

2 Parametri della corrente da fulmine

2.1 Scariche atmosferiche e propagazione della corrente da fulmine

Ogni anno l'area della Repubblica Italiana è mediamente colpita da oltre un milione di fulmini. Per una superficie di 301.336 km², questo significa una densità media di fulmini al suolo di ca. tre scariche per km² ogni anno. L'effettiva densità dei fulmini dipende tuttavia in gran parte dalla conformazione geografica del terreno e può essere desunta, come primo orientamento, dai valori medi dei fulmini a terra contenuti nella norma CEI 81-3. Oggi in Italia è possibile determinare il punto di impatto di un fulmine con una precisione dell'ordine di ca. 500 m grazie al sistema di rilevamento dei fulmini SIRF. A questo scopo, sul territorio italiano sono distribuite sedici stazioni di misurazione, sincronizzate una con l'altra attraverso il segnale orario ad alta precisione del Global Positioning System (GPS). Queste stazioni di misurazione registrano l'istante in cui l'onda elettromagnetica della scarica del fulmine giunge in corrispondenza del rispettivo ricevitore, e il punto di impatto del fulmine viene calcolato in base alla differenza dei diversi tempi di rilevamento dell'onda magnetica registrati dai vari ricevitori ed alle conseguenti differenze di durata dell'onda magnetica a partire dal punto di scarica del fulmine in corrispondenza dei vari ricevitori. I dati così rilevati vengono archiviati centralmente e messi a disposizione dell'utente organizzati in diversi pacchetti. Ulteriori informazioni su questo servizio possono essere reperite consultando il sito web

www.fulmini.it.

Presupposto per la formazione dei fenomeni temporaleschi è il moto ascensionale delle masse d'aria calda con un'umidità sufficientemente elevata. Questo moto può avvenire con modalità diverse. Nei cosiddetti temporali di calore, il terreno si surriscalda localmente per via di un intenso irraggiamento solare, così gli strati d'aria più vicini al suolo si scaldano e salgono verso l'alto. Nel caso di temporali frontali, in seguito all'arrivo di un fronte freddo, una massa di aria fredda si incunea sotto l'aria calda e la obbliga a salire verso l'alto. Nei temporali orografici, invece, l'aria calda vicina al suolo viene sollevata verso l'alto dalle correnti costrette ad innalzarsi quando incontrano un rilievo. Altri fattori fisici intensificano ulteriormente la spinta verso l'alto delle masse d'aria, formando canali di correnti ascensionali con velocità verticali fino a 100 km/h che danno origine ai cumuli, densi

ammassi di nubi tipicamente di 5-12 km di altezza e 5-10 km di diametro. Per via dei processi di separazione delle cariche elettrostatiche, come attrito e nebulizzazione, le gocce d'acqua e le particelle di ghiaccio contenute nelle nubi si caricano elettricamente. Nella parte alta della nube temporalesca si accumulano le particelle con carica positiva, nella parte bassa quelle con carica negativa. Alla base della nube si forma inoltre una piccola sacca di cariche positive che deve la sua origine all'effetto corona, un fenomeno per cui attorno ai corpi appuntiti situati a terra al di sotto della nube (piante, per esempio) si accumulano delle cariche positive che vengono poi trasportate verso l'alto dal vento.

Se, per via della densità di carica spaziale presente, in una cella temporalesca si vengono a creare intensità di campo locali dell'ordine di numerose centinaia di kV/m, si producono delle scariche guida che precedono la scarica del fulmine vero e proprio. I fulmini nube-nube provocano una compensazione della differenza di potenziale tra i centri delle cariche positive e quelli delle cariche negative all'interno delle nubi e non colpiscono direttamente alcun oggetto al suolo. Questi rappresentano tuttavia un pericolo per i sistemi elettrici ed elettronici a causa dei campi elettromagnetici impulsivi (LEMP) che essi irradiano e devono quindi essere ugualmente presi in considerazione.



Figura 2.1.1 Fulmine discendente (nube-terra)

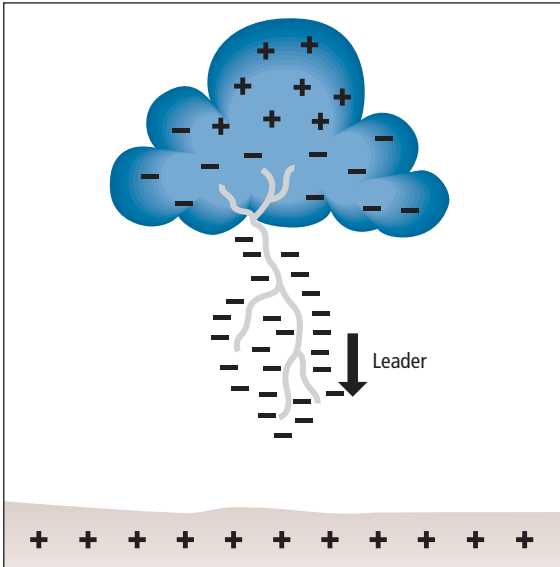


Figura 2.1.2 Meccanismo di scarica di un fulmine discendente negativo (fulmine nube-terra)

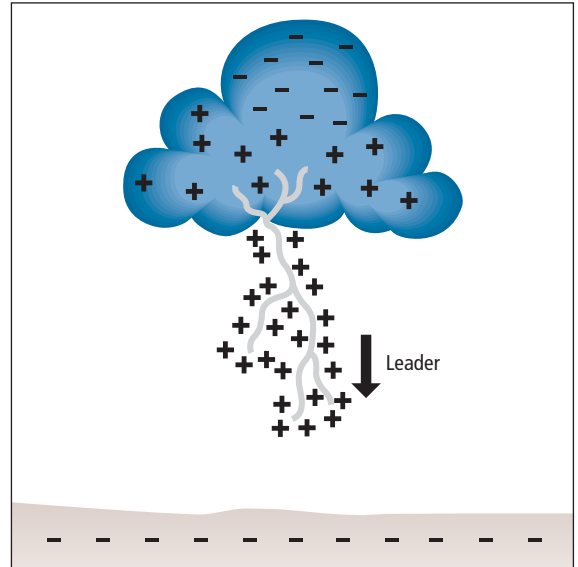


Figura 2.1.3 Meccanismo di scarica di un fulmine discendente positivo (fulmine nube-terra)

I fulmini che colpiscono il terreno producono una compensazione della differenza di potenziale tra le cariche elettriche delle nubi e le cariche al suolo. In particolare, si possono creare due tipi di fulmini:

- ⇒ fulmini discendenti (fulmini nube-terra)
- ⇒ fulmini ascendenti (fulmini terra-nube)

Nel caso dei fulmini discendenti, la scarica elettrica viene preceduta da scariche guida dirette verso il basso, cioè da nube a terra: questo tipo di fulmine si verifica per lo più su aree pianeggianti e in corrispondenza di costruzioni basse. I fulmini nube-terra sono riconoscibili dalle ramificazioni dirette verso terra (Figura 2.1.1). Più frequentemente, si verificano fulmini discendenti negativi, nei quali dalla nube temporalesca si spinge verso terra un canale di cariche negative (scarica guida o leader) (Figura 2.1.2) che aumenta con una velocità di circa 300 km/h a "passi" di 10 m per volta intervallati da pause di alcune decine di μ s. Quando la scarica guida è vicina al terreno (da qualche centinaio a poche decine di metri), il campo elettrico attorno alle parti del suolo che più si trovano vicine alla scarica guida (come alberi, colmi dei tetti) aumenta in modo tale da superare la rigidità dielettrica dell'aria, per cui in questi punti parte una scarica verso l'alto che incontra la scarica guida e dà origine alla scarica principale.

I fulmini discendenti positivi possono invece avere origine da un accumulo di cariche positive alla base della nube temporalesca (Figura 2.1.3). Per quanto riguarda la polarità, si ha un 90% circa di fulmini negativi contro un 10% di fulmini positivi: questa ripartizione dipende dalla conformazione geografica del terreno.

In corrispondenza di oggetti al suolo esposti e di altezza considerevole (come pali di antenne radio, torri per telecomunicazioni, campanili di chiese) o in corrispondenza delle vette di montagne, si possono verificare fulmini ascendenti (fulmini terra-nube), riconoscibili dalle ramificazioni della scarica principale rivolte verso l'alto (Figura 2.1.4). Nel caso di un fulmine ascendente l'elevata intensità di



Figura 2.1.4 Fulmine ascendente (terra-nube)

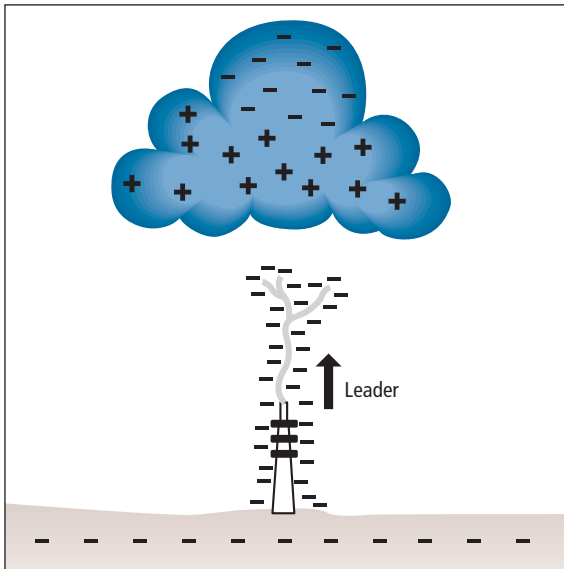


Figura 2.1.5 Meccanismo di scarica di un fulmine ascendente negativo (fulmine terra-nube)

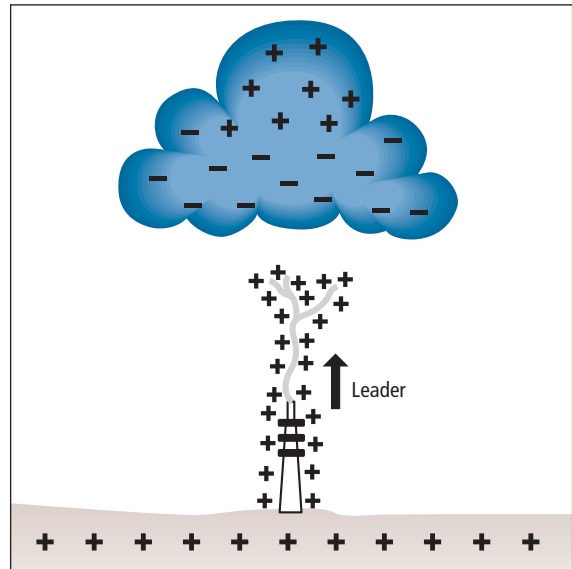


Figura 2.1.6 Meccanismo di scarica di un fulmine ascendente positivo (fulmine terra-nube)

campo necessaria per dare origine ad una scarica guida o leader non viene raggiunta all'interno della nube, ma è determinata dalla distorsione del campo elettrico in corrispondenza dell'oggetto esposto e del conseguente aumento di intensità di campo. A partire da questo punto al suolo, la scarica guida si spinge verso la nube portando con sé il suo accumulo di cariche elettriche.

I fulmini ascendenti si verificano sia con polarità negativa (Figura 2.1.5), sia con polarità positiva (Figura 2.1.6). Poiché nei fulmini ascendenti le scariche guida si instaurano a partire da oggetti al suolo molto isolati verso le nubi, gli oggetti di notevole altezza possono essere interessati più volte dalla scarica di un fulmine nel corso di un temporale.

Per quanto riguarda gli oggetti colpiti da un fulmine, i fulmini discendenti (nube-terra) comportano una sollecitazione maggiore rispetto ai fulmini ascendenti (terra-nube). Alla base dei calcoli delle misure di protezione contro i fulmini vengono pertanto considerati i parametri dei fulmini discendenti.

A seconda del tipo, ogni fulmine è composto da uno o più fulmini parziali. Si distinguono correnti impulsive di durata inferiore a 2 ms e correnti di lunga durata superiori a 2 ms. Altre caratteristiche distintive dei fulmini parziali sono la polarità (negativa o positiva) e la posizione temporale nel-

l'ambito della scarica del fulmine (primo fulmine parziale, fulmine parziale susseguente o sovrapposto). Le combinazioni possibili di fulmini parziali sono illustrate nella figura 2.1.7 per quanto riguarda i fulmini discendenti e nella figura 2.1.8 per i fulmini ascendenti.

Le correnti da fulmine composte da correnti impulsive e da correnti di lunga durata sono correnti impresse, cioè gli oggetti colpiti non esercitano alcun effetto di ritorno sulle correnti da fulmine. Nei percorsi delle correnti da fulmine indicati nelle figure 2.1.7 e 2.1.8 vengono indicati quattro parametri di effetto significativi per la tecnica della protezione contro i fulmini:

- ⇒ ampiezza della corrente da fulmine I ;
- ⇒ carica della corrente da fulmine Q_{fulmine} , composta dalla carica della corrente impulsiva Q_{imp} e dalla carica della corrente di lunga durata Q_{lungo} ;
- ⇒ energia specifica W/R della corrente da fulmine;
- ⇒ ripidità di/dt del fronte d'onda della corrente da fulmine.

Nei capitoli seguenti verranno descritti gli effetti dei singoli parametri e il modo in cui tali parametri influenzano il dimensionamento degli impianti di protezione contro i fulmini.

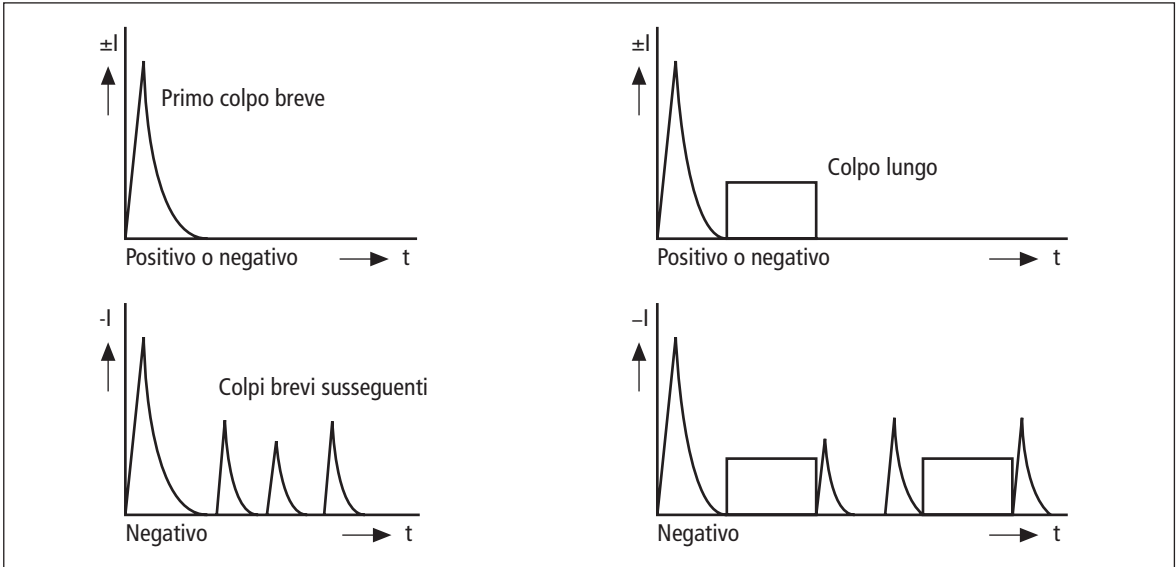


Figura 2.1.7 Possibili componenti di un fulmine discendente

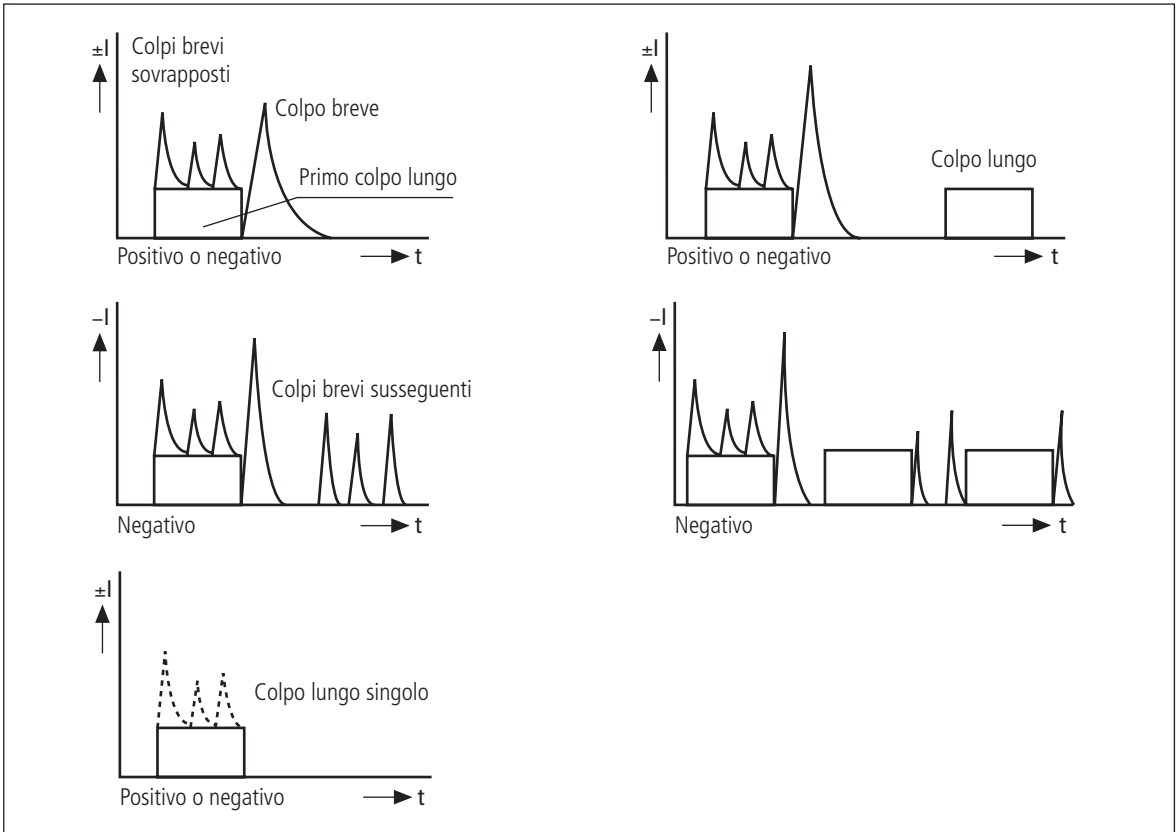


Figura 2.1.8 Possibili componenti di un fulmine ascendente

2.2 Ampiezza della corrente da fulmine

Le correnti da fulmine sono correnti indipendenti dal carico, cioè una scarica del fulmine può essere considerata come una fonte di corrente pressoché ideale. Se una corrente elettrica di questo tipo scorre attraverso parti conduttrici, in base all'intensità della corrente e all'impedenza della parte conduttrice attraversata dalla corrente, si avrà una caduta di tensione sulla parte conduttrice stessa. Nel caso più semplice questa condizione può essere descritta con la legge di Ohm:

$$U = I \cdot R$$

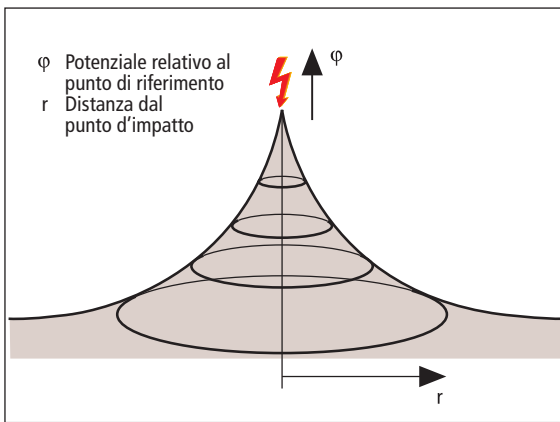


Figura 2.2.1 Distribuzione di potenziale in caso di abbattimento del fulmine su un terreno omogeneo



Figura 2.2.2 Animali morti in seguito a folgorazione da tensione di passo

Se una corrente si forma in un unico punto su una superficie conduttrice omogenea, si crea il cosiddetto gradiente di potenziale. Questo effetto si verifica anche in caso di fulmine in una zona di terra omogenea (Figura 2.2.1). Se si trovano degli esseri viventi (persone o animali) all'interno del gradiente di potenziale, si forma una tensione di passo, che può avere come conseguenza una scossa elettrica pericolosa (Figura 2.2.2). Più la conduttività del terreno è alta, più piatto risulterà il gradiente di potenziale. Il rischio di pericolose tensioni di passo diminuisce conseguentemente.

Se il fulmine colpisce un edificio, che è già provvisto di impianto di protezione contro i fulmini, la corrente da fulmine che si scarica attraverso l'impianto di messa a terra dell'edificio provoca una caduta di tensione sulla resistenza R_E dell'impianto di messa a terra dell'edificio (Figura 2.2.3). Finché tutti gli elementi conduttori all'interno dell'edificio che si possono toccare così come tutti gli elementi conduttori introdotti dall'esterno nell'edificio vengono mantenuti allo stesso potenziale, non esiste alcuna possibilità di pericolo per persone all'interno dell'edificio. Perciò è necessario eseguire l'equipotenzializzazione di tutte le parti con-

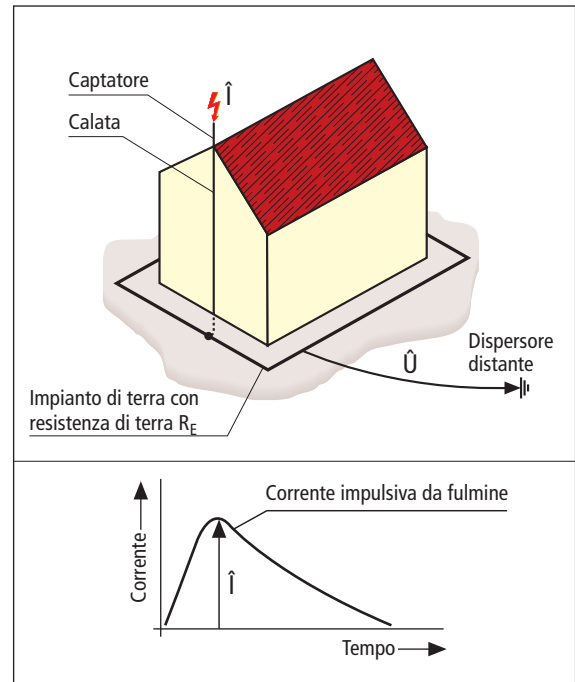


Figura 2.2.3 Aumento di potenziale dell'impianto di messa a terra di un edificio rispetto al potenziale di riferimento di terra attraverso il valore di cresta della corrente di fulminazione

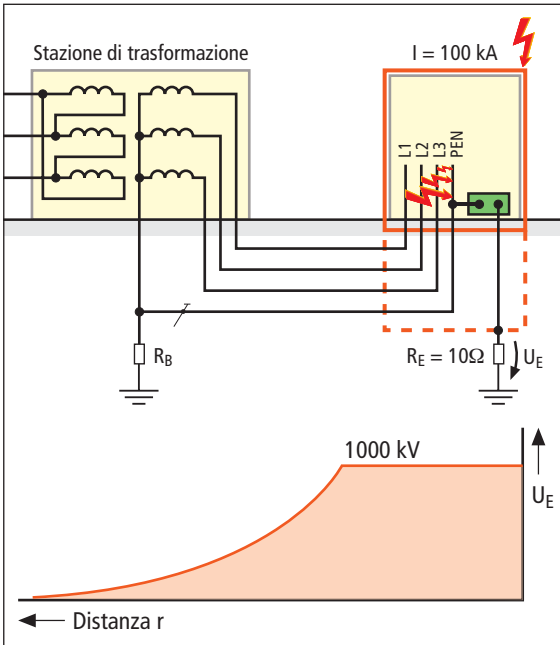


Figura 2.2.4 Messa in pericolo di impianti elettrici attraverso l'aumento di potenziale dell'impianto di messa a terra

duttrici che si possono toccare, presenti all'interno dell'edificio. Se questo viene trascurato, esiste il rischio di pericolose tensioni di contatto in caso di fulminazione.

L'aumento di potenziale dell'impianto di messa a terra causato dalla corrente da fulmine può rappresentare un pericolo per gli impianti elettrici (Figura 2.2.4). Nell'esempio illustrato, la terra d'esercizio della rete di alimentazione a bassa tensione si trova fuori dal gradiente di potenziale causato dalla corrente da fulmine. In questo modo il potenziale della terra d'esercizio, in caso di fulminazione dell'edificio non è identico al potenziale di terra dell'impianto utilizzatore all'interno dell'edificio. Nell'esempio raffigurato, la differenza è di 1000 kV. Questo rappresenta un pericolo per l'isolamento dell'impianto elettrico e degli apparecchi elettrici ad esso collegati.

2.3 Pendenza della corrente da fulmine

La pendenza dell'aumento di corrente da fulmine $\Delta i/\Delta t$, che diventa effettiva durante l'intervallo dt , determina l'altezza delle tensioni indotte elettromagneticamente. Tali tensioni vengono indotte in tutti i circuiti di conduttori aperti o chiusi, che si

trovano nelle vicinanze di conduttori attraversati dalla corrente da fulmine. La figura 2.3.1 mostra delle possibili configurazioni di circuiti di conduttori, all'interno dei quali possono essere indotte delle tensioni attraverso le correnti da fulmine. La tensione rettangolare U indotta durante l'intervallo Δt in un circuito di conduttore è:

$$U = M \cdot \Delta i / \Delta t$$

M mutua induttanza del circuito
 $\Delta i/\Delta t$ pendenza dell'aumento di corrente da fulmine

Come già descritto, le scariche dei fulmini sono composte da un certo numero di colpi. A seconda del momento in cui si verificano, all'interno di una scarica del fulmine si distinguono la prima corrente impulsiva e le correnti impulsive susseguenti. La differenza principale tra i due tipi di corrente impulsiva è che nel fulmine guida, poiché è necessaria la creazione di un canale del fulmine, è presente una pendenza della corrente da fulmine meno ripida che nel colpo susseguente, che invece trova un canale già completamente conduttore.

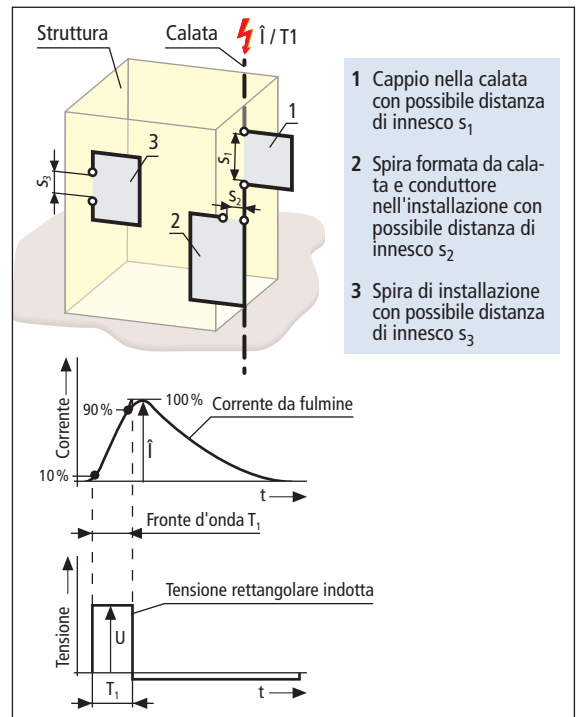


Figura 2.3.1 Tensione rettangolare indotta in circuiti attraverso la rapidità $\Delta i/\Delta t$ della corrente da fulminazione



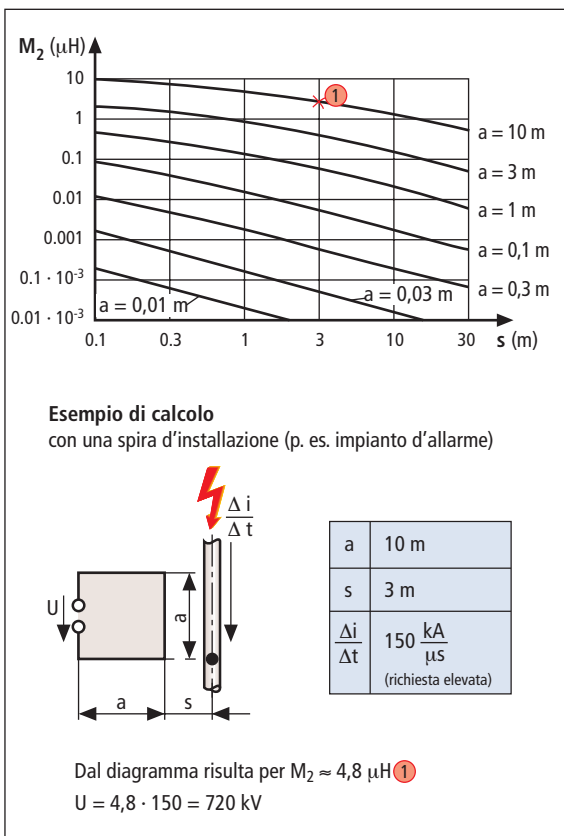


Figura 2.3.2 Esempio di calcolo per tensioni quadrate indotte in spire a forma quadrata

Per la stima della massima tensione indotta in circuiti di conduttori viene perciò utilizzata la pendenza di salita della corrente da fulmine del fulmine susseguente.

Un esempio di stima della tensione indotta in un circuito di conduttore è raffigurato in **figura 2.3.2**.

2.4 Carica della corrente da fulmine

La carica $Q_{fulmine}$ della corrente di fulminazione è composta dalla carica prodotta dalla corrente impulsiva Q_{imp} e dalla carica prodotta dalla corrente di lunga durata Q_{lungo} . La carica

$$Q = \int i dt$$

della corrente di fulminazione è determinante per la conversione di energia direttamente sul punto di abbattimento di un fulmine e in tutti gli altri

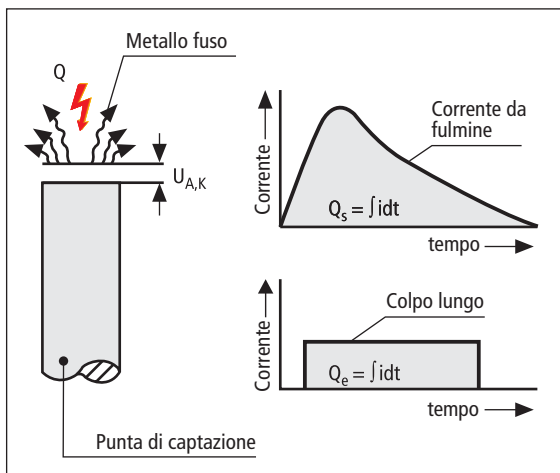


Figura 2.4.1 Conversione di energia nel punto di abbattimento del fulmine attraverso la carica della corrente di fulminazione

punti in cui la corrente da fulmine sotto forma di arco elettrico prosegue oltre un tratto di isolamento. L'energia W trasformata alla base dell'arco elettrico risulta essere il prodotto della carica Q e della caduta di tensione anodica/catodica $U_{A,K}$, con valori micrometrici (**Figura 2.4.1**).

Il valore $U_{A,K}$ in media è di alcune decine di V ed è influenzato dal flusso e dalla forma della corrente:

$$W = Q \cdot U_{A,K}$$

Q carica della corrente di fulminazione

$U_{A,K}$ caduta di tensione anodica/catodica

La carica della corrente da fulmine provoca delle fusioni sui componenti del sistema di protezione contro i fulmini che vengono colpiti direttamente dal fulmine. Ma anche per la sollecitazione degli spinterometri di sezionamento e di dispositivi di protezione da sovratensioni basati su tecnologia spinterometrica la carica è determinante.

Recenti ricerche hanno dimostrato che soprattutto la carica prolungata Q_{lungo} della corrente di lunga durata a causa dell'azione prolungata dell'arco elettrico è in grado di fondere o fare evaporare grossi volumi di materiale. Un confronto degli effetti prodotti dalla carica impulsiva Q_{imp} e dalla carica di lunga durata Q_{lungo} è raffigurato nelle **figure 2.4.2 e 2.4.3**.

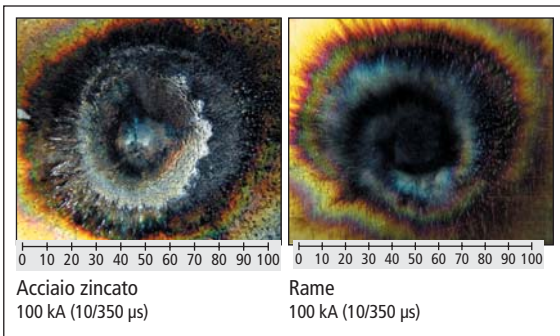


Figura 2.4.2 Effetti dell'arco elettrico della corrente impulsiva da fulmine su superficie metallica

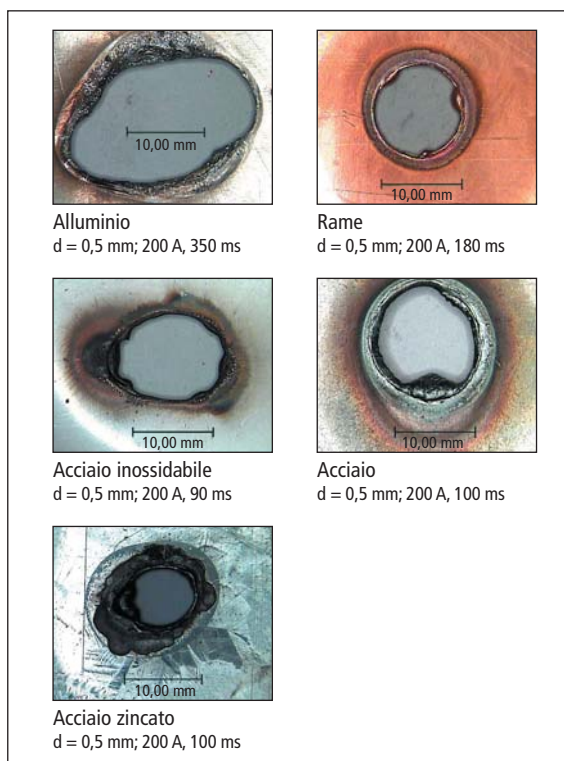


Figura 2.4.3 Perforazione di lamiere prodotte dall'azione di archi elettrici di corrente a lunga durata

2.5 Energia specifica

L'energia specifica W/R di una corrente impulsiva è l'energia che la corrente impulsiva produce su una resistenza di 1Ω . Questa conversione di energia è data dall'integrale del quadrato della corrente impulsiva sul tempo per la durata della corrente impulsiva:

$$W/R = \int i^2 dt$$

L'energia specifica viene perciò spesso chiamata "impulso quadrato di corrente". Tale energia è determinante per il riscaldamento dei conduttori attraversati dalla corrente impulsiva da fulmine, così come per l'effetto della forza esercitata sui conduttori attraversati dalla corrente impulsiva da fulmine (Figura 2.5.1).

Per l'energia W convertita in un conduttore con una resistenza R vale:

$$W = R \cdot \int i^2 dt = R \cdot W/R$$

R resistenza in corrente continua del conduttore (dipendente dalla temperatura)

W/R energia specifica

Il calcolo del riscaldamento di conduttori attraversati da corrente di fulmine può diventare necessario quando durante la progettazione e l'installazione di sistemi di protezione contro i fulmini devono essere considerati i rischi relativi alla protezione delle persone, al pericolo di incendio e di esplosione. Nel calcolo si parte dal presupposto che l'energia termica totale viene creata dalla resistenza ohmica dei componenti del sistema di pro-

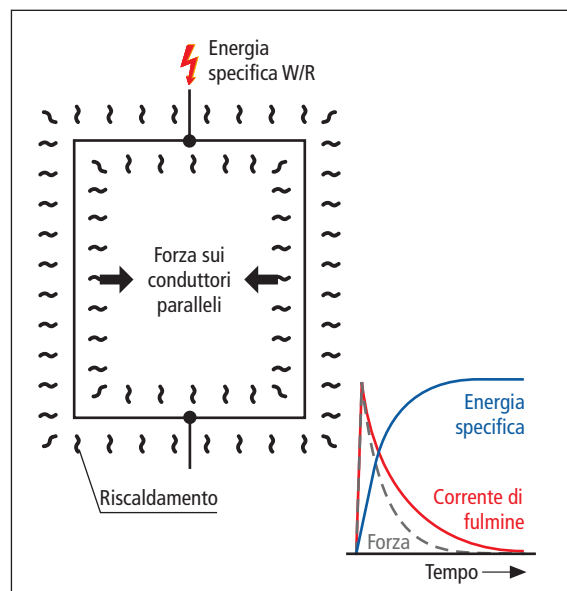


Figura 2.5.1 Effetti del riscaldamento e della forza prodotti dall'energia specifica della corrente da fulmine

Sezione [mm ²]		4	10	16	25	50	100	
Materiale	Alluminio W/R [MJ/Ω]	2,5	–	564	146	52	12	3
		5,6	–	–	454	132	28	7
		10	–	–	–	283	52	12
	Acciaio W/R [MJ/Ω]	2,5	–	–	1120	211	37	9
		5,6	–	–	–	913	96	20
		10	–	–	–	–	211	37
	Rame W/R [MJ/Ω]	2,5	–	169	56	22	5	1
		5,6	–	542	143	51	12	3
		10	–	–	309	98	22	5
	Acciaio inossidabile W/R [MJ/Ω]	2,5	–	–	–	940	190	45
		5,6	–	–	–	–	460	100
		10	–	–	–	–	940	190

Tabella 2.5.1 Aumento della temperatura ΔT in K di diversi materiali conduttori

tezione contro i fulmini. Inoltre si presuppone che, a causa della brevità del processo, non sarà possibile alcuno scambio di calore con l'ambiente circostante. Nella **tabella 2.5.1** sono elencati gli aumenti di temperatura di diversi materiali impiegati per la protezione contro i fulmini e le loro sezioni in funzione dell'energia specifica.

Le forze elettrodinamiche F generate da una corrente i in un conduttore con un percorso lungo e parallelo di lunghezza l e distanza d (**Figura 2.5.2**) si possono approssimativamente calcolare con l'equazione seguente:

$$F(t) = \mu_0 / 2\pi \cdot i^2(t) \cdot l / d$$

F(t) forza elettrodinamica

i corrente

μ₀ costante di campo magnetico in aria
(4π • 10⁻⁷ H/m)

l lunghezza del conduttore

d distanza tra i conduttori posizionati in parallelo

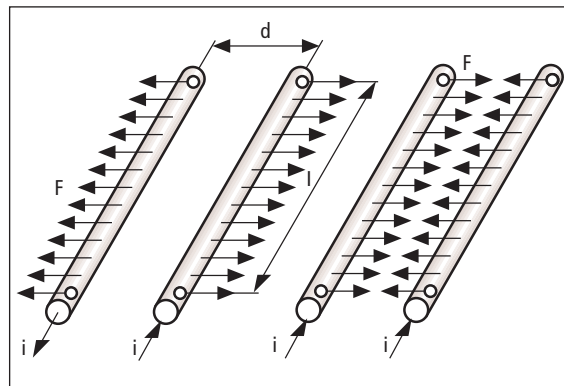


Figura 2.5.2 Effetto della forza elettrodinamica tra conduttori paralleli

L'effetto della forza sui due conduttori è attrattivo in caso di direzione di corrente uguale, mentre in caso di direzione di corrente opposta, è repulsivo. Tale effetto è direttamente proporzionale al prodotto delle correnti nei conduttori ed è inversamente proporzionale alla distanza tra i conduttori. Ma anche nel caso di un solo conduttore piegato si verifica un effetto di forza sul conduttore stesso. In tale caso la forza sarà proporzionale al quadrato della corrente nel conduttore piegato.

L'energia specifica della corrente impulsiva determina così la sollecitazione che causa una deformazione reversibile o irreversibile dei componenti e del sistema di protezione contro i fulmini. Questi effetti vengono presi in considerazione durante gli svolgimenti delle prove previste dalle norme di prodotto relative ai requisiti degli elementi di connessione per sistemi di protezione contro i fulmini.

2.6 Assegnazione di parametri della corrente da fulmine ai livelli di protezione

Per poter definire il fulmine come una grandezza perturbatrice, vengono fissati dei livelli di protezione da I a IV. Per ogni livello di protezione è necessario definire una serie di:

- ⇒ valori massimi (criteri di dimensionamento utilizzati per impostare i componenti della protezione contro i fulmini in modo che soddisfino i requisiti richiesti) e
- ⇒ valori minimi (criteri di intercettazione necessari per poter determinare le zone protette con una sufficiente sicurezza in caso di abbattimento di un fulmine (raggio della sfera rotolante)

Livello di protezione	Valori massimi (criteri di dimensionamento)	
	Massimo valore della corrente di picco	Probabilità che i parametri della corrente da fulmine effettiva siano <u>inferiore</u> ai valori massimi della corrente da fulmine
I	200 kA	99 %
II	150 kA	98 %
III	100 kA	97 %
IV	100 kA	97 %

Tabella 2.6.1 Valori limite dei parametri di protezione contro i fulmini e rispettive probabilità

Le **tabelle 2.6.1 e 2.6.2** indicano l'assegnazione dei livelli di protezione ai valori massimi e minimi dei parametri di protezione contro i fulmini.

Livello di protezione	Valori minimi (criteri di intercettazione)		
	Minimo valore della corrente di picco	Probabilità che i parametri della corrente da fulmine effettiva siano <u>superiori</u> ai valori minimi della corrente da fulmine	Raggio della sfera rotolante
I	3 kA	99 %	20 m
II	5 kA	97 %	30 m
III	10 kA	91 %	45 m
IV	16 kA	84 %	60 m

Tabella 2.6.2 Valori limite dei parametri di protezione contro i fulmini e rispettive probabilità