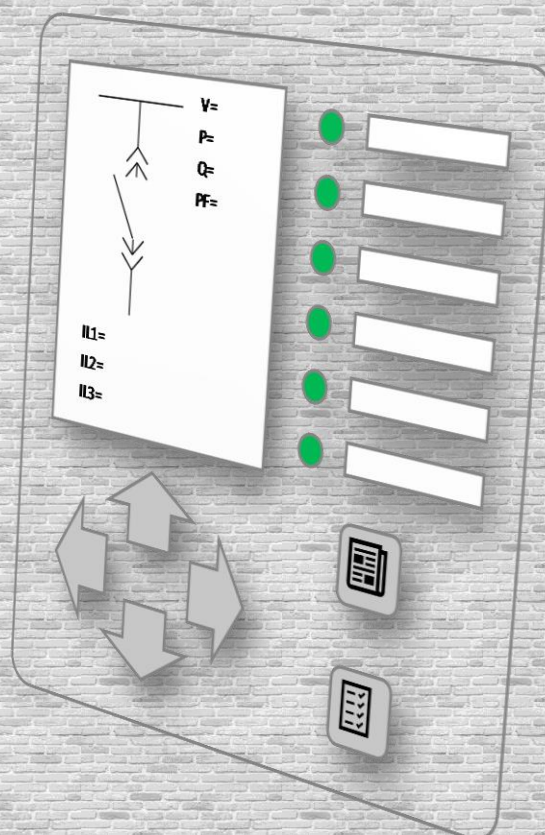


DISPENSA TECNICA nr. 1

PROVA CON CASSETTA MONOFASE DI UN RELÈ

IMMAGINE TERMICA E SEQUENZA INVERSA





1. INTRODUZIONE	3
2. MATRICE DI FORTESCUE	3
3. INIEZIONI CON CASSETTA MONOFASE	4
3.1 INIEZIONE SU UN SOLO INGRESSO DI MISURA	4
3.2 INIEZIONI SU DUE FASI (CON INVERSIONE)	5
3.3 INIEZIONI SU DUE FASI (SENZA INVERSIONE)	6
4. PROVA DELLA FUNZIONE IMMAGINE TERMICA	7
4.1 CORRENTE TERMICA EQUIVALENTE	7
4.1.1 CORRENTE TERMICA EQUIVALENTE PER INSERIZIONE SU UN SOLO INGRESSO AMPEROMETRICO	8
4.1.2 CORRENTE TERMICA EQUIVALENTE PER INSERIZIONE SU DUE INGRESSI AMPEROMETRICI CON INVERSIONE	9
4.1.3 CORRENTE TERMICA EQUIVALENTE PER INSERIZIONE SU DUE INGRESSI AMPEROMETRICO SENZA INVERSIONE	9
5. PROVA DELLA FUNZIONE DI PROTEZIONE CONTRO LA SEQUENZA INVERSA	10
5.1 FUNZIONAMENTO DELLA PROTEZIONE	10
5.2 PROVA DELLA PROTEZIONE CONTRO LA COMPONENTE INVERSA	11
6. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	14



1. INTRODUZIONE

In assenza di una cassetta con tre uscite in corrente e potendo utilizzare un dispositivo prova-relè monofase, ci si pone il problema di come realizzare le prove delle funzioni di protezione **“IMMAGINE TERMICA (49)”** e **“SEQUENZA INVERSA (46)”** su una protezione che funziona secondo curve di intervento analoghe a quelle dei relè Thytronic modello **NM20** o **NM10**.

2. MATRICE DI FORTESCUE

Si considerino i tre vettori (fasori):

$$\vec{I}_1 \quad \vec{I}_2 \quad \vec{I}_3$$

I tre vettori risultano una combinazione dei vettori associati alle sequenze diretta, inversa e omopolare:

$$\vec{I}_d \quad \vec{I}_i \quad \vec{I}_o$$

secondo la relazione:

$$\begin{bmatrix} \vec{I}_1 \\ \vec{I}_2 \\ \vec{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{I}_o \\ \vec{I}_d \\ \vec{I}_i \end{bmatrix} \quad [1]$$

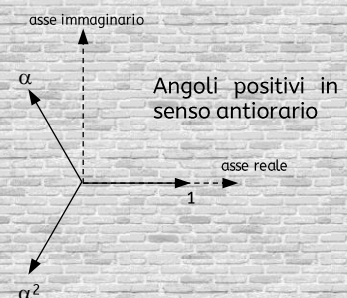
La matrice

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}$$

è la matrice di Fortescue e gli operatori α e α^2 sono pari a:

$$\alpha = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j\frac{2}{3}\pi}$$

$$\alpha^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{-j\frac{2}{3}\pi}$$



In pratica, l'applicazione degli operatori α e α^2 determina rispettivamente una rotazione di 120° e 240° in senso positivo (antiorario).

Invertendo la matrice [1] si ottiene:

$$\begin{bmatrix} \vec{I}_o \\ \vec{I}_d \\ \vec{I}_i \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{I}_1 \\ \vec{I}_2 \\ \vec{I}_3 \end{bmatrix} \quad [2]$$

Da cui:

$$\begin{aligned} \vec{I}_o &= \frac{1}{3}(\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3) \\ \vec{I}_d &= \frac{1}{3}(\vec{I}_1 + \alpha\vec{I}_2 + \alpha^2\vec{I}_3) \\ \vec{I}_i &= \frac{1}{3}(\vec{I}_1 + \alpha^2\vec{I}_2 + \alpha\vec{I}_3) \end{aligned}$$

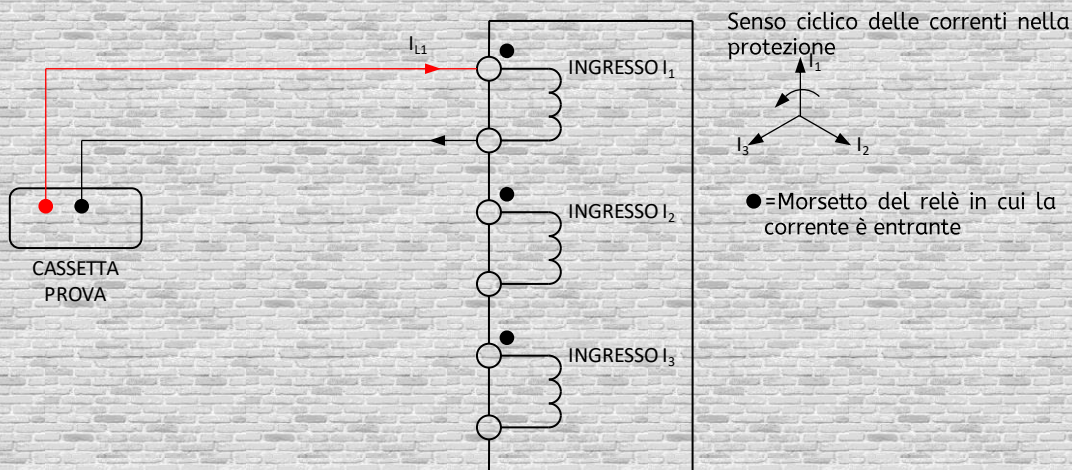


3. INIEZIONI CON CASSETTA MONOFASE

Si vuole analizzare di seguito, a quanto ammontano le componenti di sequenza in base ad alcune modalità di collegamento della cassetta prova monofase al relè. Quanto analizzato di seguito non contempla tutte le possibilità di collegamento che si possono realizzare.

3.1 INIEZIONE SU UN SOLO INGRESSO DI MISURA

Si faccia riferimento all'inserzione seguente.



Iniettando la corrente come in figura risulta (si omette il simbolo di vettore):

$$\begin{aligned}I_1 &= I_{L1} \\I_2 &= 0 \\I_3 &= 0\end{aligned}$$

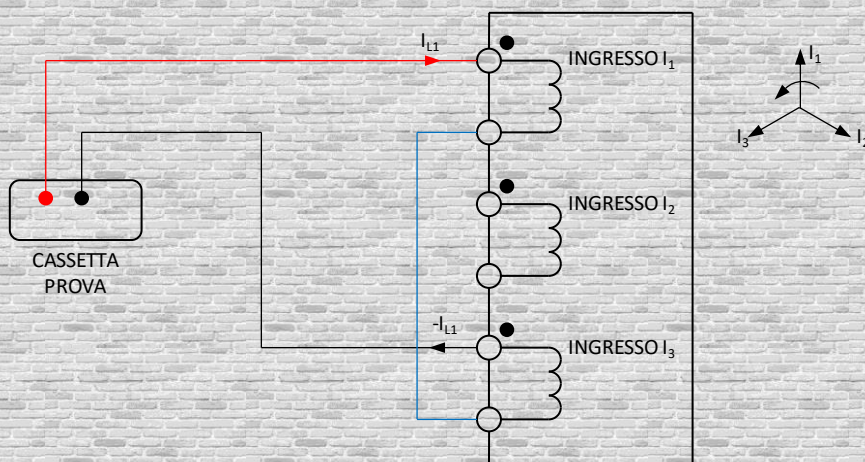
Le componenti di sequenza risultano:

$$\begin{aligned}I_o &= \frac{1}{3} I_{L1} \\I_d &= \frac{1}{3} I_{L1} \\I_i &= \frac{1}{3} I_{L1}\end{aligned}$$

Pertanto tutte le componenti di sequenza hanno valore pari a 1/3 della corrente iniettata I_{L1} .

3.2 INIEZIONI SU DUE INGRESSI DI MISURA (CON INVERSIONE)

Si faccia riferimento all'inserzione seguente.



Iniettando la corrente come in figura risulta:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{L1} \\ I_2 &= 0 \\ I_3 &= -I_{L1} \end{aligned}$$

Le componenti di sequenza risultano:

$$\begin{aligned} I_o &= \frac{1}{3}(I_{L1} - I_{L1}) = 0 \\ I_d &= \frac{1}{3}(I_{L1} - \alpha^2 I_{L1}) = \frac{1}{3}I_{L1}(1 - \alpha^2) \\ I_i &= \frac{1}{3}(I_{L1} - \alpha I_{L1}) = \frac{1}{3}I_{L1}(1 - \alpha) \end{aligned}$$

Essendo:

$$\begin{aligned} 1 - \alpha^2 &= 1 + \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 - \alpha &= 1 + \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{aligned}$$

Sostituendo:

$$I_d = \frac{1}{3}I_{L1} \left(\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

Da cui:

$$\left| \frac{I_d}{I_{L1}} \right| = \frac{1}{3} \sqrt{\left(\frac{3}{2} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)^2} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{9}{4} + \frac{3}{4}} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{12}{4}} = \frac{1}{3} \sqrt{3} = \frac{\sqrt{3}}{3} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577$$

Analogamente:

$$\begin{aligned} I_i &= \frac{1}{3}I_{L1} \left(\frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ \left| \frac{I_i}{I_{L1}} \right| &= 0.577 \end{aligned}$$

Riepilogando:

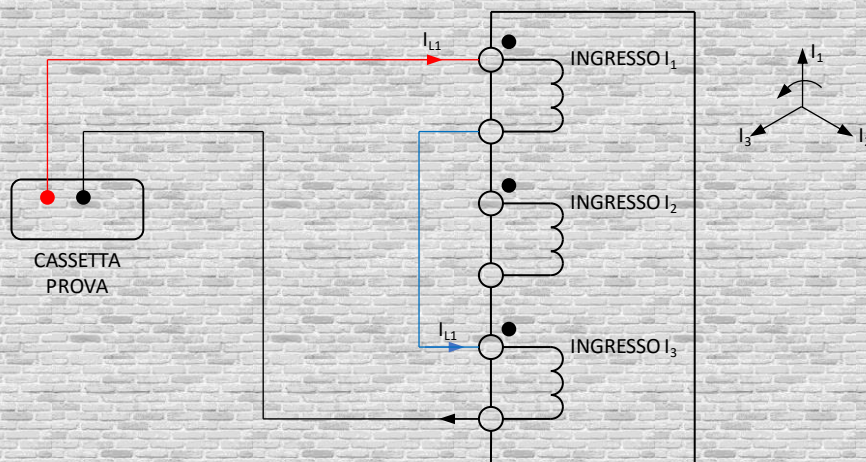
$$\begin{aligned} I_o &= 0 \\ I_d &= \frac{1}{\sqrt{3}}I_{L1} = 0.577I_{L1} \\ I_i &= \frac{1}{\sqrt{3}}I_{L1} = 0.577I_{L1} \end{aligned}$$

Nota

Per modelli di relè differenti da quello analizzato che presentano due ingressi amperometrici e calcolano la terza corrente, si applica il presente caso.

3.3 INIEZIONI SU DUE INGRESSI DI MISURA (SENZA INVERSIONE)

Si faccia riferimento all'inserzione seguente.



Iniettando la corrente come in figura risulta:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{L1} \\ I_2 &= 0 \\ I_3 &= I_{L1} \end{aligned}$$

Le componenti di sequenza risultano:

$$\begin{aligned} I_o &= \frac{1}{3}(I_{L1} + I_{L1}) = \frac{2}{3}I_{L1} \\ I_d &= \frac{1}{3}(I_{L1} + \alpha^2 I_{L1}) = \frac{1}{3}I_{L1}(1 + \alpha^2) \\ I_i &= \frac{1}{3}(I_{L1} + \alpha I_{L1}) = \frac{1}{3}I_{L1}(1 + \alpha) \end{aligned}$$

Essendo:

$$\begin{aligned} 1 + \alpha^2 &= 1 - \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 + \alpha &= 1 - \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{aligned}$$

Sostituendo:

$$I_d = \frac{1}{3}I_{L1} \left(\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

Da cui:

$$\left| \frac{I_d}{I_{L1}} \right| = \frac{1}{3} \sqrt{\left(\frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)^2} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{3}{4}} = \frac{1}{3} = 0.333$$

Analogamente:

$$\begin{aligned} I_i &= \frac{1}{3}I_{L1} \left(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ \left| \frac{I_i}{I_{L1}} \right| &= 0.333 \end{aligned}$$

Riepilogando:

$$\begin{aligned} I_o &= \frac{2}{3}I_{L1} = 0.667I_{L1} \\ I_d &= \frac{1}{3}I_{L1} = 0.333I_{L1} \\ I_i &= \frac{1}{3}I_{L1} = 0.333I_{L1} \end{aligned}$$



4. PROVA DELLA FUNZIONE IMMAGINE TERMICA

Si analizza il comportamento del relè nel caso si realizzino i collegamenti precedentemente indicati.

4.1 CORRENTE TERMICA EQUIVALENTE

La protezione ad immagine termica NM20 (o, equivalentemente, NM10), opera secondo l'equazione:

$$t = \tau \cdot \ln \left(\frac{\left(\frac{I_{th}}{I_B} \right)^2 - p^2}{\left(\frac{I_{th}}{I_B} \right)^2 - \Delta\theta} \right)$$

in cui:

τ = costante di tempo di riscaldamento regolata sul relè

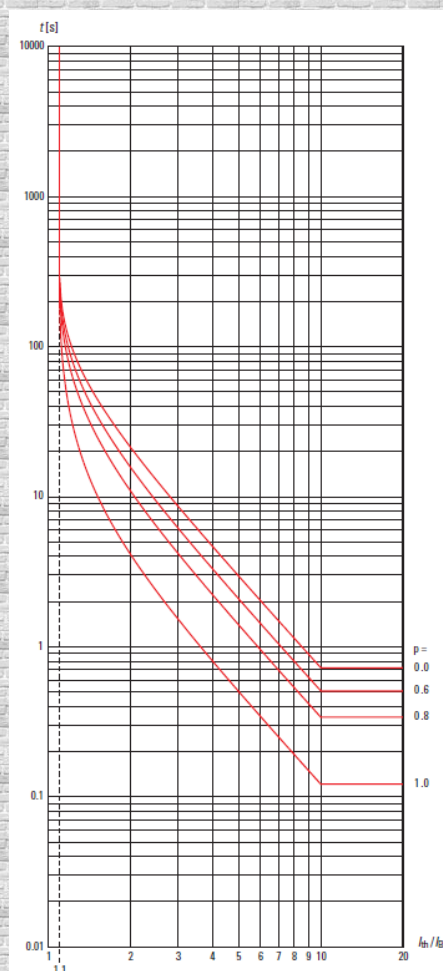
I_{th} = corrente termica equivalente ¹ calcolata dalla protezione in base a quanto misurato dagli ingressi amperometrici

I_B = corrente di base impostata sul relè (corrente nominale del motore a secondario dei TA espressa in multipli della corrente nominale del relè, I_n)

p = precarico espresso come I_p/I_B essendo I_p la corrente di precarico ²

$\Delta\theta$ = sovraccarico termico ammissibile impostato ³

La curva d'intervento, disegnata per $\tau=1\text{min}$ e $\Delta\theta=1.21\Delta\theta_n$ (sovraccarico permanente in corrente pari a $1.1I_B$) è la seguente (doc. [1]).



¹ Il rapporto I_{th}/I_B rappresenta i multipli della corrente di base.

² Se $p=0$ avviamento a freddo, se $p=1$ avviamento al 100% della corrente nominale.

³ Di solito si ammette un sovraccarico pari a $1.05-1.1I_B$, corrispondente ad uno stato termico pari a $1.10-1.21\Delta\theta_n$.



Nell'equazione precedente, il valore I_{th} è calcolato dal relè come segue:

$$I_{th} = \sqrt{I_L^2 + K \cdot I_i^2}$$

essendo:

I_L = massimo tra i valori delle correnti misurate dal relè (corrente iniettata nella prova)

K = peso della sequenza inversa programmato

I_i = sequenza inversa misurata dal relè

4.1.1 CORRENTE TERMICA EQUIVALENTE PER INSERZIONE SU UN SOLO INGRESSO AMPEROMETRICO

Si faccia riferimento al caso descritto in 3.1.

Risultano:

$$I_L = I_{L1}$$

$$I_i = \frac{1}{3} I_L$$

Sostituendo (ed esprimendo tutto in multipli di I_B):

$$\frac{I_{th}}{I_B} = \sqrt{\left(\frac{I_L}{I_B}\right)^2 + K \left(\frac{I_L}{3I_B}\right)^2}$$

$$\frac{I_{th}}{I_B} = \frac{I_L}{I_B} \sqrt{1 + \frac{K}{9}}$$

Pertanto la corrente I_L da iniettare durante la prova è:

$$\frac{I_L}{I_B} = \frac{\frac{I_{th}}{I_B}}{\sqrt{1 + \frac{K}{9}}}$$

ESEMPIO

Siano:

$$I_{th}/I_B = 2$$

$$K = 3$$

Quindi:

$$\frac{I_L}{I_B} = \frac{2}{\sqrt{1 + \frac{3}{9}}} = \frac{2}{\sqrt{\frac{12}{9}}} = \frac{2}{2\sqrt{\frac{1}{3}}} = \sqrt{3}$$

Pertanto se si procede con l'iniezione monofase su un solo ingresso, per il punto di prova $2I_{th}/I_B$ bisogna iniettare una corrente pari a 1.732 volte la corrente I_B .

Il tempo d'intervento, per $\tau = 1\text{min}$ e $\Delta\theta = 1.21\Delta\theta_n$ e $p=0$, risulta:

$$t = 1 \cdot 60 \cdot \ln\left(\frac{2^2}{2^2 - 1.21}\right) = 60 \cdot \ln\frac{4}{2.9} = 21.6\text{s}$$

Se si volesse il tempo d'intervento della protezione per costanti di tempo di riscaldamento differenti da 1min, è sufficiente moltiplicare il valore calcolato per la costante di tempo desiderata.



4.1.2 CORRENTE TERMICA EQUIVALENTE PER INSERZIONE SU DUE INGRESSI AMPEROMETRICI CON INVERSIONE

Si faccia riferimento al caso descritto in 3.2.

Si ha:

$$I_L = I_{L1}$$
$$I_i = \frac{1}{\sqrt{3}} I_L = 0.577 I_L$$

Procedendo come nel caso precedente:

$$\frac{I_{th}}{I_B} = \sqrt{\left(\frac{I_L}{I_B}\right)^2 + K \left(\frac{I_L}{\sqrt{3} I_B}\right)^2}$$

$$\frac{I_{th}}{I_B} = \frac{I_L}{I_B} \sqrt{1 + \frac{K}{3}}$$

Pertanto la corrente I_L da iniettare durante la prova è:

$$\frac{I_L}{I_B} = \frac{\frac{I_{th}}{I_B}}{\sqrt{1 + \frac{K}{3}}}$$

ESEMPIO

Siano:

$$I_{th}/I_B = 2$$

$$K = 3$$

Quindi:

$$\frac{I_L}{I_B} = \frac{2}{\sqrt{1 + \frac{3}{3}}} = \sqrt{2}$$

Pertanto se si procede con l'iniezione su due ingressi, invertendo la corrente sul secondo, per il punto di prova $2I_{th}/I_B$ bisogna iniettare una corrente pari a 1.414 volte la corrente I_B .

4.1.3 CORRENTE TERMICA EQUIVALENTE PER INSERZIONE SU DUE INGRESSI AMPEROMETRICO SENZA INVERSIONE

Si faccia riferimento al caso descritto in 3.3.

Si ha:

$$I_L = I_{L1}$$
$$I_i = \frac{1}{3} I_L = 0.333 I_L$$

Ai fini della prova, si giunge al medesimo risultato indicato in 4.1.1.

$$\frac{I_L}{I_B} = \frac{\frac{I_{th}}{I_B}}{\sqrt{1 + \frac{K}{9}}}$$



5. PROVA DELLA FUNZIONE DI PROTEZIONE CONTRO LA SEQUENZA INVERSA

Si analizza il comportamento del relè programmato per operare secondo la curva $I^2t = \text{costante}$, nel caso in cui si realizzi il collegamento indicato in 3.1.

5.1 FUNZIONAMENTO DELLA PROTEZIONE

La funzione di protezione è regolata secondo l'equazione:

$$t = 16 \cdot \frac{t_{2>inv}}{\left(\frac{I_2}{I_{2>inv}}\right)^2}$$

dove:

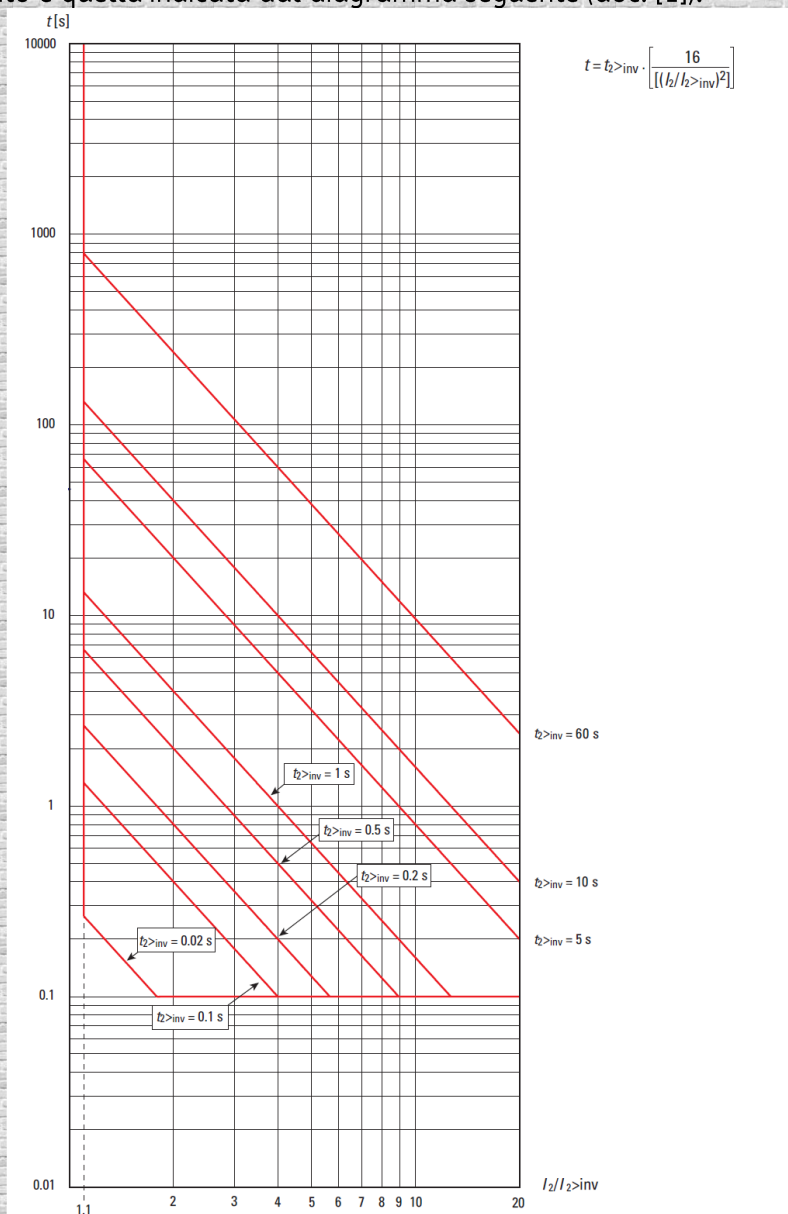
t = tempo d'intervento

$t_{2>inv}$ = ritardo regolato nel relè

I_2 = componente inversa misurata

$I_{2>inv}$ = soglia di corrente di sequenza inversa regolata espressa in multipli della corrente di base I_B

La curva d'intervento è quella indicata dal diagramma seguente (doc. [1]).





5.2 PROVA DELLA PROTEZIONE CONTRO LA COMPONENTE INVERSA

Considerando l'inserzione indicata in 3.1, in cui si inietta corrente in un solo ingresso amperometrico, il relè misura una componente di sequenza inversa pari a:

$$I_i = \frac{1}{3} I_L$$

Tenendo conto della regolazione:

$$I_{2>inv} = SET \cdot I_B$$

Si vuole realizzare la prova ad un multiplo, β , della corrente regolata pari a:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2>inv}}$$

Sostituendo:

$$\beta = \frac{\frac{1}{3} I_L}{SET \cdot I_B}$$

Pertanto la corrente da iniettare risulta:

$$I_L = \beta \cdot SET \cdot I_B \cdot 3$$

ESEMPIO

Siano:

$I_{2>inv} = 0.2 I_B$ (pertanto $SET=0.2$)

$\beta = 2$ (prova a due volte la soglia regolata-multiplo del valore regolato)

$I_B = \mu I_N$ (essendo I_N la corrente nominale del relè e μ il valore regolato sulla protezione)

La corrente da iniettare, I_L , risulta:

$$I_L = 2 \cdot 0.2 I_B \cdot 3 = 2 \cdot 0.2 \cdot \mu I_N \cdot 3$$

Se, ad esempio, $I_B = 0.89 I_N$ e $I_N = 1A$, la corrente da iniettare è:

$$I_L = 2 \cdot 0.2 \cdot 0.89 \cdot 1 \cdot 3 = 1.068A$$

Se si volesse determinare il tempo d'intervento, ad esempio per $t_{2>inv} = 10$, risulterà:

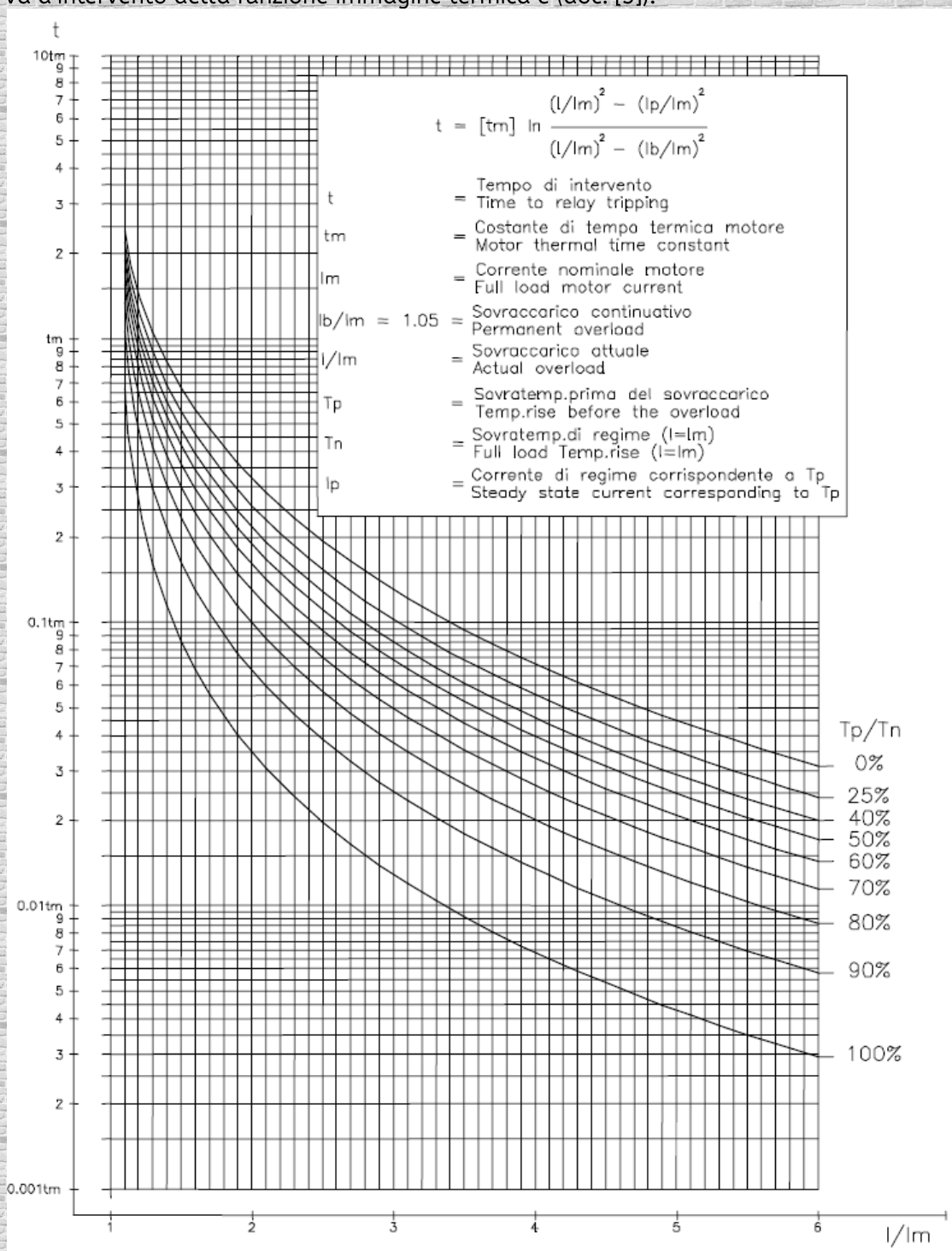
$$t = \frac{16 \cdot 10}{2^2} = 40s$$

6. APPENDICE 1

Alcuni modelli di relè (per esempio il Microelettrica Scientifica MM30) calcolano la corrente equivalente termica come secondo l'equazione:

$$I_{th} = \sqrt{I_d^2 + K \cdot I_t^2}$$

Il peso, K , della sequenza inversa sul relè MM30 è fissato pari a 3 (non regolabile).
La curva d'intervento della funzione immagine termica è (doc. [3]).





6.1 CORRENTE TERMICA EQUIVALENTE PER INSERZIONE SU UN SOLO INGRESSO AMPEROMETRICO

Le componenti di sequenza diretta e inversa misurate dalla protezione risultano (I_L corrente iniettata nell'ingresso amperometrico):

$$I_d = \frac{1}{3} I_L$$
$$I_i = \frac{1}{3} I_L$$

Sostituendo:

$$I_{th} = \sqrt{\left(\frac{I_L}{3}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{I_L}{3}\right)^2}$$

$$I_{th} = \frac{I_L}{3} \sqrt{1 + 3} = \frac{2}{3} I_L$$

Esempio

Se si vuole effettuare la prova a $I_{th}=2I_m$, la corrente da iniettare risulta:

$$I_L = 3I_m$$

6.2 CORRENTE TERMICA EQUIVALENTE PER INSERZIONE SU DUE INGRESSI AMPEROMETRICI CON INVERSIONE

Le componenti di sequenza diretta e inversa misurate dalla protezione risultano:

$$I_d = \frac{1}{\sqrt{3}} I_L = 0.577 I_L$$
$$I_i = \frac{1}{\sqrt{3}} I_L = 0.577 I_L$$

Procedendo come nel caso precedente:

$$I_{th} = \sqrt{\left(\frac{I_L}{\sqrt{3}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{I_L}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

$$I_{th} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \sqrt{1 + 3} = \frac{2}{\sqrt{3}} I_L$$

Esempio

Se si vuole effettuare la prova a $I_{th}=2I_m$, la corrente da iniettare risulta:

$$I_L = \sqrt{3} I_m$$



7. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

- | | |
|-----|--|
| [1] | Thytronic
NM 20 – Relè di protezione multifunzione per motori (PRO), doc. NM20-Manuale-02-2016 |
| [2] | Thytronic
NM 20 – Relè di protezione multifunzione per motori (BASE), doc. NM10-Manuale-01-2015 |
| [3] | Microelettrica Scientifica
Microprocessor motor protection relay type MM30-742 operation manual, doc. MO-0181-ING |

Il presente documento non rappresenta un vincolo tra chi lo ha scritto e chi lo usa. Quanto riportato è stato controllato ma ciò non esclude la presenza di imprecisioni e pertanto non si accettano responsabilità per errori ed omissioni.

Preparato da Gianni A. Tedde

Un sentito ringraziamento a Eugenio Balconi per la collaborazione.

Per contatti: gianni.tedde@nrg-sel.it