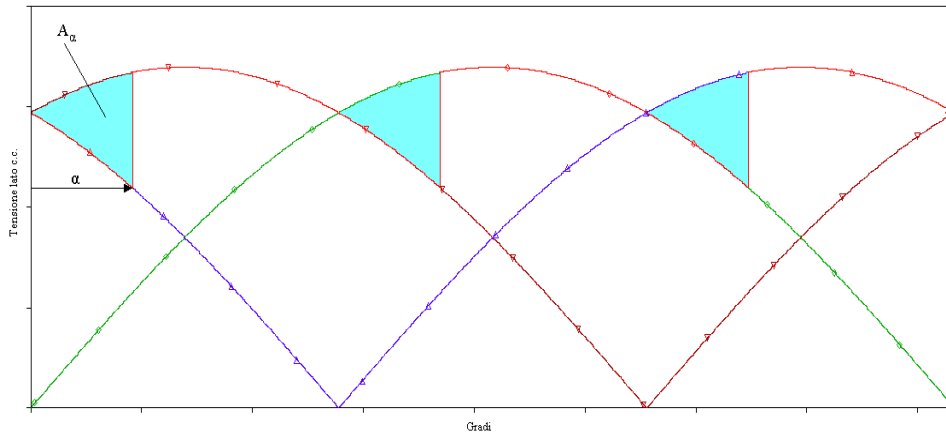


Figura 2.11 Tensione lato continua con $\alpha \neq 0$

Per quanto riguarda la presenza dell'induttanza di accoppiamento L_s fa sì che il passaggio di corrente tra una valvola e l'altra non avvenga istantaneamente come si aveva ipotizzato ma avviene in un certo intervallo di tempo. Durante l'intervallo di commutazione ci si ritrova con due tiristori che conducono contemporaneamente e le corrispondenti tensioni di fase si trovano in corto circuito causando un buco di tensione. Nello stesso intervallo, nel tiristore che si sta spegnendo la corrente passa da I_d a zero, mentre nel tiristore che si sta accendendo la corrente passa dal valore nullo al valore I_d , questo è il passaggio di corrente tra una valvola e la successiva.

Tutto questo comporta una riduzione del valore medio della tensione lato c.c., proporzionale all'area A_u (figura 2.12) questa dipende dal valore dell'induttanza L_s e dal valore della corrente I_d . Quindi, rispetto a $V_{d\alpha}$ il valore della tensione lato continua è:

$$V_d = 1,35V_{LL} \cos \alpha - \frac{3\omega L_s}{\pi} I_d$$

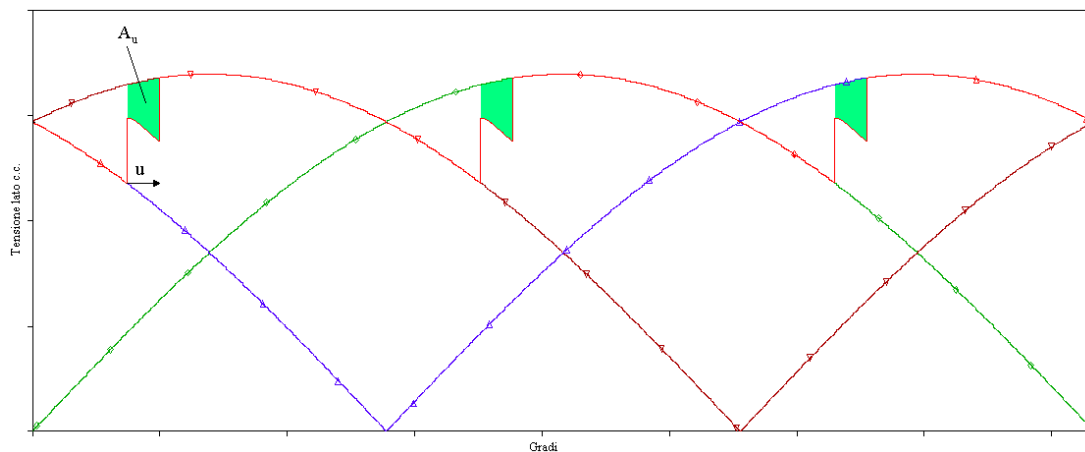


Figura 2.12 Tensione lato continua con $L_s \neq 0$

Come si vede in figura 2.10 il *ripple* si ripete ogni 60° , quindi la tensione V_d ha una frequenza 6 volte quella di linea. Le varie componenti armoniche possono essere ricavate mediante l'analisi di Fourier. Si ricava che gli ordini delle armoniche che compongono il segnale di tensione e di corrente sia nel lato alternata sia in quello continua, dipendono dal numero degli impulsi che genera il convertitore.

Un convertitore con numero di impulsi uguale a p idealmente genera una sequenza di armoniche di tensione di ordine pk sul lato c.c. e armoniche di corrente di ordine $pk \pm 1$ sul lato c.a. dove k è un numero intero.

Questi ordini di armoniche sono determinate sulla base delle ipotesi seguenti:

- **Terna di tensioni simmetrica ed equilibrata nella rete di alimentazione c.a.**
- **La corrente lato c.c. è costante**
- **Funzionamento perfetto delle valvole**
- **Impedenza d'accoppiamento è la stessa nelle tre fasi (l'angolo di commutazione μ uguale per tutti)**

A causa delle elevate potenze in gioco è importante ridurre le armoniche di corrente generate sul lato c.a. e il *ripple* di tensione presente sul lato c.c..

Per questo utilizziamo la configurazione dodecafase, mostrata in figura 2.13, la quale richiede due convertitori a sei impulsi alimentati ciascuno da una terna di tensione sfasata di 30° l'una rispetto l'altra.

I due convertitori sono collegati in serie sul lato c.c. e in parallelo sul lato c.a..

Sul lato c.c. il collegamento in serie dei due ponti soddisfa l'esigenza di aver una tensione elevata, caratteristica dei sistemi HVDC.

Con questa configurazione si ha sul lato c.c. la sovrapposizione di due andamenti a 6 impulsi sfasati di 30° , si ottiene così un andamento a 12 impulsi in un periodo (figura 2.14), cioè un impulso ogni 30° e non più ogni 60° .

Questo comporta armoniche di tensione lato c.c. di ordine $12k$.

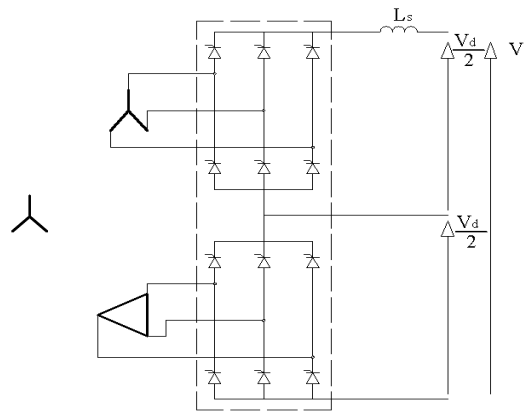


Figura 2.13 Configurazione di un convertitore a 12 impulsi

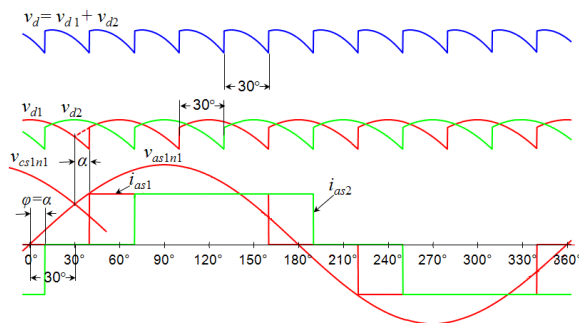


Figura 2.14 Tensione lato continua in configurazione 12 impulsi

2.1.2. Armoniche lato continua

Nel ponte trifase a sei impulsi l'ordine delle armoniche risulta essere $n=6k$.

Prendendo in considerazione l'angolo d'innescio α , l'angolo di commutazione u e quindi dell'induttanza di accoppiamento L_s la forma d'onda della tensione in figura 2.12 nell'intervallo $\frac{\pi}{3}$ è composta da tre diversi andamenti:

$$v_d = \sqrt{2}V_{LL} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \quad [0 < \omega t < \alpha]$$

$$v_d = \sqrt{2}V_{LL} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) + \frac{1}{2}V_{LL} \sin(\omega t) = \frac{\sqrt{6}}{2}V_{LL} \cos(\omega t) \quad [\alpha < \omega t < \alpha + u]$$

$$v_d = \sqrt{2}V_{LL} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \quad [\alpha + u < \omega t < \frac{\pi}{3}]$$

Dall'analisi di *Fourier* il valore efficace delle armoniche di tensione sono ricavabili dalla seguente espressione:

$$V_n = \frac{V_{c0}}{\sqrt{2}(n^2 - 1)} \left\{ (n-1)^2 \cos^2\left[(n+1)\frac{u}{2}\right] + (n+1)^2 \cos^2\left[(n-1)\frac{u}{2}\right] - 2(n-1)(n+1) \cos\left[(n+1)\frac{u}{2}\right] \cos\left[(n-1)\frac{u}{2}\right] \cos[2\alpha + u] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Dove V_{c0} è il valore della componente continua e n l'ordine dell'armonica.

Da questa espressione si ricava il valore relativo della componente armonica in funzione dell'angolo d'innescio e di commutazione.

Nel caso ideale con $\alpha=0$, $u=0$ il valore relativo alla n -esima armonica è:

$$\frac{V_n}{V_{c0}} = \frac{\sqrt{2}}{(n^2 - 1)} \approx \frac{\sqrt{2}}{n^2}$$

Otteniamo, per quanto riguarda la sesta la dodicesima e la diciottesima armonica, rispettivamente 4.04, 0.99 e 0.4% della tensione nominale.

Andando a considerare $\alpha=\frac{\pi}{2}$, $u=0$ il valore relativo della n -esima armonica risulta:

$$\frac{V_n}{V_{c0}} = \frac{\sqrt{2}}{(n^2 - 1)} \approx \frac{\sqrt{2}}{n}$$

Si può notare come prima cosa che con l'aumentare dell'angolo di ritardo α si ha un incremento dell'ampiezza di ogni singola armonica mentre con l'aumentare dell'angolo di commutazione u e quindi del valore dell'induttanza L_s si ha una progressiva diminuzione di ampiezza delle armoniche.

Si nota subito che più alto è l'ordine delle armoniche introdotte più basso è il valore delle corrispondenti componenti, diminuendo così la distorsione del segnale [5].

2.1.3. Armoniche lato alternata

Per quanto riguarda le armoniche per il lato alternata tramite l'analisi di Fourier possiamo andar a scomporre nel seguente modo:

$$i_{a1} = \frac{2\sqrt{3}I_d}{\pi k} \left(\cos \theta - \frac{\cos 5\theta}{5} + \frac{\cos 7\theta}{7} - \frac{\cos 11\theta}{11} + \frac{\cos 13\theta}{13} - \frac{\cos 17\theta}{17} + \frac{\cos 19\theta}{19} - \dots \right)$$

$$i_{a2} = \frac{2\sqrt{3}I_d}{\pi k} \left(\cos \theta + \frac{\cos 5\theta}{5} - \frac{\cos 7\theta}{7} - \frac{\cos 11\theta}{11} + \frac{\cos 13\theta}{13} + \frac{\cos 17\theta}{17} - \frac{\cos 19\theta}{19} - \dots \right)$$

$$i_a = i_{a1} + i_{a2} = \frac{4\sqrt{3}I_d}{\pi k} \left(\cos \theta - \frac{\cos 11\theta}{11} + \frac{\cos 13\theta}{13} - \frac{\cos 23\theta}{23} + \frac{\cos 25\theta}{25} - \dots \right)$$

Notiamo che i due convertitori esafase in configurazione 12 impulsi introducono armoniche di corrente nel lato alternata con ordine $n=12k \pm 1$, dunque bisognerà andar a progettare dei filtri in modo tale da attenuare il contenuto armonico ponendo particolare attenzione anche a eventuali risonanze con la rete.

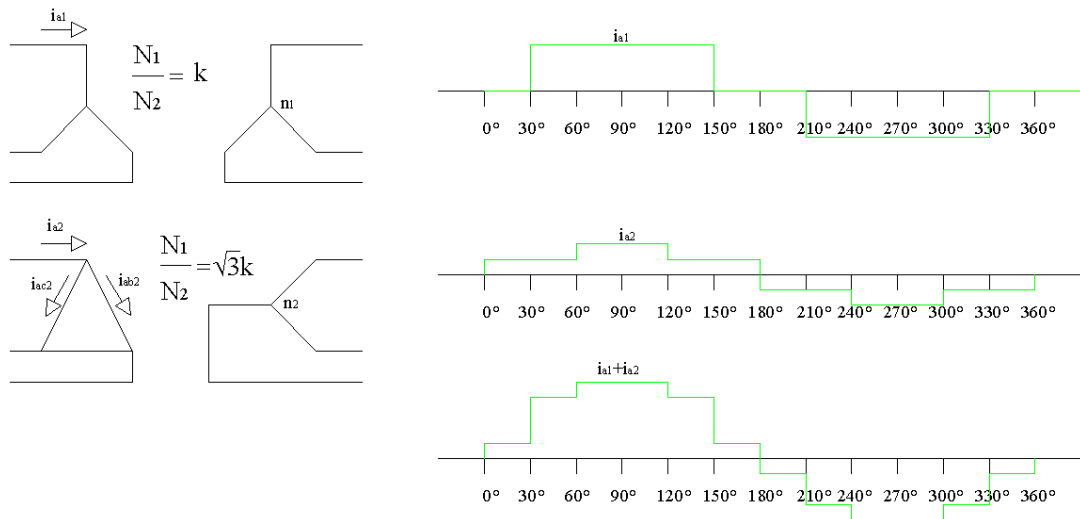


Figura 2.15 Correnti lato alternata [6]

2.1.4. Circuito elettrico per lo studio armonico lato c.c.

Le armoniche di tensione generano armoniche di corrente, l'obiettivo è quello di render minima l'interferenza prodotta da queste armoniche con altri sistemi elettrici che si trovano nelle vicinanze della linea di trasmissione (es. sistemi ferroviari, linee di telecomunicazione ecc...). Le armoniche di tensione per un convertitore a 12 impulsi sono di ordine multiple di 12, e la loro ampiezza dipende dai valori dell'angolo α e dal valore dell'induttanza L_s in serie alle tre fasi.

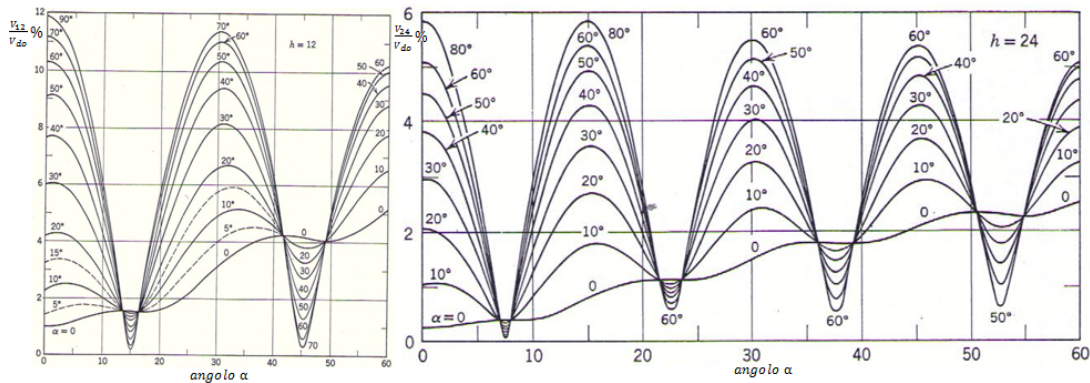


Figura 2.16 Armoniche di tensione lato continua in funzione dell'angolo α [7]

Per lo studio in regime armonico lato c.c. in condizioni di funzionamento equilibrato, le armoniche di tensione possono essere rappresentate con dei generatori di tensione ideali, uno all'inizio della linea e uno alla fine. La procedura standard è di alimentare la linea prima dal punto di partenza e poi dal punto d'arrivo e procedere con il metodo di sovrapposizione degli effetti. Tramite il *Metodo Multiconduttore* questo si può fare con un solo passaggio alimentando contemporaneamente ambo i lati della linea, in un sola iterazione si risolve il problema.

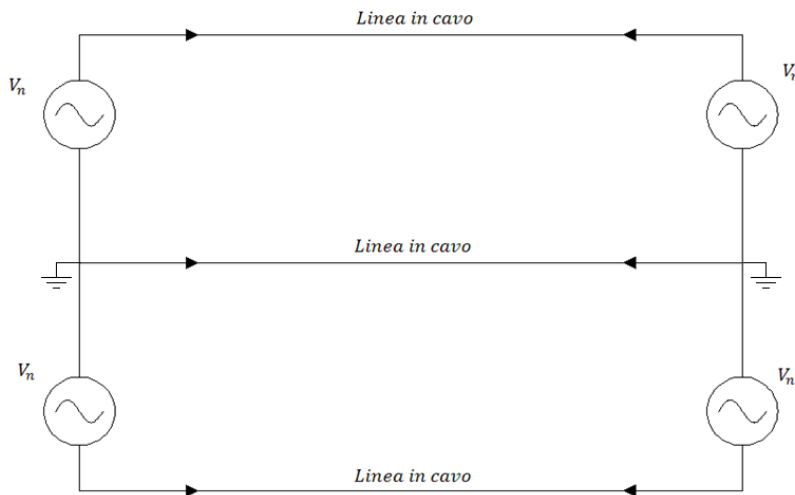


Figura 2.17 Schema per lo studio armonico

In questo lavoro si andrà a studiare, una volta individuate l'ampiezza e le corrispettive frequenze delle armoniche introdotte dal convertitore a 12 impulsi sul lato continua, come si mitigano andando a inserire l'induttanza di spianamento L_{sr} ed eventuali filtri.

2.2. Sistemi HVDC CCC

I sistemi con convertitori a commutazione con condensatori (CCC) furono introdotti all'inizio degli anni '90 però il primo impianto ad entrare in funzionamento fu nel 1999. I principali vantaggi di questi sistemi si possono notare nelle reti c.a. deboli soprattutto nel punto di distribuzione in quanto offre un comportamento migliore dei sistemi tradizionali HVDC.

In molti casi in un sistema multi-livello, almeno un inverter funziona con un rating inferiore rispetto gli altri, e spesso è connesso a una rete debole. La configurazione CCC per quell'inverter si tradurrebbe in un miglioramento delle prestazioni per l'intero sistema HVDC in quanto si ridurrebbe il rischio di fallimento della commutazione delle valvole, di disturbi nella rete a.c. e si migliorerebbe la stabilità rispetto i convenzionali convertitori.

Il consumo di potenza reattiva nei sistemi HVDC tradizionali è di circa il 50% della potenza attiva. La compensazione viene effettuata tramite un appropriato numero di filtri/shunt, normalmente il dimensionamento del banco di filtri o condensatori è determinato dalle esigenze del sistema della potenza reattiva necessaria, la quale deve non deve superare uno specifico intervallo di tolleranza, e dal valore di tensione nominale. Questo si traduce nell'inserire/togliere spesso questi banchi di filtri/shunt quando la potenza attiva cambia specialmente nelle reti a.c. deboli.

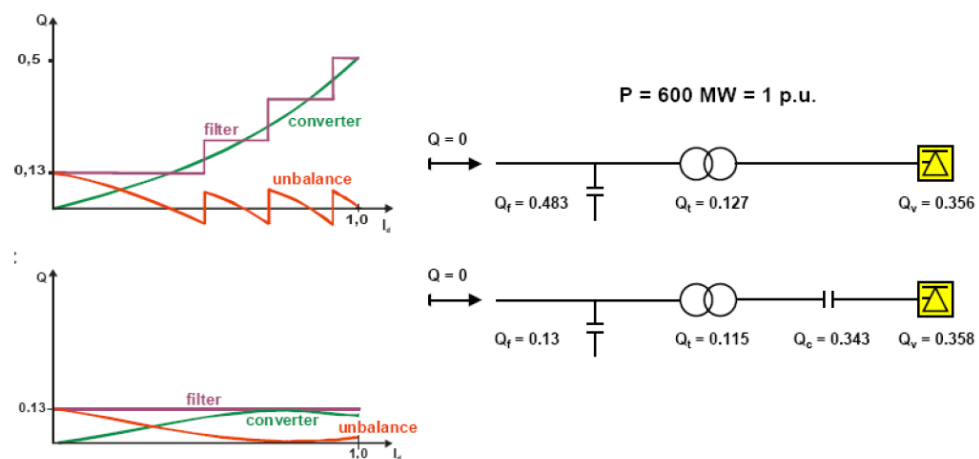


Figura 2.18 Potenza reattiva per un convertitore LCC ed uno CCC

Il funzionamento per un sistema HVDC CCC, si basa sul principio che i condensati di commutazione, collegati in serie tra il trasformatore e il convertitore (figura 2.19), da un ulteriore contributo alla commutazione della valvola. Come risultato di questo contributo aggiuntivo di tensione, è richiesta una minor quantità di potenza reattiva di compensazione rispetto l'HVDC LCC. Inoltre il contributo cresce con il carico, e questo compensa la crescita di potenza reattiva nei trasformatori e nel processo di conversione.

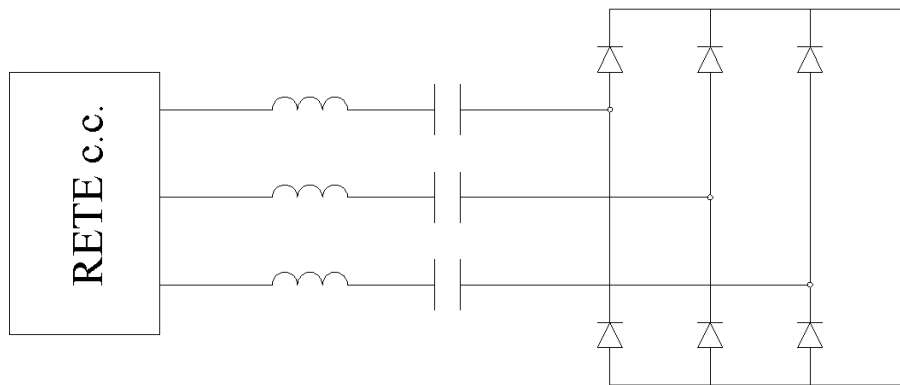


Figura 2.19 Schema di un convertitore CCC

Per questi convertitori non sono necessari dei shunt per la compensazione della potenza reattiva quando la potenza attiva varia, come possiamo notare in figura 2.18, servono solo dei filtri per attenuare il contenuto armonico presente. Inoltre anche nel lato inverter le prestazioni sono più affidabili con una migliore stabilità dinamica e una minor sensibilità ai disturbi della rete c.a. connessa.

La configurazione CCC sollecita alcuni componenti a differenti tipi di stress:

- **Come risultato del contributo dei condensatori di commutazione, la tensione sul ponte aumenta mentre diminuisce la sua corrente di corto circuito**
- **Hanno minor perdite a vuoto di un tradizionale convertitore, in quanto il trasformatore può essere progettato per una potenza nominale minore. Questo è possibile perché i condensatori minimizzano la potenza reattiva che fluisce attraverso esso.**
- **Le perdite operative sono leggermente più alte in quanto le correnti armoniche e la tensione sulle valvole durante l'apertura aumentano**

Un inverter di tipo CCC si opporrà ad un collasso di tensione in caso di guasto sul sistema, mentre un tradizionale convertitore ,molto probabilmente, accelererebbe tale crollo.

Per un tradizionale HVDC LCC:

- Il consumo di potenza reattiva aumenta con l'aumento della corrente
- L'aumento del consumo di potenza reattiva riduce ulteriormente la tensione del sistema
- Vi è il rischio di collasso di tensione

Nel caso di HVDC CCC, invece, il consumo di potenza reattiva diminuisce quando la corrente aumenta, e tutto il sistema può essere controllato con il minimo margine di commutazione grazie alla tensione supplementare ottenuta dai condensatori di commutazione. Così, il beneficio portato dalla potenza reattiva fornita dalla stazione CCC, inclusi i filtri, sarà positivo e andrà a contrastare un eventuale collasso di tensione.

Altro pregio riguarda l'eventuale risonanza tra filtri e l'impedenza di rete, infatti i tradizionali sistemi HVDC sono dotati di un insieme relativamente grande di filtri e banchi di condensatori connessi a terra. Potrebbe verificarsi una risonanza parallelo tra questi e l'induttanza di rete. Questo rischio è ridotto al minimo nei CCC, in quanto richiedono un condensatore di filtraggio relativamente piccolo [8].

2.3. Sistemi HVDC VSC

L'HVDC VSC è basato su convertitori a tensione impressa che si estendono nel campo della trasmissione con potenze di pochi MW fino ad arrivare a 1000 MW con tensioni che non superano i 320 kV.

Lo sviluppo dell'elettronica di potenza ha reso possibile il miglioramento delle valvole di commutazione, in particolare lo sviluppo dei IGBT (*insulate gate bipolar transistor*) che permettono d'essere comandati in tensione sia in accensione che in spegnimento e non più in corrente come i GTO (*gate turn-off thyristor*) comandabili solo in spegnimento i quali presentavano eccessive perdite di efficienza.

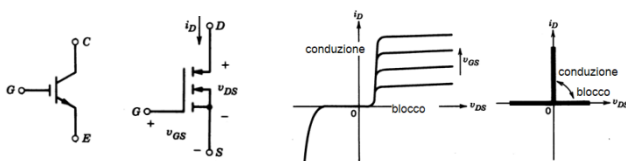


Figura 2.20 Simbolo elettrico e caratteristiche elettriche di un IGBT

Gli IGBT sono in grado di commutare a frequenze elevate (100 kHz), di sopportare tensioni elevate (sia diretta che inversa) e consentono il passaggio di elevati valori di corrente (dai 1000÷1500A). Attenzione che con l'aumentare della frequenza di commutazione i valori di tensione e corrente sopportate diminuiscono.

L'elevata frequenza di commutazione permette la generazione d'armoniche con frequenze che si trovano distanti rispetto la frequenza industriale e quindi meno gravoso per l'impegno dei filtri per l'eliminazione di esse.

Queste valvole hanno permesso lo sviluppo dei sistemi VSC, riportiamo in figura 2.21 uno schema tipico:

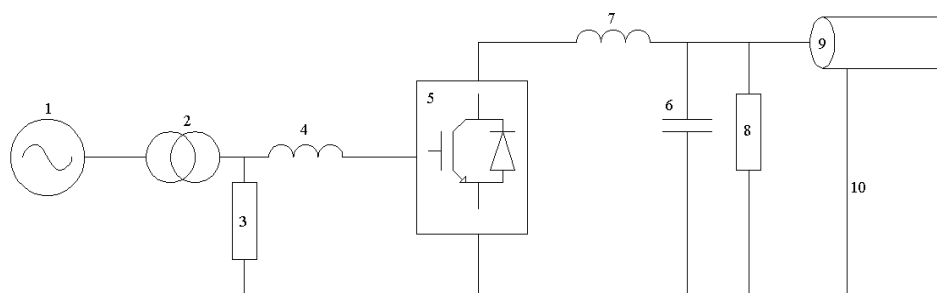


Figura 2.21 Sistema VSC HVDC

Individuiamo:

- **La connessione con la rete principale (1)**
- **Il trasformatore di conversione per alzare il livello di tensione per la trasmissione idonea (2)**
- **Filtri c.a. regolati sulle armoniche generate dal convertitore a seconda del tipo di modulazione adottato (3)**
- **Induttanza d'interfaccia che ha la funzione sia di stabilizzare la corrente alternata sia di permettere il controllo della potenza transitante (4)**
- **Convertitori a tensione impressa (5)**

- **Banchi di condensatori che hanno il compito di mantenere la tensione costante necessaria per il corretto funzionamento del ponte (6)**
- **Reattore di spianamento (7)**
- **Filtri c.c. (8)**
- **Cavo c.c. (9)**
- **Messa a terra dello schermo e dell'armatura del cavo (10)**

Il punto di messa a terra del o dei condensatori e filtri dipende dal tipo di configurazione scelto per il collegamento.

Rispetto i sistemi HVDC LCC–CCC i sistemi VSC indipendentemente del flusso di potenza attiva può fornire o prelevare potenza reattiva dalla rete c.a. al quale è collegato, comportandosi come un generatore sincrono in sovra o sottoeccitazione. Il ponte è in grado di operare in tutti e quattro i quadranti nel piano P-Q.

La stazione di conversione non incrementa il livello di corto circuito in quanto la presenza delle valvole IGBT consentono un controllo della corrente di guasto erogata, limitandola al massimo, transitoriamente di $1,2 \div 1,5$ volte la corrente nominale.

Un sistema HVDC VSC è in grado di fornire altri servizi ulteriori per esempio:

- **Scambio di potenza reattiva con la rete c.a. nei due versi e quindi partecipare alla regolazione della tensione**
- **Attua un controllo della potenza attiva con un controllo della frequenza della tensione di rete**
- **Alimenta una parte di rete resa passiva, fornendo potenza attiva e reattiva richiesta dal carico. Quest'impianto può garantire la funzione “black start”, in seguito a un collasso di tensione è in grado d'alimentare un'intera area totalmente passiva**

Le applicazioni di questi sistemi possono essere:

- **Collegamenti con siti di generazione posizionati in luoghi lontani dalla rete di utilizzo:** in particolare ad energia rinnovabile, ad esempio siti eolici e idroelettrici.
Quando un parco eolico si trova in mare aperto ne giustifica un collegamento in c.c.. Un VSC connesso ad una *wind farm* è in grado di variare la tensione e la frequenza della rete c.a. a cui sono connessi i generatori, così da consentire una ottimizzazione della potenza generata dagli stessi, adattando la frequenza di rete e dunque dell'avvolgimento di statore dei generatori, in funzione della velocità del vento. La distanza degli impianti *offshore* dalle coste può arrivare fino a 50 km.
- **Possibilità di alimentare reti deboli o passive:** permette di fornire energia elettrica a carichi isolati o integrare una generazione locale.
Si collegano aree geografiche attraverso mari o stretti per ottenere scambi di potenza aumentando la stabilità della rete.
- **Collegamento *back-to-back*:** permette la connessione di reti asincrone cioè l'interfacciamento di due sistemi elettrici con regolazione indipendentemente della frequenza, con la precisa necessità di controllare lo scambio di potenza in entrambe le direzioni, di diminuire le variazioni di tensione e di limitare le correnti di guasto.

2.3.1. Convertitori a tensione impressa

La stazione di conversione può essere utilizzata come raddrizzatore, cioè assorbendo potenza attiva dalla rete c.a. oppure come inverter, fornendo potenza attiva alla rete c.a. mantenendo la tensione in continua più costante possibile al valore di dimensionamento, questo per ridurre le perdite di energia da una stazione all'altra, risultando quasi essenzialmente dipendenti dalla tensione.

L'impiego di valvole con tempi di commutazione brevissimi consentono d'abbassare in modo decisivo il contenuto armonico di entrambi i lati rispetto i tradizionali sistemi HVDC riducendo di molto la taglia dei filtri installati. Inoltre sono disponibili soluzioni con più convertitori nella stessa stazione, con uno schema più complesso si andrà a produrre un'onda di tensione in uscita al convertitore molto prossima alla sinusoidale, sfruttando l'elevata frequenza di commutazione delle valvole la sinusoidale è composta da ripetuti gradini di tensione [9].

I principali fattori che portano alla scelta di questi convertitori sono:

- **Controllo della potenza reattiva indipendente dalla potenza attiva**
- **Dimensionamento ridotto dei filtri c.a. e c.c.**
- **Non vi sono limiti minimi di funzionamento per la potenza da trasmettere:** mentre per i sistemi HVDC LCC il limite era del 10% della potenza nominale, nel convertitore a tensione impressa praticamente la potenza minima risulta nulla, tranne quella necessaria per mantenere la tensione sul cavo al valore nominale
- **Funzione "black start":** ovvero capacità di alimentare zone passive
- **Questo tipo di convertitori non sono soggetti a "commutazioni fallite"** i quali sono affetti i ponti di conversione a tiristori dell'HVDC LCC provocando interruzioni momentanee del trasferimento di potenza, questo avviene negli intervalli di tempo in cui sono presenti disturbi in rete provocando la mancata accensione delle valvole
- **Partecipazione della regolazione di tensione nella rete c.a.**
- **Inversione della potenza attiva invertendo il flusso della corrente** lasciando inalterato il verso della tensione, questo permette di evitare grosse sollecitazioni di tipo dielettrico sul cavo di collegamento. Nell'HVDC convenzionale il cambio del flusso di potenza avviene invertendo la tensione perché non è possibile invertire il flusso di corrente, questo impone un numero di inversioni annue limitato per non danneggiare i cavi

Questi convertitori sono del tipo auto commutanti cioè la commutazione di ogni valvola è indipendente dalla presenza della rete c.a. alla specifica frequenza. Ci sono varie tecnologie di conversione applicate, quali:

- **Ponte trifase VSC**
- **Tecnica di modulazione PWM (*pulse width modulation*) applicata ai VSC**
- **Tecnica *multi-level*, con varianti tecnologiche per migliorare la forma d'onda in uscita dal convertitore**

2.3.1.1. Ponte trifase VSC

La configurazione di un ponte tipo VSC è caratterizzato dalla presenza di valvole tipo GTO con diodi in antiparallelo per la circolazione della corrente nel verso opposto e condensatore di grande capacità lato continua.

Durante i transitori veloci imposti dalle valvole il condensatore lato continua può essere considerato come un generatore di tensione costante fornendo in uscita dal convertitore una forma d'onda quadra. Le operazioni di apertura e chiusura delle valvole sono praticamente identiche a quelle effettuate in un normale convertitore trifase LCC.

Nonostante ciò ci sono sostanzialmente due differenze tra un normale convertitore LCC e VSC, una di queste è la durata dell'intervallo di conduzione delle valvole, passando da 120° dell'LCC a 180° per il VSC per motivi di funzionamento legate alla forma d'onda in uscita, la seconda differenza è l'assenza dell'angolo di commutazione e quindi presenta una migliore forma d'onda in uscita.

2.3.1.2. Convertitori multi-level

Per comprendere il funzionamento di questi convertitori si pone l'attenzione sul principio di funzionamento come inverter. La configurazione a 2 livelli è la più semplice ed è utilizzata per la trasmissione di piccole-medie potenze, inoltre la forma d'onda in uscita dall'inverter è meno simile rispetto a quelle date dalle configurazioni a 3 livelli e multilivello.

I vantaggi sono legati alla semplicità dei circuiti, alle ridotte taglie dei condensatori c.c. e filtri, al minor ingombro e complessità dei circuiti fisici. Il nome "2 livelli" significa che la tensione in uscita sulla fase in alternata assume 2 valori possibili e così via; facciamo riferimento ad un ponte a 2 e 3 livelli e l'andamento della tensione sulla fase a del sistema trifase.

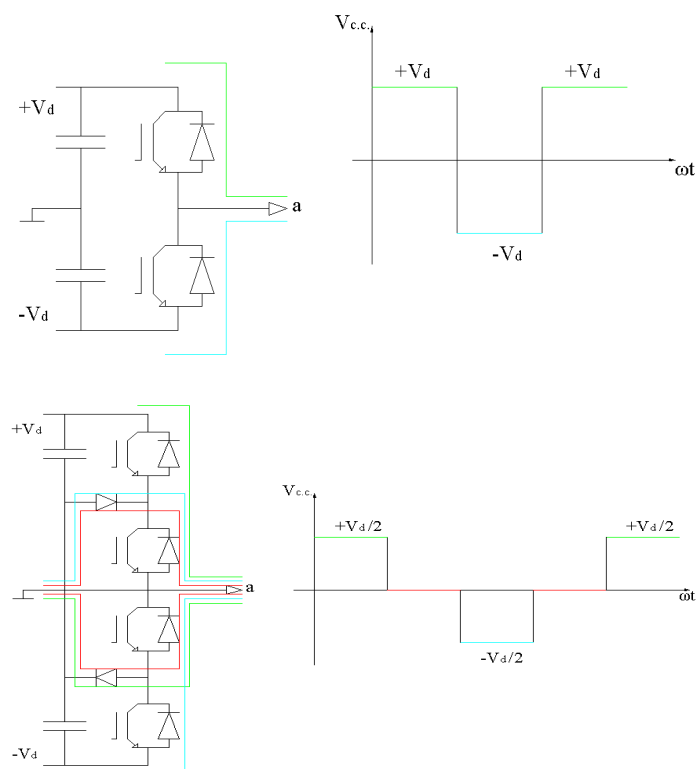


Figura 2.22 Andamento tensioni su ciascuna fase con un ponte a 2 livelli e a 3 livelli

La sorgente di tensione ideale è rappresentata dalla serie di due condensatori alla tensione di V_d . La tensione ai morsetti sulla fase a può assumere i vari livelli di tensione a seconda degli stati delle valvole, grazie alla presenza dei diodi posti in opposizione alle valvole principali, la corrente assorbita dai circuiti a valle del ponte può essere sia positiva che negativa, qui il duplice verso del flusso di potenza che si può avere senza inversione di polarità. Si intuisce che a seconda della tipologia di ponte e di numero di livelli vi è una precisa logica di apertura e chiusura delle valvole per ottenere in uscita un andamento della tensione sulla fase molto simile ad una sinusoide.

2.3.1.3. Pulse Width Modulation (PWM)

In assenza di una modulazione la forma d'onda sulla fase è del tipo quadra e di valore minore a quella della tensione continua.

Vengono adottate tecniche di modulazione di tipo PWM le quali permettono di ottenere forme d'onda alternate di valore e frequenza variabili. Per ciascuna delle tre fasi il circuito di controllo confronta istante per istante un segnale di forma triangolare V_{tri} ad alta frequenza con un segnale sinusoidale V_s uguale a quello che si desidera avere in uscita sulla fase. Quando il valore istantaneo del segnale V_s diventa maggiore del segnale V_{tri} la valvola superiore del corrispondente ramo del ponte viene accesa mentre quella inferiore viene spenta, mentre avviene l'operazione inversa nel caso $V_s < V_{tri}$.

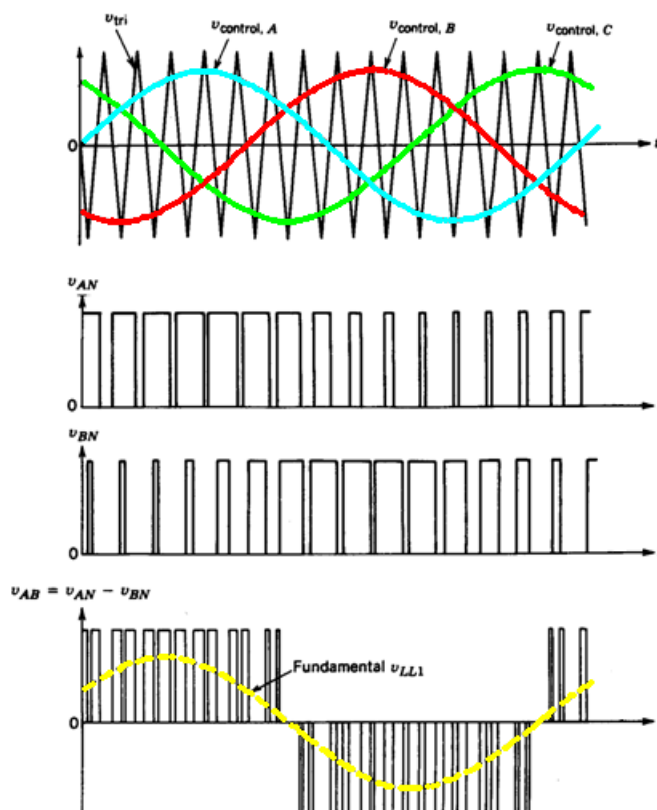


Figura 2.23 Tensione con PWM sinusoidale

In figura 2.23 notiamo l'andamento della tensione concatenata facendo la differenza istante per istante delle due tensioni di fase, si ottiene una forma d'onda concatenata a $(n+1)$ livelli dove n sono il numero di valvole presenti in un ramo del convertitore. Per un convertitore a 3 livelli essendo 4 interruttori per ramo si ottiene una forma d'onda della tensione concatenata di 5 livelli.

Andiamo a definire due parametri importanti:

- Rapporto di modulazione di frequenza: $M_f = \frac{f_t}{f_s}$
- Rapporto di modulazione d'ampiezza: $M_a = \frac{A_t}{A_s}$

Dove f_t , f_s sono rispettivamente la frequenza del segnale triangolare e sinusoidale; A_t , A_s sono rispettivamente ampiezza del segnale triangolare e sinusoidale.

Ovviamente per ogni fase dell'inverter si ha un segnale triangolare diverso, chiamato anche segnale portante, cioè stessa ampiezza stessa frequenza ma sfasati tra di loro di 120° , mentre il segnale sinusoidale coincide per tutte e tre le fasi.

Il controllo della tensione di uscita sulle tre fasi avviene variando simultaneamente l'ampiezza delle tre onde triangolari e quindi il rapporto M_a .

Se il rapporto di modulazione di frequenza M_f è molto alto, il PWM sinusoidale permette d'ottenere forme d'onda con un livello armonico avente le componenti disposte in alte frequenze.

Utilizzando l'analisi di *Fourier* si possono individuare gli ordini delle componenti armoniche secondo la formula generale:

$$n = pk \pm m$$

Dove k , m sono numeri interi. Per k dispari non compaiono nella formula generale le componenti con m dispari, cioè per $k=1$ abbiamo $n=p\pm 2$, $n=p\pm 4$, ...

Per k pari non si considerano le componenti con m pari, cioè per $k=2$ abbiamo $n=2p\pm 1$, $n=2p\pm 3$...

Le armoniche di ordine $2p\pm 1$ sono le predominanti al variare di M_a , anche le armoniche di ordine $2p\pm 2$ all'aumentare di M_a . Ad esempio se prendiamo $p=21$ cioè la frequenza di commutazione è 21 volte quella del segnale modulante, le armoniche dominanti sono la 43,40 ma anche la 23, 19 sono significative.

Per quanto riguarda il lato continua le armoniche si concentrano attorno ai multipli della frequenza di commutazione delle valvole e quindi dal PWM.

I convertitori a tensione impressa VSC hanno molte possibili soluzioni, per migliorare la forma d'onda in uscita all'inverter si tende ad aumentare i livelli andando così a diminuire il contenuto armonico e le perdite su ogni singola valvola (i valori di tensione e corrente di dimensionamento diminuiscono) a scapito di schemi più complicati, numero di valvole utilizzate, dimensionamento elevato dei condensatori quindi costi totali maggiori.

I vantaggi che offrono queste configurazioni sono:

- **Tutti i componenti statici sono sollecitati per una tensione minore**
- **La forma d'onda in uscita risulta più pulita**
- **A parità di frequenza di commutazione delle valvole risulta ridotto il THD della corrente**

Qualora il livello di potenza o di tensione risulti essere superato rispetto i valori massimi di dimensionamento di una singola unità di conversione, sarà possibile il passaggio a una configurazione multiterminale, cioè la messa in seri o in parallelo di più ponti di conversione VSC.

2.4. *Smoothing reactor*

Funzione dello smoothing reactor

L'induttanza di spianamento o *smoothing reactor* posto in serie alla linea c.c. svolge le seguenti funzioni:

- **Prevenire le correnti intermittenti:** dovute al *ripple* di corrente le quali possono causare sovratensioni nel trasformatore o nello stesso *smoothing reactor*. Inoltre l'induttanza di spianamento si oppone all'interruzione di corrente a carico minimo.
- **Limitare i guasti nella parte c.c.:** riesce a ridurre i guasti di corrente e le mancate commutazioni delle valvole.
- **Prevenire risonanze:** lo *smoothing reactor* viene scelto in modo tale da evitare risonanze per valori di frequenza compresi tra 100 Hz- 150 Hz. Questo aspetto è importante al fine di evitare amplificazioni nelle armoniche di corrente nel lato c.a. per evitare la saturazione del trasformatore.
- **Riduzione armoniche di corrente:** per ridurre le interferenze con altri sistemi, per esempio una linea telefonica, nel caso di trasmissione di linee aeree viene affidato ai filtri inseriti sul lato c.c.. Tuttavia già l'induttanza di spianamento riesce a ridurre tali armoniche in quanto funziona come un'impedenza in serie.

Dimensionamento dello smoothing reactor

Mentre la tensione e la corrente possono essere determinati basandoci sui dati costruttivi della linea c.c. il valore dell'induttanza diventa determinante per il dimensionamento del reattore.

Usualmente si sceglie un *range* tra 100÷150 [mH] per lunghe distanze in configurazione tradizionali e si posiziona in serie al cavo c.c.; mentre nel caso di collegamento *back-to-back* si prende 30÷80 [mH] e può essere connesso al terminal di bassa tensione.

Tipi di smoothing reactor

Possiamo individuare due tipologie di induttanza di spianamento:

- Isolata in aria
- Isolata in olio



Figura 2.24 Smoothing reactor isolati in aria o in olio

La scelta dell'uno o dell'altro tipo di isolamento dipende dal valore d'induttanza stabilito, dai costi e dalla posizione d'installazione.

Un vantaggio degli *smoothing* isolati in aria è che i ricambi possono essere facili da reperire e molto veloci nella sostituzione in caso di guasto.

Nel caso di un elevato valore di induttanza richiesta è possibile avere più d'una unità collegata in serie e potrebbe diventare un problema nel caso non ci fosse spazio sufficiente.

Nel caso di regione a rischio sismico si preferisce installare l'induttanza di spianamento isolata in olio in quanto quelle isolate in aria sono installate (come si vede in figura 2.24) su isolatori e quindi a rischio crollo.

2.5. Esempi HVDC nel mondo

SAPEI

Il collegamento SAPEI (Sardegna-Penisola Italiana), del tipo HVDC, è realizzato tra Fiume Santo in Sardegna e Nettuno di Latina in Lazio, autorizzato in soli 14 mesi i lavori sono cominciati nell'ottobre del 2006 e la messa in funzione completa dell'impianto è avvenuta il 17 maggio 2011. Il cavo si estende per una lunghezza di 435 km e arriva ad una profondità record di 1640 m.

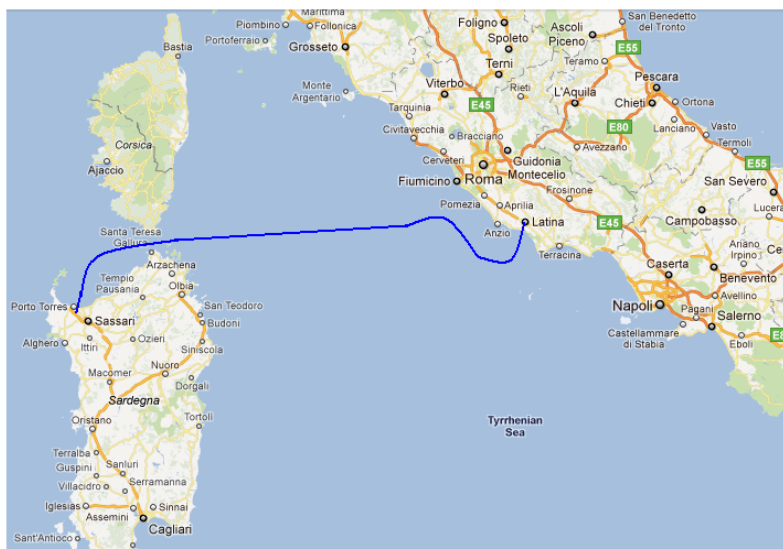


Figura 2.25 Collegamento Sardegna-Penisola Italiana

La configurazione adottata è del tipo bipolare con ritorno mare per garantire il funzionamento al 50% della potenza in caso di guasto di uno dei due poli.

I cavi adottati sono del tipo carta impregnata d'olio capaci di sostenere una tensione di 500 kV e capaci di trasportare una potenza di 1000 MW.

Con la messa in opera di questo collegamento si prevede un risparmio economico per il sistema elettrico grazie alla rimozione dei "colli di bottiglia" tra la Sardegna e il resto del mercato elettrico, un aumento della sicurezza sia del sistema elettrico sardo in quanto i 1000 MW corrispondono a oltre il 50% del fabbisogno dell'intera isola, che del sistema del Lazio e del centro Italia grazie all'utilizzo di produzione efficiente anche dalla Sardegna.

Una riduzione di oltre 500 mila tonnellate l'anno di CO_2 in atmosfera per effetto dell'utilizzo maggiore di energia proveniente da fonti rinnovabili, opportunità per gli operatori elettrici di partecipare con minori vincoli al mercato elettrico garantendo allo stesso tempo maggiore flessibilità e sicurezza di esercizio del sistema.

In fine la possibilità d'esportare dalla Sardegna verso il continente produzione termoelettrica più efficiente e produzione da fonte rinnovabile, in particolare eolica, in forte sviluppo.

Il cavo è costituito da un conduttore di alluminio di sezione di 1150 mm², isolato in carta impregnata d'olio, schermo in piombo e doppia armatura d'acciaio il tutto per un diametro di 12 cm. La decisione di utilizzare alluminio invece del rame è stata presa per ridurre sia il peso del cavo stesso, che ne ha facilitato la posa, che per la riduzione dei costi.

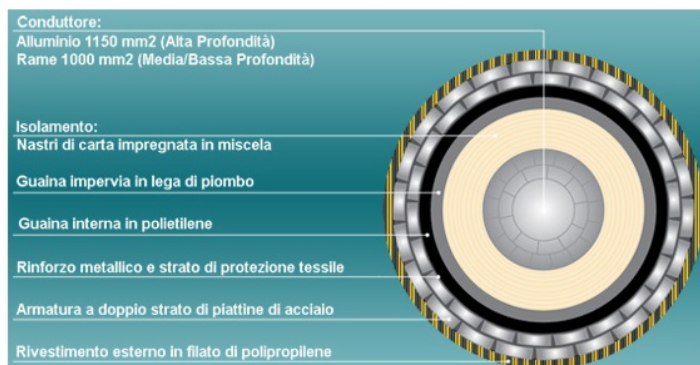


Figura 2.26 Cavo utilizzato nel collegamento

L'intero costo dell'opera è stato di 750 milioni di euro di cui 400 solo per i due cavi.

ITALIA-GRECIA

L'interconnessione tra Otranto e Aethos realizzato nel 2002 ha reso possibile lo scambio d'energia elettrica tra Grecia e l'Europa occidentale portando benefici per l'intera rete elettrica.

Il collegamento si sviluppa per un primo tratto terrestre da Galatina a Otranto lungo 43 km, un cavo sottomarino tra Otranto e Aethos di 163 km che arriva a una profondità di circa 1000 m e una linea aerea in c.c. per 110 km fino alla stazione di conversione di Arachthos.

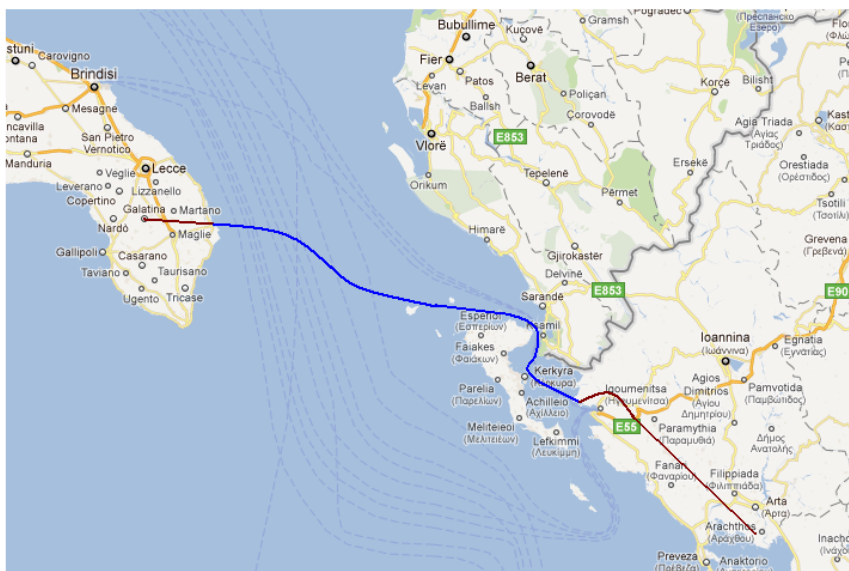


Figura 2.27 Collegamento Italia-Grecia

La configurazione adottata è del tipo monopolare con ritorno via mare; la potenza trasmessa è di 500 MW con tensione di 400 kV, il cavo utilizzato è isolato in carta impregnata con una speciale miscela ad elevata viscosità, schermo in piombo e doppia armatura ad alta resistenza meccanica.

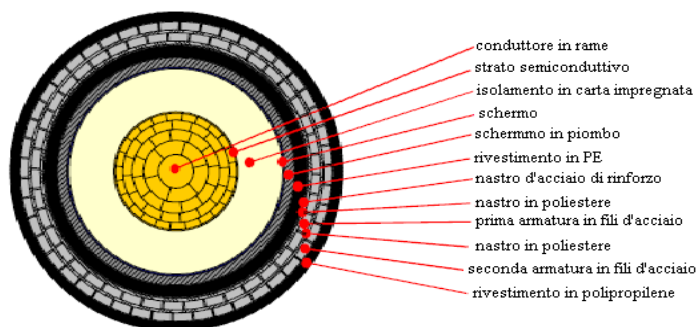


Figura 2.28 Cavo utilizzato

ITAIPU

Il collegamento ITAIPU è stato fin poco tempo fu il impressionante HVDC nel mondo. Collega la centrale idroelettrica situata al confine tra Brasile e Paraguay e la regione di Sao Paulo, ha una potenza totale di 6300 MW con una tensione di ± 600 kV in c.c..

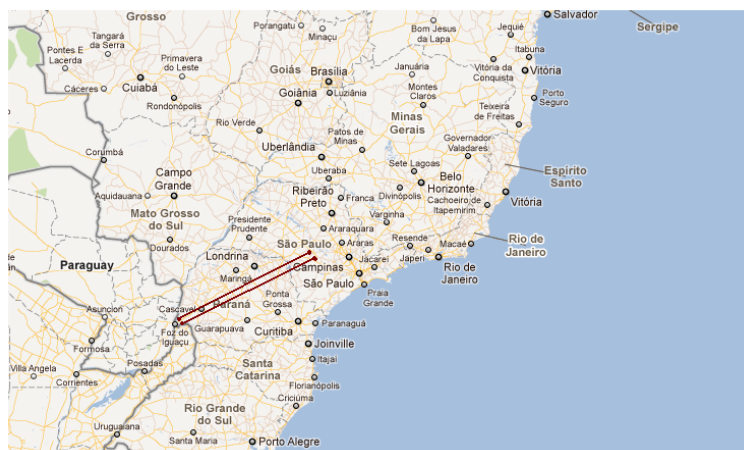


Figura 2.29 Collegamento Paraguay-Brasile

La configurazione adottata è del tipo bipolare, i lavori sono del primo polo sono iniziati nell'ottobre del 1984 e si sono conclusi nel 1987 con la messa in servizio del secondo polo. La scelta dell'HVDC fu fondamentale per due motivi: il primo per l'interconnessione delle due diverse reti con differente frequenza di funzionamento (50 Hz Paraguay 60 Hz Brasile), la seconda per la distanza, infatti il collegamento tra le due stazioni avviene mediante linee aeree di lunghezza complessiva di 805 km.

BASSLINK

Questo interconnessione tra l’Australia e l’isola di Tasmania è tra i più lunghi collegamenti in corrente continua del mondo. È costituito da un cavo, il quale si sviluppa su acque di bassissima profondità, che deve sopportare una tensione di 400 kV in grado di trasmettere una potenza di 500 MW in modo continuo fino 630 MW per un massimo di 4 ore al giorno, la configurazione adottata è del tipo monopolare con ritorno metallico.

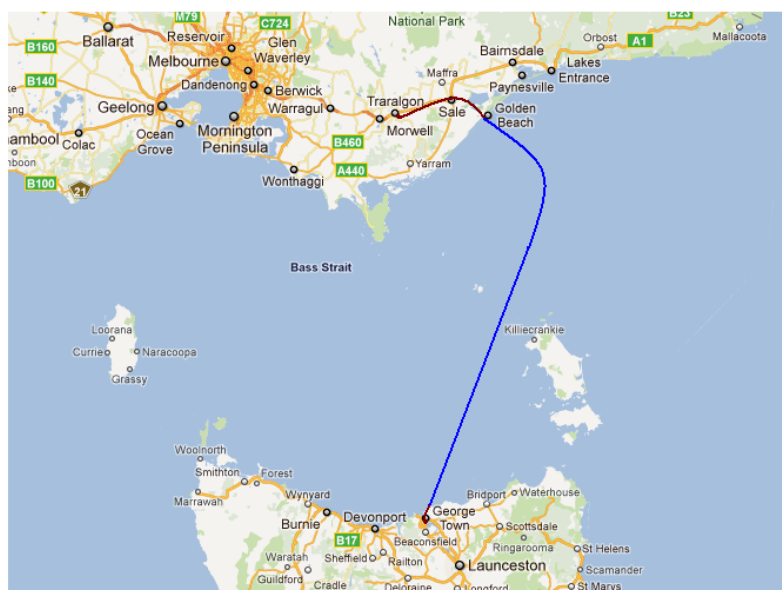


Figura 2.30 Collegamento Victoria-George Town

Il collegamento ha una distanza complessiva di circa 357 km, di cui 293 sottomarini due tratti terrestri di 6,6 km in Australia e 1,7 km in Tasmania per poi avere i collegamenti aerei alle stazioni di conversione lunghe circa 61 km e 11 km rispettivamente in Victoria e George Town.

Il cavo sottomarino è del tipo M.I., la sezione del conduttore in rame è 1500 mm² mentre il ritorno via mare è costituito da un conduttore da 1400 mm² isolato per media tensione in XLPE.

TRANSBAY

Collegamento realizzato tra Pittsburg e Potrero nella baia di San Francisco, è un collegamento che utilizza la tecnologia di conversione VSC, il quale trasmette una tensione di 200 kV con potenza di 400 MW.

Con questa interconnessione si trasmette energia dalla zona est caratterizzata da una produzione eccessiva alla zona di San Francisco che ne richiede sempre di più.

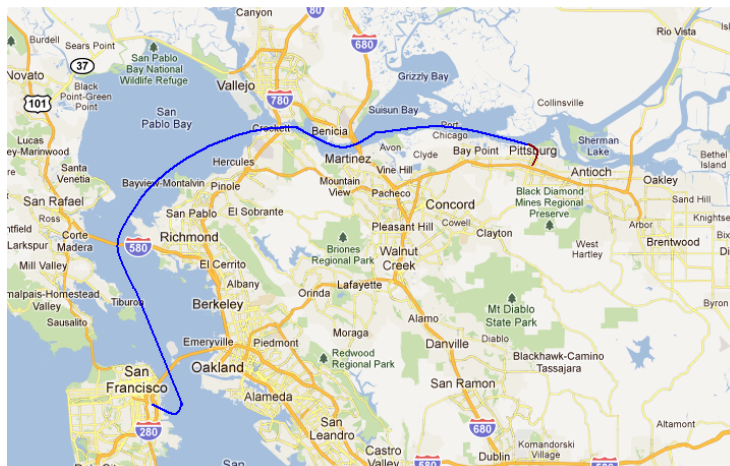


Figura 2.31 Collegamento baia di San Francisco

Il tratto marino ha una lunghezza di 80 km mentre quello terrestre di 5 km.

La configurazione adottata è del tipo bipolare, due cavi in posa “bundle” con fibra ottica per la trasmissione di segnali. Il cavo marino ha un conduttore in trefoli di rame con sezione di 1100 mm², uno strato semiconduttore, un isolante XLPE, una guaina impermeabile protettiva, uno schermo in piombo, uno strato in polietilene, un rivestimento in polipropilene, un'armatura a fili d'acciaio e una guaina esterna in polipropilene.

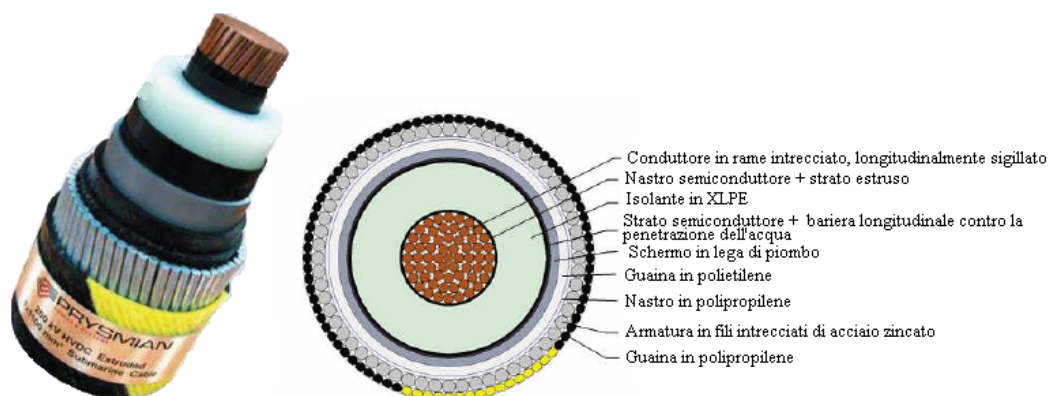


Figura 2.32 Cavo posato

YUNNAN-GUANGDONG

È il primo collegamento al mondo che opera a una tensione di ± 800 kV (per questa ragione viene chiamato Ultra HVDC) e trasmette una potenza di 5000 MW. La prima stazione è situata a Chuxiong nella regione dello Yunnan, mentre la seconda è situata a Zengcheng nel Guagdong per una lunghezza totale di 1418 km.

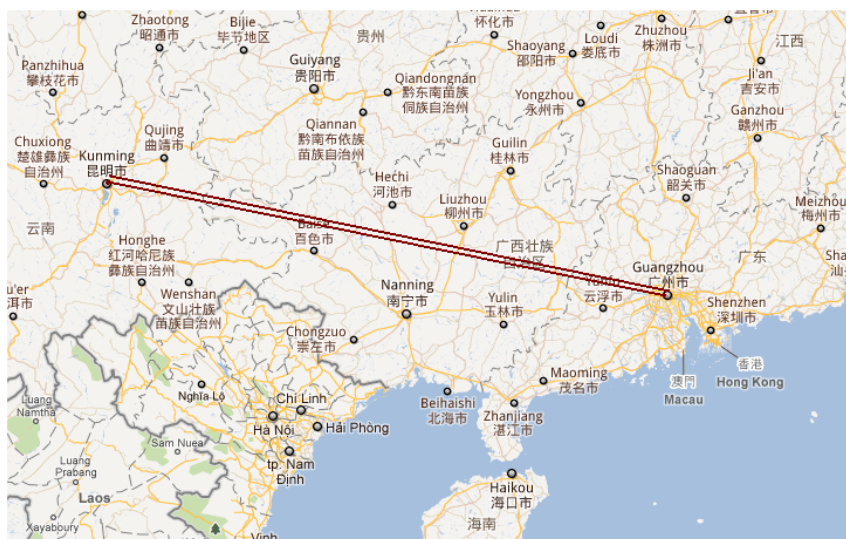


Figura 2.33 Collegamento Yunnan-Guangdong

Il collegamento è effettuato mediante linee elettriche aeree, e la configurazione utilizzata è del tipo bipolare, il primo polo è entrato in funzione nel dicembre 2009 mentre il secondo polo nel giugno 2010.

Scenari futuri

La necessità d'aver collegamenti in grado di controllare i flussi di potenza ha portato allo sviluppo della tecnologia VSC, inoltre oltre a questo pregio hanno un ingombro minore delle intere apparecchiature le quali possono essere installate per esempio in piattaforme offshore molto distanti dalle coste.

Altro possibile scenario è il possibile collegamento di potenza potrebbe trovare collocazione all'interno di un tunnel ferroviario o in altri casi all'interno del tunnel pilota o in un tunnel d'emergenza, in ogni caso si deve valutare lo spazio disponibile, l'accesso al tunnel, eventuali vincoli sull'esercizio e la manutenzione dovuti all'esercizio ferroviario e la necessità di garantire le condizioni di assoluta sicurezza.

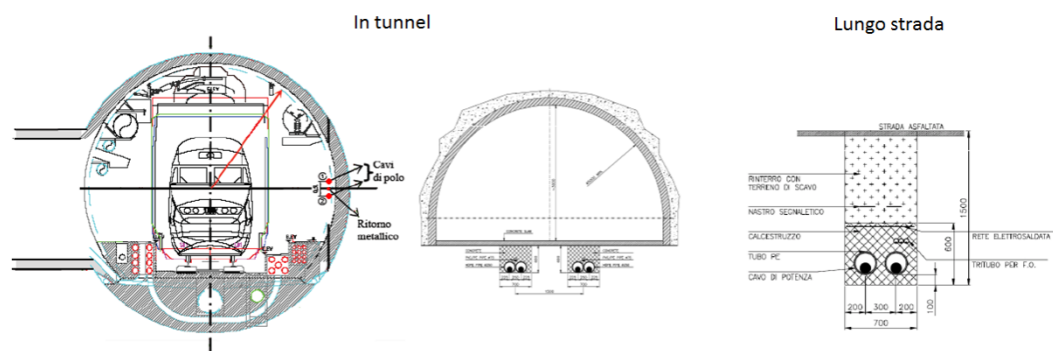


Figura 2.34 Possibili scenari di posa di cavi HVDC in galleria o interrati lungo strade

Inoltre per preservare l'impatto ambientale si potrebbe pensare ad un graduale passaggio, la dov'è possibile, in linee in cavo HVDC interrato in sostituzione delle tradizionali linee aeree che deturpano il paesaggio.

CAPITOLO 3

Metodo di studio analitico del cavo coassiale

Introduzione

Scopo della tesi è determinare l'andamento delle componenti armoniche lungo la linea in cavo adottato per le trasmissioni HVDC dopo aver inserito l'induttanza di spianamento L_{sr} e/o opportuni filtri lato c.c.. Si è dovuto cercare un metodo di studio adatto al cavo coassiale in modo da determinare l'impedenza chilometrica del cavo stesso. Una volta trovata l'impedenza chilometrica si va a rappresentare l'intera linea come una serie di celle elementari, rappresentate dal circuito equivalente a π .

Attraverso un sistema matriciale nella quale sono compresi i generatori armonici e tutti gli elementi presenti nella linea si mettono in relazione tutte le grandezze ottenendo in questo modo le correnti e tensioni lungo tutta la linea sulla fase, schermo e armatura la dov'è presente.

Nonostante tensione e corrente sono considerate continue sul lato di collegamento vi sono componenti armoniche sovrapposte prodotte dai ponti di conversione essendo dei segnali a elevata frequenza si dovrà tener ben presente il fenomeno induttivo degli strati conduttori presenti nella struttura interna del cavo. Si utilizza il metodo matriciale per rappresentare tutte le auto e mutue impedenza del cavo raffigurate in figura 3.1.

Lo studio è articolato nel seguente modo:

- **Determinazione del circuito elettrico equivalente per lo studio armonico sulla linea in cavo**
- **Determinazione dell'impedenza del cavo usando il metodo *Schelkunhoff* [10]**
- **Modellizzazione matriciale della cella elementare in cui è diviso il cavo**
- **Modellizzazione matriciale degli elementi elettrici presenti in linea (generatori di tensione, messe a terra, induttanze)**
- **Costruzione della matrice totale del sistema (intera linea di collegamento)**
- **Determinazione tensioni e correnti del sistema tramite il metodo MCA [11]**
- **Realizzazione del programma di calcolo con il software *matlab***

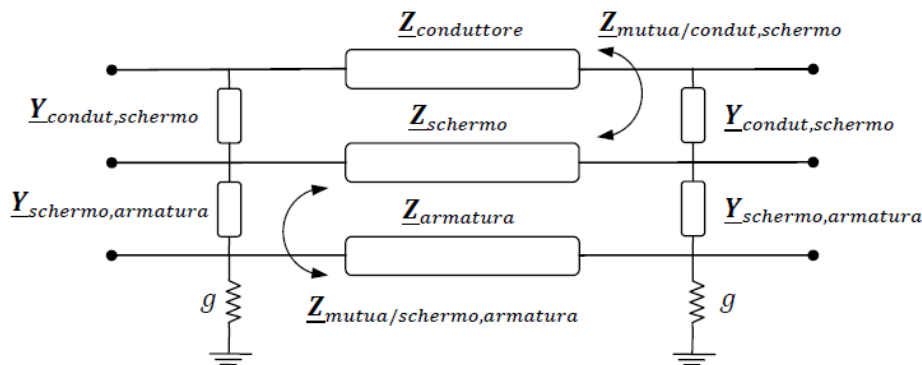


Figura 3.1 Modello circuitale a π del cavo coassiale

3.1. Teoria dei circuiti concentrici secondo Schelkunhoff

Il cavo è formato da più strati composto da diversi materiali, per comodità concentreremo lo studio sugli strati principali d'interesse elettrico.

Consideriamo un cavo unipolare a simmetria cilindrica composto da più strati conduttivi concentrici di forma tubolare, partendo dal conduttore di fase pieno, lo schermo cilindro cavo, e per finire l'armatura anch'essa cilindrica cava ciascuno separato da materiali isolanti.

Lo studio sul comportamento di questi tipi di conduttore non è semplice in quanto non trattandosi di soli cavi nudi posti in aria, bisogna tener conto della mutua interazione tra i materiali conduttori concentrici.

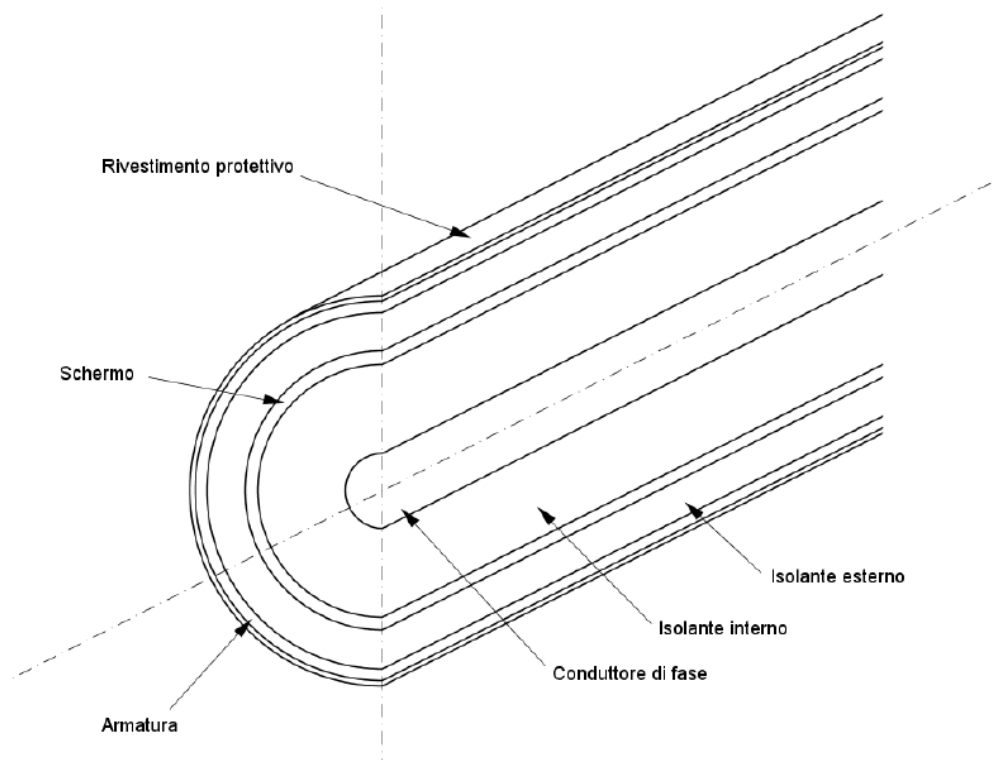


Figura 3.2 Geometria di un cavo unipolare

Al fine di calcolare la matrice delle impedenze longitudinali \underline{Z}_L del cavo si prendono in esame i circuiti formati dai conduttori cilindrici, i quali chiameremo *loop*, in questo modo possiamo considerare i diversi strati conduttori, tenendo così conto della loro interazione.

I *loop* sono così formati:

- **Loop 1:** conduttore di fase avente come ritorno lo schermo
- **Loop 2:** schermo avente come ritorno l'armatura
- **Loop 3:** armatura avente come ritorno il terreno, l'acqua o l'aria

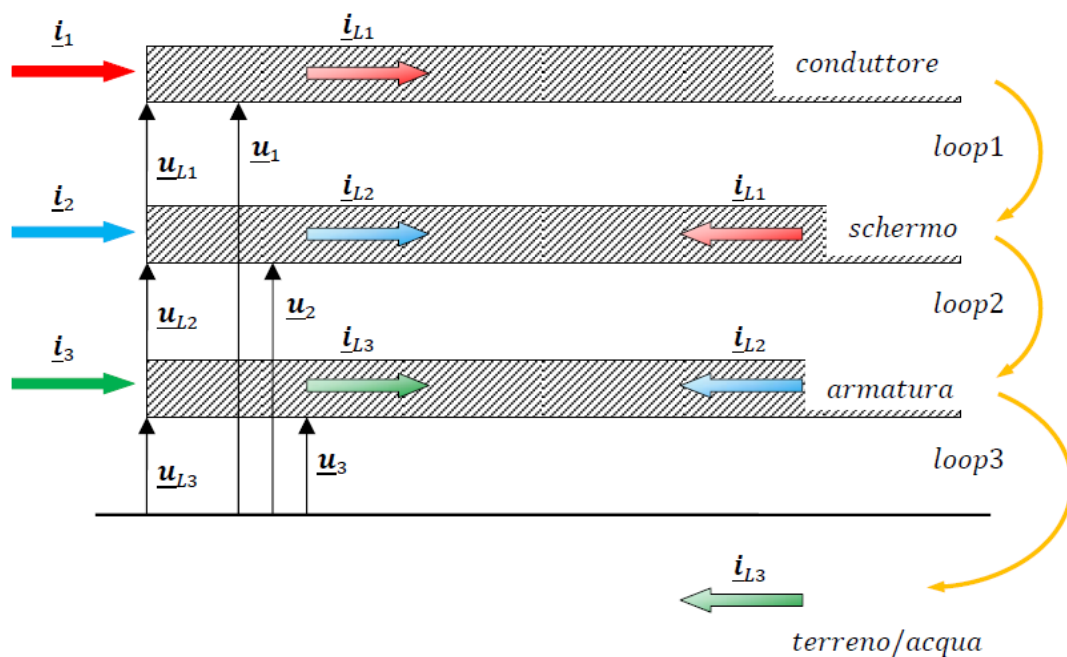


Figura 3.3 Loops formati dalla corrente e tensioni presenti

Le correnti di *loop* coincidono con le correnti all'interno dei vari strati conduttivi i_{L1} , i_{L2} , i_{L3} con i relativi versi opportuni mentre le tensioni di *loop* tra i strati conduttivi sono u_{L1} , u_{L2} , u_{L3} .

Alla fine andremo a considerare le nostre grandezze usuali, cioè le correnti entranti nei conduttori i_1 , i_2 , i_3 e tensioni rispetto terra u_1 , u_2 , u_3 .

Una volta determinata la matrice delle impedenze di *loop* Z_{LOOP} possiamo ricavare la matrice delle impedenze longitudinali $Z_L \left[\frac{\Omega}{Km} \right]$.

3.2. Definizione algoritmo matriciale

Iniziamo con il ricavarci la matrice delle impedenze longitudinali $\underline{Z}_L \left[\frac{\Omega}{km} \right]$ una volta trovata la matrice $\underline{Z}_{LOOP} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$.

Andiamo a rappresentare rispettivamente tensioni e correnti con i seguenti vettori:

$$\underline{I}_{LOOP} = \begin{bmatrix} \underline{i}_{L1} \\ \underline{i}_{L2} \\ \underline{i}_{L3} \end{bmatrix} \qquad \underline{I} = \begin{bmatrix} \underline{i}_1 \\ \underline{i}_2 \\ \underline{i}_3 \end{bmatrix}$$

$$\underline{U}_{LOOP} = \begin{bmatrix} \underline{u}_{L1} \\ \underline{u}_{L2} \\ \underline{u}_{L3} \end{bmatrix} \qquad \underline{U} = \begin{bmatrix} \underline{u}_1 \\ \underline{u}_2 \\ \underline{u}_3 \end{bmatrix}$$

Dove:

- \underline{I}_{LOOP} : vettore correnti di *loop*
- \underline{U}_{LOOP} : vettore tensioni di *loop*
- \underline{I} : vettore correnti nei conduttori
- \underline{U} : vettore tensioni verso terra dei conduttori

Osservando i versi delle correnti e tensioni in figura otteniamo le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} \underline{i}_1 &= \underline{i}_{L1} & \underline{u}_{L1} &= \underline{u}_1 - \underline{u}_2 \\ \underline{i}_2 &= \underline{i}_{L2} - \underline{i}_{L3} & \underline{u}_{L2} &= \underline{u}_2 - \underline{u}_3 \\ \underline{i}_3 &= \underline{i}_{L3} - \underline{i}_{L2} & \underline{u}_{L3} &= \underline{u}_3 \end{aligned}$$

Utilizzando la seguente matrice possiamo legare le rispettive grandezze:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

Ottenendo così le seguenti relazioni:

$$\underline{U}_{LOOP} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & -1 & 0 \\ \hline 0 & 1 & -1 \\ \hline 0 & 0 & 1 \\ \hline \end{array} * \begin{array}{|c|} \hline \underline{u}_1 \\ \hline \underline{u}_2 \\ \hline \underline{u}_3 \\ \hline \end{array}$$

T' \underline{U}

$$\underline{I} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & -1 & 0 \\ \hline 0 & 1 & -1 \\ \hline 0 & 0 & 1 \\ \hline \end{array} * \begin{array}{|c|} \hline \underline{i}_{L1} \\ \hline \underline{i}_{L2} \\ \hline \underline{i}_{L3} \\ \hline \end{array}$$

T' \underline{I}_{LOOP}

Con T' indichiamo la matrice trasposta di T .
Le grandezze di *loop* sono legate dalla relazione:

$$-\frac{d\underline{U}_{LOOP}}{dx} = \underline{Z}_{LOOP} * \underline{I}_{LOOP}$$

Dove la matrice \underline{Z}_{LOOP} rappresenta la matrice delle impedenze longitudinali di *loop*.
Utilizzando le relazioni trovate precedentemente e combinandole tra loro ottengo la matrice delle impedenze longitudinali \underline{Z}_L :

$$-\frac{d(T' * \underline{U})}{dx} = \underline{Z}_{LOOP} * (T^{-1} * \underline{I})$$

$$-\frac{d\underline{U}}{dx} = [(T')^{-1} * \underline{Z}_{LOOP} * T^{-1}] * \underline{I}$$

Otteniamo così la matrice delle impedenze longitudinali \underline{Z}_L :

$$\underline{Z}_L = \left((T')^{-1} * \begin{array}{|c|c|c|} \hline \underline{z}_{1,1} & \underline{z}_{1,2} & \underline{z}_{1,3} \\ \hline \underline{z}_{2,1} & \underline{z}_{2,2} & \underline{z}_{2,3} \\ \hline \underline{z}_{3,1} & \underline{z}_{3,2} & \underline{z}_{3,3} \\ \hline \end{array} * T^{-1} \right) \left[\frac{\Omega}{Km} \right]$$

\underline{Z}_{LOOP}

3.3. Matrice delle impedenze di loop

Se il cavo è costituito da n strati conduttivi, la relativa matrice delle impedenze di *loop* \underline{Z}_{LOOP} sarà di ordine $(n \times n)$ dove lungo la diagonale principale saranno presenti le auto impedenze di ogni conduttore cilindrico mentre gli elementi fuori la diagonale costituiranno la mutua interazione tra uno strato e il successivo facente parte del singolo *loop*.

Lo strato x -esimo avrà la seguente auto impedenza:

$$\underline{Z}_{x,x} = \underline{Z}_{pout,x} + \underline{Z}_{ins,x/x+1} + \underline{Z}_{pin,x+1}$$

- **$\underline{Z}_{pout,x}$** : impedenza interna (per unità di lunghezza) del conduttore x -esimo calcolata dalla caduta di tensione sulla superficie esterna dello strato x quando la corrente ritorna attraverso lo strato $(x+1)$
- **$\underline{Z}_{ins,x/x+1}$** : impedenza (per unità di lunghezza) dell'isolamento tra lo strato x e $(x+1)$ dovuta al campo magnetico tempo-variante nel materiale isolante
- **$\underline{Z}_{pin,x+1}$** : impedenza interna (per unità di lunghezza) del conduttore $(x+1)$ calcolata sulla base della caduta di tensione sulla superficie interna dello strato $(x+1)$ quando la corrente ritorna attraverso lo strato x
- **$\underline{Z}_{pin,x+1} = \underline{Z}_{self\ earth}$** : quando si andrà a considerare l'auto impedenza (per unità di lunghezza) dell'ultimo *loop* con ritorno attraverso il terreno o l'acqua

Per le mutue impedenze presenti al di fuori della diagonale principale della \underline{Z}_{LOOP} si ha:

$$\underline{Z}_{x,x-1} = \underline{Z}_{x-1,x} = \underline{Z}_{pm,x}$$

Essa rappresenta la mutua interazione tra il *loop* interno x e quello successivo $(x+1)$ di un singolo circuito. A causa del verso delle correnti considerate in figura esse risulteranno negative, infatti \underline{i}_{L2} è negativa rispetto il *loop* 1 e \underline{i}_{L3} è negativa rispetto il *loop* 2.

Attenzione che tra il *loop* 1 e il *loop* 3 non ci sono interazioni in comune quindi la mutua impedenza risulta nulla.

Faremo riferimento a un cavo unipolare composto da conduttori di fase, schermo e armature, le auto impedenze in funzione della frequenza sono le seguenti:

$$\underline{Z}_{1,1} = \underline{Z}_{pout,core} + \underline{Z}_{ins,core/sheath} + \underline{Z}_{pin,sheath} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3$$

$$\underline{Z}_{2,2} = \underline{Z}_{pout,sheath} + \underline{Z}_{ins,sheath/armor} + \underline{Z}_{pin,armor} = \underline{Z}_5 + \underline{Z}_6 + \underline{Z}_7$$

$$\underline{Z}_{3,3} = \underline{Z}_{pout,armor} + \underline{Z}_{ins,armor/earth} + \underline{Z}_{self\ earth} = \underline{Z}_9 + \underline{Z}_{10} + \underline{Z}_{11}$$

Le componenti sono: impedenza interna calcolata sulla superficie esterna del materiale conduttore, impedenza dell'isolamento tra strati, impedenza interna.

Vengono calcolate nel seguente modo:

$$\underline{z_{pout}} = \frac{\rho * \sigma}{2\pi * r_{ext} * H} * I_0(\sigma * r_{ext}) * K_1(\sigma * r_{in}) + K_0(\sigma * r_{ext}) * I_1(\sigma * r_{in})$$

$$\underline{z_{ins}} = j\omega \frac{\mu_{ins}}{2\pi} \ln\left(\frac{r_{ins\ ext}}{r_{ins\ in}}\right)$$

$$\underline{z_{pin}} = \frac{\rho * \sigma}{2\pi * r_{in} * H} * I_0(\sigma * r_{in}) * K_1(\sigma * r_{ext}) + K_0(\sigma * r_{in}) * I_1(\sigma * r_{ext})$$

Dove:

- $\omega = 2\pi f$ pulsazione elettrica $\left[\frac{rad}{s}\right]$
- $\rho =$ resistività elettrica del materiale $[\Omega * mm]$
- $\sigma = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\rho}}$ costante di propagazione complessa nel materiale conduttivo $\left[\frac{1}{mm}\right]$, con $\mu =$ permeabilità magnetica assoluta del materiale $\left[\frac{H}{mm}\right]$
- $\mu_{ins} =$ permeabilità magnetica assoluta del materiale isolante $\left[\frac{H}{mm}\right]$
- $r_{ext} =$ raggio esterno del materiale conduttore $[mm]$
- $r_{in} =$ raggio interno del materiale conduttore $[mm]$
- $I_0 I_1 =$ funzioni modificate di Bessel di prima specie rispettivamente di ordine zero e uno entrambi con argomento complesso
- $K_0 K_1 =$ funzioni modificate di Bessel di seconda specie rispettivamente di ordine zero e uno entrambi con argomento complesso
- $H = I_1(\sigma * r_{ext}) * K_1(\sigma * r_{in}) - I_1(\sigma * r_{in}) * K_1(\sigma * r_{ext})$

Nel caso di conduttore di fase massiccio ($r_{in} = 0$), la $\underline{z_{pout}}$ diventa:

$$\underline{z_1} = \frac{\rho * \sigma * I_0 * (\sigma * r_{ext})}{2\pi * r_{ext} * I_1 * (\sigma * r_{ext})}$$

Mentre le mutue impedenze :

$$\underline{z_{1,2}} = \underline{z_{2,1}} = -\underline{z_{sheath\ mutual}} = \underline{z_4}$$

$\underline{z_4}$ è la mutua impedenza (per unità di lunghezza) dello schermo cilindrico tra il *loop* 1 e il *loop* esterno 2

$$\underline{z_{2,3}} = \underline{z_{3,2}} = -\underline{z_{armor\ mutual}} = \underline{z_8}$$

$\underline{z_8}$ è la mutua impedenza (per unità di lunghezza) dell'armatura cilindrica tra il *loop* interno 2 e il *loop* esterno 3

$$\underline{z_{pm,x}} = \frac{\rho}{2\pi * r_{in} * r_{ext} * H} = \underline{z_4} = \underline{z_8}$$

Visto che non ci sono legami tra il *loop* 1 e il *loop* 3, $\underline{z_{1,3}} = \underline{z_{3,1}} = 0$

Per quanto riguarda la $\underline{z_{self\ earth}} = \underline{z_{11}}$ con ritorno via mare o via terra è necessario conoscere solo la corrente che vi fluisce e non la sua distribuzione; per questo motivo l'impedenza interna può essere calcolata con grande approssimazione rispetto la geometria.

Si fa riferimento, per il suo calcolo, al modello con ritorno a distanza infinita.

Il cavo si può considerare completamente immerso in un mezzo infinito in tutte le sue direzioni, la $\underline{z_{11}}$ si ricava direttamente dalla $\underline{z_{pin}}$ ipotizzando che il mezzo dove è posato il cavo sia un conduttore tubolare di sezione infinita, quindi con raggio esterno infinito e il raggio interno uguale a quello esterno dell'armatura.

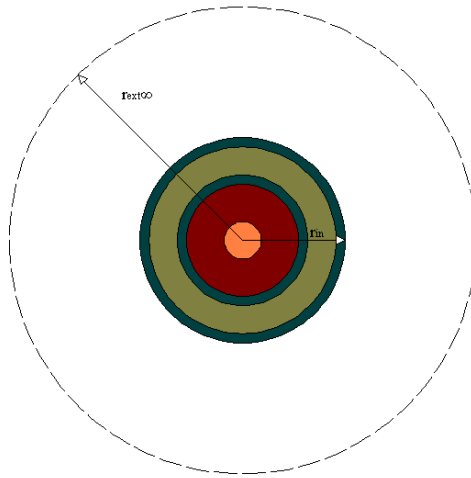


Figura 3.4 Modello a distanza infinita

Considerando che:

$$\lim_{r_{ext} \rightarrow \infty} [K_1(\sigma * r_{ext})] = 0$$

$$\underline{z_{pin}} = \frac{\rho * \sigma}{2\pi * r_{in}} \left(\frac{I_0(\sigma * r_{in}) * K_1(\sigma * r_{ext}) + K_0(\sigma * r_{in}) * I_1(\sigma * r_{ext})}{I_1(\sigma * r_{ext}) * K_1(\sigma * r_{in}) - I_1(\sigma * r_{in}) * K_1(\sigma * r_{ext})} \right) = \frac{\rho * \sigma}{2\pi * r_{in}} * \frac{K_0(\sigma * r_{in})}{K_1(\sigma * r_{in})}$$

ottenendo

$$\underline{z_{self\ earth}} = \frac{\rho_{\infty} * \sigma_{\infty}}{2\pi * r_{ext\ armor}} * \frac{K_0(\sigma_{\infty} * r_{ext\ armor})}{K_1(\sigma_{\infty} * r_{ext\ armor})} = \underline{z_{11}}$$

La matrice delle impedenze di *loop* $\underline{Z_{LOOP}}$ di un cavo monopolare formato da un conduttore di fase, schermo e armatura è così strutturata:

$$\underline{Z_{LOOP}} = \begin{pmatrix} \underline{z_{1,1}} & \underline{z_{1,2}} & 0 \\ \underline{z_{2,1}} & \underline{z_{2,2}} & \underline{z_{2,3}} \\ 0 & \underline{z_{3,2}} & \underline{z_{3,3}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{z_1} + \underline{z_2} + \underline{z_3} & -\underline{z_4} & 0 \\ -\underline{z_4} & \underline{z_5} + \underline{z_6} + \underline{z_7} & -\underline{z_8} \\ 0 & -\underline{z_8} & \underline{z_9} + \underline{z_{10}} + \underline{z_{11}} \end{pmatrix}$$

$$\underline{Z}_L = \left((T')^{-1} * \begin{array}{|c|c|c|} \hline \underline{Z}_{1,1} & \underline{Z}_{1,2} & \underline{Z}_{1,3} \\ \hline \underline{Z}_{2,1} & \underline{Z}_{2,2} & \underline{Z}_{2,3} \\ \hline \underline{Z}_{3,1} & \underline{Z}_{3,2} & \underline{Z}_{3,3} \\ \hline \end{array} * T^{-1} \right) = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \underline{Z}_{c,c} & \underline{Z}_{c,s} & \underline{Z}_{c,a} \\ \hline \underline{Z}_{s,c} & \underline{Z}_{s,s} & \underline{Z}_{s,a} \\ \hline \underline{Z}_{a,c} & \underline{Z}_{a,s} & \underline{Z}_{a,a} \\ \hline \end{array} \quad \left[\frac{\Omega}{Km} \right]$$

\underline{Z}_{LOOP}

Nel caso di più cavi posti a una distanza d_{ij} l'uno dall'altro bisogna tener in considerazione della loro mutua interazione perché la corrente totale del cavo i -esimo (\sum corrente conduttore, schermo e armatura) che si richiude attraverso il terreno/mare/aria determina una certa distribuzione di potenziale nel terreno adiacente al cavo j -esimo, che è causa di tensioni indotte nei conduttori che costituiscono il cavo stesso

La teoria dei *loops* mostra come le fasi di una linea in cavo siano accoppiate attraverso il *loop* esterno, il campo magnetico esterno al cavo prodotto dal *loop* 1 e 2 è zero poiché il campo generato dalla corrente nel conduttore di fase è compensato dalla corrente di ritorno nello schermo sia per il cavo 1 che per il cavo 2.

La presenza di più cavi viene tenuta in considerazione grazie l'impedenza $\underline{Z}_{m_{ij}}$ definita nel seguente modo:

$$\underline{Z}_{m_{ij}} = \frac{\rho_{\infty} * K_0(\sigma_{\infty} * d_{ij})}{2\pi * r_i * r_j * K_1(\sigma_{\infty} * r_i) * K_1(\sigma_{\infty} * r_j)} \cong \frac{\rho_{\infty} * \sigma_{\infty} * K_0(\sigma_{\infty} * d_{ij})}{2\pi * r_i * K_1(\sigma_{\infty} * r_i)}$$

Con r_i e r_j raggi esterni del cavo i e j .

Come detto prima questa impedenza si prende in considerazione nel calcolo dell'impedenza di *loop* $\underline{Z}_{loop_linea}$ di ordine $(3n \times 3n)$ con n numero di cavi.

Prendendo un sistema di 3 cavi unipolari, nella diagonale principale saranno presenti le sottomatrici \underline{Z}_{L-aa} , \underline{Z}_{L-bb} e \underline{Z}_{L-cc} di *loop* dei singoli cavi mentre al di fuori della diagonale principale posizioneremo le sottomatrici $\underline{Z}_{L-ab} = \underline{Z}_{L-ba}$, $\underline{Z}_{L-ac} = \underline{Z}_{L-ca}$ e $\underline{Z}_{L-bc} = \underline{Z}_{L-cb}$.

Quest'ultime matrici prendono in considerazione della presenza di più cavi e rappresentano le mutue impedenze tra i *loops* esterni.

$$\underline{Z}_{loop_linea} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \underline{Z}_{L-aa} & \underline{Z}_{L-ab} & \underline{Z}_{L-ac} \\ \hline \underline{Z}_{L-ba} & \underline{Z}_{L-bb} & \underline{Z}_{L-bc} \\ \hline \underline{Z}_{L-ca} & \underline{Z}_{L-cb} & \underline{Z}_{L-cc} \\ \hline \end{array}$$

$$\underline{Z}_{loop_linea} = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccccc} c_a & s_a & a_a & c_b & s_b & a_b & c_c & s_c & a_c & \\ \hline \underline{z_{c,c_a}} & \underline{z_{c,s_a}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_a \\ \underline{z_{s,c_a}} & \underline{z_{s,s_a}} & \underline{z_{s,a_a}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_a \\ 0 & \underline{z_{a,s_a}} & \underline{z_{a,a_a}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_a \\ \hline 0 & 0 & 0 & \underline{z_{c,c_b}} & \underline{z_{c,s_b}} & 0 & 0 & 0 & 0 & c_b \\ 0 & 0 & 0 & \underline{z_{s,c_b}} & \underline{z_{s,s_b}} & \underline{z_{s,a_b}} & 0 & 0 & 0 & s_b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{z_{a,s_b}} & \underline{z_{a,a_b}} & 0 & 0 & 0 & a_b \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{z_{c,c_c}} & \underline{z_{c,s_c}} & 0 & c_c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{z_{s,c_c}} & \underline{z_{s,s_c}} & \underline{z_{s,a_c}} & s_c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{z_{a,s_c}} & \underline{z_{a,a_c}} & a_c \end{array} \end{array}$$

Indichiamo con:

- $\underline{Z}_{m-ab} = \underline{Z}_{m-ba}$: mutua impedenza tra armatura del cavo a ed armatura del cavo b
- $\underline{Z}_{m-ac} = \underline{Z}_{m-ca}$: mutua impedenza tra armatura del cavo a ed armatura del cavo c
- $\underline{Z}_{m-bc} = \underline{Z}_{m-cb}$: mutua impedenza tra armatura del cavo b ed armatura del cavo c

Indicando rispettivamente i vettori colonna $\underline{U}_L, \underline{I}_L$ delle tensioni e correnti di loop rispettivamente:

$$\underline{U} = \begin{array}{c} \underline{U}_{L_a} \\ \underline{U}_{L_b} \\ \underline{U}_{L_c} \end{array} = \begin{array}{c} \underline{u}_{c_a} \\ \underline{u}_{s_a} \\ \underline{u}_{a_a} \\ \underline{u}_{c_b} \\ \underline{u}_{s_b} \\ \underline{u}_{a_b} \\ \underline{u}_{c_c} \\ \underline{u}_{s_c} \\ \underline{u}_{a_c} \end{array} \begin{array}{l} \text{cavo a} \\ \text{cavo b} \\ \text{cavo c} \end{array} \quad \underline{I} = \begin{array}{c} \underline{I}_{L_a} \\ \underline{I}_{L_b} \\ \underline{I}_{L_c} \end{array} = \begin{array}{c} \underline{i}_{c_a} \\ \underline{i}_{s_a} \\ \underline{i}_{a_a} \\ \underline{i}_{c_b} \\ \underline{i}_{s_b} \\ \underline{i}_{a_b} \\ \underline{i}_{c_c} \\ \underline{i}_{s_c} \\ \underline{i}_{a_c} \end{array} \begin{array}{l} \text{cavo a} \\ \text{cavo b} \\ \text{cavo c} \end{array}$$

Andando a generalizzare la matrice T otteniamo, nel caso di tre cavi:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

Andando a legare le grandezze di loop con quelle di fase otteniamo le relazioni:

$$\begin{aligned} \underline{U}_L &= T' * \underline{U} \\ \underline{I}_L &= T * \underline{I} \end{aligned}$$

La matrice delle impedenze longitudinali \underline{Z}_L diventa:

$$\underline{Z}_L = \left[(T')^{-1} * \underline{Z}_{loop_linea} * T^{-1} \right]$$

ed assume la seguente forma:

$$\underline{Z}_L = \begin{bmatrix} z_a & Z_{m-ab} & Z_{m-ac} \\ Z_{m-ba} & z_b & Z_{m-bc} \\ Z_{m-ca} & Z_{m-cb} & z_c \end{bmatrix} = \begin{matrix} & \begin{matrix} c_a & s_a & a_a & c_b & s_b & a_b & c_c & s_c & a_c \end{matrix} \\ \begin{matrix} c_a \\ s_a \\ a_a \\ c_b \\ s_b \\ a_b \\ c_c \\ s_c \\ a_c \end{matrix} & \begin{bmatrix} \underline{z}_{c,c,a} & \underline{z}_{c,s,a} & \underline{z}_{c,a,a} & \underline{Z}_{m-ab} & \underline{Z}_{m-ab} & \underline{Z}_{m-ab} & \underline{Z}_{m-ac} & \underline{Z}_{m-ac} & \underline{Z}_{m-ac} \\ \underline{z}_{s,c,a} & \underline{z}_{s,s,a} & \underline{z}_{s,a,a} & \underline{Z}_{m-ab} & \underline{Z}_{m-ab} & \underline{Z}_{m-ab} & \underline{Z}_{m-ac} & \underline{Z}_{m-ac} & \underline{Z}_{m-ac} \\ \underline{z}_{a,c,a} & \underline{z}_{a,s,a} & \underline{z}_{a,a,a} & \underline{Z}_{m-ab} & \underline{Z}_{m-ab} & \underline{Z}_{m-ab} & \underline{Z}_{m-ac} & \underline{Z}_{m-ac} & \underline{Z}_{m-ac} \\ \underline{Z}_{m-ba} & \underline{Z}_{m-ba} & \underline{Z}_{m-ba} & \underline{z}_{c,c,b} & \underline{z}_{c,s,b} & \underline{z}_{c,a,b} & \underline{Z}_{m-bc} & \underline{Z}_{m-bc} & \underline{Z}_{m-bc} \\ \underline{Z}_{m-ba} & \underline{Z}_{m-ba} & \underline{Z}_{m-ba} & \underline{z}_{s,c,b} & \underline{z}_{s,s,b} & \underline{z}_{s,a,b} & \underline{Z}_{m-bc} & \underline{Z}_{m-bc} & \underline{Z}_{m-bc} \\ \underline{Z}_{m-ba} & \underline{Z}_{m-ba} & \underline{Z}_{m-ba} & \underline{z}_{a,c,b} & \underline{z}_{a,s,b} & \underline{z}_{a,a,b} & \underline{Z}_{m-bc} & \underline{Z}_{m-bc} & \underline{Z}_{m-bc} \\ \underline{Z}_{m-ca} & \underline{Z}_{m-ca} & \underline{Z}_{m-ca} & \underline{Z}_{m-cb} & \underline{Z}_{m-cb} & \underline{Z}_{m-cb} & \underline{z}_{c,c,c} & \underline{z}_{c,s,c} & \underline{z}_{c,a,c} \\ \underline{Z}_{m-ca} & \underline{Z}_{m-ca} & \underline{Z}_{m-ca} & \underline{Z}_{m-cb} & \underline{Z}_{m-cb} & \underline{Z}_{m-cb} & \underline{z}_{s,c,c} & \underline{z}_{s,s,c} & \underline{z}_{s,a,c} \\ \underline{Z}_{m-ca} & \underline{Z}_{m-ca} & \underline{Z}_{m-ca} & \underline{Z}_{m-cb} & \underline{Z}_{m-cb} & \underline{Z}_{m-cb} & \underline{z}_{a,c,c} & \underline{z}_{a,s,c} & \underline{z}_{a,a,c} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

L'intera linea verrà discretizzata in celle elementari ed ogni cella verrà rappresentata dal modello a π .

La matrice \underline{Z}_L viene posizionata longitudinalmente nel modello in figura 3.5.

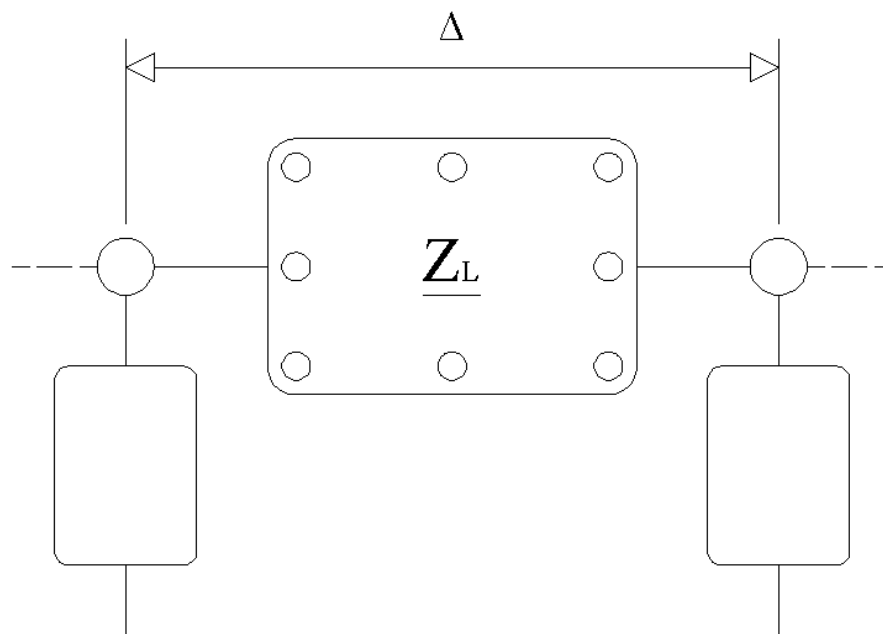


Figura 3.5 Collocazione di \underline{Z}_L nella cella elementare

3.4. Matrici delle ammettenze trasversali

Ora si andrà a determinare le matrici alle ammettenze trasversali nel modello a π della cella. Nel calcolo degli elementi si tiene conto della capacità tra materiali conduttivi e la conduttanza trasversale che presenta il materiale isolante. Le auto e mutue ammettenze sono determinate dalle seguente formula:

$$\underline{y}_{x,x+1} = g + j\omega c = \frac{\omega * 2\pi * \epsilon * (\tan \delta + j)}{\ln\left(\frac{r_{x+1}}{r_x}\right)}$$

Dove:

- x : strato conduttivo considerato
- g_1, c_1, g_2, c_2 : conduttanza e capacità dei primi due strati d'isolante
- ϵ : costante dielettrica
- $\tan \delta$: fattore di perdita del materiale isolante

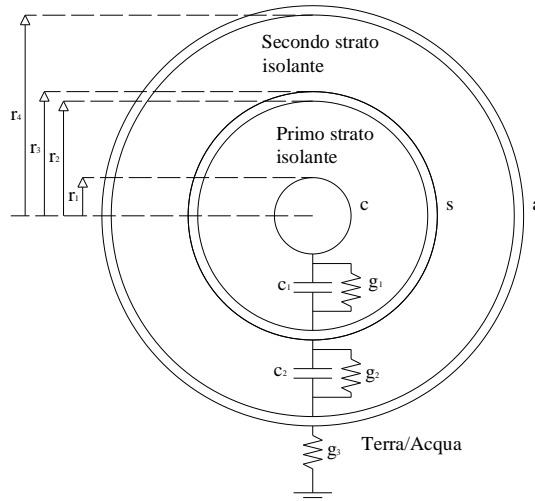


Figura 3.6 Ammettenze trasversali del cavo

Si nota subito che la matrice, di mezza cella, è anch'essa (3×3) ; dalle regole di determinazione delle auto e mutue ammettenze si ottiene:

$$\underline{Y}_{TS} = \underline{Y}_{TR} = \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} & c & s & a \\ \begin{array}{c} c \\ s \\ a \end{array} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline \underline{y}_{1,1} & \underline{y}_{1,2} & \underline{y}_{1,3} \\ \hline \underline{y}_{2,1} & \underline{y}_{2,2} & \underline{y}_{2,3} \\ \hline \underline{y}_{3,1} & \underline{y}_{3,2} & \underline{y}_{3,3} \\ \hline \end{array} & = & \begin{array}{|c|c|c|} \hline c & \underline{y}_{c,s} & -\underline{y}_{c,s} & \\ \hline s & -\underline{y}_{c,s} & \underline{y}_{c,s} + \underline{y}_{s,a} & -\underline{y}_{s,a} \\ \hline a & & -\underline{y}_{s,a} & \underline{y}_{s,a} \\ \hline \end{array} \end{array} \end{array}$$

Andiamo ora ad estendere, come nel capitolo precedente, la matrice delle ammettenze trasversali trovata per un cavo, alla linea composta da tre cavi unipolari non tenendo in considerazione la conduttanza tra le armature in quanto estremamente piccola.

La rappresentazione della matrice alle ammettenze trasversali che considera la presenza dei tre cavi assumerà la seguente forma:

$$\underline{Y}_{TS} = \underline{Y}_{TR} =$$

	c_a	s_a	a_a	c_b	s_b	a_b	c_c	s_c	a_c	
	$\underline{y}_{c,s}$	$-\underline{y}_{c,s}$	0	0	0	0	0	0	0	c_a
	$-\underline{y}_{c,s}$	$\underline{y}_{c,s} + \underline{y}_{s,a}$	$-\underline{y}_{s,a}$	0	0	0	0	0	0	s_a
	0	$-\underline{y}_{s,a}$	$\underline{y}_{s,a}$	0	0	0	0	0	0	a_a
	0	0	0	$\underline{y}_{c,s}$	$-\underline{y}_{c,s}$		0	0	0	c_b
	0	0	0	$-\underline{y}_{c,s}$	$\underline{y}_{c,s} + \underline{y}_{s,a}$	$-\underline{y}_{s,a}$	0	0	0	s_b
	0	0	0		$-\underline{y}_{s,a}$	$\underline{y}_{s,a}$	0	0	0	a_b
	0	0	0	0	0	0	$\underline{y}_{c,s}$	$-\underline{y}_{c,s}$	0	c_c
	0	0	0	0	0	0	$-\underline{y}_{c,s}$	$\underline{y}_{c,s} + \underline{y}_{s,a}$	$-\underline{y}_{s,a}$	s_c
	0	0	0	0	0	0	0	$-\underline{y}_{s,a}$	$\underline{y}_{s,a}$	a_c

Ricordando che le due matrici $\underline{Y}_{TS}, \underline{Y}_{TR}$ nel modello a π valgono per metà cella elementare inserendole trasversalmente nella figura 3.7 ottengo:

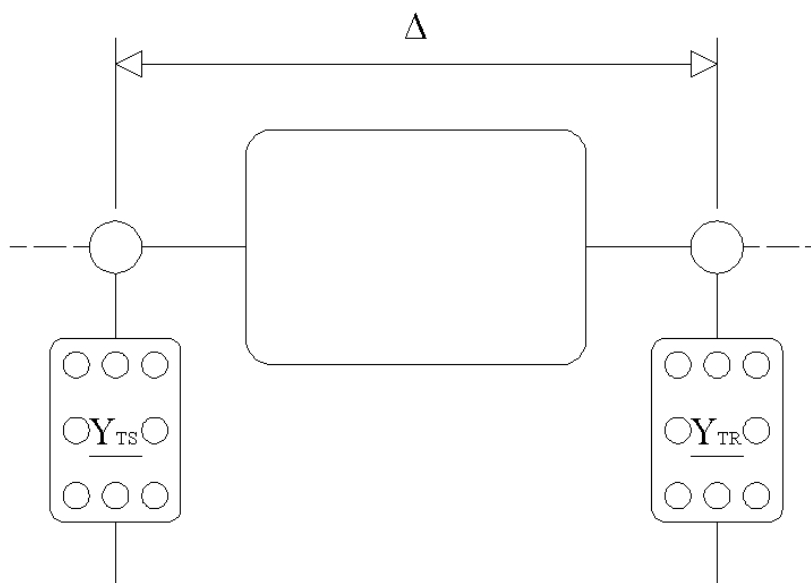


Figura 3.7 Collocazione di \underline{Y}_{TS} e \underline{Y}_{TR} nella cella elementare

E combinandola insieme alla matrice longitudinale ottengo:

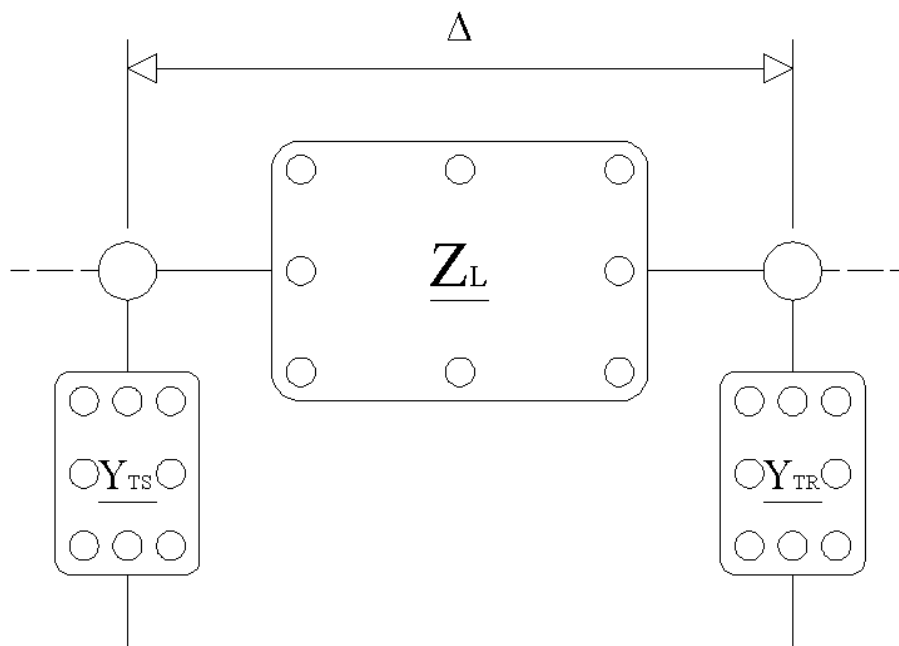


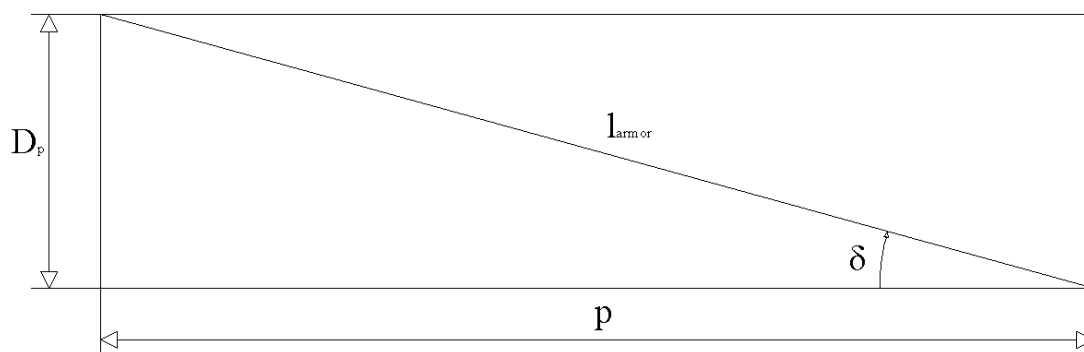
Figura 3.8 Cella elementare \underline{Y}_Δ

3.5. Modellizzazione dell'armatura composta da n-fili

L'armatura viene sempre modellizzata come un conduttore tubolare composto dal diametro interno pari a quello effettivo e diametro esterno calcolato in modo tale che le sezione risulti pari a quella complessiva dei fili.

Possiamo impostare il calcolo della resistenza chilometrica dell'armatura nel seguente modo.

Supponiamo d'avere un'armatura formata da n fili di diametro d_f cordati con passo p :



Calcoliamo prima la resistenza relativa ad un passo di cordatura con la formula:

$$R = \frac{\rho_{armor}}{S_{armor}} * l_{armor}$$

dove:

- ρ_{armor} : resistività del materiale dell'armatura
- $S_{armor} = n * \frac{\pi d_f^2}{4}$: sezione complessiva dell'armatura
- $l_{armor} = \sqrt{p^2 + D_p^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{D_p}{p}\right)^2} = p\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} = \frac{p}{\cos \delta}$: lunghezza del singolo filo d'armatura in un passo di cordatura
- $D_p = \sqrt{D_{in armor}^2 + (d_f^2 * n * \cos \delta)}$: diametro esterno equivalente dell'armatura composta da n fili

Inserendo le precedenti nella formula della resistenza:

$$R = \frac{4 * \rho_{armor}}{n * \pi * d_f^2} * \frac{p}{\cos \delta}$$

Trovo il numero di passi n_p in 1 km di cavo: $n_p = \frac{1}{p}$.

La resistenza chilometrica r diventa:

$$R = \frac{4 * \rho_{armor}}{n * \pi * d_f^2} * \frac{p}{\cos \delta} * \frac{1}{p} = \frac{4 * \rho_{armor}}{n * \pi * d_f^2} * \frac{1}{\cos \delta} \quad \left[\frac{\Omega}{Km} \right]$$

Per quanto riguarda la parte magnetica, sappiamo che la permeabilità presenta valori diversi nella direzione lungo i fili e normalmente ad essi, per la presenza dello spazio tra filo e filo.

Chiamando μ_n la permeabilità che si incontra nella direzione normale al filo e μ_l la permeabilità lungo la direzione del filo, la permeabilità totale risulta:

$$\mu_{tot} = \frac{\pi * n * d}{4 * p} |\mu_l| * e^{-j\alpha} \sin \delta + \mu_n \cos^2 \delta$$

La permeabilità da inserire nelle formule viste risulta essere:

$$\mu_{armor(n-fili)} = \mu_{armor} * \mu_{tot}$$

CAPITOLO 4

Metodo matriciale per il calcolo delle grandezze elettriche

4.1. Matrice delle ammettenze della cella elementare \underline{Y}_Δ

Prendendo in considerazione il cavo coassiale possiamo pensare il sistema composto da $n=9$ strati conduttivi (3fase, 3schermo, 3armatura) e indichiamo con 1,2,3 i tre materiali conduttori come mostrato in figura.

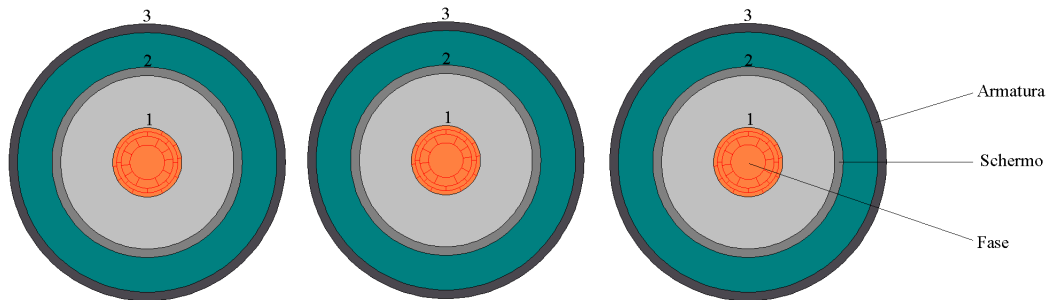


Figura 4.1 Composizione della terna di cavi

L'intera linea può essere rappresentata come la serie di m -celle elementari di opportuna lunghezza Δ_l , per es. 20÷100 m (più piccola è, migliore è la determinazione delle correnti e tensioni lungo la linea). Ogni cella è indicata con il modello π dove i vettori colonna delle tensioni ai nodi sono $\underline{u}_S, \underline{u}_R$ e i vettori colonna delle correnti sono $\underline{i}_S, \underline{i}_{SL}, \underline{i}_{ST}, \underline{i}_R, \underline{i}_{RL}, \underline{i}_{RT}$.

La matrice \underline{Z}_L ($n \times n$) è stata trovata nel paragrafo 3.3 mentre le matrici $\underline{Y}_{TS}, \underline{Y}_{TR}$ nel paragrafo 3.4.

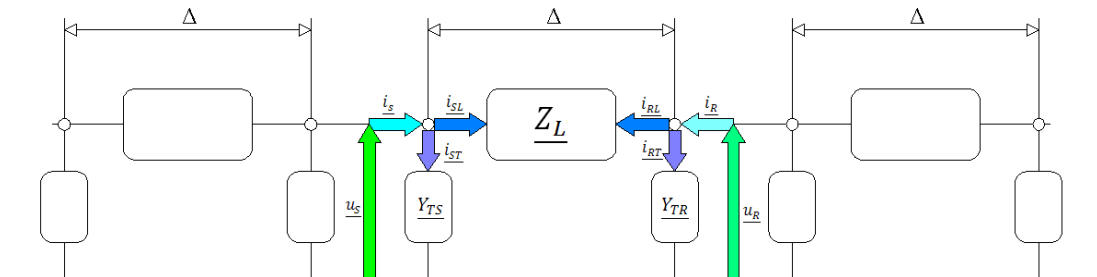


Figura 4.2 Suddivisione delle celle elementari \underline{Y}_Δ di lunghezza Δ

Dalla figura 4.2 ricaviamo immediatamente:

$$\begin{aligned} \underline{i}_S &= \underline{i}_{SL} + \underline{i}_{ST} \\ \underline{i}_R &= \underline{i}_{RL} + \underline{i}_{RT} \\ \underline{i}_{SL} + \underline{i}_{RL} &= 0 \\ \underline{u}_S + \underline{u}_R &= \underline{Z}_L * \underline{i}_{SL} \end{aligned}$$

Dalle precedenti equazioni ricaviamo le relazioni matriciali per quanto riguarda le grandezze riferite alla parte longitudinale della cella Δ_l

$$\begin{array}{c} \boxed{\begin{array}{c} \underline{i}_{SL} \\ \underline{i}_{RL} \end{array}} = \boxed{\begin{array}{cc} \underline{Z}_L^{-1} & -\underline{Z}_L^{-1} \\ -\underline{Z}_L^{-1} & \underline{Z}_L^{-1} \end{array}} \boxed{\begin{array}{c} \underline{u}_S \\ \underline{u}_R \end{array}} \\ \underline{i}_{L\Delta} \qquad \underline{Y}_{L\Delta} \qquad \underline{u}_{\Delta} \end{array}$$

Come sappiamo \underline{Z}_L è una matrice (9×9) , dunque $\underline{Y}_{L\Delta}$ risulterà (18×18) .

Per quanto riguarda i blocchi trasversali delle celle abbiamo

$$\begin{array}{c} \boxed{\begin{array}{c} \underline{i}_{ST} \\ \underline{i}_{RT} \end{array}} = \boxed{\begin{array}{cc} \underline{Y}_{TS} & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{TR} \end{array}} \boxed{\begin{array}{c} \underline{u}_S \\ \underline{u}_R \end{array}} \\ \underline{i}_{T\Delta} \qquad \underline{Y}_{T\Delta} \qquad \underline{u}_{\Delta} \end{array}$$

$\underline{Y}_{T\Delta}$ anch'essa avrà dimensione (18×18) .

Dalle ultime due relazioni otteniamo

$$\begin{array}{c} \boxed{\begin{array}{c} \underline{i}_S \\ \underline{i}_R \end{array}} = \boxed{\underline{Y}_{L\Delta} + \underline{Y}_{T\Delta}} \boxed{\begin{array}{c} \underline{u}_S \\ \underline{u}_R \end{array}} \\ \underline{i}_{\Delta} \qquad \underline{Y}_{\Delta} \qquad \underline{u}_{\Delta} \end{array}$$

\underline{Y}_{Δ} rappresenta la matrice totale della singola cella (di lunghezza Δ_l) in regime stazionario, la sua dimensione è $(2n \times 2n) = (18 \times 18)$.

Ogni blocco può essere rappresentato come un doppio ennepolo (figura 4.3), di conseguenza per ogni nodo si avrà nove tensioni e nove correnti.

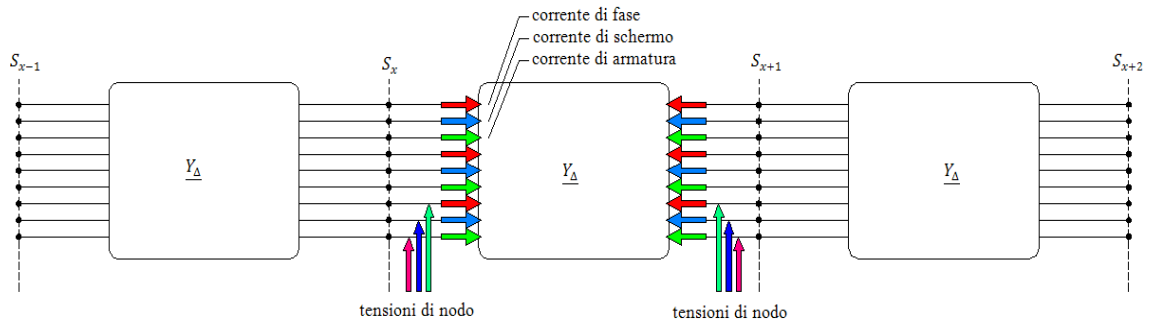


Figura 4.3 Rappresentazione della cella come doppio ennepolo

4.2. Tecnica d'eliminazione dei conduttori passivi

Tramite un semplice procedimento di risoluzione matriciale possiamo ottenere il valore dell'impedenza longitudinale del cavo analizzato, ovvero un unico valore d'impedenza il quale tiene conto in modo globale dell'iterazione dei conduttori passivi cioè schermo e armatura.

Facendo riferimento alla matrice alle impedenze \underline{Z}_L (3 x 3), si ricava il seguente sistema matriciale:

$$\begin{array}{c} \underline{u}_f \\ \underline{u}_s \\ \underline{u}_a \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \underline{z}_{f,f} & \underline{z}_{f,s} & \\ \hline \underline{z}_{s,f} & \underline{z}_{s,s} & \underline{z}_{s,a} \\ \hline & \underline{z}_{a,s} & \underline{z}_{a,a} \\ \hline \end{array} * \begin{array}{c} \underline{i}_f \\ \underline{i}_s \\ \underline{i}_a \end{array}$$

$$\underline{u} \qquad \underline{Z}_L \qquad \underline{i}$$

attraverso la partizione del sistema $\underline{u} = \underline{Z}_L * \underline{i}$ indicata in fig si ricava l'impedenza di fase, la quale tiene conto dello schermo e dell'armatura:

$$0 \left\{ \begin{array}{c} \underline{u}_f \\ \underline{u}_s \\ \underline{u}_a \end{array} \right. = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \underline{A} & \underline{B} & \\ \hline \underline{z}_{f,f} & \underline{z}_{f,s} & \\ \hline \underline{C} & \underline{D} & \\ \hline \end{array} * \begin{array}{c} \underline{i}_f \\ \underline{i}_s \\ \underline{i}_a \end{array} \left. \right\} \underline{i}_x$$

Ponendo $\underline{u}_s = \underline{u}_a = 0$ si ricava :

$$\begin{aligned} \underline{u}_f &= \underline{A} * \underline{i}_f + \underline{B} * \underline{i}_x \\ 0 &= \underline{C} * \underline{i}_f + \underline{D} * \underline{i}_x \Rightarrow \underline{i}_x = -(\underline{D}^{-1}\underline{C}) * \underline{i}_f \\ \underline{u}_f &= \underline{A} * \underline{i}_f - \underline{BD}^{-1}\underline{C} * \underline{i}_f = (\underline{A} - \underline{BD}^{-1}\underline{C}) * \underline{i}_f \end{aligned}$$

Dove:

$$\underline{Z}_{fase} = (\underline{A} - \underline{BD}^{-1}\underline{C}) \quad \left[\frac{\Omega}{Km} \right]$$

è l'impedenza del conduttore di fase la quale ingloba i valori dello schermo e dell'armatura.

4.3. Matrice di collegamento ai generatori armonici

Prendiamo il collegamento tra il generatore di tensione e la fase del cavo con una bassa impedenza a inizio e fine linea. Tra la sezione S_A e S_0 andiamo a posizionare la conduttanza g dei fili di collegamento la quale rappresenta una resistenza estremamente bassa.

Ricaviamo le matrici $Y_{sourceA}$, $Y_{sourceB}$ a inizio e fine linea sapendo che l'auto ammettenza nei nodi di collegamento è g mentre la mutua ammettenza è $-g$.

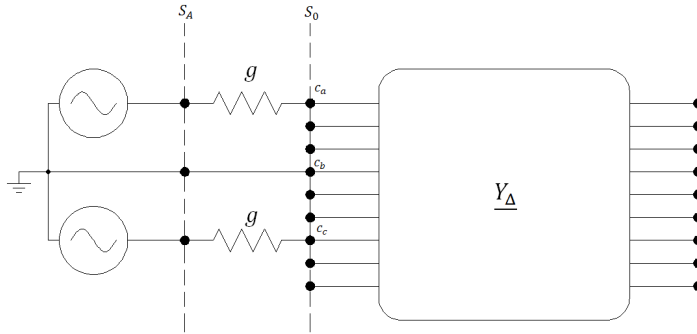
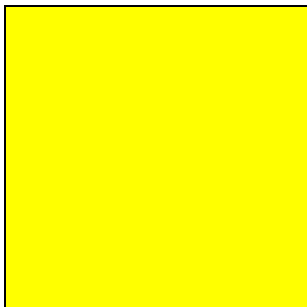


Figura 4.4 Rappresentazione del collegamento ai generatori armonici

	c_a	c_b	c_c	c_a	s_a	a_a	c_b	s_b	a_b	c_c	s_c	a_c		
$Y_{sourceA} =$	g			$-g$									c_a	
													c_b	
			g							$-g$			c_c	
		$-g$		g									c_a	
													s_a	
													a_a	
													c_b	
													s_b	
													a_b	
				$-g$							g			c_c
														s_c
														a_c

	c_a	s_a	a_a	c_b	s_b	a_b	c_c	s_c	a_c	c_a	c_b	c_c		
$Y_{sourceB} =$	g									$-g$			c_a	
													s_a	
													a_a	
													c_b	
													s_b	
													a_b	
							g					$-g$		c_c
														s_c
														a_c
		$-g$									g			c_a
														c_b
							$-g$						g	c_c

Indicheremo con il seguente blocco tale matrice:



4.4. Matrice degli smoothing reactor

L'induttanza di spianamento andrà a modificare il comportamento di solo due dei tre cavi, quindi sempre in corrispondenza della sezione S_A e S_0 andiamo ad inserire la suscettanza jb .

Tale valore sarà dato dalla formula $b = \frac{1}{\omega * l}$ dove ω è la pulsazione elettrica mentre l è il valore dell'induttanza che si andrà a scegliere.

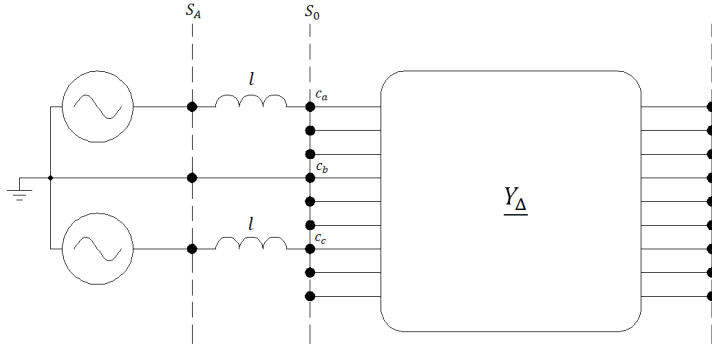


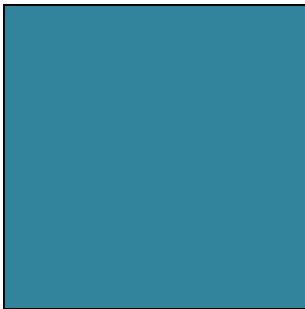
Figura 4.5 Rappresentazione collegamento degli smooth reactor

Indichiamo con $Y_{smoothA}$ e $Y_{smoothB}$ le matrici (che posizioneremo ad inizio e fine linea) di questi componenti che verranno costruite nel seguente modo:

	c_a	c_b	c_c	c_a	s_a	a_a	c_b	s_b	a_b	c_c	s_c	a_c	
$Y_{smoothA} =$	jb			$-jb$									c_a
													c_b
			jb								$-jb$		c_c
	$-jb$			jb									c_a
													s_a
													a_a
													c_b
													s_b
													a_b
			$-jb$								jb		c_c
													s_c
													a_c

$$\underline{Y}_{smoothB} = \begin{array}{c}
 \begin{array}{cccccccccccc}
 c_a & s_a & a_a & c_b & s_b & a_b & c_c & s_c & a_c & c_a & c_b & c_c
 \end{array} \\
 \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|}
 \hline
 jb & & & & & & & & & -jb & & \\
 \hline
 & & & & & & & & & & & \\
 \hline
 & & & & & & & & & & & \\
 \hline
 & & & & & & & & & & & \\
 \hline
 & & & & & & & & & & & \\
 \hline
 & & & & & & & & & & & \\
 \hline
 & & & & & & jb & & & & & -jb \\
 \hline
 & & & & & & & & & & & \\
 \hline
 & & & & & & & & & & & \\
 \hline
 & & & & & & & & & & & \\
 \hline
 -jb & & & & & & & & & jb & & \\
 \hline
 & & & & & & & & & & & \\
 \hline
 & & & & & & -jb & & & & & jb \\
 \hline
 \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 c_a \\
 s_a \\
 a_a \\
 c_b \\
 s_b \\
 a_b \\
 c_c \\
 s_c \\
 a_c \\
 c_a \\
 c_b \\
 c_c
 \end{array}$$

Indicheremo tale matrice con il seguente blocco:



4.5. Matrici di messa a terra

Per ridurre le tensioni indotte su schermo e armatura andiamo a cortocircuitarle e metterle a terra attraverso appositi picchetti di materiale conduttivo all'inizio e alla fine del cavo, ovvero in corrispondenza del nodo S_0 e S_m .

Indicheremo con r le resistenze dovute alla saldatura schermo-armatura, mentre la resistenza R indicherà proprio la resistenza del picchetto.

Per quanto riguarda le messe a terra lungo il cavo queste vengono rappresentate cortocircuitando lo schermo e l'armatura.

Ricaviamo le due matrici che poi andranno a completare la matrice totale:

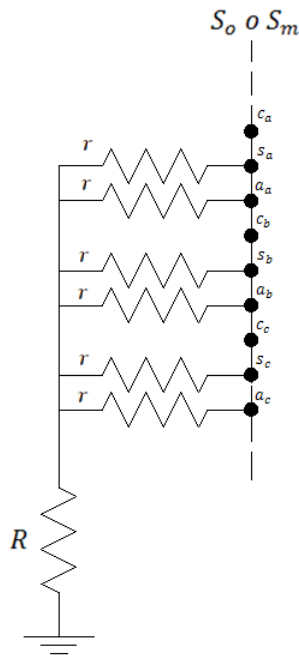


Figura 4.6 Rappresentazione della messa a terra a inizio/fine linea di schermi e armature

Andiamo a trovare le ammettenze:

$$\underline{y}_{ss} = \left. \frac{I_s}{V_s} \right|_{V_a=0} = \frac{1}{r + \left(\frac{r}{5} \parallel R \right)} = \frac{5R + r}{r(6R + r)}$$

$$\underline{y}_{sa} = \left. \frac{I_s}{V_a} \right|_{V_s=0}$$

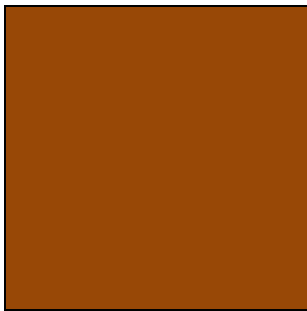
$$\underline{I}_s = \frac{\left(\frac{r}{4} \parallel R \right)}{r + \left(\frac{r}{4} \parallel R \right)} * \underline{I}_a = \frac{\left(\frac{r}{4} \parallel R \right)}{r + \left(\frac{r}{4} \parallel R \right)} * \frac{(5R + r) * V_a}{r(6R + r)} = - \frac{R}{r(r + 6R)} * \underline{V}_a = \underline{y}_{sa} * \underline{V}_a$$

$$\underline{y}_{sa} = - \frac{R}{r(r + 6R)}$$

Si deduce che $\underline{y}_{as} = \underline{y}_{sa}$ e $\underline{y}_{aa} = \underline{y}_{ss}$.

$$\underline{Y}_{MT} = \begin{array}{ccccccccc|c}
 & c_a & s_a & a_a & c_b & s_b & a_b & c_c & s_c & a_c & \\
 \hline
 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_a \\
 & 0 & \underline{y_{ss_a}} & \underline{y_{sa_a}} & 0 & \underline{y_{sa}} & \underline{y_{as}} & 0 & \underline{y_{sa}} & \underline{y_{as}} & s_a \\
 & 0 & \underline{y_{as_a}} & \underline{y_{aa_a}} & 0 & \underline{y_{as}} & \underline{y_{sa}} & 0 & \underline{y_{as}} & \underline{y_{sa}} & a_a \\
 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_b \\
 & 0 & \underline{y_{sa}} & \underline{y_{as}} & 0 & \underline{y_{ss_b}} & \underline{y_{sa_b}} & 0 & \underline{y_{sa}} & \underline{y_{as}} & s_b \\
 & 0 & \underline{y_{as}} & \underline{y_{sa}} & 0 & \underline{y_{as_b}} & \underline{y_{aa_b}} & 0 & \underline{y_{as}} & \underline{y_{sa}} & a_b \\
 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_c \\
 & 0 & \underline{y_{sa}} & \underline{y_{as}} & 0 & \underline{y_{sa}} & \underline{y_{as}} & 0 & \underline{y_{ss_c}} & \underline{y_{sa_c}} & s_c \\
 & 0 & \underline{y_{as}} & \underline{y_{sa}} & 0 & \underline{y_{as}} & \underline{y_{sa}} & 0 & \underline{y_{as_c}} & \underline{y_{aa_c}} & a_c
 \end{array}$$

Indichiamo schematicamente tale matrice:



Possiamo ridurre ulteriormente la tensione su schermi ed armature cortocircuitandoli (come mostrato in figura 4.7) ad intervalli regolari lungo la linea :

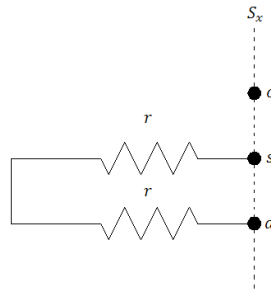


Figura 4.7 Rappresentazione del corto circuito tra schermo e armatura lungo la linea

		c	s	a
c				
$\underline{Y}_{mt=}$	s		\underline{y}_{ss}	\underline{y}_{sa}
a			\underline{y}_{as}	\underline{y}_{aa}

Ricaviamo le ammettenze nel seguente modo:

$$\underline{y}_{ss} = \left. \frac{I_s}{V_s} \right|_{V_a=0} = \frac{1}{2r}$$

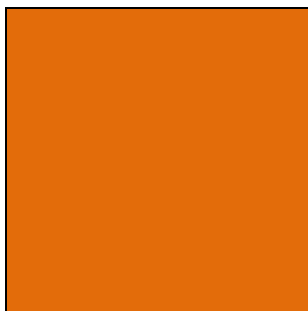
$$\underline{y}_{sa} = \left. \frac{I_s}{V_a} \right|_{V_s=0} = -\frac{1}{2r}$$

e quindi $\underline{y}_{as} = \underline{y}_{sa}$ e $\underline{y}_{aa} = \underline{y}_{ss}$.

Nel caso di tre cavi otteniamo la seguente matrice:

	c_a	s_a	a_a	c_b	s_b	a_b	c_c	s_c	a_c	
$\underline{Y}_{mt} =$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	c_a
	0	$\underline{y_{ss_a}}$	$\underline{y_{sa_a}}$	0	0	0	0	0	0	s_a
	0	$\underline{y_{as_a}}$	$\underline{y_{aa_a}}$	0	0	0	0	0	0	a_a
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	c_b
	0	0	0	0	$\underline{y_{ss_b}}$	$\underline{y_{sa_b}}$	0	0	0	s_b
	0	0	0	0	$\underline{y_{as_b}}$	$\underline{y_{aa_b}}$	0	0	0	a_b
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	c_c
	0	0	0	0	0	0	0	$\underline{y_{ss_c}}$	$\underline{y_{sa_c}}$	s_c
	0	0	0	0	0	0	0	$\underline{y_{as_c}}$	$\underline{y_{aa_c}}$	a_c

Schematizzando in:



4.6. Costruzione della matrice totale Y_{TOT}

Ora andiamo a costruire la matrice dell'intero sistema la quale tiene conto di tutti gli elementi descritti precedentemente.

Una volta trovata la matrice alle ammettenze della linea in cavo Y_{Δ} e le altre matrici possiamo creare il modello elettrico rappresentato in figura 4.8 dove $S_A, S_0, S_1, \dots, S_m$ sono i nodi o le porte delle celle elementari in cui la linea è stata discretizzata.

Tra i nodi S_A ed S_0 sono state inserite le matrici di collegamento ai generatori armonici e dell'induttanza di spianamento dopodiché dal nodo S_0 inizia la serie delle m celle della linea in cavo fino a ritrovare ancora la matrice di collegamento ai generatori armonici e gli *smooth reactor*.

Il circuito è caratterizzato dalla messa a terra di schermi e armature alle estremità e dal cortocircuito sempre di questi ad intervalli regolari.

Quindi fin'ora è stato possibile modellizzare con le matrici alle ammettenze gli elementi caratteristici del sistema elettrico della linea, inoltre notiamo la facilità del metodo multi conduttore che può adattare il modello a qualunque configurazione modificando le matrici corrispondenti alle sezioni interessate dalla variazione.

Le sovrapposizioni di elementi diversi in una stessa sezione si traducono semplicemente in una somma di matrici.

Da notare che la matrice totale risulterà molto sparsa perché non abbiamo rami in derivazione, con dimensione che dipenderà oltre naturalmente dalla lunghezza della linea anche dal numero di celle in cui è stata divisa.

La dimensione della matrice totale sarà data dalle dimensioni della singola cella per il numero di sezioni totali più la dimensione delle matrici rappresentate gli elementi del sistema (generatori, collegamenti, induttanze).

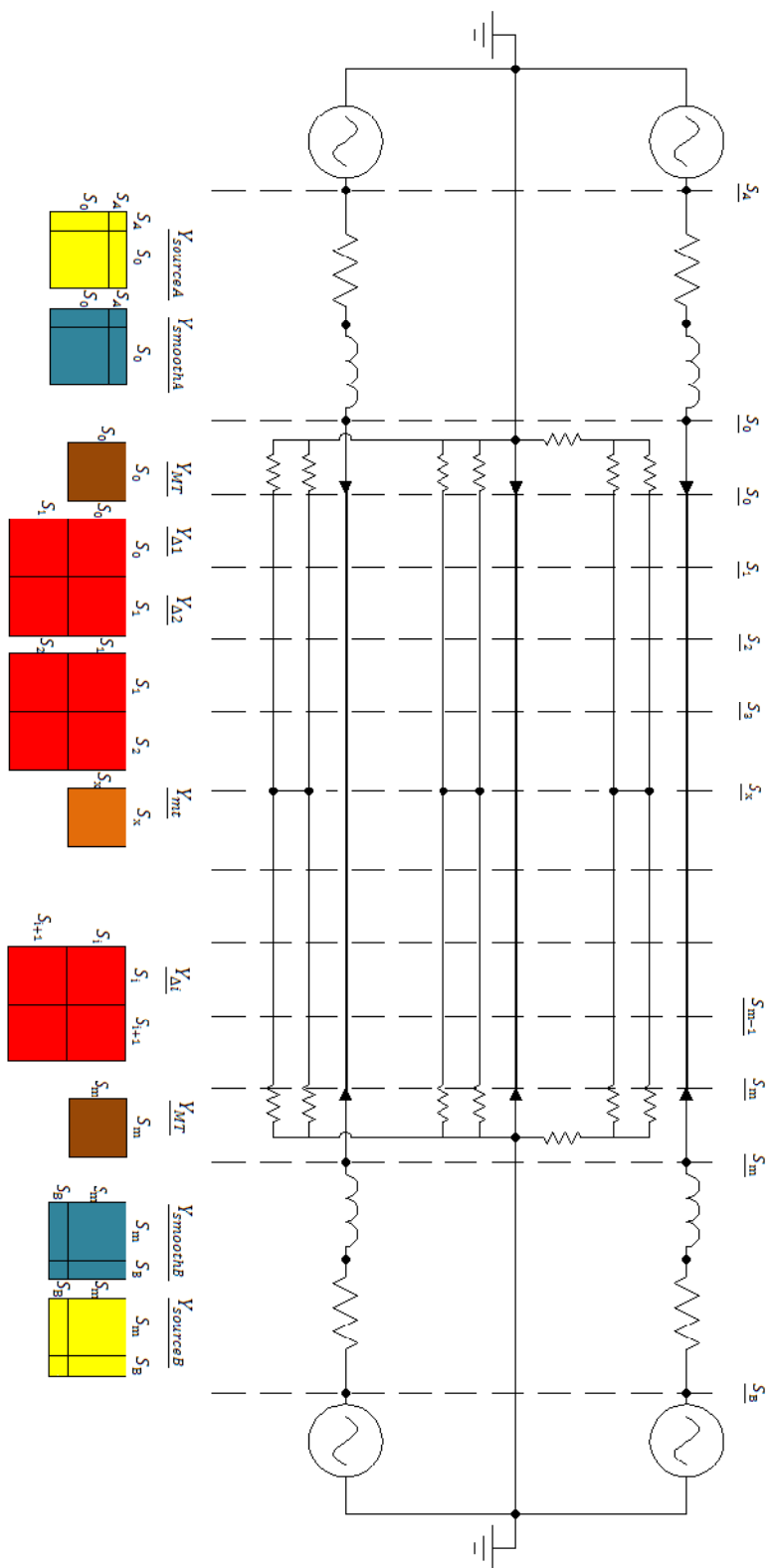


Figura 4.8 Circuito elettrico per lo studio armonico

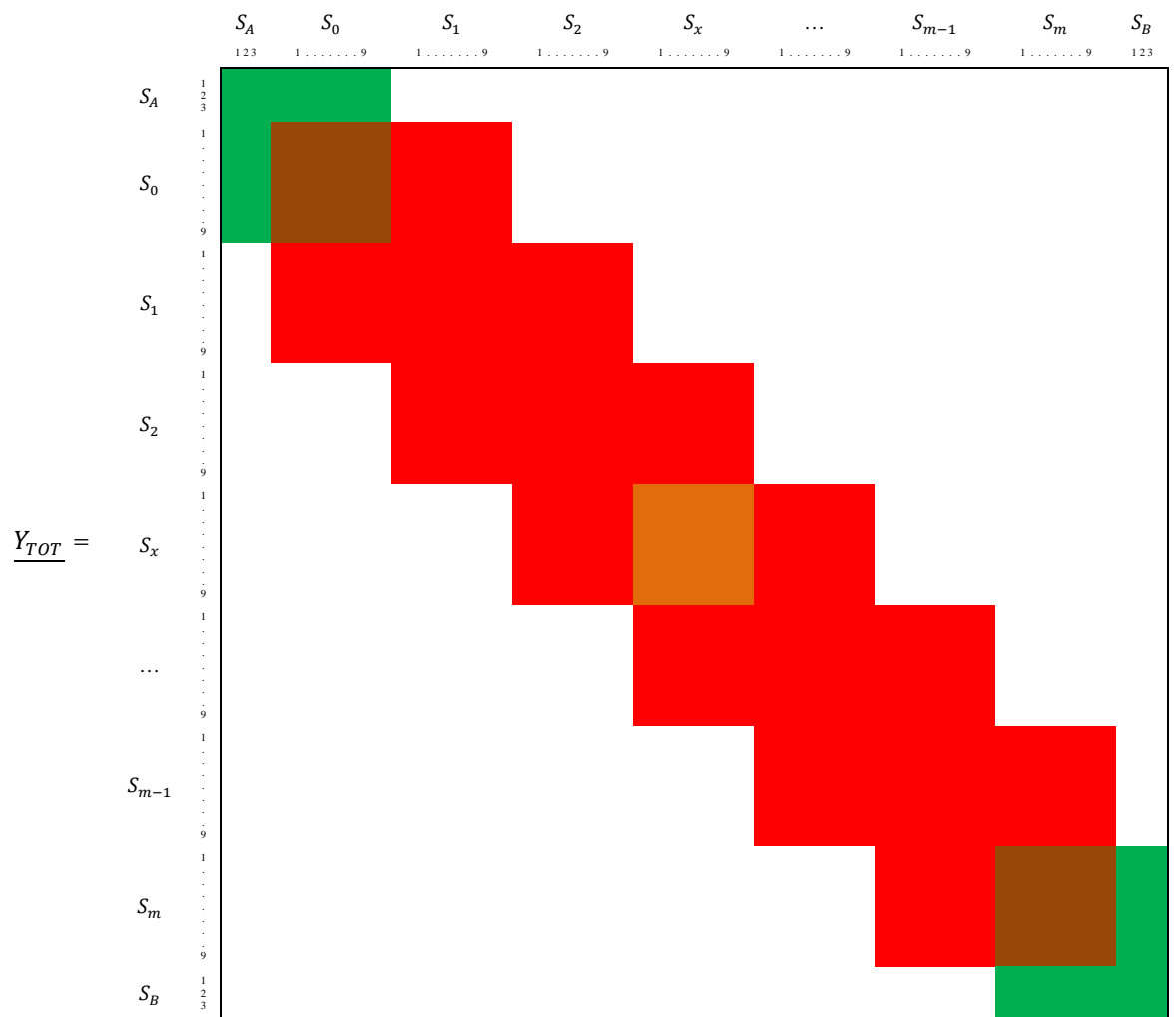


Figura 4.9 Costruzione della matrice \underline{Y}_{TOT}

4.7. Risoluzione del sistema matriciale

Costruita la matrice generale delle ammettenze che rappresenta l'intera linea l'espressione che lega le tensioni e le correnti nelle varie celle sarà: $\underline{i} = \underline{Y}_{TOT} * \underline{u}$, che può essere suddivisa come nella figura sottostante.

Sono noti i vettori delle tensioni armoniche di inizio e fine linea \underline{u}_{faseP} , \underline{u}_{faseA} , più si pone il vettore $\underline{i}_x = 0$, si ricava immediatamente la relazione:

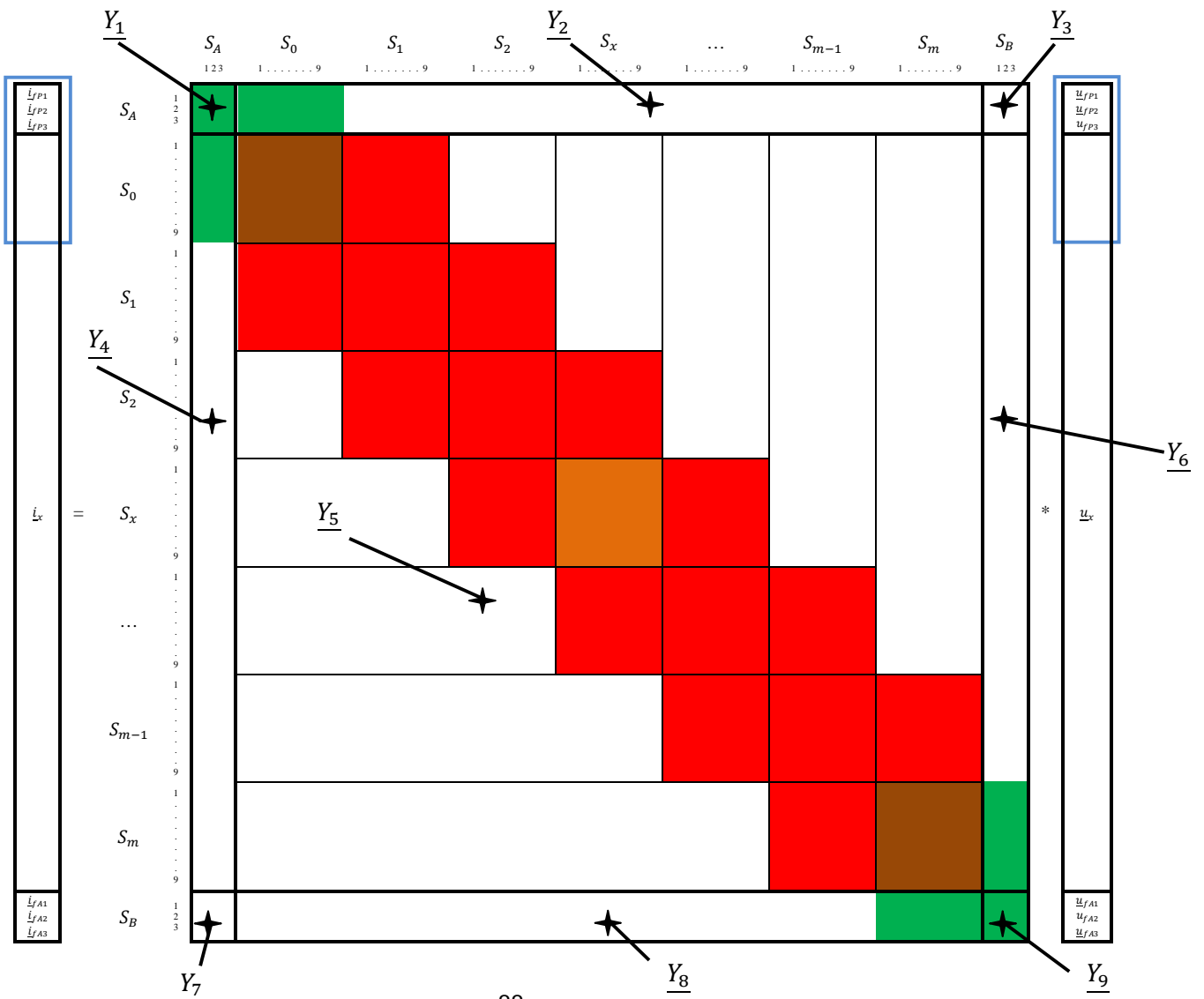
$$\underline{i}_x = 0 = \underline{Y}_4 * \underline{u}_{faseP} + \underline{Y}_5 * \underline{u}_x + \underline{Y}_6 * \underline{u}_{faseA}$$

Si ricava il vettore delle tensioni ai nodi lungo la linea:

$$\underline{u}_x = -(\underline{Y}_5)^{-1} * [\underline{Y}_4 * \underline{u}_{faseP} + \underline{Y}_6 * \underline{u}_{faseA}]$$

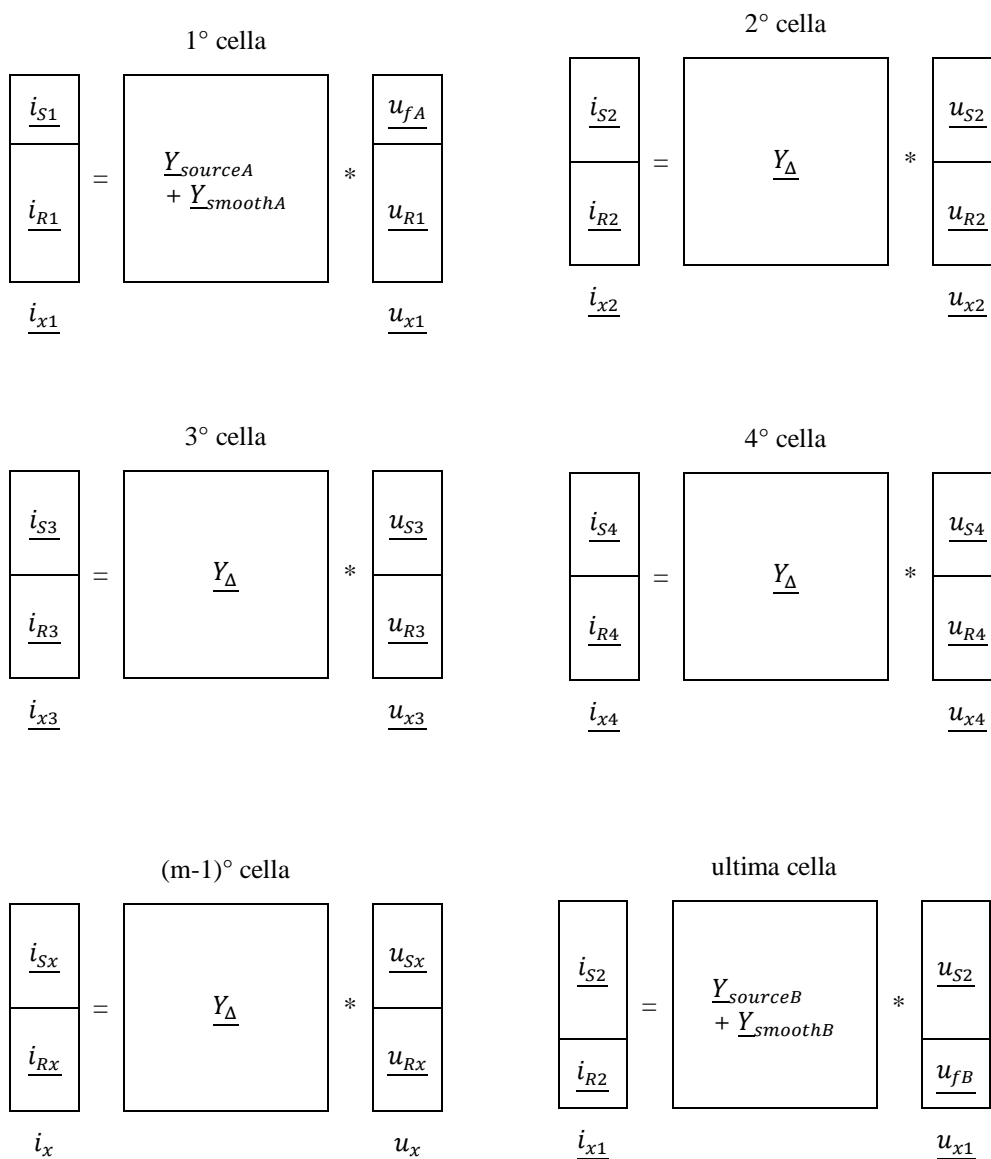
Una volta trovato il vettore \underline{u}_x si ricava il vettore \underline{i}_x in modo iterativo il quale rappresenta tutte le correnti entranti in ogni cella (nove correnti per ogni nodo).

A questo punto conosciamo l'andamento delle tensioni e correnti lungo tutta la linea di trasmissione.



Per ottenere il vettore \underline{i}_x si parte prendendo il vettore \underline{u}_x ed estraendo il primo vettore delle tensioni \underline{u}_{x1} (12 x 1) (evidenziato in blu nell'immagine precedente) lo si moltiplica per la prima cella che si trova, ovvero $\underline{Y}_{sourceA} + \underline{Y}_{smoothA}$, in questo modo si ricavano le prime 12 correnti, ovvero la prima sottomatrice \underline{i}_{x1} del vettore totale delle correnti (evidenziato in blu).

Poi si estrae il secondo vettore delle tensioni \underline{u}_{x2} (18 x 1) posizionato dal nodo S_0 al nodo S_1 che corrisponde alle tensioni della seconda cella lo si moltiplica per la cella elementare \underline{Y}_Δ e si ricava il secondo vettore delle correnti entranti nella cella \underline{i}_{x2} , questo procedimento iterativo verrà ripetuto fino all'ultima cella .



Attenzione che durante il calcolo del vettore \underline{i}_x ad ogni passaggio si ha che $\underline{u}_{S(x+1)} = \underline{u}_{R(x)}$, cioè le tensioni di partenza della cella successiva sono le tensioni di arrivo della cella precedente.

Il vettore corrente che andremo a considerare per ogni cella è $\underline{i}_{S(x)}$ e non l'intero vettore $\underline{i}_{x(x)}$ (18×1), infatti ogni cella risulta essere $\underline{i}_{Sx} = -\underline{i}_{Rx}$ da cui si potrà ricavare ad ogni iterazione da $\underline{i}_{x(x)}$ (18×1) il vettore $\underline{i}_{S(x)}$.

A questo punto conoscendo le tensioni su ciascun nodo e correnti entranti su ogni singola cella si conosce il loro andamento in funzione della lunghezza della linea e della frequenza applicata [12].

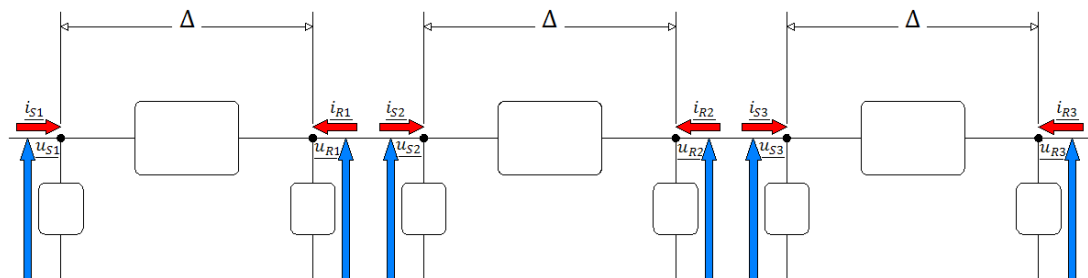


Figura 4.10 Tensioni e correnti di ogni cella

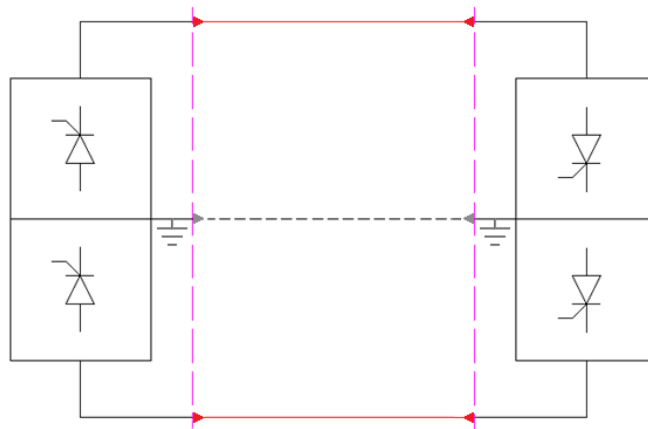
CAPITOLO 5

Implementazione algoritmo

5.1. Tipo di collegamento e cavo

La configurazione adottata è del tipo bipolare con ritorno metallico.

I cavi sono terrestri e non sottomarini, dunque la presenza dell'armatura, anche se non utilizzata nei cavi terrestri, è stata prevista per protezione da possibili danni esterni.



Nel prosieguo si definiscono le varie caratteristiche elettriche e geometriche del cavo utilizzato:

- Sezione conduttore di fase: 1500 [mm²]
- Diametro conduttore di fase: 43.8 [mm]
- Resistività elettrica cond. di fase ($\theta = 90^\circ$): $2.2952 * 10^{-5}$ [$\Omega * \text{mm}$]
- Permeabilità magnetica assoluta cond. di fase: $4\pi * 10^{-10}$ [H/mm]
- Diametro interno schermo: 82.5 [mm]
- Diametro esterno schermo: 89.1 [mm]
- Resistività elettrica schermo ($\theta = 20^\circ$): $2.14 * 10^{-4}$ [$\Omega * \text{mm}$]
- Permeabilità magnetica assoluta schermo: $4\pi * 10^{-10}$ [H/mm]
- N.ro fili armatura: 42
- Diametro fili d'acciaio: 5 [mm]
- Diametro interno armatura: 100.7 [mm]
- Diametro esterno equivalente armatura: 105.6 [mm]
- Resistività elettrica armatura ($\theta = 20^\circ$): $1.38 * 10^{-4}$ [$\Omega * \text{mm}$]
- Costante dielettrica relativa 1° isolante: 4.3
- Permeabilità magnetica assoluta 1° isolante: $4\pi * 10^{-10}$ [H/mm]
- Fattore di perdita 1° isolante $\tan\delta$: 0.001
- Costante dielettrica relativa 2° isolante: 2.3
- Permeabilità magnetica assoluta 2° isolante: $4\pi * 10^{-10}$ [H/mm]
- Fattore di perdita 2° isolante $\tan\delta$: $7 * 10^{-4}$
- Distanza tra conduttori: 1 [m]
- Resistenza di contatto schermo-armatura: 10^{-4} [Ω]
- Resistenza di messa a terra: 0.1 [Ω]
- Conduttanza di collegamento: $5 * 10^3$ [S]
- Induttanza di spianamento 1: 100 [mH]
- Induttanza di spianamento 2: 200 [mH]
- Induttanza di spianamento 3: 700 [mH]

5.2. Risultati

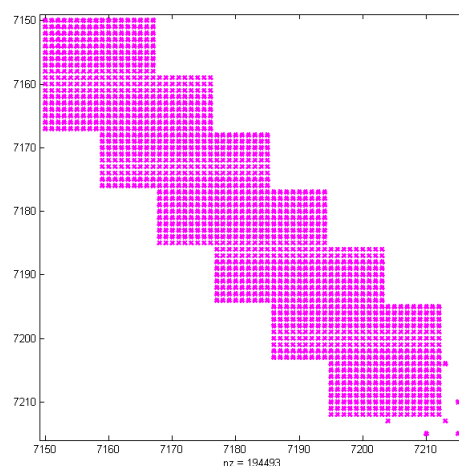
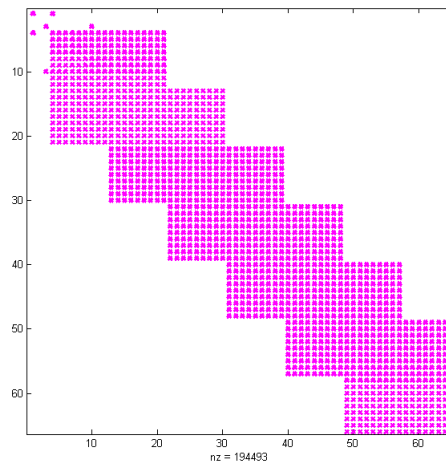
Si riportano i grafici ottenuti con l'applicazione del *MCA*; le frequenze armoniche sono di ordine $n=12k$, con k numero intero.

Si è scelto una lunghezza di 80 km con tensione nominale $U_n = \pm 300 \text{ kV c.c.}$ e viene visualizzato l'andamento delle tensioni e correnti per la frequenza considerata: 600 Hz (12° armonica) e 1200 Hz (24° armonica), dopodiché si andranno ad inserire gli *smoothing reactor* e si riporterà l'andamento delle correnti trovate.

Si sono assunti le seguenti ampiezze di tensione per i generatori armonici: dell'11% per la 12° e del 6% per la 24° della tensione nominale.

Lo schermo e l'armatura dei cavi sono a terra a inizio e fine linea inoltre ogni 20 km lo schermo è cortocircuitato con l'armatura.

Si mostrano due pezzi della matrice totale di linea: gli elementi colorati in viola sono gli elementi non nulli mentre tutto il resto sono elementi nulli dunque la matrice è molto sparsa.



5.2.1. Tensioni e correnti senza smoothing reactor

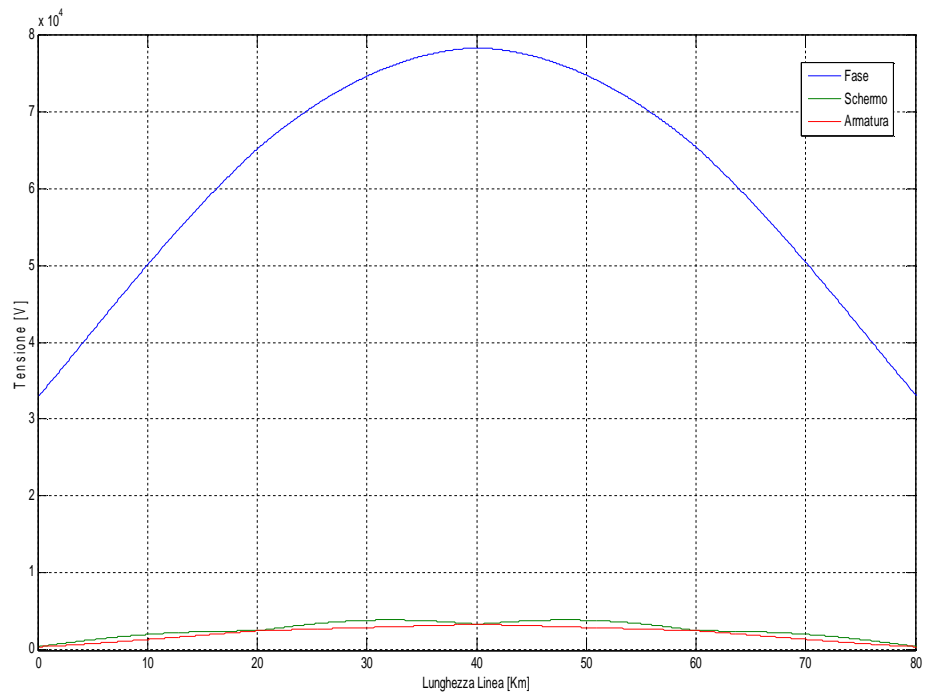


Figura 5.1 Tensione sul polo 1 a 600 Hz

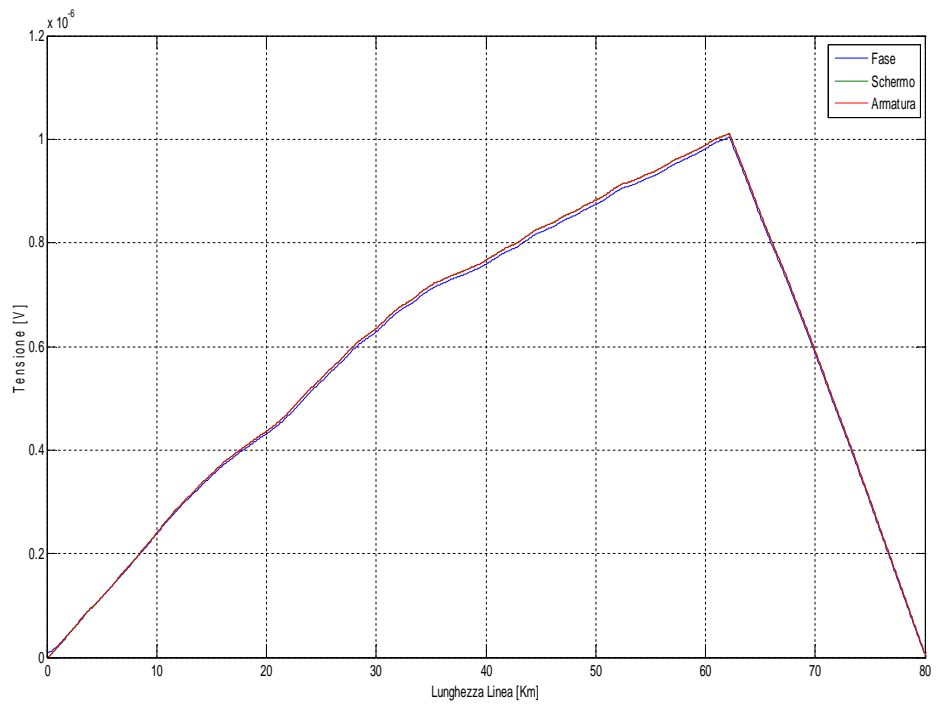


Figura 5.2 Tensione sul ritorno metallico a 600 Hz

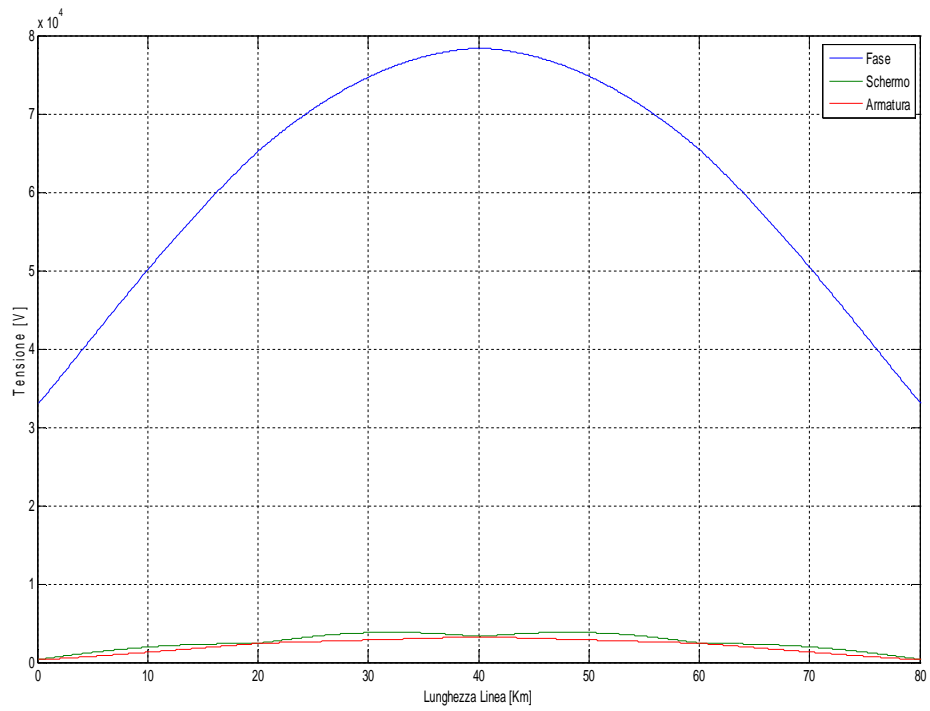


Figura 5.3 Tensione sul polo 2 a 600 Hz

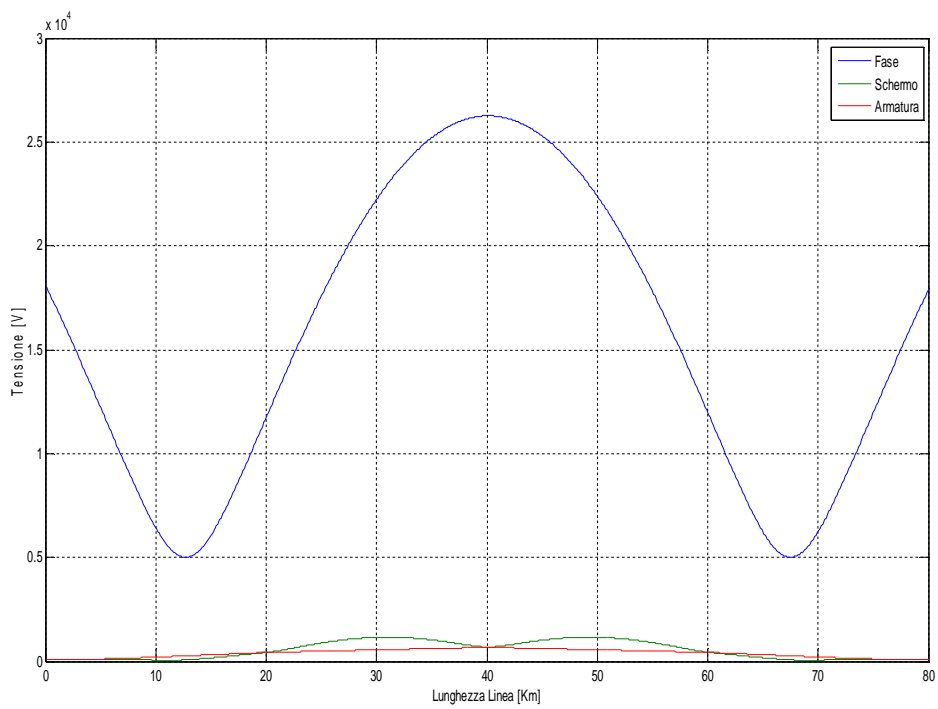


Figura 5.4 Tensione sul polo 1 a 1200 Hz

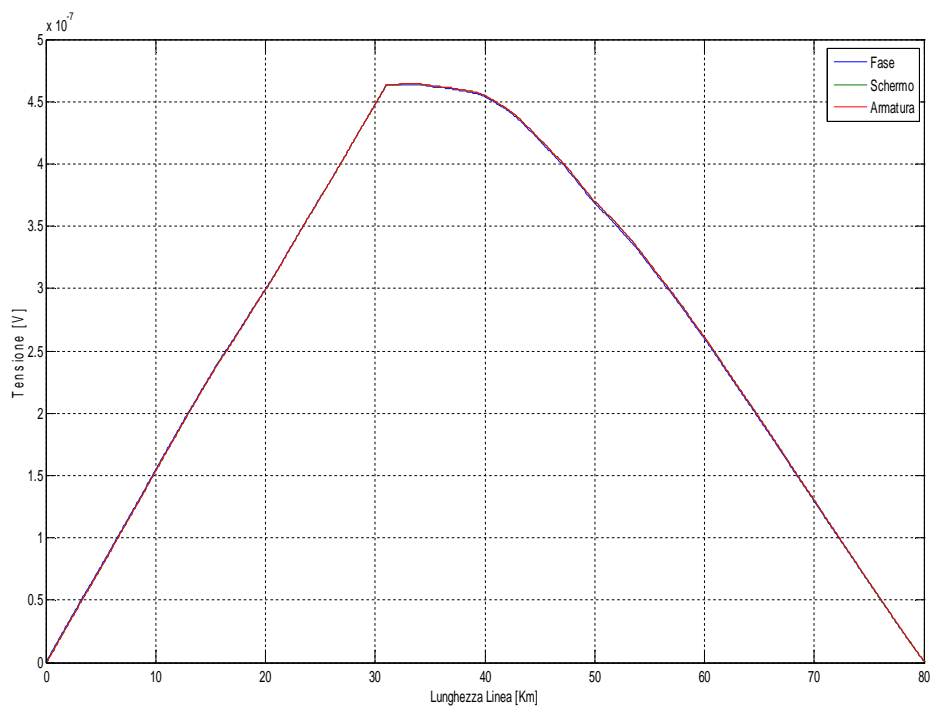


Figura 5.5 Tensione sul ritorno metallico a 1200 Hz

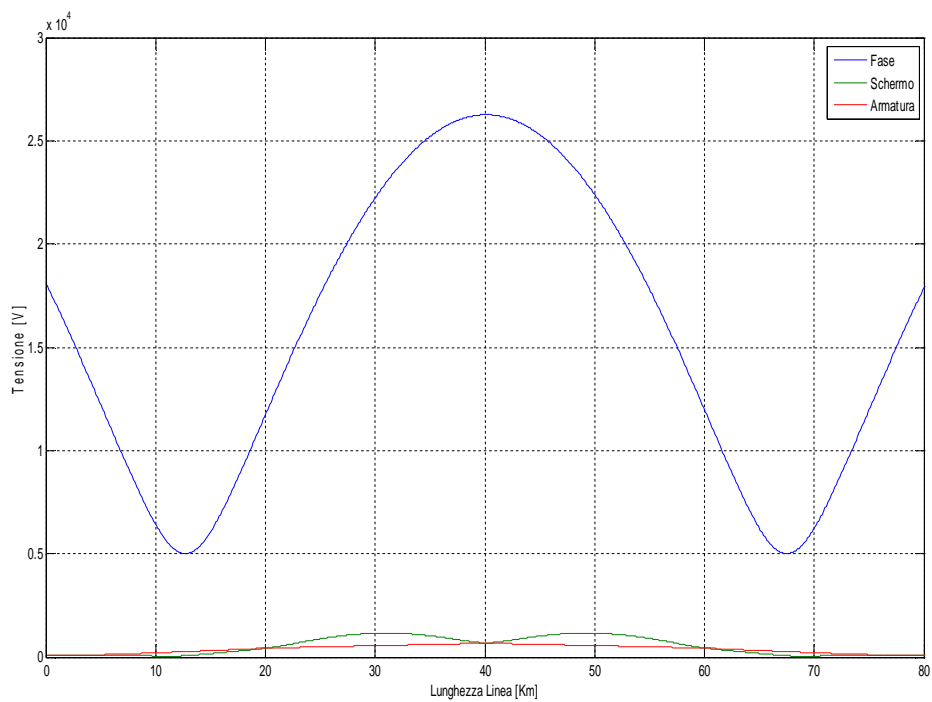


Figura 5.6 Tensione sul polo 2 a 1200 Hz

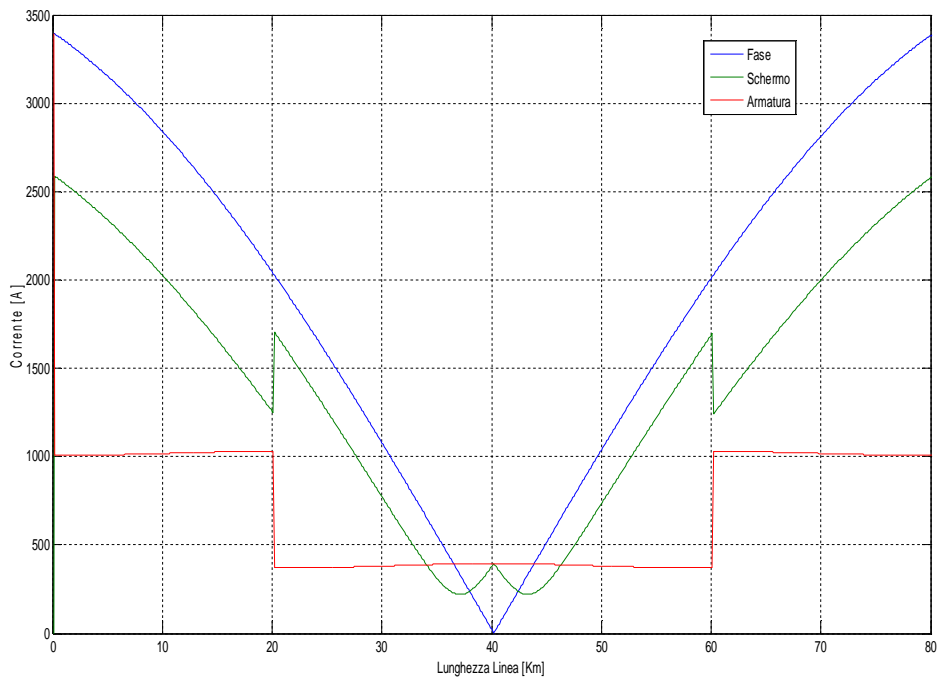


Figura 5.7 Corrente sul polo 1 a 600 Hz

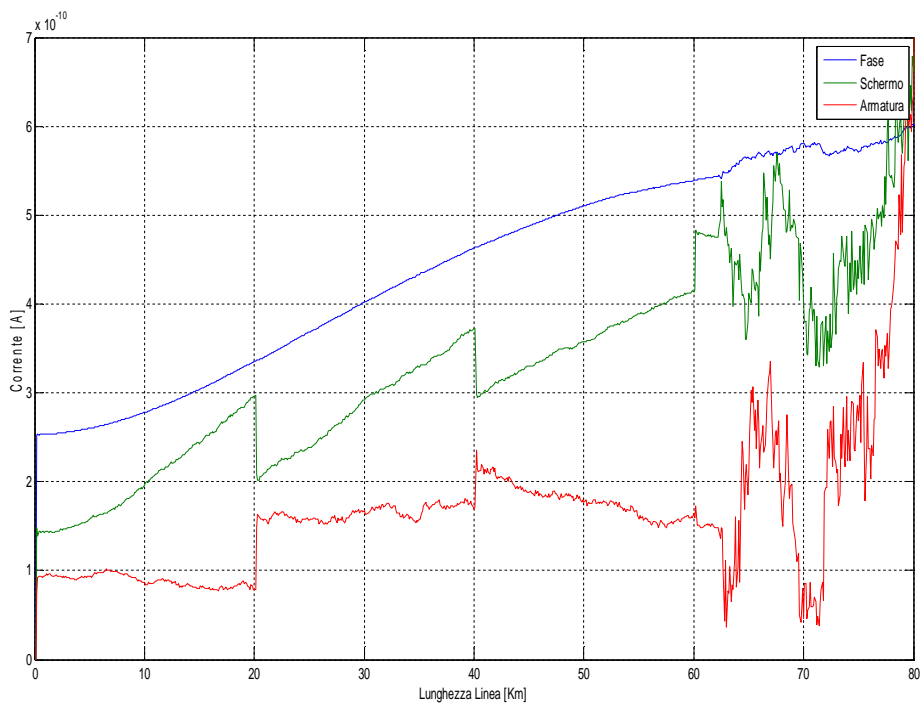


Figura 5.8 Corrente sul ritorno metallico a 600 Hz

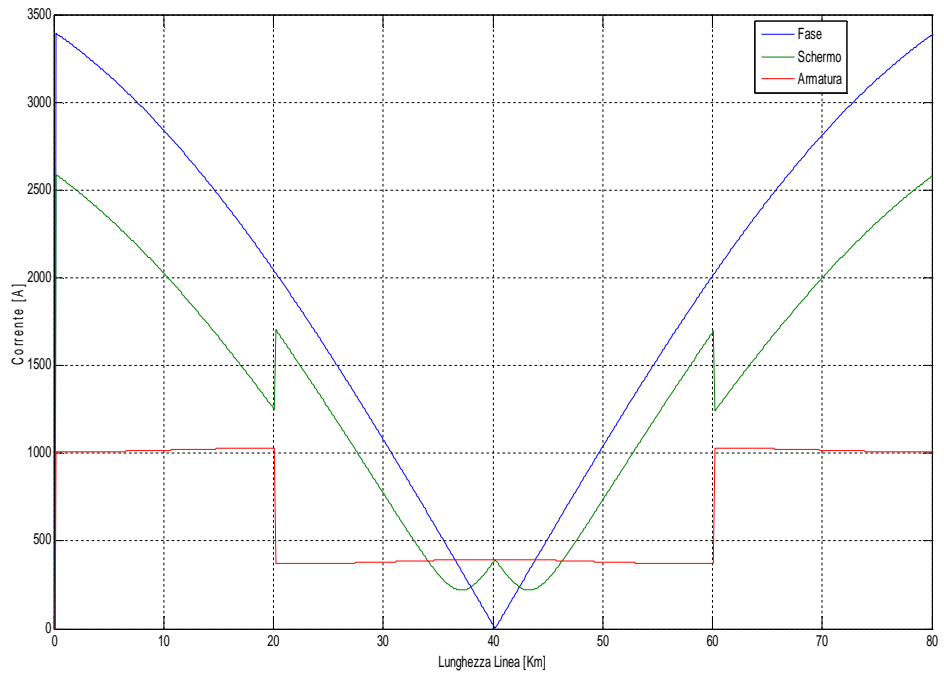


Figura 5.9 Corrente sul polo 2 a 600 HZ

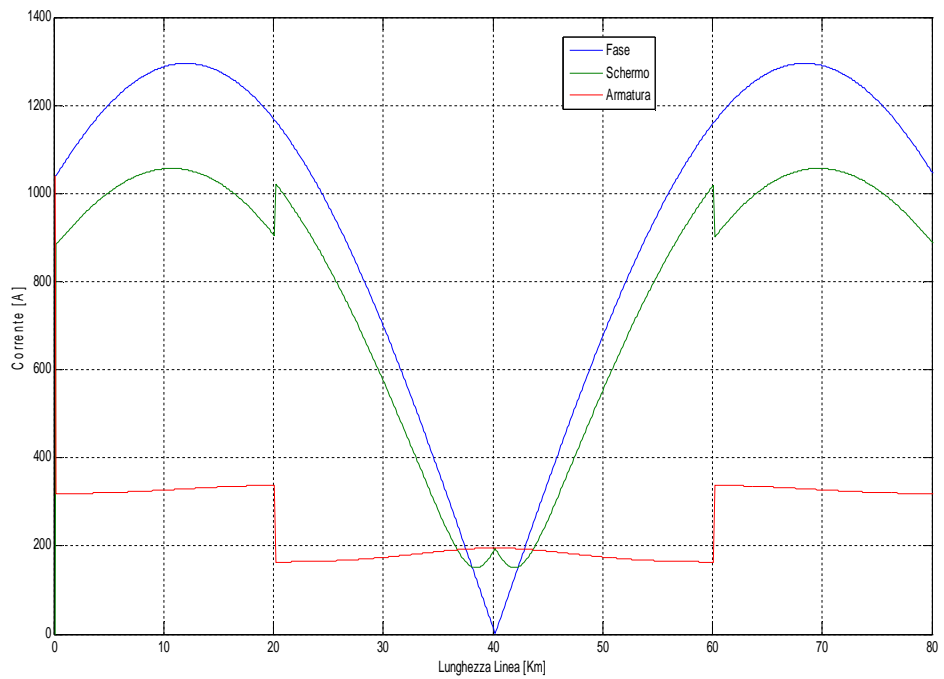


Figura 5.10 Corrente sul polo 1 a 1200 Hz

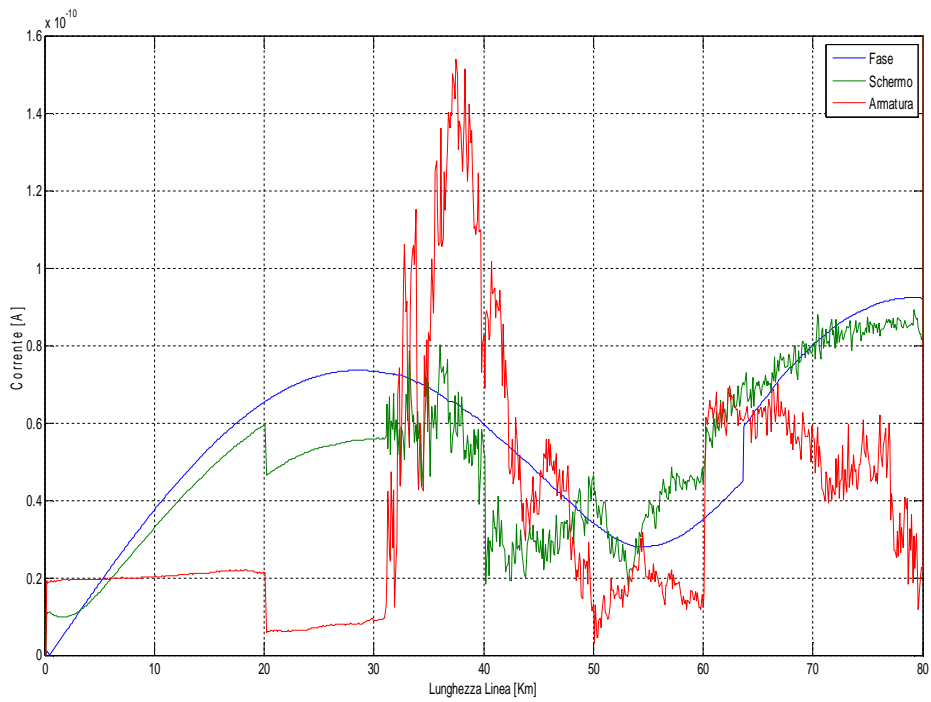


Figura 5.11 Corrente sul ritorno metallico a 1200 Hz

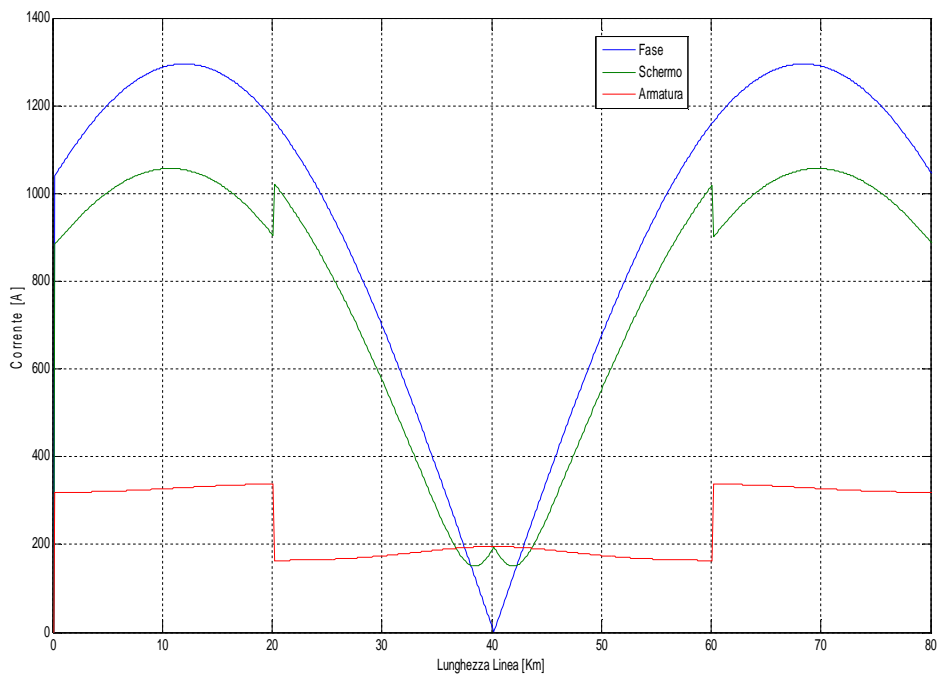


Figura 5.12 Corrente sul polo 2 a 1200 Hz

Si può notare che la tensione tende ad aumentare questo proprio a causa dell'effetto Ferranti e raggiunge il massimo al centro della linea dato che la linea è alimentata bilateralmente, sempre per questa causa si nota che la corrente raggiunge lo zero (punto di taglio) a metà.

Gli andamenti del polo 1 risultano identici agli andamenti del polo 2 in quando si è considerato il modulo di tensione e corrente mentre, in accordo con la teoria, nel ritorno metallico le grandezze sono trascurabili.

Si nota per quanto riguarda la tensione dell'armatura e dello schermo coincidono ogni 20 km proprio perché sono cortocircuitati tra loro.

Aumentando la frequenza la corrente nello schermo tende a coincidere con quella sulla fase a causa dell'effetto di prossimità.

Successivamente si riportano gli andamenti delle grandezze viste in precedenza ma con l'aggiunta dello *smoothing reactor*.

5.2.2. Correnti con smoothing reactor da 100 mH

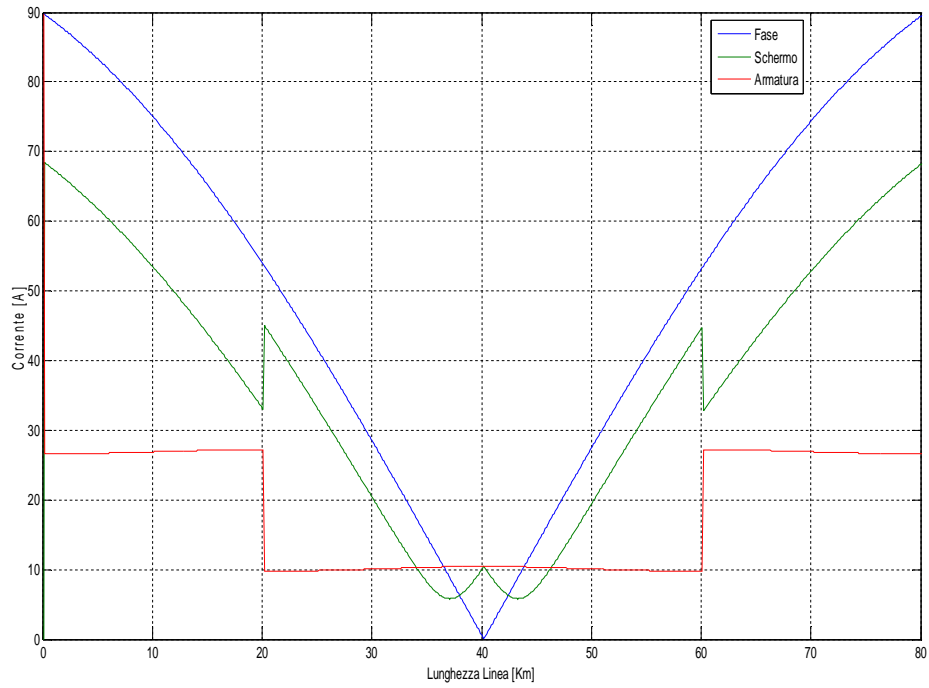


Figura 5.13 Corrente sul polo 1 a 600 Hz

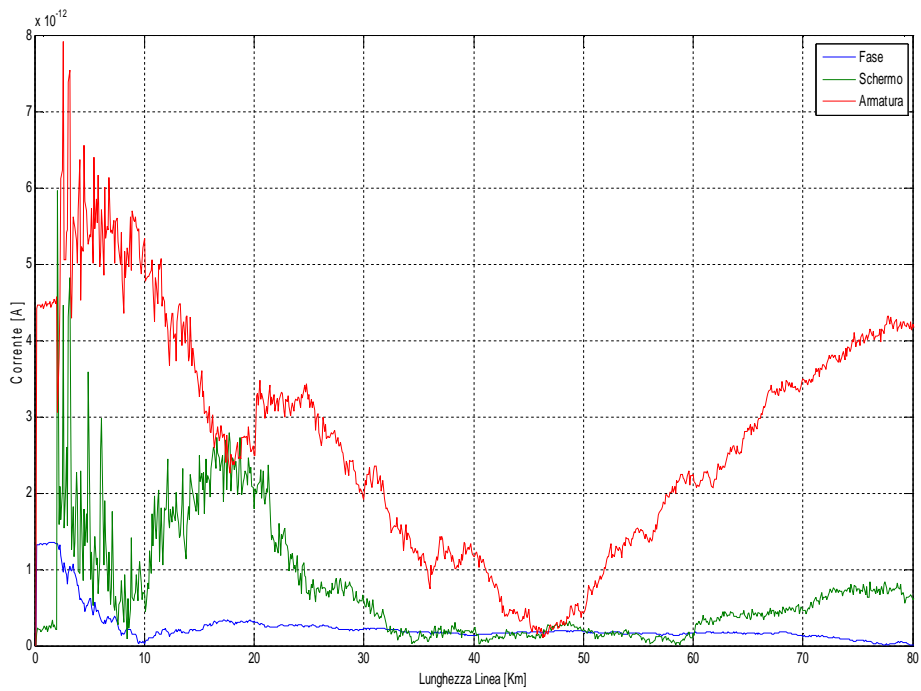


Figura 5.14 Correnti sul ritorno metallico a 600 Hz

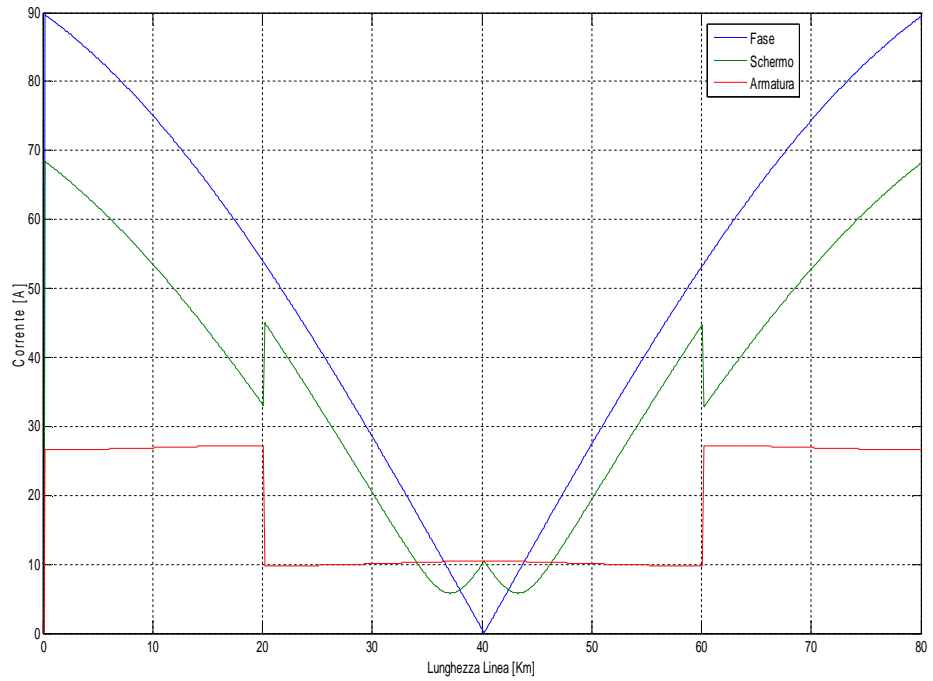


Figura 5.15 Correnti sul polo 2 a 600 Hz

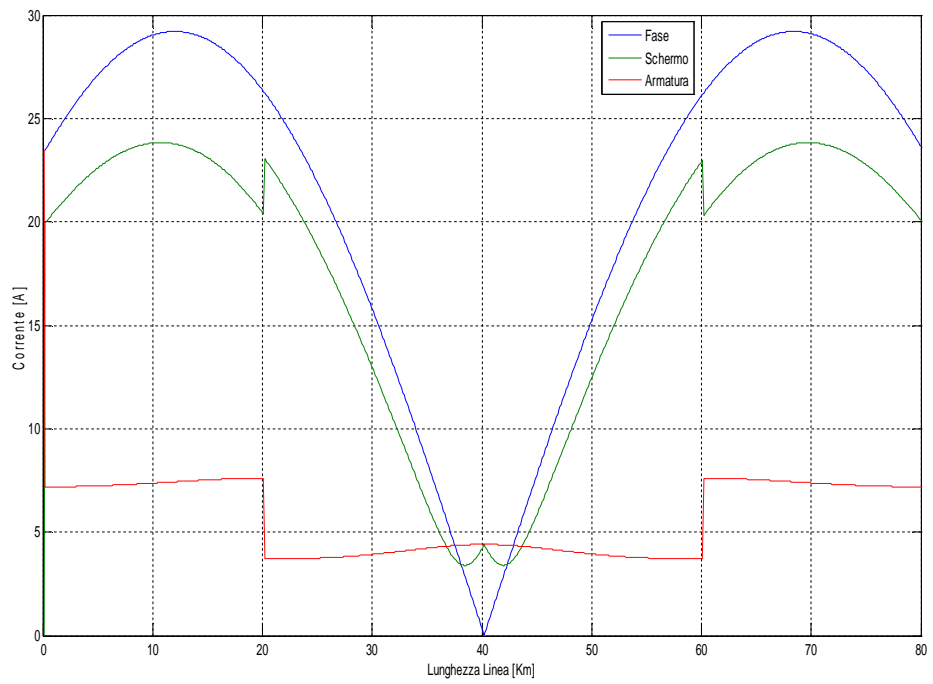


Figura 5.16 Correnti sul polo 1 a 1200 Hz

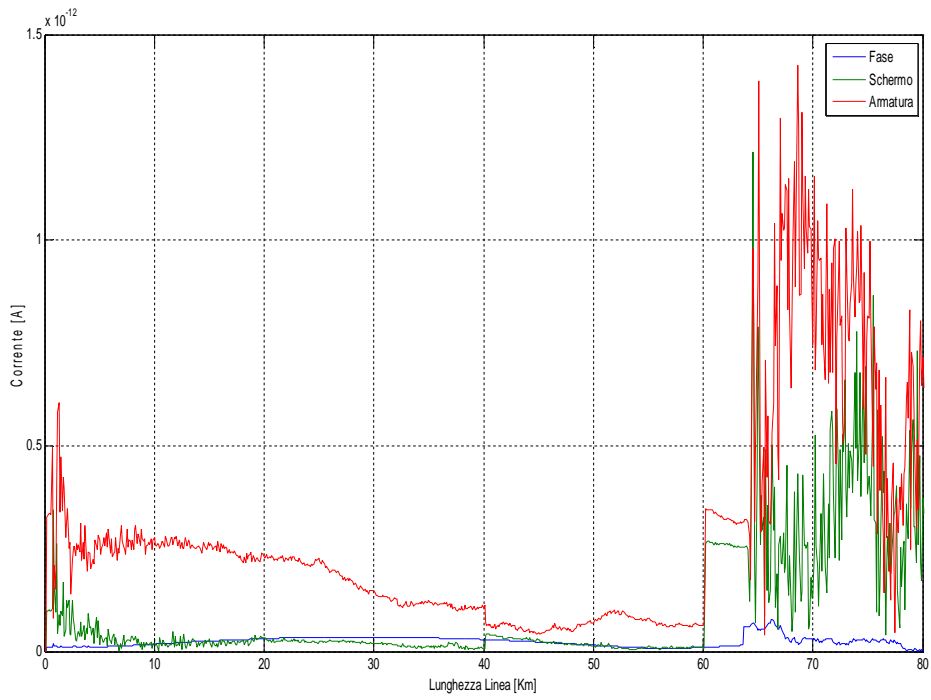


Figura 5.17 Correnti sul ritorno metallico a 1200 Hz

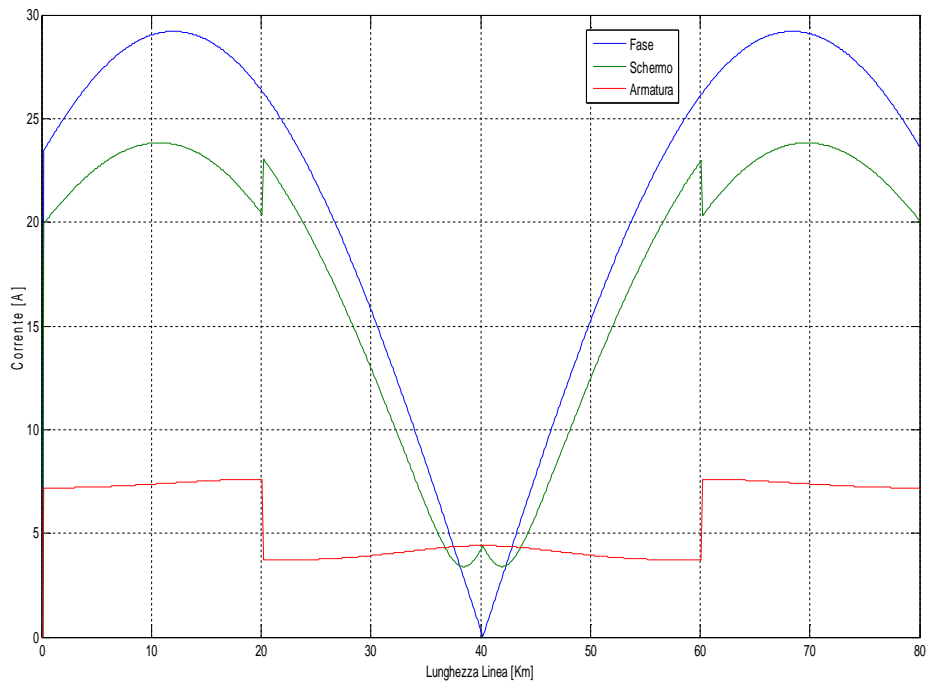


Figura 5.18 Correnti sul polo 2 a 1200 Hz

È stato preso in considerazione solamente il polo 1 dato che l'andamento sul polo 2 è del tutto identico.

Già con un'induttanza di spianamento di 100 mH si può notare come il valore della 12° armonica, a inizio linea, passa da 3392,5 A ad 89,7 A mentre per la 24° armonica si passa da 1039,9 A ad 23,4 A.

Dunque lo *smoothing reactor* è fondamentale in questo tipo di sistema per ridurre le armoniche introdotte dal convertitore a 12 impulsi.

Sul ritorno metallico vi è una corrente praticamente nulla.

5.2.3. Correnti con smoothing reactor da 200 mH

Andando ad aumentare il valore dell'induttanza di spianamento, secondo la teoria, si dovrebbe ridurre l'ampiezza della corrente ulteriormente.

Si riporta di seguito i grafici ottenuti.

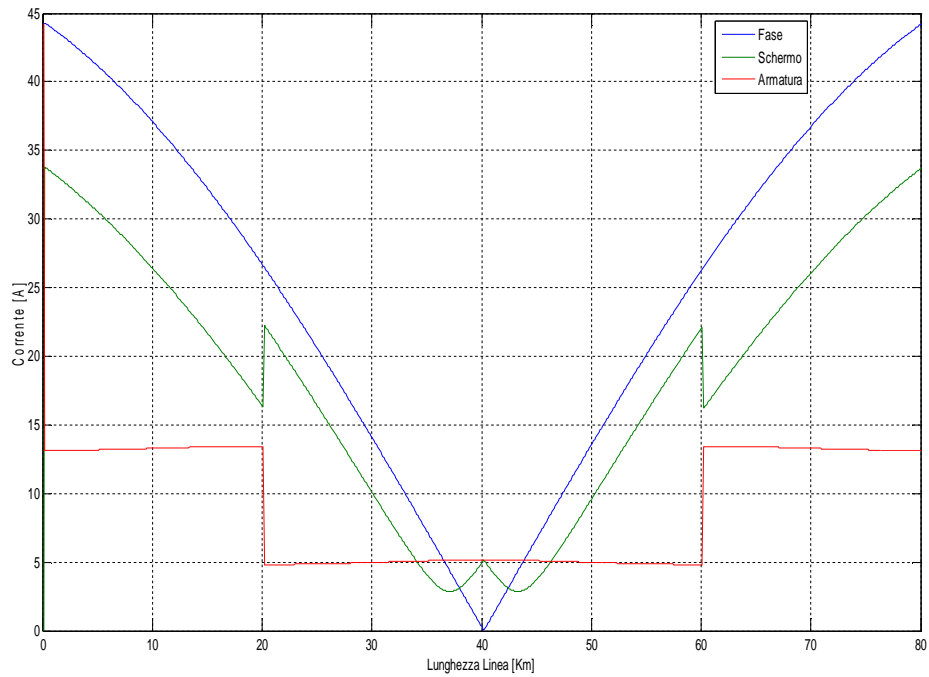


Figura 5.19 Correnti sul polo 1 a 600 Hz

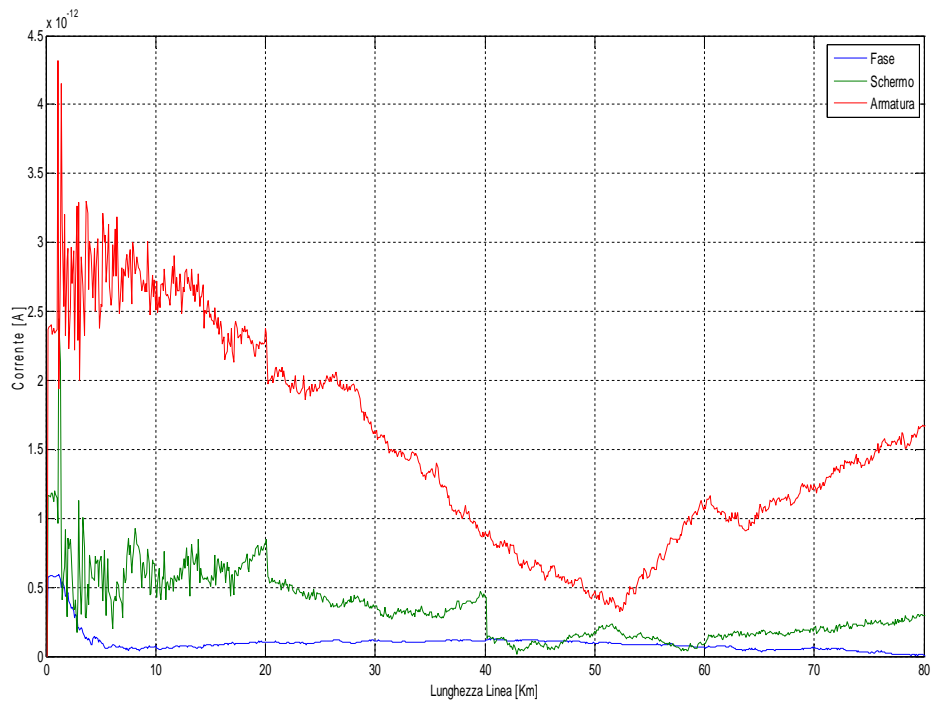


Figura 5.20 Correnti sul ritorno metallico a 600 Hz

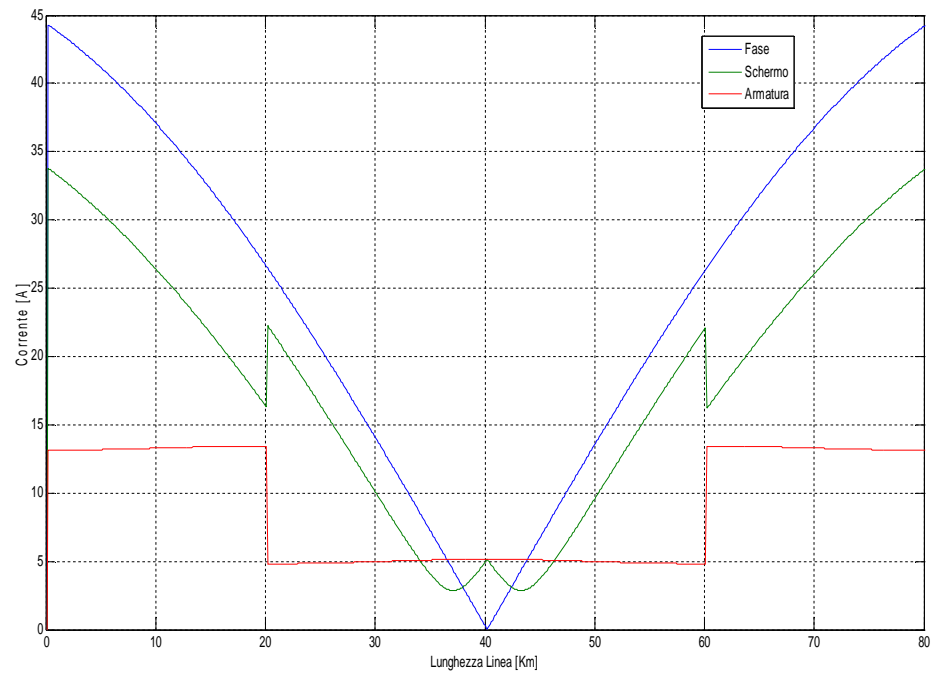


Figura 5.21 Correnti sul polo 2 a 600 Hz

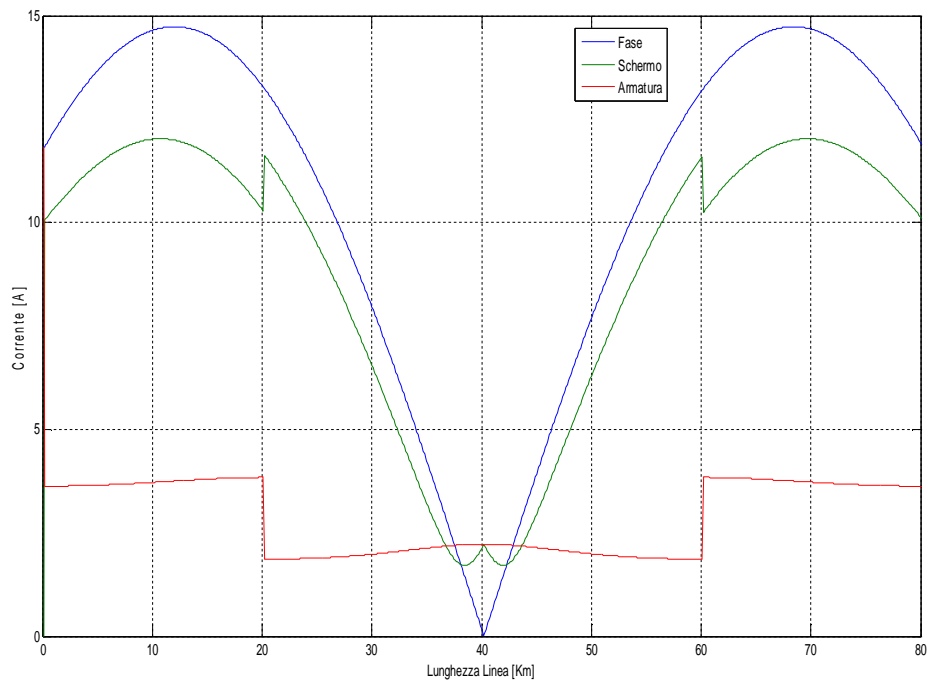


Figura 5.22 Correnti sul polo 1 a 1200 Hz

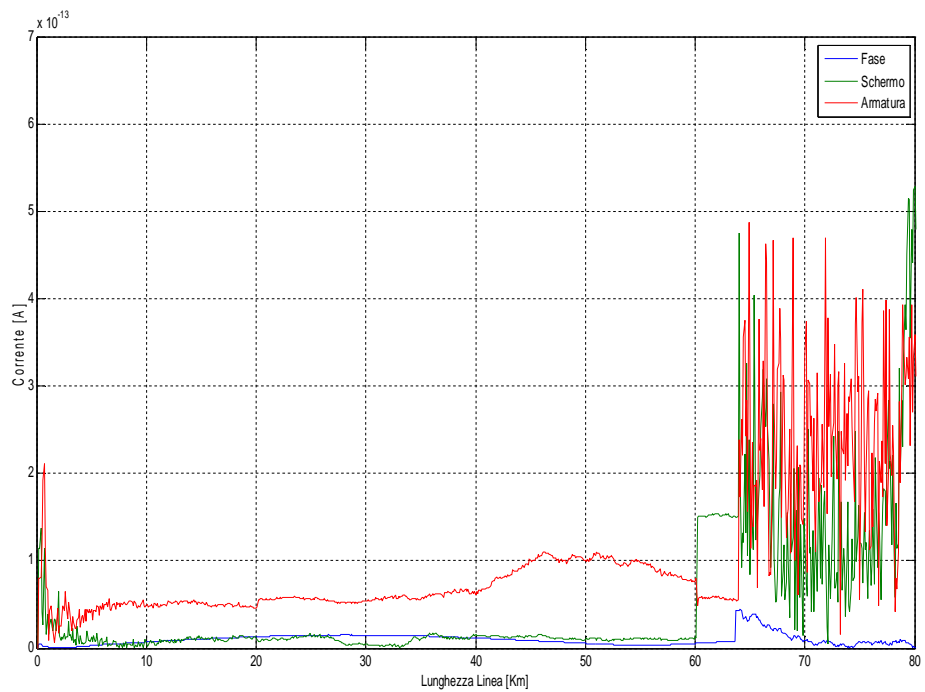


Figura 5.23 Correnti sul ritorno metallico a 1200 Hz

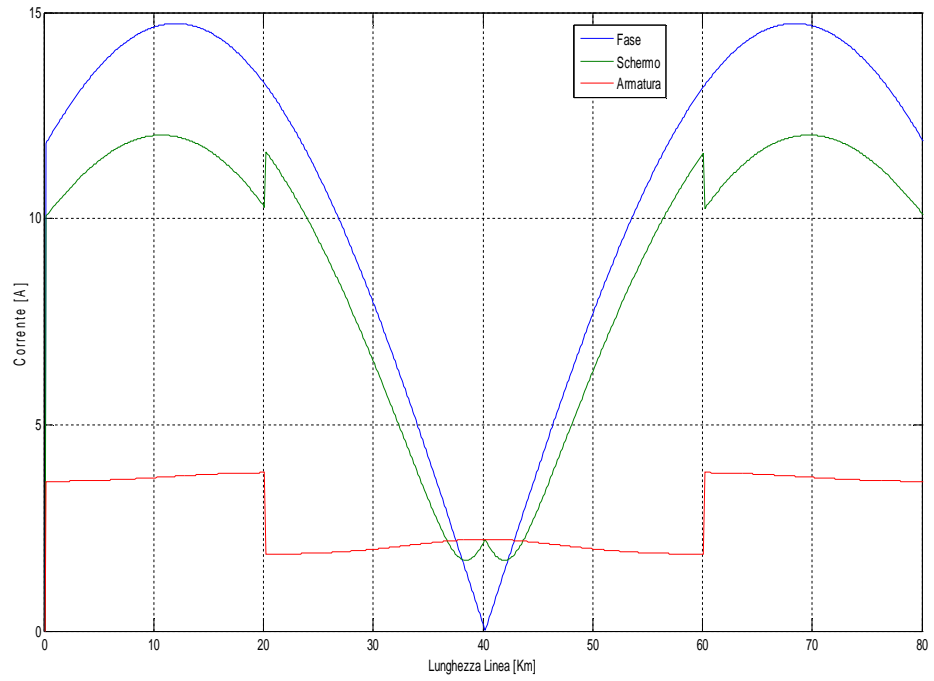


Figura 5.24 Correnti sul polo 2 a 1200 Hz

5.2.4. Correnti con smoothing reactor da 700 mH

Questo paragrafo ha un interesse puramente teorico in quanto risulta molto difficile realizzare uno *smoothing reactor* del valore di 700 mH.

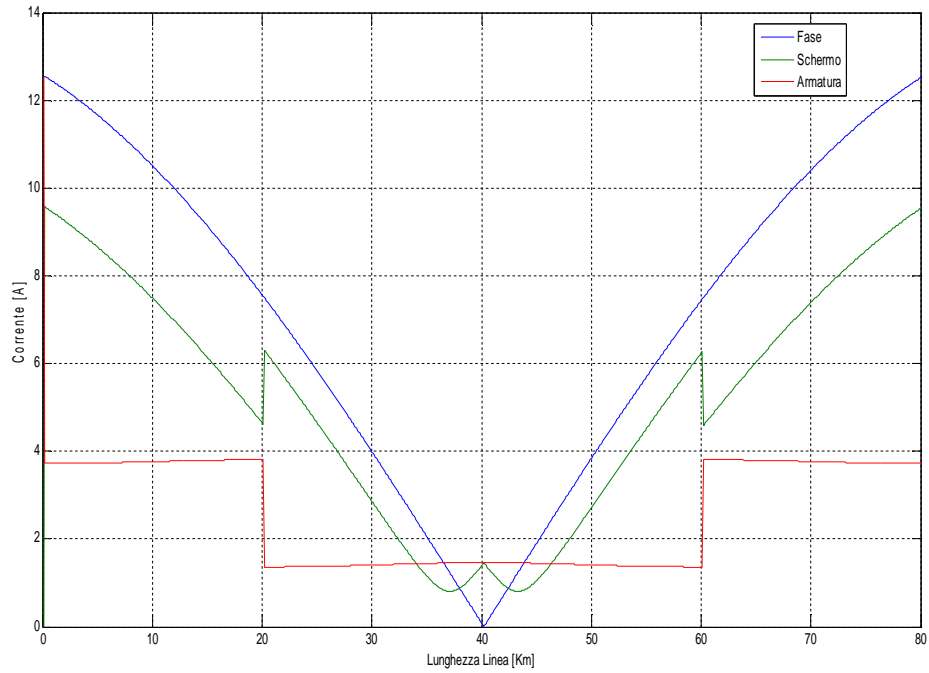


Figura 5.25 Correnti sul polo 1 a 600 Hz

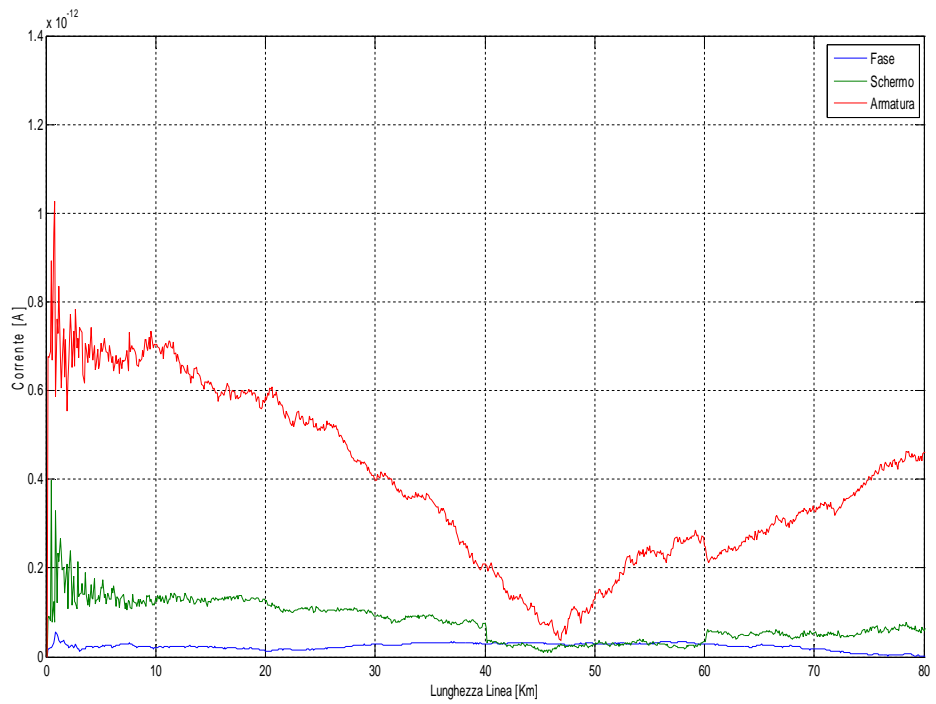


Figura 5.26 Correnti sul ritorno metallico a 600 Hz

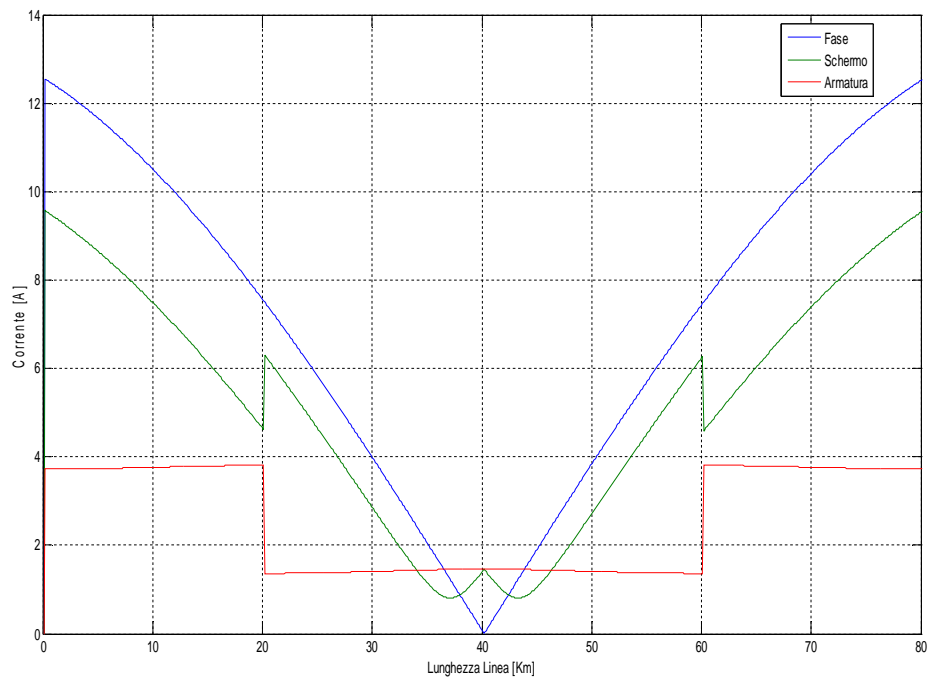


Figura 5.27 Correnti sul polo 2 a 600 Hz

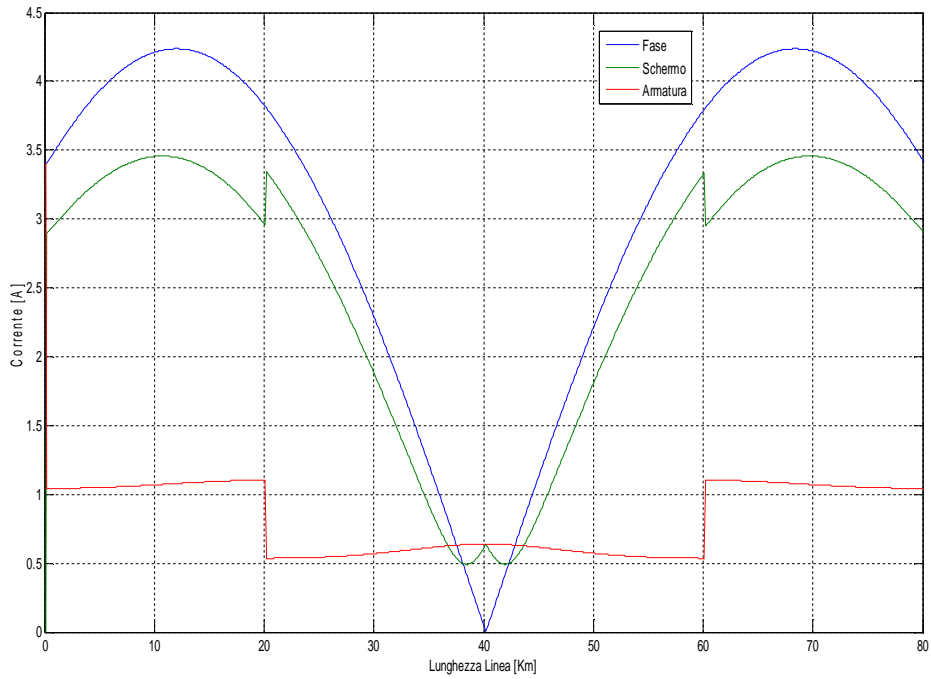


Figura 5.28 Correnti sul polo 1 a 1200 Hz

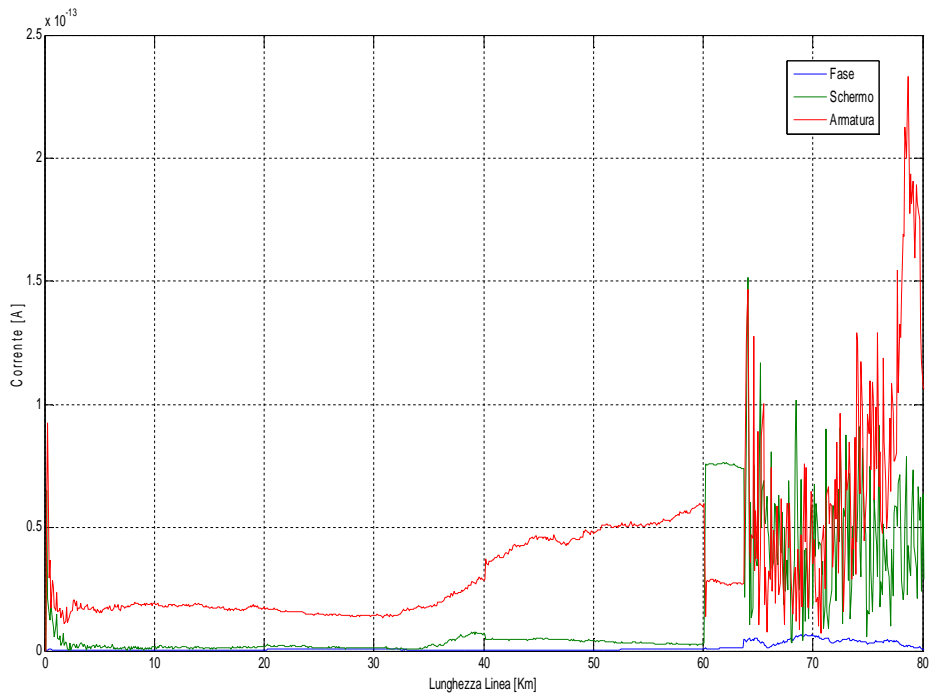


Figura 5.29 Correnti sul ritorno metallico a 1200 Hz

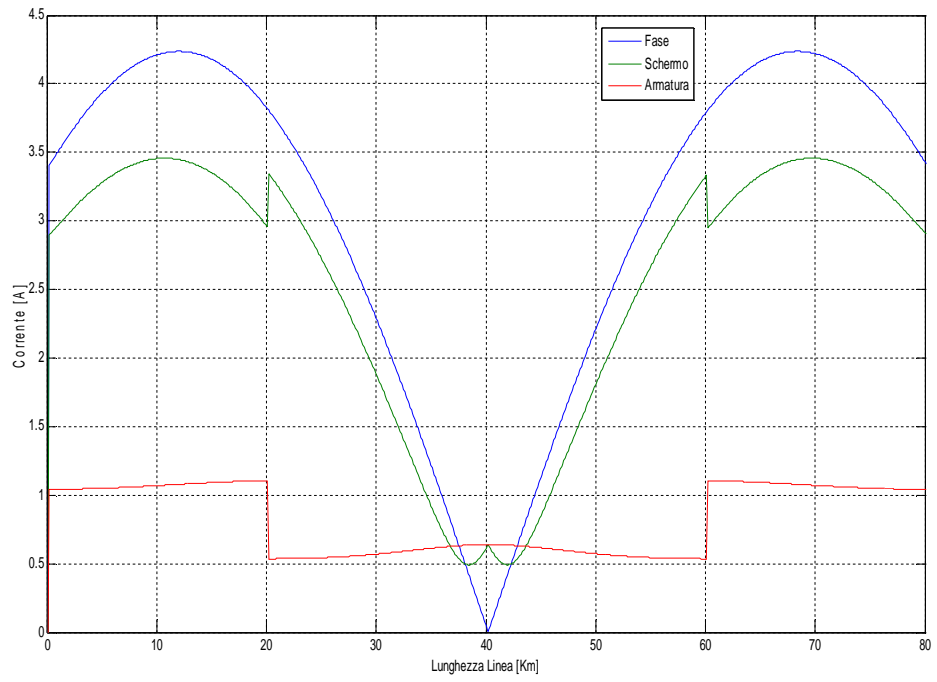


Figura 5.30 Correnti sul polo 2 a 1200 Hz

5.2.5. *Contenuto armonico fino alla 24° armonica*

A questo punto si è andato a sommare le grandezze della 12° armonica e della 24° armonica in questo modo si ottiene l'andamento reale lungo il polo in considerazione.

Successivamente si compara l'effetto delle varie induttanze di spianamento (100mH, 200mH, 700mH) su fase schermo e armatura.

Si riportano i grafici ottenuti:

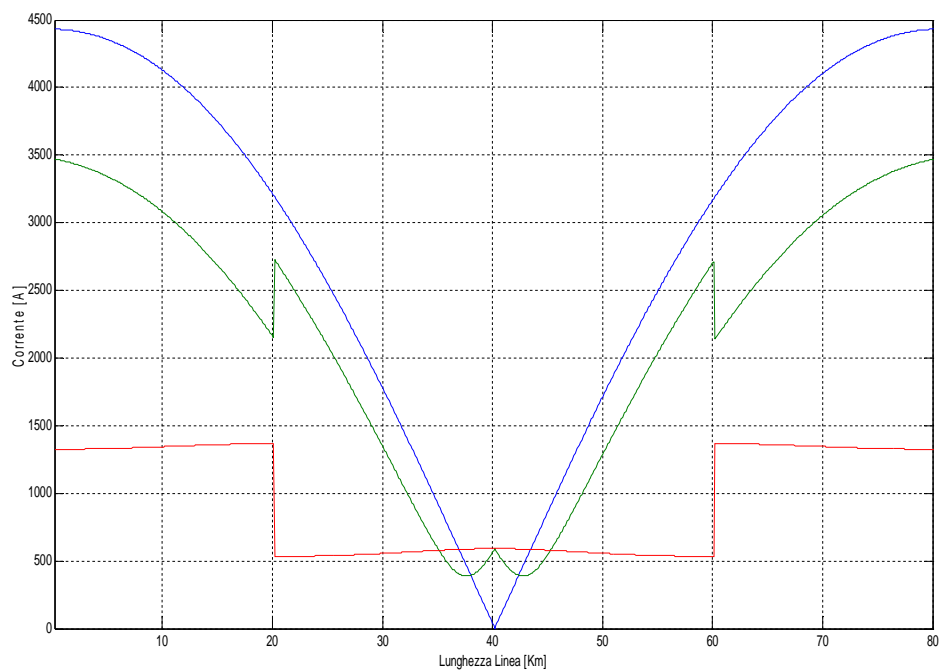


Figura 5.31 Contenuto armonico del polo 1

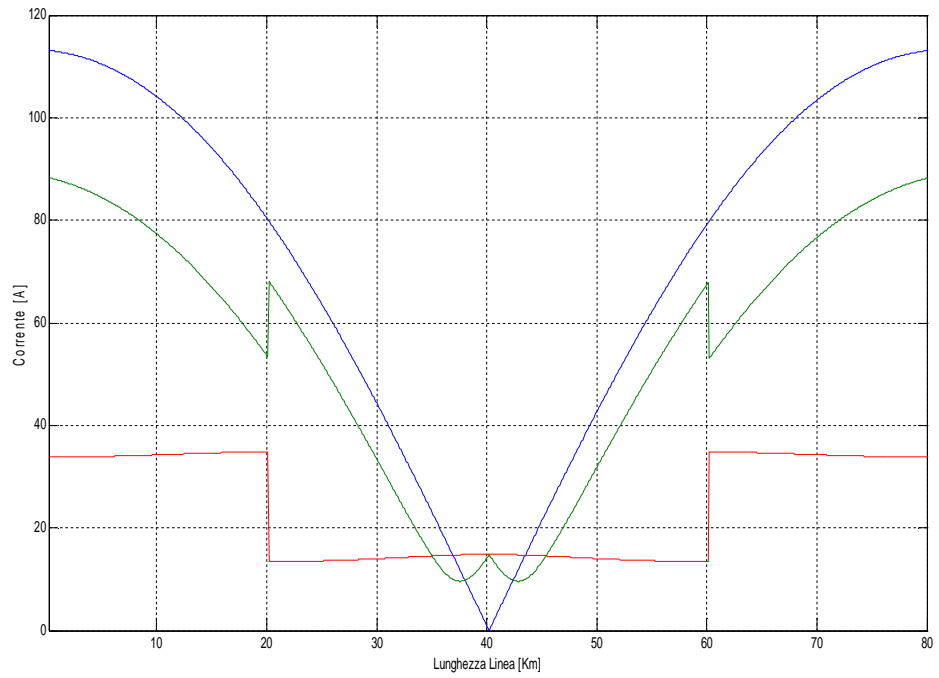


Figura 5.32 Contenuto armonico del polo 1 con smoothing reactor da 100 mH

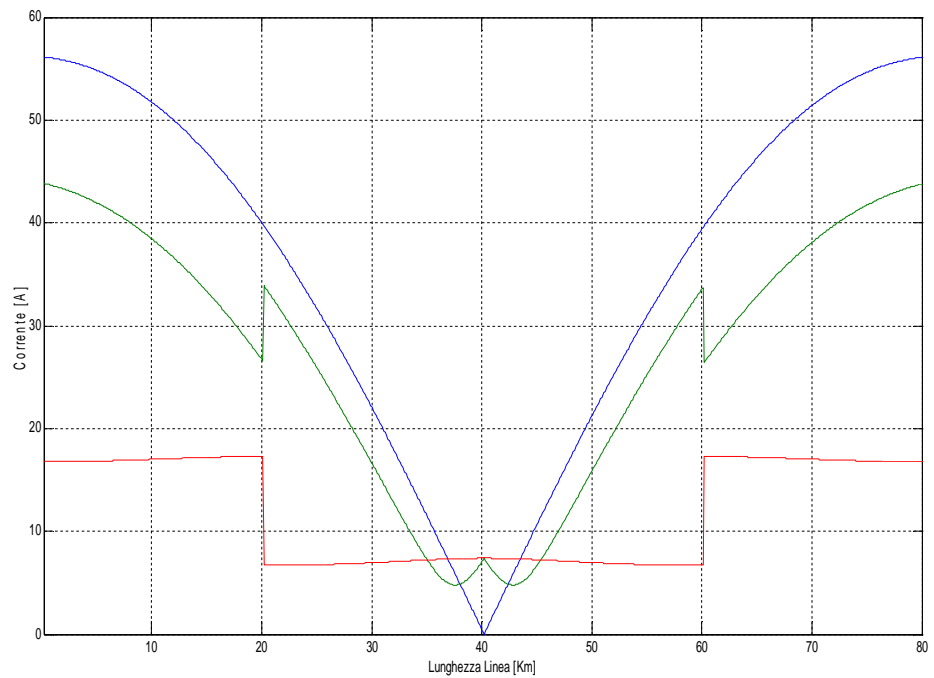


Figura 5.33 Contenuto armonico del polo 1 con smoothing reactor da 200

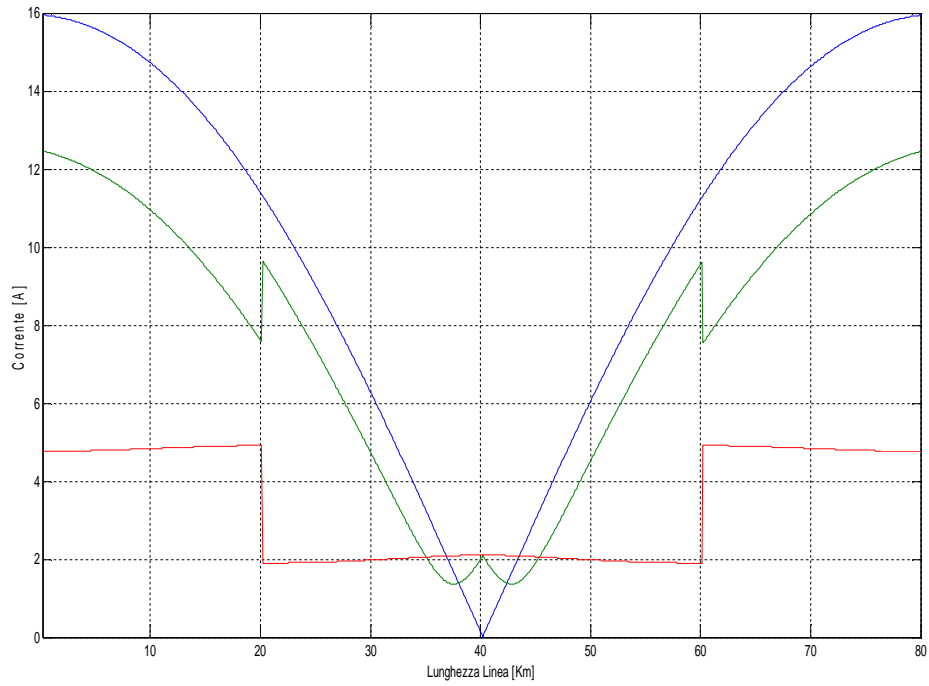


Figura 5.34 Contenuto armonico del polo 1 con smoothing reactor da 700 mH

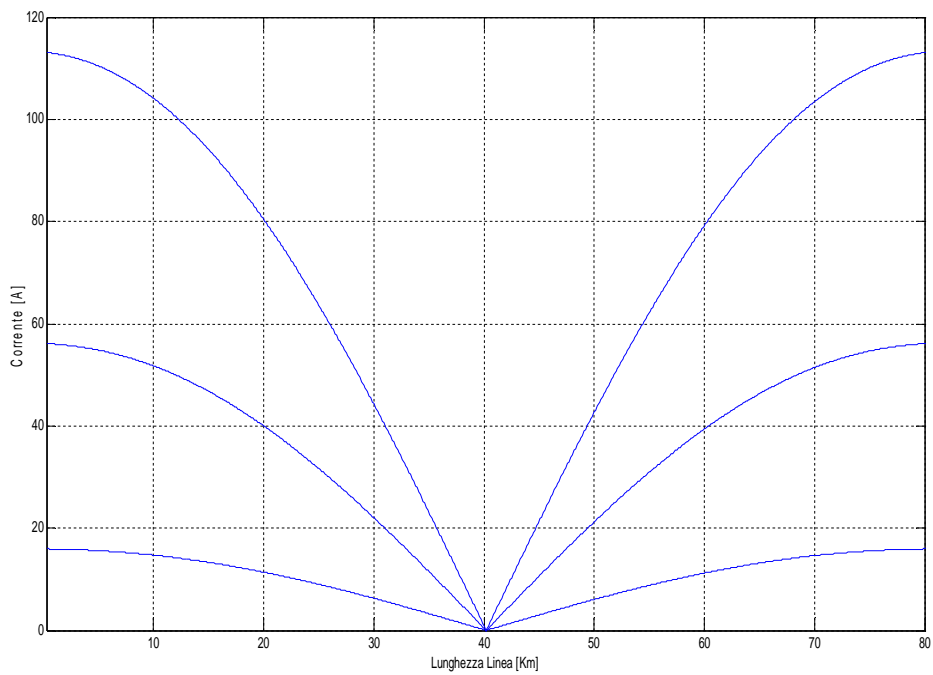


Figura 5.35 Contenuto armonico sulla fase del polo 1 con smoothing reactor da 100 mH, 200 mH, 700mH

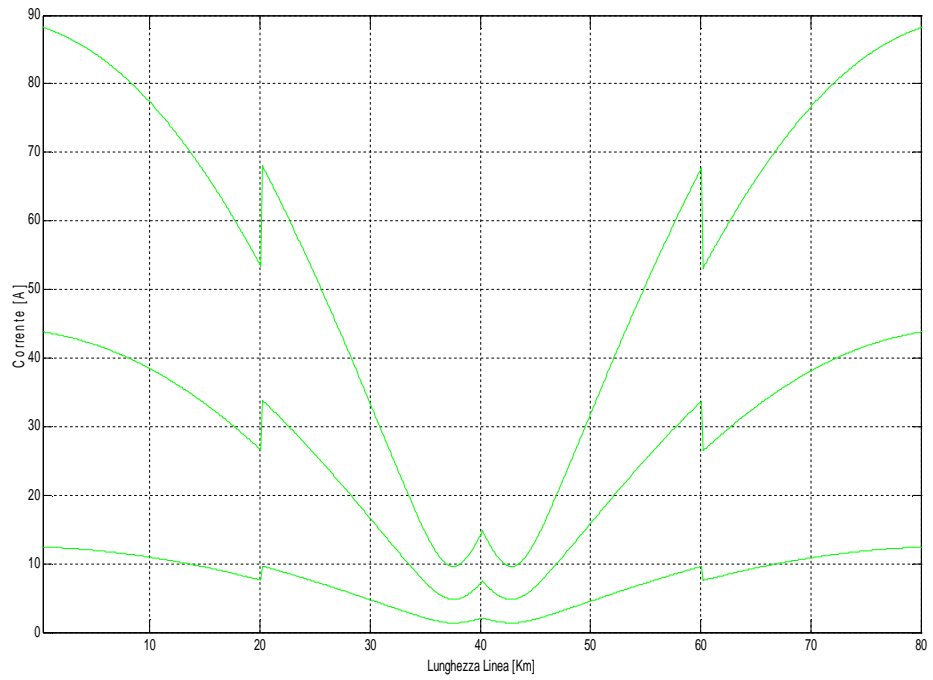


Figura 5.36 Contenuto armonico sullo schermo del polo 1 con smoothing reactor da 100 mH, 200 mH, 700mH

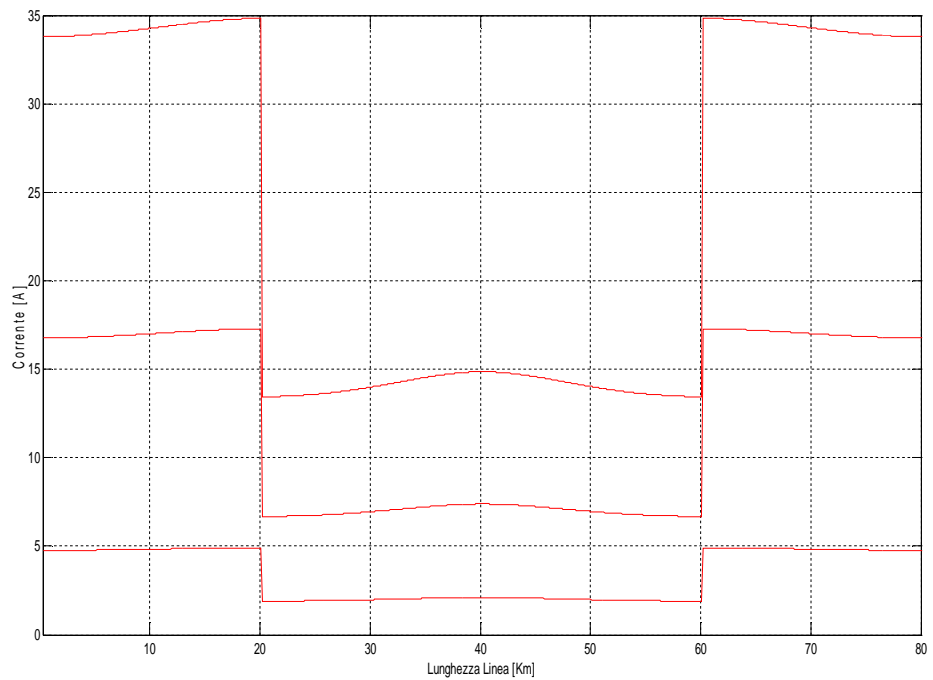


Figura 5.37 Contenuto armonico sull'armatura del polo 1 con smoothing reactor da 100 mH, 200 mH, 700mH

In figura 5.35 è stato riportato l'andamento della somma della 12°+24° armonica sul conduttore di fase per i valori rispettivamente di 100-200 e 700 mH, si può notare proprio come all'aumentare del valore di induttanza le armoniche tendono a diminuire. Di conseguenza anche i valori su schermo e armatura diminuiscono.

Conclusioni

Partendo dalla teoria di *Schelkunoff* si è andati a calcolare ogni auto impedenza, mutua impedenza, auto ammettenza e mutua ammettenza andando a prender in considerazione ogni strato conduttivo del cavo e il numero di cavi presenti rappresentando in tal modo il comportamento della terna analizzata.

Tramite l'applicazione del *Multiconductor Cell Analysis* si sono potute analizzare le grandezze elettriche lungo la linea in configurazione bipolare con ritorno metallico.

Dai grafici delle correnti possiamo vedere come all'aumentare della frequenza la corrente sullo schermo tende ad avvicinarsi al valore della corrente della fase mentre quella sull'armatura tende a diminuire.

Si è dimostrato che la corrente nel ritorno metallico è quasi nulla dunque si può pensare di costruirlo con una sezione minore con un risparmio di materiale.

Inserendo l'induttanza di spianamento si nota chiaramente una diminuzione della corrente che si traduce in una minore distorsione armonica durante la trasmissione di energia e minori interferenze con altri sistemi, in particolare con quelli telefonici.

Più si aumenta il valore della induttanza più il valore della corrente tende a diminuire eliminando ogni tipo di corrente armonica e di disturbo.

In ogni caso il cavo alle frequenze armoniche si comporta come un cavo coassiale e quindi l'effetto schermante del schermo di piombo è tale da eliminare le interferenze elettromagnetiche.

Inoltre sempre nell'ambito dell'integrazione di linee con infrastrutture nel caso di percorsi dedicati o in particolari situazioni di sicurezza si può pensare d'eliminare l'armatura, in quanto il rischio di danneggiamento al cavo è molto ridotto, comportando una riduzione di materiale dunque del peso e portando un vantaggio economico.

Bibliografia

[1] R. Benato: “Multiconductor analysis of underground power transmission system: EHV AC cables”, *Electric Power system Research* 79 (2009), pp27-38, July 2008

[2] S. Dambone Sessa, relatore R. Benato : “Studio multiconduttore matriciale di cavi sottomarini in corrente alternata” Tesi di laurea specialistica in ing. Elettrotecnica

[3] R. Benato, R. Caldon, E. Di Bartolomeo, L. Fellin: “Linee elettriche in cavo in c.a. e c.c. in infrastrutture ferroviarie/stradali esistenti e future: un utilizzo affidabile delle sinergie”, 102° CONFERENZA NAZIONALE AEIT, Catania, settembre 2009 (ACN)

[4] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins
“Elettronica di potenza”
Hoelpli, Milano, 3° edizione, 2005

[5] J. Arillaga, Y. H. Liu, N. R. Watson
“Flexible power transmission, the HVDC options”
Wiley, Chippenham, Wiltshire, 2007

[6] M. Andriollo “Conversione statica dell’energia elettrica”
www.die.unipd.it/conversione-statica-dellenergia-elettrica.html , 2010

[7] E. W. Kimbark
Direct current transmission
Wiley-Interscience, 1971

[8]G. Persson, V. F. Lescale, A. Persson “HVDC CAPACITOR COMMUTATED CONVERTERS IN WEAK NETWORKS”
ABB AB, HVDC, SE-771 80 Ludvika, Sweden

[9]”Indagine sulle tecnologie di trasmissione dell’energia elettrica in corrente continua mediante convertitori a tensione impressa”
CESI, www.ricercadisistema.it , 2003

[10] S.A. Schelkunhoff, "The electromagnetic theory of coaxial transmission lines and cylindrical shields", *Bell System Technical Journal*, 13, 1934 pp. 532-579.

[11] R. Benato: "Multiconductor cell Analysis Of Power Cable Steady State", Proc. of JICABLE 2007, Paper N° C.5.2.9., pp. 707-712, Versailles, France, 24-28 giugno (ACI)

[12] F. Guglielmi, relatore R. Benato : "Propagazione armonica in cavi sottomarini HVDC" Tesi di laurea specialistica in ing. Elettrotecnica