

Capitolo 5

Protezione delle condutture da sovracorrenti

5.1 Definizioni

Per circuito elettrico si intende la parte di impianto elettrico alimentata da uno stesso punto e protetta contro le sovracorrenti da uno stesso dispositivo di protezione.

Si definisce corrente d'impiego I_B del circuito, la corrente da prendere in considerazione per la scelta dei componenti del circuito. Il valore di questa corrente dipende ovviamente dalla potenza degli apparecchi utilizzatori, dal numero e dalla corrente nominale delle prese che il circuito alimenta. Poiché non tutti gli apparecchi e non tutte le prese sono utilizzati contemporaneamente, né sono sempre utilizzati alla piena potenza, per ogni tipo di ambiente vengono assunti fattori di contemporaneità e di utilizzo che, applicati alla potenza totale installata, permettono di determinare la corrente d'impiego per la quale il circuito va dimensionato.

- Nota:

Sovente la corrente non ha un valore costante nel tempo, bensì variabile in dipendenza di predeterminati cicli di manovre, ad esempio di una macchina utensile, o di ripetuti avviamenti di motori. Si considera in questo caso quale

corrente di impiego la corrente che, in regime permanente, produrrebbe gli stessi effetti termici.

Individuata la corrente di impiego I_B si adotta un cavo di portata I_Z uguale o maggiore alla corrente d'impiego.

Come già detto, per sovracorrente si intende ogni corrente superiore alla portata del cavo. Le sovracorrenti possono essere causate da un sovraccarico o da un cortocircuito.

La corrente di sovraccarico è una corrente che si stabilisce in un circuito elettricamente sano; è il caso di un motore a rotore bloccato, dell'utilizzazione di un circuito al di là del coefficiente di contemporaneità, dell'utente sprovvisto che inserisca sulla stessa presa tanti apparecchi da superare la portata del cavo, ecc.

La corrente di cortocircuito (franco) è una sovracorrente prodotta da un guasto di impedenza trascurabile tra le due parti del circuito, che presentano una differenza di potenziale nel servizio ordinario, ad esempio tra due conduttori di fase.

In genere le correnti di sovraccarico sono di valore modesto, mentre quelle di cortocircuito sono molto più elevate. Questa è una constatazione che non può valere come definizione. E' comunque accettabile riferirsi implicitamente a sovracorrenti di piccolo valore quando si parla di sovraccarico e di

sovracorrenti elevate quando si tratta di cortocircuito, la differenza tra sovraccarico e cortocircuito resta pur sempre nell'origine e non nel valore della sovracorrente.

5.2 Portata di un cavo

5.2.1 Il conduttore

Un conduttore percorso da corrente assume una temperatura θ_c maggiore della temperatura ambiente θ_a . A regime, tutto il calore sviluppato nel conduttore per effetto Joule (trascurando le perdite dielettriche nell'isolante) viene disperso nell'ambiente circostante. Il valore della temperatura θ_c del conduttore si ricava dal bilancio termico a regime, che in modo semplificato, può essere espresso nella forma:

$$(\rho l / \pi r^2) I^2 = h (\theta_c - \theta_a) 2\pi r l$$

dove:

ρ è la resistività del conduttore,

r è il raggio della sezione del conduttore,

l è la lunghezza del conduttore,

h è il coefficiente di conducibilità termica tra conduttore e ambiente,

I è l'intensità di corrente.

Da cui:

$$\theta_c - \theta_a = (\rho / 2 \pi^2 r^3 h) I^2 \quad (1)$$

La temperatura θ_c del conduttore deve essere compatibile con il tipo di materiale isolante che riveste il conduttore stesso.

5.2.2 L'isolante

I materiali isolanti, utilizzati in genere in bassa tensione, subiscono un decadimento nel tempo, dovuto soprattutto all'ossidazione, tanto più intenso quanto maggiore è la temperatura.

Per durata di vita dell'isolante ad una certa temperatura si intende il tempo per cui l'isolante può sopportare in modo continuo tale temperatura, prima che le sue caratteristiche elettriche, e soprattutto meccaniche, decadano in modo inaccettabile; è ovvio che la durata di vita diminuisce all'aumentare della temperatura.

In Figura 5.1 sono indicate le durate di vita del polivinilcloruro (PVC) e della gomma etilenpropilenica (EPR) in funzione della temperatura.

Per ogni tipo di isolante è definita una temperatura massima di funzionamento θ_s che non deve essere superata, nel servizio ordinario, per assicurare al cavo una conveniente durata. Ad esempio per la gomma G7 (mescola a base di EPR) la massima temperatura di funzionamento è di 90°C, mentre per il PVC è di 70°C; a queste temperature corrisponde una durata di vita di circa trenta e venti anni rispettivamente.

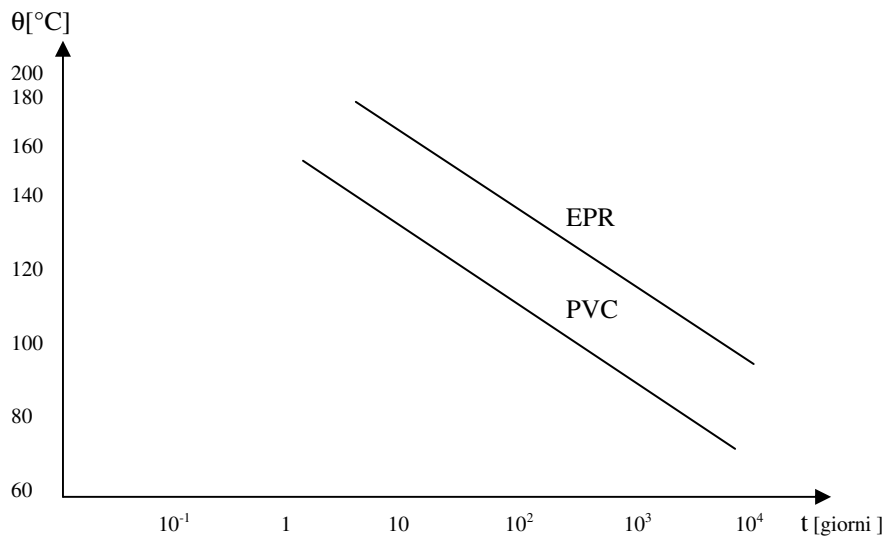


Figura 5.1

5.2.3 Portata I_z

L'isolante a contatto con la superficie del conduttore assume la stessa temperatura θ_c del conduttore; deve essere allora:

$$\theta_c \leq \theta_s$$

Sostituendo θ_c con θ_s nella (1) si ricava la portata I_z del cavo, cioè il più elevato valore di corrente che a regime il cavo può trasmettere, in condizioni di installazione determinate, senza superare la temperatura massima di funzionamento:

$$I_z = \pi [2 h r^3 (\theta_s - \theta_a) / \rho]^{1/2} \quad (2)$$

Questa formula è estremamente semplificata e solo indicativa (perché non tiene conto dell'effetto pelle, dell'influenza di un conduttore sugli altri, delle

perdite dielettriche, di eventuali guaine, ecc.) ma è utile per svolgere alcune considerazioni:

- la portata dipende dal tipo di isolante, cioè dalla sua attitudine a sopportare la temperatura θ_s ;

- la portata dipende dai parametri che influiscono sulla produzione di calore cioè ρ ed r ;

- la portata dipende dai fattori che influenzano lo scambio termico tra cavo e ambiente circostante quali:

temperatura ambiente;

numero e modalità di posa dei conduttori: in cunicolo, in canaletta, in condotto, in tubo, ecc., che influenzano θ_a ed il coefficiente h .

Da notare che la portata non varia proporzionalmente alla sezione S , ma secondo una legge del tipo $I_z = a S^b$ dove b è un numero inferiore a uno, pari a 0,625 secondo la norma CEI 20-21, mentre a dipende dalle condizioni di posa.

La portata di un cavo può essere posta sotto la forma:

$$I_z = I_0 K_1 K_2$$

dove:

I_0 è la portata, a 30 °C, secondo il modo d'installazione del singolo circuito;

K_1 è un fattore di correzione che cambia con la temperatura ambiente;

K_2 è un fattore di riduzione per gruppi di cavi, in fascio o in strato.

5.3 Sovracorrenti e transitorio termico del cavo

Sovracorrente è ogni corrente superiore alla portata del cavo. Un cavo, posto nelle condizioni d'installazione a cui la portata si riferisce, se è percorso dalla corrente I_z assume, a regime termico, la temperatura massima di funzionamento θ_s . Al verificarsi di una sovracorrente aumenta la temperatura del cavo; se la sovracorrente perdura per un tempo sufficientemente lungo, il cavo raggiunge attraverso un transitorio termico, una nuova temperatura di regime. Si può dimostrare che una relazione approssimata del fenomeno è data dalla:

$$\theta = \theta_a + (\rho I^2 / 2 h \pi^2 r^3) - [\theta_a + (\rho I^2 / 2 h \pi^2 r^3) - \theta_s] e^{-(2h/rc)t} \quad (3)$$

dove:

ρ è la resistività del conduttore,

r è il raggio della sezione del conduttore,

l è la lunghezza del conduttore,

I è l'intensità di corrente,

h è il coefficiente di conducibilità termica tra conduttore e ambiente,

θ_a è la temperatura ambiente,

c è il calore specifico riferito all'unità di volume.

La Figura 5.2 mostra l'andamento della temperatura del conduttore in funzione del tempo; il fattore $rc/2h$ costituisce la costante di tempo termica del cavo.

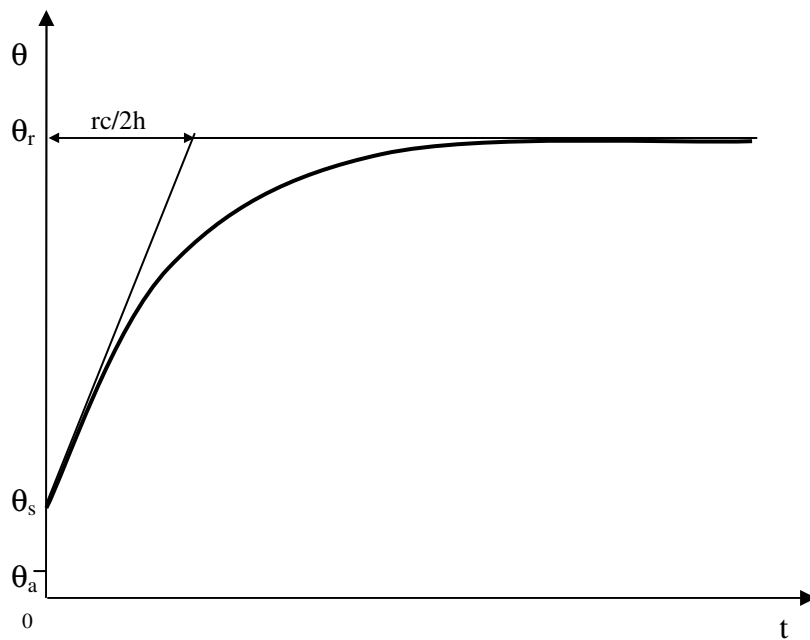


Figura 5.2

5.3.1 Curva di sovraccaricabilità di un cavo

Un cavo percorso a regime da una corrente pari alla sua portata I_z se è installato nelle condizioni cui la portata si riferisce, assume la temperatura θ_s corrispondente a una conveniente durata di vita. Ogni corrente superiore a I_z , cioè ogni sovracorrente, porta il cavo a una temperatura superiore a θ_s e dunque abbrevia la vita del cavo rispetto a quella corrispondente alla temperatura massima di funzionamento θ_s . Una sovracorrente di intensità I , che duri per il tempo t , porta il conduttore a una temperatura θ individuata dalla (3).

Se la durata t della sovracorrente è sufficientemente lunga in relazione alla costante di tempo termica del cavo, il cavo raggiunge la temperatura di

regime θ_r ; diversamente raggiunge una temperatura θ intermedia tra θ_s e θ_r . In entrambi i casi, a favore della sicurezza, si può assumere che la temperatura finale raggiunta dal cavo permanga per tutta la durata t della sovracorrente. Questo è tanto più vero quanto maggiore è il rapporto tra la durata t e la costante di tempo termica del cavo. Una volta stabilita la relazione tra l'evento di sovracorrente (I,t) e la sollecitazione termica (θ,t), occorre stabilire la sollecitazione termica tollerabile. Poiché, come si è detto, ogni sollecitazione termica corrisponde a una perdita di vita del cavo, rispetto a quella attesa (per $\theta=\theta_s$), si tratta, infine, di stabilire quale sia la perdita di vita accettabile.

Convenzionalmente, si ritiene tollerabile una perdita di vita del cavo del 10% per l'insieme degli eventi di sovracorrente che possono prodursi durante l'intera vita del cavo. Se si suppone che il cavo possa essere soggetto a non più di cento eventi di sovracorrente, ne consegue come accettabile una perdita di vita dello 0,1% per ogni singolo evento di sovracorrente.

In Figura 5.3, accanto alla retta di durata di vita (100%) di un cavo in PVC, è indicata la retta rappresentativa dello 0,1% della durata di vita. Una sovracorrente I che duri il tempo t è allora tollerabile se dà origine a una temperatura non superiore a quella corrispondente allo stesso tempo t sulla retta dello 0,1% della durata di vita.

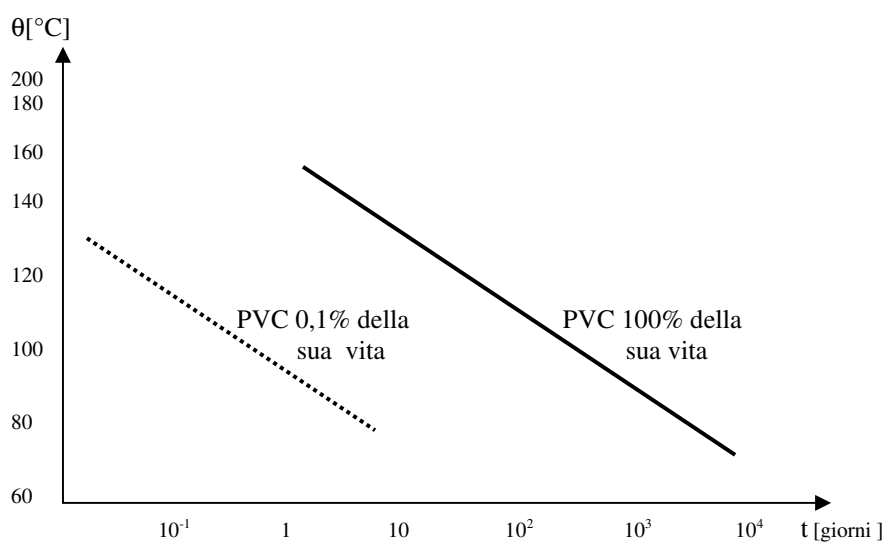
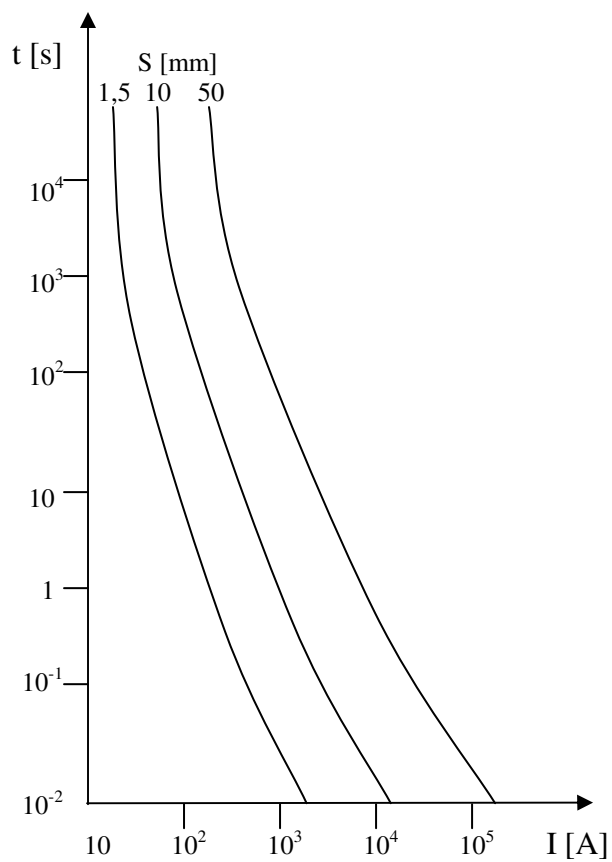


Figura 5.3



Curva di sovraccaricabilità di cavi tripolari in rame, isolati in PVC e fissati a parete.

Figura 5.4

In base ai principi ora indicati si può ricavare la curva di sovraccaricabilità di un cavo installato in condizioni specificate, Figura 5.4. Le coppie di valori (I,t) delle curve di Figura 5.4, corrispondono tramite la (3) a coppie di valori (θ,t) che si trovano sulla retta dello 0,1% di durata di vita di Figura 5.3 (con l'approssimazione che la temperatura θ duri per tutto il tempo t).

5.4 Caratteristiche d'intervento dei dispositivi di protezione

5.4.1 Interruttori automatici

Un interruttore automatico, sottoposto a una corrente elevata, apre automaticamente il circuito, su comando dei propri sganciatori, secondo una caratteristica di intervento tempo-corrente.

Per tempo d'intervento, o di apertura, si intende il tempo intercorrente tra l'istante in cui la corrente raggiunge il valore di funzionamento degli sganciatori e l'istante in cui i contatti (d'arco) dell'interruttore risultano separati su tutti i poli. Gli sganciatori che comandano l'apertura dell'interruttore sono in genere di due tipi: termico e magnetico. Per sovracorrenti di debole intensità è lo sganciatore termico a provocare l'intervento dell'interruttore, secondo tempi tanto più brevi quanto più grande è la corrente (caratteristica a tempo inverso). Per correnti di elevato valore, lo sganciatore magnetico provoca l'apertura istantanea dell'interruttore, cioè senza ritardo intenzionale.

Le norme non stabiliscono la forma che deve avere la caratteristica d'intervento, ma solo alcune porte entro cui deve essere contenuta. In relazione alla posizione delle porte si distinguono gli interruttori per impianti domestici e similari di tipo B, C e D, Figura 5.5 (norma CEI 23-3(EN 60898)). Una di queste porte è delimitata dalla corrente convenzionale di non intervento I_{nf} e dalla corrente convenzionale di intervento I_f .

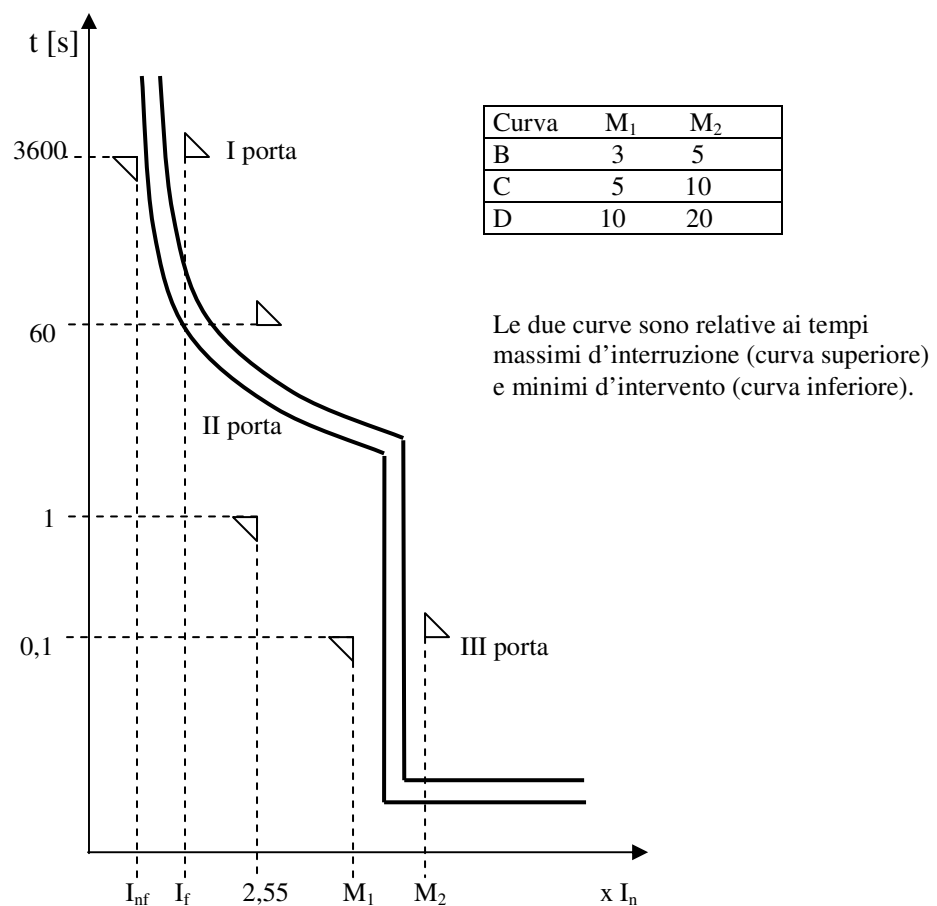


Figura 5.5

La corrente convenzionale di non intervento I_{nf} è quel valore specificato di corrente che non provoca, in condizioni determinate, l'intervento dell'interruttore per un intervallo di tempo convenzionale.

La corrente convenzionale di intervento I_f è quel valore specificato di corrente che provoca, in condizioni determinate, l'intervento dell'interruttore entro un intervallo di tempo convenzionale.

Le caratteristiche di intervento B-C-D rappresentano di fatto degli specifici campi di applicazione nei quali gli interruttori possono operare.

La Tabella riportata di seguito indica le tre soglie di intervento magnetico e alcuni esempi di campi di impiego per gli interruttori automatici.

Curva	Soglia di Intervento	Campo di applicazione
B	$3 \div 5 I_n$	Protezione di generatori o di cavi di notevole lunghezza
C	$5 \div 10 I_n$	Protezione di cavi ed impianti che alimentano utilizzatori normali
D	$10 \div 20 I_n$	Protezione di cavi che alimentano utilizzatori con elevate correnti di spunto

La norma CEI 17-5(EN 60947-2) non indica alcuna caratteristica di intervento magnetico lasciando al costruttore la libertà di realizzare apparecchi con soglie differenziate. Le Caratteristiche di intervento magnetico K-Z-MA (viste in precedenza nel cap.4), vengono definite dal costruttore che le riferisce alla norma CEI EN 60947-2 e rappresentano delle soglie magnetiche

di intervento differenti. Gli apparecchi con queste caratteristiche possono essere impiegati come riportato nella Tabella di seguito.

Curva	Soglia di Intervento	Campo di applicazione
Z	$2,4 \div 3,6 I_n$	Protezione di circuiti elettronici
K	$10 \div 14 I_n$	Protezione di cavi che alimentano utilizzatori con elevate correnti di spunto
MA	$12 \div 14 I_n$	Protezione motori dove non è richiesta la protezione termica

Nella Tabella 1 sono indicati i valori delle correnti I_{nf} e I_f in funzione della corrente nominale per gli interruttori rispondenti alle norme CEI 23-3, e della corrente di regolazione per gli interruttori regolabili rispondenti alle norme CEI 17-5 .

Interruttori automatici		I_{nf}	I_f	Tempo convenzionale
Regolabili CEI 17-5 (EN 60947-2)	Non regolabili CEI 23-3 (EN 60898)			
	I_n	$1,13 I_n$	$1,45 I_n$	1h
$I_r \leq 63A$	-	$1,05 I_r$	$1,3 I_r$	1h
$I_r > 63A$	-	$1,05 I_r$	$1,3 I_r$	2h

Tabella 1 - Valori della corrente convenzionale di intervento I_f e di non intervento I_{nf} in funzione della corrente nominale, o di regolazione, degli interruttori automatici.

I relè termici per contattori hanno in genere:

$$I_{nf} = I_n \text{ e } I_f = 1,2 I_n ;$$

Per i relè termici compensati rispetto alla temperatura ambiente, si ha:

$$I_{nf} = 1,05 I_n .$$

5.4.2 Fusibili

Per i fusibili valgono considerazioni analoghe a quelle svolte per gli interruttori automatici. Un fusibile apre il circuito in tempi tanto più piccoli quanto più grande è la corrente, secondo una propria caratteristica di intervento (cap.4). Per tempo di prearco si intende il tempo intercorrente tra l'istante di inizio della corrente e l'istante in cui ha inizio l'arco di interruzione, conseguente alla fusione dell'elemento fusibile. Anche per i fusibili si definiscono le correnti convenzionali di non fusione I_{nf} e di fusione I_f , con significato analogo a quello indicato per gli interruttori. I valori delle correnti I_{nf} ed I_f e quello dei tempi convenzionali, variano con la corrente nominale I_n . Essi sono indicati, ad esempio, per fusibili ad uso generale (tipo gG), nella Tabella 2.

I_n	I_{nf}	I_f	Tempo convenzionale
$16A \leq I_n \leq 63A$	$1,25 I_n$	$1,6 I_n$	1h
$63A < I_n \leq 160A$	$1,25 I_n$	$1,6 I_n$	2h
$160A < I_n \leq 400A$	$1,25 I_n$	$1,6 I_n$	3h
$400A < I_n$	$1,25 I_n$	$1,6 I_n$	4h

Tabella 2 - Valori della corrente convenzionale di fusione I_f e di non fusione I_{nf} in funzione della corrente nominale dei fusibili.

5.5 Requisiti del dispositivo di protezione contro il sovraccarico

5.5.1 Corrente nominale e corrente convenzionale d'intervento

Se I_B è la corrente d'impiego del circuito, cioè la corrente che nel servizio ordinario percorre il cavo prescelto di portata I_Z e se I_n è la corrente nominale, o di regolazione, del dispositivo di protezione contro sovraccarico, c'è da chiedersi quali siano i vincoli fra questi tre valori di corrente.

Certamente il cavo dovrà avere una portata maggiore, o al limite eguale, alla corrente d'impiego del circuito, dovrà cioè essere:

$$I_B \leq I_Z$$

Il dispositivo di protezione contro il sovraccarico deve essere adatto a portare con continuità la corrente di impiego I_B che normalmente fluisce nel circuito, senza dar luogo a interventi intempestivi. La corrente nominale del dispositivo di protezione I_n deve essere perciò uguale o superiore alla corrente d'impiego del circuito:

$$I_B \leq I_n$$

Per definire la posizione reciproca delle tre correnti I_B , I_n e I_Z , basta osservare che il dispositivo di protezione contro il sovraccarico non dovrebbe consentire il permanere di correnti superiori alla portata del cavo I_Z . Dovrà essere quindi in ogni caso verificata la condizione:

$$I_n \leq I_Z$$

In definitiva dovrà essere:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z \quad (5)$$

Questa condizione sarebbe sufficiente a individuare la corrente nominale del dispositivo di protezione, se questo intervenisse per correnti di poco superiori alla propria corrente nominale. Di fatto il dispositivo di protezione interviene, in modo certo in tempi specificati, solo per correnti uguali o superiori alla corrente convenzionale di intervento I_f . Il dispositivo di protezione si comporta quindi nel modo riassunto in Figura 5.6, nell'ipotesi che il tempo convenzionale sia un'ora.

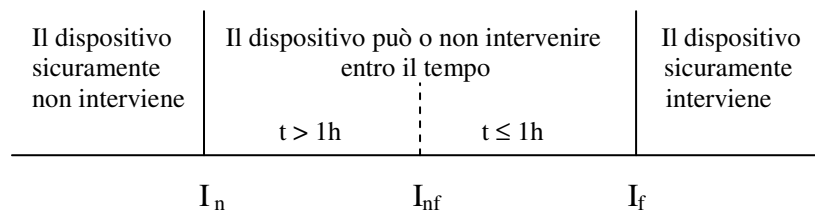


Figura 5.6

Se in base alla (5) si assume $I_n = I_Z$, le correnti comprese tra I_n e I_f , che costituiscono un sovraccarico per il cavo, potrebbero non essere mai interrotte (sovraccarico permanente) Figura 5.7. Ad esempio, un cavo di portata 10A sia protetto con un fusibile di 10A; questo interviene in modo sicuro solo per correnti superiori a 16A (Tabella 2), sicché il cavo di portata 10A potrebbe essere percorso in permanenza da correnti fino a 16A subendo un riscaldamento intollerabile.

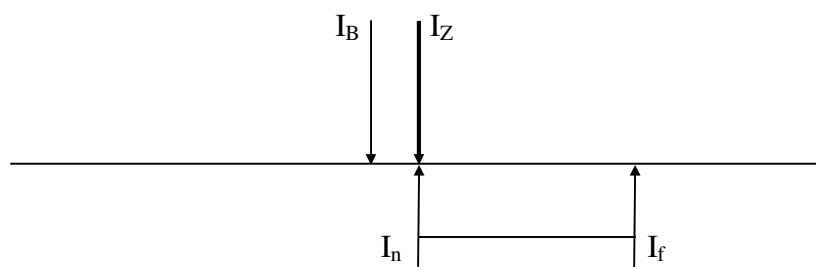


Figura 5.7

Se si vuole che qualunque corrente superiore alla portata I_Z non permanga per un tempo indefinito, deve essere soddisfatta la condizione:

$$I_f = I_Z$$

bisogna quindi considerare la Figura 5.8.

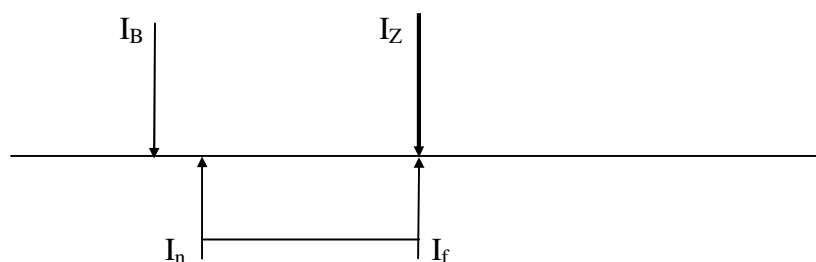


Figura 5.8

Così facendo aumenta però il divario tra la corrente d'impiego del circuito I_B (che deve essere inferiore a I_n) e la portata I_Z , posta uguale alla corrente I_f ; ne consegue che il cavo, che può portare la corrente I_Z , è utilizzato solo alla corrente I_B di gran lunga inferiore. Nell'esempio precedente il cavo di portata 10A dovrebbe essere protetto da un fusibile di corrente $I_f = 1,6 I_n$, ma con la condizione $I_f = I_Z$ la corrente nominale del fusibile risulterebbe: $I_n = I_f / 1,6$ e

cioè $I_n = (10/1,6)A$ ed essere dunque utilizzato ad una corrente inferiore, circa 6A.

Un compromesso tra sicurezza ed economia è stato trovato in sede normativa (CEI 64-8) ammettendo che I_f possa superare I_Z , in modo che I_B possa avvicinarsi a I_Z , ma non di molto; deve essere quindi soddisfatta la condizione, (Figura 5.9):

$$I_f \leq 1,45 I_Z$$

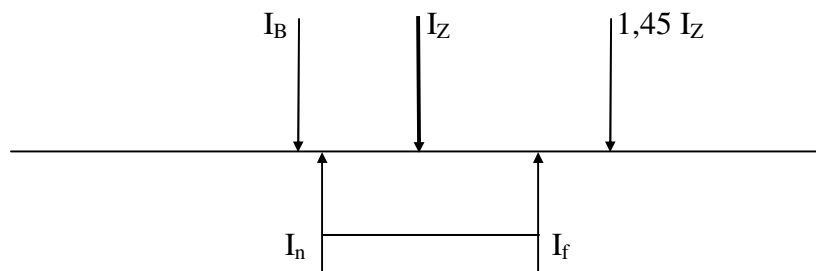


Figura 5.9

Quanto sopra può anche essere visto in funzione degli intervalli di corrente I_B-I_Z e I_Z-I_f .

Quanto più è ampio l'intervallo I_B-I_Z tanto meno è utilizzato il cavo, quanto più ampio è l'intervallo I_Z-I_f tanto meno è protetto il cavo. In Figura 5.7 l'intervallo I_B-I_Z minimo, tanto che I_B può coincidere con I_Z (cavo utilizzato al massimo), ma è massimo l'intervallo I_Z-I_f (cavo mal protetto). In Figura 5.8 l'intervallo I_B-I_Z è massimo (cavo mal utilizzato) e l'intervallo I_Z-I_f è nullo (cavo protetto completamente). La Figura 5.9 indica il compromesso

normativo nel quale si rinuncia a utilizzare il cavo per le correnti comprese tra I_B e I_Z e si rinuncia a una protezione certa per le correnti tra I_Z e I_f . Il rischio relativo al compromesso normativo sembra accettabile, perché si ha una perdita di vita del cavo solo quando si verificano contemporaneamente le seguenti condizioni:

- si stabilisce nel circuito una sovracorrente di valore compreso proprio nell'intervallo I_Z - I_f ;
- tale sovracorrente è permanente o di lunga durata (diversamente la perdita di vita per il cavo sarebbe trascurabile);
- il dispositivo di protezione non interviene, anche se potrebbe intervenire specie per correnti prossime a I_f .

Nota:

- Il rischio non è più accettabile negli impianti a sicurezza (“tipo AD” per atmosfere esplosive) dove è richiesto che sia soddisfatta la condizione $I_f \leq I_Z$.

In definitiva, un dispositivo di protezione delle condutture contro sovraccarico deve soddisfare entrambe le condizioni:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z$$

$$I_f \leq 1,45 I_Z$$

Queste condizioni non sono indipendenti tra loro, ma legate dal rapporto I_n / I_f variabile con il dispositivo di protezione, sicché la condizione necessaria e

sufficiente per assicurare la protezione contro il sovraccarico è diversa, secondo che il circuito sia protetto da un interruttore automatico o da un fusibile.

5.5.2 Interruttori automatici

Secondo la Tabella 1, per gli interruttori automatici ad uso domestico e similare (non regolabili) si ha:

$$I_f = 1,45 I_n$$

Se pertanto è soddisfatta la condizione $I_n \leq I_Z$, lo è anche l'altra condizione $I_f \leq 1,45 I_Z$.

Un circuito con corrente d'impiego I_B e con cavo di portata I_Z si considera pertanto protetto contro sovraccarico da un interruttore automatico di corrente nominale:

$$I_n \leq I_Z$$

Quanto detto per gli interruttori automatici non regolabili vale a maggior ragione per gli interruttori regolabili per i quali $I_f = 1,3 I_n$ e per gli sganciatori termici dei contattori, essendo per questi $I_f = 1,2 I_n$.

5.5.3 Fusibili

Per i fusibili $I_f = 1,6 I_n$ e la condizione $I_f \leq 1,45 I_Z$ diventa:

$$I_n \leq (1,45/1,6) I_Z = 0,9 I_Z$$

risulta pertanto sovrabbondante l'ulteriore condizione $I_n \leq I_Z$.

In definitiva, la corrente nominale del fusibile per la protezione contro sovraccarico di un circuito con corrente d'impiego I_B e cavo di portata I_Z , deve soddisfare la condizione:

$$I_B \leq I_n \leq 0,9 I_Z$$

E' interessante osservare come il fusibile, atto alla protezione di sovraccarico, abbia in genere una corrente nominale inferiore a quella di un interruttore automatico e permetta quindi una minore utilizzazione del cavo.

Ciò è dovuto al fatto che i fusibili hanno $I_f = 1,6 I_n$ mentre per gli interruttori automatici $I_f = 1,45 I_n$ o anche meno. Il diverso valore di I_f dipende soprattutto dalle diverse condizioni di prova per determinare la corrente I_f :

- a freddo per i fusibili,
- dopo la prova a I_{nf} per gli interruttori.

5.5.4 Confronto tra caratteristiche d'intervento e curve di sovraccaricabilità

Correnti superiori a I_f determinano l'intervento del dispositivo di protezione entro un tempo definito dalla caratteristica d'intervento del dispositivo stesso.

L'evento di sovracorrente (I,t) produce una sollecitazione termica del cavo che è tollerabile se il punto (I,t) rimane al di sotto della curva di sovraccaricabilità del cavo. Il dispositivo di protezione assicura pertanto una

idonea protezione del cavo, se la caratteristica d'intervento del dispositivo di protezione rimane completamente al di sotto della curva di sovraccaricabilità del cavo stesso.

Questa è una verifica che viene condotta solo in casi particolari; più in generale si assume che la caratteristica di intervento dei dispositivi di protezione, scelti secondo quanto indicato precedentemente, sia tale da assicurare la protezione contro i sovraccarichi.

In realtà questo non è sempre vero; si tratta di casi particolari, il cui rischio è ritenuto accettabile dalla norma, la quale non prescrive verifiche particolari a tal fine.

5.5.5 Necessità e ubicazione del dispositivo di protezione contro Sovraccarico

La protezione contro il sovraccarico è necessaria ogni qualvolta siano ipotizzabili sovracorrenti nel circuito elettricamente sano. In pratica è sempre necessaria, a meno che la sorgente non possa fornire correnti superiori a I_Z , oppure si tratti di circuiti che alimentano esclusivamente apparecchi utilizzatori termici o d'illuminazione, sempre che:

- appartengano a sistemi TT o TN (per i sistemi IT, è necessario proteggere contro sovraccarico qualsiasi circuito, paragrafo 5.11.2);

- non siano in luoghi con pericolo di esplosione, o a maggior rischio in caso d'incendio;

- i fattori di contemporaneità e di utilizzazione siano stati assunti pari a uno.

Gli apparecchi termici o d'illuminazione non sono infatti per loro natura capaci di dare origine a sovraccarichi.

La protezione contro il sovraccarico può essere inoltre omessa quando sia economicamente accettabile che il cavo si deteriori e ciò non possa provocare danni all'ambiente circostante, ad esempio per certi cavi interrati (CEI 11-17, 64-8).

Uno stesso dispositivo di protezione può proteggere contro il sovraccarico più cavi uguali in parallelo, nell'ipotesi che la portata globale I_Z si ripartisca uniformemente tra tutti i cavi. La posizione reciproca tra i cavi influisce sulla mutua induttanza e quindi sull'impedenza dei singoli conduttori. Per favorire una equiripartizione della corrente i cavi di una stessa fase devono essere disposti in modo simmetrico rispetto al centro ideale del fascio di cavi. Se la distribuzione della corrente non è uniforme, si hanno cioè differenze maggiori del 10%, oppure i cavi sono addirittura di sezione diversa, ciascun cavo deve essere singolarmente protetto contro il sovraccarico con un proprio dispositivo di protezione.

L'interruzione del circuito può dare a volte origine a pericoli molto più gravi dell'invecchiamento precoce del cavo, ad esempio nei circuiti:

- di alimentazione di elettromagneti di sollevamento;
- di eccitazione di macchine rotanti,
- secondari di trasformatori di corrente,
- di alimentazione dei servizi di sicurezza.

In questi casi la norma raccomanda di omettere la protezione contro i sovraccarichi, secondo la logica del male minore.

In teoria, il dispositivo di protezione contro sovraccarico può essere installato in un punto qualsiasi della condotta, ad esempio al termine della condotta stessa, purché a monte non vi siano derivazioni o prese a spina. Per definizione, il circuito è infatti elettricamente sano e il valore della corrente che percorre la condotta è costante in ogni suo punto.

Nei sistemi IT, tuttavia, il dispositivo di protezione contro sovraccarico deve essere installato all'inizio della condotta, per i motivi indicati in seguito (paragrafo 5.11.2).

I dispositivi di protezione regolabili devono essere inaccessibili, o avere gli organi di regolazione inaccessibili, al personale non addestrato. I fusibili, accessibili alle persone non addestrate, devono essere non intercambiabili con altri di corrente nominale superiore, nei limiti richiesti dalle norme relative, ed essere di tipo tale che il ricambio delle cartucce possa effettuarsi con il circuito sotto tensione senza pericolo.

5.6 Esempi di protezione da sovraccarico

Nella generalità dei casi è richiesta la protezione da sovraccarico delle linee. Nelle normali condizioni impiantistiche con circuito sano, il funzionamento di alcuni utilizzatori può essere solo a tutto o niente. Sono cioè possibili solo due valori di corrente: “0” o “ I_B ”. E’ il caso delle lampade, dei carichi puramente resistivi, dei forni, degli scalda acqua ecc. In tutti questi casi non essendo possibile il sovraccarico, la norma tollera l’omissione di tale protezione.

Esempio 1

Da dorsale qualsiasi (Figura 5.10), con sezione S_0 e portata I_{Z0} protetta da interruttore D_0 con taratura I_{n0} , viene derivata una linea luce con sezione S_4 e portata I_{Z4} , alimentante uno o più punti illuminanti.

E’ scontata la scelta delle sezioni linee-lampade che ovviamente dovranno disporre ciascuna di una portata I_{Zi} superiore alla I_{Bi} della relativa lampada.

- Se la somma delle n correnti I_{Bi} delle lampade, che converge in S_4 , è inferiore alla I_{Z4} , non è necessario proteggere da sovraccarico la sezione colletttrice S_4 .

- Non esistono comunque problemi di carico, se la I_{Z4} è superiore alla taratura I_{n0} del dispositivo di protezione D_0 della dorsale con sezione S_0 ;

Infatti anche se:

$$I_{B1} + I_{B2} + I_{B3} > I_{Z4}$$

si ha anche:

$$I_{n0} \leq I_{Z4}$$

E quindi si ha l'intervento del dispositivo di protezione D_0 .

Se la somma delle n I_{Bi} supera la I_{Z4} e questa, a sua volta, è inferiore alla I_{n0} di D_0 , si rende necessario un ulteriore interruttore D_4 sulla derivazione con :

$$I_{n4} \leq I_{Z4}$$

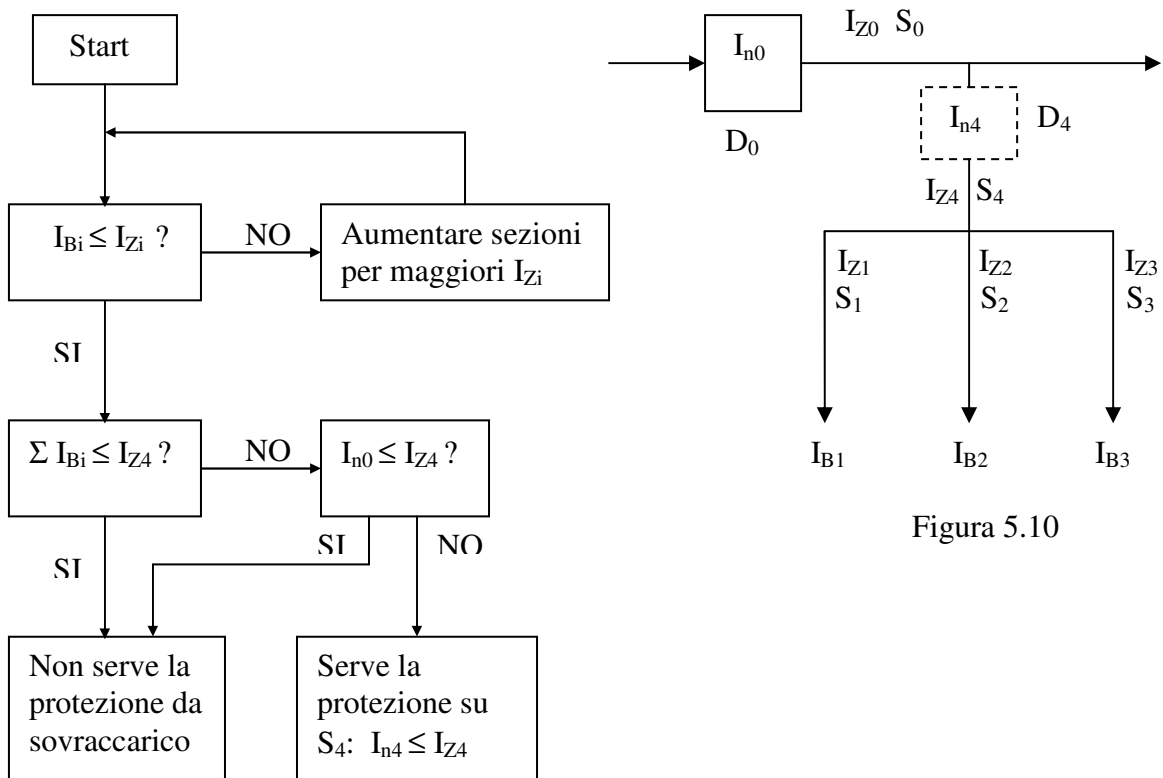


Figura 5.10

Il tutto può essere riassunto nello schema sopra.

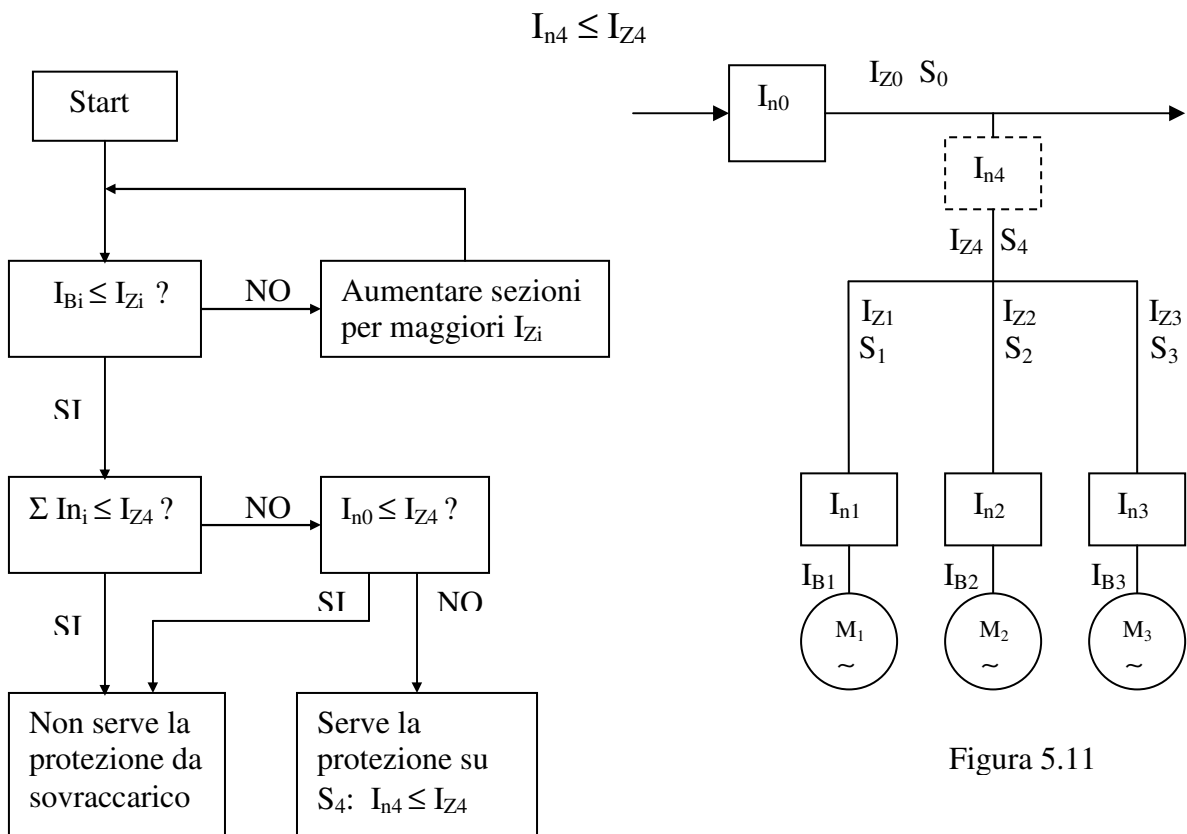
Esempio 2

Da una dorsale a monte (Figura 5.11), con S_0 e I_{Z0} si deriva un'altra dorsale a valle, che alimenta motori, con sezione S_4 e portata I_{Z4} . Ogni macchina

dispone di propria protezione termica contro il sovraccarico con taratura I_{ni} . Normalmente si considera protetta ciascuna linea che arriva al relativo motore, essendo ovviamente la portata I_{Zi} superiore alla corrente di pieno carico di targa I_{Bi} sulla quale si dimensiona l'intervento del termico I_{ni} . La linea con S_4 può essere esente da sovraccarico se:

- la sua portata I_{Z4} supera la somma di tutte le I_{ni} presenti (una per ciascun motore);
- se la sua I_{Z4} è superiore alla I_{n0} già disponibile come protezione a monte sulla dorsale principale.

Altrimenti si deve collocare lungo la S_4 un'ulteriore protezione termica tarata sulla portata I_{Z4} con :



5.7 Sollecitazione termica di un cavo in condizioni di cortocircuito

Non è sufficiente che il dispositivo di protezione sia in grado di interrompere e stabilire (nel caso dell'interruttore) la corrente presunta di cortocircuito; esso deve anche interrompere la corrente in un tempo sufficientemente breve per la protezione termica del cavo. In considerazione della rapidità di intervento dei dispositivi di protezione contro cortocircuito, si può trascurare lo scambio termico tra il cavo e l'ambiente circostante e supporre che tutto il calore sviluppato dalla corrente di cortocircuito vada ad aumentare la temperatura del conduttore, cioè si considera il fenomeno adiabatico.

Nota:

- Nelle norme il fenomeno è ritenuto adiabatico per tempi fino a 5 s.

Un conduttore di resistività ρ , lunghezza l , sezione S , calore specifico c riferito all'unità di volume (come valore medio riferito alle variazioni di temperatura), attraversato dalla corrente $i(t)$ per il tempo dt , subisce un incremento di temperatura $d\theta$ tale da soddisfare il bilancio termico:

$$\rho (l/S) i^2 dt = S l c d\theta$$

Se si indica con:

- t_i il tempo che il dispositivo di protezione impiega ad interrompere la corrente di cortocircuito, tempo d'interruzione (vedi cap.4);
- θ_0 la temperatura iniziale del conduttore quando si verifica il cortocircuito;

- θ la temperatura finale che il conduttore raggiunge dopo il cortocircuito;

integrando si ottiene:

$$\int_0^{t_i} i^2(t) dt = c S^2 \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{d\theta}{\rho}$$

In considerazione della forte escursione termica la resistività ρ non può essere considerata costante con la temperatura; essa vale:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha\theta)$$

dove ρ_0 è la resistività a 0°C e α il relativo coefficiente di variazione con la temperatura. L'integrale assume la forma:

$$\int_0^{t_i} i^2(t) dt = \frac{c S^2}{\rho_0} \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{1}{1 + \alpha\theta} d\theta$$

Posto $1 + \alpha\theta = y$, si ha:

$$\int_{\theta_0}^{\theta} \frac{d\theta}{(1 + \alpha\theta)} = \int_{(1+\alpha\theta_0)}^{(1+\alpha\theta)} \frac{dy}{y} = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1 + \alpha\theta}{1 + \alpha\theta_0}$$

e quindi:

$$\int_0^{t_i} i^2(t) dt = \frac{c S^2}{\alpha \rho_0} \ln \frac{1 + \alpha\theta}{1 + \alpha\theta_0}$$

L'isolante non deve superare la "massima temperatura di cortocircuito θ_f " stabilita nelle norme per la buona conservazione del cavo.

Gli isolanti termoplastici non devono superare la temperatura di rammollimento, in genere 160°C. Per gli isolanti elastomerici è stabilita una temperatura massima di 200÷250 °C che corrisponde, nel tempo mediamente impiegato per eliminare il cortocircuito, ad una perdita di vita del cavo di circa 0,1% della durata di vita del cavo stesso.

L'isolante a contatto con il conduttore assume la stessa temperatura del conduttore; perché al termine del cortocircuito l'isolante non superi la temperatura θ_f supponendo che all'istante iniziale di cortocircuito si trovi alla temperatura di funzionamento θ_0 , deve essere soddisfatta la condizione:

$$\int_0^{t_i} i^2(t) dt \leq K^2 S^2$$

dove K è un coefficiente definito dalla relazione:

$$K^2 = \frac{c}{\alpha \rho_0} \ln \frac{1 + \alpha \theta_f}{1 + \alpha \theta_0}$$

Nella Tabella 3, sono indicati alcuni valori di K, nell'ipotesi che all'istante iniziale di cortocircuito il cavo si trovi alla temperatura massima di funzionamento, $\theta_0 = \theta_s$. Se il cavo ha una temperatura iniziale inferiore alla temperatura massima di funzionamento θ_s , perché quando si verifica il cortocircuito è percorso da una corrente inferiore alla portata relativa alle sue condizioni d'installazione, i valori di K indicati nella Tabella 3 sono a favore della sicurezza.

Natura dell'isolante	Materiale conduttore	
	Rame	Alluminio
PVC ($\theta_0 = \theta_s = 70^\circ\text{C}$; $\theta_f = 160^\circ\text{C}$)	115	74
Gomma naturale ($\theta_0 = \theta_s = 85^\circ\text{C}$; $\theta_f = 200^\circ\text{C}$) Gomma butilica ($\theta_0 = \theta_s = 85^\circ\text{C}$; $\theta_f = 220^\circ\text{C}$)	135	87
Gomma etilenpropilenica, polietilene reticolato ($\theta_0 = \theta_s = 90^\circ\text{C}$; $\theta_f = 250^\circ\text{C}$)	143	87

Tabella 3 – Valori del coefficiente K (CEI 64-8)

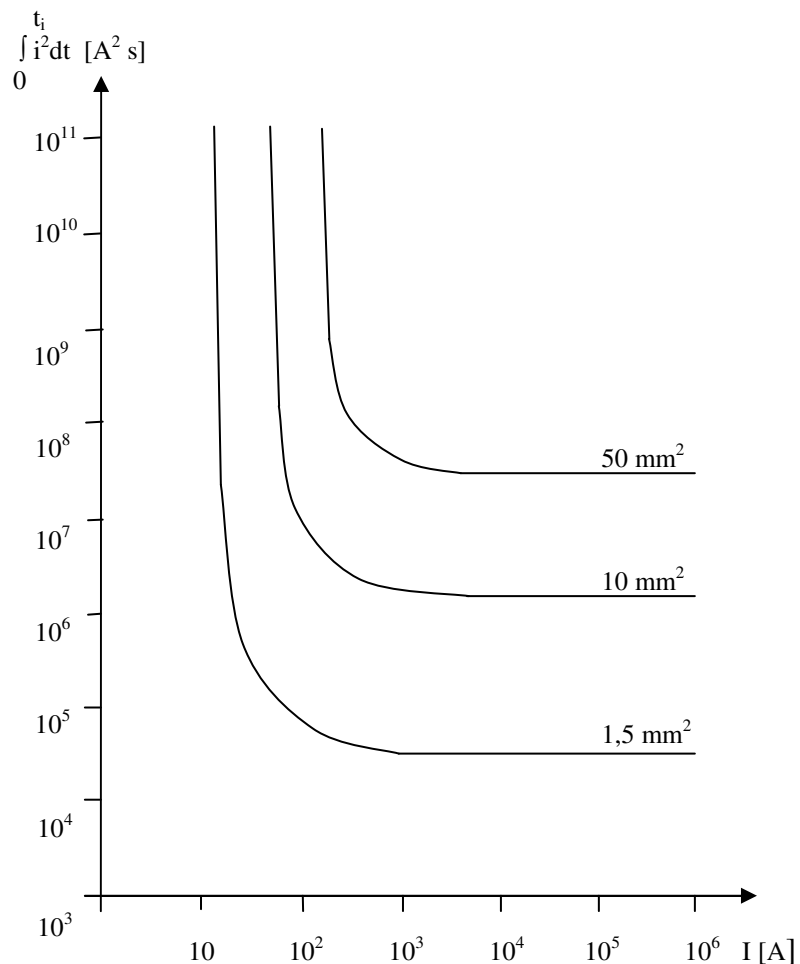
Se il cavo non è volutamente utilizzato alla sua portata, e quindi ha certamente una temperatura iniziale $\theta_0 < \theta_s$, il coefficiente K può essere direttamente calcolato dalla relazione di K^2 ; in tutti gli altri casi si fa riferimento alla tabella vista. Il termine $\int i^2(t)dt$ è denominato (come già detto nel cap.4) integrale di Joule, o anche energia specifica o energia specifica passante, più semplicemente iquadratoti; viene chiamata:

- Energia specifica, poiché rappresenta l'energia sviluppata dalla corrente di cortocircuito su un conduttore di resistenza unitaria.
- Energia specifica passante perché è rappresentativa dell'energia specifica che fluisce attraverso il dispositivo di protezione, prima che questo interrompa la corrente di cortocircuito.

Il termine $K^2 S^2$ indica l'iquadratoti tollerabile in condizioni adiabatiche da un cavo costituito di un certo materiale conduttore (c, ρ_o, α), di sezione S, isolato con un determinato isolante (θ_f) e avente una temperatura iniziale definita

(θ_s). Da rilevare che l'iquadrato tollerabile dal cavo in condizioni adiabatiche:

- aumenta con il quadrato della sezione; e questo perché all'aumentare della sezione diminuisce, con la resistenza, il calore prodotto dalla corrente e nel contempo aumenta la capacità termica del cavo;
- non dipende dalle condizioni di posa del cavo, proprio perché è trascurabile lo scambio termico con l'ambiente circostante.



Iquadrato tollerabile da cavi in rame, isolati in PVC in condizioni adiabatiche e non adiabatiche (cavi tripolari, fissati a parete).

Figura 5.12

Come si può notare dalla Figura 5.12, l'iquadratoti è costante, il fenomeno è cioè adiabatico soltanto alle elevate correnti, perché il dispositivo di protezione interviene in tempi brevissimi, ed è trascurabile lo scambio termico con l'esterno; se questo non è più trascurabile, l'iquadratoti tollerabile dal cavo aumenta fino a diventare infinito per correnti pari alla portata del cavo, quando tutto il calore è ceduto all'ambiente circostante e cioè a regime.

5.8 Requisiti del dispositivo di protezione contro il cortocircuito

Il dispositivo di protezione contro cortocircuito deve innanzi tutto avere una corrente nominale I_n uguale, o maggiore, della corrente d'impiego I_B del circuito:

$$I_B \leq I_n$$

in modo da garantire la continuità del servizio.

Il dispositivo di protezione contro cortocircuito, deve inoltre avere un potere d'interruzione estremo I_{cu} non inferiore alla corrente presunta di cortocircuito nel punto d'installazione. Questa condizione assume in genere maggior importanza per gli interruttori automatici che non per i fusibili a fusione chiusa: i primi hanno infatti un potere d'interruzione di gran lunga inferiore ai secondi. Il dispositivo di protezione contro cortocircuito deve infine intervenire con una rapidità tale che l'isolante del cavo non raggiunga la

massima temperatura di cortocircuito θ_f , qualunque sia il punto del cavo in cui si verifichi il cortocircuito. Deve cioè essere soddisfatta la condizione:

$$\int_0^{t_i} i^2(t) dt \leq K^2 S^2 \quad (5)$$

per un cortocircuito in un punto qualsiasi della condotta. Al variare del punto di cortocircuito cambia la corrente di cortocircuito e il corrispondente tempo t_i che il dispositivo di protezione impiega ad aprire il circuito. Occorre pertanto stabilire quali siano i punti di cortocircuito più gravosi ai fini della sollecitazione termica del cavo; e questo naturalmente dipende dalla caratteristica d'intervento del dispositivo di protezione.

5.8.1 I Cortocircuiti

In un circuito trifase o trifase più neutro si può considerare un cortocircuito trifase, fase-fase o fase-neutro. C'è da domandarsi allora quali di questi eventi sia da prendere in considerazione ai fini della valutazione della sollecitazione termica del cavo.

Come è noto, la corrente di cortocircuito più elevata è in genere quella di cortocircuito trifase, segue in ordine decrescente quella di cortocircuito fase-fase e quella di cortocircuito fase-neutro.

All'inizio di una condotta si ha la massima corrente di cortocircuito, e se protetta con interruttori automatici, la condizione (5) è tanto più gravosa quanto maggiore è la corrente (l'energia termica lasciata passare aumenta all'aumentare della corrente, Figura 5.12, nella zona delle alte correnti), e quindi si considera la corrente di cortocircuito trifase.

Al fondo della linea, viceversa, la sollecitazione termica del cavo (l'energia termica lasciata passare dal dispositivo di protezione) è tanto maggiore quanto minore è la corrente; in tal caso occorre considerare:

- per una linea trifase, un cortocircuito fase-fase;
- per una linea trifase con neutro, un cortocircuito fase-neutro; se il conduttore di neutro ha sezione minore di quella del conduttore di fase (e quindi anche K^2S^2 minore), la condizione (5), deve essere ovviamente riferita al conduttore di neutro.

Per quanto riguarda un cortocircuito verso terra occorre distinguere i sistemi TT, TN, e IT.

Nei sistemi TT un guasto a terra non costituisce un cortocircuito a causa delle resistenze di terra R_T , del dispersore dell'impianto di terra della cabina di trasformazione, e R_N del dispersore dell'impianto di terra delle masse. La corrente verso terra, di valore non noto a priori, è di modesto valore: i dispositivi precedentemente individuati per la protezione contro sovraccarico

e contro cortocircuito tra conduttori attivi sono convenzionalmente ritenuti sufficienti a fronteggiare anche la sovracorrente che può stabilirsi verso terra.

Nei sistemi TN un guasto a terra costituisce un cortocircuito tra conduttore di fase e conduttore di protezione. Il valore della corrente di guasto è noto a priori, anche perché deve soddisfare la condizione relativa all'impedenza dell'anello di guasto.

Nei sistemi IT un primo guasto a terra non provoca sovracorrenti; al secondo guasto a terra si stabilisce però una sovracorrente di doppio guasto.

5.8.2 Interruttori automatici come protezione da cortocircuito

La Figura 5.13 mostra l'iquadratoti attraverso un interruttore automatico in funzione della corrente presunta di cortocircuito (valore efficace della componente simmetrica).

L'iquadratoti diminuisce in corrispondenza dello sgancio magnetico; successivamente aumenta poiché il tempo d'intervento rimane pressoché costante all'aumentare della corrente.

Dal confronto tra l'iquadratoti lasciato fluire dall'interruttore e quello tollerabile da un cavo in condizioni adiabatiche, Figura 5.12, risulta che la condizione:

$$\int_0^{t_i} i^2(t) dt \leq K^2 S^2$$

è soddisfatta per tutti i valori di corrente compresi tra le correnti I_p e I_q corrispondenti all'intersezione tra la retta che indica l'iquadratoti tollerabile per il cavo e la curva dell'iquadratoti relativo all'interruttore automatico.

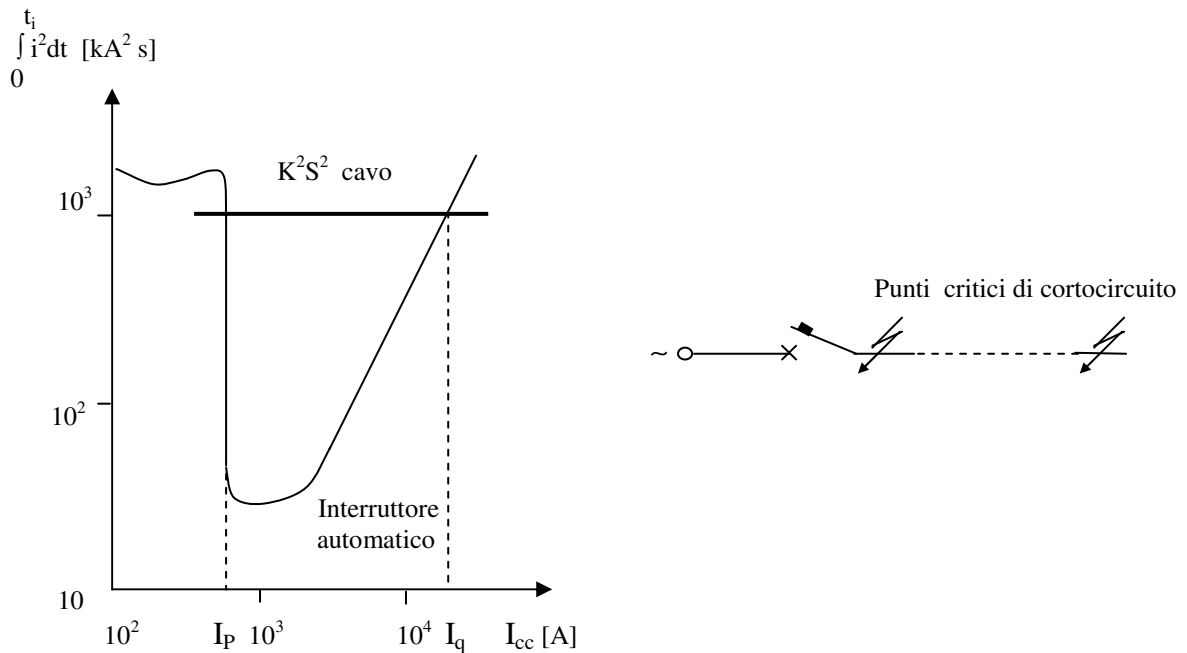


Figura 5.13

L'interruttore automatico protegge il cavo entro un intervallo di correnti definito; occorre pertanto verificare che le correnti di cortocircuito che possono aversi cadano entro questo intervallo. In altri termini, occorre verificare che la condizione (5) sia verificata per un cortocircuito in fondo alla linea (corrente minima), e per un cortocircuito immediatamente a valle dell'interruttore (corrente massima).

La condizione (5) per un cortocircuito all'inizio della linea è in realtà una condizione limite, poiché non si avrebbe in tal caso alcun tratto di cavo da

proteggere; né avrebbe interesse pratico porre un limite all'invecchiamento precoce di un cavo già danneggiato da un cortocircuito nei primi metri a valle dell'interruttore, poiché tale tratto andrebbe comunque sostituito. C'è tuttavia interesse a porre un limite all'iquadratoti passante attraverso il dispositivo di protezione, in modo che il cavo percorso dalla corrente di cortocircuito non costituisca una possibile causa di incendio; bisognerebbe allora riferirsi ad un coefficiente K più grande di quello precedentemente fissato per la buona conservazione dei cavo, e variabile con le condizioni ambientali nel quale il cavo è posato, con particolare riferimento alla presenza nelle immediate vicinanze del cavo di materiali combustibili o infiammabili. Questo nuovo valore di K variabile con le infinite situazioni ambientali, sarebbe difficilmente individuabile e si preferisce pertanto attenersi, a favore della sicurezza, al valore di K relativo alla buona conservazione del cavo.

5.8.3 Fusibili come protezione da cortocircuito

L'iquadratoti, lasciato fluire nel circuito da un fusibile, decresce all'aumentare della corrente di cortocircuito, fino a rimanere pressoché costante per elevati valori della corrente di cortocircuito (valore efficace della componente simmetrica).

In Figura 5.14, l'iquadratoti lasciato passare da un fusibile è confrontato con l'iquadratoti K^2S^2 tollerabile da un cavo in condizioni adiabatiche; è immediato concludere dalla Figura che la condizione:

$$\int_0^{t_i} i^2(t)dt \leq K^2 S^2$$

è soddisfatta, cioè il cavo subisce una sollecitazione termica accettabile, per tutte le correnti superiori alla corrente I_m .

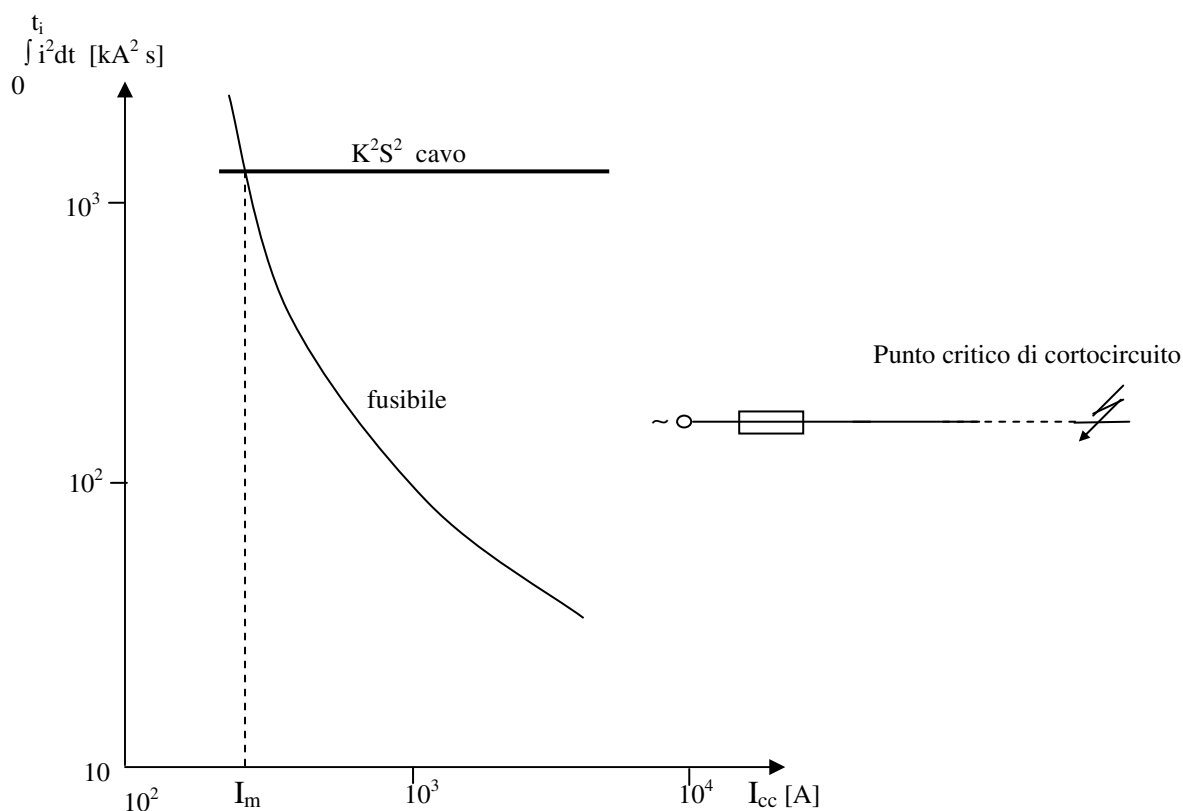


Figura 5.14

Per correnti inferiori a I_m l'energia passante attraverso il fusibile diventa eccessiva per la buona protezione del cavo. Il fusibile protegge il cavo tanto meglio quanto maggiore è la corrente di cortocircuito; il punto più critico è perciò al termine del circuito, dove la corrente di cortocircuito ha il valore minimo. In conclusione, se il dispositivo di protezione contro cortocircuito è un fusibile, è sufficiente che la condizione (5) sia soddisfatta per un cortocircuito in fondo alla linea, perché allora, sicuramente, è soddisfatta per un cortocircuito in qualsiasi altro punto della linea. Va da sé, che un fusibile protegge contro cortocircuito un determinato cavo solo per lunghezze inferiori a quella corrispondente alla corrente di cortocircuito I_m ; per lunghezze superiori a tale limite, la corrente di cortocircuito diventa troppo piccola e il fusibile non è più in grado di proteggere il cavo.

5.8.4 Necessità e ubicazione del dispositivo di protezione contro Cortocircuito

Ogni circuito deve essere protetto contro le correnti di cortocircuito a meno che la sorgente non sia in grado di erogare correnti pericolose per la buona conservazione del cavo.

Anche per il cortocircuito, come già detto per il sovraccarico, la protezione contro le correnti di cortocircuito può essere omessa quando sia economicamente accettabile che il cavo, o una sua parte, si deteriori e ciò non

possa provocare danni all'ambiente circostante, ad esempio per certi cavi interrati (CEI 11-17, 64-8).

Come già detto per il sovraccarico, è bene evitare l'installazione di dispositivi di protezione contro cortocircuito sui circuiti:

- di alimentazione di elettromagneti di sollevamento,
- di eccitazione di macchine rotanti,
- secondari di trasformatori di corrente.

Il dispositivo di protezione contro cortocircuito deve essere ovviamente ubicato all'inizio della condotta. E' tuttavia consentita una certa elasticità nella dislocazione del dispositivo di protezione contro cortocircuito entro i primi tre metri di condotta; la condotta deve però essere realizzata in modo da ridurre al minimo il pericolo di cortocircuito e il danno per le cose e le persone, in particolare non deve trovarsi in vicinanza di materiali combustibili; in tal modo il rischio relativo a un cortocircuito è accettabile, poiché il danno probabile è limitato e il pericolo di cortocircuito è ridotto, essendo il tratto non protetto di condotta molto corto e/o adeguatamente realizzato.

5.9 Protezione contro il sovraccarico e il cortocircuito

La protezione contro il sovraccarico e contro il cortocircuito può essere assicurata da uno stesso dispositivo o da dispositivi distinti.

Nel primo caso c'è da chiedersi quali requisiti debba possedere l'unico dispositivo di protezione, nel secondo caso si pongono problemi di coordinamento tra i due dispositivi di protezione.

5.9.1 Dispositivo di protezione unico

Un unico dispositivo di protezione contro sovraccarico e contro cortocircuito deve soddisfare l'insieme dei requisiti indicati per la protezione contro sovraccarico e contro cortocircuito, e cioè:

per sovraccarico:

$$(c_1) \quad I_B \leq I_n \leq I_Z$$

$$(c_2) \quad I_f \leq 1,45 I_Z$$

per cortocircuito:

$$(c_3) \quad I_B \leq I_n$$

$$(c_4) \quad \int_0^{t_i} i^2(t) dt \leq K^2 S^2$$

(c₅ Il potere di interruzione estremo del dispositivo protezione deve essere maggiore della corrente di cortocircuito presunta nel punto d'installazione.

(c₆ Il dispositivo di protezione deve essere ubicato all'inizio della linea.

La condizione c₁ comprende la condizione c₃. Si può inoltre ritenere che se è soddisfatta la condizione c₂ sia anche soddisfatta la condizione c₄ per un cortocircuito in fondo alla linea.

Si ammette cioè che un dispositivo adatto alla protezione del cavo per correnti di poco superiori alla sua portata, intervenga in tempo utile per proteggere il cavo anche in occasione di un cortocircuito in fondo alla linea, dove si ha la più piccola corrente di cortocircuito.

Da quanto sopra si deduce che:

- un fusibile, scelto per la protezione contro sovraccarico, è anche idoneo ad assicurare la protezione contro cortocircuito, purché sia ubicato all'inizio della linea ed abbia potere d'interruzione maggiore della corrente presunta di cortocircuito nel punto d'installazione (come è in genere il caso);

- un interruttore, scelto per la protezione contro sovraccarico, è anche idoneo ad assicurare la protezione contro cortocircuito, purché sia ubicato all'inizio della linea, abbia potere d'interruzione maggiore della corrente presunta di cortocircuito nel punto d'installazione, ed inoltre soddisfi la condizione:

$$\int_0^{t_i} i^2(t)dt \leq K^2 S^2$$

per un cortocircuito all'inizio della linea.

5.9.2 Dispositivi di protezione distinti

Se la protezione contro sovraccarico e cortocircuito è assicurata da dispositivi distinti, questi devono essere coordinati in modo che il dispositivo di protezione contro cortocircuito protegga quello contro sovraccarico durante un cortocircuito. In altri termini, l'iquadratoti passante attraverso il dispositivo di protezione contro cortocircuito deve essere tollerabile per il dispositivo contro il sovraccarico. Esempio tipico di dispositivi distinti di protezione contro sovraccarico e cortocircuito è quello dei contattori con sganciatore termico (avviatori) associati a fusibili.

5.10 Considerazioni finali

In teoria, per verificare se un cavo è completamente protetto contro le sovracorrenti (sovraccarico e cortocircuito) bisogna accertare se la caratteristica d'intervento del dispositivo di protezione rimane al di sotto della curva di sovraccaricabilità del cavo. In altri termini, per qualsiasi valore di

sovracorrente, l'iquadratoti passante attraverso il dispositivo di protezione non dovrebbe superare quello tollerabile dal cavo.

In pratica, si è fatto distinzione tra sovraccarico e cortocircuito indicando separatamente le condizioni da soddisfare. I requisiti per la protezione contro cortocircuito sono stati stabiliti in condizioni adiabatiche, corrispondenti al tratto orizzontale delle curve dell'iquadratoti tollerabile dai cavi (Figura 5.12).

I requisiti per la protezione contro sovraccarico sono stati riferiti a correnti prossime alla portata I_z del cavo, corrispondente al tratto verticale delle curve dell'iquadratoti tollerabile dai cavi, Figura 5.12. Nel tratto intermedio delle curve di Figura 5.12, non si è in condizioni adiabatiche, anche se le correnti sono molto maggiori della portata del cavo; il dispositivo di protezione contro il sovraccarico dovrebbe intervenire in tempi sufficientemente brevi affinché la perdita di vita del cavo sia accettabile; in genere questa verifica non viene condotta, poiché si ritiene che le usuali caratteristiche di intervento dei dispositivi a tempo inverso siano a tal fine abbastanza soddisfacenti. D'altronde il rischio sembra accettabile, poiché il danno si traduce in genere in una perdita di vita del cavo non molto superiore al limite convenzionale dello 0,1% preso come riferimento per stabilire la curva di sovraccaricabilità del cavo. Le correnti corrispondenti al tratto intermedio suddetto, possono essere provocate da un sovraccarico o da un guasto di resistenza non trascurabile (cortocircuito non franco); in questo caso è proprio il dispositivo

di protezione contro sovraccarico, che può proteggere il cavo, se installato all'inizio del cavo stesso.

In conclusione, uno o più dispositivi di protezione, che soddisfino l'insieme dei requisiti separatamente indicati per il sovraccarico e per il cortocircuito, proteggono in modo soddisfacente la condotta, qualunque sia l'origine e il valore della sovracorrente.

5.11 Protezione dei conduttori di fase e di neutro

Definiti i requisiti dei dispositivi di protezione contro le sovracorrenti, rimane da stabilire se tali dispositivi vadano installati su tutti i conduttori, di fase e di neutro, o soltanto su una parte di essi. A tal fine, occorre distinguere i sistemi TT e TN dai sistemi IT.

5.11.1 Sistemi TT e TN

5.11.1.1 Protezione dei conduttori di fase

Nei circuiti fase-fase un dispositivo su una sola fase, sarebbe sufficiente per interrompere la corrente di cortocircuito tra le fasi, ma l'altra fase non sarebbe protetta per un cortocircuito a terra. Lo stesso dicasi per i circuiti trifasi con una fase non protetta. Tutti i conduttori di fase devono essere pertanto protetti, salvo quanto di seguito indicato.

- Se il circuito è protetto anche con un interruttore differenziale, come è generalmente il caso nei sistemi TT e occasionalmente nei sistemi TN, la corrente verso terra è interrotta dall'interruttore differenziale. Se questo soddisfa le condizioni per la protezione contro cortocircuito, in particolare ha un potere d'interruzione differenziale superiore alla corrente presunta di cortocircuito monofase a terra, può essere omesso il dispositivo di protezione su un conduttore di fase.

Nei circuiti quadripolari occorre invece installare un dispositivo di protezione su tutti i conduttori di fase, per fronteggiare un cortocircuito fase-neutro, che non sarebbe sentito da un eventuale interruttore differenziale.

5.11.1.2 Protezione del conduttore di neutro

E' opportuno innanzitutto osservare che nei sistemi TN un guasto a terra del conduttore di neutro non dà origine a sovracorrenti; nei sistemi TT questo accade solo eccezionalmente, quando il neutro assume una tensione verso terra in condizioni anomale. Nei sistemi TN e TT non verrà pertanto considerato il caso di sovracorrente prodotta da un guasto a terra del conduttore di neutro.

Nei circuiti fase-neutro, è perciò sufficiente un dispositivo di protezione sul conduttore di fase per proteggere il circuito contro le sovracorrenti, ad esempio un fusibile o un interruttore bipolare con un solo polo protetto.

Nei circuiti quadripolari, i dispositivi di protezione posti sui conduttori di fase devono proteggere il conduttore di neutro contro un cortocircuito fase-neutro. Se il conduttore di neutro ha sezione S_N inferiore a quella del conduttore di fase, i dispositivi di protezione installati sui conduttori di fase devono essere scelti in modo da soddisfare la condizione:

$$\int_0^{t_i} i^2(t)dt \leq K^2 S_N^2$$

Nei confronti di un sovraccarico, occorre distinguere se la sezione del conduttore di neutro S_N è uguale o inferiore a quella del conduttore di fase S_F . Se le due sezioni sono uguali $S_N = S_F$ i dispositivi di protezione contro sovraccarico installati sui conduttori di fase sono idonei anche per la protezione del conduttore di neutro, poiché la corrente di squilibrio difficilmente supera la più elevata tra le correnti di fase. Se $S_N < S_F$ vuol dire che è stato previsto un carico abbastanza equilibrato, cioè la risultante delle correnti sulle fasi, che percorre il neutro, non può essere maggiore della sua portata. Se così non fosse si dovrebbe utilizzare un conduttore di neutro di sezione uguale a quella di fase. Essendo il carico sostanzialmente equilibrato, nel senso suddetto, non occorre proteggere il conduttore di neutro contro il sovraccarico, neanche se di sezione inferiore a quella di fase.

In presenza di correnti distorte, le armoniche possono dare origine sul conduttore di neutro a una corrente risultante di valore elevato; in tal caso il conduttore di neutro deve essere sempre protetto contro il sovraccarico, qualunque sia la sua sezione.

In conclusione, in presenza di armoniche si deve sempre proteggere il conduttore di neutro; in assenza di armoniche non è mai necessario.

Inoltre, se necessario, il conduttore di neutro nei circuiti quadripolari non deve essere protetto con un fusibile. Infatti a seguito dell'intervento del fusibile sul conduttore di neutro gli apparecchi si trovano alimentati ad una tensione diversa da quella stellata, Figura 5.15. Se è necessario proteggere il conduttore di neutro, occorre pertanto impiegare un interruttore quadripolare con quattro poli protetti.

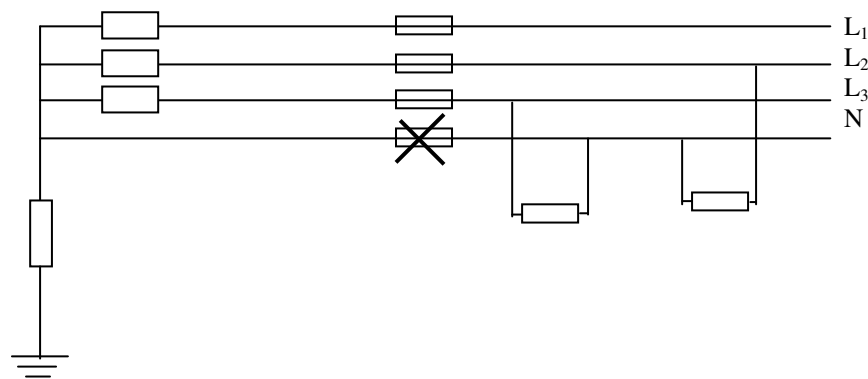


Figura 5.15

Nei sistemi TN-C il conduttore di neutro funge anche da conduttore di protezione ed è vietato interrompere il conduttore PEN (protezione e neutro), anche se si interrompono contemporaneamente le fasi. Nei casi particolari in cui il conduttore PEN vada protetto contro il sovraccarico (in un sistema squilibrato e/o in presenza di armoniche), occorre disporre sul conduttore PEN un elemento E, sensibile alla corrente, che determini l'apertura di un interruttore tripolare sulle fasi Figura 5.16.

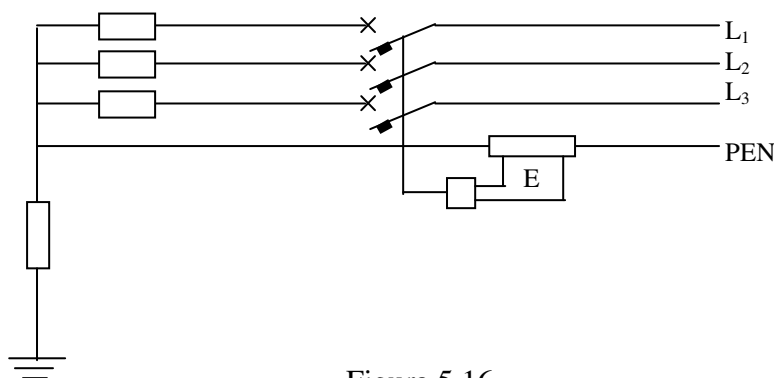


Figura 5.16

5.11.2 Sistemi IT

Come è noto nei sistemi IT un primo guasto a terra non determina l'intervento delle protezioni, e può permanere per un tempo indefinito. Se successivamente si verifica un ulteriore guasto a terra su un'altra fase di un altro circuito, si stabilisce tra i due circuiti, per il tramite dei conduttori di protezione, una sovracorrente di doppio guasto a terra. Non è possibile prevedere una protezione completa contro la sovracorrente di doppio guasto a

terra, poiché di valore sconosciuto, essendo ignoti a priori i due circuiti affetti da guasto a terra. Nei sistemi IT occorre pertanto mettere in atto provvedimenti più restrittivi che nei sistemi TN e TT, nell'intento di limitare i danni che potrebbero provenire da una sovracorrente di doppio guasto a terra. Ad esempio, considerando la Figura 5.17, un doppio guasto a terra interessa i circuiti A e B.

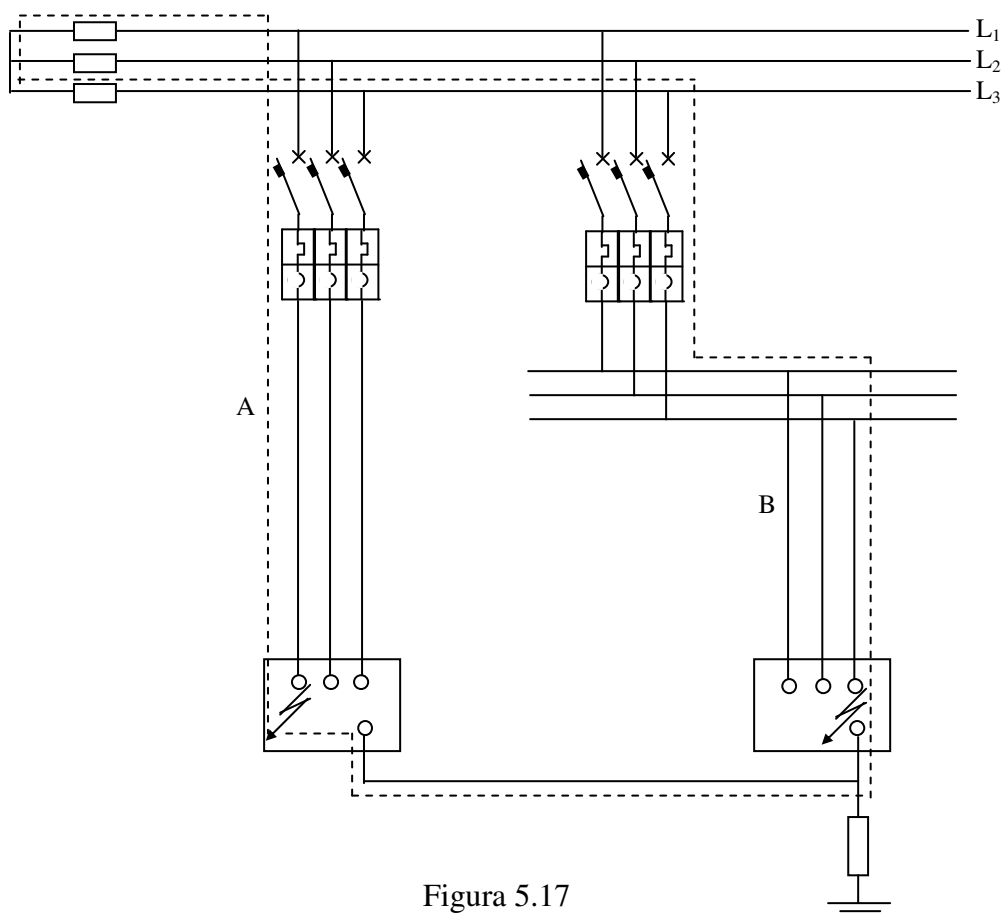


Figura 5.17

Il circuito B, non protetto contro il sovraccarico perché ad esempio è un circuito luce, può essere danneggiato in modo irrimediabile. Infatti i

dispositivi di protezione contro le sovracorrenti sul circuito A, che è protetto per qualsiasi corrente, e quelli per la protezione contro cortocircuito sul circuito B non sono necessariamente idonei per la protezione del circuito B contro la sovracorrente di doppio guasto. Donde la necessità, nei sistemi IT, di proteggere indistintamente tutti i circuiti contro il sovraccarico.

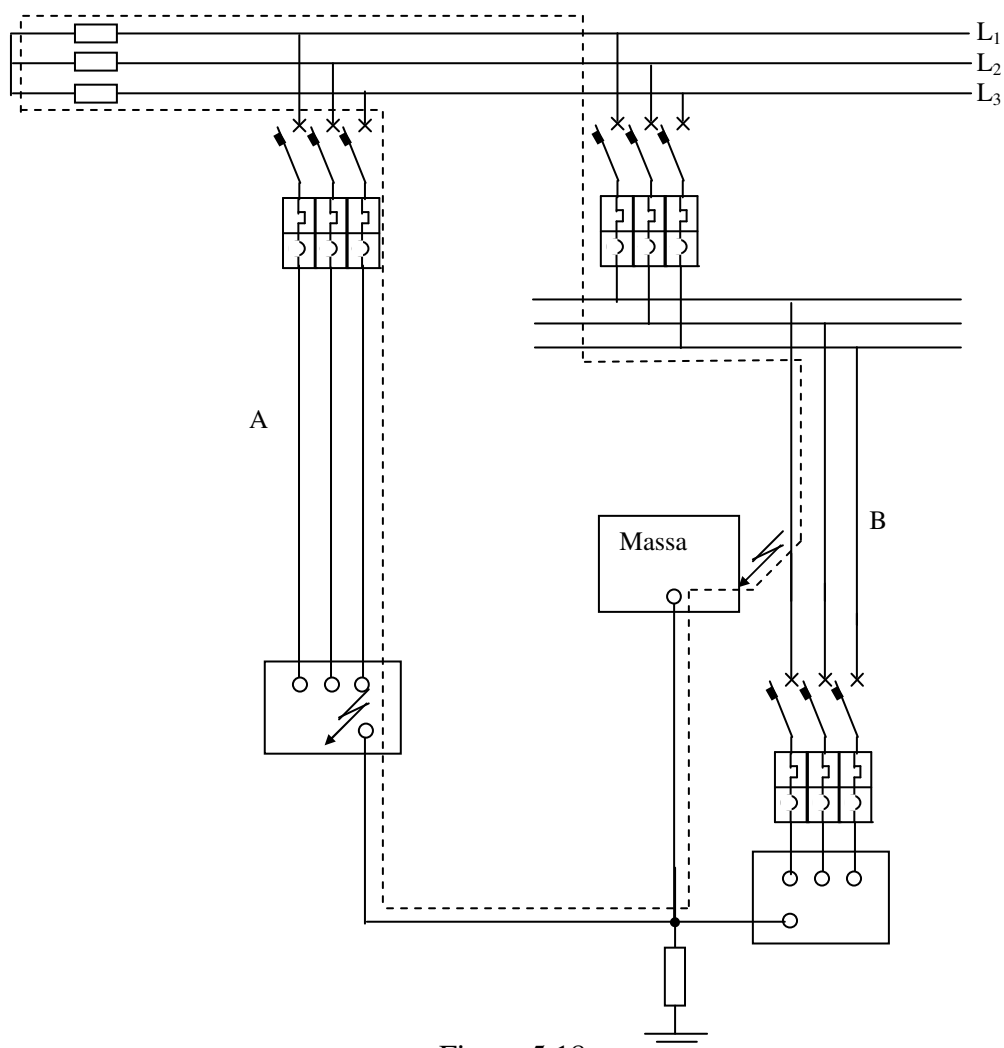


Figura 5.18

Altro esempio è quello di Figura 5.18 dove il circuito B è protetto contro il sovraccarico, ma il dispositivo di protezione è situato al termine della

conduttura, esso non può intervenire se uno dei guasti a terra si verifica in un punto della conduttura a monte del dispositivo stesso. Per questo motivo, nei sistemi IT, il dispositivo di protezione contro sovraccarico deve essere installato all'inizio della conduttura.

Nei sistemi TT e TN uno dei conduttori di fase può non essere dotato del dispositivo di protezione contro le sovracorrenti, se a monte è installato un differenziale e la linea è trifase senza neutro.

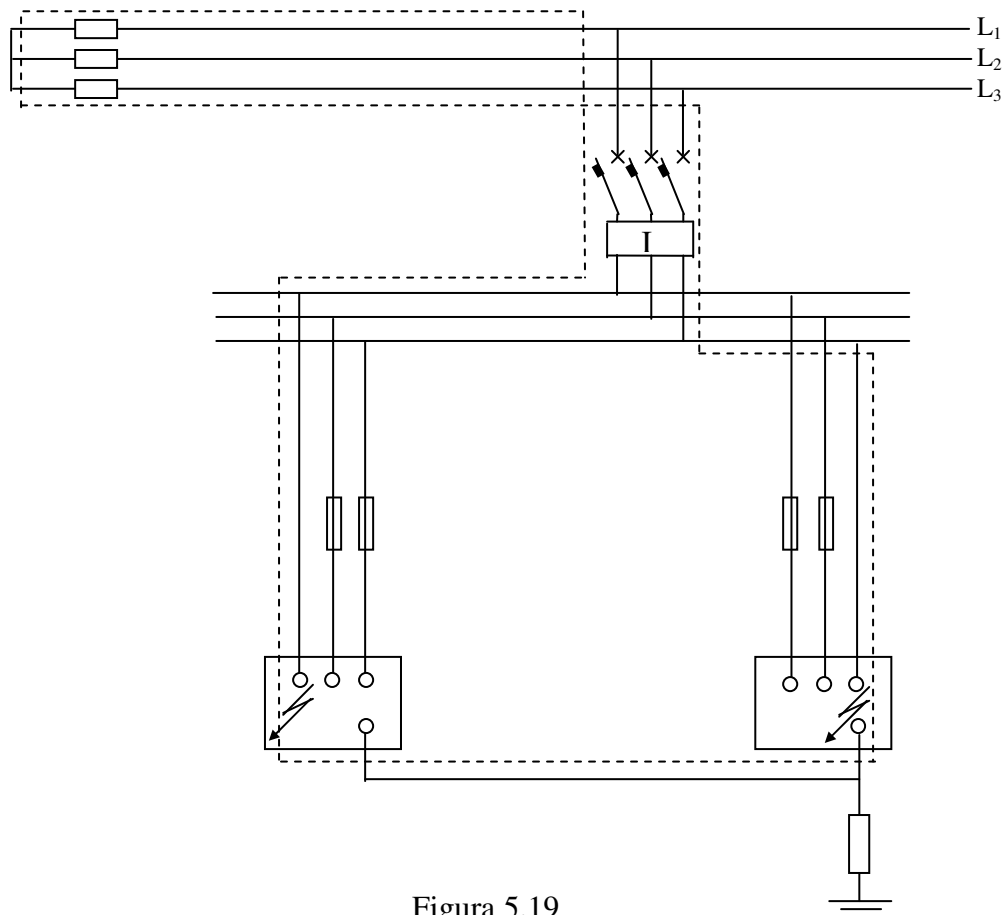


Figura 5.19

Questo non va più bene nei sistemi IT: infatti, come mostra la Figura 5.19, una sovracorrente di doppio guasto a terra può percorrere il conduttore di fase non protetto senza che l'interruttore differenziale possa intervenire.

Per questa ragione, nei sistemi IT, i dispositivi di protezione contro le sovracorrenti devono essere installati su tutti i conduttori di fase, indipendentemente dalla presenza di interruttori differenziali.

Nei circuiti fase-neutro dei sistemi IT esiste un ulteriore problema. Se la protezione è realizzata per mezzo di fusibili, come in Figura 5.20, e a seguito di una sovracorrente di doppio guasto fonde il solo fusibile sul conduttore di neutro, l'apparecchio rimane alimentato alla tensione concatenata anziché stellata.

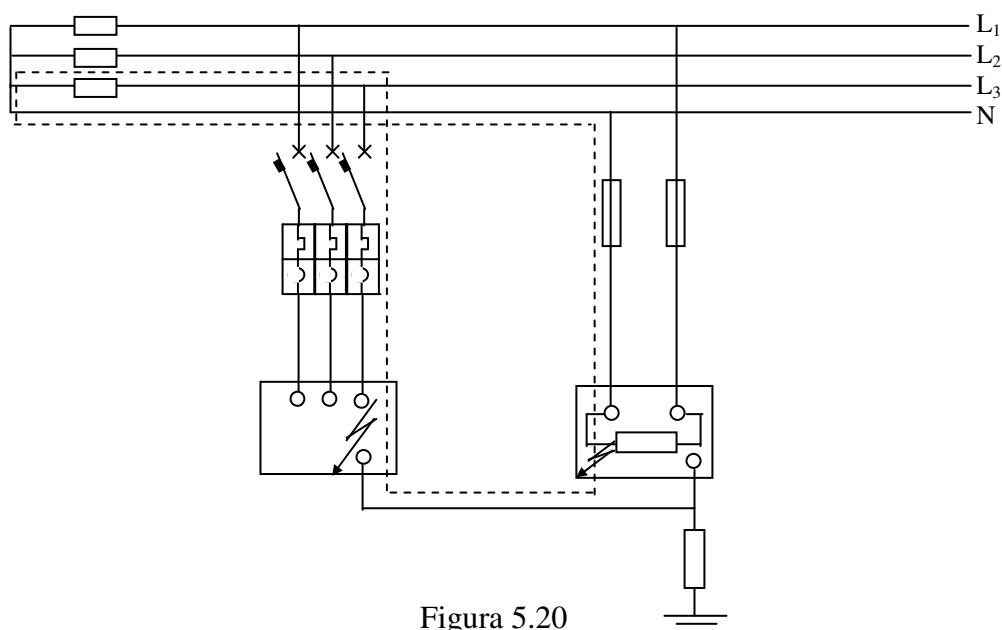


Figura 5.20

La corrente di guasto è limitata dalla impedenza propria dell'apparecchio e può permanere per un tempo indefinito senza determinare l'intervento del fusibile sul conduttore di fase. Ne consegue che nei sistemi IT il dispositivo di protezione contro le sovracorrenti deve essere multipolare (non si ammette la presenza di un fusibile sul conduttore di neutro Figura 5.21) non solo nei circuiti trifase con neutro (come detto a proposito della protezione dei conduttori di fase), ma anche nei circuiti bipolari fase-neutro.

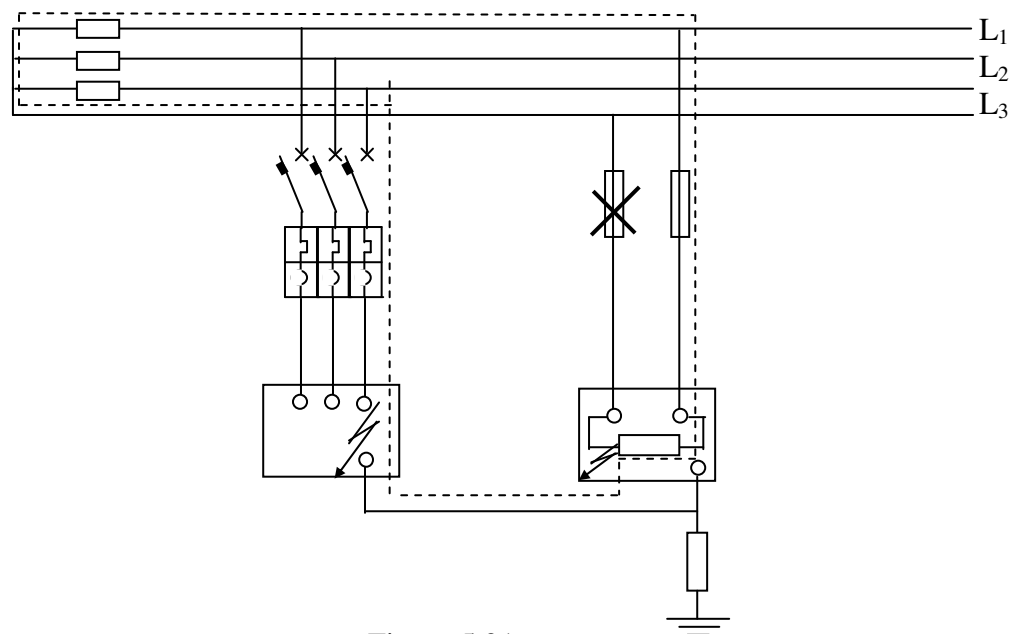


Figura 5.21

Nella Tabella viene riassunto quanto precedentemente esposto sulla necessità di installare un dispositivo di protezione sui conduttori di fase e di neutro nei sistemi TT, TN e IT.

Sistemi	Circuiti										
	Fase - Neutro		Fase - Fase		Trifase			Trifase con neutro			
	F	N	F	F	F	F	F	F	F	F	N
TN-C	P	no	P	P ²	P	P	P ²	P	P	P	no ¹
TN-S	P	-	P	P ²	P	P	P ²	P	P	P	-
TT	P	-	P	P ²	P	P	P ²	3,4			
IT	P	P ³	P	P	P	P	P	3,4	P	P	P
									P	P	P
											P ³

Tabella 4: Necessità dei dispositivi di protezione contro sovracorrenti sui conduttori di fase e neutro

LEGENDA:

F conduttore di fase.

N conduttore di neutro.

P è richiesto un dispositivo di protezione.

- non è richiesto un dispositivo di protezione; esso peraltro non è vietato.

no è vietato inserire un dispositivo di protezione che interrompa il conduttore PEN.

1: In presenza di armoniche che possono sovraccaricare il conduttore PEN si deve disporre sul conduttore PEN un rivelatore di sovracorrente, che provochi l'interruzione dei conduttori di fase ma non del conduttore PEN.

2: Un dispositivo di protezione contro le sovracorrenti non è richiesto su un conduttore di fase, se il circuito è protetto con un idoneo dispositivo differenziale.

3: Il conduttore neutro non deve aprirsi prima e non deve chiudersi dopo i conduttori di fase.

4: Un dispositivo di protezione sul conduttore di neutro è richiesto solo in presenza di armoniche che lo possano sovraccaricare.

5.12 Un Problema pratico

Superato l'ostacolo rappresentato dal puro confronto numerico tra la I_{cc} nel punto di installazione e l' I_{cu} (potere d'interruzione) dell'interruttore ($I_{cc} < I_{cu}$), si deve concentrare l'attenzione sull'energia passante.

Alle alte correnti si cerca (come già detto precedentemente) l'intersezione tra le curve che rappresentano l'iquadratoti degli interruttori (fornite dal costruttore) e dei cavi (tratto adiabatico). Da tale confronto verrà fuori, per ogni coppia cavo interruttore, una e una sola determinata corrente massima di corto, fino alla quale la protezione è garantita e oltre mancherà la protezione,

e cioè la curva dell'interruttore passa sopra alla K^2S^2 del cavo. Con questa corrente si farà quindi il confronto con la più alta corrente che viene calcolata sull'impianto e che sarà ovviamente ancora la I_{cc} presunta di corto simmetrico ai morsetti dell'interruttore già calcolata e utilizzata nel confronto con I_{cu} .

Quanto detto è in sostanza una verifica della capacità di protezione dell'interruttore, che si era già scelto secondo la prima condizione e le specifiche del sovraccarico (se serve da doppia protezione). Come avviene per molte verifiche, talvolta l'esito può essere negativo.

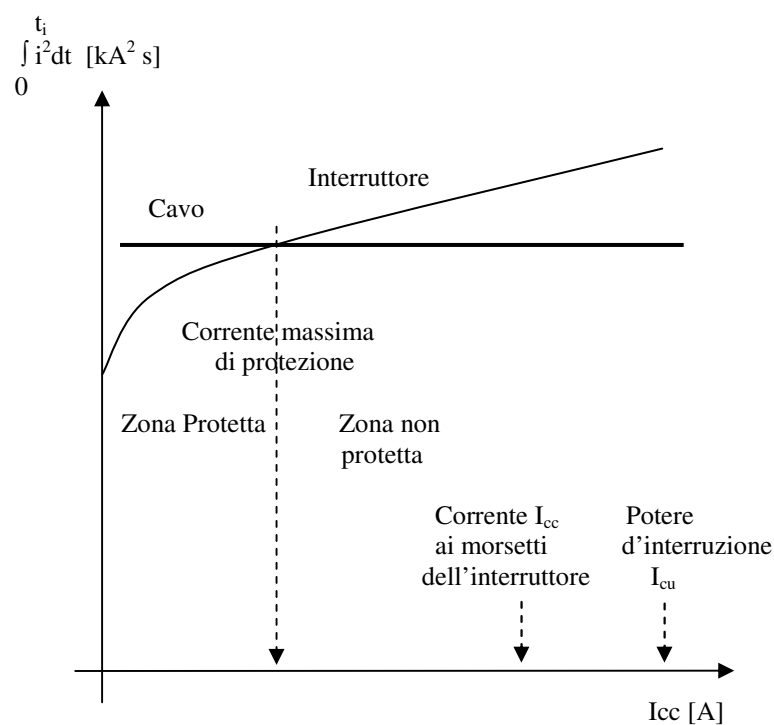


Figura 5.22

Si può riscontrare cioè, come riportato nella Figura 5.22, che la corrente ai morsetti, pur essendo inferiore al potere d'interruzione I_{cu} , supera la corrente massima di protezione, cioè l'interruttore non riesce a proteggere il cavo per

tutte le correnti. La soluzione a questo problema, si può ottenere intervenendo con:

- un fusibile,
- sul cavo,
- sull'interruttore.

Fusibile

Per risolvere il problema, una “chance” la offre ancora il vecchio fusibile. La sua curva di iquadratoti, si presta egregiamente ad entrare in campo. Il suo intervento, Figura 5.23, inizia oltre la corrente relativa al punto d'intersezione tra la propria curva e quella dell'interruttore, corrente I_b di scambio.

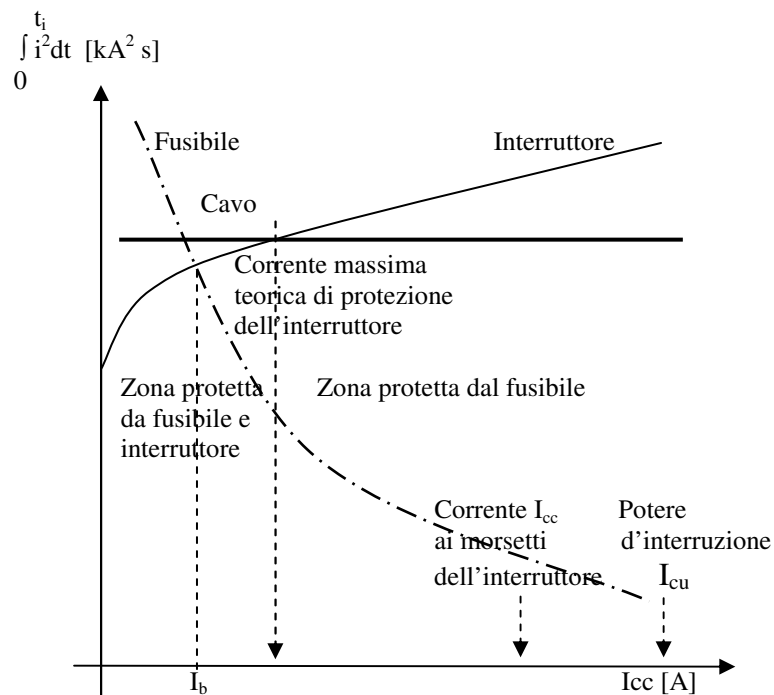


Figura 5.23

Questa corrente si individua facilmente sovrapponendo i due grafici come in Figura. Essendo in questo dominio la retta del cavo largamente superiore e lontana da quella del fusibile, che inoltre è discendente, da quel valore di corrente in poi ci si può attendere, in caso di corto, una fulminea fusione del fusibile con troncamento secco della corrente e con ottima garanzia di sicurezza per il cavo.

Cavo

Se il cavo finora studiato (A) non riesce a reggere il colpo di calore fuoriuscito dall'interruttore nel caso di corto peggiore, si può sostituire con un altro cavo (B) di sezione maggiore o con isolante più pregiato (più alto K^2S^2), Figura 5.24.

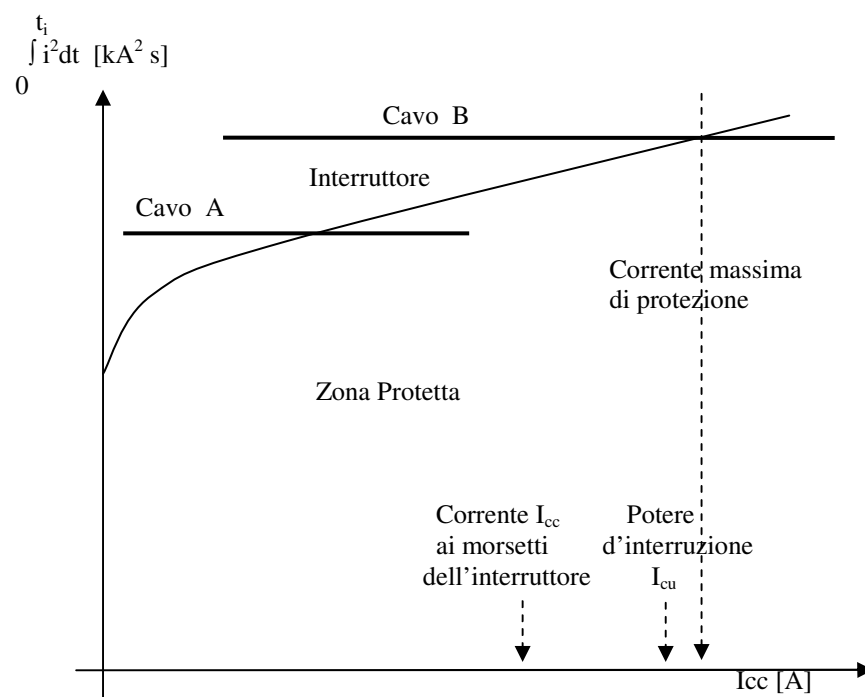


Figura 5.24

La scelta è equivalente giacché in entrambi i casi la nuova retta si sarà alzata. La decisione risponderà alle normali esigenze economiche o contingenti dovute, per esempio, alla disponibilità di cavo nel magazzino dell'installatore.

Interruttore

Mantenendo lo stesso cavo iniziale (A) si può soddisfare la condizione cambiando interruttore. Si dovrà anche qui decidere ulteriormente tra due alternative. A parità di tipo di interruttore, diminuire la taratura, penalizzando la corrente d'impiego I_B , oppure a parità di taratura cambiare tipo di interruttore e invece di un interruttore a zero di corrente installare un limitatore (B).

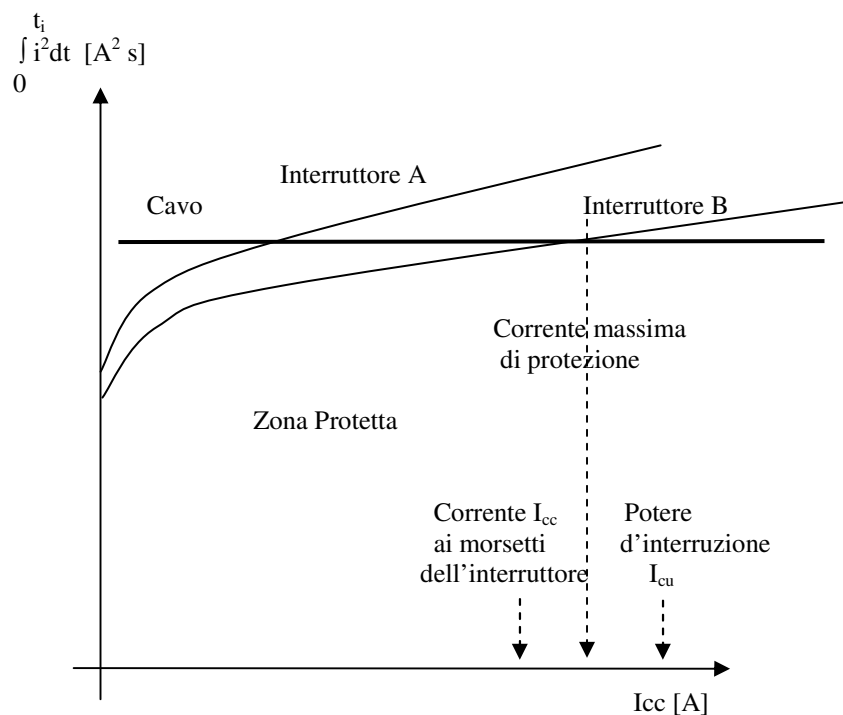


Figura 5.25

L'effetto finale, Figura 5.25, in termini di abbassamento della curva di limitazione sarà lo stesso. Anche qui valgono i commenti già fatti coi cavi sull'opportunità di scegliere una alternativa o l'altra secondo disponibilità di apparecchi.

5.13 Correnti di cortocircuito modeste

Resta un ultimo aspetto da chiarire: cosa succede nel caso di correnti di corto modeste, in caso di guasto franco in fondo ad una linea protetta molto lunga. Diametralmente opposto al cortocircuito violento, perché carico di energia in prossimità dei morsetti nel quadro di distribuzione o in cabina, troviamo un altro corto, dall'altro capo del cavo. Esso è debole e povero di energia, caratterizzato da basse correnti, limitate naturalmente dalla elevata impedenza della lunga linea a monte. Seguendo la retta dell'iquadratoti del cavo verso sinistra, ad un certo punto, come già visto, notiamo un cambiamento di direzione che fa salire sempre più verso l'alto la curva, per poi farla congiungere con l'asintoto verticale della portata I_Z . Inferiormente è affiancata dalla corrispondente linea d'iquadratoti dell'interruttore che, in prossimità della fine del controllo magnetico, sale in verticale e quasi viaggia parallela al cavo. Qui si pone il problema di fondo: avremo intersezioni tra le due curve?

Avendo abbandonato il controllo magnetico, la curva dell'interruttore rileva l'energia passante alle diverse correnti sentite e sganciate dal bimetallo. Per sua natura il bimetallo lavora lentamente e impiega tempi dell'ordine dei minuti e delle ore. Tempi dunque largamente superiori a quelli limite (5 secondi) perché il fenomeno possa essere considerato adiabatico. Seguendo ancora la curva dell'interruttore s'incontrerà necessariamente, entro il tempo di un'ora, la verticale della I_f (corrente di intervento), e poi certamente dopo oltre un'ora, anche la verticale della I_{nf} . Ma la forma della curva ormai è tracciata, e potremo ragionevolmente aspettarci di incontrare il limite asintotico su un valore di corrente più che scontato: la corrente nominale o taratura I_n . Si è visto finalmente l'estrema importanza delle correnti I_n e I_z nella protezione delle condutture. Esse segnano il confine sinistro asintotico delle curve di energia passante dell'interruttore e del cavo.

Caso di I_n inferiore ad I_z

Si può affermare con sufficiente fondamento fisico che se I_n è inferiore a I_z , la qual cosa con interruttori a norme significa assicurare la protezione da sovraccarico, non esistono punti d'intersezione tra le due curve dell'energia passante alle basse correnti, Figura 5.26.

Per definizione normativa e per analisi fisica queste correnti sono collocate nella zona diabatica. Mancando l'intersezione non si determina alcuna

corrente minima di corto e quindi alcuna lunghezza massima protetta o, che è lo stesso, la lunghezza della linea protetta è infinita.

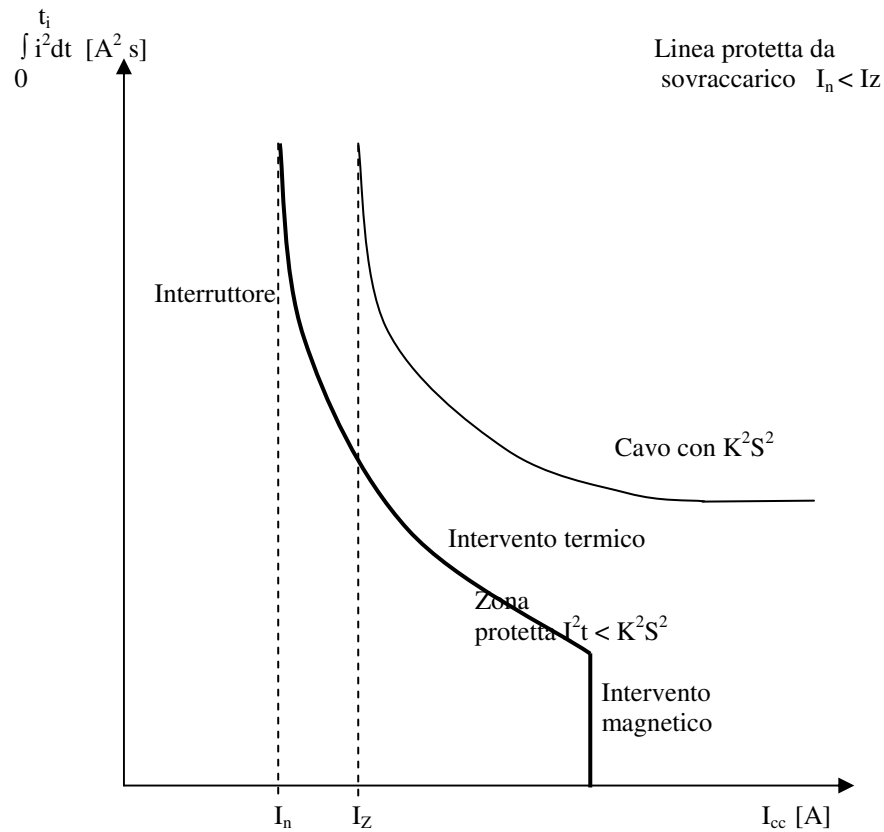


Figura 5.26

Essendo richiesta quasi sempre la protezione da sovraccarico ($I_n \leq I_z$), si conclude che quasi mai si devono cercare limiti alla lunghezza delle linee correttamente protette e da sovraccarico e da cortocircuito.

La medesima conclusione si ritrova nella 64-8 edizione III edizione.

Caso di I_n superiore ad I_Z

Ci si trova di fronte al caso opposto nei pochi casi nei quali manca la protezione da sovraccarico (linee resistive, luce e calore) e cioè, pur avendo scelto la portata I_Z maggiore della I_B , si è deciso per un interruttore abbondante con I_n maggiore di I_Z (la scelta è a norme pur con qualche cautela).

Qui è inevitabile l'intersezione tra le curve di cavo e interruttore, Figura 5.27. Talvolta l'interruttore in gioco è privo di relè termico e l'intersezione avviene ovviamente sulla sua verticale magnetica.

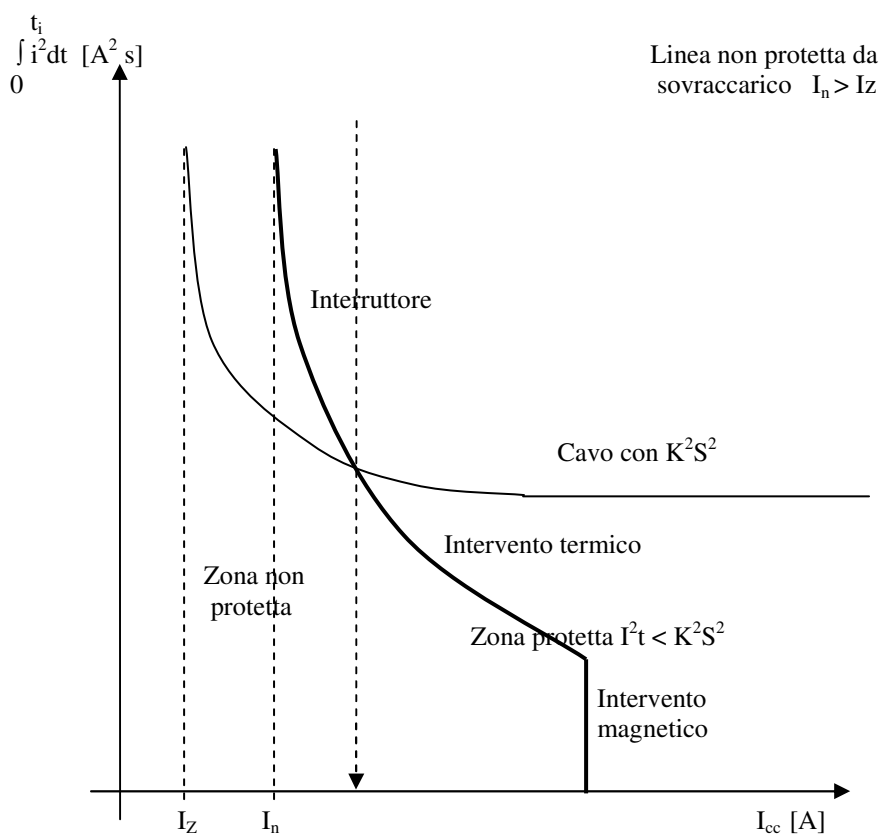


Figura 5.27

In ogni caso il punto di contatto tra le curve dell'interruttore e del cavo individua la corrente minima di cortocircuito e, indirettamente, la lunghezza massima o limite di linea protetta.

In definitiva per essere protetti per tutta la linea, da minime correnti di cortocircuito, bisognerà proteggere considerando una $I_n < I_Z$.