

La protezione contro le sovratensioni atmosferiche nelle reti di distribuzione a M.T.

Prima parte

Il coordinamento dell'isolamento.

Andrea Gulinelli

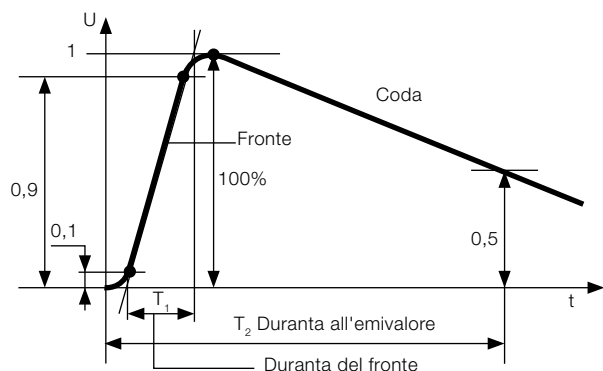
CARATTERISTICHE E TIPOLOGIA DELLE FULMINAZIONI

Le forme d'onda tipiche delle sovratensioni atmosferiche e delle correnti associate al fulmine, che è costituito da una serie di scariche parziali, sono tipicamente rappresentate in figura 1. Si tratta di grandezze impulsive di carattere unidirezionale, con un fronte e una coda ⁽¹⁾, caratterizzate da:

- il valore di picco o di cresta (valore massimo);
- il tempo di picco, T_1 , necessario al raggiungimento del valore massimo;
- il tempo all'emivalore, T_2 , tempo necessario sulla coda al raggiungimento del 50% del valore massimo.

⁽¹⁾ Analiticamente esprimibile con la differenza di due esponenziali in funzione del tempo: $u(t) = U(e^{-t/q} - e^{-t/p})$, dove i termini $1/q$ e p sono le costanti di tempo delle due funzioni e U il valore di picco. La forma d'onda che si presenta con fronte infinitamente ripido ($T_1 = 0$) è data dalla sola funzione $U \cdot e^{-t/p}$, cioè dalla sola coda.

Figura 1 – Forma d'onda dell'impulso atmosferico T_1/T_2 .



Per le prove di tenuta degli isolamenti alle sovratensioni impulsive di origine atmosferica le norme CEI 42-15 ⁽²⁾ hanno normalizzato la forma d'onda 1,2/50 μ s; che tradotto in pratica di massima assume il significato di essere la forma di sovratensione atmosferica statisticamente più probabile.

Per l'impulso di corrente, oltre a parametri di cui sopra, si considerano anche:

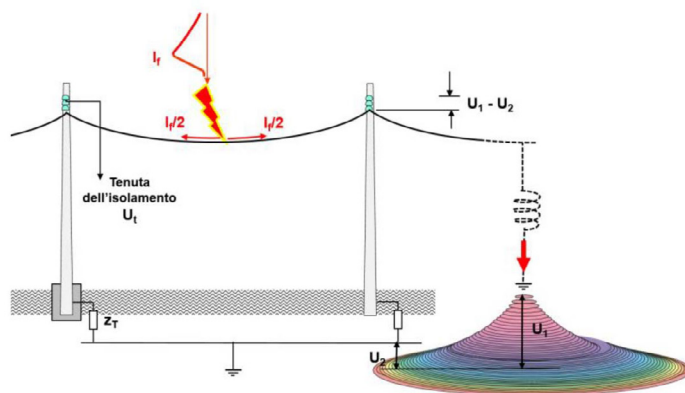
- la carica associata, $\int idt$ [C].;
- l'energia specifica, $\int i^2 dt$ [kA²s];
- la ripidità del fronte, di/dt [kA/ μ s].

Le norme, ai fini delle prove, assegnano la forma d'onda 10/350 μ s per il primo colpo di fulmine, mentre a 0,25/100 μ s la forma per i colpi successivi al primo. La pendenza di/dt del fronte di salita della corrente di fulmine, che agisce durante l'intervallo dt , determina l'intensità delle tensioni indotte elettromagneticamente di forma rettangolare. Tali tensioni vengono indotte in tutti i circuiti di conduttori aperti o chiusi, che si trovano nelle vicinanze di conduttori attraversati dalla corrente di fulmine. Il valore dell'energia specifica entra in gioco per valutare la tenuta termica dell'apparecchio utilizzato contro la sovratensione. Quanto

all'intensità dei fulmini negativi ⁽³⁾, nella distribuzione di frequenza della probabilità associata, i primi colpi del valore di 10÷15 kA presentano il 90÷95% circa di probabilità di essere uguali o superati, per contro un'intensità di 200 kA è superata solamente nell'0,5% dei casi. In genere l'energia in gioco per le sovratensioni è modesta per la loro breve durata. Tuttavia esse provocano lesioni ai componenti dell'impianto determinando dei punti deboli nei quali si scatena tutta l'energia del sistema elettrico nel funzionamento a frequenza industriale con effetti devastanti. Le sovratensioni di origine atmosferica che interessano le reti elettriche sono causate da fulminazione:

- diretta (Figura 2) - quando la scarica atmosferica colpisce direttamente le strutture della linea o dell'impianto (conduttori d'energia, fune di guardia delle linee AT, sostegni, ecc.); nell'esempio rappresentato la corrente di fulmine si ripartisce in due, $I_f/2$, determinando in un punto lontano un potenziale U_1 che a meno di U_2 , a cui si trovano i sostegni vicini, sollecita gli isolamenti della linea con una tensione U_1-U_2 ; se il fulmine

Figura 2 – Fulminazione di retta; es. il fulmine colpisce un conduttore.



⁽²⁾ CEI EN 60060-1 (2015-03) - Tecniche di prova in alta tensione Parte 1: Definizioni generali e prescrizioni di prova. Riguarda le prove su dispositivi che hanno tensione massima per l'apparecchiatura, U_m , superiore a 1 kV.

⁽³⁾ La scarica della parte negativa della nube contro terra rappresenta il 90% di probabilità di accadimento di un fulmine.

colpisce il palo si eleva il suo potenziale rispetto ai conduttori praticamente a terra a potenziale 0 in un punto lontano; gli effetti in genere sono devastanti e si possono raggiungere ampiezze elevate, fino anche a 40 000 kV; il fronte è poco ripido, la durata della coda è dell'ordine di alcune decine di μs ; ci si può attendere un numero annuo di scatti per scarica (guasti), da 5 a 20, per 100 km di linea. Va detto inoltre che il numero degli eventi attesi dipende dal grado di esposizione della linea, dalla schermatura offerta da oggetti vicini (che si dimostra efficace quando hanno la medesima altezza), dall'altezza media da terra dei conduttori, dalla distanza orizzontale fra i conduttori esterni e da un coefficiente orografico che tiene conto della conformazione del terreno in vicinanza della linea.

- indiretta (sovratensione indotta - figura 3) - quando la caduta del fulmine avviene in prossimità della linea/impianto creando

Figura 3 – Fulminazione indiretta. Il fulmine cade a terra in prossimità della linea.

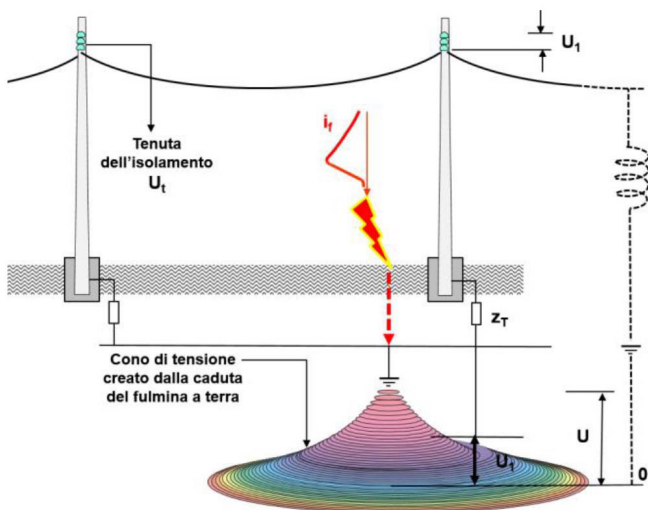
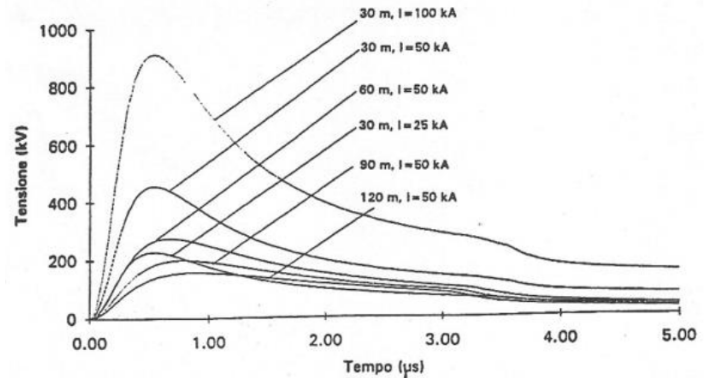


Figura 4 – Ampiezze delle sovratensioni indotte in funzione dell'intensità e della distanza del fulmine dalla linea.

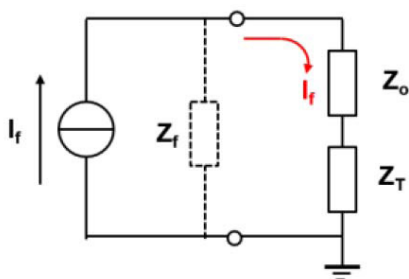


una spirale formata dai conduttori col suolo; nel caso esemplificato il fulmine cade a terra in prossimità della linea e crea un cono di sovratensione d'ampiezza U , di cui una parte, U_1 , è captata dal dispersore del sostegno; tale potenziale sollecita gli isolamenti in quanto i conduttori sono a terra lontano (punto a potenziale 0) attraverso l'impedenza interna del sistema alimentante la linea; i valori di picco sono in genere meno elevati ($800 \div 1\,000$ kV), mentre il fronte è più ripido ($100 \div 500$ kV/ μs), la coda varia da 2 a 3 μs e ci si può attendere un numero annuo di scatti, da 15 a 60, per 100 Km di linea (*).

Le fulminazioni dirette hanno effetti molto gravi e interessano anche le reti AT. Le fulminazioni indirette invece provocano scariche con conseguenze distruttive solamente sugli isolamenti delle linee/impianti a MT aventi essi livelli di tenuta più bassi. Nella figura 4 è mostrato il valore assunto da delle sovratensioni indotte in funzione dell'intensità delle correnti di fulmine e della distanza della loro caduta al suolo dalla linea assunta con altezza media dei conduttori da terra di 10 m. Se la

(*). Sovratensioni che per livello superano il BIL (Basic - Insulation - Level) di una line aerea con franco da terra di 10 m. I valori più elevati si riferiscono al livello ceraunico di 4 fulmini per km^2 . Il livello ceraunico è numero dei giorni temporaleschi all'anno, in una certa zona. Per giornata temporalesca s'intende quella nella quale si è udito almeno un tuono. I valori medi del numero dei fulmini a terra (1,5, 2,5 e 4) per anno e per chilometro quadrato dei Comuni d'Italia, in ordine alfabetico si trovano nella norma CEI 81-3. Norma non più applicabile ai fini della valutazione del rischio per la progettazione degli impianti di protezione dalle scariche atmosferiche negli ambienti di lavoro secondo il D.Lgs. n. 81/08, ma che ai fini delle presenti considerazioni conserva validità.

Figura 5 – Il fulmine: generatore ideale di corrente.



fulminazione è indiretta oppure di tipo diretta sul sostegno, si origina una terna di tensioni omopolari (fra loro eguali) che sollecitano gli isolamenti. Nel caso di linee AT la probabilità che non si verifichi alcuna scarica, ovvero una scarica monofase o polifase, dipende dall'ampiezza della sovratensione indiretta e dall'angolo di sfasamento con la tensione di fase del sistema elettrico.

Le fulminazioni possono interessare anche i cavi interrati. Nel punto d'impatto del fulmine con il terreno si crea uno strato semisferico ionizzato (la corrente si ripartisce in tutte le direzioni) a tutti gli effetti conduttore. Nei cavi MT (che sono schermati) quando per la loro collocazione vengono invasi da detta zona conduttrice, la corrente di fulmine si divide come nel caso di figura 2 scaricandosi alle estremità collegate a terra a potenziale zero lontano. La sovratensione che si determina per caduta ohmica sullo schermo sollecita l'isolamento verso i conduttori attivi con intensità decrescente rispetto al punto d'impatto provocandone la perforazione. In assenza dello schermo la corrente si ripartisce sui conduttori e la sovratensione della stessa natura di cui sopra s'instaura rispetto all'isolamento a contatto con il terreno laddove fuoriesce rispetto alla zona ionizzata.

PROPAGAZIONE DELLE ONDE

Dal punto di vista elettrico la corrente di fulmine è quella impressa da un generatore ideale di corrente, quindi d'impedenza interna infinita o comunque molto più elevata

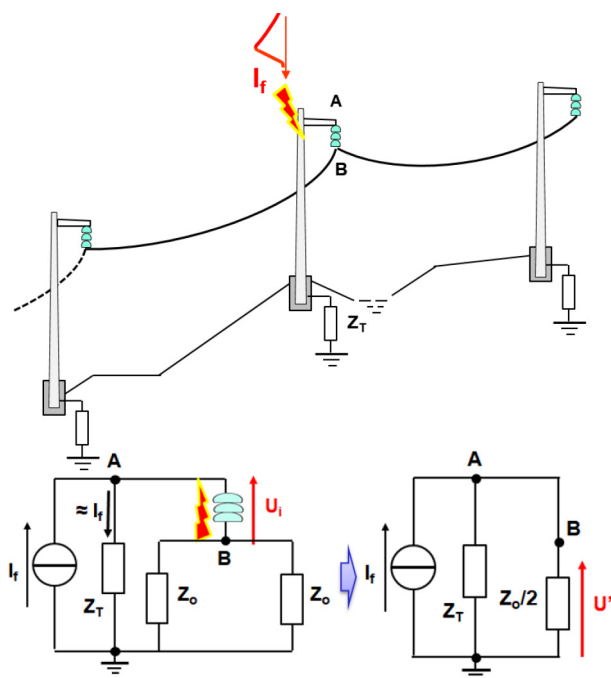
rispetto a quella della struttura/impianto/linea colpita. Di conseguenza l'intensità della fulminazione è in pratica indipendente dal tipo di oggetto colpito e dal valore della sua impedenza di messa a terra.

Con riferimento alla figura 5 indichiamo con:

- Z_f impedenza del canale di fulmine;
- Z_o impedenza d'onda della struttura / impianto/linea colpita; nelle linee aeree in conduttori nudi i valori variano da 400 a 500 Ω , per le linee in cavo si può assumere 40 Ω (in qualche caso il valore scende fino a 5 Ω) e per i trasformatori MT/BT il valore indicativo è intorno a 4000 Ω ;
- Z_T impedenza di messa a terra della struttura.

Nel caso di una fulminazione diretta di un sostegno avviene una scarica (detta scarica inversa terra-conduttori) sull'isolamento (A-B di figura 6) quando la sovratensione incidente, in via di prima approssimazione del valore $U_i \approx I_f \cdot Z_T$ (atteso che la messa a terra del sostegno è sempre molto minore

Figura 6 – a) Fulminazione diretta di un sostegno.

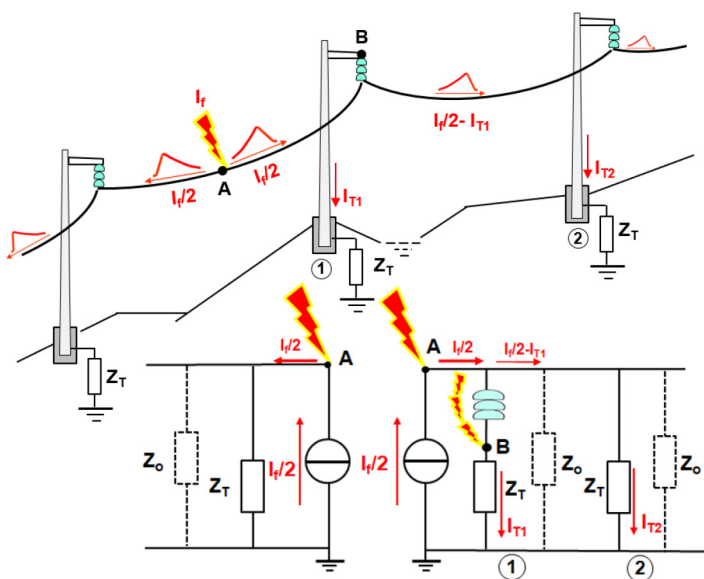


dell'impedenza d'onda e trascurando l'impedenza induttiva del sostegno), è maggiore della tensione di tenuta ad impulso della catena di isolatori U_t . A quel punto la tensione incidente viene troncata al valore: $U'_i \approx I_f(Z_T \cdot Z_o/2) / (Z_T + Z_o/2)$. "Shuntato" in tal modo l'isolamento, U'_i si propaga nelle due direzioni, perdendo d'ampiezza, ai sostegni laterali successivi, potendo potenzialmente provocare il cedimento anche dell'isolamento di questi (questa volta con scarica diretta conduttore-terra), fino a quando sarà $U'_i < U_t$. L'onda di corrente si scarica in massima parte attraverso il sostegno direttamente colpito e dai conduttori cominceranno a viaggiare in senso contrario le due porzioni residue (uguali) dell'intera corrente di fulmine. A parità d'intensità della corrente di fulmine e delle altre condizioni, se la fulminazione si abbatte direttamente sui conduttori, il fenomeno è sicuramente più grave perché

la sovratensione incidente assume il valore $U_i \approx I_f \cdot Z_o/2$ che sicuramente fa scaricare il primo isolamento ($U_i \approx I_f \cdot Z_o/2 > U_t$ - figura 7), assumendo che inizialmente sia pressoché nulla la corrente derivata dal ramo verso terra costituito dal conduttore-catena-sostegno). Dopo di che, analogamente a quanto visto in precedenza, l'onda di sovratensione si tronca, mantenendo però ampiezze, che sollecitano gli isolamenti successivi al punto d'impatto. I valori delle sovratensioni decrescenti che si propagano dopo ogni sostegno, di cui il primo drena una corrente data da $I_{T1} = \{I_f/2 (Z_T \cdot Z_o) / [(Z_T + Z_o)]\} / Z_T$, sono dati da $(I_f/2 - I_{T1})Z_o$ fin tanto che gli stessi superano la tenuta ad impulso degli isolamenti (5).

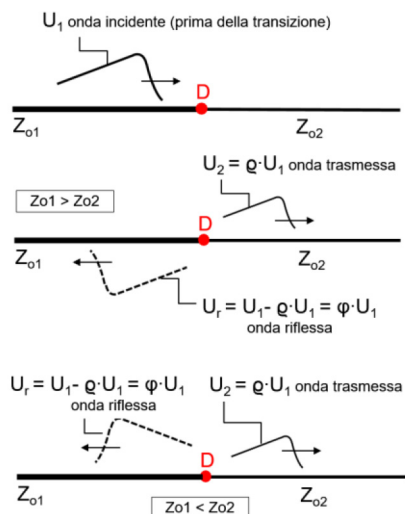
La propagazione lungo una linea avviene secondo onde di tensione e di corrente che generano rispettivamente campi elettrici e magnetici. Se si ammette l'assenza di elementi dissipativi la trasformazione da campo elettrico a campo magnetico dura all'infinito. Se la linea è di lunghezza infinita, il rapporto tensione corrente si mantiene costante e prende il nome di impedenza d'onda data da $Z_o = \sqrt{L/C}$, dove i valori di L e C sono quelli del conduttore o fune di guardia verso a terra. La velocità di propagazione è data da $v = 1/\sqrt{L/C}$ e vale 300 m/μs per le linee aeree in conduttori nudi e 150÷180 m/μs per i cavi secondo l'espressione $v = 1/\sqrt{\mu_o \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_r} \approx 300/\sqrt{\epsilon_r}$ (ϵ_r costante dielettrica relativa dell'isolamento del cavo). Partendo dalla premessa che le linee considerate siano infinitamente lunghe, i fronti d'onda siano infinitamente ripidi e le code infinitamente lunghe, passando da una linea d'impedenza Z_{o1} a una linea d'impedenza Z_{o2} ($Z_{o1} \neq Z_{o2}$) nel punto di

Figura 7 – Fulminazione diretta dei conduttori.



(5) Quale esempio si assuma una fulminazione diretta del conduttore $I_f = 20$ kA di una linea con sostegni aventi impedenza di messa a terra $Z_T = 80 \Omega$ e impedenza d'onda $Z_o = 400 \Omega$. La sovratensione incidente vale: $U_{i1} = 10 \cdot 400 = 4000$ kV che fa sempre scaricare un qualsiasi isolamento a MT. Dopo che la catena di isolatori del sostegno 1 ha scaricato la parte della corrente di fulmine drenata dallo stesso sostegno 1 (figura 7) è data da: $\{10 \cdot 400 \cdot 80 / [(400 + 80)]\} / 80 = 8,3$ kA, mentre la restante, 1,7 kA, si propaga attraverso il conduttore colpito facendo viaggiare un'onda di sovratensione del valore $U_{i2} = 1,7 \cdot 400 = 680$ kV ancora in grado di provocare la sicura scarica degli isolamenti. Nel sostegno 2 la corrente drenata vale: $\{1,7 \cdot 400 \cdot 80 / (480 + 80)\} / 80 = 1,42$ kA, la parte residua 0,28 kA impatta sulla linea una sovratensione $U_{i3} = 0,28 \cdot 400 = 112$ kV che invece generalmente, come vedremo nel seguito, non supera anche il più basso livello di tenuta a impulso degli isolatori previsti per le linee a MT in conduttori nudi.

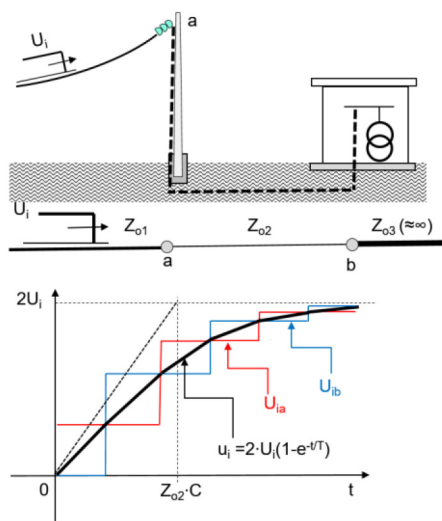
Figura 8 – Propagazione, trasmissione (rifrazione) e riflessione d'onda.



transizione (o di discontinuità) D (Figura 8) le onde di corrente e tensione si modificano sia in ampiezza sia nel valore della ripidità del fronte di salita al valore di picco. Se U_1 è la tensione incidente, la tensione trasmessa U_2 ha il valore $q \cdot U_1$ e la conseguente onda riflessa $U_r = U_1 - q \cdot U_1 = U_1(1 - q) = \varphi \cdot U_1$. Con q e φ parametri funzione dei valori delle impedenze, precisamente: $q = 2 \cdot Z_{o2} / (Z_{o1} + Z_{o2})$ - coefficiente di trasmissione o rifrazione e $\varphi = (Z_{o2} - Z_{o1}) / (Z_{o1} + Z_{o2})$ - coefficiente di riflessione⁽⁶⁾. L'estensione estrema del caso $Z_{o1} < Z_{o2}$ è il funzionamento della linea a vuoto (aperta $Z_{o2} = \infty$) nel quale è zero la tensione trasferita ($q = 0$) e pari al valore della tensione incidente la tensione riflessa ($\varphi = 1$), con la conseguenza del raddoppio della tensione incidente nel punto di transizione ($U_1 + U_r = U_1 + U_1 = 2 \cdot U_1$). Il caso opposto è la linea il corto circuito ($Z_{o2} = 0$), dove tutta l'onda incidente è trasferita ($q = 1$), mentre è zero quella riflessa ($\varphi = 0$)

con la conseguenza che l'onda di tensione si annulla nel punto di transizione ($U_1 + U_r = U_1 + 0 = U_2 = U_1$). È d'interesse particolare ma con valenza generale l'impatto di una onda a gradino, come sopra intesa, che entra in una capacità concentrata di una specifica apparecchiatura elettrica, ovvero in una capacità distribuita come quella di un cavo⁽⁷⁾. Al gradino d'onda entrante ($T_1 = 0$) la capacità si comporta come un corto circuito quindi la tensione è zero ma subito dopo la tensione incidente è continua e la capacità comincia con inerzia a caricarsi raggiungendo dopo un certo tempo il doppio del valore di cresta dell'onda incidente perché questa vede un circuito aperto. Da ciò deriva che l'onda incidente si riduce nell'ampiezza e nella pendenza del fronte di salita al valore di picco secondo l'andamento esponenziale tipico della carica di un condensatore. Il corollario di tale regola è il caso di un'onda incidente U_i nella situazione linea aerea-cavo-trasformatore (Figura 9), dove in pratica la linea in cavo

Figura 9 – Linea aerea-cavo trasformatore.



(6) Si ottengono dovendo essere, nelle immediate vicinanze del punto di transizione, $U_1 + U_r = U_2$, $I_1 + I_r = I_2$ e $I_1 = U_1/Z_{o1}$, $I_r = U_r/Z_{o1}$, $I_2 = U_2/Z_{o2}$. Nella discontinuità classica conduttori nudi-cavo è $Z_{o1} = 400 \Omega$ e $Z_{o2} = 40 \Omega$ che con onda incidente su Z_{o1} fornisce $q = 0,1818$ e $\varphi = -0,8181$ da cui è verificato che: $U_1 + \varphi \cdot U_1 = q \cdot U_1$ ossia $U_1 - 0,8181 \cdot U_1 = 0,1818 \cdot U_1$ nel caso invece della transizione contraria è $q = 1,8181$ e $\varphi = 0,8181$.

(7) La capacità unitaria di una line in cavo a MT è all'incirca 70 volte quella corrispondente di una linea aerea in conduttori nudi.

funziona aperta data l'elevata impedenza d'onda del trasformatore ($Z_{o3} \gg Z_{o2} \ll Z_{o1}$). In ogni caso consideriamo che sia $Z_{o3} = \infty$. L'onda trasferita attraverso la transizione **a** sia $q \cdot U_i$, quando, dopo un tempo dato da $t = l/300/\sqrt{\epsilon_r}$, dove l è la lunghezza del cavo, essa arriva nella terminazione **b** si raddoppia ($2 \cdot q \cdot U_i$) riflettendosi verso la terminazione a dopo il tempo t appena detto. In a una parte si trasferisce e una parte si riflette, aumentando d'ampiezza al valore $\varphi \cdot q \cdot U_i$ dando inizio ad una serie di riflessioni fra i due terminali a e b che cumulandosi tendono esponenzialmente al valore $2 \cdot q \cdot U_i$. Istante per istante il terminale più sollecitato è quello lato trasformatore, ma se il cavo è sufficientemente lungo da essere $t > Z_{o2} \cdot C$ (costante di tempo) ⁽⁸⁾ le sovratensioni U_{ia} e U_{ib} tendono al limite a coincidere. Questo porta a concludere che la lunghezza del cavo interviene, come vedremo in seguito, nella strategia del sistema di protezione da predisporre. Anche prendendo in considerazione la forma d'onda reale le cose non cambiano se si considera che la sovratensione incidente può essere scomposta in una serie di onde elementari a gradino in cui effetti sovrapposti forniscono la risposta esponenziale evidenziata. Concludendo si può dire che:

- le sollecitazioni nel cavo è tanto maggiore quanto maggiore è la durata all'emivalue dell'onda incidente ($T_2 \gg Z_{o2} \cdot C$);
- la stessa sollecitazione si esalta al diminuire della lunghezza del cavo; a parità di durata della coda la sollecitazione di tensione diminuisce all'aumentare della lunghezza del cavo.

LE SOVRATENSIONI DI ORIGINE INTERNA

I criteri per il coordinamento dell'isolamento degli impianti, inteso come l'insieme dei provvedimenti volti a mantenere entro un livello di probabilità prestabilito il rischio di scarica dei componenti, di convenienza dal punto di vista economico, il tasso di guasto e la continuità del servizio (norma CEI EN IEC 60071-1 – CEI 28-5:2020-12) ⁽⁹⁾, tengono conto, oltre che delle sovratensioni esterne attese sullo specifico impianto:

- del livello delle massime sovratensioni di origine interna;
- della tenuta dielettrica degli isolamenti;
- delle caratteristiche degli apparecchi di protezione;
- delle prove sui componenti.

Le sovratensioni interne hanno origine da eventi di guasto o da false manovre interni all'impianto elettrico e quindi dipendenti dallo stesso e dalla sua configurazione. La norma CEI EN IEC 60071-1 fornisce le classi e le forme delle tensioni e delle sovratensioni (Figura 10). Quelle a bassa frequenza (frequenza industriale o armoniche) sono in genere dovute a:

- guasti permanenti a terra;
 - fenomeni di risonanza;
 - brusche variazioni di carico;
- la forma è oscillatoria-sinusoidale; l'ampiezza varia fra 1,4 e 3 volte il valore della tensione nominale ⁽¹⁰⁾.

Quelle transitorie sono distinte in relazione al fronte lento (slow front transient) provocate da:

(8) Cioè il tempo necessario al raggiungimento del raddoppio del valore di cresta nell'ipotesi che si mantenesse costante la variazione di tensione calcolata in $t = 0$.

(9) CEI EN IEC 60071-1 - Coordinamento dell'isolamento. Parte 1: Definizioni, principi e regole. Si applica ai sistemi in corrente alternata trifase con una tensione massima per le apparecchiature superiore a 1 kV. Specifica la procedura per la scelta delle tensioni nominali di tenuta per l'isolamento fase-terra, fase-fase e longitudinale dell'apparecchiatura e delle installazioni di detti sistemi e fornisce gli elenchi delle tensioni normalizzate di tenuta da cui vengono scelte le tensioni di tenuta nominali.

(10) Negli studi del coordinamento per uniformità con il valore di cresta delle sovratensioni impulsive si usa il valore di picco anche per le tensioni d'esercizio e le sovratensioni: si esprime in p.u. riferito a $U_s \cdot \sqrt{2}/\sqrt{3}$, dove U_s è la tensione massima d'esercizio in condizioni operative normali e come meglio definita e specificato nel seguito.

Figura 10 – Tipi di sovratensioni (Norma CEI EN IEC 60071-1).

Class	Low frequency		Transient		
	Continuous	Temporary	Slow-front	Fast-front	Very-fast-front
Voltage or over-voltage shapes					
Range of voltage or over-voltage shapes	$f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ $T_1 \geq 3 \text{ 600s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_1 \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_1 \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$

- aperture di carichi capacitivi con riadescamento;
- intervento di fusibili;
- apertura di trasformatori a vuoto;
- archi intermittenti a terra;
- richiusure linee.

L'ampiezza fase fase può andare anche oltre 4 volte la tensione nominale nel caso di apertura carichi capacitivi e oltre 3 volte fase terra nel caso di archi intermittenti; possono raggiungere frequenze elevate, la forma è tipo impulsivo e oscillatoria smorzata.

Le sovratensione a fronte ripido e molto ripido (fast front transient e very fast front transient) sono dovute alle fulminazioni dirette e indirette delle cui caratteristiche abbiamo detto.

L'ampiezza delle sovratensioni a bassa frequenza e a fronte lento dipendono principalmente dallo stato del neutro della rete nel punto in cui avviene il guasto ed è determinata, generalmente, attraverso il fattore di guasto a terra K_F . Tale fattore è definito per un punto della rete come il rapporto tra il valore efficace più elevato raggiunto dalla tensione delle fasi sane verso terra e il valore efficace della tensione di fase che si ha nello stesso punto nel normale esercizio. Per la rete a MT si assume, se il neutro è:

- connesso efficacemente a terra, $K_F \leq 1,4$;

- compensato con induttanza (bobina di Petersen) o messo a terra mediante resistenza, $K_F \leq \sqrt{3}$;
- isolato da terra, $K_F > \sqrt{3}$.

Le sovratensioni a bassa frequenza (industriale e armoniche) e quelle a fronte lento, intervengono sia nel dimensionamento dell'isolamento sia nella scelta del dispositivo di protezione (spinterometri e scaricatori) che devono intervenire esclusivamente per le sovratensioni impulsive di natura atmosferica, in tal senso devono essere oggetto di specifica analisi per l'impianto da proteggere con la valutazione dell'ampiezza, della durata e della forma d'onda

Nel caso di archi intermittenti a terra la messa a terra del neutro, la bobina ha l'effetto di inibire i riadescamenti in quanto in molti casi la tensione sulla fase interessata dal guasto non raggiunge, dopo l'estinzione dello stesso, il livello di scarica dell'isolamento. Nell'Allegato C, della norma CEI EN IEC 60071-2 (CEI 28-4) ⁽¹¹⁾ sono riportate considerazioni di sintesi degli studi fatti per la determinazione delle sovratensioni interne. In tal senso l'esperienza d'esercizio e la letteratura dimostrano che le sovratensioni di origine interna delle reti a MT non costituiscono una criticità per la tenuta delle normali apparecchiature installate sulla rete

(11) CEI EN IEC 60071-2 - Coordinamento dell'isolamento. Parte 2: Guida applicativa. Costituisce una guida applicativa per la scelta dei livelli di isolamento delle apparecchiature o delle installazioni per i sistemi elettrici trifase con tensioni nominali superiori a 1 kV. Il suo scopo è fornire raccomandazioni per la determinazione delle tensioni di tenuta nominali nelle serie I e II della Norma IEC 60071-1 e giustificare l'associazione con i valori normalizzati delle tensioni massime per le apparecchiature.

dalle imprese distributrici (trasformatori, spinterometri, scaricatori, riduttori di misura, ecc.). Per tali componenti e apparati la norma CEI EN IEC 60071-1 chiede che siano progettate per superare le prove di tenuta all'impulso di manovra per quelle a fronte lento e a frequenza industriale per le sovratensioni di bassa frequenza temporanee, lasciando alla norma di prodotto la prova da superare rispetto alle sovratensioni di bassa frequenza continue. I valori dei parametri L e C da considerare nei calcoli sono quelli di servizio (trifase simmetrico del sistema elettrico).

BIBLIOGRAFIA

- N. Falletti - P. Chizzolini - Produzione e distribuzione dell'energia elettrica. Patron editore.
- A. Paolucci - Trasmissione dell'energia elettrica. Cleup Editore.
- A. Bossi - E. Sesto - Gli scaricatori di sovratensione
- V. Biscaglia - A. Porrino - Limitazione delle

sovratensioni nelle reti a MT di Enel.

- Enel DK 4441 - Guida al coordinamento degli isolamenti delle reti MT di distribuzione
- A. Porrino - V. Biscaglia - G. Como - C. A. Nucci - R. Iorio - Sovratensioni indotte sulle linee aeree di MT - Applicazione delle nuove conoscenze acquisite ai problemi di protezione delle apparecchiature e di continuità del servizio.
- A. Porrino. Sovratensioni transitorie di origine interna nelle reti a MT.
- J. Rizzati - Modellizzazione ed analisi di sovratensioni di origine interna ed esterna su organi di manovra su palo in reti ad alta tensione.
- L. Simoni - Un semplice metodo per la determinazione della forma d'onda prodotta da un generatore a impulso.
- E. Namor - Coordinamento dell'isolamento di una sottostazione ibrida a 220 kV - confronto tra analisi analitica secondo norma IEC e simulazioni numeriche.

Fine Parte I
continua