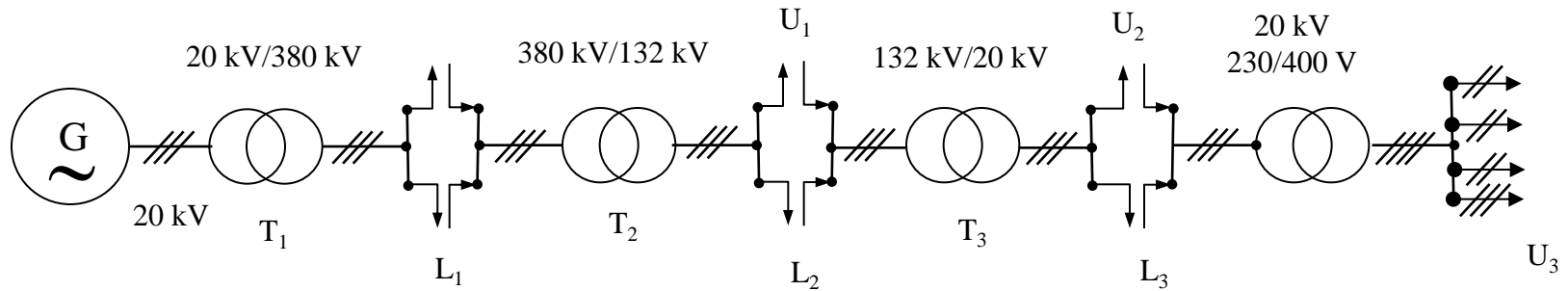


IMPIANTI



La figura mostra lo schema del sistema di produzione, trasporto, distribuzione ed utilizzo della energia elettrica:

- L'energia elettrica viene prodotta nelle centrali (termoelettriche, idroelettriche, nucleari, eoliche, solari ...) mediante generatori che sono principalmente generatori sincroni.
- Per trasportare l'energia elettrica dai luoghi di produzione a quelli di utilizzo si fa uso di linee aeree trifase ad elevata/elevatissima tensione per ridurre le perdite lungo la linea. I trasformatori trifase consentono la trasformazione dei valori di tensione.
- La distribuzione della energia elettrica agli utenti industriali viene fatta mediante linee trifase in alta/media tensione; la distribuzione della energia elettrica alle utenze domestiche viene fatta mediante linee trifase col filo neutro in bassa tensione.

CLASSIFICAZIONE DEI SISTEMI ELETTRICI IN BASE ALLA TENSIONE NOMINALE

Norma **CEI 64-8**

- Sistemi di **categoria zero**:
 $V_n \leq 50 \text{ V}$ se in corrente alternata;
 $V_n \leq 120 \text{ V}$ se in corrente continua.
- Sistemi di **prima categoria**:
 $50 \leq V_n \leq 1000 \text{ V}$ se in corrente alternata;
 $120 \leq V_n \leq 1500 \text{ V}$ se in corrente continua.
- Sistemi di **seconda categoria**:
 $1000 \leq V_n \leq 30\,000 \text{ V}$ se in corrente alternata;
 $1500 \leq V_n \leq 30\,000 \text{ V}$ se in corrente continua.
- Sistemi di **terza categoria**:
 $V_n \geq 30\,000 \text{ V}$ sia in corrente alternata che in corrente continua

Ai fini della **distribuzione della energia elettrica** si distinguono:

- **bassa tensione** (BT) $V_n < 1000 \text{ Volt}$
- **media tensione** (MT) $1000 \text{ Volt} < V_n < 30\,000 \text{ Volt}$
- **alta tensione** (AT) $30\,000 \text{ Volt} < V_n < 150\,000 \text{ Volt}$
- **altissima tensione** (AAT) $V_n > 150\,000 \text{ Volt}$

ORGANI DI MANOVRA E PROTEZIONI

Per potere utilizzare in sicurezza l'energia elettrica sono inseriti nell'impianto degli organi di manovra e dei sistemi di protezione.

Gli **organi di manovra** devono consentire il funzionamento dell'impianto in condizioni normali. Essi sono costituiti dagli interruttori e dai sezionatori,

- gli **interruttori** sono in grado di **aprire e chiudere un circuito a carico**;
- i **sezionatori** sono in grado di **aprire e chiudere un circuito a vuoto**.

Gli **organi di protezione** devono intervenire, in caso di guasto, per proteggere i dispositivi elettrici (protezione dalle sovracorrenti e dalle sovratensioni) e le persone (protezione dai contatti diretti od indiretti). Essi sono costituiti da:

- **interruttori automatici** (interruttori comandati automaticamente da un dispositivo che prende il nome di **relè**).
- **fusibili**;
- **scaricatori di tensione**;
- **impianto di terra**.



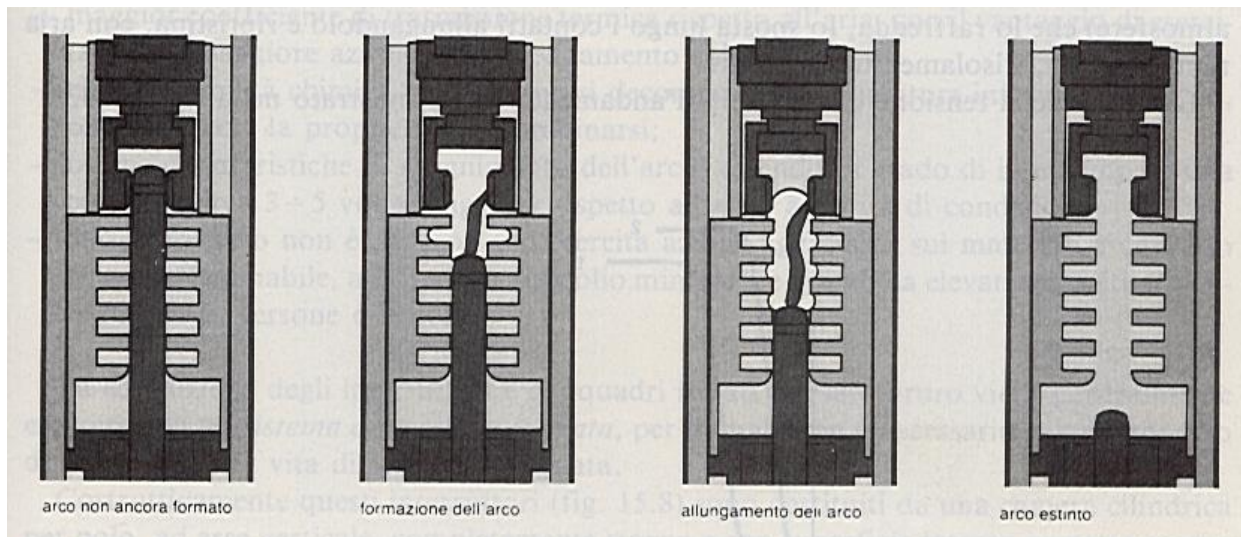
Simboli dell'interruttore manuale (a) ed automatico (b).

INTERRUTTORI

Un interruttore è generalmente realizzato mediante due elettrodi: uno fisso ed uno mobile.

- Nella posizione di interruttore chiuso l'elettrodo mobile è pressato contro l'elettrodo fisso.
- Nella posizione di interruttore aperto l'elettrodo mobile è separato dall'elettrodo fisso da uno spessore di materiale isolante

Durante il processo di apertura dell'interruttore, al momento del distacco dell'elettrodo mobile da quello fisso, nasce un arco elettrico ($E = V/d > K =$ rigidità dielettrica del materiale isolante) che si estingue prima che l'elettrodo mobile abbia raggiunto la posizione di fine corsa, corrispondente allo stato di interruttore aperto.



Esempio di
interruttore
in olio per
MT

CARATTERISTICHE DEGLI INTERRUTTORI

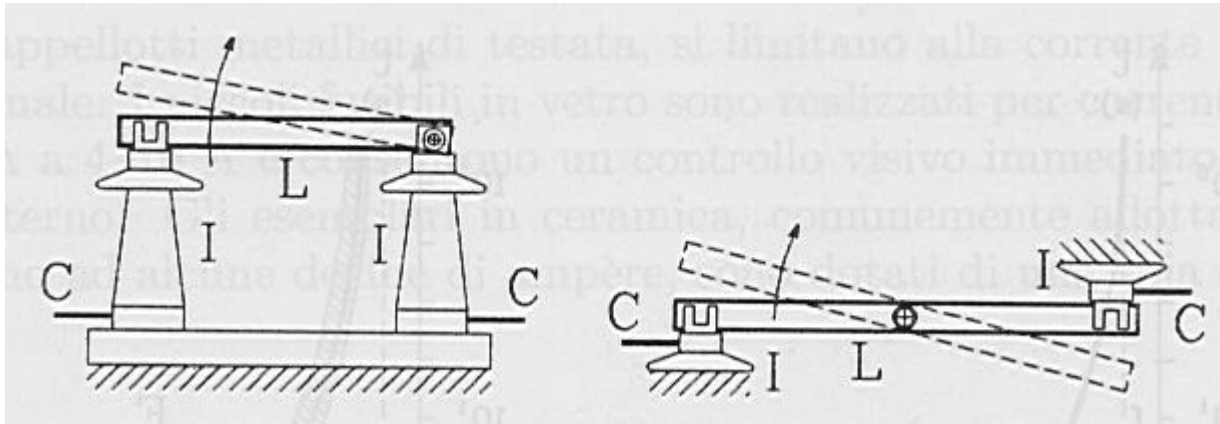
TIPI DI INTERRUTTORI

- Interruttori in olio
- Interruttori ad aria compressa
- Interruttori ad esafluoruro di zolfo (SF_6)
- Interruttori in aria a deionizzazione magnetica (DEION)
- Interruttori sotto vuoto

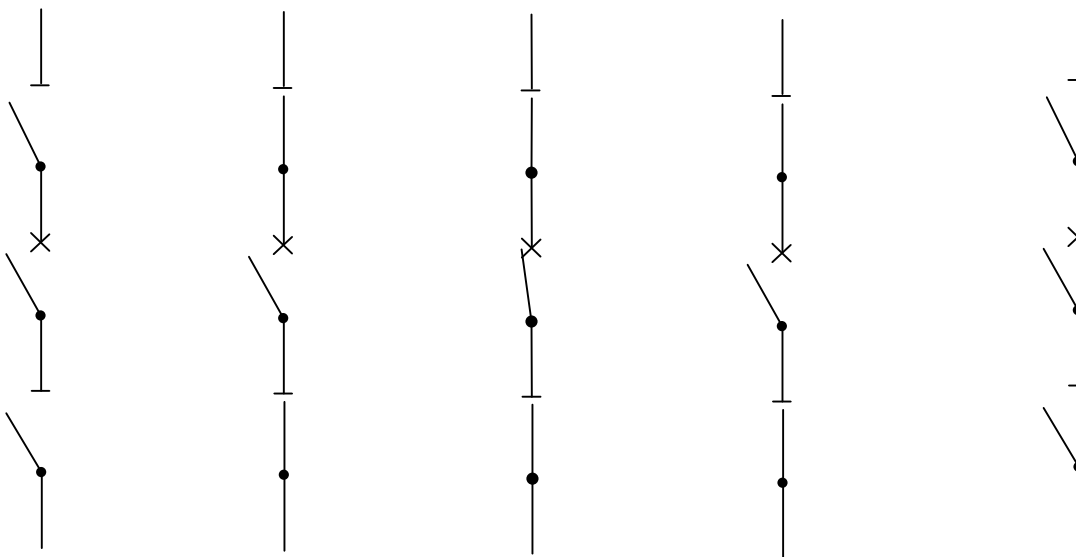
PRINCIPALI CARATTERISTICHE FUNZIONALI DEGLI INTERRUTTORI

- **Tensione nominale**: tensione che l'interruttore è in grado di sostenere indefinitamente nella posizione di interruttore aperto.
- **Corrente nominale**: corrente che l'interruttore è in grado di sostenere indefinitamente nella posizione di interruttore chiuso.
- **Potere di interruzione**: massima corrente (valore efficace se in corrente alternata) che l'interruttore è in grado di interrompere

SEZIONATORI



I sezionatori sono destinati ad interrompere la continuità elettrica per le sole linee a vuoto. Pertanto sono sempre inseriti a monte e a valle di un interruttore. I loro contatti, spesso del tipo a coltello, sono generalmente visibili e forniscono, in tal modo, una sorta di assicurazione visiva sullo stato di apertura della linea.

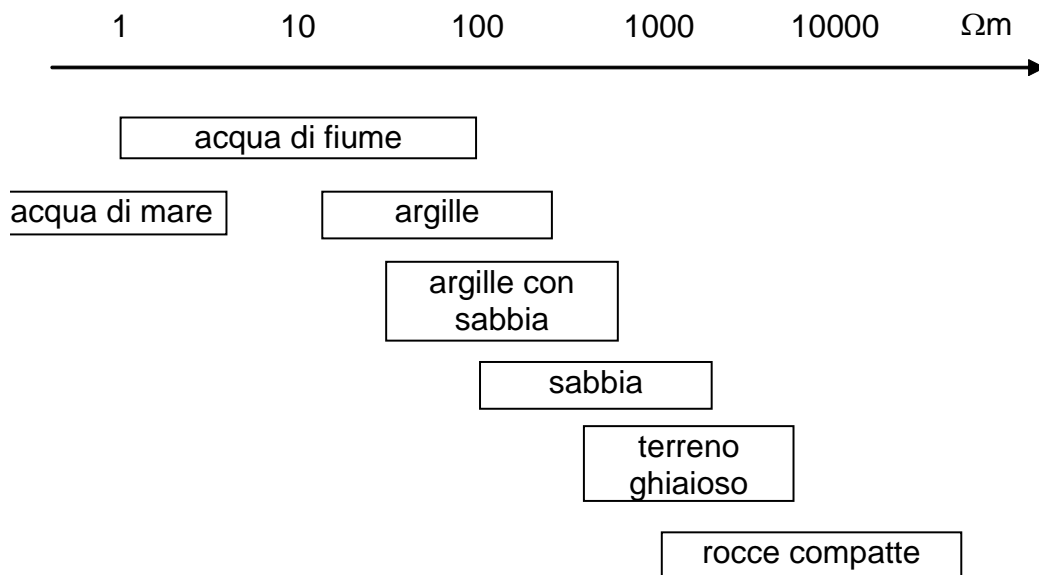


circuito aperto chiusura sezionatori chiusura interruttore apertura interruttore apertura sezionatori

II TERRENO

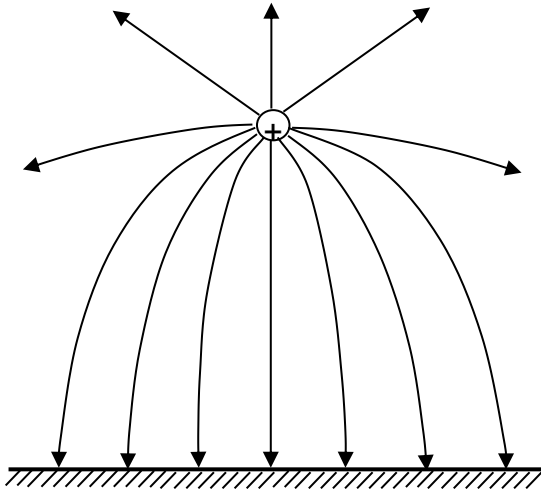
Nello studio del funzionamento degli impianti elettrici è indispensabile considerare la presenza del terreno.

Il terreno si comporta come un “conduttore” in grado di assorbire o cedere qualsiasi quantità di carica senza modificare il suo potenziale.

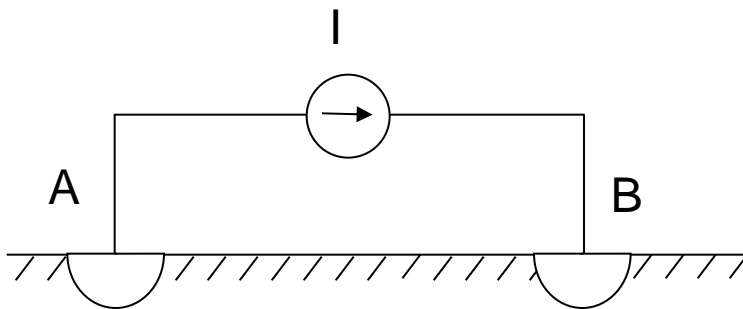


Valori indicativi della resistività elettrica di alcuni tipi di terreno

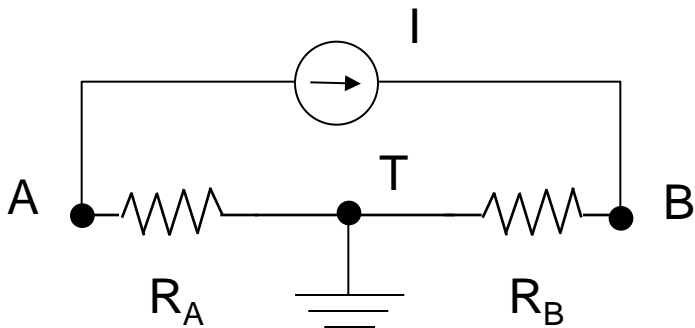
EFFETTI DEL TERRENO



La presenza del terreno modifica il percorso delle linee di campo elettrico sotto una linea aerea

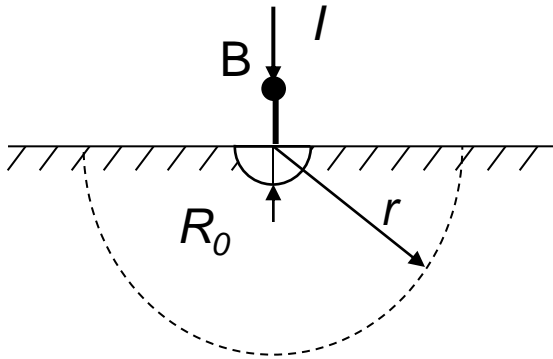


La presenza del terreno permette il passaggio della corrente elettrica tra due dispersori di terra



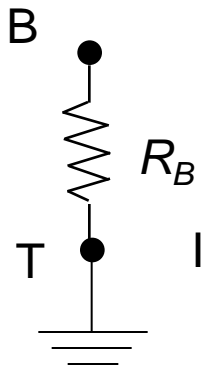
Il nodo T rappresenta un punto nel terreno posto ad infinita distanza da tutti i dispersori di terra dove il potenziale elettrico assume sempre il valore zero qualunque sia la corrente I che circola nei dispersori.

CALCOLO DELLA RESISTENZA DI TERRA



Si consideri un dispersore emisferico di raggio R_0 che disperda in un terreno omogeneo, di conducibilità σ , una corrente I . La legge di variazione del potenziale elettrico è:

$$V(\mathbf{r}) = \frac{I}{2\pi\sigma} \frac{1}{\|\mathbf{r}\|}$$



Il potenziale elettrico è massimo in corrispondenza della superficie del dispersore e si annulla asintoticamente all'infinito. La resistenza di terra R_B del dispersore assume quindi il valore:

$$R_B = \frac{I}{2\pi\sigma R_0}$$

Per realizzare valori piccoli della resistenza di terra è molto importante disporre attorno al dispersore un terreno avente una buona conducibilità elettrica

PROTEZIONE DALLE SOVRATENSIONI

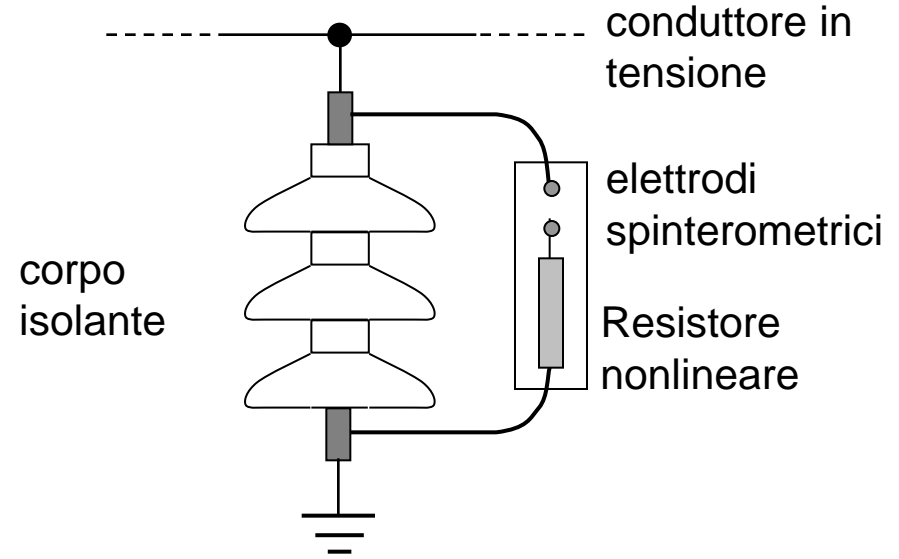
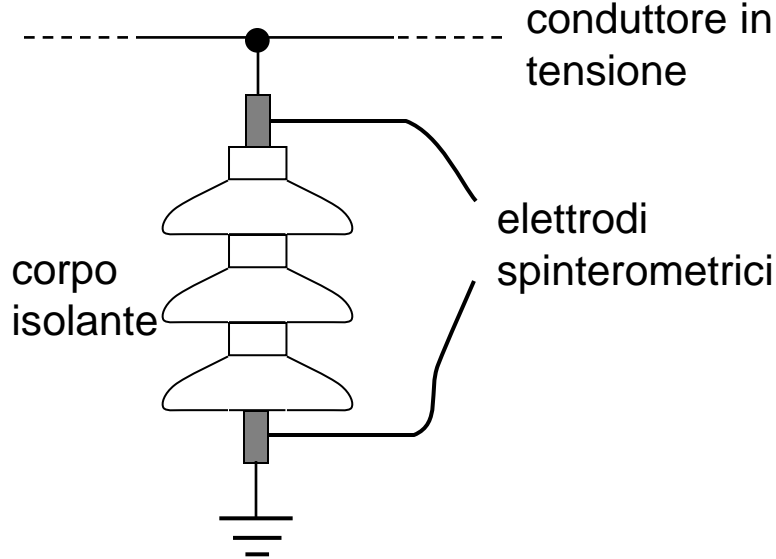
Le sovratensioni (valore di tensione superiore a quello nominale) si distinguono in:

- sovratensioni **di origine atmosferica**, legate ai fulmini che possono colpire direttamente le apparecchiature elettriche o essere a loro trasmessi dalle linee aeree; hanno forma impulsiva unidirezionale (fenomeni molto rapidi $\tau \cong 1 \mu\text{s}$);
- sovratensioni **interne**, originate da manovre effettuate nell'esercizio dell'impianto (per esempio apertura di circuiti induttivi, fenomeni lenti $\tau \cong 1 \text{ ms}$).

La protezione dalle sovratensioni viene ottenuta:

- **in via preventiva** costruendo gli isolamenti e provando i componenti con una tensione (tensione d'isolamento nominale) maggiore di quella nominale.
- mediante **inserzione di scaricatori** a monte delle apparecchiature da proteggere (per le sovratensioni di origine atmosferica)

SCARICATORI DI TENSIONI



- Nella versione spinterometrica, sono costituiti da due elettrodi affacciati posti ad una certa distanza: uno di essi fa capo alla linea da proteggere mentre l'altro è collegato direttamente a terra.
- Quando la tensione di linea supera la rigidità dielettrica dell'aria interposta fra gli elettrodi, si verifica un arco elettrico, che costituisce la via preferenziale attraverso la quale si scarica la sovratensione: la distanza fra le punte dipende dal valore della tensione per la quale si desidera che avvenga l'innesco dell'arco.
- Gli scaricatori *a resistenza* non lineare sono realizzati ponendo in serie uno scaricatore spinterometrico con una resistenza non lineare allo scopo di mantenere praticamente costante la tensione ai capi della protezione.

PROTEZIONE DALLE SOVRACORRENTI

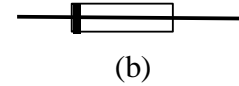
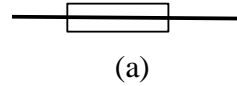
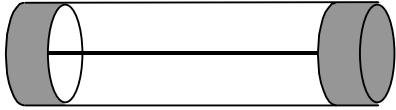
Le sovracorrenti (valore di corrente superiore a quello nominale) si generano a causa di:

- **Guasti** (cortocircuiti parziali o totali di avvolgimenti o parti di impianto); tali sovracorrenti permangono per un tempo infinito fino a quando non si interrompe il circuito.
- **Manovre** effettuate nell'esercizio dell'impianto (apertura e chiusura di interruttori); tali sovracorrenti hanno una durata limitata nel tempo e si estinguono naturalmente con le costanti di tempo tipiche dei circuiti in cui si manifestano.

La protezione dalle sovracorrenti viene ottenuta mediante:

- **fusibili.**
- **interruttori automatici:** interruttore + relè.

FUSIBILE



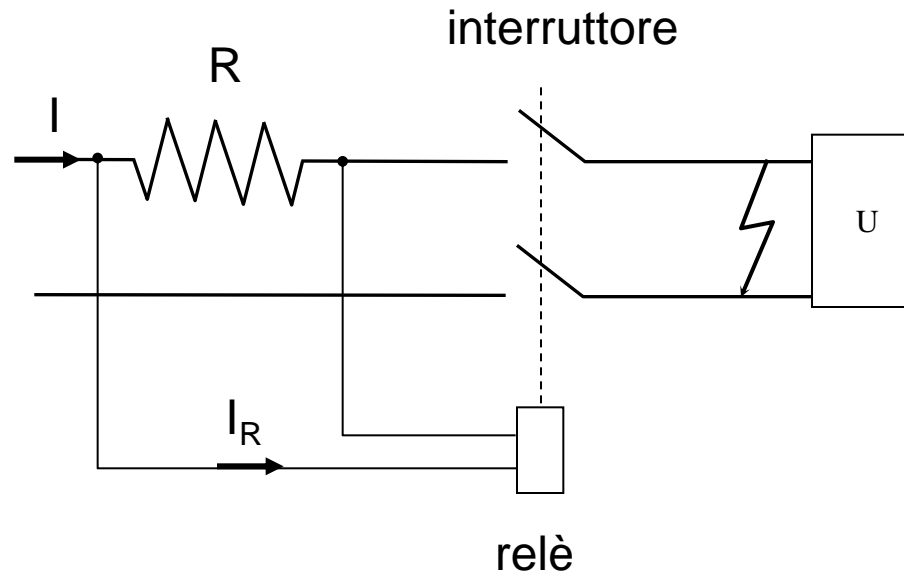
I fusibili sono i più semplici dispositivi di protezione contro le sovracorrenti. Sono costituiti essenzialmente da un corto conduttore in lega a basso punto di fusione alloggiato entro un apposito contenitore. Il simbolo del fusibile è riportato in figura (a); il simbolo di figura (b) si riferisce invece al fusibile dotato di indicazione a tratto spesso dell'estremo che rimane in tensione dopo l'intervento.

Dopo l'intervento, il fusibile va sostituito per ristabilire la connessione elettrica dell'impianto.

I fusibili vengono sempre inseriti a monte dell'impianto seguiti da un interruttore automatico. Il tempo di intervento dei due dispositivi viene scelto in modo che, normalmente, la protezione venga garantita dall'interruttore automatico e quindi sia possibile, ad eliminazione del guasto avvenuta, procedere al ristabilimento delle condizioni operative dell'impianto mediante la semplice chiusura dell'interruttore

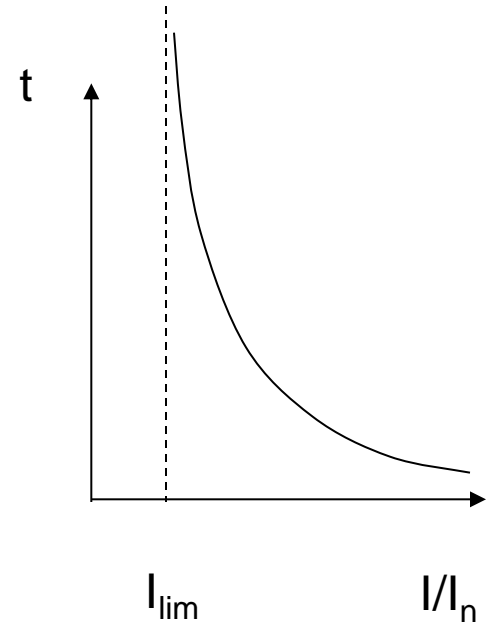
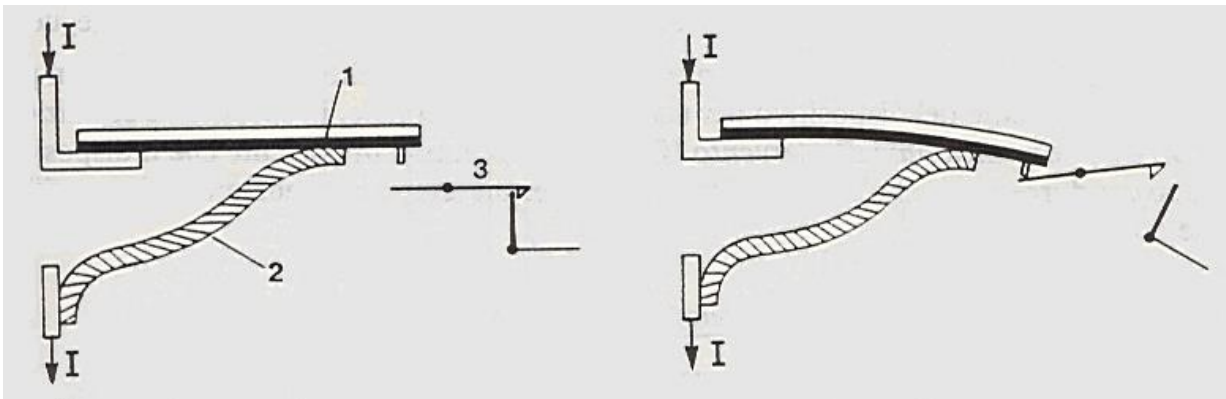
RELÈ AMPEROMETRICO

Gli interruttori automatici utilizzati per la protezione dalle sovracorrenti utilizzano i relè amperometrici, che intervengono quando la corrente supera un valore limite caratteristico del relè.



Il relè amperometrico utilizzato è il relè **magneto-termico**, costituito da un relè **termico** ed un relè **magnetico** con correnti di intervento opportunamente coordinate.

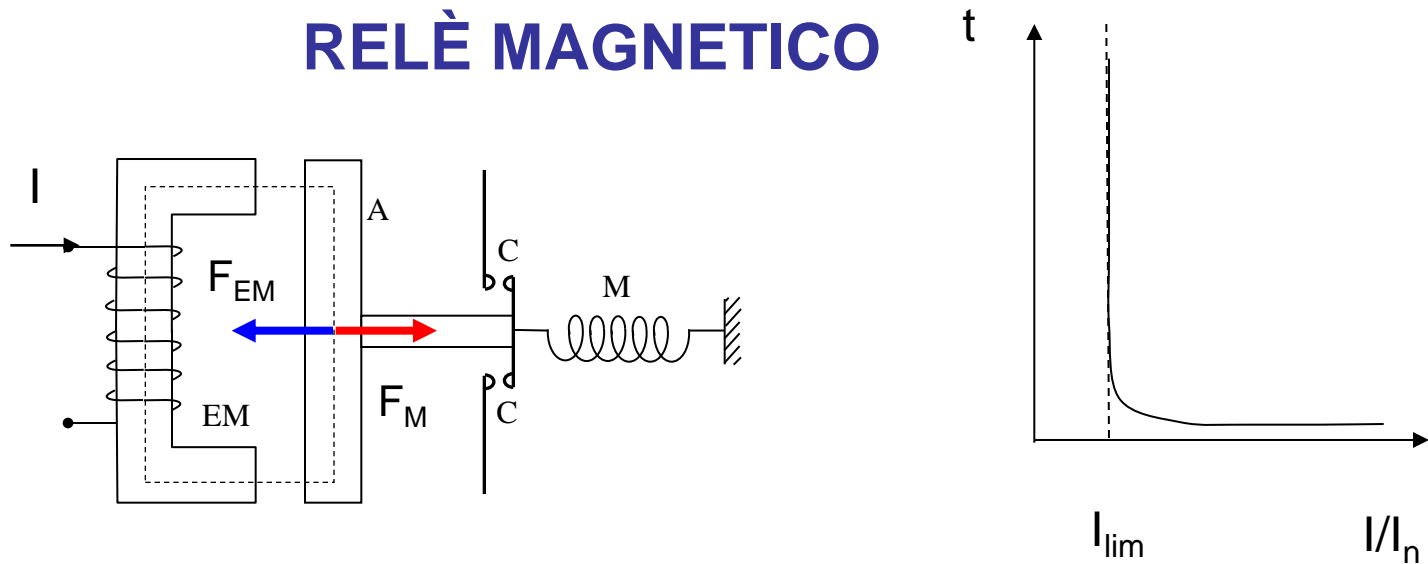
RELÈ TERMICO



Il **relè termico** è costituito da una lamina bimetallica.

- Ad ogni valore della corrente I corrisponde un valore della temperatura di regime della lamina, tanto più alto quanto più elevato è il valore della corrente.
- Tanto più alta è la temperatura della lamina, tanto maggiore è la curvatura della stessa, dovuta al diverso valore del coefficiente di dilatazione termica dei metalli costituenti.
- Quando la temperatura raggiunge il valore di intervento, la curvatura della lamina fa sì che venga attivato il meccanismo di apertura dell'interruttore.
- **Il tempo di intervento è tanto più breve quanto più alta è la sovracorrente.**

RELÈ MAGNETICO

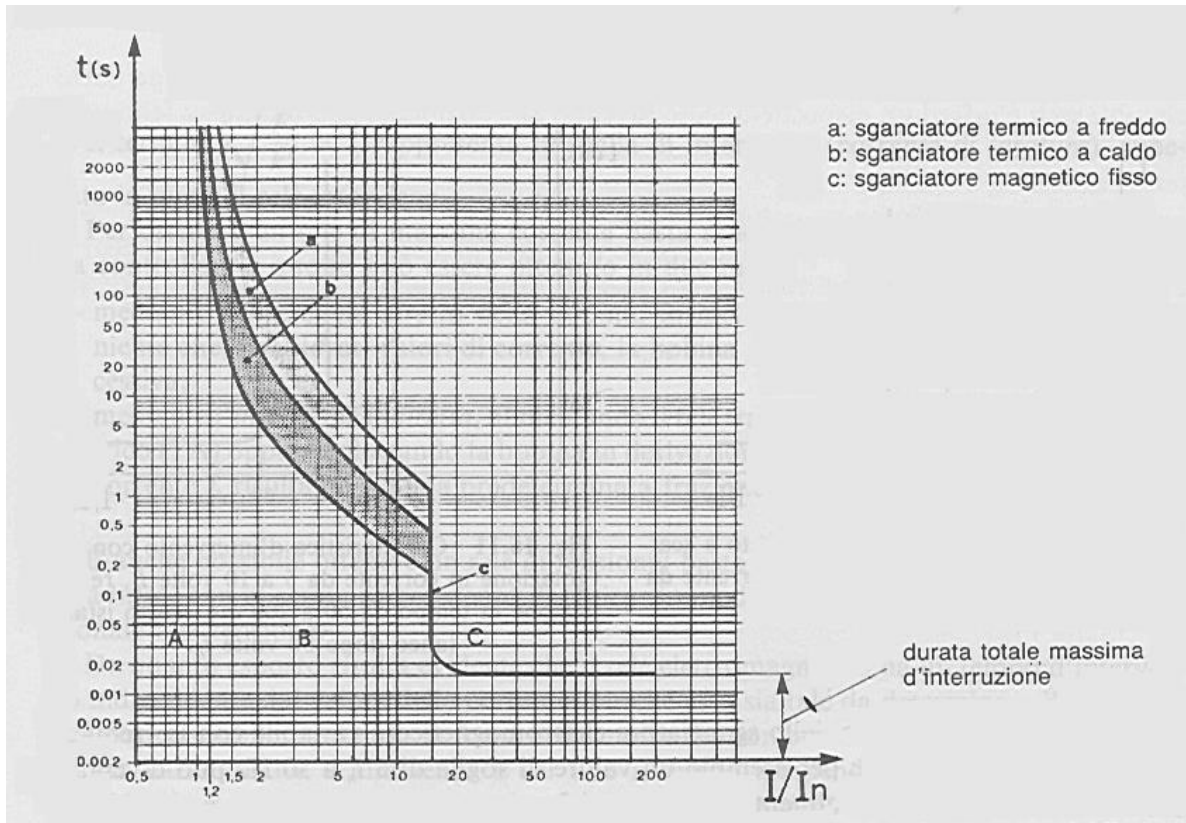


Il **relè magnetico** è costituito da un nucleo di materiale ferromagnetico diviso in una parte fissa (EM) ed una parte mobile (A). La parte mobile è tenuta in posizione da una **forza di natura magnetica** (F_{EM}), proporzionale alla corrente I , ed una **forza di natura meccanica**, dovuta alla molla M.

- Ad ogni valore della corrente I corrisponde una posizione di equilibrio della parte mobile, tanto più prossima alla parte fissa quanto più elevato è il valore della corrente.
- Quando la corrente raggiunge il valore di intervento, la posizione di equilibrio della parte mobile fa sì che venga attivato il meccanismo di apertura dell'interruttore.
- **Il tempo di intervento è molto breve, praticamente indipendente dal valore della corrente.**

RELÈ MAGNETO-TERMICO

Il relè magneto-termico è costituito da un relè magnetico ed un relè termico le cui correnti di intervento sono coordinate in modo che:



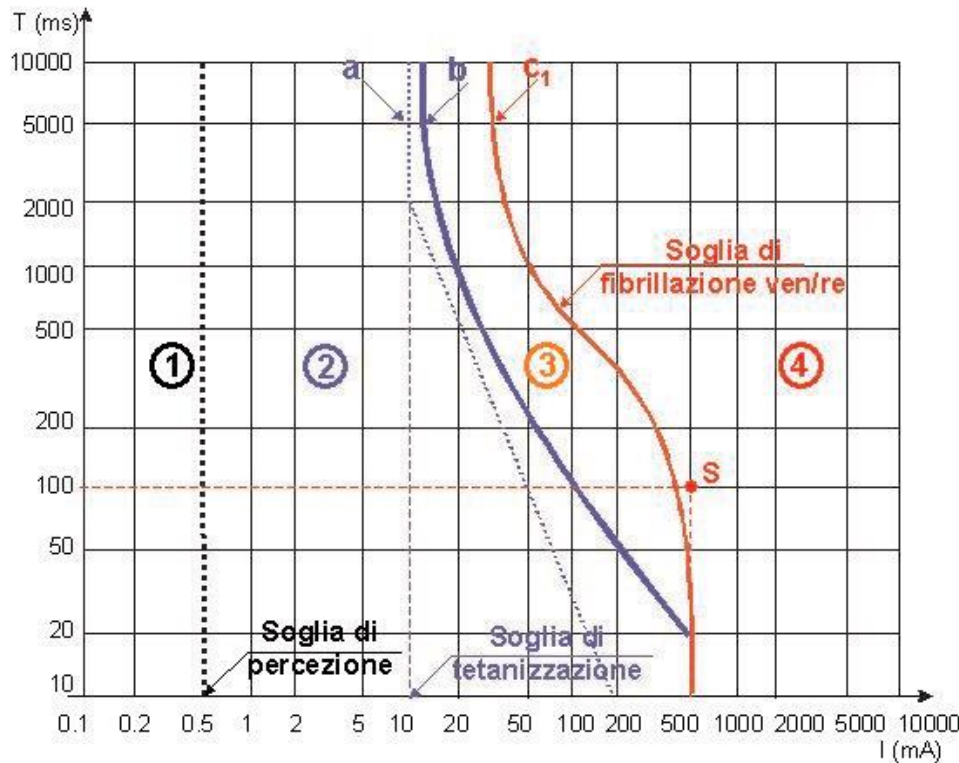
- il relè magnetico interviene rapidamente solo in caso di sovracorrenti di elevata intensità (15-20 volte quella nominale), sicuramente dovute a corto-circuiti presenti nell'impianto.
- Il relè termico interviene con un tempo di intervento inversamente proporzionale alla intensità della sovracorrente in caso di sovracorrenti di modesta entità (sovraccarichi) che possono anche essere dovute a “normali” transitori dell'impianto.

EFFETTI BIOLOGICI DELLA CORRENTE ELETTRICA

La corrente elettrica, attraversando il corpo umano, produce effetti che possono essere dannosi, fino a portare alla morte, a seconda del valore della intensità della corrente, della frequenza e del tempo di contatto:

- **Tetanizzazione dei muscoli:** i muscoli (anche quelli che presiedono alla respirazione) rimangono contratti, indipendentemente dalla volontà della persona.
- **Fibrillazione ventricolare:** il cuore perde la sua capacità di contrarsi ritmicamente e non è più in grado di assicurare la circolazione sanguigna.
- **Ustioni:** il passaggio della corrente elettrica produce dissipazione di energia per effetto Joule e conseguente incremento della temperatura. Le ustioni prodotte risultano particolarmente dannose in quanto interessano anche i tessuti interni del corpo

CURVA DI SICUREZZA CORRENTE-TEMPO

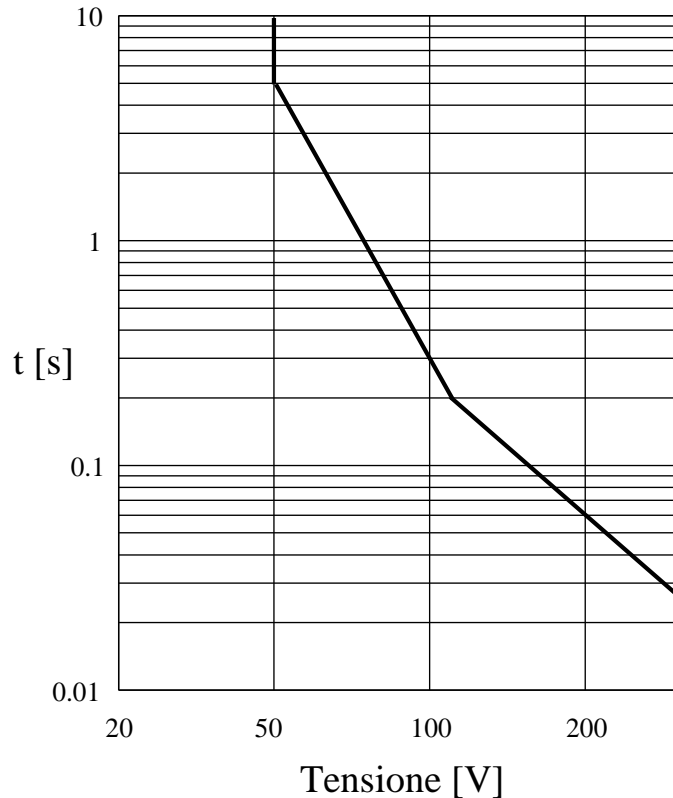


La figura mostra la curva di sicurezza della corrente elettrica in regime di corrente alternata con una frequenza compresa tra 15 e 100 Hz.

- Se la corrente (valore efficace) è inferiore alla soglia di percezione (0.5 mA) il fenomeno non viene percepito
- Se la corrente è inferiore alla soglia di tetanizzazione (10 mA) la persona riesce a sottrarsi volontariamente al contatto senza conseguenze.
- Se la corrente supera la soglia di tetanizzazione il contatto deve essere interrotto da un dispositivo esterno prima di un tempo limite, individuato dalla curva di sicurezza, affinché la persona non abbia conseguenze.

CURVA DI SICUREZZA TENSIONE-TEMPO

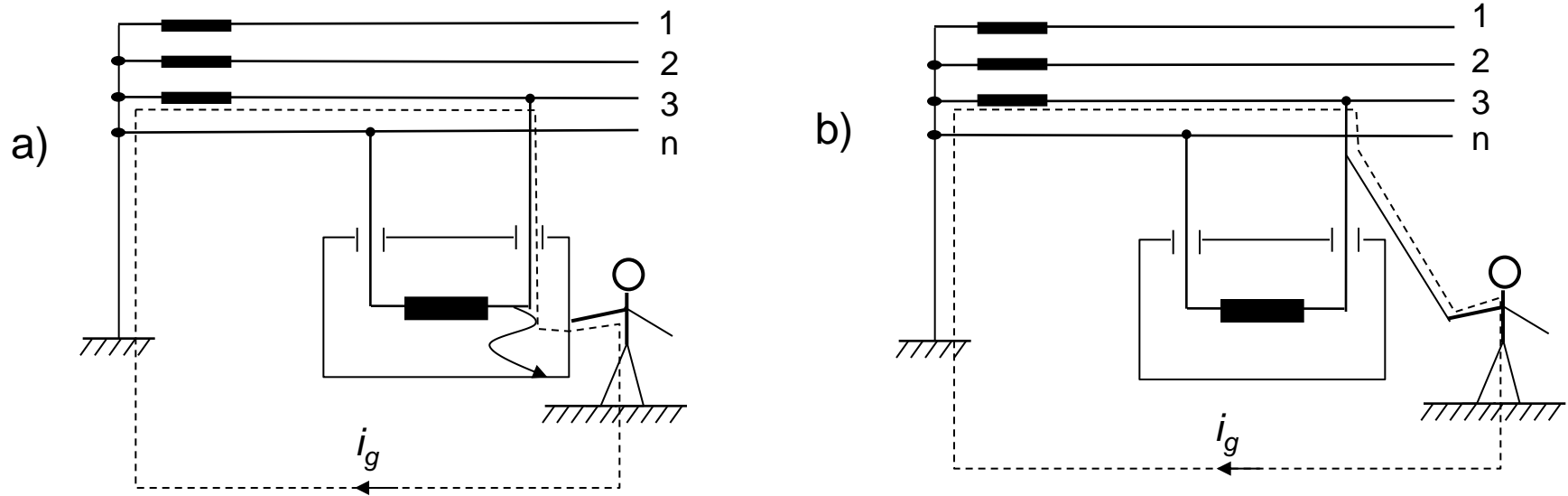
Dalla curva di sicurezza corrente-tempo, tenendo conto dei possibili valori della resistenza del corpo umano e della sua resistenza verso terra, le norme ricavano la curva di sicurezza tensione-tempo.



Curva di sicurezza tensione-tempo per impianti di categoria 1 (CEI 64-8)

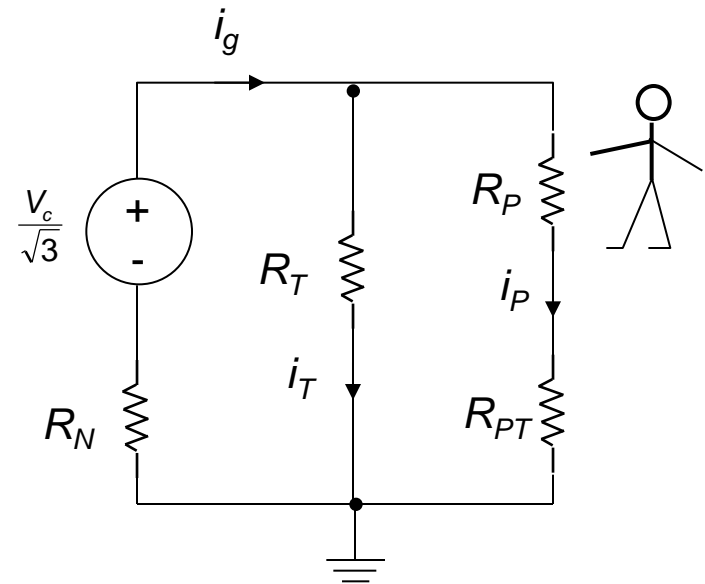
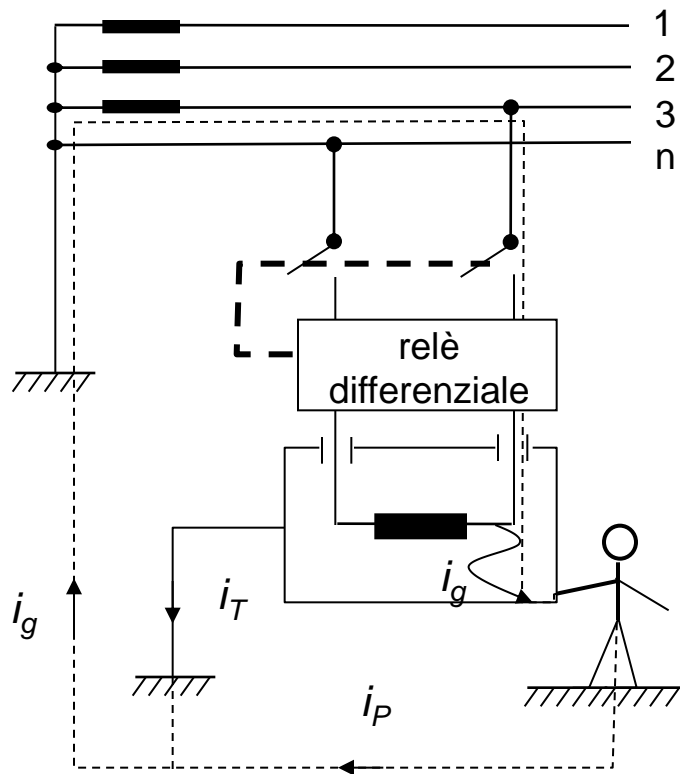
- Se la tensione è inferiore ad un valore limite (50 V in ambiente al chiuso con una valore di resistenza verso terra di 1000 Ω) il contatto può permanere per un tempo infinito senza conseguenze.
- Se la tensione è superiore al valore limite, la sicurezza viene raggiunta solo se l'impianto è in grado di interrompere il contatto prima del tempo limite definito dalla curva di sicurezza.
- Il valore di tensione da utilizzare è il valore di tensione di contatto a vuoto (calcolato supponendo nulla la corrente sulla persona)

SICUREZZA ELETTRICA NEGLI IMPIANTI DI DISTRIBUZIONE DELLA ENERGIA ELETTRICA IN BT



- La distribuzione della energia elettrica in BT viene fatta mediante linee elettriche trifase ($V_c = 400 \text{ V}$) col filo neutro collegato a terra.
- Si definisce **massa** ogni conduttore, accessibile dalle persone, che è separato dai conduttori attivi dall'isolamento principale e che quindi normalmente non è in tensione rispetto al terreno, ma va in tensione quando si rompe l'isolamento principale.
- Il contatto di una persona con un conduttore in tensione, con conseguente elettrocuzione, può avvenire, con una massa, in presenza della rottura dell'isolamento principale (**contatto indiretto**, figura a) o direttamente con i conduttori attivi (**contatto diretto**, figura b)

PROTEZIONE DAI CONTATTI INDIRETTI:

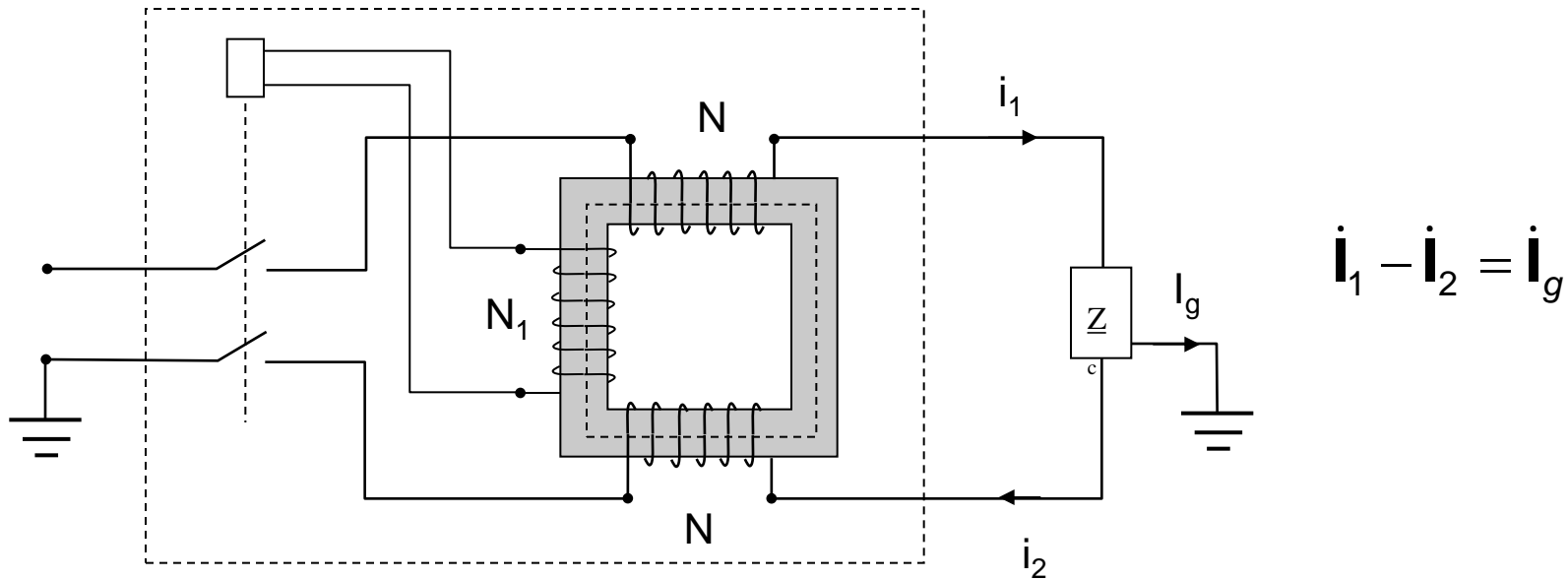


- R_P = resistenza della persona
- R_{PT} = resistenza di terra della persona
- R_N = resistenza di terra del neutro
- R_P ed R_{PT} dipendono dalla persona

La protezione dai contatti indiretti, secondo la norma CEI 64-8, si realizza mediante:

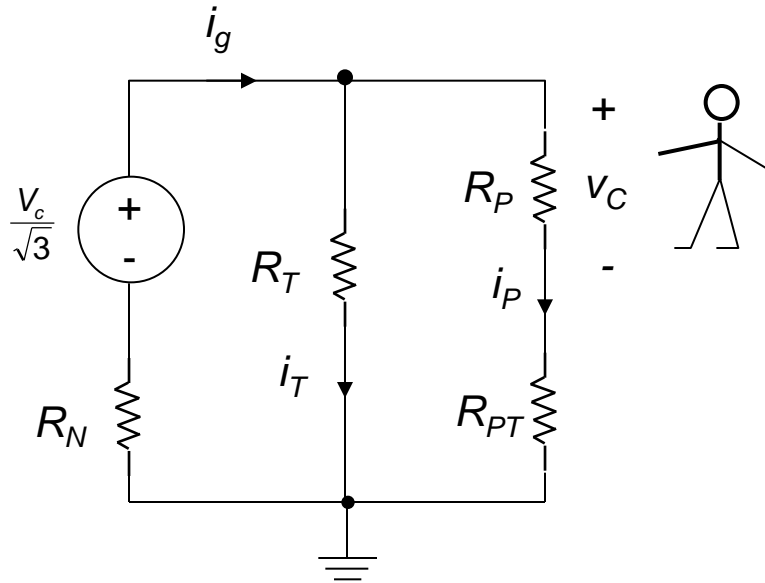
- Installazione di un **interruttore differenziale con corrente di intervento differenziale non superiore a 30 mA**.
- **Collegamento a terra di tutte le masse del sistema**.
- **Coordinamento dei valori della resistenza di terra e della corrente di intervento differenziale dell'interruttore**.

RELÈ DIFFERENZIALE



- In assenza di guasto le correnti i_1 ed i_2 sono uguali e non viene indotta nessuna f.e.m. nell'avvolgimento con N_1 spire.
- In presenza di guasto la differenza fra le correnti i_1 ed i_2 genera una f.e.m. indotta nell'avvolgimento con N_1 spire.
- Se la corrente di guasto supera la **corrente di intervento differenziale dell'interruttore ($I_{\Delta N}$)** la f.e.m. indotta è sufficiente ad azionare il meccanismo di apertura dell'interruttore.
- La caratteristica di intervento del relè differenziale soddisfa la curva di sicurezza tensione tempo.

COORDINAMENTO DELLE PROTEZIONI



V_C = tensione di contatto (valore efficace)

V_{C0} = tensione di contatto a vuoto = tensione di contatto quando la corrente i_p è nulla ($R_p = \infty$):

$$V_{C0} = R_T I_g$$

Per ogni valore delle resistenze R_p e R_{TP} risulta:

$$V_C \leq V_{C0}$$

Se la corrente di guasto è inferiore alla corrente di intervento differenziale dell'interruttore:

$$I_g \leq I_{\Delta N}$$

Affinché sia garantita la sicurezza, dalla curva di sicurezza tensione-tempo, supponendo un tempo di contatto infinito deve essere:

$$V_{C0} \leq U_L$$

La sicurezza viene quindi garantita se:

$$R_T I_{\Delta N} \leq U_L$$