IMPIANTI ELETTTRICI

parte II

di Delucca Ing. Diego

PROTEZIONE DI UN IMPIANTO DAI SOVRACCARICHI E DAI CORTO CIRCUITI

Una corrente I che passa in un cavo di sezione S, di portata Iz è chiamata di sovracorrente se: $I > Iz$.

Una sovracorrente, determina un aumento anormale della temperatura del cavo, e quindi una riduzione della vita dell'isolante del cavo stesso.

Per i cavi a BASSA TENSIONE, gli isolanti usati hanno temperature massime di esercizio, indicate dalle sigle seguenti:

gomma di qualità G1 … 60 °C;
gomma di qualità G2 … 85 °C;
gomma di qualità G3 … 90 °C;
gomma in PVC … 70 °C.

Infine le sovracorrenti si distinguono in due grandi categorie:

nelle **correnti di sovraccarico**;

nelle **correnti di corto circuito o di guasto**.

Si noti che per **sovratemperatura** si intende l'eccesso di temperatura rispetto alla temperatura dell'ambiente.

IL SOVRACCARICO

Le correnti di sovraccarico sono correnti di valore superiore alla portata Iz del cavo, che si verificano non per difetto di isolamento, o guasto, ma per l'inserzione contemporanea di troppi apparecchi utilizzatori.

Una corrente di sovraccarico I determina una sovratemperatura proporzionale alla differenza I – Iz. Se la corrente I che circola nel cavo, supera di poco il valore della portata Iz, allora la riduzione della vita dell'isolante si può ritenere trascurabile, mentre invece, se il valore della I è molto più elevato della Iz, anche se essa circola per un tempo molto breve, la durata dell'isolante viene complessivamente ridotta, o comunque non è più trascurabile.

In definitiva la riduzione della vita dell'isolante è proporzionale:

a) al valore della corrente di sovraccarico;
b) alla durata complessiva del sovraccarico.

Un sovraccarico del 30%, ossia nel caso in cui $I = 1{,}3\ Iz$, per una durata di 5 secondi, non comporta alcuna riduzione della vita dell'isolante, ma se questo sovraccarico si mantiene per un'ora, allora la riduzione della VITA dell'isolante non è più trascurabile.

Proprio per questo scopo, si proteggono i cavi, con i dispositivi di protezione **magnetotermici**. Questi dispositivi di protezione devono intervenire in un tempo tanto più breve, quanto più è grande la differenza I – Iz.
C'è da osservare che, anche il dispositivo magnetotermico, deve funzionare ad una sua corrente **nominale**, la quale deve essere **minore** della portata Iz del cavo.

RELAZIONE FRA Iz, I_B , I_N .

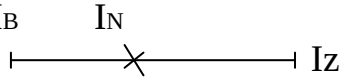
Per assicurare la protezione dei cavi al sovraccarico, occorre rispettare la condizione $I_B \leq I_N \leq Iz$, in altri termini la corrente I_N, dell'interruttore deve essere sempre compresa fra la corrente di impiego e la portata Iz del cavo.
ESEMPIO. **Una linea dorsale di un ufficio, realizzata con cavi unipolari isolati in PVC, deve alimentare 5 prese da 10 A. Determinare I_B , Iz, e la corrente nominale I_N dell'interruttore magnetotermico.**

SOLUZIONE

Dalla tabella sotto la voce NEGOZIO e prese da 10 A, si rileva il seguente valore di coefficiente di utilizzazione: 0,10.
Da ciò il vero valore, del coefficiente di utilizzazione, nel nostro caso in cui si hanno 5 prese a spina si desume dalla relazione seguente:

$$g' = 0{,}10 + (1 - 0{,}10) / 5 = 0{,}10 + 0{,}18 = 0{,}28.$$

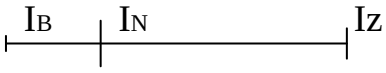
Si ricava così la corrente di impiego del cavo: $I_B = n\ g'\ I = 5.\ 0{,}28.\ 10 = 14$ A.
Ora, nella seconda tabella scegliamo un valore di PORTATA del cavo, superiore al valore I_B della corrente di impiego del cavo stesso, ad esempio scegliamo Iz = 19 A, con sezione di 4 mm².



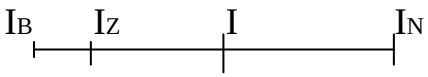
La corrente nominale del magnetotermico deve risultare compreso fra 14A e 19 A.
Si nota dal punto di vista commerciale che, per i magnetotermici, sono previsti i seguenti valori di corrente nominale, I_N :

6; 10; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63, 80.

Nel nostro caso noi scegliamo ovviamente un magnetotermico di I_N = 16 A:

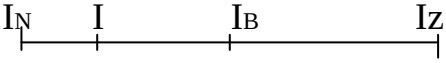


Scegliendo un interruttore $I_N > Iz$, il cavo può funzionare in sovraccarico per lunghi periodi, senza che intervenga il dispositivo di protezione magnetotermico:



(scelta errata interruttore).

come si vede dal grafico la corrente I è una corrente di sovraccarico; infatti I > Iz, ma l'interruttore non interviene, perché $I < I_N$.
Viceversa, scegliendo un interruttore $I_N < I_B$:



(scelta errata interruttore).

Infatti, una corrente I < Iz, cioè una corrente che non è di sovraccarico, determina l'intervento dell'interruttore, perché $I > I_N$.
Nel caso di linee dorsali, la condizione: $I_B \leq I_N \leq Iz$, deve essere verificata anche per le derivazioni, e perciò indicando con I_{Bd}, Izd, la corrente di impiego nella derivazione e la portata del cavo lungo la derivazione, dovrà allora risultare:

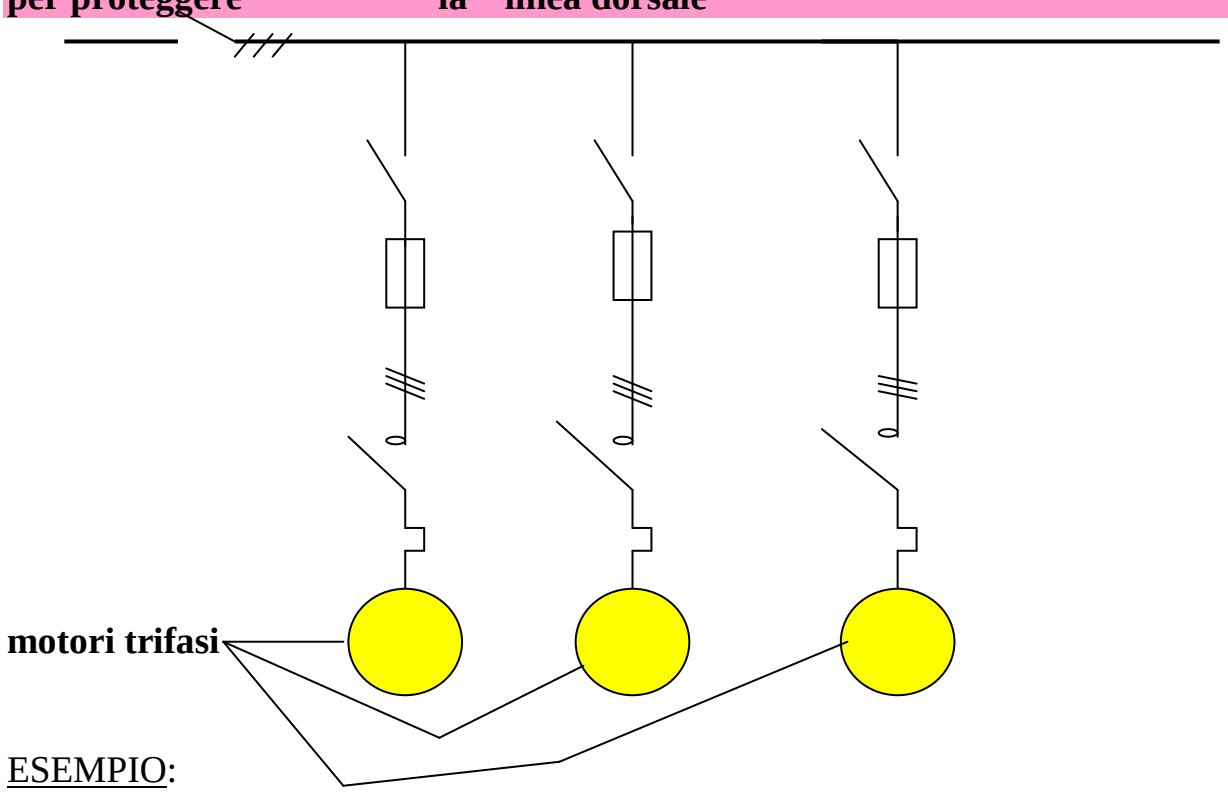
$$I_{Bd} \leq I_N \leq Izd.$$

Nel caso di linee dorsali che alimentano macchine elettriche, singolarmente protette dai sovraccarichi mediante relé termici, (caso di linea per motori, di figura vedi pagina successiva), l'interruttore magnetotermico deve proteggere **solo** la **dorsale**, e la condizione

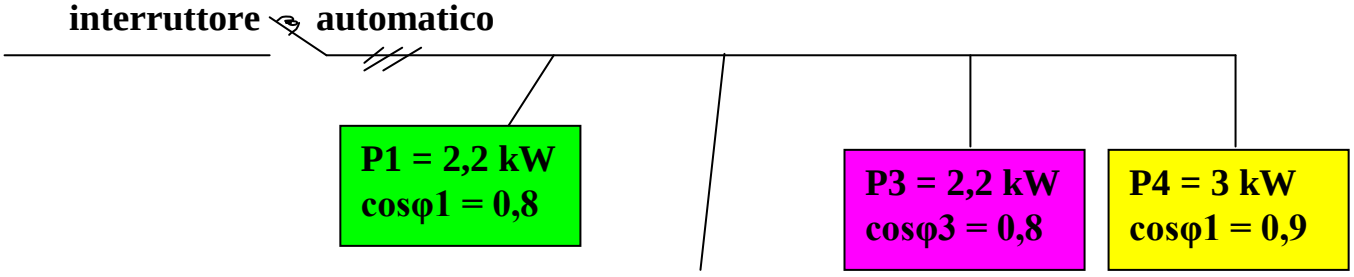
$$\mathbf{I_B \leq I_N \leq Iz},$$

deve essere verificata solo per la dorsale. La relazione superiore è fondamentale ed è imposta dalla normativa.

Interruttore magnetotermico per proteggere la linea dorsale



ESEMPIO:
Nella figura sotto rappresentata, è indicata una dorsale trifase che alimenta 4 utilizzatori, a tensione Vn = 380 Volt.
Gli utilizzatori non sono protetti singolarmente. Si dimensioni l'impianto assumendo, come caso sfavorevole, il funzionamento contemporaneo di tutti gli utilizzatori.



P2 = 4 kW
cosφ2 = 0,75

SOLUZIONE.

Le componenti attive, reattive e apparenti richieste dai diversi carichi, si ottengono dalle relazioni seguenti:

$S = P / \cos \varphi$; $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$; $I = S / \sqrt{3}\ Vn$; $Ia = P / \sqrt{3}\ Vn$;

$Ir = \sqrt{I^2 - Ia^2}$; da ciò si ottengono i risultati della tabella:

P1 = 2200 W	**S1 = 2750 VA**	**Q1 = 1650 VAR**
P2 = 4000 W	**S2 = 5333,3 VA**	**Q2 = 3527,7 VAR**
P3 = 2200 W	**S3 = 2750 VA**	**Q3 = 1650 VAR**
P4 = 3000 W	**S4 = 3333,3 VA**	**Q4 = 1453 VAR**

Ora impiegando le formule indicate nella pagina precedente si ricavano le correnti assorbite dai diversi carichi, nonché la componente di corrente attiva e reattiva:

I1 = 4,18 A	Ia1 = 3,34 A	Ir1 = 2,50 A
I2 = 8,10 A	Ia2 = 6,10 A	Ir2 = 5,40 A
I3 = 4,18 A	Ia3 = 3,34 A	Ir3 = 2,50 A
I4 = 5,10 A	Ia4 = 4,60 A	Ir4 = 2,20 A

La somma delle componenti attive e reattive forniscono i seguenti risultati:

IaT = 3,34 + 6,10 + 3,34 + 4,60 = 17,3 A

IrT = 2,50 + 5,40 + 2,50 + 2,20 = 12,6 A, pertanto la corrente nel primo tratto della dorsale, cioè il tratto compreso fra l'interruttore automatico e la prima derivazione, risulta uguale a: $I = \sqrt{IaT^2 - IrT^2} = \sqrt{(17,3)^2 - (12,6)^2} = 21,4$ A.

Essendo previsto il funzionamento contemporaneo di tutti gli utilizzatori, la corrente di impiego I_B della dorsale risulta: $I_B = 21,4$ A, la sezione dei cavi e la relativa PORTATA si ricava dalla tabella, con cavi in PVC; infatti la corrente immediatamente superiore del valore di I_B trovato, è $I_N = 24$ A, con sezione di 6 mm².

Per le derivazioni si possono impiegare cavi di sezione:

Sd = 4 mm² e $I_{ZD} = 19$ A.

In questo caso non essendo prevista la protezione specifica per ogni apparecchio utilizzatore, le NORME CEI prescrivono vengano soddisfatte le seguenti condizioni:

$I_B \le I_N \le I_Z$ protezione della dorsale;

$I_{BD} \le I_N \le I_{ZD}$ protezione delle derivazioni,

essendo $I_{ZD} < I_Z$ e $I_{BD} < I_B$,

le condizioni superiori sono verificate contemporaneamente, quando $I_B < I_N < I_{ZD}$, nell'esempio in esame la condizione:

$I_B = 21,4$ A $< I_N <$ 19 A $= I_{ZD}$, **non risulta vera**.

E' necessario, pertanto, utilizzare il cavo di sezione 6 mm², anche per le derivazioni.

ESEMPIO Si dimensioni l'impianto dell'esempio precedente, supponendo che gli utilizzatori siano protetti singolarmente dai sovraccarichi.

Abbiamo visto per la dorsale che e per le derivazioni che:

S = 6 mm² , I_Z = 24 A, questo per la dorsale;Sd = 2,5 mm², I_Z = 14 A per le derivazioni, non essendo necessaria le protezioni delle derivazioni, l'interruttore automatico viene scelto in base alla condizione: $I_B \leq I_N \leq I_Z$,

ossia $21{,}4 \leq I_N \leq 24$ A.

La serie commerciale dei MAGNETOTERMICI**, I_N = 6, 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63,80,** non prevede una corrente nominale compresa fra 21,4 e 24 A, pertanto si impiega l'interruttore con portata nominale di 20 A, anche se di valore lievemente inferiore alla corrente di impiego. L'interruttore di 25 A, non è adatto perché supera la PORTATA dei cavi.

RIEPILOGO ULTIME QUESTIONI

In generale il dispositivo magnetotermico:

- non interviene per correnti $I \leq I_N$;
- interviene sicuramente dopo un'ora, con in sovraccarico I = 1,45 I_N;
- interviene sicuramente dopo 100 s, con un sovraccarico I = 2 I_N;
- interviene sicuramente dopo 0,02 s, se il sovraccarico I = 10 I_N.

In genere l'intervento ISTANTANEO è assicurato con una sovracorrente maggiore o uguale a
5 I_N se l'interruttore è di tipo B;
10 I_N se l'interruttore è di tipo C;
20 I_N se l'interruttore è di tipo D.

Si osserva inoltre che, I è la corrente di linea, che corrisponde anche alla corrente che attraversa l'interruttore. In condizioni normali risulta $I < I_N$, e ciò implica che:

$$I / I_N \leq 1.$$

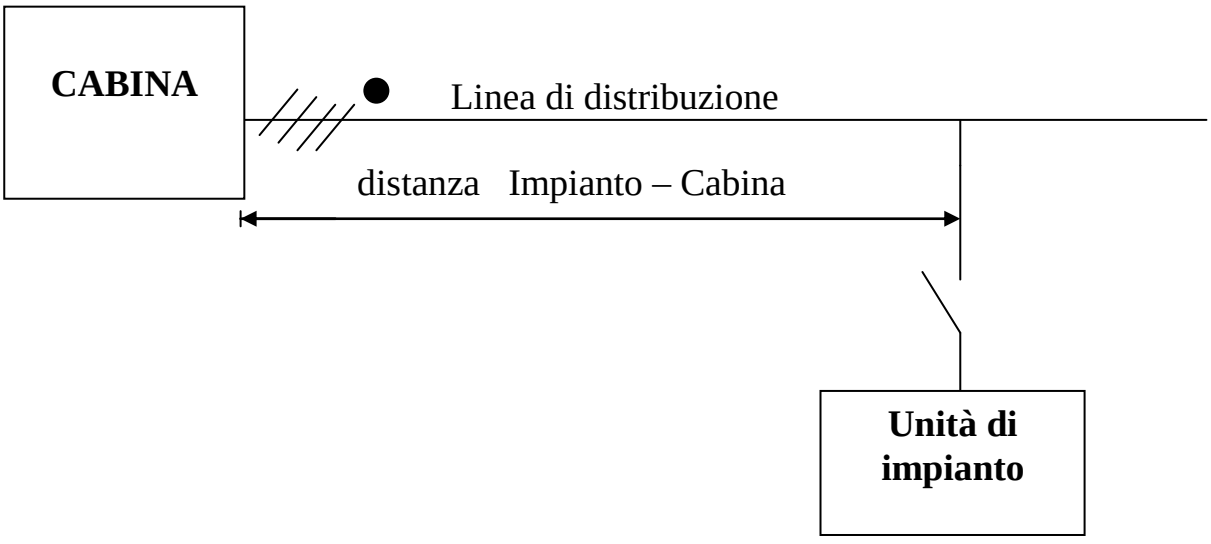
Per esempio, se fosse dato un interruttore magnetotermico con corrente nominale I_N = 16 A, allora in questo caso può anche risultare I = 16; infatti si ha che, $I / I_N \leq 1$. Ma se la corrente di sovraccarico I = 32 A, allora il magnetotermico è attraversato da una corrente di 32 A, e perciò risulterà $I / I_N = 32 / 16 = 2$; con questo valore adimensionale si considera il grafico o la curva di intervento del dispositivo magnetotermico considerato, ottenendo così l'intervallo in secondi di intervento del dispositivo stesso. Se risultasse invece, un sovraccarico di 48 A, e perciò $I / I_N = 48 / 16 = 3$, dal grafico si ricaverebbe un intervallo di intervento più breve di quello precedente; infatti il dispositivo interviene più rapidamente quanto più è elevata la sovracorrente.

IL CORTO CIRCUITO

Un corto circuito si verifica quando fra due punti di un impianto, tra i quali in condizioni di normale funzionamento vi è una d.d.p, si definisce un collegamento anormale a basso valore di impedenza.
La corrente di CORTO CIRCUITO è limitata solo dall'impedenza del tratto di conduttura a MONTE del GUASTO. Essendo l'impedenza Z dei cavi molto piccola, la corrente di corto circuito è elevata e data da: $Icc = V / Z$.
Visto che la corrente di corto circuito è molto elevata, rispetto alla portata dei cavi, i cavi stessi subiscono una variazione termica rapidissima e se non si interviene rapidamente, si può danneggiare irreparabilmente i cavi e le apparecchiature da esso servite o alimentate, a monte del guasto. Le protezioni dai corto circuito, (interruttori e fusibili), devono intervenire nel più breve tempo possibile, (qualche centesimo di secondo), e deve essere in grado di interrompere la massima corrente di corto circuito. La massima corrente che il dispositivo è in grado di interrompere si dice POTERE di ROTTURA o POTERE di INTERRUZIONE, (P_R).

Se ad esempio un interruttore magnetotermico, o fusibile, ha un potere di rottura di 4,5 KA, significa che il dispositivo è in grado di interrompere correnti di corto circuito Icc il cui valore non superi i 4.500 A.

Il valore della corrente di corto circuito, per un determinato impianto, dipende, essenzialmente, dalla distanza dell'impianto dalla CABINA elettrica, si veda lo schema di principio:



Se l'impianto è distante dalla cabina, l'impedenza del tratto di linea CABINA – IMPIANTO risulta elevata e perciò la corrente di corto circuito, è piccola, mentre invece se la distanza suddetta è molto breve, il tratto di linea CABINA – IMPIANTO ha impedenza piccola e perciò la corrente di corto circuito è molto elevata.

In definitiva l'interruttore generale di un impianto deve avere un potere di interruzione o di rottura superiore alla corrente di corto circuito nel punto di consegna, (punto di consegna = punto in cui si deve realizzare l'impianto, e in cui

giunge l'ente distributore dell'energia elettrica). Il valore della corrente di corto circuito, nel punto di consegna, può essere richiesto dal progettista all'ente distributore; l'interruttore generale dell'impianto deve avere un potere di rottura superiore a Icc, ossia: $P_R > Icc$.

In genere, sia per gli impianti monofasi che per quelli trifasi, risulta sufficiente un potere di rottura: $P_R = 4{,}5$ KA, e per maggiore sicurezza, soprattutto nei casi incerti, si può installare un interruttore generale, avente potere di rottura, $P_R = 6$ KA.

CALCOLO DELLE CORRRENTI DI CORTO CIRCUITO

La TABELLA qui sotto presentata, fornisce la corrente di corto circuito in funzione della potenza del trasformatore della cabina. Nota la potenza nominale An del trasformatore della cabina, la corrente nominale al secondario risulta:

$I2n = An / \sqrt{3}\ V2n$, dove la potenza apparente An è espressa in VA; V2n è invece la tensione nominale a secondario del trasformatore.

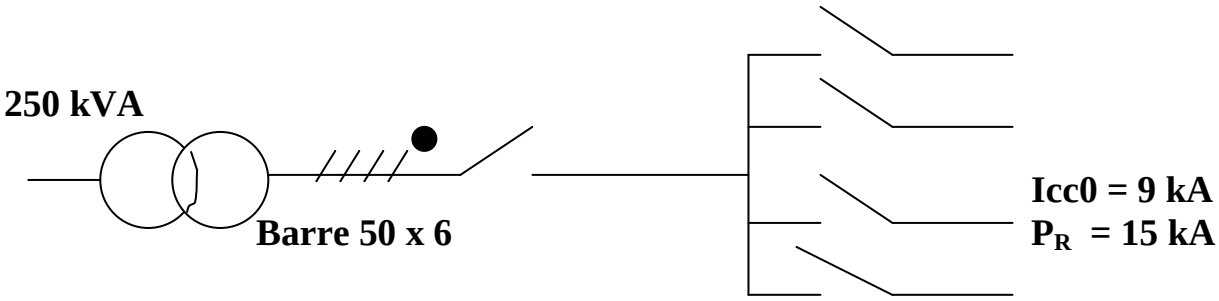
Potenza trasformatore in KVA	**Corrente Nominale al secondario I2n in A**	**Corrente di Corto circuito Icc0 in A**	**Potere di Interruzione richiesto in KA**	**SEZIONE conduttori lato B.T**
50	**72**	**1.804**	**4,5**	**Cavi PVC S = 50 mm²**
100	**144**	**3.608**	**6**	**Cavi PVC S = 120 mm²**
160	**231**	**5.775**	**10**	**Barre in mm² 50 . 6 = 300**
250	**361**	**9.025**	**15**	**Barre in mm² 50 . 6 = 300**
400	**577**	**14.425**	**20**	**Barre in mm² 100 . 6 = 600**
630	**909**	**22.725**	**30**	**Barre in mm² 100 . 10 = 1.000**

ESEMPIO: **Un trasformatore di potenza nominale di 250 KVA presenta una Corrente nominale al secondario, data da:**

$I2n = An / \sqrt{3}\ \ V2n = 250.000 / (\sqrt{3}.400) = 361$ A.

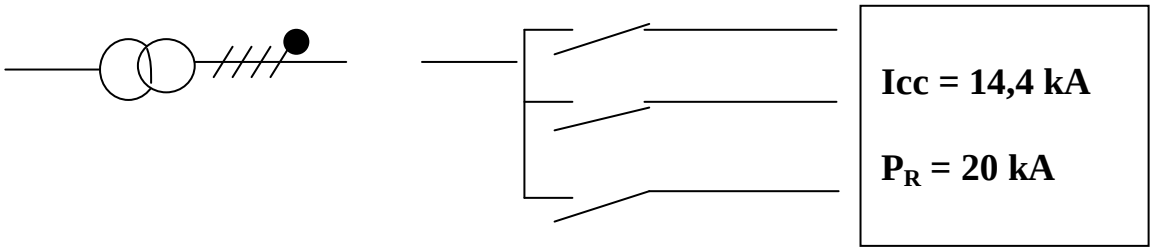
Una corrente così elevata viene convogliata in barre rettangolari di rame di sezione 300 mm², cioè di larghezza di 50 mm per un'altezza di 6 mm.
La densità di corrente d nelle barre risulta data da:

d = I2n / S = 361 / 300 = 1,2 A / mm². Si ricordi che le barre rettangolari di rame ammettono densità di corrente fino a 2 A / mm².
In mancanza di altri dati, la corrente di corto circuito trifase sul LATO BASSA TENSIONE del TRASFORMATORE può essere calcolata MOLTIPLICANDO per 25 la CORRENTE NOMINALE del SECONDARIO, che nell'esempio da noi considerato diviene: Icc0 = 25.I2n = 25 . 361 = 9.025 = 9 kA.
L'interruttore generale magnetotermico del trasformatore e gli interruttori delle linee BT, vedi la figura di riferimento, devono avere un potere di interruzione o potere di rottura superiore alla corrente di corto circuito, ossia nel nostro caso:
P_R > Icc0, ossia P_R > 9 KA, e perciò si deve considerare un P_R = 15 KA.
Si ricordi che le serie commerciali degli interruttori per i quadri BT di cabina prevedono i seguenti poteri di rottura, in KA seguenti: **4,5; 6; 10; 15; 20; 25; 35.**



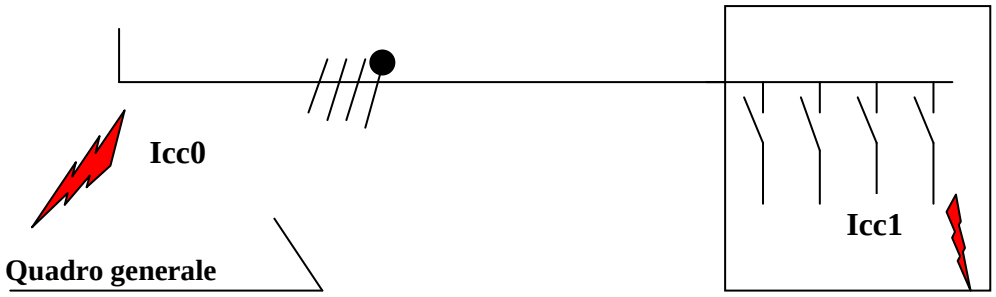
Consideriamo l'ESEMPIO seguente: un trasformatore di potenza nominale di 400 KVA, presenta una corrente nominale al secondario, data da:
I2n = An / √ 3 V2n = 400.000 / (√ 3.400) = 577 A.
La corrente viene convogliata in barre la cui sezione è di 600 mm², cioè barre di 100 . 6, larghezza 100 mm e altezza 6 mm. La densità di corrente vale pertanto in questo caso: d = I2n / S = 577 / 600 = 0,96 A / mm², che è ampiamente al disotto del limite massimo di 2 A / mm². La corrente di corto circuito trifase sul lato di BT del trasformatore risulta dato da: 25 I2n = 25 . 577 = 14.425 A = 14,4 KA.

Il potere di rottura dell'interruttore generale del trasformatore e delle linee, deve avere valore superiore, ossia commercialmente, il valore superiore corrisponde al valore di P_R = 20 KA.



Consideriamo anche il seguente schema:





ESERCIZIO **In una cabina è installato un trasformatore di potenza di 400 KVA. Si trascura l'impedenza del tratto di linea trasformatore – quadro generale. Una delle linee di partenza dal quadro generale ha sezione di 25 mm² e alimenta un quadro di zona distante 15 metri.**
Determinare il potere di rottura degli interruttori del quadro generale e del quadro di zona.

La corrente di corto circuito nel quadro generale si ricava dalla tabella, ed è:
Icc0 = 14,4 KA, e quindi gli interruttori del quadro generale devono avere potere di interruzione pari a P_R = 20 KA.

sez. in mm²	**LUNGHEZZA DELLA LINEA in METRI**

4	**1,0**	**1,3**	**1,8**	**2,4**	**3,2**	**4,4**	**6,0**	**6,8**	**11,0**	**15,0**	**20,0**
6	**1,5**	**2,0**	**2,7**	**3,6**	**4,8**	**6,6**	**9,0**	**12,6**	**16,5**	**22,5**	**30,0**
10	**2,5**	**3,3**	**4,5**	**6**	**8**	**11,0**	**15,0**	**21,0**	**28,0**	**37,5**	**50,0**
16	**4,0**	**5,2**	**7,1**	**9,5**	**12,5**	**17,5**	**24,0**	**33,5**	**44,0**	**60,0**	**80,0**
25	**6,3**	**8,1**	**11,3**	**15**	**20**	**27,5**	**37,5**	**52,5**	**70,0**	**94,0**	**125,0**

Icc0	⟷	⟷	**corr**	**enti**	**di**	**corto**	**circ**	**uito**	**Icc1**	**in**	**kA**
3	**3**	**3**	**2,5**	**2,5**	**2,5**	**2,5**	**2**	**2**	**1,5**	**1,5**	**1**
3,5	**3,5**	**3**	**3**	**3**	**3**	**2,5**	**2,5**	**2**	**2**	**1,5**	**1**
4	**4**	**3,5**	**3,5**	**3,5**	**3,5**	**3**	**3**	**2,5**	**2**	**1,5**	**1,5**
4,5	**4**	**4**	**4**	**3,5**	**3,5**	**3**	**3**	**2,5**	**2**	**2**	**1,5**
5	**5**	**4,5**	**4,5**	**4**	**4**	**3,5**	**3**	**3**	**2,5**	**2**	**1,5**
6	**5,5**	**5,5**	**5**	**5**	**4,5**	**4**	**3,5**	**3**	**2,5**	**2**	**1,5**
7	**6,5**	**6,5**	**6**	**5,5**	**5**	**4**	**3,5**	**3**	**2**	**1,5**	
8	**7,5**	**7**	**7**	**6,5**	**6**	**5**	**4,5**	**3,5**	**3**	**2**	**2**
10	**10**	**8,5**	**8**	**7,5**	**7**	**5,5**	**5**	**4**	**3**	**2**	**2**
12	**10,5**	**10**	**9,5**	**8**	**7,5**	**6,5**	**5**	**4**	**3**	**2,5**	**2**
14	**12**	**11,5**	**10,5**	**9,5**	**8**	**6,5**	**5,5**	**4**	**3**	**2,5**	**2**

17	**14,5**	**13,5**	**12**	**10,5**	**9**	**7**	**5,5**	**4**	**3,5**	**2,5**	**2**
20	**16**	**15**	**13**	**11**	**9,5**	**7,5**	**5,5**	**4**	**3,5**	**2,5**	**2**
22	**17,5**	**16**	**14**	**12**	**10**	**7,5**	**6**	**4,5**	**3,5**	**2,5**	**2**
25	**19**	**17,5**	**15**	**12,5**	**10**	**8**	**6**	**4,5**	**3,5**	**2,5**	**2**

Nella tabella, in corrispondenza di: lunghezza della **linea** = 15 metri;
sezione della **linea** = 25 mm²; Icc nel quadro **generale** = 17 KA, si trova la corrente di corto circuito nel quadro di zona: **Icc1 = 10,5** kA ed il potere di rottura richiesto, del dispositivo di protezione è: P_R = 15 KA.
Osservazione Come si vede, nella tabella considero un valore della **Icc0** corrispondente a 17 kA, non a 14 kA, perché nella realtà la corrente di corto circuito del quadro generale risulta avere un valore superiore a 14 kA, più precisamente 14.425 A.

ESEMPIO 2 **In una cabina è installato un trasformatore di potenza di 630 KVA. Una delle linee in partenza dal quadro generale ha sezione di 16 mm² e alimenta un quadro di zona a distanza di 23 m. Determinare i poteri di rottura degli interruttori del quadro generale e del quadro di zona**.
Dalla tabella della pagina precedente in corrispondenza di un trasformatore di 630 KVA si ha: Icc0 = 22,7 KA e pertanto il potere di interruzione degli interruttori deve essere assunto in P_R = 30 KA. Inoltre dalla stessa tabella si desume in corrispondenza di: lunghezza della LINEA = 24 m, (la distanza di 23 m non è codificata);
sezione della LINEA = 16 mm²;
Icc nel quadro GENERALE = 25 KA, e dalla stessa tabella si ottiene il valore della corrente di corto circuito per il quadro di zona: Icc1 = 6 KA, e quindi l'interruttore deve avere un potere di rottura di 10 KA.

ENERGIA PASSANTE

I dispositivi di protezione, (interruttori magnetotermici. fusibili), in caso di corto circuito lasciano passare, prima di interrompere il circuito, una certa corrente I per un determinato tempo t. Il prodotto $\mathbf{I^2t}$ prende il nome di **energia passante**, ed essa è proporzionale all'energia effettivamente lasciata passare, nell'intervallo di tempo compreso fra il verificarsi dell'evento, (il corto circuito), e l'interruzione effettiva del circuito. Questa energia si trasforma in calore che tende a sollecitare i CAVI. Inoltre l'energia massima sopportabile da un cavo si può ottenere mediante il seguente prodotto: $\mathbf{K^2S^2}$, dove S è la sezione del cavo in mm², K costante che per i CAVI ISOLATI in **PVC vale 115**, e per quelli isolati in **EPR vale 146**.
Le norme CEI prescrivono la verifica delle seguenti condizioni: $\mathbf{I^2t \leq K^2S^2}$, dove $\mathbf{I^2t}$ è l'energia passante dell'interruttore magnetotermico, ed esso è fornito dal costruttore del dispositivo stesso, mentre $\mathbf{K^2S^2}$ è la massima energia sopportabile dal cavo.

ESEMPIO Una linea monofase deve essere dimensionata per una corrente di impiego I_B = 29 A. Determinare la sezione dei cavi e la I_N dell'interruttore magnetotermico, con potere di rottura di 4,5 KA in modo tale che risultino verificate, le seguenti condizioni:

$I_B \leq I_N \leq I_Z$ per la protezione al sovraccarico e

$I^2t \leq K^2S^2$, per la protezione ai corto circuiti.

SOLUZIONE Nella tabella si osserva che per il cavo in PVC, si ricerca una Corrente di portata leggermente superiore ai 29 A; infatti si deduce IZ = 33 A, a cui corrisponde una sezione di 10 mm².

L'interruttore adatto alla protezione dei cavi contro le sovracorrenti deve rispettare la condizione $I_B \leq I_N \leq I_Z$, visto che I_Z = 33 A e I_B = 29 A, si può assumere un interruttore con I_N = 32 A.

Inoltre l'energia massima sopportabile dal cavo la si ottiene dal prodotto $K^2 S^2$, che nel nostro caso è uguale a: $K^2 S^2 = (115 . 10)^2 = 1.322.000\ A^2s$.

Assumendo una corrente di corto circuito pari al potere di rottura dell'interruttore, cioè una Icc di 4,5 KA, ossia Icc = 4.500 A, ed un tempo di intervento dello SGANCIATORE MAGNETICO pari a 15 ms, l'energia passante risulta:

$(Icc)^2 . t = (4.500)^2 . 0,015 = 303.750\ A^2s$.

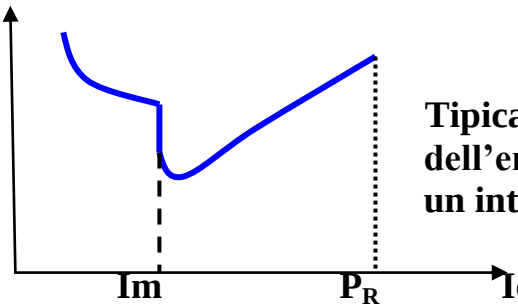
In definitiva la condizione $Icc^2 . t < K^2 . S^2$ è ampiamente soddisfatta.

VERIFICA GRAFICA DELL'ENERGIA PASSANTE

I costruttori di interruttori automatici e fusibili forniscono le CURVE CARATTERISTICHE dell'energia passante.

Tali curve rappresentano i valori dell'energia passante $I^2 t$, espressa in $A^2 s$, in funzione della corrente di corto circuito.

Inoltre, per verificare graficamente la condizione $I^2t < K^2S^2$, occorre procedere nel modo seguente, (una volta che sia fornita la curva caratteristica dell'energia passante di un interruttore) :



Tipica curva caratteristica dell'energia passante di un interruttore

- cercare la curva dell'energia passante nei cataloghi forniti dal costruttore;
- eseguire il calcolo K^2S^2, impiegando il valore di K relativo all'isolante del cavo impiegato;
- sul grafico dell'energia passante tracciare la retta parallela all'asse delle ascisse, avente per ordinata il valore K^2S^2;

- si individui sulla curva dell'energia passante i due punti di intersezione A e B, con la retta di equazione $y = K^2S^2$.
- proiettare i punti A e B sull'asse delle ascisse per ottenere i due valori, Icc min e Icc max, ossia il valore minimo di corto circuito ed il valore massimo di corto circuito.

Infine affinché sia verificata la condizione $\mathbf{I^2t < K^2S^2}$, deve risultare:
Icc min < Icc < Icc max.

Riportiamo alcune curve caratteristiche d'intervento e dell'energia passante di alcuni interruttori della B – TICINO:

CAVI	IN	RAME		CAVI in	ALLUMINIO
SEZIONE in mm^2	Isolamento PVC, K = 115 in 10^3 A^2 s	Isolamento Gomma G2 K = 135 in 10^3 A^2 s	Isolamento Gomma G5 o polietilene Reticolato K = 146 in 10^3 A^2 s	Isolamento PVC K = 74 in 10^3 A^2 s	Isolamento in gomma NATURALE in 10^3 A^2 s
1	13,2	18,2	21,3	/	/
1,5	29,7	41	48	/	/
2,5	82,6	113	133	/	/
4	211,6	291	341	/	/
6	476,1	565	767	/	/
10	1.322	1.822	2.131	541	752
16	3.385	4.665	5.456	1.390	1.930
25	8.265	11.390	13.322	3.380	4.700
35	16.200	22.325	26.122	6.640	9.230
50	33.062	45.562	53.290	13.500	18.800
70	64.802	89.302	104.448	26.800	37.100
95	119.355	164.480	192.377	49.900	68.300
120	190.440	262.440	306.950	78.850	109.000
150	297.567	410.062	/	/	/
185	452.626	625.750	/	/	/
240	761.760	1.049.760	/	/	/

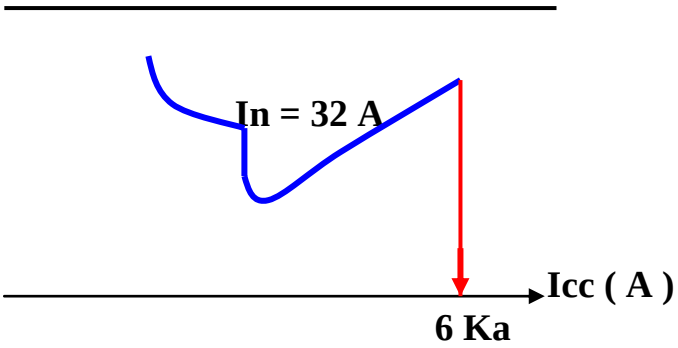
ESEMPIO: Controllare se l'impianto I_N = 32 A, (interruttore magnetotermico), con cavi isolati in PVC, S = 6 mm^2, con lunghezza L = 30 m, attraverso la relazione: $I^2t < K^2S^2$.

Nella tabella superiore in corrispondenza di S = 6 mm^2, e di cavi in rame isolati in PVC con K = 115, si rileva il valore di $K^2S^2 = 476{,}1 \cdot 10^3$ A^2s.

Riportando la retta di ordinata $476 \cdot 10^3$ sul grafico dell'energia passante, del dispositivo scelto, ossia del dispositivo I_N = 32 A, si determina allora che:

$\mathbf{I^2t}$ **(A^2 s)**

$\mathbf{476 \cdot 10^3}$

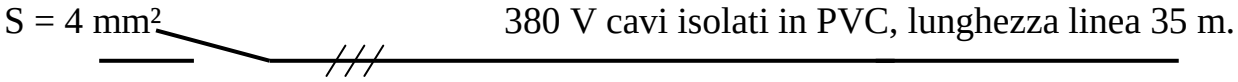


Tale retta come si vede passa al di sopra dell'energia passante, relativamente al

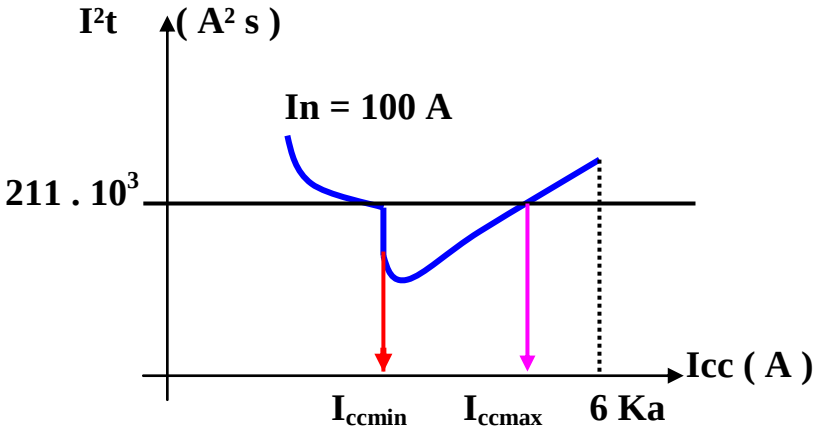
dispositivo scelto con la corrente nominale di 32 A. In conclusione la condizione: $I^2t < K^2S^2$, è verificata per qualsiasi valore di corto circuito.

Altro esempio

Si controlli che il circuito di figura:



Dalla TABELLA per S = 4 mm², vedi pagina 81, si rileva che: $K^2S^2 = 211{,}6 \cdot 10^3$ A^2 s, essendo il cavo in PVC con K = 115.
Ora, tracciando la retta di equazione $K^2S^2 = 211{,}6 \cdot 10^3$, relativamente all'energia passante in un dispositivo con corrente nominale I_N =100 A si desume che:

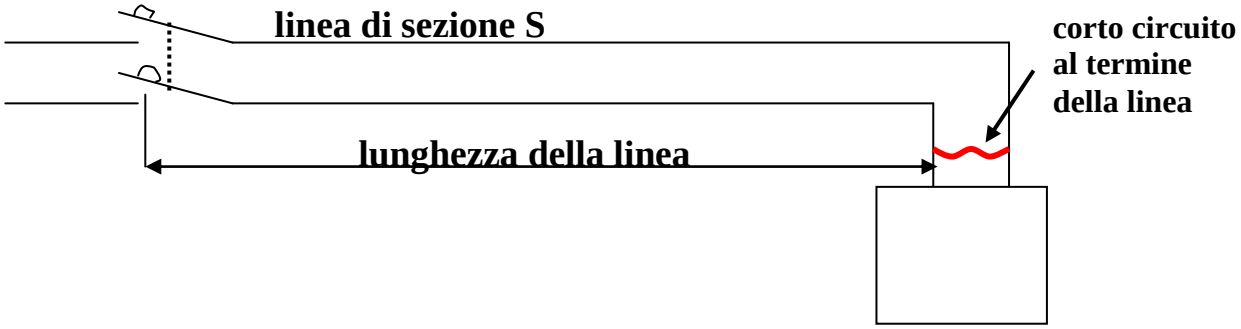


In questo caso la condizione, $I^2t < K^2S^2$ si verifica solo se, Icc min < Icc < Icc max o in altri termini 700 A < Icc < 4.500 A.
In definitiva l'abbinamento I_N =100 A, con una sezione di 4 mm², per quanto riguarda l'energia passante è corretto purché la Icc, nel punto di installazione NON SUPERI 4,5 KA e risulti inoltre: Icc min > 700 A.

Si noti inoltre che, la corrente di corto circuito MINIMO si può verificare con la relazione: Icc min = 15 V S / L, dove L è la lunghezza della linea in metri; S = sezione della linea in mm²; e V è la tensione in VOLT.
Nel nostro caso risulta: Icc min = (15 . 380 . 4) / 35 = 651 A, e quindi la condizione sull'energia passante non è verificata, cioè un CORTO CIRCUITO in fondo alla LINEA o al termine di essa, determinando una corrente di corto circuito di 651 A, comporta un'energia passante dell'interruttore superiore a quella che il cavo è in grado di sopportare.

LUNGHEZZA LIMITE DELLA LINEA

Si consideri un corto circuito al termine di una linea di lunghezza L e di sezione S.



La corrente di corto circuito è limitata dall'impedenza della linea. Se la linea è lunga con piccola sezione, la sua impedenza risulta elevata, e di conseguenza la Icc è piccola. Le NORME CEI forniscono la relazione seguente per la valutazione della corrente di corto circuito, in fondo o al termine di una linea di lunghezza L e di sezione S, ossia: **Icc = 15 V S / L**.

Per le linee trifasi risulterà V = 220 Volt in presenza del conduttore neutro;
V = 380 Volt in assenza del conduttore di neutro.
Se una linea risulta troppo lunga, la corrente di CORTO CIRCUITO Icc al termine della linea, può risultare NON SUFFICIENTE per determinare l'intervento dello sganciatore magnetico dell'interruttore magnetotermico: in questo caso i cavi della linea risultano percorsi dalla corrente di corto circuito Icc, per un tempo non trascurabile, ed il calore prodotto può danneggiare irrimediabilmente i cavi.
In poche parole la lunghezza della linea e la corrente nominale I_N dell'interruttore magnetotermico devono avere valore tale che, in caso di corto circuito o di guasto, al termine della linea la Icc determini l'intervento dell'interruttore.
L'intervento istantaneo di un magnetotermico è assicurato per una sovracorrente

$$Icc > m\ I_N, \text{ con}$$

$m\ I_N$ corrispondente alla minima corrente che fa certamente intervenire lo sganciatore elettromagnetico, dove

m = 5 per i magnetotermici di tipo B;
m = 10 per i magnetotermici di tipo C;
m = 20 per i magnetotermici di tipo D.

Visto che le Norme ci permettono di scrivere : **Icc = 15 V S / L**, ciò implica che, **Icc > m I_N**, ossia **15 V S / L > m I_N**, e perciò ne risulta che, **L < 15 V S / m I_N.**
Se la linea verifica questa condizione, in caso di corto circuito viene assicurato l'intervento istantaneo dell'interruttore.

ESEMPIO: Una linea monofase, Vn = 220 V, è realizzata mediante cavi di sezione S eguale a 6 mm². La linea, lunga 30 metri, è protetta dai sovraccarichi e dai corto circuiti da un interruttore magnetotermico di tipo C, avente corrente nominale I_N = 32 A. Verificare se l'intervento dell'interruttore è istantaneo in caso di corto circuito al termine della LINEA.
In base alla relazione L < 15 V S / m I_N si ottiene che: L < 15 . 220 . 6 / 10 I_N = 62 m essendo la linea lunga 30 metri, un corto circuito a fondo linea, determina una corrente Icc di intensità tale da definire l'intervento istantaneo dell'interruttore stesso.

LA CADUTA DI TENSIONE

Si consideri il seguente schema:



Con Vi indichiamo la tensione nel punto di consegna, (CONTATORE), e con Vf si indica la tensione relativa all'utilizzatore più distante. La tensione Vf è minore della tensione Vi a causa della caduta di tensione nei cavi: $\Delta V = Vi - Vf$ e la ΔV è

proporzionale alla lunghezza L della linea e alla corrente di impiego I_B, (e risulta anche inversamente proporzionale alla sezione S), pertanto scriveremo $\Delta V = K\ L\ I_B$, e la costante **$K = \Delta V / L\ I_B$** in VOLT / AMPERE . METRO, rappresenta la caduta di tensione per Ampere e per ogni metro di linea. Essa si può pensare come la caduta di tensione specifica o caduta di tensione unitaria. Il valore della costante K si desume dalle tabelle, che sono rappresentate nelle pagine successive.

Tabella relativa ai **CAVI UNIPOLARI** e **TRIPOLARI**

CADUTE DI TENSIONE

Sezione nominale	Resistenza **R** a 80 ° C	Reattanza **X**	**Corr. CONT.**	**Corr alternata Monof. cosφ = 1**	**Corr alternata Monof. cosφ = 0,8**	**Corr alternata Trifase cosφ = 1**	**Corr alternata Trifase cosφ = 0,8**
mm²	**Ω / Km**	**Ω / Km**	mV / Am	mV / Am	mV / Am	mV / Am	mV / Am
1	**22,1**	**0,176**	44,2	44,2	35,6	38,3	30,8
1,5	**14,8**	**0,168**	29,7	29,7	23,9	25,7	20,7
2,5	**8,91**	**0,155**	17,8	17,8	14,4	15,4	12,5
4	**5,57**	**0,143**	11,1	11,1	9,08	9,65	7,87
6	**3,71**	**0,135**	7,41	7,41	6,10	6,42	5,28
10	**2,24**	**0,119**	4,47	4,47	3,72	3,87	3,22
16	**1,41**	**0,112**	2,82	2,82	2,39	2,44	2,07
25	**0,889**	**0,106**	1,78	1,78	1,55	1,54	1,34
35	**0,641**	**0,101**	1,28	1,28	1,15	1,11	0,993
50	**0,473**	**0,101**	0,947	0,947	0,878	0,820	0,760
70	**0,328**	**0,0975**	0,655	0,656	0,641	0,568	0,555
95	**0,236**	**0,0965**	0,472	0,473	0,494	0,410	0,428
120	**0,188**	**0,0939**	0,373	0,375	0,413	0,325	0,358
150	**0,153**	**0,0928**	0,304	0,306	0,356	0,265	0,308
185	**0,123**	**0,0908**	0,243	0,246	0,306	0,213	0,265
240	**0,0943**	**0,0902**	0,185	0,189	0,259	0,163	0,224
300	**0,0761**	**0,0895**	0,147	0,152	0,229	0,132	0,198

400	**0,0607**	**0,0876**	0,115	0,121	0,202	0,105	0,175
500	**0,0496**	**0,0867**	0,0912	0,0992	0,183	0,0859	0,159
630	**0,0402**	**0,0865**	0,0707	0,0805	0,168	0,0697	0,146

Tabella relativa ai **CAVI UNIPOLARI**

CADUTE DI TENSIONE

Sezione nominale	Resistenza **R** a 80 ° C	Reattanza **X**	**Corr. CONT.**	**Corr alt ernata Monof.**		**Corr alt ernata Trifase**	
				cosφ = 1	**cosφ = 0,8**	**cosφ = 1**	**cosφ = 0,8**
mm²	**Ω / Km**	**Ω / Km**	mV / Am	mV / Am	mV / Am	mV / Am	mV / Am
1	**22,5**	**0,125**	45,0	45,0	36,1	39,0	31,3
1,5	**15,1**	**0,118**	30,2	30,2	24,3	26,1	21,0
2,,5	**9,08**	**0,109**	18,2	18,2	14,7	15,7	12,7
4	**5,68**	**0,101**	11,4	11,4	9,21	9,85	7,98
6	**3,78**	**0,0955**	7,56	7,56	6,16	6,54	3,34
10	**2,27**	**0,0861**	4,55	4,55	3,73	3,94	3,24
16	**1,43**	**0,0817**	2,87	2,87	2,39	2,48	2,07
25	**0,907**	**0,0813**	1,81	1,81	1,55	1,57	1,34
35	**0,654**	**0,0783**	1,31	1,31	1,14	1,13	0,988
50	**0,483**	**0,0779**	0,966	0,967	0,866	0,838	0,750
70	**0,334**	**0,0751**	0,667	0,669	0,624	0,579	0,541
95	**0,241**	**0,0762**	0,482	0,484	0,476	0,419	0,412
120	**0,191**	**0,0740**	0,381	0,383	0,394	0,332	0,342
150	**0,157**	**0,0745**	0,311	0,314	0,341	0,272	0,295
185	**0,125**	**0,0742**	0,247	0,251	0,289	0,217	0,250
240	**0,0966**	**0,0752**	0,188	0,193	0,245	0,167	0,212
300	**0,0780**	**0,0750**	0,150	0,156	0,215	0,135	0,186
400	**0,0652**	**0,0742**	0,117	0,125	0,189	0,108	0,164

500 630	**0,0512** **0,0417**	**0,0744** **0,0749**	0,0932 0,0722	0,102 0,0834	0,171 0,157	0,0887 0,0722	0,148 0,136

ESERCIZIO 1: Una linea monofase, (Vn = 220 Volt), realizzata con cavi unipolari di lunghezza 45 m, deve alimentare un carico di potenza 6 KW. Si dimensioni la LINEA.

Si ritiene che il cavo unipolare sia in PVC, e si assume un cosφ = 0,9, pertanto la corrente di impiego si ottiene: $P = V I_B \cos\varphi$ e da ciò si ricava, $I_B = P / V \cos\varphi$.
Nel nostro caso ricaveremo che: $I_B = P / V \cos\varphi = 6.000 / 220 . 0,9 = 30,3$ A.
Dalla tabella relativa ai cavi UNIPOLARI in PVC si ricava una corrente di portata pari a $I_N = 33$ A. Inoltre dalla tabella, relativa ai cavi monofasi unipolari, che sono rappresentate nelle pagine precedenti si ricava una caduta di tensione unitaria K di valore: K = 4,095 mV / Am, e ciò implica che,

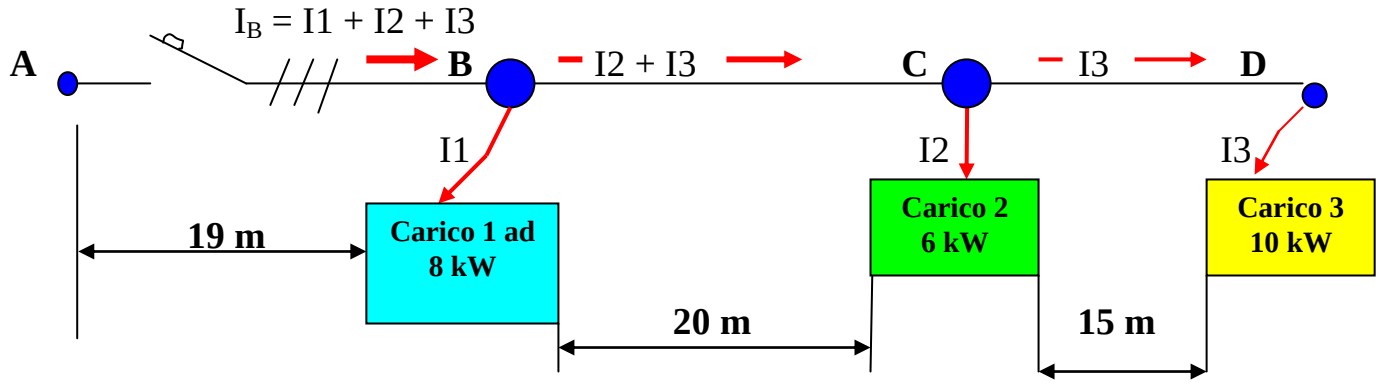
$$\Delta V = K L I_B = 4,095 . 45 . 30,3 = 5,583 \text{ mV} \approx 5,6 \text{ V}.$$

La caduta di tensione percentuale vale perciò :

$$\Delta V \% = (\Delta V / Vn) . 100 = (5,6 / 220) . 100 = 2,5 \%,$$

che è un valore accettabile. Il valore K = 4,095 è stato ottenuto come media dei valori di K relativi a cosφ = 1 e a cosφ = 0,8.

ESERCIZIO 2 : Una linea trifase realizzata con cavi unipolari isolati in PVC, alimenta, alla tensione nominale Vn = 380 Volt, i carichi visibili e specificati in figura :



Calcoliamo le correnti nominali nei 3 carichi, assumendo un cosφ = 0,9:
I1 = 8.000/ √ 3 . 380 . 0,9 = 13,5 A; I2 = 6.000/ √ 3 . 380 . 0,9 = 10,1 A;

I3 = 10.000/ √ 3 . 380 . 0,9 = 16,9. La corrente di impiego della dorsale, con coefficiente di contemporaneità pari a 1, vale: I_B = I1 + I2 + I3 = 40,5 A.
Dalla tabella si desume una portata dei cavi I_Z = 45 A, con sezione di 16 mm².
Inoltre dalla tabella della pagina precedente in corrispondenza di cavi unipolari trifasi si desume una caduta unitaria con valore K = 2,25 mV / Am. Pertanto la caduta di tensione nel tratto AB, vale: Δ V(AB) = K L_{AB} I_B = 2,25 . 19 . 40,5 = 1.731 mV = 1,7
Δ V(BC) = K L_{BC}(I2 + I3) = 2,25 . 20 . 27 = 1.215 mV = 1,2 V; ed infine si ha che
Δ V(CD) = K L_{BC} I3 = 2,25 . 15 . 16,9 = 570 mV = 0,6 V. La caduta di tensione complessiva risulta data da: Δ V(AD) = Δ V(AB) + Δ V(BC) + Δ V(CD) = 3,5 V e la corrispondente caduta di tensione % vale: Δ V(AD)% = (Δ V(AD) / Vn) . 100 =
(3,5 / 380) . 100 = 0,92 % , che è un valore accettabile.

ESERCIZI RIEPILOGATIVI

In un locale adibito ad uffici è prevista l'installazione di 42 prese da 10 A e di 15 prese da 16 A. Dimensionare l'impianto supponendo di utilizzare una sola fase.

Per determinare la SOLUZIONE è necessario suddividere l'impianto stesso in un certo numero di DORSALI, in modo tale da evitare delle differenze troppo elevate fra la sezione della dorsale e le sezioni delle derivazioni.
E' ovvio che ogni dorsale sarà protetta dai sovraccarichi e dai corto circuiti, da un proprio interruttore magnetotermico. La suddivisione in tante dorsali, consente in caso di guasto di interrompere solo una parte del sistema, in modo tale che la restante parte posso proseguire i propri lavori.
Per quanto detto suddividiamo l'impianto nel modo seguente, ossia consideriamo 6 dorsali in cui sono inserite 7 prese da 10 A, e 3 dorsali in cui sono inserite 5 prese da 16 A; infatti 6 x 7 = 42 prese da 10 A, e 5 x 3 = 15 prese da 16 A.
Dalla TABELLA valutiamo, alla voce di UFFICI il coefficiente di contemporaneità dalle prese da 10 A:

g = 0,10, in cui g' = g + (1 – g) / n = 0,1 + 0,9 / 7 = 0,23.

La corrente di impiego per le prese da 10 A, è data come:

I_B = n . I . g' = 7 . 10 . (0,23) = 16 A.

Se si sceglie un cavo in PVC la PORTATA I_Z = 19 A, con sezione di 4 mm², e pertanto la derivazione può avere sezione di Sd =2,5 mm².
Il magnetotermico adibito alla protezione della singola dorsale dovrà essere tale che:
$I_B \leq I_N \leq I_Z$ e perciò $16 \leq I_N \leq 19$, e quindi si sceglie il magnetotermico con corrente nominale di 16 A.
Consideriamo la lunghezza massima della dorsale nell'ipotesi di considerare un magnetotermico di classe C, si deve allora applicare la relazione:

$L < 15 . V . S / 10 I_N$.

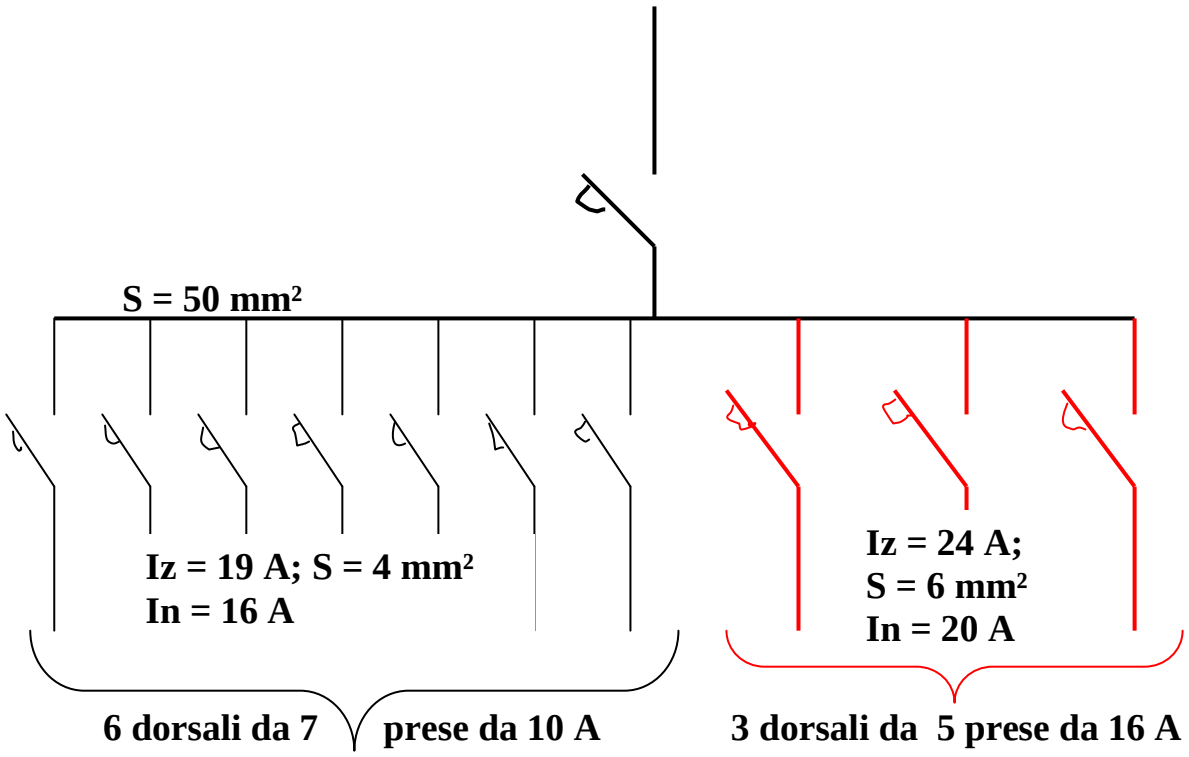
Nel nostro caso risulterà:

L < 15 . 220 . 4 / 10 . 16 = 15 . 880 / 160 = 82,5 metri.

CALCOLO le dorsali con prese da 16 A: dalla TABELLA alla voce UFFICI si consideri il valore di g, dove g = 0,05 e adesso calcoliamone il valore corretto, ossia:

g’ = g + (1 – g) / n = 0,05 + 0,95 / 5 = 0,24, da cui la corrente di impiego vale: I_B = n . I . g’ = 5 . 16 . 0,24 = 19,2 A.
Dalla tabella si valuti la corrente PORTATA, nel caso in cui il cavo sia in PVC e con valore di corrente al valore della corrente di impiego e se ne determini anche la SEZIONE. In questo caso si valuta una Iz = 24 A e
S = 6 mm². L’interruttore magnetotermico a protezione della linea deve essere tale che: $I_B \leq I_N \leq I_Z$ e perciò dovrà essere: I_N = 20 A.
Adesso valutiamo la corrente di impiego complessiva sia per le prese a 10 A che a 16A. La corrente di impiego relativo a tutte le prese da 10 A si calcola nel modo seguente: g = 0,10, g’ = 0,10 + 0,90 / 42 = 0,122, da cui I_B = 42 . 10 . 0,122 = 51 A.
mentre la corrente di impiego, relativa a tutte le prese a 16 A, vale: g = 0,05,
g’ = 0,05 + 0,95 / 15 = 0,133, e ciò implica che, I_B = 15 . 16 . 0,133 = 27 A.

La corrente complessiva dell’impianto PRESE è : I_{BTOT} = 51 + 27 = 78 A, la PORTATA e la SEZIONE della linea monofase generale delle prese è:
vedi TABELLA con cavo in PVC, Iz = 92 A, S = 50 mm².
L’interruttore GENERALE dell’impianto deve avere CORRENTE NOMINALE:
$I_B \leq I_N \leq I_Z$ e da ciò, $78 \leq I_N \leq 92$, ed in commercio l’interruttore commerciale ha corrente nominale di 80 A. In definitiva nel quadro GENERALE si impiega, per sicurezza, un INTERRUTTORE MAGNETOTERMICO DIFFERENZIALE BIPOLARE I_Δ = 0,03 A, con corrente nominale di 80 A.
La potenza impegnata dall’impianto prese è:
P = V . I_B = 220 . 78 = 17. 160 W ≈ 17 kW.
Lo schema dell’impianto prese assumerà la forma seguente:



ESEMPI DI SCELTA DEGLI INTERRUTTORI AUTOMATICI

ESERCIZIO 1

Si scelgano gli interruttori automatici per il quadro di distribuzione di una cabina di potenza An = 250 kVA, sia Vcc % = 4 %.

SOLUZIONE La corrente secondaria del trasformatore è:

I2n = An / ✯ 3 400 = 250.000 / ✯ 3 400 = 360 A.

La corrente di corto circuito trifase sul lato Bassa Tensione risulta:

Icc = 100 I2n / Vcc % = 100 . 360 / 4 = 9.000 A.

Dalla tabella si può scegliere l'interruttore generale della serie TICINO MB 630, con In = 400 A e con Pr = 40 kA.

Lo sganciatore termico consente una regolazione compresa tra l'80 % e il 100 % della corrente nominale In: l'intervallo di regolazione nel nostro caso vale

320 ÷ 400 A.

Ritenendo tollerabile un sovraccarico del trasformatore del 10 % si ha che:

la corrente di taratura del relé termico = Itt = 1,1 I2n = 1,1 (360) A = 396 A.

La corrente di taratura dello sganciatore magnetico è regolabile nell'intervallo (5 ÷ 10) In , e cioè: 5 . 400 ÷ 10 . 400 = 2.000 ÷ 4.000 A.

Per garantire una buona selettività di intervento si sceglie la taratura superiore, cioè la Itt max = 4.000 A. E' possibile suddividere il carico su diverse linee e pertanto la corrente complessiva si suddivide sul numero di linee scelte.

ESERCIZIO 2

Scegliere gli interruttori automatici per il quadro di distribuzione di una cabina di potenza di 630 kVA.

La corrente secondaria del trasformatore vale:

I2n = An / ✯ 3 400 = 630.000 / ✯ 3 400 = 910 A.

Icc = 100 I2n / Vcc % = 100 . 910 / 4 = 22.750, con Pr = 30 k V, minimo richiesto.

L'interruttore generale scelto è il modello Ticino MB 1250, con In = 1000 A, e Pr = 50 kA. L'intervallo di taratura dello sganciatore termico è sempre compreso fra l'80 % e il 100 % della corrente nominale, ossia 800 ÷ 1.000 A, e ritenendo tollerabile un sovraccarico del trasformatore del 5 %, la corrente di taratura dello sganciatore termico si può ritenere uguale a:

Itt = 1,05 . I2n = 1,05 . 910 = 955 A.

Infine dalla tabella si rileva che lo sganciatore magnetico del modello MB 1250 è regolabile nell'intervallo (3 ÷ 6) In, cioè: 3.000 ÷ 6.000 A.

Sempre per assicurare una buona selettività si considera il valore più elevato, ossia la corrente di taratura dello sganciatore magnetico si considera pari a 6.000 A.

IL PROBLEMA TERMICO NEGLI IMPIANTI ELETTRICI TRASMISSIONE DEL CALORE

Il riscaldamento di un componente o di un'apparecchiatura elettrica, (cavo, interruttore, motore, ecc.), è dovuto alla trasformazione in calore dell'energia elettrica PERSA durante il FUNZIONAMENTO. Le principali cause della perdita di potenza e quindi dell'innalzamento termico, è dovuta all'effetto Joule, nei conduttori percorsi da corrente. La perdita di potenza ΔP per effetto Joule, in un conduttore di resistenza R, è direttamente proporzionale al quadrato della corrente :

$$\mathbf{\Delta P = R\ I^2.}$$

Pertanto, variazioni notevoli di corrente comportano un aumento rilevante di perdita di potenza: è sufficiente un aumento del 30 % della corrente, per provocare un aumento della perdita di potenza del 69 %.
Indicando con $\Delta P1$ e $\Delta P2$ le perdite di potenza corrispondenti a due valori distinti di corrente, ossia alle correnti I1 ed I2, allora si ottiene che:

$\Delta P1 = R\ I1^2$ e $\Delta P2 = R\ I2^2$ e da ciò si determina che;

$\Delta P1 / I1^2 = R$ ed $R = \Delta P2 / I2^2$, e perciò si ottiene che: $\Delta P1 / I1^2 = \Delta P2 / I2^2$, e risolvendo rispetto a $\Delta P2$, si desume che: $\Delta P2 = \Delta P1\ I2^2 / I1^2 = \Delta P1\ (I2 / I1)^2$.
Se la corrente dovesse aumentare di 25 volte, come avviene in un fenomeno di corto circuito, la potenza dissipata aumenterebbe di 625 volte; infatti se fosse $I2 = 25\ I1$,
$\Delta P2 = \Delta P1\ I2^2 / I1^2 = \Delta P1\ (25\ I1 / I1)^2 = \Delta P1(25)^2 = 625\ \Delta P$.
in pratica correnti superiori a quelle assunte per il dimensionamento dei cavi e delle apparecchiature provocano sovratemperature eccessive, NON SOPPORTABILI dai materiali isolanti. Indicando con D la durata in ORE di un materiale isolante e con T la sua temperatura di funzionamento, si ha :

$$\mathbf{\log D = a + (b / T)},$$ dove **a** e **b** sono COSTANTI che dipendono dal tipo di ISOLANTE.
Come si osserva all'aumentare di T, diminuisce la quantità b / T, e ciò implica che diminuisce la vita dell'isolante. Inoltre c'è da osservare che un cavo o un'apparecchiatura con isolante fortemente invecchiato, non solo è causa di disservizio, ma costituisce un pericolo per l'incolumità delle persone e delle cose; infatti la carenza o l'insufficienza di isolamento può provocare un aumento di probabilità di avere contatti accidentali con parti attive, e perciò aumenta il rischio di folgorazioni, di corto circuiti, o di archi elettrici, che possono provocare anche fenomeni di incendio.
Nelle apparecchiature elettriche le perdite di potenza si hanno sia per effetto Joule nei circuiti elettrici, sia nei circuiti magnetici per effetto delle correnti parassite che per fenomeni di isteresi magnetica. Si ricorda che le perdite negli avvolgimenti sono proporzionali al quadrato della corrente, mentre le perdite nel ferro sono proporzionali al quadrato della tensione.

Un cavo o un'apparecchiatura trasmette il calore che in esso si sviluppa, all'ambiente esterno o circostante per CONVEZIONE e per IRRAGGIAMENTO.

L'IRRAGGIAMENTO è la trasmissione del calore per mezzo di onde elettromagnetiche, mentre la CONVEZIONE è la trasmissione di calore per il tramite il moto dei fluidi; infatti l'aria ambiente in contatto diretto o immediato con la superficie del cavo o dell'apparecchiatura, si riscalda ed, assumendo un minore peso specifico sale, lasciando posto all'aria fredda.
La potenza termica Pt trasmessa per convezione è direttamente proporzionale:

- ❖ alla differenza di temperatura ΔT fra cavo o apparecchiatura e temperatura dell'ambiente;
- ❖ alla superficie disperdente S o di smaltimento del calore.

Indicando con λ il coefficiente di trasmissione termica, si ha

$Pt = \lambda S \Delta T$, dove Pt si misura in Watt, S in m^2, ΔT in ° C o K, e perciò λ si misura in W / m^2 °C oppure, $W / m^2 K$.

CORRENTE TERMICAMENTE EQUIVALENTE

Se in un cavo di resistenza R è percorso da una corrente costante I, l'energia dissipata per effetto Joule nell'intervallo di tempo ΔT risulta:

$$\Delta E = \Delta P \, \Delta T = R I^2 \Delta T.$$

Se invece il cavo segue un ciclo di lavoro predefinito, ossia se esso è percorso dalla corrente I1 nell'intervallo di tempo $\Delta T1$ e dalla corrente I2 nell'intervallo di tempo $\Delta T2$, allora l'energia dissipata nell'intervallo di tempo $\Delta T = \Delta T1 + \Delta T2$, con ΔT durata del ciclo di lavoro, sarà data come: $\Delta E = R\, I1^2 \Delta T1 + R\, I2^2 \Delta T2$.
A questo punto si può definire la CORRENTE TERMICAMENTE EQUIVALENTE:
La corrente termicamente equivalente, Iteq, è quel valore di corrente che, circolando nel cavo nell'intervallo di tempo ΔT, cioè la durata del ciclo di lavoro del cavo stesso, determina la stessa dissipazione di ENERGIA ΔE. In altri termini risulta che:

$\Delta E = R\, (Iteq)^2 \Delta T = R\, I1^2 \Delta T1 + R\, I2^2 \Delta T2$.

Da ciò si ricava che: $\Delta E = R\, (Iteq)^2 \Delta T = R\, (I1^2 \Delta T1 + I2^2 \Delta T2)$, semplificando la R, si ottiene $(Iteq)^2 \Delta T = I1^2 \Delta T1 + I2^2 \Delta T2$, e così si determina il valore della Iteq, con i seguenti calcoli, $(Iteq)^2 = (I1^2 \Delta T1 + I2^2 \Delta T2) / \Delta T$:

$$Iteq = \sqrt{(I1^2 \Delta T1 + I2^2 \Delta T2) / \Delta T}.$$

ESERCIZIO: Un cavo è percorso dalla corrente I1 = 40 A, nell'intervallo di tempo $\Delta T1$ = 6 minuti, e dalla corrente I2 = 70 A nell'intervallo di tempo $\Delta T2$ = 18 minuti. Si determini la corrente termicamente equivalente a questa situazione:

$$Iteq = \sqrt{\{\, 40^2 (6) + 70^2 (18) \,\} / 6 + 18} = 63{,}8 \text{ A}.$$

Si noti che: $Iteq = \sqrt{\sum Ii^2 (\Delta Ti) / \Delta T}$, **dove** $\Delta T = \Delta T1 + \Delta T2 + \ldots + \Delta Tn$.

ESERCIZIO: Un cavo ha le seguente ciclo di lavoro, ossia è percorso da una: corrente I1 = 35 A, per 5 minuti; corrente I1 = 50 A, per 8 minuti; corrente I1 = 60 A, per 9 minuti; corrente I1 = 40 A, per 6 minuti. Si calcoli la corrente termicamente equivalente.

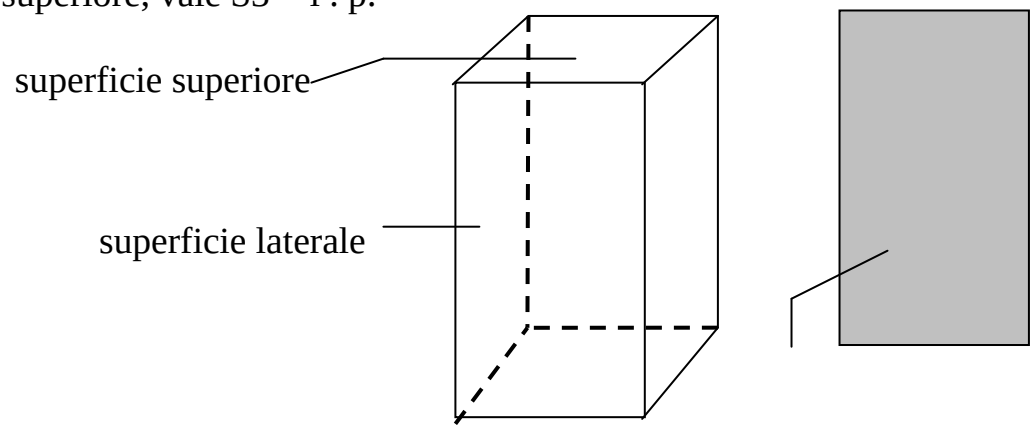
SOLUZIONE: La durata complessiva del ciclo vale:
$\Delta T = \Delta T1 + \Delta T2 + \Delta T3 + \Delta T4 = 5 + 8 + 9 + 6 = 28$ minuti;
applicando la relazione superiore si ottiene che:

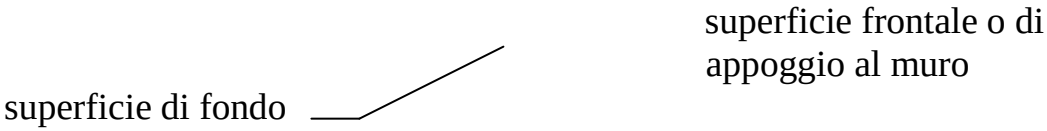
$$Iteq = \sqrt{\{(35)^2 . 5 + (50)^2 . 8 + (60)^2 . 9 + (40)^2 . 6\} / 28} = 49{,}3 \text{ A.}$$

SOVRATEMPERATURA DEI QUADRI ELETTRICI

Nei quadri elettrici il problema termico è estremamente complesso, perché in un VOLUME LIMITATO si concentra un gran numero di dispositivi:
interruttori automatici, conduttori in cavo, ecc., che sviluppano un notevole calore.
Tenendo conto che il calore prodotto nel quadro viene esclusivamente smaltito per CONVEZIONE, la quantità di calore smaltito o la potenza trasmessa Pt per convezione è data da: $Pt = \Delta P = \lambda S (Tq – Ta) = \lambda S \Delta T_Q$, dove λ è il coefficiente di trasmissione termico espresso in W / m² K, Tq = temperatura del quadro, Ta = temperatura dell'ambiente, S = superficie del quadro, ed infine ΔT_Q = sovratemperatura del quadro, ossia ci esprime di quanto si è elevata la temperatura del quadro rispetto alla temperatura dell'ambiente.
Inoltre, per favorire lo smaltimento del calore prodotto all'interno del quadro, è necessario prevedere due aperture:
1) un'apertura inferiore per l'entrata dell'aria fredda;
2) un'apertura superiore per favorire l'uscita dell'aria calda.

Per quanto riguarda la superficie che effettivamente disperde il calore, occorre tenere presente che, il QUADRO è un parallelepipedo con una LARGHEZZA = l, con un'ALTEZZA = h, e con una PROFONDITA' = p.
Da ciò si desume che, l'area della parete frontale e di quella appoggiata al muro, vale: S1 = h . l ; l'area delle pareti laterali vale, S2 = h . p; e l'area del fondo e quindi della faccia superiore, vale S3 = l . p.





La superficie effettivamente disperdente Se, risulta così definita:

$$Se = 1{,}4\ S3 + 0{,}9\ (\ 2\ S2 + S1\ ) = 1{,}4\ lp + 0{,}9\ (\ 2\ hp + hl\ ) =$$
$$= 1{,}4\ lp + h\ (\ 1{,}8\ p + 0{,}9\ l\ ).$$

Se ad esempio un quadro presenta la seguente geometria: h = 2 m; l = 0,8 m e p = 0,6 m, si ha perciò che:

$$S1 = hl = 2\ .\ (\ 0{,}8\ ) = 1{,}6\ m^2\ ;$$
$$S2 = hp = 2\ .\ (\ 0{,}6\ ) = 1{,}2\ m^2\ ;$$
$$S3 = lp = 0{,}8\ .\ (\ 0{,}6\ ) = 0{,}48\ m^2.$$

Dai dati ottenuti la superficie effettivamente disperdente vale allora:

$$Se = S\ eff. = 1{,}4\ S3 + 1{,}8\ S2 + 0{,}9\ S1 = 1{,}4\ .\ (\ 0{,}48\ ) + 1{,}8\ .\ (\ 1{,}2\ ) + 0{,}9\ .\ (\ 1{,}6\ ) =$$
$$= 4{,}272\ m^2.$$

Per quanto riguarda il calcolo della potenza ΔP dissipata all'interno dell'armadio o del quadro, occorre distinguere fra il contributo dato dagli interruttori e dal contributo dei conduttori interni al quadro stesso. Per quanto riguarda il primo contributo, i costruttori forniscono per tutti gli interruttori, la potenza dissipata Pd per ogni polo. Valori indicativi possono essere i seguenti, in funzione della corrente nominale In degli interruttori stessi.

In (A)	Pd in W	S in mm² o dimensione sbarra	Pc (W) per 1 m di conduttore
25	3	10	1,43
40	4	16	2,32
63	5,2	25	3,69
100	6	50	4,60
160	11,5	20 x 3	8,96
250	15,6	20 x 5	13,13
320	15,9	30 x 5	14,34
400	19,2	30 x 5	22,40
500	19,4	40 x 6	21,88
630	19,6	50 x 6	27,78

Se ad esempio, in un quadro sono installati:

a) 1 magnetotermico quadripolare, con In = 500 A;
b) 3 magnetotermici quadripolari, con In = 160 A;
c) 2 magnetotermici quadripolari, con In = 100 A.

Si ha allora che, la potenza dissipata dal magnetotermico è dato da:
(numero di poli) per (potenza dissipata da esso in relazione alla corrente nominale fornita) per (il numero complessivo di interruttori dello stesso tipo).

In definitiva si ha che:
potenza complessivamente dissipata dal dispositivo di tipo a), 4 x 19,4 x 1 = 77,6 W;
potenza complessivamente dissipata dal dispositivo di tipo b), 4 x 11,5 x 3 = 138 W;
potenza complessivamente dissipata dal dispositivo di tipo c), 4 x 6 x 2 = 48 W.

A ciò si aggiunge per esempio:
la potenza dissipata da 1 metro di sbarra 40 x 6, ⟹ 1 x 21,88 = 21,88 W;
la potenza dissipata da 3 metri di sbarra 20 x 3, ⟹ 3 x 8,96 = 26,88 W;
la potenza dissipata da 2 metri di cavo di sezione di 50 mm², ⟹ 2 x 4,60 = 9,2 W.

In conclusione la potenza ΔP dissipata complessivamente all'interno del quadro è:
ΔP = 77,6 + 138 + 48 + 21,88 + 9,20 = 321,56 W.

VALUTAZIONE DEL CARICO CONVENZIONALE

Per valutare la corrente assorbita da una singola utenza di tipo CIVILE, si può far riferimento alla POTENZA CONTRATTUALE.
Per le potenze domestiche e similari, (abitazioni, piccoli negozi, ecc.), le potenze contrattuali possono essere: 1,5 kW; 3 kW; 6 kW; 10 kW, con fornitura MONOFASE alla tensione nominale Vn = 220 Volt.
Se si assume un cos φ UNITARIO, le correnti risultano:

POTENZA contrattuale in W	**Corrente assorbita a cosφ unitario, I = P / 220 oppure P / 230 in Ampere**	
1.500	**6,8**	**6,52**
3.000	**13,6**	**13**
6.000	**27,3**	**26**
10.000	**45,5**	**43,5**

OSSERVAZIONE La potenza contrattuale è la potenza che l'UTENTE richiede all'ENTE fornitore, ed è la POTENZA che l'ENTE mette a disposizione dell'UTENTE.
Per le utenze di tipo civile con potenze contrattuali in kW di **10; 15; 20; 30; 40** la fornitura è di tipo trifase, con presenza del NEUTRO, con tensione nominale concatenata 380 Volt oppure 400. Se si assume un cos φ = 0,9, le correnti assorbite risultano, per entrambe, (i due risultati sono separati da una linea verticale:

POTENZA contrattuale in W	**Corrente assorbita in A, I = P / √ 3 cos φ , in A**	
10.000	**16,9**	**14,5**
15.000	**25,4**	**21,7**
20.000	**33,8**	**29**

E’ ovvio che prima della stipulazione del contratto, l’**utente** deve conoscere la potenza che richiederà il proprio impianto. Generalmente per determinare la potenza che un impianto assorbe nella situazione più gravosa, non è necessario eseguire la somma di tutte le potenze nominali di TUTTE le apparecchiature elettriche presenti, perché l’esperienza dimostra che ciò conduceva ad una valutazione in **eccesso** della potenza medesima. Infatti, risulta molto improbabile che funzionino TUTTE le macchine CONTEMPORANEAMENTE, con le loro rispettive potenze nominali.
Indicando con Pinst, la potenza INSTALLATA, ossia la **somma di tutte** le **potenze nominali** di tutte le apparecchiature presenti nell’impianto, e, con P la POTENZA che PRESUMIBILMENTE verrà ASSORBITA dall’impianto nelle condizioni gravose, si ha allora: **P = k Pinst**.
Dove nell’equazione precedente, **k** è il **coefficiente di riduzione globale**, che tiene conto sia dell’UTILIZZAZIONE, (funzionamento delle apparecchiature con una potenza nominale inferiore o uguale alla propria potenza di targa), che della CONTEMPORANEITA’, (ossia si deve tenere conto che le apparecchiature non possono **tutte funzionare** contemporaneamente). I valori di k desunti dall’esperienza, per i vari tipi di impianto, sono riportati nella seguente TABELLA:

IMPIANTI in …	k
Ospedali	0,75
Alberghi	0,8
Scuole	0,7
Supermercati	0,9

Un altro metodo per determinare la potenza complessiva, si basa sul **concetto di potenza richiesta e superficie occupata**.
Si può così definire la POTENZA SPECIFICA, cioè la potenza richiesta per m² del locale: **Ps = P / S**, con P = potenza totalmente richiesta, in W; S = superficie in m²;
Ps = potenza specifica, ossia potenza richiesta per m² di superficie, in W / m².
I valori di potenza specifica relativi ai casi più comuni sono riportati nella tabella seguente:

IMPIANTI in …	Ps in W / m²
Ospedali	70
Alberghi	90
Scuole	60
Supermercati	100

ESERCIZIO: **La potenza elettrica installata in una scuola è di 120 kW, e la superficie totale di essa, è di 1.500 m². Si calcoli la potenza che presumibilmente verrà prelevata nelle condizioni più gravose o sfavorevoli**.
Dalla tabella dei valori di k si ricava che nel caso delle Scuole K = 0,7, e perciò si desume che: P = k Pinst = 0,7 . 120 kW = 84 kW.

Se utilizziamo il concetto relativo alla potenza specifica, dalla tabella di poco superiore si rileva che, la potenza richiesta, per ogni m², da una Scuola, è di valore Ps = 60 W / m², e da ciò per la Scuola considerata che ha una superficie complessiva di 1.500 m², la potenza complessivamente richiesta è data da:

P = Ps . S = 60 x 1.500 = 90.000 Watt = 90 kW.

Il metodo basato sulla POTENZA SPECIFICA fornisce un risultato superiore rispetto al metodo basato sul **coefficiente di riduzione globale**, e perciò assumiamo come valore di potenza presumibilmente richiesto dall'impianto, nel caso più sfavorevole, nel valore di 90 kW.

In GENERALE assumendo come **potenza massima prelevabile** il maggiore tra i due valori: **P = K . Pinst;** **P = Ps . S**,
la **potenza contrattuale** si ottiene **maggiorando P del 20 %**, ossia:
P contrattuale = 1,2 P.

La maggiorazione del 20% si rende necessaria sia per far fronte ad eventuali aumenti della potenza e sia per compensare un possibile errore nella stima della potenza richiesta dall'impianto stesso.

Negli impianti industriali, la determinazione della potenza richiesta dall'impianto in condizioni di carico più gravose, è ancora più INCERTA, perché NON è prevedibile QUANTE e QUALI siano le macchine che funzionano contemporaneamente, a cui si aggiunge che i motori asincroni trifasi subiscono delle variazioni notevoli.

Una stima delle potenze complessivamente prelevate dai motori asincroni trifasi, negli impianti industriali, nelle situazioni più gravose, può essere fatta utilizzando i valori di POTENZA SPECIFICA della seguente tabella:

IMPIANTI in	POTENZA specifica in W / m²
FALEGNAMERIA	**80**
OFFICINA MECCANICA	**90**
INDUSTRIA ELETTRONICA	**100**
INDUSTRIA TESSILE	**110**
CARTIERA	**130**

La potenza massima prelevabile dall'insieme dei motori asincroni trifase, in mancanza di dati precisi, sul loro regime di funzionamento, si può assumere pari al 50 % della potenza installata complessiva: P = 0,5 Pinst.

Questo equivale a considerare un **coefficiente di utilizzazione medio** K di 0,7;
(ovvero ogni motore asincrono EROGA una potenza media del 70 % della sua potenza nominale; e un coefficiente globale di contemporaneità del 70 %, ossia si ritiene che il 70 % dei motori asincroni possano lavorare simultaneamente).

In definitiva con un Ku = 0,7 e con Kc = 0,7 la potenza effettivamente prelevata dall'insieme dei motori asincroni trifasi risulta eguale a:

P = Ku . Kc . Pinst = 0,7 . 0,7 Pinst = 0,49 Pinst.

In una falegnameria di superficie 300 m² la potenza installata, riferita ai soli motori asincroni trifasi, è 42 kW. Determinare la potenza contrattuale assumendo una potenza dell'impianto luce e delle apparecchiature monofase di 3 kW.
Utilizzando la potenza specifica, Ps = 80 W / m², la potenza richiesta dall'insieme dei motori asincroni è: P = Ps . S = 80 . 300 = 24.000 W = 24 kW.
Utilizzando un coefficiente di riduzione globale pari a 0,5, la potenza richiesta dall'insieme dei motori asincroni trifasi è: P = 0,5 Ps = 0,5 .42 = 21 kW.
Proprio per questo assumiamo come potenza richiesta, nelle condizioni più sfavorevoli, il valore di 24 kW. Tenendo conto dei 3 kW per l'illuminazione e per le utenze monofasi, la potenza P sale 27 kW. Infine maggiorando la potenza del 20 %, per tenere conto di eventuali aumenti di potenza e di eventuali errori di stima delle potenze, si ottiene: P contrattuale = 1,2 . 27 = 32,4 kW.
A questo punto l'utente può scegliere fra due potenze contrattuali o la potenza contrattuale di 30 kW oppure quella 40 kW.
Ora la scelta è legata alla flessibilità dell'impianto o meno, ossia se l'impianto, si è certi non subirà aggiunte in futuro di altri macchinari, si può scegliere la potenza contrattuale di 30 kW, se no si sceglie la potenza contrattuale dei 40 kW.

INTERRUTTORI MAGNETOTERMICI LENTI, RAPIDI E LIMITATORI

Gli interruttori magnetotermici si possono classificare in base al tempo di PRE ARCO in 3 categorie:

- interruttori LENTI;
- interruttori RAPIDI;
- interruttori LIMITATORI.

Il tempo di PRE ARCO Tpa è il tempo che intercorre dall'istante t1 in cui si manifesta la sovracorrente all'istante t2 in cui i contatti si separano, dando inizio alla FORMAZIONE dell'ARCO ELETTRICO. In definitiva risulta che: Tpa = t2 – t1.

Il TEMPO d'ARCO è il tempo che intercorre dall'istante t2 in cui i contatti si separano, dando inizio all'arco, all'istante t3 in cui l'arco elettrico è completamente estinto: Ta = t3 –t2.

Il tempo TOTALE di INTERRUZIONE Ti è pari alla somma del tempo di pre arco e del tempo d'arco: Ti = Tpa + Ta = ~~t2~~ – t1 + t3 – ~~t2~~ = t3 – t1.

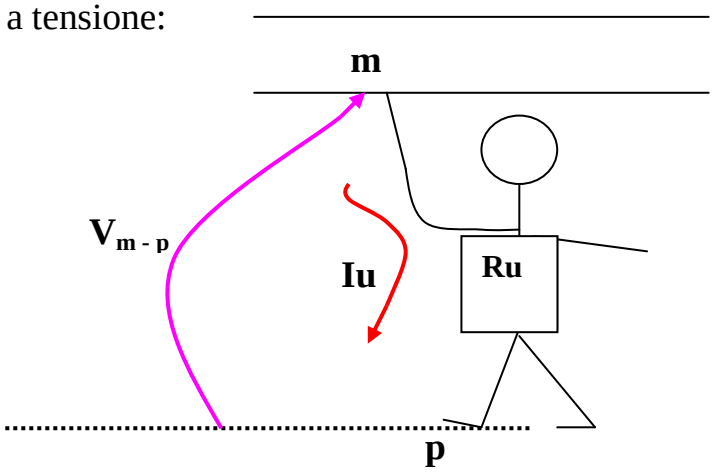
Gli interruttori LENTI hanno tempi di pre arco volutamente lunghi, superiori ai 60 ms, in quanto destinati alla protezione dei trasformatori nelle CABINE e le linee di B T di elevata sezione. Perciò essi devono avere un intervento SELETTIVO, ovvero RITARDATO, rispetto agli INTERRUTTORI RAPIDI installati a valle.

Gli interruttori RAPIDI hanno tempi di pre arco dell'ordine di 2 – 3 ms, e perciò, il distacco dei contatti avviene prima che la corrente di corto circuito si stabilizzi.
L'arco si spegne al primo passaggio della tensione per lo ZERO, ed il TEMPO TOTALE di INTERRUZIONE generalmente NON SUPERA i 13 ms.
Gli interruttori RAPIDI sono quelli più diffusi in quanto adatto per la protezione delle LINEE in CAVO di piccola e media sezione, (da 1,5 mm² fino a 35 mm²).

Gli interruttori LIMITATORI hanno tempi di pre arco dell'ordine di 0,6 ÷ 0,9 ms e, quindi il distacco dei contatti avviene quando il valore istantaneo della corrente di corto circuito è ancora inferiore al valore di CRESTA. In questo modo il tempo TOTALE di interruzione non supera i 10 ms.

ESPRESSIONE ANALITICA DELLA CURVA DI PERICOLOSITA' DELLA CORRENTE ELETTRICA

Nella figura è rappresentato un soggetto che tocca un dispositivo o un conduttore a tensione:



ì
Tra la MANO ed il PIEDE del soggetto è presente una d d p: Vmp = Vm – Vp,
dove Vm è il potenziale della parte di impianto toccata con la mano, (potenziale di mano); Vp = potenziale nel punto in cui il soggetto poggia i piedi; ed infine
Vmp = d d p MANO – PIEDI.

La corrente che attraversa il corpo umano, (percorso mano – piedi), è:
Iu = Vmp / Ru, con Ru resistenza del corpo umano ed Iu corrente che attraversa l'uomo. Il pericolo è proporzionale alla corrente Iu e quindi alla differenza di potenziale tra mano e piede, o Vmp. Ogni valore determinato o preciso di Iu, può essere sopportato dal corpo umano per un tempo massimo ricavabile dalla seguente formula: t = 10 / Iu – 10.

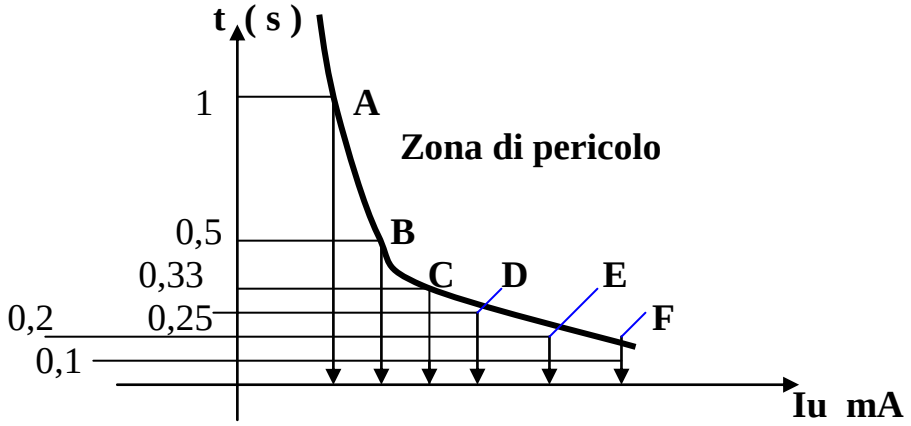
Superato il tempo massimo t dato dalla relazione precedente, possono verificarsi danni irreversibili, (arresto respiratorio, fibrillazione cardiache, paralisi dei centri nervosi, ecc.), con possibile morte dell'infortunato.

La curva di pericolosità può essere ottenuta per punti alle seguenti condizioni:

PUNTI	VALORE CORRENTE in mA	TEMPO in s
A	**20**	**1**
B	**30**	**0,5**
C	**40**	**0,33**
D	**50**	**0,25**
E	**60**	**0,2**
F	**110**	**0,1**

OSSERVAZIONE: per I = 10 mA, t = 10 / (10 – 10) = 10 / 0 = ∞.

Si esamini ora il grafico :



Con questo espediente è possibile determinare in modo qualitativo la CURVA di PERICOLOSITA' della CORRENTE nell'ipotesi di una tensione sinusoidale a 50 Hz di frequenza. Si osservi che la curva di pericolosità suddivide il piano in due ZONE: ZONA SOPRA la CURVA e ZONA SOTTO la CURVA. La zona superiore è la ZONA di PERICOLO, quella inferiore è la ZONA di NON PERICOLO.
Si osservi che per Iu = 100 mA, Iu = 150 mA, e Iu = 250 mA, si desume che la sopportabilità è rispettivamente: t = 10 / 100 – 10 = 0,11 s; t = 10 / 150 – 10 = 0,071s; t = 10 / 250 – 10 = 0,04 s.
In definitiva l'interruttore di corrente differenziale d'intervento IΔn = 30 mA, presenta i seguenti tempi di intervento, (massimi), in funzione della corrente differenziale:

Id in mA	Tempo in s
30	**0,3**
60	**0,15**
150	**0,04**

Da un confronto con la curva di pericolosità risulta che:

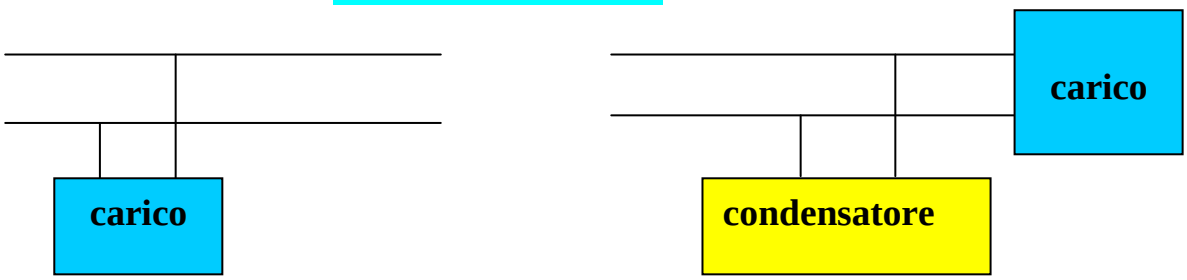
- l'interruttore differenziale IΔn = 30 mA, non offre alcuna protezione nel caso in cui il corpo umano è attraversato da correnti comprese fra 10 ÷ 30 mA;
- la curva di intervento dell'interruttore, si trova al di sotto della curva di pericolosità, per correnti comprese nell'intervallo 30 ÷ 250 mA.

Tenendo presente che la corrente che, percorre il corpo umano, (cioè nel caso di contatto diretto con la fase), è: Iu = V0 / Ru = 220 / 2000 = 0,11 A = 110 mA; l'interruttore differenziale IΔn = 30 mA è una valida protezione contro i contatti diretti ed indiretti, in quanto l'intervento è garantito al di sotto della curva di pericolosità. La normativa per gli interruttori differenziali d'uso domestico e similari, classifica questi apparecchi secondo due tipologie d'intervento:

1) tipo AC: interruttori il cui sgancio è assicurato per correnti sinusoidali differenziali;
2) tipo A: interruttori il cui sgancio è assicurato sia per correnti sinusoidali differenziali che per correnti unidirezionali pulsanti.

Le correnti differenziali su cui opera il dispositivo possono essere: IΔn;2 IΔn e 5 IΔn; in cui i tempi di intervento massimi in secondi, sono rispettivamente 0,3; 0,15 e 0,04.

IL RIFASAMENTO



La corrente assorbita da un carico, alimentato da una tensione alternata V, è rappresentata da una corrente I sfasata con una angolo φ rispetto al vettore V:

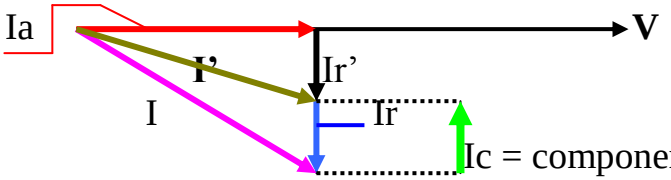


dove la corrente Ia è la componente attiva, ossia quella in fase con la tensione V, e la corrente Ir viene indicata con il nome di componente reattiva della corrente, ed essa è in quadratura con il vettore della tensione. Utilizzando il teorema di Pitagora ci permette di ricavare il valore della corrente, circolante nel circuito:

$$I = \sqrt{(Ia^2 + Ir^2)}.$$

Senza il RIFASAMENTO la linea deve portare o trasportare la corrente I del carico, anche se ad esso interessa la sola corrente ATTIVA. Ciò significa che la LINEA deve anche supportare la corrente reattiva Ir, ma un'intensità di corrente I elevata comporta perdite maggiori, maggiore effetto di riscaldamento della linea stessa. Se, invece, si esegue il RIFASAMENTO, la corrente in linea si riduce al valore I', minore della corrente I, richiesta dal carico, in quanto parte della corrente reattiva Ir viene fornita dalla BATTERIA di CONDENSATORI, preposti al RIFASAMENTO.

In definitiva la batteria di condensatori, posta in parallelo al carico, fornisce una parte della corrente reattiva. Si veda la figura di riferimento, sotto riportata:



La componente ATTIVA viene trasportata indipendentemente dal fatto che sia o non sia effettuato il RIFASAMENTO. Il RIFASAMENTO determina una riduzione della corrente in LINEA, comportando vantaggi tecnici ed economici; infatti se fosse previsto il RIFASAMENTO, nella fase di progettazione dell'impianto, ciò comporterebbe la scelta di cavi con sezione più ridotta, mentre se la linea è già stata realizzata l'adozione del RIFASAMENTO comporterebbe un assorbimento minore di corrente e ciò implica una minore perdita di potenza per effetto Joule e minori cadute di TENSIONI: (si vedano le tabelle della pagina successiva)

CARICO del MOTORE in % della potenza NOMINALE															
25%				50%				75%				100%			
Numeri Poli				Numeri Poli				Numeri Poli				Numeri Poli			
2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
0,35	0,30	0,28	0,27	0,55	0,46	0,43	0,42	0,68	0,57	0,53	0,52	0,74	0,62	0,58	0,57
0,38	0,33	0,31	0,29	0,59	0,51	0,48	0,45	0,73	0,62	0,58	0,56	0,80	0,68	0,64	0,61
0,39	0,35	0,32	0,31	0,61	0,54	0,50	0,48	0,75	0,67	0,61	0,59	0,82	0,73	0,67	0,65
0,40	0,36	0,34	0,32	0,62	0,56	0,52	0,50	0,77	0,70	0,64	0,61	0,84	0,76	0,70	0,67
0,41	0,38	0,35	0,34	0,63	0,59	0,55	0,52	0,78	0,72	0,68	0,64	0,85	0,79	0,74	0,70
0,41	0,39	0,36	0,35	0,64	0,60	0,56	0,53	0,79	0,74	0,70	0,67	0,86	0,81	0,76	0,73
0,42	0,39	0,37	0,36	0,64	0,61	0,58	0,56	0,80	0,75	0,71	0,70	0,87	0,82	0,78	0,76
0,42	0,40	0,38	0,37	0,65	0,62	0,59	0,58	0,81	0,77	0,72	0,71	0,88	0,84	0,79	0,78
0,42	0,41	0,38	0,38	0,65	0,63	0,59	0,59	0,81	0,78	0,73	0,72	0,88	0,85	0,80	0,79
0,43	0,41	0,39	0,38	0,66	0,64	0,60	0,59	0,82	0,79	0,74	0,73	0,89	0,86	0,81	0,80
FATTORE DI POTENZA corrispondente															

POTENZA Nominale del motore		Carico del motore 50%				Carico del motore 75%			
		Numero di poli				Numero di poli			
kW	CV	**2**	**4**	**6**	**8**	**2**	**4**	**6**	**8**
0,1	0,13	**0,08**	**0,13**	**0,18**	**0,17**	**0,07**	**0,12**	**0,18**	**0,17**
0,25	0,34	**0,17**	**0,24**	**0,29**	**0,33**	**0,12**	**0,22**	**0,28**	**0,31**
0,5	0,68	**0,3**	**0,4**	**0.46**	**0,52**	**0,2**	**0,33**	**0,44**	**0,5**
1	1,36	**1,1**	**1,3**	**1,6**	**1,8**	**0,34**	**0,53**	**0,7**	**0,85**
2,5	3,40	**1,2**	**1,4**	**1,6**	**1,9**	**0,74**	**1,1**	**1,34**	**1,7**
5	6,80	**2,3**	**2,6**	**3**	**3,5**	**1,3**	**1,9**	**2,3**	**2,8**
10	13,6	**4,4**	**4,9**	**5,5**	**6**	**2,3**	**3,4**	**4,3**	**4,7**
25	34	**10**	**12**	**13**	**14**	**5,1**	**7,2**	**10**	**11**
50	68	**20**	**22**	**25**	**26**	**10**	**13**	**19**	**20**
100	136	**38**	**41**	**48**	**51**	**18**	**24**	**35**	**38**
POTENZA REATTIVA in kVAR **a freccia dello stesso colore corrisponde la polarità e la potenza**									

ESERCIZIO: **Una linea in cavo deve alimentare un motore asincrono trifase di potenza nominale Pn = 10 kW, di 6 poli. Calcolare la sezione dei cavi senza rifasamento e prevedendolo**. (Hp. $\eta = 0,85$)

Dalla tabella si desume che per un motore asincrono trifase di 6 poli, il rifasamento totale, ossia il 100 %, ha un cos $\varphi = 0,78$. Sapendo che: $P = \sqrt{3} \cdot VI \cos \varphi$.
Nell'ipotesi che il motore abbia un rendimento del 0,85, (come indicato superiormente), si desume una corrente I :

$I = I_B = P / \eta \sqrt{3} .V \cos \varphi = 10.000 / 0,85.\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,78 \approx 23$ A.

Impiegando cavi unipolari in PVC si ha una corrente di portata Iz = 33 A, per avere un buon margine di sicurezza, e ad esso corrisponde una sezione S = 10 mm².
Prevedendo il RIFASAMENTO, dello stesso motore asincrono, si desume che:
$I' = I_B' = 10.000 / 0,85 .\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,95 = 18,8$ A ≈ 19 A, e ciò implica una corrente di portata Iz' = 24 A, che comporta una sezione di 6 mm². come si osserva il **rifasamento** comporta la riduzione della sezione dei cavi.

ESERCIZIO: **Una linea in cavo di sezione S = 10 mm², lunga 30 m, alimenta un motore asincrono trifase di potenza Pn = 10 kW, 6 poli e con tensione di 380 V. Si determini la perdita di potenza in LINEA senza rifasamento e prevedendolo a cos φ = 0,95. Si assume un rendimento η del motore = a 0,85 e $\rho = 0,021\ \Omega\ mm^2 / m$.**

Dalla tabella, si rileva che il fattore di potenza o il cos φ , relativo ad un funzionamento del 100 % del motore asincrono, ossia si ritiene che il motore funzioni a piena potenza nominale, pari a 10 kW, vale 0,78.
Da ciò si ricava che:
$I = I_B = P / \eta \sqrt{3} . V \cos \varphi = 10.000 / 0,85.\sqrt{3} . 380 . 0,78 \approx 23$ A.
La resistenza di un cavo alla temperatura di esercizio vale:

$$R = \rho \, l / S = 0,021 . (30) / 10 = 0,063 \, \Omega.$$

La potenza perduta in linea, vale:
$Pp = 3 R I^2 = 3 . 0,063 . (23)^2 \approx 100$ W.
Con il rifasamento a cos φ = 0,95, si ottiene che:
$I' = I_B' = 10.000 / 0,85 .\sqrt{3} . 380 . 0,95 = 18,8$ A ≈ 19 A, e ciò implica,
$R = \rho \, l / S = 0,021 . (30) / 6 = 0,105 \, \Omega$ ed una potenza perduta in linea, data da
$Pp' = 3 R I'^2 = 3 . 0,105 (19)^2 \approx 113,7$ W.

In conclusione si vede che riducendo la corrente da I a I',la potenza aumenta, per effetto del fatto che scelgo una sezione di rame minore. In effetti al diminuire della sezione aumenta la resistenza, per unità di lunghezza e quindi la potenza perduta.

ADDEBITO O COMPUTO DELL'ENERGIA REATTIVA

Le linee di distribuzione dell'energia elettrica trasferiscono una quantità, tanto più elevata di corrente elettrica agli utenti, quanto minore è il cos φ.
Consideriamo questo esempio, ossia se il fattore di potenza di un impianto è cos φ = 0,7, la corrente in linea risulta data da:

$I = P / \sqrt{3} \, V \cos \varphi$, ponendo $K^* = P / \sqrt{3} \, V$, si desume che,

$I = K^* / \cos \varphi$.

A parità di potenza attiva P, erogata al carico, se il fattore di potenza è cos φ' = 0,9, ciò implica che: **$I' = K^* / \cos \varphi'$**, ossia I' < I , infatti, è possibile eseguire il seguente calcolo, $I / I' = K^* / \cos \varphi / K^* / \cos \varphi' = \cos \varphi' / \cos \varphi = 0,9 / 0,7 = 1,286$.

In altri termini un RIFASAMENTO da cos φ a cos φ' consente di ridurre la corrente secondo il fattore 1,286 e questo implica che il rapporto fra le perdite di potenza è: $\Delta P / \Delta P' = (I / I')^2 = (1,286)^2 = 1,654$ e quindi $\Delta P' = \Delta P / 1,654$.

In conclusione, il rifasamento da cos φ = 0,7 a cos φ' = 0,9 riduce le perdite di potenza in linea secondo il fattore 1,654.
Proprio per questo l'**ente distributore**, per rifarsi delle maggiori perdite di potenza, nelle proprie linee, dovute al basso cos φ degli utenti, applica un tariffario anche sull'energia reattiva prelevata.

1) La potenza reattiva prelevata Q ≤ 50 % P = 1/ 2 P, da cui si ricava che,
Tg φ = Q / P = 1/ 2 P / P = 1/ 2 = 0,5 , dove φ ≈ 26°, 56, e da ciò si ricava che cos φ ≈ 0,894. L'energia reattiva prelevata in un certo intervallo di tempo Δt è

uguale a: Eq = Q Δt e se cos φ ≈ 0,894 l'energia Eq NON VIENE ADDEBITATA.
CONCLUSIONE: se l'impianto è tale che il fattore di potenza è maggiore o uguale a **0,9** , allora la potenza reattiva non è maggiore di P / 2, perciò l'impianto è **rifasato** di suo e l'ente fornitore di energia elettrica non addebita all'utente l'energia reattiva prelevata.

2) Se la potenza reattiva è compresa tra il 50 % e il 100 % della potenza attiva, ossia se: **0,5 P < Q < P**, l'**ente distributore** addebita all'utente l'energia reattiva che eccede dal 50 % dell'energia attiva: (Eq) add = (Q – 0,5 P) Δt.
Se ad esempio la potenza reattiva è pari all'80 % della potenza attiva:
Q = 0,8 P, allora la **(Eq) add = (0,8 P – 0,5 P) Δt = 0,3 P Δt**.
OSSERVAZIONE: Se **P = Q** ciò implica che Tg φ = Q / P = P / P = 1, ossia a l'angolo φ = 45 ° e perciò il cos φ = cos 45 ° = √ 2 / 2 = 0,707.

3) Se la potenza reattiva supera la potenza attiva, cioè nel caso in cui cos φ < 0,707 l'ENTE DISTRIBUTORE può obbligare l'utente a rifasare l'impianto.

ESEMPIO : **Un impianto utilizzatore presenta le seguenti caratteristiche,**
Potenza contrattuale = P = 20 kW;
Fattore di potenza = 0,72 = cos φ.

Assumendo un funzionamento con la potenza contrattuale per un intervallo di tempo Δt = 450 ore, determinare:

l'energia attiva prelevata;
l'energia reattiva prelevata;
l'energia reattiva addebitata all'utente;
la potenza delle batterie di rifasamento.

SOLUZIONE: Con cos φ = 0,72 corrisponde un angolo φ = 43°,94, e ciò implica una Tg φ = 0,964, e quindi la potenza reattiva dell'impianto vale:

Q = P Tg φ = 20 . 0,964 = 19,28 kVAR.

L'energia reattiva totalmente prelevata, si ottiene come:

Eq = Q Δt = 19,28 . 450 = 8.676 kVARh.

L'energia attiva prelevata sempre nelle 450 ore, è dato da:

Ea = P Δt = 20 . 450 = 9.000 kWh.

Ora l'energia reattiva add4ebitata è pari a metà dell'energia attiva, ossia: Eq' = 1 / 2 Ea = 0,5 . (9.000) = 4.500 kVARh.
Pertanto l'ENERGIA REATTIVA addebitata dall'ENTE FORNITORE è :

(Eq)add. = Eq – Eq' = 8.676 – 4.500 = 4.176 kVARh.

Per RIFASARE l'impianto a cos φ = 0,90, occorre ridurre la Potenza reattiva da Q = 19,38 a Q' = 1 / 2 . P = 20 / 2 = 10 kVAR.
Perciò la batteria di condensatori deve avere una potenza di

rifasamento data da : Qbatt. = Qb = Q – Q’ = (19,28 – 10) = 9,28 kVAR.

Si fa notare che i valori commerciali delle batterie di rifasamento, (batterie trifasi, collegate a triangolo, con tensione nominale 400 V), sono da:

1; 2; 3; 5; 10; 15; 20; 30; 40; 50 kVAR.

Pertanto nel nostro caso impiegheremo la batteria con potenza nominale di 10 kVAR.

In CONCLUSIONE se la potenza attiva P e il fattore di potenza, o cos φ , dell’impianto rimangono costanti nell’intervallo di tempo Δt, per calcolare l’energia reattiva addebitata e la potenza della batteria di RIFASAMENTO, si procede nel modo seguente:

1. Si calcola la potenza reattiva richiesta dell’impianto: Q = P Tg φ.
2. Energia attiva ed energia reattiva prelevate nell’intervallo di tempo Δt:
   E = P Δt, Eq = Q Δt.
3. Se Eq è minore ed uguale a 0,5 E ovvero Q ≤ 0,5 P, non ci sarà alcun addebito di

energia reattiva;

4. Se Q > 0,5 P l’energia reattiva addebitata è (Eq)add = Eq – 1 / 2 P , oppure si può anche considerare la relazione seguente (Eq)add = (Q – 1 / 2 P) . Δt .
5. La potenza delle batterie di rifasamento è data: Qb = Q – 1 / 2 P.

A determinare un basso fattore di potenza sono principalmente i motori asincroni trifasi. Inoltre essendo macchine estremamente diffuse, molto spesso è necessario eseguire il RIFASAMENTO. Assumendo 150 giorni lavorativi per semestre e considerando le 8 ore lavorative giornaliere, l’intervallo di tempo Δt da prendere in considerazione per il calcolo delle potenze attive e reattive è: Δt = 150 . 8 = 1.200 ore
L’ente distributore, infatti, emette le bollette di conguaglio con cadenza semestrale.

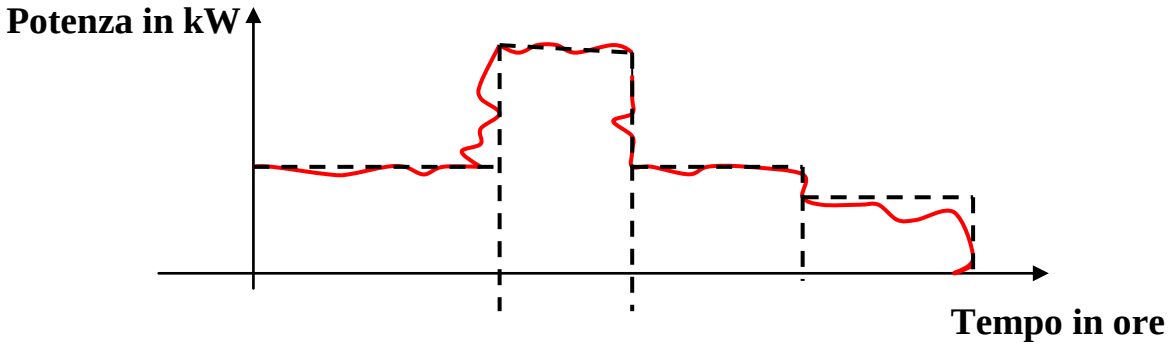
IL DIAGRAMMA DI CARICO

Spesso la potenza attiva e reattiva richieste da un impianto variano nel tempo, in quanto i vari utilizzatori, cioè i motori, le lampade, le saldatrici, i torni, ecc., vengono messi in FUNZIONE secondo le esigenze specifiche del momento, senza alcuna programmazione oraria predefinita.
Il diagramma ottenuto riportando la potenza attiva P richiesta dell’impianto, in funzione delle ore della giornata, si chiama

DIAGRAMMA di CARICO GIORNALIERO.

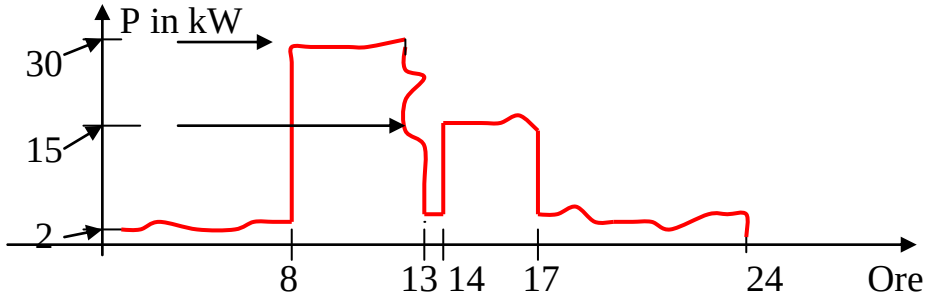
L'area del diagramma di carico relativo ad un determinato periodo di tempo fornisce l'energia prelevata dall'impianto in quel periodo di tempo.

Si consideri il seguente diagramma di carico:



L'area del diagramma di carico, (cioè l'energia attiva prelevata dall'impianto), si può determinare approssimativamente sommando le aree dei rettangoli con cui si suddivide il diagramma stesso.

ESERCIZIO: Un impianto presenta il diagramma di carico di figura:



Il diagramma di carico può essere scomposto in 5 parti:

a) Dalle 0,00 alle ore 8,00 vengono assorbiti 2 kW per 8 ore, e perciò si desume che, E1 = 2 . 8 = 16 kWh;
b) Dalle 8,00 alle 13,00, vengono assorbiti 30 kW per 5 ore, e perciò si desume che, E2 = 30 . 5 = 150 kWh;
c) Dalle 13,00 alle 14,00, vengono assorbiti 2 kW per 1 ora, e perciò si desume che, E2 = 2 . 1 = 2 kWh;
d) Dalle 14,00 alle 17,00, vengono assorbiti 15 kW per 3 ore, e perciò si desume che, E2 = 15 . 3 = 45 kWh;
e) Dalle 17,00 alle 0,00, vengono assorbiti 2 kW per 7 ore, e perciò si desume che, E2 = 2 . 7 = 14 kWh.

In definitiva l'energia complessivamente richiesta giornalmente è data da:
Eg =(16 + 150 + 45 + 14 + 2) kWh = 227 kWh.

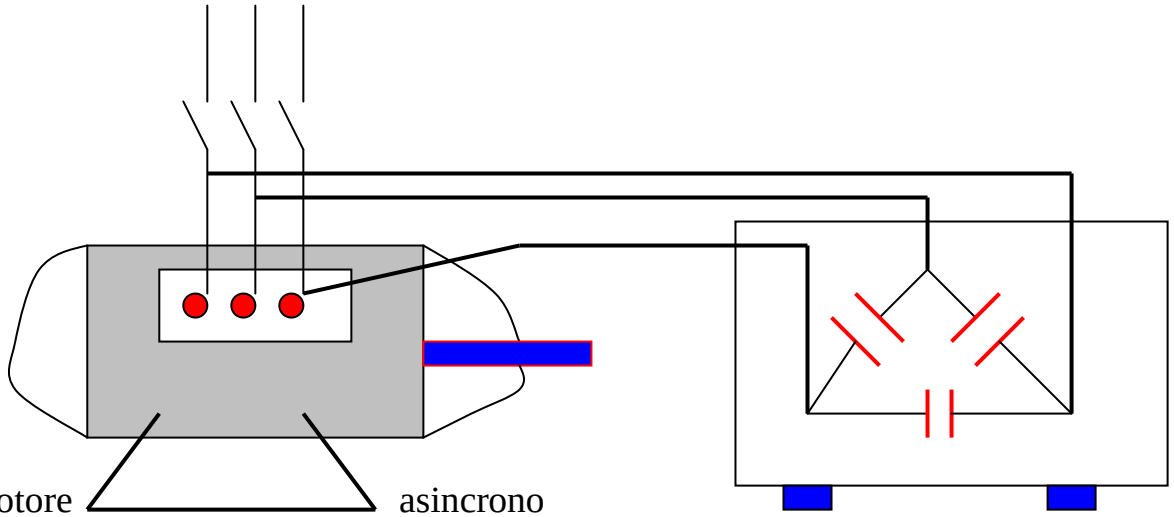
L’energia prelevata in un ANNO, ritenendo l’anno lavorativo costituito da 270 giorni: E annuale = E**anno** = 270 . Eg = 270 . 227 = 61.290 kWh.

TIPI DI RIFASAMENTO

Esistono tre metodi fondamentali per rifasare un impianto:

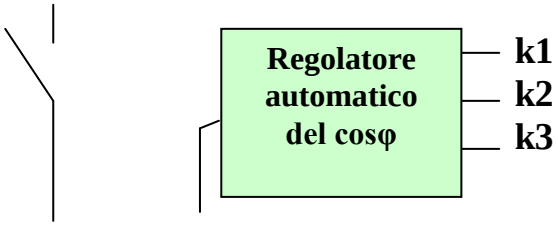
- Rifasamento singolo di ciascun utilizzatore;
- Rifasamento centralizzato con batterie inserite manualmente;
- Rifasamento centralizzato con batterie inserite automaticamente.

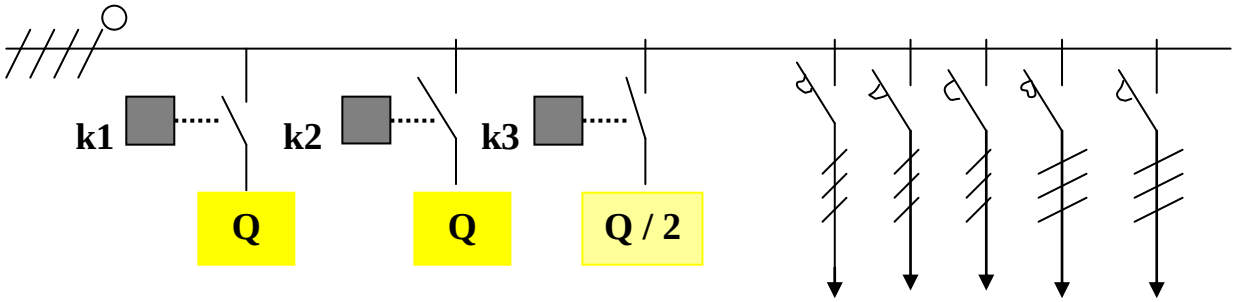
Il rifasamento SINGOLO risulta conveniente se l’impianto è costituito da macchine di media e alta potenza, con coefficiente di contemporaneità prossimo a 1.
Nei casi di impianti costituiti da macchine di piccola e media potenza funzionanti con un coefficiente di contemporaneità inferiore a 1, risulta conveniente il rifasamento centralizzato, con batterie inserite manualmente.
Il rifasamento centralizzato automatico consente di rifasare carichi molto variabili; infatti la presenza di un regolatore rilevando in ogni momento il cos φ, comanda in modo automatico l’inserimento o il disinserimento delle batterie di condensatori da rifasamento, in modo tale che il cos φ sia sempre prossimo a 0,9.



<u>Esempio</u>: rifasamento singolo

Mediane tre batterie di potenza, come in questo schema di riferimento:





è possibile ottenere queste 5 combinazioni di potenza rifasante, ossia questi 5 gradini di rifasamento:

CONTATTORI CHIUSI	POTENZA RIFASANTE INSERITA
K3	**Q / 2**
K2	**Q**
K2 e K3	**1,5 Q**
K1 e K2	**2 Q**
K1, K2, K3	**2,5 Q**

Se ad esempio le tre batterie sono di 50 kVAR; 50 kVAR; 25 kVAR, allora la potenza rifasante può assumere i seguenti 5 valori:
25 kVAR; 50 kVAR; 75 kVAR; 100 kVAR; 125 kVAR.
Le principali caratteristiche delle batterie di rifasamento sono:

1. **la tensione nominale**;
2. **la potenza nominale**;
3. **la classe di temperatura ambiente**;
4. **il collegamento interno**.

La tensione nominale deve essere maggiore di quella dell'impianto in cui le batterie sono installate.
Normalmente le batterie trifasi sono collegate a sistemi a barre o a linee con tensione concatenate 380 V, e questo implica che la tensione nominale vale 400 V, mentre la tensione di effettivo funzionamento è 380 V.
La tensione nominale delle batterie monofasi è 230 V.
La potenza reattiva nominale è il valore della potenza capacitiva espressa in kVAR, relativa alla tensione e alla frequenza nominali. La frequenza nominale corrisponde con quella di RETE, (50 Hz).Indicando con Qn la potenza reattiva nominale, riferita alla tensione nominale Vn e con Q la potenza reattiva della stessa batteria riferita alla tensione effettiva V, si ha: $Q = (V / Vn)^2 Qn$.
Così ad esempio, la potenza reattiva capacitiva effettivamente assorbita, da una batteria trifase, avente caratteristiche nominali: Qn = 30 kVAR, Vn = 400 V,
quando la tensione di alimentazione è 380 V, risulta:

$$Q = (V / Vn)^2 . Qn = (380 / 400)^2 . 30 = 27,07 \text{ kVAR}.$$

La classe di TEMPERATURA AMBIENTE rappresenta l'intervallo di temperatura entro cui sono garantite le caratteristiche delle batterie. Sono previste tre classi:

- classe A, da – 25° a + 40°;

- classe B, da – 10° a + 40°;
- classe C, da – 10° a + 45°.

Il collegamento interno per le batterie trifasi può essere a stella o a triangolo..
Nel collegamento a STELLA, ciascun condensatore è sottoposto alla tensione di fase V0 = 220 V, e pertanto la potenza reattiva capacitiva di ciascun condensatore è:
$Q = V0^2 / Xc$ con Xc reattanza capacitiva, e vale: $1 / 2 \pi f C$ ed espressa in OHM.
La potenza reattiva della batteria espressa in funzione della CAPACITA',
$Qb = 3 V0^2 / Xc = 3 (2 \pi f C) V0^2 = 6 \pi f C V0^2$ e da ciò si desume che:
$C = Qb / 6 \pi f V0^2$, ma tenendo presente che , $V0 = V / \sqrt{3}$ si ottiene in maniera definitiva a, $C = Qb / 6 \pi f (V / \sqrt{3})^2 = Qb / 2 \pi f V^2$. ⟶ 1

Nel collegamento a TRIANGOLO ciascun condensatore è sottoposto alla tensione concatenata V = 380 V, e questo comporta che la potenza reattiva capacitiva di ciascun condensatore è: $Q = V^2 / Xc$ e da ciò ne segue che, la potenza delle batterie $Qb = 3 V^2 / Xc = 6 \pi f C V^2$, e questo implica che,

$C = Qb / 6 \pi f V^2$ ⟶ 2

Dal confronto della 1 con la 2 si deduce che il collegamento a TRIANGOLO consente di utilizzare condensatori di capacità pari ad 1 / 3 rispetto al collegamento a STELLA. Proprio per questo motivo solitamente le batterie sono collegate a triangolo.

ESERCIZIO:

Per una batteria di potenza nominale di 50 kVAR e tensione Nominali di 400 V, inserite in un sistema con tensione concatenata V = 380 Volt, la potenza effettivamente assorbita è:

$Qb = (V / Vn)^2 Qn = (380 / 400)^2 . 50 = 45,12$ kVAR.

Se la batteria è collegata a stella la capacità risulta:
$C = (Qb / 2 \pi f V^2) = 45.120 / 2 \pi 50 (380)^2 = 0,001$ F = 1 mF = 1.000 µF.

Se la batteria è collegata a triangolo si avrà che:
$C = (Qb / 6 \pi f V^2) = 45.120 / 6 \pi 50 (380)^2 = 0,00033$ F = 330 µF.

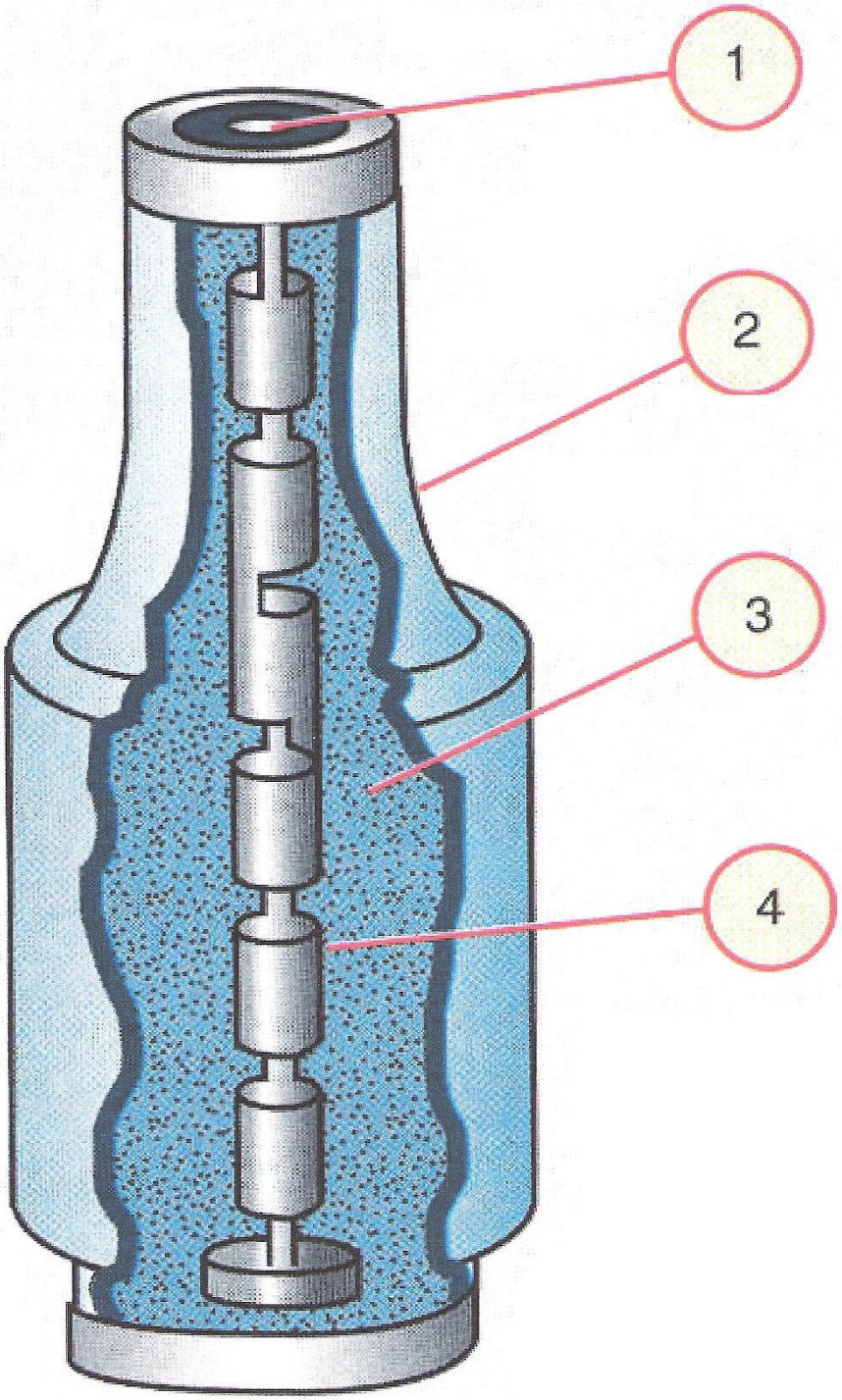
Importante

Inoltre, visto che un condensatore, tolto dalla sua tensione di alimentazione, conserva la carica, costituendo un pericolo per le persone, le NORME impongono la realizzazione del circuito di scarica.

Siamo giunti alla fine di questo percorso legato agli impianti elettrici. I miei appunti non hanno la presunzione e la pretesa di essere completi, (infatti rimando a testi più completi e specializzati per ulteriori informazioni), ma di assicurare gli studenti su quello che sarà il percorso da Me seguito durante, l'anno scolastico.
Mi riservo la possibilità di aggiornare e perfezionare gli appunti stessi.
Ringrazio gli allievi che usufruiranno di questi appunti e che Mi segnaleranno gli eventuali errori ed incomprensioni.
Nell'appendice verranno inserite alcune informazioni relative ai fusibili, ossia le parti fondamentali e le forme tipiche dei fusibili applicati ai motori elettrici e l'energia passante, nei fusibili, in relazione alla corrente di prova; esercizi relativi al rifasamento ed alcune considerazioni di illuminotecnica ed un esercizio sulla ricerca della potenza di una centrale idroelettrica.
Grazie alle documentazioni della BTicino inserirò un estratto dei segni grafici che rispondono alla normativa CEI. Infine, inserirò alcuni temi d'esame, relativi agli impianti, completamente risolti. Le curve di intervento degli interruttori magnetotermici.

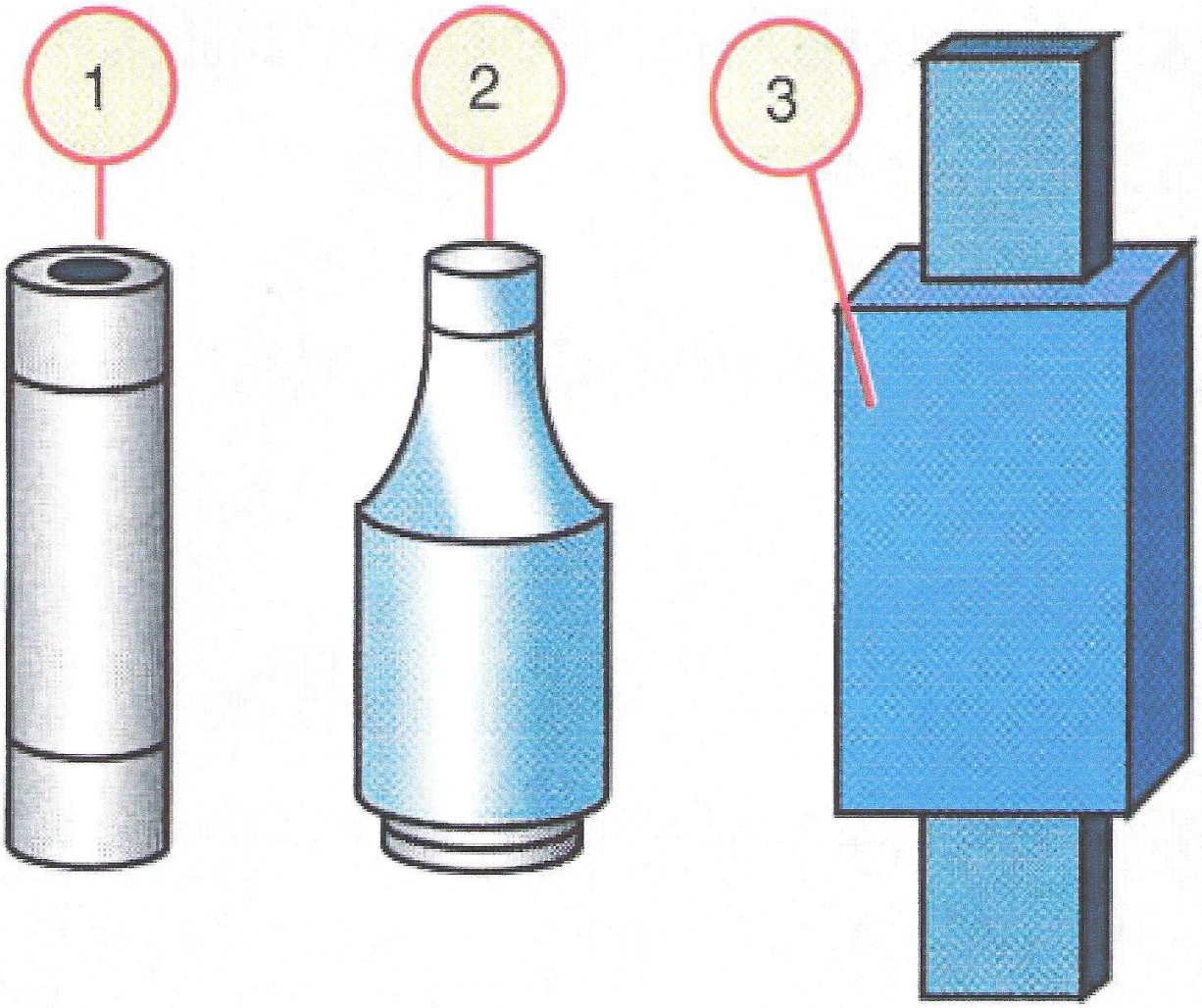
Segue dalla pagina successiva gli APPENDICI sopra indicati.

Parti fondamentali di un fusibile



1 Dispositivo di segnalazione dell'intervento
2 Corpo ceramico
3 Sabbia di quarzo spegniarco
4 Fusibile a lamina o a filo

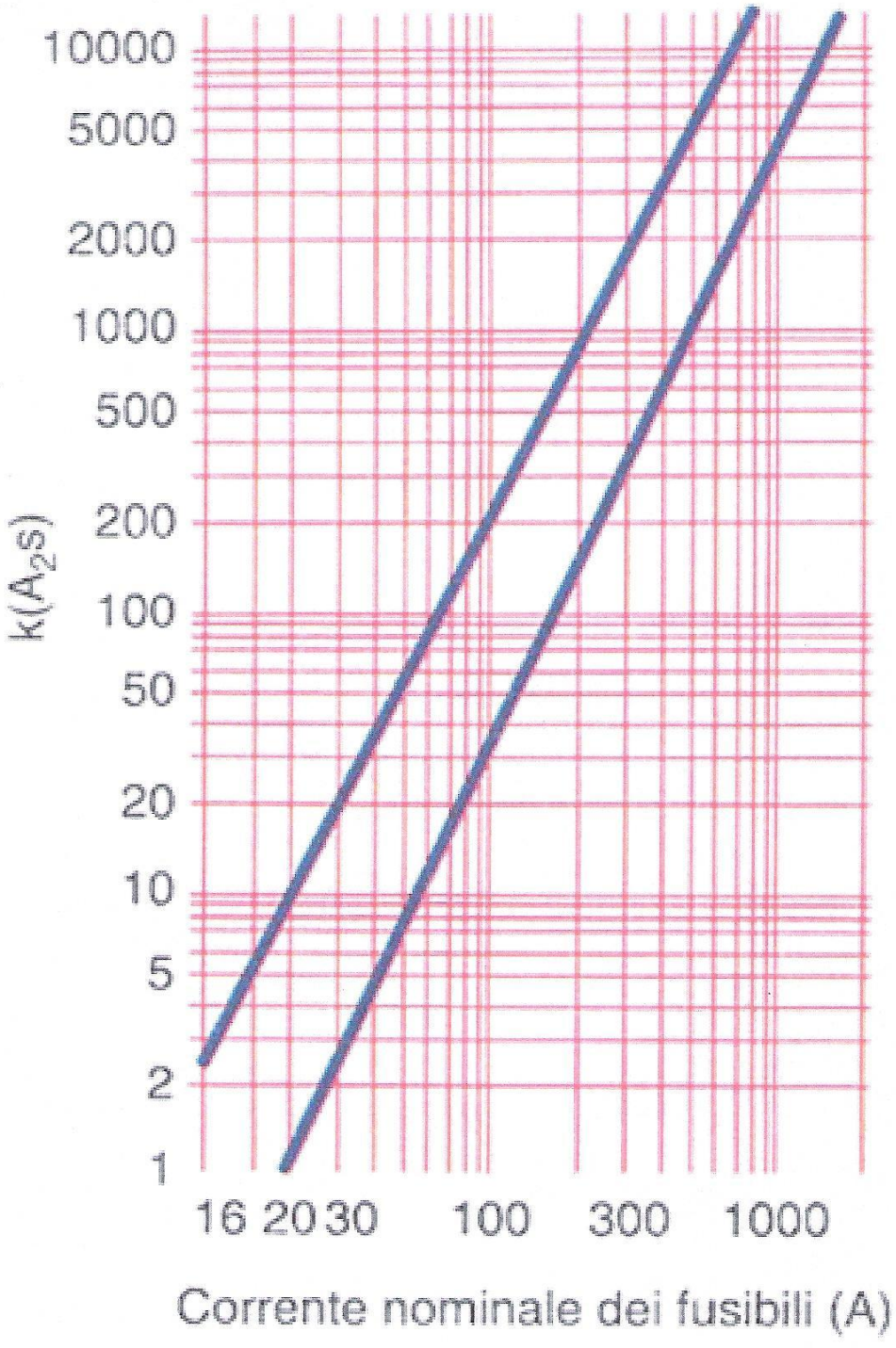
Le tre forme tipiche dei fusibili aM



1 Cilindrici fino a 125 A in quattro grandezze
2 Cilindrici rastremati fino a 125 A (Diazed)
3 A coltello fino a 1250 A in sei grandezze (NH)

Energia specifica passante alla corrente di prova "r"

(Valori indicativi)

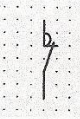
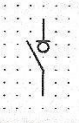
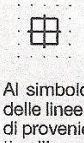


bticino®

Estratto di segni grafici dalle norme CEI

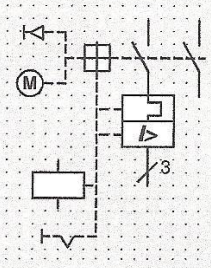
CEI 3-15

Apparecchi di manovra e comando

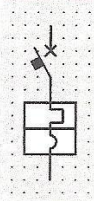
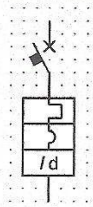
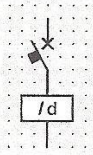
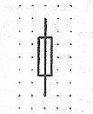
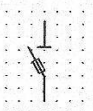
Segno grafico	Descrizione
	Contattore Contatto di chiusura principale (contatto aperto in condizione di riposo)
	Contattore ad apertura automatica, determinata da un relé o sganciatore di misura incorporato
	Contattore Contatto di apertura principale (contatto chiuso in condizione di riposo)
	Interruttore (di potenza)
	Sezionatore
	Interruttore di manovra-sezionatore
	Meccanismo ad apertura libera.

Al simbolo devono pervenire perpendicolarmente delle linee tratteggiate che rappresentano i comandi provenienti dai vari dispositivi meccanici presenti nell'apparecchiatura

Esempio
Apparecchio meccanico di interruzione, tripolare, motorizzato o manuale con meccanismo di apertura libera e:
- sganciatore termico di sovraccarico
- sganciatore di massima corrente
- attuatore manuale con dispositivo di mantenimento
- bobina di apertura remota
- un contatto ausiliario di chiusura e uno d'apertura



Apparecchi di manovra e comando

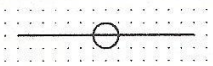
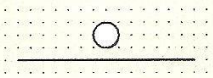
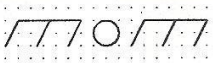
Segno grafico	Descrizione
	Interruttore unipolare di potenza automatico, magnetotermico
	Interruttore unipolare di potenza automatico, magnetotermico con differenziale
	Interruttore unipolare di potenza automatico, con differenziale
	Fusibile
	Interruttore di manovra con fusibile incorporato
	Sezionatore con fusibile incorporato

bticino®

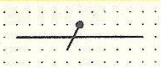
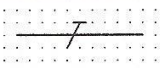
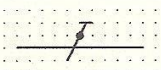
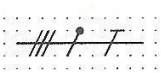
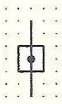
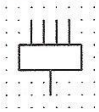
Estratto di segni grafici dalle norme CEI

CEI 3-23

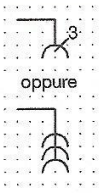
Esempi di linee

Segno grafico	Descrizione
	Linea sotterranea
	Linea aerea
	Linea in canalizzazione
	Tubo protettivo incassato (simbolo non unificato)

Identificazione di conduttori

Segno grafico	Descrizione
	Conduttore di neutro
	Conduttore di protezione
	Conduttore di neutro avente anche funzione di conduttore di protezione
	Conduttore trifase con conduttore di neutro e conduttore di protezione
	Scatola, cassetta segno grafico generale
	Scatola o cassetta di connessione o di derivazione
	Cassetta di allacciamento d'utente (il segno è rappresentato con la conduttura)
	Quadro di distribuzione (il segno è rappresentato con cinque condutture)

Prese a spina

Segno grafico	Descrizione
	Presa Segno grafico generale
	Presa multipla il segno è rappresentato con tre uscite oppure
	Presa con contatto per conduttore di protezione
	Presa con schermo interno
	Presa con interruttore unipolare
	Presa con interruttore unipolare interbloccato
	Presa con trasformatore d'isolamento Presa rasoio
	Presa per telecomunicazione Il simbolo può essere completato da sigle IEC/ISO quali: TP = telefono FX = fax M = microfono = altoparlante FM = modulazione di frequenza TV = televisione

ESERCIZIO: **Si voglia determinare la potenza di un impianto idroelettrico, con un salto H = 250 m, Qv = 25 m^3 / s = portata volumetrica, ed η= 0,84.**

Ricordando che $P = \gamma \eta Q H = 9,81 . 10^3 . 250. 25 . 0,84 = 51,5$ kW.

DOMANDA: Quali sono le caratteristiche fondamentali delle TURBINE?

RISPOSTA: Le caratteristiche delle turbine sono legate al numero di giri , al salto, al grado di reazione. Si indica pertanto con nc = numero caratteristico delle turbine, ed è definito come: $nc = n \sqrt{P} = H \sqrt{H}$, dove n = numero di giri di rotazione della turbina in giri al minuto:

TIPO	nc	SALTO in metri	Grado di reazione
PELTON	20 ÷ 60	300 ÷ 2000	0
FRANCIS lenta	50 ÷ 60	100 ÷ 600	0,3 ÷ 0,4
FRANCIS normale	85 ÷ 130	50 ÷ 200	0,4 ÷ 0,5
FRANCIS veloce	350 ÷ 600	10 ÷ 100	0,5 ÷ 0,6
ELICA	350 ÷ 600	1 ÷ 30	0,7 ÷ 0,8
KAPLAN	350 ÷ 1000	1 ÷ 30	0,7 ÷ 0,8

ILLUMINAZIONE (cenno)

L'impiego dell'energia elettrica per l'illuminazione di ambienti interni ed esterni, rappresenta una delle principali utilizzazioni.
I relativi impianti rientrano generalmente in quelli utilizzatori a BASSA TENSIONE.
Introduciamo le principali grandezze fotometriche:
DEF. La LUCE è l'effetto di una particolare forma di energia, detta RADIANTE, emessa per irraggiamento, da una sorgente. Tale energia radiante è in grado di propagarsi nel vuoto.

La velocità di propagazione si esprime come: $v = \lambda f$, con λ lunghezza d'onda, f frequenza e con v velocità di propagazione.
Nel vuoto la velocità di propagazione è v = c, velocità della luce, che corrisponde a 2,998 . 10 elevato a 8.
Inoltre la LUCE è una forma di energia che si trasmette mediante radiazione elettromagnetiche, con lunghezze d'onda comprese fra 0,380 μm e 0,780 μm, e perciò le corrispondenti frequenze di trasmissione corrispondono a:

$f1 = c / \lambda 1 = 2,998 . 10 / 0,380 . 10 = 7,89\ 10$ Hz;

$f2 = c / \lambda 2 = = 2,998 . 10 / 0,780 . 10 = 3,84 . 10$ Hz.

DEF. Il flusso luminoso totale ϕ rappresenta la quantità di energia luminosa emessa nell'unità di tempo. Essa si esprime in Watt.

DEF. Il LUMEN corrisponde alla quantità di luce prodotta in un secondo dalla radiazione di lunghezza d'onda 0,555 μm e potenza 1 / 680 Watt.

DEF. Per ILLUMINAMENTO si intende il flusso luminoso per unità di superficie, o densità di flusso. La sua unità di misura è il Lux, dove il Lux, corrisponde a: 1 Lux = 1 Lm / 1 m^2.

CARATTERISTICHE DELLE LAMPADE

POTENZA ELETTRICA;

FLUSSO LUMINOSA;

EFFICIENZA LUMINOSA, dato come rapporto tra flusso e potenza luminosa, ossia, $\eta = \phi / P$;

DURATA, in riferimento alla vita media della lampada;

TENSIONE NOMINALE;

INDICE di RESA dei COLORI o IRC, che è la proprietà della sorgente luminosa di NON alterare la superficie illuminata rispetto ad una sorgente campione.

I tipi di lampada con impiego per esterno o per interno è la seguente:

LAMPADE ad INCANDESCENZA;
LAMPADE a SCARICA NEI GAS;
LAMPADE FLUORESCENTI;
LAMPADE ai VAPORI DI MERCURIO ad ALTA E MEDIA PRESSIONE;
LAMPADE ai VAPORI DI SODIO.

ESERCIZIO: RIFASAMENTO DI UNA SINGOLA MACCHINA TRIFASE

Si supponga di dovere rifasare una macchina asincrona trifase, avente i seguenti dati di targa: Potenza 25 kW;
Tensione 380 V;
Frequenza nominale = 50 Hz;
Fattore di potenza nominale = cos φ = 0,83;
Rendimento = η= 0,90.

Soluzione : Non conoscendo la curva di carico del motore si suppone pari a 1 il fattore di utilizzazione, per cui la potenza assorbita è data come,
Pa = Pn / η= 25.000 / 0,90 = 27,8 kW.

Il fattore di potenza iniziale è = cos φ = 0,83, e con Tg φ = 0,672.
Dovendo rifasare in modo tale da avere un cos φr ≥ 0,9 allora ciò comporta che la Tg φr = 0,484.
La potenza capacitiva del condensatore di rifasamento vale:
Qc = Pa (Tg φ - Tg φr) = 27,8 (0,672 – 0,484) = 5,23 kVAR.
Dalle tabelle fornite dal manuale, si osserva che dal punto di vista commerciale quello che si avvicina di più è: Qcn = 5 kVAR, 400 V, con corrente nominale di 7 A.
La batteria sarà costituita da 3 condensatori, collegati a TRIANGOLO di capacità:

$$C_{\Delta} = Qcn / 3.\ 2.\ \pi.\ f.\ Vn^2 = = 5.000 / 6\ .\ \pi.\ 50\ .\ (\ 400\ )^{\ 2} = 33\ \mu F.$$

Alla potenza di 380 V, la potenza reattiva capacitiva è data come:
$Qc = 3.\ 2.\ \pi.\ f.\ C_{\Delta}\ .\ f.\ V^2 = 6\ .\ \pi.\ 50.\ 33.\ 10\ \ .\ 380^2 = 4{,}49$ kVAR, e da ciò si ottiene che: Qc = Pa (Tg φ - Tg φr) , ⇨ Tg φ - Tg φr = Qc / Pa,

Tg φr = Tg φ - Qc / Pa = 0,672 – (4,49 . 10^3 / 27,8. 10^3) = 0,51 e da ciò si ottiene, Tg φr = 0,51, e da ciò si desume che l'angolo di rifasamento vale,
φr = 27° circa.

ESERCIZIO: CASO CON PIU' MACCHINE ASINCRONE

Si voglia rifasare, con un'unica batteria di condensatori un gruppo di macchine asincrone trifasi con tensione nominale Vn = 380 V; frequenza nominale di 50 Hz, composta da.

- 4 motori da 15 kW, con cos φ = 0,82; η = 0,85; Ku1 = 0,8; Kc1 = 0,8;
- 10 motori da 2,2 kW, con cos φ = 0,74; η = 0,78; Ku2 = 0,7; Kc2 = 0,6.

SOLUZIONE:

La potenza totale attiva mediamente assorbita da questo insieme di macchine è dato come: $P_t = N1(P1 /\eta 1) Ku1\ Kc1 + N2(P2 /\eta 2) Ku2\ Kc2 =$

$= 4. (15 / 0,85) .0,8 . 0,8 + 10 (2,2 / 0,78) . 0,7. 0,6 = 57$ kW.

La potenza reattiva assorbita a pieno carico da un motore del primo gruppo è dato come: $Q1 = P1 /\eta 1 . Tg\ \varphi 1 = (15 / 0,85)\ Tg(\cos^{-1}0,82) = 12,3$ kVAR.
La potenza reattiva assorbita a pieno carico da un motore del secondo gruppo è dato come: $Q2 = P1 /\eta 2 . Tg\ \varphi 2 = (2,2 / 0,78)\ Tg(\cos^{-1} 0,74) = 2,6$ kVAR.

La potenza reattiva media assorbita dai due gruppi:

$$Qf = N1\ Q1\ kc1\ Ku1 + N2\ Q2\ kc2\ Ku2 =$$

$$= 4. 12,3. 0,8 . 0,8 + 10. 2,2. 2,6. 0,7. 0,6 = 42,3 \text{ kVAR}.$$

Il fattore di POTENZA globale si ottiene dalla relazione seguente:
$Tg\ \varphi t = = Qt / Pt = 42,3 / 57 = 0,741$, da cui si ottiene $\cos \varphi t = 0,803 = \cos \varphi 0$.
Ponendo un $\cos \varphi r$ = fattore di rifasamento = 0,93, ciò comporta $Tg\ \varphi r = 0,395$, e perciò si desume pure che,

$$Qc = Pt (Tg\ \varphi 0 + Tg\ \varphi r) = 57. (0,741 – 0,395) = 19,7 \text{ kVAR}.$$

Dalle tabelle si sceglie la batteria di potenza più vicina, che è quella di 20 kVAR, e con Vn = 400 Volt, e corrente nominale = Inc = 29 A.
Inoltre si deve ammettere che la tensione effettiva è quella a 380 Volt:

$$Qc = Qcn (380 / 400)^2 = 20 (380 / 400)^2 = 18,05 \text{ kVAR}.$$

Si deve tenere presente che la batteria di condensatori, dovrà essere inserita in un proprio circuito di SCARICA, se la batteria stessa non è già munita della resistenza di scarica stessa.
Per il CALCOLO della RESISTENZA di SCARICA è necessario considerare la relazione che, fissato il tempo di scarica, la tensione residua v e la tensione nominale, ci consente di calcolare la COSTANTE di TEMPO o di SCARICA τ.
La formula in questione è la seguente:

$$\mathbf{\tau = t / \ln (\sqrt{2}\ Vn / v)}.$$

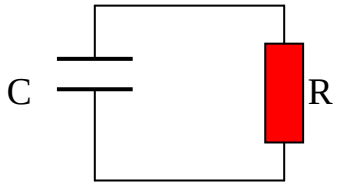
Per una tensione Vn = 220 V	**Per tensione RESIDUA $v \leq 50$ Volt.**	**TEMPO SCARICA $\tau = 60$ s.**
Per una tensione Vn = 380 V	**Per tensione RESIDUA $v \leq 50$ Volt.**	**TEMPO SCARICA $\tau = 60$ s.**

Nel nostro caso sarà : $\tau = 60 / \ln (\sqrt{2}\ 380 / 50) = 60 / 2,374 = 25,3$ s.
Per avere un certo margine di sicurezza si può considerare una τ di 15 secondi.
La capacità di ogni condensatore, nell'ipotesi di collegamento a triangolo:

$$C_\Delta = Qcn / 3. 2. \pi. f. Vn^2 = = 20.000 / 6 . \pi. 50 . (400)^2 = 132,6\ \mu F .$$

Si deve ora stabilire il tipo di collegamento delle resistenze con questo gruppo di condensatori.
Proprio per questo faremo alcune considerazioni.

1) Nel caso di rifasamento con un singolo condensatore monofase, il circuito di scarica è rappresentato da una singola resistenza,



da ciò si desume che, $\tau = RC$ e $R = \tau / C$.
Perciò se fosse $\tau = 30$ s e $C = 50\ \mu F$ si ricaverebbe $R = \tau / C = 30 / 50.\ 10^{-6} =$
$R = 0{,}6\ .\ 10^{6} = 600\ k\Omega$.

2) Nel caso di collegamento dei condensatori a stella e i resistori a stella, oppure i condensatori a triangolo e resistori a triangolo:

fig. A

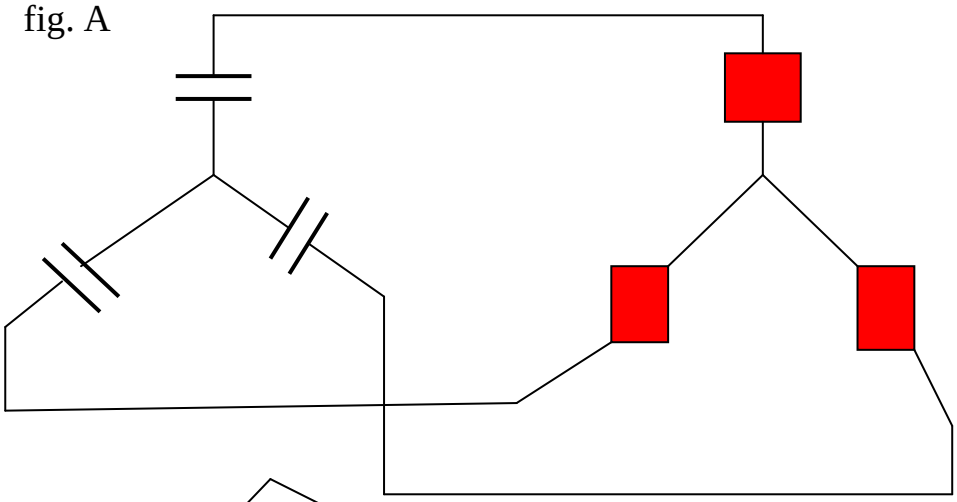
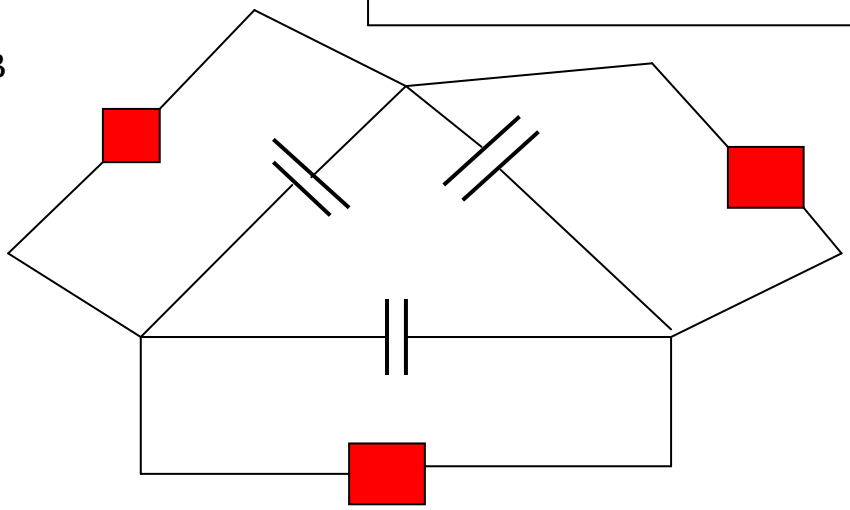
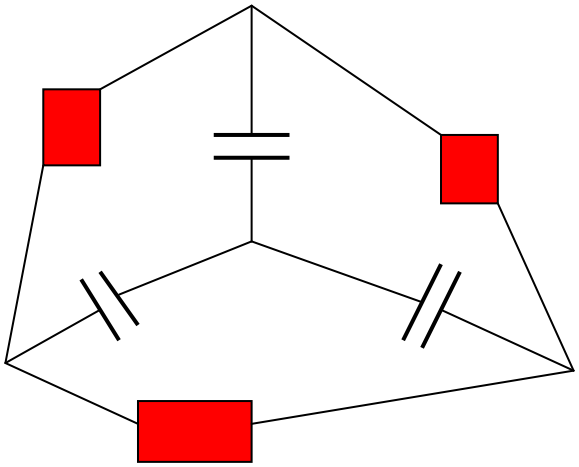


Fig. B



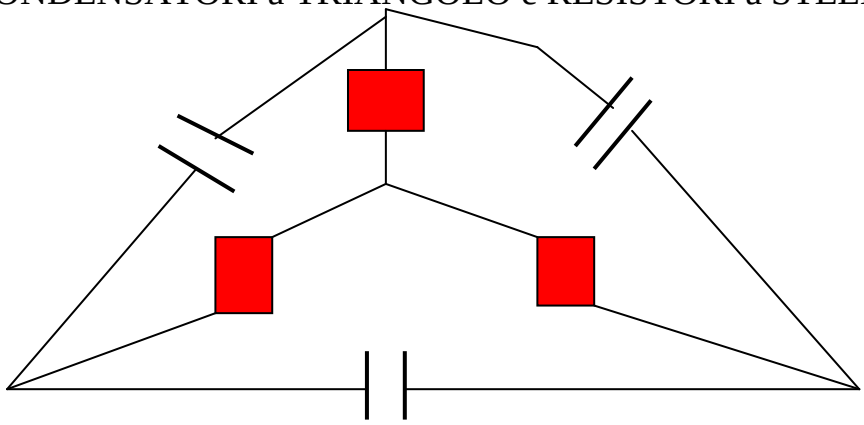
In ambedue i casi i tre circuiti di scarica si possono considerare indipendenti, perché ogni condensatore vede soltanto una resistenza R e $\tau = RC$ e $R = \tau / C$.

3) Nel caso in cui i condensatori sono collegati a STELLA, e i resistori a TRIANGOLO, si ricava che: (vedi pagina successiva)



Trasformando il triangolo nella STELLA EQUIVALENTE, la RESISTENZA diventa R / 3 e ciò comporta che: $\tau = (R / 3)C$ e perciò $R = 3\,\tau / C$.

4) CONDENSATORI a TRIANGOLO e RESISTORI a STELLA:



Trasformando la STELLA nel TRIANGOLO EQUIVALENTE, da ciò si ottiene che: $Req = 3\,R$ e perciò $\tau = 3\,RC$ e così $R = \tau / 3C$.
Infine per la scelta della corrente nominale del dispositivo di manovra per l'inserzione e la disinserzione della batteria di condensatori, occorre riferirsi alla corrente di linea assorbita dalla batteria di condensatori in servizio continuativo, calcolata secondo le seguenti relazioni:

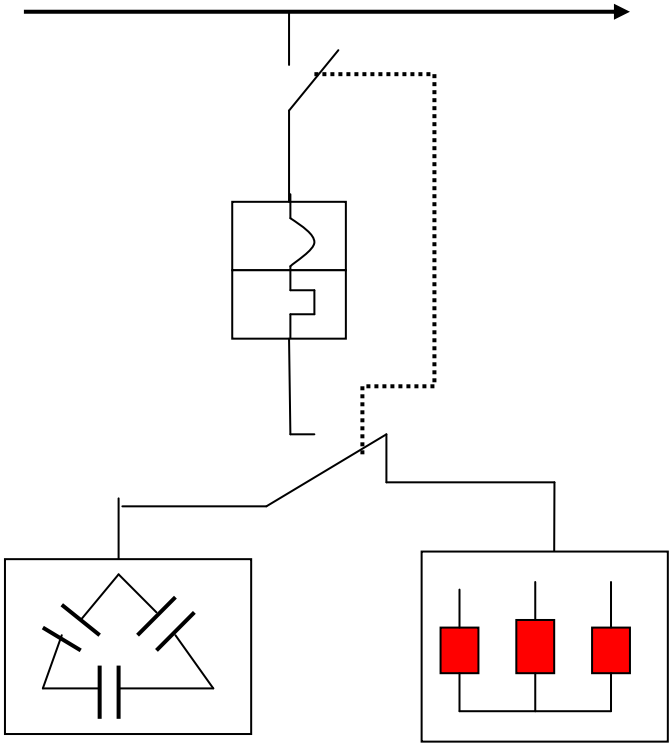
a) $Inc = 2.\,\pi.\,f.\,C\,Vn$ se il gruppo è MONOFASE;
b) $Inc = 2.\,\pi.\,f.\,Cy.\,Vn / \sqrt{3}$ se il gruppo è TRIFASE a STELLA;
c) $Inc = \sqrt{3}.\,2.\,\pi.\,f.\,C_{\Delta}.\,Vn$ se il gruppo è TRIFASE a TRIANGOLO, dove Vn è la tensione concatenata NOMINALE, Cy e C_{Δ} sono le capacità in serie ed in parallelo, che si possono calcolare dalle relazioni seguenti:

$Cy = Qc / 2.\,\pi.\,f.\,V^2$ e $C_{\Delta} = Qc / 3.\,2.\,\pi.\,f.\,V^2 = Cy / 3$, da ciò si desume che, $Cy = 3\,C_{\Delta}$.

SCEGLIENDO nel nostro caso tre RESISTENZE collegate a STELLA e i tre CONDENSATORI collegati a TRIANGOLO, ottenendo così:

$$R = \tau / 3\, C_{\Delta} = 15 / 3.\ 132{,}6\ .\ 10 = 37{,}7\ k\Omega.$$

Detto GRUPPO dovrà essere protetto con un interruttore magnetotermico e commutatore per il distacco dalla RETE.



La corrente NOMINALE dell'interruttore si sceglie tenendo conto che:

$In = (1{,}5 \div 2)\ Inc$, con Inc nel nostro caso pari a 29 A, e perciò si ricava che,

$$43{,}5 \leq In \leq 58\ A.$$

Si può scegliere In = 50 A con sganciatore magnetico tarato a Inc = 10 x 29 = 290 A.

CONSIDERAZIONI SUI QUADRI : come risposta ad eventuali domande

Un quadro elettrico è un componente dell'impianto costituito dall'insieme di un involucro, dalle varie apparecchiature di protezione, manovra, comando, regolazione e di misura in esso contenuti.

Nelle prove **TIPO** dei quadri elettrici si eseguono le seguenti verifiche:

limiti di SOVRATEMPERATURA;
TENUTA alla tensione applicata;
TENUTA di CORTO CIRCUITO;
EFFICIENZA del circuito di protezione;
DISTANZA in ARIA e SUPERFICIALI;
FUNZIONAMENTO meccanico;
GRADO di PROTEZIONE.

I **QUADRI di COMANDO E DI REGOLAZIONE** contengono tutti gli apparecchi, contattori, relé , ecc., necessari per il funzionamento di una UNITA' OPERATRICE; esempio quadro di una macchina utensile.

I **QUADRI di DISTRIBUZIONE** contengono prevalentemente INTERRUTTORI, e hanno la funzione di smistare l'ALIMENTAZIONE elettrica da una linea in arrivo a più linee in partenza. A seconda della potenza si va dai piccoli quadri a quadri di elevata potenza, o i cosiddetti POWER CENTER.

Il **SEZIONAMENTO è la MANOVRA** che serve a mettere FUORI TENSIONE un impianto o una sua parte, per garantire la sicurezza delle persone che devono operare su parti attive o in vicinanza di esse. Esso è anche detto " INTERRUTTORE per MOTIVI ELETTRICI ".

Tema di impianti assegnato dal ministero, come seconda prova , all'esame di Stato per i TECNICI DELL'INDUSTRIA ELETTRICA.

Da un quadro elettrico di distribuzione in B T, ubicato in un capannone industriale, partono tre linee di alimentazione: due trifasi ed una monofase.

La prima linea trifase è lunga 50 m ed alimenta a 380 V due trapani mossi da motori asincroni che assorbono una potenza di 2,2 kW ciascuno, con cosφ = 0,8 e fattori di contemporaneità pari a 0,6.

La seconda linea trifase è lunga 100 m ed alimenta una macchina utensile mossa da un motore asincrono di 4 kW con cosφ = 0,75 e fattore di contemporaneità pari a 0,7 .

La terza linea è lunga 115 m ed alimenta un carico luce che assorbe una potenza di 5 kW a cosφ = 1 e fattore di contemporaneità pari a 0,8.

Il candidato giustificando le proprie valutazioni e formulando, se necessario, le opportune ipotesi aggiuntive:

1. tracci lo schema del quadro di distribuzione generale, completo delle protezioni, illustrando i criteri seguiti nella scelta delle apparecchiature;

2. calcoli la sezione delle linee in modo che l'eventuale caduta di tensione sia nei limiti stabiliti dalla Normativa;

3. determini la caratteristiche della batteria o delle batterie di condensatori per rifasare a cosφ = 0,9;

4. determini le caratteristiche dell'impianto di terra.

SOLUZIONE

Il quadro generale è costituito da un interruttore automatico magnetotermico differenziale **tetrapolare**.
Sulle diramazioni sono presenti interruttori automatici tripolare ed unipolari.
Il dimensionamento dei cavi e la scelta degli interruttori automatici sono effettuati nel rispetto delle Norme CEI 64 – 8, in modo tale da garantire la protezione e la selettività. Inoltre, verificherò la caduta di tensione nei limiti imposti dalle Norme, il cui valore è 4%.

LINEA a

La linea **a** è la linea trifase di 50 m, che alimenta due carichi di 2,2 kW, ciascuno con cosφ = 0,8 e Kc = 0,6. Ammettendo un coefficiente di utilizzazione Ku = 0,8 si ottiene: Pa = N . P . Ku . Kc = 2 . 2,2 . 0,6 . 0,8 = circa = **2,1 kW**.

La corrente di impiego fittizia **Iba'** si ottiene da:

Iba' = Pa / √3 V cosφ = 2100 / (√3 . 380 . 0,8) = circa = 4 A.

La corrente di impiego $\mathbf{I_Ba}$ della linea **a** la si può ottenere prevedendo un 20% della corrente di impiego fittizia **Iba'**, (in altri termini è come se si prevedesse una maggiorazione del 20% sul risultato ottenuto precedentemente), per consentire un minimo grado di tolleranza nell'ipotesi di eventuali allacciamenti futuri:

$$\mathbf{I_Ba = 1,2\ Iba' = 1,2 \cdot 4 = 4,8\ A}$$

Nell'ipotesi di impiegare cavi in PVC, senza guaina posati in un tubo a temperatura ambiente Ta = 30 °C, dalle tabelle del manuale, ritenendo inoltre che i conduttori caricati siano 3 e che il circuito sia unico, si desume la corrente di portata del cavo **Iz**, dove **Iza =corrente di portata della linea a = 15,5 A** con sezione **Sa = 1,5 mm²**.

Verifico la caduta di tensione di questa linea di 50m di lunghezza. Dalla tabella si verifica che per un cavo trifase con sezione di 1,5 mm² con cosφ = 0,8 si desume un K' = 20,7 mV / A m e da ciò si ricava:

$$\mathbf{\Delta Va = K'\ La\ I_Ba = 20,7 \cdot 50 \cdot 4,8 \cdot 10^{-3} = circa = 5\ V}.$$

Tenendo presente che la caduta di tensione ammissibile, ΔVam, è ottenuta dal 4% della tensione di alimentazione V = 380 V, ossia:

$$\mathbf{\Delta Vam = 4\% \cdot 380 = 4 \cdot 380 / 100 = 15,2\ V}.$$

Pertanto visto che si verifica la condizione che **ΔVa < ΔVam**, **(5 < 15,2)**, la caduta di tensione della linea **a** soddisfa le condizioni imposte dalle Norme.
Per la scelta dell'interruttore automatico deve essere soddisfatta la relazione seguente: $\mathbf{I_Ba \le Ina \le Iza}$, in altri termini l'interruttore magnetotermico deve avere una corrente nominale di funzionamento compresa fra la corrente di impiego della linea e la sua corrente di portata. Nel nostro caso dovrà quindi risultare: **4,8 ≤ Ina ≤ 15,5** in **A**.

Dal punto di vista commerciale esiste un dispositivo o un interruttore con corrente nominale di **10 A**, che soddisfa la relazione poco sopra indicata. In particolare si assume un interruttore magnetotermico con corrente nominale **Ina =** 10 A, con caratteristica di tipo D, adatto per i motori, con potere di interruzione di **4,5 kA** e corrente differenziale $\mathbf{I_{\Delta}a = 0,1\ A}$.

LINEA b

Consideriamo ora la linea **b**, avente una lunghezza di 100 m che alimenta una macchina utensile di 4 kW, con cosφ = 0,75 e Kc = 0,7. Essendo il carico unico posso ammettere un coefficiente di utilizzazione Ku = 1. In base a ciò si ottiene, utilizzando la relazione, sotto riportata:

Pb = P . Ku . Kc / η = (ritenendo che la macchina abbia un rendimento **η = 0,82) = = 4 . 1 . 0,7 / 0,82 = circa = 3,41 kW**.

La corrente di impiego della linea **b**, la si ottiene dalla relazione seguente:

$$\mathbf{I_Bb = Pb / \sqrt{3}\ V\ cos\varphi = 3410 / (\sqrt{3} . 380 . 0,75) = circa = 6,9\ A.}$$

Verifico la caduta di tensione di questa linea di 100m di lunghezza, con un ragionamento analogo a quello svolto per la linea **a**. Dalla tabella si verifica che per un cavo trifase con sezione di 1,5 mm² con cosφ = 0,8 si desume un
K' = 20,7 mV / A m e da ciò si ricava:

$$\mathbf{\Delta Vb = K'\ Lb\ I_Bb = 20,7 . 100 . 6,9 . 10^{-3} = circa = 14,3\ V}, \text{ ma}$$

Anche in questo caso la caduta di tensione, essendo 14,3 < 15, rispetta le indicazioni delle Norme.
Anche in questo caso la corrente di portata del cavo **Iz**, vale **Izb =corrente di portata della linea b = 15,5 A** con sezione **Sb = 1,5 mm²**.
Per la scelta dell'interruttore automatico deve essere soddisfatta la relazione

$$\mathbf{I_Bb \le Inb \le Izb}, \text{ ossia in questo caso deve risultare,}$$

6,9 ≤ Inb ≤ 15,5 in **A**, ed anche in questo caso
l'interruttore commerciale deve avere una corrente nominale di funzionamento di 10°. In definitiva è possibile assumere un interruttore magnetotermico con una corrente nominale **Inb = 10 A**, con curva caratteristica D, adatto per i motori, con potere di interruzione di **4,5 kA** ed $\mathbf{I_{\Delta}n = 0,1\ A}$.

LINEA monofase o LINEA c

Infine analizziamo la linea monofase, di conseguenza Vlinea = V / √3 = **220 V**, che indicherò per comodità come linea **c**. Si tratta di una linea con lunghezza di 115 m, monofase, che alimenta un carico luce, con potenza di 5 kW a cosφ = 1, con
Kc = 0,8. In questo caso scelgo un Ku = 1.
In base a quanto indicato posso ottenere la potenza messa in gioco nella linea **c,** o **Pc**: **Pc = P Ku Kc = 5 . 0,8 . 1 = 4 kW** e da ciò posso dedurre una corrente di impiego, data dalla relazione seguente:

$$\mathbf{I_Bc = P / Vlinea\ cos\varphi = 4000 / (220 . 1) = circa = 18,2\ A}.$$ Ammettendo un criterio di scelta analogo a quello delle linee **a** e **b**, allora per un cavo in PVC con

I_Bc = 18,2 A, dalle tabelle è possibile considerare un conduttore con corrente di portata **Izc = 28 A**, con una sezione **Sc = 4 mm²** e questo implica che:

I_Bc ≤ Inc ≤ Izc, ossia deve risultare che, **18,2 ≤ Inc ≤ 28**. Dal punto di vista commerciale esiste un interruttore magnetotermico con corrente nominale di **25 A**, assumo allora un interruttore di questo tipo, perciò risulterà **Inc = 25 A**.

Per quanto riguarda la caduta di tensione, in questo caso, dal manuale si ricava che:

K' = 11,1 mV / A m e da ciò ne segue che,

$$\Delta Vc = K' \, Lc \, I_Bc = 11,1 \cdot 115 \cdot 18,2 \cdot 10^{-3} = \text{circa} = 23,23 \text{ V}.$$

In questo caso non è verificata secondo le Norme la relazione **ΔV < ΔVam**; infatti in questo caso si ha che **23,23 > 15,2**, proprio per questa ragione consideriamo, per il cavo della linea monofase **c**, la sezione immediatamente superiore a quella di **4 mm²**. La sezione allora da considerare è la sezione **Sc = 6 mm²**. In relazione a questa sezione si ha che, **Izc = 41 A**, ed inoltre dalle tabelle si desume un

K' = 7,41 mV / A m, che porterà a concludere,

$$\Delta Vc = K' \, Lc \, I_Bc = 7,41 \cdot 115 \cdot 18,2 \cdot 10^{-3} = \text{circa} = 15,5 \text{ V}.$$

Anche in questo caso non viene soddisfatta la condizione che **ΔV < ΔVam**.

Il procedimento continua, ossia si aumenta la sezione fino che non viene soddisfatta anche quest'ultima relazione. Nel nostro caso si troverà che la relazione è soddisfatta in corrispondenza di una sezione **Sc = 16 mm²**, con **Izc = 76 A** e con

K' = 2,82 V / A m, che fornisce una caduta di tensione

$$\Delta Vc = K' \, Lc \, I_Bc = 2,82 \cdot 115 \cdot 18,2 \cdot 10^{-3} = \text{circa} = 5,9 \text{ V}.$$

La scelta dell'interruttore automatico si ottiene se:

I_Bc ≤ Inc ≤ Izc, ossia deve risultare che, **18,2 ≤ Inc ≤ 76**.

Dal punto di vista commerciale risponde alle nostre esigenze l'interruttore con corrente nominale **Inc = 25 A**. In definitiva si assume un interruttore magnetotermico con **In = 25 A**, con curva caratteristica di tipo C, con potere di interruzione di **4,5 kA** e **I_Δn = 0,03 A**.

Rifasamento

Operando un rifasamento separato delle due linee **a** e **b**, si ottiene che per un cosφ = 0,9 corrisponde un Tgφ = 0,48, e, da ciò possiamo ammettere che i dispositivi di rifasamento abbiano potenza reattiva ottenuta nel modo seguente:

$$Qca = N \, Pa \, (Tg\varphi - Tg\varphi') = 2 \cdot 2,2 \cdot (0,8 - 0,48) = 1,4 \text{ kVAR};$$

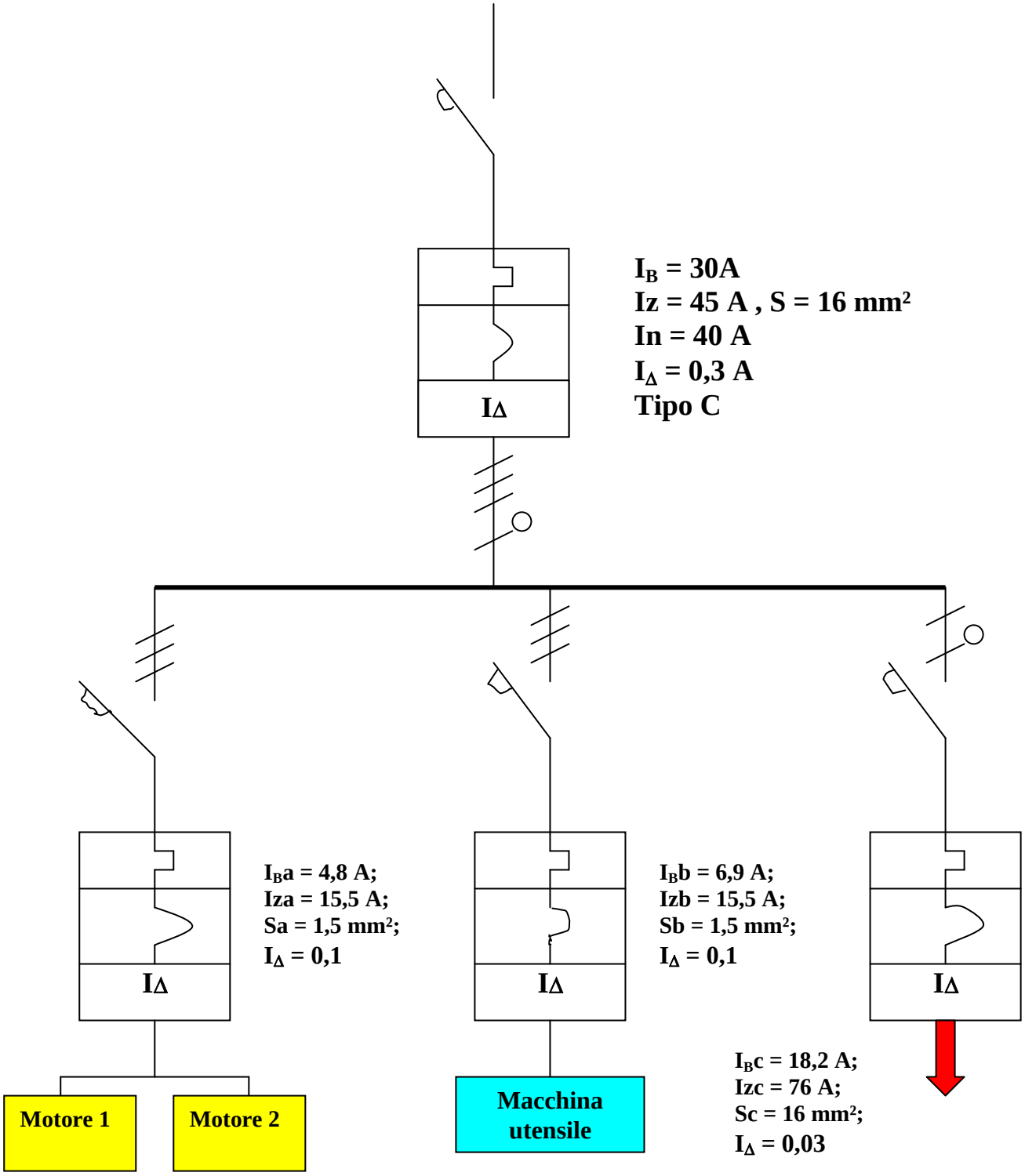
$$Qcb = N \, Pb \, (Tg\varphi - Tg\varphi') = 1 \cdot 4 \cdot (0,75 - 0,48) = 1,08 \text{ kVAR}.$$

Resistenza di Terra

La resistenza di terra **Rt** deve essere coordinata alle soglie dei differenziali, secondo la normativa o la legge 46 – 90: **Rt ≤ 50 / (I_Δa + I_Δb + I_Δc)**, con **50 =** tensione di contatto ammessa dalle Norme, e con $I_\Delta a + I_\Delta b + I_\Delta c = 0,23$, perciò **Rt ≤ 50 / 0,23**, ossia **Rt ≤ 217,4 Ω**. Ipotizzando una resistività di terra **ρt = 500 Ω m** e dei picchetti di lunghezza **Lp = 1,5 m**, si può ammettere indicativamente che **Rt = ρt / n Lp**, con **n** numero di picchetti da impiegare, da cui nel nostro caso:

n = ρt / Rt Lp = 500 / (217,4 . 1,5) = (1,53) = **2**. Si realizza l'impianto di terra semplicemente con due picchetti.

Schema unifilare del nostro impianto



Linea c

Linea a **Linea b**

Tema di impianti elettrici sessione ordinaria del 2001

Un condominio ubicato su un'area a forma rettangolare, comprende:

- tre piani fuori terra con una scala interna;
- tre appartamenti per piano aventi rispettivamente una superficie di circa 50 m², 100 m² e 150 m²;
- impianto ascensore con locali tecnici accessibili all'ultimo piano;
- locale contatori, centrale idrica, ripostigli e box auto, che si affacciano a cielo aperto, al piano terra;
- giardino circostante lo stabile;
- ingressi carrabile e pedonale.

Le potenze assorbite dai servizi condominiali sono:

- forza motrice e luce ascensore 5000 W + 600 W;
- illuminazione giardino 700 W;
- centrale idrica ed irrigazione del giardino 2500 W;
- cancello elettrico 450 W;
- illuminazione scale ed atrio d'ingresso 400 W;
- illuminazione corridoi e parti comuni 500W;
- alimentazione impianti ausiliari 300 W.

Il candidato, fatte le ipotesi aggiuntive che ritiene necessarie e stabilite le caratteristiche generali del progetto, determini:

1 la potenza contrattuale per i singoli appartamenti e per i servizi condominiali;

2 lo schema unifilare del quadro generale dei servizi condominiali e giustifichi i criteri di scelta delle apparecchiature presenti nello schema proposto;

3 le caratteristiche ed i criteri di dimensionamento delle colonne montanti per l'alimentazione delle unità abitative;

4 la costituzione e le caratteristiche dell'impianto di terra del complesso.

SOLUZIONE

Prima di procedere conviene effettuare alcune considerazioni preliminari:
l'impianto deve essere realizzato nel rispetto della legge, N. 46, del 5 marzo 1990 e quindi seguire le Norme CEI relative all'edilizia residenziale.
Si ipotizza inoltre che l'impianto sia alimentato con:
tensione trifase 400 / 230 V con punto di prelievo nei contatori ENEL, installati nel vano contatori;
tensione monofase 230 V, fra fase e neutro;
il sistema di distribuzione sia del tipo TT.

Calcolo della potenza contrattuale

Ipotizzando per gli appartamenti una potenza apparente per unità di superficie pari a 70 VA / m², si ottiene per le diverse tipologie di appartamenti le seguenti potenze apparenti complessive:

superficie appartamento in m²	Potenza apparente totale in VA
50	50 . 70 = 3500
100	100 . 70 = 7000
150	150 . 70 = 10500

Ammettendo che il **fattore di potenza** di tutti gli appartamenti sia pari a **0,9**, è possibile ottenere anche la potenza attiva richiesta da ogni singolo appartamento, in relazione alla sua superficie:

superficie appartamento in m²	Potenza attiva = S cosφ in W	Potenza contrattuale da richiedere all'ENEL
50	3500 . 0,9 = 3150	3 kW
100	7000 . 0,9 = 6300	4,5 kW
150	10500 . 0,9 = 9450	6 kW

I valori dedotti per la potenza contrattuale da richiedere all'ente distributore, sono legati ad una riduzione della potenza attiva per effetto dei coefficienti di contemporaneità e di utilizzazione: **K = Kc . Ku**.
Tenendo presente che gli appartamenti hanno un'alimentazione monofase con tensione di 230 V, è possibile determinare le correnti di impiego delle tre diverse tipologie di appartamento con la relazione : $\mathbf{I_B = P / V \cos\varphi}$.

superficie appartamento in m²	Corrente di impiego I_B in Ampere
50	3000 / (230 . 0,9) = 14,5
100	4500 / (230 . 0,9) = 21,8
150	6000 / (230 . 0,9) = 29

Ipotizzando che gli appartamenti del terzo piano siano alla distanza di **15 m** dal locale contatori, le sezioni dei montanti e le relative protezioni saranno per le diverse tipologie di appartamenti, le seguenti, ipotizzando una densità massima all'interno dei cavi di 3 A / mm², è come fissare un sezione minima per il cavo):

appartamenti da 50 m² o di tipologia A

sezione minima del cavo 14,5 / 3 = 4,8 mm², scelgo allora un cavo in PVC con una sezione di **6 mm²**, con corrente di portata di **Iz = 24 A**, dove l'interruttore magnetotermico dovrà avere un corrente nominale tale che,

I_BA ≤ InA ≤ IzA, ossia la sua corrente nominale deve avere valore compreso fra i 14,5 A ed i 24 A. Dalle tabelle si rileva che esiste un interruttore commerciale magnetotermico differenziale bipolare con **In = 20 A** e **I_Δ = 0,03 A = 30 mA**, con curva di sgancio di **tipo C** e con potere di interruzione **Pi ≥ 6 kA**;

appartamenti da 100 m² o di tipologia B

sezione minima del cavo 21,8 / 3 = 7,3 mm², scelgo allora un cavo in PVC con una sezione di **10 mm²**, con corrente di portata di **Iz = 33 A**, dove l'interruttore magnetotermico dovrà avere un corrente nominale tale che,

I_BB ≤ InB ≤ IzB, ossia la sua corrente nominale deve avere valore compreso fra i 21,8 A ed i 33 A. Dalle tabelle si rileva che esiste un interruttore commerciale magnetotermico differenziale bipolare con **In = 25 A** e **I_Δ = 0,03 A = 30 mA**, con curva di sgancio di **tipo C** e con potere di interruzione **Pi ≥ 6 kA**;

appartamenti da 150 m² o di tipologia C

sezione minima del cavo 29 / 3 = 9,7 mm², scelgo allora un cavo in PVC con una sezione di **16 mm²**, (per ragioni di sicurezza ho scelto una sezione S maggiore di 10 mm²), con corrente di portata di **Iz = 45 A**, dove l'interruttore magnetotermico dovrà avere un corrente nominale tale che,

I_BC ≤ InC ≤ IzC, ossia la sua corrente nominale deve avere valore compreso fra i 29 A ed i 45 A. Dalle tabelle si rileva che esiste un interruttore commerciale magnetotermico differenziale bipolare con **In = 32 A** e **I_Δ = 0,03 A = 30 mA**, con curva di sgancio di **tipo C** e con potere di interruzione **Pi ≥ 6 kA**.

Dimensionamento cavi ed interruttori dei sevizi comuni

Le potenze dei servizi condominiali sono indicati nel testo e sono:

forza motrice e luce ascensore	5600 W;
illuminazione giardino	700 W;
centrale idrica ed irrigazione del giardino	2500 W;
cancello elettrico	450 W;
illuminazione scale ed atrio d'ingresso	400 W;
illuminazione corridoi e parti comuni	500W;
alimentazione impianti ausiliari	300 W.

Il totale della potenza relativa a questi servizi condominiali vale:

Pt = 5600 + 700 + 2500 + 450 + 400 + 500 + 300 = **10450 W**.

Ipotizzando possibili ampliamenti, si può pensare di richiedere all'ente distributore una potenza contrattuale di **15 kW**. Tenendo conto che essa è una linea trifase, la corrente di impiego, ammettendo un **cosφ = 0,9**, (si ritiene in pratica che i carichi siano già rifasati) , è data dalla relazione:

$$\mathbf{I_B tot = P / \sqrt{3}\ V \cos\varphi = 15000 / (\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0{,}9) = 25{,}3\ A}.$$

Considero allora un cavo in PVC, con corrente di portata pari a **Iz = 33 A** e sezione **S = 10 mm²**, con un interruttore magnetotermico avente una corrente nominale **In = 32 A**. Anche questo caso è garantita la rispondenza a quanto richiesto dalle nome; infatti si ha che: $\mathbf{I_B\ (= 25{,}3\ ) \leq In\ (= 32\ )\ \leq Iz\ (= 33\ )}$.

Interruttore generale

A questo punto è possibile dimensionare l'interruttore generale, da installare subito dopo il contatore trifase. Si può considerare, ad esempio, un interruttore generale $\mathbf{I_G}$ **automatico in aria, quadripolare** con le seguenti caratteristiche:
Vn = 400 V; **Vis** = tensione di scatto istantaneo = **690 V**; $\mathbf{I_B = 25{,}3\ A}$; **In = 32 A**; **Iz =33 A**; con curva di sgancio di **tipo C**; con potere di interruzione **Pi ≥ 6 kA** ed una corrente differenziale $\mathbf{I_\Delta = 0{,}3\ A = 300\ mA}$. La scelta della curva di sgancio di **tipo C** e della protezione differenziale di **300 mA** occorre per garantire la selettività con gli altri interruttori posti a valle.
A questo punto si prosegue alla determinazione della sezione e dei dispositivi di protezione delle linee che alimentano i singoli servizi condominiali. Ritenendo che ogni linea abbia una lunghezza ridotta, tale da soddisfare la condizione imposta dalle norme sulla caduta di tensione, non si procederà alla verifica.

Linea ascensore con P = 5000 W o della forza motrice dell'ascensore

Calcoliamo la sua corrente di impiego: (la linea è trifase)

$$Ib1 = P / \sqrt{3}\ V \cos\varphi = 5000 / \sqrt{3}\ .\ 380\ .\ 0{,}9 = \mathbf{8{,}44\ A}.$$

Nell'ipotesi di considerare un cavo in PVC, possiamo così ammettere un cavo con sezione **S = 4 mm²**, con corrente di portata **Iz = 19 A** ed interruttore magnetotermico quadripolare in aria, con **In = 16 A**. In particolare l'interruttore avrà una tensione nominale **Vn = 400 V**, una tensione di scatto istantaneo **Vis = 690 V**, con curva di sgancio di **tipo B** ed $\mathbf{I_\Delta = 0{,}03\ A = 30\ mA}$,
Come si vede è soddisfatta la condizione, secondo la legge, che:

$$\mathbf{I_B \leq In \leq Iz}.$$

Luce ascensore con P = 600 W

La corrente di impiego in questo caso si calcola come: (la linea è monofase)

$$Ib2 = P / V \cos\varphi = 600 / 230\ .\ 1 = 600 / 230 =$$

ritenendo che le lampade siano già rifasate $= \mathbf{Ib2 = 2{,}6\ A}$.

Considerando un cavo in PVC, possiamo ammettere un cavo con sezione **S = 1,5 mm²**, con corrente di portata **Iz = 10 A** ed interruttore magnetotermico bipolare in aria con **In = 6 A**. In particolare l'interruttore avrà una tensione nominale **Vn = 230 / 400 V**, una tensione di scatto istantaneo **Vis = 690 V**, con curva di sgancio di **tipo B** ed $\mathbf{I_\Delta = 0{,}03\ A = 30\ mA}$,
Risulta essere soddisfatta la condizione, secondo la legge, che:

$$\mathbf{I_B \leq In \leq Iz}.$$

Illuminazione del giardino con P = 700 W

Sempre nell'ipotesi di considerare lampade già rifasate, è possibile determinare la corrente di impiego attraverso la seguente relazione: (la linea è monofase)

$$Ibg = P / V = 700 / 230 = \mathbf{3{,}04\ A},$$ ed

è possibile impiegare allo scopo un cavo in PVC con sezione **S = 1,5 mm²**, con corrente di portata **Iz = 10 A** ed interruttore magnetotermico bipolare in aria con **In = 6 A**. In particolare l'interruttore avrà una tensione nominale **Vn = 230 / 400 V**, una tensione di scatto istantaneo **Vis = 690 V**, con curva di sgancio di **tipo B** ed $\mathbf{I_\Delta = 0{,}03\ A = 30\ mA}$,
Risulta essere soddisfatta la condizione, secondo la legge, che:

$$\mathbf{I_B \leq In \leq Iz}.$$

Centrale idrica ed irrigazione del giardino con P = 2500

La corrente di impiego in questo caso si ottiene nel modo seguente:
(la linea è trifase)

$$Ib3 = P / \sqrt{3}\ V \cos\varphi = 2500 / \sqrt{3}\ .\ 380\ .\ 0{,}9 = \mathbf{4{,}22\ A}.$$

E' possibile impiegare allo scopo un cavo in PVC con sezione
S = 1,5 mm², con corrente di portata **Iz = 10 A** ed interruttore magnetotermico quadripolare in aria con **In = 6 A**. In particolare l'interruttore avrà una tensione nominale
Vn = 400 V, una tensione di scatto istantaneo **Vis = 690 V**, con curva di sgancio di **tipo B** ed $\mathbf{I_\Delta = 0{,}03\ A = 30\ mA}$,
Risulta essere soddisfatta la condizione, secondo la legge, che:

$$\mathbf{I_B \leq In \leq Iz}.$$

Cancello elettrico con P = 450 W

La corrente di impiego si ottiene attraverso la seguente relazione: (la linea è monofase)

$$Ib4 = P / V \cos\varphi\ = 450 /\ 230\ .\ 0{,}9\ = \mathbf{2{,}174\ A}.$$

E' possibile impiegare allo scopo un cavo in PVC con sezione
S = 1,5 mm², con corrente di portata **Iz = 10 A** ed interruttore magnetotermico bipolare in aria con **In = 6 A**. In particolare l'interruttore avrà una tensione nominale **Vn = 230 / 400 V**, una tensione di scatto istantaneo **Vis = 690 V**, con curva di sgancio di **tipo B** ed $\mathbf{I_\Delta = 0{,}03\ A = 30\ mA}$,
Risulta essere soddisfatta la condizione, secondo la legge, che:

$$\mathbf{I_B \leq In \leq Iz}.$$

Illuminazione corridoi e parti comuni con P = 500 W

Sempre nell'ipotesi di considerare dispositivi già rifasati, è possibile determinare la corrente di impiego attraverso la seguente relazione: (la linea è monofase)

$$Ib5 = P / V\ = 500 /\ 230 = \mathbf{2{,}174\ A},\ \text{ed}$$

è possibile impiegare allo scopo un cavo in PVC con sezione
S = 1,5 mm², con corrente di portata **Iz = 10 A** ed interruttore magnetotermico bipolare in aria con **In = 6 A**. In particolare l'interruttore avrà una tensione nominale **Vn = 230 / 400 V**, una tensione di scatto istantaneo **Vis = 690 V**, con curva di sgancio di **tipo B** ed $\mathbf{I_\Delta = 0{,}03\ A = 30\ mA}$,
Risulta essere soddisfatta la condizione, secondo la legge, che:

$$\mathbf{I_B \leq In \leq Iz}.$$

Illuminazione scale ed atrio di ingresso con P = 400 W

Sempre nell'ipotesi di considerare dispositivi già rifasati, è possibile determinare la corrente di impiego attraverso la seguente relazione: (la linea è monofase)

Ib6 = P / V = 400 / 230 = **1,74 A**, ed

è possibile impiegare allo scopo un cavo in PVC con sezione **S = 1,5 mm²**, con corrente di portata **Iz = 10 A** ed interruttore magnetotermico bipolare in aria con **In = 6 A**. In particolare l'interruttore avrà una tensione nominale **Vn = 230 / 400 V**, una tensione di scatto istantaneo **Vis = 690 V**, con curva di sgancio di **tipo B** ed $\mathbf{I_\Delta = 0,03\ A = 30\ mA}$,

Risulta essere soddisfatta la condizione, secondo la legge, che: $\mathbf{I_B \leq In \leq Iz}$.

Alimentazione degli impianti ausiliari con P = 300 W

E' possibile determinare la corrente di impiego attraverso la seguente relazione: (la linea è monofase), Ibaux = P / V = 300 / 230 = **1,3 A**, ed

è possibile impiegare allo scopo un cavo in PVC con sezione **S = 1,5 mm²**, con corrente di portata **Iz = 10 A** ed interruttore magnetotermico bipolare in aria con **In = 6 A**. In particolare l'interruttore avrà una tensione nominale **Vn = 230 / 400 V**, una tensione di scatto istantaneo **Vis = 690 V**, con curva di sgancio di **tipo B** ed $\mathbf{I_\Delta = 0,03\ A = 30\ mA}$,

Risulta essere soddisfatta la condizione, secondo la legge, che:

$\mathbf{I_B \leq In \leq Iz}$.

Importante: La sezione del conduttore di terra non deve essere inferiore a quella dei rispettivi conduttori di fase fino ad una sezione di 16 mm²; la sezione dei conduttori di protezione va scelta come quella del conduttore neutro se nello stesso tubo.

IMPIANTO DI TERRA

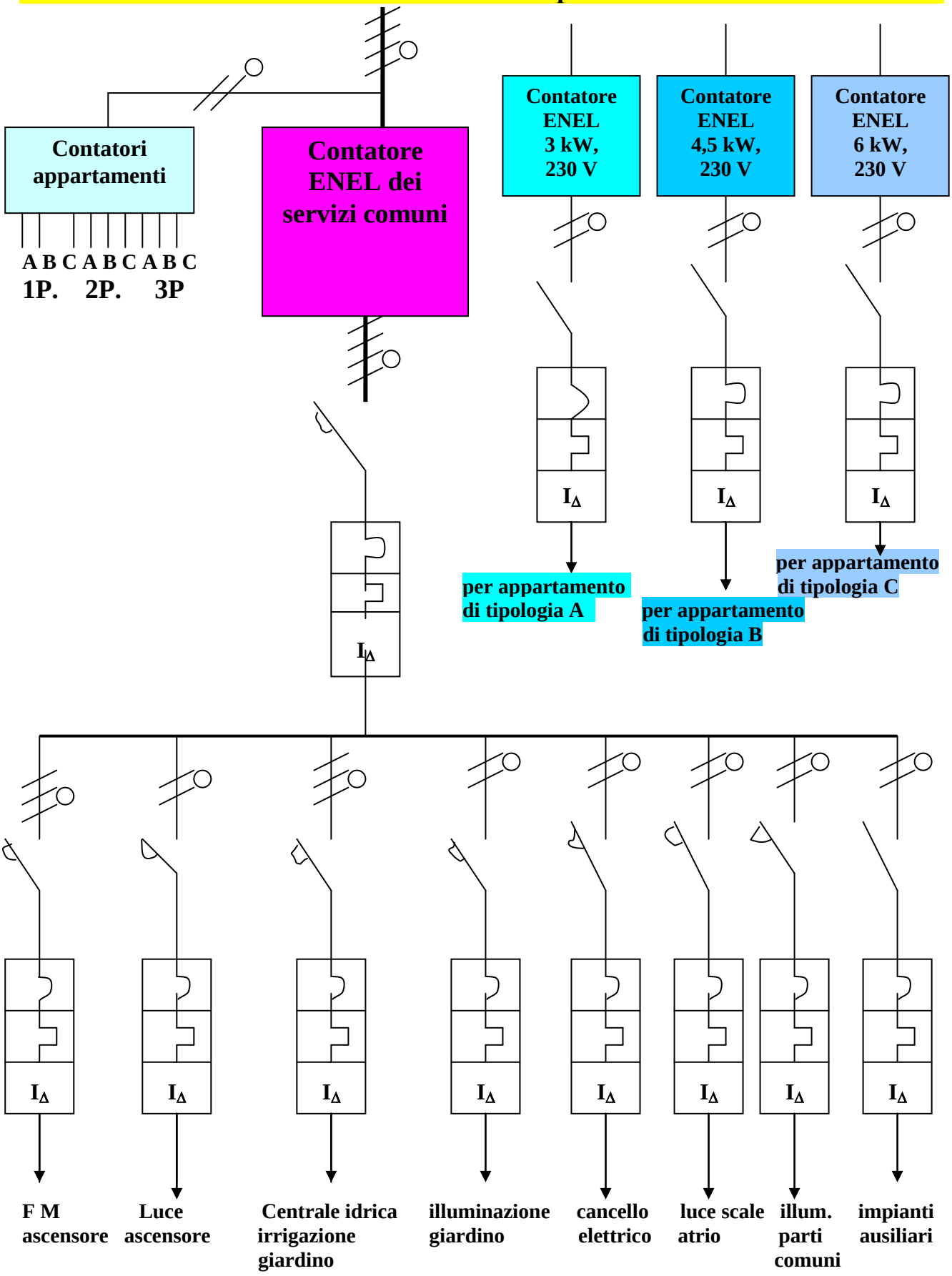
Ho scelto che il sistema di distribuzione sia lo stesso di quello adottato dall'ente distributore, ossia il sistema TT. In questo caso le norme **IEC** impongono che sia verificata la seguente relazione: $\mathbf{Rt \leq 50}$ (Volt) / $\mathbf{I_\Delta}$ (Ampere).

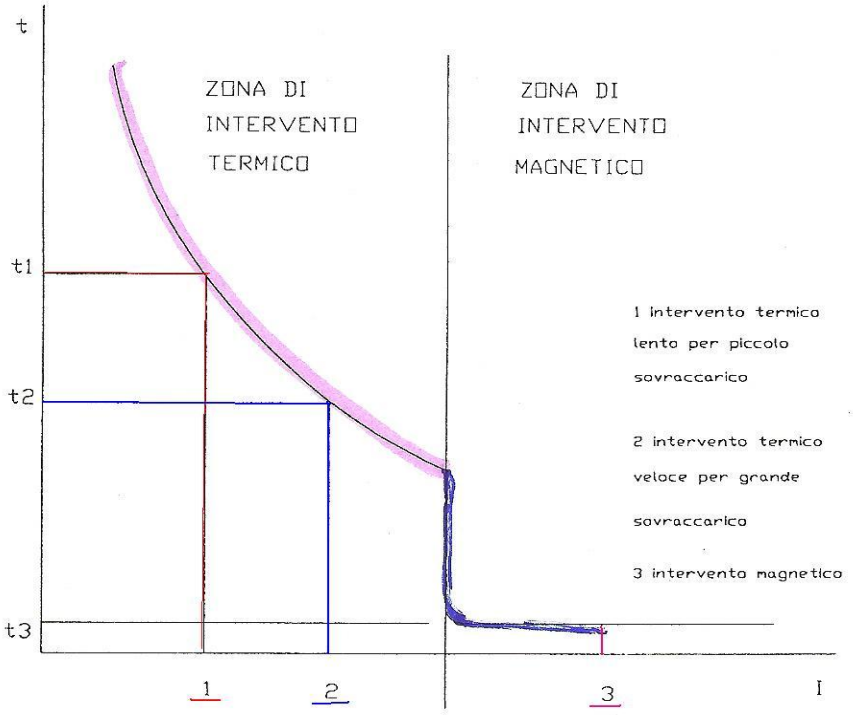
Per gli appartamenti si ricava un valore della resistenza di terra pari a:

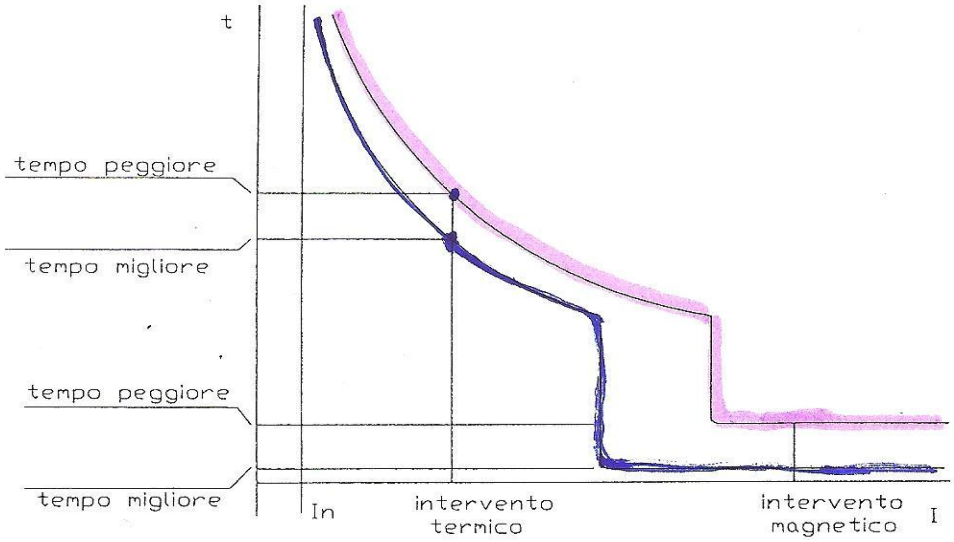
Rt ≤ 50 / 0,03 = circa = **1667 Ω**, mentre per i servizi condominiali si ricava un valore della resistenza di terra pari a **Rt ≤ 50 / 0,3** = circa = **166,7 Ω**. Quindi il valore della resistenza di terra per l'intero complesso deve risultare pari a, **Rt = 166,7 Ω**.

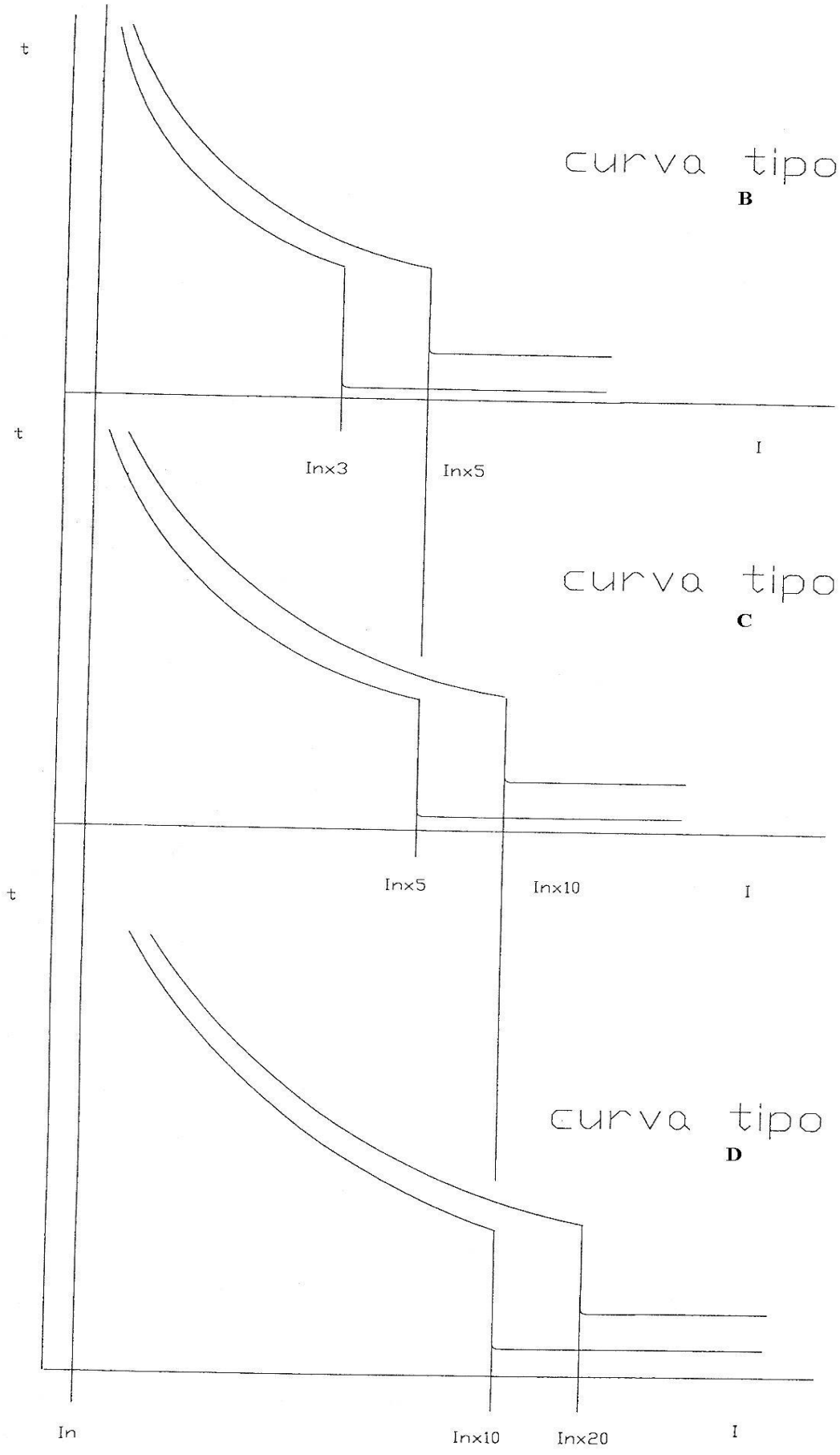
Si possono utilizzare sia dispersori di fatto, (ferri di armatura), che dispersori intenzionali, (picchetti), collegati con un conduttore in corda di rame nuda con sezione di **35 mm²**.

Schema unifilare dell'impianto dato




t
ZONA DI
INTERVENTO
TERMICO
ZONA DI
INTERVENTO
MAGNETICO
t1
t2
t3
1 intervento termico
lento per piccolo
sovraccarico
2 intervento termico
veloce per grande
sovraccarico
3 intervento magnetico
1
2
3
I


t
tempo peggiore
tempo migliore
tempo peggiore
tempo migliore
In
intervento
termico
intervento
magnetico
I


t
curva tipo
B
t
Inx3
Inx5
I
curva tipo
C
t
Inx5
Inx10
I
curva tipo
D
In
Inx10
Inx20
I

Spero che gli appunti, gli appendici ed i temi d'esame siano per Voi un aiuto, per affrontare serenamente sia i test di verifica annuali, che l'esame finale del vostro corso di studi, ossia l'esame di Stato.

Un saluto Delucca Ing. Diego