

Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA



**Modellizzazione ed analisi di
sovratensioni di origine interna ed
esterna su organi di manovra su palo
in reti ad alta tensione**

Tesi di Laurea Magistrale

Relatore

Prof. Roberto Turri

Correlatori

Ing. Roberto Spezie

Ing. Claudio Serafino

Ing. Francesco Palone

Laureando

Jessica Rizzati

ANNO ACCADEMICO 2019-2020

A mio padre

Sommario

Terna Rete Italia, al fine di garantire un servizio elettrico continuo, sicuro e affidabile, ha pianificato l'installazione di nuovi Organi di Manovra su Palo (OMP) in reti di alta tensione. Lo scopo di questa tesi di ricerca è quello di rappresentare in maniera dettagliata una porzione di rete in cui verranno a breve installati due nuovi OMP, al fine di stimare e analizzare le sovratensioni a cui essi possono essere soggetti in seguito a transitori elettromagnetici. Pertanto, dopo aver rappresentato ogni componente della linea elettrica nei due ambienti DIgSILENT PowerFactory e EMTP-RV, sono state condotte simulazioni di origine esterna ed interna: per le prime, sono stati esaminati i casi di fulminazione diretta del sostegno e del conduttore di fase, mentre per le seconde è stato esposto un metodo di analisi statistica per le manovre di rete. Infine, si è dimostrata l'importanza di installare opportuni scaricatori di sovratensione a protezione degli organi di manovra.

Indice

Introduzione	1
1 La propagazione dei transitori nelle linee	5
1.1 Le onde viaggianti	5
1.1.1 Impedenza d'onda	7
1.2 I coefficienti di riflessione e trasmissione	8
1.2.1 Esempi di discontinuità	9
1.3 Generazione di onde viaggianti	10
1.4 Energia e smorzamento	12
1.4.1 Distorsione della forma d'onda	13
1.5 Interazione tra linee adiacenti	15
1.6 Onde viaggianti in un sistema trifase	17
2 Le sovratensioni di origine esterna	21
2.1 Il fenomeno della fulminazione	21
2.1.1 Dati statistici	23
2.1.2 Parametri della scarica di fulmine	23
2.2 Fulminazione diretta	25
2.2.1 Fulminazione diretta di un conduttore di fase	25
2.2.2 Fulminazione diretta di un sostegno	26
2.2.3 Fulminazione diretta della fune di guardia	28
2.3 La risposta alla fulminazione	29
2.3.1 Influenza dei parametri caratteristici del sostegno	29
2.3.2 Influenza dei parametri caratteristici del terreno	30
2.4 Il ruolo della fune di guardia e dei sostegni	32
2.5 Sovratensioni sulle catene di isolatori	33
2.5.1 Il modello fisico: leader progression model	34
2.5.2 <i>Shielding Failure FlashOver Rate</i>	35
2.5.3 <i>BackFlashOver Rate</i>	36
2.6 Scaricatori di sovratensione	37
3 Le sovratensioni di origine interna	41
3.1 Caratteristiche delle sovratensioni di manovra	41
3.2 Sovratensioni di manovra in reti induttive	42
3.2.1 Richiusura monofase in un circuito induttivo	42
3.2.2 Richiusura trifase in un circuito induttivo	43
3.2.3 Energizzazione di un circuito induttivo	44

3.3	Analisi statistica delle sovratensioni di manovra	45
4	Modellizzazione della rete	47
4.1	I software di calcolo	47
4.2	Ipotesi alla base dello studio	48
4.3	Elementi rappresentati nel modello di rete	49
4.3.1	Linea aerea	49
4.3.2	Sostegni	51
4.3.3	Catene di isolatori	53
4.3.4	Sottostazioni elettriche	55
4.3.5	Macchine dell'Utente A	55
4.3.6	OMP	55
4.3.7	Scaricatori di sovratensione	57
4.4	Schemi di rete	60
5	Simulazioni di sovratensioni di origine esterna	63
5.1	Ipotesi di base	63
5.2	Casi studio di fulminazioni dirette	63
5.3	Fulminazione diretta del sostegno	64
5.3.1	Esempio esplicativo	65
5.3.2	Caso 1: modello base	66
5.3.3	Caso 2: inserimento degli OMP	71
5.3.4	Caso 3: inserimento degli scaricatori di sovratensione	73
5.3.5	Confronto dei risultati	79
5.4	Fulminazione diretta del conduttore di fase	80
5.4.1	Esempio esplicativo	80
5.4.2	Caso 1: modello base	82
5.4.3	Caso 2: inserimento degli OMP	85
5.4.4	Caso 3: inserimento degli scaricatori di sovratensione	87
5.4.5	Confronto dei risultati	90
5.5	Fulminazioni dirette in diverse configurazioni di rete	91
6	Simulazioni di sovratensione di origine interna	95
6.1	Ipotesi di base	95
6.2	Energizzazione	96
6.2.1	Risultati delle simulazioni	96
6.3	Richiusura monofase	100
6.3.1	Risultati delle simulazioni	100
6.3.2	Richiusura monofase su guasto permanente	103
6.4	Richiusura trifase	104
6.4.1	Risultati delle simulazioni	105
6.4.2	Richiusura trifase su guasto permanente	105
	Conclusioni	107
	A Analisi di stabilità	109
	B Verifica di risultati analitici in PowerFactory	111

C	Verifica dei parametri distribuiti di linea	115
D	Confronto dei modelli per le catene di isolatori	119
E	Confronto con valutazione tecnica esterna	121
E.1	Ipotesi alla base dei due studi	121
E.2	Elementi della linea	121
E.3	Modelli di rete	122
E.4	Confronto dei risultati	122
	Bibliografia	125

Elenco delle figure

1	Schema della linea T1.	1
2	Sostegno P57 dotato di OMP.	2
3	Confronto della configurazione presente e futura.	2
1.1	Elemento generico di linea a parametri distribuiti.	5
1.2	Onde di tensione e onde di corrente associate.	6
1.3	Geometrie per il calcolo dell'impedenza d'onda: (a) singolo conduttore, (b) due conduttori, (c) sistema trifase.	8
1.4	Punto di discontinuità tra due linee a diversa impedenza d'onda.	9
1.5	Onde di tensione e di corrente per $Z_2 = \infty$	9
1.6	Onde di tensione e di corrente per $Z_2 = 0$	9
1.7	Resistenza in parallelo in corrispondenza della giunzione tra due linee.	10
1.8	Esempio di diagramma a graticcio.	11
1.9	Energizzazione di una linea.	11
1.10	Fulminazione di una linea.	12
1.11	Smorzamento dell'onda viaggiante lungo la linea.	13
1.12	Smorzamento dovuto all'effetto corona.	14
1.13	Smorzamento dovuto all'effetto pelle in funzione di varie distanze percorse.	15
1.14	Interazione tra due linee elettriche parallele.	15
1.15	Sistema trifase.	18
2.1	Esempio di fulminazione diretta.	22
2.2	Densità ceraunica in Italia.	23
2.3	Confronto tra le distribuzioni dei valori di picco di fulminazioni negative proposte da IEEE e CIGRE.	24
2.4	Fulminazione diretta di un conduttore di fase.	26
2.5	Andamento ad onda tronca.	27
2.6	Fulminazione diretta di un sostegno privo di fune di guardia.	27
2.7	Fulminazione diretta di un sostegno dotato di fune di guardia.	28
2.8	Fulminazione diretta della fune di guardia.	29
2.9	Influenza dell'altezza di un sostegno 380 kV.	30
2.10	Influenza delle dimensioni trasversali di un sostegno 380 kV.	30
2.11	Influenza di (a) numero e (b) ubicazione delle funi di guardia di un sostegno 380 kV.	31
2.12	Curva di risposta alla fulminazione di due sostegni 380 kV.	31
2.13	Influenza della resistenza di terra di un sostegno 380 kV.	32
2.14	Protezione data dalla fune di guardia.	33

2.15	Schema di una catena di isolatori.	34
2.16	Fasi del processo di scarica.	34
2.17	Geometria per il calcolo della distanza di esposizione.	36
2.18	Struttura tipica di uno scaricatore di sovratensione.	37
2.19	Caratteristica corrente-tensione di uno scaricatore ZnO	38
2.20	Microstruttura di un elemento di ossido di zinco.	38
3.1	Circuito induttivo: richiusura monofase.	42
3.2	Circuito induttivo: richiusura trifase.	43
3.3	Circuito induttivo: energizzazione.	44
3.4	Distribuzione di probabilità dei tempi di chiusura dei poli dell'inter- ruttore.	45
4.1	Tratto di interesse della linea T1.	48
4.2	Disposizione dei conduttori lungo la dorsale (a) e la derivazione (b).	50
4.3	Andamento delle resistenze di terra in funzione della corrente di scarica.	52
4.4	Rappresentazione dei sostegni in (a) PowerFactory e (b) EMTP.	53
4.5	Tensione di tenuta di una catena di isolatori in funzione del tempo.	53
4.6	Processo di scarica LPM.	54
4.7	Organo di manovra.	56
4.8	Viste in prospettiva e frontale dell'OMP.	56
4.9	Schema unifilare dell'OMP.	56
4.10	Circuito monofase equivalente dell'OMP.	57
4.11	Rappresentazione del sostegno dotato di OMP in (a) PowerFactory e (b) EMTP.	58
4.12	Modello Pinceti-Giannettoni dello scaricatore di sovratensione.	59
4.13	Caratteristiche dei resistori non lineari.	59
4.14	Caratteristiche v-i dello scaricatore nei due software di calcolo.	59
4.15	Rappresentazione della rete in PowerFactory.	61
4.16	Rappresentazione della rete in EMTP.	62
5.1	Forma d'onda della corrente di fulmine.	65
5.2	Forme d'onda di tensione e corrente lungo la derivazione.	66
5.3	Corrente drenata a terra in a) PowerFactory e b) EMTP.	67
5.4	Resistenza di terra variabili del sostegno P56 in a) PowerFactory e b) EMTP.	68
5.5	Tensioni in corrispondenza del sostegno P56 in a) PowerFactory e b) EMTP.	69
5.6	Propagazione delle onde di tensione nella direzione di Stazione 1 in a) PowerFactory e b) EMTP.	70
5.7	Tensioni in corrispondenza del sostegno P56 in EMTP.	71
5.8	Sovratensioni ai capi dell'OMP del sostegno P56 in a) PowerFactory e b) EMTP.	72
5.9	Corrente drenata a terra in a) PowerFactory e b) EMTP.	73
5.10	Sovratensioni ai capi dell'OMP dotato di scaricatori del sostegno P56 in a) PowerFactory e b) EMTP.	74

5.11	Corrente drenata a terra in a) PowerFactory e b) EMTP.	75
5.12	Correnti di scarica attraverso gli scaricatori di sovratensione in EMTP.	76
5.13	Potenza assorbita dallo scaricatore della fase C in EMTP.	77
5.14	Forme d'onda di corrente e potenza che interessano lo scaricatore collegato alla fase C in EMTP.	78
5.15	Forma d'onda della corrente di fulmine.	80
5.16	Propagazione dell'onda di sovratensione lungo la derivazione in PowerFactory.	81
5.17	Processo di scarica lungo la catena di isolatori in PowerFactory.	81
5.18	Valori di tensione in corrispondenza del palo P56 in a) PowerFactory e b) EMTP.	82
5.19	Fenomeno di formazione del leader in a) PowerFactory e b) EMTP.	83
5.20	Propagazione dell'onda di tensione in a) PowerFactory e b) EMTP.	84
5.21	Fenomeno di scarica diretta in EMTP con fulminazione di 9,3 kA.	85
5.22	Sovratensioni in corrispondenza del palo P56 in a) PowerFactory e b) EMTP.	86
5.23	Processo di formazione del leader e conseguente scarica in PowerFactory.	87
5.24	Sovratensioni in corrispondenza del palo P56 dotato di scaricatori in a) PowerFactory e b) EMTP.	88
5.25	Correnti che attraversano gli scaricatori di sovratensione in EMTP.	89
5.26	Potenza assorbita dal varistore connesso alla fase A in EMTP.	89
5.27	Corrente e potenza dello scaricatore nel caso peggiore in EMTP.	93
6.1	Distribuzione (a) normale e (b) gaussiana.	96
6.2	Tempi di chiusura degli interruttori dell'OMP del sostegno P56 per ogni simulazione.	97
6.3	Valori massimi di tensione ai capi dell'OMP del sostegno P56 per ogni simulazione.	97
6.4	Distribuzioni cumulate delle tensioni ai capi dell'OMP.	99
6.5	Procedura di richiusura rapida in seguito a guasto monofase.	100
6.6	Estinzione del transitorio in seguito all'apertura dell'interruttore.	101
6.7	Distribuzioni cumulate delle tensioni ai capi dell'OMP.	102
6.8	Procedura di richiusura rapida in seguito a guasto polifase.	104
6.9	Estinzione del transitorio in seguito all'apertura dell'interruttore trifase.	104
6.10	Distribuzioni cumulate delle tensioni ai capi dell'OMP.	106
A.1	Circuito per l'analisi di stabilità.	109
A.2	Parte reale dell'impedenza in ingresso calcolata in (a) PowerFactory e (b) EMTP.	110
B.1	Fulminazione diretta di un conduttore di fase.	111
B.2	Propagazione dell'onda di sovratensione nel caso di fulminazione.	112
B.3	Energizzazione di una linea elettrica.	112
B.4	Propagazione dell'onda di sovratensione nel caso di energizzazione.	113
C.1	Disposizione geometrica dei conduttori.	115

Elenco delle tabelle

4.1	Caratteristiche della tratta T1.	49
4.2	Caratteristiche della derivazione verso l'Utente A.	50
4.3	Altezze e resistenze dei sostegni lungo la dorsale.	51
4.4	Altezze e resistenze dei sostegni lungo la derivazione.	52
4.5	Parametri delle catene di isolatori cappa-perno.	54
4.6	Parametri delle sottostazioni elettriche.	55
5.1	Parametri delle fulminazioni dirette.	64
5.2	Confronto dei risultati nei due software.	79
5.3	Confronto dei risultati nei due software.	90
5.4	Configurazioni di rete.	91
5.5	Valori massimi delle grandezze di interesse.	92
6.1	Risultati energizzazione.	98
6.2	Risultati richiusura monofase.	101
6.3	Risultati richiusura monofase su guasto permanente.	103
6.4	Risultati richiusura trifase.	105
6.5	Risultati richiusura trifase su guasto permanente.	105
C.1	Caratteristiche della linea elettrica.	115
C.2	Matrici delle resistenze.	116
C.3	Matrici delle reattanze.	117
C.4	Matrici delle suscettanze.	117
D.1	Confronto risultati ottenuti con i due modelli di catene di isolatori.	120
E.1	Confronto delle assunzioni di base.	121
E.2	Confronto dei parametri di rete assunti.	122
E.3	Confronto dei modelli di rete.	123
E.4	Confronto dei risultati delle simulazioni.	123

Introduzione

Terna Rete Italia, in qualità di TSO (*transmission system operator*), ha il compito di garantire un servizio elettrico caratterizzato da sicurezza, affidabilità e continuità. A tale scopo, le Aree Operative Trasmissione pianificano interventi di manutenzione sugli elettrodotti. È questo il caso dell'attività manutentiva pianificata su una linea AT, oggetto della tesi, che d'ora in poi sarà chiamata **T1 "Stazione 1 - Stazione 2 derivazione Utente A"** che prevede la sostituzione dei sostegni P56 e P57 e degli Organi di Manovra su Palo (OMP) su di essi installati, in corrispondenza della derivazione verso la centrale idroelettrica A, utente attivo connesso alla dorsale attraverso un collegamento in antenna, derivato a "T" (figura 1).

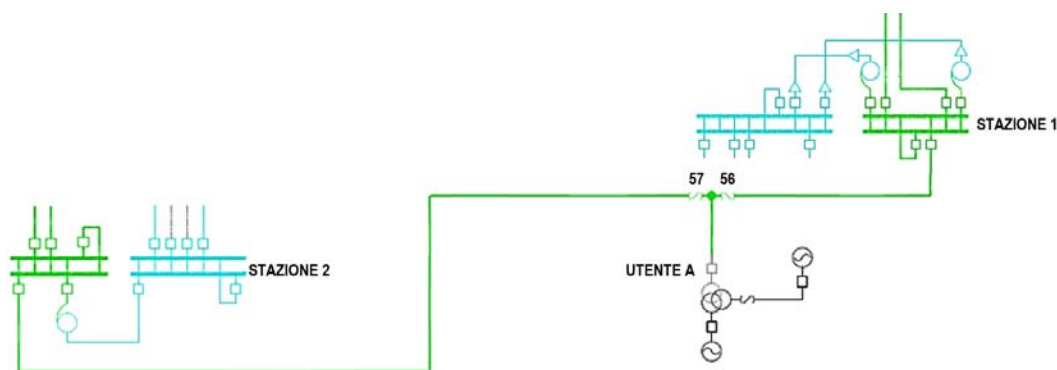


Figura 1: Schema della linea T1.

Lo scopo principale dell'intervento è quello di sostituire gli organi di manovra in aria esistenti (figura 2) con nuovi OMP in SF_6 aventi migliori prestazioni, in termini di flessibilità e riduzione dei tempi di ripristino del funzionamento in seguito a disservizi. Questi vantaggi, che consentono di migliorare la qualità del servizio elettrico, derivano dalla possibilità di poter effettuare le manovre da remoto, in modalità automatica, oltre che manualmente in loco, grazie alla sostituzione dei sezionatori a vuoto esistenti con nuovi interruttori sottocarico (IMS) (figura 3).

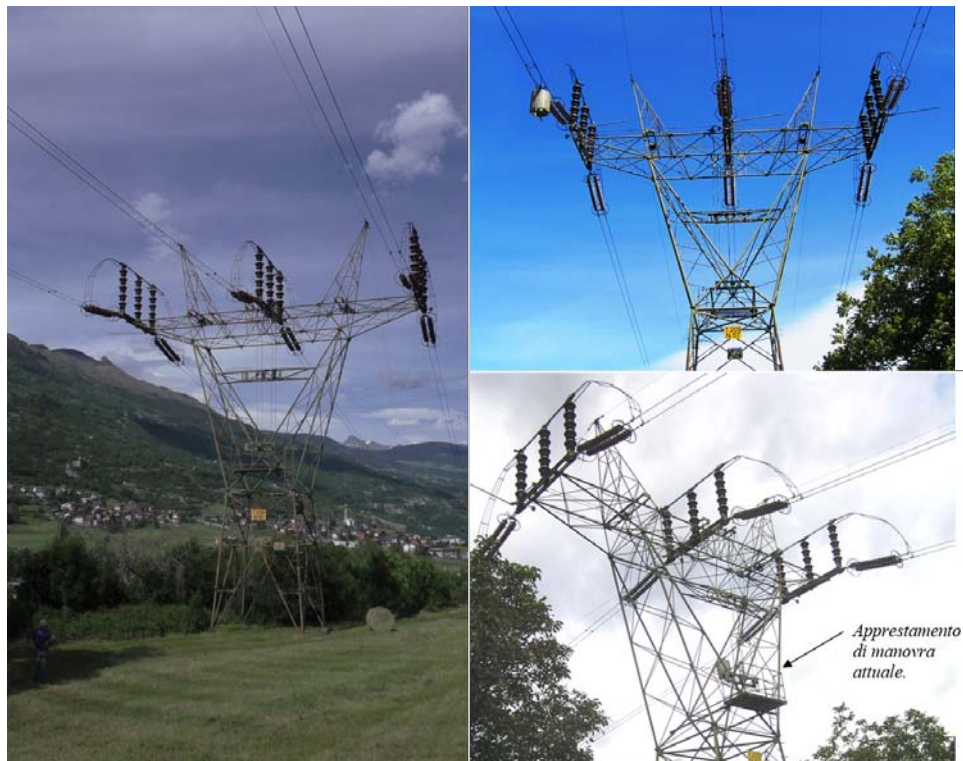


Figura 2: Sostegno P57 dotato di OMP.

La caratteristica principale dell'OMP è la modularità: tale dispositivo, infatti, può svolgere sia la funzione di sezionatore che di interruttore, permettendo quindi, in caso di necessità, di interrompere sia la corrente a vuoto che la corrente a carico della linea in maniera autonoma. A questo, è possibile aggiungere un sistema di protezione in modo tale da poter intervenire in caso di guasto in rete, interrompendo le correnti di guasto, attraverso l'installazione di dispositivi TV e TA di protezione opportunamente tarati.

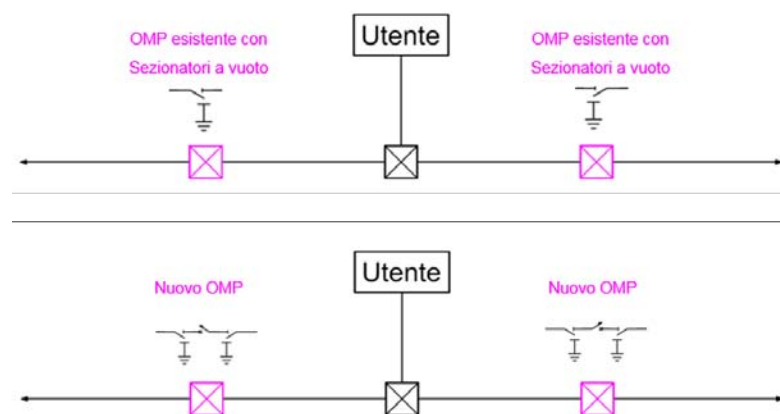


Figura 3: Confronto della configurazione presente e futura.

Il nuovo OMP verrà installato in reti di alta tensione (220 kV in questo intervento) e, poiché queste ultime sono soggette a transitori elettromagnetici di entità non trascurabile, risulta importante stimare le massime sovratensioni che si possono manifestare ai capi dell'organo di manovra stesso, con lo scopo di dimensionare correttamente le sue protezioni. È noto infatti come la maggior parte dei disservizi nelle reti ad alta tensione sia dovuta a sovratensioni, siano esse di origine interna (e. g. manovre di rete) od esterna (e. g. fulminazioni).

L'elaborato si propone di stimare ed analizzare le sovratensioni massime che l'OMP, che verrà installato nei sostegni P56 e P57 della linea T1, dovrà sopportare. A tal fine, è stato svolto uno studio su transitori elettromagnetici di rapidità e frequenza variabili, ai cui sono associate onde viaggianti sulla linea elettrica. Per rappresentare la linea in esame e condurre le simulazioni nel dominio del tempo sono stati scelti due diversi ambienti di simulazione, quali EMTP-RV e DIgSILENT PowerFactory. Grazie al confronto dei risultati ottenuti nei due diversi ambienti di simulazione è stato possibile, dapprima, validare il caso studio e, successivamente, effettuare analisi accurate sui transitori a cui potranno essere sottoposti i dispositivi che verranno installati.

La tesi è articolata in sei capitoli: il primo capitolo è un'introduzione alla propagazione dei transitori elettromagnetici nelle linee elettriche; il secondo ed il terzo capitolo trattano rispettivamente le sovratensioni di origine esterna ed interna, a partire dalla teoria alla base dei fenomeni e dall'analisi di alcuni casi esplicativi. Il quarto capitolo riguarda la modellizzazione della rete oggetto dello studio, analizzando in dettaglio ogni singolo componente rappresentato nel modello. Nel quinto capitolo si riportano le simulazioni di vari eventi di fulminazione, causa di sovratensioni esterne, considerando varie configurazioni di rete. Infine, il sesto capitolo propone un metodo di indagine per lo studio statistico delle sovratensioni di origine interna.

Questo studio ha permesso di capire quali sono i fattori ed i componenti che meglio devono essere modellizzati ai fini di realizzare una stima accurata delle massime sovratensioni raggiungibili nel caso in esame; inoltre, è stata dimostrata l'importanza di inserire a protezione degli OMP degli opportuni scaricatori di sovratensione.

Capitolo 1

La propagazione dei transitori nelle linee

I fenomeni transitori riguardano la transizione da una condizione di regime permanente ad un'altra. Nel caso specifico di sistemi elettrici, tali fenomeni sono di natura elettromagnetica, con un range di frequenze da DC (0,1 Hz) a 50 MHz e ad essi sono associate onde viaggianti sulle linee [1]. I transitori che più creano disturbi nelle reti elettriche di alta tensione sono quelli riguardanti le sovratensioni. Infatti, queste ultime causano sollecitazioni elevate alle varie apparecchiature, che possono condurre sino alla rottura dell'isolamento. Poiché le cause, e quindi gli effetti, possono essere molteplici, si distinguono:

- * sovratensioni di origine interna, associate ai transitori di manovra;
- * sovratensioni di origine esterna, associate ai fenomeni atmosferici.

1.1 Le onde viaggianti

Al fine di effettuare un'analisi accurata del problema, è necessario caratterizzare il sistema elettrico con parametri distribuiti. Pertanto, per un elemento generico di linea, come quello rappresentato in figura 1.1, è possibile scrivere [2]:

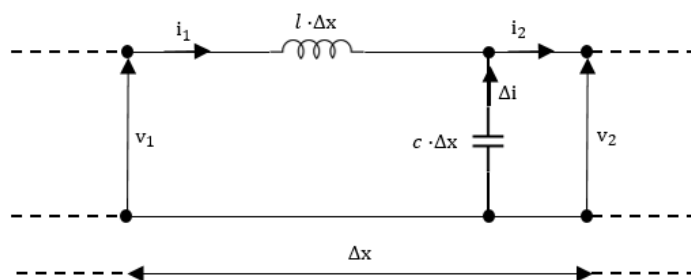


Figura 1.1: Elemento generico di linea a parametri distribuiti.

$$v_2 - v_1 = \Delta v = -\frac{\partial i_1}{\partial t} \ell \Delta x \quad (1.1a)$$

$$i_2 - i_1 = \Delta i = -\frac{\partial v_2}{\partial t} c \Delta x \quad (1.1b)$$

con ℓ e c rispettivamente auto-induttanza e capacità della linea per unità di lunghezza. Considerando Δx infinitesimo, si ottengono le seguenti equazioni differenziali:

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = \ell \frac{\partial i}{\partial t} \quad (1.2a)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = c \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1.2b)$$

Tali equazioni sono soddisfatte dalle seguenti funzioni¹:

$$v(x, t) = v_d(x - at) + v_s(x + at) \quad (1.3a)$$

$$i(x, t) = \frac{v_d(x - at)}{Z} + \frac{v_s(x + at)}{-Z} \quad (1.3b)$$

avendo definito l'impedenza d'onda (o impedenza caratteristica) $Z = \sqrt{\ell/c}$ e la velocità di propagazione $a = 1/\sqrt{\ell c}$, che risultano essere indipendenti dalla forma d'onda. Le v_d e v_s sono rispettivamente le onde di tensione progressiva (verso destra) e regressiva (verso sinistra). Ad esse, sono associate le rispettive onde di corrente, aventi la stessa forma ma scalate dell'opportuna costante Z , come mostrato in figura 1.2. Tale associazione si spiega se si assume che ogni elemento di lunghezza

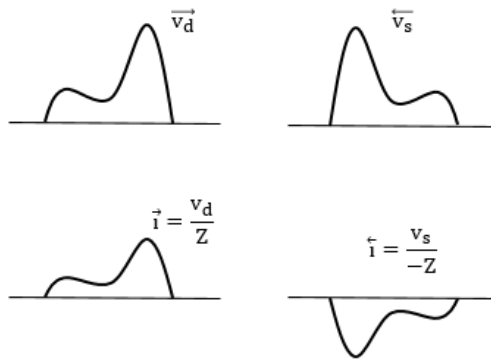


Figura 1.2: Onde di tensione e onde di corrente associate.

Δx possiede una carica Δq : poiché dopo un tempo $\Delta t = \Delta x/a$ l'onda di tensione è traslata della quantità Δx , allora è possibile considerare l'intensità di corrente secondo la sua definizione:

$$i_x = \frac{\Delta q}{\Delta t} = v_x c a = \frac{v_x}{Z} \quad (1.4)$$

¹Dal problema delle corde vibranti risolto da J. B. D'Alembert nel 1747.

Si noti che tali cariche non si spostano con velocità pari ad a : esse si muovono infatti alla velocità di deriva. Tuttavia, i loro fenomeni di addensamento e diradamento causano la propagazione dell'onda, che avviene invece alla velocità a .

1.1.1 Impedenza d'onda

Ogni linea è quindi caratterizzata da una coppia di grandezze: induttanza ℓ e capacità c per unità di lunghezza oppure impedenza caratteristica Z e velocità a . Poiché l'impedenza d'onda gioca un ruolo fondamentale nella propagazione delle onde viaggianti, risulta interessante determinarne l'ampiezza in alcuni casi particolari riportati in figura 1.3.

- * Nel caso a) di singolo conduttore ideale di diametro d , posto ad un'altezza h dal terreno, l'auto-induttanza e la capacità per unità di lunghezza sono così calcolate:

$$\ell = 2 \ln \frac{4h}{d} \qquad c = \frac{1}{2a^2 \ln \frac{4h}{d}} \qquad (1.5)$$

L'impedenza d'onda risulta quindi essere:

$$Z = \sqrt{\frac{\ell}{c}} = 60 \ln \frac{4h}{d} [\Omega] \qquad (1.6)$$

- * Se sono presenti, come nel caso b), due conduttori posti a distanza s l'uno dall'altro, la capacità totale del sistema è dimezzata e pari a:

$$c = \frac{1}{4a^2 \ln \frac{2s}{d}} \qquad (1.7)$$

In questo caso, si ottiene:

$$Z = 120 \ln \frac{2s}{d} [\Omega] \qquad (1.8)$$

- * Nel caso infine di sistema trifase c), la capacità aumenta di un terzo² e l'impedenza caratteristica diventa:

$$Z = 90 \ln \frac{2s}{d} [\Omega] \qquad (1.9)$$

Per linee aeree trifasi, Z assume valori compresi tra $300 \div 500 \Omega$; in esse, le onde si propagano ad una velocità approssimabile alla velocità della luce, ovvero $300 \text{ m}/\mu\text{s}$.

²Per la sovrapposizione dei campi potenziali di linea.

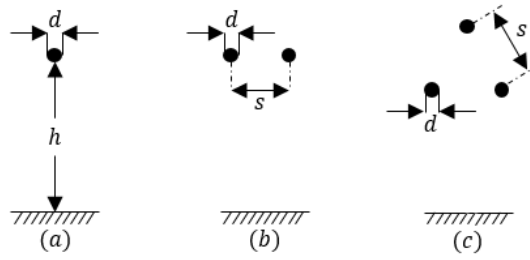


Figura 1.3: Geometrie per il calcolo dell'impedenza d'onda: (a) singolo conduttore, (b) due conduttori, (c) sistema trifase.

1.2 I coefficienti di riflessione e trasmissione

L'onda viaggiante si propaga lungo le linee elettriche: se lungo il percorso è presente una variazione dell'impedenza d'onda, causata da una discontinuità M che separa due tratti di linea caratterizzati da due diverse impedenze Z_1 e Z_2 (figura 1.4), l'onda incidente v_i viene in parte riflessa e in parte trasmessa, secondo la relazione³:

$$v_i + v_r = v_t \quad (1.10)$$

dove v_r è l'onda di tensione riflessa mentre v_t è l'onda di tensione trasmessa. Analogamente, vale una simile relazione anche per le correnti associate⁴:

$$i_i + i_r = i_t \quad (1.11)$$

Quindi, si deduce che lo stato elettrico di una linea può sempre essere rappresentato dalla sovrapposizione di due impulsi viaggianti in direzioni opposte.

Considerando le equazioni che legano le onde di tensione e le onde di corrente, è possibile riscrivere:

$$i_i = \frac{v_i}{Z_1} \quad i_r = -\frac{v_r}{Z_1} \quad i_t = \frac{v_t}{Z_2} \quad (1.12)$$

e sostituendo queste nella (1.11), si ottiene:

$$v_i - v_r = \frac{Z_1}{Z_2} v_t \quad (1.13)$$

Da quest'ultima, è possibile ricavare i coefficienti di riflessione ρ e di trasmissione τ , così definiti:

$$\rho = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \tau = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (1.14)$$

e per i quali vale sempre la relazione:

$$1 + \rho = \tau \quad (1.15)$$

³La discontinuità non introduce variazioni di tensione.

⁴Secondo il principio di continuità.

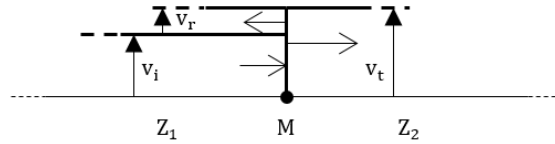


Figura 1.4: Punto di discontinuità tra due linee a diversa impedenza d'onda.

L'onda riflessa si propaga in seguito con la stessa velocità dell'onda incidente, $a_1 = 1/\sqrt{\ell_1 c_1}$, mentre l'onda trasmessa ha velocità $a_2 = 1/\sqrt{\ell_2 c_2}$, secondo le caratteristiche del successivo tratto di linea.

1.2.1 Esempi di discontinuità

Risulta interessante, per meglio capire quanto visto sino ad ora, analizzare due situazioni particolari, caratterizzate da un solo conduttore percorso da un'onda di tensione incidente a gradino, in cui Z_2 assume i seguenti valori:

- * $Z_2 = \infty$. Nel caso di circuito aperto, i coefficienti di riflessione e trasmissione calcolati a partire dalle equazioni (1.14) assumono i valori $\rho = 1$ e $\tau = 2$, per cui $v_r = v_i$ e $v_t = 2v_i$, come mostra la figura 1.5. Le rispettive onde di corrente si comportano di conseguenza secondo le relazioni viste in (1.12).

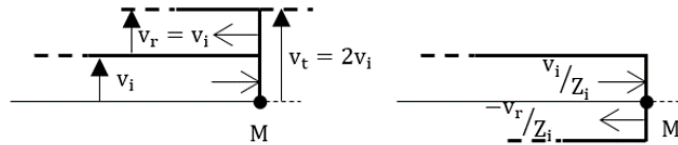


Figura 1.5: Onde di tensione e di corrente per $Z_2 = \infty$.

- * $Z_2 = 0$. Nel caso di cortocircuito, invece, i coefficienti di riflessione e trasmissione valgono $\rho = -1$ e $\tau = 0$, pertanto $v_r = -v_i$ e $v_t = 0$, come mostra la figura 1.6.

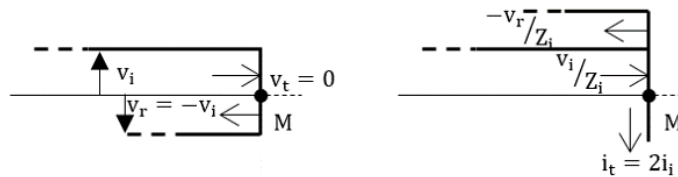


Figura 1.6: Onde di tensione e di corrente per $Z_2 = 0$.

Un'altra situazione particolarmente interessante da analizzare è la seguente: con riferimento alla figura 1.7, una resistenza R è posta in parallelo in corrispondenza di una giunzione tra due linee elettriche di impedenza d'onda rispettivamente Z_1 e Z_2 . Nonostante la tensione sia la stessa nelle due linee, da cui

$$v_{i1} + v_{r1} = v_2 \tag{1.16}$$

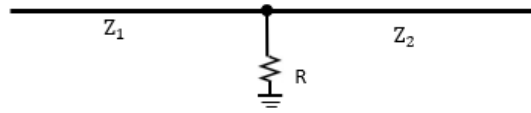


Figura 1.7: Resistenza in parallelo in corrispondenza della giunzione tra due linee.

le correnti sono diverse a causa della quantità di carica che fluisce lungo la resistenza posta in parallelo⁵:

$$i_1 = i_2 + \frac{v_2}{R} \quad (1.17)$$

Pertanto, per la (1.16), le corrispettive correnti sono:

$$\frac{v_{i1}}{Z_1} - \frac{v_{r1}}{Z_1} = \frac{v_2}{Z_2} + \frac{v_2}{R} \quad (1.18)$$

Moltiplicando quest'ultima equazione per Z_1 e sommandola alla (1.16), si ottengono le equazioni delle onde trasmessa e riflessa:

$$\begin{aligned} v_2 &= \frac{\frac{2}{Z_1}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{R}} v_{i1} \\ v_{r1} &= \frac{\frac{1}{Z_1} - \frac{1}{Z_2} - \frac{1}{R}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{R}} v_{i1} \end{aligned} \quad (1.19)$$

Se R è sufficientemente piccola, è possibile rimuovere notevolmente l'ampiezza dell'onda trasmessa.

Nel caso più generale, in cui la discontinuità non è di natura puramente resistiva, i coefficienti di trasmissione e riflessione non sono costanti, bensì variabili nel tempo. Tali fenomeni di riflessione e trasmissione sono laboriosi da analizzare anche nel caso di situazioni estremamente semplici. Uno strumento utile allo studio è il diagramma a graticcio, in figura 1.8 [3]: esso consente di ricostruire i giochi di propagazione, in corrispondenza dei punti di discontinuità, tenendo conto degli opportuni coefficienti di riflessione e trasmissione a seconda che le onde siano progressive (ρ , τ) o regressive⁶ (ρ' , τ').

1.3 Generazione di onde viaggianti

E' stato visto che l'impedenza d'onda e la velocità di propagazione sono caratteristiche intrinseche della linea elettrica. La forma e l'ampiezza dell'onda viaggiante, invece, dipendono dalla causa che l'ha generata e dalle condizioni al contorno. Risulta quindi interessante analizzare alcuni casi di generazione di onde:

- * Si consideri una linea relativamente lunga, che viene energizzata da un generatore ideale di tensione sinusoidale (figura 1.9). Quando a $t = 0$ l'interruttore

⁵Legge di Kirchhoff ai nodi.

⁶In tal caso, nelle (1.14) le due impedenze d'onda devono essere scambiate.

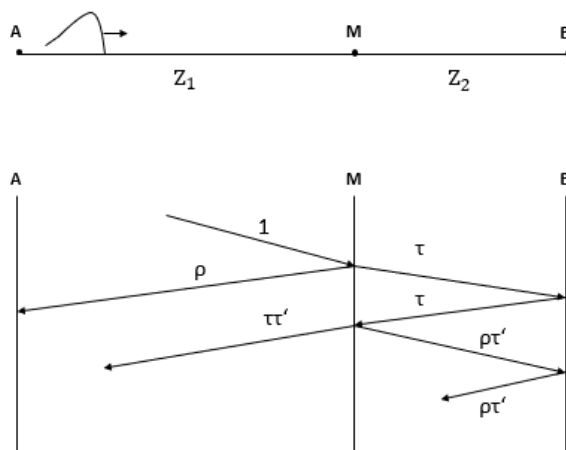


Figura 1.8: Esempio di diagramma a graticcio.

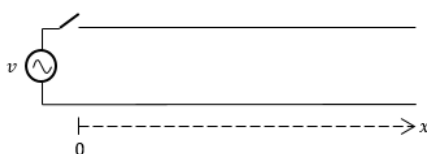


Figura 1.9: Energizzazione di una linea.

viene chiuso, si propaga alla velocità della luce un'onda di tensione puramente progressiva⁷, a cui è associata la corrispondente onda di corrente, opportunamente scalata della costante Z . Tale impulso, che energizza la linea, non ha un'ampiezza costante lungo la propagazione: il fronte dell'onda è un gradino di ampiezza pari al valore istantaneo di tensione all'istante di chiusura; tale fronte viaggia lungo la linea creando dietro sè una distribuzione sinusoidale di tensione e corrente alla frequenza imposta dal generatore. Data la presenza delle due onde viaggianti, viene trasmessa lungo la linea una potenza pari a $P = vi$.

- * Si consideri ora una fulminazione che colpisce un conduttore posto ad una altezza h dal terreno (figura 1.10). La carica statica accumulata nella nube viene scaricata sulla linea e da lì si propaga in ugual modo in entrambe le direzioni, per giungere successivamente ad una nuova situazione di regime. Le due onde hanno quindi la stessa distribuzione spaziale della carica rilasciata e metà ampiezza della tensione associata.

Si noti che le onde che vengono generate nei due casi sopra esposti risultano avere caratteristiche di forma, ampiezza e durata completamente differenti.

⁷Immediatamente dopo la chiusura non possono esserci onde di tensione o corrente al termine della linea, quindi non possono esserci onde riflesse.

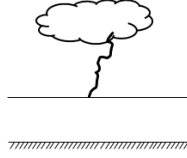


Figura 1.10: Fulminazione di una linea.

1.4 Energia e smorzamento

Il contenuto energetico di un'onda viaggiante è dato dalla somma delle energie elettrostatica e magnetica immagazzinate rispettivamente in c e ℓ :

$$w_{el} = \frac{1}{2}cv^2 \quad (1.20a)$$

$$w_m = \frac{1}{2}li^2 \quad (1.20b)$$

Poiché queste due componenti sono uguali tra loro, l'energia totale immagazzinata per unità di lunghezza è data da:

$$w = 2w_{el} = 2w_m \quad (1.21)$$

La potenza dell'onda viaggiante è di conseguenza data dal prodotto tra il contenuto energetico e la velocità di propagazione:

$$P = wa = i^2 l \frac{1}{\sqrt{\ell c}} = i^2 Z = \frac{v^2}{Z} \quad (1.22)$$

Tali potenze possono assumere valori sufficientemente elevati da produrre effetti non trascurabili nelle reti di alta tensione, la cui durata è limitata solo dall'alta velocità di propagazione. Pertanto, nel caso di linee ideali, trascurandone l'isolamento e la resistenza dei conduttori, la potenza associata all'onda viaggiante si propaga indisturbata, senza perdite né distorsioni di forma. Tuttavia, nel caso di linee reali, si riscontrano delle perdite di potenza, che vengono dissipate sotto forma di calore nella resistenza dei conduttori r e dell'isolamento p (per unità di lunghezza); le perdite totali per un elemento Δx sono pari a:

$$P_p = \left(i^2 r + \frac{v^2}{p} \right) \Delta x = i^2 \left(r + \frac{Z^2}{p} \right) \Delta x \quad (1.23)$$

Differenziando la (1.22), si ottengono le perdite dell'onda viaggiante per ogni elemento della linea:

$$-dP = -2iZdi \quad (1.24)$$

e, eguagliando quest'ultima con la (1.23), risulta:

$$i^2 \left(r + \frac{Z^2}{p} \right) dx = -2iZdi \quad (1.25)$$

Da questa, separando le variabili i e x , si ricava la seguente equazione differenziale:

$$\frac{di}{i} = -\frac{1}{2} \left(\frac{r}{Z} + \frac{Z}{p} \right) dx \quad (1.26)$$

Infine, integrando, è possibile ricavare la variazione di corrente lungo la linea, nonché la rispettiva variazione di tensione:

$$i = i_0 e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{r}{Z} + \frac{Z}{p} \right) x \right]} \quad (1.27a)$$

$$v = v_0 e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{r}{Z} + \frac{Z}{p} \right) x \right]} \quad (1.27b)$$

Le resistenze presenti lungo la linea elettrica producono quindi uno smorzamento sia per le onde di corrente che per le onde di tensione di tipo esponenziale, che dipende solamente dalle caratteristiche della linea stessa e non influenza in alcun modo la velocità di propagazione. In particolare, nel caso di linee di trasmissione, il valore di p è molto elevato, pertanto le perdite nell'isolamento possono essere trascurate, ottenendo il seguente coefficiente di attenuazione:

$$\frac{v}{v_0} = \frac{i}{i_0} = e^{-rx/2Z} = e^{-rt/2l} \quad (1.28)$$

Dall'ultimo membro della (1.28), si può vedere come lo smorzamento dipenda dal quoziente tra la resistenza e l'auto-induttanza, ovvero il reciproco della costante di tempo della linea: si evince che l'attenuazione delle onde viaggianti è governata dalle stesse leggi che regolano i circuiti oscillanti a parametri concentrati [4].

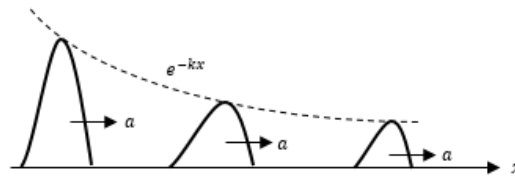


Figura 1.11: Smorzamento dell'onda viaggiante lungo la linea.

1.4.1 Distorsione della forma d'onda

Oltre all'effetto dissipativo dovuto alle resistenze dei conduttori, sono presenti altri fattori che influenzano e modificano la forma d'onda delle onde viaggianti. Infatti, fenomeni quali l'effetto corona e l'effetto pelle producono ulteriori distorsioni.

- * *Effetto corona.* Quando l'ampiezza dell'impulso supera il valore limite V_{ec} , si innesca una corrente di scarica i_{ec} a partire dalla superficie del conduttore. Questo provoca una ingente perdita, definita come:

$$P_{ec} = \frac{v(v - V_{ec})}{p} \quad (1.29)$$

dove p è la resistenza dell'isolamento corrispondente alle perdite per la corrente di scarica. Derivando la (1.22) e ponendola pari alla (1.29), si ottiene un'equazione differenziale in due variabili, v e x , la cui soluzione è:

$$v - V_{ec} = (v_0 - V_{ec})e^{-Zx/2p} \quad (1.30)$$

Si tratta ancora una volta di un'attenuazione esponenziale, come mostra la figura 1.12.

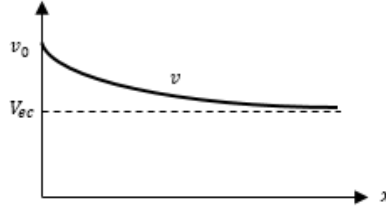


Figura 1.12: Smorzamento dovuto all'effetto corona.

- * *Effetto pelle.* Lo smorzamento non dipende solamente dalla distanza percorsa, ma anche dal livello di frequenza. Infatti, le resistenze coinvolte nel sistema elettrico sono proporzionali alla radice quadrata della frequenza angolare:

$$r = \rho\sqrt{\omega} \quad (1.31)$$

Di conseguenza, riprendendo la (1.28), si nota come la distorsione della forma d'onda aumenti all'aumentare della frequenza. E' possibile riportare tale equazione nel dominio spazio-temporale, considerando il tempo dall'inizio dell'impulso, definendo lo spazio percorso ξ :

$$\omega = \frac{1}{t} \qquad \xi = at \quad (1.32)$$

Così facendo, si nota come il fronte d'onda venga appiattito durante la sua propagazione lungo la linea (figura 1.13):

$$\frac{v}{v_0} = e\left(-\frac{\rho x}{2Z\sqrt{t}}\right) = e\left(-\frac{\rho x\sqrt{a}}{2Z\sqrt{\xi}}\right) \quad (1.33)$$

Si può quindi dedurre che, nello studio delle onde viaggianti nei sistemi elettrici, l'ipotesi di circuiti ideali è cautelativa, in quanto trascura gli smorzamenti che resistenze, effetto corona ed effetto pelle provocano.

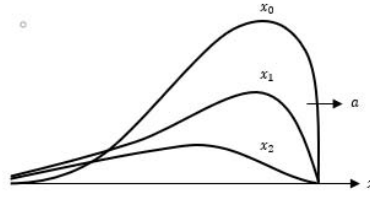


Figura 1.13: Smorzamento dovuto all'effetto pelle in funzione di varie distanze percorse.

1.5 Interazione tra linee adiacenti

Le onde viaggianti producono campi magnetici che hanno effetti sulle linee elettriche poste nelle loro vicinanze, producendo forti interazioni. Per analizzare il problema, si consideri il sistema riportato in figura 1.14, in cui il conduttore superiore è percorso da un'onda viaggiante a gradino. Il campo elettromagnetico prodotto da quest'ultima induce tensioni e correnti nella linea adiacente, la quale a sua volta produce un contro effetto nella linea superiore [4]. E' già stato visto

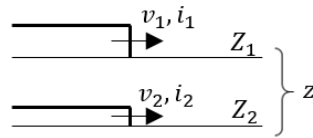


Figura 1.14: Interazione tra due linee elettriche parallele.

in (1.2a) che le variazioni di tensione nello spazio dipendono solamente dall'auto-induttanza e dalle variazioni di corrente nel tempo. In questo caso è necessario introdurre un ulteriore termine per la tensione indotta da variazioni di corrente nella linea adiacente. Pertanto, con ℓ_1 e ℓ_2 auto-induttanze e ℓ_m mutua induttanza per unità di lunghezza, risulta:

$$-\frac{\partial v_1}{\partial x} = \ell_1 \frac{\partial i_1}{\partial t} + \ell_m \frac{\partial i_2}{\partial t} \quad (1.34a)$$

$$-\frac{\partial v_2}{\partial x} = \ell_2 \frac{\partial i_2}{\partial t} + \ell_m \frac{\partial i_1}{\partial t} \quad (1.34b)$$

Allo stesso modo, è possibile scrivere che le variazioni di tensione nel tempo dipendono dalla capacità della linea e dalle variazioni di corrente nello spazio, ma anche dalle variazioni di corrente nella linea adiacente. Di conseguenza, con c_1 e c_2 capacità e c_m mutua capacità per unità di lunghezza, si ottiene:

$$-\frac{\partial v_1}{\partial t} = \frac{1}{c_1} \frac{\partial i_1}{\partial x} + \frac{1}{c_m} \frac{\partial i_2}{\partial x} \quad (1.35a)$$

$$-\frac{\partial v_2}{\partial t} = \frac{1}{c_2} \frac{\partial i_2}{\partial x} + \frac{1}{c_m} \frac{\partial i_1}{\partial x} \quad (1.35b)$$

Poiché tali equazioni differenziali sono lineari, è possibile applicare il principio di sovrapposizione degli effetti: ciò è utile al fine di determinare le impedenze d'onda, annullando l'una o l'altra corrente. Infatti, considerando dapprima $i_2 = 0$, la (1.34a) e la (1.35a) diventano:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial v_1}{\partial x} &= \ell_1 \frac{\partial i_1}{\partial t} \\ -\frac{\partial v_1}{\partial t} &= \frac{1}{c_1} \frac{\partial i_1}{\partial x} \\ v_1 &= Z_1 i_1 \end{aligned} \tag{1.36}$$

mentre la (1.34b) e la (1.35b) diventano:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial v_2}{\partial x} &= \ell_m \frac{\partial i_1}{\partial t} \\ -\frac{\partial v_2}{\partial t} &= \frac{1}{c_m} \frac{\partial i_1}{\partial x} \\ v_2 &= z i_1 \end{aligned} \tag{1.37}$$

Ripetendo quanto fatto sino ad ora con $i_1 = 0$, per le (1.34a) e (1.35a) si può scrivere:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial v_1}{\partial x} &= \ell_m \frac{\partial i_2}{\partial t} \\ -\frac{\partial v_1}{\partial t} &= \frac{1}{c_m} \frac{\partial i_2}{\partial x} \\ v_1 &= z i_2 \end{aligned} \tag{1.38}$$

e per le (1.34b) e (1.35b) si può scrivere:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial v_2}{\partial x} &= \ell_2 \frac{\partial i_2}{\partial t} \\ -\frac{\partial v_2}{\partial t} &= \frac{1}{c_2} \frac{\partial i_2}{\partial x} \\ v_2 &= Z_2 i_2 \end{aligned} \tag{1.39}$$

Da queste equazioni differenziali si ricavano le tre impedenze d'onda, di cui due di linea e una mutua:

$$Z_1 = \sqrt{\frac{\ell_1}{c_1}} \tag{1.40}$$

$$Z_2 = \sqrt{\frac{\ell_2}{c_2}} \tag{1.41}$$

$$z = \sqrt{\frac{\ell_m}{c_m}} \tag{1.42}$$

Si noti che l'impedenza mutua z varia al variare della distanza tra le due linee considerate. Appare utile, quindi, rapportarla alle impedenze d'onda Z_1 e Z_2 :

$$\begin{aligned}\frac{z}{Z_1} &= \sqrt{\frac{\ell_m c_1}{c_m \ell_1}} \\ \frac{z}{Z_2} &= \sqrt{\frac{\ell_m c_2}{c_m \ell_2}}\end{aligned}\quad (1.43)$$

Poiché le velocità di propagazione sono uguali, vale la relazione:

$$a = \frac{1}{\sqrt{\ell_1 c_1}} = \frac{1}{\sqrt{\ell_2 c_2}} = \frac{1}{\sqrt{\ell_m c_m}} \quad (1.44)$$

ed è così possibile riscrivere le (1.44):

$$\begin{aligned}\frac{z}{Z_1} &= \frac{c_1}{c_m} \\ \frac{z}{Z_2} &= \frac{c_2}{c_m}\end{aligned}\quad (1.45)$$

Questi rapporti, come si nota dalle loro definizioni, dipendono principalmente dalle geometrie dei due sistemi che interagiscono tra loro. Inoltre, da queste formule di base è possibile anche ricavare eventuali fattori schermanti dovuti alla presenza di funi di guardia [5].

1.6 Onde viaggianti in un sistema trifase

Nel caso più reale di un sistema trifase, l'analisi della propagazione dei fenomeni transitori deve essere effettuata in maniera più accurata: infatti, non è possibile trascurare i mutui accoppiamenti che si instaurano tra i conduttori di fase e la fune di guardia [2]. Si consideri il sistema riportato in figura 1.15, caratterizzato da tre conduttori ideali disposti parallelamente al terreno. Supponendo una simmetria strutturale⁸ del sistema trifase, si possono scrivere le seguenti equazioni:

$$\begin{aligned}-\frac{\partial v_1}{\partial x} &= \ell \frac{\partial i_1}{\partial t} + \ell_m \frac{\partial i_2}{\partial t} + \ell_m \frac{\partial i_3}{\partial t} \\ -\frac{\partial v_2}{\partial x} &= \ell_m \frac{\partial i_1}{\partial t} + \ell \frac{\partial i_2}{\partial t} + \ell_m \frac{\partial i_3}{\partial t} \\ -\frac{\partial v_3}{\partial x} &= \ell_m \frac{\partial i_1}{\partial t} + \ell_m \frac{\partial i_2}{\partial t} + \ell \frac{\partial i_3}{\partial t}\end{aligned}\quad (1.46)$$

$$\begin{aligned}-\frac{\partial i_1}{\partial x} &= (c + 2c_m) \frac{\partial v_1}{\partial t} - c_m \frac{\partial v_2}{\partial t} - c_m \frac{\partial v_3}{\partial t} \\ -\frac{\partial i_2}{\partial x} &= -c_m \frac{\partial v_1}{\partial t} + (c + 2c_m) \frac{\partial v_2}{\partial t} - c_m \frac{\partial v_3}{\partial t} \\ -\frac{\partial i_3}{\partial x} &= -c_m \frac{\partial v_1}{\partial t} - c_m \frac{\partial v_2}{\partial t} + (c + 2c_m) \frac{\partial v_3}{\partial t}\end{aligned}\quad (1.47)$$

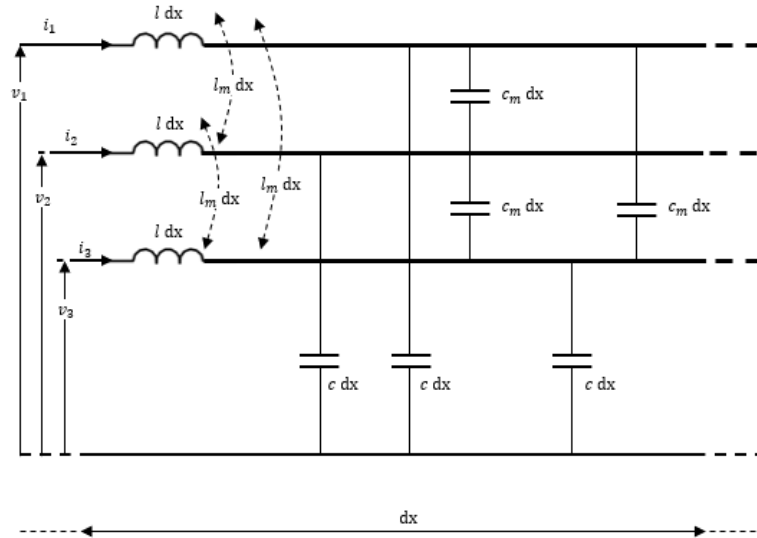


Figura 1.15: Sistema trifase.

Le (1.46) e (1.47) possono essere riscritte in forma matriciale e compattate come:

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = L \frac{\partial i}{\partial t} \quad -\frac{\partial i}{\partial x} = C \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1.48)$$

dove v e i sono i vettori colonna delle tensioni e correnti di fase, mentre L e C sono rispettivamente le seguenti matrici:

$$L = \begin{bmatrix} \ell & \ell_m & \ell_m \\ \ell_m & \ell & \ell_m \\ \ell_m & \ell_m & \ell \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} c + 2c_m & -c_m & -c_m \\ -c_m & c + 2c_m & -c_m \\ -c_m & -c_m & c + 2c_m \end{bmatrix} \quad (1.49)$$

Volendo riportare lo studio alle sequenze servendosi delle trasformazioni di Fortescue che mettono in relazione i vettori colonna delle grandezze di fase e i vettori colonna delle componenti alle sequenze attraverso opportune matrici complesse di trasformazione,

$$v_s = T v \quad v = T^{-1} v_s \quad i_s = T i \quad i = T^{-1} i_s \quad (1.50)$$

$$T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{\alpha} & \dot{\alpha}^2 \\ 1 & \dot{\alpha}^2 & \dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{\alpha}^2 & \dot{\alpha} \\ 1 & \dot{\alpha} & \dot{\alpha}^2 \end{bmatrix} \quad \dot{\alpha} = e^{i2\pi/3} \quad (1.51)$$

è possibile riscrivere le (1.48) come:

$$-\frac{\partial v_s}{\partial x} = L_s \frac{\partial i_s}{\partial t} \quad -\frac{\partial i_s}{\partial x} = C_s \frac{\partial v_s}{\partial t} \quad (1.52)$$

Le matrici L_s e C_s sono rispettivamente:

$$L_s = T L T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \ell_o & 0 & 0 \\ 0 & \ell' & 0 \\ 0 & 0 & \ell' \end{bmatrix} \quad C_s = T C T^{-1} = \begin{bmatrix} c_o & 0 & 0 \\ 0 & c' & 0 \\ 0 & 0 & c' \end{bmatrix} \quad (1.53)$$

in cui vengono definite le seguenti grandezze chilometriche di linea:

⁸Condizione irrealizzabile ma semplificativa ai fini dell'analisi.

- * $\ell_o = \ell + 2\ell_m$ è l'induttanza alla sequenza zero;
- * $\ell' = \ell - \ell_m$ è l'induttanza alle sequenze diretta e inversa, ovvero l'induttanza di esercizio;
- * $c_o = c$ è la capacità alla sequenza zero;
- * $c' = c + 3c_m$ è la capacità alle sequenze diretta e inversa, ovvero la capacità di esercizio.

Le trasformazioni di Fortescue consentono quindi la trattazione disaccoppiata dei tre modi di propagazione: per ciascuno di essi si possono definire un sistema di equazioni per le tensioni e le correnti, una velocità di propagazione e un'impedenza d'onda.

$$\begin{cases} -\frac{\partial v_k}{\partial x} = \ell_k \frac{\partial i_k}{\partial t} \\ \frac{\partial i_k}{\partial x} = c_k \frac{\partial v_k}{\partial t} \end{cases} \quad (1.54)$$

$$a_k = \frac{1}{\sqrt{\ell_k c_k}} \quad (1.55)$$

$$Z_k = \sqrt{\frac{\ell_k}{c_k}} \quad (1.56)$$

$$k = o, d, i$$

Poiché sia l'induttanza chilometrica che la capacità chilometrica assumono gli stessi valori nel caso di sequenza diretta e inversa, si riscontrano le seguenti uguaglianze:

$$a_d = a_i \qquad Z_d = Z_i \quad (1.57)$$

e inoltre, viste le definizioni sopra riportate, risulta valere:

$$Z_o > Z_{d,i} \quad (1.58)$$

Nel caso in cui si volessero considerare conduttori di fase e terreno caratterizzati da un certo valore di resistività non nullo, i sistemi di equazioni visti sino ad ora si complicano notevolmente: in tale situazione infatti sia le resistenze che le induttanze non sono costanti nel tempo, ma variano in funzione dell'effetto pelle. Pertanto, data la complessità del problema, si ricorre all'utilizzo di calcolatori.

Capitolo 2

Le sovratensioni di origine esterna

Le sovratensioni di origine esterna sono dovute a fulminazioni che colpiscono il sistema elettrico: esse sono una delle principali cause di disservizio¹ per le linee di trasmissione [6]. Si distinguono:

- * fulminazioni dirette, ovvero scariche che colpiscono un conduttore, la fune di guardia o un sostegno, eventualmente provocando un arco sulle catene di isolatori;
- * fulminazioni indirette, ovvero scariche in prossimità della linea che causano sovratensioni indotte.

L'elaborato si limita all'analisi delle scariche dirette, essendo queste le cause di sovratensioni più gravose. I calcoli teorici proposti si basano su ipotesi atte a schematizzare e semplificare il fenomeno delle fulminazioni (si trascurano diametro e numero di conduttori, frecce, ecc.): lo scopo primario è infatti quello di analizzare i principi delle scariche atmosferiche e i loro effetti, senza approfondire nel dettaglio e complicare le espressioni analitiche alla base.

2.1 Il fenomeno della fulminazione

Al fine di determinare le sovratensioni di origine atmosferica, è necessario analizzare il meccanismo della scarica di fulmine. Con i temporali, vi è una separazione di cariche di polarità opposta nelle nubi, come fossero dipoli elettrici. Lo spazio compreso tra nubi e terreno diventa quindi sede di un campo elettrico: quando quest'ultimo supera un certo valore critico, ha origine la scarica di fulmine, che può essere:

- * discendente, quando il campo critico viene raggiunto in prossimità delle nubi;
- * ascendente, quando il campo critico viene raggiunto in prossimità del suolo.

Nel primo caso, a partire dalla parte inferiore della nube, si origina un canale che si propaga verso il terreno per scatti successivi, ad una velocità pari ad un

¹In alcune zone, il 65 ÷ 70% dei guasti è dovuto a scariche atmosferiche.

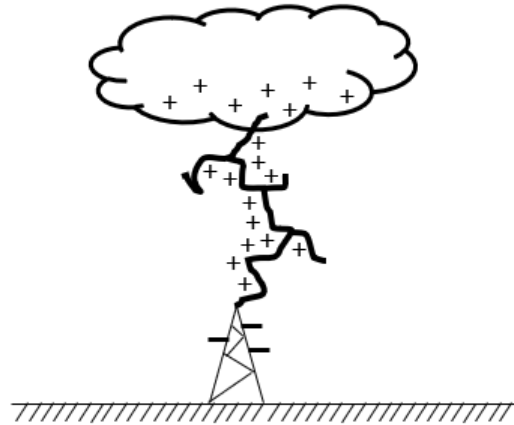


Figura 2.1: Esempio di fulminazione diretta.

millesimo della velocità della luce [7]. La carica precedentemente cumulata nella nube scende quindi verso terra, incrementando l'intensità del campo elettrico e originando, talvolta, controscariche ascendenti. Quando il canale discendente incontra il terreno o uno dei canali ascendenti formatisi, si innesca la scarica verso terra, ovvero lo smaltimento delle cariche provenienti dalla nube. L'intensità della corrente drenata è molto maggiore rispetto a quella associata al canale discendente²: infatti, nonostante la carica sia la stessa, la velocità a terra è mille volte maggiore. Oltre allo smaltimento a terra, vi è anche un processo di scarica di ritorno che si propaga verso l'alto: è a questo punto che il fenomeno della fulminazione diventa visibile. Dopo questa scarica, possono succedersi scariche successive, secondo diversi meccanismi.

Nel secondo caso, le scariche ascendenti si verificano per la presenza di strutture elevate: si sviluppano verso l'alto con correnti massime di qualche migliaia di A.

Limitatamente alle scariche discendenti, con la presenza di una linea di trasmissione, la componente tangenziale del campo elettrico generato dalla nube $E_{t,nube}$ deve annullarsi su ogni elemento della linea stessa, avendo supposto quest'ultima perfettamente conduttrice. Di conseguenza, le cariche indotte generano un campo elettrico indotto $E_{t,indotto}$ uguale ed opposto al precedente, in modo tale da annullarne l'effetto. Poiché la distribuzione di carica discendente varia nel tempo, anche la distribuzione delle cariche indotte sarà variabile. La scarica avviene nel momento in cui il canale ionizzato è sufficientemente vicino al suolo o ad una controscarica ascendente. L'analisi del problema con l'utilizzo di un approccio analitico risulta essere alquanto complessa, coinvolgendo non solo le distribuzioni di carica, ma anche velocità, processi di ionizzazione e neutralizzazione, considerando campi elettromagnetici e accoppiamenti non uniformi. Pertanto, per una trattazione accurata si rimanda a [7].

²Nel canale discendente scorrono centinaia di A, mentre nella scarica a terra si raggiungono centinaia di migliaia di A.

2.1.1 Dati statistici

Lo studio del fenomeno delle fulminazioni comprende, oltre ad un'analisi scientifica, un'analisi statistica spaziale e temporale [8], in modo da determinare un tasso medio di fulminazione per unità d'area in base a caratteristiche quali luogo e periodo dell'anno. I dati vengono raccolti ed elaborati da vari enti, quali per esempio CESI³, NASA, al fine di definire la densità ceraonica N_g , che rappresenta l'attività media regionale delle scariche atmosferiche, come mostra la figura 2.2⁴.

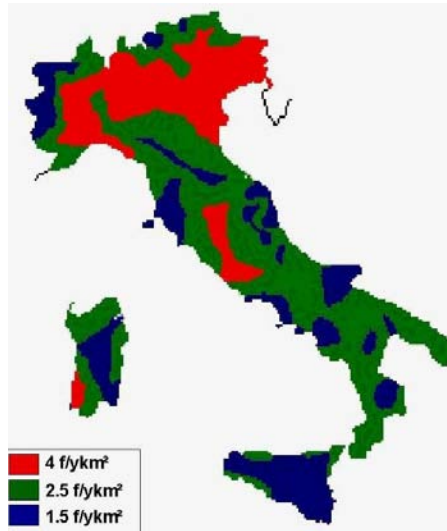


Figura 2.2: Densità ceraonica in Italia.

La densità ceraonica può anche essere stimata sulla base del numero di tempeste giornaliere registrate T_d , secondo la seguente relazione:

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} \quad (2.1)$$

Il calcolo di questi parametri, basati su archi temporali molto lunghi, è fondamentale ai fini di un'analisi ingegneristica del problema.

2.1.2 Parametri della scarica di fulmine

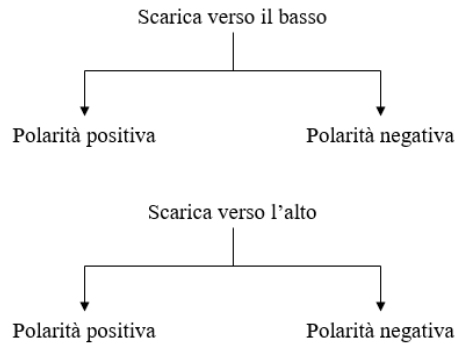
Data la complessità del fenomeno, risulta difficile determinarne delle caratteristiche tali da schematizzarlo. Tuttavia, grazie ad un'analisi dei valori medi registrati su lunghi archi di tempo, è possibile ricostruire un modello di fulmine tipico, nonostante la grande variabilità.

La fulminazione è innanzitutto caratterizzata dalla polarità della scarica, che è definita come la carica della nube che ha dato luogo alla scarica stessa. Con questa convenzione, il 90% delle fulminazioni tra nube e terra sono di polarità negativa [7]: di questi, il 50% consiste di più scariche consecutive. Un'altra caratteristica fondamentale è la direzione di propagazione del canale di scarica: il fulmine può

³Che si avvale del Sistema Italiano Rilevamento Fulmini.

⁴Secondo la norma CEI 81-3.

essere discendente o ascendente. Su queste basi, si distinguono quattro categorie di fulminazioni tra nubi e terreno:



Per quanto riguarda la forma d'onda, nel caso di fulmini discendenti, si assiste ad un andamento ad impulso: si tratta di un impulso di corrente caratterizzato da un fronte ripido, di valori $0,5 \div 100 \text{ kA}/\mu\text{s}$, durata compresa tra $100 \div 1000 \mu\text{s}$ e ampiezza dell'ordine di $3 \div 300 \text{ kA}$ [9].

In particolare, per quanto riguarda i valori di picco della corrente di fulmine,

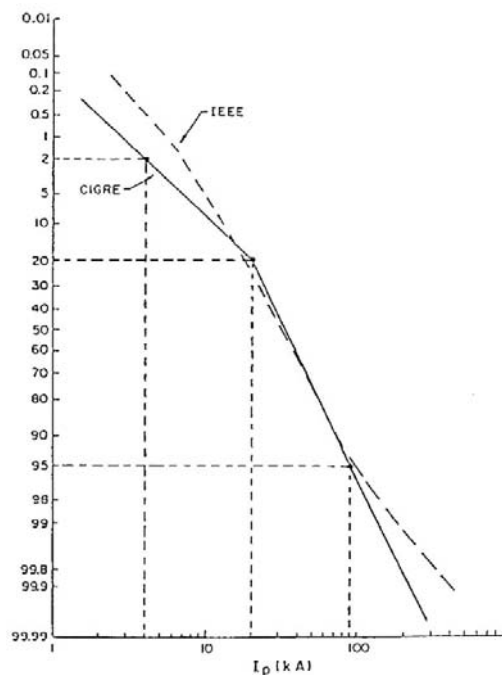


Figura 2.3: Confronto tra le distribuzioni dei valori di picco di fulminazioni negative proposte da IEEE e CIGRE.

vengono proposti in letteratura vari diagrammi (come quello in figura 2.3 [10]) e varie funzioni che ne esprimono la distribuzione di probabilità. Per esempio, a seconda della polarità della scarica di fulmine è possibile calcolare:

- * la probabilità che avvenga una fulminazione di polarità negativa con corrente maggiore o uguale a I^* :

$$p(I > I^*) = \frac{1}{1 + (I^*/31)^{2,6}} \quad (2.2)$$

- * la probabilità che avvenga una fulminazione di polarità positiva con corrente maggiore o uguale a I^* :

$$p(I > I^*) = 10^{2-I^*/60} \quad (2.3)$$

L'insieme di questi dati statistici è fondamentale in sede di progetto di una linea aerea per il corretto dimensionamento dell'isolamento, data l'incidenza dei guasti dovuti a scariche atmosferiche: risulta importante conoscere sia il probabile numero di scariche, sia la forma d'onda, nonché l'intensità di corrente delle fulminazioni.

2.2 Fulminazione diretta

Come già detto, anche se le fulminazioni dirette sono meno frequenti di quelle indirette, è più importante analizzarle perché causano sollecitazioni e sovratensioni maggiori. Si distinguono fulminazioni di un conduttore di fase, di un sostegno e della fune di guardia.

In prima approssimazione, si può considerare il canale ionizzato come un conduttore cilindrico verticale di impedenza d'onda Z_f e uniformemente carico alla tensione V_f ; indicando con Z_p l'impedenza d'onda dell'oggetto colpito, si può scrivere:

$$I_f = \frac{V_f}{Z_p + Z_f} \quad (2.4)$$

Poiché Z_f assume valori compresi tra $1650 \div 5000 \Omega$, la (2.4) diventa:

$$I_f = \frac{V_f}{Z_f} \quad (2.5)$$

Di conseguenza, la corrente di fulmine risulta essere indipendente dal sistema colpito: pertanto, il fulmine verrà rappresentato in questa trattazione come un generatore di corrente ad impulso, caratterizzato da un valore di picco I_f , un tempo del fronte d'onda t_f e un tempo all'emivalore t_h . Per quanto concerne invece la rappresentazione dei conduttori di fase e delle funi di guardia, essi vengono assimilati a conduttori cilindrici circolari, paralleli tra loro e al terreno, in cui le onde si propagano ad una velocità costante pari alla velocità della luce, senza attenuazioni e distorsioni [6].

2.2.1 Fulminazione diretta di un conduttore di fase

La fulminazione diretta di un conduttore di fase può essere così schematizzata: un fulmine colpisce un conduttore di diametro d , posto orizzontalmente ad una altezza h dal suolo, nel punto P (figura 2.4a). Si indicano con R la resistenza di terra a frequenza industriale del traliccio e con C la capacità tra conduttore e sostegno, principalmente dovuta alla catena di isolatori.

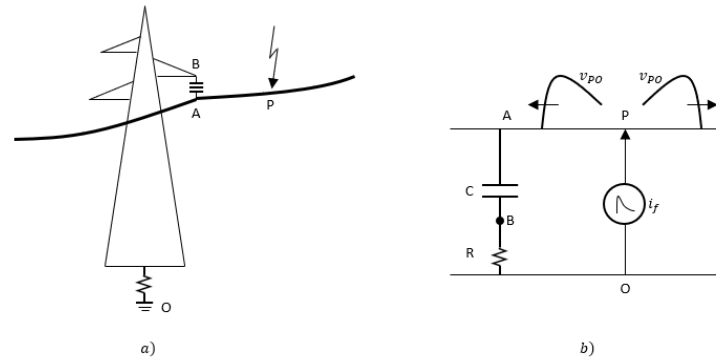


Figura 2.4: Fulminazione diretta di un conduttore di fase.

Con riferimento al circuito in figura 2.4b, considerando il conduttore di lunghezza infinita e trascurando la corrente assorbita dal ramo RC , la tensione risulta:

$$v_{PO}(t) = \frac{Z}{2} i_f(t) \quad (2.6)$$

Si propagano quindi a partire da P nei due versi opposti del conduttore due onde di tensione aventi la stessa forma dell'impulso. Se però tale valore di sovratensione supera la tensione di tenuta delle catene di isolatori, cosa che accade nella quasi totalità delle scariche dirette su un conduttore, si innesca all'istante t^* un arco in aria, causando un guasto monofase-terra; ciò provoca un brusco abbassamento della tensione, che assume il valore approssimato⁵:

$$v^*(t) = R i_f(t) \quad (2.7)$$

da cui si evince l'importanza di avere una bassa resistenza di messa a terra dei sostegni. In questo caso, la forma d'onda di tensione, definita forma tronca, è quella riportata in figura 2.5.

Per quanto riguarda le sovratensioni indotte sulle altre fasi, queste si possono stimare pari al 70% della sovratensione del conduttore colpito dalla fulminazione. Se il sistema è inoltre dotato di una fune di guardia, anche su quest'ultima viene indotta una tensione; non potendo però circolare alcuna corrente, la fune di guardia non influenza in alcun modo le tensioni e le correnti del conduttore di fase colpito dalla fulminazione. Pertanto, sarà presente solamente una tensione indotta pari al $20 \div 40\%$ della sovratensione del conduttore fulminato [cap.1, par.5].

Nel raro caso in cui la sovratensione non causa l'innesco dell'arco sulla catena di isolatori, parte della carica viene dissipata lungo la linea per le cause già affrontate nel paragrafo 1.4, parte viene smaltita a terra in corrispondenza del primo trasformatore che l'onda incontra.

2.2.2 Fulminazione diretta di un sostegno

Il fenomeno è schematizzato in figura 2.6a: un fulmine colpisce un sostegno privo di fune di guardia in corrispondenza del punto più elevato. Con riferimento al

⁵Dovuto al parallelo tra la resistenza R e metà dell'impedenza d'onda Z.

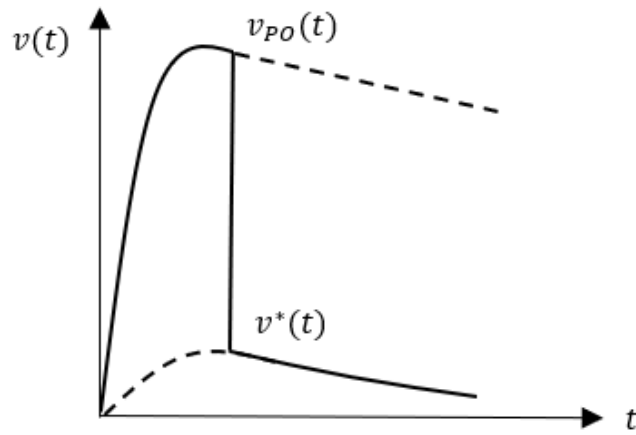


Figura 2.5: Andamento ad onda tronca.

corrispondente circuito equivalente (figura 2.6b), in prima approssimazione si può affermare che la tensione v_{AB} sia all'incirca pari alla tensione v_{PO} , pertanto:

$$v_{BA} \simeq v_{PO} = Ri_f(t) \tag{2.8}$$

Come precedentemente, anche nella quasi totalità di questi casi ciò provoca una

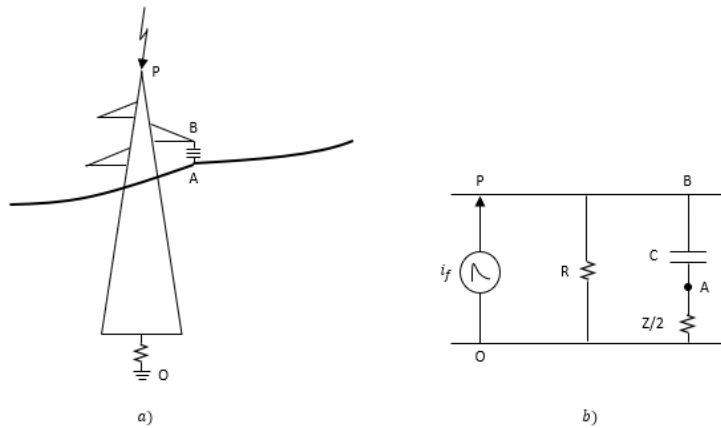


Figura 2.6: Fulminazione diretta di un sostegno privo di fune di guardia.

sovratensione tale da innescare un arco da B ad A (scarica inversa), coinvolgendo la fase che in quel momento è caratterizzata da un potenziale di segno opposto; questa scarica per prima verso terra, risultando così:

$$v_{PO} = \frac{R \cdot Z/2}{R + Z/2} i_f(t) \tag{2.9}$$

Se le onde di tensione che vengono quindi a propagarsi nei due versi opposti della linea sono sufficientemente elevate possono causare il cedimento dell'isolamento anche nei sostegni adiacenti.

Per proteggere i conduttori di fase dalle fulminazioni dirette, vengono installate una o più funi di guardia, ovvero corde in acciaio o acciaio-alluminio con effetto schermante. Se il sostegno colpito dalla scarica è dotato di fune di guardia, come mostra la figura 2.7, allora la sovratensione è pari a:

$$v_{PO} = \frac{R \cdot Z_g/2}{R + Z_g/2} i_f(t) \quad (2.10)$$

dove Z_g è l'impedenza d'onda della fune di guardia. Dalla (2.10) risulta evidente che il valore massimo di tensione è indipendente dalla presenza di sostegni adiacenti e dalle loro resistenze di messa a terra: ciò evidenzia l'importanza che ogni sostegno abbia una propria resistenza R molto bassa (dell'ordine di $5 \div 20 \Omega$) grazie ad un adeguato sistema di dispersori.

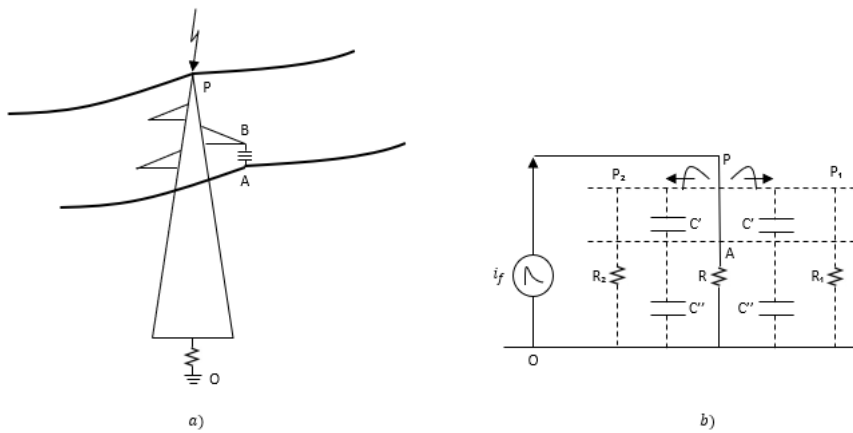


Figura 2.7: Fulminazione diretta di un sostegno dotato di fune di guardia.

In realtà, la tensione v_{PA} che sollecita la catena di isolatori è inferiore a v_{PO} a causa degli accoppiamenti capacitivo e induttivo che si instaurano tra la fune di guardia e il conduttore di fase. Pertanto, è possibile scrivere:

$$v_{PA} = k \cdot v_{PO} \quad (2.11)$$

dove $k = 0,7 \div 0,9$, a seconda della geometria del sistema. Come nel caso precedente, la scarica inversa avviene nel momento in cui la tensione v_{PA} supera la tensione di tenuta dell'isolamento.

2.2.3 Fulminazione diretta della fune di guardia

Si supponga, come ultimo caso preso in esame, che la fulminazione colpisca la fune di guardia a metà campata, come mostra la figura 2.8. Quando il fulmine colpisce il punto H, si propagano in verso opposto due onde di tensione uguali, di ampiezza $v_1 = v_2 = Z_g i_f / 2$. La sovratensione che si presenta tra H ed il suolo è data da:

$$v_{HO} = Z_g \frac{i_f}{2} \quad (2.12)$$

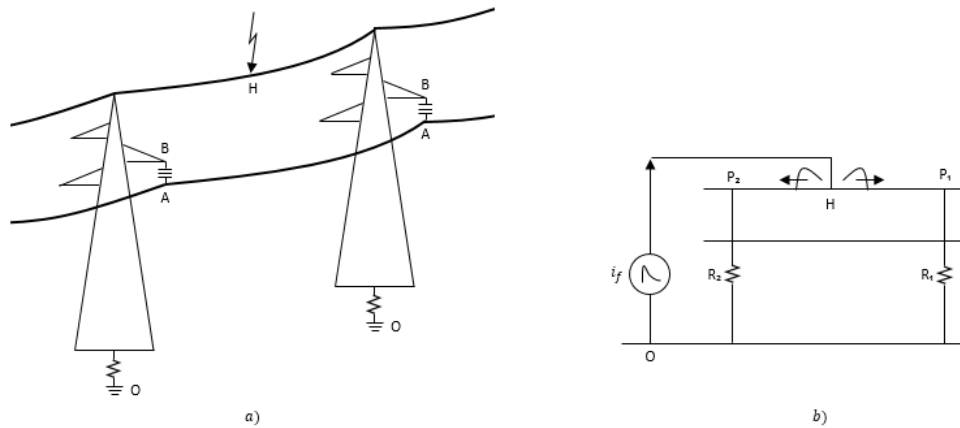


Figura 2.8: Fulminazione diretta della fune di guardia.

Se si considerano i mutui accoppiamenti induttivi e capacitivi presenti tra la fune di guardia e il conduttore di fase, le catene di isolatori sono sollecitate da una tensione inferiore a quella calcolata in (2.12):

$$v_{HA} = kv_{HO} = kZ_g \frac{i_f}{2} \quad (2.13)$$

In realtà, tali fenomeni sono di natura più complessa e le sovratensioni associate risultano inferiori ai valori qui riportati: ciò è dovuto principalmente all'effetto corona, qui trascurato, che aumenta il diametro dei conduttori diminuendo così gli accoppiamenti capacitivi, e alla formazione di onde riflesse e trasmesse lungo la linea, che sovrapponendosi alle sovratensioni iniziali ne abbassano l'ampiezza.

2.3 La risposta alla fulminazione

Da quanto visto sino ad ora, risulta di evidente importanza adottare, in sede di progetto, efficaci misure di protezione del sistema elettrico da tali sovratensioni impulsive. A tale proposito, è necessario valutare in quale maniera i fattori geometrici ed elettrici influiscono nella risposta al fulmine di un sostegno [11], [12]. Sulla base del metodo della tensione di maglia di Lundholm e del metodo della cancellazione di campo di Wagner, provenienti dalla teoria dei campi elettromagnetici per il calcolo della tensione sulla catena di isolatori, sono stati individuati i principali parametri su cui agire per limitare le sovratensioni e quindi la probabilità di scarica.

2.3.1 Influenza dei parametri caratteristici del sostegno

Nello studio delle sovratensioni transitorie, il sostegno assume un'impedenza d'onda equivalente Z_t che dipende principalmente dalle sue caratteristiche geometriche, quali altezza, dimensioni trasversali e funi di guardia.

Per quanto riguarda l'influenza dell'altezza del sostegno, la figura 2.9 mostra come l'impedenza d'onda sia all'incirca costante finché il tempo di cresta è inferiore al doppio del tempo che impiega l'onda a percorrere il sostegno; per tempi maggiori si nota invece una dipendenza praticamente lineare. Anche le dimensioni laterali

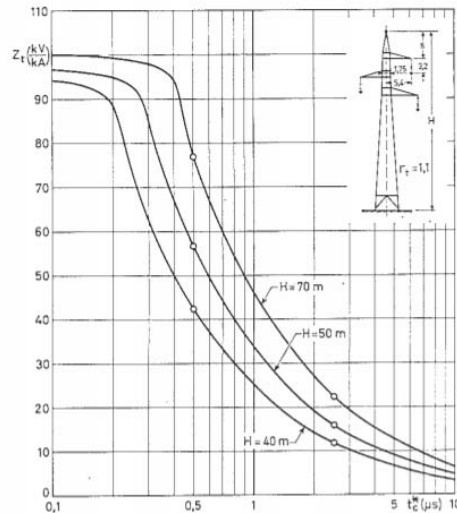


Figura 2.9: Influenza dell'altezza di un sostegno 380 kV.

influenzano in maniera modesta (figura 2.10): sostegni con sezioni più larghe presentano Z_t minori. Al contrario, la presenza della fune di guardia riduce notevolmente

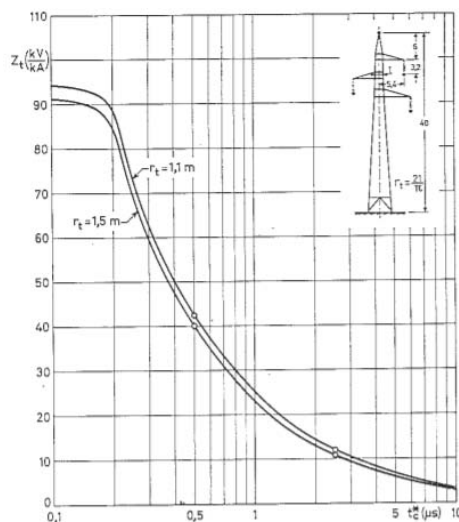


Figura 2.10: Influenza delle dimensioni trasversali di un sostegno 380 kV.

l'ampiezza delle sovratensioni nel caso di fulminazione diretta del sostegno. Inoltre, se è presente una seconda fune di guardia, l'impedenza d'onda risulta inferiore del 20 ÷ 30% rispetto al caso precedente, come riporta la figura 2.11. Da quanto visto sino ad ora, la tipologia di sostegno che consente di avere la minima impedenza equivalente è quella ad Y: il sostegno ha così altezza minima, larga sezione e due funi di guardia ben distanziate tra loro (figura 2.12).

2.3.2 Influenza dei parametri caratteristici del terreno

Per quanto riguarda l'influenza che hanno le caratteristiche del suolo nella risposta al fulmine del sostegno, nessuno dei due metodi precedentemente nominati consente di tener conto dell'impedenza di terra. Tuttavia, Lundholm ha proposto un metodo

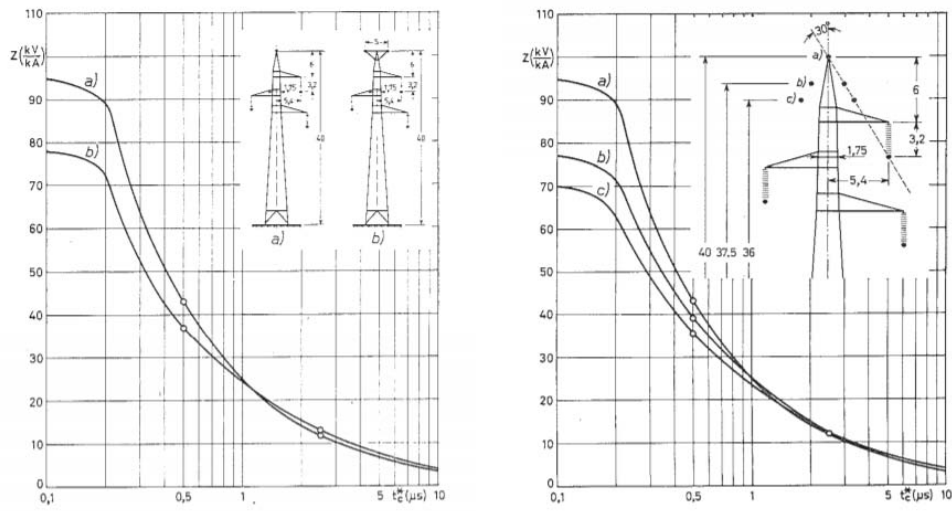


Figura 2.11: Influenza di (a) numero e (b) ubicazione delle funi di guardia di un sostegno 380 kV.

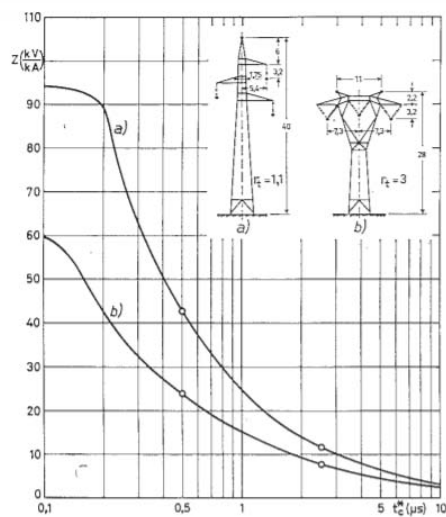


Figura 2.12: Curva di risposta alla fulminazione di due sostegni 380 kV.

per il calcolo dell'influenza della resistenza di terra di un sostegno, dimostrando l'efficacia di dispersori a bassa impedenza ad impulso [13]: all'aumentare della resistenza, infatti, la risposta del sostegno peggiora notevolmente (figura 2.13).

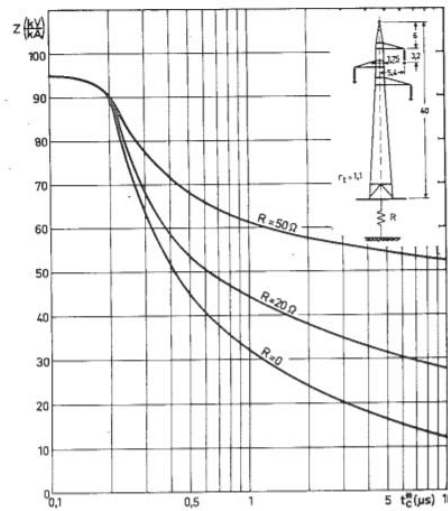


Figura 2.13: Influenza della resistenza di terra di un sostegno 380 kV.

A conclusione di quanto esposto, si può concludere che per abbassare l'impedenza equivalente Z_t di un sostegno conviene agire sui seguenti parametri:

- * *altezza del sostegno.* L'impedenza cresce linearmente all'aumentare dell'altezza;
- * *funi di guardia.* L'inserimento di una fune di guardia abbassa notevolmente (circa del 50%) l'impedenza del sostegno. L'aggiunta di una seconda fune di guardia ben distanziata dalla prima comporta ulteriori riduzioni;
- * *impedenza di terra.* Per limitare le sovratensioni, la resistenza del sostegno deve essere la più bassa possibile.

2.4 Il ruolo della fune di guardia e dei sostegni

Come detto precedentemente, la fune di guardia è un conduttore in alluminio o alluminio-acciaio non isolato, ma collegato a terra tramite la resistenza di messa a terra del sostegno. Uno degli scopi per cui essa viene installata nelle linee elettriche è quello di proteggere i conduttori di fase dalle fulminazioni dirette: la fune di guardia esercita infatti un effetto schermante che consente di ridurre notevolmente la percentuale di guasti da sovratensioni di origine atmosferica quando i conduttori sono posti nella zona definita da un angolo $\alpha = 30^\circ \div 40^\circ$ (figura 2.14). Oltre ad avere questo effetto preventivo, nel caso di fulminazione diretta di un conduttore di fase, la fune di guardia contribuisce a ridurre le sovratensioni grazie ad una riduzione dell'impedenza d'onda del conduttore stesso. D'altra parte, la presenza dei sostegni adiacenti consente anche di limitare l'ampiezza dell'onda di tensione trasmessa lungo la fune di guardia alle successive campate, sulla base di quanto visto

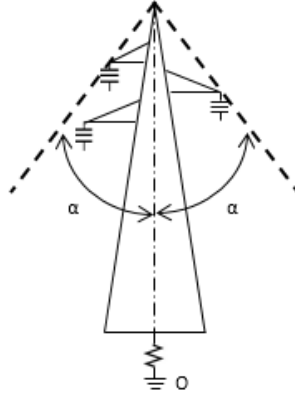


Figura 2.14: Protezione data dalla fune di guardia.

nel sottoparagrafo 1.2.1; riprendendo le equazioni (1.19), è possibile determinare l'ampiezza dell'onda trasmessa e dell'onda riflessa:

$$\begin{aligned} v_2 &= \frac{v_1}{1 + \frac{Z_{fg}}{2R}} \\ v_{r1} &= -\frac{v_1}{1 + \frac{2R}{Z_{fg}}} \end{aligned} \quad (2.14)$$

dove R è la resistenza di terra del sostegno e Z_{fg} è l'impedenza caratteristica della fune di guardia. Queste sovratensioni inducono a loro volta tensioni sul conduttore di fase, a seconda della mutua impedenza d'onda che accoppia elettrostaticamente conduttore stesso e fune di guardia. Pertanto, si evince che lungo quest'ultima, un modesto valore di R consente di ridurre l'ampiezza delle onde trasmesse, mentre le variazioni indotte sul conduttore di fase dipendono dal grado di accoppiamento tra le due linee. Infine, se il fulmine colpisce direttamente il sostegno o la fune di guardia, essa riduce il rischio di scarica inversa disperdendo parte della corrente di fulmine attraverso i sostegni adiacenti; il grado di dispersione da un sostegno al successivo è dato da [4]:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{1 + \frac{Z_{fg}}{2R}} \quad (2.15)$$

Questo processo si ripete successivamente di sostegno in sostegno: si nota quindi che l'onda viaggiante lungo la fune di guardia è notevolmente attenuata e interessa solamente poche campate.

2.5 Sovratensioni sulle catene di isolatori

Le catene di isolatori sono catene costituite da una serie di elementi di materiale isolante, il cui scopo è quello di sostenere i conduttori di fase in corrispondenza dei sostegni (figura 2.15). Solitamente, la forza dell'isolamento viene testata con prove ad impulso atmosferico standard, rappresentato dall'onda $1,2/50 \mu\text{s}$ ⁶. Risulta però

⁶Norma CEI 61000 4-5.

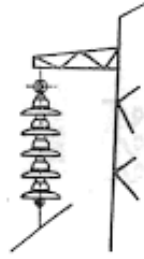


Figura 2.15: Schema di una catena di isolatori.

di fondamentale importanza valutare l'efficienza di tali catene di isolatori nel caso di diverse forme d'onda. A tale scopo, nella letteratura si trovano sia metodi di risoluzione analitica sia modelli fisici del problema. Per quanto riguarda i primi, tra i quali si ricordano i metodi di integrazione sopraccitati di Lundholm e Wagner, da cui derivano anche [14], [15] per il calcolo delle sovratensioni lungo la catena di isolatori, è stato dimostrato che possono essere applicati a specifiche geometrie e forme di tensione, che pertanto restringono il campo di applicazione; i secondi, invece, basandosi sul processo fisico della scarica, non variano al variare di forme d'onda e geometrie del sistema, e sono pertanto preferibili [8].

2.5.1 Il modello fisico: leader progression model

Il processo di scarica consiste di tre fasi: il fenomeno corona, la propagazione del canale di scarica e la propagazione del leader (figura 2.16) [16], [17]. Quando la

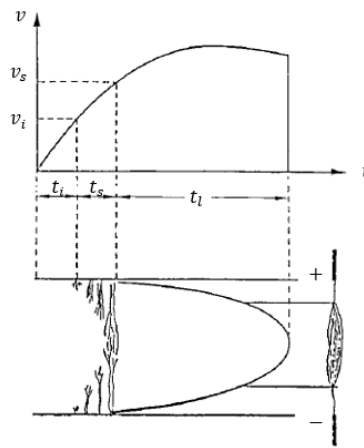


Figura 2.16: Fasi del processo di scarica.

tensione ai capi dell'isolatore raggiunge la tensione di innesco (Corona Inception Voltage), dopo un tempo t_i in cui la tensione rimane sufficientemente elevata, un canale di scarica localizzata inizia a propagarsi lungo il gap tra le due estremità della catena. Quando questo canale, detto anche streamer, attraversa l'intero gap nel tempo t_s , si sviluppa il leader, ovvero un canale più ionizzato del precedente, la cui velocità cresce esponenzialmente; nel momento in cui il leader raggiunge l'altra estremità, dopo un tempo t_l , avviene la scarica. Di conseguenza, il tempo

del processo di scarica è dato dalla somma dei tre tempi:

$$t_b = t_i + t_s + t_l \quad (2.16)$$

Tale processo, definito in letteratura *leader progression model*, può non essere continuo se si verificano variazioni brusche o oscillazioni di tensione.

Il fenomeno precedentemente descritto può verificarsi sia nel caso di fulminazione del conduttore di energia, provocando una scarica diretta, sia nel caso di fulminazione del sostegno o fune di guardia, provocando una scarica inversa.

2.5.2 *Shielding Failure FlashOver Rate*

La scarica diretta può verificarsi nel momento in cui il fulmine riesce a superare lo schermo protettivo dato dalla presenza della fune di guardia, andando a colpire direttamente un conduttore di energia. In questo caso, detto *shielding failure*, se la sovratensione è sufficiente a raggiungere il valore critico della tensione d'innescamento del corona, inizia il processo precedentemente descritto: il leader si propaga successivamente da un estremo all'altro del gap (rispettivamente dal conduttore di fase alla mensola del sostegno) innescando la scarica diretta. Si verifica così il *shielding failure flashover*.

Data l'importanza di stimare la frequenza con cui questi eventi si verificano, viene definito il *shielding failure flashover rate*, o SFFOR, ovvero il numero di fulminazioni che colpiscono un conduttore di fase, causando una scarica, in un anno per 100 km [18]:

$$SFFOR = 2 \frac{N_g L_1}{10} \int_{I_c}^{I_{max}} D_c f(I) dI \quad (2.17)$$

Per poter calcolare il SFFOR, è necessario introdurre i parametri presenti nella (2.17):

- * N_g è la densità ceramica;
- * L_1 è la lunghezza della linea di interesse;
- * I_c è il valore di corrente di fulmine oltre il quale avviene la scarica, e dipende dalla tensione critica e dalla impedenza d'onda del conduttore secondo la seguente relazione:

$$I_c = 2U_{50}/Z \quad (2.18)$$

- * I_{max} è il massimo valore di corrente di fulmine che può sfuggire alla protezione fornita dalla fune di guardia, in funzione dell'altezza del conduttore, dell'altezza della fune di guardia e dell'angolo di protezione [19]:

$$I_{max} = \left[\frac{(h_c + h_{fg})/2}{10(1 - \sin\alpha)} \right]^{1/0.65} \quad (2.19)$$

- * D_c è la distanza di esposizione per il *shielding failure* (figura 2.17);
- * $f(I)$ è la funzione densità di probabilità della corrente di fulmine.

Dalla (1.16) si deduce che nel caso in cui $I_{max} = I_c$, la schermatura risulta essere perfetta, ovvero SFFOR= 0.

* $f(I)$ è la funzione densità di probabilità della corrente di fulmine.

Ulteriori fattori concorrono alla valutazione del BFOR, quali per esempio altezza del sostegno e sua impedenza di terra, tensione di esercizio alla frequenza nominale, presenza di una seconda fune di guardia, ecc.

Laddove non si possono ottenere valori accettabili di BFOR, si ricorre all'utilizzo di scaricatori di sovratensione, al fine di ridurre la possibilità di scariche inverse.

2.6 Scaricatori di sovratensione

Data la gravità delle scariche atmosferiche e dei disservizi ad esse correlati, vengono inseriti nei sistemi elettrici gli scaricatori di sovratensione: si tratta di componenti non lineari della rete elettrica il cui scopo è quello di proteggere il sistema dalle sovratensioni, siano esse di origine esterna, ma anche interna. Storicamente, si trattava di elementi in carburo di silicio SiC : oggi vengono invece realizzati con ossidi metallici⁷, alla cui base vi è l'ossido di zinco ZnO , che risultano essere molto più efficienti [2]. Gli scaricatori sono resistori (detti anche

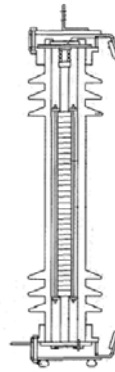


Figura 2.18: Struttura tipica di uno scaricatore di sovratensione.

varistori) ceramici la cui caratteristica $i(v)$ estremamente non lineare (figura 2.19) consente di proteggere i dispositivi a cui sono connessi in parallelo: infatti, con tensioni molto basse si comportano come un circuito aperto, mentre nel caso di tensioni elevate si comportano come un corto circuito, deviando la corrente verso terra e limitando così la sovratensione [20].

La loro particolare non linearità è dovuta al comportamento semiconduttivo degli ossidi metallici che li compongono: oltre ad essere presente l'ossido di zinco (per il 95%), vengono inserite anche piccole quantità di ossido di bismuto Bi_2O_3 , ossido di antimonio Sb_2O_3 e altri. La microstruttura dello scaricatore, riportata in figura 2.20, è dovuta alla sinterizzazione di ZnO drogato con tali additivi, ad una temperatura di circa $1100 \div 1300^\circ \text{C}$ [21].

La struttura consiste quindi in un gruppo di granuli di ZnO all'interno di una matrice di altri ossidi metallici, tra due elettrodi metallici. I bordi dei granuli

⁷Maggiore semplicità costruttiva, maggiore affidabilità e migliore attitudine a contenere le sovratensioni.

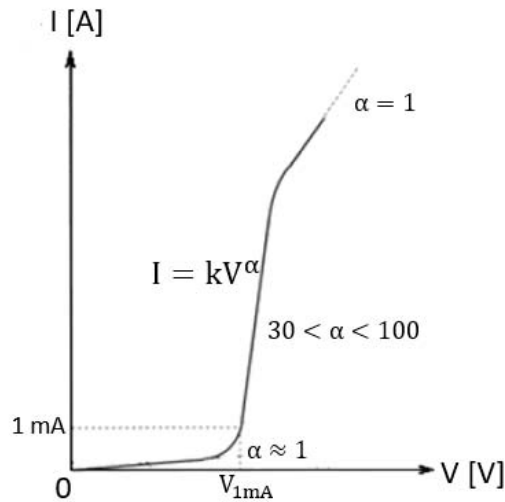


Figura 2.19: Caratteristica corrente-tensione di uno scaricatore ZnO .

dell'ossido di zinco, i quali hanno dimensioni di circa $10 \div 100 \mu\text{m}$, formano barriere a doppio potenziale con giunzioni Schottky, caratterizzate da tensioni di conduzione di 3,5 V. Il confine tra ogni granulo e l'adiacente forma una giunzione simile al diodo Zener⁸. I granuli sono quindi separati da questi limiti "attivi" di spessore pari a pochi nanometri. Inoltre, questo gruppo di granuli è orientato in modo casuale ed è elettricamente equivalente ad una rete di coppie di diodi poste in parallelo le une con le altre. Se viene applicata agli elettrodi una debole tensione, scorre tra le giunzioni dei diodi una piccola corrente di dispersione inversa attivata termicamente; se al contrario viene applicato un elevato livello di tensione, tali giunzioni vengono abbattute dall'effetto valanga e di conseguenza scorre una corrente molto maggiore. Questo comportamento giustifica quindi la caratteristica estremamente non lineare di corrente-tensione, in cui lo scaricatore ha un'elevata resistenza a basse tensioni e bassa resistenza ad alte tensioni.

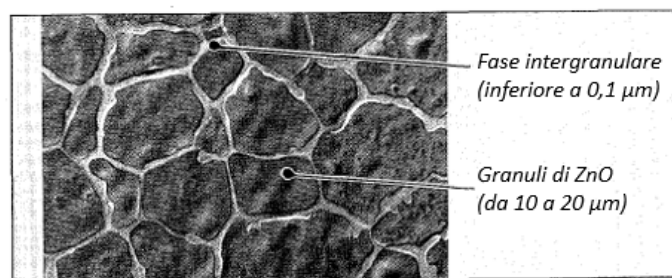


Figura 2.20: Microstruttura di un elemento di ossido di zinco.

Riprendendo la figura 2.19, si distinguono tre zone a diverso comportamento:

- * regione ohmica a basse tensioni, in cui lo scaricatore si comporta come una resistenza lineare;

⁸Diodo a giunzione p-n con effetto di breakdown a valanga.

- * regione di breakdown a valanga, in cui la corrente cresce molto rapidamente;
- * regione ohmica ad alte tensioni, in cui la corrente è linearmente proporzionale alla tensione.

La dipendenza della corrente in funzione della tensione è espressa dalla seguente formula:

$$I = kV^\alpha \quad (2.22)$$

dove il parametro α è un indice della non linearità dell'elemento ed è così definito:

$$\alpha = \frac{d[\log(I)]}{d[\log(V)]} \quad (2.23)$$

Le proprietà elettriche che principalmente caratterizzano uno scaricatore di sovratensione sono:

- * la tensione di soglia, definita come la tensione ai capi dell'elemento quando una corrente di 1 mA lo attraversa. Tale valore di tensione delimita la differenza tra la prima zona ohmica e la regione di scarica.
- * la capacità energetica, ovvero la massima quantità di energia che lo scaricatore può assorbire senza danneggiarsi.

Per limitare la probabilità che lo scaricatore si danneggi, è necessario che esso abbia una elevata capacità energetica: ciò è possibile se l'elemento ha omogeneità microstrutturale. Infatti, una distribuzione uniforme dei granuli di ZnO consente di avere una distribuzione di corrente uniforme e, di conseguenza anche di energia, lungo tutto il varistore.

Capitolo 3

Le sovratensioni di origine interna

I dispositivi di commutazione, con le loro operazioni di manovra, generano onde di sovratensione, sia durante condizioni normali di esercizio, sia nel caso di guasti: esempi che provocano sovratensioni di manovra sono l'energizzazione di una linea, la commutazione di condensatori e reattori, nonché le aperture e richiuse degli interruttori. I transitori associati a questi fenomeni hanno una durata variabile tra le decine e le migliaia di microsecondi e sono caratterizzati da onde a fronte lento: tali caratteristiche possono renderli più pericolosi delle sovratensioni da fulminazioni. Risulta pertanto importante analizzare questa tipologia di transitori al fine di un dimensionamento corretto dell'isolamento e dei dispositivi di protezione del sistema elettrico [22].

3.1 Caratteristiche delle sovratensioni di manovra

L'operazione di commutazione modifica lo stato di regime esistente causando un fenomeno transitorio che conduce ad una successiva condizione di stabilità. A ciò, è associata una variazione della frequenza del sistema, perché il transitorio è caratterizzato da onde con frequenze di $0,1 \div 1$ kHz che si sovrappongono alla frequenza nominale.

Tra tutte, le sovratensioni di messa in tensione di linee a vuoto sono quelle caratterizzate dalle ampiezze maggiori [23]: esse traggono origine dalla differenza di potenziale che esiste tra i conduttori di energia e le sbarre nell'istante immediatamente precedente alla chiusura dell'interruttore. I gradini impressi generano onde viaggianti che si propagano lungo la linea fino ad essere riflesse in corrispondenza dell'estremità aperta. Se questo fenomeno si verifica in presenza di carica residua dovuta a precedente messa in tensione, il conduttore a potenziale opposto maggiore è percorso da un'onda viaggianti di entità superiore.

Varie soluzioni sono state implementate al fine di contenere le sovratensioni di manovra, secondo due diversi approcci [24]:

- * effettuare le manovre con opportune cautele, in modo tale da ridurre le sovratensioni all'origine (ad esempio con l'utilizzo di resistenze di preinserzione o di trasformatori induttivi di tensione per drenare la carica accumulata nei conduttori di fase);

* servirsi di scaricatori di sovratensione.

3.2 Sovratensioni di manovra in reti induttive

Per meglio comprendere le cause principali delle sovratensioni di manovra, si riportano a titolo esemplificativo i seguenti casi di richiusura ed energizzazione di circuiti induttivi [25].

3.2.1 Richiusura monofase in un circuito induttivo

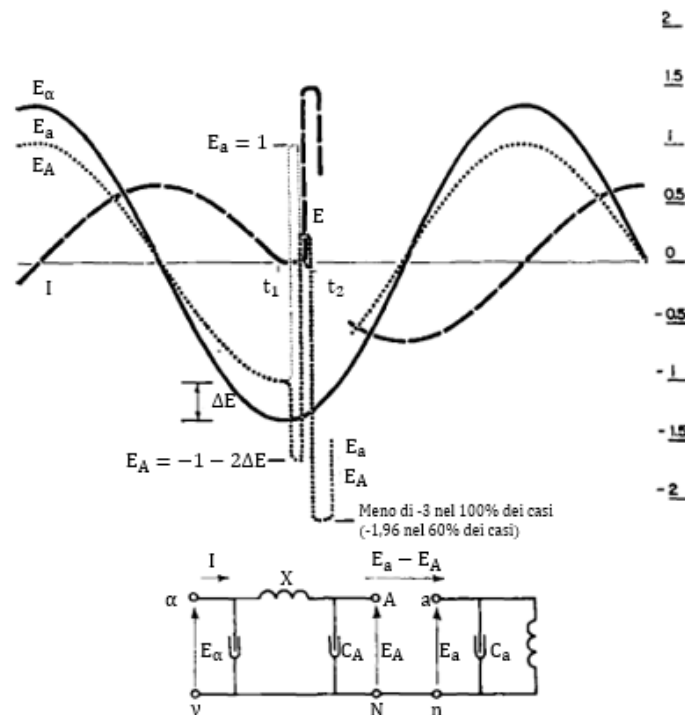


Figura 3.1: Circuito induttivo: richiusura monofase.

La figura 3.1 rappresenta un circuito trifase ideale (a resistenza nulla), rappresentato a parametri concentrati, che alimenta un carico induttivo. All'istante t_1 , la corrente può essere interrotta perché passante per lo zero; se ciò avviene, la tensione E_a tende ad annullarsi. Poiché però sono presenti delle piccole capacità C_a , si genera un'oscillazione ad alta frequenza che spingerà il livello di tensione da -1 p.u. ad un superamento del valore +1 p.u. Allo stesso modo, anche la tensione E_A subirà un'oscillazione. Se, per pura coincidenza, le frequenze delle due oscillazioni risultano essere uguali, la tensione transitoria di recupero¹ assume il valore massimo all'istante t_2 , quando i due transienti raggiungono il loro picco. Se in quel preciso momento vi è la richiusura dell'interruttore, la sovratensione sarà data da:

$$E = \frac{C_a - C_A - 2\Delta E C_A}{C_a + C_A} \text{ p.u.} \quad (3.1)$$

¹Tensione che si manifesta ai capi dell'interruttore dopo l'apertura del circuito.

Nonostante le semplificazioni adottate, è possibile affermare che le due tensioni tenderanno all'onda sinusoidale di regime ma, dato il sistema privo di perdite, tale valore supererà abbondantemente il picco di regime, causando così una sovratensione. Quest'ultima, come si può notare, è sempre minore del triplo della tensione di regime: tale limite viene raggiunto nel caso raro in cui $C_a \gg C_A$. Nei circuiti reali, le onde di sovratensione sono sinusoidi attenuate che si sovrappongono alle forme d'onda di regime; data la presenza di perdite, l'effetto del transitorio è molto minore (picco inferiore del 60% circa rispetto al circuito ideale) e non è permanente. Definendo $P\%$ come *overshoot ratio*, la sovratensione massima raggiungibile è:

$$E_0 = 1 + \frac{P}{100} \left(1 + \frac{P}{100} \right) p.u. \quad (3.2)$$

3.2.2 Richiusura trifase in un circuito induttivo

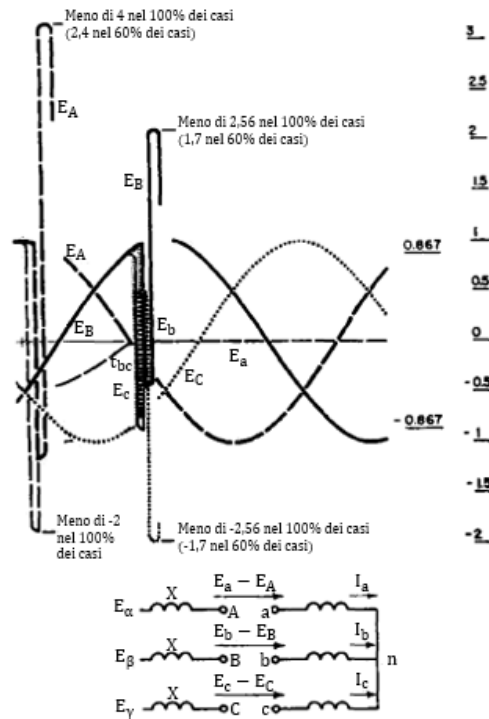


Figura 3.2: Circuito induttivo: richiusura trifase.

La richiusura trifase (figura 3.2) può provocare situazioni più critiche rispetto al caso precedente. Quando, all'istante t_0 , la corrente della fase A si annulla, è possibile aprire il circuito; di conseguenza, la tensione E_a tenderebbe al valore $(E_b + E_c)/2^2$, ma si porta in realtà a -2 p.u. Se avviene una richiusura in corrispondenza del picco della tensione di recupero, le due tensioni E_a e E_A si portano ad un valore E'_A determinato dalle capacità parassite dei due contatti dell'interruttore. Da qui, le tensioni tendono al valore di regime attraverso variazioni transitorie che le portano a raggiungere il valore $E_A + (E_A - E'_A)$; nel caso peggiore, se $E'_A = -2$ p.u., la

²I punti a e n rendono simmetrico il sistema.

sovratensione raggiunge quattro volte il picco della tensione di regime. Definendo $P\%$, la massima sovratensione che si può verificare è:

$$E_0 = \frac{1,5P}{100} \left(1 + \frac{P}{100}\right) + 1 \text{ p.u.} \quad (3.3)$$

Qualora l'interruttore della fase A rimanesse aperto, le fasi B e C potrebbero essere interrotte nell'istante in cui le loro correnti si annullano. Una richiusura, in questa situazione, causerebbe sovratensioni molto più contenute:

$$E_0 = \frac{\sqrt{3}}{2} \left[1 + \frac{P}{100} \left(\frac{P}{100}\right)\right] \text{ p.u.} \quad (3.4)$$

Anche nel caso di richiusura trifase, le sovratensioni che si generano nei circuiti reali sono inferiori a quelle qui riportate a titolo esemplificativo.

3.2.3 Energizzazione di un circuito induttivo

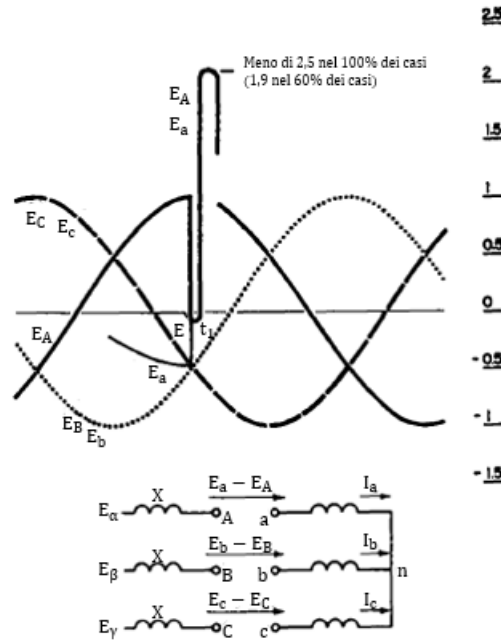


Figura 3.3: Circuito induttivo: energizzazione.

Si consideri il circuito aperto trifase in figura 3.3. La sovratensione massima si verifica quando la fase A viene chiusa al tempo t_1 , in seguito alla chiusura delle fasi B e C. Come visto precedentemente, la tensione della fase A si porta ad un valore compreso tra $E_A = 1$ p.u. e $E_a = E_b = E_c = -0,5$ p.u.³, stabilito dalle condizioni del sistema. La sovratensione massima raggiungibile risulta essere inferiore a 2,5 volte il valore di picco a regime. Definendo $P\%$, la massima sovratensione è:

$$E_0 = 1 + \frac{1,5P}{100} \text{ p.u.} \quad (3.5)$$

³Dal partitore di tensione precedente all'istante di chiusura.

3.3 Analisi statistica delle sovratensioni di manovra

Come detto precedentemente, le sovratensioni di origine interna determinano il dimensionamento dell'isolamento della linea elettrica. Dai casi sopra riportati, è però emerso come sia difficile calcolare l'intensità delle sovratensioni, trovandone solamente limiti superiori. Ciò è dovuto al fatto che la loro ampiezza dipende dalle caratteristiche del sistema, ovvero da un numero di parametri estremamente elevati e variabili, che devono essere pertanto considerati distribuiti attorno a valori medi. Accanto all'aleatorietà del sistema e delle condizioni di esercizio, vi è la distribuzione casuale dell'istante in cui l'interruttore viene comandato, nonché dell'istante in cui effettivamente esso effettua la manovra.

Di conseguenza, ai fini di una accurata analisi del problema, per non sottovalutare né sopravvalutare l'isolamento del sistema elettrico, conviene ottenere una distribuzione di probabilità delle sovratensioni di manovra. Un efficiente strumento per questa tipologia di analisi è il metodo di Monte Carlo: esso consiste nell'analisi statistica di varie simulazioni con tempi di intervento casuali per le operazioni di manovra degli interruttori per ogni singola fase [26]. Si tratta quindi di una procedura numerica con variabili casuali; i passaggi per ottenere una distribuzione di probabilità delle sovratensioni sono i seguenti:

- * simulazioni con tempi di intervento casuali dell'interruttore e dei poli (figura 3.4);
- * calcolo delle sovratensioni di manovra;
- * analisi statistica dei risultati delle simulazioni.

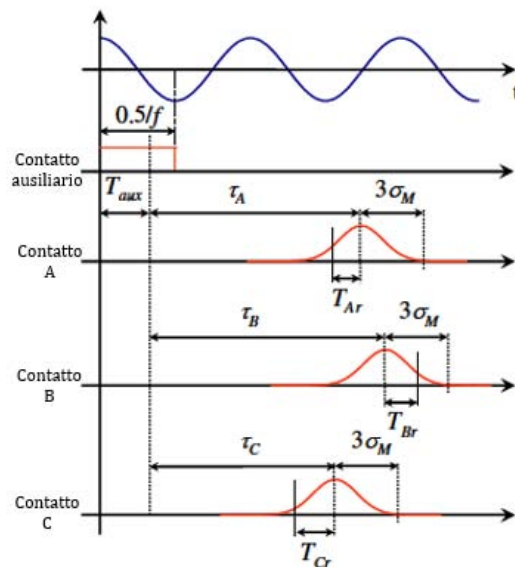


Figura 3.4: Distribuzione di probabilità dei tempi di chiusura dei poli dell'interruttore.

Da questo studio statistico, che solitamente coinvolge alcune migliaia di simulazioni nel dominio del tempo, si ottengono due tipologie di grafici per le massime sovratensioni registrate:

- * funzioni di distribuzione di probabilità;
- * funzioni di distribuzione cumulata.

Da queste, è possibile valutare il dimensionamento ed il coordinamento dell'isolamento della linea elettrica, onde evitarne il rischio di cedimento.

Capitolo 4

Modellizzazione della rete

Per lo studio delle sovratensioni di origine esterna ed interna, sono stati scelti due software di calcolo:

- * DIgSILENT PowerFactory;
- * EMTP-RV.

In entrambi, i componenti della porzione di rete di interesse sono stati rappresentati da opportuni modelli digitali, secondo guide e articoli scientifici riguardanti lo studio dei fenomeni transitori presenti in letteratura.

4.1 I software di calcolo

La scelta di condurre le simulazioni di sovratensioni in due ambienti di calcolo differenti è stata guidata da due fattori principali:

- * il confronto dei risultati ottenuti, provenienti da diverse tipologie di calcolo;
- * l'utilizzo del software DIgSILENT nell'analisi dei fenomeni transitori.

Infatti, mentre EMTP-RV è un software atto all'analisi e allo studio dei transitori elettromagnetici, PowerFactory si presta principalmente all'analisi dei sistemi elettrici dal punto di vista della generazione, trasmissione e distribuzione dell'energia. Pertanto, per dimostrare che quest'ultimo può essere utilizzato anche per le simulazioni nel dominio del tempo, sono stati effettuati due test:

- * un'analisi della stabilità dell'impedenza in ingresso al variare della frequenza [Appendice A];
- * due simulazioni riguardanti le sovratensioni sia di origine esterna che interna, confrontando i risultati con i calcoli provenienti dalla letteratura [Appendice B].

Data inoltre la necessità di rappresentare la linea di trasmissione a parametri distribuiti, per poter osservare la propagazione delle onde viaggianti nel sistema elettrico, è stata effettuata un'ulteriore verifica del calcolo di tali parametri ad una frequenza

di 100 kHz, confrontando i risultati con EMTP-RV e Simulink [Appendice C].

Dopo aver dimostrato l'affidabilità di PowerFactory nello studio dei fenomeni transitori, è stato possibile creare in entrambi gli ambienti di calcolo il modello della rete in esame, secondo la procedura di seguito descritta.

4.2 Ipotesi alla base dello studio

Data la complessità dei fenomeni elettromagnetici che caratterizzano le sovratensioni in un sistema elettrico, sono state assunte le seguenti ipotesi di base, che semplificano il modello di rete senza compromettere la validità dei risultati ottenuti:



Figura 4.1: Tratto di interesse della linea T1.

- * rappresentazione della linea aerea limitatamente dal sostegno P51 al sostegno P62 della linea T1, ovvero 11 delle campate tra la Stazione 1 e la Stazione 2, e della derivazione verso la centrale idroelettrica A, ad eccezione del micropalo P004 (figura 4.1);
- * rappresentazione di reti equivalenti in corrispondenza delle sottostazioni elettriche Stazione 1 e Stazione 2 perché, date le lunghe distanze (superiori ai 10 km), i tempi di propagazione superano gli intervalli di tempo di interesse;
- * rappresentazione delle impedenze di terra dei sostegni come resistenze indipendenti dalla frequenza;
- * esclusione dell'effetto corona sia per efficienza computazionale che per ipotesi cautelativa¹;
- * distribuzione di campo elettrico uniforme sulle catene di isolatori.

Le simulazioni vengono effettuate nel dominio del tempo, con un intervallo di interesse ed un passo di calcolo variabili a seconda dello studio di sovratensioni di origine esterna ed interna, nonché a seconda del software utilizzato.

¹L'effetto corona aumenta gli accoppiamenti capacitivi della linea limitando le sovratensioni.

Tabella 4.1: Caratteristiche della tratta T1.

Elemento	Descrizione
<i>Conduttori di fase</i>	Conduttori in alluminio-acciaio, di diametro 19,6 mm, di resistenza chilometrica 0,158 Ω /km, binati con distanza 40 cm.
<i>Fune di guardia</i>	OPGW di diametro 10,5 mm e resistenza chilometrica 1,084 Ω /km.
<i>Catene di isolatori</i>	Lunghezza del gap di 1,94 m.

4.3 Elementi rappresentati nel modello di rete

Di seguito si elencano i principali elementi costitutivi del sistema in esame, riportando i dati utilizzati nello studio e il primo approccio di modellizzazione.

4.3.1 Linea aerea

La linea T1 è costituita da una singola terna con le caratteristiche riportate in tabella 4.1. Per quanto riguarda la fune di guardia, lungo la dorsale vi è un'eccezione: infatti tra i due sostegni P56 e P57 è presente una seconda fune di guardia in acciaio, di diametro 9 mm². La disposizione dei conduttori per i sostegni rappresentati lungo la dorsale, ad eccezione dei pali P56 e P57, è riportata in figura 4.2a.

Le lunghezze delle campate rappresentate sono le seguenti:

P51-P52: 191,75 m

P52-P53: 155,53 m

P53-P54: 240,11 m

P54-P55: 224,00 m

P55-P56: 220,02 m

P56-P57: 221,67 m

P57-P58: 193,45 m

P58-P59: 193,20 m

P59-P60: 179,80 m

P60-P61: 202,04 m

P61-P62: 182,69 m

²Questa seconda fune di guardia non è stata rappresentata in PowerFactory per problemi di instabilità.

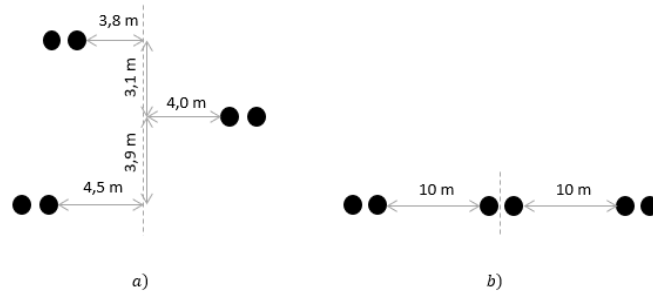


Figura 4.2: Disposizione dei conduttori lungo la dorsale (a) e la derivazione (b).

Tabella 4.2: Caratteristiche della derivazione verso l'Utente A.

Elemento	Descrizione
<i>Conduttori di fase</i>	Conduttori in alluminio-acciaio, di diametro 19,6 mm, di resistenza chilometrica 0,158 Ω /km, binati con distanza 40 cm.
<i>Fune di guardia</i>	Due funi in acciaio di diametro 9 mm e resistenza chilometrica 1,714 Ω /km.
<i>Catene di isolatori</i>	Lunghezza del gap di 1,94 m.

Oltre a queste, le tratte da Stazione 1 a P51 e da P62 a Stazione 2 sono state rappresentate trascurando i sostegni, per una lunghezza rispettivamente di 10,271 km e 20,799 km.

La derivazione verso la centrale idroelettrica A è anch'essa una singola terna ma con due funi di guardia (tabella 4.2). La disposizione dei conduttori per i sostegni rappresentati lungo la derivazione è riportata in figura 4.2b.

Le lunghezze delle campate sono le seguenti:

P000-P001: 158,34 m

P001-P002: 171,84 m

P002-P003: 220,05 m

P003-P004: 105,95 m

Entrambe le linee elettriche in esame sono state modellizzate nei due software con la rappresentazione a parametri distribuiti, necessaria allo studio dei transitori elettromagnetici. I parametri di linea sono stati considerati variabili al variare della frequenza, secondo il modello proposto da J. Marti, per un range di frequenze da 1 Hz a 100 kHz. Le disposizioni dei conduttori di energia e delle funi di guardia, queste ultime considerate anch'esse come conduttori, sono quelle riportate in figura 4.2; inoltre, tutti i conduttori sono disposti parallelamente al suolo e tra loro. Per quanto riguarda l'altezza dei conduttori da terra, è stata dapprima valutata un'altezza media per ogni campata, considerando l'altitudine dei sostegni sul livello del mare; successivamente, tenendo conto del tiro dei conduttori, è stata calcolata la

Tabella 4.3: Altezze e resistenze dei sostegni lungo la dorsale.

Sostegni della dorsale		
Sostegno	Altezza [m]	Resistenza di terra [Ω]
P51	31,5	23,1
P52	25,5	104,3
P53	25,3	74,32
P54	34,5	67
P55	34,5	60,07
P56	23,8	6,17
P57	26,8	4,83
P58	34,5	4,462
P59	31,5	5,178
P60	25,5	23,56
P61	31,3	4,892
P62	29,8	29,45

freccia, in modo tale da calcolare l'altezza media del conduttore più basso secondo la seguente formula:

$$h_m = h - \frac{2}{3}f_r \quad (4.1)$$

Infine, per quanto riguarda la resistività del terreno, data la variabilità della tipologia del suolo è stato adottato il valore tipico di 100 Ωm .

4.3.2 Sostegni

Per quanto riguarda le altezze e le resistenze di terra dei sostegni della dorsale, si riportano in tabella 4.3 i risultati ottenuti dalle misurazioni in loco³: I dettagli dei sostegni della derivazione verso l'Utente A sono invece listati in tabella 4.4⁴: Nel modello, i sostegni sono stati inizialmente rappresentati attraverso linee monofasi ideali a parametri concentrati, di lunghezza pari all'altezza indicata, caratterizzati da valori di [27]:

* impedenza caratteristica equivalente e velocità di propagazione in EMTP, pari a [28]:

$$Z = 60 \ln[\sqrt{2}(2h/r)] \quad v = 0,9 \cdot c \quad (4.2)$$

dove h e r sono rispettivamente l'altezza e il raggio equivalente del sostegno, mentre c è la velocità della luce nel vuoto;

³La resistenza del sostegno P54 è stata stimata per mancanza di misurazione

⁴Le resistenze dei sostegni P000 e P001 sono state stimate per mancanza di misurazioni.

Tabella 4.4: Altezze e resistenze dei sostegni lungo la derivazione.

Sostegni della derivazione		
Sostegno	Altezza [m]	Resistenza di terra [Ω]
P000	22,3	100
P001	28,9	100
P002	21,0	102
P003	31,1	187,7

* induttanza e capacità equivalenti in PowerFactory, calcolati secondo le formule [29]:

$$L = \frac{1}{Z_C v} \quad C = \frac{Z_C}{v} \quad (4.3)$$

In questo modello, le mensole sono state trascurate per scopi pratici: pertanto, le catene di isolatori delle tre fasi sono connesse allo stesso nodo del sostegno. Per

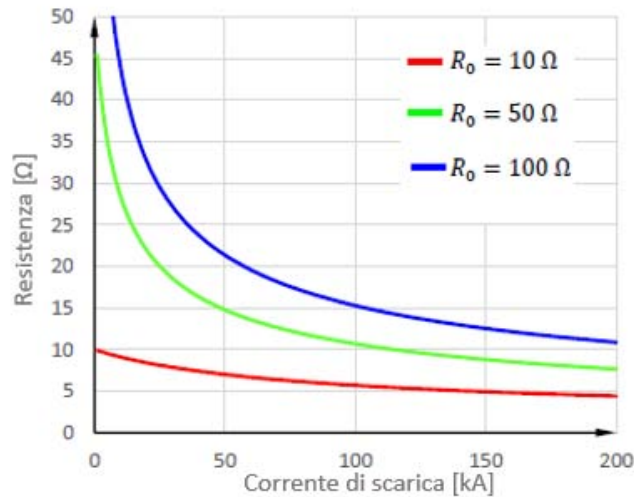


Figura 4.3: Andamento delle resistenze di terra in funzione della corrente di scarica.

quanto riguarda le impedenze di terra, invece, sono state rappresentate attraverso il modello proposto in [28]. Infatti a causa della ionizzazione del terreno, la resistenza non rimane costante, bensì diminuisce in funzione della corrente che fluisce nel suolo, come mostra la figura 4.3, secondo la relazione:

$$R[i(t)] = \frac{R_0}{\sqrt{(1 + i(t)/I_g)}} \quad (4.4)$$

dove R_0 è il valore di resistenza alla frequenza di esercizio, mentre I_g è il valore soglia di corrente oltre il quale il terreno si ionizza:

$$I_g = \frac{E_g \rho}{2\pi R_0^2} \quad (4.5)$$

la quale, oltre a dipendere dalla resistenza di terra del sostegno, dipende dal campo elettrico critico E_g assunto pari a 400 kV/m e dalla resistività del terreno ρ . Pertanto, in entrambi gli ambienti è stato implementato un controllo per variare la resistenza di terra in funzione della corrente di scarica, una volta che questa supera il valore soglia I_g .

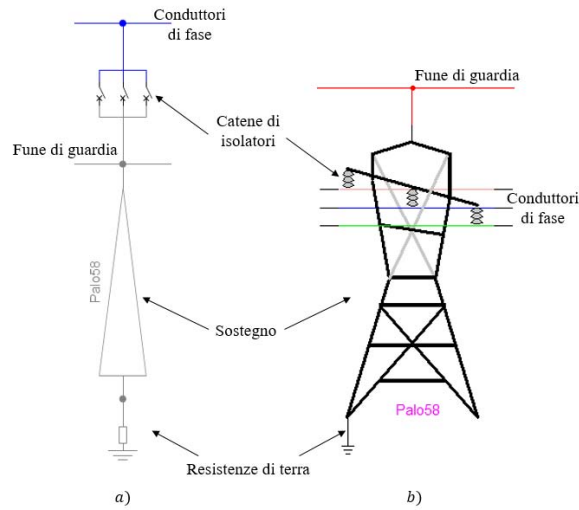


Figura 4.4: Rappresentazione dei sostegni in (a) PowerFactory e (b) EMTP.

4.3.3 Catene di isolatori

In un primo momento sono state rappresentate come interruttori ideali che vengono chiusi non appena la tensione ai loro capi supera la tensione di tenuta dell'isolamento (figura 4.5): la loro chiusura, ideale e istantanea, consente il passaggio di corrente dal conduttore di fase al sostegno (o viceversa), simulando la scarica diretta (o inversa). Si tratta quindi di confrontare in ogni momento la tensione ai capi dell'interruttore con la curva della tensione di tenuta: se la prima non supera mai la seconda, l'interruttore rimane aperto e la scarica non avviene [29].

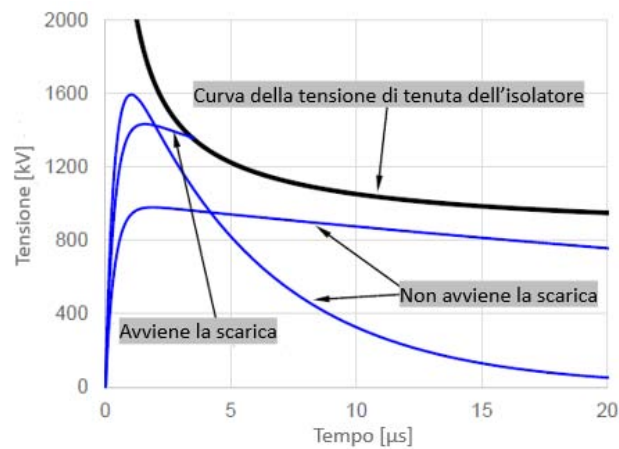


Figura 4.5: Tensione di tenuta di una catena di isolatori in funzione del tempo.

Tabella 4.5: Parametri delle catene di isolatori cappa-perno.

Isolatori cappa-perno		
Polarità	k [$m^2/V^2/s$]	E_0 [kV/m]
+	$1,2 \cdot 10^{-6}$	520
-	$1,3 \cdot 10^{-6}$	600

Come si può intuire, tale modello è molto semplicistico e non consente di tener conto della forma e della durata dell'onda di sovratensione. Pertanto, è stato implementato un modello più realistico, il *leader progression model* (LPM). Con riferimento al paragrafo 2.5.1, il controllo degli interruttori che rappresentano le catene di isolatori è stato basato sulla propagazione del leader attraverso il gap in aria tra il conduttore di fase ed il sostegno. La velocità di propagazione del leader è espressa in varie formule presenti in letteratura; in questo trattato, è stata scelta la formula proposta in [30], [31]:

$$\frac{dl}{dt} = k u(t) \left[\frac{u(t)}{d_g - l_l} - E_0 \right] \quad (4.6)$$

dove $u(t)$ è la tensione istantanea ai capi dell'isolatore, d_g è la lunghezza del gap, l_l è la lunghezza del leader e i parametri k e E_0 ⁵, per isolatori cappa-perno, dipendono dalla polarità della fulminazione, secondo i dati in tabella 4.5: Con riferimento alla figura 4.6, quando la lunghezza del leader eguaglia la lunghezza del gap, il controllo comanda la chiusura dell'interruttore, simulando la scarica.

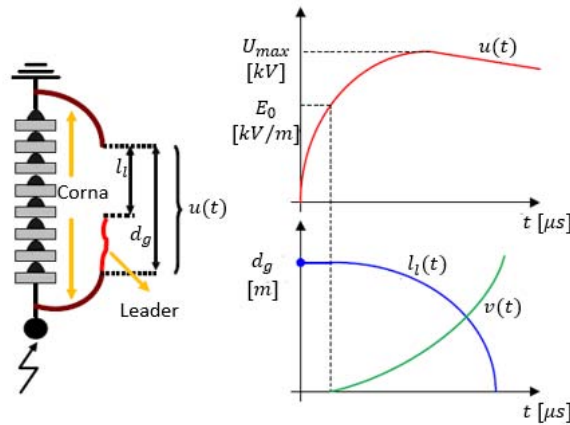


Figura 4.6: Processo di scarica LPM.

Per dimostrare che il modello LPM è più realistico rispetto al primo proposto, è stato eseguito un confronto tra i due in Appendice D.

⁵Campo critico elettrico ipotizzato costante lungo la catena di isolatori.

Tabella 4.6: Parametri delle sottostazioni elettriche.

Sottostazioni elettriche			
Impianto	Livello di tensione [kV]	I_{cc} trifase [kA]	I_{cc} monofase [kA]
Stazione 1	220	17,5	16,6
Stazione 2	220	18,4	15,6

4.3.4 Sottostazioni elettriche

I parametri che definiscono le sottostazioni elettriche Stazione 1 e Stazione 2 sono i livelli di tensione e le correnti di cortocircuito trifase (tabella 4.6).

In PowerFactory, sono state rappresentate mediante l'utilizzo della rete equivalente già presente nella libreria del software. In EMTP, invece, sono state rappresentate attraverso un generatore ideale trifase di tensione avente in serie un'impedenza ohmico-induttiva, il cui valore è stato ricavato attraverso i dati delle correnti di cortocircuito monofase e trifase lungo la dorsale forniti da Terna [1].

4.3.5 Macchine dell'Utente A

In entrambi gli ambienti di simulazione, il trasformatore presente in corrispondenza della centrale idroelettrica A è stato rappresentato mediante il modello presente nelle due librerie: si tratta di un trasformatore trifase a tre avvolgimenti, di cui sono stati specificati i parametri. A monte di esso, sono state poste delle capacità parassite verso terra, di valore 500 pF, e opportuni scaricatori di sovratensione a protezione del trasformatore stesso.

Anche per quanto riguarda i generatori sincroni è stato utilizzato il modello di macchina sincrona presente nei due software, apportando i dati caratteristici delle macchine.

4.3.6 OMP

Nelle figure 4.7 e 4.8, è riportato l'organo di manovra su palo oggetto di questa analisi; la figura 4.9 rappresenta invece lo schema unifilare dello stesso.

L'OMP è stato rappresentato nei due ambienti di calcolo secondo il circuito monofase equivalente di figura 4.10. I vari elementi che lo compongono, come i passanti, l'interruttore, TV e TA, sono stati modellizzati attraverso delle capacità aventi i seguenti valori forniti dal costruttore:

Passante terminale P1: $C_1 = 150$ pF

Comparto 1: $C_2 = 125$ pF

Trasformatore induttivo di potenza: $C_3 = 200$ pF

Interruttore aperto: $C_4 = 20$ pF



Figura 4.7: Organo di manovra.

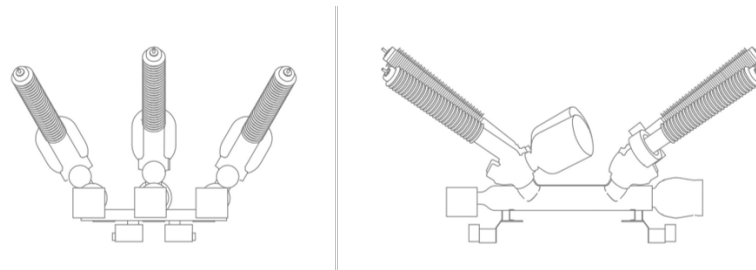


Figura 4.8: Viste in prospettiva e frontale dell'OMP.

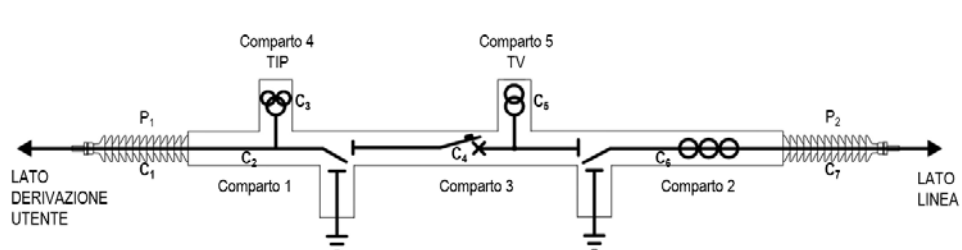


Figura 4.9: Schema unifilare dell'OMP.

Trasduttore di tensione: $C_5 = 200$ pF

Comparto 2: $C_6 = 125$ pF

Passante terminale P1: $C_7 = 150$ pF

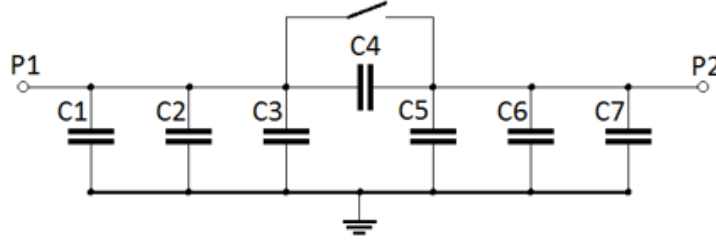


Figura 4.10: Circuito monofase equivalente dell'OMP.

4.3.7 Scaricatori di sovratensione

A protezione dell'OMP, è prevista l'installazione a monte e a valle di esso di scaricatori di sovratensione, ai fini di evitare eventuali danneggiamenti in seguito a spiacevoli transitori elettromagnetici.

Per rappresentare gli scaricatori di sovratensione, nei due ambienti sono stati seguiti due differenti approcci.

- * Essendo già presente nella libreria di PowerFactory, è stato utilizzato il modello predefinito di scaricatore con due terminali (uno da collegare alla fase, l'altro al sostegno), inserendo i dati del data sheet fornito dalla casa produttrice in modo tale da poter ricreare la caratteristica $v(i)$.
- * In EMTP, invece, è stato utilizzato il modello di scaricatore ZnO proposto da Pinceti e Giannettoni [32], riportato in figura 4.11. Esso è caratterizzato da una resistenza di circa $1\text{ M}\Omega$, per evitare instabilità numeriche; i due resistori non lineari A_0 e A_1 sono definiti dalle caratteristiche proposte da [33] in figura 4.12⁶; le due induttanze, infine, sono definite sulla base delle caratteristiche elettriche dello scaricatore stesso⁷:

$$L_0 = \frac{1}{12} \cdot \frac{V_{r1/(2-20)} - V_{r8/20}}{V_{r2/20}} \cdot V_n$$

$$L_1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{V_{r1/(2-20)} - V_{r8/20}}{V_{r2/20}} \cdot V_n \quad (4.7)$$

dove con V_r si intende la tensione residua per la corrente nominale di 10 kA nel caso della forma d'onda specificata, mentre V_n è la tensione nominale.

In figura 4.13 è sono riportate le curve caratteristiche dello scaricatore di sovratensione nei due ambienti di simulazione.

⁶Le curve sono riferite alla tensione residua a 10 kA dell'onda $8/20$.

⁷Le induttanze caratterizzano il comportamento del modello: per onde a fronte lento sono trascurabili e i resistori sono praticamente in parallelo; per onde a fronte rapido invece distribuiscono la corrente tra i due rami.

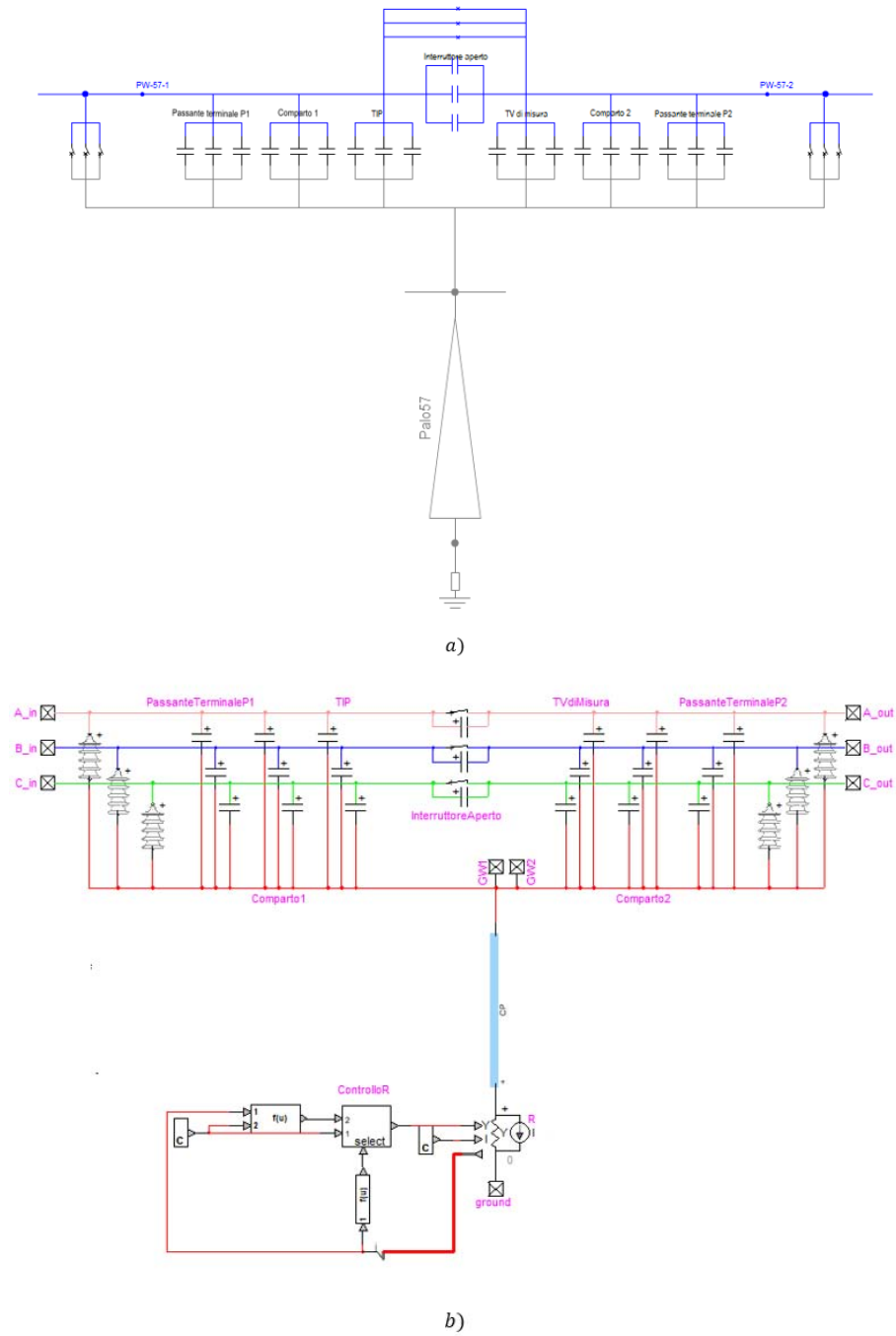


Figura 4.11: Rappresentazione del sostegno dotato di OMP in (a) PowerFactory e (b) EMTP.

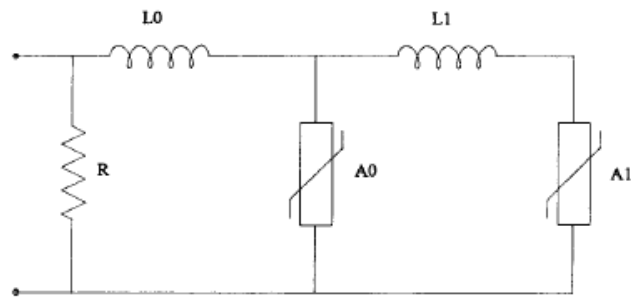


Figura 4.12: Modello Pinceti-Giannettoni dello scaricatore di sovratensione.

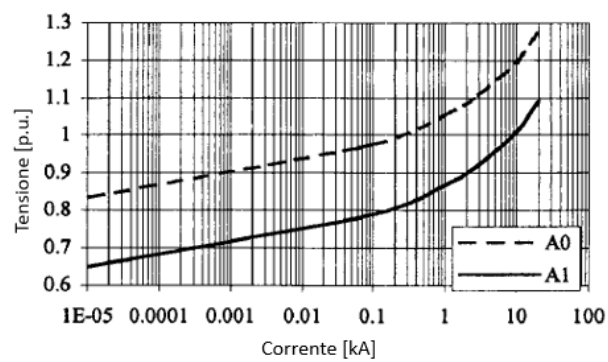


Figura 4.13: Caratteristiche dei resistori non lineari.

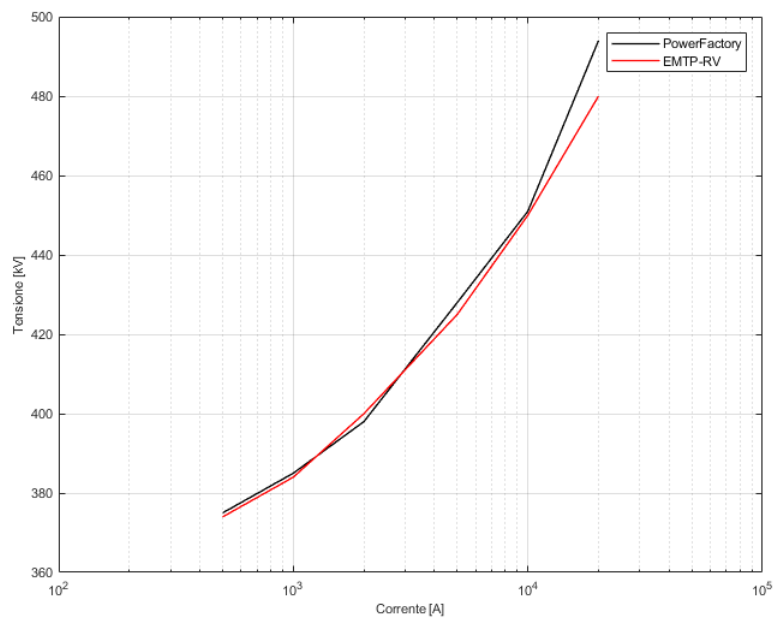


Figura 4.14: Caratteristiche v-i dello scaricatore nei due software di calcolo.

4.4 Schemi di rete

In seguito si riportano le rappresentazioni della rete in PowerFactory ed EMTP, contenenti tutti gli elementi sopra descritti.

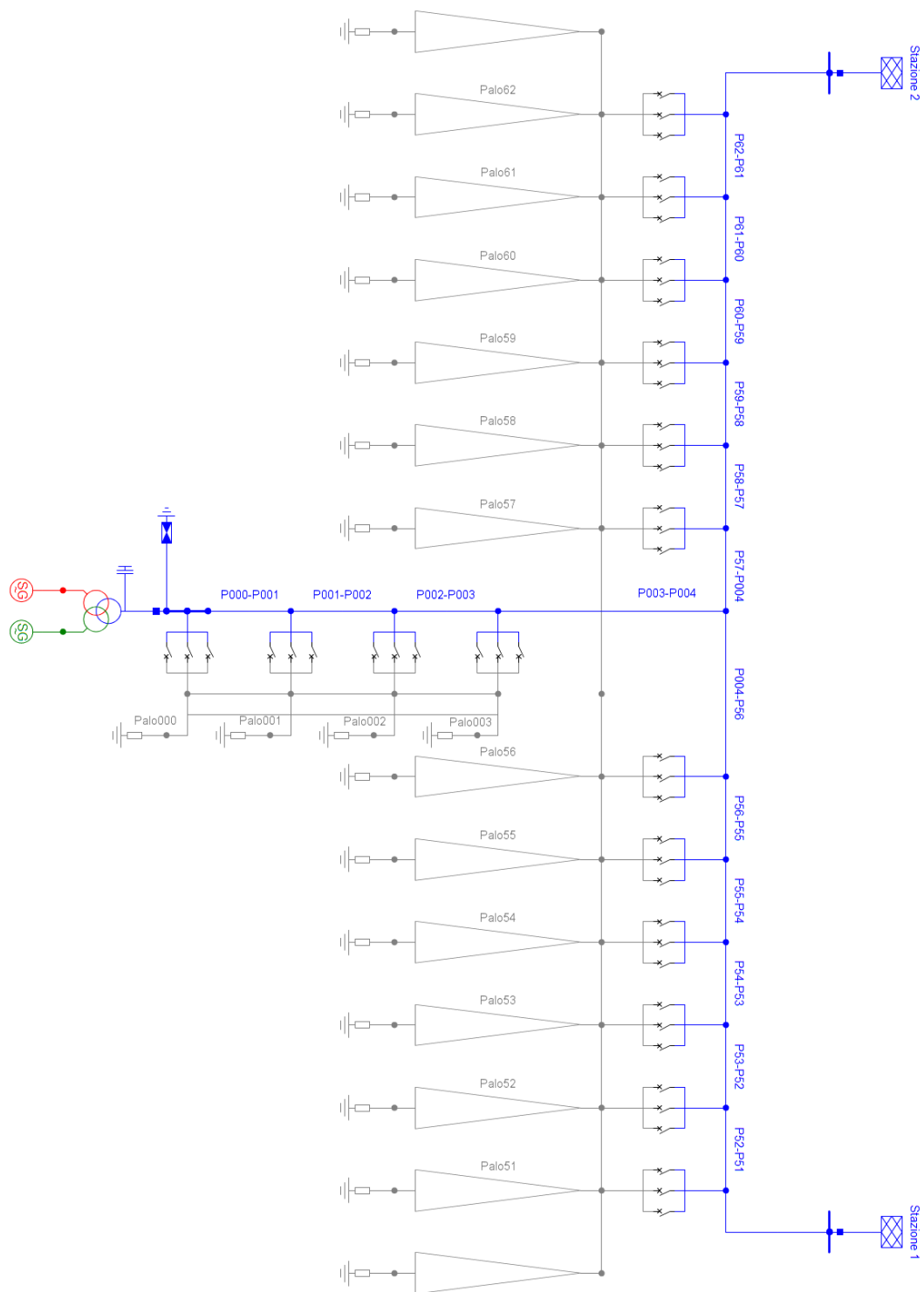


Figura 4.15: Rappresentazione della rete in PowerFactory.

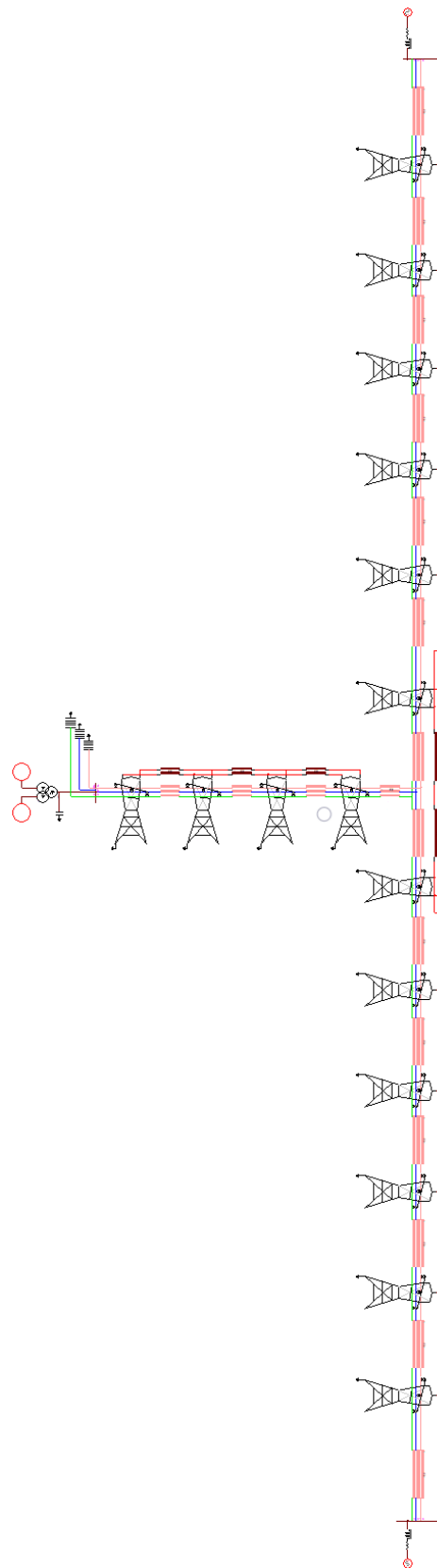


Figura 4.16: Rappresentazione della rete in EMTP.

Capitolo 5

Simulazioni di sovratensioni di origine esterna

Le simulazioni di sovratensioni di origine esterna sono state condotte sia in PowerFactory che in EMTP, sebbene nel primo software di calcolo siano stati riscontrati in certi casi alcuni problemi di instabilità, dovuti ad oscillazioni numeriche e mancanza di convergenza nella soluzione del problema. Tuttavia, per la stima dei valori massimi di sovratensione raggiunti, è possibile ritenere validi i risultati di seguito riportati.

5.1 Ipotesi di base

Oltre alle ipotesi precedentemente esposte sul modello di rete, per lo studio delle fulminazioni è necessario aggiungere ulteriori assunzioni:

- * per la caratterizzazione della corrente di fulmine, si scelgono parametri tali da sollecitare nel modo più gravoso il sistema elettrico;
- * per ricreare l'evento più critico, si considerano fulminazioni dirette su un sostegno dotato di OMP (nel caso in esame si tratta del palo P56);
- * per analizzare il maggior numero di casi, si simulano fulminazioni nelle diverse configurazioni di rete, considerando i possibili stati degli interruttori interni agli OMP (aperto/chiuso).

Le simulazioni vengono condotte nel dominio del tempo, con un intervallo di tempo di interesse di decine di μs , con passi di calcolo di 15 ns in PowerFactory e 3 ns in EMTP¹.

5.2 Casi studio di fulminazioni dirette

Gli eventi di fulminazione che sono stati scelti per l'analisi delle sovratensioni atmosferiche sono i seguenti:

¹La scelta dello step di integrazione è dettata dalle caratteristiche dei due software di simulazione.

Tabella 5.1: Parametri delle fulminazioni dirette.

Oggetto colpito	Polarità	I_f	t_f	t_h
Sostegno	+	250 kA	25 μ s	250 μ s
Conduttore di fase	-	7 kA	3 μ s	70 μ s

- * fulminazione diretta del sostegno: in tal caso l'onda a impulso assume valori di picco estremamente elevati ed ha una durata molto sostenuta, trasferendo di conseguenza un'ingente quantità di energia.
- * fulminazione diretta del conduttore di fase, dovuta al fenomeno dello *shielding failure*: per correnti di picco sufficientemente basse², la scarica di fulmine può "oltrepassare" la protezione fornita dalla fune di guardia e andare a colpire direttamente un conduttore di energia;

I parametri che descrivono le due fulminazioni sono riportati in tabella 5.1. Nel modello, la corrente di fulmine è rappresentata da un generatore ideale ad impulso, la cui forma d'onda è analiticamente rappresentata da un'equazione del tipo:

$$i(t) = I_p(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (5.1)$$

in cui gli esponenti degli esponenziali, ricavati sulla base dei parametri di fulmine secondo quanto proposto in [34] sono stati posti pari a $\alpha = 2800s^{-1}$ e $\beta = 10^5s^{-1}$ per l'impulso 25/250 μ s, mentre $\alpha = 1000s^{-1}$ e $\beta = 8,3 \cdot 10^5s^{-1}$ per l'impulso 3/70 μ s.

Come precedentemente anticipato, le simulazioni sono state condotte dapprima in PowerFactory e successivamente in EMTP. Inoltre, avendo costruito il modello della rete a partire dalla configurazione più semplice, nonché l'attuale, e apportando successive modifiche fino alla configurazione che si otterrà in futuro con l'installazione degli OMP, si riportano i risultati delle simulazioni effettuate nelle seguenti tre diverse rappresentazioni:

- 1) modello base della rete attuale;
- 2) caso 1) con l'aggiunta degli organi di manovra sui sostegni P56 e P57;
- 3) caso 2) con l'inserimento di scaricatori di sovratensione a monte e a valle di entrambi gli OMP.

5.3 Fulminazione diretta del sostegno

Il sostegno colpito dalla scarica atmosferica è il P56: come riportato in tabella 5.1, si tratta di una scarica caratterizzata da polarità positiva, avente una forma d'onda del tipo 25/250 μ s con corrente di picco di 250 kA (figura 5.1). In questo caso, è il sostegno a portarsi ad un potenziale maggiore rispetto ai conduttori di fase: questo può provocare perdita di isolamento e, di conseguenza, un guasto

²Inferiori alla massima corrente di shielding failure secondo la (2.19).

monofase, in seguito ad una scarica inversa ai capi della catene di isolatori della fase caratterizzata dal maggiore potenziale opposto.

Lo stesso evento è stato simulato nei tre casi precedentemente descritti, in

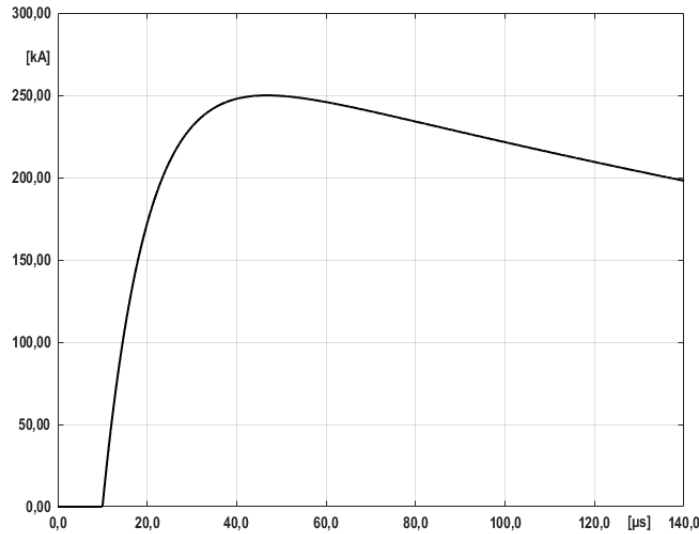


Figura 5.1: Forma d'onda della corrente di fulmine.

entrambi gli ambienti di calcolo.

5.3.1 Esempio esplicativo

Prima di procedere con l'analisi delle fulminazioni e delle grandezze di maggior importanza, è interessante soffermarsi sul fenomeno in sé: come precedentemente spiegato nel capitolo 2, la fulminazione diretta del sostegno induce sovratensioni nei conduttori di fase, a cui sono associate onde viaggianti che si propagano lungo l'intera linea, fino a quando vengono o smorzate dai vari effetti dissipativi o drenate a terra attraverso scariche di catene di isolatori o opportuni scaricatori a protezione del sistema elettrico. Le simulazioni³ dell'evento nel dominio del tempo consentono di apprezzare visivamente il fenomeno di propagazione delle onde: si possono quindi osservare eventuali trasmissioni e riflessioni delle onde stesse in corrispondenza di variazioni d'impedenza caratteristica. A titolo esplicativo, si riportano in figura 5.2 le forme d'onda di tensione, e le rispettive onde di corrente scalate dell'opportuna impedenza d'onda, che si verificano in corrispondenza dei sostegni P003, P002, P001 e P000, ovvero lungo la derivazione verso la centrale idroelettrica A, a seguito di una scarica atmosferica che colpisce il palo P56. Dalla figura 5.2, si nota il ritardo con cui si manifesta l'onda di sovratensione in corrispondenza di sostegni successivi: gli intervalli di tempo dipendono dalle diverse lunghezze delle campate. Volontariamente, sono stati rimossi gli scaricatori a monte del trasformatore della centrale; questo è stato fatto per mostrare che, all'arrivo dell'onda viaggiante, il trasformatore si comporta come un circuito aperto: l'onda viene interamente riflessa

³L'esempio è stato analizzato solamente in PowerFactory per non appesantire inutilmente la trattazione.

[paragrafo 1.2.1], assumendo il doppio del valore di picco iniziale, e di conseguenza si propaga verso la dorsale. Tale fenomeno è visibile in due istanti: $5 \mu\text{s}$ e $14 \mu\text{s}$.

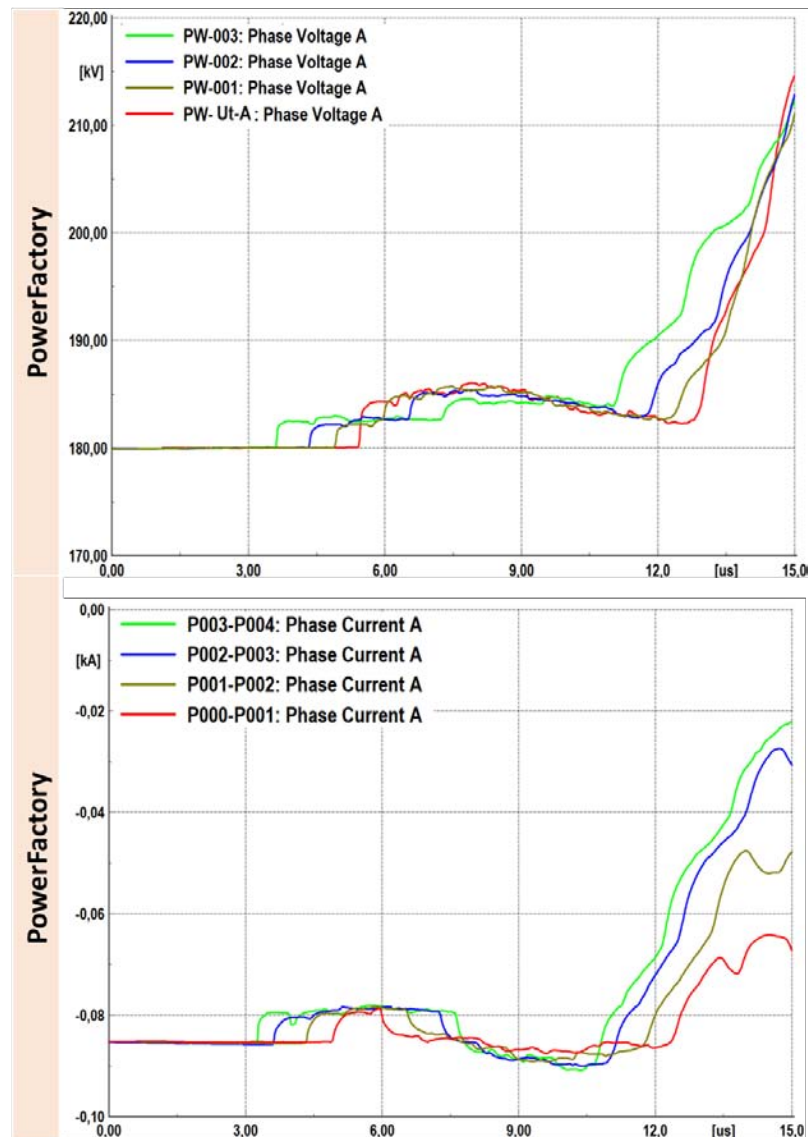


Figura 5.2: Forme d'onda di tensione e corrente lungo la derivazione.

5.3.2 Caso 1: modello base

In seguito si analizza la fulminazione diretta del sostegno P56 nella configurazione di rete attuale e si riportano le forme d'onda di corrente e di tensione di maggior interesse, ottenute in PowerFactory e EMTP.

Poiché è il sostegno ad essere interessato dalla fulminazione, parte della corrente associata al canale di scarica viene direttamente drenata a terra attraverso il sostegno stesso⁴: dai grafici in figura 5.3, che riportano la stessa grandezza nei due software, si nota che la forma d'onda è la stessa e i valori massimi vengono raggiunti

⁴La corrente che fluisce nel terreno dipende dal valore della resistenza di terra del sostegno colpito.

quasi nello stesso istante. Inoltre, in entrambi i software viene superata la soglia di ionizzazione del terreno (figura 5.4), pertanto il valore della resistenza diminuisce in funzione della corrente che fluisce nel terreno. L'unica differenza riguarda il valore massimo leggermente superiore (circa il 7% in più) raggiunto in PowerFactory, in questo il processo di ionizzazione inizia con qualche μs di anticipo.

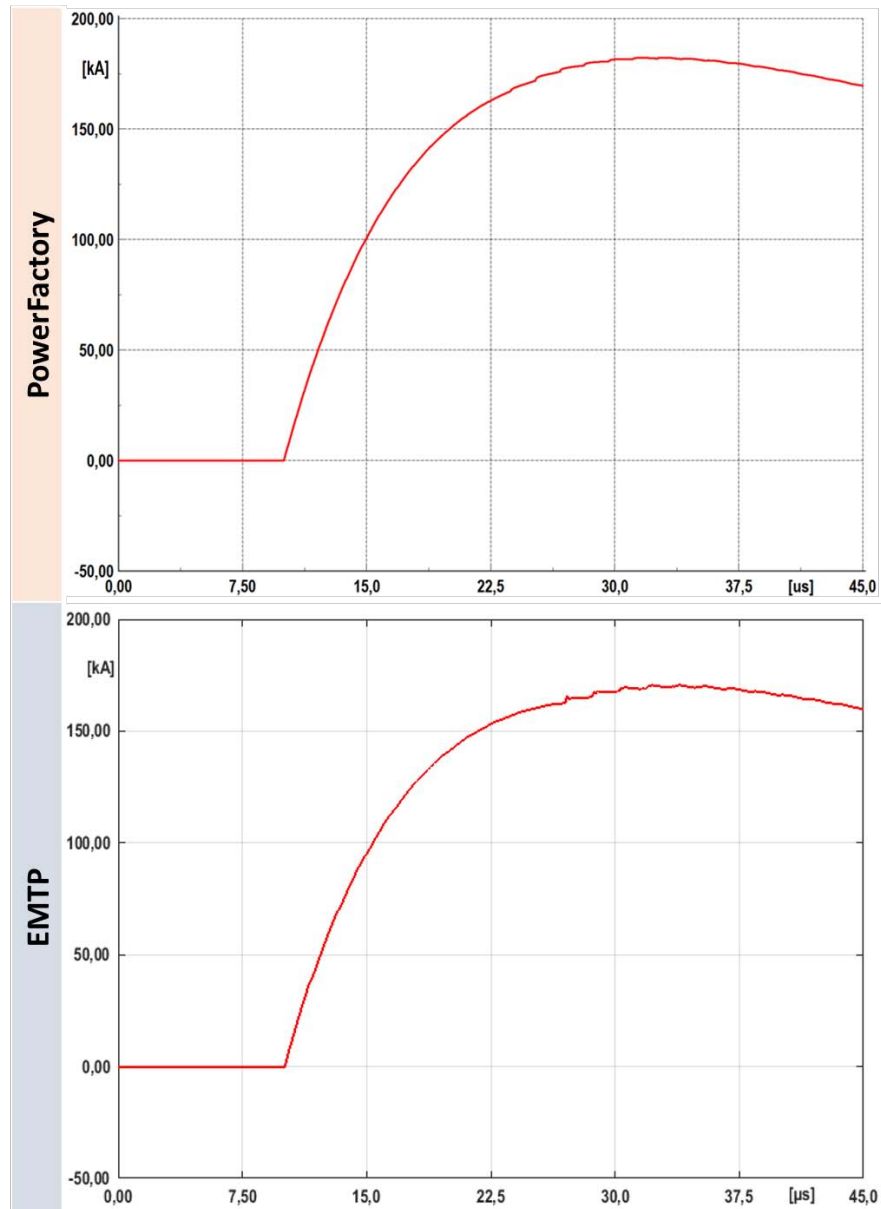


Figura 5.3: Corrente drenata a terra in a) PowerFactory e b) EMTP.

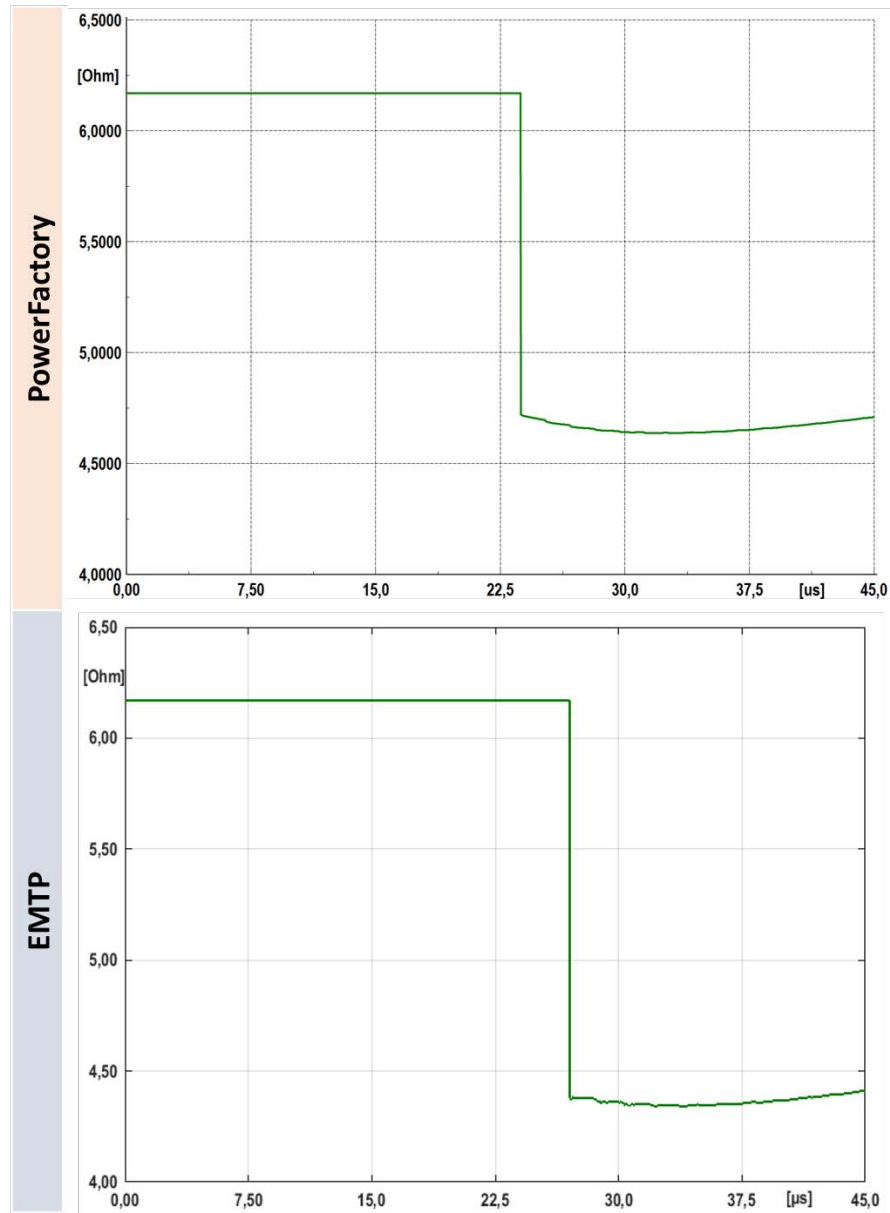


Figura 5.4: Resistenza di terra variabili del sostegno P56 in a) PowerFactory e b) EMTP.

Oltre alle correnti, è interessante analizzare le sovratensioni che sollecitano il sistema elettrico: i valori più elevati si raggiungono in corrispondenza del sostegno P56, i cui conduttori di fase maggiormente risentono delle tensioni indotte dalla fulminazione (figura 5.5). Tali onde di sovratensione si propagano quindi lungo la rete, risentendo dell'attenuazione dovuta alle resistenze, all'effetto corona e all'effetto pelle, come mostra la figura 5.6.

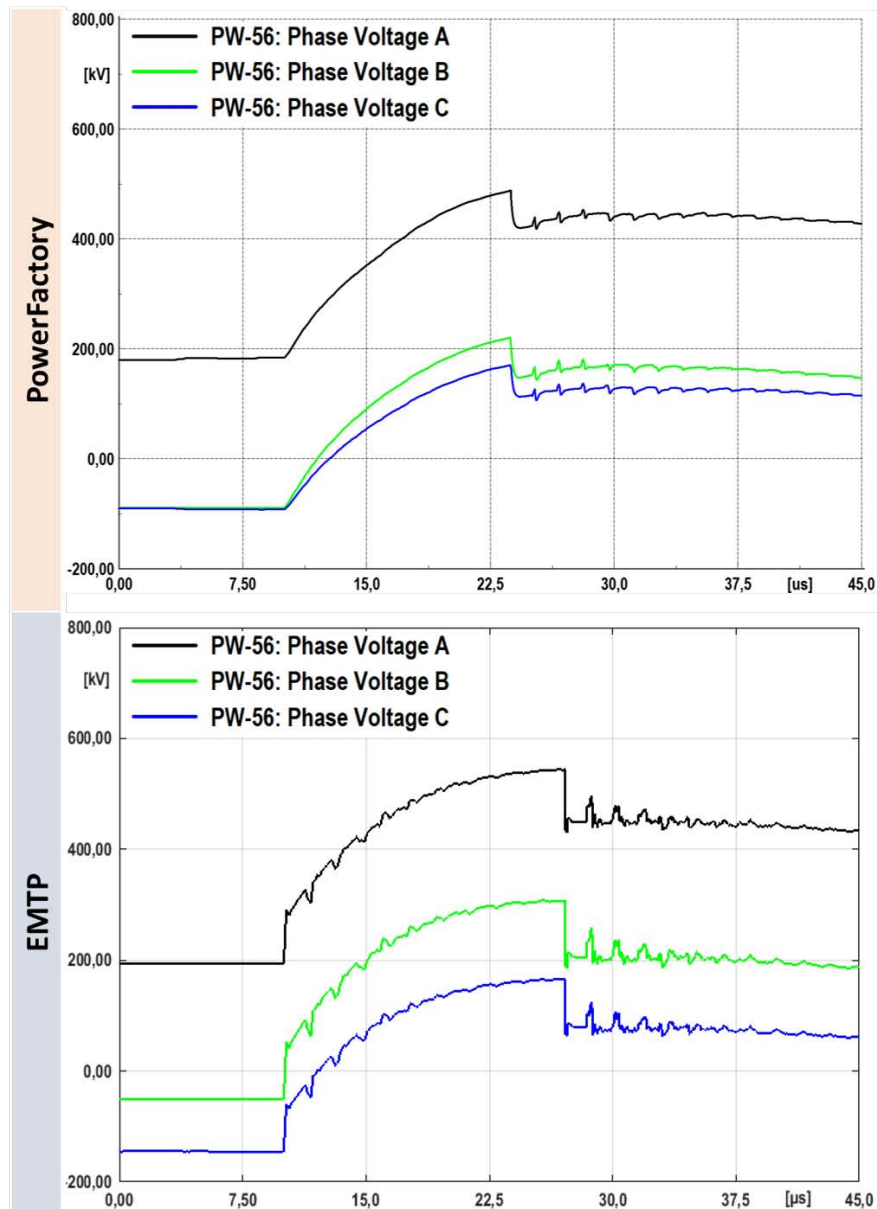


Figura 5.5: Tensioni in corrispondenza del sostegno P56 in a) PowerFactory e b) EMTP.

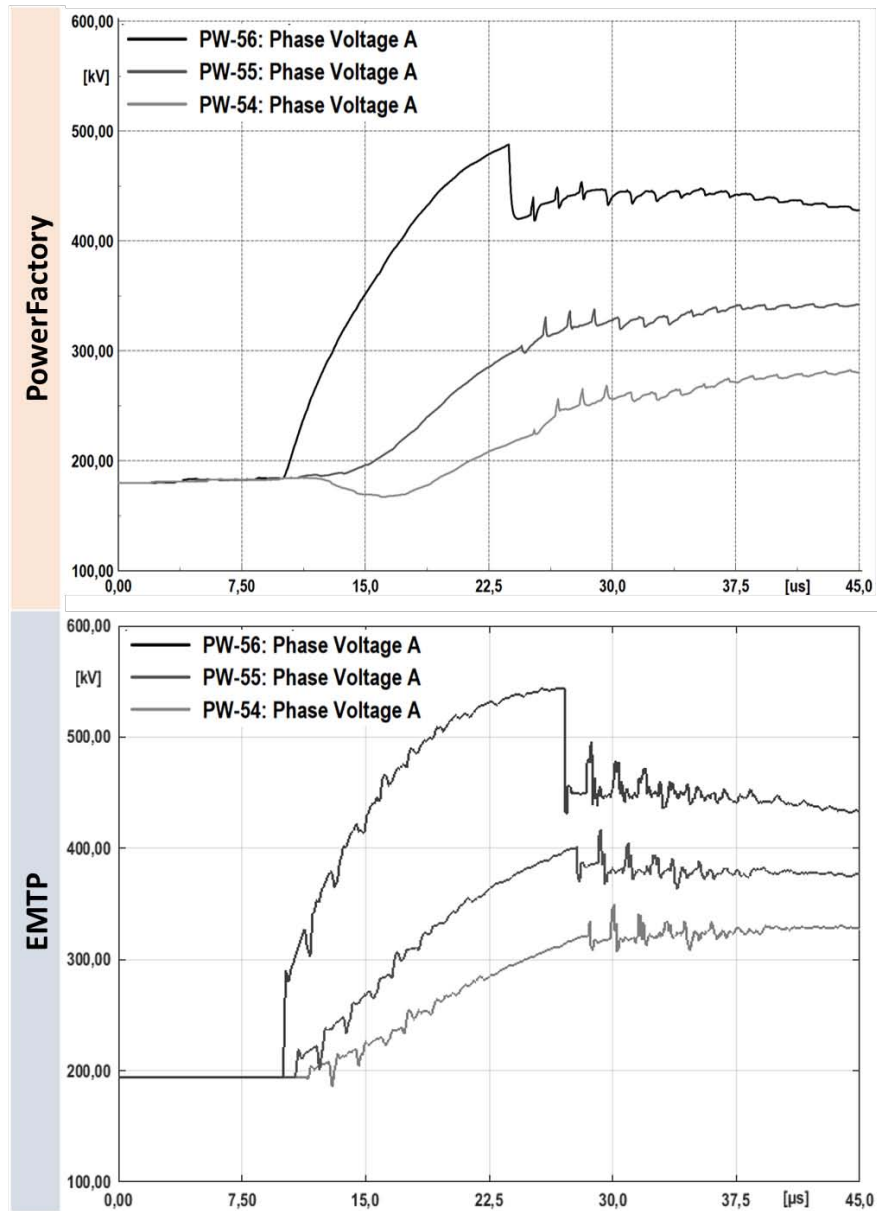


Figura 5.6: Propagazione delle onde di tensione nella direzione di Stazione 1 in a) PowerFactory e b) EMTP.

5.3.3 Caso 2: inserimento degli OMP

Con l'aggiunta degli organi di manovra in entrambi i sostegni P56 e P57, le forme d'onda di tensione e corrente non cambiano in maniera significativa, come mostrano gli andamenti di tensione in EMTP⁵ nella figura 5.7: infatti le capacità sono caratterizzate da valori estremamente piccoli che quasi non influenzano le tensioni indotte⁶. Risulta di maggior interesse, a questo punto, analizzare le massime sovratensioni che possono manifestarsi ai capi dell'OMP in tale situazione (figura 5.8).

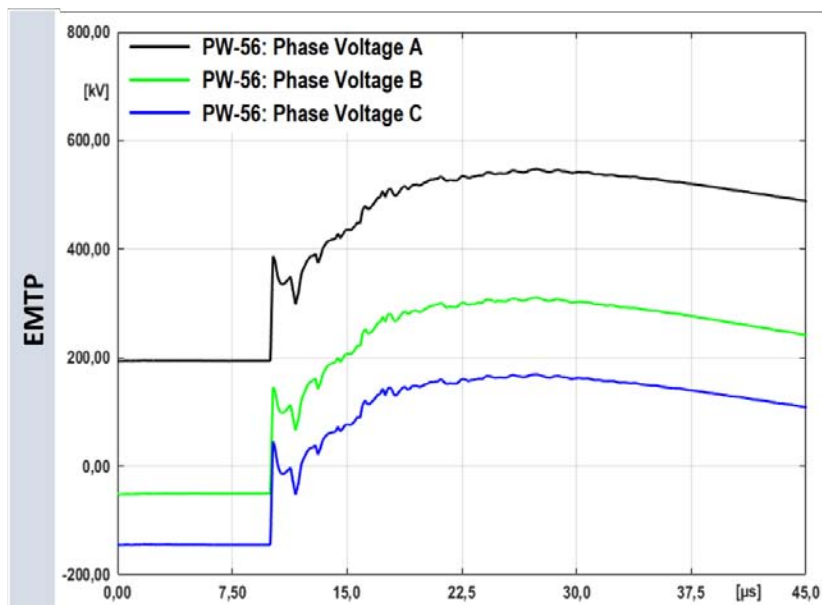


Figura 5.7: Tensioni in corrispondenza del sostegno P56 in EMTP.

⁵In PowerFactory, l'inserimento delle capacità dell'OMP tra fasi e sostegno crea oscillazioni numeriche.

⁶E' importante stimare correttamente le capacità che rappresentano l'OMP: nel caso di sovrastima le tensioni assumono forme d'onda differenti.

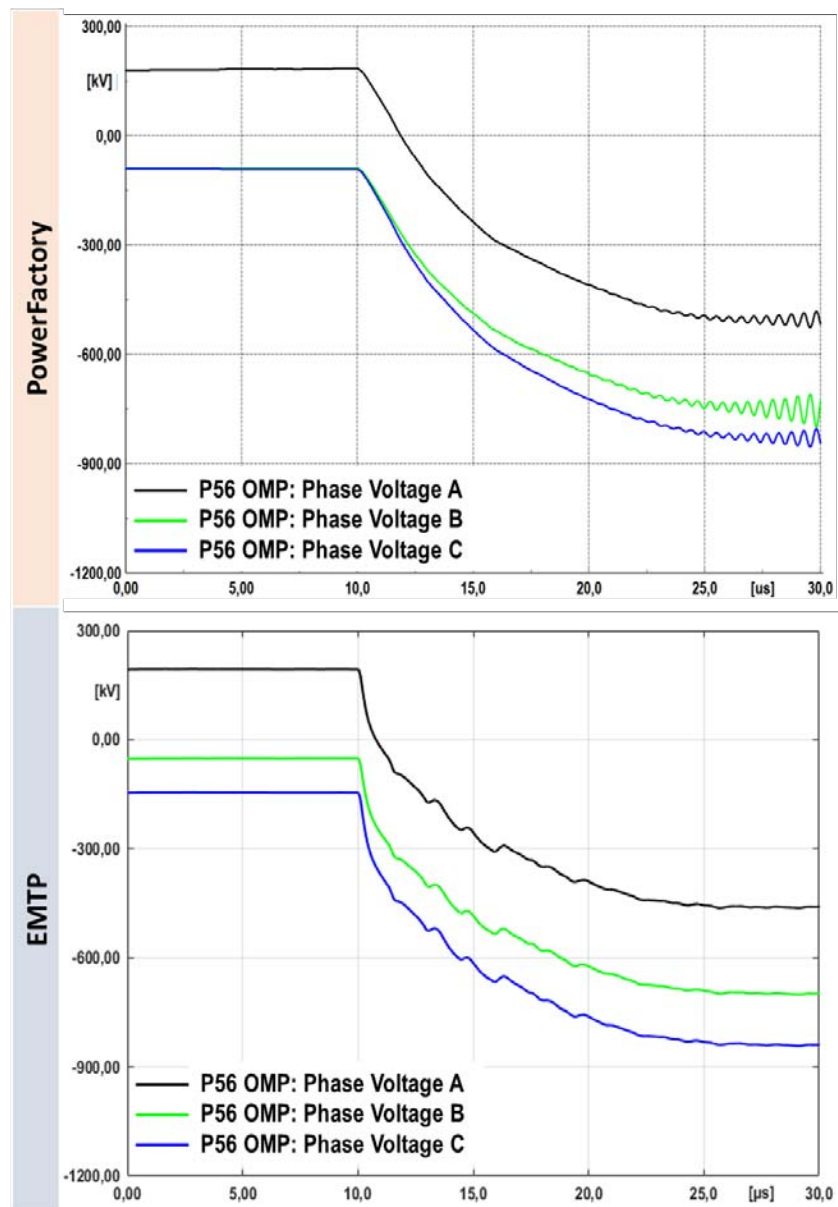


Figura 5.8: Sovratensioni ai capi dell'OMP del sostegno P56 in a) PowerFactory e b) EMTP.

Per quanto riguarda la corrente drenata a terra attraverso la resistenza del sostegno, dalla figura 5.9 si nota che la forma d'onda è la stessa del caso precedente; si nota solamente una differenza nel picco, che risulta qui essere inferiore del 6,3% in PowerFactory e del 5,0% in EMTP.

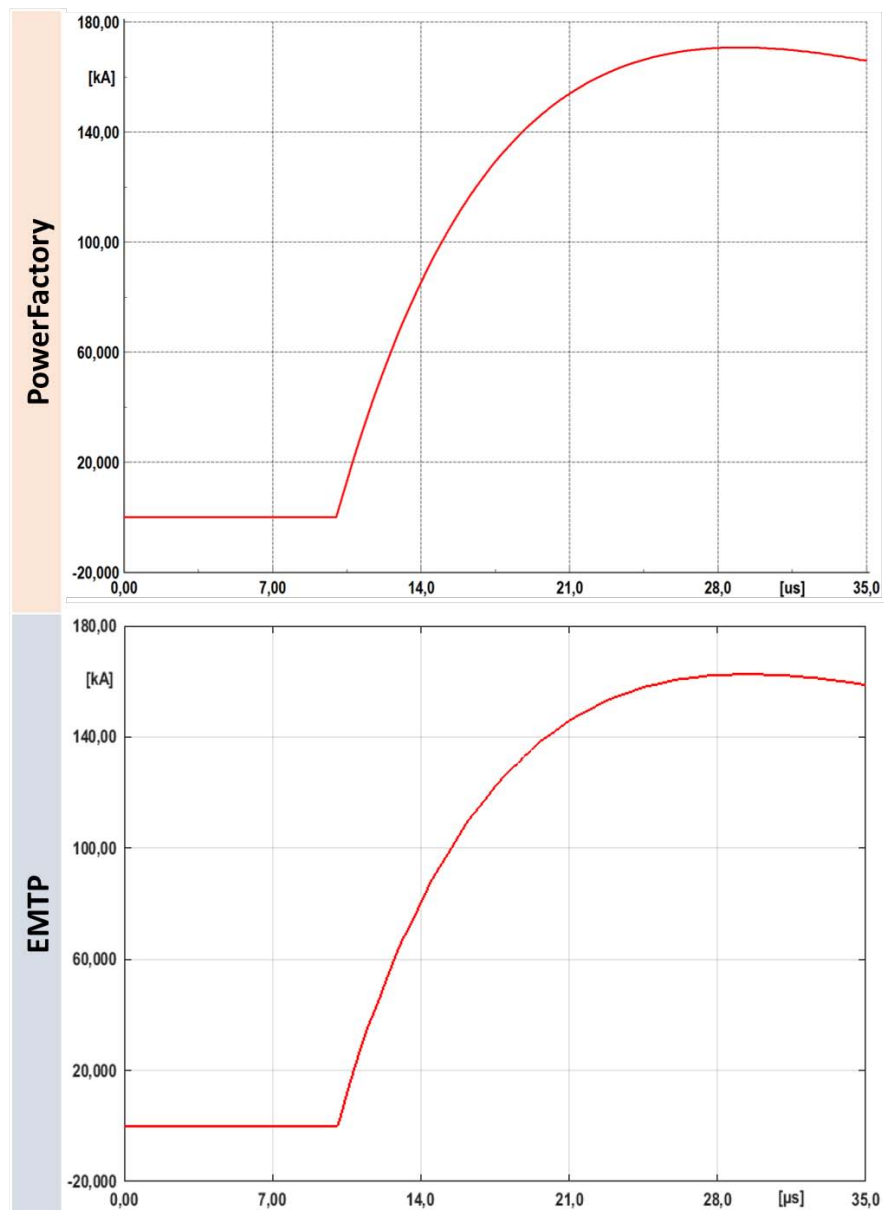


Figura 5.9: Corrente drenata a terra in a) PowerFactory e b) EMTP.

5.3.4 Caso 3: inserimento degli scaricatori di sovratensione

Volendo analizzare ora il caso reale, vengono inseriti a protezione degli OMP opportuni scaricatori di sovratensione, sia a monte che a valle dei sostegni P56 e P57. Come visto nel paragrafo 2.6, al sopraggiungere dell'onda di tensione essi scaricano la corrente di fulmine a terra attraverso il sostegno a cui sono collegati, limitando così la sovratensione ai capi degli organi di manovra.

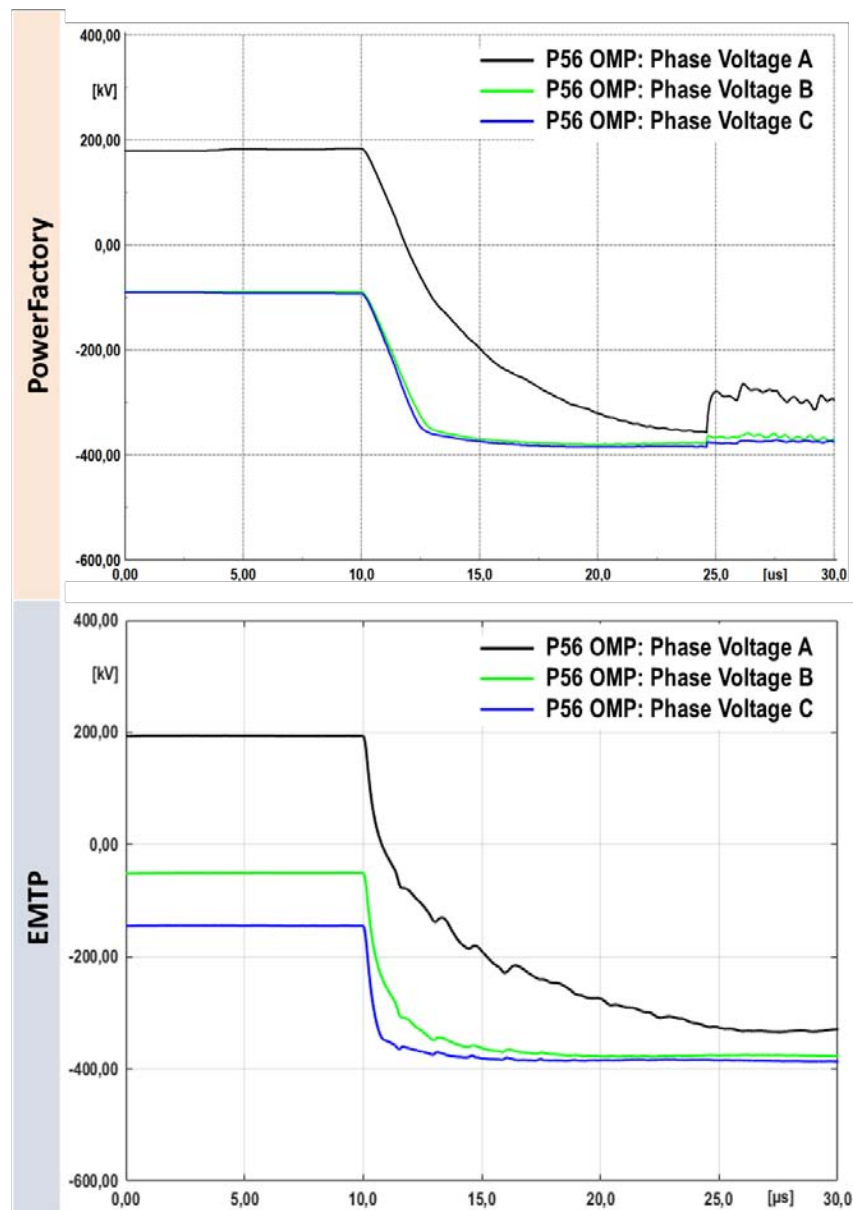


Figura 5.10: Sovratensioni ai capi dell'OMP dotato di scaricatori del sostegno P56 in a) PowerFactory e b) EMTP.

Dalla figura 5.10, se confrontata con la 5.8, si nota una grande differenza dei valori massimi di tensione che si manifestano ai capi dell'OMP: in particolare, si ottiene una riduzione superiore al 50% se si considera la sola fase C, ovvero quella interessata dalle maggiori sovratensioni indotte. Per quanto riguarda invece la corrente drenata attraverso il sostegno, si ritrova la forma d'onda dei casi precedenti (figura 5.11), con valori di picco molto simili al caso base, con la differenza che in PowerFactory si verifica nuovamente la ionizzazione del terreno mentre in EMTP non si raggiunge il valore soglia di corrente necessario.

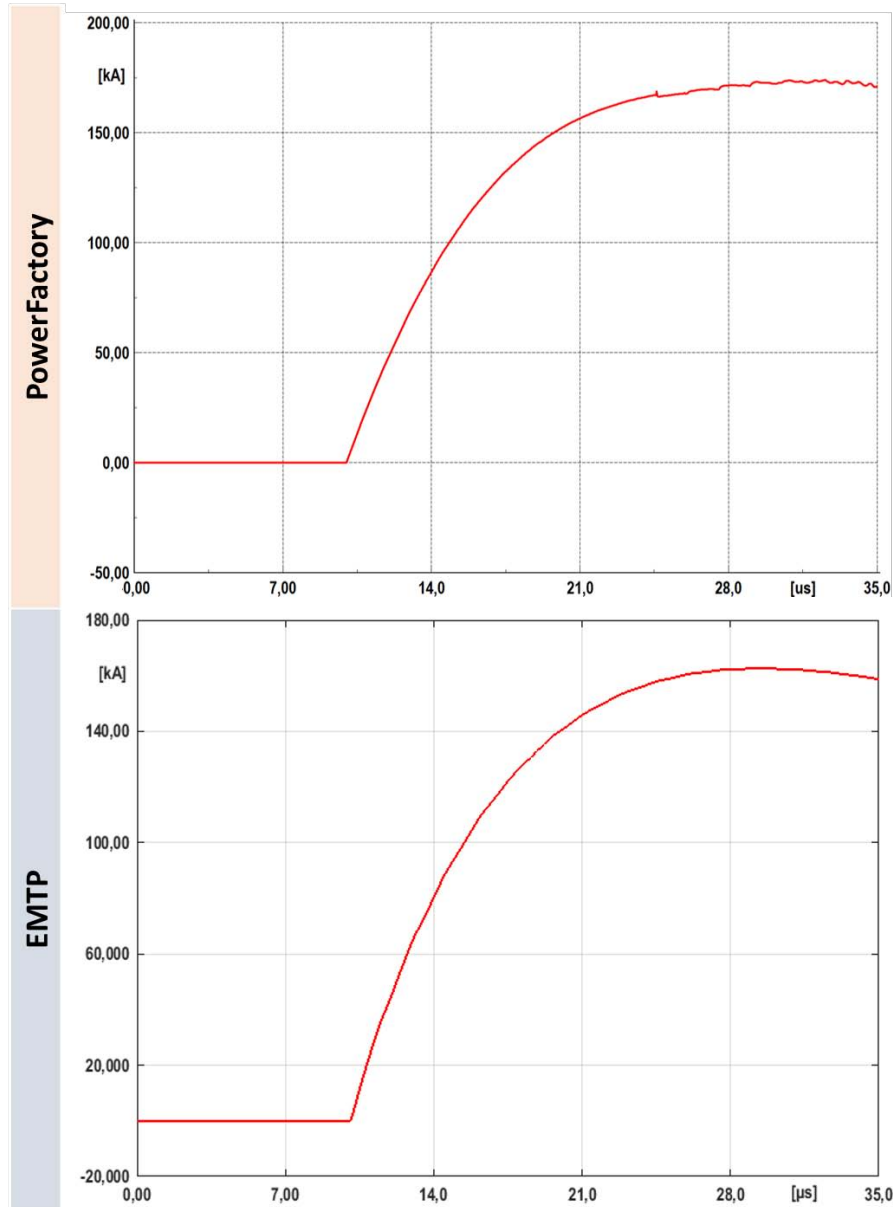


Figura 5.11: Corrente drenata a terra in a) PowerFactory e b) EMTP.

Assumendo quindi che, in presenza degli scaricatori di sovratensione a monte e a valle di ogni OMP, questi ultimi siano sempre protetti, risulta interessante analizzare se i varistori stessi possono subire danneggiamenti in seguito a fulminazioni estremamente gravose. Per fare ciò, dopo aver simulato una scarica atmosferica, si studiano le forme d'onda di corrente e potenza che interessano lo scaricatore. Rielaborando i dati estrapolati⁷, è possibile calcolare la carica trasferita dal fulmine allo scaricatore e l'energia da quest'ultimo assorbita, secondo le seguenti equazioni:

$$q = \int i dt \quad (5.2)$$

$$w = \int p dt \quad (5.3)$$

⁷Si prendono in considerazione solamente le forme d'onda fornite da EMTP per evitare le instabilità insorte in PowerFactory.

in modo tale da controllare che lo scaricatore sia stato dimensionato correttamente per questo tipo di avvenimenti.

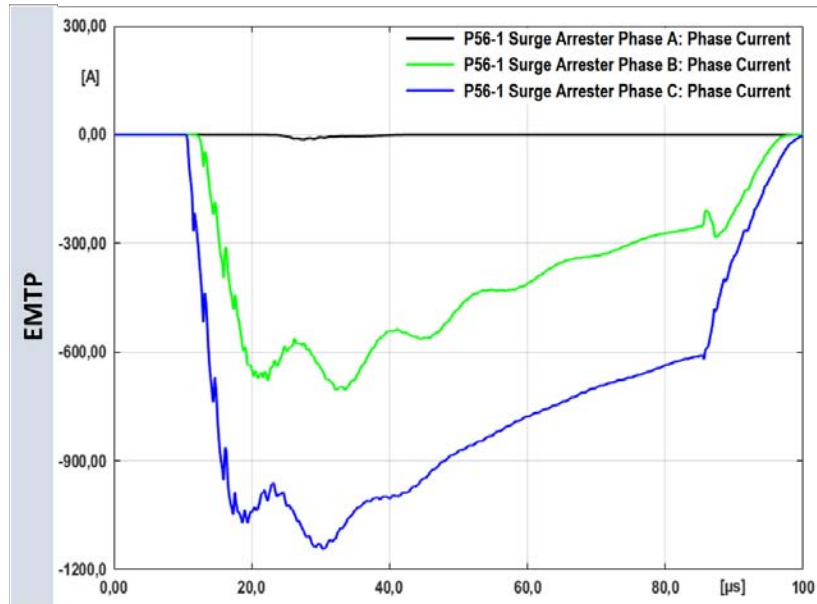


Figura 5.12: Correnti di scarica attraverso gli scaricatori di sovratensione in EMTP.

Analizzando le tensioni ai capi dell'OMP (nonché a capo degli scaricatori di tensione⁸) e le correnti assorbite dagli scaricatori in figura 5.12, si nota immediatamente che il varistore maggiormente sollecitato è quello collegato alla fase C. Pertanto, secondo la 5.2, è possibile ricavare la carica trasferita che risulta essere pari a 0,0715 C, inferiore alla carica massima di 4 C riportata del datasheet del costruttore. In seguito, dopo aver calcolato la potenza istante per istante (figura 5.13), integrandola nel tempo risulta un'energia assorbita pari a 27,145 kJ, anch'essa inferiore all'energy capability dello scaricatore, pari a 2,178 MJ.

Poiché i valori calcolati di carica trasferita ed energia assorbita sono molto inferiori alle capacità di questa tipologia di scaricatore di sovratensione, è stato analizzato in EMTP il fenomeno di una scarica atmosferica avente ancora una forma d'onda 25/250 μ s, ma valore di picco di 350 kA. Anche in questo caso, lo scaricatore soggetto ai valori più elevati di tensione e corrente è quello collegato alla fase C, le cui forme d'onda di corrente e potenza sono riportate in figura 5.14. Integrando entrambe le grandezze nel tempo, sono state calcolate la carica, pari a 0,1685 C, e l'energia, pari a 65,701 kJ. Tali risultati sono molto maggiori rispetto al caso precedente ma rientrano ancora nei limiti sopportabili dal varistore.

Nel caso in cui si voglia sapere con che probabilità oppure con che frequenza possa avvenire una fulminazione con queste caratteristiche, è necessario calcolare:

- * N_l , ovvero il numero di fulmini che impattano nelle campate afferenti ai sostegni dotati di OMP in un anno. Esso è pari a [8]:

$$N_l = N_g \cdot \frac{(28h^{0,6} + b)}{10} \cdot \frac{2l}{100} \quad (5.4)$$

⁸OMP e scaricatori di sovratensione sono entrambi collegati tra fase e sostegno.

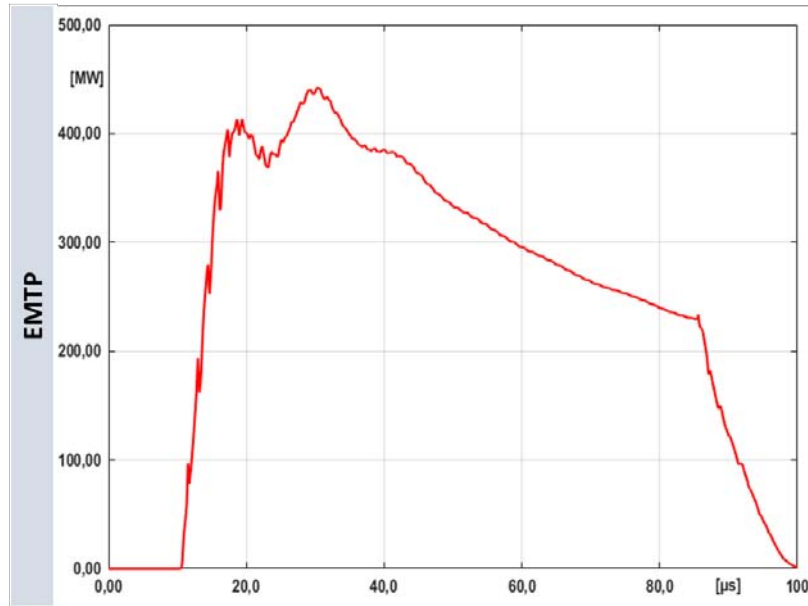


Figura 5.13: Potenza assorbita dallo scaricatore della fase C in EMTP.

dove N_g è la densità ceraunica⁹, h è l'altezza media del sostegno, b è l'impedimento laterale della linea elettrica e l è la lunghezza della campata. Risulta $N_l = 0,152$ fulminazioni/anno.

- * $P(I > 350 \text{ kA})$, ovvero la probabilità che possa verificarsi una scarica atmosferica avente corrente di picco maggiore o uguale di 350 kA. Dalla (2.3), si ricava $P(I > 350 \text{ kA}) = 1,5\%$.

Di conseguenza, la probabilità che una scarica di fulmine colpisca le campate in corrispondenza dei sostegni P56 e P57 con corrente di picco superiore ai 350 kA è pari a $P = 0,152 \cdot 0,015 = 0,228\%$, che equivale a dire che un tale evento si verifica almeno una volta ogni 438,6 anni. Si tratta pertanto di un avvenimento molto raro, ma nel momento in cui avviene gli scaricatori di sovratensione riescono a proteggere gli organi di manovra senza alcun danneggiamento.

⁹Il valore puntuale è stato fornito da Terna, grazie al sistema di localizzazione fulmini SIRF di CESI.

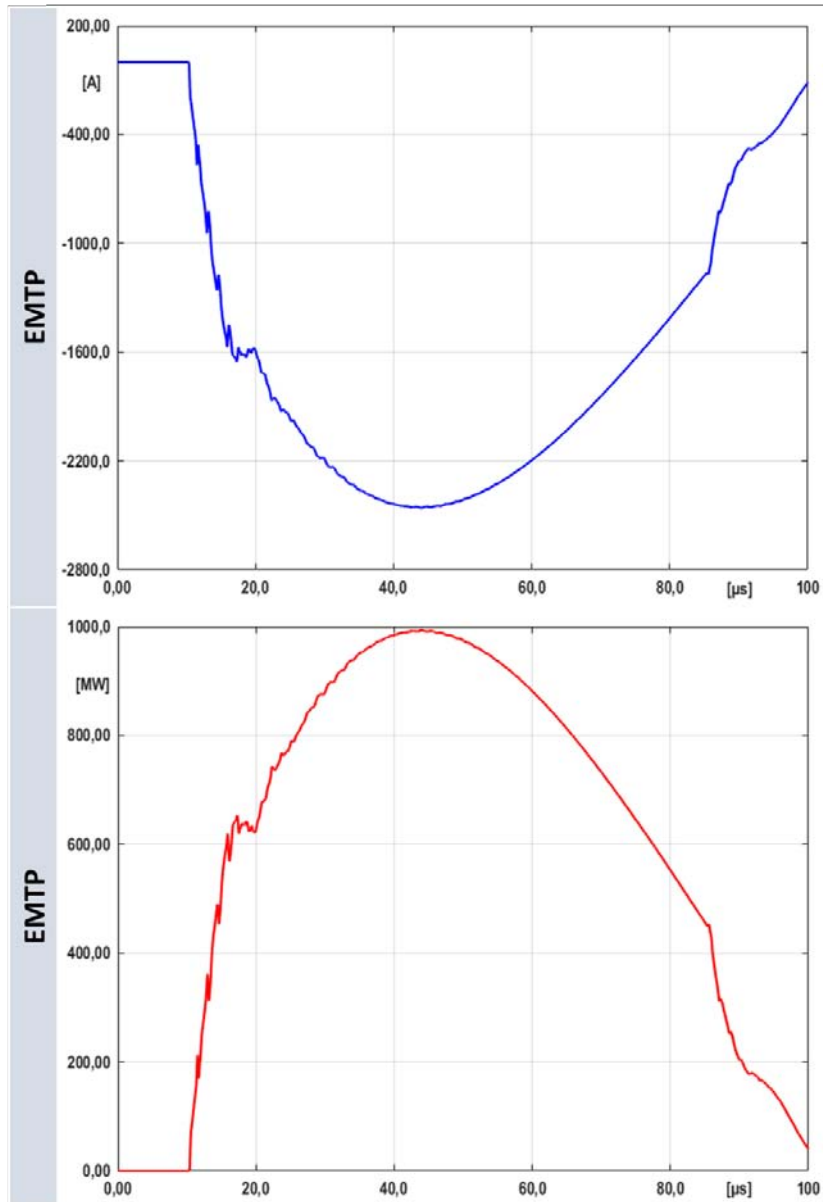


Figura 5.14: Forme d'onda di corrente e potenza che interessano lo scaricatore collegato alla fase C in EMTP.

Tabella 5.2: Confronto dei risultati nei due software.

Valori massimi riscontrati			
		PowerFactory	EMTP
Caso 1	i_R	182,4 kA	170,7 kA
	v_{P56}	488,0 kV	542,5 kV
Caso 2	i_R	170,8 kA	162,6 kA
	v_{P56}	551,3 kV	547,6 kV
	v_{OMP}	837,0 kV	842,2 kV
Caso 3	i_R	173,9 kA	161,1 kA
	v_{P56}	715,5 kV	663,5 kV
	v_{OMP}	387,9 kV	387,1 kV
	i_{SA}	1,0 kA	1,1 kA

5.3.5 Confronto dei risultati

Per avere un'idea più chiara dei massimi valori di tensione che possono sollecitare il sistema nel caso di fulminazione diretta del sostegno, con onda 25/250 μ s di picco 250 kA, si riportano i dati più significativi ottenuti nei due ambienti di simulazione in tabella 5.2. Come si può notare, i risultati risultano essere molto simili; in particolar modo, per quanto riguarda le sovratensioni massime ai capi dell'OMP, si riscontra una differenza massima di 5,2 kV nel secondo caso, pari allo 0,6%.

5.4 Fulminazione diretta del conduttore di fase

Nuovamente, il sostegno interessato dalla scarica atmosferica è il P56, ma in questo caso il fulmine colpisce direttamente il conduttore di energia posto ad altezza maggiore (fase A in questo modello). Se la sovratensione associata all'impulso di corrente è sufficientemente elevata, si può verificare una scarica diretta ai capi della catena di isolatori della fase colpita, provocando un guasto monofase. In questo caso, l'impulso di corrente è un'onda 3/70 μs , avente picco di 7 kA (figura 5.15), calcolata secondo la seguente formula già citata in 2.5.2:

$$I_{max} = \left[\frac{(h_c + h_{fg})/2}{10(1 - \sin\alpha)} \right]^{1/0.65} \quad (5.5)$$

dove h_c altezza media dei conduttori è 26 m, h_{fg} altezza media della fune di guardia è 30 m e α angolo di *shielding failure* risulta essere, dalla geometria, 12° .

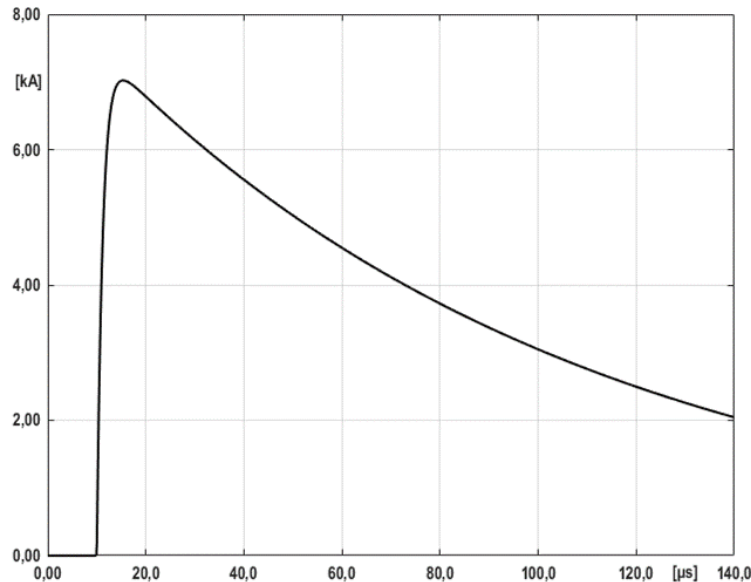


Figura 5.15: Forma d'onda della corrente di fulmine.

5.4.1 Esempio esplicativo

Prima di procedere con le forma d'onda di interesse, si propone un esempio di fulminazione diretta del conduttore di energia (fase A) in PowerFactory, ai fini di mostrare la propagazione delle onde viaggianti. Come in 5.3.1, vengono rimossi gli scaricatori di sovratensione a monte del trasformatore dell'Utente A, per osservare la riflessione totale dell'onda di tensione (figura 5.16). In questa simulazione, si assiste inoltre ad un cedimento dell'isolamento in corrispondenza della catena di isolatori collegata alla fase A. Come mostra la figura 5.17, la tensione raggiunge valori tale da innescare la formazione del leader, che si propaga con una velocità che cresce quadraticamente con la tensione, fino a raggiungere l'estremità opposta della catena. Quando la lunghezza del leader eguaglia il gap di 1,94 m, l'interruttore viene istantaneamente chiuso, simulando la scarica diretta. La fase corrispondente

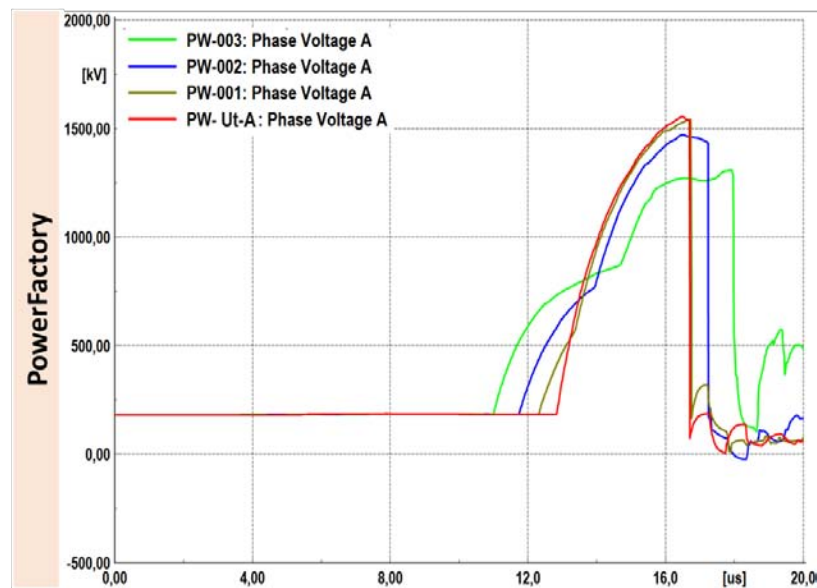


Figura 5.16: Propagazione dell'onda di sovratensione lungo la derivazione in PowerFactory.

subisce un guasto monofase e si comporta successivamente come una fune di guardia per le due fasi ancora sane.

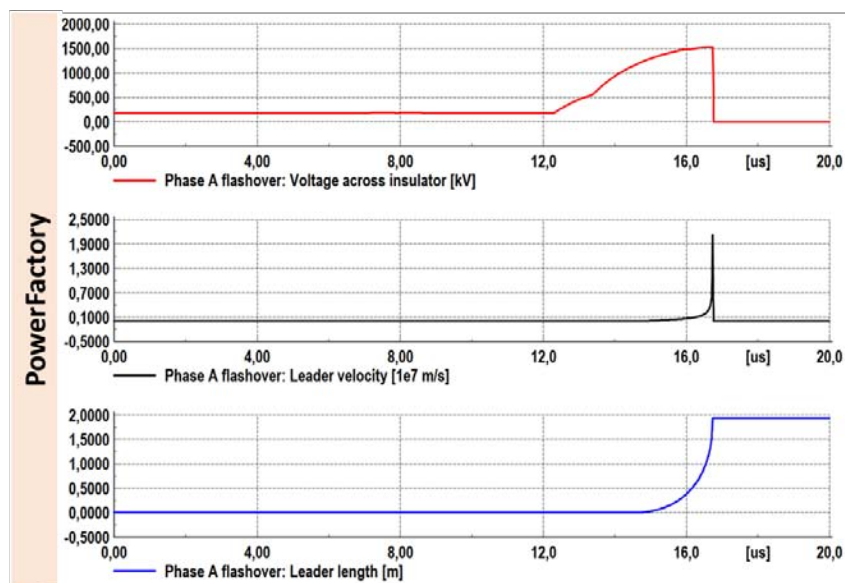


Figura 5.17: Processo di scarica lungo la catena di isolatori in PowerFactory.

5.4.2 Caso 1: modello base

In seguito si riportano le forme d'onda di corrente e tensione di maggior interesse, ottenute in PowerFactory e EMTP in seguito ad una fulminazione diretta del conduttore di fase A in corrispondenza del sostegno P56. Dalla figura 5.18 si nota

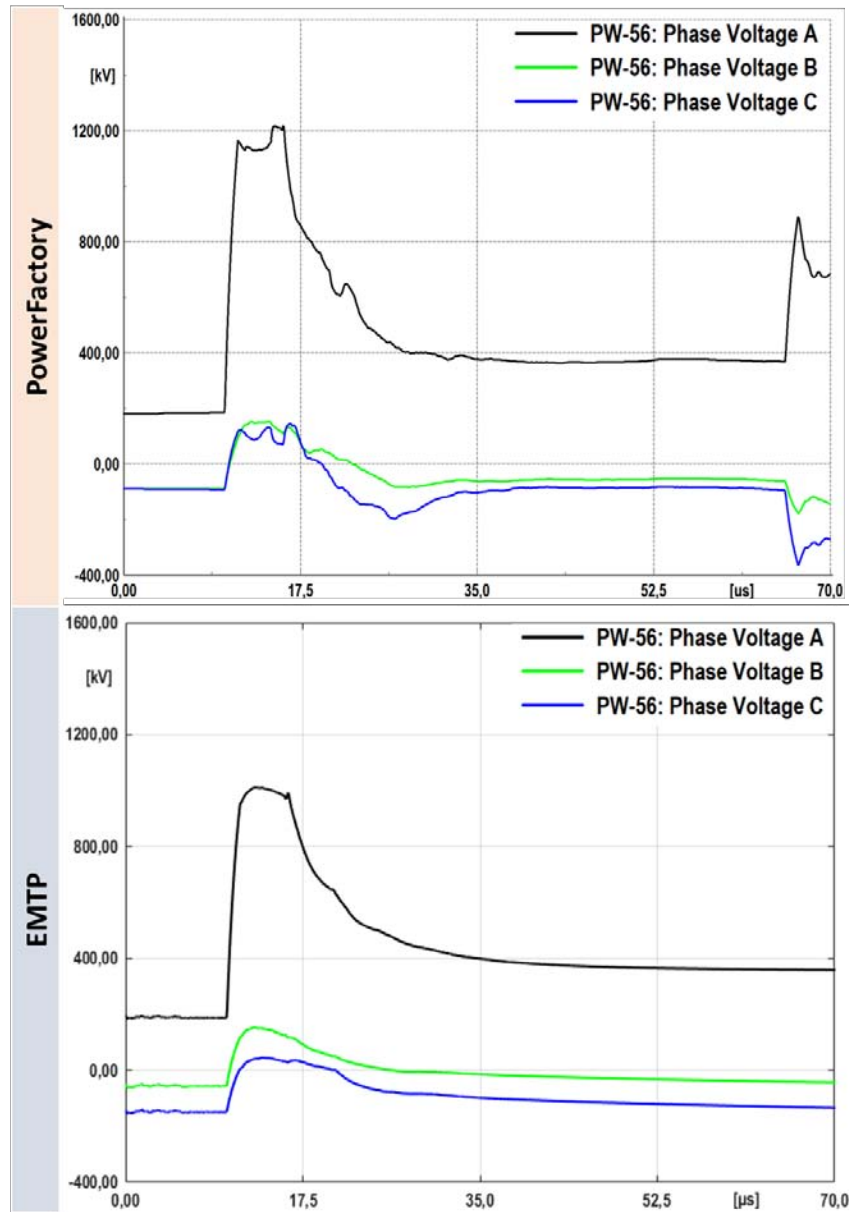


Figura 5.18: Valori di tensione in corrispondenza del palo P56 in a) PowerFactory e b) EMTP.

una marcata differenza nei risultati ottenuti nei due software. In particolare, in PowerFactory, le sovratensioni raggiunte (circa il 20% in più rispetto ad EMTP) sono tali da innescare la formazione e la propagazione parziale del leader (figura 5.19), che al contrario non si verifica in EMTP per mancato raggiungimento della soglia di innesco.

Nonostante questa differenza, in entrambi gli ambienti di simulazione non si verifica nessun cedimento dell'isolamento. Si riporta inoltre, in figura 5.20, la

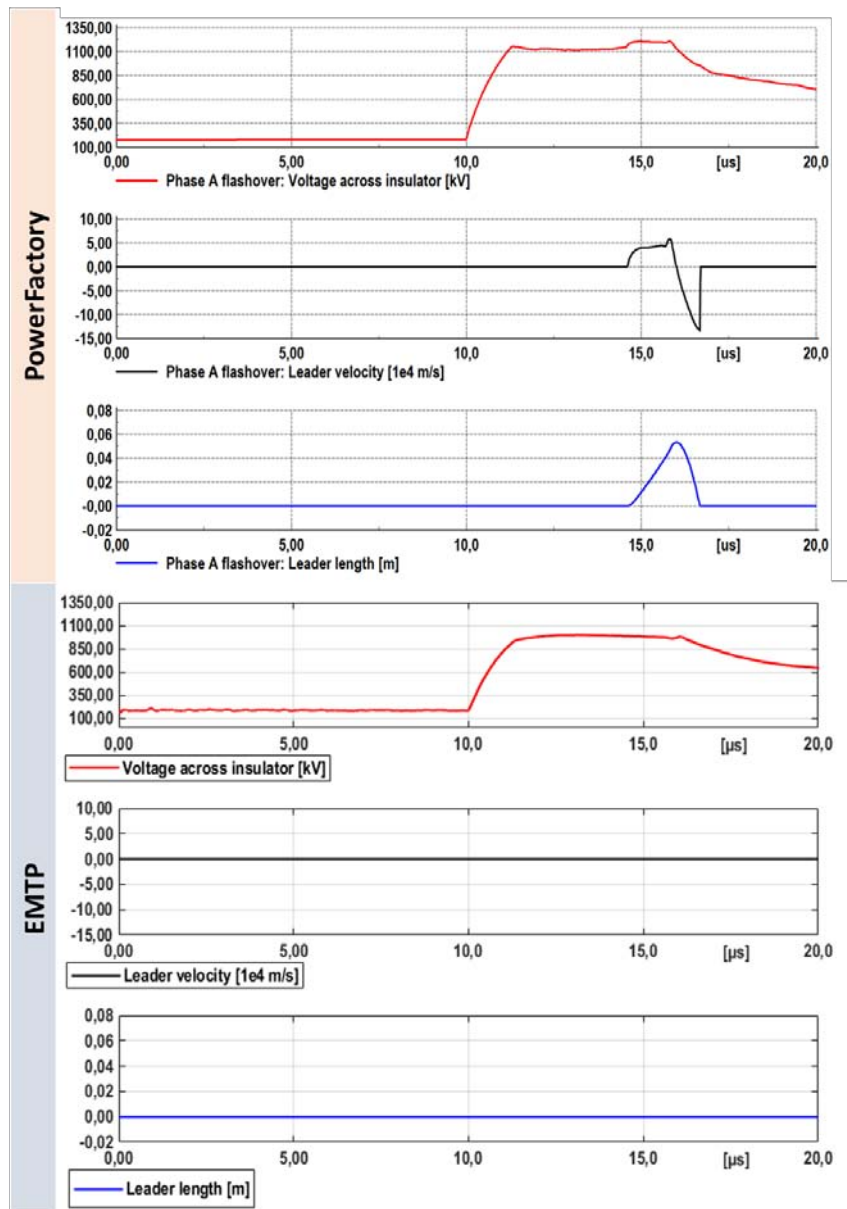


Figura 5.19: Fenomeno di formazione del leader in a) PowerFactory e b) EMTP.

propagazione dell'onda viaggiante lungo il conduttore di fase A verso la derivazione, fino a raggiungere lo scaricatore posto a protezione del trasformatore dell'Utente A.

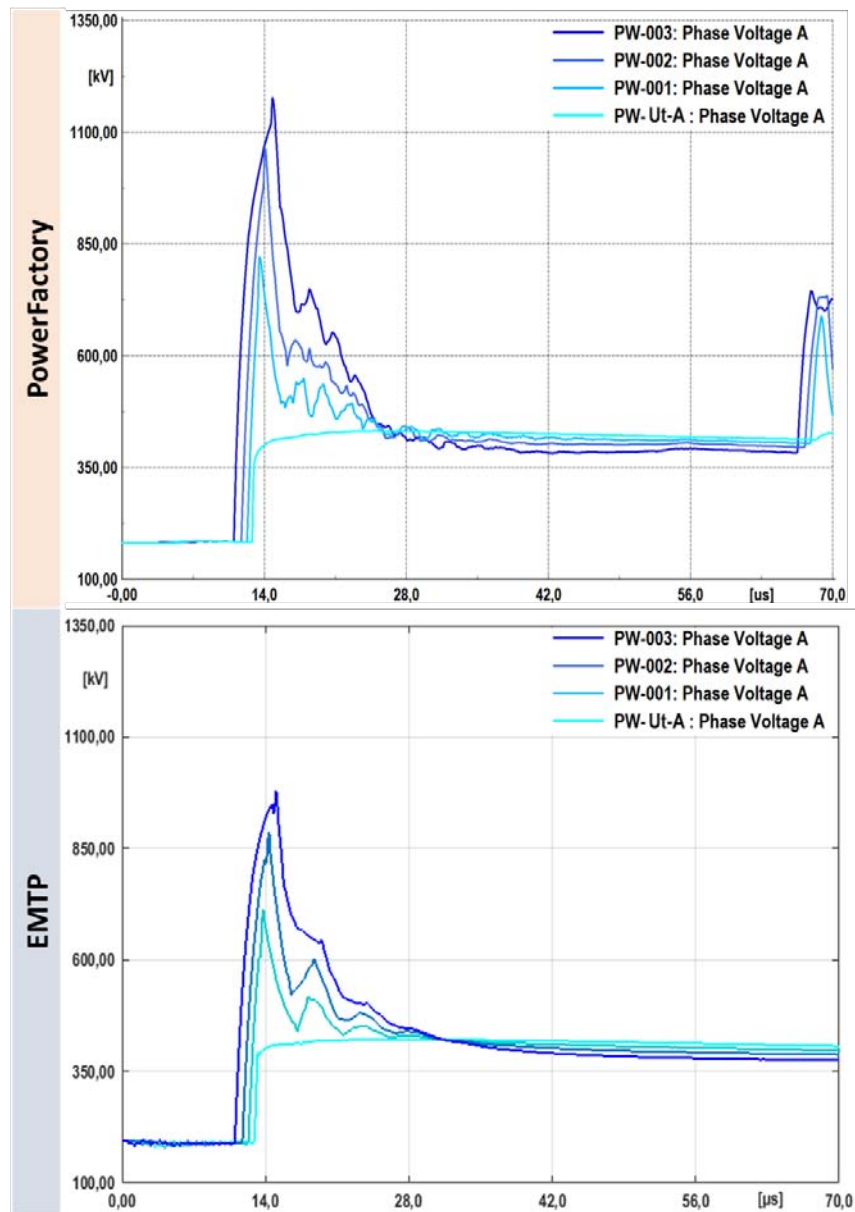


Figura 5.20: Propagazione dell'onda di tensione in a) PowerFactory e b) EMTP.

Visti i valori di sovratensione molto minori raggiunti in EMTP, è stata aumentata la corrente di fulmine fino al momento in cui si è verificato il cedimento dell'isolamento. Il picco di corrente che ha portato all'evento di scarica diretta lungo la catena collegata alla fase A (figura 5.21) è stato di 9,3 kA.

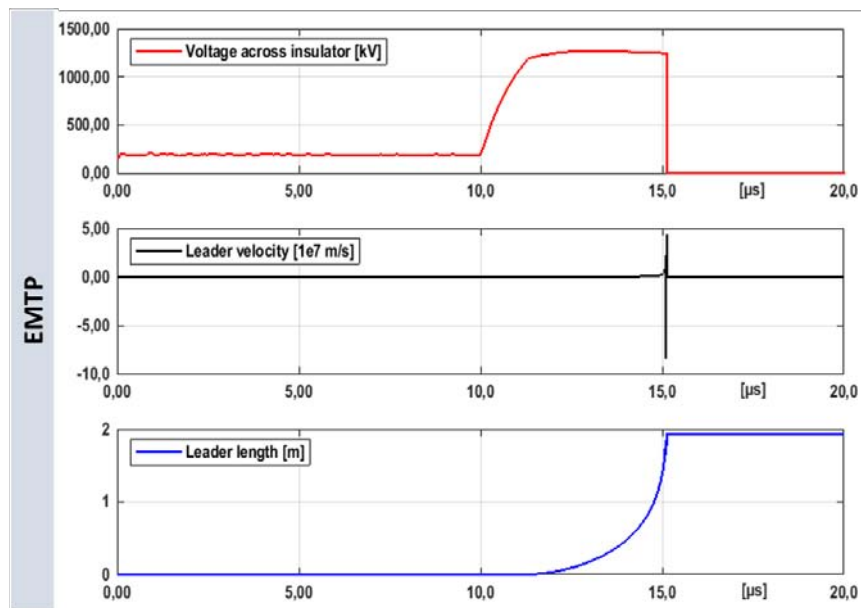


Figura 5.21: Fenomeno di scarica diretta in EMTP con fulminazione di 9,3 kA.

5.4.3 Caso 2: inserimento degli OMP

Con l'aggiunta degli organi di manovra sui sostegni P56 e P57, le forme d'onda cambiano rispetto al caso precedente e, inoltre, si nota una sostanziale differenza in PowerFactory e EMTP (figura 5.22): infatti, nel primo si assiste ad una scarica diretta lungo la catena di isolatori connessa alla fase A, come riporta la figura 5.23.

Ciò si spiega notando che, ancora una volta, i valori massimi di tensione sono molto maggiori in PowerFactory.

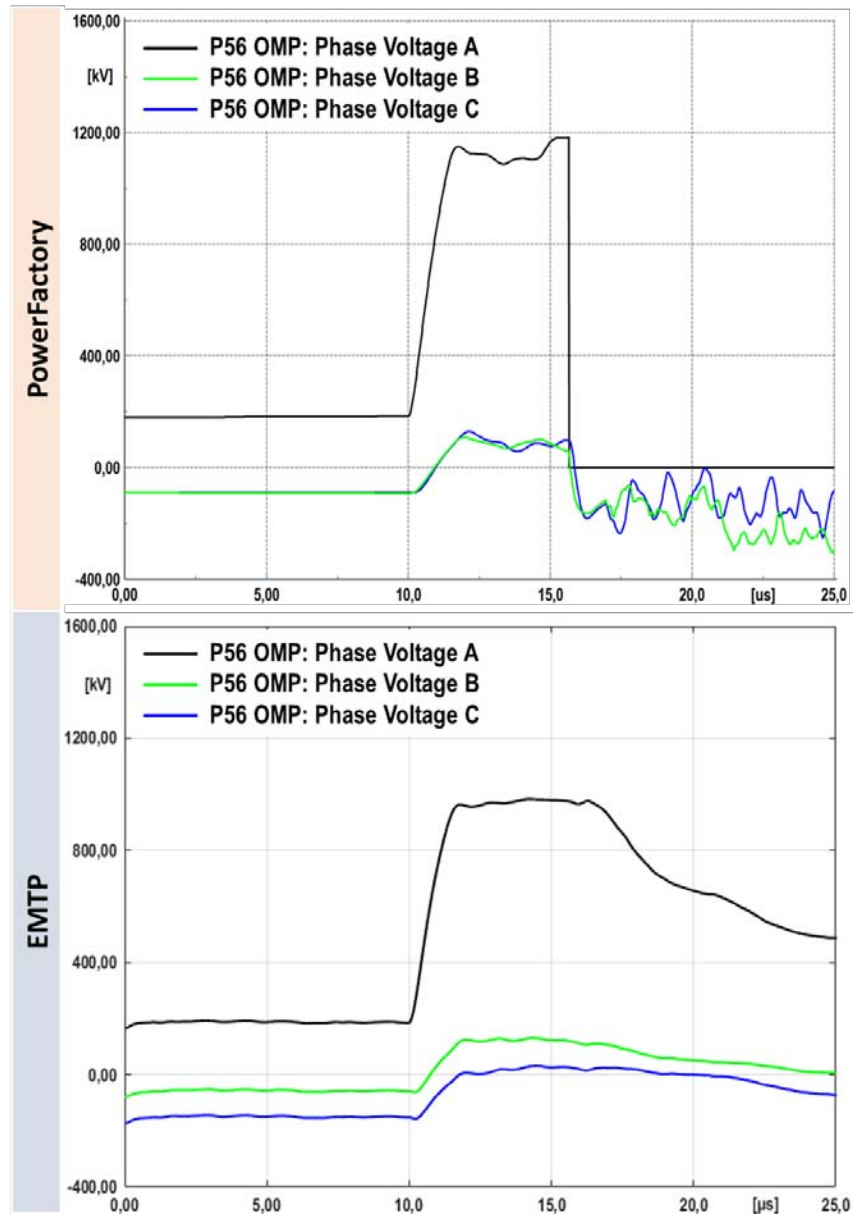


Figura 5.22: Sovratensioni in corrispondenza del palo P56 in a) PowerFactory e b) EMTP.

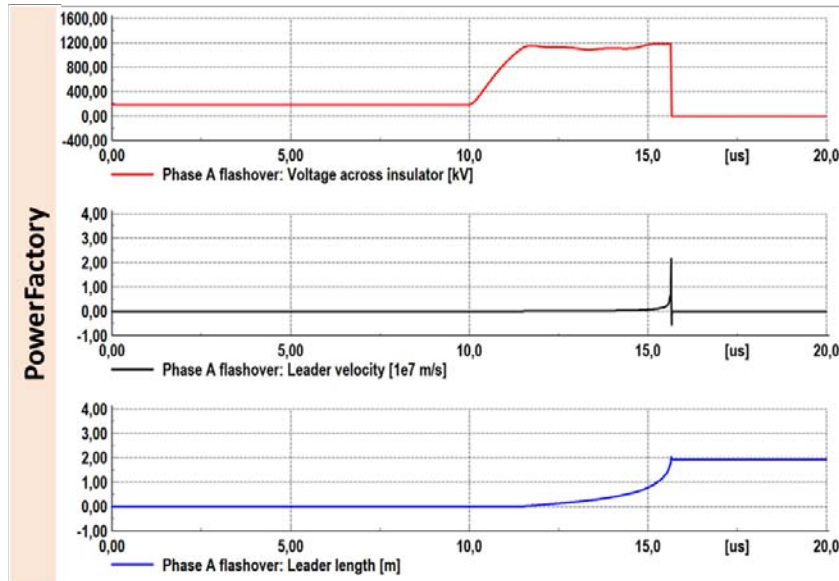


Figura 5.23: Processo di formazione del leader e conseguente scarica in PowerFactory.

5.4.4 Caso 3: inserimento degli scaricatori di sovratensione

Si analizza infine il caso reale, tenendo conto della presenza degli scaricatori di sovratensione, connessi tra fase e sostegno, a monte e a valle dell'OMP. Grazie a questi, come mostra la figura 5.24, le tensioni massime sono molto minori (33% in meno in PowerFactory), consentendo una protezione totale all'organo di manovra.

Con la stessa logica di 5.3.4, il varistore della fase A interviene a protezione dell'OMP assumendo un comportamento da corto circuito, drenando la corrente mostrata in figura 5.25. Dalla (5.2), integrando la corrente che passa attraverso il varistore, è possibile stimare la carica trasferita, che risulta essere pari a 0,0886 C. Per quanto riguarda invece l'energia assorbita, è sufficiente integrare nel tempo la potenza (figura 5.26), ottenendo così 33,951 kJ. Entrambe le grandezze calcolate sono perfettamente sostenibili dal varistore. Per sapere con che probabilità un evento di fulminazione del conduttore può verificarsi, è necessario stimare:

- * N_l , numero di fulmini che impattano nelle campate afferenti ai sostegni P56 e P57; dalla (5.4) risulta un numero pari a 0,152 fulminazioni/anno.
- * SFR , tasso di *shielding failure*, che è data dalla seguente formula, simile a quella già spiegata in 2.5.2:

$$SFR = 2N_g L_1 \int_{I_{3\ kA}}^{I_{7\ kA}} D_{cf}(I) dI \quad (5.6)$$

da cui risulta un SFR pari a 0,117.

Pertanto, si possono verificare 0,0178 fulmini/anno direttamente sul conduttore di fase.

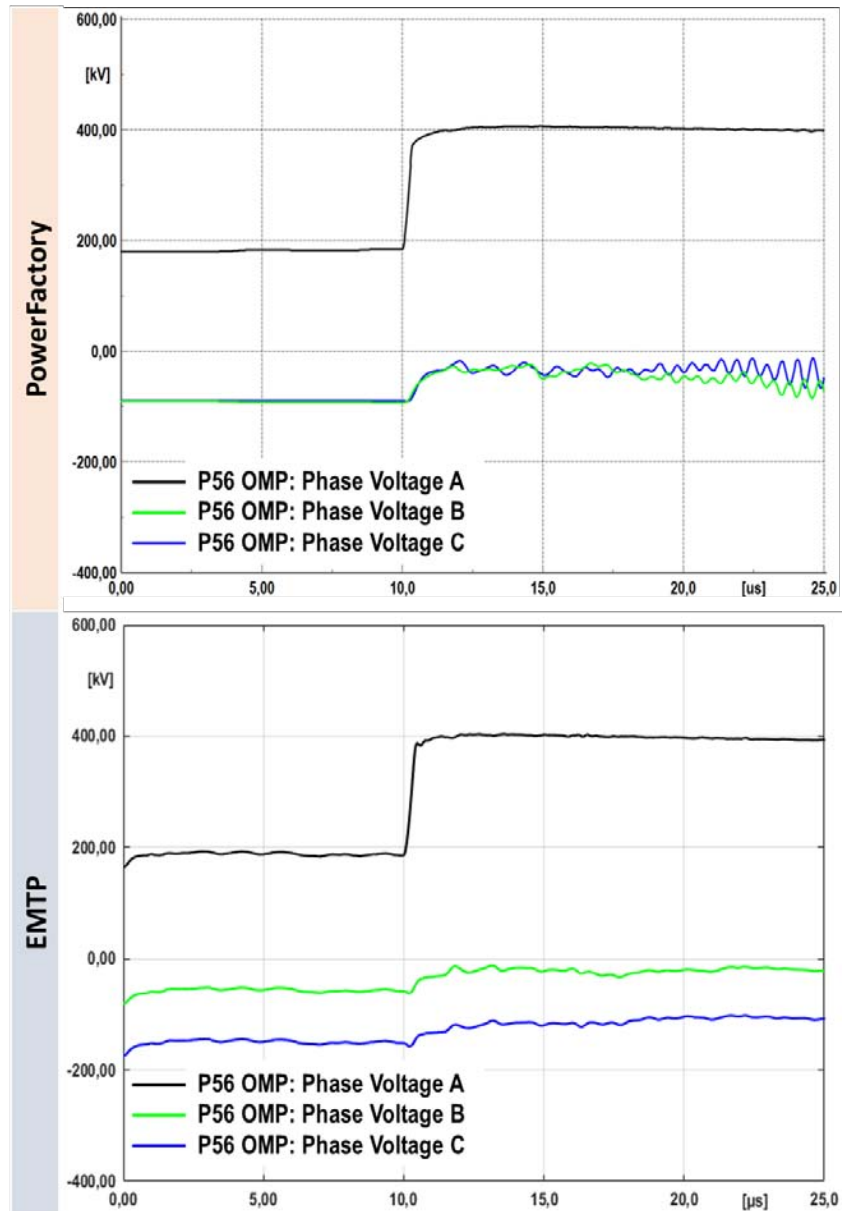


Figura 5.24: Sovratensioni in corrispondenza del palo P56 dotato di scaricatori in a) PowerFactory e b) EMTP.

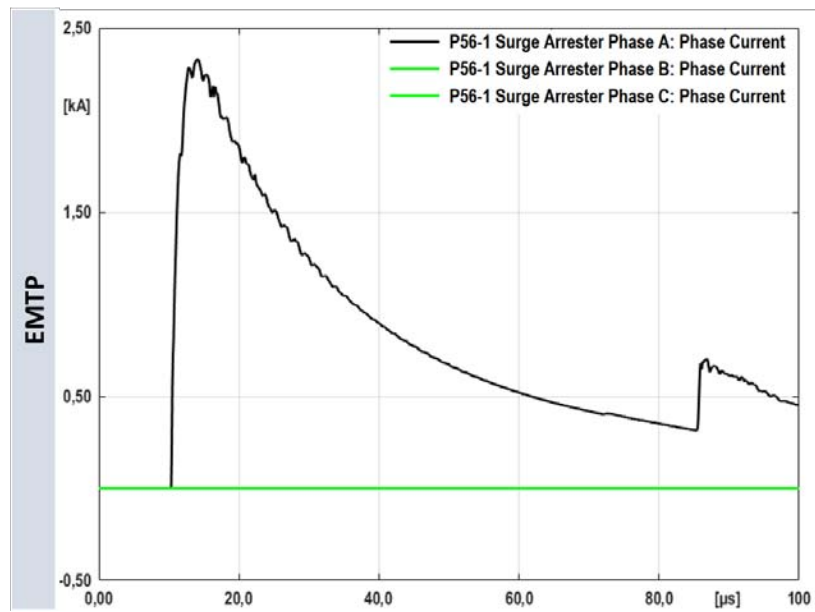


Figura 5.25: Correnti che attraversano gli scaricatori di sovratensione in EMTP.

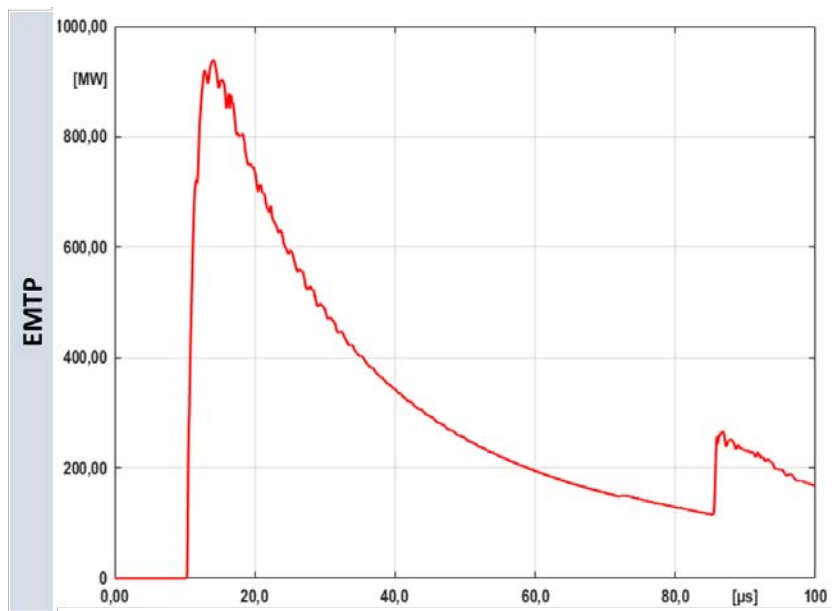


Figura 5.26: Potenza assorbita dal varistore connesso alla fase A in EMTP.

Tabella 5.3: Confronto dei risultati nei due software.

Valori massimi riscontrati			
		PowerFactory	EMTP
Caso 1	v_{P56}	1216,4 kV	1011,0 kV
Caso 2	v_{P56}	1192,3 kV	993,3kV
	v_{OMP}	1181,7 kV	983,2 kV
Caso 3	v_{P56}	384,5 kV	439,1 kV
	v_{OMP}	409,2 kV	403,8 kV
	i_{SA}	2,7 kA	2,3 kA

5.4.5 Confronto dei risultati

Per avere un'idea più chiara dei massimi valori di tensione che possono sollecitare il sistema nel caso di fulminazione diretta del conduttore di fase posto ad altezza maggiore, con onda $3/70 \mu s$ di picco 7 kA, si riportano i dati più significativi ottenuti nei due ambienti di simulazione in tabella 5.3. Rispetto al caso precedente, i risultati qui mostrati mostrano differenze significative: le sovratensioni massime registrate differiscono quasi del 20% nei primi due casi analizzati.

Tabella 5.4: Configurazioni di rete.

Configurazioni analizzate				
Configurazione	Stazione 2	P57	P56	Stazione 1
<i>a</i>	o	c	c	c
<i>b</i>	c	o	c	c
<i>c</i>	c	c	o	c
<i>d</i>	c	c	c	o

5.5 Fulminazioni dirette in diverse configurazioni di rete

Seppur molto rara, c'è la possibilità che la fulminazione avvenga in diverse configurazioni di rete, dovute a manutenzioni, guasti o altro. Fortunatamente, anche in questi casi gli scaricatori di sovratensione intervengono a protezione degli organi di manovra, limitando le tensioni massime a valori inferiori ai 450 kV. Di seguito si riportano i risultati di alcune simulazioni condotte in EMTP, in cui lo stato degli interruttori, *o* di *open* oppure *c* di *closed*, è quello riportato in tabella 5.4.

Con riferimento alle configurazioni di rete proposte, si riportano in tabella 5.5 i valori massimi di tensione ai capi dell'OMP e di corrente attraverso gli scaricatori di sovratensione.

Tabella 5.5: Valori massimi delle grandezze di interesse.

Risultati nelle varie configurazioni di rete		
Evento di fulminazione	v_{OMP} [kV]	i_{SA} [kA]
<i>Configurazione a</i>		
Sostegno	388,3	1,2
Conduttore	404,1	2,3
<i>Configurazione b</i>		
Sostegno	381,9	0,8
Conduttore	405,6	2,5
<i>Configurazione c</i>		
Sostegno	391,4	1,3
Conduttore	430,6	5,0
<i>Configurazione d</i>		
Sostegno	388,6	1,2
Conduttore	404,1	2,3

Il caso peggiore in termini di sovratensione e corrente corrisponde alla fulminazione del conduttore della fase A nella configurazione *c*, ovvero con gli interruttori dell'OMP situato in P56 aperti. Risulta interessante vedere che, ancora una volta, lo scaricatore di sovratensione interviene a protezione dell'organo senza alcun danneggiamento. Infatti, ricavando la carica trasferita e la potenza assorbita da quest'ultimo (figura 5.27) risultano 0,1391 C e 55,420 kJ, perfettamente sopportabili dal varistore.

5.5. FULMINAZIONI DIRETTE IN DIVERSE CONFIGURAZIONI DI RETE93

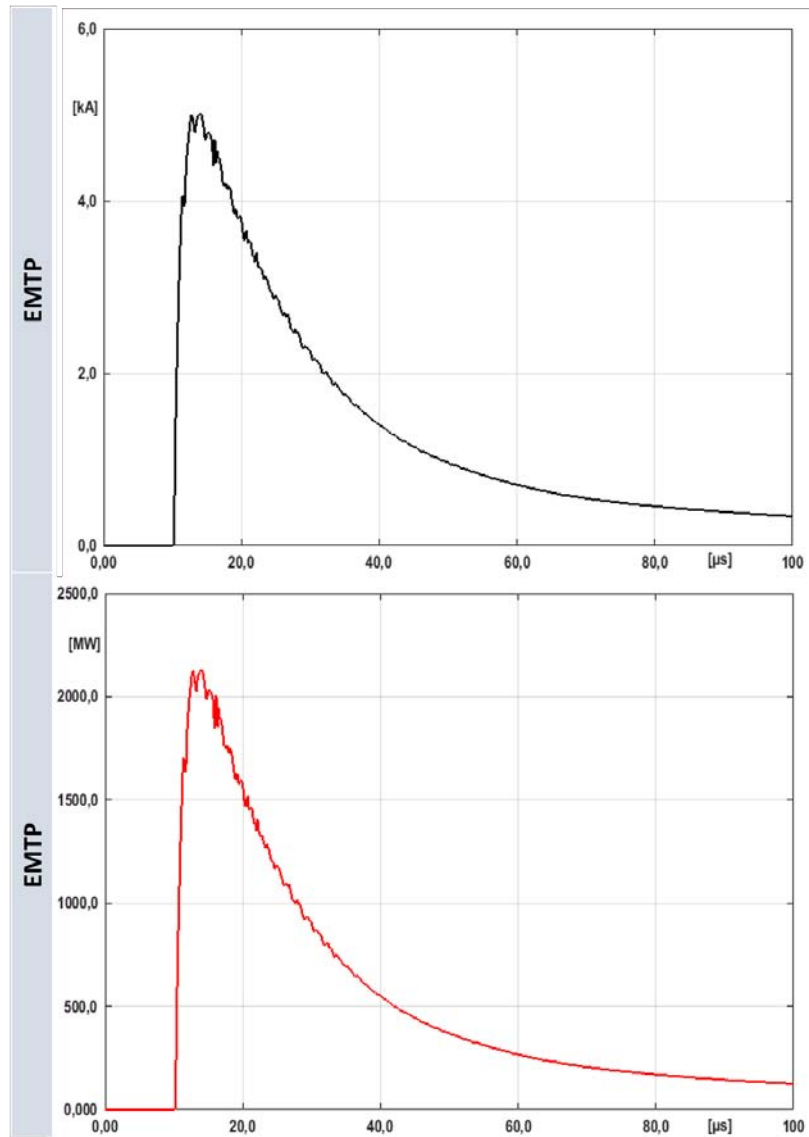


Figura 5.27: Corrente e potenza dello scaricatore nel caso peggiore in EMTP.

Capitolo 6

Simulazioni di sovratensione di origine interna

Per quanto concerne le sovratensioni causate dagli organi di manovra, il trattato si limita a proporre una metodologia di analisi del problema. Infatti, come riportato in 3.3, servirebbe un numero troppo elevato di simulazioni al fine di poter riportare risultati statisticamente significativi. Pertanto, in un primo approccio, sono state effettuate 20 simulazioni nel software EMTP¹ per ogni tipologia di evento di interesse, ovvero energizzazione, richiusura monofase e richiusura trifase.

6.1 Ipotesi di base

Il metodo qui proposto consiste nell'analizzare un numero finito di simulazioni, in cui variano in maniera statistica i tempi di manovra degli interruttori che si trovano all'interno dell'OMP installato sul sostegno P56. Infatti, poiché le sovratensioni di origine interna dipendono principalmente dalle condizioni del sistema negli istanti immediatamente precedenti alle manovre, conviene analizzare il maggior numero di situazioni che si possono verificare in maniera casuale. I dati statistici per le manovre degli interruttori possono avere distribuzioni normali, usate per il contatto principale che solitamente coincide con la fase A, o distribuzioni gaussiane, usate principalmente per le fasi B e C (figura 6.1). La deviazione standard per le due tipologie di distribuzione dipende dalla frequenza nominale f ed è data da [35]:

* distribuzione normale:

$$\sigma_n = \frac{1}{2\sqrt{3}f} \quad (6.1)$$

* distribuzione gaussiana:

$$\sigma_g = \frac{1}{12f} \quad (6.2)$$

In base ai risultati ottenuti, dipendenti dalla aleatorietà del sistema, è possibile ottenere distribuzioni di probabilità dei valori massimi di tensione che si possono presentare ai capi degli organi di manovra.

¹PowerFactory ha dimostrato instabilità numeriche durante le simulazioni statistiche.

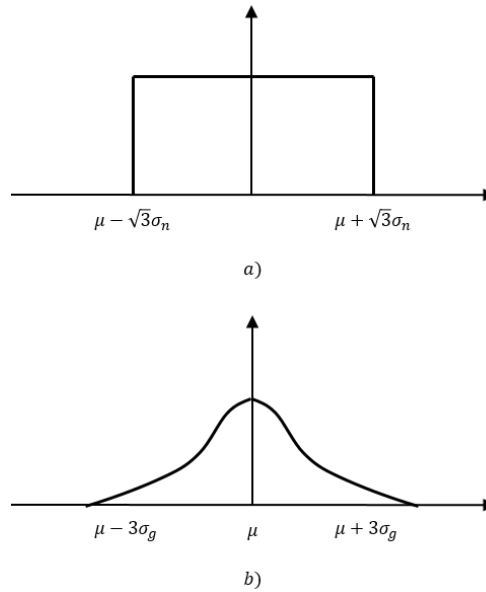


Figura 6.1: Distribuzione (a) normale e (b) gaussiana.

Il modello della rete è lo stesso utilizzato per l'analisi delle sovratensioni di origine esterna viste nel capitolo precedente. L'unica differenza consiste nella scelta dello step di calcolo e dell'intervallo di tempo di interesse, variabili con il tipo di evento in esame.

6.2 Energizzazione

Il primo evento analizzato è l'energizzazione: considerando la tratta P56 - Stazione 1 scollegata dalla sottostazione stessa, si vuole energizzare questo tratto di linea chiudendo gli interruttori dell'OMP posto sul sostegno P56. Di questi, l'interruttore della fase A è considerato il principale, detto *master*, avente una deviazione standard calcolata secondo la (6.1) di 5,7 ms, in un tempo medio di chiusura di 50 ms. Per quanto riguarda invece le fasi B e C, gli interruttori *slave* hanno deviazione standard di 1,7 ms calcolata dalla (6.2), su un ritardo di tempo rispetto alla fase A di 2 ms². Sono state eseguite così 20 simulazioni, con step di calcolo di 70 ns e intervallo di tempo di 100 ms. Il tempo totale impiegato da EMTP per quest'analisi statistica è stato di 2,8 ore.

6.2.1 Risultati delle simulazioni

I grafici 6.2 e 6.3 mostrano rispettivamente i tempi in cui hanno agito i tre interruttori delle tre fasi e i valori massimi ai capi dell'OMP per ciascuna delle 20 simulazioni.

Poiché tali grafici sono poco intuitivi, si preferisce riportare la distribuzione cumulata delle sovratensioni massime che si possono verificare per ciascuna delle tre fasi (figura 6.4). Inoltre, si riportano in tabella 6.1 i valori massimi per ciascuna

²Ritardo di chiusura dei poli.

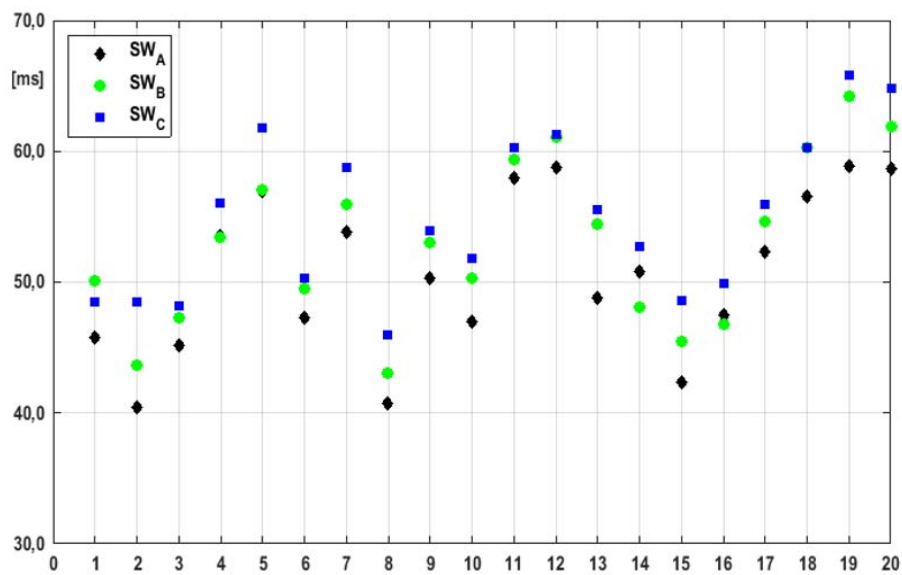


Figura 6.2: Tempi di chiusura degli interruttori dell'OMP del sostegno P56 per ogni simulazione.

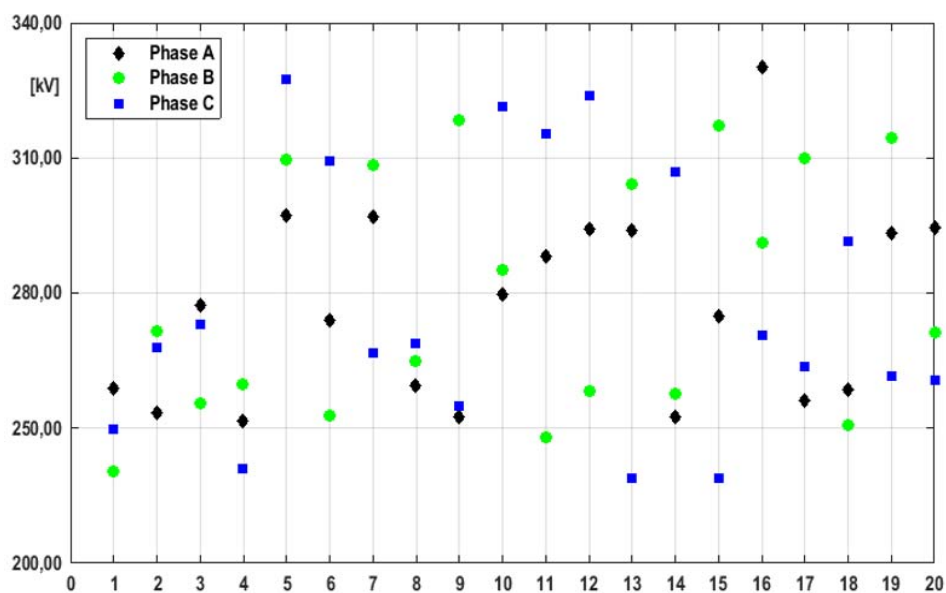


Figura 6.3: Valori massimi di tensione ai capi dell'OMP del sostegno P56 per ogni simulazione.

Tabella 6.1: Risultati energizzazione.

Fase	v_{max}	v_{max}	μ	σ_s
OMP	[p.u.]	[kV]	[kV]	[kV]
A	1,50	330,16	276,86	21,44
B	1,45	318,42	279,50	27,07
C	1,49	327,39	277,57	29,67

fase in p.u., il valore medio μ e la deviazione standard σ_s . Come si può notare, in nessuna delle 20 simulazioni effettuate si supera l'1,5 p.u. e almeno nel 60% dei casi la sovratensione rimane sotto i 290 kV (1,3 p.u.).

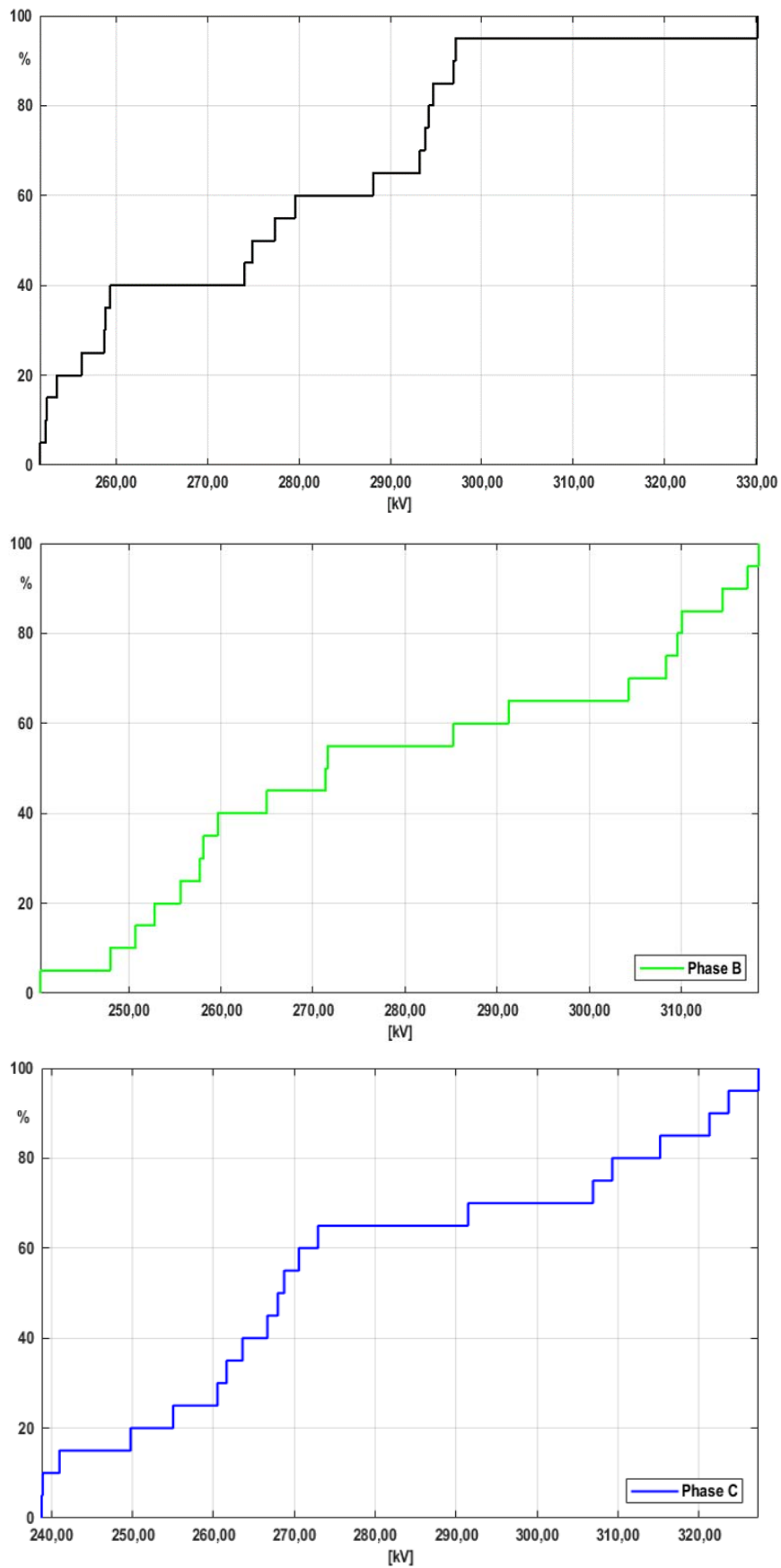


Figura 6.4: Distribuzioni cumulate delle tensioni ai capi dell'OMP.

6.3 Richiusura monofase

In seguito ad un guasto monofase, la procedura seguita dal sistema di protezione è quella riportata in figura 6.5. L'individuazione del guasto e il comando dell'apertura dell'interruttore collegato alla fase interessata impiegano circa 75 ms; a questo punto l'interruttore è aperto e vi è un tempo d'attesa per la richiusura rapida di 1 s: questo è l'intervallo ritenuto sufficiente affinché avvenga l'estinzione del canale ionizzato e l'aria riacquisti le sue proprietà isolanti. Trascorso questo arco di tempo, l'interruttore viene comandato in chiusura e rimane chiuso nel caso di guasto temporaneo. Se invece il guasto risulta essere permanente, si comanda l'apertura trifase e, dopo un intervallo di 60 s, avviene l'ultimo tentativo di richiusura rapida: se il guasto è ancora presente, viene comandata l'apertura trifase definitiva. Dato il costo computazionale che una simulazione completa richiederebbe, inizialmente è stato considerato solo il caso di guasto temporaneo, riguardante solamente due manovre dell'interruttore, una di apertura e una di chiusura monofase, valutando le sovratensioni massime che possono presentarsi in tale situazione. Inoltre, per accorciare ulteriormente l'intervallo di tempo simulato, non è stata rispettata l'attesa di 1 s tra l'apertura e la richiusura rapida monofase: infatti, essendo questo un tempo "fisicamente necessario" per l'estinzione del canale ionizzato che non è considerato nel modello qui proposto, è sufficiente attendere il tempo di estinzione del transitorio, che si può considerare di circa 30 ms (figura 6.6).

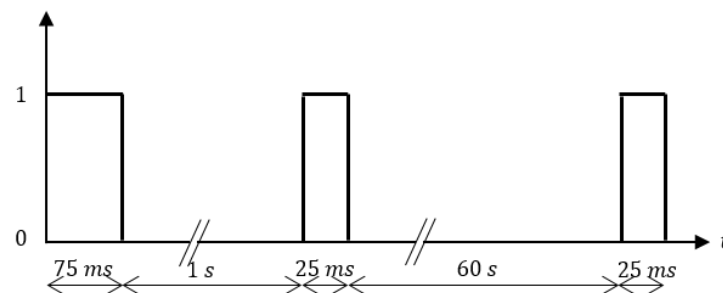


Figura 6.5: Procedura di richiusura rapida in seguito a guasto monofase.

In questa simulazione, l'interruttore *master* è quello che provoca il guasto della fase A verso terra, caratterizzato da distribuzione normale; da esso dipende lo switch della fase A, *slave*, che interviene dopo 75 ms con una deviazione standard gaussiana di 1,7 ms. Infine, dopo aver estinto il guasto perché temporaneo, l'interruttore richiude dopo un'attesa di 50 ms. Anche in questo caso sono state analizzate 20 simulazioni, con passo 70 ns per un intervallo di tempo di 200 ms. EMTP ha impiegato 8,3 ore per quest'analisi statistica.

6.3.1 Risultati delle simulazioni

In seguito si riportano le distribuzioni cumulate delle sovratensioni calcolate per ciascuna fase ai capi dell'organo di manovra (figura 6.7); inoltre, la tabella 6.2 riporta i valori massimi in p.u., i valori medi e le deviazioni standard. Rispetto al caso precedente di energizzazione, si riscontra un picco leggermente superiore (2% in più), ma i valori medi calcolati sono inferiori.

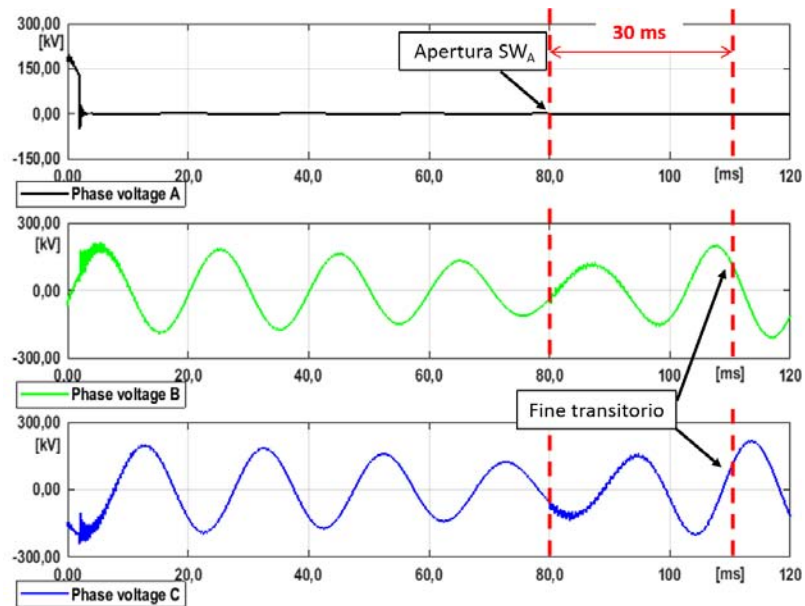


Figura 6.6: Estinzione del transitorio in seguito all'apertura dell'interruttore.

Tabella 6.2: Risultati richiusura monofase.

Fase OMP	v_{max} [p.u.]	v_{max} [kV]	μ [kV]	σ_s [kV]
A	1,53	336,76	265,89	23,58
B	1,08	236,69	224,94	52,31
C	1,36	298,79	234,92	18,40

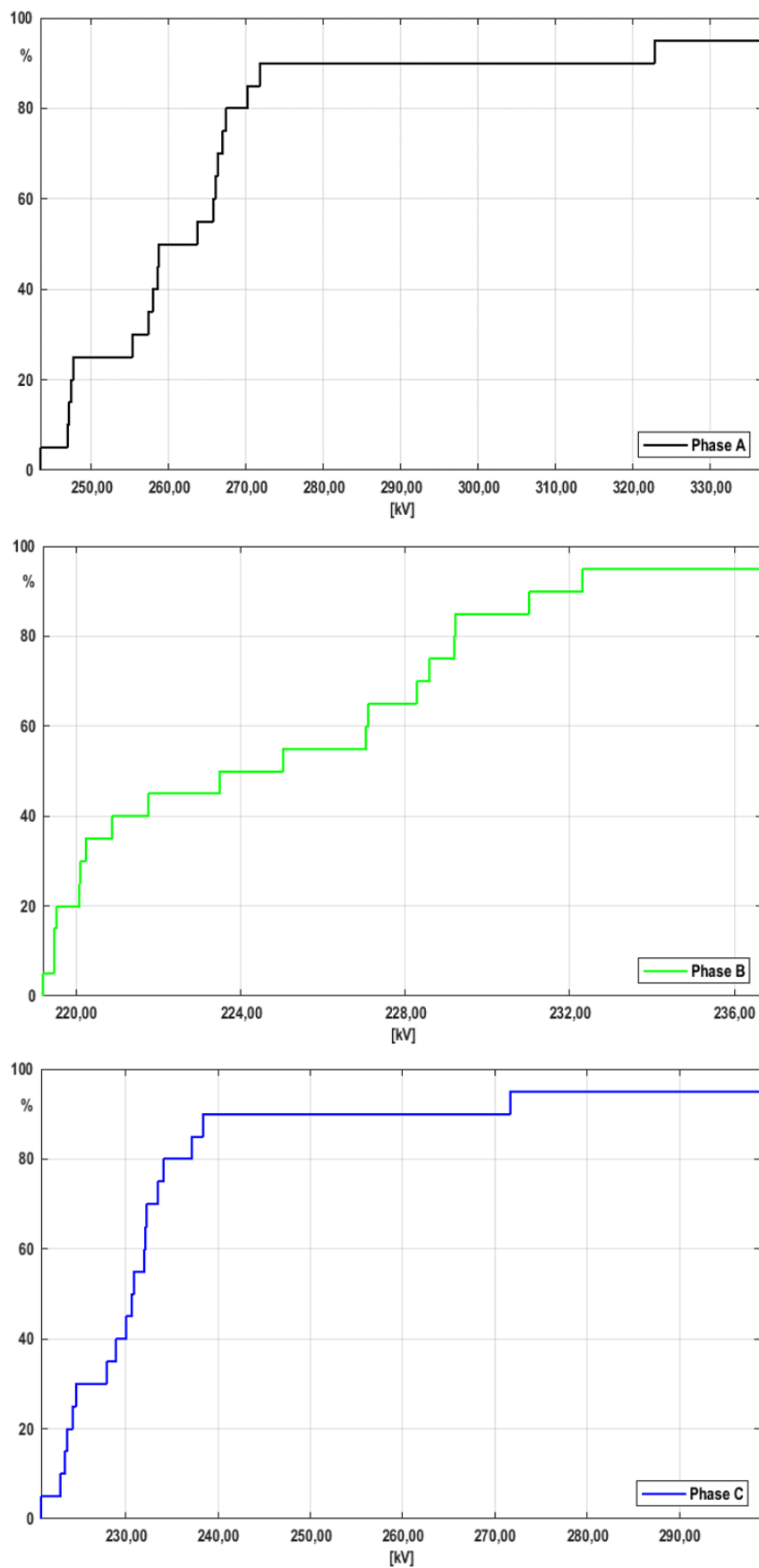


Figura 6.7: Distribuzioni cumulate delle tensioni ai capi dell'OMP.

Tabella 6.3: Risultati richiusura monofase su guasto permanente.

Fase	v_{max}	v_{max}	μ	σ_s
OMP	[p.u.]	[kV]	[kV]	[kV]
A	1,59	348,88	339,25	12,34
B	1,17	258,44	246,30	57,98
C	1,26	277,65	267,81	6,41

6.3.2 Richiusura monofase su guasto permanente

Nel caso in cui il guasto non è temporaneo, bensì permanente, in seguito alla richiusura dell'interruttore della fase A, si comanda immediatamente l'apertura trifase. In questo caso, le sovratensioni massime registrate nell'arco delle 20 simulazioni ai capi delle fasi dell'OMP sono risultate leggermente superiori al caso precedentemente esaminato, come riporta la tabella 6.3. Rispetto al caso di guasto temporaneo, si nota una notevole differenza nel valore medio della fase A: esso risulta qui essere superiore del 28% circa.

6.4 Richiusura trifase

In seguito ad un guasto polifase, il sistema di protezione segue la procedura riportata in figura 6.8. Il procedimento risulta essere equivalente a quello per un guasto monofase, con due sole differenze: tutte le manovre sono trifase e il tempo di attesa affinché l'aria riacquisti le proprietà dielettriche è 300 ms anziché 1 s.

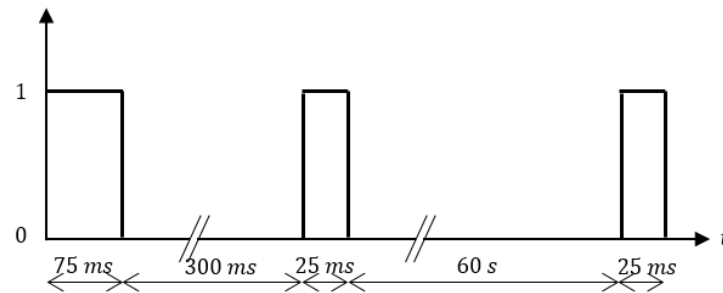


Figura 6.8: Procedura di richiusura rapida in seguito a guasto polifase.

Come nel caso precedente, per limitare il costo computazionale delle simulazioni statistiche vengono considerate inizialmente le sole fasi di apertura e richiusura trifase successive al guasto, con un tempo d'attesa intermedio inferiore ai 300 ms sopracitati. Infatti, come mostra la figura 6.9, il transitorio che segue l'apertura trifase si estingue in poche decine di ms. Anche in questa simulazione, l'interruttore *master* è quello che provoca il guasto bifase nella campata tra P56 e P55. Dopo 75 ms, secondo una distribuzione gaussiana, l'interruttore dell'OMP apre in modalità trifase, con una variabilità tra i poli di 2 ms. Gli switch richiudono dopo un'attesa di 50 ms e rimangono chiusi perché il guasto è estinto. Con passo 70 ns, intervallo di tempo di 200 ms per un totale di 20 simulazioni, EMTP ha impiegato 8,3 ore.

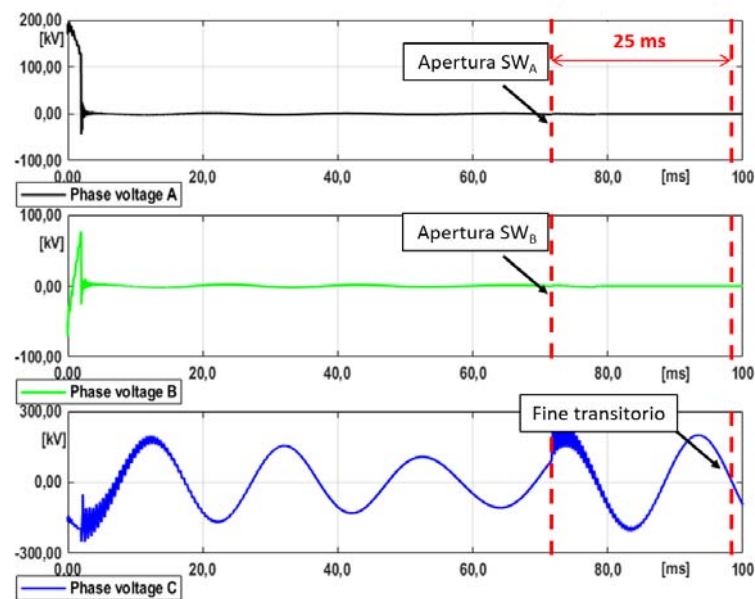


Figura 6.9: Estinzione del transitorio in seguito all'apertura dell'interruttore trifase.

Tabella 6.4: Risultati richiusura trifase.

Fase OMP	v_{max} [p.u.]	v_{max} [kV]	μ [kV]	σ_s [kV]
A	1,57	345,78	332,64	64,77
B	1,58	346,56	331,30	18,38
C	1,53	337,65	320,13	12,09

Tabella 6.5: Risultati richiusura trifase su guasto permanente.

Fase OMP	v_{max} [p.u.]	v_{max} [kV]	μ [kV]	σ_s [kV]
A	1,59	349,28	338,91	5,38
B	1,57	345,40	341,65	4,07
C	1,53	337,65	322,07	13,81

6.4.1 Risultati delle simulazioni

Le distribuzioni cumulate delle sovratensioni e i loro valori massimi, nonché i valori medi e le deviazioni standard per le tre fasi sono mostrati rispettivamente in figura 6.10 e tabella 6.4. Rispetto ai casi di energizzazione e richiusura rapida monofase, qui si ritrovano valori massimi superiori (come ci si aspettava da 3.2.2). Tuttavia, si può affermare che in tutte le simulazioni effettuate non si superano i 350 kV (1,6 p.u.).

6.4.2 Richiusura trifase su guasto permanente

Se il guasto non si è estinto nell'intervallo di tempo di attesa che precede la richiusura, nel momento in cui l'interruttore chiude e rileva ancora la presenza del guasto, ne viene comandata la riapertura. In questo caso, le tensioni massime registrate assumono valori che poco si discostano dai risultati precedentemente ottenuti, come mostra la tabella 6.5. I risultati riscontrati sono molto simili ai valori massimi ottenuti nel caso precedente; solamente i valori medi risultano essere leggermente superiori (fino al 3% in più).

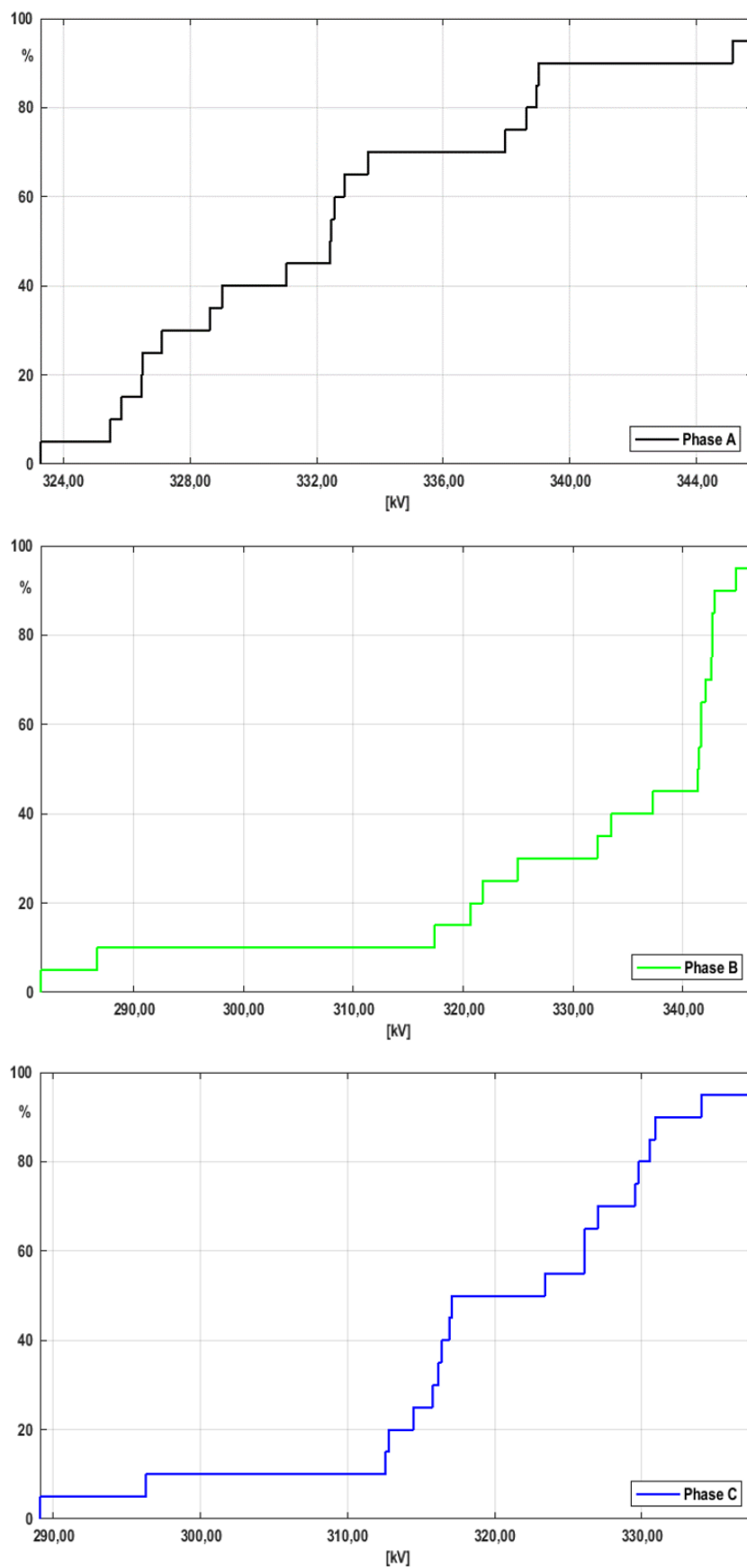


Figura 6.10: Distribuzioni cumulate delle tensioni ai capi dell'OMP.

Conclusioni

L'obiettivo dell'elaborato era quello di analizzare e stimare i transitori elettromagnetici e le sovratensioni massime a cui possono essere soggetti i nuovi OMP, una volta installati sui sostegni P56 e P57 della linea T1.

L'utilizzo di due diversi ambienti, quali DIGSILENT PowerFactory e EMTP-RV, ha consentito di poter confrontare i risultati ottenuti, a fronte di due diversi modelli di rete i cui componenti sono stati rappresentati in ugual modo, laddove possibile.

Per la modellizzazione del sistema elettrico, è stata rilevata l'importanza di caratterizzare la rete a parametri distribuiti, sottolineando la necessità di stimare e rappresentare accuratamente le geometrie e le impedenze di terra dei sostegni.

Per quanto riguarda le prime simulazioni di sovratensioni di origine esterna, ovvero le fulminazioni dirette del sostegno P56, i software hanno dato risultati comparabili in termini sia di forme d'onda che di valori massimi ai capi dell'OMP, con differenze inferiori allo 0,6%. Per quanto riguarda invece le fulminazioni dirette del conduttore di fase, sono state riscontrate le prime differenze non trascurabili tra i due ambienti di calcolo: una possibile motivazione potrebbe essere il diverso passo di calcolo, di fondamentale importanza nell'analisi di transitori molto ripidi. Inoltre, sono stati riscontrati anche i primi problemi di instabilità in PowerFactory, associati sia all'accoppiamento tra conduttori e funi di guardia, sia all'inserimento delle capacità rappresentative degli OMP, le quali hanno compromesso la convergenza delle soluzioni. Tuttavia, per quanto riguarda le tensioni massime ai capi dell'OMP, protetto da scaricatori di sovratensioni, si riscontra una differenza dell'1,5%.

Le simulazioni statistiche di sovratensioni interne sono state condotte solamente in EMTP-RV, perché nuovamente PowerFactory ha mostrato problemi di instabilità e non convergenza nel calcolo della soluzione del problema. In questo caso, lo scopo dell'elaborato era quello di riportare un metodo di indagine per lo studio delle sovratensioni interne, piuttosto che risultati significativi: infatti, il numero estremamente limitato di simulazioni analizzate (20 per ciascun evento di energizzazione, richiusura rapida monofase e trifase) non consente di trarre conclusioni statisticamente considerabili.

Nelle due diverse tipologie di transitori sopra analizzate, i valori delle tensioni massime risultano essere molto diversi, per la diversa causa che le genera. Tuttavia, la presenza degli scaricatori, a monte e a valle di entrambi gli OMP, è di fondamentale importanza perché consente di limitare ogni tipo di sovratensione, sia essa interna od esterna.

Per ulteriori analisi future, si potrebbe rappresentare in maniera più dettagliata il sostegno, sia per quanto riguarda le sue varie parti, tra cui le mensole, sia per l'impedenza di terra. Per quest'ultima, infatti, si potrebbe ricorrere ad una

rappresentazione che ne consideri la dipendenza dalla frequenza. Infine, in merito alle sovratensioni interne, si potrebbe analizzare un numero maggiore di simulazioni, in modo tale da poter dedurre risultati significativi.

Appendice A

Analisi di stabilità

Prima di iniziare lo studio del regime transitorio con l'utilizzo dei due software di calcolo, è stata effettuata una verifica di stabilità, che consiste nel calcolo dell'impedenza in ingresso di un semplice circuito trifase al variare della frequenza (*frequency scan*). Se dall'analisi risulta che l'impedenza in ingresso ha parte reale negativa, questo è un indice di instabilità del circuito elettrico, causa di oscillazioni numeriche indesiderate.

La figura A.1 mostra il circuito analizzato in PowerFactory ed in EMTP: si tratta di un generatore ideale trifase a cui è connessa una linea elettrica avente la geometria riportata.

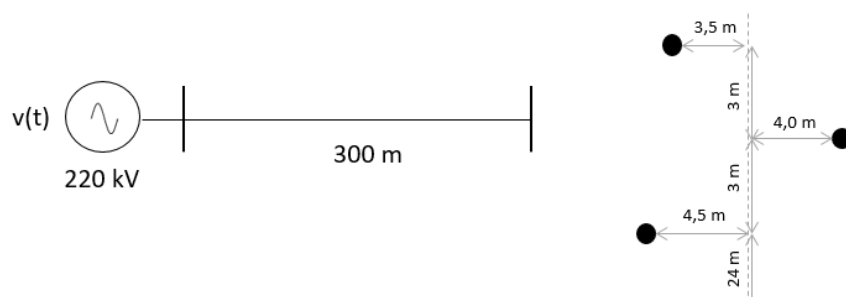


Figura A.1: Circuito per l'analisi di stabilità.

Effettuando l'analisi in frequenza dell'impedenza in ingresso, per un range di frequenze da 1 Hz a 100 kHz con passo di 5 Hz , la parte reale di Z è risultata essere sempre positiva (figura A.2).

Pertanto, entrambi i calcolatori non dovrebbero avere problemi di instabilità e oscillazioni numeriche.

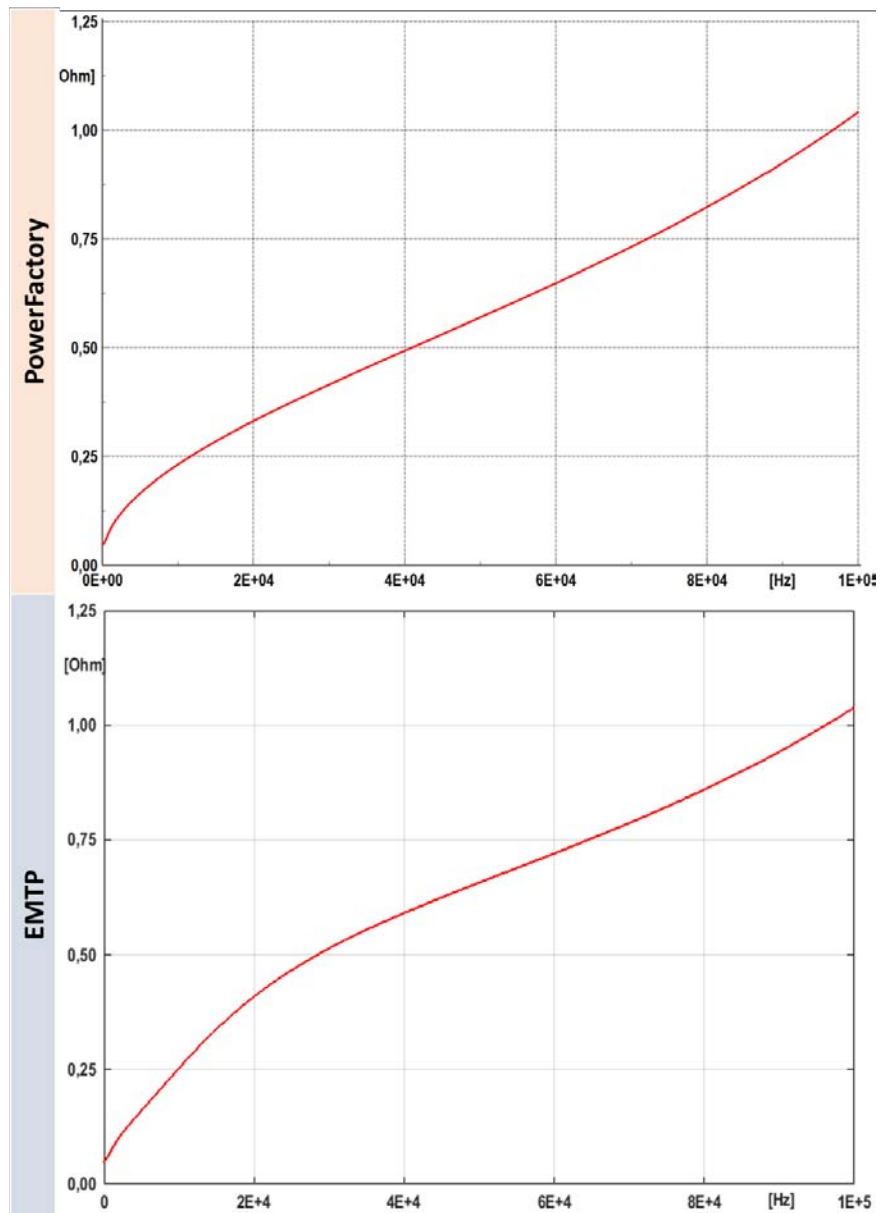


Figura A.2: Parte reale dell'impedenza in ingresso calcolata in (a) PowerFactory e (b) EMTP.

Appendice B

Verifica di risultati analitici in PowerFactory

Una prima verifica è stata effettuata sulle sovratensioni di origine esterna, nel caso di fulminazione diretta di un conduttore di energia. Il sistema in esame è quello riportato in figura B.1.

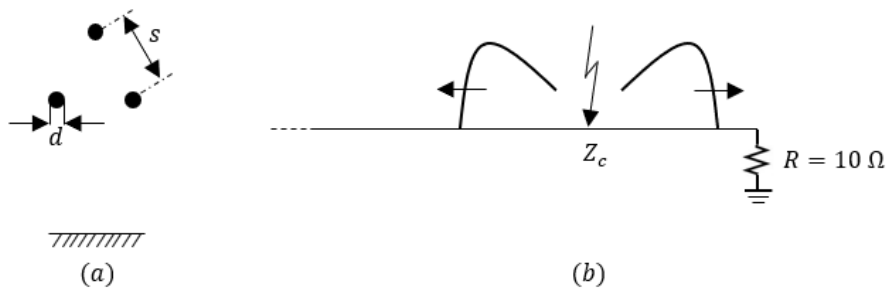


Figura B.1: Fulminazione diretta di un conduttore di fase.

Ipotizzando una distanza lineare tra i conduttori, di diametro 10 mm, pari a 2 m, dalla (1.9) è possibile ricavare il valore dell'impedenza caratteristica della linea, pari a:

$$Z_c = 90 \ln \frac{2s}{d} = 540 \Omega \quad (\text{B.1})$$

Data la presenza di una discontinuità, rappresentata dalla resistenza verso terra, è necessario calcolare i coefficienti di trasmissione e riflessione che governano la propagazione delle onde di tensione e corrente progressive lungo la linea, secondo le (1.14):

$$\rho = \frac{R - Z_c}{R + Z_c} = -0,964 \quad \tau = 1 + \rho = 0,036 \quad (\text{B.2})$$

Poiché si tratta di fulminazione diretta, dalla (2.3) è possibile ricavare il picco dell'onda di sovratensione in funzione del picco della corrente di fulmine, ipotizzato pari a 7 kA:

$$V = \frac{Z_c}{2} \cdot I_f = 1890 \text{ kV} \quad (\text{B.3})$$

Pertanto, l'onda di tensione trasmessa risulta avere un valore di picco di:

$$v_t = V \cdot \tau = 68 \text{ kV} \quad (\text{B.4})$$

Questo risultato ricavato analiticamente è in linea con il picco rilevato dalla simulazione effettuata nel software, come mostra la figura B.2¹. Inoltre, il tempo di propagazione dell'onda lungo la linea è all'incirca coincidente con quanto calcolato²:

$$t = \frac{300 \text{ m}}{300 \text{ m}/\mu\text{s}} = 1 \mu\text{s} \quad (\text{B.5})$$

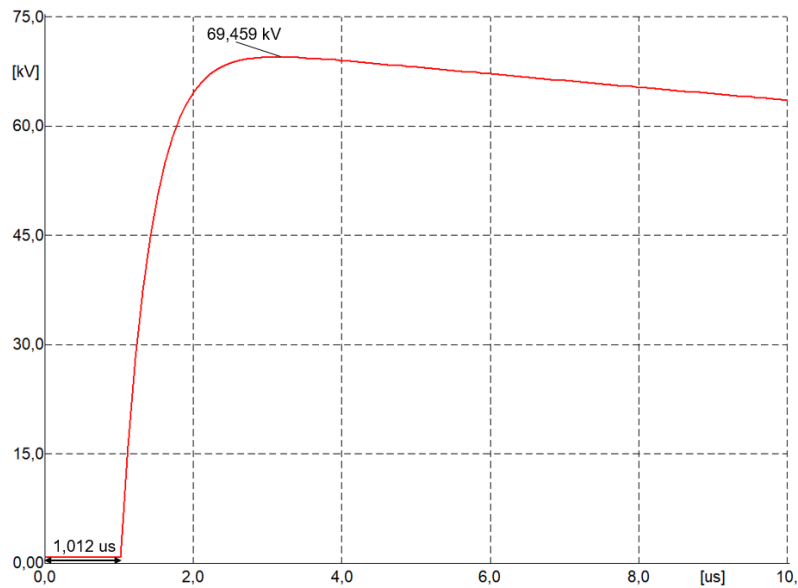


Figura B.2: Propagazione dell'onda di sovratensione nel caso di fulminazione.

Un'ulteriore verifica è stata effettuata per quanto riguarda le sovratensioni di origine interna: in particolare, la simulazione si basa sull'energizzazione della stessa linea elettrica precedentemente considerata (figura B.3).

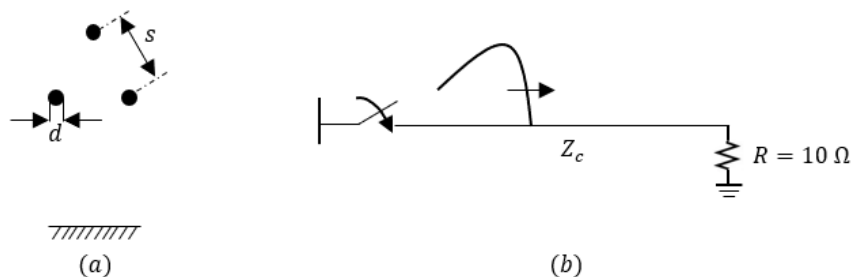


Figura B.3: Energizzazione di una linea elettrica.

¹Errore dell'1% se si considera la tensione iniziale del sistema pari a 0,797 kV.

²Nella realtà la velocità di propagazione è leggermente inferiore a c , pertanto il tempo impiegato risulta maggiore.

Considerando gli stessi valori sopra calcolati di Z_c , ρ e τ , e considerando una tensione di 1 kV_u , risulta:

$$V = 1 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 817 \text{ V} \quad (\text{B.6})$$

$$v_t = V \cdot \tau = 30 \text{ V} \quad (\text{B.7})$$

$$t = \frac{1000 \text{ m}}{300 \text{ m}\mu\text{s}} = 3,33 \mu\text{s} \quad (\text{B.8})$$

Ancora una volta, i risultati ottenuti analiticamente sono in accordo con quanto emerso dalle simulazioni in PowerFactory (figura B.4).

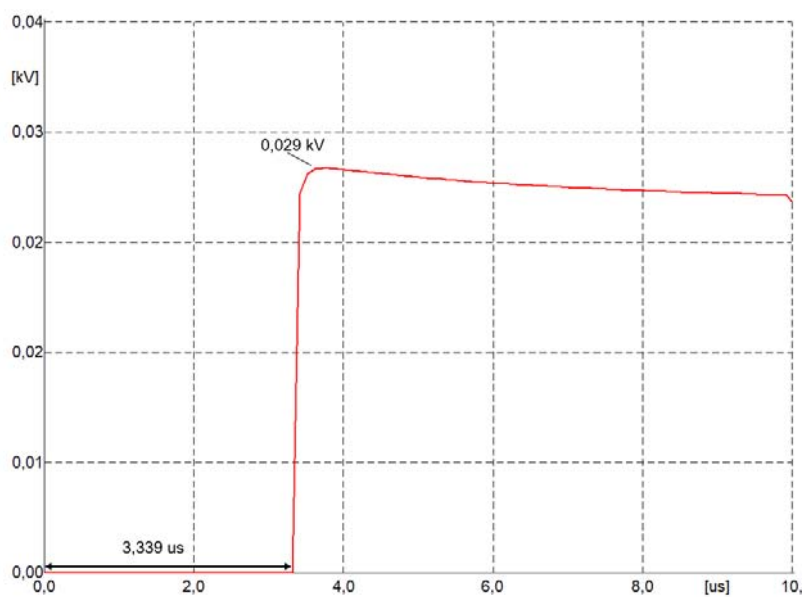


Figura B.4: Propagazione dell'onda di sovratensione nel caso di energizzazione.

Appendice C

Verifica dei parametri distribuiti di linea

Per la verifica dei parametri distribuiti di linea, è stata rappresentata una linea elettrica trifase, avente la conformazione geometrica riportata in figura C.1, nei tre ambienti di calcolo Simulink, PowerFactory ed EMTP.

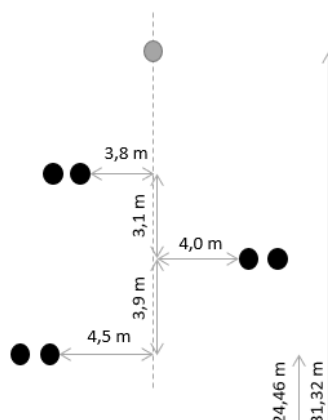


Figura C.1: Disposizione geometrica dei conduttori.

Le caratteristiche geometriche ed elettriche dei conduttori di fase e della fune di guardia sono elencate in tabella C.1.

In tutti e tre gli ambienti di calcolo è stata considerata una resistività del terreno pari a $100 \Omega\text{m}$ e si è tenuto conto dell'effetto pelle; inoltre, le matrici delle impedenze di fase sono state calcolate ad una frequenza di 100 kHz.

Per quanto riguarda il calcolo della resistenza per unità di lunghezza, si veda la

Tabella C.1: Caratteristiche della linea elettrica.

Elemento	N. subconduttori	r_{DC}	ϕ
Conduttore di fase	2	0,158 Ω/km	19,6 mm
Fune di guardia	1	1,084 Ω/km	10,5 mm

Tabella C.2: Matrici delle resistenze.

Resistenza [Ω/km]			
Simulink			
27,2963	26,9343	28,6808	25,4960
	29,4642	29,5372	26,5254
		32,8770	27,8278
			31,0627
PowerFactory			
27,2621	26,9280	28,6900	25,4445
	29,5099	29,5469	26,4522
		32,9241	27,8340
			31,0134
EMTP			
27,264	26,923	28,684	25,445
	29,504	29,541	26,455
		32,917	27,831
			31,017

tabella C.2, che confronta le tre matrici $[4 \times 4]$ simmetriche ottenute¹.

I risultati del calcolo della reattanza e della suscettanza chilometrica sono invece riportati nelle figure C.3 e C.4.

Come si può notare, nel confronto tra i due software di maggior interesse perché utilizzati in questo studio, almeno due cifre significative nel calcolo dei parametri distribuiti di linea coincidono sempre. A sostegno di questo, entrambi si avvalgono del modello proposto da J. Marti per il calcolo dei parametri in funzione della frequenza [36], [37].

¹Si considera la fune di guardia come un quarto conduttore accoppiato.

Tabella C.3: Matrici delle reattanze.

Reattanza [$\cdot 10^2 \Omega/\text{km}$]			
Simulink			
9,0874	2,7310	2,8778	3,6588
	8,9831	2,4750	3,0918
		8,8398	2,4723
			12,4187
PowerFactory			
8,9417	2,7304	2,8788	3,6578
	8,8374	2,4744	3,0923
		8,6938	2,4717
			12,1647
EMTP			
8,9412	2,7311	2,8778	3,6588
	8,8371	2,4750	3,0919
		8,6938	2,4723
			12,224

Tabella C.4: Matrici delle suscettanze.

Suscettanza [$\cdot 10^{-3} \mu\text{S}/\text{km}$]			
Simulink			
6,2812	-1,0250	-1,3130	-1,3038
	6,0304	-0,9744	-0,9449
		6,0903	-0,4930
			4,4029
PowerFactory			
6,2807	-1,0250	-1,3130	-1,3027
	6,0297	-0,9738	-0,9449
		6,0905	-0,4926
			4,4018
EMTP			
6,2787	-1,0266	-1,3139	-1,2958
	6,0290	-0,9750	-0,9391
		6,0898	-0,4899
			4,3759

Appendice D

Confronto dei modelli per le catene di isolatori

Come riportato nel paragrafo 4.3.3 sulla modellizzazione delle catene di isolatori, queste sono state dapprima rappresentate da un modello il cui controllo ne misurava istante per istante la tensione ai capi: nel momento in cui questa superava la tensione di tenuta dell'isolamento, comandava la chiusura istantanea e ideale dell'interruttore, simulando l'avvenimento della scarica. Tale controllo non è però fedele al modello fisico reale: infatti non tiene conto del tempo di innesco del canale di scarica e della sua propagazione. Pertanto, si è passati dal cosiddetto *volt-time curve model* al più realistico *leader progression model*. Quest'ultimo si basa sul seguente controllo:

- * misura della tensione ai capi dell'interruttore in ogni momento;
- * confronto del campo elettrico, considerato uniforme lungo la catena, con il valore del campo elettrico critico;
- * quando il campo elettrico critico viene superato, inizia la formazione del leader: viene quindi calcolata la sua velocità di propagazione secondo la (4.6);
- * integrando la velocità del leader, si determina la sua lunghezza (o spazio percorso): quando questo diventa pari al gap, il controllo comanda la chiusura dell'interruttore.

Per dimostrare la differenza nelle due tipologie di controllo, sono state effettuate in PowerFactory due simulazioni di fulminazioni dirette del conduttore di fase A del palo P56, con un'onda di tensione 1,2/50 μ s di rispettivamente 5 kA e 8 kA. I risultati sono riportati nella tabella D.1.

Analizzando i risultati, si notano delle sostanziali differenze: sebbene l'istante d'innesco del leader coincida con l'istante in cui la tensione supera la tensione di tenuta dell'isolamento, i momenti in cui avviene la scarica sono differenti: infatti, nel LPM la chiusura dell'interruttore è ritardata perché considera il tempo impiegato dal leader per raggiungere l'altra estremità del gap. Ciò influisce molto sull'evoluzione del sistema elettrico, perché quel lasso di tempo permette alla tensione di aumentare, raggiungendo valori di picco che fanno avvenire la scarica in più catene di isolatori. Si conclude quindi dicendo che la scelta del primo modello avrebbe sottostimato le sovratensioni che interessano l'isolamento di linea.

Tabella D.1: Confronto risultati ottenuti con i due modelli di catene di isolatori.

I_{picco}	V-t curve					LPM				
	t_{start} [μ s]	t_{end} [μ s]	Palo	Fase	U_{max} [kV]	t_{start} [μ s]	t_{end} [μ s]	Palo	Fase	U_{max} [kV]
5 kA	3,5	3,5	P000	A	1230	3,5	7,5	P000	A	1480
	3,8	3,8	P001	A	1230	3,8	8,0	P001	A	1480
8 kA	0,4	0,4	P56	A	1230	0,4	4,4	P56	A	1670
			-			1,2	4,9	P55	A	1630
			-			1,9	5,6	P54	A	1630
	2,7	2,7	P53	A	1230	2,7	6,1	P53	A	1650
	3,2	3,2	P000	A	1230	3,2	4,4	P000	A	2180
			-			3,5	4,7	P001	A	2110
			-			4,0	6,7	P002	A	2170

t_{start} : istante d'innesco del leader

t_{end} : istante d'innesco dell'arco

Palo: sostegno coinvolto dalla scarica

Fase: isolatore corrispondente in cui avviene la scarica

U_{max} : massima sovratensione misurata

- : non avviene alcuna scarica

Appendice E

Confronto con valutazione tecnica esterna

In seguito, si riporta un confronto in termini di ipotesi di analisi, modelli e risultati ottenuti da un ente esterno che ha effettuato una valutazione tecnica delle sovratensioni massime che possono colpire l'organo di manovra in caso di fulminazione.

E.1 Ipotesi alla base dei due studi

La tabella E.1 riporta le principali differenze che sono state riscontrate tra il report e lo studio qui presentato. In entrambe le analisi, è stato trascurato l'effetto corona a titolo cautelativo; inoltre, i sostegni sono stati rappresentati come linee monofase a parametri concentrati.

E.2 Elementi della linea

Per quanto riguarda i vari elementi che compongono il sistema considerato, in tabella E.2 si riportano le principali differenze riscontrate nei parametri assunti.

I parametri che non sono stati citati sono stati assunti allo stesso modo in entrambe le analisi.

Tabella E.1: Confronto delle assunzioni di base.

Assunzioni	Report	Tesi
Tratto di linea	P50-P62	P51-P62
Generatori Utente A	✗	✓
Micropalo P004	✓	✗
Impedenza di terra	R costante	$R=R[i(t)]$
Passo di calcolo	1 ns	3 ns

Tabella E.2: Confronto dei parametri di rete assunti.

Parametri	Report	Tesi
Lunghezza del gap	2 m	1,94 m
Configurazione dei sostegni	Costante	Variabile con i dati reali
Trasformatore Utente A	50 MVA	Dato reale

E.3 Modelli di rete

Infine, la tabella E.3 elenca le differenze riguardanti i modelli di rete rappresentati nell'ambiente di simulazione.

E.4 Confronto dei risultati

Sono state simulate due tipologie di fulminazione sul palo P56:

- * *fulminazione diretta del sostegno*: l'impulso ha una forma d'onda 7/405 μs ed una corrente di picco di 250 kA;
- * *fulminazione diretta del conduttore*: l'impulso ha una forma d'onda 1/40 μs ed una corrente di picco di 18 kA.

Le uniche due grandezze che è stato possibile confrontare sono state le seguenti:

- * v_{OMP} ovvero la tensione massima ai capi dell'OMP;
- * i_{SA} ovvero la corrente massima che attraversa gli scaricatori di sovratensione.

Inoltre, è stato controllato se in seguito a tali scariche atmosferiche si è verificata un'eventuale scarica ai capi delle catene di isolatori (*flashover*). I risultati sono listati in tabella E.4. Come si può notare, i valori sono abbastanza simili ma ci sono alcune differenze. Per capire quale fosse il motivo di queste diversità, sono state apportate modifiche al modello presentato in questo elaborato per renderlo il più simile possibile a quello proposto dall'ente esterno. Per esempio, sono stati cambiati la resistività del terreno, le rappresentazioni dei sostegni e delle sottostazioni equivalenti. Tutte queste variazioni sono risultate però ininfluenti ai fini dei valori massimi riscontrati. Pertanto, si è concluso che le differenze possono essere dovute principalmente alla:

- * rappresentazione degli scaricatori di sovratensione, che mentre qui sono rappresentati attraverso il modello Pinceti-Giannettoni, nella relazione tecnica sono stati rappresentati direttamente sulla base della caratteristica tensione-corrente;
- * rappresentazione degli organi di manovra: nel report sono state infatti considerati molto più nel dettaglio i componenti interni all'organo di manovra, includendo calate, passanti gas/aria, tratti interni in cavo e collegamento al sostegno.

Tabella E.3: Confronto dei modelli di rete.

Modelli	Report	Tesi
<i>Linea aerea</i>		
Tratti terminali	Infiniti	Dati reali
Sottostazione	Generatore ideale trifase 245 kV	Generatore ideale trifase 220 kV con RL in serie
Resistività del terreno	300 Ωm	100 Ωm
<i>Utente A</i>		
Capacità parassite	2,5 nF	0,5 nF
Scaricatori	Modello generico	Modello scaricatore OMP
<i>Sostegno</i>		
Linea monofase	In più segmenti	Unica
Mensole	Rappresentate da RL	Trascurate
Catena di isolatori	Doppia	Singola
Controllo isolatori	V-t curve	LPM
<i>OMP</i>		
Elementi considerati	Calate, passanti aria/ SF_6 , capacità e messa a terra	Sole capacità
<i>Fulminazione</i>		
Impulso di corrente	$i(t) = \frac{I_p}{k} \frac{(t/T_1)^{10}}{1 + (t/T_1)^{10}} e^{-t/T_2}$	$i(t) = I \text{ CIGRE}^1$

Tabella E.4: Confronto dei risultati delle simulazioni.

Fulminazione del sostegno			
	v_{OMP} [kV]	i_{SA} [kA]	<i>flashover</i> [si/no]
Report	432	3	no
Tesi	421	3	no
Fulminazione del conduttore			
	v_{OMP} [kV]	i_{SA} [kA]	<i>flashover</i>
Report	559	11	no
Tesi	543	8	no

Bibliografia

- [1] CIGRE WG 33, «Guidelines for representation of network elements when calculating transients», *CIGRE Technical Brochure*, 1990.
- [2] A. Paolucci, *Lezioni di trasmissione dell'energia elettrica*. Cleup, 1998.
- [3] A. R. Hileman, *Insulation coordination for power systems*. CRC Press, 2018.
- [4] R. Rudenberg, *Electrical Shock Waves in Power Systems: Traveling Waves in Lumped and Distributed Circuit Elements*. Harvard University, 1968.
- [5] K. W. Wagner, *Induktionswirkungen von Wanderwellen in Nachbarleitungen*. Elektrotech. Z., 1914.
- [6] E. Giudice e G. B. Lo Piparo, «I fulmini e le linee elettriche», *ERI*, n. 3, 1974.
- [7] E. Giudice e G. B. Lo Piparo, «Il fenomeno della fulminazione», *ERI*, n. 2, 1972.
- [8] CIGRE WG 33, «Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines», *CIGRE Technical Brochure*, 1991.
- [9] V. Rakov, «Lightning parameters for engineering applications (keynote speech)», in *2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, 2010.
- [10] F. Palone, M. Forteleoni e M. Marzinotto, «Evaluation of lightning performances of 132 kV overhead lines in Northern Italy: comparison of different LLS data and lightning parameters Lightning and Power Systems», in *2016 International CIGRE Symposium Bologna*, 2016.
- [11] E. Giudice e G. B. Lo Piparo, «Fattori che influenzano la risposta al fulmine di un sostegno di linea aerea - Parte I: Metodo della tensione di maglia», 1971.
- [12] E. Giudice e G. B. Lo Piparo, «Fattori che influenzano la risposta al fulmine di un sostegno di linea aerea - Parte II: Metodo della cancellazione di campo», 1971.
- [13] R. Lundholm, R. Finn e W. Price, «Calculation of transmission line lightning voltages by field concepts», *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 76, n. 3, 1957.
- [14] E. Giudice e G. B. Lo Piparo, «Calcolo delle sovratensioni sulle catene di isolatori di linee aeree nel caso di fulminazione del sostegno», 1970.

- [15] A. R. Meo, «Sovratensioni in catena d'isolatori da caduta di fulmine sulla linea», 1967.
- [16] G. Baldo e G. Zingales, «Recenti sviluppi delle conoscenze sulla scarica impulsiva in aria», 1976.
- [17] G. Baldo, «Il fenomeno della scarica in aria su lunghe distanze», 1969.
- [18] J. T. Whitehead, W. Chisholm, J. Anderson, R. Clayton, H. Elahi, A. Eriksson, S. Grzybowski, A. Hileman, W. Janischewskyj, V. Longo et al., «Estimating lightning performance of transmission line 2—Updates to analytical models», *IEEE Transactions on Power Delivery (Institute of Electrical and Electronics Engineers);(United States)*, vol. 8, n. 3, 1993.
- [19] Z. Datsios, P. Mikropoulos e T. Tsovilis, «Shielding failure current of overhead transmission lines generated through an ATPDraw object», in *Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients (IPST), Delft, The Netherlands*, 2011.
- [20] M. R. Meshkatoddini, «Metal oxide ZnO-based varistor ceramics», *Advances in Ceramics-Electric and Magnetic Ceramics, Bioceramics, Ceramics and Environment*, 2011.
- [21] K. Iwata, H. Koike, T. Yoshida, S. Shiga, T. Morita e K. Mukae, *Fuji metal oxide surge arrester*. Fuji Electric Review, 1986.
- [22] A. Ibrahim e H. Dommel, «A knowledge base for switching surge transients», *IPST05-050*, vol. 6, 2005.
- [23] F. Iliceto, «Scarica delle linee di alta tensione attraverso le resistenze di apertura degli interruttori», 1971.
- [24] L. Paris, «Riduzione delle sovratensioni conseguenti a manovra di chiusura e richiusura di linee a vuoto», 1966.
- [25] J. Zaborszky e J. Rittenhouse, «Fundamental aspects of some switching overvoltages on power systems», *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 81, n. 3, 1962.
- [26] P. Gomez, «Validation of ATP transmission line models for a Monte Carlo study of switching transients», in *2007 39th North American Power Symposium*, IEEE, 2007.
- [27] J. Gutierrez, J. Naredo e P. Moreno, «Transmission line tower modeling for lightning performance analysis», *IEEE Power Engineering Review*, vol. 19, n. 7, 1999.
- [28] M. A. Sargent e M. Darveniza, «Tower surge impedance», *IEEE transactions on power apparatus and systems*, n. 5, 1969.
- [29] DIgSILENT PowerFactory, «Lightning transients application example»,

- [30] Z. G. Datsios e P. N. Mikropoulos, «Implementation of leader development models in ATP-EMTP using a type-94 circuit component», in *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, IEEE, 2014.
- [31] D. Filipović-Grčić, B. Filipović-Grčić, D. Brezak, I. Uglešić e A. Tokić, «Leader progression model application for calculation of lightning critical flashover voltage of overhead transmission line insulators», in *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, IEEE, 2012.
- [32] P. Pinceti e M. Giannettoni, «A simplified model for zinc oxide surge arresters», *IEEE transactions on power delivery*, vol. 14, n. 2, 1999.
- [33] IEEE Working Group 3.4.11, «Modeling of metal oxide surge arrester», 1992.
- [34] L. Simoni, «Un semplice metodo per la determinazione della forma d'onda prodotta da un generatore a impulso», 1965.
- [35] S. Yang e G. A. Franklin, «Switching transient overvoltage study simulation comparison using PSCAD/EMTDC and EMTP-RV», in *2013 Proceedings of IEEE Southeastcon*, IEEE, 2013.
- [36] H. W. Dommel, *EMTP theory book*. Microtran Power System Analysis Corporation, 1996.
- [37] DIgSILENT PowerFactory Working, «Overhead Line Models (ElmLne, TypLne, TypGeo, TypTow)», *Technical Reference*, 2018.