



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica

**Analisi delle soluzioni tecniche per la ricerca dei guasti  
nei cavi di MT**

Relatore: Prof. Bignucolo Fabio

Correlatore: Dott. Clementi Riccardo

Laureando: Stecca Matteo

N° Matricola: 1208895

Anno Accademico 2020/2021



*Ai miei genitori e  
a mia sorella Sara*



# Indice

Introduzione .....	1
Capitolo 1 – La rete MT italiana .....	3
1.1 Caratteristiche della rete MT italiana .....	3
1.1.1 La gestione del neutro nelle reti di distribuzione MT .....	4
1.1.2 Le cabine primarie AT/MT .....	5
1.1.3 Realizzazione delle reti di distribuzione MT .....	7
1.1.4 La Generazione Distribuita .....	8
1.2 Gli impianti eolici in Italia .....	9
Capitolo 2 – Le linee elettriche in cavo .....	15
2.1 Costituzione del cavo .....	15
2.1.1 Il conduttore .....	16
2.1.2 L'isolante .....	17
2.1.3 Gli schermi semiconduttivi .....	20
2.1.4 Gli schermi metallici .....	21
2.1.5 L'armatura .....	21
2.1.6 La guaina esterna .....	21
2.2 Cavi di potenza utilizzati in Italia .....	22
2.2.1 Livelli di tensione .....	22
2.2.2 Cavi di Media Tensione .....	23
2.3 Gradienti e parametri elettrici dei cavi .....	25
2.3.1 Il campo elettrico nell'isolante .....	25
2.3.2 Parametri elettrici di un cavo .....	29
2.4 Portata di corrente di un cavo .....	35
2.5 Posa interrata dei cavi MT .....	37
2.6 Collegamento degli schermi metallici .....	39
2.7 Giunti e terminali MT .....	41

Capitolo 3 – Tipologie di guasto nei cavi .....	45
3.1 Guasti a bassa resistenza .....	45
3.2 Guasti ad alta resistenza .....	46
3.2.1 Circuito aperto .....	46
3.2.2 Pinhole .....	48
3.3 Il deterioramento dell'isolante .....	49
3.4 Il monitoraggio delle scariche parziali .....	53
Capitolo 4 – Metodi per la localizzazione del guasto nei cavi MT interrati .....	57
4.1 Analisi del tipo di guasto .....	57
4.1.1 Misura della resistenza di isolamento del cavo .....	58
4.1.2 High Potential Test (HIPOT test) .....	59
4.1.3 Verifica TDR della lunghezza del cavo .....	60
4.2 Tecniche per la pre-localizzazione del guasto .....	61
4.2.1 Time Domain Reflectometry – TDR .....	61
4.2.2 Arc Reflection Method – ARM .....	67
4.2.3 Metodo degli impulsi di corrente – ICE .....	69
4.2.4 Metodo delle onde migranti – Decay .....	71
4.2.5 ARM accoppiato ad un generatore di elevata corrente .....	73
4.3 Localizzazione precisa del punto di guasto .....	74
4.3.1 Metodo acustico-elettromagnetico .....	76
4.3.2 Step Voltage Method .....	78
4.4 Soluzioni in commercio e costi .....	80
Capitolo 5 – Modellizzazione dei metodi TDR e ARM in ambiente MATLAB-Simulink .....	85
5.1 Modellizzazione della linea in cavo .....	85
5.1.1 Scelta del cavo .....	85
5.1.2 Modellizzazione della linea in cavo su Simulink .....	86
5.2 Modellizzazione del Time Domain Reflectometer – TDR .....	89
5.3 Modellizzazione dell'impedenza di guasto .....	91
5.3.1 Modello del cortocircuito .....	91

5.3.2 Modello del circuito aperto .....	92
5.3.3 Modello del pinhole .....	93
5.4 Simulazione dei guasti in ambiente MATLAB-Simulink .....	95
5.4.1 Simulazione del TDR applicato alla linea in cavo senza guasti .....	95
5.4.2 Simulazione del TDR applicato alla linea in cavo con cortocircuito .....	99
5.4.3 Simulazione del TDR applicato alla linea in cavo con circuito aperto .....	101
5.4.4 Simulazione del TDR e dell'ARM applicato alla linea in cavo con pinhole .....	105
Conclusioni .....	111
Appendice: Tabelle dei cavi .....	113
Elenco delle Figure .....	119
Elenco delle Tabelle .....	121
Script MATLAB .....	121
Bibliografia .....	123



# Introduzione

Negli ultimi due decenni, a seguito delle stringenti pressioni ambientaliste e del continuo progresso tecnologico, i cavi elettrici hanno sostituito man mano le vecchie linee aeree di distribuzione e trasmissione. Sebbene economicamente le linee in cavo siano più costose, esse presentano importanti vantaggi rispetto alle linee aeree: essendo interrate, godono di una maggiore protezione e, soprattutto, risultano avere un impatto ambientale trascurabile.

L'espansione della generazione distribuita negli ultimi anni ha portato ad un aumento degli impianti rinnovabili, molto spesso dislocati in luoghi isolati sul territorio nazionale per sfruttare al meglio le varie fonti. Per le motivazioni sopra esposte, la connessione di questi impianti con la rete di distribuzione viene preferibilmente effettuata tramite linee in cavo interrato.

I cavi, pur essendo meno esposti alle condizioni ambientali avverse, non sono però esenti da guasti: più un cavo si avvicina al cosiddetto “fine vita”, più è alta la probabilità che risenta del deterioramento dell'isolante e che vada fuori servizio. È evidente, quindi, l'importanza che rivestono le tecnologie odierne di localizzazione dei guasti; esse consentono, con sufficiente rapidità e accuratezza, di determinare il punto di guasto limitando il disservizio e evitando l'onerosa procedura di scavo per tentativi.

Lo scopo di questa Tesi, svolta in collaborazione con la STE Energy S.r.l. di Padova, è quello di descrivere il principio di funzionamento delle tecnologie in grado di determinare la posizione del guasto in un cavo interrato e di fornire una panoramica dei costi da sostenere per l'intero processo e per la riparazione del tratto guasto. È stata inoltre modellizzata in ambiente MATLAB/Simulink una linea in cavo di MT, composta da tre pezzature e due giunti, che collega tra loro delle turbine di un parco eolico. Tramite la modellizzazione delle tre tipologie di guasto che interessano i cavi, è stata effettuata per ognuna di esse una simulazione scegliendo il metodo più appropriato per determinarne la posizione.

Nel Capitolo 1 vengono inizialmente descritte le caratteristiche della rete di Media Tensione italiana e l'impatto che ha su di essa la generazione distribuita.

Nel secondo paragrafo, invece, dal momento che la linea in cavo modellizzata su Simulink collega tra loro delle turbine, è stata fatta una panoramica generale degli impianti eolici con un focus particolare sulle tecnologie attuali e future.

Il Capitolo 2 è stato dedicato, invece, interamente ai cavi descrivendo in modo dettagliato le parti di cui sono composti e il loro processo di fabbricazione; successivamente, dopo una breve introduzione sui principali cavi utilizzati in Italia per la Media Tensione, vengono descritti i parametri principali e i giunti che collegano le varie pezzature.

Nel Capitolo 3 sono state analizzate singolarmente le tre tipologie di guasto che possono interessare un cavo; è stato poi esposto il meccanismo che porta al deterioramento dell'isolante, con un breve accenno ai metodi per il monitoraggio delle scariche parziali.

Il Capitolo 4 descrive il processo da seguire minuziosamente per l'individuazione del guasto in un cavo di MT interrato. Partendo dall'analisi del tipo di guasto, vengono introdotte in successione tutte le principali tecnologie di pre-localizzazione e di localizzazione dei guasti. Viene fatto poi un accenno alle soluzioni attualmente in commercio e ai costi da sostenere per l'individuazione del guasto.

Nel Capitolo 5, infine, vengono illustrati i modelli del cavo, del TDR e dei vari guasti per la loro corretta implementazione nel software Simulink. Si è proceduto poi con le varie simulazioni applicando gli impulsi del TDR ad una linea sana e, in seguito, ad una linea con cortocircuito e con guasto da circuito aperto interpretando, per ognuna di esse, il risultato della simulazione. Per l'ultimo guasto, il pinhole, si modellizzano in ambiente Simulink le parti che compongono l'Arc Reflection Method e si analizzano i risultati della simulazione effettuata.

# Capitolo 1 – La rete MT italiana

## 1.1 Caratteristiche della rete MT italiana

Il sistema di distribuzione italiano comprende le infrastrutture e i servizi utili al trasporto dell'energia elettrica dagli impianti di trasformazione AT/MT, denominati cabine primarie, ai carichi. In particolare, la rete di distribuzione si suddivide in due sottoreti:

- La rete di distribuzione MT che in Italia viene esercita tipicamente a 15 o a 20 kV;
- La rete di distribuzione BT a 380 V;

La gestione delle reti di distribuzione MT è di tipo radiale: dalla cabina primaria le varie diramazioni alimentano i carichi derivati, con o senza trasformazioni intermedie. Questa configurazione presenta numerosi vantaggi: semplicità costruttiva ed economicità, la rapida localizzazione dei guasti grazie alla selettività dei sistemi di protezione e una chiara distribuzione delle correnti. Tuttavia, è limitata la possibilità di successivi ampliamenti della rete e la qualità del servizio è modesta. Quest'ultimo problema viene evitato realizzando dei lati di controalimentazione che permettono un eventuale alimentazione di emergenza e un miglioramento della power quality [1]:

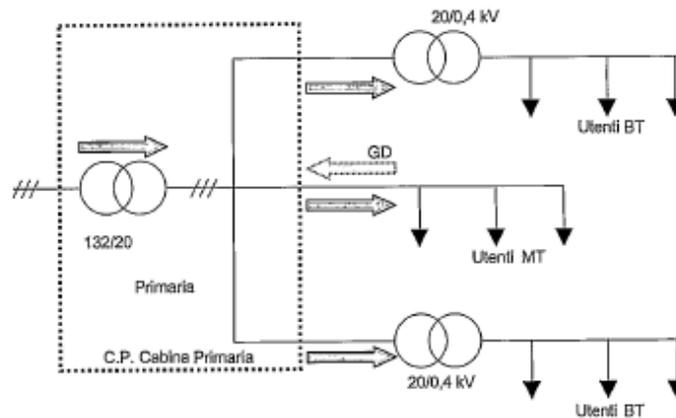


Figura 1.1 - Struttura di una rete radiale in MT

Frequentemente, quando c'è bisogno di alimentare grossi carichi concentrati (come ospedali, industrie, ecc.) e mantenere una certa continuità di esercizio, si adotta uno schema ad anello della rete in cui la linea di distribuzione in media tensione si origina e si richiude sulla stessa cabina primaria.

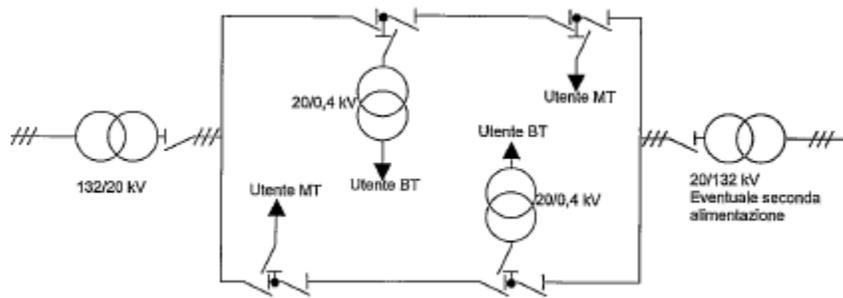


Figura 1.2 - Struttura di una rete gestita ad anello aperto

### 1.1.1 La gestione del neutro nelle reti di distribuzione MT

Nelle reti di distribuzione in MT è fondamentale conoscere come viene gestito il neutro, ovvero il conduttore che fa capo al centro stella del trasformatore AT/MT in cabina primaria. Infatti, mentre nel normale esercizio in regime sinusoidale simmetrico il neutro si trova al potenziale di terra e le correnti/tensioni non variano, in condizioni perturbate il regime delle correnti/tensioni varia in base alla tipologia di gestione del neutro:

- **Neutro isolato:** è un sistema di gestione anche denominato “neutro messo a terra attraverso capacità”. Infatti, in caso di guasto fase-terra, vengono messe in gioco correnti di natura capacitiva: il ritorno della corrente di guasto  $I_g$  avviene attraverso le capacità delle fasi sane del sistema elettrico.
- **Neutro compensato:** è la soluzione oggi adottata dall'Italia su tutte le sbarre di MT in cabina primaria, andando a rimpiazzare il vecchio sistema di gestione a neutro isolato.

La connessione del centro stella dei trasformatori AT/MT avviene tramite il parallelo di una bobina di compensazione, detta bobina di Petersen, e di una resistenza. La bobina di Petersen è una bobina d'induttanza il cui principio di funzionamento si basa sulla risonanza parallelo di

un circuito LC: accordando opportunamente il valore dell'induttanza si riesce a compensare completamente la corrente capacitiva e a non avere, quindi, alcuna corrente di guasto circolante. Questa soluzione è in grado di limitare la corrente di guasto monofase a terra, di aumentare la probabilità di auto-estinzione dei guasti monofase e di ridurre numero, ampiezza e durata delle sovratensioni sostenute.

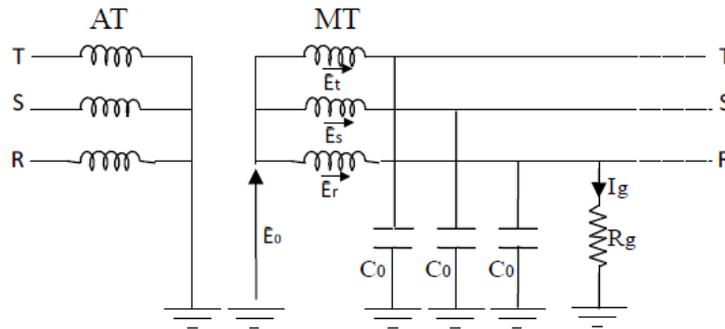


Figura 1.3 - Rete MT a neutro isolato

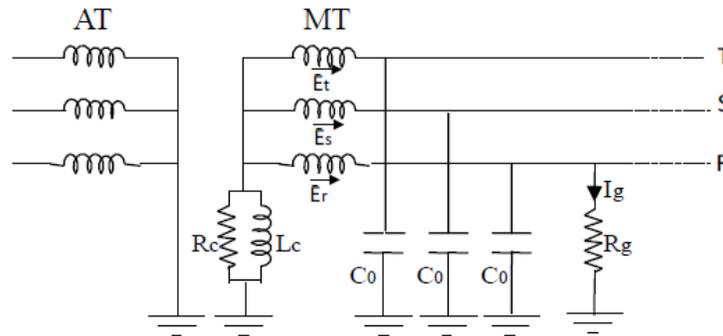


Figura 1.4 - Rete MT a neutro compensato

### 1.1.2 Le cabine primarie AT/MT

Le reti di distribuzione in media tensione sono alimentate dalle cabine primarie, dove avviene la trasformazione da alta a media tensione. Lo schema tipico di una cabina primaria AT/MT prevede l'installazione di due trasformatori per aumentare l'affidabilità della rete se uno dei due va fuori uso: si tratta di trasformatori variatori sotto carico che permettono di mantenere costante la tensione lato MT ogni qualvolta essa si discosti rispetto al valore nominale. Tramite opportune protezioni

di massima corrente, massima tensione e massima tensione omopolare, ogni trasformatore è collegato alla relativa semisbarra di MT: in caso di guasto di uno dei due, ricorrendo ad un congiuntore di sbarra, si possono collegare tra loro le due semisbarre e consentire la continuità dell'alimentazione delle linee a valle mediante il sovraccarico temporaneo del trasformatore funzionante.

Dalle semisbarre si diramano radialmente le varie linee di MT: generalmente, ognuna di esse presenta protezioni di massima corrente, protezioni varmetriche o wattmetriche (nel caso rispettivamente di linee a neutro isolato o a neutro compensato) e il dispositivo di richiusura automatica DRA.

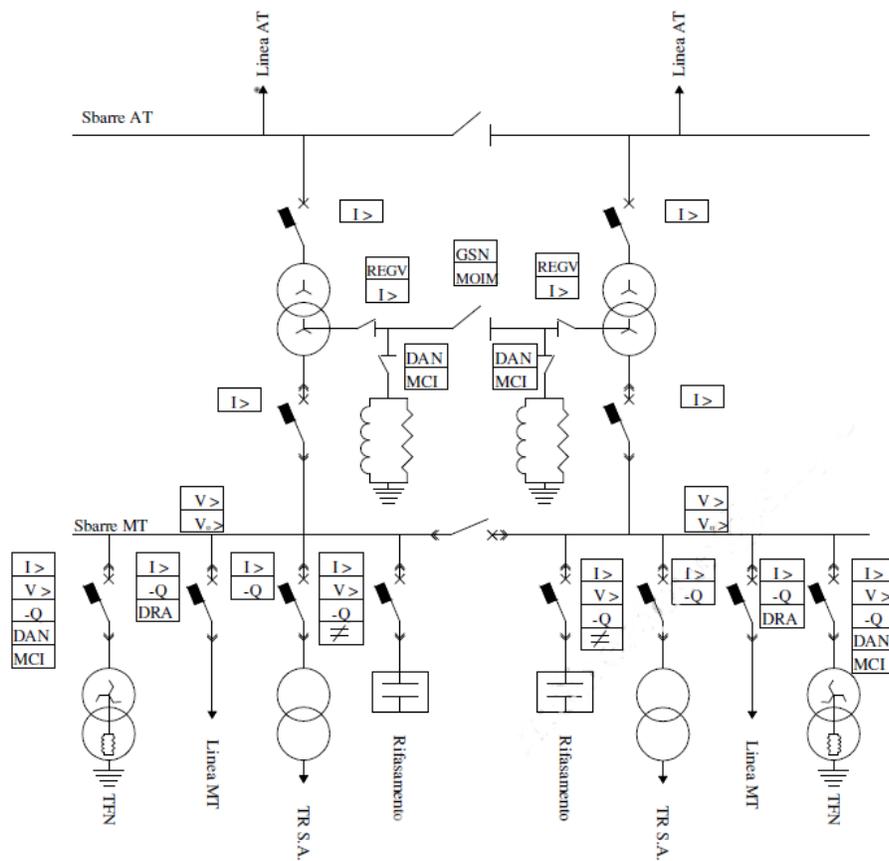


Figura 1.5 - Schema tipico di stazione AT/MT di distribuzione

Nella Figura 1.5 è rappresentata la modalità di gestione del neutro tramite bobina di Petersen: nel centro stella del trasformatore variatore sotto carico, lato MT, viene collocata la bobina

d'induttanza che compensa eventuali correnti capacitive di guasto. È presente anche il DAN, dispositivo analizzatore di neutro, che serve a regolare sotto carico, in modo automatico, il grado di accordo tra bobina mobile e capacità omopolare della rete MT. Nel caso non vi sia accesso o spazio per installare la bobina di Petersen collegandola al centro stella del trasformatore, si può collegare alla sbarra MT il TFN, trasformatore formatore di neutro, che crea un centro stella virtuale a cui si collegano la bobina e le relative protezioni.

### 1.1.3 Realizzazione delle reti di distribuzione MT

Le reti di media tensione vengono realizzate con conduttori nudi posti su palificazioni oppure con cavi interrati. Le linee aeree sono realizzate con fili e corde di rame nudo e vengono installate generalmente in zone rurali o a bassa densità abitativa. I sostegni possono essere in legno, acciaio o cemento armato: l'isolamento rispetto ai conduttori di potenza avviene con opportuni isolatori in porcellana o vetro.

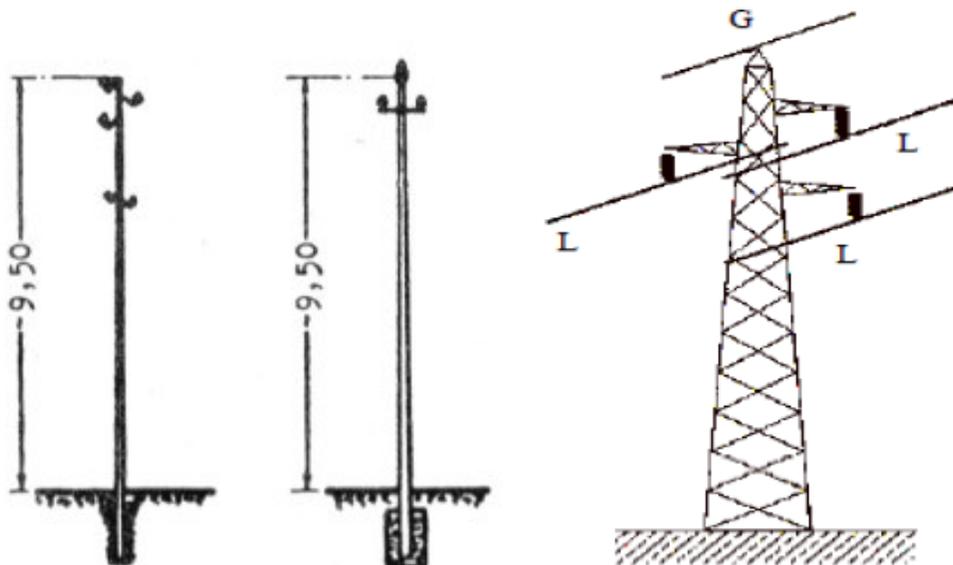


Figura 1.6 - Sostegni a stelo con palo di legno e cemento armato e sostegno a traliccio per linee MT

Le linee in cavo vengono invece impiegate nelle reti di distribuzione MT nei centri urbani: la possibilità di avere una rete elettrica sotterranea consente di occupare uno spazio minore anche se

il costo realizzativo è maggiore. Le linee elettriche in cavo sono costituite da pezzature collegate tra loro mediante dei giunti; è possibile anche il collegamento tra linea in cavo e linea aerea tramite opportune terminazioni di collegamento.

La struttura tipica di un cavo MT viene presentata nel Capitolo 2.

#### **1.1.4 La Generazione Distribuita**

Fino al 1992 la produzione di energia elettrica è stata monopolio di Stato: la rete elettrica italiana era esclusivamente di tipo passivo con un flusso unidirezionale dell'energia elettrica che, prodotta nelle grandi centrali di produzione, veniva poi trasportata per lunghe distanze fino alle utenze finali. Il percorso di liberalizzazioni, avviato appunto nel 1992, ha consentito il superamento di questo monopolio statale e offerto anche al singolo cittadino l'opportunità di diventare produttore di energia elettrica.

Il sistema elettrico sta dunque affrontando un profondo cambiamento rispetto al secolo scorso: dalle grandi e inquinanti vecchie centrali di produzione, si sta passando ad una produzione sempre più rinnovabile, favorita dalle politiche pro-clima e dalle normative vigenti riguardanti le emissioni nocive. Nel caso dell'Italia, però, gran parte del potenziale eolico e fotovoltaico si trova al Sud e sulle Isole, lontano dai carichi del Nord industrializzato: il progressivo passaggio ad una quota sempre maggiore di energia pulita deve perciò essere accompagnato da una contemporanea trasformazione delle vecchie linee di trasmissione e distribuzione, molto spesso obsolete e soggette a grandi perdite. Questa transizione verso un sistema elettrico sempre più decentralizzato sta portando ad un numero elevato di piccoli impianti rinnovabili situati in luoghi anche sperduti che devono, ovviamente, essere connessi alla rete di distribuzione: questo passaggio è reso però complicato dal fatto che tali reti sono state pensate e progettate per essere passive e con un flusso di potenza unidirezionale.

A seguito dell'aumento della generazione distribuita, i principali problemi che la nuova rete elettrica deve e dovrà affrontare sono [2]:

- La perdita della selettività delle protezioni in caso di guasti in rete e l'aumento della corrente di cortocircuito;

- La non programmabilità delle fonti rinnovabili che vengono viste dalla rete come un contributo intermittente di potenza;
- Un nuovo sistema di controllo e regolazione della tensione in rete;

La generazione distribuita, tuttavia, avrà un grande vantaggio: le linee, infatti, diventeranno più corte perché gli utenti finali saranno più vicini alle piccole centrali. Di conseguenza, potenziando le reti di distribuzione, si avrà una marcata riduzione delle attuali perdite nelle lunghe linee di trasmissione. Inoltre, la vicinanza dei carichi a centrali medio-piccole interconnesse tra loro porterà ad una maggiore affidabilità della rete: se una di esse dovesse andare fuori servizio, non si avrebbero interruzioni perché le altre centrali continuerebbero ad alimentare il carico.

La sempre più massiccia penetrazione di generazione distribuita in rete sarà quindi la futura soluzione per un sistema elettrico più efficiente e rispettoso dell'ambiente, ma dovrà inevitabilmente essere accompagnata da uno sviluppo della rete di distribuzione che consentirà di avere un flusso bidirezionale in rete e di ovviare ai problemi sopracitati.

## **1.2 Gli impianti eolici in Italia**

L'energia eolica è una fonte energetica rinnovabile fondamentale nel passaggio alla transizione ecologica: alcuni Paesi nel mondo basano già gran parte del proprio sistema di approvvigionamento elettrico da questa risorsa.

Lo sfruttamento del vento risale a circa un secolo fa quando si iniziò a parlare di generazione elettrica da fonte eolica con la turbina di Smith-Putnam, costruita nel 1941 negli USA. La tecnologia si è parecchio evoluta nei successivi decenni: in particolare, dall'inizio del nuovo millennio, con la crescente preoccupazione derivante dai cambiamenti climatici e dalle emissioni delle centrali termoelettriche, l'energia eolica sta occupando una parte rilevante del mix energetico mondiale. In Europa l'eolico riveste un ruolo primario dal punto di vista economico: contribuisce per 37 miliardi al PIL della UE e, nonostante la recente pandemia di COVID-19, è riuscito ad attrarre oltre 14 miliardi di euro di investimenti per le future installazioni [3].

L'energia eolica si basa sul principio di sfruttamento dell'energia cinetica del vento sulla superficie terrestre tra zone di alta e bassa pressione: questa differenza di pressione è influenzata da vari fattori come la temperatura, la conformazione del terreno, l'altimetria e la presenza di inerzie termiche (come oceani, laghi, ecc.).

È quindi indispensabile, in base alla morfologia dei vari siti, studiare in modo dettagliato la caratterizzazione della fonte eolica: generalmente, la disponibilità della risorsa aumenta quando vengono ridotte al minimo le irregolarità della superficie terrestre. Ne consegue che gli impianti off-shore, situati al largo delle coste, hanno una maggiore producibilità rispetto a quelli situati nell'entro terra poiché non sono soggetti alla presenza di edifici o rilievi che possono influenzare la massa di vento.

Per quanto riguarda l'Italia, è stato messo a punto l'Atlante Eolico Italiano che riporta nella cartina la velocità media annua del vento nelle varie zone del territorio: basandosi su questi riferimenti, è possibile prevedere per un determinato sito quale sarà la producibilità di un determinato impianto su base annuale. La mappa della velocità media del vento nel territorio italiano è riportata nella seguente Figura [4]:

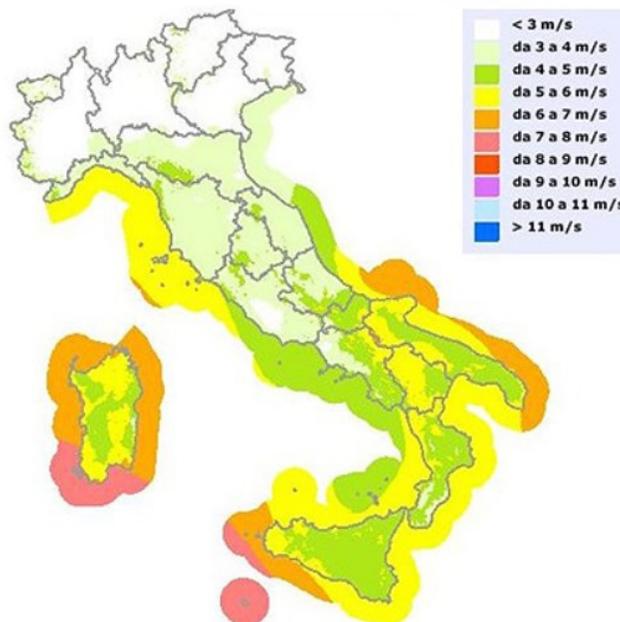


Figura 1.7 - Velocità media annua del vento a 25 m s.l.t.

Nel 2019, in Italia, risultavano installati 10527 MW di impianti eolici [5]: la maggior parte di essi, data la maggiore ventosità, sono situati al Sud e sulle Isole. La produzione da fonte eolica rappresenta il 9% della produzione elettrica totale in Italia: la maggior parte di questi impianti, però, è stata installata nello scorso decennio quando era previsto un sistema di incentivazione generoso (il “sistema dei Certificati Verdi”).

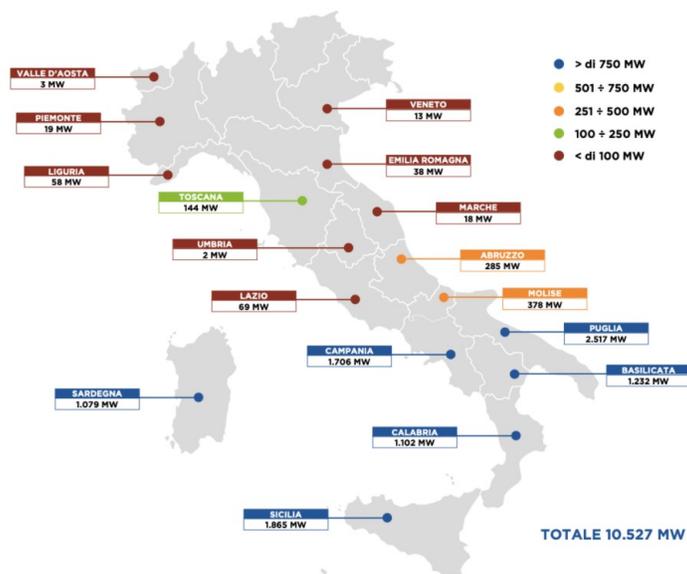


Figura 1.8 - Potenza eolica installata al 2019 per regione

Le pale eoliche, mosse dal vento, attivano un movimento rotatorio dando vita all'energia cinetica che viene captata da un rotore. Quest'ultimo trasmette l'energia meccanica di rotazione all'albero che sorregge le pale e al generatore che trasforma l'energia in elettrica.

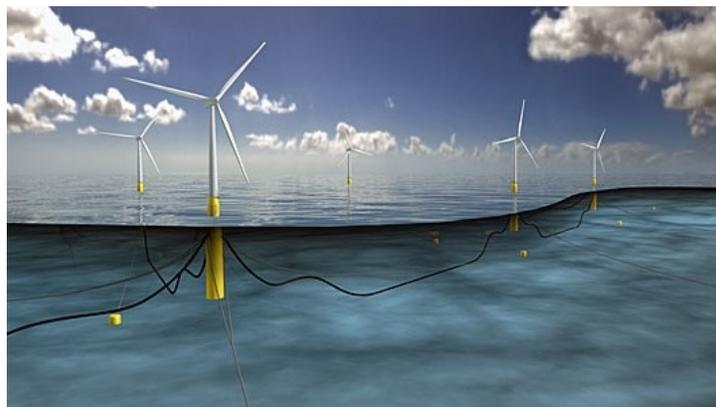
Gran parte degli impianti installati in Italia è di grande taglia, con potenze installate superiori a 20 MW per sito. Gli impianti eolici possono dunque essere classificati per taglia [6]:

- Grandi impianti: con potenza complessiva superiore a 10 MW e connessi alla rete AT;
- Impianti di taglia media: con potenza compresa tra 0,1 e 10 MW e connessi alla MT;
- Impianti di piccola taglia: connessi alla BT e con potenza non superiore a 100 kW;
- Micro e mini-impianti: composti da un unico aerogeneratore di qualche kW;

Numerosi sono i vantaggi di questa fonte rinnovabile: è un'energia pulita (non emette CO<sub>2</sub>), è gratis, non intacca le attività agricole e gli allevamenti degli animali ed ha bassi costi di manutenzione. D'altro canto, l'impatto visivo e acustico (soprattutto on-shore) non è trascurabile e l'esposizione finanziaria iniziale è davvero elevata (circa 1200 €/kW installato). Per questo è importante uno studio preliminare accurato del sito al fine di determinare con un buon grado di certezza la producibilità annuale dell'impianto e il relativo tempo di ritorno dell'investimento.

Le nuove installazioni eoliche nel territorio italiano negli ultimi anni sono però diminuite rispetto allo scorso decennio: il principale problema riguarda l'infinito iter burocratico per ottenere le dovute autorizzazioni. Tuttavia, a seguito delle enormi risorse previste dal PNRR e dalla road map definita nel nuovo PNIEC (Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima), il futuro dell'eolico in Italia non può essere che positivo. In particolar modo, per rispettare gli impegni sulla riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> e sulla quota di potenza definita nei due Piani sopracitati, una parte rilevante sarà svolta dall'eolico off-shore: l'obiettivo al 2030 è infatti di installare al largo delle coste italiane circa 900 MW di impianti eolici [7].

Le tecnologie off-shore stanno avendo un rapido sviluppo negli ultimi anni: di rilevante interesse sono oggi le turbine installate su basi flottanti che, non richiedendo fondamenta fisse, riescono a sfruttare i fenomeni ventosi anche in fondali profondi come il Mediterraneo. Le turbine flottanti, unite all'ormai consolidata tecnologia dei cavi sottomarini che collegano le turbine con la terraferma, stanno trovando sempre più interesse negli investitori del settore.



*Figura 1.9 - Illustrazione di un parco eolico flottante off-shore*

La ricerca e l'innovazione hanno portato alla costruzione di turbine off-shore di dimensioni sempre maggiori: è infatti comprovato che, a parità di altri fattori, una turbina eolica più grande produce più energia [8].

Tra tutte spiccano:

- V236 -15.0 MW, è la nuova mega turbina prodotta dalla danese Vestas. I numeri sono impressionanti: 43 mila metri quadrati di area spazzata, 15 MW di potenza, 80 GWh/anno. Una sola turbina sarà in grado di generare energia per 20000 famiglie e di offrire un'eccellente produzione a carico parziale, aumentando l'efficienza del processo;
- HALIADE-X 14 MW, è il generatore da record progettato da General Electric. Alto ben 260 metri, con un rotore di 220 m e una singola pala da 107 m, sarà in grado di generare 74 GWh/anno. È inoltre progettato per essere meno sensibile alle variazioni di velocità del vento: in questo modo è in grado di generare più energia quando il vento è meno forte.

Questa tecnologia, spinta dal continuo progresso tecnologico, andrà ad occupare una rilevante fetta del mix energetico italiano e mondiale nei prossimi anni.



# Capitolo 2 – Le linee elettriche in cavo

A seguito della necessaria decarbonizzazione del sistema elettrico, è prevista nei prossimi anni una crescita importante delle installazioni rinnovabili in Italia e nel mondo.

La crescente penetrazione delle fonti pulite nel mix energetico italiano richiede, però, un contemporaneo adeguamento del sistema elettrico al fine di mantenere il livello di qualità del servizio ai livelli odierni. Nel periodo di transizione energetica risulta fondamentale il ruolo delle linee elettriche in cavo al fine di rafforzare la rete di distribuzione nazionale e connettere ai carichi i nuovi impianti rinnovabili, spesso situati in luoghi sperduti del territorio. La distribuzione dell'energia elettrica attraverso i cavi interrati consente, inoltre, di avere un minor impatto ambientale rispetto all'installazione di nuove linee aeree.

## 2.1 Costituzione del cavo

Nel 1881, Thomas Edison costruì la “Street Pipes”: si trattava del primo cavo interrato che collegava la centrale elettrica situata a Pearl Street (New York) con la zona di Manhattan.

I primi cavi erano isolati in gutta-percha; la vera rivoluzione avvenne, però, nel 1917 grazie ad Emanuelli che perfezionò l'isolamento in carta avvolta ed impregnata d'olio [9]. Questa nuova tecnologia era in grado di soddisfare i requisiti di resistenza al calore e di rigidità dielettrica che gli altri materiali non riuscivano a garantire.

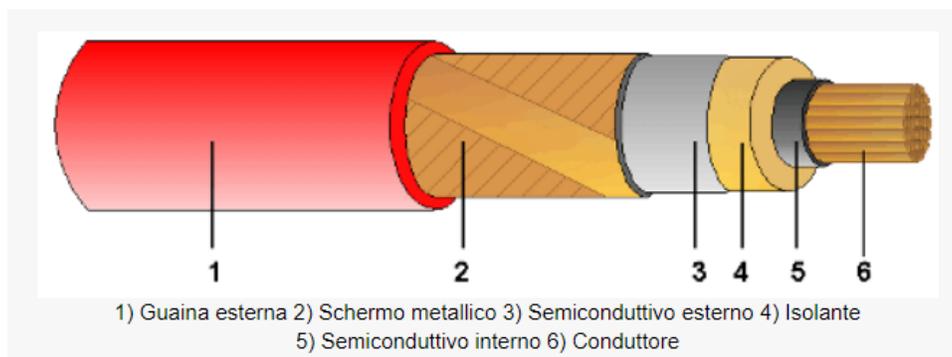
A partire dagli anni '40 quest'ultima venne pian piano sostituita dagli isolamenti in materiale termoplastico (PE, polietilene) che garantiva una migliore stabilità termica e limitava la formazione di vacuoli e delle relative scariche parziali.

Nel 1963, nei laboratori di ricerca di General Electric, venne inventato il polietilene reticolato (“cross linked polyethylene” o XLPE): oggi è l'isolante più utilizzato nelle installazioni in cavo di MT e AT. Le sue proprietà dielettriche eccezionali consentirono infatti, nei decenni successivi, la sua rapida espansione: le altre tecnologie divennero ben presto obsolete. Negli anni '80 l'introduzione degli schermi semiconduttivi e l'adozione di particolari componenti nella costituzione dell'isolamento XLPE, permisero di ridurre sensibilmente la formazione di vacuoli e

dei water-tree: venne così superato il problema delle scariche parziali che riduceva sensibilmente la vita del cavo. I progressivi miglioramenti tecnologici consentirono l'installazione, ad inizio millennio, di un cavo interrato isolato in XLPE esercito a ben 500 kV (Tokyo, 2000).

I cavi di potenza in corrente alternata possono essere oggi suddivisi in due grandi famiglie:

- I cavi unipolari, dove ogni conduttore di fase con l'isolante e lo schermo costituisce un cavo a sé stante;
- I cavi multipolari, dove le fasi sono tutte contenute all'interno di un unico cavo. Se gli schermi metallici sono su ogni fase, il cavo si dice a campo radiale; altrimenti, se lo schermo è comune per tutte le fasi, il cavo si dice a campo non radiale.



*Figura 2.1 - Parti costituenti un cavo unipolare MT*

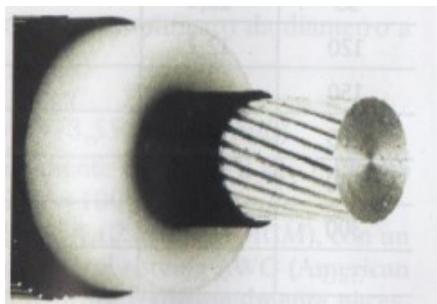
Di seguito vengono analizzate le parti che compongono un cavo unipolare [10].

### **2.1.1 Il conduttore**

Il conduttore di fase è sempre costituito da più fili elementari dello stesso diametro, disposti ad elica su strati concentrici partendo da un nucleo centrale costituito da uno o più fili.

I materiali utilizzati per la costruzione dei conduttori sono il rame elettrolitico e l'alluminio elettrolitico, entrambi aventi un altissimo grado di purezza. Per diametri superiori a 16 mm<sup>2</sup> i conduttori devono essere compattati: questo processo porta ad uno schiacciamento della corda e ad una forma quasi cilindrica della superficie esterna.

La compattatura viene eseguita perché porta a molti benefici: il cavo risulta essere di diametro ridotto e quindi i costi per i materiali sono minori, la superficie esterna della corda risulta essere cilindrica e regolare e, inoltre, viene impedita ogni infiltrazione all'interno che andrebbe a provocare delle irregolarità sullo strato isolante adiacente.



*Figura 2.2 - Cavo con conduttore a corda circolare compatta di alluminio*

La formazione delle corde di rame o alluminio è un processo che richiede inizialmente delle progressive riduzioni di diametro del tondino proveniente dal laminatoio. Da un diametro iniziale di 8 cm, il filo elementare viene ridotto alla misura richiesta per la formazione della corda; a seguito della trafilatura, i fili di rame devono essere sottoposti alla ricottura che ne migliora le caratteristiche meccaniche. I fili soggetti a ricottura vanno quindi a formare le corde: una cordatrice li dispone a elica in strati concentrici partendo da un nucleo centrale. Le corde vengono infine compattate.

### **2.1.2 L'isolante**

L'evoluzione dell'isolamento del cavo negli ultimi decenni ha permesso a questa tecnologia di essere una valida alternativa alle linee aeree, sia nelle linee di distribuzione sia in quelle di trasmissione.

Il compito dell'isolante è quello di isolare elettricamente i conduttori di fase tra loro e rispetto al terreno: viene dunque interposto tra il conduttore di fase e lo schermo metallico.

Un buon isolante deve avere le seguenti proprietà:

- Elevate rigidità dielettriche e resistenza di isolamento radiale  $R_{isol}$ ;
- Elevate caratteristiche meccaniche e non igroscopicità (ovvero non deve assorbire umidità);
- Elevata durata di vita sotto tensione;
- Elevate caratteristiche di non propagazione della fiamma in caso di incendio e di durabilità alle varie temperature a cui viene sottoposto;

Come sottolineato ad inizio Capitolo, l'isolamento del cavo ha subito una grande evoluzione negli ultimi 100 anni. Dagli anni '20 del Novecento si è diffuso l'isolamento in carta impregnata con olio viscoso: ancor'oggi è una tecnologia molto utilizzata nelle altissime tensioni, soprattutto nei cavi marini in corrente continua. I "Mass Impregnated cables" hanno un'alta affidabilità e una lunga vita di esercizio, anche se, tra gli svantaggi, presentano una scarsa maneggevolezza intrinseca ed un costo di processo molto elevato che li sta progressivamente eliminando dal mercato.

Le innovazioni tecnologiche degli ultimi 40 anni hanno consentito la rapida affermazione dei cavi con isolamento estruso, ottenuti per estrusione di mescole a base di polimeri.

Questa soluzione impiantistica viene suddivisa in due categorie principali:

- *Isolanti di tipo termoplastico*: la cui consistenza solida diminuisce progressivamente all'aumentare della temperatura fino a che l'isolante si fonde.

Fanno parte dei materiali termoplastici il PVC (in realtà una soluzione solida del polimero additivato con oli plastificanti per ottenere opportune caratteristiche di morbidezza) e il PE (o polietilene termoplastico).

L'uso dei cavi isolati in PVC è oggi marginale: se da un lato questo materiale risulta essere molto economico, non può essere utilizzato per cavi eserciti a tensioni maggiori di 3 kV poiché presenta scarse proprietà dielettriche che ne pregiudicano la sua diffusione.

- *Isolanti di tipo termoindurente*: al crescere della temperatura non si deformano, ma si incendiano o collassano quando viene superata una temperatura limite.

Fanno parte di questa categoria l'EPR, o gomma etilenpropilenica normale, e l'XLPE.



*Figura 2.3 - Cavo XLPE unipolare*

L'XLPE, più propriamente detto “polietilene reticolato”, è oggi il materiale più utilizzato al mondo per reti di media, alta e altissima tensione. Presenta delle caratteristiche dielettriche ottime e ad oggi non equiparabili a nessun altro materiale in commercio: un bassissimo fattore di dissipazione ( $\text{tg}\delta = 0,4 \cdot 10^{-3}$ ), bassa permittività dielettrica ( $\epsilon_r = 2,3$ ), altissima costante di isolamento e, infine, un'elevata rigidità dielettrica.

D'altro canto, però, l'XLPE è sensibile alle scariche parziali e alle infiltrazioni d'umidità: è quindi fondamentale l'introduzione di particolari additivi che inibiscano la formazione di arborescenze elettriche quando l'isolante viene sottoposto ad elevate tensioni.

La reticolazione consente ad un materiale termoplastico di diventare termoindurente, con enormi vantaggi nelle applicazioni del cavo: è un processo ottenuto per via chimica tramite la decomposizione di perossidi organici additivati nel polimero.

I perossidi, reagendo con la catena polimerica, estraggono atomi di H dai legami C-H: si ottengono delle catene polimeriche direttamente legate tra loro tramite legami carbonio-carbonio che rendono

il prodotto simile ad una grande macromolecola.

### 2.1.3 Gli schermi semiconduttivi

Per cavi con tensione nominale di esercizio maggiore di 3 kV sono prescritti dalle norme gli schermi semiconduttivi, posti su entrambe le superfici dell'isolante: quella interna, a contatto con il conduttore e quella esterna, a contatto con lo schermo metallico.

Le superfici di contatto con l'isolante sono infatti irregolari poiché interfacciano materiali aventi proprietà e geometrie diverse tra loro: la finalità, dunque, degli schermi semiconduttivi è quella di equalizzare il campo elettrico sulle due superfici di separazione.

Tramite questi strati quindi si elimina la possibilità di eventuali vacuoli d'aria tra l'isolante e i trefoli del conduttore di fase: nei vacuoli, infatti, i campi elettrici sono molto intensi e, data la bassa rigidità elettrica dell'aria, il cavo può incorrere facilmente nella scarica elettrica.

Per gli isolanti estrusi vengono adottati dei semiconduttori costituiti da mescole a base polimerica, estrusi assieme all'isolante: utilizzando dei materiali molto omogenei e una finissima dispersione del nerofumo nella mescola si riesce ad avere interfacce lisce e prive di difetti di alcun tipo.

Si ottengono degli strati semiconduttivi che hanno le seguenti caratteristiche elettriche:

$$\rho = 0.01 \div 100 \Omega \cdot m$$

$$\varepsilon_r = 100 \div 1000$$

Nella formazione dell'isolante e degli schermi semiconduttivi è stata citata l'*estrusione*: si tratta di un processo tecnologico che permette di trasformare una mescola granulosa in un rivestimento omogeneo e continuo dello spessore e della forma voluti. La mescola in forma di granuli viene caricata in una tramoggia e spinta da una coclea; durante il moto rotatorio di quest'ultima, la mescola viene riscaldata per attrito o con alcuni elementi termici collocati lungo il cilindro che contiene la coclea. Il risultato è la fusione completa dei granuli e la formazione di un materiale omogeneo in uscita sull'altro lato della tramoggia.

#### **2.1.4 Gli schermi metallici**

Lo schermo metallico ha lo scopo di proteggere dai contatti diretti con i conduttori di fase in tensione e di drenare verso terra le correnti di guasto. Gli schermi sono normalmente a fili o a nastri di rame, rispettivamente per cavi unipolari e tripolari, con una resistenza elettrica massima di 3  $\Omega/\text{km}$  a 20 °C in c.c. e una sezione elettrica di circa 6 mm<sup>2</sup> (salvo valori differenti concordati tra committente e fornitore).

La CEI 11-17 specifica che lo schermo metallico di un cavo deve essere collegato a terra ad entrambe le estremità e, per linee molto lunghe, anche in corrispondenza dei giunti a distanze non superiori ai 5 km.

#### **2.1.5 L'armatura**

L'armatura ha la funzione di protezione meccanica del cavo da possibili danneggiamenti per cause esterne come urti, abrasioni, roditori, ecc. e quella di dare maggiore resistenza alla trazione del cavo durante l'installazione o la movimentazione in ambiente sottomarino.

È normalmente in acciaio in forma di fili rotondi, piattine o nastri e deve essere zincata per evitare fenomeni di corrosione. Viene sempre utilizzata nelle applicazioni sottomarine.

#### **2.1.6 La guaina esterna**

La guaina è l'elemento più esterno del cavo ed ha il compito di impedire l'accessibilità dello schermo metallico (che può raggiungere tensioni pericolose). È sempre presente nei cavi: nel caso dei cavi tripolari conferisce al cavo la forma rotonda tenendo unite fra loro le anime.

La guaina è normalmente costituita da materiale termoplastico estruso come:

- Il PVC, o polivinilcloruro, economico e con buone caratteristiche meccaniche; risente però di una leggera permeabilità all'acqua;
- Il PE, o polietilene, che risulta essere molto più duro e resistente alle sollecitazioni meccaniche rispetto al PVC;

Essendo a contatto diretto con l'ambiente, la guaina deve avere determinate proprietà: non deve propagare la fiamma in caso d'incendio e deve sopportare l'aggressione di eventuali agenti corrosivi esterni.

Il PVC, se coinvolto in fenomeni incendiari, non propaga la fiamma; emana però dei gas tossici e corrosivi. Il PE, invece, se da un lato non emana alcun gas tossico nei fumi della combustione, dall'altro non è resistente alla propagazione della fiamma e brucia.

Molto importante è il colore della guaina: in Italia, infatti, fornisce una indicazione univoca della tipologia di cavo e del livello di tensione a cui è esercito. Ad esempio, il colore rosso indica un cavo MT e il nero i cavi AT interrati.

## **2.2 Cavi di potenza utilizzati in Italia**

### **2.2.1 Livelli di tensione**

I cavi di potenza utilizzati per il trasporto dell'energia elettrica in Italia vengono distinti in base ad opportuni livelli di tensione:

- Cavi di bassa tensione (BT) con  $U_0/U \leq 0,6/1$  kV;
- Cavi di media tensione (MT) con  $0,6/1$  kV  $< U_0/U \leq 18/30$  kV;
- Cavi di alta tensione (AT) con  $U_0/U > 18/30$  kV;

Dove:

- $U_0$  è la tensione nominale d'isolamento in kV efficaci, a frequenza industriale, tra un conduttore isolato e la terra;
- $U$  è la tensione nominale d'isolamento in kV efficaci, a frequenza industriale, tra due conduttori isolati qualsiasi del cavo;

In base alla dicitura internazionale, pur non essendo esplicitati nella norma CEI, vengono inoltre definiti i cavi di altissima tensione (AAT) aventi  $U > 150$  kV.

### 2.2.2 Cavi di media tensione

I cavi di media tensione in uso in Italia sono trattati nella Norma CEI 20-13: essa considera cavi con tensioni applicate fino a 30 kV isolati solamente in HEPR.

I cavi di media tensione più utilizzati in Italia sono i seguenti [11][12]:

- Cavi RG7H1R e RG7H1OR, rispettivamente unipolari e tripolari, isolati in gomma HEPR di qualità G7, sotto guaina di PVC. La guaina per i cavi di media tensione è rigorosamente di colore rosso.

Sono cavi adatti per il trasporto di energia tra le cabine di trasformazione e le grandi utenze; non propagano la fiamma in caso di incendio e hanno tensione nominale  $U_0/U$  che va dagli 1,8/3 kV ai 26/45 kV.

Il conduttore è di rame rosso e il cavo è schermato tramite fili di rame rosso con nastro di rame in controspirale.

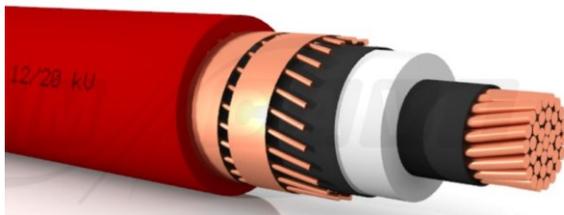


Figura 2.4 - Cavo RG7H1R 12/20 kV



Figura 2.5 - Cavo RG7H10R 12/20 kV

- Cavi ARG7H1R e ARG7H1OR, generalmente utilizzati per la posa interrata nella rete di distribuzione MT.

Sono isolati in gomma HEPR di qualità G7, sotto guaina di PVC; come i precedenti, non propagano la fiamma.

Il conduttore è di alluminio e la schermatura metallica è fatta tramite fili di rame rosso con nastro di rame in controspirale.

Per range di tensioni nominali  $U_0/U$  dagli 1,8/3 kV ai 18/30 kV.

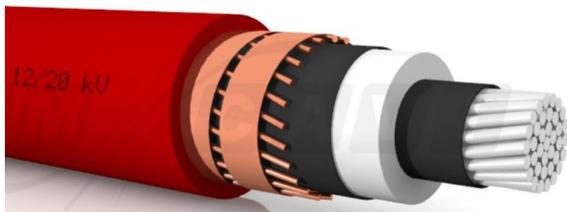


Figura 2.6 - Cavo ARG7H1R 12/20 kV



Figura 2.7 - Cavo ARG7H10R 12/20 kV

Cavi ARE4H1R, particolarmente indicati per gli impianti eolici.

Isolati in XLPE senza piombo e sotto guaina di PVC, non propagano la fiamma in caso di incendio.

Il conduttore è di alluminio e la schermatura metallica è fatta tramite fili di rame rosso con nastro di rame in controspirale.

Vengono applicate a questi cavi tensioni nominali pari a  $U_0/U = 12/20$  kV oppure  $U_0/U = 18/30$  kV.

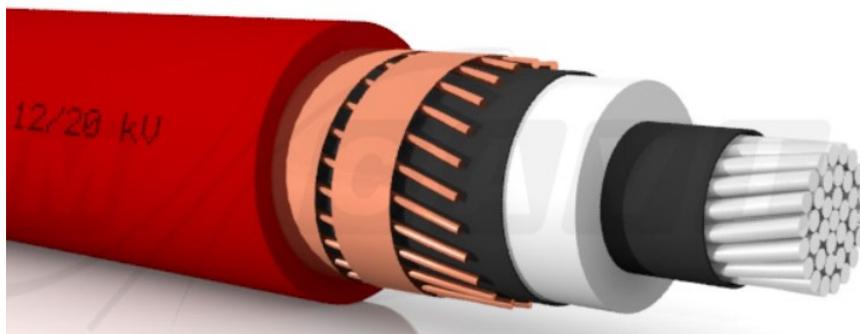
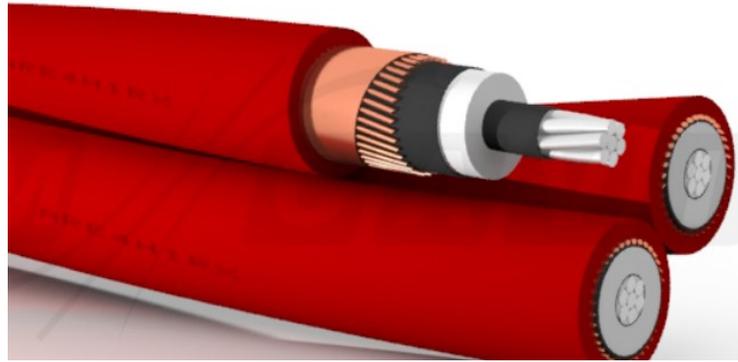


Figura 2.8 - Cavo ARE4H1R 12/20 Kv

- Cavi ARE4H1RX, anch'essi particolarmente indicati per impianti eolici.

Isolati in XLPE, sono cavi di media tensione ad elica visibile con conduttore a corda compatta di alluminio. La schermatura metallica è a fili di rame rosso e controspirale.

Sopportano temperature massime di cortocircuito pari a 250 °C e vengono applicati per tensioni  $U_0/U = 12/20$  kV e  $U_0/U = 18/30$  kV.



*Figura 2.9 - Cavo ARE4HIRX 12/20 kV*

Le caratteristiche tecniche ed elettriche dei cavi sovracitati sono riportate in Appendice.

## 2.3 Gradienti e parametri elettrici dei cavi

### 2.3.1 Il campo elettrico nell'isolante

In base alla distribuzione del campo elettrico nell'isolante, i cavi vengono suddivisi in due categorie [13]:

- Cavi a campo elettrico radiale, se ogni anima del cavo è singolarmente schermata.  
In questo caso, il campo elettrico è delimitato dagli schermi semiconduttivi adiacenti allo strato isolante. Il campo elettrico genera delle superfici equipotenziali cilindriche regolari e coassiali e quindi, perpendicolari ad esse, delle linee di forza radiali.
- Cavi a campo elettrico non radiale, se le anime non sono singolarmente schermate.  
Il campo elettrico non ha più una distribuzione con superfici equipotenziali circolari e uniformi: presenta delle linee di forza con componenti sia radiali che tangenziali all'isolante.

Queste ultime, soprattutto nei cavi con isolanti costituiti da strati di carta impregnata, possono portare a microscariche nelle inclusioni d'aria che vengono a formarsi.

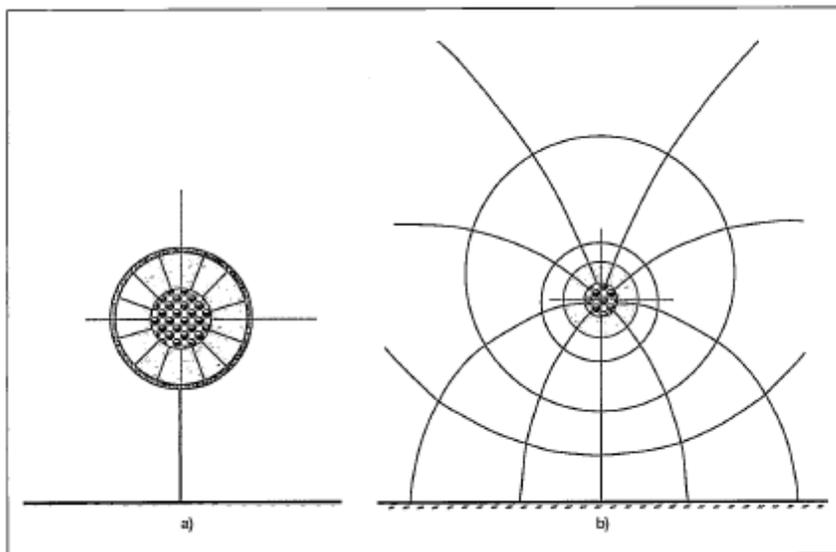


Fig. 2.10 - Andamento del campo elettrico in un cavo unipolare  
 a) cavo a campo radiale con schermo metallico  
 b) cavo a campo non radiale sprovvisto di schermo metallico

Per la media tensione, i gradienti di esercizio sono compresi tra 2 e 4 kV/mm: si tratta di valori molto cautelativi in relazione alle rigidità dielettriche dei materiali usati per l'isolante, considerando che si tratta dello stesso isolamento utilizzato nei cavi di alta tensione.

È importante analizzare il comportamento del campo elettrico in corrente alternata.

In questo caso, la ripartizione del campo elettrico risulta essere di tipo capacitivo: il cavo unipolare, infatti, può essere ricondotto ad un condensatore con armature cilindriche e coassiali (conduttore e schermo). La corrente capacitiva che circola sull'isolante risulta essere:

$$I_c = \omega \cdot C \cdot U_0$$

Dove:

- C = capacità (per unità di lunghezza)

- $U_0 =$  tensione conduttore-schermo
- $\omega = 2\pi f$

Applicando la legge di Gauss, il campo elettrico in un punto  $x$  [mm] preso radialmente lungo l'isolante è dato dalla relazione (dove  $r_0 =$  raggio schermo,  $r_1 =$  raggio conduttore di fase):

$$E_x = \frac{U_0}{x \cdot \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right)}$$

L'andamento del campo elettrico presenta quindi l'andamento di figura 1.10:

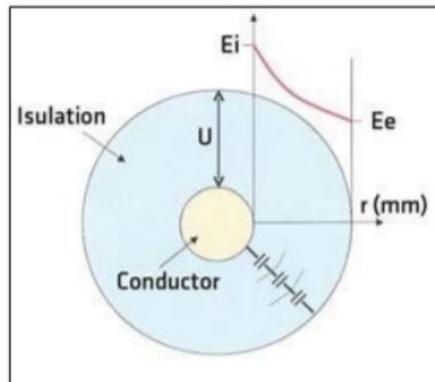


Figura 2.11 - Distribuzione del campo elettrico nell'isolante di un cavo a campo elettrico radiale

Dalla Figura 2.11 e dalla relazione sopra, è immediato determinare i punti di massimo e di minimo del campo elettrico nell'isolante:

- Il valore massimo si trova per  $x = r_1$ , ovvero in corrispondenza della superficie esterna del conduttore di fase.

Il campo elettrico per un dato isolante non dipende dal valore della permittività  $\epsilon$ , bensì dai suoi parametri geometrici  $r_0$  e  $r_1$ :

$$E_{max} = \frac{U_0}{r_1 \cdot \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right)}$$

- Il valore minimo del campo elettrico si trova per  $x = r_0$ , in corrispondenza del raggio dello schermo:

$$E_{min} = \frac{U_0}{r_0 \cdot \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right)}$$

Per ottenere un dimensionamento ottimale del cavo bisogna calcolare qual è il valore di  $r_1$  in cui si ha il minimo di  $E_{max}$ . Ciò si ottiene quando:

$$\ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right) = 1 \quad \text{ovvero quando} \quad \frac{r_0}{r_1} = 2,7182$$

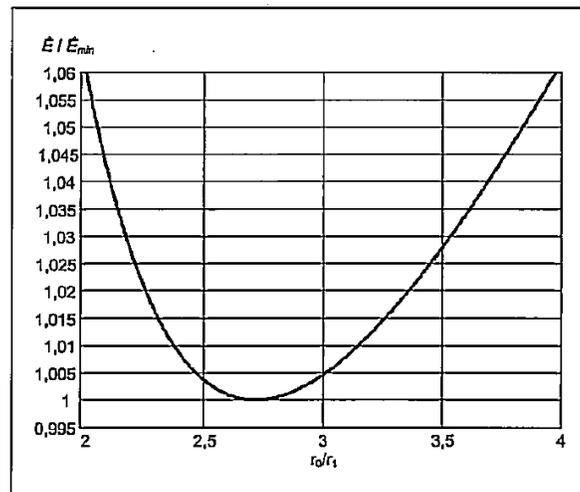


Figura 2.12 - Relazione tra il rapporto dei raggi e il campo elettrico

Nella Figura 2.12 si può vedere che il minimo è piuttosto piatto: è quindi ammissibile un qualsiasi rapporto dei raggi compreso tra 2,5 e 3 poiché, in tale intervallo, l'aumento del valore massimo del campo elettrico è minore dello 0,5%.

Per le sezioni maggiori del conduttore, inoltre, un dimensionamento di schermo metallico ed isolante secondo il rapporto ottimale porterebbe a spessori dell'isolante troppo elevati: in questi casi, si riporta come valore ottimale un rapporto tendente a 2.

Per i cavi di media tensione fino a 30 kV, gli spessori degli isolanti sono fissati dalle norme.

Di conseguenza, vengono stabiliti dalle norme anche i rispettivi gradienti di esercizio: nella tabella seguente sono riportati gli spessori degli isolanti in mm per i cavi MT.

	$U_0/U$ [kV]					
	1,8/3	3,6/6	6,0/10	8,7/15	12/20	18/30
PVC	2,2-3,0	=	=	=	=	=
HEPR	2,0-2,8	2,5	3,4	4,5	5,5	8,0
XLPE	2,0-2,8	2,5	3,4	4,5	5,5	8,0

Tab 2.1 - Spessori degli isolamenti in mm per diversi materiali estrusi e relative tensioni

### 2.3.2 Parametri elettrici di un cavo

Un cavo può essere rappresentato da:

- 2 parametri longitudinali: resistenza ohmica dei conduttori e reattanza induttiva
- 2 parametri trasversali: resistenza di isolamento e reattanza capacitiva

Lo studio di questi parametri è fondamentale poiché essi risultano essere molto influenzati dalle caratteristiche fisiche e geometriche del cavo stesso. Le linee in cavo MT possono essere rappresentate dalla Figura 2.13:

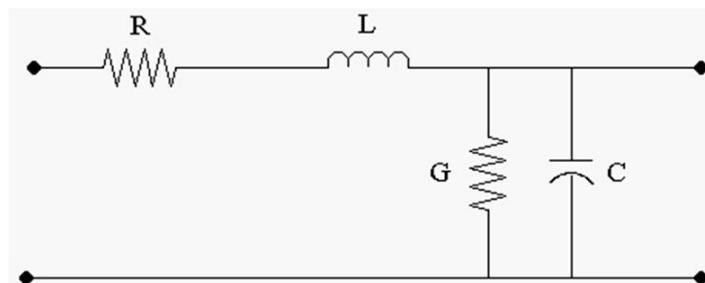


Figura 2.13 - Modello di un cavo unipolare MT

I due rami longitudinali rappresentano rispettivamente il conduttore di fase e lo schermo metallico. Essendo materiali metallici, sia il conduttore di fase che lo schermo presentano una certa resistenza ohmica e un'induttanza che si crea a seguito della vicinanza tra i due conduttori: quest'ultima dipende dalla loro distanza che, nel caso del cavo, risulta essere costante e pari allo spessore dell'isolamento.

Si può quindi definire l'impedenza chilometrica longitudinale  $\dot{z}$  [ $\Omega/\text{km}$ ], tenendo conto della resistenza e dell'induttanza equivalente del circuito.

Allo stesso modo, può essere definita l'ammettenza chilometrica trasversale  $\dot{y}$  [ $\text{S}/\text{km}$ ]:

$$\dot{z} = r + j\omega l$$

$$\dot{y} = g + j\omega c$$

Di seguito vengono descritti dettagliatamente i singoli parametri:

- Resistenza ohmica dei conduttori: alla temperatura  $t$  di esercizio, la resistenza elettrica in corrente continua è data dalla relazione:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \Delta t)$$

Dove:

\* $\alpha$  = coefficiente di temperatura [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ], pari a 0.0393 per il rame e 0.0403 per l'alluminio;

\* $\Delta t = (\vartheta_c - t_0)$  [ $^{\circ}\text{C}$ ], è l'escursione di temperatura massima consentita rispetto a  $t_0 = 20^{\circ}\text{C}$ . Questa escursione dipende dal tipo di isolamento utilizzato nel cavo:

Materiale isolante utilizzato nel cavo	Massima temperatura di esercizio $\vartheta_c$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Massima temperatura di corto circuito [ $^{\circ}\text{C}$ ]
Carta impregnata	50 ÷ 80	200
Carta impregnata con olio fluido	90	220
Gomma etilenpropilenica EPR (sigle: G7 e G10)	90	250 <sup>(1)</sup>
Polietilene reticolato XLPE (sigla: E4)	90	250 <sup>(1)</sup>
Polivinilcloruro PVC (sigla: R2)	70	160 <sup>(2)</sup>

Fig. 2.14 - Temperature massime di esercizio continuativo e di corto circuito per i vari materiali isolanti

$R_0$ , ovvero la resistenza in corrente continua, si ricava dalla norma CEI 20-29 che riporta i valori massimi (in  $\Omega/\text{km}$ ) alla temperatura  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ , per ogni sezione nominale del conduttore.

In corrente alternata, alla frequenza  $f$ , bisogna tenere conto di due parametri:

- L'autoinduttanza del conduttore percorso dalla c.a. che genera l'effetto pelle (valore apprezzabile solo per sezioni del conduttore maggiori di  $1000 \text{ mm}^2$ );
- La mutua induttanza tra conduttori che provoca a sua volta variazioni di densità di corrente (effetto di prossimità).

L'effetto pelle e l'effetto di prossimità fanno sì che la resistenza in corrente alternata sia maggiore rispetto a quella in corrente continua [14].

Tramite due opportuni coefficienti  $\gamma_s$  e  $\gamma_p$  (rispettivamente effetto pelle e effetto di prossimità, ricavabili dalla norma CEI 21-1 o dalla IEC 60287) si trova il valore della resistenza del conduttore in corrente alternata alla temperatura  $t$  di esercizio:

$$R_{t \text{ c.a.}} = R_0(1 + \alpha\Delta t)(1 + \gamma_s + \gamma_p)$$

- Induttanza: si compone di due termini, l'autoinduttanza del conduttore percorso da corrente alternata e l'induttanza mutua tra i conduttori [10].

L'induttanza per ciascun conduttore dipende dal rapporto tra la distanza degli assi dei conduttori e il diametro esterno del conduttore.

\*Cavo unipolare schermato o dotato di conduttori concentrici:

$$L = 0,05 + 0,46 \cdot \log \frac{d_2}{d_1} \text{ [mH/km]}$$

\*Cavo tripolare o terna di cavi con configurazione a trifoglio:

$$L = 0,05 + 0,46 \cdot \log \frac{2a}{d_1} \text{ [mH/km]}$$

\*Terna di cavi unipolari con configurazione in piano:

$$L = 0,05 + 0,46 \cdot \log \frac{2 \cdot \sqrt[3]{2a}}{d_1} \text{ [mH/km]}$$

Dove:

0,05 = termine relativo all'autoinduttanza

$d_1$  e  $d_2$  = diametri del conduttore e dello schermo concentrico [mm]

$a$  = distanza interasse di due conduttori [mm]

Dal valore della resistenza del conduttore in c.a. alla temperatura di esercizio e dal valore della reattanza induttiva  $X$  (ottenuta moltiplicando  $L$  per  $\omega \cdot 10^{-3}$ ), si ottiene l'impedenza chilometrica longitudinale:

$$Z = \sqrt{R_{t.c.a.}^2 + X^2}$$

- Capacità: nei cavi di media tensione il campo elettrico è radiale; la capacità d'esercizio di un cavo unipolare è la capacità esistente tra conduttore di fase e schermo metallico:

$$C = \frac{\epsilon_r}{18 \ln \frac{d_0}{d_i}} [\mu\text{F}/\text{km}]$$

dove:

$d_0$  = diametro esterno del mezzo isolante escludendo lo strato semiconduttivo [m]

$d_i$  = diametro del conduttore di fase includendo lo strato semiconduttivo [m]

$\epsilon_r$  = costante dielettrica dell'isolante

- Conduttanza trasversale  $g$ : anche denominata "resistenza di isolamento". Questo parametro è dovuto al fatto che i materiali isolanti non sono mai ideali, ma sono sede di perdite che dipendono dalla frequenza, dalla temperatura e dalla tensione.

La corrente drenata verso terra, nel caso di dielettrico perfetto, sarebbe sfasata di  $90^\circ$  in anticipo rispetto alla tensione di fase applicata al cavo.

In realtà esiste una componente di corrente resistiva, in fase con la tensione, per cui tale angolo risulta essere inferiore a 90°: la riduzione  $\delta$  dell'angolo rappresenta le perdite di potenza attiva nell'isolante. Le perdite vengono dunque identificate col parametro  $\tan \delta$ , detto "fattore di perdita":

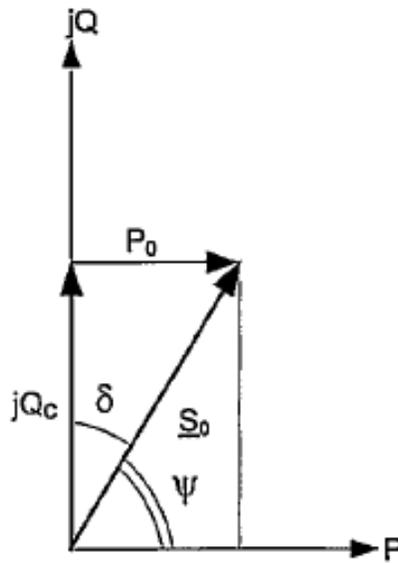


Figura 2.15 - Triangolo delle potenze assorbite a vuoto da un cavo di potenza

Per ogni fase, la potenza dissipata nel dielettrico è data dalla relazione:

$$Pd = \omega \cdot C \cdot U_0^2 \cdot \tan \delta$$

Dalla precedente relazione si evince che le perdite dielettriche sono proporzionali al quadrato della tensione stellata. Tuttavia, mentre per i cavi in AT e AAT devono essere obbligatoriamente considerate, nel caso dei cavi MT possono essere trascurate perché risultano essere molto piccole se comparate alle perdite per effetto Joule dovute alla resistenza chilometrica longitudinale.

La seguente tabella riporta i valori della permittività relativa per i vari materiali utilizzati come isolanti nel cavo e i relativi fattori di perdita  $\tan \delta$  [13]:

<i>Tipo di cavo</i>	$\epsilon_r$	$\tan \delta$
<b>Cavi isolati in carta</b>		
Carta impregnata	4,0	0,01
Olfo fluido bassa pressione fino a: $U_0 = 36$ kV	3,6	0,0035
$U_0 = 87$ kV	3,6	0,0033
$U_0 = 160$ kV	3,5	0,0030
$U_0 = 220$ kV	3,5	0,0028
Olfo fluido in pressione pipe-type	3,7	0,0045
Gas interno in pressione	3,4	0,0045
Gas esterno in pressione	3,6	0,0040
<b>Cavi con altri tipi di isolamento</b>		
Gomma butile	4,0	0,050
<b>EPR</b>		
fino a 18/30 (36) kV	3,0	0,020
oltre 18/30 (36) kV	3,0	0,005
<b>PVC</b>		
	8,0	0,1
<b>PE (HD e LD)</b>		
	2,3	0,001
<b>XLPE</b>		
fino a 18/30 (36) kV non riempito	2,5	0,004
oltre 18/30 (36) kV non riempito	2,5	0,001
oltre 18/30 (36) kV riempito	3,0	0,005
<b>PPL</b>		
uguale o maggiore a 63/110 kV	2,8	0,0014

Tab. 2.2 - Valori della permittività relativa e del fattore di perdita a 50-60 Hz per vari materiali isolanti

La conduttanza trasversale è calcolabile dalla suscettanza capacitiva chilometrica una volta noto il fattore di perdita  $\tan \delta$ :

$$g = \omega \cdot C \cdot \tan \delta \quad [\text{S/km}]$$

Per ognuno dei quattro parametri citati, si fa sempre riferimento alle tabelle che vengono fornite dai costruttori dei cavi MT.

In termini di paragone, le linee in cavo presentano un'induttanza e una capacità di esercizio pari a, rispettivamente, 0,3÷0,6 volte e 20÷60 volte quella delle linee aeree.

Dal calcolo dell'impedenza longitudinale chilometrica  $\hat{z} = r + j\omega L$  e dell'ammettenza trasversale chilometrica  $\hat{y} = g + j\omega C$ , si può calcolare una grandezza molto importante, l'impedenza caratteristica del cavo, definita come [15]:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{z}{y}}$$

Le linee in cavo, caratterizzate da induttanze piuttosto basse e capacità di esercizio elevate (a seguito della distanza modesta tra conduttori e dell'elevata permittività relativa del dielettrico), presentano valori di  $Z_0$  circa cinque volte inferiori rispetto alle linee aeree. È importante sottolineare, inoltre, che questa grandezza non dipende dalla lunghezza della linea ma dai parametri caratteristici del cavo (resistenza, induttanza, capacità, conduttanza) e dalla pulsazione  $\omega$ .

## 2.4 Portata di corrente di un cavo

La portata di corrente di un cavo è definita come la corrente massima nel conduttore per la quale, in regime continuativo, non viene superata la temperatura ammessa dall'isolante.

Quindi, la portata non dipende solamente da com'è fatto il cavo nei suoi vari strati concentrici, ma anche da altri elementi che rientrano nel calcolo termico: la modalità di posa, le caratteristiche termiche dell'ambiente in cui il cavo si trova e la modalità di messa a terra delle guaine.

Il salto termico che non deve dunque essere superato è dato dalla differenza tra la temperatura massima ammessa dall'isolante e la temperatura ambiente:

$$\Delta\theta_{tot} = \theta_{max} - \theta_{amb}$$

Il salto termico viene valutato come somma dei  $\Delta\theta$  di ogni strato attraversato dalla potenza termica: tale somma deve essere compatibile con la massima temperatura sopportabile dall'isolamento del cavo. Il salto termico di un generico strato del cavo è dato da:

$$\Delta\theta = R_T \cdot W \quad [^{\circ}\text{C}]$$

dove:

$W$  = potenza termica trasmessa attraverso lo strato considerato [W/m];

$R_T$  = resistenza termica dello strato considerato [K m/W]

A sua volta, la resistenza termica può essere calcolata come:

$$R_T = \frac{\rho_T}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_{ext}}{r_{int}}$$

dove:

$\rho_T$  = resistività termica del materiale dello strato considerato [K m/W];

$r_{ext}, r_{int}$  = raggio esterno ed interno dello strato considerato [m];

Per un cavo interrato si considerano i salti termici principali (gli altri vengono omessi perché trascurabili):

- $R_d$  e  $\Delta\theta_d$ , ovvero la resistenza termica e il salto termico nello strato di dielettrico;
- $R_g$  e  $\Delta\theta_g$ , ovvero resistenza termica e salto termico nella guaina termoplastica;
- $R_t$  e  $\Delta\theta_t$ , ovvero resistenza termica e salto termico nel terreno; quest'ultima è la componente predominante nel salto termico.

La norma IEC 60287 fornisce le tabelle per ricavare i valori di riferimento della resistività termica sia per i materiali isolanti sia per le condizioni relative al terreno in cui viene posato il cavo interrato.

Per i cavi MT interrati si fa sempre riferimento alle “tabelle delle portate” fornite dai costruttori del cavo, in cui le modalità di posa sono considerate tramite opportuni coefficienti di correzione rispetto alla condizione standard di portata in corrente  $I_0$  ( $\theta_{amb} = 20^\circ\text{C}$ , profondità di posa = 0,8 m, resistività termica media radiale del terreno = 1,5 K m/W, connessione degli schermi metallici in solid bonding):

$$I_n = I_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4$$

dove:

- $K_1$  = fattore correzione per  $T^\circ$  diverse da  $20^\circ\text{C}$ ;

- $K_2$ = fattore correzione per gruppi di più circuiti installati sullo stesso piano;
- $K_3$ = fattore correzione per profondità di interrimento diverse da 0,8 m;
- $K_4$ = fattore correzione per resistività termica del terreno diversa da 1,5 K m/W.

Un elemento da considerare è l'elevata capacità termica del cavo elettrico: questo fattore consente di poter esercire il cavo con portate di corrente superiori a quelle ammissibili per un tempo considerevole. Infatti, il cavo ha una costante di tempo che può arrivare a qualche ora: un eventuale sovraccarico temporaneo, quindi, può essere gestito senza alcun problema.

Al giorno d'oggi, vengono impiegate delle fibre ottiche fissate alla superficie del cavo per monitorare la temperatura lungo la tratta considerata: in questo modo, si può controllare continuamente la temperatura dell'isolante in modo da far fronte alle variabilità ambientali e alle situazioni di carico.

## 2.5 Posa interrata dei cavi MT

La posa interrata dei cavi viene regolamentata dalla Norma CEI 11-17; le profondità minime di interrimento si riferiscono proprio a tale Norma e crescono all'aumentare della tensione nominale del cavo:

- 0,5 m per  $U_n \leq 1000$  V;
- 0,6 o 0,8 m per  $1000 \leq U_n \leq 30$  kV;
- 1,0 o 1,2 m per  $U_n > 30$  kV;

La soluzione più frequentemente adottata è la cosiddetta posa "in trincea": generalmente per la MT la posa è a trifoglio e i cavi vengono adagiati a circa 1,5 m di profondità su terreno sabbioso opportunamente selezionato.

I cavi vengono poi ricoperti da uno strato di circa 30 cm di sabbia selezionata affinché lungo tutto il tracciato del cavo si abbia una uniforme dissipazione del calore prodotto dal cavo.

Il materiale con cui riempire la restante area dello scavo può rimanere il terreno naturale solo se la sua resistività termica è compresa tra 1,0 e 1,2 K·m/W, altrimenti va sostituito per non influire sul range termico del cavo.

Poiché parecchi guasti che riguardano i cavi interrati avvengono per cause esterne (scavi, conficcamento di picchetti o sonde, ecc.), è necessario proteggere meccanicamente la terna di cavi unipolari: generalmente vengono impiegate a tale scopo delle lastre in calcestruzzo armato ricoperte da nastri di segnalazione.

Una soluzione alternativa, ma più onerosa, è la posa “in cunicolo”: il cavo in questo caso, anziché essere posato direttamente a contatto col terreno, viene adagiato in un manufatto di calcestruzzo prefabbricato e ricoperto da tegoli di protezione in calcestruzzo armato che consentono un rapido accesso per ispezionare il cavo.

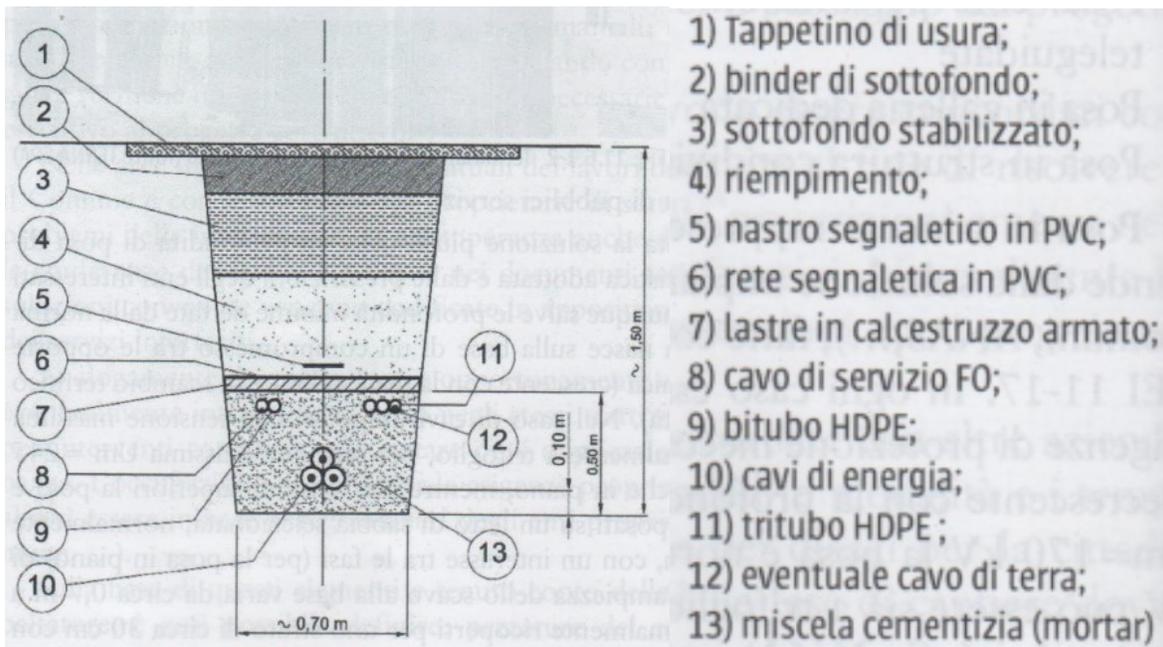


Figura 2.16 - Sezione tipica di trincea per cavo con posa a trifoglio su sede stradale



*Figura 2.17 - Scavi per interramento di una linea in cavo MT*

## **2.6 Collegamento degli schermi metallici**

I cavi unipolari sono realizzati con uno schermo metallico esterno avente doppia funzione:

- Drenare verso terra le correnti capacitive del cavo;
- Assicurare la protezione contro i contatti diretti;

La messa a terra degli schermi metallici nei cavi MT viene trattata nella Norma CEI 11-17 che riporta: “Tutti i rivestimenti metallici dei cavi devono essere messi a terra almeno alle estremità di ogni collegamento; per collegamenti di grande lunghezza è raccomandabile, inoltre, la messa a terra del rivestimento metallico in corrispondenza dei giunti a distanze non superiori ai 5 km.

Per collegamenti corti, in genere non superiori al km, è pure consentita la messa a terra del rivestimento metallico in un sol punto purché vengano adottate le seguenti precauzioni:

- in corrispondenza delle terminazioni e delle interruzioni dei rivestimenti metallici, se accessibili, devono essere applicate opportune protezioni atte ad evitare tensioni di contatto superiori ai valori

ammessi dalla Norma CEI EN 50522;

-la guaina non metallica di protezione del cavo deve essere in grado di sopportare la massima tensione totale di terra dell'impianto di terra al quale il rivestimento metallico è collegato.”

Esistono tre tipologie di collegamento degli schermi metallici a terra:

- Single- point bonding, è la messa a terra degli schermi metallici ad una sola estremità. Così facendo, poiché un'estremità è disconnessa da terra, negli schermi non si avranno circolazioni né di correnti indotte né di correnti di guasto: tuttavia, l'estremo scollegato da terra si troverà a potenziale flottante di valore proporzionale alla lunghezza del collegamento che può raggiungere valori pericolosi, superiori alla tenuta della guaina isolante del cavo.

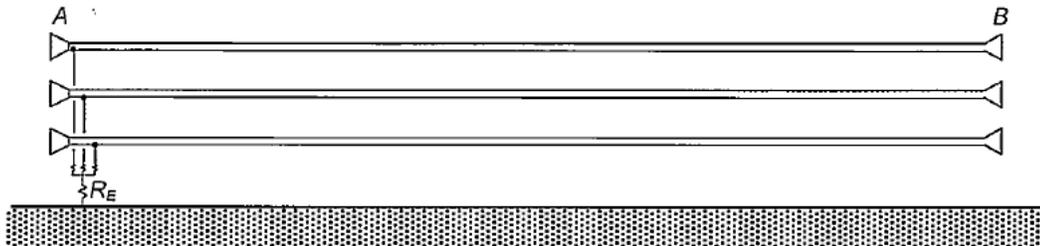


Figura 2.18 - Collegamento degli schermi a terra con la tecnica del single- point bonding

Questo schema di collegamento, per i motivi elencati, viene utilizzato solamente per linee corte, meno di 1 km, e per correnti non superiori a 500 A.

- Solid- bonding, è la messa a terra ad entrambe le estremità. In questo modo, se da un lato le tensioni indotte risultano essere di basso valore, dall'altro si forma un circuito chiuso percorso da correnti indotte che causano perdite aggiuntive.

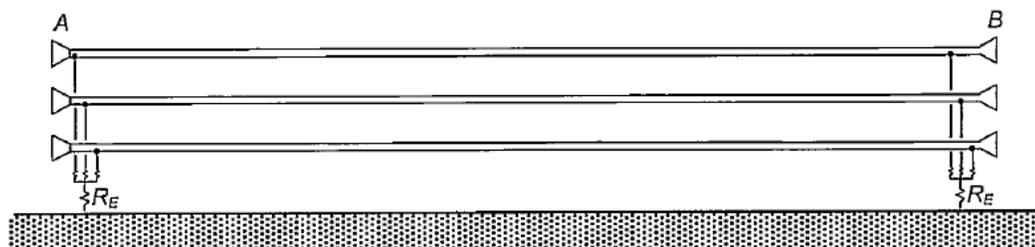


Figura 2.19 - Collegamento degli schermi a terra con la tecnica del solid- bonding

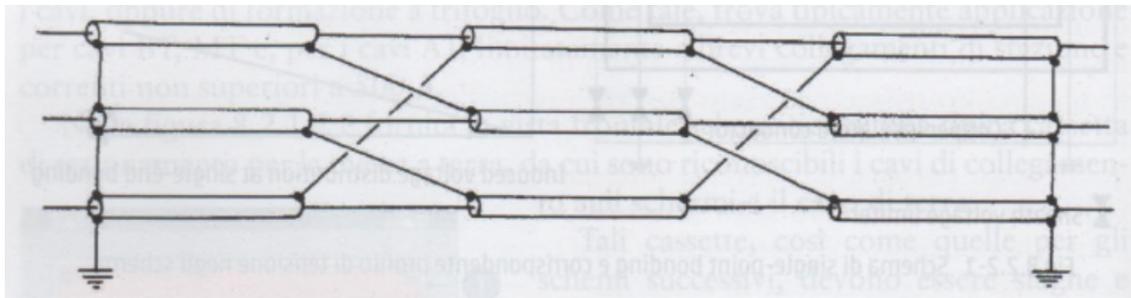
Questa tecnica trova applicazione per i cavi MT con correnti non superiori a 500 A.

- Cross-bonding, è la tecnologia più complessa delle tre, ma viene attualmente utilizzata per superare i limiti delle due sopracitate per quanto riguarda le linee in cavo molto lunghe, costituite da più pezzature.

Questa tecnica prevede la suddivisione della linea in cavo in tre (o multipli di tre) parti e la trasposizione degli schermi metallici in corrispondenza dei giunti intermedi; gli schermi vengono poi collegati tra loro alle estremità del circuito e messi a terra. Così facendo, le tensioni indotte nelle singole tratte sono sfasate tra loro di  $120^\circ$  e la loro somma vettoriale è nulla.

Vengono meno, con l'adozione di questa tecnica, i limiti sulla lunghezza del cavo.

È importante specificare che il motivo principale per cui viene scelta questa tecnologia è quello di limitare le perdite negli schermi, responsabili di una riduzione della portata del cavo: per questo si usa questa tecnica prevalentemente per le linee AT e AAT, dove non possono essere tollerate perdite aggiuntive (a differenza della BT e della MT).



*Figura 2.20 - Collegamento degli schermi a terra con la tecnica del cross-bonding*

## 2.7 Giunti e terminali MT

I cavi elettrici vengono forniti dai costruttori in tratte di determinate lunghezze, dette pezzature, avvolte in bobine: tanto maggiore è la sezione del cavo, tanto minore risulterà essere la lunghezza della pezzatura (normalmente per cavi MT, 500-1000 m circa).

Le varie pezzature, ovviamente, devono essere collegate tra loro per permettere la continuità della linea in cavo: sono quindi necessari dei giunti.

I giunti devono essere realizzati con la massima accuratezza: molti guasti nei cavi MT derivano proprio da un procedimento errato nella costruzione e messa in servizio del componente.

Negli ultimi decenni c'è stata una rapida evoluzione nei materiali e nelle tecnologie utilizzate per i giunti e le terminazioni dei cavi. Attualmente, le tecnologie più utilizzate sono [10]:

- ad isolamento termorestringente, è la tecnica più economica e più utilizzata negli accessori dei cavi MT. Il principio si basa sul riscaldamento con phon industriale di tubi e parti prefabbricate di diversa forma, composti da poliolefine reticolato, con cui si riesce ad ottenere il restringimento e l'adesione del materiale al cavo.
- ad isolamento autorestringente, utilizzano sistemi isolanti composti da gomme sintetiche. Tali accessori, vengono fatti espandere a temperatura ambiente su alcuni supporti predefiniti: al momento del montaggio, l'operatore estrae i supporti e il sistema si stringe sul cavo.



*Figura 2.21 - Giunto termorestringente*

È quindi di fondamentale importanza l'aspetto realizzativo per non incorrere in eventuali guasti successivi.

Il primo step da seguire è la connessione metallica del conduttore: i capicorda delle due pezzature vengono connessi tramite dei manicotti metallici.

Successivamente si procede con il controllo del campo elettrico: è una fase necessaria, dovuta al fatto che, in prossimità del taglio dello strato semiconduttivo esterno, il campo presenta dei valori molto elevati. È necessario provvedere ad una deflessione geometrica per ottenere un andamento regolare e uniformemente distribuito delle superfici equipotenziali, attenuando i gradienti.

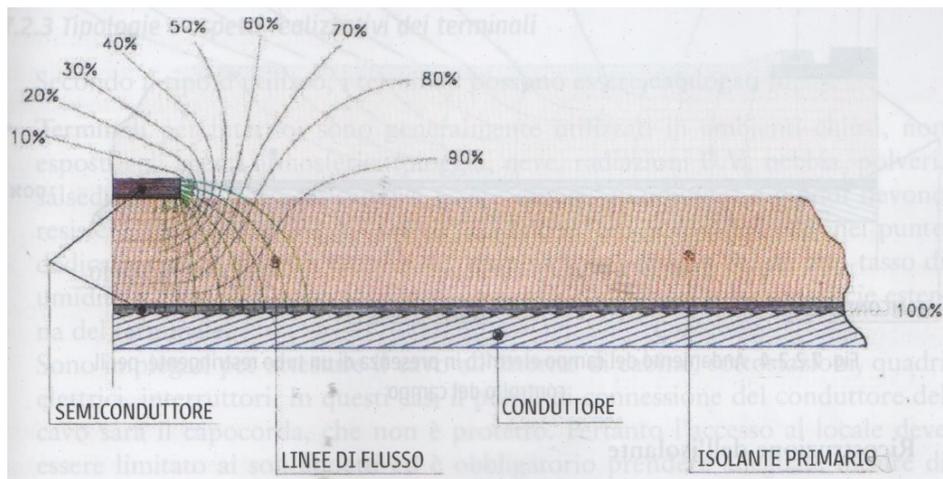


Figura 2.22 - Andamento del campo elettrico in prossimità del taglio dello strato semiconduttivo esterno

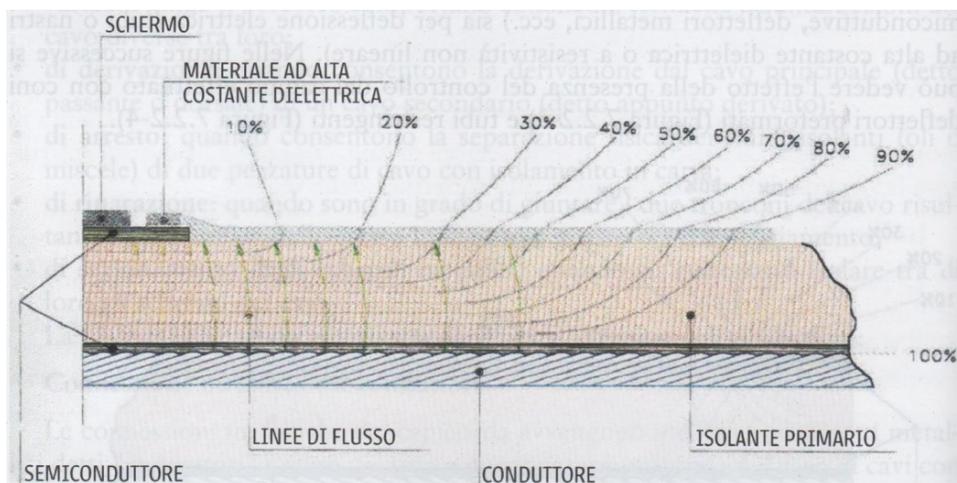


Figura 2.23 - Andamento del campo elettrico in presenza di un tubo restringente per il controllo del campo

Le fasi successive, molto complesse, sono il ripristino della continuità degli schermi e la ricostruzione dell'isolante.

Infine, dal momento che gran parte dei cavi MT sono interrati, il giunto deve essere rivestito da uno strato protettivo esterno in grado di proteggerlo da eventuali infiltrazioni di acqua o umidità (che portano alla formazione di arborescenze e alla scarica elettrica del componente).

Le stesse considerazioni devono essere applicate anche per le terminazioni dei cavi MT.

# Capitolo 3 - Tipologie di guasto nei cavi

Nella distribuzione dell'energia elettrica in MT i cavi vengono normalmente interrati: l'impatto ambientale è ampiamente minore rispetto a quello delle linee aeree e il cavo risulta essere protetto dalle condizioni ambientali estreme.

Tuttavia, molteplici sono i guasti a cui possono essere soggetti i cavi: è importante che vengano localizzati nel minor tempo possibile, al fine di ridurre al minimo il disservizio.

I guasti possono essere distinti in due grandi categorie, in base alla loro natura [16][17]:

- Guasti a bassa resistenza
- Guasti ad alta resistenza

## 3.1. Guasti a bassa resistenza

I guasti a bassa resistenza avvengono molto raramente nei cavi interrati: rientrano in questa categoria tutti quei guasti caratterizzati da una resistenza inferiore ai 100/200  $\Omega$ .

Il cortocircuito è un guasto a bassa resistenza: si verifica quando, a seguito di correnti elevatissime che percorrono il cavo, l'isolante si fonde e, di conseguenza, il conduttore e lo schermo metallico vengono in contatto tra loro.



*Figura 3.1- Tratto di cavo guasto a seguito di un cortocircuito*

Questa tipologia di guasto può verificarsi anche in un cavo multipolare: in tal caso è sufficiente che, per una qualsiasi causa, due o più conduttori vengano a contatto tra loro.

Il guasto derivante da un cortocircuito in un cavo può essere individuato misurando la resistenza tra conduttore e terra (nel caso di cavo unipolare) e tra coppie di conduttori (nel caso di cavo multipolare). In entrambi i casi, in presenza di cortocircuito, sullo strumento viene visualizzato un valore di resistenza pressoché nullo.

Allo stesso modo, è possibile localizzare il guasto con i metodi oggi in commercio. Il TDR (Time-Domain Reflectometer) è in grado di localizzare con buona precisione il punto di guasto, essendo un guasto a bassa resistenza. Tuttavia, la localizzazione precisa del cortocircuito non è possibile: l'applicazione di impulsi ad alta tensione non porta alla formazione di alcun arco elettrico e, quindi, nemmeno di un rumore rilevabile dallo strumento.

## **3.2 Guasti ad alta resistenza**

### **3.2.1 Circuito aperto**

Un guasto abbastanza comune nei cavi interrati è la divisione in due parti del conduttore di fase. L'interruzione del conduttore ha luogo quando:

- Un'elevata corrente di guasto brucia il conduttore e lo divide in due;
- Agenti esterni rompono in due parti il cavo (può succedere, ad esempio, durante uno scavo con una ruspa);
- Il cavo, per un difetto di costruzione del giunto, si sfilava da quest'ultimo;

Statisticamente si è visto che la suddivisione del conduttore in due parti, se dovuta ad un'elevata corrente di guasto, è molto più frequente nei conduttori di fase in alluminio; nei conduttori in rame, invece, ciò non viene quasi mai riscontrato.

La discontinuità che si crea nel conduttore di fase viene rilevata come un guasto ad elevata resistenza, di valore maggiore ai 200  $\Omega$ .



*Figura 3.2 – Guasto con separazione del conduttore in due parti*

Per capire se c'è stata la separazione del conduttore in due parti vengono collegati tra loro i conduttori di fase nella terminazione più lontana e posti a terra.

Si procede, in seguito, misurando la resistenza tra ciascun conduttore e terra: se un conduttore è spezzato a metà, lo strumento misura una resistenza  $R = \infty$ .

Per quanto riguarda la localizzazione del guasto, il TDR è in grado di rilevarlo anche se si tratta di un guasto ad alta resistenza. Conoscendo la lunghezza totale del cavo interrato dalla planimetria di progetto, infatti, se il TDR visualizza sul display una lunghezza inferiore è immediato dedurre che in quel punto è avvenuto il guasto.

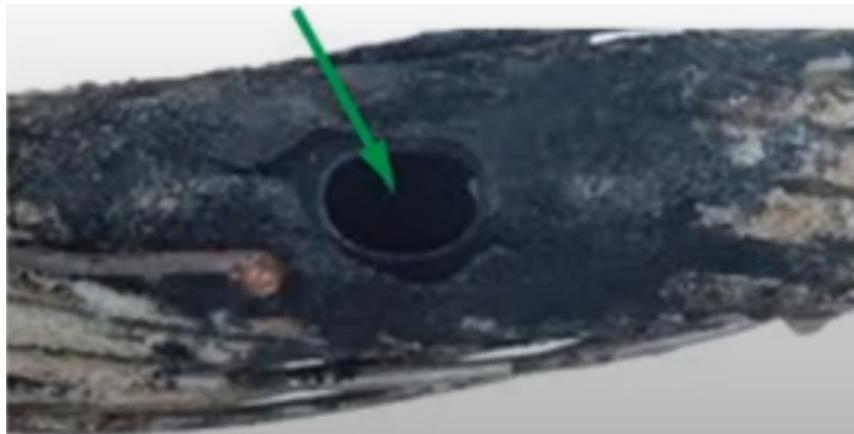
La localizzazione precisa, invece, risulta essere più complicata: la corrente di guasto, dell'ordine delle centinaia/migliaia di A, dopo aver bruciato il conduttore sul punto di guasto, torna all'alimentazione attraverso lo schermo metallico dando luogo ad una condizione denominata "burning back": si brucia un'ulteriore parte di isolante. Applicando impulsi ad alta tensione sul punto di guasto dal lato dell'alimentazione, a causa del gap sull'isolante troppo grande, non ha luogo alcuna scarica elettrica poiché la tensione da applicare risulta essere troppo elevata.

L'altro lato del cavo non risente del "burning back" per cui è possibile applicare gli impulsi ad alta tensione e ottenere la scarica elettrica e il relativo rumore che permette la localizzazione precisa del guasto.

### 3.2.2 Pinhole

Il “pinhole” è il guasto più comune nei cavi interrati eserciti in media tensione: statisticamente, 8 guasti su 10 rientrano in questa categoria.

Questo guasto è dovuto al processo naturale di invecchiamento del cavo; se il cavo, inoltre, entra in contatto con acqua o umidità, l’isolamento del cavo si degrada più velocemente fino alla condizione di breakdown che può dar luogo ad un buco di 7-8 mm di diametro. L’isolante, dunque, essendo molto lontano dalle sue condizioni di idealità ed omogeneità, non è più in grado di sopportare l’applicazione di gradienti elettrici di crescente intensità e il cavo va quindi fuori servizio. Il pinhole è un guasto ad elevata resistenza, dell’ordine delle centinaia di  $k\Omega$  o addirittura dei  $M\Omega$ .



*Figura 3.3 - Buco sull’isolante derivante dalla sua degradazione*

Applicando l’HIPOT test è possibile individuare la tensione che porta alla scarica elettrica sul buco nell’isolante: il cavo viene sottoposto ad una tensione DC crescente finché viene raggiunta la tensione di breakdown. Nell’istante che coincide con il breakdown, tramite degli appositi strumenti collegati al cavo, si rileva un aumento immediato della corrente di dispersione sullo schermo metallico e il contemporaneo brusco calo della tensione.

Essendo un guasto ad elevata resistenza, il TDR non è in grado di localizzarlo: la bassa tensione dei suoi impulsi, infatti, non consente di ottenere delle marcate riflessioni in corrispondenza del guasto.

Si procede quindi con l’Arc Reflection Method: si applica al cavo la tensione di breakdown individuata con l’HIPOT test provocando l’arco elettrico sul guasto.

Quest’ultimo, essendo una condizione temporanea di cortocircuito e quindi un guasto a bassa resistenza, può essere facilmente pre-localizzato dal TDR.

La localizzazione precisa è abbastanza semplice: è sufficiente applicare una tensione DC maggiore di quella di breakdown per provocare la scarica elettrica sul buco e il conseguente rumore udibile dallo strumento di localizzazione.

### **3.3 Il deterioramento dell’isolante**

Il deterioramento dell’isolante è un fenomeno naturale ed inevitabile nei cavi interrati. Gran parte dei cavi ha ormai più di trent’anni e risente di numerosi fattori che variano irreversibilmente le proprietà del materiale isolante portando al suo cedimento e al conseguente guasto nel cavo.

La degradazione dell’isolante inizia solitamente nelle imperfezioni del materiale, come i vacuoli e gli interstizi, formatesi durante il processo di costruzione o di installazione del cavo: interagendo con i fattori sopracitati, il deterioramento si propaga via via nell’isolante. La variazione delle proprietà dell’isolante può avvenire in parecchi anni oppure semplicemente in un paio di giorni in base alla tipologia dei meccanismi che portano all’invecchiamento del cavo.

In condizioni normali, i fattori da stress elettrico sono i più impattanti sulla degradazione del cavo: l’isolante, infatti, può cedere a causa delle scariche parziali e dei meccanismi di “treeing” aggravati dalla presenza di acqua o umidità.

È stato provato infatti che la maggior parte dei fattori che provocano il deterioramento del polietilene reticolato, o XLPE, è causa proprio dei meccanismi di “treeing”, così chiamati perché si manifestano sull’isolante con una forma che ricorda quella di un albero.

Nella Tabella 3.1 sono riportati i fattori e i relativi meccanismi che portano al deterioramento dell’isolante [18].

	<b>Fattori di invecchiamento</b>	<b>Meccanismi di invecchiamento</b>
<b>Termici</b>	Alta temperatura	Reazioni chimiche, espansione termica, diffusione, fusione dell'isolante
	Bassa temperatura	Fessurazione, contrazione termica
<b>Elettrici</b>	Tensione: AC, DC, impulsi	Scariche parziali, electrical e water treeing, perdite dielettriche
	Corrente	Surriscaldamento
<b>Meccanici</b>	Flessione ciclica, vibrazioni, fatica, compressione, trazione, sforzo di taglio	Cedimento dei materiali, fessurazione, rottura
<b>Ambientali</b>	Acqua, umidità, contaminazioni con liquidi o gas	Electrical e water treeing, corrosione, perdite dielettriche
	Radiazioni	Aumento delle reazioni chimiche

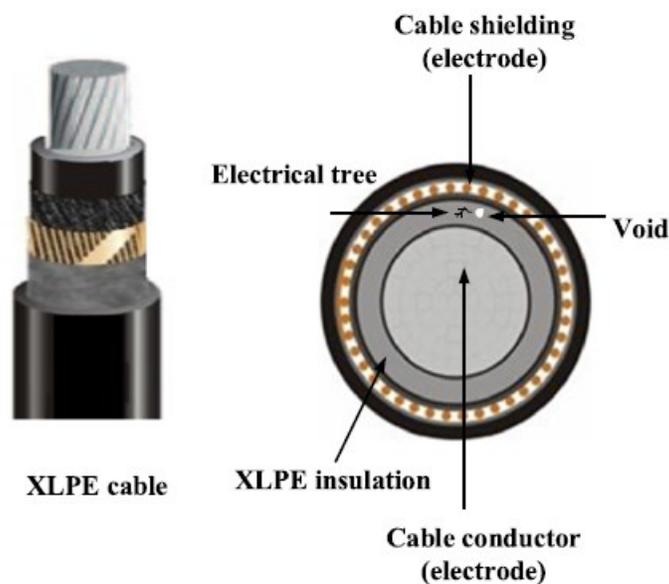
*Tab. 3.1 - Fattori e meccanismi di invecchiamento dell'isolante di un cavo*

I fattori che portano alla degradazione dell'isolamento sono quattro: termici (alta e bassa temperatura), elettrici (tensioni AC, DC, impulsi e correnti), meccanici (vibrazioni, compressioni, ecc.) e ambientali (in particolare, acqua, umidità e contaminazioni esterne).

Il processo naturale di invecchiamento dell'isolante, a seguito dei meccanismi riportati nella Tabella, è in realtà velocizzato quando il cavo viene a contatto con terreno umido o bagnato: le infiltrazioni di acqua e di umidità o le contaminazioni da liquidi e gas possono dar luogo a fenomeni denominati “electrical treeing” (arborescenze elettriche) o “water treeing” (alberi d'acqua), deleteri per la tenuta dell'isolamento.

I cavi di media tensione che vengono oggi utilizzati per la posa interrata sono in grado di resistere alla presenza occasionale di acqua, ma non permanente [19].

I cavi isolati in XLPE, di maggior impiego per la media tensione, risentono della presenza di alberi elettrici (o alberi di scarica) che si formano a seguito di particolari fenomeni denominati “scariche parziali”. Infatti, a causa delle sollecitazioni sopraelencate, negli interstizi tra conduttore e isolante o tra isolante e schermo metallico, possono formarsi dei vacuoli o bolle d’aria. Poiché l’aria ha una costante dielettrica minore rispetto ai materiali termoplastici di cui è composto l’isolante, in questi vacuoli si ha un’intensificazione del campo elettrico.



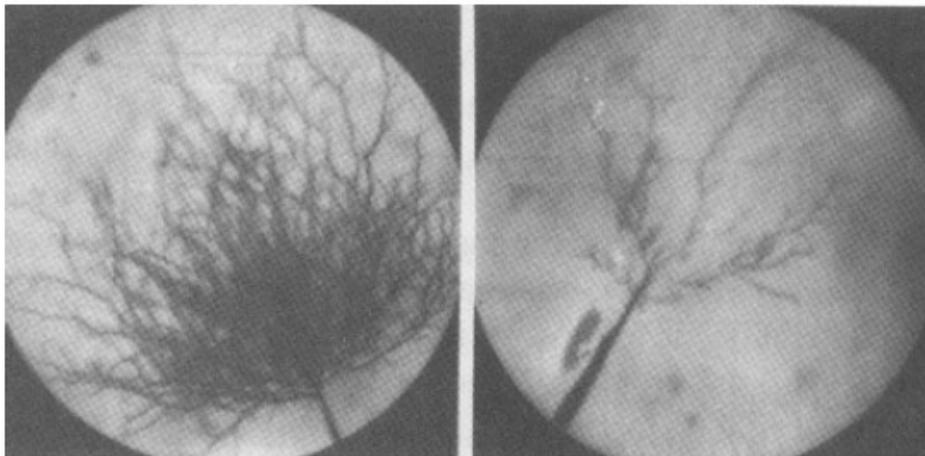
*Figura 3.4 - Presenza di un vacuolo d’aria sull’isolamento del cavo XLPE*

Quando il campo elettrico raggiunge valori più elevati, gli ioni presenti nella bolla d’aria vengono accelerati e ionizzano per collisione altre particelle d’aria. Si riduce man mano la rigidità dielettrica dell’aria e, quando essa risulta essere inferiore al valore del campo elettrico applicato, si ha la scarica elettrica parziale [20]. Perché abbia inizio una scarica parziale, la dimensione della cavità su cui essa si sviluppa deve raggiungere un limite critico che, nel caso dei cavi isolati in XLPE, è di 0,03 mm per una cavità sferica riempita d’aria.

La tensione d’innesco della scarica parziale dipende da molteplici fattori: dalla dimensione della cavità, dallo spessore e dal tipo di isolante e dalla sezione del conduttore.

Maggiore è la grandezza della cavità, minore è la tensione d'innescò per avere la scarica parziale; se le scariche parziali si autosostengono con la tensione nominale del sistema, allora evolvono formando gli alberi elettrici, meglio conosciuti come "electrical-trees": il campo elettrico perché abbia inizio la loro formazione è di 150 kV/mm [21].

Gli alberi elettrici non sono altro che canali vuoti e permanenti che si formano molto velocemente, nell'arco di poche settimane, nell'isolante; la loro forma tipica è la seguente:



*Figura 3.5 - Andamento tipico degli alberi elettrici in un isolante XLPE*

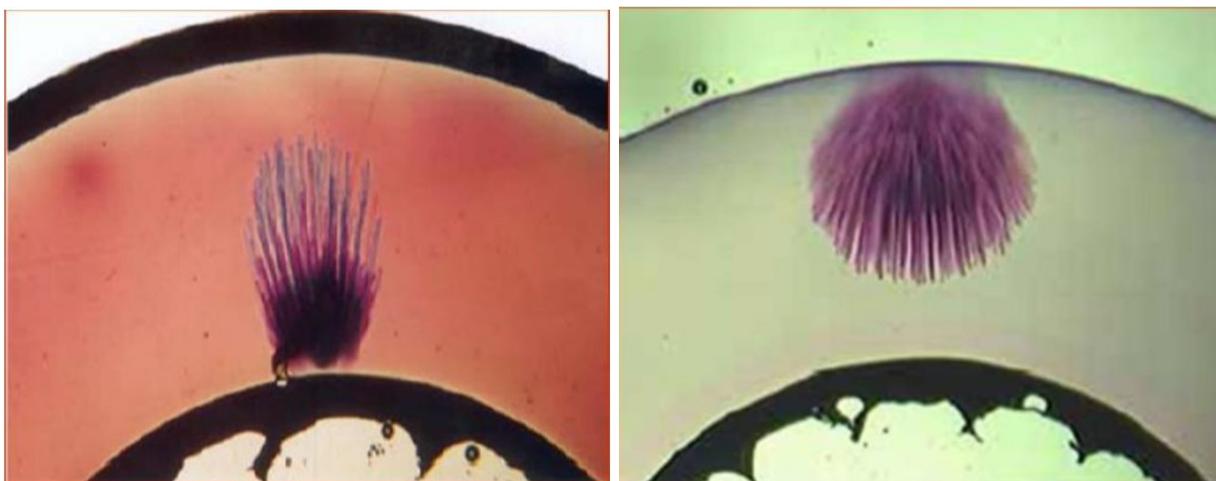
Ovviamente l'attività ripetuta delle scariche parziali sulla cavità può portare ad alberi elettrici sempre più grandi e al conseguente collasso totale dell'isolante, dando vita al guasto ad alta impedenza denominato "pinhole".

L'altro fenomeno che porta alla degradazione dell'isolante e al suo breakdown è la formazione degli alberi d'acqua, o "water trees". Quando il cavo è a contatto per un periodo prolungato con un terreno molto umido, tipicamente con valori di umidità maggiori del 65% [22], può avere origine il processo di formazione degli alberi d'acqua.

Come nel caso degli alberi elettrici, il fenomeno ha origine a causa della presenza di piccoli vacuoli o cavità nella superficie di separazione tra l'isolante e lo schermo semiconduttivo esterno: la presenza di queste impurità porta ad un'intensificazione del campo elettrico e alla successiva formazione di piccole microfratture ellissoidali sull'isolante [23].

L'umidità riempie le microfessure causando un ulteriore aumento del campo elettrico in questa regione di isolante e una conseguente crescita delle diramazioni dell'albero d'acqua, fino a che esse non toccano il conduttore dando vita ad un guasto ad alta impedenza.

Gli alberi d'acqua si propagano lentamente all'interno dell'isolante (6-15 anni) e non producono scariche parziali: per questo motivo, è difficile rilevare la loro presenza con i metodi in commercio. Quando gli alberi d'acqua, però, si evolvono in alberi elettrici, ad esempio a causa di una scarica parziale prolungata in una cavità che si forma nel water tree, il breakdown dell'isolante avviene in brevissimo tempo.



*Figura 3.6 - Fenomeno di water-tree nell'isolante di un cavo*

### **3.4 Il monitoraggio delle scariche parziali**

Le scariche parziali sono la prima indicazione che il materiale di cui è composto l'isolante del cavo si sta deteriorando: è importante quindi monitorarle per prevenire un eventuale guasto [24]. Le scariche parziali hanno luogo in ogni sistema isolante, che sia solido, liquido o gassoso, quando il valore del campo elettrico in una cavità o vacuolo supera il valore di breakdown del campo elettrico del materiale isolante.

Possono essere classificate in tre tipologie:

- Scariche interne, avvengono solitamente nelle cavità all'interno di un isolante solido e si formano a seguito del processo di electrical-treeing;
- Scariche superficiali, si verificano sulla superficie dell'isolante e generalmente provocano danni all'isolamento solo superficialmente; la loro causa è da ricercarsi nelle contaminazioni superficiali, come la sporcizia, e nella presenza di umidità;
- Scariche a corona, si verificano nell'aria o nel gas che circondano un conduttore: si manifestano quando il campo elettrico locale supera la rigidità dielettrica dell'aria o del gas circostante.

La distribuzione del campo elettrico all'interno di un cavo è rappresentata nella seguente Figura:

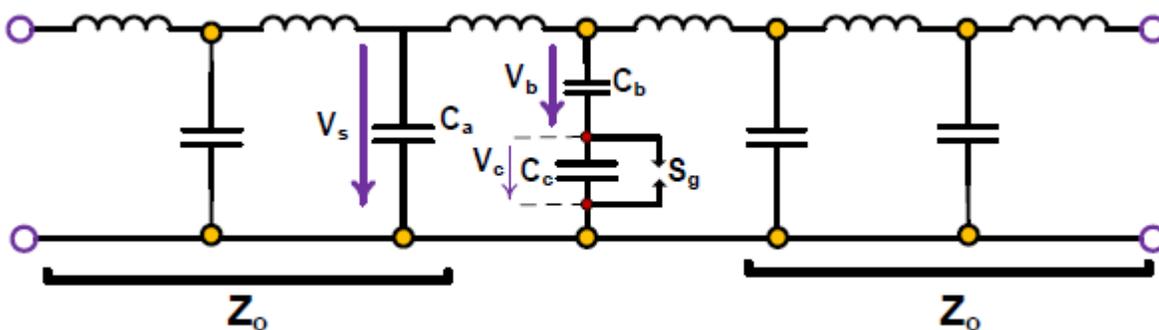


Figura 3.7 - Circuito equivalente di una scarica parziale in un cavo

La scarica parziale ha origine quando viene superata la tensione di breakdown del mezzo dielettrico all'interno del vacuolo (solitamente aria): in quell'istante, la tensione crolla improvvisamente estinguendo il processo di scarica. Tuttavia, la capacità del vacuolo si carica nuovamente e il processo di scarica parziale si ripete.

Nella Figura 3.7,  $C_a$  rappresenta l'elemento che non contiene impurità o difetti,  $C_b$  l'elemento in serie con i difetti del vacuolo,  $C_c$  la capacità della cavità sull'isolante e, infine,  $S_g$  rappresenta la scarica parziale che avviene sul vacuolo.

Se la tensione applicata è costante, le scariche parziali non hanno più luogo perché i gradienti di campo elettrico sul vacuolo sono costanti; se, invece, la tensione applicata aumenta, la scarica

parziale si ripete ad ogni ciclo perché si vengono a creare nuovi gradienti di campo elettrico all'interno della cavità.

Ci sono parecchie tecniche che possono essere utilizzate per monitorare le scariche parziali, sia off-line che on-line [24][25][26]. Mentre le tecnologie off-line richiedono che il cavo venga de-energizzato e quindi non sono in grado di monitorare in tempo reale le scariche parziali, nel caso delle tecnologie on-line ciò è possibile: per questo motivo, queste ultime sono di gran lunga preferibili alle prime.

I sensori utilizzati per il monitoraggio delle scariche parziali on-line sono:

- HFCT (High Frequency Current Transformer): viene spesso collocato in corrispondenza dei giunti o delle terminazioni dei cavi collegati a terra. Quando avviene una scarica parziale, l'impulso che si crea si chiude a terra tramite lo schermo metallico del cavo. Tra lo schermo e l'HFCT si crea un accoppiamento induttivo per cui viene indotta sullo strumento una tensione proporzionale all'impulso prodotto dalla scarica parziale: questa tensione è inviata ad un'unità centrale di elaborazione dati che quantifica l'ampiezza dell'impulso ed esamina il dato rilevato dal sensore.
- TEV (Transient Earth Voltage): è un sensore capacitivo che si basa sul principio dell'accumulo di carica che si viene a creare sulla parte metallica delle terminazioni delle linee in cavo ogni qual volta avviene una scarica parziale.

Questo sensore misura quindi la sovratensione dovuta alla scarica parziale tra la parte metallica e terra: si tratta di transitori di tensione dell'ordine dei mV, proporzionali all'ampiezza della scarica parziale.

Il processo per monitorare e localizzare le scariche parziali deve rispettare i seguenti step:

- Filtraggio del rumore: è la parte essenziale dell'elaborazione dei dati sulla scarica parziale. Siccome l'ampiezza dell'impulso di una scarica parziale è dell'ordine dei pC, può essere paragonata alle interferenze elettromagnetiche provenienti da dispositivi elettronici presenti vicino al sistema di rilevamento, da onde radio, ecc.

Il rischio è quindi che l'interferenza elettromagnetica possa nascondere la scarica parziale e non renderla localizzabile, per cui il filtraggio di eventuali interferenze risulta essere la parte principale di tutto il processo.

- L'identificazione lungo la linea dei punti in cui le scariche parziali hanno avuto luogo. Parecchi metodi sono utilizzati per identificare e riconoscere il punto preciso in cui si hanno le scariche parziali: uno di questi si basa sul principio della propagazione degli impulsi lungo la linea.

Se al tempo  $t_0$  ha origine un impulso a seguito di una scarica parziale, esso si propaga dal punto  $X$  verso entrambe le estremità della linea.

Al tempo  $t_1$ , l'impulso raggiunge il sensore  $S_1$ : viene in quell'istante attivato un contatore che misura il tempo che intercorre tra la ricezione da parte di  $S_1$  dell'impulso e la ricezione da parte di  $S_2$  in un tempo ovviamente maggiore ( $t_2 > t_1$ ).

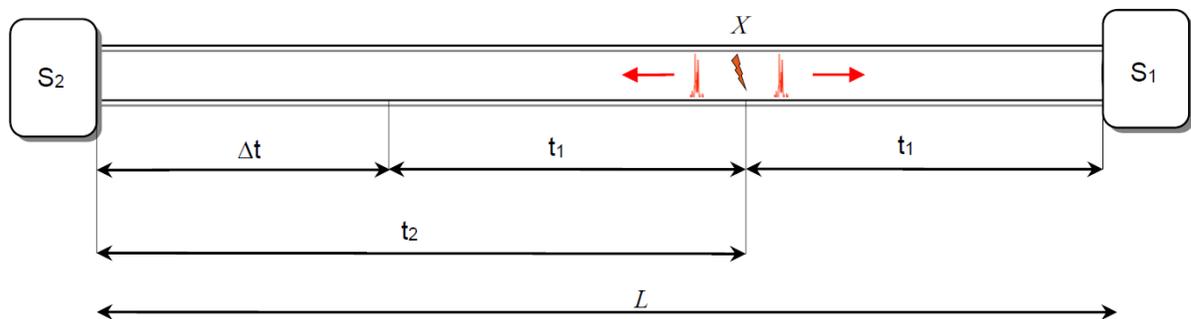


Figura 3.8 - Propagazione dell'impulso sulla linea dovuto a scarica parziale nel punto  $X$

Conoscendo la velocità di propagazione dell'impulso nel cavo  $v$ , si può scrivere:

$$t_2 = t_1 + \Delta t \text{ [ns]}$$

da cui è quindi possibile determinare il punto in cui la scarica parziale ha avuto luogo:

$$X = \frac{L - v\Delta t}{2}$$

È preferibile disporre più sensori in modo distribuito lungo la linea in cavo, di modo da evitare l'attenuazione degli impulsi dovuti, ad esempio, alla presenza di giunti; in tal caso, la relazione che intercorre tra due sensori adiacenti è sempre quella sopraccitata.

# Capitolo 4 - Metodi per la localizzazione del guasto nei cavi MT interrati

I cavi interrati sono soggetti durante il loro funzionamento a numerosi guasti, come spiegato nel precedente Capitolo. La localizzazione dei guasti nei cavi deve essere la più rapida e precisa possibile, al fine di garantire un'immediata riparazione e rialimentazione: un qualunque disservizio, infatti, comporta anche una certa ricaduta economica.

Per questo motivo, ogniqualvolta un cavo interrato in MT è soggetto ad un guasto, è necessario seguire una procedura ben precisa nel minor tempo possibile:

- Analisi del tipo di guasto, per determinare le sue caratteristiche;
- Pre-localizzazione, per rilevare la posizione del guasto con la tolleranza di qualche metro;
- Localizzazione precisa del punto di guasto, per individuarne esattamente la posizione limitando così il più possibile i tempi di scavo e di riparazione;
- Sostituzione del tratto guasto e successiva ri-energizzazione del cavo.

## 4.1 Analisi del tipo di guasto

L'analisi del tipo di guasto consente di determinarne le caratteristiche e, di conseguenza, di stabilire la procedura e i metodi da adottare per la successiva pre-localizzazione.

La prima cosa da fare è ottenere il maggior numero di informazioni possibili sul cavo in esame: capire la tipologia del cavo, il suo isolamento, la sezione del conduttore e il materiale di cui è composto, la lunghezza totale della linea interrata e l'eventuale presenza di giunti di collegamento tra le pezzature.

Una volta ottenute tutte le informazioni necessarie, si può procedere con l'analisi del tipo di guasto.

#### 4.1.1 Misura della resistenza di isolamento del cavo

La misura della resistenza ohmica di isolamento consente di classificare elettricamente la tipologia del guasto che ha interessato il cavo. Essa si basa sulla legge di Ohm: applicando una tensione continua di valore conosciuto (fino a 1000 V), si misura la corrente di dispersione circolante nell'isolante e si determina quindi il valore della sua resistenza [27].

La qualità dell'isolamento si modifica durante la vita utile del cavo a causa delle sollecitazioni elettriche, meccaniche, chimiche e termiche a cui i cavi sono sottoposti; questa alterazione riduce la resistività elettrica dell'isolante portando ad un aumento delle correnti di dispersione. Nei cavi MT sani, la resistenza dell'isolamento del cavo presenta valori molto elevati, nell'ordine dei G $\Omega$ : dal valore di questa misura, considerata non distruttiva, è possibile quindi fare un'interpretazione del guasto che ha interessato il cavo.

È importante specificare che durante l'applicazione della tensione continua, la corrente circolante di dispersione e il valore della resistenza di isolamento risentono dell'influenza di due fattori: la temperatura e l'umidità.

Il tasso di umidità influenza l'isolamento in base al livello di contaminazione delle superfici isolanti; non si deve perciò effettuare questa misura se la temperatura è inferiore a quella del punto di rugiada. Per quanto riguarda la temperatura, invece, è necessario correggere il valore della resistenza di isolamento portandolo al valore della temperatura di riferimento dal momento che un aumento di 10 °C dimezza il valore della resistenza, mentre una diminuzione di 10 °C ne raddoppia il valore [28].

Tenendo conto quindi che la resistenza d'isolamento di un cavo MT sano è dell'ordine dei G $\Omega$ , viene normalmente fatta la seguente distinzione:

- Guasti a bassa resistenza: se la resistenza d'isolamento misura un valore inferiore a 200  $\Omega$ ;
- Guasti ad alta resistenza: se la resistenza d'isolamento misura un valore superiore ai 200  $\Omega$ ;

La misura della resistenza d'isolamento viene eseguita con un apposito strumento denominato Megaohmetro. Per i cavi unipolari si misura la resistenza tra conduttore e schermo metallico collegato a terra, mentre per i cavi tripolari la misura va fatta tra fase e fase per ognuna delle tre coppie di cavi [16].

Si parla di guasto per cortocircuito quando il Megaohmetro rileva una resistenza pari a circa  $0 \Omega$ : ciò avviene quando il conduttore e lo schermo vengono a contatto tra loro.

Il cavo, invece, è soggetto ad un circuito aperto se la misura della resistenza fornisce il valore  $\infty$ .

Con una semplice misura di resistenza è quindi possibile farsi un'idea della tipologia di guasto che ha interessato il cavo e, in base alla sua natura, agire di conseguenza con il metodo di pre-localizzazione adeguato.

#### **4.1.2 High potential test (HIPOT test)**

Se il cavo presenta un guasto ad alta resistenza, risulta utile capire qual è la tensione che porta al breakdown del cavo. L'HIPOT test prevede l'applicazione di una tensione DC tramite un generatore di impulsi: il cavo e il suo isolamento non sono in grado di reggere la tensione applicata e si ha quindi la formazione dell'arco elettrico sul punto di guasto [17].

Al cavo viene applicata una tensione DC via via crescente per un periodo di 10 secondi continuativi: la tensione di breakdown che porta alla scarica elettrica deve essere annotata perché risulta essenziale per gli step successivi di localizzazione e pre-localizzazione.

Analizzando i guasti ad alta resistenza presentati nel Capitolo 3:

- Nel caso del guasto denominato “pinhole”, l'HIPOT test è essenziale per determinare la tensione di breakdown del buco nell'isolante. Osservando lo strumento di misura applicato al cavo, ci si accorge che, in corrispondenza della tensione di breakdown, la tensione applicata cala bruscamente mentre cresce la corrente di dispersione circolante sullo schermo metallico del cavo.
- Nel caso invece di un “circuito aperto”, l'applicazione dell'HIPOT test è un po' più complessa. Come spiegato nel Capitolo 3, infatti, il cavo risente del fenomeno del burning back per cui il gap sull'isolante diventa talmente grande da richiedere una tensione troppo elevata perché avvenga la scarica elettrica. Se è accessibile l'altra estremità del cavo interrotto, invece, è possibile applicare l'HIPOT test: lato carico, infatti, il cavo non risente del burning back e la tensione per avere la scarica elettrica è di un valore ragionevole.

Nel caso del cortocircuito invece, data la natura del guasto, non è possibile la formazione di un arco elettrico e quindi non è applicabile l'HIPOT test.

#### 4.1.3 Verifica TDR della lunghezza del cavo

L'ultima analisi che viene effettuata prima della pre-localizzazione del guasto richiede l'uso del Time Domain Reflectometer, analizzato in dettaglio nel prossimo paragrafo.

L'obiettivo di questo step è di verificare se il dato della lunghezza del cavo fornito dal TDR coincide con i dati della planimetria: in caso contrario, si è in presenza o di un cortocircuito o di un circuito aperto [17].

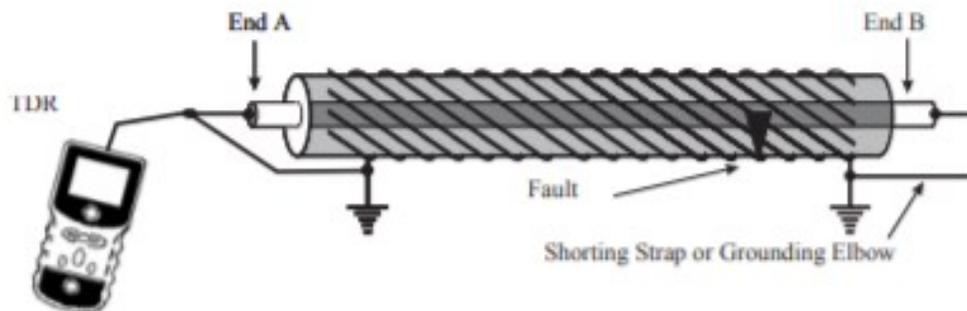


Figura 4.1 - TDR test per la continuità del cavo

Dopo aver cortocircuitato conduttore e schermo metallico ad un'estremità del cavo, dall'altro lato viene collegato lo strumento TDR come in Figura 4.1, tra conduttore di fase e schermo metallico. Se lo strumento rileva un cortocircuito alla distanza coincidente con il dato della lunghezza del cavo fornito dalla planimetria, allora non vi sono guasti e sia il conduttore sia lo schermo sono continui.

Se, invece, il TDR indica una lunghezza del cavo inferiore a quella prevista dalla planimetria, il conduttore o lo schermo metallico sono interrotti in quel punto: si è in presenza, quindi, di un circuito aperto. Se, infine, in un qualsiasi punto del cavo sul TDR si osserva una riflessione verso il basso e la resistenza misurata è inferiore a  $200 \Omega$ , allora in tal caso viene individuato un cortocircuito tra conduttore e schermo metallico.

## 4.2 Tecniche per la pre-localizzazione del guasto

Dopo aver eseguito l'analisi del tipo di guasto, è essenziale disporre di un metodo di pre-localizzazione del guasto rapido, efficiente e preciso. Una buona pre-localizzazione, infatti, consente di determinare la posizione del guasto con un errore di qualche punto percentuale e di ridurre a qualche minuto il tempo della localizzazione precisa.

### 4.2.1 Time Domain Reflectometry - TDR

Il metodo TDR è il metodo di misurazione più affermato e utilizzato per stabilire la lunghezza totale di un cavo, la posizione dei giunti e la distanza dai guasti a bassa resistenza o dalle interruzioni dei cavi.

La tecnica del Time Domain Reflectometry è stata sviluppata negli anni '40: il principio di funzionamento è simile a quello del RADAR (RADio Detection And Ranging) usato negli aeroporti per determinare la distanza e la velocità degli aerei in volo rispetto all'antenna che trasmette le onde radio. Normalmente, una parte delle onde radio trasmesse viene riflessa verso l'antenna quando raggiunge l'aereo o un altro velivolo; un timer misura il tempo che intercorre tra la trasmissione dell'impulso dell'onda radio e la ricezione da parte dell'antenna dell'impulso riflesso dall'aereo. Per determinare, quindi, la distanza dall'aereo, il tempo totale viene dimezzato e poi moltiplicato per la velocità di propagazione dell'impulso nell'aria.

Allo stesso modo, un impulso caratterizzato da un rapido fronte di salita viene trasmesso ad un'estremità del cavo: ogni variazione di impedenza rilevata rispetto all'impedenza caratteristica del cavo si traduce in una parziale riflessione dell'impulso [17][29][30].

La componente riflessa dell'impulso può essere positiva se l'impedenza misurata in quel punto è maggiore dell'impedenza caratteristica del cavo, negativa invece se è inferiore. L'ampiezza della riflessione nel punto di discontinuità è determinata dal coefficiente di riflessione  $\rho$ :

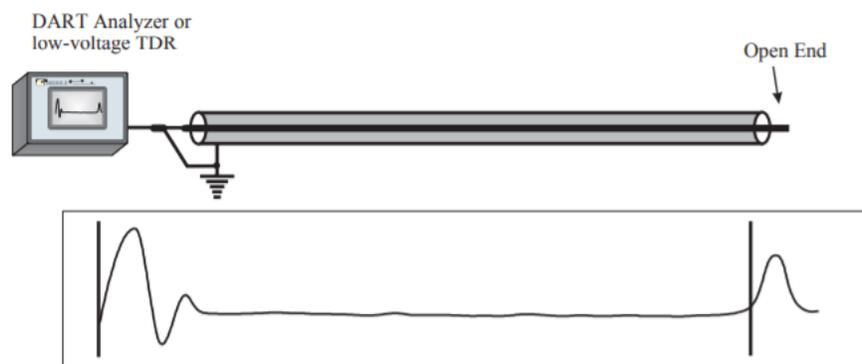
$$\rho = \frac{Z_d - Z_0}{Z_d + Z_0}$$

Dove:  $Z_d$  è il valore dell'impedenza misurata nel punto di discontinuità

$Z_0$  è l'impedenza caratteristica del cavo

Il valore di  $\rho$  varia da 1 (in caso di circuito aperto) a -1 (nel caso di cortocircuito). Un valore pari a 0 indica che non vi è alcuna riflessione, ovvero che l'impedenza è la medesima di quella caratteristica del cavo.

Questa tecnologia viene applicata off-line, ovvero quando il cavo è de-energizzato: un impulso a bassa tensione, solitamente inferiore a 60 V e con un rapido fronte di salita, viene trasmesso ad alta frequenza tra il conduttore e lo schermo metallico del cavo. Il display a cristalli liquidi del TDR opera come un oscilloscopio e consente di visualizzare qualsiasi discontinuità rispetto all'impedenza caratteristica del cavo.



*Figura 4.2 - TDR applicato ad un cavo sano*

Nella precedente Figura 4.2 si può notare la traccia che viene visualizzata sul display dello strumento nel caso di un cavo sano: non vi è alcuna riflessione fino alla fine del cavo dove, invece, gli impulsi incontrano l'alta resistenza coincidente con l'estremità aperta della linea.

L'impulso iniziale e tutte le riflessioni vengono visualizzati nel display del TDR in funzione del tempo; per calcolare la distanza del guasto dall'estremità a cui è collegato il TDR è essenziale conoscere la velocità di propagazione degli impulsi. Quest'ultima non è altro che la velocità a cui viaggiano gli impulsi trasmessi dal TDR sul cavo; essa dipende dalla tipologia e dallo spessore

dell'isolante, dalla sezione del conduttore, dall'eventuale grado di deterioramento dell'isolante e degli schermi metallici, dalle condizioni del terreno circostante ecc.

Poiché le variabili da cui questo valore dipende sono molte, è praticamente impossibile definirlo in modo esatto; solitamente i costruttori forniscono dei valori standard in m/μs per le tipologie di materiali isolanti più comuni:

Cable Type	Dielectric/insulation Type	Velocity Factor	Propagation Factor	VoP(%)	V (m/μs)
Power	Impregnated Paper / PIC	0.5 to	2 to 1.75	50	150
		0.57		57	171
Power	PVC	0.51 to	1.97 to 1.715	51	152
		.58		58	175
Power	Paper Oil Filled	0.72 to	1.38 to 1.19	72	216
		0.84		84	252
Power	PE	0.46 to	1.72 to 2.15	46	139.2
		0.58		58	174
Power	XLPE	0.54 to	1.92 to 1.61	54	156
		0.62		62	186
Power	EPR	0.45 to	2.22 to 1.75	45	135
		0.57		57	171

Tab. 4.1 - Velocità di propagazione per tipologia di isolamento

Oltre alla velocità di propagazione V, in tabella vengono forniti altri importanti valori:

- il fattore di velocità, definito come rapporto tra la velocità dell'impulso TDR nel cavo e la velocità della luce nel vuoto;
- il fattore di propagazione PF, ovvero il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto e la velocità dell'impulso TDR nel cavo;

- la velocità in percentuale VoP%, ottenuta moltiplicando il fattore di velocità per 100. Nel caso dei cavi isolati in XLPE, la velocità di propagazione dell'impulso TDR nel cavo è pari ad un valore compreso tra 54% e 62% della velocità della luce nel vuoto.

A questo punto è possibile determinare la distanza del guasto dal TDR (posto ad un'estremità del cavo) tenendo conto che l'impulso viaggia fino al guasto e poi torna indietro, per cui il tempo deve essere dimezzato:

$$d(x) = \frac{t}{2} \cdot V \quad [\text{m}]$$

Mentre l'ampiezza dell'impulso fornito dal TDR al cavo varia da 10 a 60 V, la sua larghezza dipende invece dalla lunghezza della linea. Solitamente la larghezza degli impulsi varia tra 80 ns e 10  $\mu\text{s}$ : più è lunga la linea, più largo deve essere l'impulso in modo tale da fornire al cavo un'energia sufficiente per visualizzare la riflessione all'estremità lontana. Tuttavia, più largo è l'impulso, più bassa è la risoluzione e le piccole variazioni di impedenza sul cavo risultano difficilmente visibili. È necessario quindi provvedere ad un giusto compromesso tra risoluzione e larghezza dell'impulso.

Gli impulsi forniti dal TDR al cavo risentono di due fattori di distorsione: l'attenuazione e la dispersione. L'attenuazione dell'impulso è dovuta alla perdita di energia derivante dalla sua propagazione attraverso la resistenza del conduttore, gli schermi semiconduttivi e lo schermo metallico; l'energia persa è proporzionale alla lunghezza del cavo e alla frequenza dell'impulso stesso. Di conseguenza, un impulso ad alta frequenza è in grado di viaggiare sul cavo solo per distanze corte, venendo poi attenuato; per questo motivo, più un cavo è lungo, minore deve essere la frequenza degli impulsi forniti dal TDR.

L'impulso del TDR è composto da frequenze diverse che viaggiano sul cavo a velocità differenti: esse causano una distorsione denominata dispersione.

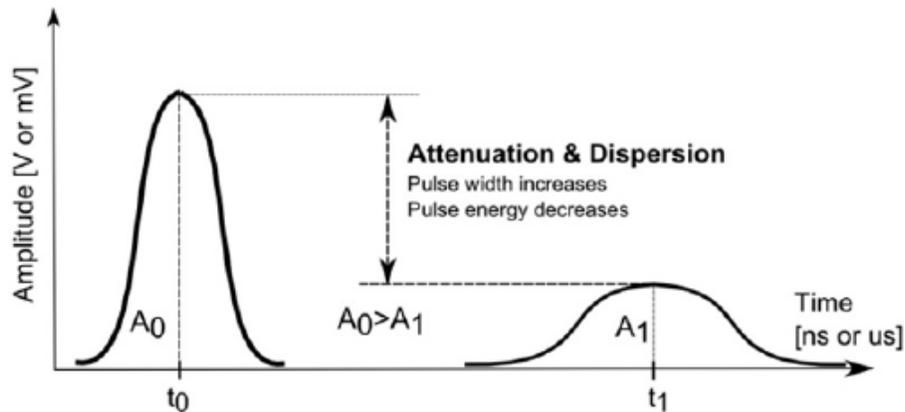


Figura 4.3 - Impulso del TDR soggetto ad attenuazione e dispersione

Nella precedente Figura 4.3, viene raffigurato un impulso che risente dell'attenuazione e della dispersione: l'ampiezza è inferiore, cresce la larghezza dell'impulso e viene ridotta di molto la sua energia.

Il TDR è un eccellente e affidabile strumento per la pre-localizzazione di giunti e guasti a bassa resistenza (inferiori a 200  $\Omega$ ) come i cortocircuiti tra conduttore e schermo metallico o tra due conduttori di un cavo multipolare. Questa tecnologia non è in grado però di rilevare alcuna riflessione in caso di guasto ad alta resistenza: deve perciò essere abbinata ad altri metodi introdotti nei successivi paragrafi. Tuttavia, tra i guasti ad alta resistenza i circuiti aperti sono un'eccezione: il TDR è in grado di visualizzare una riflessione positiva in corrispondenza delle interruzioni nei cavi.

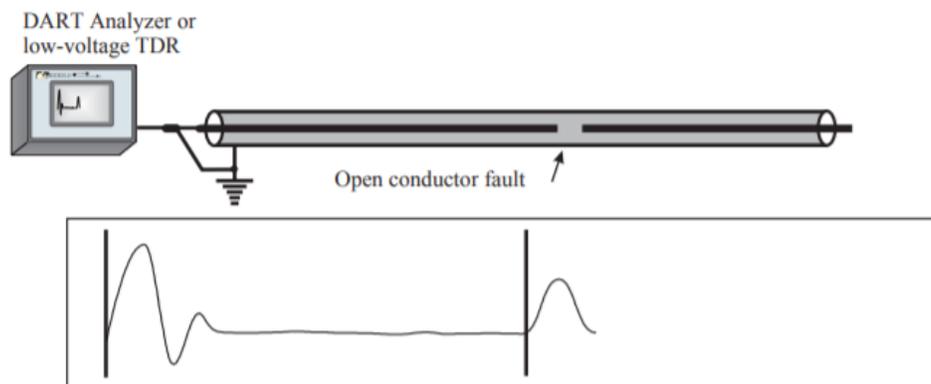


Figura 4.4 - Circuito aperto rilevato dal TDR

Per calcolare in modo accurato la distanza della riflessione dallo strumento, è necessario posizionare correttamente il cursore sulla traccia fornita nel display del TDR.

Il cursore di sinistra deve essere posizionato appena a sinistra della prima riflessione verso l'alto: in tal caso risulta essere in corrispondenza dei terminali d'uscita dello strumento. Il cursore di destra, invece, deve essere sempre posizionato appena a sinistra della riflessione positiva o negativa che rappresenta il guasto: la posizione corretta è nel punto in cui la riflessione lascia la linea orizzontale del cavo. In questo modo si è sicuri che la misura di pre-localizzazione del guasto risulterà la più precisa possibile.

Di seguito sono visibili le tipiche forme d'onda visualizzabili sullo strumento:

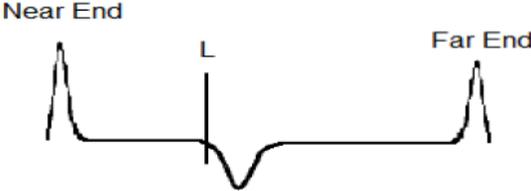
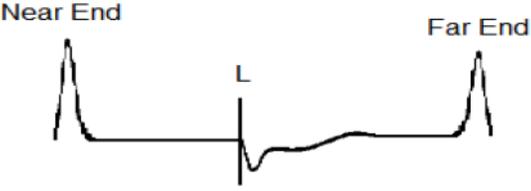
Case	TDR
Uniform cable system with no joints.	
Uniform cable system with no joints and shorted conductor at distance L from Near End.	
Cable system with a joint at a distance L from Near End.	
Cable system with a wet joint at a distance L from Near End.	

Figura 4.5 - Riflessioni rilevate dal TDR: cavo sano, cortocircuito, cavo con giunto, cavo con giunto bagnato

#### 4.2.2 Arc Reflection Method – ARM

L'Arc Reflection Method è la tecnologia di pre-localizzazione più avanzata e accurata attualmente in commercio. L'80% dei guasti che interessano un cavo sono ad alta resistenza: questi guasti, però, non vengono rilevati dagli impulsi a bassa tensione del TDR.

Si utilizza quindi l'ARM che combina un generatore di impulsi ad alta tensione DC (denominato anche “thumper”) e appunto il TDR [31]. Il principio è il seguente: il generatore di impulsi ad alta tensione provoca la formazione dell'arco elettrico sul guasto ad alta resistenza che diventa un cortocircuito temporaneo, rilevabile quindi dal Time Domain Reflectometer.

Lo schema di principio è il seguente:

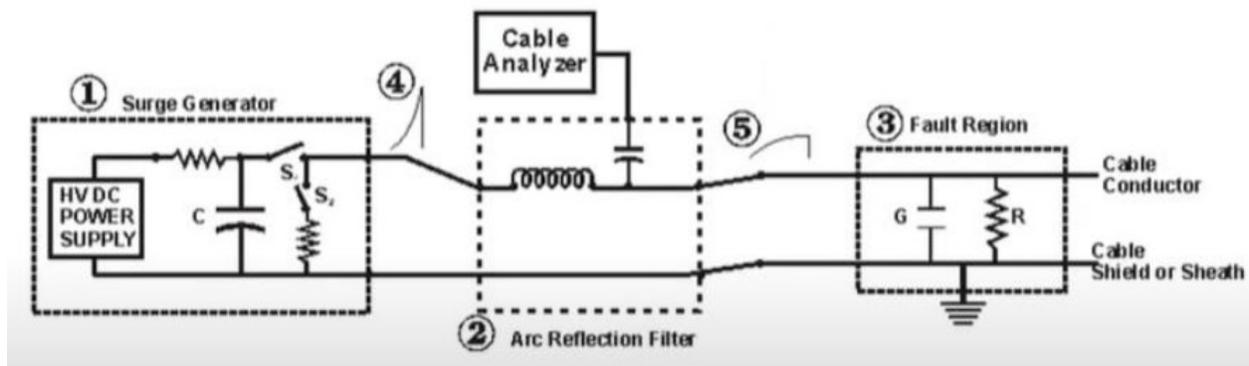


Figura 4.6 - Schema di principio dell'Arc Reflection Method

La presenza di un filtro consente di combinare simultaneamente gli impulsi ad alta tensione prodotti dal generatore di tensione impulsiva e gli impulsi a bassa tensione prodotti dal TDR. La parte induttiva del filtro serve a prolungare l'arco elettrico sul guasto, mentre quella capacitiva serve a proteggere il TDR (sullo schema denominato “cable analyzer”) dagli impulsi ad alta tensione prodotti dal thumper.

Il generatore di impulsi ad alta tensione carica il condensatore ad una tensione DC di poco superiore a quella definita dall'HIPOT test: tramite la chiusura dell'interruttore si crea il fronte d'onda dell'impulso che passa prima per il filtro e poi arriva al guasto provocando la scarica elettrica. Essendo l'arco elettrico un cortocircuito temporaneo, in quel preciso istante il TDR invia degli impulsi a bassa tensione che vengono parzialmente riflessi dal guasto permettendo allo strumento di elaborare la traccia e di rilevare la posizione del guasto.

Il processo sopracitato viene attuato mediante la sovrapposizione di due tracce:

- La traccia blu nella seguente Figura è denominata “low voltage reference trace”: ad un’estremità del cavo vengono trasmessi degli impulsi a bassa tensione dal TDR. Essendo il guasto in questione ad alta resistenza, lo strumento non è in grado di rilevarlo e perciò l’unica riflessione che viene visualizzata è quella corrispondente all’estremità del cavo più lontana. Questa prima traccia serve, dunque, a identificare la lunghezza totale del cavo.
- La traccia rossa, invece, è detta “high voltage fault trace”: è la traccia derivante dal processo dell’Arc Reflection Method precedentemente esposto. A seguito della scarica elettrica, il TDR rileva il guasto temporaneo a bassa resistenza e la corrispondente riflessione negativa.

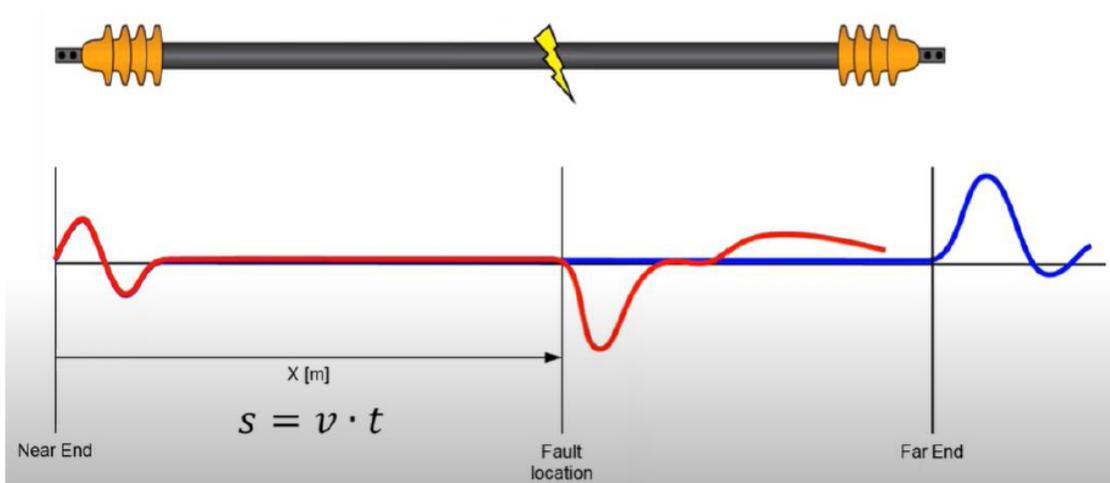


Figura 4.7 - Arc Reflection Method per la pre-localizzazione del guasto

Le due tracce vengono quindi sovrapposte e viene identificato il punto di guasto rispetto alla lunghezza totale del cavo interrato.

Un cavo può essere considerato come un condensatore dal momento che è composto da due conduttori separati da un isolante [17]: più è lungo il cavo, maggiore risulta essere la sua capacità. Di conseguenza, è fondamentale che la capacità (caricata dal generatore di impulsi DC ad alta tensione e poi scaricata sul guasto) sia maggiore rispetto alla capacità del cavo: in questo caso, si

è sicuri di provocare la scarica elettrica. In caso contrario, invece, non si avrà la formazione dell'arco elettrico nel guasto fino a che la capacità del cavo non sarà completamente carica, ovvero dopo molteplici impulsi del generatore DC.

L'Arc Reflection Method è particolarmente indicato per pre-localizzare i guasti ad alta resistenza in cavi lunghi al massimo 5-8 km; è molto affidabile ed accurato (1% sulla misura) ma sollecita particolarmente l'apparecchiatura di misura per cui, se dopo 4-5 tentativi non viene individuato il punto di guasto, è consigliato applicare il metodo degli impulsi di corrente.

#### 4.2.3 Metodo degli impulsi di corrente - ICE

Il metodo degli impulsi di corrente viene applicato per pre-localizzare guasti ad alta resistenza in cavi molto lunghi, solitamente più lunghi di 10 km.

L'Arc Reflection nei cavi molto lunghi, infatti, non può essere applicato perché il TDR risente dello smorzamento naturale del cavo e la riflessione dell'impulso nel punto di guasto non ritorna allo strumento [17][32].

Il metodo degli impulsi di corrente richiede la presenza di un generatore di impulsi DC ad alta tensione, di un accoppiatore induttivo e del TDR che opera solo passivamente come un oscilloscopio:

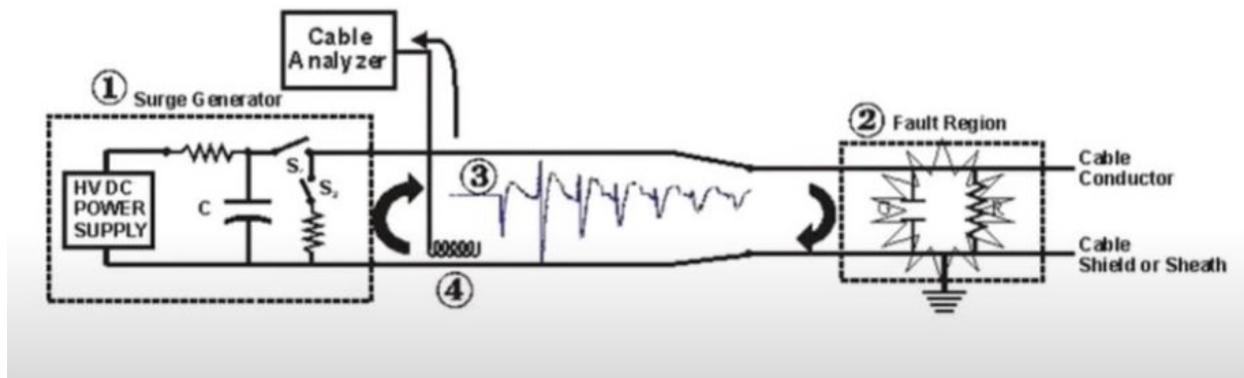


Figura 4.8 - Schema di principio del metodo degli impulsi di corrente

Il principio di funzionamento di questo metodo è il seguente: il generatore rilascia sul cavo un impulso ad alta tensione tale da provocare l'arco elettrico sul punto di guasto; la scarica, a sua volta, produce un'onda di corrente transitoria che viaggia ripetutamente sul cavo tra il generatore e il guasto fino a che la sua energia si esaurisce completamente.

Le riflessioni, tramite un accoppiatore induttivo, vengono rilevate dal TDR che le visualizza sul display come una traccia: per determinare dove è avvenuto il guasto, si misura il tempo  $t$  che intercorre tra due picchi successivi del transitorio e si tiene in considerazione la velocità di propagazione dell'impulso sul cavo. La distanza del guasto dall'estremità a cui è collegato il TDR risulta essere quindi:

$$d(x) = \frac{t}{2} \cdot V_{prop}$$

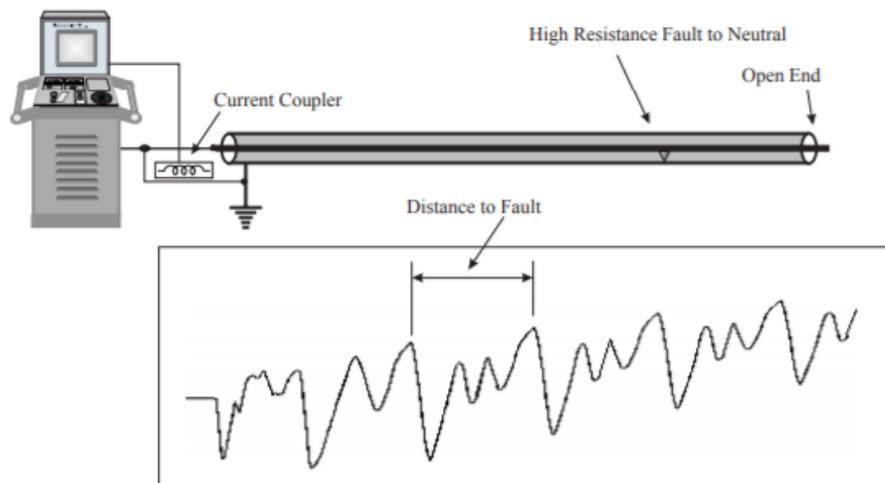


Figura 4.9 - Transitorio di corrente tra il guasto e il generatore di impulsi

Come si può vedere dalla Figura 4.9, uno dei limiti di questa tecnologia è l'interpretazione del transitorio: spesso la forma d'onda può essere molto complessa e caratterizzata dalla sovrapposizione con altre riflessioni, come ad esempio quelle dei giunti. In questi casi non è così facile individuare i due picchi consecutivi su cui posizionare il cursore del TDR.

La precisione di questo metodo è di  $\pm 5-10\%$  sulla misura della distanza dal guasto: questa tecnologia di prelocalizzazione è quindi molto meno accurata rispetto all'Arc Reflection.

#### 4.2.4 Metodo delle onde migranti – Decay

La maggior parte dei guasti ad alta resistenza che avvengono nei cavi MT possono essere individuati applicando delle tensioni di valore inferiore ai 32 kV. Tuttavia, in certe circostanze, i guasti risultano essere intermittenti e per innescare l'arco elettrico c'è bisogno dell'applicazione di tensioni maggiori di 32 kV: torna utile, in questi casi, il metodo delle onde migranti.

Una tensione DC viene applicata gradualmente al cavo che, essendo una capacità, è in grado di accumulare una grande energia: quando viene raggiunta la tensione di breakdown, la capacità si scarica attraverso il guasto ad alta resistenza generando un impulso di tensione che si propaga come un'onda transitoria verso l'inizio del cavo. Qui si trova il TDR che opera passivamente (non applica impulsi) e funge da oscilloscopio visualizzando l'onda transitoria. A questo punto, l'impulso di tensione viene riflesso e raggiunge nuovamente il punto di guasto, dove cambia polarità e viene ulteriormente rinviato verso l'analizzatore posto a inizio cavo. Le riflessioni vanno avanti e indietro tra TDR e punto di guasto fino a che l'energia contenuta nell'onda di tensione transitoria non viene completamente dissipata [17].

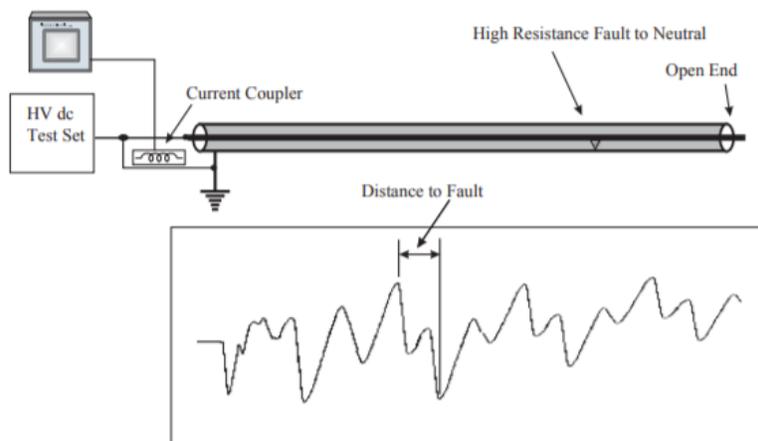


Figura 4.10 - Onda migrante di tensione tra guasto e generatore DC

Come si nota dalla precedente Figura 4.10, il TDR registra e visualizza l'onda transitoria di tensione: perché ciò sia possibile, gli impulsi di tensione devono prima passare attraverso un partitore capacitivo in modo tale che venga opportunamente ridotto il loro valore.

Per sapere qual è la distanza del guasto dall'inizio del cavo bisogna posizionare il cursore tra due successivi picchi: il TDR misura il tempo che intercorre tra i due e poi lo moltiplica per la velocità di propagazione dell'impulso sul cavo. Come nel caso del metodo degli impulsi di corrente, la distanza dal guasto è:

$$d(x) = \frac{t}{2} \cdot V_{prop}$$

Il dato della distanza del guasto dall'inizio del cavo considera anche la lunghezza dei cavetti di test, che deve essere ovviamente scorporata dal risultato finale e sottratta dal valore fornito dallo strumento.

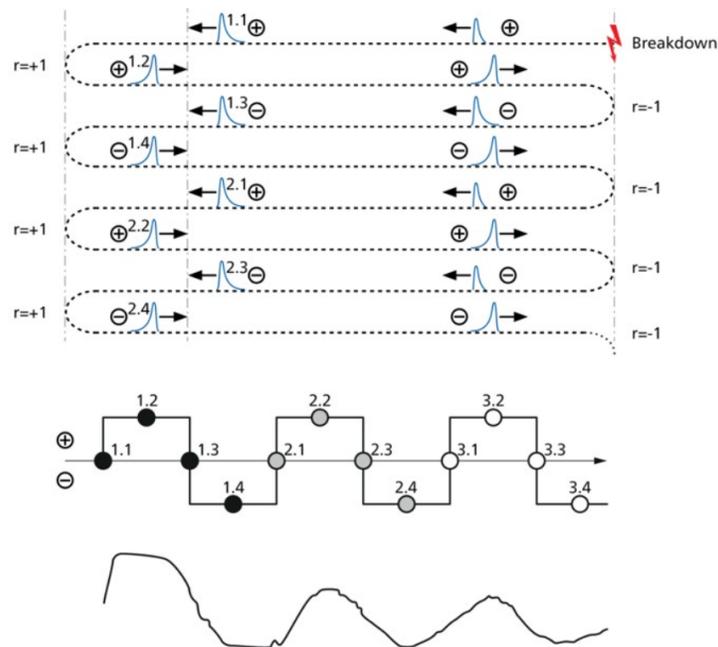


Figura 4.11 - Propagazione dell'impulso di tensione nel cavo e cambi di polarità

Nella Figura 4.11 sono raffigurati i cambi di polarità degli impulsi nell'onda transitoria di tensione. Il cavo è inizialmente sottoposto ad una tensione DC di breakdown negativa: a seguito dell'arco elettrico, si forma un impulso di tensione positivo che viaggia verso l'estremità del cavo [32]. In corrispondenza del generatore DC l'impulso viene riflesso senza cambi di polarità ma, quando

arriva sul guasto e viene nuovamente rinviato verso il generatore, la polarità viene cambiata e diventa negativa.

Infatti, quando l'onda migrante arriva al dispositivo HV di test incontra la sua impedenza elevatissima d'uscita e l'impulso viene riflesso con la medesima ampiezza e polarità; quando, invece, l'impulso di tensione raggiunge il punto di guasto, è ancora presente il cortocircuito derivante dall'arco elettrico: in questo caso, la resistenza è molto bassa e la riflessione ha un fronte d'onda negativo.

Il metodo delle onde migranti consente di avere una pre-localizzazione in caso di guasti ad alta resistenza intermittenti quando la tensione di breakdown è superiore a 32 kV. La precisione sulla misura è di  $\pm 5\%$ .

#### **4.2.5 ARM accoppiato ad un generatore di elevata corrente**

I guasti ad alta resistenza nei cavi non possono essere individuati dal TDR perché quest'ultimo non è in grado di rilevare una variazione dell'impedenza nel punto di guasto.

La tecnologia analizzata, denominata anche ARM burning, è stata applicata negli scorsi decenni per i guasti ad alta resistenza nei cavi isolati in carta impregnata d'olio.

Per questa tipologia di cavi, dal momento che le particelle dell'olio si muovono, non è possibile applicare l'Arc Reflection Method e creare un arco elettrico che si autosostenga nel punto di guasto.

Per ridurre la resistenza di questi guasti in modo che siano rilevabili dal TDR, si utilizza un generatore di alta tensione che fornisce al cavo un'elevata corrente, fino a 20 A. In questo modo, la corrente fornita dal generatore carbonizza l'isolante e cambia le proprietà chimiche dell'olio: la carbonizzazione consente la conversione in un guasto a bassa resistenza facilmente localizzabile col TDR [32].

È bene ricordare che questo metodo, ormai obsoleto, viene impiegato oggi solamente nei cavi isolati in carta impregnata d'olio mentre nei cavi ad isolamento estruso non viene applicato. La precisione di questo metodo sulla misura di pre-localizzazione fornita dallo strumento è di  $\pm 1\%$ .

### 4.3 Localizzazione precisa del punto di guasto

Una volta che il guasto è stato pre-localizzato, è necessario ridurre il più possibile il margine d'errore sulla posizione effettiva del guasto nel cavo interrato. La localizzazione precisa tramite le tecnologie in commercio consente, infatti, di avere un errore minimo sulla distanza dal guasto e di individuare rapidamente il tratto da sostituire con un apposito scavo. È quindi essenziale conoscere il tracciato del cavo sottoterra: in caso contrario, vengono applicate delle procedure per stabilire l'esatta posizione e la profondità del cavo nel sottosuolo.

La tecnologia principale per il tracciamento del cavo interrato prevede la connessione galvanica di un generatore di frequenza audio con una fase sana del cavo guasto: è consigliabile operare con frequenze relativamente basse (circa 2 kHz) per minimizzare l'accoppiamento induttivo con altri cavi e non disturbare il segnale audio [32][33].

Il segnale elettromagnetico trasmesso dal generatore di frequenza audio sul cavo viene rilevato dall'operatore con un apposito strumento sopra il terreno; a seconda della direzione della bobina dell'asta di rilevamento, il segnale viene accoppiato in due modi differenti:

- Metodo massimo: la bobina di rilevamento è orizzontale rispetto al percorso del cavo e il segnale massimo si ottiene quando essa è direttamente sopra al cavo;
- Metodo minimo: la bobina di rilevamento è verticale rispetto al percorso del cavo e la frequenza audio minima del segnale si ottiene quando la bobina è sopra al cavo;

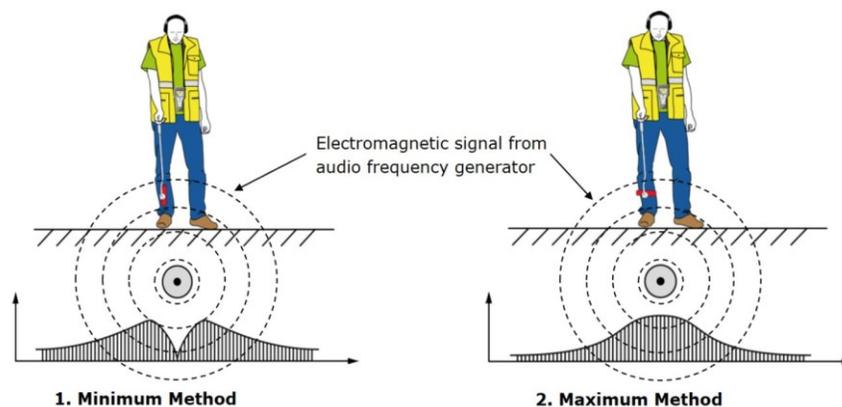


Figura 4.12 - Tracciamento del cavo col metodo minimo e massimo

Col metodo minimo è possibile, inoltre, determinare la profondità del cavo rispetto al livello del terreno: la distanza che intercorre tra il segnale minimo quando la bobina è sopra al cavo e il segnale minimo che si ha quando la bobina viene ruotata di 45°, risulta essere proprio la profondità del cavo.

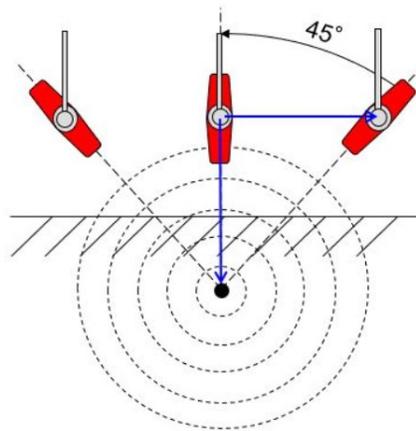


Figura 4.13 - Determinazione della profondità del cavo

Prima di procedere con lo scavo per riparare il tratto guasto nel cavo interrato, è necessario ridurre l'errore sulla misura della distanza dal guasto fornito dai vari metodi di pre-localizzazione.

Il cavo guasto viene collegato direttamente ad un generatore di impulsi ad alta tensione, anche denominato “thumper”:

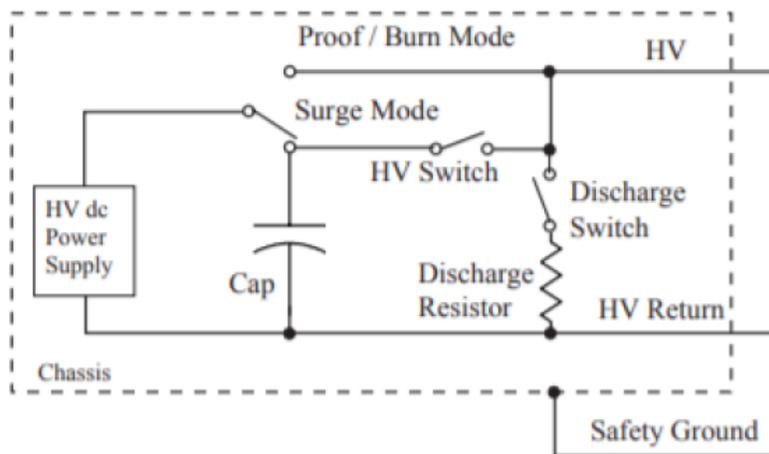


Figura 4.14 - Schema di principio di un generatore di impulsi HV

Il generatore carica il condensatore ad una elevata tensione DC: tramite la chiusura dell'interruttore a valle, tutta l'energia accumulata sulla capacità viene scaricata sul cavo provocando la scarica elettrica sul guasto. Il fronte d'onda dell'impulso di alta tensione a cui viene sottoposto il cavo si crea a seguito della chiusura dell'interruttore una volta che la capacità a valle del generatore risulta essere carica.

La scarica elettrica sul punto di guasto produce un caratteristico segnale acustico udibile tramite degli opportuni strumenti: normalmente, l'energia minima richiesta per avere un rumore percepibile è di 300-400 J. Poiché l'energia è proporzionale al quadrato della tensione del generatore e alla capacità che viene scaricata sul cavo, bisogna dimensionare opportunamente il generatore in modo tale che il cavo venga sottoposto ad un'energia sufficiente da provocare un segnale acustico facilmente avvertibile.

$$E = \frac{C}{2} \cdot V^2$$

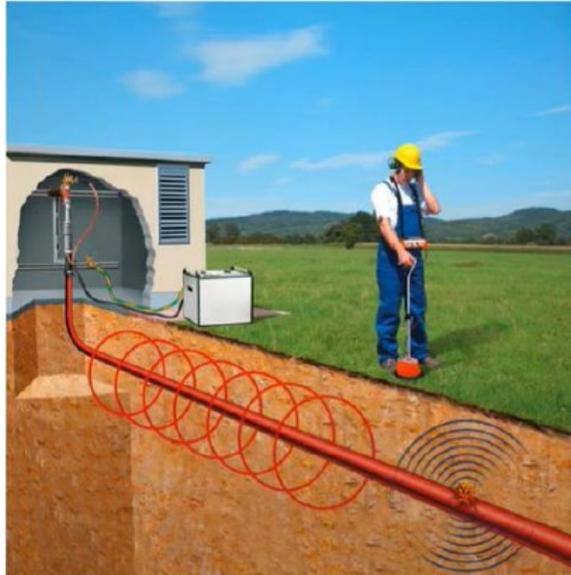
Dove: C [ $\mu$ F], V [kV], E [J]

La tensione da applicare sul cavo deve essere di poco superiore alla tensione di breakdown del guasto: i continui impulsi sono, infatti, stressanti per il cavo e possono dar luogo addirittura ad altri guasti, specialmente se il cavo è in servizio da tanti anni.

#### **4.3.1 Metodo acustico-elettromagnetico**

Il metodo che viene più largamente utilizzato per determinare l'esatta posizione di un guasto ad alta resistenza in un cavo interrato è il metodo acustico-elettromagnetico [17][32].

La scarica del condensatore caricato dal generatore DC ad alta tensione produce un impulso di corrente che viaggia lungo il cavo verso il punto di guasto e poi torna alla capacità del generatore; l'impulso di corrente genera un campo magnetico che può essere rilevato e misurato mentre l'operatore cammina lungo il percorso del cavo. Man mano che il punto di guasto si avvicina, l'intensità del campo magnetico aumenta; se il valore del campo magnetico cala bruscamente due sono le possibilità: o l'operatore è andato oltre il punto di guasto oppure non si trova più sopra il tracciato del cavo interrato.



*Figura 4.15 - Localizzazione del guasto con il metodo acustico-elettromagnetico*

Come suggerisce il nome del metodo, oltre al campo magnetico viene rilevato anche il segnale acustico emesso dalla scarica elettrica sul guasto ad alta resistenza: ogni 10 secondi, infatti, un impulso ad alta tensione porta al breakdown del cavo e al conseguente caratteristico rumore.

Lo strumento che viene utilizzato è un microfono a contatto con il terreno caratterizzato da due canali, quello acustico e quello elettromagnetico. I segnali, tramite un amplificatore, vengono poi trasmessi ad un ricevitore e visualizzati dall'operatore su un display a cristalli liquidi.

Il principio di funzionamento su cui si basa questo metodo è denominato “thunder and lightning” perché funziona con lo stesso principio del fulmine-tuono: quanto prima si sente il tuono dopo aver visto il fulmine, tanto più si è vicini al fulmine stesso. Allo stesso modo, quando l'operatore cammina lungo il percorso del cavo, il microfono a contatto col terreno rileva prima il campo magnetico prodotto dall'impulso di corrente che si propaga sul cavo e, subito dopo, il segnale acustico derivante dalla scarica elettrica nel guasto.

Non appena viene rilevato il campo elettromagnetico prodotto dall'impulso di corrente, viene avviato un timer sullo strumento ricevitore: si misura il tempo che passa prima che lo strumento ricevi anche il segnale acustico. Questo tempo viene quindi tradotto automaticamente dal ricevitore in distanza effettiva dal guasto e aiuta l'operatore a capire in che direzione deve muoversi tramite

una freccia sul display; tanto prima arriva allo strumento il segnale acustico, tanto più si è vicini alla posizione esatta del guasto.

Quando l'operatore, camminando sul tracciato del cavo interrato, si trova a cavallo del guasto, sul display vengono visualizzate due frecce con la punta l'una verso l'altra: è questa l'indicazione che la localizzazione precisa del guasto è stata portata a termine.

Se da un lato, per evitare di dover tornare indietro, è necessario non procedere in fretta camminando sul terreno, dall'altro non bisogna impiegare troppo tempo perché il cavo è sottoposto ad impulsi ad alta tensione ogni 10 secondi e, come già detto, ciò può essere deleterio per la tenuta del suo isolante. Nella seguente Figura 4.16, si può vedere ciò che viene visualizzato dal display del rilevatore in tre successive posizioni dell'operatore: l'intensità dell'impulso di corrente, il tempo che intercorre tra la ricezione del segnale elettromagnetico e il segnale acustico, l'intensità del suono e la direzione da prendere per localizzare il guasto.

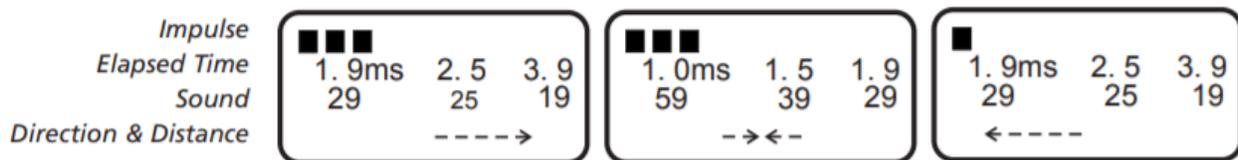
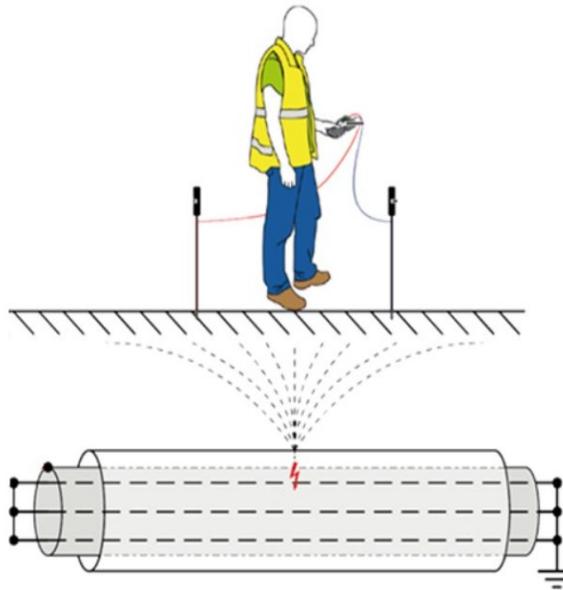


Figura 4.16 - Raffigurazione dei parametri visualizzati dal rilevatore

### 4.3.2 Step voltage method

In caso di cortocircuito o di guasti a bassa resistenza, non è possibile provocare la scarica elettrica sul punto di guasto e, di conseguenza, non si può avere alcun segnale acustico che consenta la sua localizzazione.

In questo caso è necessario applicare lo step voltage method [32][33]: una sequenza di impulsi di tensione a gradino viene inviata nel cavo guasto producendo una caduta di tensione verso terra. Quest'ultima si traduce in un gradiente di tensione, che può essere misurato con l'uso di due sonde di terra.



*Figura 4.17 - Step voltage method*

Camminando verso il guasto, il dispositivo ricevitore in mano all'operatore segnala una tensione positiva crescente; appena viene oltrepassato il guasto, la polarità della tensione cambia e diventa negativa. Quando le sonde di terra si trovano simmetricamente sopra al guasto, la tensione risultante è nulla e la posizione del guasto è dunque determinata.

Una volta che è stata individuata l'esatta posizione del guasto nel cavo, generalmente con un errore sulla misura pari allo 0,1%, è necessario procedere con il lavoro di riparazione per rimettere il cavo in servizio. Si scava nella porzione di terreno determinata dal processo di localizzazione e si dissotterrano i cavi: se il guasto è visibile, è relativamente facile capire qual è il cavo che deve essere riparato; se, invece, vi sono più cavi raggruppati assieme è necessario disporre di un metodo affidabile che riconosca correttamente il cavo guasto ed impedisca di tagliare erroneamente un tratto sano.

## 4.4 Soluzioni in commercio e costi

Ognuno degli step descritti nei precedenti paragrafi può essere implementato singolarmente tramite un opportuno strumento. Risulta però preferibile, anche per una questione di comodità, avere a disposizione un sistema che integri l'analisi e la pre-localizzazione del guasto in un unico dispositivo. Sono disponibili diversi sistemi, aventi prestazioni e capacità differenti: la scelta di quello più idoneo, quindi, tiene conto di molteplici fattori tra cui, principalmente, il luogo in cui si va a fare la localizzazione del guasto.

I principali sistemi in commercio sono i seguenti [34]:

- Sistema trasportabile “STX 40”: questo prodotto dell'azienda Megger integra in un unico dispositivo tutti gli step da seguire rigorosamente per la localizzazione di un guasto in un cavo interrato. È un dispositivo trasportabile del peso di 118 kg che consente all'operatore in modo semplice e intuitivo di eseguire rigorosamente la procedura per localizzare il guasto.



Figura 4.18 - Megger STX 40-2000

Il Megger STX 40 è l'unico dispositivo del suo genere in grado di applicare ben 7 metodi: la misura della resistenza d'isolamento, il DC HIPOT test (fino a 40 kV DC), il Time Domain Reflectometry (fino a 50 V), l'Arc Reflection Method (fino a 32 kV), il Metodo degli impulsi di corrente (fino a 32 kV), il Metodo delle onde migranti (fino a 40 kV) e può inoltre funzionare da thumper per la

localizzazione precisa del guasto applicando a scelta tre livelli di tensione ad energia costante (8-16-32 kV con energia in uscita costante pari a 2000 J).

- Sistema su laboratorio mobile “Centrix 2.0”:



*Figura 4.19 - Sistema su laboratorio mobile Centrix 2.0*

Centrix 2.0 è il più potente e moderno sistema su laboratorio mobile per la localizzazione dei guasti attualmente in circolazione. Rispetto all’STX 40, non è un sistema trasportabile a mano: l’applicazione dei vari metodi per localizzare il guasto avviene dall’interno del furgone, selezionando tramite un display la tecnologia opportuna e monitorando i risultati.

Il Centrix 2.0 è in grado di applicare la misura della resistenza d’isolamento, il DC HIPOT test fino a 40 kV, il TDR con impulsi fino a 160 V, l’ARM fino a 32 kV, il metodo degli impulsi di corrente con tensioni fino a 32 kV e il metodo Decay con tensioni fino ad 80 kV. Per localizzare in modo preciso i guasti, fornisce degli impulsi di tensione con quattro livelli a scelta di tensione: 0-4 kV, 0-8 kV, 0-16 kV e 0-32 kV. Gli impulsi possono essere applicati singolarmente oppure con una determinata cadenza al minuto (da 3 a 20 impulsi/minuto).

Tutto il sistema viene alimentato con delle batterie agli ioni di litio.

Grazie ai due sistemi sopra descritti è possibile una efficace pre-localizzazione del guasto. Tuttavia, per la localizzazione precisa, c’è bisogno di una tecnologia che consenta all’operatore,

camminando sul terreno sopra al percorso del cavo interrato, di rilevare il segnale elettromagnetico e acustico prodotto dal guasto. Viene quindi impiegata la tecnologia denominata “digiPHONE<sup>+</sup>2”:



*Figura 4.20 - digiPHONE<sup>+</sup>2 per localizzazione precisa del guasto*

Nella Figura 4.20, a sinistra è visibile l’asta che funge da rilevatore sia del segnale elettromagnetico sia di quello acustico. Le cuffie Bluetooth consentono all’operatore di sentire il segnale acustico proveniente dalla scarica elettrica nel guasto; il miglioramento di questa tecnologia ha portato al filtraggio e all’eliminazione di eventuali rumori circostanti che non consentivano all’operatore di sentire bene il rumore proveniente dalla scarica elettrica.

Il display a disposizione è molto intuitivo: una linea verde indica il percorso del cavo aiutando l’operatore a non andare fuori traccia e una freccia indica la direzione da intraprendere per arrivare al guasto. A destra sono invece visibili le sonde di terra da utilizzare per lo step voltage method in caso di guasti a bassa resistenza.

I costi e i tempi per la localizzazione precisa di un guasto, la riparazione e sostituzione del tratto di cavo interrato e la successiva ri-energizzazione del cavo dipendono da più fattori:

- Dal tipo di guasto: certi guasti, infatti, sono più difficili da localizzare con precisione e richiedono più tempo ed esperienza;
- Dalla lunghezza della linea in cavo interrato;
- Dalle condizioni logistiche: se il luogo dove è avvenuto il guasto è difficilmente raggiungibile dall'operatore per via della morfologia del territorio, i costi saranno più alti: si pensi, ad esempio, ad un parco eolico situato in luoghi isolati e non facilmente raggiungibili dai due sistemi di pre-localizzazione citati;
- Dal sistema utilizzato per pre-localizzare il guasto;

Tenendo conto di ciò, indicativamente, per un cavo usato per la distribuzione il costo per l'intero processo di localizzazione del guasto nel cavo interrato è di circa 1500/2000 €. Il costo può raggiungere, invece, i 5000 € nel caso dei campi eolici: come già detto, molto spesso i parchi eolici sono collocati in punti difficilmente raggiungibili dall'operatore e le difficoltà legate al processo di localizzazione del guasto sono maggiori rispetto a quelle di un cavo di distribuzione situato nei centri urbani. A questi costi vanno aggiunti quelli per le trasferte del tecnico [35].



# Capitolo 5 – Modellizzazione dei metodi TDR e ARM in ambiente MATLAB/Simulink

Questo elaborato è stato sviluppato in collaborazione con la STE Energy S.r.l. di Padova. Seguendo le direttive proposte, si è pensato di proporre un modello per lo studio dei guasti nei cavi interrati che collegano tra loro le turbine di un parco eolico.

La simulazione è stata effettuata con Simulink, un software particolarmente indicato per costruire schemi a blocchi di sistemi dinamici lineari e non lineari e per eseguire la loro simulazione. Sviluppato dall'azienda MathWorks, Simulink è l'ambiente di programmazione grafico associato a MATLAB.

## 5.1 Modellizzazione della linea in cavo

### 5.1.1 Scelta del cavo

La linea in cavo interrato considerata è lunga 3.6 km: è composta da tre pezzature uguali da 1.2 km collegate tra loro tramite dei giunti. Il cavo unipolare, di sezione pari a  $95 \text{ mm}^2$ , è esercito a 20 kV e collegato alla rete di MT.

La scelta del cavo adatto per la simulazione è ricaduta sull'ARE4H1R: è un cavo di MT unipolare particolarmente adatto per la posa interrata e il collegamento con gli impianti eolici, grazie alla sua flessibilità e alla facilità di torsione nella torre eolica [36]. Per quanto riguarda le sue caratteristiche costruttive, è isolato in XLPE senza piombo, ha una guaina esterna in PVC e il conduttore di fase è in alluminio.

Il cavo non propaga la fiamma in caso d'incendio e presenta delle temperature massime e minime di funzionamento rispettivamente di  $90^\circ\text{C}$  e  $-15^\circ\text{C}$ .

Per la simulazione è stata scelta la posa interrata con disposizione dei cavi a trifoglio, più adatta ai cavi unipolari con tensioni nominali fino a 170 kV [10].

Caratteristiche tecniche/Technical characteristics								
U max: 24 kV								
Formazione Size	Ø indicativo conduttore Approx. conduct. Ø	Ø indicativo isolante Approx. insulation Ø	Ø esterno max Max outer Ø	Peso indicativo cavo Approx. cable weight	Portata di corrente Current rating			
					A			
n° x mm <sup>2</sup>	mm	mm	mm	kg/km	in aria In air		interrato* buried*	
					a trifoglio trefoil	in piano flat	a trifoglio trefoil	in piano flat
1 x 95	11,4	23,00	31,0	880,0	280,0	338,0	221,0	229,0

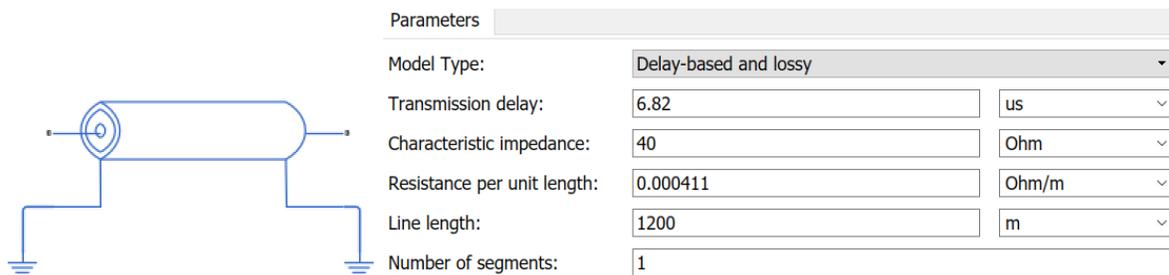
  

Caratteristiche elettriche/Electrical characteristics							
Formazione Size	Resistenza elettrica a 20°C Max. electrical resistance at 20°C	Resistenza apparente a 90°C e 50Hz Conductor apparent resistance at 90°C and 50Hz			Reattanza di fase Phase reactance		Capacità a 50Hz Capacity at 50Hz
		a trifoglio trefoil	in piano flat	a trifoglio trefoil	in piano flat		
n° x mm <sup>2</sup>	Ω/Km	Ω/Km	Ω/Km	Ω/Km	Ω/Km	μF/km	
1 x 95	0,320	0,411	0,411	0,12	0,13	0,232	

Tab 5.1 – Caratteristiche tecniche ed elettriche di un cavo ARE4HIR 12/20 kV

### 5.1.2 Modellizzazione della linea in cavo su Simulink

Una volta definite tipologia e caratteristiche del cavo, bisogna inserire i dati sul software. Sono presenti su Simulink dei blocchi predefiniti; per la linea in cavo viene scelto il blocco “transmission line” che implementa sul software una linea di trasmissione:



The image shows a Simulink block diagram of a transmission line on the left and its parameter configuration on the right. The diagram consists of a blue transmission line block with two input terminals on the left and two output terminals on the right. The left terminals are connected to ground symbols. The right terminals are connected to a ground symbol and a terminal symbol. The parameter configuration panel on the right is titled "Parameters" and includes the following settings:

- Model Type: Delay-based and lossy
- Transmission delay: 6.82 us
- Characteristic impedance: 40 Ohm
- Resistance per unit length: 0.000411 Ohm/m
- Line length: 1200 m
- Number of segments: 1

Figura 5.1 - Blocco Simulink del cavo e definizione dei parametri

Il blocco Simulink rappresenta fedelmente un cavo unipolare: in particolare, in Figura 5.1 si notano il conduttore di fase che, tramite i suoi terminali, consente il collegamento con altri blocchi del software e lo schermo metallico della linea che viene collegato a terra alle due estremità.

Il modello scelto per la linea in cavo è denominato “delay-based and lossy”: questa modalità permette di rappresentare la linea di trasmissione come una serie di componenti, ognuno caratterizzato da un certo tempo di delay, connessi in serie; il modello, inoltre, considera anche le perdite in linea.

Per quanto riguarda i parametri da definire nel blocco, uno dei principali è l’impedenza caratteristica del cavo; poiché questo parametro dipende dalla frequenza, è necessario sottolineare che nel caso delle simulazioni effettuate con Simulink non si considera la normale frequenza di esercizio, bensì l’alta frequenza degli impulsi trasmessi sul cavo dal TDR.

La formula per il calcolo dell’impedenza caratteristica del cavo è la seguente:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

Alle alte frequenze del TDR (23.3 kHz), però, la resistenza e la conduttanza sono trascurabili rispetto alle componenti in frequenza come l’induttanza e la capacità. Di conseguenza, il calcolo dell’impedenza caratteristica può essere ricondotto semplicemente a [23][42]:

$$Z_0 \approx \sqrt{\frac{L}{C}}$$

È necessario dunque ricavare i valori delle due grandezze dalla Tabella 5.1:

- $L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{0.12}{2\pi 50} = 3.8197 \cdot 10^{-4} \text{ H/km}$
- $C = 0.232 \cdot 10^{-6} \text{ F/km}$

Da cui:

$$Z_0 \approx \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{3.8197 \cdot 10^{-4}}{0.232 \cdot 10^{-6}}} = 40.58 \Omega \cong 40 \Omega$$

Il parametro denominato “transmission delay” indica il tempo che impiega l’impulso per propagarsi da un’estremità della linea all’altra; viene definito come il rapporto tra la lunghezza del cavo e la velocità di propagazione dell’impulso.

La velocità di propagazione dell’impulso nel cavo è un parametro che dipende dal dielettrico che compone l’isolante. Per l’XLPE, alle basse frequenze, questo valore è pari a 154 m/μs, ma all’aumentare della frequenza dell’impulso la sua velocità di propagazione cresce: un valore ragionevole per le frequenze a cui opera il TDR è 176 m/μs [43][44].

Il tempo impiegato dall’impulso per percorrere la singola pezzatura di cavo di 1200 m è quindi:

$$\text{Transmission delay} = \frac{l}{V_{prop}} = \frac{1200}{1.76 \cdot 10^8} = 6.82 \mu s$$

Il transmission delay totale della linea è dato dal valore precedente moltiplicato per le tre pezzature che compongono la linea in cavo. Tuttavia, essendo la linea in cavo collegata ad un’estremità con il TDR, il tempo totale va moltiplicato per due poichè l’impulso trasmesso dal TDR raggiunge la l’estremità della linea dopo un tempo t, viene riflesso e ritorna allo strumento dopo un tempo pari a 2t. Di conseguenza, il transmission delay TD della linea in cavo collegata al TDR è:

$$TD = \frac{2 \cdot l}{V_{prop}} = \frac{2 \cdot 3600}{1.76 \cdot 10^8} = 40.9 \mu s$$

Dove:  $l$  = lunghezza totale della linea = 3600 m;

$V_{prop}$  = velocità di propagazione dell’impulso nel cavo.

Gli altri parametri da definire nel blocco Simulink sono:

- La resistenza per unità di lunghezza del cavo che si ricava dalla Tabella 5.1 ed è pari a 0.000411 Ω/m;

- La lunghezza del tratto di linea modellizzato: per la simulazione questo valore è pari a 1200 m, essendo la linea composta da tre pezzature identiche interconnesse tramite due giunti;
- Il numero di segmenti che rappresenta il numero di modelli utilizzati per rappresentare l'intera linea di trasmissione in cavo. Siccome le pezzature sono interconnesse tramite dei giunti, questo valore viene posto pari a 1.

## 5.2 Modellizzazione del Time Domain Reflectometer - TDR

Il Time Domain Reflectometer, più comunemente detto TDR, è uno strumento efficiente e molto utilizzato per pre-localizzare i guasti in una linea in cavo.

Introdotta nel Capitolo 4, il TDR è un generatore di impulsi a bassa tensione e alta frequenza in grado di rilevare ogni discontinuità esistente rispetto al valore dell'impedenza caratteristica del cavo. L'impulso trasmesso alla linea viene, infatti, parzialmente riflesso in corrispondenza di ogni punto di discontinuità: la componente riflessa dell'impulso può essere positiva se l'impedenza misurata in quel punto è maggiore dell'impedenza caratteristica del cavo, negativa se è inferiore. L'ampiezza della riflessione nel punto di discontinuità è data dal coefficiente di riflessione  $\rho$ :

$$\rho = \frac{Z_d - Z_0}{Z_d + Z_0}$$

Dove:  $Z_d$  è il valore dell'impedenza misurata nel punto di discontinuità

$Z_0$  è l'impedenza caratteristica del cavo

Per modellizzare su Simulink il TDR come un generatore di impulsi a bassa tensione e alta frequenza, nel library browser del software viene scelto il blocco denominato "pulse voltage source" in grado di fornire un impulso ad onda quadra [40][41]:

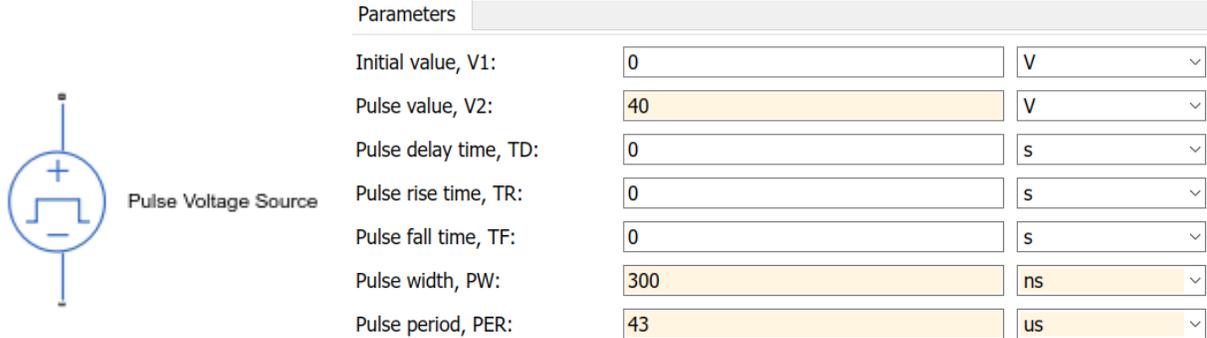


Figura 5.2 - Blocco Simulink del generatore di impulsi TDR e impostazione dei parametri

L'impulso viene settato con un'ampiezza inizialmente nulla e un valore di regime pari a 40 V. Quest'ultimo valore è stato scelto considerando l'impulso prodotto dal modello reale "STX 40" settato in modalità TDR; poiché l'output di questo dispositivo varia tra 10 e 60 V, è preferibile scegliere un impulso iniziale di ampiezza elevata per evitarne l'attenuazione.

Dal datasheet dell'STX 40 si ricava, inoltre, il valore della larghezza degli impulsi che può variare tra 20 ns e 10 μs. Più è lunga la linea in cavo, maggiore deve essere la larghezza dell'impulso fornito dal TDR: un impulso stretto, infatti, risente di un'attenuazione tale da non consentire di visualizzare alcuna riflessione sulla terminazione lontana del cavo. Tuttavia, è necessario considerare che più un impulso è largo, minore è la risoluzione temporale dello strumento; una minima variazione rispetto all'impedenza caratteristica del cavo potrebbe infatti non venire identificata. Tenendo conto che la linea in cavo è lunga globalmente 3.6 km, viene scelta per la simulazione una larghezza dell'impulso pari a 0.3 μs: il valore è un giusto compromesso tra bassa attenuazione del segnale e una buona risoluzione temporale.

L'impulso così parametrizzato fornisce quindi in output un'onda quadra di ampiezza pari a 40 V e larghezza pari a 0.3 μs.

Per quanto riguarda il periodo dell'impulso, infine, si fa riferimento al "transmission delay" della linea in cavo. Essendo questo valore pari a 40.9 μs, è sufficiente un valore del periodo leggermente superiore e pari a 43 μs; di conseguenza, la frequenza con cui il TDR fornisce impulsi ad onda quadra alla linea in cavo risulta essere:

$$f = \frac{1}{T} = 23256 \text{ Hz} = 23.3 \text{ kHz}$$

In serie al pulse voltage source viene inserita una resistenza di accoppiamento di valore pari all'impedenza caratteristica del cavo.

In questo modo si hanno due vantaggi [30]:

- Si evita la riduzione marcata dell'energia dell'impulso nel punto di transizione con la linea in cavo, ciò che causerebbe una riduzione marcata dell'energia dell'impulso con conseguente attenuazione di quest'ultimo;
- Si evita la riflessione dell'impulso, verso il TDR, nel punto di transizione con la linea in cavo. Questo causerebbe una risoluzione nulla nei primi metri visualizzati sul display dello strumento e la riflessione corrispondente all'estremità iniziale del cavo non sarebbe quindi visibile nella traccia registrata dal dispositivo.

### **5.3 Modellizzazione dell'impedenza di guasto**

Nel Capitolo 3 sono stati messi in evidenza i principali guasti che possono interessare le linee in cavo interrate. Per costruire un modello in grado di pre-localizzarli è necessario individuare il modello corretto da implementare poi sul software Simulink.

#### **5.3.1 Modello del cortocircuito**

Il cortocircuito è un guasto a bassa resistenza che si verifica quando si ha la fusione dell'isolante e il conduttore di fase viene in contatto con lo schermo metallico.

In corrispondenza di questo guasto, il TDR visualizza sul display una riflessione negativa: la resistenza che rappresenta il cortocircuito, infatti, è nulla o al più di qualche  $\Omega$ .

Il modello da implementare su Simulink per rappresentare il guasto da cortocircuito è raffigurato nella seguente Figura 5.3 [17][37]:

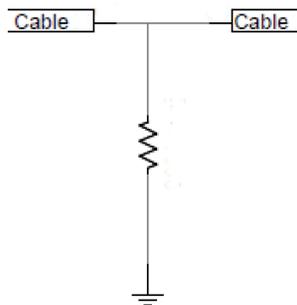


Figura 5.3 - Modello del cortocircuito

La resistenza collega, quindi, il conduttore di fase con la terra dato che gli schermi metallici sono collegati a quest'ultima.

### 5.3.2 Modello del circuito aperto

Il circuito aperto è un guasto che si verifica quando, a causa di elevate correnti oppure della fuoriuscita del cavo dal giunto, il conduttore risulta essere interrotto e suddiviso in due parti distinte.

Per questo motivo, il circuito aperto è anche denominato “guasto in serie”. È sufficiente interporre tra le due tratte di cavo interrotte una resistenza di valore molto elevato, idealmente prossimo ad  $\infty$ . Il TDR, in corrispondenza del guasto, visualizza sul display una riflessione positiva [17].

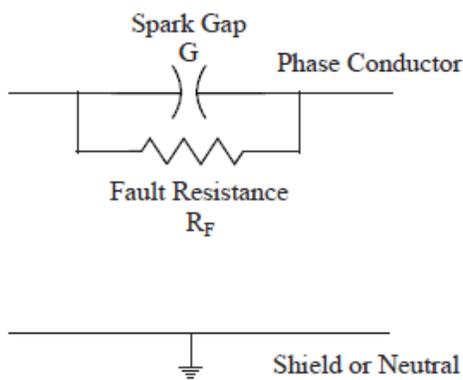


Figura 5.4 - Modello del circuito aperto

### 5.3.3 Modello del pinhole

Il pinhole è il guasto più frequente nei cavi interrati ed è derivante dal processo naturale di invecchiamento del cavo o dall'ingresso di acqua e umidità nel cavo [37].

L'ingresso di acqua all'interno dell'isolante forma i cosiddetti “water trees”: essi hanno origine da impurità o imperfezioni all'interfaccia tra isolante e schermo metallico.

Queste impurità causano l'intensificazione del campo elettrico e la formazione di microfratture nell'isolante; se queste ultime si riempiono di acqua o umidità, la continua intensificazione del campo elettrico provoca l'espansione di queste diramazioni nell'isolante (da qui il nome “water trees”). Il water tree cresce fino a che con le sue diramazioni raggiunge il conduttore di fase dando origine a un guasto ad alta resistenza denominato appunto pinhole.

Le proprietà elettriche all'interno della regione affetta da water tree sono differenti rispetto a quelle dell'isolante sano: in particolare, la permittività relativa  $\epsilon_r$  può raggiungere valori fino a 3 volte superiori rispetto a quella di riferimento dell'XLPE [38] e la conduttività elettrica  $\sigma$  addirittura  $10^{10}$  volte il valore dell'isolante sano [39]. Per modellizzare il pinhole è necessario ricorrere al modello del water tree, rappresentato dal parallelo di una resistenza con una capacità:

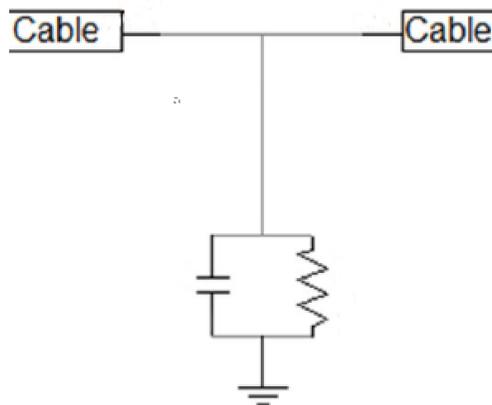


Figura 5.5 - Modello del pinhole

Poiché la capacità ed il valore della resistenza dipendono rispettivamente dalla permittività relativa  $\epsilon_r$  e dalla conduttività elettrica  $\sigma$ , si deduce che, al crescere della regione affetta da water tree, la capacità cresce mentre la resistenza decresce:

$$C = \frac{2\pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot l}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

$$G = \frac{\sigma \cdot A}{l} \quad \text{da cui} \quad R = \frac{1}{G}$$

Dove:  $r_1$ = raggio conduttore,  $r_2$ = raggio isolante,  $A$ = sezione del conduttore,  $l$ = lunghezza del cavo,  $\epsilon_0$ = permittività del vuoto.

I valori della capacità e della resistenza da inserire nel modello dipendono dalla percentuale di propagazione del water tree nello spessore dell'isolante XLPE [23]:

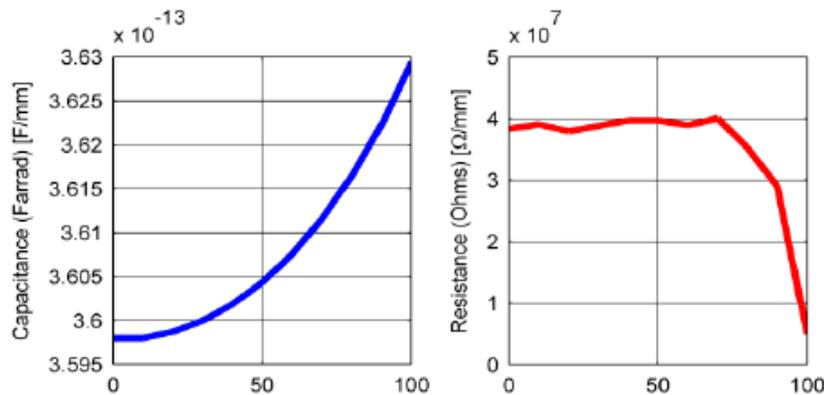


Figura 5.6 - Capacità e resistenza per mm di cavo del water tree in relazione alla percentuale di isolante interessata dal fenomeno

Dalla precedente Figura 5.6, si evince che la resistenza resta pressoché costante fino a che la regione affetta da water tree non raggiunge il conduttore di fase: in quell'istante il valore cala bruscamente. Per quanto riguarda la capacità avviene il contrario: il suo valore cresce esponenzialmente al propagarsi del water tree lungo lo spessore dell'isolante. Ciò è dovuto al fatto che il water tree si comporta come un conduttore e man mano che si propaga verso il conduttore di fase, aumenta di conseguenza il valore della sua capacità.

Per la modellizzazione del pinhole è necessario individuare i valori di capacità e resistenza in corrispondenza del 100% di crescita del water tree, ovvero quando quest'ultimo, propagandosi a

partire dall'interfaccia tra schermo metallico e isolante, raggiunge il conduttore di fase dando luogo al guasto ad alta resistenza. Dalla Figura 5.6 si ricavano, quindi, i seguenti valori:

$$C = 3.63 \cdot 10^{-13} \text{ F/mm} \quad \text{e} \quad R = 7.9 \cdot 10^6 \text{ } \Omega/\text{mm}$$

Si suppone che il tratto di cavo interessato dal guasto ad alta resistenza sia lungo 3 mm, essendo la forma del water tree assimilabile ad un ellissoide. Di conseguenza, i valori di capacità e resistenza del modello Simulink sono i seguenti:

$$C = 1.089 \cdot 10^{-12} \text{ F} \quad \text{e} \quad R = 23.7 \cdot 10^6 \text{ } \Omega$$

## **5.4 Simulazione dei guasti in ambiente MATLAB/Simulink**

### **5.4.1 Simulazione del TDR applicato alla linea in cavo senza guasti**

La prima simulazione effettuata su Simulink riguarda la linea in cavo ideale e non soggetta a guasti. Nel Capitolo 4 è stato dettagliatamente spiegato che l'applicazione della tecnica del Time Domain Reflectometry è un metodo molto affidabile ed efficiente per individuare nella linea eventuali variazioni rispetto al valore dell'impedenza caratteristica del cavo.

La linea in cavo, essendo composta da tre pezzature identiche tra loro, è stata modellizzata mettendo in serie tre blocchi "transmission line", introdotti e parametrizzati nel paragrafo 5.1; tra ogni pezzatura e quella adiacente è stato inserito il modello di un giunto, descritto successivamente in questo paragrafo. Gli impulsi del TDR, parametrizzati come nel paragrafo 5.2, vengono trasmessi alla linea in cavo passando per la resistenza di accoppiamento: quest'ultima viene settata di un valore pari all'impedenza caratteristica del cavo, 40  $\Omega$ , per evitare riflessioni dell'impulso nel punto di transizione con la linea. Poiché la linea risulta essere scollegata dalla rete durante l'applicazione degli impulsi TDR, all'estremità del cavo viene inserita una resistenza di valore infinito per modellizzare un circuito aperto.

Per visualizzare la traccia prodotta dalle riflessioni dell'impulso lungo la linea si utilizza un oscilloscopio collegato al cavo mediante un sensore di tensione che converte la tensione misurata in un segnale fisico proporzionale ad essa; un blocco "Simulink converter" consente poi la conversione del segnale fisico in ingresso in un segnale Simulink. Il modello della linea in cavo collegata al TDR e il risultato delle riflessioni visualizzate dall'oscilloscopio sono rappresentate nelle seguenti Figure 5.7 e 5.8:

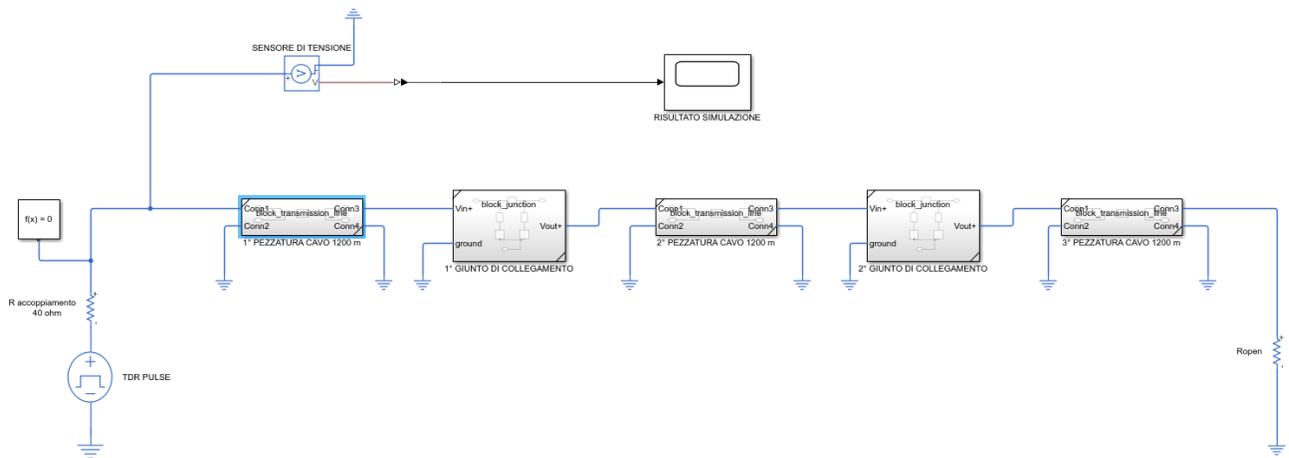


Figura 5.7 - Modello della linea in cavo senza guasti

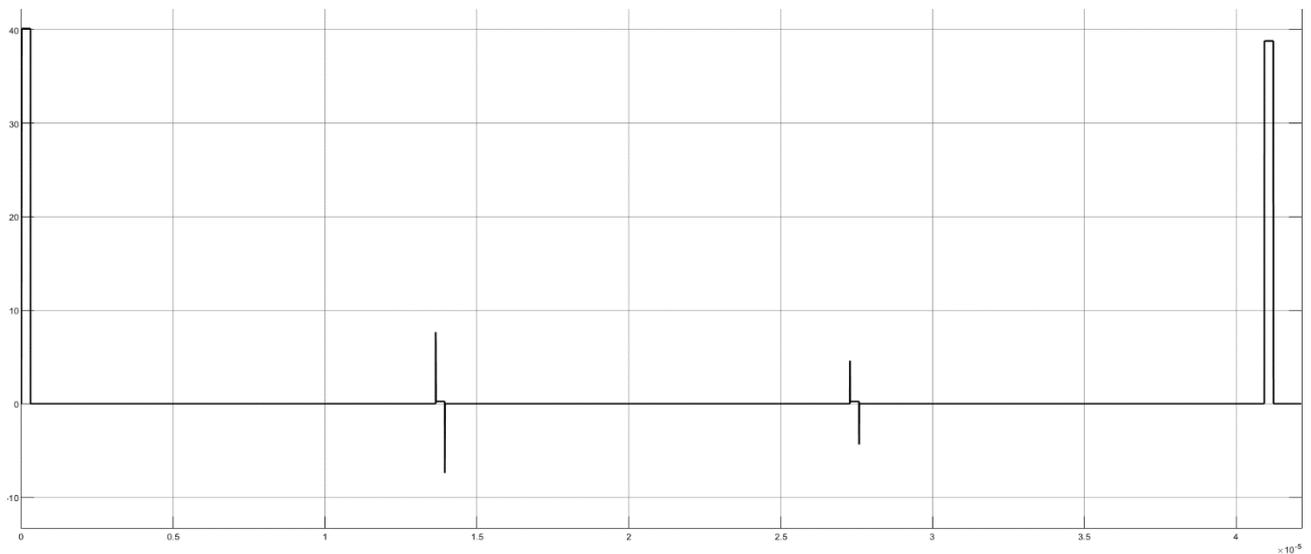


Figura 5.8 - Risultato della simulazione senza guasti

La prima riflessione rappresenta l'impulso trasmesso dal TDR nel cavo; si possono notare i parametri descritti nel modello come l'ampiezza di 40 V, la larghezza dell'impulso di 300 ns e il tempo di salita e di discesa nulli.

La seconda e la terza riflessione rappresentano i giunti di collegamento tra le pezzature: l'andamento delle riflessioni è molto simile a quello visualizzato nel display di un dispositivo reale. L'ultima riflessione, invece, rappresenta l'estremità del cavo aperta.

Poiché l'asse x dell'oscilloscopio rappresenta dei valori temporali, per ottenere la distanza del TDR dalle varie riflessioni bisogna applicare la formula del Transmission Delay TD della linea complessiva, descritta nel paragrafo 5.1. Per ogni riflessione, quindi, è stato posizionato il cursore sinistro in corrispondenza di  $t=0$  e il cursore destro in corrispondenza del punto in cui la riflessione lascia la linea orizzontale del cavo: in questo modo si è sicuri di avere la misura più precisa possibile.

Vengono riportate quindi le riflessioni ottenute nella simulazione:

- 1° giunto:  $TD = 13.649 \mu\text{s}$ ,  $l = \frac{TD \cdot V_{prop}}{2} = \frac{13.649 \cdot 10^{-6} \cdot 1.76 \cdot 10^8}{2} = 1201.11 \text{ m} \cong 1200 \text{ m}$
- 2° giunto:  $TD = 27.284 \mu\text{s}$ ,  $l = \frac{TD \cdot V_{prop}}{2} = \frac{27.284 \cdot 10^{-6} \cdot 1.76 \cdot 10^8}{2} = 2400.99 \text{ m} \cong 2400 \text{ m}$
- Estremità aperta cavo:  $TD = 40.891 \mu\text{s}$ ,  $l = \frac{40.891 \cdot 10^{-6} \cdot 1.76 \cdot 10^8}{2} = 3598.41 \text{ m} \cong 3600 \text{ m}$

Le tre distanze rappresentano rispettivamente la fine della prima pezzatura, la fine della seconda pezzatura e l'estremità del cavo: di conseguenza, le tre riflessioni raffigurano il primo giunto, il secondo giunto e la terminazione aperta della linea.

Per quanto riguarda la modellizzazione dei giunti di collegamento tra le varie pezzature di cavo, non esiste un blocco Simulink dedicato. Di conseguenza, per ricostruire le riflessioni tipiche di un giunto di collegamento per la Media Tensione, è stato necessario introdurre il modello a parametri concentrati della pubblicazione [45]:

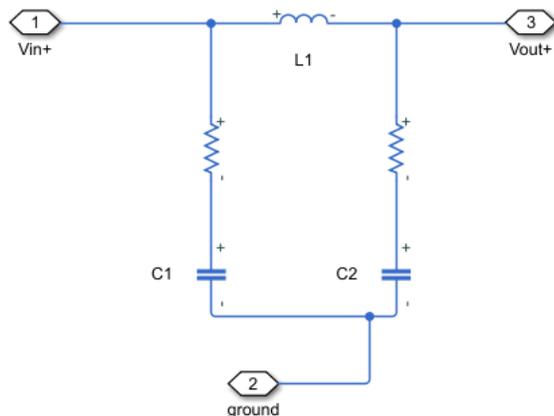


Figura 5.9 - Modello a parametri concentrati del giunto

Il modello del giunto comprende un'induttanza, due capacità e due resistenze, queste ultime rappresentano le perdite su di esso. I valori da inserire nel modello a parametri concentrati vengono desunti dalla pubblicazione:

$$L = 16.50 \text{ nH}, R = 6.5 \Omega, C = 0.40 \text{ pF}$$

Per valutare la validità del modello è necessario comparare le riflessioni ottenute tramite la simulazione con il software e quelle visualizzate in una traccia reale dal TDR:

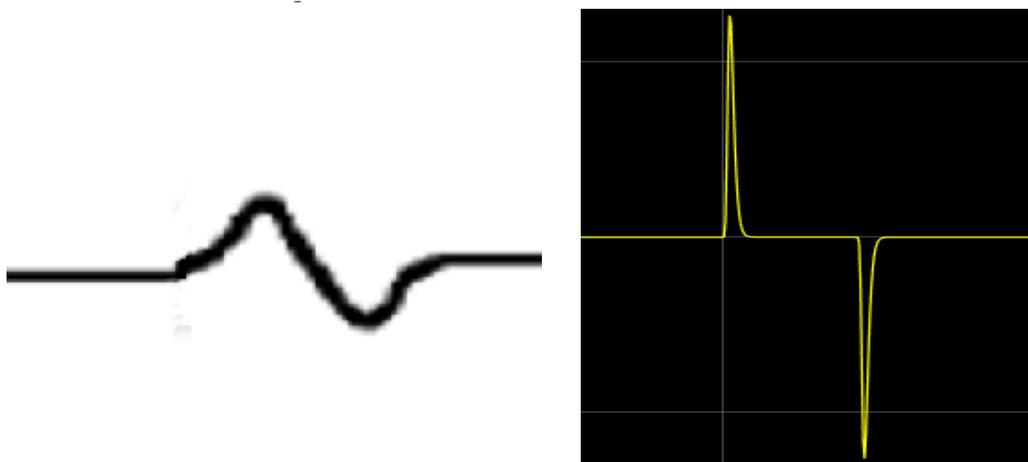


Figura 5.10 – Riflessioni prodotte da un giunto: traccia reale, a sx, e modello Simulink, a dx

La prima riflessione positiva è dovuta al fatto che, nella parte iniziale del giunto, il conduttore e lo schermo metallico sono ad una distanza maggiore da quella standard determinata dallo spessore dell'isolante: ciò porta all'aumento dell'induttanza e, di conseguenza, all'incremento dell'impedenza rispetto a quella caratteristica del cavo. Per lo stesso motivo, la successiva riflessione negativa è dovuta ad una diminuzione dell'impedenza: quando l'impulso lascia il giunto, conduttore e schermo sono di nuovo alla distanza definita dallo spessore del dielettrico e quindi aumenta la capacità causando una riflessione negativa.

Le riflessioni positiva e negativa sono simmetriche se il giunto è ben costruito: dalla Figura 5.10, si può vedere che il modello Simulink così definito rispetta questa caratteristica.

Ritornando, infine, all'analisi della traccia fornita dall'oscilloscopio si può notare come il secondo giunto, nonostante sia settato con gli stessi valori del primo, presenti un'ampiezza delle riflessioni inferiore; allo stesso modo, anche l'estremità aperta del cavo presenta un'ampiezza inferiore rispetto all'impulso di partenza. L'attenuazione in ampiezza delle riflessioni è dovuta al fatto che il modello di cavo scelto considera anche le perdite in linea e che anche il giunto è sede di perdite.

#### **5.4.2 Simulazione del TDR applicato alla linea in cavo con cortocircuito**

Il primo guasto che viene simulato sul modello della linea in cavo è il cortocircuito. Questo guasto, non molto frequente, avviene quando il conduttore e lo schermo metallico vengono in contatto tra loro; la causa principale della fusione dell'isolante è l'elevatissima corrente che percorre il cavo. Per la localizzazione di questi guasti si utilizza il TDR che è in grado di visualizzare sulla traccia del display il punto in cui è avvenuto il cortocircuito. Per questo motivo, è stato implementato il modello del cavo ideale come in Figura 5.7 ed è stata aggiunta la resistenza che modella il cortocircuito.

Il guasto si suppone sia avvenuto ad una distanza di 2150 m dal TDR; nel modello Simulink è quindi necessario dividere la pezzatura di cavo centrale in due parti (una da 950 m e una da 250 m) e settare nuovamente i parametri di queste due tratte.

La resistenza che simula il cortocircuito è stata posta di valore pari a 2  $\Omega$ .

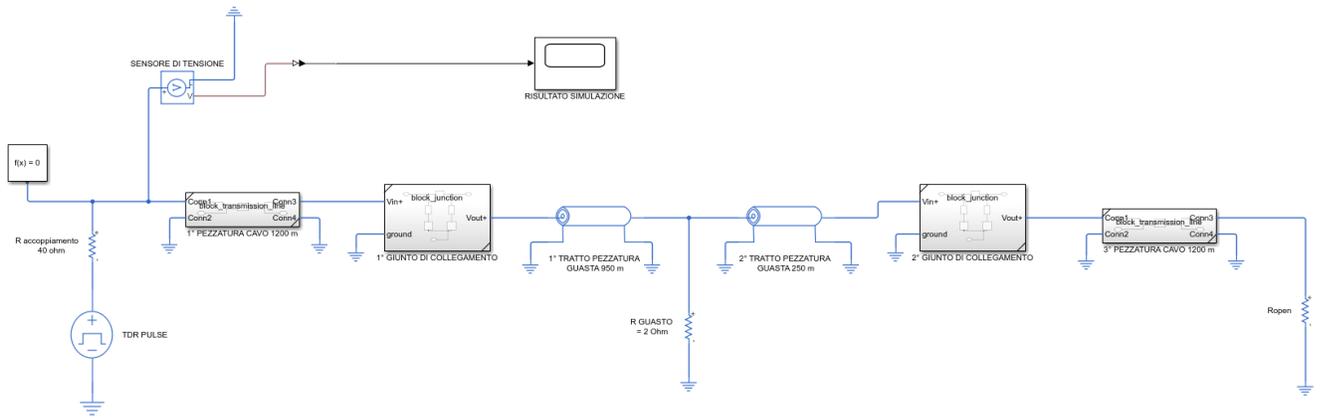


Figura 5.11 - Modello della linea in cavo con cortocircuito

La simulazione ha prodotto il seguente risultato:

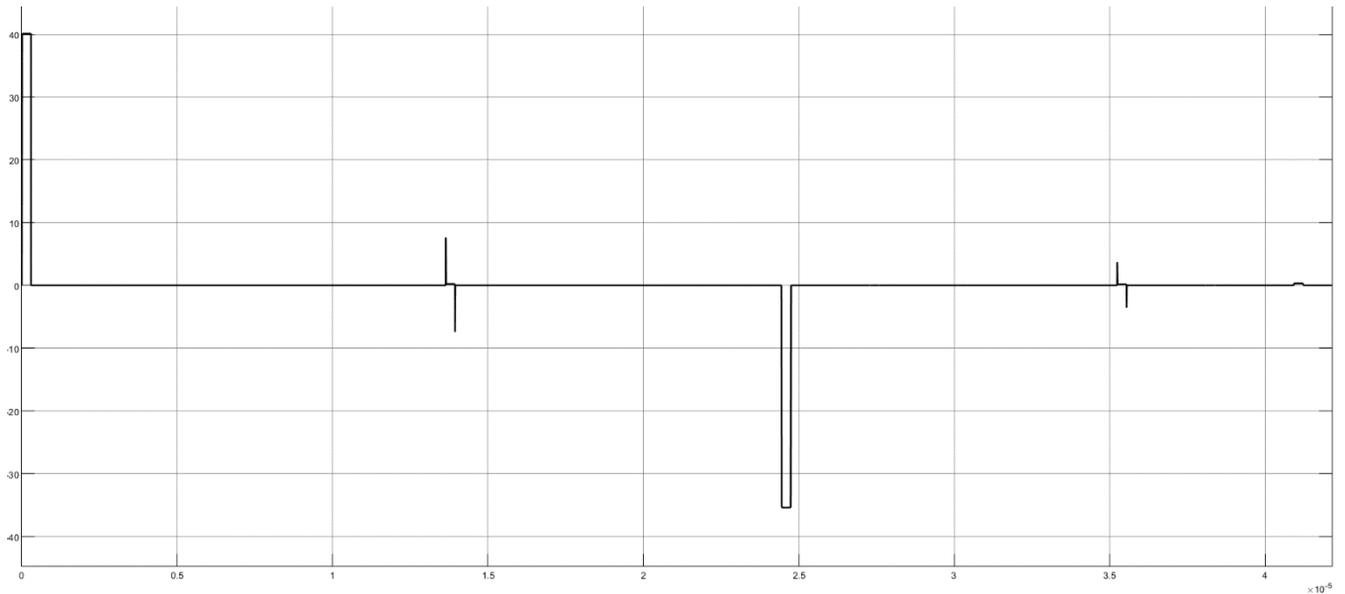


Figura 5.12 – Risultato della simulazione con guasto da cortocircuito

Il TDR è stato in grado di rilevare il cortocircuito: si nota infatti la riflessione negativa tipica di questo guasto, dovuta al fatto che in quel punto l'impedenza è inferiore rispetto all'impedenza caratteristica del cavo.

Bisogna quindi verificare che la riflessione negativa sia avvenuta alla distanza di 2150 m, come implementato nel modello Simulink. Posizionando opportunamente il cursore nel punto in cui avviene la riflessione, si ricava un valore temporale di 24.441  $\mu$ s: è necessario, quindi, tradurre il valore in termini di distanza dal TDR applicando la formula del Transmission Delay:

$$l = \frac{TD \cdot V_{prop}}{2} = \frac{24.441 \cdot 10^{-6} \cdot 1.76 \cdot 10^8}{2} = 2150.81 \text{ m} \cong 2150 \text{ m}$$

Il TDR ha rilevato il cortocircuito poiché la riflessione negativa corrisponde al punto in cui è stato posizionato il guasto nel modello utilizzato per la simulazione.

### **5.4.3 Simulazione del TDR applicato alla linea in cavo con circuito aperto**

Il circuito aperto è un guasto che avviene con una certa frequenza nei cavi interrati: il conduttore viene separato in due parti e perciò la linea in cavo risulta essere interrotta.

Le cause che portano a questa tipologia di guasto sono molteplici; nella maggior parte dei casi, la divisione in due parti del cavo è determinata da un errore dell'operatore durante uno scavo effettuata con un mezzo di movimento terra. Un altro fattore che può dar luogo ad un circuito aperto è l'estrazione indesiderata del cavo da un giunto: per qualche difetto di costruzione il conduttore si sfilava dal giunto e in quel punto la linea si interrompe.

Per simulare questo guasto con Simulink è necessario, quindi, analizzare separatamente entrambi i casi. Il modello utilizzato nella simulazione è uguale a quello dei due casi precedenti; il TDR, nonostante il circuito aperto sia un guasto ad alta resistenza, è in grado di rilevarlo.

Per modellizzare il circuito aperto, come introdotto nel Paragrafo 5.3, viene utilizzata una resistenza in serie alla linea in cavo di valore pari a 500 G $\Omega$ .

### 1° caso: Linea in cavo con circuito aperto a 2650 m

Si suppone che il guasto sia avvenuto ad una distanza di 2650 m dal TDR posto ad inizio linea. È necessario quindi dividere l'ultima pezzatura della linea in due cavi, lunghi rispettivamente 250 m e 950 m, e settare i parametri dei due blocchi; tra i due cavi viene interposta la resistenza che modella il circuito aperto.

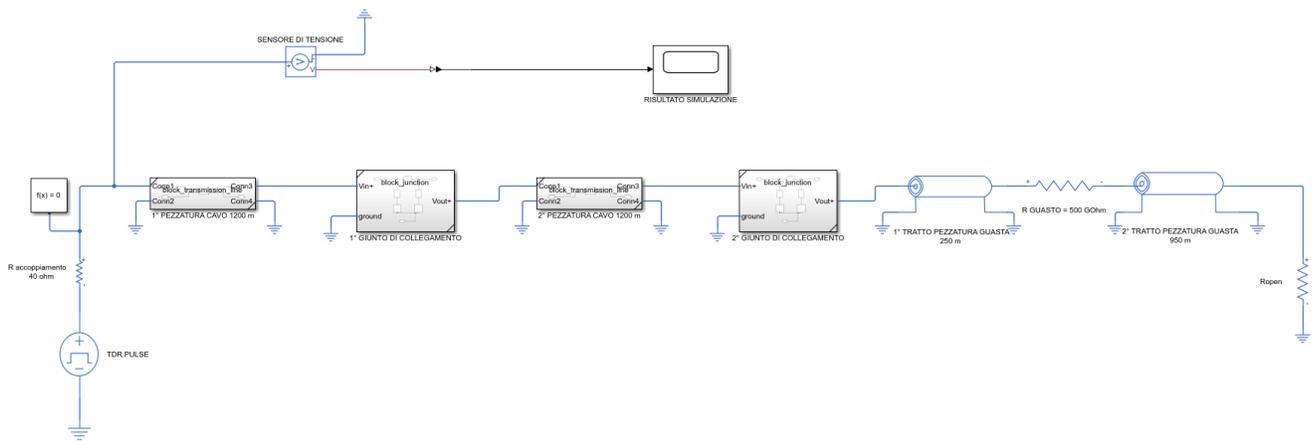


Figura 5.13 - Modello della linea in cavo con circuito aperto

Il risultato della simulazione è:

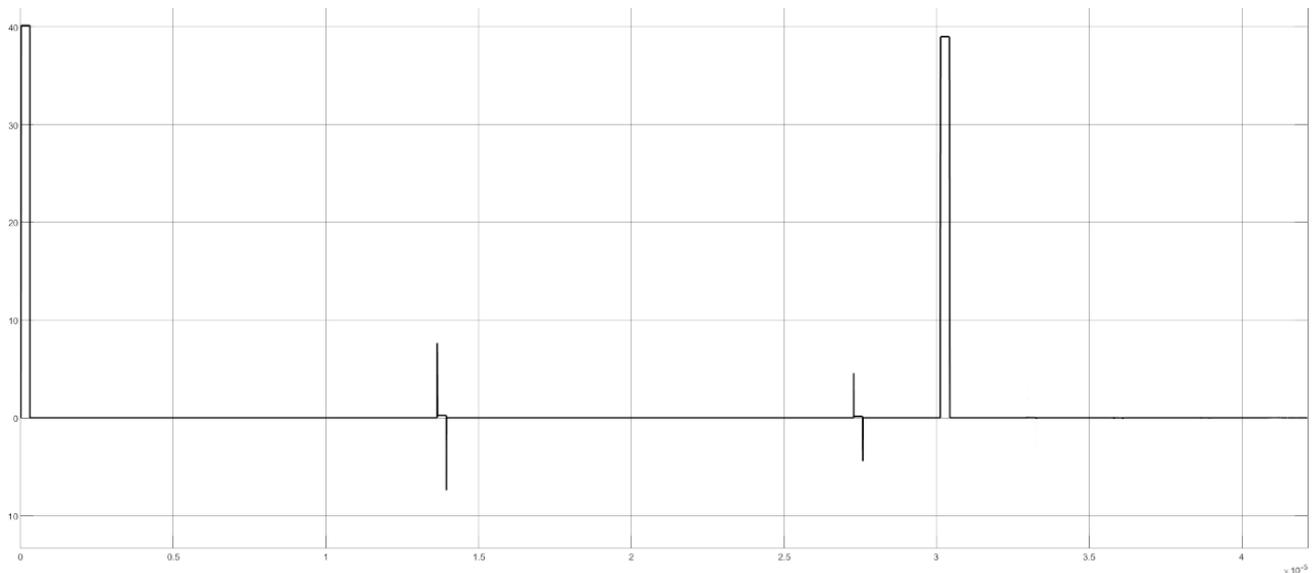


Figura 5.14 – Risultato della simulazione con guasto da circuito aperto

A valle del secondo giunto il TDR ha rilevato una riflessione positiva, tipica di un guasto ad alta resistenza come il circuito aperto.

Posizionando il cursore in corrispondenza della riflessione, viene rilevato un valore temporale di 30.099  $\mu$ s; applicando l'equazione del Transmission Delay:

$$l = \frac{TD \cdot V_{prop}}{2} = \frac{30.099 \cdot 10^{-6} \cdot 1.76 \cdot 10^8}{2} = 2648.7 \text{ m} \cong 2650 \text{ m}$$

La distanza del TDR dalla riflessione positiva è la medesima supposta ad inizio simulazione e ciò significa che lo strumento è stato in grado di rilevare il punto in cui è avvenuta l'interruzione del cavo.

### 2° caso: Estrazione indesiderata del cavo da un giunto

Si suppone, in questo caso, che la seconda pezzatura della linea in cavo si sfilì dal giunto; per modellizzare su Simulink questo evento è sufficiente inserire la resistenza che rappresenta il circuito aperto tra il blocco del cavo e il secondo giunto:

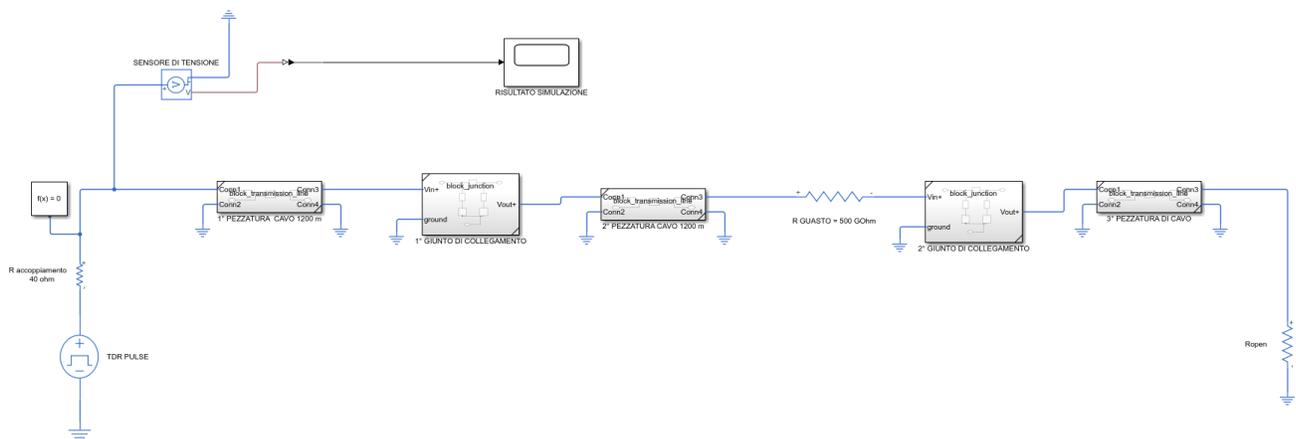


Figura 5.15 – Modello della linea con estrazione indesiderata del cavo dal giunto

La simulazione ha prodotto la seguente traccia nell'oscilloscopio:

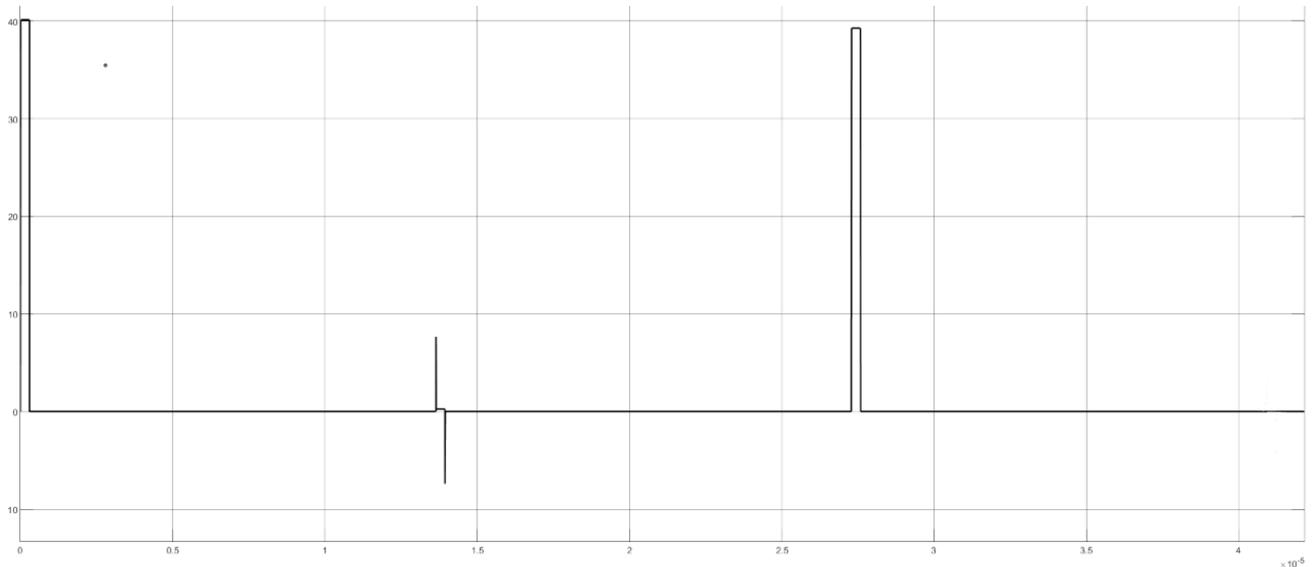


Figura 5.16 – Risultato della simulazione con estrazione indesiderata del cavo dal giunto

Nella Figura 5.16 si notano l'impulso iniziale del TDR, la riflessione positiva e negativa del primo giunto e un'ampia riflessione positiva. È necessario, tramite il corretto posizionamento del cursore, determinare il tempo che intercorre tra quest'ultima e il TDR; la riflessione positiva viene rilevata dopo un tempo pari a 27.284  $\mu$ s che tradotta in distanza tramite l'equazione del Transmission Delay diventa:

$$l = \frac{TD \cdot V_{prop}}{2} = \frac{27.284 \cdot 10^{-6} \cdot 1.76 \cdot 10^8}{2} = 2400.99 \text{ m} \cong 2400 \text{ m}$$

La riflessione positiva a 2400 m indica che il guasto si trova nel punto di transizione tra la fine della seconda pezzatura di cavo e il secondo giunto.

Il modello della linea rappresentato in Figura 5.15 è quindi in grado di rilevare la riflessione positiva causata dallo sfilamento del cavo dal giunto.

#### 5.4.4 Simulazione del TDR e dell'ARM applicati alla linea in cavo con pinhole

I guasti caratterizzati da valori altamente resistivi, come il pinhole, non sono facilmente individuabili applicando solamente il TDR. Infatti, gli impulsi a bassa tensione trasmessi dallo strumento alla linea in cavo non sono in grado di provocare una riflessione marcata sul display tale da consentire una agevole pre-localizzazione del guasto.

Per questo motivo, in presenza di questi guasti viene utilizzato un metodo più efficiente, l'Arc Reflection Method, che combina assieme due tecnologie: quella del generatore di impulsi ad alta tensione, in grado di provocare l'arco elettrico temporaneo sul guasto, e quella del TDR che rileva il cortocircuito provvisorio e permette di determinare la posizione del guasto con una buona precisione.

Vengono comunque effettuate entrambe le simulazioni per procedere con un confronto tra le due tecnologie e mettere in evidenza la maggiore validità della seconda.

Si applica quindi inizialmente il solo TDR; si suppone che, ad una distanza di 1930m dall'inizio del cavo, si trovi il pinhole. Per modellizzarlo su Simulink è necessario suddividere la pezzatura centrale in due tratte di cavo, rispettivamente lunghe 730 e 470 m, e interporre tra le due il modello del pinhole introdotto nel paragrafo 5.3.3.

In questo caso però, il pinhole è stato rappresentato solamente da una capacità poiché la parte resistiva viene inserita direttamente tra i parametri del condensatore nel software.

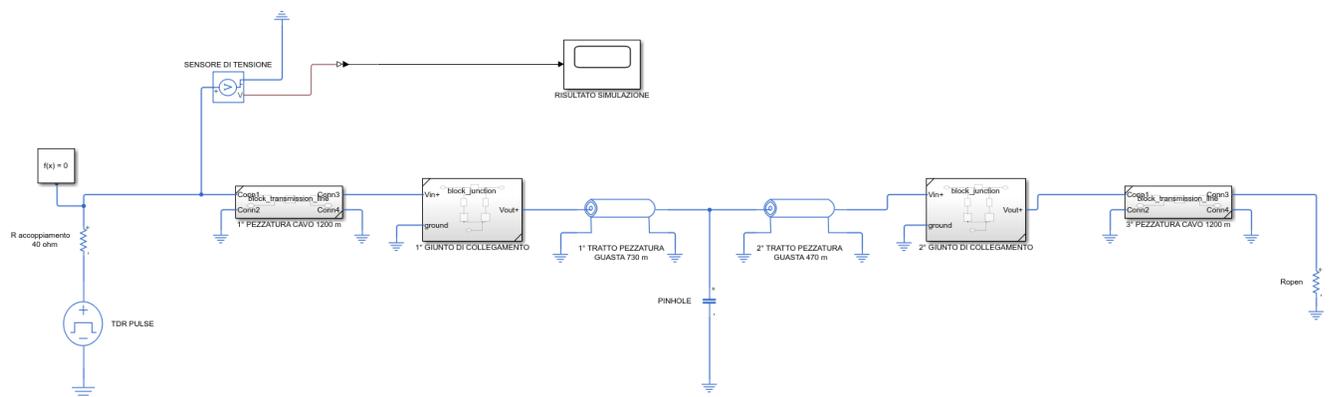


Figura 5.17 – Modello del TDR applicato alla linea in cavo con pinhole

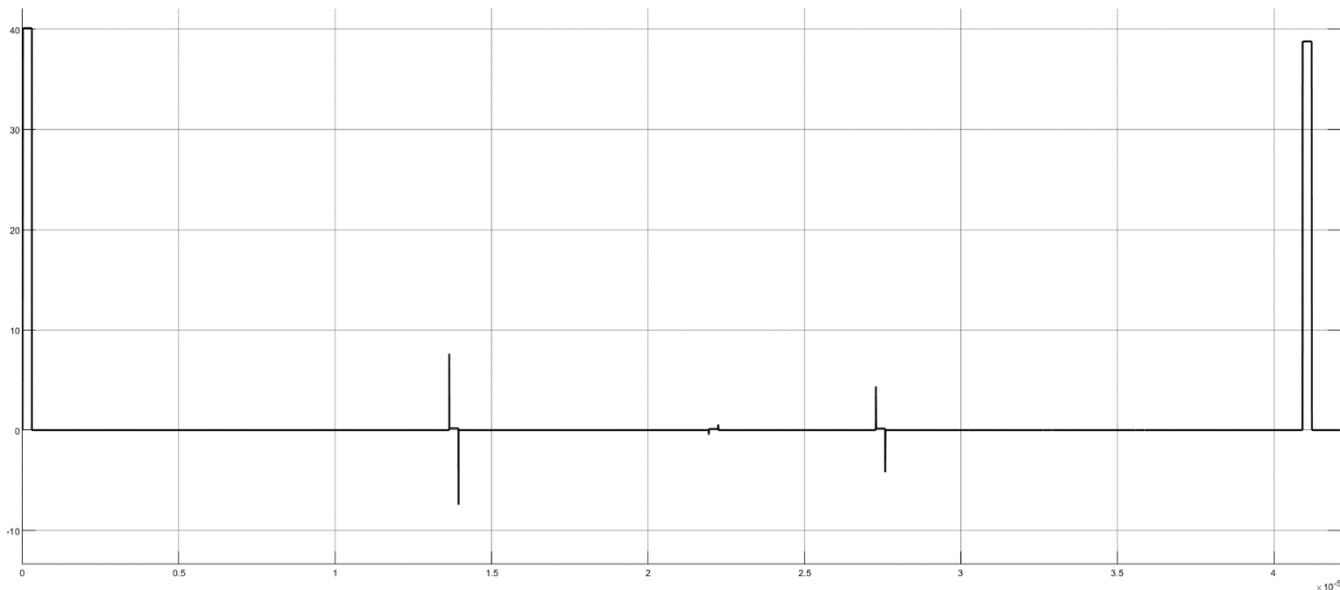


Figura 5.18 – Risultato della simulazione con TDR applicato a cavo con pinhole

Tra i due giunti viene rilevata una piccola riflessione; posizionando correttamente il cursore in corrispondenza di essa si ottiene uno scostamento temporale di  $21.929 \mu\text{s}$  che, convertito in distanza dal TDR, porta al seguente risultato:

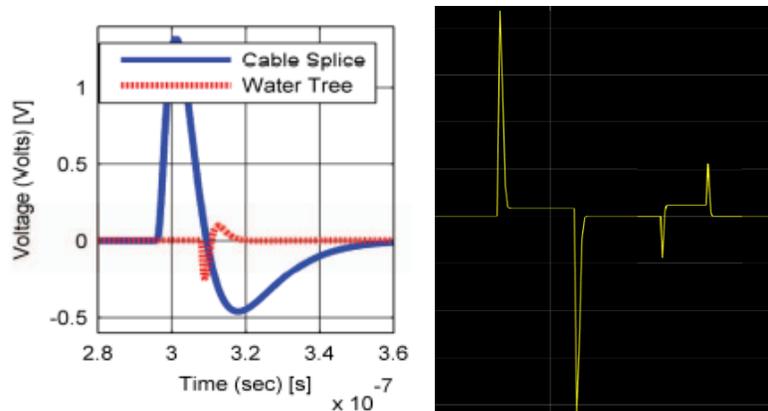
$$l = \frac{TD \cdot V_{prop}}{2} = \frac{21.929 \cdot 10^{-6} \cdot 1.76 \cdot 10^8}{2} = 1929.75 \text{ m} \cong 1930 \text{ m}$$

Il TDR è stato comunque in grado di rilevare il guasto nonostante la riflessione del pinhole non sia particolarmente marcata. Nella pubblicazione [23], infatti, viene spiegato dettagliatamente che, tramite il Time Domain Reflectometer, si riesce a localizzare anche delle piccolissime riflessioni come quelle del pinhole. Queste non vengono confuse con i giunti per due motivi:

- L'ampiezza della riflessione del pinhole è molto più piccola rispetto a quella del giunto. Il buco nell'isolante, infatti, è grande qualche mm mentre i giunti sono lunghi anche qualche decina di cm;
- Alle alte frequenze del TDR, il pinhole è un guasto di natura capacitiva e il giunto di tipo induttivo.

Ne consegue che la prima riflessione del giunto sarà positiva, mentre quella del pinhole sarà negativa: il punto dov'è avvenuto il guasto, data la sua natura capacitiva alle alte frequenze, ha un valore dell'impedenza inferiore rispetto a quello dell'impedenza caratteristica del cavo.

La comparazione tra le due riflessioni viene riportata nella seguente Figura 5.19:



*Figura 5.19 – Comparazione tra le riflessioni del giunto e del pinhole della pubblicazione e del modello Simulink*

L'applicazione del solo TDR se da un lato consente di determinare la posizione del guasto ad alta resistenza, dall'altro non permette di visualizzare in modo marcato la riflessione corrispondente.

Per questo motivo viene quindi applicato l'Arc Reflection Method ai guasti da pinhole; per procedere ad un giusto confronto con la simulazione sopracitata, si utilizza lo stesso modello adottato nel caso precedente supponendo quindi il guasto a 1930 m dal TDR.

L'implementazione di questa tecnologia sul software Simulink risulta essere più complessa poiché l'ARM è composto da due fasi distinte, una in successione all'altra.

Nella prima fase, un generatore di impulsi DC ad alta tensione deve essere in grado di provocare un arco elettrico sul guasto nella linea in cavo; nel momento esatto in cui avviene la scarica elettrica, il TDR posto ad inizio linea deve trasmettere al cavo gli impulsi a bassa tensione per permettere di individuare la posizione del cortocircuito temporaneo creatosi a seguito dell'arco elettrico.

Il modello dell'ARM applicato alla linea in cavo con pinhole è rappresentato nella seguente Figura 5.20:

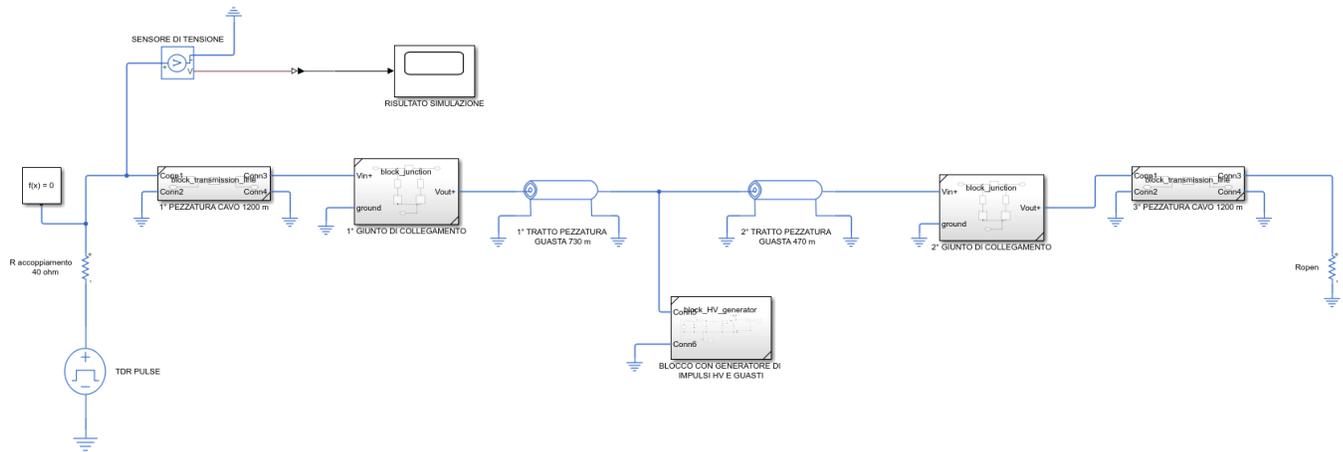


Figura 5.20 – Modello dell'ARM applicato alla linea in cavo con pinhole

Lo schema Simulink è lo stesso di Figura 5.18 con l'aggiunta di un blocco "HV generator":

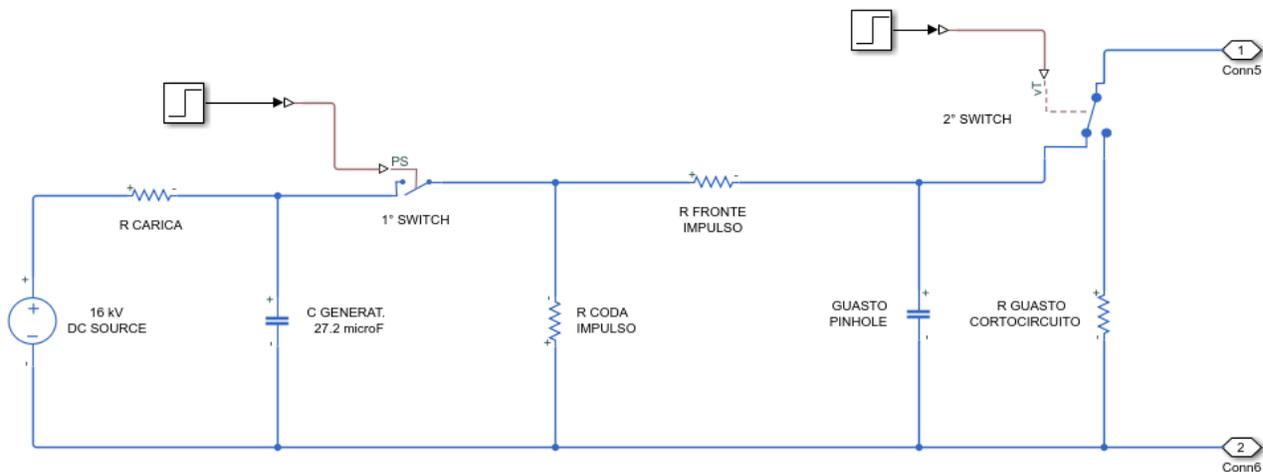


Figura 5.21 – Blocco Simulink "HV generator"

Il blocco "HV generator" implementa nel software un generatore DC di impulsi ad alta tensione in grado di provocare la scarica elettrica sul pinhole. Il modello del generatore di impulsi ad alta tensione utilizzato prende spunto dalla pubblicazione [46] con l'aggiunta di un interruttore temporizzato a valle di esso che modella il passaggio da pinhole a cortocircuito a seguito della scarica elettrica.

I valori inseriti nel modello sono quelli del modello reale della Megger “SWG 1750 CD” [47], utilizzato per la pre-localizzazione dei guasti ad alta resistenza nei cavi di Media Tensione.

Un condensatore da 27.2  $\mu\text{F}$  viene caricato alla tensione del generatore DC pari a 16 kV tramite una opportuna resistenza di carica. Quando il condensatore è completamente carico, il primo interruttore si chiude e viene scaricata a valle tutta la sua energia provocando la scarica elettrica sul carico rappresentato dal pinhole (definito da una capacità come in precedenza).

Poiché l’arco elettrico non è altro che un cortocircuito temporaneo, dopo un tempo pari a 10  $\mu\text{s}$  un secondo interruttore si chiude permettendo la trasformazione da pinhole a cortocircuito (rappresentato da una resistenza di 2  $\Omega$ ). Nello stesso istante in cui si ha la chiusura del secondo interruttore, il TDR del modello Simulink viene attivato per rilevare il cortocircuito temporaneo.

Le resistenze a valle del primo interruttore servono a modulare l’impulso in modo tale che assomigli il più possibile all’impulso 1.2/50  $\mu\text{s}$  definito dagli standard IEC. La resistenza che regola il fronte dell’impulso, settata pari a 10  $\Omega$ , serve per portare in brevissimo tempo l’impulso al valore di picco pari a 16 kV; l’altra resistenza, invece, regola la coda dell’impulso in modo tale che, dopo circa 50  $\mu\text{s}$ , esso abbia un valore di tensione pari al 50% del valore di picco (quindi 8 kV). Questa resistenza è stata definita pari a 50 M $\Omega$ .

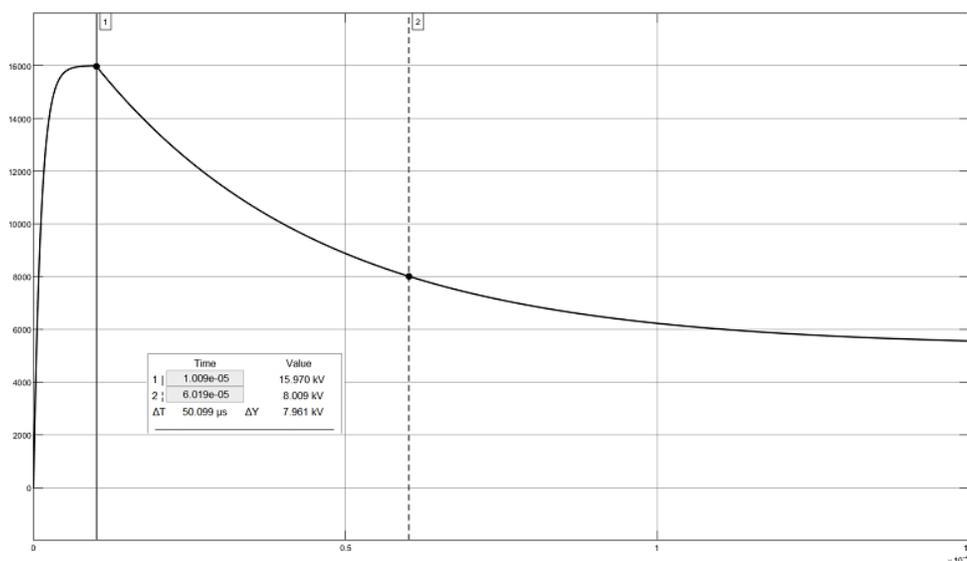


Figura 5.22 – Impulso trasmesso dal blocco HV generator al pinhole

Poiché il secondo interruttore consente la trasformazione da pinhole a cortocircuito, viene dunque attivato il TDR per verificare se è possibile determinare la posizione del guasto. La simulazione ha prodotto il seguente risultato:

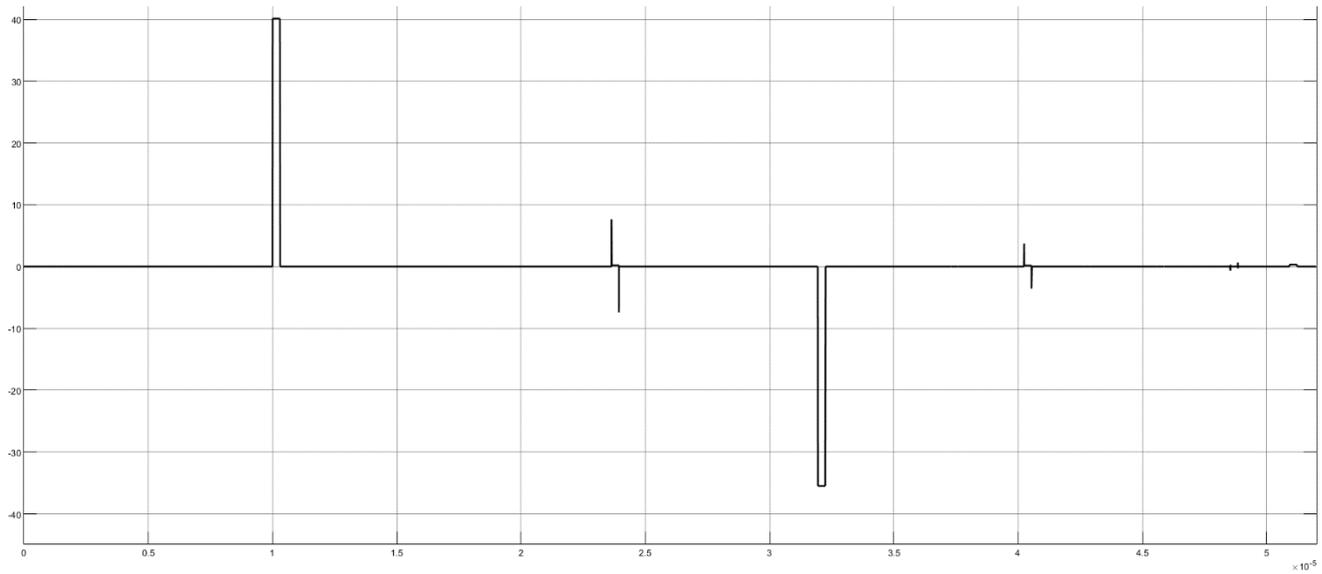


Figura 5.23 – Risultato della simulazione con ARM applicato a cavo con pinhole

Il TDR trasmette il suo impulso di ampiezza pari a 40 V dopo un tempo di delay di 10  $\mu\text{s}$ : questo valore temporale corrisponde al ritardo nella chiusura del secondo interruttore dall'istante in cui è stata provocata la scarica elettrica sul guasto.

Posizionando, quindi, il primo cursore in corrispondenza di  $t = 10 \mu\text{s}$  e il secondo cursore nel punto in cui si ha la riflessione negativa viene rilevato un valore di 21.925  $\mu\text{s}$ ; tradotto in distanza dal TDR con la solita formula questo valore è pari a:

$$l = \frac{TD \cdot V_{prop}}{2} = \frac{21.925 \cdot 10^{-6} \cdot 1.76 \cdot 10^8}{2} = 1929.4 \text{ m} \cong 1930 \text{ m}$$

Il cortocircuito è stato dunque rilevato ad una distanza di 1930 m, come supposto ad inizio simulazione, con una riflessione molto più marcata rispetto al risultato ottenuto con la sola applicazione del TDR.

# Conclusioni

L'obiettivo del presente lavoro di Tesi è quello di descrivere le caratteristiche e il principio di funzionamento delle principali tecnologie impiegate per localizzare i guasti nei cavi interrati di Media Tensione.

Il cortocircuito, il circuito aperto e il pinhole sono i principali guasti che possono interessare la linea in cavo e interromperne il normale funzionamento; dopo averli illustrati singolarmente, è stato necessario introdurre la procedura normalmente utilizzata dalle aziende che operano nel settore per rilevare il punto di guasto. Il processo per determinarne la corretta posizione si compone di tre step da seguire in questo preciso ordine: analisi, pre-localizzazione e localizzazione precisa del guasto. I dati forniti dagli strumenti utilizzati nel procedimento spesso non sono di facile interpretazione ed è, quindi, necessaria una buona dose di esperienza ed abilità dell'operatore per ridurre il più possibile il tempo di disservizio e determinare nel modo più efficiente possibile la posizione del guasto nel cavo interrato. Per distinguere le varie tecnologie presenti in commercio, per ognuna di esse è stata indicata l'accuratezza sulla misura fornita e il campo di applicazione: le più utilizzate, affidabili ed efficienti sono la tecnica del Time Domain Reflectometry e l'Arc Reflection Method. Per questo motivo, queste due tecnologie sono state modellizzate e simulate in ambiente MATLAB/Simulink. In accordo con la STE Energy S.r.l con cui è stato sviluppato l'elaborato, i tre guasti sono stati simulati su una linea in cavo di Media Tensione, composta da tre pezzature identiche da 1200 m l'una e unite da due giunti.

Come da teoria, quindi, alla linea in cavo sana, con cortocircuito e con circuito aperto, la simulazione per determinare il punto di guasto è stata condotta tramite l'applicazione del TDR; nel caso della linea che presenta il guasto da pinhole, invece, viene utilizzato l'Arc Reflection Method. La simulazione condotta tramite l'Arc Reflection Method è stata la più complessa perché ha richiesto lo sviluppo di un modello che tratti congiuntamente il Time Domain Reflectometer e il generatore di impulsi ad alta tensione.

La principale difficoltà nell'implementazione del modello è stata la corretta sincronizzazione tra i due dispositivi in modo tale che il TDR generi i suoi impulsi negli istanti immediatamente

successivi alla scarica elettrica prodotta dal generatore di impulsi ad alta tensione permettendo la pre-localizzazione dei guasti ad alta resistenza con un grado di accuratezza molto elevato.

Con il presente elaborato, quindi, sono stati implementati sul software dei modelli in grado di determinare in modo efficiente la posizione dei vari guasti simulati sulla linea in cavo; ciò è stato possibile nonostante la letteratura presente in rete sia piuttosto scarsa relativamente alla modellizzazione del pinhole e dell'Arc Reflection Method.

Un possibile sviluppo futuro potrebbe riguardare l'implementazione su Simulink delle altre tecnologie presenti in commercio e dei guasti con una casistica talmente bassa da non essere stati considerati nel presente lavoro di Tesi.

# Appendice: Tabelle dei cavi

Vengono di seguito riportate le tabelle dei cavi MT elencati al Capitolo 2, con i rispettivi dati costruttivi e le portate in aria e in posa interrata [11][12]:

## \*Cavo RG7H1R

### Unipolare - conduttore di rame / Single core - copper conductor - RG7H1R

sezione nominale	diametro indicativo conduttore	spessore isolante	diametro esterno massimo	peso indicativo del cavo	raggio minimo di curvatura
conductor cross-section	approximate conductor diameter	insulation thickness	maximum outer diameter	approximate weight	minimum bending radius
(mm <sup>2</sup> )	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(mm)

sezione nominale	posa in aria		posa interrata			
	in piano	a trifoglio	in piano p=1 °C m/W	a trifoglio	in piano p=2 °C m/W	a trifoglio
conductor cross-section	open air installation flat	trefoil	flat p=1 °C m/W	trefoil	flat p=2 °C m/W	trefoil
(mm <sup>2</sup> )	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)

#### Dati costruttivi / Construction charact. - 12/20 kV

35	7,0	5,5	27,7	940	360
50	8,2	5,5	29,0	1080	380
70	9,9	5,5	31,0	1330	400
95	11,6	5,5	33,1	1640	430
120	13,1	5,5	34,6	1920	450
150	14,4	5,5	36,0	2200	470
185	16,1	5,5	37,8	2580	490
240	18,5	5,5	40,2	3160	530
300	21,1	5,5	42,9	3800	560
400	23,9	5,5	45,7	4660	600
500	27,1	5,5	49,7	5810	660
630	30,7	5,5	54,2	7260	720

#### Caratt. elettriche / Electrical charact. - 12/20 kV

35	213	190	189	182	146	141
50	255	228	224	216	172	166
70	320	284	274	265	209	202
95	390	346	328	316	249	241
120	450	399	373	360	282	273
150	510	451	416	402	313	304
185	585	520	471	456	354	344
240	690	614	544	528	407	397
300	790	705	611	595	456	446
400	910	816	688	673	512	503
500	1050	944	776	761	575	568
630	1190	1087	873	856	645	637

## \*Cavo RG7H10R

### Unipolare - conduttore di rame / Single core - copper conductor - RG7H1R

sezione nominale	diametro indicativo conduttore	spessore isolante	diametro esterno massimo	peso indicativo del cavo	raggio minimo di curvatura
conductor cross-section	approximate conductor diameter	insulation thickness	maximum outer diameter	approximate weight	minimum bending radius
(mm <sup>2</sup> )	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(mm)

sezione nominale	posa in aria		posa interrata			
	in piano	a trifoglio	in piano p=1 °C m/W	a trifoglio	in piano p=2 °C m/W	a trifoglio
conductor cross-section	open air installation flat	trefoil	flat p=1 °C m/W	trefoil	flat p=2 °C m/W	trefoil
(mm <sup>2</sup> )	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)

#### Dati costruttivi / Construction charact. - 12/20 kV

35	7,0	5,5	54,7	3790	720
50	8,2	5,5	57,4	4360	760
70	9,9	5,5	62,0	5390	820
95	11,6	5,5	65,9	6470	870
120	13,1	5,5	69,3	7470	920
150	14,4	5,5	72,6	8540	960
185	16,1	5,5	76,8	10020	1020
240	18,5	5,5	82,0	12090	1090
300	21,1	5,5	88,7	14620	1180

#### Caratt. elettriche / Electrical charact. - 12/20 kV

35	177		175		138	
50	209		207		162	
70	260		253		198	
95	315		300		234	
120	362		342		266	
150	408		381		296	
185	468		431		335	
240	550		500		387	
300	630		561		435	

**\*Cavo ARG7H1R**

**Caratteristiche tecniche/Technical characteristics**

**U max: 24 kV**

Formazione Size	Ø indicativo conduttore Approx. conduct. Ø	Spessore medio isolante Average insulation thickness	Ø esterno max Max outer Ø	Peso indicativo cavo Approx. cable weight	Portata di corrente Current rating			
					A			
					in aria In air		interrato* buried*	
n° x mm²	mm	mm	mm	kg/km	a trifoglio trefoil	in piano flat	a trifoglio trefoil	in piano flat
1 x 35	7,0	5,5	27,7	740,0	144,0	152,0	142,0	149,0
1 x 50	8,1	5,5	29,0	820,0	174,0	183,0	168,0	177,0
1 x 70	9,7	5,5	30,5	940,0	218,0	229,0	207,0	218,0
1 x 95	11,4	5,5	33,0	1070,0	266,0	280,0	247,0	260,0
1 x 120	12,9	5,5	34,8	1250,0	309,0	325,0	281,0	296,0
1 x 150	14,3	5,5	36,2	1350,0	352,0	371,0	318,0	335,0
1 x 185	16,0	5,5	37,6	1550,0	406,0	427,0	361,0	380,0
1 x 240	18,3	5,5	40,2	1850,0	483,0	508,0	418,0	440,0
1 x 300	21,0	5,5	43,0	2100,0	547,0	576,0	472,0	497,0
1 x 400	23,6	5,5	45,8	2500,0	640,0	674,0	543,0	572,0
1 x 500	26,5	5,5	50,0	3000,0	740,0	779,0	621,0	654,0
1 x 630	30,1	5,5	54,0	3600,0	862,0	907,0	70,6	743,0

\*Resistività termica del terreno 100°C cm/W  
\* Ground thermal resistivity 100°C cm/W

**Caratteristiche elettriche/Electrical characteristics**

Formazione Size	Resistenza elettrica a 20°C Max. electrical resistance at 20°C	Resistenza apparente a 90°C e 50Hz Conductor apparent resistance at 90°C and 50Hz		Reattanza di fase Phase reactance		Capacità a 50Hz Capacity at 50Hz
		a trifoglio trefoil	in piano flat	a trifoglio trefoil	in piano flat	
		Ω/Km	Ω/Km	Ω/Km	Ω/Km	
n° x mm²	Ω/Km	Ω/Km	Ω/Km	Ω/Km	Ω/Km	µF/km
1 x 35	0,868	1,113	1,113	0,14	0,20	0,17
1 x 50	0,641	0,822	0,822	0,13	0,19	0,18
1 x 70	0,443	0,568	0,568	0,13	0,19	0,21
1 x 95	0,320	0,411	0,411	0,12	0,18	0,23
1 x 120	0,253	0,325	0,325	0,12	0,18	0,25
1 x 150	0,206	0,265	0,265	0,11	0,17	0,27
1 x 185	0,164	0,211	0,211	0,11	0,17	0,29
1 x 240	0,125	0,161	0,161	0,11	0,16	0,32
1 x 300	0,100	0,130	0,129	0,10	0,16	0,35
1 x 400	0,0778	0,102	0,101	0,099	0,16	0,39
1 x 500	0,0605	0,0801	0,0794	0,096	0,15	0,43
1 x 630	0,0469	0,0635	0,0625	0,093	0,15	0,49

\*Cavo ARG7H10R

**Caratteristiche tecniche/Technical characteristics**  
**U max: 24 kV**

Formazione Size	Ø indicativo conduttore Approx. conduct. Ø	Spessore medio isolante Average insulation thickness	Ø esterno max Max outer Ø	Peso indicativo cavo Approx. cable weight	Portata di corrente Current rating	
					A	
n° x mm <sup>2</sup>	mm	mm	mm	kg/km	in aria / In air	interrato* / buried*
3 X 25	6,10	5,5	48,10	2950,0	125,0	115,0
3 x 35	7,0	5,5	50,40	3254,0	150,0	145,0
3 x 50	8,1	5,5	52,80	3595,0	175,0	175,0
3 x 70	9,7	5,5	56,45	4168,0	220,0	210,0
3 x 95	11,4	5,5	60,70	4841,0	265,0	255,0
3 x 120	12,9	5,5	64,95	5617,0	305,0	290,0
3 x 150	14,3	5,5	68,05	6120,0	345,0	320,0
3 x 185	16,0	5,5	72,20	7029,0	406,0	360,0
3 x 240	18,3	5,5	78,90	8404,0	470,0	420,0
3 x 300	21,0	5,5	83,95	9588,0	590,0	500,0
3 X 400	23,6	5,5	91,40	11853,0	640,0	543,0

\*Resistività termica del terreno 100°C cm/W

\* Ground thermal resistivity 100°C cm/W

**Caratteristiche elettriche/Electrical characteristics**

Formazione Size	Resistenza elettrica a 20°C	Resistenza apparente a 90°C e 50Hz	Reattanza di fase	Capacità a 50Hz
	Max. electrical resistance at 20°C	Conductor apparent resistance at 90°C and 50Hz	Phase reactance	Capacity at 50Hz
n° x mm <sup>2</sup>	Ω/Km	Ω/Km	Ω/Km	µF/km
3 X 25	1,20	1,222	0,21	0,17
3 x 35	0,868	1,113	0,20	0,17
3 x 50	0,641	0,822	0,19	0,18
3 x 70	0,443	0,568	0,19	0,21
3 x 95	0,320	0,411	0,18	0,23
3 x 120	0,253	0,325	0,18	0,25
3 x 150	0,206	0,265	0,17	0,27
3 x 185	0,164	0,211	0,17	0,29
3 x 240	0,125	0,161	0,16	0,32
3 x 300	0,100	0,130	0,16	0,35
3 X 400	0,0778	0,102	0,16	0,39

\*Cavo ARE4H1R

Caratteristiche tecniche/Technical characteristics

U max: 24 kV

Formazione Size	Ø indicativo conduttore Approx. conduct. Ø	Ø indicativo isolante Approx. insulation Ø	Ø esterno max Max outer Ø	Peso indicativo cavo Approx. cable weight	Portata di corrente Current rating			
					A			
					in aria In air		interrato* buried*	
n° x mm <sup>2</sup>	mm	mm	mm	kg/km	a trifoglio trefoil	in piano flat	a trifoglio trefoil	in piano flat
1 x 35	7,1	18,70	26,2	590,0	154,0	185,0	129,0	134,0
1 x 50	8,2	19,80	27,4	650,0	184,0	222,0	152,0	157,0
1 x 70	9,9	21,50	29,2	750,0	230,0	278,0	186,0	192,0
1 x 95	11,4	23,00	31,0	880,0	280,0	338,0	221,0	229,0
1 x 120	13,1	24,70	32,8	1010,0	324,0	391,0	252,0	260,0
1 x 150	14,4	26,00	34,5	1150,0	368,0	440,0	281,0	288,0
1 x 185	16,2	27,80	36,4	1290,0	424,0	504,0	317,0	324,0
1 x 240	18,4	30,00	38,9	1520,0	502,0	593,0	367,0	373,0
1 x 300	20,7	32,25	41,6	1760,0	577,0	677,0	414,0	419,0
1 x 400	23,6	35,20	44,9	2253,0	673,0	769,0	470,0	466,0
1 x 500	26,5	38,10	48,3	2580,0	781,0	890,0	550,0	540,0
1 x 630	30,2	41,80	52,4	3110,0	909,0	1030,0	710,0	700,0

\*Resistività termica del terreno 100°C cm/W

\* Ground thermal resistivity 100°C cm/W

Caratteristiche elettriche/Electrical characteristics

Formazione Size	Resistenza elettrica a 20°C Max. electrical resistance at 20°C	Resistenza apparente a 90°C e 50Hz Conductor apparent resistance at 90°C and 50Hz		Reattanza di fase Phase reactance		Capacità a 50Hz Capacity at 50Hz
		a trifoglio trefoil	in piano flat	a trifoglio trefoil	in piano flat	
		Ω/Km	Ω/Km	Ω/Km	Ω/Km	
1 x 35	0,868	1,113	1,113	0,14	0,15	0,170
1 x 50	0,641	0,822	0,822	0,13	0,14	0,186
1 x 70	0,443	0,568	0,568	0,13	0,13	0,211
1 x 95	0,320	0,411	0,411	0,12	0,13	0,232
1 x 120	0,253	0,325	0,325	0,12	0,12	0,257
1 x 150	0,206	0,265	0,265	0,11	0,12	0,275
1 x 185	0,164	0,211	0,211	0,11	0,12	0,301
1 x 240	0,125	0,161	0,161	0,11	0,11	0,332
1 x 300	0,100	0,130	0,129	0,10	0,11	0,364
1 x 400	0,0778	0,102	0,101	0,099	0,11	0,405
1 x 500	0,0605	0,0801	0,0794	0,096	0,11	0,446
1 x 630	0,0469	0,0635	0,0625	0,093	0,10	0,498

\*Cavi ARE4H1RX

12/20 kV Dati dimensionali - size characteristics

Formazione	Ø nominale conduttore	Spessore isolante	Spessore guaina	Ø nominale cavo	Peso nominale cavo	Raggio minimo di curvatura
Size	Nominal conduct. Ø	Insulation thickness	Sheath thickness	Nominal cable Ø	Nominal cable weight	Minimum bending radius
n° x mm <sup>2</sup>	mm	mm	mm	mm	kg/km	mm
25	6,0	5,5	1,8	29,6	610	350
35	7,0	5,5	1,8	30,7	670	360
50	8,1	5,5	1,8	31,7	720	380
70	9,9	5,5	1,8	33,3	840	400
95	11,5	5,5	1,9	35,4	955	430
120	12,9	5,5	1,9	37,0	1060	450
150	14,2	5,5	2,0	38,5	1210	470
185	15,9	5,5	2,0	40,0	1345	490
240	18,3	5,5	2,1	43,2	1590	530
300	20,7	5,5	2,2	45,8	1845	570
400	23,5	5,5	2,3	49,0	2175	610
500	26,5	5,5	2,4	52,0	2620	650
630	30,1	5,5	2,5	56,2	3110	710
3x1x25	6,0	5,5	1,8	63,9	1834	350
3x1x35	7,0	5,5	1,8	66,3	2014	360
3x1x50	8,1	5,5	1,8	68,5	2164	380
3x1x70	9,9	5,5	1,8	71,9	2525	400
3x1x95	11,5	5,5	1,9	76,5	2871	430
3x1x120	12,9	5,5	1,9	79,9	3186	450
3x1x150	14,2	5,5	2,0	83,2	3637	470
3x1x185	15,9	5,5	2,0	86,4	4043	490
3x1x240	18,3	5,5	2,1	93,3	4780	530
3x1x300	20,7	5,5	2,2	98,9	5546	570
3x1x400	23,5	5,5	2,3	105,8	6538	610
3x1x500	26,5	5,5	2,4	112,3	7876	650

Per i cavi con isolamento in G7 i dati dimensionali sono da ritenersi identici.  
For cables with insulation G7 dimensional data are to be considered identical.

### 12/20 kV Caratteristiche elettriche - electrical characteristics

Formazione	Capacità nominale	Corrente capacitiva nominale a tensione $U_0$	Reattanza di fase a 50 HZ	Resistenza massima in CC del conduttore a 20°C	Resistenza massima in CC dello schermo a 20°C	Resistenza massima in CA del conduttore a 90°C	Portata di corrente	
Size	Nominal capacity	Nominal capacitive current at voltage $U_0$	Reactance phase 50HZ	Conductor max electrical resist. CC at 20°C	Screen max electrical resist. CC at 20°C	Conductor max electrical resist. CA at 90°C	Current rating	
							A	
							in aria a 30° C	interrato a 20° C Underground at 20° C Rt=1m°C/W
n° x mm <sup>2</sup>	mm	A/Km	Ω/Km	Ω/Km	Ω/Km	Ω/Km		
25	0,15	0,56	0,155	1,200	3,0	1,540	136	133
35	0,16	0,65	0,147	0,868	3,0	1,115	160	156
50	0,17	0,71	0,141	0,641	3,0	0,852	198	181
70	0,20	0,80	0,132	0,443	3,0	0,570	243	222
95	0,22	0,89	0,125	0,320	3,0	0,412	296	263
120	0,24	0,96	0,120	0,253	3,0	0,328	338	296
150	0,25	1,03	0,117	0,206	3,0	0,268	387	337
185	0,28	1,12	0,112	0,164	3,0	0,213	441	378
240	0,30	1,23	0,108	0,125	3,0	0,163	517	436
300	0,33	1,34	0,105	0,100	3,0	0,132	586	493
400	0,37	1,48	0,101	0,0778	3,0	0,103	677	567
500	0,40	1,62	0,098	0,0605	3,0	0,081	775	626
630	0,44	1,80	0,095	0,0469	3,0	0,064	882	700
3x1x25	0,15	0,56	0,155	1,200	3,0	1,540	136	133
3x1x35	0,16	0,65	0,147	0,868	3,0	1,115	160	156
3x1x50	0,17	0,71	0,141	0,641	3,0	0,825	198	181
3x1x70	0,20	0,80	0,132	0,443	3,0	0,570	243	222
3x1x95	0,22	0,89	0,125	0,320	3,0	0,412	296	263
3x1x120	0,24	0,96	0,120	0,253	3,0	0,328	338	296
3x1x150	0,25	1,03	0,117	0,206	3,0	0,268	387	337
3x1x185	0,28	1,12	0,112	0,164	3,0	0,213	441	378
3x1x240	0,30	1,23	0,108	0,125	3,0	0,163	517	436
3x1x300	0,33	1,34	0,105	0,100	3,0	0,132	586	493
3x1x400	0,37	1,48	0,101	0,0778	3,0	0,103	677	567
3x1x500	0,40	1,62	0,098	0,0605	3,0	0,081	775	626

Per i cavi con isolamento in G7 le portate di corrente sono da ritenersi più basse di 4-6 A.  
For cables with insulation G7 current rating are to be considered more low 4-6 A.

# Elenco delle figure

Figura 1.1 – Struttura di una rete radiale in MT .....	3
Figura 1.2 – Struttura di una rete gestita ad anello aperto .....	4
Figura 1.3 – Rete MT a neutro isolato .....	5
Figura 1.4 – Rete MT a neutro compensato .....	5
Figura 1.5 – Schema tipico di stazione AT/MT di distribuzione .....	6
Figura 1.6 – Sostegni a stelo con palo di legno e cemento armato e sostegno a traliccio per linee MT .....	7
Figura 1.7 – Velocità media annua del vento a 25 m s.l.t. ....	10
Figura 1.8 – Potenza eolica installata al 2019 per regione .....	11
Figura 1.9 – Illustrazione di un parco eolico flottante off-shore .....	12
Figura 2.1 – Parti costituenti un cavo unipolare MT .....	16
Figura 2.2 – Cavo con conduttore a corda circolare compatta di alluminio .....	17
Figura 2.3 – Cavo XLPE unipolare .....	19
Figura 2.4 – Cavo RG7H1R 12/20 kV .....	23
Figura 2.5 – Cavo RG7H10R 12/20 kV .....	23
Figura 2.6 – Cavo ARG7H1R 12/20 kV .....	24
Figura 2.7 – Cavo ARG7H10R 12/20 kV .....	24
Figura 2.8 – Cavo ARE4H1R 12/20 kV .....	24
Figura 2.9 – Cavo ARE4H1RX 12/20 kV .....	25
Figura 2.10 – Andamento del campo elettrico in un cavo unipolare .....	26
Figura 2.11 – Distribuzione del campo elettrico nell'isolante di un cavo a campo elettrico radiale .....	27
Figura 2.12 – Relazione tra il rapporto dei raggi e il campo elettrico .....	28
Figura 2.13 – Modello di un cavo unipolare MT .....	29
Figura 2.14 – Temperature massime di esercizio continuativo e di corto circuito per i vari materiali isolanti .....	30
Figura 2.15 – Triangolo delle potenze assorbite a vuoto da un cavo di potenza .....	33
Figura 2.16 – Sezione tipica di trincea per cavo con posa a trifoglio su sede stradale .....	38
Figura 2.17 – Scavi per interrimento di una linea in cavo MT .....	39
Figura 2.18 – Collegamento degli schermi a terra con la tecnica del single-point bonding .....	40
Figura 2.19 – Collegamento degli schermi a terra con la tecnica del solid-bonding .....	40
Figura 2.20 – Collegamento degli schermi a terra con la tecnica del cross-bonding .....	41
Figura 2.21 – Giunto termorestringente .....	42
Figura 2.22 – Andamento del campo elettrico in prossimità del taglio dello strato semiconduttivo esterno .....	43
Figura 2.23 – Andamento del campo elettrico in presenza di un tubo restringente per il controllo del campo .....	43
Figura 3.1 – Tratto di cavo guasto a seguito di un cortocircuito .....	45

Figura 3.2 – Guasto con separazione del conduttore in due parti .....	47
Figura 3.3 – Buco sull'isolante derivante dalla sua degradazione .....	48
Figura 3.4 – Presenza di un vacuolo d'aria sull'isolamento del cavo XLPE .....	51
Figura 3.5 – Andamento tipico degli alberi elettrici in un isolante XLPE .....	52
Figura 3.6 – Fenomeno di water-tree nell'isolante di un cavo .....	53
Figura 3.7 – Circuito equivalente di una scarica parziale in un cavo .....	54
Figura 3.8 – Propagazione dell'impulso sulla linea dovuto a scarica parziale nel punto X .....	56
Figura 4.1 – TDR test per la continuità di un cavo .....	60
Figura 4.2 – TDR applicato ad un cavo sano .....	62
Figura 4.3 – Impulso del TDR soggetto ad attenuazione e dispersione .....	65
Figura 4.4 – Circuito aperto rilevato dal TDR .....	65
Figura 4.5 – Riflessioni rilevate dal TDR: cavo sano, cortocircuito, cavo con giunto, cavo con giunto bagnato .....	66
Figura 4.6 – Schema di principio dell'Arc Reflection Method .....	67
Figura 4.7 – Arc Reflection Method per la pre-localizzazione del guasto .....	68
Figura 4.8 – Schema di principio del metodo degli impulsi di corrente .....	69
Figura 4.9 – Transitorio di corrente tra il guasto e il generatore di impulsi .....	70
Figura 4.10 – Onda migrante di tensione tra guasto e generatore DC .....	71
Figura 4.11 – Propagazione dell'impulso di tensione nel cavo e cambi di polarità .....	72
Figura 4.12 – Tracciamento del cavo col metodo minimo e massimo .....	74
Figura 4.13 – Determinazione della profondità del cavo .....	75
Figura 4.14 – Schema di principio di un generatore di impulsi HV .....	75
Figura 4.15 – Localizzazione del guasto con il metodo acustico-elettromagnetico .....	77
Figura 4.16 – Raffigurazione dei parametri visualizzati dal rilevatore .....	78
Figura 4.17 – Step voltage method .....	79
Figura 4.18 – Megger STX 40-2000 .....	80
Figura 4.19 – Sistema su laboratorio mobile Centrix 2.0 .....	81
Figura 4.20 – digiPHONE <sup>+</sup> 2 per la localizzazione precisa del guasto .....	82
Figura 5.1 – Blocco Simulink del cavo e definizione dei parametri .....	86
Figura 5.2 – Blocco Simulink del generatore di impulsi TDR e impostazione dei parametri.....	90
Figura 5.3 – Modello del cortocircuito .....	92
Figura 5.4 – Modello del circuito aperto .....	92
Figura 5.5 – Modello del pinhole .....	93
Figura 5.6 – Capacità e resistenza per mm di cavo del water tree in relazione alla percentuale di isolante interessata dal fenomeno .....	94
Figura 5.7 – Modello della linea in cavo senza guasti .....	96
Figura 5.8 – Risultato della simulazione senza guasti .....	96
Figura 5.9 – Modello a parametri concentrati del giunto .....	98
Figura 5.10 – Riflessioni prodotte da un giunto: traccia reale, a sx, e modello Simulink, a dx ....	98
Figura 5.11 – Modello della linea in cavo con cortocircuito .....	100
Figura 5.12 – Risultato della simulazione con guasto da cortocircuito .....	100
Figura 5.13 – Modello della linea in cavo con circuito aperto .....	102

Figura 5.14 – Risultato della simulazione con guasto da circuito aperto .....	102
Figura 5.15 – Modello della linea con estrazione indesiderata del cavo dal giunto .....	103
Figura 5.16 – Risultato della simulazione con estrazione indesiderata del cavo dal giunto .....	104
Figura 5.17 – Modello del TDR applicato alla linea in cavo con pinhole .....	105
Figura 5.18 – Risultato della simulazione con TDR applicato a cavo con pinhole .....	106
Figura 5.19 – Comparazione tra le riflessioni del giunto e del pinhole della pubblicazione e del modello Simulink .....	107
Figura 5.20 – Modello dell’ARM applicato alla linea in cavo con pinhole .....	108
Figura 5.21 – Blocco Simulink “HV generator” .....	108
Figura 5.22 – Impulso trasmesso dal blocco HV generator al pinhole .....	109
Figura 5.23 – Risultato della simulazione con ARM applicato a cavo con pinhole .....	110

## Elenco delle tabelle

Tabella 2.1 – Spessori degli isolamenti in mm per diversi materiali estrusi e relative tensioni .....	29
Tabella 2.2 – Valori della permittività relativa e del fattore di perdita a 50-60 Hz per vari materiali isolanti .....	34
Tabella 3.1 – Fattori e meccanismi di invecchiamento dell’isolante di un cavo .....	50
Tabella 4.1 – Velocità di propagazione per tipologia di isolamento .....	63
Tabella 5.1 – Caratteristiche tecniche ed elettriche di un cavo ARE4H1R 12/20 kV .....	86

## Script MATLAB

Lo script MATLAB utilizzato per la definizione dei parametri nei blocchi utilizzati per la simulazione su Simulink è il seguente:

```
%Definizione parametri "block transmission line"
```

```
Z0 = 40; % Impedenza caratteristica del cavo [ $\Omega$ ]
delay = 6.82 * 10^-6; % Transmission delay [s]
r = 0.000411; % Resistenza chilometrica del cavo [ $\Omega$  /m]
l = 1200; % Lunghezza della pezzatura [m]
```

%Definizione parametri "block junction"

Cj = 0.4 \* 10<sup>-12</sup>;                    % Capacità del giunto [F]  
Lj = 16.50 \* 10<sup>-9</sup>;                % Induttanza del giunto [H]  
Rj = 6.5;                            % Resistenza del giunto [Ω]

%Definizione parametri "TDR pulse"

V\_TDR = 40;                        % Ampiezza dell'impulso [V]  
T\_TDR = 43 \* 10<sup>-6</sup>;                % Periodo dell'impulso [s]  
W\_TDR = 300 \* 10<sup>-9</sup>;               % Larghezza dell'impulso [s]  
  
tf = delay \* 3 \* 2 \* 1.03            % Durata della simulazione [s]

# Bibliografia

[1] S. Tedde, *Incremento dei tempi di attesa alla richiusura degli interruttori per il miglioramento della continuità di servizio*, Università degli Studi di Cagliari, 2011/2012, Tesi di Dottorato.

[2] E. Ninarello, *La generazione distribuita*, 27 Luglio 2021,  
<http://www.studioninarello.it/efficienza-energetica/la-generazione-distribuita/>.

[3] Energia eolica: la situazione attuale in Italia, *HYDAC S.p.A*, 6 Luglio 2021,  
<https://modofluido.hydac.it/energia-eolica>.

[4] Atlante eolico interattivo, *RSE – Ricerca sul Sistema Energetico S.p.A.*, 27 Luglio 2021,  
<https://atlanteolico.rse-web.it/>.

[5] Associazione nazionale del vento, *Brochure Anev*, 2020  
[https://www.anev.org/wp-content/uploads/2020/06/Anev\\_brochure\\_2020web.pdf](https://www.anev.org/wp-content/uploads/2020/06/Anev_brochure_2020web.pdf).

[6] R. Caldon, F. Bignucolo, *Impianti di produzione dell'energia elettrica – Criteri di scelta e dimensionamento*, Lavis (TN), Società Editrice Esculapio s.r.l, 2018, pp. 141-163.

[7] Eolico offshore: l'Italia fanalino di coda, *la Repubblica*, 4 Giugno 2021,  
[https://www.repubblica.it/economia/rapporti/energitalia/lascossa/2021/06/04/news/eolico\\_offshore\\_e\\_l\\_italia\\_fanalino\\_di\\_coda-304203029/](https://www.repubblica.it/economia/rapporti/energitalia/lascossa/2021/06/04/news/eolico_offshore_e_l_italia_fanalino_di_coda-304203029/).

[8] L'incessante forza del vento – I segreti dell'energia eolica, una tecnologia in costante evoluzione in grado di raggiungere altezze vertiginose, *Eni*, 16 Marzo 2021,  
<https://www.eni.com/it-IT/tecnologie/eolico.html>.

- [9] H. Orton, "History of underground power cables", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Volume 29, pp. 52-57, 2013.
- [10] M. Pompili, R. Rendina, *Linee elettriche in cavo*, Lavis (TN), Società Editrice Esculapio s.r.l, 2019, pp. 13-47, 59-60, 77-109, 140-144.
- [11] Catalogo cavi e accessori di bassa e media tensione, *Prysmian Group*, 6 Giugno 2021, [https://it.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/PRYSMIAN\\_CatalogoCavi\\_2018\\_bas\\_sa.pdf](https://it.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/PRYSMIAN_CatalogoCavi_2018_bas_sa.pdf).
- [12] Cavi elettrici media tensione, *Com Cavi S.p.A. Holding*, 6 Giugno 2021, <https://www.comcavi.it/cavi/cavi-elettrici-media-tensione/>.
- [13] R. Benato, L. Fellin, *Impianti Elettrici*, Milanofiori Assago (MI), Wolters Kluwer Italia S.r.l., 2012, pp. 85-123.
- [14] R. Benato, A. Paolucci, *EHV AC Undergrounding Electrical Power: performance and planning*, Springer London Ltd, 2010, pp. 33-37.
- [15] A. Paolucci, *Lezioni di trasmissione dell'energia elettrica*, Padova (PD), CLEUP sc, 1998, pp. 55-61.
- [16] K. Daware, *Faults in Underground Cables: Types and Detection*, 28 Luglio 2021, <https://www.electricaleasy.com/2017/05/faults-in-underground-cables-types-and.html>.
- [17] Fault finding solutions, *Megger*, 28 Luglio 2021, [https://www.cablejoints.co.uk/upload/Megger\\_Cable\\_Fault\\_Finding\\_Solutions.pdf](https://www.cablejoints.co.uk/upload/Megger_Cable_Fault_Finding_Solutions.pdf).

- [18] J. Densley, "Ageing mechanisms and diagnostics for power cables – an overview", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Volume 17, pp. 14-22, 2001.
- [19] Guasti nei cavi, *GreenEnergy S.p.A.*, 28 Luglio 2021, <http://www.greenenergyspa.it/index.php/it/10-azienda/servizio-di-ricerca-guasti/39-guasti-nei-cavi-di-potenza>.
- [20] M. Shafiq, I. Kiitam, P. Taklaja, L. Kutt, K. Kauhaniemi, I. Palu, "Identification and Location of PD Defects in Medium voltage Underground Power Cables Using High Frequency Current Transformer", *IEEE Access*, Volume 7, 8771171, pp. 103608-103618, 2019.
- [21] N. Ahmed, N. Srinivas, "Extruded insulated cable deterioration mechanism and PD", 2002 *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Cancun, Ottobre 2002, pp. 744-747.
- [22] E.F. Steennis, F.H. Kreuger, "Water treeing in Polyethylene Cables", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Volume 25, pp. 989-1028, 1990.
- [23] K.W. Burkes, E.B. Makram, R. Hadidi, "Water Tree Detection in Underground Cables Using Time Domain Reflectometry", *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, Volume 2, 7104068, pp. 53-62, 2015.
- [24] S.S. Refaat, M.A. Shams, "A review of partial discharge detection, diagnosis techniques in high voltage power cables", *12th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering*, Doha, Aprile 2018, pp. 1-5.
- [25] N.H. Ahmed, N.N. Srinivas, "On-line partial discharge detection in cables", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume 5, pp. 181-188, 1998.

- [26] F. Alvarez, F. Garnacho, J. Ortego, M.A. Sanchez-Uran, “Application of HFCT and UHF sensors in on-line partial discharge measurements for insulation diagnosis of high voltage equipment”, *Sensors*, Volume 15, pp. 7360-7387, 2015.
- [27] Test Isolamento, *GreenEnergy S.p.A.*, 31 Luglio 2021, <http://www.greenenergyspa.it/index.php/it/10-azienda/servizio-di-ricerca-guasti/31-test-isolamento>.
- [28] Guida alla misura dell’isolamento, *Chauvin Arnoux Group*, 31 Luglio 2021, <https://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/D00VEC39.PDF>.
- [29] R. Cerny, “Time-domain reflectometry method and its application for measuring moisture content in porous materials: a review”, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, Volume 42, pp. 329-336, 2009.
- [30] J. C. Hernandez-Mejia, “Time Domain Reflectometry (TDR)”, *Georgia Tech Research Corporation*, 2016, [https://www.neetrac.gatech.edu/publications/CDFI/5-TDR\\_17\\_with-Copyright.pdf](https://www.neetrac.gatech.edu/publications/CDFI/5-TDR_17_with-Copyright.pdf).
- [31] Pre-location with ARM arc reflection technologies, *Megger*, 5 Agosto 2021, [https://embed.widencdn.net/pdf/plus/megger/xk9msf6h11/PrelocationARMTechology\\_en\\_001.pdf](https://embed.widencdn.net/pdf/plus/megger/xk9msf6h11/PrelocationARMTechology_en_001.pdf).
- [32] T. Neier, “Cable fault location in LV, MV and HV underground cable networks”, *BAUR*, 2013.
- [33] Cable fault location measuring methods, *HV Technologies*, 2 Agosto 2021, <https://hvtechnologies.com/cable-fault-location-measuring-methods/>.

- [34] Cable fault, test and diagnostics, *Megger*, 3 Agosto 2021, <https://megger.com/products/cable-fault-test-and-diagnostics>.
- [35] Dato fornito da Volta S.p.A. in data 13 Maggio 2021, <https://www.volta.it/>.
- [36] ARE4H1R - Cavi elettrici media tensione, *Com Cavi S.p.A. Holding*, 23 Agosto 2021, <https://www.comcavi.it/cavi/cavi-elettrici-media-tensione/are4h1r/>.
- [37] Cable fault profiles and troubleshooting guide, *Megger*, 24 Agosto 2021, [https://www.cablejoints.co.uk/upload/Cable Fault Profiles and Troubleshooting Guide.pdf](https://www.cablejoints.co.uk/upload/Cable_Fault_Profiles_and_Troubleshooting_Guide.pdf).
- [38] M. Acedo, I. Radu, F. Frutos, J. C. Filippini, P. Notingher, “Water treeing in underground power cables: Modelling of the trees and calculation of the electric field perturbation”, *Journal of Electrostatics*, Volume 53, pp. 267-294, 2001.
- [39] T. Toyoda, S. Mukai, Y. Ohki, Y. Li, T. Maeno, “Estimation of conductivity and permittivity of water trees in PE from space charge distribution measurements”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume 8, pp. 111-116, 2001.
- [40] S. Schuet, D. Timuçin, K. Wheeler, “A model-based probabilistic inversion framework for characterizing wire fault detection using TDR”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Volume 60, pp. 1654-1663, 2011.
- [41] Y. H. Md. Thayoob, S. Sulaiman, A.M. Ariffin, “Analysis of wave propagation in time domain reflectometry circuit simulation model”, *IEEE International Conference on Power and Energy*, Kuala Lumpur, 29 Nov. -1 Dic. 2010, pp. 276-281.

- [42] P. Wagenaars, P.A.A.F. Wouters, P.C.J.M. Van der Wielen, E.F. Steennis, "Approximation of transmission line parameters of single-core and three-core XLPE cables", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume 17, pp. 106-115, 2010.
- [43] G.M. Hashmi, R. Papazyan, M. Lehtonen, "Determining wave propagation characteristics of MV XLPE power cable using time domain reflectometry technique", *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, Volume 19, pp. 207-219, 2011.
- [44] H.A. Illias, H.R. Yon, A.H.A. Bakar, H. Mokhlis, G. Chen, P.L. Lewin, A.M. Ariffin, "Modelling of partial discharge pulses in high voltage cable insulation using finite element analysis software", *31st Electrical Insulation Conference*, Ottawa, Giugno 2013, pp. 52-56.
- [45] Y. Li, P. Wagenaars, P.A.A.F Wouters, P.C.J.M. van der Wielen, E. Fred Steennis, "Power cable joint model: Based on lumped components and cascaded transmission line approach", *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, Volume 4, pp. 536-552, 2012.
- [46] R. Sheeba, M. Jayaraju, T.K.N. Shanavas, "Simulation of impulse voltage generator and impulse testing of insulator using MATLAB Simulink", *World Journal of Modelling and Simulation*, Volume 8, pp. 302-309, 2012.
- [47] Surge wave generators, *Megger*, 13 Settembre 2021, [https://embed.widencdn.net/pdf/plus/megger/lyeqbwpmnds/SWG\\_DS\\_en.pdf](https://embed.widencdn.net/pdf/plus/megger/lyeqbwpmnds/SWG_DS_en.pdf).