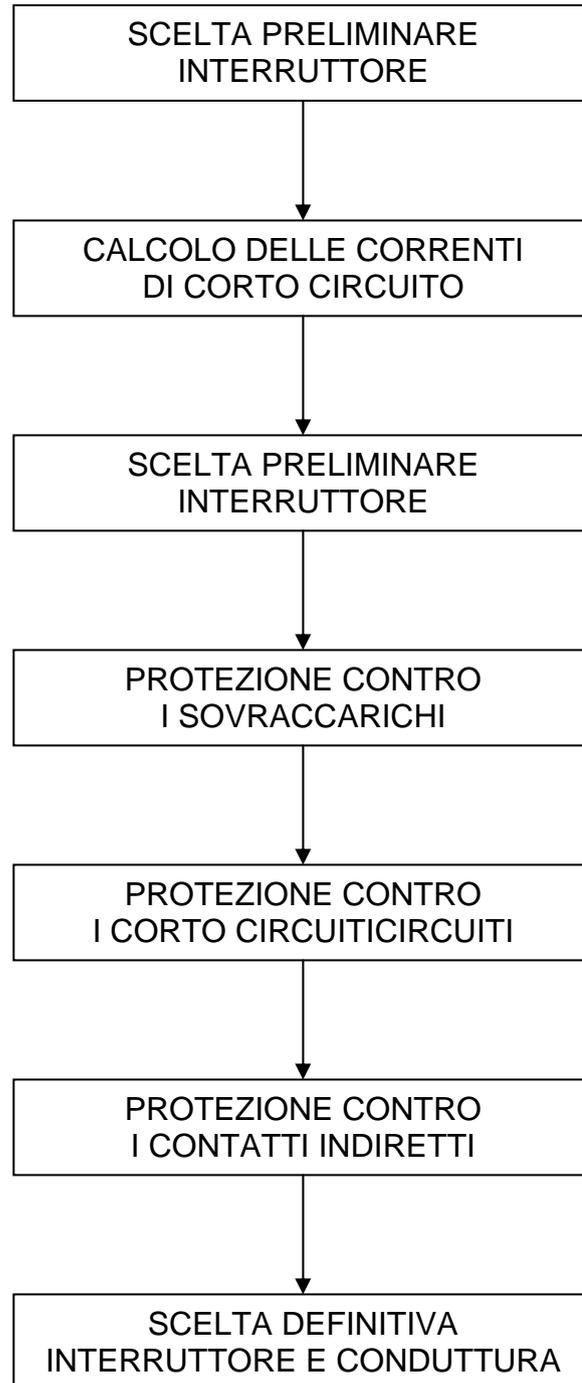


CRITERI DI SCELTA DEGLI INTERRUTTORI AUTOMATICI B T

DIAGRAMMA A BLOCCHI



CRITERI DI SCELTA DEGLI INTERRUTTORI AUTOMATICI B T

1 - SCELTA PRELIMINARE DELLA CONDUTTURA

Consiste nel determinare la sezione del cavo in modo che siano verificate le seguenti condizioni:

a) Portata del cavo I_z maggiore o uguale alla corrente d'impiego I_B :

$$I_z \geq I_B$$

La **portata** è il massimo valore di corrente che un cavo, in determinate condizioni di posa e ambientali, può trasportare in regime permanente senza superare la massima temperatura ammissibile.

Essa dipende da:

- **Tipo di cavo**

Dal tipo di cavo (isolamento) dipendono la temperatura massima di esercizio e quella massima di corto circuito, che, per i tipi di cavi più usati in bassa tensione, sono riportate nella seguente tabella:

TIPO DI CAVO (isolamento)	TEMPERATURA MASSIMA (°C)	
	esercizio	cortocircuito
Gomma naturale	60	200
Polivinilcloruro (PVC)	70	160
Gomma butilica	85	220
Gomma etilenpropilenica (EPR)	90	250
Polietilene reticolato (XLPE)		

- **Tipo di posa**

Da essa dipende la capacità del cavo di smaltire il calore prodotto verso l'ambiente circostante.

- **Temperatura ambiente**

Ad essa è legato il salto termico fra cavo e ambiente e quindi la quantità di calore che il cavo è in grado di cedere all'ambiente.

- **Vicinanza di altri cavi**

Più cavi accostati si influenzano a vicenda per quanto riguarda lo scambio termico, e da ciò viene a dipendere la temperatura di funzionamento.

La **corrente d'impiego** è il valore della corrente da prendere in considerazione per la determinazione delle caratteristiche degli elementi di un circuito. In regime permanente essa corrisponde alla massima potenza da trasmettere; in regime variabile si considera la corrente termica equivalente, che in regime permanente porterebbe gli elementi del circuito alla stessa temperatura.

b) Caduta di tensione del cavo Δu inferiore o uguale alla caduta di tensione ammissibile per la condotta Δu_a :

$$\Delta u \leq \Delta u_a$$

La caduta di tensione del cavo viene determinata con la relazione:

$$\Delta u = \sqrt{3} \cdot I_B \cdot L_c \cdot (R'_c \cdot \cos \varphi + X'_c \cdot \sin \varphi)$$

dove:

- L_c = lunghezza della condotta [m]
- R'_c = resistenza unitaria del cavo [Ω/m]
- X'_c = reattanza unitaria del cavo [Ω/m]
- φ = angolo di sfasamento fra tensione e corrente

Se le relazioni precedenti non sono verificate occorre intervenire sulla condotta aumentando la portata I_z del cavo attraverso un aumento di sezione.

Una volta determinata la sezione del cavo, vengono calcolate:

c) La potenza Δp dissipata dal cavo mediante la relazione:

$$\Delta p = 3 \cdot R'_c \cdot L_c \cdot I_B^2$$

d) L'energia specifica E_c sopportabile dal cavo con la relazione:

$$E_c = K^2 \cdot S^2$$

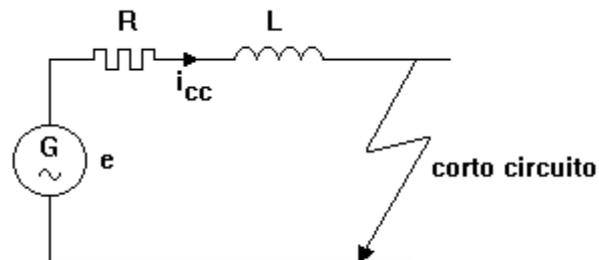
dove:

- S = sezione del cavo [mm^2]
- K = coefficiente che dipende dal tipo di cavo e che, in relazione alla massima temperatura di corto circuito riportata nella tabella precedente, assume i seguenti valori:

ISOLAMENTO DEL CAVO	COEFFICIENTE K	
	Conduttore rame	Conduttore alluminio
Polivinilcloruro (PVC)	115	74
Gomma naturale Gomma butilica	135	87
Gomma etilenpropilenica (EPR) Polietilene reticolato (XLPE)	146	94

2 - CALCOLO DELLE CORRENTI DI CORTO CIRCUITO

La corrente di corto circuito può essere determinata considerando il seguente circuito:



Applicando il secondo principio di Kirchhoff relativo alle maglie (uguaglianza fra f.e.m. e cadute di tensione), si ottiene l'equazione elettrica del circuito:

$$e + e_L = R \cdot i_{cc}$$

dove:

- e = f.e.m. fornita dal generatore
- e_L = f.e.m. di autoinduzione nell'induttanza L
- $R \cdot i_{cc}$ = caduta di tensione sulla resistenza R prodotta dalla corrente di corto circuito i_{cc}

Essendo:

$$e = \sqrt{2} \cdot E \cdot \text{sen } \omega t$$

$$e_L = -L \cdot \frac{di_{cc}}{dt}$$

si ottiene:

$$\sqrt{2} \cdot E \cdot \sin \omega t - L \cdot \frac{di_{cc}}{dt} = R \cdot i_{cc}$$

e quindi:

$$\sqrt{2} \cdot E \cdot \sin \omega t = L \cdot \frac{di_{cc}}{dt} + R \cdot i_{cc}$$

La risoluzione della precedente equazione differenziale fornisce la corrente di corto circuito in funzione del tempo: $i_{cc} = f(t)$.

Essa è costituita da due componenti:

- una **permanente simmetrica**, variabile con legge sinusoidale, di ampiezza pari a $\sqrt{2} \cdot I_{cc}$ e pulsazione ω :

$$i_s = \sqrt{2} \cdot I_{cc} \cdot \sin(\omega t - \varphi_{cc})$$

- una **transitoria unidirezionale**, decrescente nel tempo con legge esponenziale:

$$i_u = \sqrt{2} \cdot I_{cc} \cdot \sin \varphi_{cc} \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}$$

dove:

$$I_{cc} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

è il valore efficace della componente simmetrica della corrente di corto circuito.

La corrente di corto circuito vale pertanto:

$$i_{cc} = i_s + i_u$$

cioè:

$$i_{cc} = \sqrt{2} \cdot I_{cc} \cdot \sin(\omega t - \varphi_{cc}) + \sqrt{2} \cdot I_{cc} \cdot \sin \varphi_{cc} \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}$$

o anche:

$$i_{cc} = \sqrt{2} \cdot I_{cc} \cdot \sin(\omega t - \varphi_{cc}) + \sqrt{2} \cdot I_{cc} \cdot \sin \varphi_{cc} \cdot e^{-\frac{\omega}{\tan \varphi_{cc}} \cdot t}$$

dove:

- L/R = costante di tempo [s] del circuito di guasto (R = resistenza [Ω], L = induttanza [H] del circuito a monte del punto di guasto)
- φ_{cc} = angolo caratteristico dell'impedenza di corto circuito

In fig. 1 è riportato l'andamento della corrente di corto circuito in funzione del tempo nel caso in cui si ponga, a titolo d'esempio, $I_{cc} = 1$ e $\varphi_{cc} = 80^\circ$.

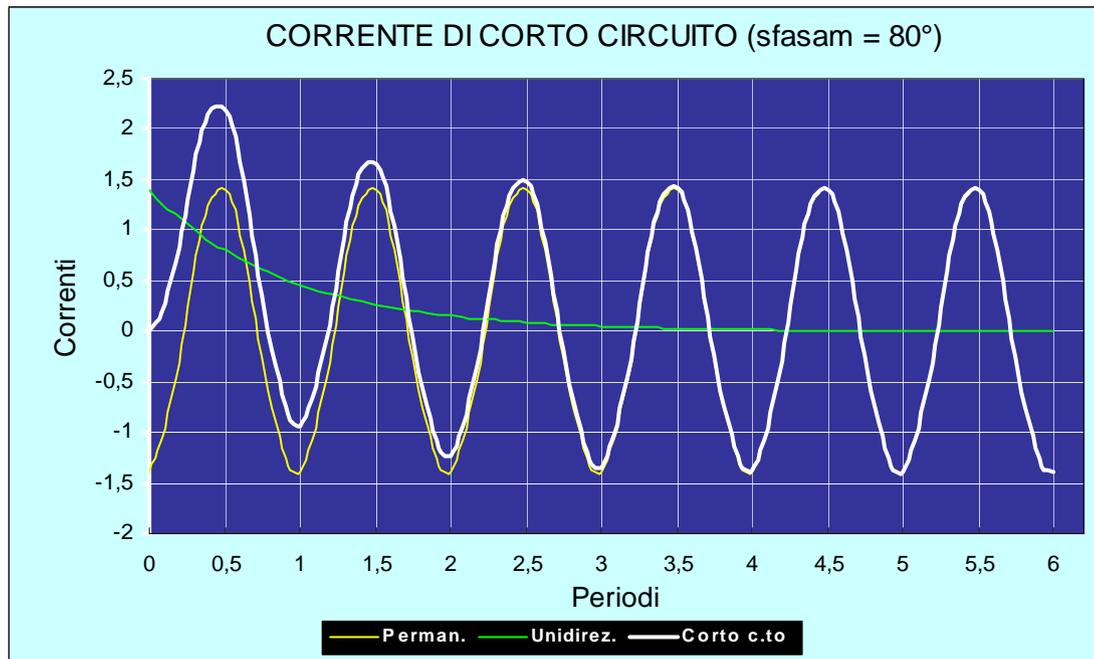


Fig. 1 - Andamento della corrente di corto circuito

NOTA: l'andamento delle correnti di corto circuito può essere analizzato con il programma in QBasic "corto" presente nel sito nella sezione Software.

Per la scelta delle caratteristiche dell'interruttore, il calcolo delle correnti di corto circuito deve riguardare:

a) La corrente di corto circuito massima $I_{cc,max}$

Il massimo valore della corrente di corto circuito si ha per guasto trifase all'inizio della conduttura e coincide con il valore efficace della componente simmetrica della corrente di corto circuito.

La conoscenza del suo valore serve per stabilire il potere d'interruzione dell'interruttore. Si calcola con la relazione:

$$I_{cc,max} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z}$$

dove:

- U = tensione di esercizio dell'impianto [V]
- Z = impedenza del circuito a monte del punto di guasto [Ω]

b) La corrente di corto circuito di cresta $I_{cc,cr}$

Il valore della corrente di corto circuito di cresta (valore di picco della corrente totale di corto circuito) può essere ricavato direttamente dal grafico della corrente di corto circuito (fig. 1), oppure, in mancanza di questo, con la relazione:

$$I_{cc,cr} = K_{cr} \cdot I_{cc,max}$$

dove il valore del fattore di cresta K_{cr} può essere calcolato, con sufficiente approssimazione, mediante la relazione:

$$K_{cr} = \sqrt{2} \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{\tan \varphi_{cc}}} \right)$$

La conoscenza di $I_{cc,cr}$ serve per stabilire il potere di chiusura dell'interruttore.

c) La corrente di corto circuito minima $I_{cc,min}$

Il valore minimo della corrente di corto circuito si ha per guasto monofase (fase-fase o fase-neutro) alla fine della condotta e può essere calcolato con la relazione riportata dalla Norma CEI 64-8:

$$I_{cc,min} = \frac{0,8 \cdot U \cdot S}{1,5 \cdot \rho \cdot L_c} \cdot \frac{1}{1 + m} \cdot K_x$$

dove:

- 0,8 = coefficiente che tiene conto del presumibile abbassamento della tensione per effetto del corto circuito
- U = tensione del circuito di guasto (tensione fase-neutro per circuito trifase con neutro distribuito; tensione fase-fase per circuito monofase o circuito trifase con neutro non distribuito) [V]
- S = sezione del cavo [mm²]

- 1,5 = fattore che tiene conto dell'incremento della resistività del cavo dovuto all'aumento di temperatura durante il corto circuito
- ρ = resistività del conduttore a 20°C [per il rame 0,0178 Ω mm²/m]
- L_c = lunghezza del cavo [m]
- $m = S_F/S_N$ = rapporto fra le sezioni dei conduttori di fase e di neutro nel caso di circuito trifase con neutro distribuito

Rispetto alla sezione del conduttore di fase, la sezione del neutro può essere scelta nel modo indicato nella seguente tabella:

Sezione di fase S_F (mm ²)	Sezione di neutro S_N (mm ²)
$S_F \leq 16$	$S_N = S_F$
$16 < S_F \leq 35$	$S_N = 16$
$S_F > 35$	$S_N = S_F/2$

- $m = 1$ nel caso di circuito monofase o circuito trifase con neutro non distribuito
- K_x = coefficiente che tiene conto della reattanza del cavo

Tale coefficiente, a seconda della sezione del conduttore di fase, assume i valori riportati nella seguente tabella:

Sezione (mm ²)	≤ 95	120	150	185	240
K_x	1	0,90	0,85	0,80	0,75

La conoscenza di $I_{cc,min}$ serve per la verifica del corretto intervento dello sganciatore magnetico; serve, in altri termini, per stabilire il valore massimo della soglia d'intervento dello sganciatore magnetico dell'interruttore.

La corrente di corto circuito produce, nel circuito, due effetti:

- **Effetto termico**, legato al tempo di durata della corrente di corto circuito
- **Effetto elettrodinamico**, legato al valore massimo (valore di picco) della corrente di corto circuito

3 - SCELTA PRELIMINARE DELL'INTERRUTTORE

Per la scelta dell'interruttore è necessario coordinare i dati tecnici dell'apparecchio con i dati relativi alle caratteristiche elettriche dell'impianto, quali:

- Valore della tensione d'esercizio U [V]
- Valore della corrente d'impiego I_B [A]

- Valore della massima corrente di corto circuito $I_{cc,max}$ (valore efficace della componente simmetrica)
- Valore di cresta della corrente di corto circuito $I_{cc,cr}$ (valore di picco della corrente totale di corto circuito)

Le condizioni che devono essere verificate per una scelta corretta dell'interruttore sono:

a) Corrente nominale dell'interruttore I_N maggiore o uguale alla corrente d'impiego I_B :

$$I_N \geq I_B$$

Negli interruttori in cui è possibile la regolazione dello sganciatore termico deve essere:

$$I_{rt} \geq I_B$$

dove:

- I_{rt} = corrente regolata dello sganciatore termico [A]

b) Potere d'interruzione P_{di} dell'interruttore maggiore o uguale al valore efficace della componente simmetrica della massima corrente di corto circuito:

$$P_{di} \geq I_{cc,max}$$

c) Potere di chiusura P_{ch} dell'interruttore maggiore o uguale al valore di cresta della corrente di corto circuito:

$$P_{ch} \geq I_{cc,cr}$$

Se la condizione a) non è verificata occorre intervenire sull'interruttore, scegliendone uno con corrente nominale più elevata.

Se una delle condizioni b) o c), o entrambe, non sono soddisfatte bisogna cambiare tipo di interruttore, adottandone uno con potere d'interruzione (e quindi anche potere di chiusura) più elevato, per esempio un interruttore limitatore.

4 - PROTEZIONE DELLA CONDUTTURA CONTRO I SOVRACCARICHI

Consiste nel coordinare interruttore e conduttura in modo che l'interruttore intervenga prima che le temperature dei cavi raggiungano valori nocivi per gli isolanti.

A tale proposito occorre che siano verificate le seguenti condizioni:

a) Corrente nominale dell'interruttore I_N compresa tra la corrente d'impiego I_B e la portata I_z :

$$I_B \leq I_N \leq I_z$$

b) Corrente d'intervento dell'interruttore I_f non superiore a 1,45 volte la portata del cavo:

$$I_f \leq 1,45 \cdot I_z$$

La prima parte della condizione a) ($I_B \leq I_N$) è già stata verificata al punto precedente, relativamente alla scelta dell'interruttore.

Per quanto riguarda la seconda parte ($I_N \leq I_z$), se non è verificata, occorre intervenire sulla condotta aumentandone la portata I_z e quindi la sezione.

La verifica della condizione b) è in genere superflua, in quanto implicita nella condizione a): per gli interruttori si ha infatti, di norma, $I_f < 1,45 I_N$ e pertanto, essendo per la condizione a) - al limite - $I_N = I_z$, si ha anche $I_f < 1,45 I_z$.

Qualora, in casi particolari, non fosse verificata, occorre intervenire sulla condotta, aumentando la portata I_z e quindi la sezione.

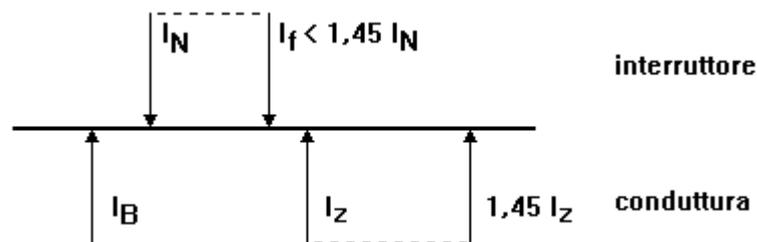
La scelta della corrente nominale I_N dell'interruttore va fatta in maniera oculata, perché dal suo coordinamento con la corrente d'impiego I_B e con la portata del cavo I_z dipende l'efficacia (in termini di sicurezza) della protezione della condotta dai sovraccarichi.

A tale proposito si possono verificare i seguenti casi:

1) Caso generale $I_B < I_N < I_z$

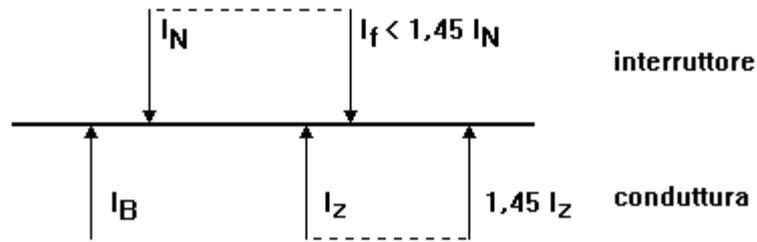
Si possono avere le seguenti situazioni:

a) $I_f < I_z$



In questo caso la protezione della condotta è sicura in quanto l'interruttore interviene prima che la corrente superi la portata del cavo.

b) $I_f > I_z$

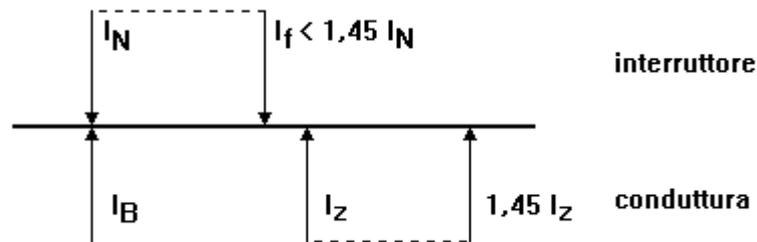


In questo caso la protezione della conduttura non è del tutto sicura in quanto non è certo che, per correnti superiori alla portata e comprese fra I_Z e I_f , l'interruttore intervenga prima che il cavo raggiunga temperature superiori ai limiti massimi consentiti.

2) Caso limite $I_B = I_N < I_Z$

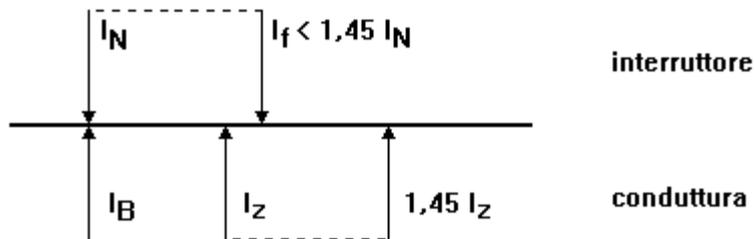
Si possono avere le seguenti situazioni:

a) $I_f < I_Z$



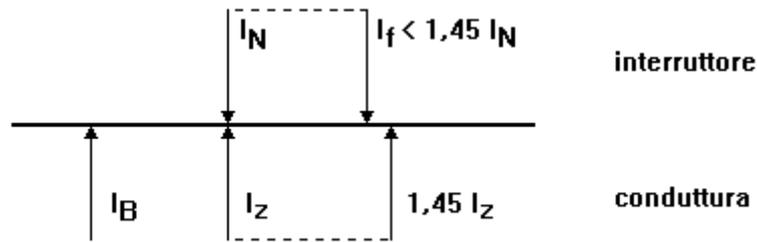
Per il grado di protezione della conduttura vale quanto detto al punto 1a).

b) $I_f > I_Z$

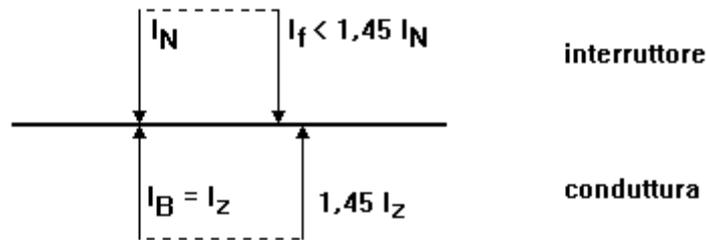


Per il grado di protezione della conduttura vale quanto detto al punto 1b).

3) Caso limite $I_B < I_N = I_Z$



4) Caso limite $I_B = I_N = I_z$



I casi 3) e 4) sono simili ai casi 1b) e 2b) ($I_f > I_z$) e vale pertanto quanto già detto a proposito di quei casi, tenendo però presente che, per correnti superiori alla portata e comprese fra I_z e I_f , la protezione del cavo è ancora più incerta in quanto maggiore è la differenza fra le due correnti.

Dall'esame dei casi precedenti si può concludere che la protezione della conduttura è:

- **Sicura** quando I_f è minore di I_z .
- **Non del tutto sicura** (e quindi da verificare) quando I_f è maggiore di I_z .

Un'ulteriore indicazione che si può trarre dai casi precedenti è che:

- Se la corrente nominale I_N dell'interruttore è più vicina alla corrente d'impiego I_B della conduttura (caso limite $I_N = I_B$), la conduttura non può essere completamente sfruttata, ma in compenso risulta maggiormente protetta;
- Se la corrente nominale I_N dell'interruttore è più vicina alla portata I_z della conduttura (caso limite $I_N = I_z$), la conduttura può essere sfruttata completamente, ma di contro risulta meno protetta.

5 - PROTEZIONE DELLA CONDUTTURA CONTRO I CORTO CIRCUITI

Consiste nel verificare che l'interruttore sia in grado di interrompere le correnti di corto circuito prima che esse producano effetti termici e meccanici dannosi per le condutture.

A tale scopo, deve essere soddisfatta la condizione che l'energia specifica E_i lasciata passare dall'interruttore durante il corto circuito sia minore o al limite uguale all'energia specifica E_c sopportabile dal cavo:

$$E_i \leq E_c$$

Tale condizione può essere ricavata graficamente sovrapponendo le curve dell'energia specifica dell'interruttore e di quella del cavo, come evidenziato in fig.2.

Da essa si ricava che il cavo risulta protetto ($E_i < E_c$) se la corrente di corto circuito è compresa fra le correnti I_m e I_c corrispondenti ai punti di intersezione delle due curve.

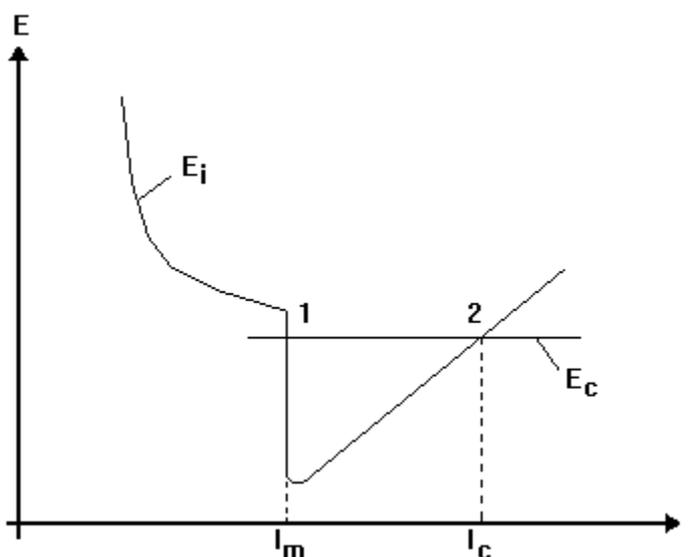


Fig. 2 - Protezione della conduttura dal corto circuito

In pratica occorre verificare (fig. 3) che l'interruttore protegga il cavo sia per guasto nel punto iniziale della conduttura (corrente di corto circuito massima, $I_{cc,max}$), sia per guasto nel punto finale (corrente di corto circuito minima $I_{cc,min}$).

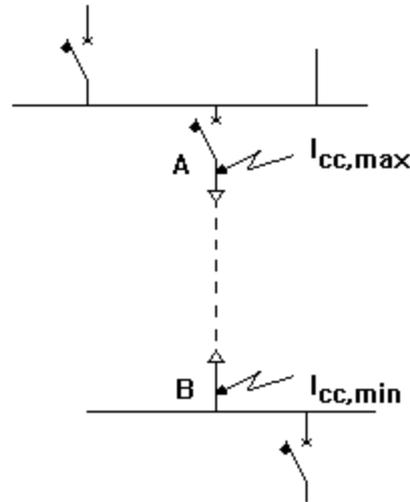


Fig. 3 - Corto circuito nei punti iniziale e finale della condotta

Si devono cioè verificare le seguenti condizioni:

- a) Per il punto A (guasto trifase all'inizio della condotta, vedi fig. 3), la corrente di corto circuito massima $I_{cc,max}$ deve essere inferiore alla corrente I_c corrispondente al punto di intersezione 2 fra le curve delle energie specifiche del cavo e dell'interruttore (fig. 2):

$$I_{cc,max} \leq I_c$$

La corrente di corto circuito massima può essere calcolata con la relazione già vista a proposito del calcolo delle correnti di corto circuito:

$$I_{cc,max} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z}$$

dove:

- U = tensione di esercizio della condotta [V]
- Z = impedenza del circuito a monte del punto di guasto [Ω]

- b) Per il punto B (guasto monofase alla fine della condotta, vedi fig. 3), la corrente di corto circuito minima $I_{cc,min}$ deve essere maggiore o uguale alla soglia d'intervento I_m dello sganciatore magnetico dell'interruttore (fig. 2):

$$I_{cc,min} \geq I_m \quad (1)$$

La corrente di corto circuito minima $I_{cc,min}$ può essere calcolata con la relazione già vista in precedenza:

$$I_{cc,min} = \frac{0,8 \cdot U \cdot S}{1,5 \cdot \rho \cdot L_c} \cdot \frac{1}{1+m} \cdot K_x$$

Sostituendo questa relazione nella (1) si ottiene:

$$\frac{0,8 \cdot U \cdot S}{1,5 \cdot \rho \cdot L_c} \cdot \frac{1}{1+m} \cdot K_x \geq I_m$$

La verifica della condizione (1) può essere eseguita anche in modo diverso, considerando, anziché la corrente di corto circuito minima, la lunghezza limite del cavo per la quale l'interruttore assicura la protezione. Risolvendo, a questo proposito la precedente relazione rispetto a L_c si ottiene:

$$L_c \leq \frac{0,8 \cdot U \cdot S}{1,5 \cdot \rho \cdot I_m} \cdot \frac{1}{1+m} \cdot K_x$$

Il valore di L_c così ottenuto rappresenta appunto la lunghezza massima del cavo che l'interruttore è in grado di proteggere.

Per lunghezze inferiori a L_c il cavo risulta protetto. Per lunghezze superiori a L_c la protezione del cavo non è più assicurata in quanto, a causa della sua elevata impedenza, la corrente di corto circuito alla fine della condotta risulta inferiore alla soglia d'intervento dello sganciatore magnetico e l'interruttore quindi non è più in grado di intervenire in tempi sufficientemente rapidi.

Di conseguenza l'energia specifica lasciata passare dall'interruttore risulta superiore a quella sopportabile dal cavo (vedi fig. 2).

Se si indica con:

$$L_{max} = \frac{0,8 \cdot U \cdot S}{1,5 \cdot \rho \cdot I_m} \cdot \frac{1}{1+m} \cdot K_x$$

la lunghezza massima del cavo che l'interruttore è in grado di proteggere, si ha:

$$L_c \leq L_{max}$$

In definitiva, la condizione precedente serve a verificare che la lunghezza del cavo sia tale da lasciare stabilire, attraverso la sua impedenza, una corrente di corto circuito di valore sufficientemente elevato per far intervenire lo sganciatore magnetico dell'interruttore.

Da quanto visto in precedenza si può concludere che l'interruttore assicura la protezione della condotta dal corto circuito se sono verificate le seguenti condizioni:

a) L'energia specifica lasciata passare dall'interruttore per guasto trifase all'inizio della condotta (punto A, fig. 3) è inferiore o al limite uguale a quella sopportabile dal cavo:

$$E_i \leq E_c$$

Se la precedente condizione non è verificata bisogna intervenire o sulla conduttura, aumentando la portata I_z e quindi la sezione, o sull'interruttore, adottandone uno con energia specifica E_i inferiore (per esempio limitatore).

- b) La lunghezza della conduttura è inferiore o al limite uguale alla lunghezza massima protetta dall'interruttore:

$$L_c \leq L_{\max}$$

Se questa condizione non è verificata bisogna ancora intervenire o sulla conduttura aumentando la portata I_z e quindi la sezione, oppure sull'interruttore, regolando (quando è possibile) la soglia d'intervento I_{m} dello sganciatore magnetico su valori più bassi.

6 - PROTEZIONE CONTRO I CONTATTI INDIRETTI

Per la protezione dai contatti indiretti occorre coordinare l'intervento dell'interruttore con l'impianto di terra o con la conduttura a seconda del sistema di distribuzione adottato per l'impianto.

a) Sistema TT

Deve essere verificata la condizione:

$$R_A \cdot I_a \leq 50$$

dove:

- R_A = resistenza del dispersore di terra e dei conduttori di protezione delle masse [Ω]
- I_a = corrente che provoca l'apertura automatica del dispositivo di protezione [A]

La corrente I_a rappresenta:

- La corrente che provoca l'intervento dell'interruttore automatico in 5.
- La corrente nominale differenziale per gli interruttori differenziali.

Se la condizione precedente non è verificata bisogna intervenire - nel caso di interruttore magnetotermico - sull'impianto di terra diminuendo R_A , oppure - nel caso di interruttore differenziale - sull'interruttore stesso adottandone uno con corrente differenziale nominale più bassa.

b) Sistema TN

Deve essere verificata la condizione:

$$Z_s \cdot I_a \leq U_0$$

dove:

- Z_s = Impedenza del circuito (anello) di guasto, che comprende la sorgente (generalmente il trasformatore), il conduttore attivo fino al punto di guasto e il conduttore di protezione tra il punto di guasto e la sorgente [Ω]
- I_a = corrente che provoca l'intervento dell'interruttore automatico entro un tempo definito, che dipende dal tipo di circuito (di distribuzione o terminale) e dalla tensione nominale del sistema verso terra [A].

Nel caso dei circuiti di distribuzione la I_a è la corrente che provoca l'intervento dell'interruttore in un tempo di 5 s.

Nel caso di circuiti terminali la I_a è la corrente che provoca l'intervento dell'interruttore nei tempi riportati nella seguente tabella:

Tensione di fase del sistema U_0 (V)	Tempo d'intervento massimo dell'interruttore (s)
120	0,8
230	0,4
400	0,2
> 400	0,1

Nel caso in cui di interruttore differenziale, la I_a è la sua corrente differenziale nominale [A].

- U_0 = tensione nominale del sistema verso terra (tensione fra fase e terra) [V]

Perché la protezione dai contatti indiretti sia garantita occorre che la corrente per guasto a massa I_g sia superiore alla soglia d'intervento I_m dello sganciatore magnetico dell'interruttore:

$$I_g \geq I_m$$

In questo modo la corrente di guasto viene ad assumere le caratteristiche di una corrente di corto circuito fra conduttore di fase e conduttore di protezione e l'interruttore interviene in tempi inferiori a quelli riportati nella precedente tabella (intervento istantaneo dovuto allo sganciatore magnetico).

La corrente di guasto può essere calcolata con la stessa formula già usata per il calcolo della corrente di corto circuito minima:

$$I_g = \frac{0,8 \cdot U_0 \cdot S_F}{1,5 \cdot \rho \cdot L_c} \cdot \frac{1}{1+m} \cdot K_x$$

dove:

- 0,8 = coefficiente che tiene conto del presumibile abbassamento della tensione per effetto del corto circuito
- U_0 = tensione del circuito di guasto = tensione di fase (tensione fra conduttore di fase e conduttore di protezione) [V]
- S_F = sezione del conduttore di fase [mm²]
- 1,5 = fattore che tiene conto dell'incremento della resistività del cavo dovuto all'aumento di temperatura durante il corto circuito
- ρ = resistività del conduttore a 20°C [per il rame 0,0178 Ω mm²/m]
- L_c = lunghezza della condotta [m]
- $m = S_F/S_{PE}$ = rapporto fra le sezioni del conduttore di fase e del conduttore di protezione

Rispetto alla sezione del conduttore di fase, la sezione del conduttore di protezione può essere scelta nel modo indicato nella seguente tabella:

Sezione del conduttore di fase S_F (mm ²)	Sezione del conduttore di protezione S_{PE} (mm ²)
$S_F \leq 16$	$S_{PE} = S_F$
$16 < S_F \leq 35$	$S_{PE} = 16$
$S_F > 35$	$S_{PE} = S_F/2$

- K_x = coefficiente che tiene conto della reattanza del cavo e che, a seconda della sezione del conduttore di fase, assume i valori riportati nella seguente tabella:

Sezione (mm ²)	≤ 95	120	150	185	240
K_x	1	0,90	0,85	0,80	0,75

E quindi:

$$\frac{0,8 \cdot U_0 \cdot S_F}{1,5 \cdot \rho \cdot L_c} \cdot \frac{1}{1+m} \cdot K_x \geq I_m$$

Dalla relazione precedente si può ricavare la lunghezza massima della condotta L_{MAX} che assicura la protezione dai contatti indiretti:

$$L_{MAX} = L_c \leq \frac{0,8 \cdot U_0 \cdot S_F}{1,5 \cdot \rho \cdot I_m} \cdot \frac{1}{1+m} \cdot K_x$$

Se la condizione non è verificata si può agire in diverse direzioni:

- intervenendo sull'interruttore diminuendo la soglia d'intervento I_m dello sganciatore magnetico;
- intervenendo sulla conduttura aumentando la sezione dei cavi: prima quella S_{PE} del conduttore di protezione (se inferiore a S_F), quindi quella S_F dei conduttori di fase;
- se i provvedimenti precedenti non permettono di assicurare la protezione dai contatti indiretti, bisogna ricorrere ad un interruttore differenziale: è, in genere, sufficiente adottarne uno a bassa sensibilità con $I_{\Delta N} = (1 \div 3) A$. Questa soluzione è particolarmente indicata per quei circuiti terminali che sono suscettibili di frequenti modifiche o che alimentano prese di corrente alle quali sono collegati cavi flessibili di cui non si conosce né la sezione, né la lunghezza.

c) Sistema IT

Per primo guasto a terra deve essere verificata la seguente condizione:

$$R_T \cdot I_d \leq 50$$

dove:

- R_T = resistenza dell'impianto di terra [Ω].
- I_d = corrente di guasto fra un conduttore di fase ed una massa [A].

Nel caso di secondo guasto a terra bisogna distinguere fra masse collegate a terra singolarmente e masse collegate a terra collettivamente mediante lo stesso impianto di terra.

Nel primo caso (masse collegate a terra singolarmente), il sistema si trasforma in TT e vale la stessa condizione vista a proposito di tale sistema.

Nel secondo caso (masse collegate allo stesso impianto di terra), il sistema si trasforma in TN e devono essere soddisfatte le seguenti condizioni:

1) neutro non distribuito:

$$Z_s \leq \frac{U}{2 \cdot I_a}$$

2) neutro distribuito (condizione sconsigliata dalle Norme CEI):

$$Z'_s \leq \frac{U_0}{2 \cdot I_a}$$

dove:

- Z_s = Impedenza dell'anello di guasto, costituito dal conduttore di fase e da quello di protezione [Ω].
- Z'_s = Impedenza dell'anello di guasto, costituito dal conduttore di neutro e da quello di protezione [Ω].
- U = Tensione nominale del sistema tra fase e fase (tensione concatenata)[V].
- U_0 = Tensione nominale del sistema tra fase e terra (tensione di fase)[V].
- I_a = Corrente d'intervento dell'interruttore automatico entro un tempo determinato, che per i circuiti di distribuzione vale 5 s, mentre per i circuiti terminali dipende dalla tensione nominale dell'impianto e assume i valori riportati nella seguente tabella:

Tensione nominale dell'impianto U_0 / U (V)	Tempo d'interruzione (s)	
	Neutro non distribuito	Neutro distribuito
120/240	0,8	5
230/400	0,4	0,8
400/690	0,2	0,4
580/1000	0,1	0,2

Anche in questo caso (come già per i sistemi TN, sistema in cui si trasforma il sistema IT con le masse collegate allo stesso impianto di terra in caso di secondo guasto a terra), perché la protezione dai contatti indiretti sia garantita occorre che la corrente per guasto a massa I_g sia superiore alla soglia d'intervento I_m dello sganciatore magnetico dell'interruttore:

$$I_g \geq I_m$$

Tale condizione assicura l'intervento dell'interruttore in tempi inferiori a quelli riportati nella precedente tabella.

Le correnti di guasto e le lunghezze massime delle condutture per le quali è assicurata la protezione possono essere calcolate con le seguenti relazioni:

1) Neutro non distribuito:

$$I_g = \frac{0,8 \cdot U \cdot S_F}{1,5 \cdot \rho \cdot L_c} \cdot \frac{1}{1+m} \cdot K_x$$

$$L_{MAX} = L_c \leq \frac{0,8 \cdot U \cdot S_F}{1,5 \cdot \rho \cdot I_m} \cdot \frac{1}{1+m} \cdot K_x$$

dove, oltre ai termini già noti, è:

- U = tensione fase-fase (tensione concatenata) [V]
- S_F = sezione del conduttore di fase (mm^2)
- $m = S_F/S_{PE}$ = rapporto fra le sezioni del conduttore di fase e del conduttore di protezione

Se la condizione $I_g \geq I_m$ non è verificata, si può intervenire nelle seguenti direzioni:

- sull'interruttore diminuendo la soglia d'intervento I_m dello sganciatore magnetico;
- sulla conduttura aumentando prima la sezione S_{PE} del conduttore di protezione (se inferiore a S_F), quindi quella S_F dei conduttori di fase;
- se i provvedimenti precedenti non permettono di assicurare la protezione dai contatti indiretti, bisogna ricorrere ad un interruttore differenziale: è, in genere, sufficiente adottarne uno a bassa sensibilità con $I_{\Delta N} = (1\div3) A$.

2) neutro distribuito (condizione sconsigliata dalle Norme CEI):

$$I_g = \frac{0,8 \cdot U_0 \cdot S_N}{1,5 \cdot \rho \cdot L_c} \cdot \frac{1}{1+m} \cdot K_x$$

$$L_{MAX} = L_c \leq \frac{0,8 \cdot U_0 \cdot S_N}{1,5 \cdot \rho \cdot I_m} \cdot \frac{1}{1+m} \cdot K_x$$

dove, oltre ai termini già noti, è:

- U_0 = tensione fase-conduttore di protezione (tensione di fase) [V]
- S_N = sezione del conduttore neutro (mm^2)
- $m = S_N/S_{PE}$ = rapporto fra le sezioni del conduttore neutro e del conduttore di protezione

Se la condizione $I_g \geq I_m$ non è verificata, si può intervenire nelle seguenti direzioni:

- sull'interruttore diminuendo la soglia d'intervento I_m dello sganciatore magnetico;
- sulla conduttura aumentando prima la sezione S_{PE} del conduttore di protezione (se inferiore a S_F), quindi quella S_N del conduttori neutro (se inferiore a S_F), infine quella S_F dei conduttori di fase;
- se i provvedimenti precedenti non permettono di assicurare la protezione dai contatti indiretti, bisogna ricorrere ad un interruttore differenziale: è, in genere, sufficiente adottarne uno a bassa sensibilità con $I_{\Delta N} = (1\div3) A$.

