

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI MESSINA
Dipartimento di Ingegneria
Contrada Di Dio I, 98166 – Villaggio S. Agata Messina

Appunti Corso di Sistemi Elettrici

Capitolo 08 Protezione delle condutture dal sovraccarico

Anno Accademico 2015-2016

prof. ing. Bruno Azzerboni

Fonti:

Manuali, guide e cataloghi
ABB, bTicino, Gewiss, Merlin Gerin
Schneider, Siemens

Web:

www.elektro.it,
www.voltimum.it
www.electroyou.it

Sommario

8. Protezione delle condutture dal sovraccarico	3
8.1 Sovracorrenti	3
8.2 Sollecitazione termica per sovraccarico di una conduttura.	5
8.2.1 Portata di una conduttura (I_z)	6
8.2.2 Cavi in parallelo	9
8.2.3 Cavi schermati e/o armati	10
8.2.4 Portata nei sistemi trifasi	10
8.2.5 Cavi in aria libera	10
8.2.6 Conduttori debolmente caricati	10
8.2.7 Carico intermittente e variabile	10
8.2.8 Portata termica delle condutture	10
8.3 Scelta dei dispositivi di protezione delle condutture contro i sovraccarichi	11
8.3.1 Coordinamento delle protezioni	15
8.4 Corto circuito	22
8.5 Protezione contro il cortocircuito	24
8.5.1 Energia specifica passante (I^2t)	24
8.5.2 Corto circuito a inizio linea (I_{CCmax})	24
8.5.3 Corto circuito in fondo alla linea (I_{CCm})	25
8.5.4 Condizioni generali di protezione	26
8.6 Casi nei quali è obbligatoria la protezione dal sovraccarico	27
8.7 Casi nei quali può essere omessa la protezione dal sovraccarico	27
8.8 Casi nei quali è vietata la protezione dal sovraccarico	28
8.10 Dimensionamento e protezione del conduttore di neutro	28
8.11 Caduta di tensione	29

8. Protezione delle condutture dal sovraccarico

La protezione contro le sovracorrenti nelle reti di distribuzione elettrica in bassa tensione è una componente importante del problema più generale della sicurezza e dall'affidabilità degli impianti elettrici.

In tale ottica è necessario che i conduttori attivi di un circuito elettrico siano protetti da uno o più dispositivi in grado di interrompere automaticamente l'alimentazione quando si produce sovracorrente.

8.1 Sovracorrenti

Sovracorrente è una qualsiasi corrente superiore alla portata I_z che può circolare nel cavo.

Si tratta di correnti dannose, giacché producono aumenti di temperatura oltre il limite ammissibile. In funzione della loro entità e del tempo di mantenimento le sovracorrenti possono generare aumenti lenti o repentini della temperatura e anche la fusione degli isolanti se non addirittura del conduttore di rame.

Per meglio studiare il problema si usa suddividere le sovracorrenti in due famiglie:

- *i sovraccarichi;*
- *i corto circuiti.*

La protezione contro i sovraccarichi e i corto circuiti può essere assicurata sia in modo separato, con dispositivi distinti, sia in modo unico con dispositivi che assicurano entrambe le protezioni.

Per assicurare la protezione il dispositivo deve:

- interrompere sia la corrente di sovraccarico sia quella di corto circuito, in qualunque punto della linea, prima che esse provochino nel conduttore un riscaldamento tale da danneggiare l'isolamento;
- essere installato in generale all'origine di ogni circuito e di tutte le derivazioni aventi portate differenti (diverse sezioni dei conduttori, diverse condizioni di posa e ambientali, nonché un diverso tipo di isolamento del conduttore)

La frontiera tra sovraccarico e cortocircuito è quanto mai labile e soggettiva, mancando un oggettivo criterio per fissarla. Nella tabella seguente sono evidenziate le differenze principali. Anche le Norme CEI non si sbilanciano eccessivamente a riguardo; pur tuttavia studiano separatamente queste correnti e ne prevedono il controllo e l'interruzione secondo procedure diverse e quasi indipendenti.

	<i>Sovraccarichi</i>	<i>Corto Circuito</i>
<i>Stato dell'Impianto</i>	Integro	Guasto
<i>Range di Valori</i>	$I_z \div 10I_z$	$\geq 10I_z$
<i>Termodinamica</i>	Fenomeno lento e diabatico	Fenomeno velocissimo e adiabatico
<i>Cause</i>	Umane volontarie	Umane involontarie o accidentali
<i>Tempo-Durata</i>	dai secondi, ai minuti alle ore	Millisecondi
<i>Apparecchio di Protezione</i>	Interruttore automatico	Interruttore automatico o fusibile
<i>Installazione della Protezione</i>	Qualsiasi punto sulla linea	All'inizio della linea
<i>Relè di Sgancio dell'Interruttore</i>	Termico bimetallo	Bobina elettromagnetica

Una prima differenza riguarda lo stato dell'impianto.

I *sovraccarichi* si manifestano mentre l'impianto è elettricamente sano, cioè privo di guasti e sottoposto a normali modalità di lavoro. In questo caso responsabile dell'evento è ovviamente un operatore, che sta sfruttando oltre misura (per la quantità o per la sollecitazione unitaria) gli apparecchi utilizzatori a sua disposizione (motori, pompe, corpi illuminanti, ecc.) e, di conseguenza, sollecita eccessivamente le condutture coinvolte che assorbono correnti elevate, superiori alla portata e dunque sovraccaricano i cavi.

Il *corto circuito* avviene invece in un impianto o in un componente in seguito ad un guasto. Per guasto s'intende un cedimento casuale e involontario dell'isolamento di uno o più cavi in tensione verso massa o fra loro. Tale situazione causa un assorbimento di corrente elevatissima tra i due punti in avaria.

Una seconda differenza è puramente quantitativa e convenzionale e riguarda corrente e tempo. Consiste nel limitare a una corrente pari ad esempio a 10 volte la I_z , il confine di demarcazione tra correnti di sovraccarico o di corto circuito e nel fissare in pochi secondi (fino a cinque) il tempo di mantenimento, che caratterizza i cortocircuiti, mentre tempi di durata superiore si considerano dovuti a sovraccarichi.

Una terza differenza riguarda la termodinamica del fenomeno. Il sovraccarico, per le limitate correnti in gioco, può essere tollerato per qualche tempo e poi interrotto, con assoluta facilità, dai dispositivi interni di apertura degli interruttori automatici. Il cortocircuito, al contrario, deve essere interrotto istantaneamente e inoltre l'apertura della corrente sollecita pesantemente i dispositivi spegni arco interni agli interruttori.

Una quarta differenza s'intravede nel diverso modo di rilevazione e sgancio. Il sovraccarico è controllato da relè a bimetallo precisi, ma lenti e tolleranti, mentre il corto è individuato e sganciato da relè elettromagnetici, sensibilissimi e alquanto rapidi. Del problema della protezione contro le sovracorrenti si fa carico per antonomasia l'interruttore magnetotermico, che deve essere costruito rispettando le specifiche di costruzione, di taratura e di prova fissate dalle norme nazionali e internazionali.

Quindi:

sovracorrenti dovute a sovraccarichi

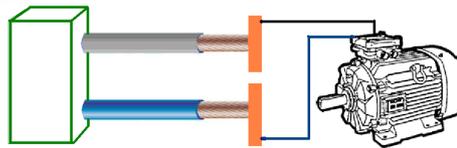
caso tipico di un circuito elettricamente sano, interessato da una corrente fino ad un massimo di 6 - 8 volte la corrente nominale e che può essere sopportata per un tempo determinato producendo sollecitazioni termiche. *Un sovraccarico non controllato può degenerare rapidamente in un corto circuito e quindi sarà necessario adottare delle protezioni che intervengano in tempi tanto più brevi quanto maggiore è l'entità del sovraccarico;*

sovracorrenti dovute a guasti o corto circuiti

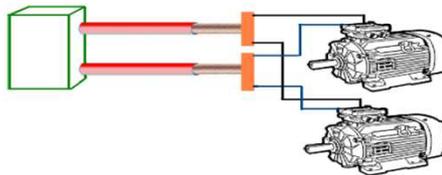
si verificano in un circuito elettricamente guasto a causa di un contatto di impedenza nulla tra due parti in tensione con esclusione della parte di impianto a valle del guasto. La corrente diventa molto intensa in poco tempo sottoponendo il circuito a sollecitazioni termiche, a sforzi elettrodinamici e provocando archi elettrici che possono essere causa d'innescio d'incendio o di esplosioni. *Poiché il funzionamento in corto circuito provoca danni in tempi brevissimi, il guasto deve essere eliminato quasi istantaneamente.*

Esempi:

➤ **Sovraccarico**



nel funzionamento **normale** la temperatura dell'isolante dei cavi non supera il valore massimo ammissibile (70 °C per PVC – 90 °C per EPR): **corrente di impiego $I_b \leq$ portata I_z**

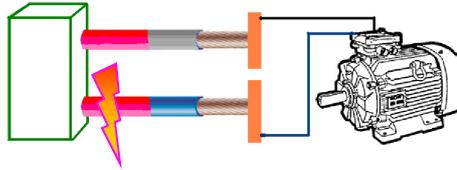


nel funzionamento **in sovraccarico** la temperatura dell'isolante dei cavi supera il valore massimo ammissibile, e, a lungo andare, ne causa il degrado: **corrente di sovraccarico $I_b >$ portata I_z**

Nota bene:

- *lungo il circuito non è presente alcun guasto di isolamento*
- *la corrente di sovraccarico si manifesta in tutta la tratta della conduttura*
- *la corrente di sovraccarico non è in genere molto elevata (tipicamente fino a qualche multiplo della portata)*

➤ **Corto Circuito**



In caso di **corto circuito** è intervenuto un **guasto**: la perdita d'isolamento tra due parti a diverso potenziale; la temperatura dell'isolante dei cavi supera notevolmente il valore massimo ammissibile, e, in tempi brevi, ne causa il degrado: **corrente di corto circuito $I_{cc} \gg$ portata I_z**

Nota bene:

- lungo il circuito è presente un guasto di isolamento
- la corrente di corto circuito si manifesta a monte del punto di guasto ma non a valle
- la corrente di corto circuito può essere molto elevata (dell'ordine di decine di kA)
- agli effetti termici sono associati anche fenomeni di sforzi elettrodinamici

8.2 Sollecitazione termica per sovraccarico di una conduttura.

Una corrente superiore alla portata della conduttura è detta sovracorrente (art. 25-6 norme CEI 64-8). Una conduttura (si preferisce parlare di conduttura anziché di conduttore poiché la portata di un conduttore cambia con le condizioni di posa e un conduttore posato costituisce una conduttura) percorsa da corrente sviluppa calore (per effetto Joule) che viene disperso nell'ambiente circostante finché non raggiunge la temperatura di regime ϑ_c maggiore della temperatura ambiente ϑ_a . A regime termico la potenza sviluppata a causa dell'effetto Joule e la potenza ceduta dal cavo all'ambiente sono uguali a:

$$\frac{\rho l}{\pi r^2} I^2 = h(\vartheta_c - \vartheta_a) 2\pi r l \quad (8.1)$$

dove:

- ρ = resistività del conduttore;
- r = raggio della sezione del conduttore;
- l = lunghezza del conduttore;
- h = coefficiente di conducibilità termica tra conduttore e ambiente;
- I = intensità di corrente;
- ϑ_a = temperatura ambiente;
- ϑ_c = temperatura raggiunta dal conduttore a regime termico.

da cui:

$$\vartheta_c - \vartheta_a = \frac{\rho}{2\pi^2 r^3 h} I^2 \quad (8.2)$$

Un funzionamento in sovraccarico, per un tempo pari all'intervento delle apparecchiature di protezione, porta a un aumento della temperatura che tende a un nuovo valore di regime, proporzionale alla nuova potenza termica dissipata, che deve essere compatibile col materiale isolante impiegato. I materiali isolanti normalmente usati in BT subiscono una degradazione (invecchiamento) tanto più intensa quanto maggiore è la temperatura che assumono. Per ogni tipo d'isolante è definita una temperatura massima di funzionamento ϑ_s (ad esempio 70°C per il PVC) che non deve essere superata nel servizio ordinario per evitarne il decadimento delle caratteristiche elettriche e meccaniche. La protezione dal sovraccarico deve perciò essere tanto più rapida quanto maggiore, è l'entità del sovraccarico stesso e quanto minore è la sovratemperatura ammissibile per l'isolante. Ad esempio un conduttore di 10mm² (50 A circa di portata) tollera una sovracorrente di 100A per circa 16 minuti con una riduzione di vita dello 0,1%.

Molto importante è la temperatura ambiente in cui un cavo è installato; è evidente che quanto più è elevata, tanto minore è la corrente che può circolare in un cavo. Al limite un conduttore isolato in PVC non può essere adottato in un locale la cui temperatura è maggiore di 70°C (vedi tab. 8.1)

Per valori di corrente molto maggiori della portata non si può più parlare di sovraccarico ma di corto circuito. Poiché il funzionamento in corto circuito provoca danni in brevissimo tempo (sollecitazioni termiche, elettrodinamiche, archi elettrici che possono innescare esplosioni e incendi) i relativi dispositivi di protezione devono intervenire istantaneamente.

<i>Sigla</i>	<i>Tipo di materiale</i>	<i>Temperatura Massima di esercizio (°C)</i>	<i>Temperatura Massima di cortocircuito (°C)</i>
EI1	Gomma naturale	60	200
EI2	Gomma siliconica	180	350
TI1	Polivinilcloruro (posa fissa)	70	160
TI2	Polivinilcloruro (posa mobile)	70	150
G5/G7	Gomma etilpropilenica (EPR)	90	250
G9/10	Gomma reticolata (XLPE)	90	250
R2	Polivinilcloruro (posa fissa)	70	160

Tab 8.1 - Massima temperatura di funzionamento per gli isolanti più comuni

8.2.1 Portata di una conduttura (I_z)

Secondo l'art. 21.5 della norma CEI 64-8 si definisce portata di una conduttura (I_z) "il massimo valore della corrente che può fluire in essa, in regime permanente ed in determinate condizioni senza che la sua temperatura superi un valore specificato". La massima corrente che un cavo può portare è la corrente I_z corrispondente alla temperatura $\vartheta_c = \vartheta_s$. Dove, ricordiamo, ϑ_s è la temperatura massima di funzionamento.

Dalla 8.2. si ottiene:

$$I_z = \pi \sqrt{\frac{2hr^3}{\rho} (\vartheta_s - \vartheta_a)} \quad (8.3)$$

Si può in definitiva concludere che la portata di un cavo dipende dalla capacità dell'isolante di sopportare la temperatura, dai parametri che influiscono sulla produzione del calore, come la resistività e la sezione del conduttore, e dagli elementi che condizionano lo scambio termico tra il conduttore e l'ambiente (numero e modalità di posa dei conduttori, temperatura ambiente). La tabella CEI-UNEL 35024-1 (cavi isolati con materiale elastomerico o termoplastico) esprime le portate dei cavi come il prodotto di tre fattori:

$$I_z = I_{z0} x k_1 x k_2 \quad (8.4)$$

dove:

I_{z0} = portata a 30°C di un singolo cavo installato;

k_1 = coefficiente di correzione per temperatura ambiente diversa da 30°C;

k_2 = coefficiente di riduzione per gruppi di cavi in fascio o strato.

Portata a 30°C di un singolo cavo installato (I_0) - La portata I_0 (la tab. 8.2. riporta un esempio di portata I_0 di cavi unipolari in rame, senza guaina con isolamento in PVC o EPR per uno degli otto tipi di posa fondamentali ai fini della determinazione della portata che sono indicati nella Tabella C della parte 5 della Norma CEI 64-8 Allegato A) di un singolo cavo varia a seconda del tipo di cavo installato (unipolare con guaina, unipolare senza guaina, multipolare con guaina), dal numero di conduttori percorsi da corrente (caricati) nel funzionamento normale, e dalle modalità di posa. Il conduttore di protezione non è da considerare conduttore caricato, mentre il neutro, che normalmente non si considera caricato, lo diventa alla presenza di armoniche.

A influenzare la portata I_0 di un cavo concorrono anche la sezione, il numero di conduttori (circuito bipolare, tripolare) e il metodo di posa (tubo protettivo, canale, passerella, ecc..).

Sezione (mm ²)	Numero di conduttori			
	2		3	
	PVC	EPR	PVC	EPR
1,5	17,5	23	15,5	20
2,5	24	31	21	28
4	32	42	28	37
6	41	54	36	48
10	57	75	50	66
16	76	100	68	88
25	101	133	89	117
35	125	164	110	144
50	151	198	134	175
70	192	253	171	222
95	232	306	207	269
120	269	354	239	312
150	309	402	275	355

Tab. 8.2 - Portata I_0 in ampere, di singoli cavi unipolari senza guaina, isolati in PVC o EPR, posati in tubo o incassati nella muratura alla temperatura ambiente di 30°C

Coefficiente di correzione della temperatura ambiente (k_1) - Le portate I_0 sono definite alla temperatura ambiente convenzionale di 30°C (si considera che la temperatura possa occasionalmente raggiungere la temperatura di 35°C). Se la temperatura ambiente è più bassa rispetto a quella convenzionale la portata aumenta, al contrario se la temperatura aumenta la portata diminuisce (tab. 8.3).

Temperatura Ambiente (°C)	PVC	EPR
10	1,22	1,15
15	1,17	1,12
20	1,12	1,08
25	1,06	1,04
30	1	1
35	0,94	0,96
40	0,87	0,91
45	0,79	0,87
50	0,71	0,82
55	0,61	0,76
60	0,50	0,71
65	---	0,65
70	---	0,58
75	---	0,50
80	---	0,41

Tab. 8.3 - Coefficiente correttivo K_1 per temperature ambiente diverse da 30°C

Coefficiente di riduzione per gruppi di cavi in fascio o strato (k_2) - I cavi possono essere posati in fascio o in strato (ovviamente si tratta di cavi multipolari o unipolari appartenenti a circuiti diversi). Un fascio è un raggruppamento di cavi non distanziati, uno strato è un insieme di cavi affiancati o distanziati disposti orizzontalmente o verticalmente (possono essere posati in passerella, a muro, a soffitto ecc.). Se la distanza tra i cavi posati in strato supera due volte il diametro esterno del cavo di sezione maggiore i cavi si dicono distanziati (più cavi disposti in strati sovrapposti dentro un unico contenitore ma non distanziati costituiscono un fascio di cavi). In definitiva il coefficiente di riduzione k_2 tiene conto del tipo di posa ed è applicabile a cavi aventi la stessa temperatura massima di funzionamento. In caso contrario è necessario considerare per tutto l'insieme dei cavi una portata relativa alla temperatura ϑ_s più bassa. Ad esempio posare assieme cavi in PVC con cavi in EPR significa declassare i cavi isolati in EPR a cavi in PVC in quanto non sarebbe ammissibile installare cavi in EPR, che possono raggiungere temperature di $\vartheta_s=90^\circ\text{C}$, vicino a cavi in PVC che invece sopportano una temperatura di $\vartheta_s=70^\circ\text{C}$.

Il coefficiente k_2 (alcuni coefficienti k_2 sono riportati nelle tabelle 8.4 e 8.5) si applica a gruppi di cavi con sezioni contigue e uniformemente caricate; le sezioni devono cioè essere contenute entro tre valori adiacenti unificati come ad esempio 16, 25, 35 mm² oppure 6, 10, 16 mm² ecc... Questo porta a sotto utilizzare i cavi di grossa sezione per cui, per un migliore utilizzo dei cavi, è conveniente non mescolare nello stesso fascio cavi di sezione molto diversa.

Numero di circuiti o di cavi multipolari	Fattore k_2
2	0,80
3	0,70
4	0,65
5	0,60
6	0,57
7	0,54
8	0,52
9	0,50
12	0,45
16	0,41
20	0,38

Tab. 8.4 - Coefficiente K_2 per cavi posati in fascio

Numero di cavi Multipolari in Passerella	Numero di passerelle		
	1	2	3
2	0,88	0,87	0,86
3	0,82	0,80	0,79
4	0,77	0,77	0,76
6	0,73	0,73	0,71
9	0,72	0,68	0,66

Tab. 8.5 - Coefficiente k_2 per cavi multipolari non distanziati posati in strato su passerella perforate, orizzontali sovrapposte.

Se così non fosse il progettista può calcolare la situazione ottimale (i calcoli sono piuttosto laboriosi) oppure, a favore della sicurezza, può applicare il fattore di riduzione:

$$k_2 = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (8.5)$$

dove n è il numero dei circuiti raggruppati. La Norma permette di non considerare i cavi caricati fino al 30% della portata I_z mentre per i cavi non caricati alla massima portata è possibile aumentare il coefficiente K_2 a discrezione del progettista (la Norma non dà indicazioni in proposito).

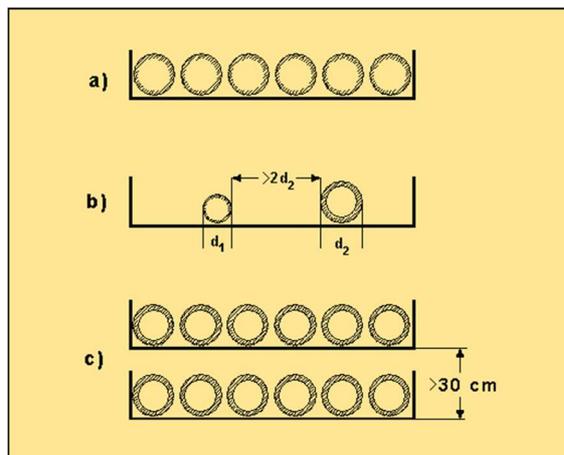


Fig. 8.1 - Cavi in strato: a) non distanziati; b) distanziati; c) in doppio strato

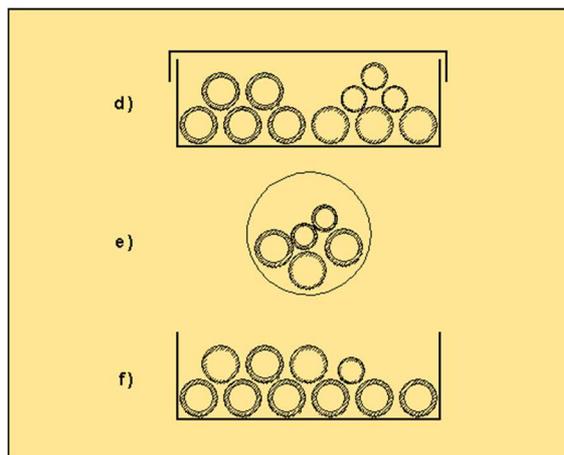


Fig. 8.2 - Cavi in fascio: d) in canale; e) in tubo; f) su passerella perforata

8.2.2 Cavi in parallelo

Quando le correnti da trasportare sono elevate, per evitare di utilizzare cavi di sezione eccessiva o non disponibile oppure per aumentare la potenza da trasferire con condutture già esistenti, si installano cavi di sezione più piccola collegati in parallelo. La portata I_z di n conduttori per fase in parallelo, di un circuito trifase, si determina considerando n circuiti tripolari. Si calcola innanzi tutto la portata I_0 di un circuito tripolare, secondo il tipo di cavo e la modalità di posa, e si applica quindi il coefficiente di riduzione k_2 relativo a n circuiti installati in fascio o in strato a seconda del caso. I cavi in parallelo sono in genere protetti da un unico interruttore di corrente nominale uguale o inferiore alla somma delle portate dei cavi di ogni fase. Per questo motivo i cavi in parallelo devono presentare la stessa impedenza e in particolare devono avere la stessa sezione in modo che la corrente si distribuisca in parti uguali su ciascun cavo a evitare che alcuni cavi si carichino più di altri. Per sezioni fino a circa 70 mm^2 la resistenza prevale sulla reattanza mentre per cavi di sezione maggiore la reattanza non è più trascurabile rispetto la resistenza. Per rendere uniforme la reattanza sui vari cavi è necessario disporre i cavi in modo il più possibile simmetrico rispetto al centro ideale del fascio di cavi (fig. 8.3).

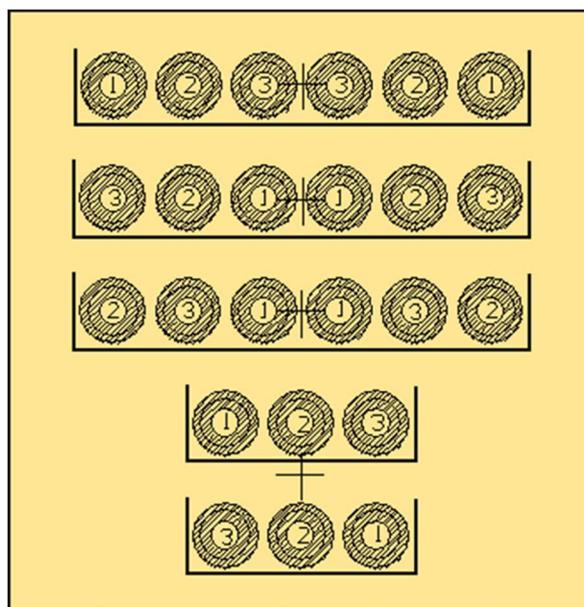


Fig. 8.3 - Disposizione di cavi in parallelo. I cavi di una stessa fase devono essere disposti in modo il più possibile simmetrico rispetto al centro ideale del fascio di cavi.

8.2.3 Cavi schermati e/o armati

Nei cavi di questo tipo, funzionanti in corrente alternata, le tabelle si applicano se l'armatura o lo schermo contengono tutti conduttori attivi appartenenti al circuito. Per i cavi unipolari armati o schermati occorre calcolare la portata col metodo indicato dalla Norma CEI 20-21.

8.2.4 Portata nei sistemi trifasi

I sistemi trifasi si suppongono equilibrati. Nel caso di squilibri di piccola entità per il calcolo della portata si considera la fase più caricata mentre, per forti squilibri, si deve calcolare la portata per il singolo caso particolare, verificando anche l'adeguatezza del conduttore di neutro (senza dimenticare l'eventuale presenza di armoniche, terza e multipli). Si osserva inoltre che, essendo la reattanza di un cavo funzione della distanza dei conduttori, nei sistemi trifasi, con sezioni superiori a 10 mm² (per sezioni inferiori la reattanza è trascurabile rispetto alla resistenza) le pose consigliate sono del tipo a trifoglio. La Norma CEI 64-8, infatti, prevede che in caso di mancata disposizione a trifoglio siano almeno effettuate delle trasposizioni per lunghezze superiori a 100m.

8.2.5 Cavi in aria libera

Un cavo si considera installato in aria libera se:

- la distanza del cavo dalla parete è sufficiente per permettere l'applicazione delle portate appropriate per la posa in aria libera;
- se in passerella forata per più del 30% della sua superficie di base.

Se il cavo è posato in tubo o canale aperti alle estremità, non si ha riduzione di portata se la lunghezza dell'attraversamento non supera i seguenti limiti:

- 0,5 m per cavi di sezione dei conduttori fino a 10 mm²;
- 1,0 m per sezioni oltre 10 mm² e fino a 95 mm²;
- 1,5 m per sezioni oltre 95 mm²

8.2.6 Conduttori debolmente caricati

Se, alle condizioni normali di funzionamento, il carico per tutti i conduttori attivi è inferiore alla loro portata, il fattore di correzione k_2 può essere aumentato. Se infine per un circuito la condizione di esercizio è tale per cui la corrente che lo attraversa è inferiore al 30% di quella ottenuta applicando tutti i coefficienti di correzione relativi a tutto il fascio o strato di cavi, allora il circuito può non essere considerato ai fini del calcolo del coefficiente di correzione.

8.2.7 Carico intermittente e variabile

Se il carico dei conduttori attivi è variabile o intermittente, il fattore k_2 può essere più elevato.

8.2.8 Portata termica delle condutture

La portata termica è il massimo valore della corrente che un conduttore può sopportare, in condizioni di posa specificate, senza che la sua temperatura superi un valore specificato (massima temperatura di funzionamento). La portata dipende dal bilancio termico tra la potenza sviluppata a causa dell'effetto Joule e la potenza ceduta all'ambiente circostante.

8.3 Scelta dei dispositivi di protezione delle condutture contro i sovraccarichi

L'art. 431-1 delle norme CEI 64-8 impone che i conduttori attivi debbano essere protetti da uno o più dispositivi che interrompano automaticamente l'alimentazione quando si produce un sovraccarico o un cortocircuito.

Queste situazioni, entrambe pericolose, possono essere affrontate in modo distinto oppure contemporaneamente utilizzando i seguenti dispositivi:

Relè termici: sono elementi dotati di un dispositivo sensibile alla temperatura del cavo e di una caratteristica di intervento tempo corrente. **Proteggono dai sovraccarichi;**

Interruttori automatici magnetotermici: sono dotati di un dispositivo sensibile alla temperatura del cavo (relè termico) e di un dispositivo che interviene istantaneamente per le elevate correnti di corto circuito (relè magnetico).

Garantiscono la protezione sia per i sovraccarichi sia per i corto circuiti;

Il magnetotermico (fig.8.4) è un dispositivo automatico in grado di stabilire, portare e interrompere tutte le correnti, comprese quelle di cortocircuito, per le quali è stato progettato. L'apertura automatica del circuito è determinata dall'azione di due dispositivi di sgancio, uno magnetico e uno termico, che intervengono quando sono sottoposti ad una sovracorrente.

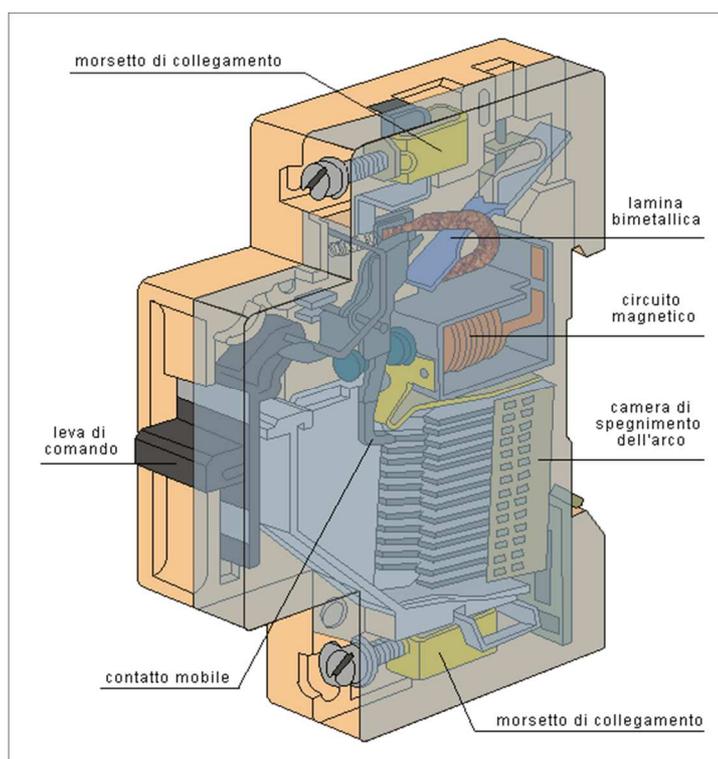
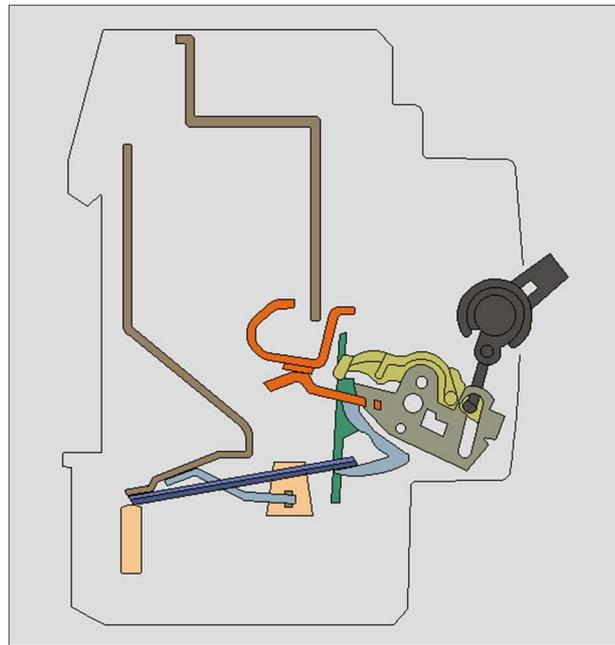
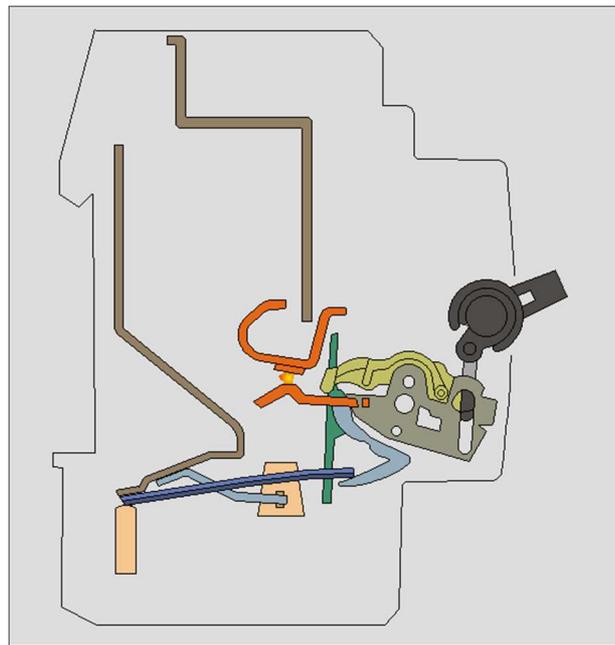


Fig. 8.4 – Interruttore magnetotermico

Lo sganciatore termico (fig. 8.5) è costituito da due lamine metalliche unite fra loro che presentano un diverso valore del coefficiente di dilatazione termico. La bilamina è interessata, direttamente o indirettamente, dalla corrente che circola nel circuito da proteggere.



a) Condizioni di normale funzionamento

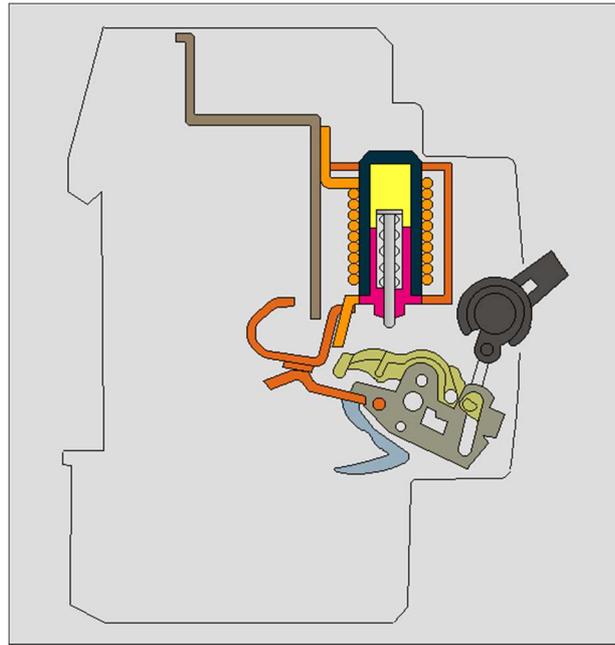


b) Condizione di sovraccarico

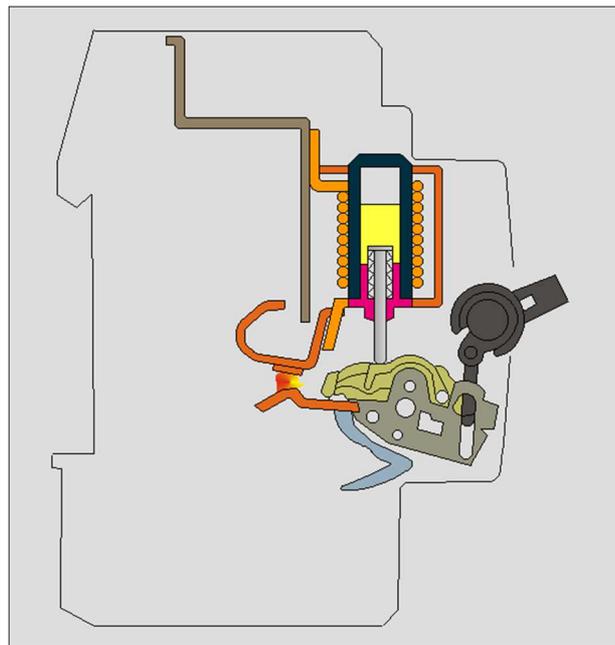
Fig. 8.5 – In caso di sovraccarico si ha la lenta deformazione della lamina bimetallica che provoca l'apertura dei contatti dell'interruttore

All'aumentare della corrente il calore sviluppato per effetto Joule provoca un aumento della temperatura della bilamina con conseguente dilatazione. Il diverso coefficiente di dilatazione determina un allungamento diverso delle due lamine e quindi la lenta deformazione delle stesse. La deformazione viene sfruttata per sganciare un arpionismo che rilascia una molla, precedentemente caricata con la chiusura manuale dell'interruttore, provocando l'apertura dei contatti dell'interruttore.

Allorché la corrente diventa troppo elevata, i tempi di intervento della lamina bimetallica non sono più accettabili e deve intervenire lo sganciatore magnetico (fig. 8.6).



a) Condizioni di normale funzionamento



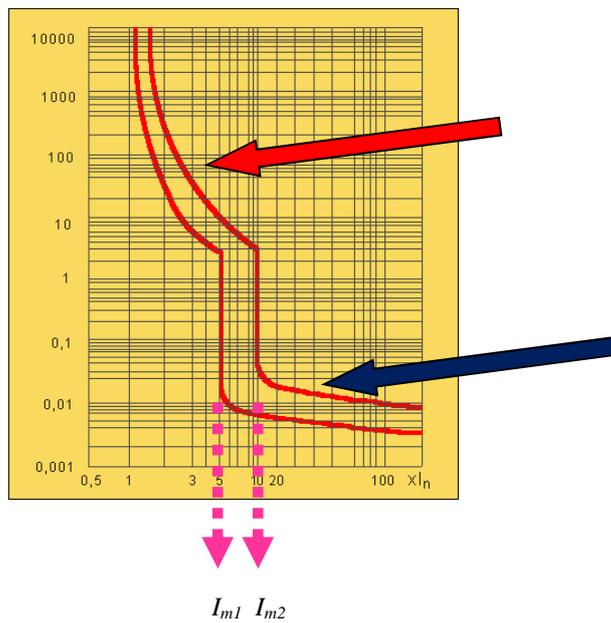
b) Condizione di cortocircuito

Fig. 8.6 – In caso di cortocircuito interviene in tempi brevissimi lo sganciatore magnetico

Il funzionamento dello sganciatore magnetico è basato sulla forza che è esercitata su un nucleo mobile in ferro da un elettromagnete. Il nucleo mobile è sottoposto a due forze opposte, quella magnetica di attrazione verso il nucleo magnetico e quella di una molla caricata in fase di chiusura manuale dell'interruttore. In caso di cortocircuito lo sganciatore interviene in tempi brevissimi vincendo l'azione della molla che provoca l'istantanea l'apertura del circuito sede del guasto.

La caratteristica I-t è:

- in parte (freccia rossa) a tempo inverso (tratto iniziale – relè termico)
- in parte (freccia blu) a tempo indipendente (tratto finale – relè magnetico)



Gli interruttori a Norma CEI EN 60898 (per usi domestici o similari – fino a 125 A) sono classificati in base alle correnti d'intervento del relè magnetico I_{m1} e I_{m2} .

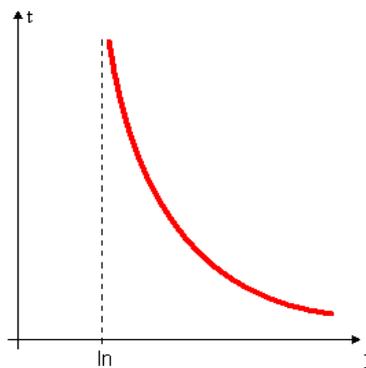
Caratteristica	I_{m1}	I_{m2}
B	$3I_n$	$5I_n$
C	$5I_n$	$10I_n$
D	$10I_n$	$20I_n$

Vantaggi
 ripristino tramite semplice riarmo
 dimensioni standard modulari

Svantaggi
 potere d'interruzione non particolarmente elevato
 costi molto superiori rispetto ai fusibili

Fusibili, con caratteristiche analoghe a quelle degli interruttori automatici (fusibili tipo gI).

La caratteristica I-t è a tempo inverso, in altre parole: quanto più la corrente è maggiore del valore nominale, tanto più il tempo di intervento è minore



Tipi particolari di fusibili sono:

- gG – per usi generali
- aM – per avviamento motori

Vantaggi
rapidità d'intervento (per corto circuito)
elevato potere d'interruzione
dimensioni ridotte
costo limitato

Svantaggi
necessità di sostituzione ad avvenuto intervento
tempi elevati di sostituzione
necessità di ricambi identici
dimensioni non sempre unificate

8.3.1 Coordinamento delle protezioni

Indichiamo con I_b la corrente di impiego del circuito, cioè la corrente che in condizioni normali percorre il cavo di portata I_z , con I_f la corrente che assicura l'effettivo funzionamento del dispositivo di protezione entro il tempo convenzionale in condizioni definite e con I_n la corrente nominale, o regolata, del dispositivo di protezione contro il sovraccarico.

Le relazioni che vincolano questi valori di corrente sono:

- *Il cavo deve avere una portata maggiore o al limite uguale alla corrente d'impiego I_b del circuito;*

$$I_z \geq I_b \quad (8.6)$$

- *Il dispositivo di protezione contro il sovraccarico deve essere adatto a portare con continuità la corrente di impiego I_b senza dar luogo ad interventi intempestivi. La corrente nominale del dispositivo di protezione I_n deve essere quindi maggiore della corrente d'impiego del circuito;*

$$I_n \geq I_b \quad (8.7)$$

- *Il dispositivo di protezione non deve consentire il permanere di correnti superiori alla portata del cavo I_z .*

$$I_n \leq I_z \quad (8.8)$$

Sintetizzando dovrà essere:

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

In effetti, questa condizione non ci permette di scegliere con facilità la corrente nominale I_n del dispositivo di protezione perché tali dispositivi hanno una fascia di intervento incerto tra i valori I_{nf} (corrente convenzionale di non intervento) e I_f (corrente convenzionale di intervento) come schematizzato nelle figure seguenti.

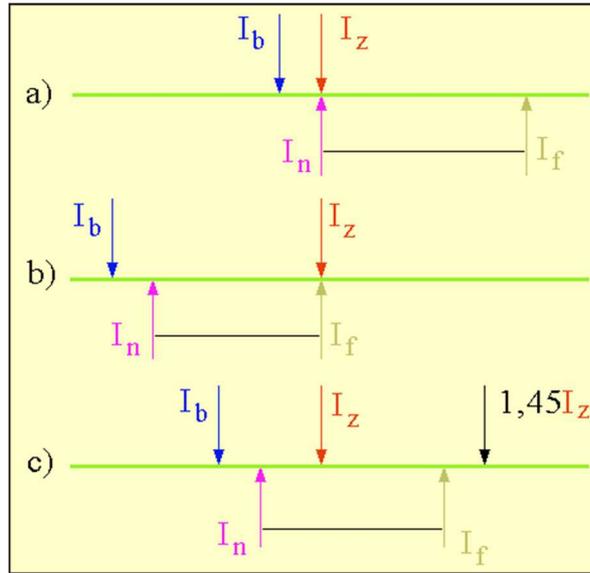


Fig. 8.4 - Scelta del dispositivo di protezione delle condutture contro il sovraccarico.

a) Il cavo è sovraccaricato in modo inammissibile perché le correnti comprese tra I_z e I_f possono non essere interrotte dal dispositivo.

b) Con $I_z = I_f$ la protezione del cavo è massima ma il cavo risulta essere sotto utilizzato in quanto la corrente di impiego I_b , minore di I_n , è molto inferiore alla sua portata I_z .

c) Col compromesso $I_f = 1,45I_z$ si riduce il divario tra I_b e I_z senza aumentare quello tra I_z e I_f dove il cavo potrebbe non essere protetto.

Esaminiamo i seguenti casi:

$$I_n = I_z$$

Nella zona tra I_n e I_f il dispositivo potrebbe non intervenire e la conduttura, essendo presente una corrente maggiore di I_z risulterebbe sovraccaricata. Se ad esempio si usa un fusibile con $I_f/I_n = 1,6$ e con un tempo convenzionale d'intervento $t_c=3$ h si avrebbe un sovraccarico del 60% per un tempo di tre ore con conseguente riduzione di vita del cavo (fig. 8.4 a) .

$$I_f = I_z$$

Una corrente superiore alla portata I_z è interrotta ma aumenta il divario tra la corrente d'impiego I_b e la portata del cavo I_z ; il cavo risulta pertanto sotto utilizzato (fig.8.4 b) .

Una soluzione di compromesso è stata raggiunta in sede normativa con il soddisfacimento della seguente condizione (fig. 8.4 c):

$$I_f \leq 1,45xI_z$$

Da quanto detto sopra si può rilevare che tanto più è ampio il divario tra I_b e I_z tanto meno è utilizzato il cavo, quanto più è ampio il divario tra I_z ed I_f tanto meno è protetto il cavo. Il compromesso raggiunto in sede normativa è accettabile perché si accorcia la vita del cavo solo se si verificano contemporaneamente le seguenti condizioni:

La corrente che si stabilisce nel circuito è compresa tra I_z e I_f ;

- Il sovraccarico è di lunga durata.
- Il dispositivo di protezione non interviene anche per correnti prossime ad I_f .

Riassumendo possiamo affermare che “le caratteristiche di funzionamento di un dispositivo di protezione delle condutture contro i sovraccarichi devono soddisfare le seguenti condizioni” (Art. 433-2 Norme CEI 64-8):

$$I_b \leq I_n \leq I_z \quad (8.9)$$

$$I_f \leq 1.45 I_z \quad (8.10)$$

Le seguenti disequazioni comportano conseguenze diverse a seconda che il dispositivo di protezione utilizzato sia un interruttore automatico, uno sganciatore termico oppure un fusibile.

Interruttori automatici

La condizione peggiore riguarda gli interruttori non regolabili (vedi “Dispositivi di manovra e protezione”) per i quali, se sono costruiti secondo le norme CEI 23-3 e CEI 17-5 risulta che è al massimo $I_f = 1.45 I_n$ quindi la (8.10) diventa:

$$1.45 I_n \leq 1.45 I_z$$

e se deve essere:

$$I_n \leq I_z$$

anche la (8.10) è rispettata. La protezione è quindi sicuramente conforme alle norme se è $I_b \leq I_n \leq I_z$.

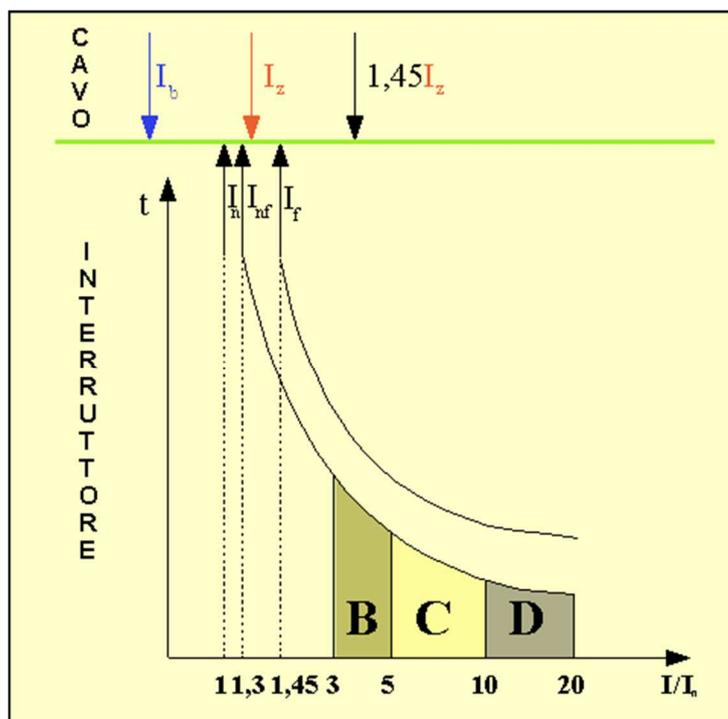


Fig. 8.5 - Il compromesso normativo per la protezione dei cavi contro i sovraccarichi con interruttori automatici

SCELTA DEL DISPOSITIVO DI PROTEZIONE

Per scegliere in modo corretto le caratteristiche del dispositivo di protezione occorre considerare i seguenti valori di corrente:

- I_b è la corrente d'impiego del circuito che, in condizioni normali, percorre le condutture;
- I_z è la portata della conduttura;
- I_n è la corrente nominale (termica) del dispositivo di protezione oppure, nel caso di apparecchi regolabili, è la corrente di regolazione.

Si tratta ora di stabilire quali sono le relazioni che devono intercorrere tra i precedenti valori. Occorrerà innanzitutto che sia verificata la condizione:
 $I_b \leq I_n$

in modo che il dispositivo di protezione non intervenga per valori minori della corrente d'impiego. Altra condizione da rispettare è:

$$I_n \leq I_z$$

in modo che non venga superata la portata del cavo. Le due relazioni possono essere sintetizzate nell'unica disequazione:

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

che determina un intervallo di scelta della corrente I_n del dispositivo (Fig. 1A).

La scelta della corrente I_n viene però complicata dal fatto che i dispositivi di protezione hanno una fascia di intervento incerto tra i valori I_{nf} ed I_f come schematizzato in Fig. 2A.

A seconda della posizione reciproca delle varie correnti si possono avere i seguenti due casi limite:

- $I_n = I_z$ (Fig. 3A)

In questo caso la protezione non è efficace in quanto, nella fascia da I_n ad I_f , il dispositivo può non intervenire e la conduttura, essendoci una corrente maggiore di I_z , risulta sovraccaricata.

- $I_f = I_z$ (Fig. 4A)

In questo caso la protezione è efficace perchè il dispositivo interviene in ogni caso per una corrente non superiore alla portata I_z della conduttura, ma occorre scegliere una I_z troppo maggiore di I_b ; il cavo risulta pertanto sottoutilizzato.

Una soluzione di compromesso tra i due casi limite è quella prevista dalla Norma che stabilisce il soddisfacimento delle condizioni seguenti:

$$\begin{aligned} I_b &\leq I_n \leq I_z \\ I_f &\leq 1.45 I_z \end{aligned} \text{ (Fig. 5A)}$$

In questo modo il divario tra I_b ed I_z diminuisce, permettendo un migliore sfruttamento del cavo. La protezione è efficace tranne che per correnti comprese nell'intervallo $I_z - I_f$ per le quali il dispositivo potrebbe non intervenire fino al valore del tempo convenzionale.

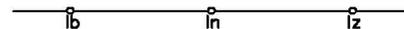


Fig. 1A

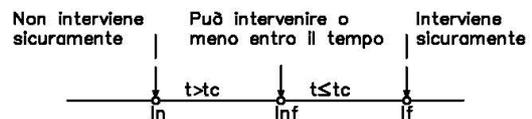


Fig. 2A

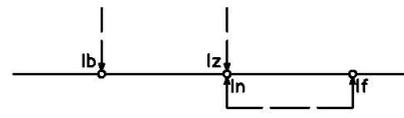


Fig. 3A

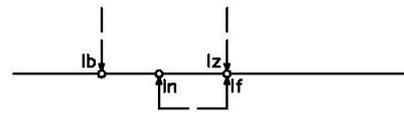


Fig. 4A

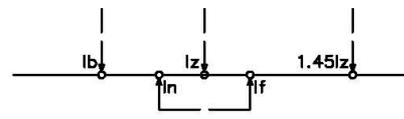
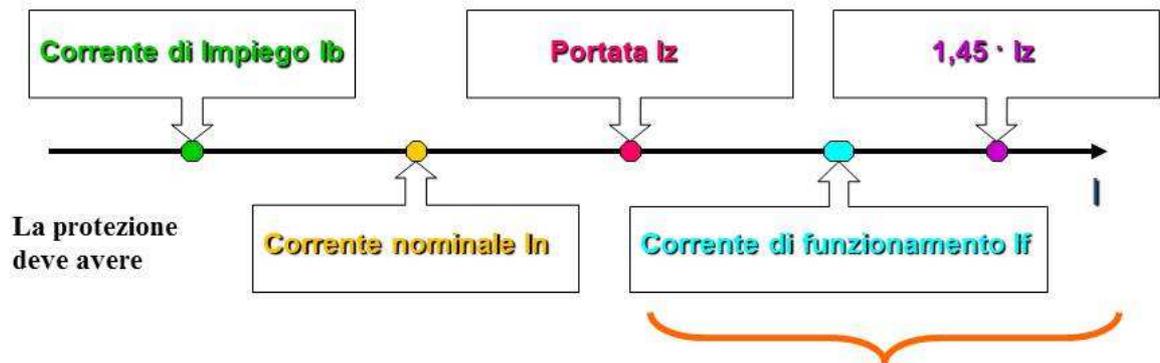


Fig. 5A

SOVRACCARICO [Norma CEI 64-8 art. 433.2]

data una condotta che abbia



In definitiva:

$$\begin{aligned} I_b &\leq I_n \leq I_z \\ I_f &\leq 1,45 \cdot I_z \end{aligned}$$

- La corrente nominale deve avere un valore compreso tra il valore della corrente di impiego e il valore della portata
- Nel caso di impiego di fusibili, la corrente di funzionamento non deve superare la portata maggiorata del 45 %

- nel caso di impiego di *interruttori automatici* conformi alle norme CEI 23-3 (EN 60898) e CEI 17-5 (EN 60947-2) risulta:

$$I_f = 1,45 I_n \quad [\text{CEI 23-3}]$$

$$I_f = 1,25 I_n \quad [\text{CEI 17-5}]$$

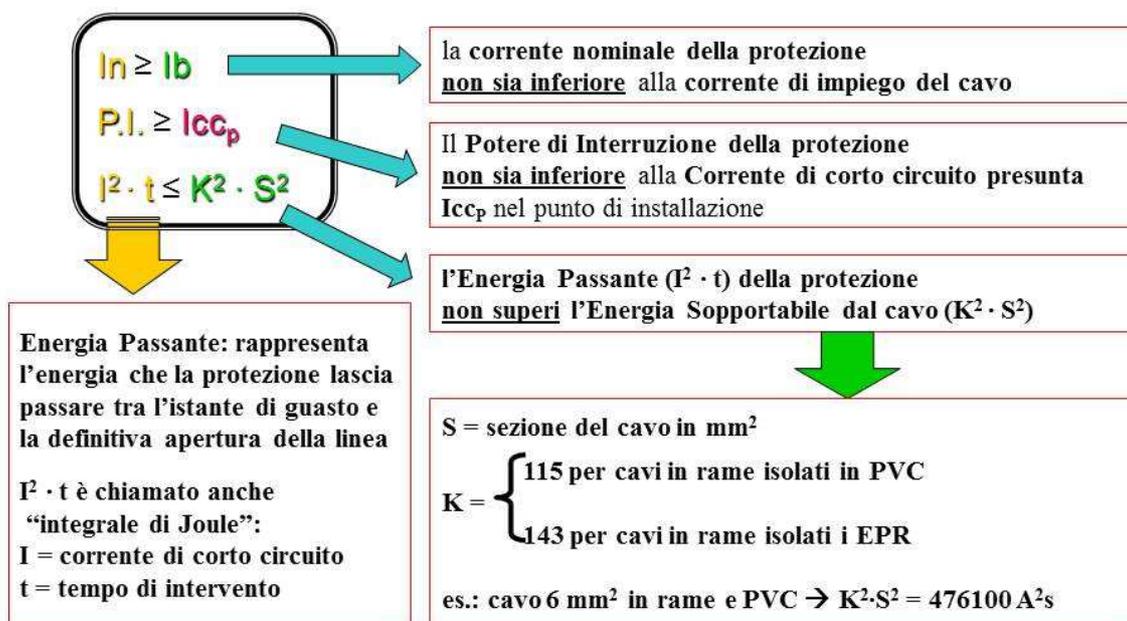
e pertanto, dovendo essere $I_n \leq I_z$, la verifica $I_f \leq 1,45 I_z$ è **sempre** automaticamente soddisfatta

- nel caso di impiego di *fusibili* risulta generalmente: $I_f = 1,6 I_n$ e pertanto è sempre necessario valutare che sia $I_f \leq 1,45 I_z$

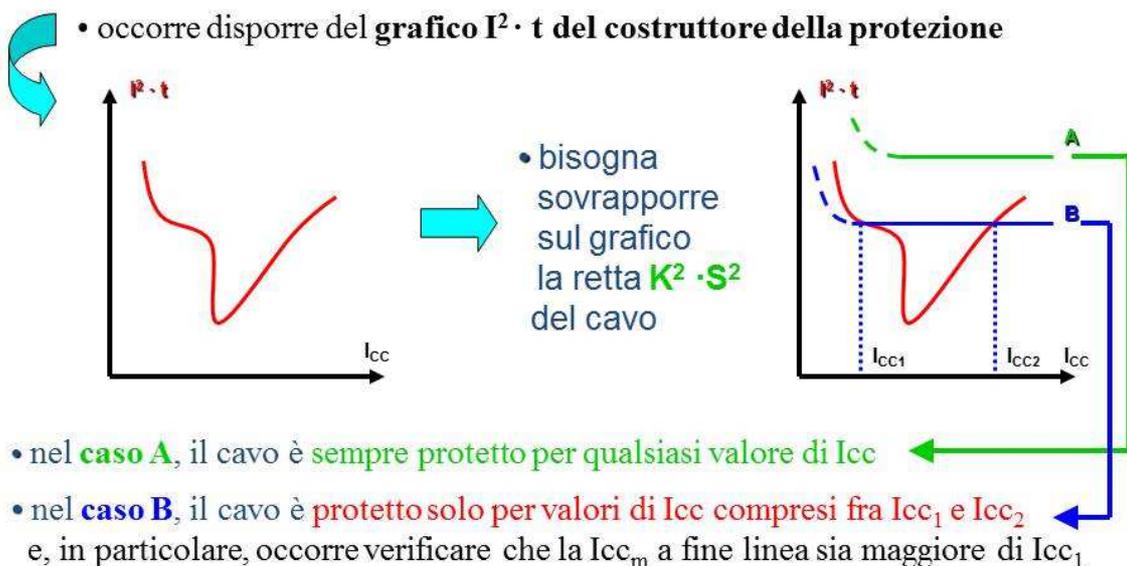
La Norma CEI 64-8 ammette il sovraccarico ma per tempi limitati: la verifica $I_f \leq 1,45 I_z$ intende dire che: è ammissibile sovraccaricare il cavo fino al 45% in più della portata e questo sovraccarico non deve durare oltre un tempo convenzionale (1 h o 2 h)

CORTO CIRCUITO [Norma CEI 64-8 art. 434.3]

E' NECESSARIO CHE LA PROTEZIONE POSSIEDA:



CORTO CIRCUITO: verifica grafica di $I^2 \cdot t \leq K^2 \cdot S^2$



NOTA:

Se la protezione è disposta a monte ed è idonea a proteggere contro il sovraccarico, la verifica dell'energia passante non è necessaria

Sganciatori termici

Per gli sganciatori termici da accoppiare ai teleruttori si ha che $I_f = 1.2xI_n$ e la (8.10) vale:

$$1.2xI_n \leq 1.45xI_z$$

da cui:

$$I_n \leq \frac{1.45}{1.2}xI_z; \quad I_n \leq 1.208xI_z$$

Se si sceglie il dispositivo con $I_n \leq I_z$ è soddisfatta anche la (8.10).

La protezione è quindi sicuramente conforme alle norme se è $I_b \leq I_n \leq I_z$.

Fusibili

I fusibili, in funzione della loro corrente nominale I_n , hanno le correnti I_{nf} e I_f legate dalle relazioni indicate in tab. 8.6:

Corrente nominale I_n	Tempo convenzionale	Correnti convenzionali	
		I_f	I_{nf}
(A)	(h)		
$I_n \leq 63$	(1)	$1.6I_n$	$1.25I_n$
$63 < I_n \leq 160$	(2)	$1.6I_n$	$1.25I_n$
$160 < I_n \leq 400$	(3)	$1.6I_n$	$1.25I_n$
$400 < I_n$	(4)	$1.6I_n$	$1.25I_n$

Tab. 8.6 - Correnti convenzionali di fusione I_f non fusione I_{nf} dei fusibili gG e gM.

dal momento che I_f vale $1.6I_n$ risulta necessaria la verifica della condizione $I_f = 1.45I_n$ per cui la 8.10 diventa:

$$1.6xI_n \leq 1.45xI_z$$

$$I_n \leq \frac{1.45}{1.6}xI_z; \quad I_n \leq 0.906xI_z$$

Queste disequazioni sono più restrittive di $I_n \leq I_z$ quindi l'unica condizione che deve essere soddisfatta per avere protezione da sovraccarico è: $I_b \leq I_n \leq 0.906xI_z$. Questo significa che per proteggere una conduttura dai sovraccarichi per mezzo di fusibili, è necessario che la corrente nominale del fusibile non superi il 90% della portata del cavo e quindi il cavo deve essere sottoutilizzato (questo, come è noto, non avviene con l'impiego degli interruttori automatici ad uso domestico e similare perché si ha $I_f = 1.45xI_n$ e con gli interruttori ad uso industriale dove $I_f = 1.25xI_n$ è sufficiente quindi che sia $I_n \leq I_z$). Diversamente dall'interruttore automatico che viene provato a caldo, cioè dopo una prova alla corrente nominale I_n , il fusibile viene provato alla corrente a freddo, cioè a temperatura ambiente. Se le prove eseguite sui fusibili fossero analoghe a quelle eseguite sugli interruttori automatici, anche per i fusibili, come per gli interruttori automatici varrebbe la stessa relazione $I_f = 1.45xI_n$ per cui $I_n \leq I_z$ senza dover sottoutilizzare il cavo. In sede normativa si sta procedendo verso l'uniformità delle due norme per colmare questo piccolo svantaggio dei fusibili nei confronti degli interruttori automatici. Se la conduttura presenta tratti con portate diverse (per es. a causa di diverse condizioni di posa) le condizioni 8.9 e 8.10 devono essere verificate per i tratti con portata inferiore, mentre se il dispositivo è posto a monte di più linee derivate esso protegge dal sovraccarico tutte le condutture che soddisfano alle condizioni 8.9 e 8.10. Abbiamo visto come in una conduttura protetta con dispositivi a tempo dipendente possa essere tollerata una sovracorrente fino all'intervento della protezione stessa. Questa sovracorrente è tollerabile dal cavo se la sua curva di sovraccaricabilità rimane al di sopra della caratteristica d'intervento del dispositivo di protezione. In genere questa verifica non è necessaria se le caratteristiche d'intervento dei dispositivi di protezione sono scelte con i criteri sopra esposti.

8.4 Corto circuito

Se il valore dell'impedenza di un circuito scende al di sotto del valore di pieno carico, il sistema assorbe una corrente che è tanto maggiore quanto minore è il valore dell'impedenza Z . Al limite per Z che tende a zero il valore della corrente assorbita tende all'infinito. Questo non si verifica mai perché il valore dell'impedenza a monte del guasto, per quanto piccolo possa essere, non è mai nullo. Dopo un periodo transitorio, dipendente dai parametri dell'impianto, il fenomeno assume carattere permanente. La corrente di corto circuito è quindi composta da due termini: uno sinusoidale e simmetrico all'asse dei tempi e uno unidirezionale transitorio, con andamento esponenziale e che si estingue dopo un certo tempo, dovuto alla presenza dell'induttanza del circuito. La componente unidirezionale rende la corrente di corto circuito asimmetrica durante il periodo transitorio per diventare praticamente simmetrica dopo tale periodo.

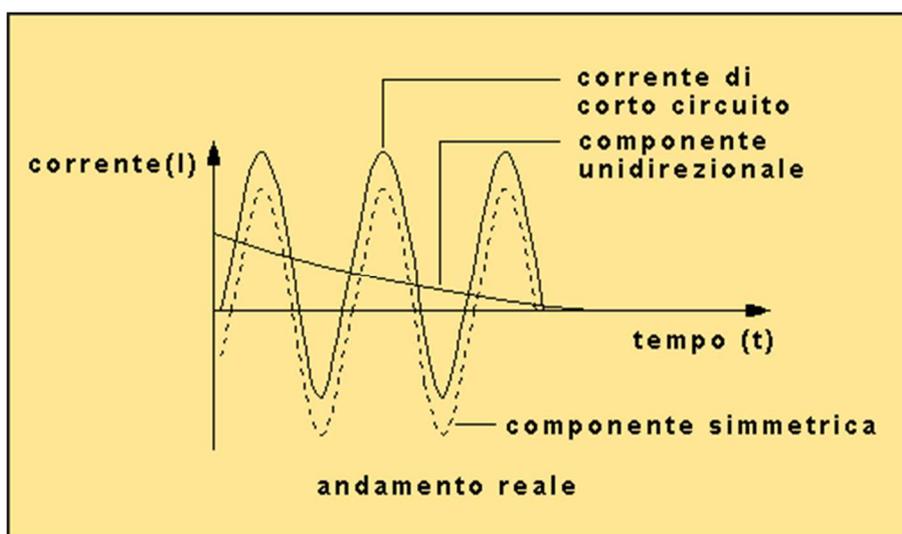


Fig. 8.6 – Andamento reale della corrente di corto circuito

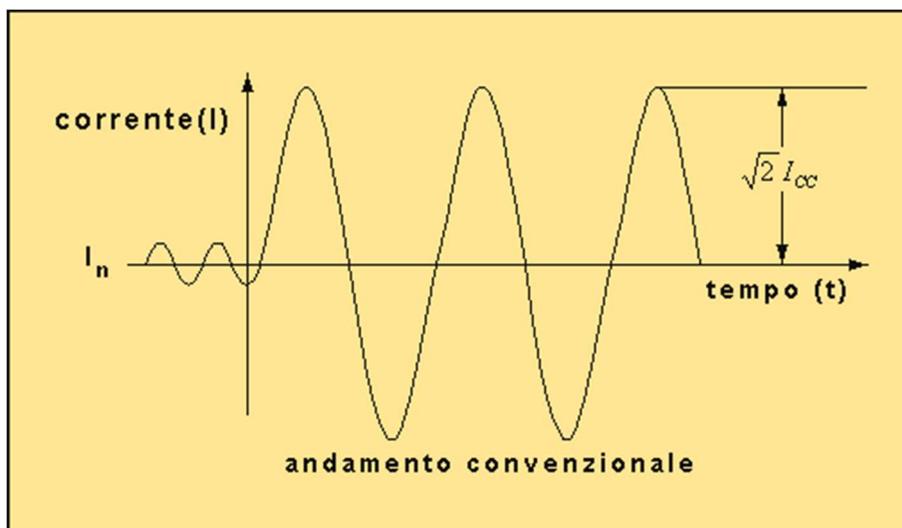


Fig. 8.7 – Andamento convenzionale della corrente di corto circuito

L'intensità della corrente di corto circuito, considerando trascurabile l'impedenza di contatto del punto di guasto (generalmente lo scopo consiste nel determinare il valore più elevato della corrente di corto circuito e quindi si può considerare la situazione più gravosa), dipende dai seguenti fattori:

- dalla potenza in kVA, a parità della tensione di corto circuito del trasformatore di cabina che alimenta l'impianto (Tensione di corto circuito U_{cc} - Tensione che applicata al primario del trasformatore, con i morsetti del secondario chiusi in corto circuito, fa circolare nel secondario la corrente nominale - nei trasformatori MT/BT è dell'ordine del 5% - 6% della tensione nominale), nel senso che maggiore è la potenza del trasformatore maggiore è la corrente;

- dai modi in cui si verifica il C.C; tra fase e fase, tra fase e neutro, tra fase e terra, fra tre fasi. Il corto circuito trifase è il più pericoloso anche se si verifica raramente non dipendendo normalmente da cause accidentali ma da manovre errate da parte del personale che gestisce gli impianti;
- dall'impedenza del tratto di linea posto fra trasformatore e punto di guasto (direttamente proporzionale alla lunghezza ed inversamente proporzionale alla sezione).

Generalizzando il valore della corrente di corto circuito può essere calcolato mediante la seguente relazione:

$$I_{cc} = \frac{\text{tensione applicata al circuito di guasto}}{\text{impedenza del circuito di guasto}}$$

I valori più elevati di corrente di corto circuito si hanno vicino ai morsetti di bassa tensione del trasformatore; allontanandosi dal trasformatore le correnti di corto circuito diminuiscono notevolmente per assumere valori molto bassi al termine delle linee lunghe. La determinazione per via analitica delle correnti presunte di corto circuito è piuttosto laboriosa, ma in pratica si possono ottenere risultati accettabili con l'ausilio di tabelle o meglio con programmi sviluppati al calcolatore. In ogni caso volendo determinare la corrente di cortocircuito presunta in un punto dell'impianto bisogna innanzi tutto calcolare le resistenze e le reattanze nei vari punti dell'impianto (tab. 14.7) ed infine calcolare la corrente di corto circuito (corrente di corto circuito trifase presunta) con la nota formula:

$$I_{cc} = \frac{U}{\sqrt{3}x\sqrt{(R_1 + R_2 + R_3)^2 + (X_1 + X_2 + X_3)^2}}$$

Con U (tensione nominale a vuoto fra le fasi del trasformatore) espressa in V e R e X espressi in $m\Omega$ la I_{cc} risulta in kA.

Componenti dell'impianto	Resistenze (mW)	Reattanze (mW)
<i>Rete a monte</i>	$R_1 = Z_1 \cos \varphi$ $\cos \varphi = 0.15$ $Z_1 = \frac{U^2}{S_{cc}} \times 10^{-3}$ S_{cc} = potenza di corto circuito A monte del trasformatore in MVA	$X_1 = Z_1 \sin \varphi$ $\sin \varphi = 0.98$
<i>Trasformatore</i>	$R_2 = \frac{P_{cu} \times U^2}{S_n^2}$ P_{cu} = perdite nel rame (kW) S_n = Potenza nominale (kVA)	$X_2 = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2}$ $Z = \frac{U_{cc}}{100} \times \frac{U^2}{S_n}$ U_{cc} = tensione di corto circuito percentuale (%)
<i>Interruttori</i>	Trascurabili	Trascurabili
<i>Collegamenti in cavo</i>	$R_3 = \rho \frac{l}{S}$ l = lunghezza (m) S = sezione (mm ²) r = resistività (mm ² mW/m)	X_3 Valori di reattanza da desumere dalle tabelle dei costruttori per i casi generali o da calcolare per i casi particolari
<i>Collegamenti in sbarre</i>	$R_3 = \rho \frac{l}{S}$ l = lunghezza (m) S = sezione (mm ²) r = resistività (mm ² mW/m)	X_3 Valori di reattanza da desumere dalle tabelle dei costruttori per i casi generali o da calcolare per i casi particolari

Tab. 8.7 - Determinazione delle resistenze e delle reattanze nei vari punti dell'impianto.

8.5 Protezione contro il cortocircuito

8.5.1 Energia specifica passante (I^2t)

In caso di corto circuito le parti di un impianto interessate al guasto vengono sottoposte a sollecitazioni dinamiche e termiche che sono proporzionali al quadrato della corrente di guasto e al tempo impiegato dalle protezioni per interromperla. Durante la fase di eliminazione del guasto si sviluppa una certa quantità di energia che è lasciata passare dal dispositivo di protezione durante il suo intervento: questa energia si trasforma in calore ($W = RI^2t$) che va a sollecitare le varie parti dell'impianto. Questa energia prende il nome di "energia specifica passante" chiamata integrale di Joule ($\int_0^t I^2 dt$), o più semplicemente indicata col termine I^2t (A^2s). Viene detta specifica in quanto è espressa per unità di resistenza dei vari elementi del circuito ed è la stessa per tutti i suoi componenti percorsi in serie dalla stessa corrente. La conoscenza dell'energia specifica passante è fondamentale per il dimensionamento e la protezione delle varie parti dell'impianto ed inoltre per stabilire la protezione di sostegno (back-up) e la selettività fra interruttori.

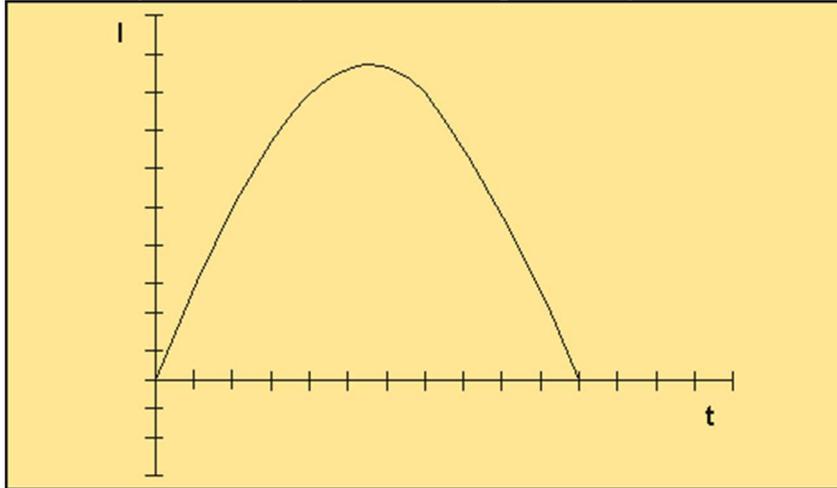


Fig. 8.8 - Integrale di Joule $\int_0^t I^2 dt$ (energia specifica passante) calcola l'area sottesa dalla curva rappresentante la corrente di guasto rispetto all'asse dei tempi.

8.5.2 Corto circuito a inizio linea (I_{Cmax})

Il dispositivo deve interrompere la corrente di corto circuito prima che possano essere danneggiati, a causa degli effetti termici dovuti all'energia passante e a quelli meccanici dovuti alle sollecitazioni di origine elettrodinamica, i conduttori e le connessioni. Deve essere installato all'inizio della condotta protetta con una tolleranza di 3 m dal punto di origine se non vi è pericolo d'incendio e se si prendono le normali precauzioni atte a ridurre al minimo il rischio di corto circuito. Deve essere scelto con una corrente nominale tale da evitare che il dispositivo possa intervenire per correnti inferiori o uguali a quella d'impiego (deve essere: $I_n \geq I_b$ dove I_n è la corrente nominale o di regolazione dell'interruttore. Questa condizione è imposta anche per la protezione da sovraccarico). Il suo potere d'interruzione non deve essere inferiore al valore efficace della componente simmetrica della corrente presunta di corto circuito nel punto d'installazione. L'intervento deve essere abbastanza rapido da impedire che il cavo possa assumere temperature superiori al limite ammissibile limitando quindi l'energia termica passante a valori sopportabili dal conduttore. Deve essere quindi verificata la condizione:

$$I^2 \Delta t \leq k^2 S^2 \quad (14.11) \text{ (Energia Specifica Passante)}$$

dove:

$I^2 \Delta t$ espressa in A^2s , è l'energia specifica (per unità di resistenza) lasciata passare dall'interruttore;

k è una costante caratteristica dei cavi che dipende sia dal materiale del conduttore sia dal tipo di isolante (tab. 8.8);

S è la sezione del cavo in mm^2 .

Il valore di $I^2 \Delta t$ deve essere fornito dal costruttore che normalmente mette a disposizione curve caratteristiche per ogni apparecchio. Nel caso d'interruttori con intervento ritardato il valore di $I^2 \Delta t$ deve essere calcolato come prodotto del quadrato del valore efficace della corrente di cortocircuito per il tempo totale di apertura.

Costante K		conduttore	
		rame	alluminio
Isolante	PVC	115	74
	G2	135	87
	EPR/XLPE	143	87

Tab. 8.8

I valori K sono stabiliti dalle Norme e sono validi per corto circuiti di durata non superiore a $\Delta t = 5 \text{ sec}$, entro i quali si assume che il riscaldamento dei conduttori avvenga in modo adiabatico, cioè senza trasmissione di calore all'isolante ed alle parti circostanti. La verifica consiste nel confrontare le curve caratteristiche dell'energia passante del dispositivo, in funzione della corrente presunta di corto circuito, con l'energia specifica passante ($K^2 S^2$) tollerabile dal conduttore.

8.5.3 Corto circuito in fondo alla linea (I_{ccm})

L'intervento delle protezioni deve in alcuni casi essere verificato anche in fondo alla linea dove la corrente di corto circuito I_{ccm} potrebbe essere di valore modesto (anche se la presenza di una protezione termica è in genere considerata sufficiente a garantire la protezione contro il corto circuito in fondo alla linea) tale da non permettere l'intervento della protezione magnetica in tempo utile. Il calcolo si può effettuare come segue:

$$I_{ccm} = \frac{0.8xUxS_F}{1.5\rho x2xl} xk_x xk_p \quad \text{conduttore di neutro non distribuito}$$

$$I_{ccm} = \frac{0.8xU_0xS_F}{1.5\rho x(1+m)xl} xk_x xk_p \quad \text{conduttore di neutro distribuito}$$

dove:

U (V) è la tensione concatenata di alimentazione;

ρ ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) è la resistività a 20° C del materiale del conduttore (0,018 per il rame, 0,027 per l'alluminio);

L (m) è la lunghezza della conduttura da proteggere;

S_F (mm^2) è la sezione del conduttore di fase;

I_{ccm} è la corrente di corto circuito in fondo alla linea;

U_0 (V) è la tensione di fase di alimentazione;

m è il rapporto tra la sezione del conduttore di fase e la sezione del conduttore di neutro.

Nelle formule si utilizza un coefficiente (0,8) che tiene conto della riduzione della tensione di alimentazione che si ha a causa della corrente di corto circuito e un coefficiente (1,5) che tiene conto dell'aumento della resistenza dei conduttori dovuto al loro riscaldamento.

Fattore K_x (reattanza dei cavi)					
Sez. cavo (mm^2)	120	150	185	240	300
K_x	0,9	0,85	0,80	0,75	0,72
Fattore K_p (cavi in parallelo)					
n° cavi in parall.o	1	2	3	4	5
K_p	1	2	2,65	3	3,2

Tab. 8.9 – Fattori di correzione

I fattori K_x e K_p sono da utilizzarsi rispettivamente in presenza di cavi di sezione superiore a 95 mm^2 , per tenere conto della loro reattanza, e nel caso di diversi conduttori in parallelo.

8.5.4 Condizioni generali di protezione

A seconda che la protezione avvenga tramite interruttore automatico oppure fusibile occorre fare alcune distinzioni.

Fusibili

Sono dispositivi limitatori e come tali l'energia specifica passante decresce all'aumentare della corrente di corto circuito simmetrica. Per tutte le correnti superiori a I_{ccm} (corrente di corto circuito minima in fondo alla linea) l'integrale di Joule è verificato, mentre, per tutti i valori inferiori a I_{ccm} l'energia passante attraverso il fusibile diventa eccessiva per la protezione del cavo (se si installa il fusibile all'inizio della linea e supponendo una linea che si estenda all'infinito si ha che a causa dell'impedenza caratteristica del cavo, la corrente di corto circuito, allontanandosi dal punto d'installazione, tende a diminuire). Per la verifica si impiegano i grafici, forniti dal costruttore, indicanti il valore dell' I^2t del fusibile, sui quali si traccia la caratteristica K^2S^2 del cavo (fig. 8.9). Se quest'ultima cade completamente al di sopra della caratteristica del fusibile, il cavo è protetto per ogni valore di corrente di corto circuito. Viceversa, se le due curve si intersecano, il punto di intersezione individua il valore di corrente I_1 . Il cavo è protetto se il valore di I_1 è inferiore a quello relativo alla minima corrente di corto circuito presunta ($I \leq I_{ccm}$). Se il valore di I_1 non soddisfa tale relazione si rende necessario aumentare la sezione del cavo o, ove possibile, scegliere un fusibile con I_n più bassa. In conclusione se si impiega un fusibile è sufficiente verificare la (8.11) solo in fondo alla linea perché in tal caso è sicuramente verificata in un qualsiasi altro punto della linea.

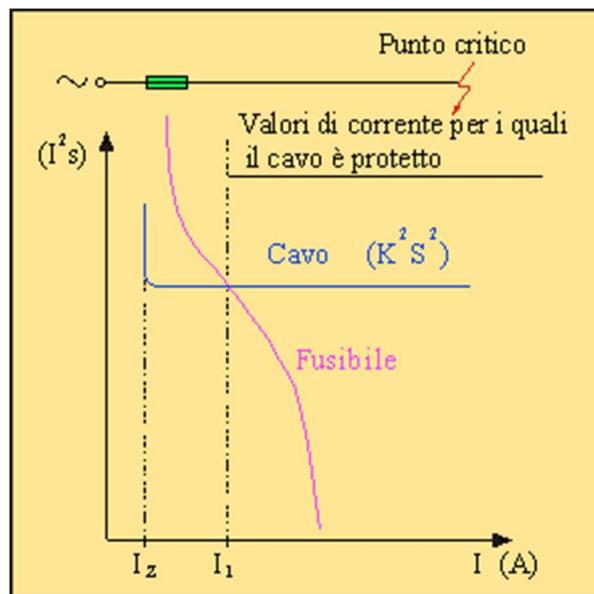


Fig. 8.9 - Confronto tra l'energia specifica passante attraverso un fusibile e quella sopportabile da un cavo in condizioni adiabatiche

Interruttore automatico magnetotermico

L'energia specifica passante diminuisce in corrispondenza dell'intervento del relè magnetico; successivamente aumenta perché il tempo d'intervento rimane pressoché costante all'aumentare della corrente. Confrontando la curva dell'energia specifica passante sopportabile dal cavo con la curva dell'energia specifica lasciata passare dal dispositivo (fig. 8.10) risulta che la 8.11 è soddisfatta per tutti i valori compresi tra le correnti I_{ccm} (corrente di corto circuito minima presunta in fondo alla linea) e I_{ccM} (corrente di corto circuito massima presunta all'inizio della linea). Sul grafico dell' I^2t si traccia la curva corrispondente al valore K^2S^2 del cavo. Se la caratteristica del cavo è completamente al di sopra di quella dell'interruttore, il cavo è protetto, altrimenti si individuano i valori I_1 e I_2 . La protezione è assicurata se risultano verificate le seguenti relazioni: $I_2 \geq I_{ccM}$ e $I_1 \leq I_{ccm}$. Tale verifica non è solitamente necessaria se l'interruttore automatico che protegge il circuito è in grado di proteggere la linea anche dai sovraccarichi ($I_b \leq I_n \leq I_z$). In questo caso non si deve più parlare di lunghezza limite della linea in quanto qualsiasi valore di corrente, anche molto basso, che si stabilisse all'estremità della linea è percepito come un sovraccarico dall'interruttore automatico che come tale interrompe il circuito nei tempi necessari per proteggere il conduttore. Di lunghezza limite si parlerà solo per alcuni particolari tipi di circuiti che devono essere realizzati senza protezione termica o con protezione termica sovradimensionata.

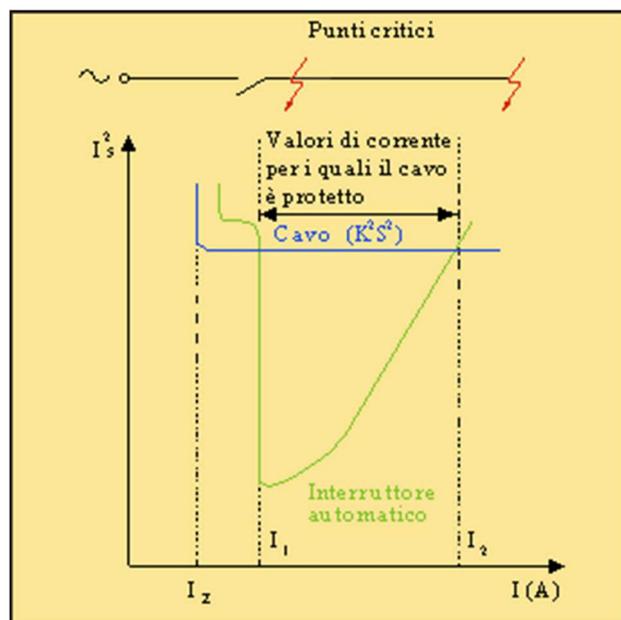


Fig. 8.10 - Confronto tra l'energia specifica passante attraverso un interruttore automatico e quella sopportabile da un cavo in condizioni adiabatiche.

Interruttore magnetico combinato con fusibile.

In questo caso il dispositivo di protezione contro i sovraccarichi deve rispondere alla 8.9 e alla 8.10 (condizioni per la protezione dai sovraccarichi) e alle condizioni specificate nel paragrafo relativo alle "condizioni generali di protezione". In ogni caso le caratteristiche dei due dispositivi devono essere coordinate in modo che l'energia I^2t che il dispositivo di protezione contro i corto circuiti lascia passare non danneggi il dispositivo di protezione contro i sovraccarichi. Ne consegue che il dispositivo di protezione contro i corto circuiti deve essere installato sempre a monte del dispositivo di protezione contro i sovraccarichi.

8.6 Casi nei quali è obbligatoria la protezione dal sovraccarico

- Conduttura principale che alimenta utilizzatori derivati funzionanti con coefficiente di contemporaneità inferiore a uno (il coefficiente di contemporaneità è il rapporto tra la potenza degli utilizzatori che funzionano contemporaneamente e quella di tutti gli utilizzatori alimentati dalla stessa conduttura).
- Conduttura che alimenta motori ed utilizzatori che durante il funzionamento possono dar luogo a sovraccarichi .
- Conduttura che alimenta prese a spina.
- Conduttura che alimenta utilizzatori ubicati in luoghi soggetti a pericolo d'esplosione o d'incendio.
- Condutture di sistemi IT (i conduttori devono essere protetti dai sovraccarichi che si manifestano dopo il secondo guasto a terra).

8.7 Casi nei quali può essere omessa la protezione dal sovraccarico

- Condutture che sono derivate da una conduttura principale protetta contro i sovraccarichi con dispositivo idoneo e in grado di garantire la protezione anche delle condutture derivate.
- Condutture che alimentano utilizzatori termici.
- Condutture che alimentano apparecchi d'illuminazione
- Condutture che alimentano apparecchi con proprio dispositivo di protezione che garantisca anche la protezione della conduttura di alimentazione.
- Condutture che alimentano motori quando la corrente assorbita dalla linea a rotore bloccato non supera la portata della conduttura stessa.
- Conduttura che alimenta diverse derivazioni singolarmente protette contro i sovraccarichi, quando la somma delle correnti nominali dei dispositivi di protezione delle derivazioni non supera la portata della conduttura principale.
- Conduttura dei circuiti di telecomunicazione, segnalazione e simili.
- Condutture nelle quali per situazioni particolari o per la tipologia degli utilizzatori alimentati non si possono verificare sovraccarichi

8.8 Casi nei quali è vietata la protezione dal sovraccarico

- Condutture che alimentano elettromagneti di sollevamento.
- Condutture che alimentano impianti di sicurezza.
- Condutture che alimentano utilizzatori particolari la cui messa fuori servizio improvvisa può dar luogo a pericoli.

8.10 Dimensionamento e protezione del conduttore di neutro

Nei circuiti monofase, qualunque sia la sezione dei conduttori di fase, e nei circuiti trifase quando la sezione dei conduttori di fase è minore o uguale a 16 mm² se in rame o a 25 mm² se in alluminio, il conduttore di neutro (identificato con colore blu chiaro) deve avere la stessa sezione dei conduttori di fase (CEI 64-8 art. 524.2). Nei circuiti trifase con conduttori di rame con sezione superiore a 16 mm² se in rame o a 25 mm² se in alluminio il conduttore di neutro può avere una sezione inferiore a quella dei conduttori di fase, con un minimo di 16 mm² o 25 mm², se i carichi sono sostanzialmente equilibrati (tab. 8.10). Se i carichi non sono equilibrati o se i carichi alimentati producono correnti armoniche apprezzabili il neutro deve essere considerato come conduttore caricato e deve avere una sezione uguale o maggiore (in caso di correnti armoniche anche se i carichi sono equilibrati il neutro potrebbe essere caricato anche più dei conduttori di fase) rispetto a quella dei conduttori di fase (CEI 64-8 art. 524.3). In questo caso per dimensionare il conduttore di neutro bisogna determinare la portata I_0 ma le tabelle che danno la corrente I_0 sono relative a circuiti bipolari o tripolari. Per risalire alla portata di un circuito con quattro conduttori occorre considerare la corrente I_0 di un circuito bipolare e applicare il coefficiente di riduzione $k_2=0,8$ per un fascio costituito da due circuiti bipolari. Per quanto riguarda la protezione è necessario fare alcune considerazioni. Nei circuiti monofasi l'interruttore automatico può avere un solo polo protetto (per "polo" si intende la parte dell'interruttore che riguarda una sola via di corrente, elettricamente distinta, del circuito principale - un polo si dice protetto se dotato di sganciatore) che in questo caso deve essere inserito sul conduttore di fase (questo è valido anche per i circuiti bifase purché siano protetti anche da un interruttore differenziale) (CEI 64-8 art. 473.3.1). Nei sistemi trifase, quando il neutro ha sezione uguale a quella delle fasi oppure quando ha sezione inferiore ma il carico è sostanzialmente equilibrato (un carico si può ritenere sostanzialmente equilibrato quando la somma delle potenze assorbite dai carichi monofase è sicuramente minore rispetto alla potenza totale e quindi la corrente che percorre il neutro nelle condizioni di massimo squilibrio è minore della sua portata), il polo di neutro dell'interruttore quadripolare non è necessario che sia protetto (CEI 64-8 art. 473.3.2). Se la corrente di squilibrio può superare la portata del neutro si può utilizzare un conduttore di neutro con sezione uguale a quella delle fasi oppure un conduttore di neutro con sezione inferiore a quella delle fasi ma in questo caso occorre un interruttore quadripolare con lo sganciatore sul neutro di corrente inferiore a quella delle fasi (esistono in commercio interruttori magnetotermici di tipo industriale con relè di protezione sul quarto polo con correnti di taratura pari a 0,5 I_n). La Norma in definitiva demanda la scelta della sezione del neutro al progettista il quale, volendo risparmiare sulla sezione del neutro, potrà, per linee di grandi dimensioni, scendere anche al di sotto del solito valore di $\frac{1}{2} S_F$ purché sia garantita la tenuta al corto circuito e la sezione del neutro sia dimensionata per sopportare il massimo carico previsto.

-	Sezione di fase S_F (mm ²)	Minima sezione del neutro (mm ²)
Cu	≤ 16	S_F
	> 16	16
Al	≤ 25	S_F
	> 25	25

Tab. 8.10 – Sezioni minime del neutro

8.11 Caduta di tensione

Un'eccessiva caduta di tensione pregiudica il buon funzionamento delle apparecchiature perciò è necessario, nei vari punti dell'impianto, verificarne il valore. Le Norme CEI raccomandano di non superare, tra l'origine dell'impianto elettrico e ogni punto di utilizzo, il 4% della tensione nominale. In particolare negli impianti di forza motrice una caduta di tensione superiore al 4% può provocare malfunzionamenti per i seguenti motivi:

- i motori funzionano correttamente se la tensione nominale non supera $\pm 5\%$ della tensione nominale;
- essendo la corrente di avviamento dei motori piuttosto elevata ($5 \div 7I_n$ e oltre) al momento dell'avviamento la caduta di tensione potrebbe essere anche molto elevata con una riduzione, che potrebbe essere inaccettabile, della coppia di spunto (si consiglia, all'avviamento, di non superare la caduta di tensione del 10%);
- problemi di funzionamento per altre apparecchiature sensibili se alimentate dalla stessa linea che alimenta il motore.

Il valore della caduta di tensione può essere determinato con l'impiego di tabelle oppure mediante la seguente formula:

$$\Delta U = kxI_bxlx(R \cos \varphi + X \sin \varphi) \quad (8.12)$$

In percentuale, infine si ha:

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_n} \times 100 \quad (8.13)$$

Dove:

I_b = corrente del cavo (A);

k = coefficiente che vale 2 per i circuiti monofasi/bifasi e $\sqrt{3}$ per i circuiti trifase;

l = lunghezza della linea (km);

R = resistenza di un chilometro di cavo (ohm/km);

X = reattanza di un chilometro di cavo (ohm/km)

U_n = tensione nominale dell'impianto;

$\cos \varphi$ = fattore di potenza del carico.