

CAPITOLO 4

ANOMALIE DI FUNZIONAMENTO SULLE RETI DI DISTRIBUZIONE E METODI E SISTEMI PER LA LORO PROTEZIONE

4.1 PROTEZIONE DEGLI IMPIANTI DI DISTRIBUZIONE CONTRO LE SOVRACORRENTI

L'impianto elettrico di distribuzione, dimensionato con le regole precedentemente esaminate facendo riferimento a condizioni di funzionamento "normali", deve essere protetto contro l'insorgere di sovracorrenti, intendendo per sovracorrente ogni corrente superiore a quella prevista nella fase di progettazione dell'impianto nelle condizioni normali.

Le sovracorrenti possono essere causate da un sovraccarico o da un corto circuito.

La corrente di sovraccarico è una sovracorrente che si stabilisce in un circuito elettricamente sano, a causa di un funzionamento anomalo del carico.

La corrente di corto circuito è una sovracorrente prodotta da un guasto sul sistema di distribuzione, normalmente di impedenza trascurabile, tra due punti del circuito che presentano una differenza di potenziale nel servizio normale.

In genere, le sovracorrenti di sovraccarico sono di valore piccolo, mentre quelle di corto circuito sono molto più elevate.

Per la protezione contro le sovracorrenti vengono fondamentalmente impiegati due sistemi di protezione chiamati: interruttori automatici e fusibili.

Caratteristiche di intervento dei sistemi di protezione

a) Interruttori automatici

Un "interruttore automatico" è un sistema che, quando è attraversato da una corrente elevata, interrompe (mediante un organo di manovra che prende il nome di "interruttore") automaticamente il circuito in cui è installato, su comando dei propri "relè" o "sganciatori" (parte intelligente del sistema di protezione), secondo una caratteristica di intervento temporale. Un esempio di tale caratteristica è riportato nella fig. 1.

Per tempo di 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 quando più grande è la corrente (caratteristica a tempo inverso). Per sovracorrenti di elevato valore, è lo sganciatore

magnetico a provocare l'apertura "istantanea" dell'interruttore, ossia 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. Una di queste porte è delimitata dalla corrente convenzionale di non intervento (I_{nf}) e dalla corrente convenzionale di intervento (I_f).

La *corrente convenzionale di non intervento* (I_{nf}), è quel valore specificato di corrente che non provoca, in condizioni determinate, l'intervento dell'interruttore, entro un intervallo di tempo convenzionale (tipicamente 1 h o 2 h).

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.

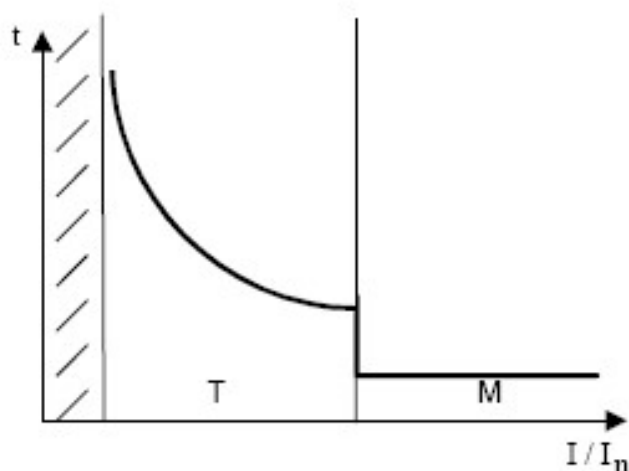


Fig. 1. Esempio di caratteristica di intervento di un interruttore automatico, dotato di relè magneto-termico

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.

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.

Interruttori automatici		I_{nf}	I_f	Tempo convenzionale
Regolabili (CEI 17-5)	Non regolabili (CEI 23-3)			
—	I_N	$1,13 I_N$	$1,45 I_N$	1h
$I_r \leq 63 \text{ A}$	—	$1,05 I_r$	$1,35 I_r$	1h
$I_r > 63 \text{ A}$	—	$1,05 I_r$	$1,25 I_r$	2h

b) Fusibili

Per i fusibili valgono considerazioni analoghe a quelle svolte per gli interruttori automatici, sebbene in esso non è possibile distinguere fisicamente il relè dal dispositivo di manovra, essendo questi ultimi integrati in un unico sistema di protezione (appunto, il fusibile).

Un fusibile apre il circuito in tempi tanto più piccoli quanto più grande è la corrente che lo attraversa, secondo una propria caratteristica di intervento (fig. 2).

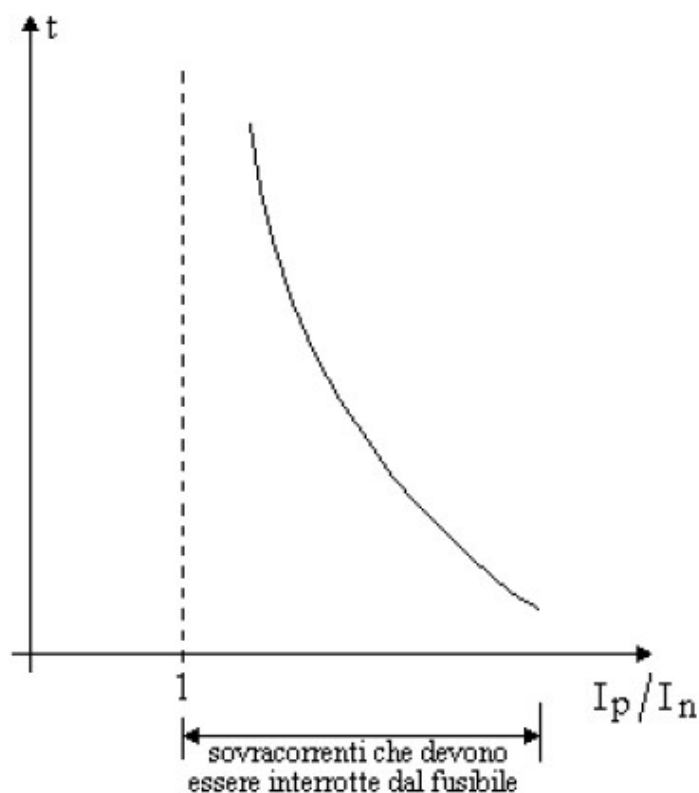


Fig.2. Esempio di caratteristica di intervento di un fusibile

Per tempo di prearco di un fusibile si intende il tempo intercorrente tra l'istante di inizio della corrente e l'istante in cui ha inizio l'arco elettrico 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_f e I_{nf} e dei tempi convenzionali variano con la corrente nominale I_N . Essi sono indicati nella tabella 2.

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

I_N	I_{nf}	I_f	Tempo convenzionale
$4 A < I_N \leq 10 A$	$1,5 I_N$	$1,9 I_N$	1h
$10 A < I_N \leq 25 A$	$1,4 I_N$	$1,75 I_N$	1h
$25 A < I_N \leq 63 A$	$1,3 I_N$	$1,6 I_N$	1h

Scelta del sistema di protezione contro il sovraccarico

L'apparecchiatura contro il sovraccarico può essere posta in un punto qualsiasi del circuito.

Ricordando che con I_N , I_B e I_Z sono state indicate la corrente nominale del sistema di protezione, la corrente d'impiego del circuito(*) e la portata del cavo, rispettivamente, deve essere:

$$I_B \leq I_N \leq I_Z \quad (1)$$

Il sistema di protezione contro il sovraccarico deve, infatti, essere adatto a portare con continuità la corrente di impiego, che normalmente fluisce nel circuito, senza dar luogo a interventi intempestivi; essa, inoltre, non deve consentire il permanere di correnti superiori alla portata.

La condizione (1) sarebbe sufficiente a individuare la corrente nominale del sistema di protezione, se questo intervenisse per correnti di poco superiori alla propria corrente nominale I_N . Di fatto il sistema di protezione interviene, in modo certo solo per correnti uguali o superiori alla corrente convenzionale di intervento I_f .

Se si assume $I_N = I_Z$, le correnti comprese tra I_N e I_f costituiscono un sovraccarico per il cavo; esse potrebbero, peraltro, non essere mai interrotte, dando luogo ad un sovraccarico permanente (fig. 3).

Se si assume $I_f = I_Z$, nessuna corrente superiore alla portata può permanere per un tempo indefinito. 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 ; ne consegue che il cavo, che può portare la corrente I_Z , è utilizzato solo alla corrente I_B di gran lunga inferiore (fig. 3).

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 soddisfatta la condizione (fig. 3):

(*) 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.

$$I_f \leq 1,45 I_Z \quad (2)$$

In definitiva, un sistema di protezione delle condutture contro sovraccarico è scelto secondo le norme quando soddisfa 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 le condizioni necessarie e sufficienti per assicurare la protezione contro il sovraccarico sono diverse, secondo che il circuito sia protetto da un interruttore automatico o da un fusibile.

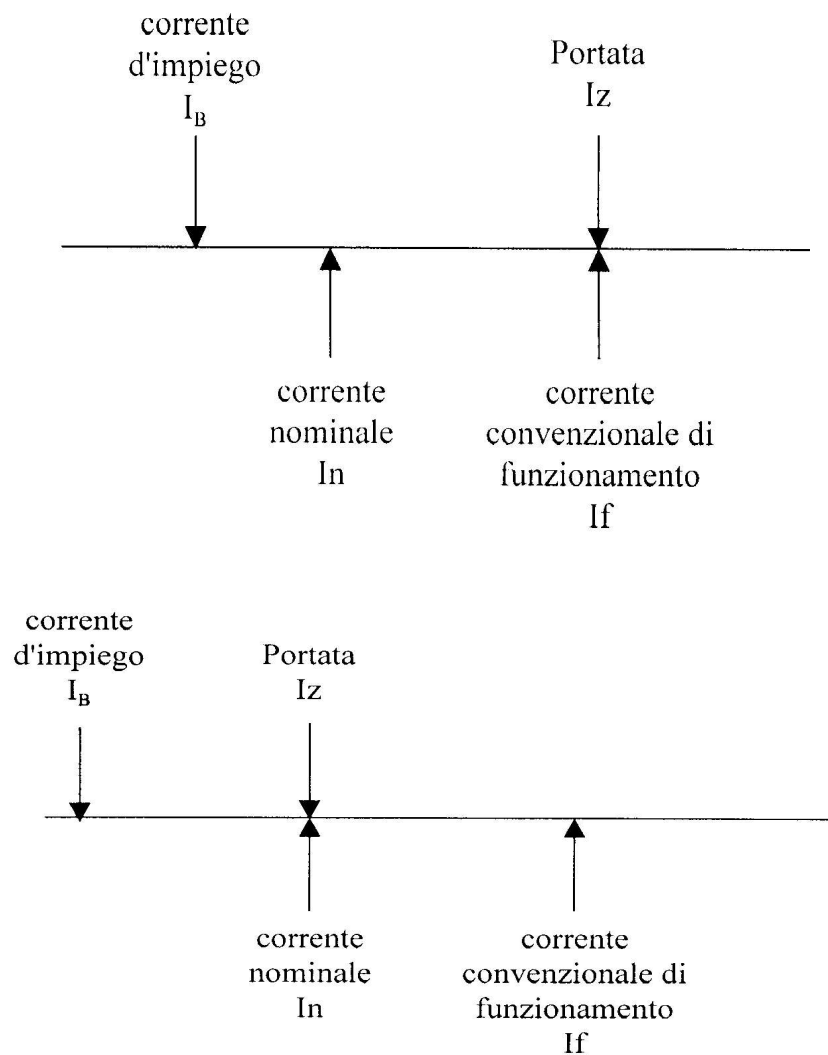


Fig. 3. Scelta della corrente nominale dell'apparecchiatura per la protezione della conduttura contro il sovraccarico

a) Interruttori automatici

Secondo la tabella 1, per gli interruttori automatici si ha $I_f \leq 1,45 I_N$; se pertanto è soddisfatta la condizione $I_N \leq I_Z$, a maggior ragione lo è anche la (2).

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 se è:

$$I_N \leq I_Z$$

b) Fusibili

Per i fusibili il rapporto $\frac{I_f}{I_N}$ varia secondo la corrente nominale I_N del fusibile stesso, come indicato nella tabella 1.2.

Il minimo rapporto $\frac{I_f}{I_N}$ vale 1,6; la condizione (2) diventa perciò:

$$I_N \leq \frac{1,45}{1,6} I_Z$$

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

Le condizioni alle quali deve soddisfare 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 , sono indicate nella tabella 3.

Tabella 3 - Condizioni alle quali deve soddisfare la corrente nominale I_N di un fusibile atto alla protezione contro sovraccarico.

Corrente nominale del fusibile	Condizioni da soddisfare
4 A < I_N ≤ 10 A	$I_B \leq I_N \leq 0,763 I_Z$
10 A < I_N < 25 A	$I_B \leq I_N \leq 0,828 I_Z$
25 A < I_N	$I_B \leq I_N \leq 0,9 I_Z$

Scelta del sistema di protezione contro il corto circuito

L'apparecchiatura contro il corto circuito deve essere posta all'inizio del circuito.

Essa deve avere un potere di interruzione non inferiore alla corrente di corto circuito presunta nel punto di installazione.

Deve, infine, intervenire con una rapidità tale che l'isolante del cavo non raggiunga la massima temperatura di corto circuito θ_M . In pratica, l'isolante non deve superare la *massima temperatura di corto circuito* θ_M 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 corto circuito, ad una perdita di vita del cavo di circa 0,1% della durata di vita del cavo stesso. Poiché l'isolante è a contatto con il conduttore esso assume la temperatura del conduttore stesso.

In considerazione della rapidità di intervento dei dispositivi di protezione contro corto circuito, si può trascurare lo scambio termico tra il cavo e l'ambiente circostante e supporre che tutto il calore sviluppato dalla corrente di corto circuito vada ad aumentare la temperatura del conduttore (fenomeno adiabatico).

Un conduttore di resistività ρ , lunghezza l , sezione S , calore specifico riferito all'unità di volume c , attraversato dalla corrente i per il tempo dt , subisce un incremento di temperatura $d\theta$ tale da soddisfare il bilancio termico:

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

Se si indica con:

- t_i il tempo che il dispositivo di protezione impiega ad interrompere la corrente di corto circuito (tempo d'interruzione)¹,
 - θ_i la temperatura iniziale del conduttore quando si verifica il corto circuito,
 - θ_f la temperatura finale che il conduttore raggiunge dopo il corto circuito,
- integrando si ottiene:

$$\int_0^{t_i} (\rho \cdot l / S) \cdot i^2 \cdot dt \leq \int_{\theta_i}^{\theta_f} S \cdot l \cdot c \cdot d\theta$$

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:

¹ Dall'istante di inizio del corto circuito la corrente fluisce attraverso il sistema di protezione per tutto il tempo che questa impiega ad aprire i contatti se è un interruttore automatico (tempo d'intervento o di apertura), o a fondere se è un fusibile (tempo di prearco).

In entrambi i casi si forma successivamente un arco, durante il quale fluisce ancora corrente nel circuito. Il tempo di interruzione, o di funzionamento, è la somma del tempo di apertura (interruttori automatici), o di prearco (fusibili), e del tempo d'arco (tempo tra l'istante di inizio e l'istante di estinzione finale dell'arco).

$$\int_0^{t_i} i^2 \cdot dt \leq S^2 \cdot c \cdot \int_{\theta_i}^{\theta_f} 1/(\rho_0 (1 + \alpha\theta)) \cdot d\theta$$

donde:

$$\int_0^{t_i} i^2 \cdot dt \leq K^2 \cdot S^2$$

(1)

essendo K il coefficiente definito dalla relazione:

$$K^2 = \frac{c}{\alpha \rho_0} \ln \frac{1 + \alpha \theta_M}{1 + \alpha \theta_i}$$

Il primo termine della (1) è l'integrale di Joule esteso al tempo di interruzione (o energia specifica, o energia passante); il secondo termine rappresenta l'energia specifica tollerabile dal cavo.

Nella tabella 4 sono indicati alcuni valori di K, nell'ipotesi che all'istante iniziale di corto circuito il cavo si trovi alla massima temperatura di servizio $\theta_i = \theta_s$.

Se il cavo ha una temperatura iniziale inferiore alla massima temperatura di servizio θ_s , perché, quando si verifica il corto circuito, è percorso da una corrente inferiore alla portata relativa alle sue condizioni d'installazione, i valori di K indicati nella tabella 4 sono a favore della sicurezza.

Se il cavo non è volutamente utilizzato alla sua portata, e quindi ha certamente una temperatura iniziale $\theta_i < \theta_s$, il coefficiente K può essere direttamente calcolato con la predetta equazione; in tutti gli altri casi si fa riferimento alla tabella 4.

Nella tabella 5 sono indicati i valori di c, α e ρ_0 di alcuni materiali conduttori, necessari per calcolare il coefficiente K.

Il termine $\int_0^t i^2 dt$ è denominato *integrale di Joule*, *energia specifica* o infine *energia passante*.

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

Il termine $K^2 S^2$ indica l'energia specifica tollerabile in condizioni adiabatiche da un cavo costituito di un certo materiale conduttore (c, ρ_0 , α), di sezione S, isolato con un determinato isolante (θ_M) e avente una temperatura iniziale definita (θ_i).

Tabella 4 - Valori del coefficiente K (CEI 64-8)

Natura dell'isolante	Materiale conduttore	
	Rame	Alluminio
PVC ($\theta_o = 70 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta_{qf} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$)	115	74
Gomma naturale ($\theta_o = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta_f = 220 \text{ }^\circ\text{C}$), gomma butilica ($\theta_o = 85 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta_f = 220 \text{ }^\circ\text{C}$)	135	87
Gomma etilenpropilenica, polietilene reticolato ($\theta_o = 85 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta_f = 250 \text{ }^\circ\text{C}$)	146 (1)	94 (1)

(1) Se le giunzioni saldate a stagno, si applicano i valori K sopraindicati per il PVC, perché le giunzioni non sopporterebbero le temperature corrispondenti a valori di K superiori.

Tabella 5 - Coefficiente di temperatura (α), resistività a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ (ρ_o) e calore specifico medio per unità di volume (c) dei materiali conduttori di comune impiego.

Materiale	α ($^\circ\text{C}^{-1}$)	c ($\text{J}/^\circ\text{C mm}^3$)	ρ_o (Wmm^{-1})
Rame	4,25 $\cdot 10^{-3}$	3,45 $\cdot 10^{-3}$	15,89 $\cdot 10^{-3}$
Alluminio	4,38 $\cdot 10^{-3}$	2,5 $\cdot 10^{-3}$	25,98 $\cdot 10^{-3}$
Piombo	4,34 $\cdot 10^{-3}$	1,45 $\cdot 10^{-3}$	196,88 $\cdot 10^{-3}$
Acciaio	4,95 $\cdot 10^{-3}$	3,8 $\cdot 10^{-3}$	125,56 $\cdot 10^{-3}$

Da rilevare che l'energia specifica 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.

Per un certo tipo di corto circuito, al variare del punto di corto circuito, cambia la corrente I e il corrispondente tempo t che il sistema di protezione impiega ad aprire il circuito.

Il problema è quello di stabilire quali sono le condizioni più gravose ai fini della sollecitazione termica del cavo; e queste naturalmente dipendono dalla caratteristica d'intervento del sistema di protezione.

Se il sistema di protezione è un fusibile, si ha la situazione della fig. 4: il cavo è protetto contro corto circuito per tutte le correnti superiori a I_m .

Occorre in questo caso, pertanto, verificare che la più piccola corrente di corto circuito che può instaurarsi sia superiore a I_m , essendo la più piccola corrente di corto circuito che può instaurarsi quella corrispondente, per una linea trifase, ad un corto circuito fase - fase in fondo alla linea e, per una linea trifase con neutro (*), quella corrispondente ad un corto circuito fase - neutro sempre in fondo alla linea.

Se il sistema di protezione è un interruttore automatico, si ha la situazione della fig. 5: il cavo è protetto per tutte le correnti comprese tra I_p e I_q .

Occorre in questo caso, pertanto, verificare che la corrente più grande che può aversi nel circuito (cioè quella corrispondente ad un corto circuito trifase immediatamente a valle dell'interruttore) sia minore di I_q e quella più piccola (cioè quella considerata nel caso del fusibile) sia maggiore di I_p .

Nelle condizioni precedenti si è considerato l'impiego di un fusibile o di un interruttore automatico scelto per proteggere solo dal corto circuito. Bisogna osservare che se il fusibile o l'interruttore automatico viene scelto per proteggere il circuito anche contro il sovraccarico, la verifica alla minima corrente di corto circuito non è più necessaria, in quanto per correnti inferiori alla minima corrente di corto circuito la temperatura massima di cortocircuito M non viene sicuramente raggiunta.

(*) Se il conduttore di neutro ha sezione minore di quella del conduttore di fase, la condizione (3) deve essere ovviamente riferita al conduttore di neutro.

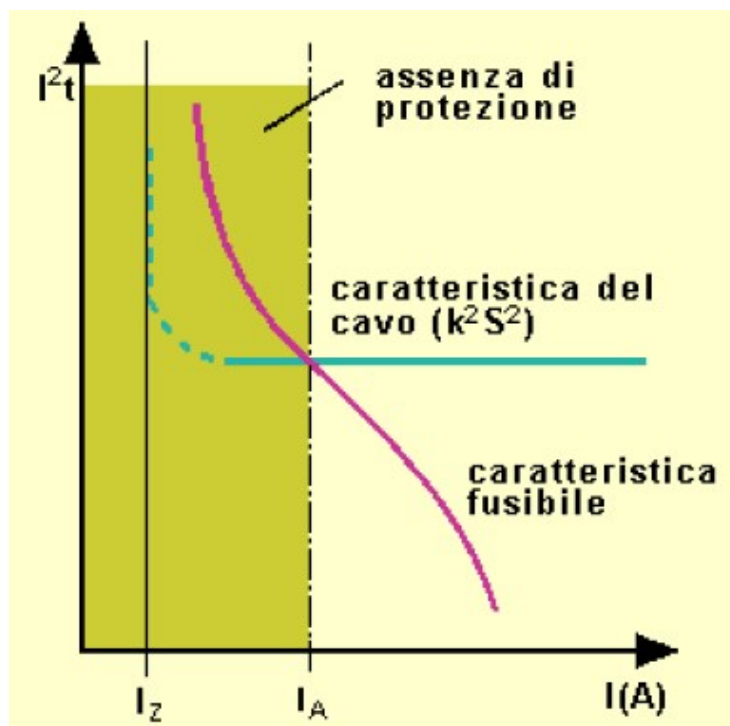


Fig. 4. L'energia passante attraverso un fusibile è messa a confronto con l'energia specifica tollerabile da un cavo in condizioni adiabatiche.

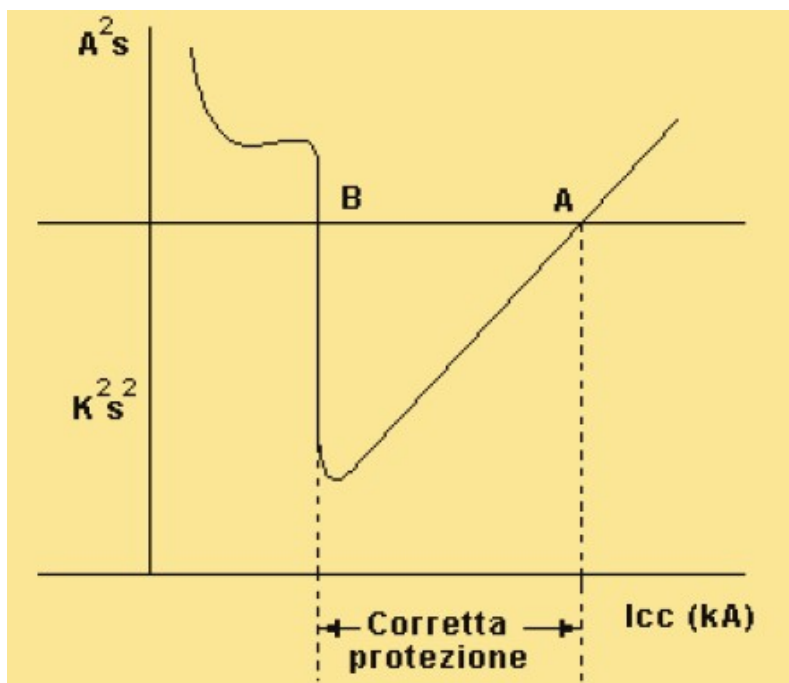


Fig. 5. L'energia passante attraverso un interruttore automatico è messa a confronto con l'energia specifica tollerabile da un cavo in condizioni adiabatiche.