

# Elementi di impianti elettrici e sicurezza elettrica

[www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm](http://www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm)  
(versione del 31-5-2019)

## Energia elettrica

- La maggior parte dell'energia necessaria alle utenze industriali e civili è fornita sotto forma elettrica
  - ◆ L'energia elettrica può essere trasmessa facilmente a grande distanza, distribuita in modo capillare sul territorio, convertita con elevato rendimento in energia meccanica, luminosa e termica ed è indispensabile in tutte le applicazioni nel campo dell'informatica e delle telecomunicazioni
  - ◆ Il principale inconveniente dell'energia elettrica è rappresentato dal fatto che non è possibile immagazzinarla in quantità industriali, quindi deve essere prodotta nello stesso momento in cui viene richiesta

## Centrali di produzione

- La maggior parte dell'energia elettrica è prodotta mediante conversione elettromeccanica utilizzando alternatori
- Le centrali di produzione si classificano in base all'energia primaria utilizzata
  - ◆ Energia idraulica
    - centrali idroelettriche
    - centrali mareomotrici
  - ◆ Energia termica
    - centrali termoelettriche a combustibile fossile
    - centrali geotermoelettriche
    - centrali termonucleari
  - ◆ Energia eolica
  - ◆ Energia solare
    - centrali fotovoltaiche

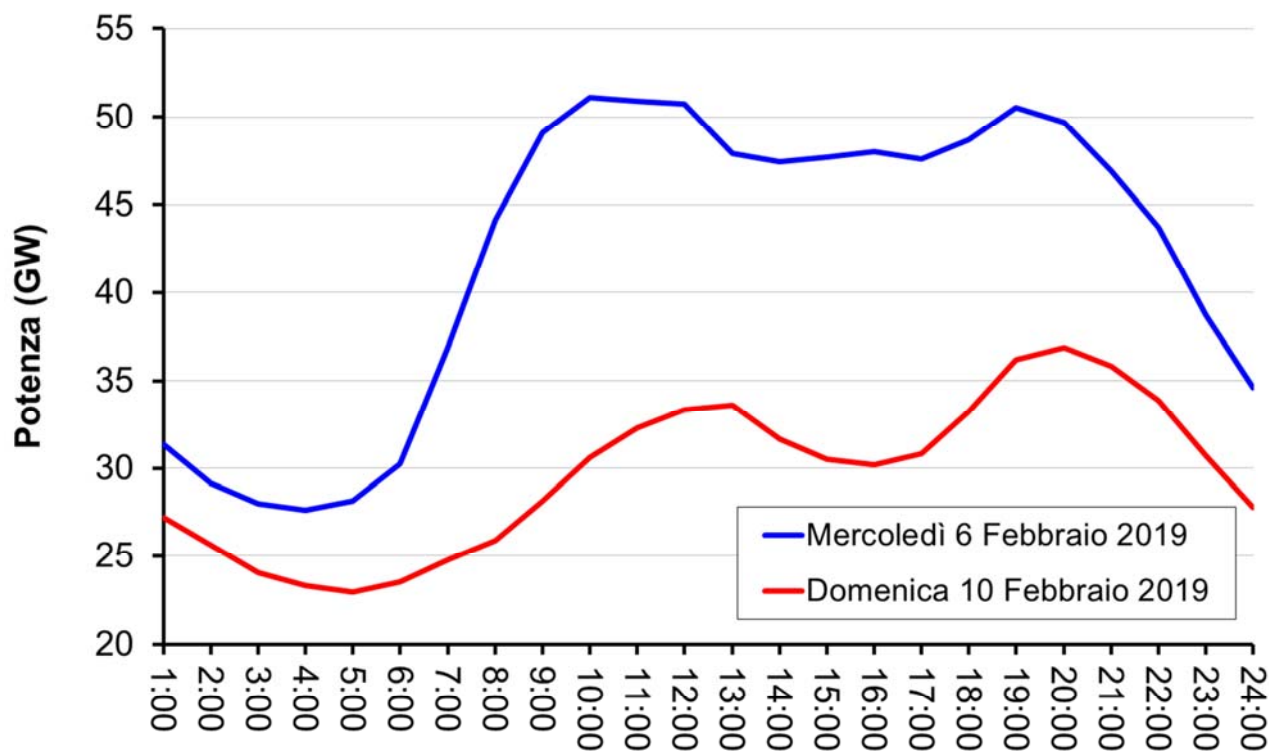
3

## Diagramma di carico

- Il problema di adeguare la potenza generata a quella richiesta viene semplificato collegando tra loro un numero elevato di utenze in modo che l'andamento della richiesta sia più regolare
- ➔ L'insieme delle utenze nazionali può essere visto come un unico carico il cui fabbisogno di energia in funzione del tempo è rappresentato mediante un grafico detto **diagramma di carico**
- L'andamento del diagramma di carico giornaliero varia a seconda della stagione ma presenta un andamento sempre dello stesso tipo nei giorni feriali, e un andamento diverso, con potenze ridotte, il sabato e i giorni festivi
- In ogni caso sono presenti due massimi (punte di carico) e un minimo notturno

4

## Diagramma di carico giornaliero



5

## Dispacciamento

- La *gestione coordinata delle immissioni e dei prelievi di energia elettrica e dei flussi di energia elettrica sulla rete di trasmissione ai fini del mantenimento del bilanciamento del sistema elettrico in condizioni di sicurezza* è detta **dispacciamento**



Centro nazionale di controllo del sistema elettrico italiano

6

## Dispacciamento

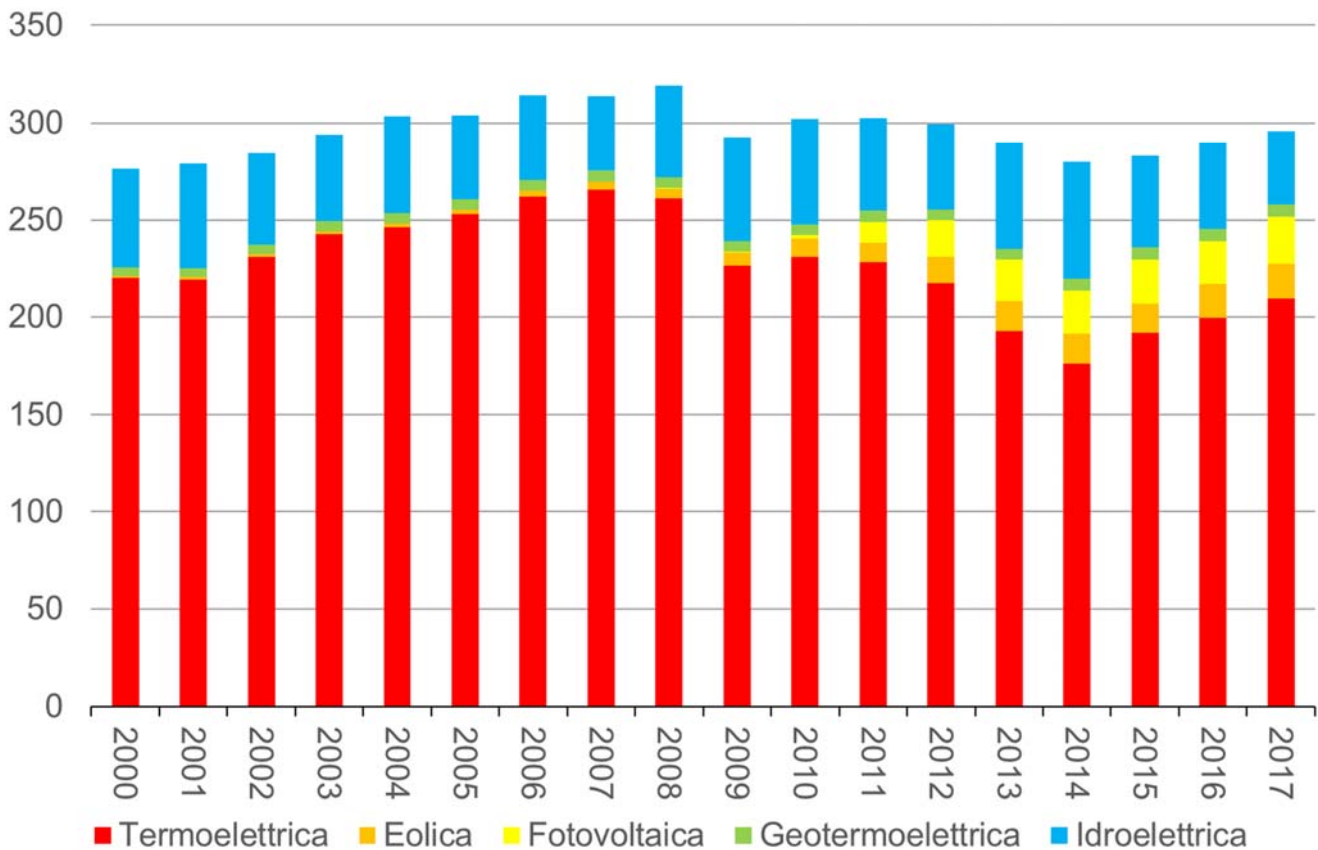
- L'adeguamento della produzione alla richiesta è effettuato facendo funzionare alcune centrali in modo continuativo, un modo da rendere disponibile una potenza base  $P_B$  e facendo intervenire altre centrali per coprire le punte di carico
- Le centrali termoelettriche hanno tempi di avviamento lunghi (dell'ordine delle ore), quindi sono idonee al servizio di base
- Le centrali idroelettriche hanno tempi di avviamento più brevi (dell'ordine dei minuti), quindi sono idonee al servizio di punta
- Nei periodi in cui la potenza richiesta è minore di  $P_B$  si ha un'eccedenza di potenza disponibile
- Questa energia viene utilizzata nelle centrali idroelettriche per pompare l'acqua dai bacini di valle a quelli in quota, costituendo scorte da utilizzare nei momenti di punta

## Richiesta di energia elettrica in Italia – Anno 2017

(Valori in GWh)

<b>Produzione netta</b>	
• Idroelettrica	37 556.7
• Termoelettrica tradizionale	200 305.3
• Geotermoelettrica	5 821.5
• Eolica	17 556.3
• Fotovoltaica	24 016.8
<b>Produzione netta totale</b>	<b>285 265.7</b>
Importazione	37 760.7
Consumo pompaggi	2 478.2
<b>Richiesta di energia elettrica</b>	<b>320 548.2</b>

## Produzione di energia elettrica in Italia (TWh)



9

## Sistema elettrico nazionale

- Gli elementi di un sistema elettrico nazionale sono
  - ◆ **centrali di produzione**, in cui viene generata l'energia elettrica
  - ◆ **linee elettriche di potenza**, che collegano interconnettono le centrali, i nodi intermedi del sistema e le utenze finali
  - ◆ **stazioni e cabine di trasformazione**, disposte nei nodi intermedi, che interconnettono le diverse sezioni del sistema
  - ◆ **utenze**
- Il sistema elettrico ha una struttura gerarchica ed è costituito dall'unione di sottosistemi caratterizzati da diverse
  - ◆ estensioni territoriali
  - ◆ strutture topologiche
  - ◆ tensioni nominali

# Livelli di tensione nei sistemi elettrici

*Classificazione di uso corrente dei livelli di tensione*

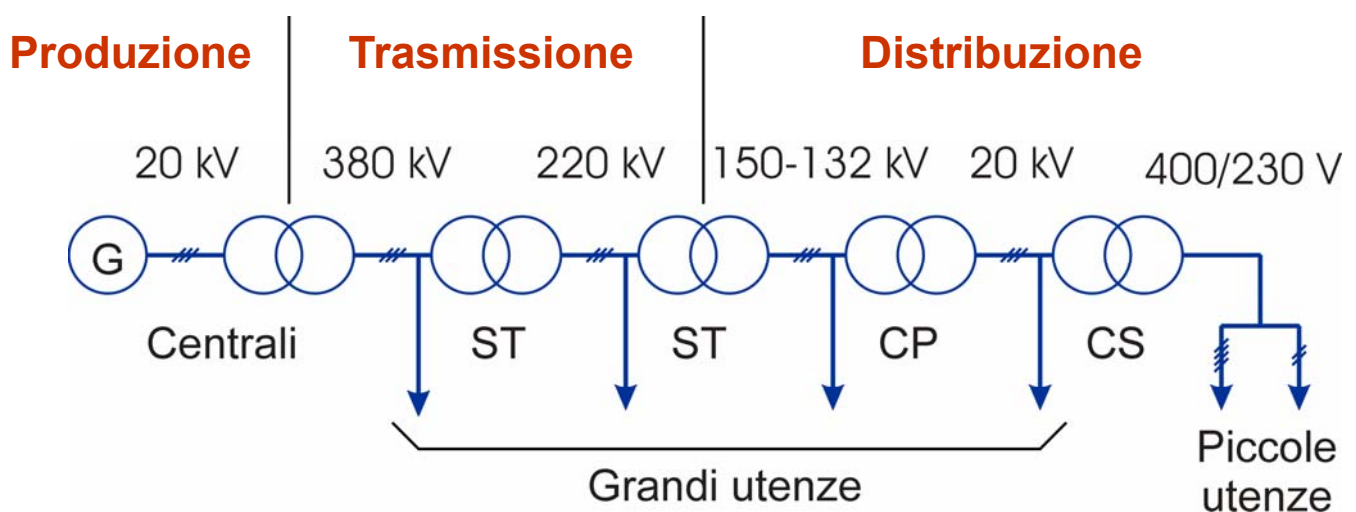
Fascia di tensione	Tensione nominale
bt: bassa tensione	$V_n \leq 1000 \text{ V}$
MT: media tensione	$1000 \text{ V} < V_n \leq 30000 \text{ V}$
AT: alta tensione	$30000 \text{ V} < V_n \leq 150000 \text{ V}$
AAT: altissima tensione	$V_n \geq 150000 \text{ V}$

*Classificazione normativa in funzione dei livelli di tensione*

Categoria	Tensioni alternate	Tensioni continue
0	$V_n \leq 50 \text{ V}$	$V_n \leq 120 \text{ V}$
1	$50 \text{ V} < V_n \leq 1000 \text{ V}$	$120 \text{ V} < V_n \leq 1500 \text{ V}$
2	$1000 \text{ V} < V_n \leq 30000 \text{ V}$	$1500 \text{ V} < V_n \leq 30000 \text{ V}$
3	$V_n \geq 30000 \text{ V}$	$V_n \geq 30000 \text{ V}$

11

# Struttura del sistema elettrico nazionale



G = generatori

ST = stazioni di trasformazione

CP = cabine di trasformazione primarie

CS = cabine di trasformazione secondarie

12

## Produzione

- Nelle centrali di produzione l'energia è generata in prevalenza mediante alternatori trifase con tensioni nominali dell'ordine delle decine di kV e frequenza di 50 Hz
- I generatori delle centrali sono collegati alle linee di trasmissione mediante trasformatori che provvedono a elevare le tensioni, in modo da ridurre le correnti nelle linee
- Le centrali con potenza superiore a 250 MVA sono sempre collegate alle linee a 380 kV o 220 kV
- Per centrali di potenza inferiore è possibile anche il collegamento alle linee a 150-132 kV
- Solo centrali di potenza inferiore a 10 MVA possono essere collegate anche alle linee a media tensione

13

## Trasmissione

- La rete di trasmissione (o trasporto) ha una struttura magliata ed è costituita da linee trifase senza neutro a 380 kV (con estensione nazionale) o 220 kV (con estensione regionale)
- Le linee a 380 kV e 220 kV sono interconnesse mediante autotrasformatori nelle stazioni di trasformazione
- La rete a 380 kV include un collegamento mediante cavo sottomarino a corrente continua (500 kV) tra la penisola italiana e la Sardegna
- La rete a 220 kV include un collegamento mediante cavo sottomarino a corrente continua (200 kV) tra Toscana, Corsica e Sardegna
- La rete italiana è collegata alle reti estere confinanti (Francia, Svizzera, Austria, Slovenia) e mediante un cavo sottomarino a corrente continua, (400 kV) con la Grecia

14

# Trasmissione



Rete a 380 kV  
(31-12-2017)



Rete a 220 kV  
(31-12-2017)

15

# Distribuzione

- Le linee di trasmissione sono collegate nelle stazioni di trasformazione alle linee di distribuzione in AT (150-132 kV) mediante autotrasformatori
- Sono trifase senza neutro e hanno struttura magliata ed estensione regionale
- Le linee di distribuzione a MT (20 kV) sono collegate a trasformatori alimentati dalle linee di distribuzione AT nelle cabine di trasformazione primarie
- Sono trifase senza neutro e hanno struttura ramificata ed estensione comunale o intercomunale
- Le linee di distribuzione BT (400/230 V) sono trifase con neutro e hanno struttura ramificata e distribuzione capillare sul territorio
- Sono collegate con le linee MT nelle cabine di trasformazione secondarie per mezzo di trasformatori con primario a triangolo e secondario a stella con neutro

16

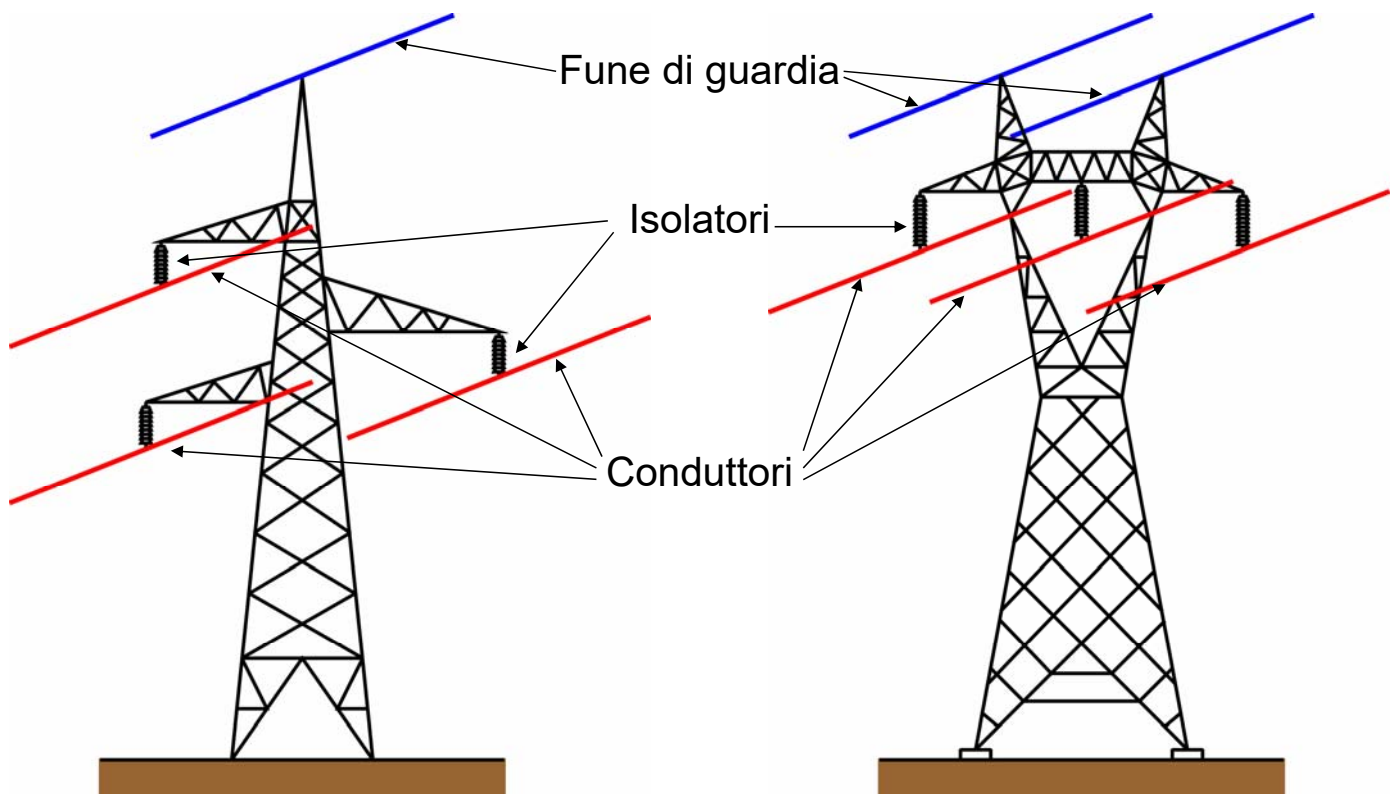


## Linee aeree

- Sono realizzate con conduttori fissati mediante isolatori a pali (per medie e basse tensioni ) o tralicci (per alte tensioni)
- I conduttori hanno struttura a fune e possono essere in rame o alluminio (a parità di resistenza elettrica i conduttori di alluminio hanno una sezione maggiorata del 60% ma peso pari alla metà dei conduttori in rame)
- I conduttori in alluminio in genere sono irrobustiti mediante un'anima interna di acciaio
- Negli elettrodotti di potenza maggiore spesso si utilizzano due terne di conduttori collegati in parallelo tra loro
- Nelle linee ad alta tensione di solito è presente un ulteriore conduttore, detto fune di guardia, che collega le estremità superiori dei tralicci e che costituisce una protezione contro le fulminazioni atmosferiche

17

## Linee aeree



18

## Linee aeree

- In particolari condizioni di pressione e umidità si può verificare un fenomeno detto **effetto corona**, dovuto alla ionizzazione dell'aria in prossimità dei conduttori e che spesso si manifesta come una luminescenza di colore azzurro che circonda un tratto della linea
- Questo fenomeno dà origine a perdite e produce scariche che possono creare disturbi alle comunicazioni radio
- Inoltre nel caso di tensioni elevate può anche innescare scariche elettriche tra i conduttori
- Per contrastare il fenomeno occorre ridurre l'intensità del campo elettrico in prossimità dei conduttori
- A tal fine si utilizzano linee a conduttori multipli (2, 3 o anche più conduttori nel caso di altissime tensioni) in modo da aumentare il diametro efficace dei conduttori

19

## Linee in cavo

- Per la distribuzione a media e bassa tensione si utilizzano le linee aeree solo nelle aree rurali e extraurbane
- Nelle zone urbane si impiegano in prevalenza linee in cavo sistemate in cunicoli sotterranei
- Le linee in cavo sono impiegate, inoltre, nei sistemi elettrici di potenza in continua, utilizzati per i collegamenti sottomarini
- I conduttori sono rivestiti da guaine isolanti (in gomma sintetica, PVC o polietilene)
- Si possono avere più cavi unipolari affiancati oppure cavi multipolari
- I cavi possono essere racchiusi in una calza conduttrice, che ha la funzione di schermo elettrostatico e di protezione meccanica e che viene rivestita, a sua volta da una guaina isolante

20

## Dispositivi di manovra e protezione

- Fanno parte del sistema elettrico anche una serie di dispositivi che
  - ◆ sono impiegati per realizzare manovre richieste dalle esigenze dell'utenza nelle condizioni di esercizio ordinario
    - es. inserimento o disinserimento di generatori, carichi o intere sezioni di rete
  - ◆ intervengono in modo automatico in caso di condizioni di funzionamento anomalo, che possono costituire pericolo per le cose o le persone

21

## Sovratensioni

- Nei sistemi elettrici possono manifestarsi tensioni superiori ai valori nominali
  - **Sovratensioni per cause interne**, dovute a
    - ◆ manovre sugli impianti (apertura o chiusura di interruttori)
    - ◆ rapida variazione del carico
    - ◆ fenomeni di risonanza
    - ◆ contatti accidentali di un impianto con un altro avente tensione di esercizio maggiore
- queste sovratensioni possono superare di alcune volte i valori nominali e hanno tempi caratteristici di evoluzione dell'ordine dei millisecondi

22

# Sovratensioni

- **Sovratensioni per cause esterne**, dovute generalmente a fenomeni di origine atmosferica
  - ◆ fenomeni di induzione elettrostatica o elettromagnetica
  - ◆ fulminazioni dirette

i valori delle sovratensioni sono molto maggiori dei valori nominali, i tempi di salita sono dell'ordine dei microsecondi e quelli di discesa dell'ordine delle decine di microsecondi
- Le sovratensioni possono causare il danneggiamento degli isolamenti
  - ◆ nel caso di isolanti solidi si hanno danni irreversibili
  - ◆ il cedimento degli isolamenti può provocare cortocircuiti e quindi sovracorrenti

23

# Sovracorrenti

- Si hanno sovracorrenti quando si manifestano correnti di intensità maggiore del valore nominale
- **Sovracorrenti dovute a sovraccarico transitorio**
  - ◆ possono verificarsi in seguito a manovre
  - ◆ hanno durata limitata e sono prive di conseguenze dannose
  - ◆ esempi:
    - avviamento di un motore asincrono: corrente 6-8 volte maggiore della corrente nominale per una durata di pochi secondi
    - inserzione di un trasformatore a vuoto: correnti 30-50 volte maggiori delle correnti nominali per una durata di pochi periodi
  - ➔ in questi casi non è opportuno che intervengano dispositivi di protezione

24

## Sovracorrenti

### ● Sovracorrenti dovute a sovraccarico permanente

- ◆ si verificano quando la potenza assorbita dagli utilizzatori supera quella per cui è stato dimensionato l'impianto
- ◆ in questo caso si ha un progressivo surriscaldamento dei conduttori
- ◆ i danni prodotti aumentano con le intensità delle sovracorrenti e con la loro durata (dal semplice deterioramento degli isolanti fino all'incendio)
- ➔ è quindi necessario che i dispositivi di protezione provvedano ad aprire il circuito quando le sovracorrenti permangono per tempi lunghi (in relazione alle loro intensità)

25

## Sovracorrenti

### ● Sovracorrenti di cortocircuito

- ◆ si verificano nel caso di collegamenti accidentali tra elementi non equipotenziali che danno origine a maglie a bassa impedenza (**anelli di guasto**)
- ◆ in queste condizioni si hanno correnti persistenti con valori molto grandi rispetto a quelli nominali
  - si ha un rapido aumento della temperatura di conduttori che può causarne la fusione
  - nelle macchine elettriche gli avvolgimenti possono essere sottoposti a notevoli sollecitazioni elettrodinamiche, che possono causarne il cedimento meccanico
- ➔ In questo caso è necessario che i dispositivi di protezione provvedano ad aprire rapidamente il circuito
- ➔ *Per proteggere i circuiti elettrici dalle sovracorrenti sono necessari dispositivi che intervengano in modo selettivo, in base alla durata e all'intensità delle sovracorrenti*

26

## Apertura di un circuito elettrico

- Si possono distinguere diversi casi di apertura
  - ◆ **a vuoto**: con corrente nulla
  - ◆ **a carico**: con corrente non superiore a quella nominale
  - ◆ **con sovracorrente**: con corrente maggiore della nominale
- Esistono vari dispositivi di apertura, che si distinguono per la capacità di eseguire l'apertura in una o più delle condizioni elencate
- L'apertura reversibile è effettuata separando due elettrodi inizialmente a contatto
  - ◆ tra i due elettrodi si frappone un fluido dielettrico, che deve essere in grado di sopportare la tensione tra gli elettrodi a circuito aperto
  - ◆ nei dispositivi di potenza gli elettrodi e il fluido dielettrico sono racchiusi all'interno di una camera di interdizione
- Per l'apertura con sovracorrente si utilizzano anche dispositivi non reversibili (fusibili)

27

## Arco elettrico

- Quando l'apertura avviene in presenza di corrente, in genere si ha l'innescò di un **arco elettrico** che tende a conservare la continuità della corrente
  - ◆ prima del distacco degli elettrodi la superficie di contatto si riduce a pochi punti in cui si concentra la corrente, causando surriscaldamenti localizzati
  - ◆ dopo il distacco in questi punti si producono elettroni liberi per effetto termoionico
  - ◆ questi elettroni sono accelerati dal forte campo elettrico tra gli elettrodi ancora vicini e, urtando le molecole del fluido dielettrico posto tra gli elettrodi, ne provocano la ionizzazione
  - ◆ in questo modo si può avere conduzione di corrente attraverso il fluido e quindi si produce un arco elettrico
- Se l'arco permane troppo a lungo può provocare erosione degli elettrodi

28

## Estinzione dell'arco elettrico

- Gli interruttori sono costruiti in modo da provvedere all'estinzione dell'arco elettrico e prevenirne il reinnesco
- Per questo si utilizzano vari accorgimenti quali
  - ◆ l'**allungamento dell'arco**, (ed eventuale frazionamento in archi più piccoli) in modo da aumentare il valore della tensione necessaria per il sostentamento dell'arco
  - ◆ la **deionizzazione dell'ambiente**, cioè sostituzione del dielettrico con altro non ionizzato, in modo da ripristinare la rigidità dielettrica tra gli elettrodi
  - ◆ il **raffreddamento degli elettrodi**, per ridurre l'emissione termoionica
- In fase di chiusura l'arco si estingue automaticamente al contatto, per evitare inconvenienti è sufficiente che la manovra sia rapida

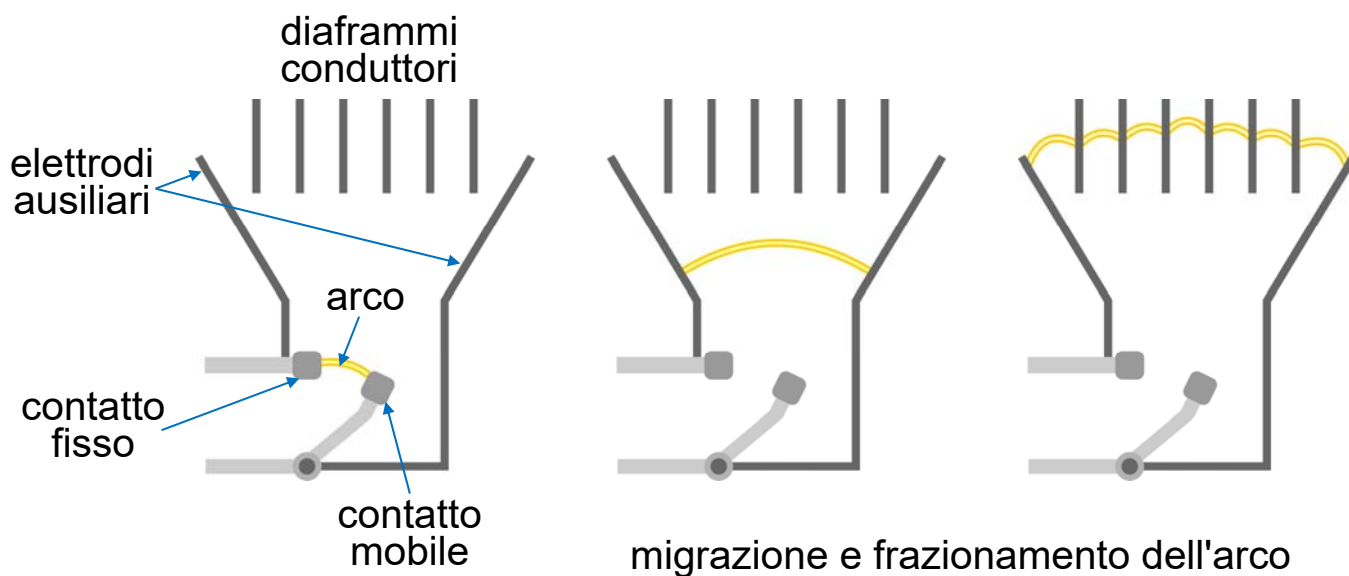
29

## Allungamento dell'arco

- E' una tecnica utilizzata prevalentemente negli interruttori a bassa tensione
- L'allungamento è ottenuto mediante l'allontanamento degli elettrodi, che deve avvenire molto rapidamente
  - ◆ a tal fine si utilizzano meccanismi a scatto con molle precaricate
- Agli elettrodi principali si aggiungono due elettrodi ausiliari opportunamente sagomati in modo da favorire la migrazione dell'arco e il suo progressivo allungamento
- Inoltre si possono utilizzare dei diaframmi conduttori per frazionare l'arco in più archi minori, aumentando ulteriormente la tensione necessaria per il mantenimento dell'arco

30

## Frazionamento dell'arco

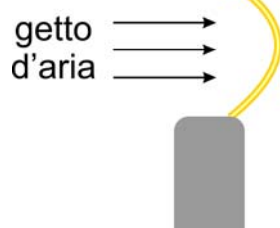


31

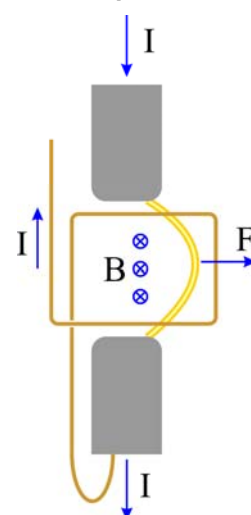
## Soffiatura

- Per favorire l'allungamento e la migrazione dell'arco, si può investire l'arco con un getto d'aria (**soffiatura pneumatica**)
- In alternativa, è possibile utilizzare la forza elettrodinamica esercitata sull'arco da un campo magnetico (**soffiatura magnetica**)
- Generalmente il campo magnetico viene prodotto mediante un solenoide percorso dalla stessa corrente che si deve interrompere

**soffiatura  
pneumatica**



**soffiatura  
magnetica**



32



# Deionizzazione

- La deionizzazione è utilizzata prevalentemente per gli interruttori a media ed alta tensione:
- **Interruttori a volume d'olio ridotto**
  - ◆ utilizzano come dielettrico l'olio minerale
  - ◆ a causa del riscaldamento dell'olio dovuto all'arco si formano bolle di gas a cui è dovuta la circolazione dell'olio, che provvede al ripristino della rigidità dielettrica
- **Interruttori ad esafluoruro di zolfo (SF<sub>6</sub>)**
  - ◆ All'apertura dell'interruttore si apre anche una valvola che immette SF<sub>6</sub> ad alta pressione nella camera di interdizione, provocando lo spegnimento dell'arco
  - ◆ l'SF<sub>6</sub> oltre ad avere elevata rigidità dielettrica ha anche la proprietà, se scaldato ad alta temperatura, di decomporre in zolfo e fluoro
  - ◆ quest'ultimo tende a catturare gli elettroni liberi a cui è dovuta principalmente la conduzione nell'arco

33

# Dispositivi di interruzione

	Azionamento manuale	Azionamento automatico
<b>Interruttore di potenza</b>		
<b>Interruttore di manovra</b>		
<b>Sezionatore</b>		
<b>Contattore (teleruttore)</b>		

34

## Interruttori di potenza

- Sono dispositivi che possono eseguire l'apertura e la chiusura a carico anche in condizioni di cortocircuito
- I parametri principali che caratterizzano un interruttore sono:
  - ◆ **Tensione nominale di esercizio**  $V_n$ : tensione a cui sono riferite le prestazioni del dispositivo
  - ◆ **Corrente nominale**  $I_n$ : massima corrente di regime permanente che l'interruttore può condurre quando è chiuso
  - ◆ **Potere nominale di interruzione**  $I_{in}$ : massima corrente che l'interruttore è in grado di interrompere (si ha sempre  $I_{in} > I_n$ )
  - ◆ **Potere nominale di chiusura su cortocircuito**  $I_{cn}$ : massima corrente di cortocircuito sulla quale l'interruttore può essere chiuso

35

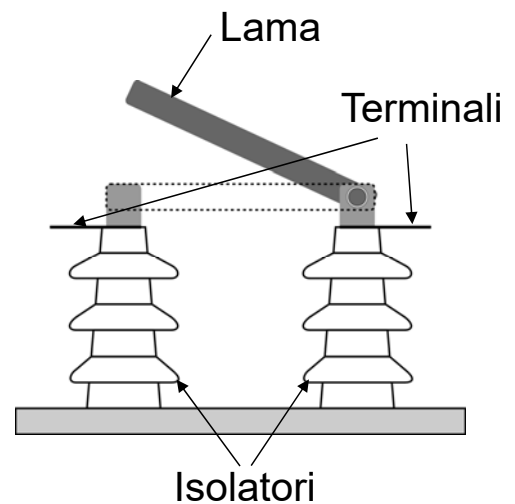
## Interruttori di manovra

- Sono dispositivi che possono eseguire l'apertura e la chiusura a carico con correnti e tensioni che non superano i valori nominali
- Come negli interruttori di potenza, le manovre devono essere rapide, quindi si utilizzano meccanismi a scatto con molle precaricate
- Un interruttore di manovra è caratterizzato da
  - ◆ **Tensione nominale di esercizio**  $V_n$
  - ◆ **Corrente nominale**  $I_n$ 
    - definite come per gli interruttori di potenza
  - ◆ **Corrente di cortocircuito di breve durata**  $I_{cc}$ : massima corrente che l'interruttore in posizione di chiusura può sopportare per un secondo

36

## Sezionatori

- Sono dispositivi che possono eseguire l'apertura a vuoto (in assenza di corrente) e la chiusura in assenza di tensione tra i terminali
- In genere sono dotati di contatti mobili a lama, la cui posizione fornisce un'indicazione visiva sullo stato di apertura
- Un sezionatore è caratterizzato da
  - ◆ **Tensione nominale di esercizio**  $V_n$
  - ◆ **Corrente nominale**  $I_n$
  - ◆ **Corrente di cortocircuito di breve durata**  $I_{cc}$ 
    - definite come per gli interruttori di manovra



37

## Contattori (o teleruttori)

- Come gli interruttori di manovra, sono dispositivi che possono eseguire l'apertura e la chiusura a carico con correnti e tensioni che non superano i valori nominali
- Hanno un'unica posizione stabile di funzionamento, che di solito corrisponde allo stato di apertura
- Possono permanere nell'altra posizione (di solito di chiusura) solo sotto l'azione di un comando
- Spesso sono azionati in modo automatico (normalmente mediante elettromagneti)

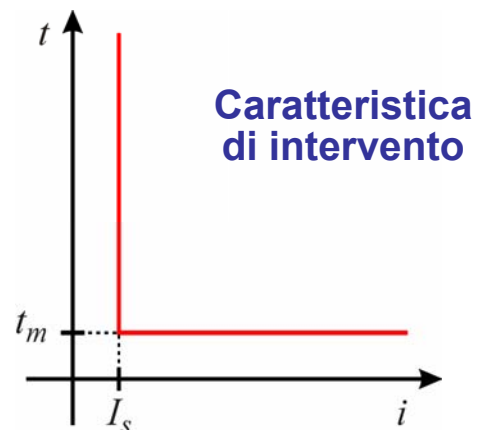
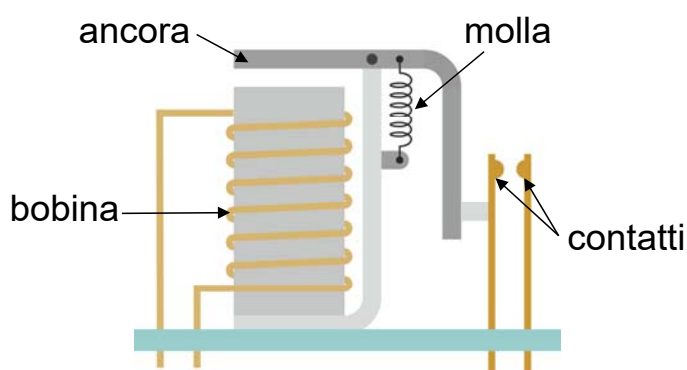
38

# Relè

- Il relè è un dispositivo che permette di azionare automaticamente interruttori o contattori
- I relè possono essere classificati:
  - ◆ in base alla grandezza fisica a cui sono sensibili (**grandezza di comando**):
    - relè voltmetrici, amperometrici, wattmetrici, frequenzimetrici, ecc.
  - ◆ in base al principio di funzionamento:
    - relè elettromagnetici, termici, statici (privi di parti mobili, realizzati mediante dispositivi elettronici) ecc.
- La **caratteristica di intervento** di un relè esprime la relazione tra la grandezza di comando e il tempo di intervento (cioè il tempo necessario per cambiare stato)

39

## Relè elettromagnetico

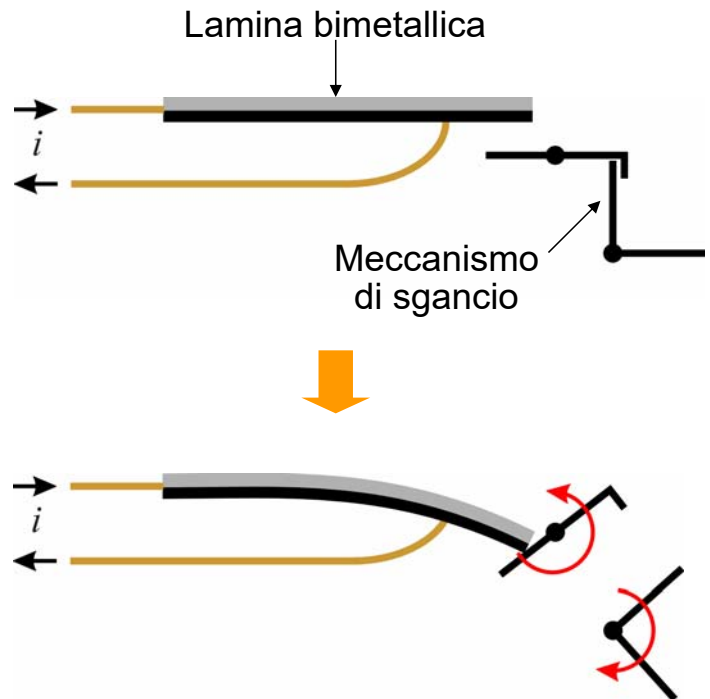


- Sfrutta l'azione esercitata da un solenoide percorso da corrente  $i$  su un'ancora mobile trattenuta da una molla
- Quando la corrente supera il valore di soglia  $I_S$  in corrispondenza del quale la forza dell'elettromagnete è uguale alla forza di richiamo della molla, l'ancora si sposta e aziona un interruttore
- Per  $i > I_S$  il tempo di intervento  $t_m$  dipende solo dall'inerzia meccanica, quindi non varia con  $i$  (per  $i < I_S$  il relè non interviene mai)

40

## Relè termico

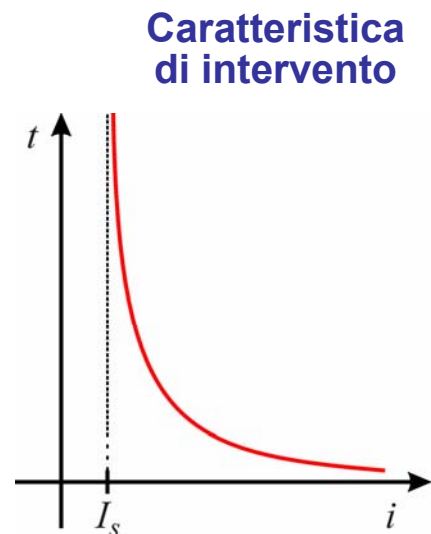
- La corrente  $i$  scorre attraverso una lamina formata da due conduttori con diverso coefficiente di dilatazione termica
- A causa del riscaldamento dovuto all'effetto Joule la lamina si deforma
- La lamina incurvandosi causa l'azionamento di un meccanismo di sgancio e quindi l'apertura di un interruttore



41

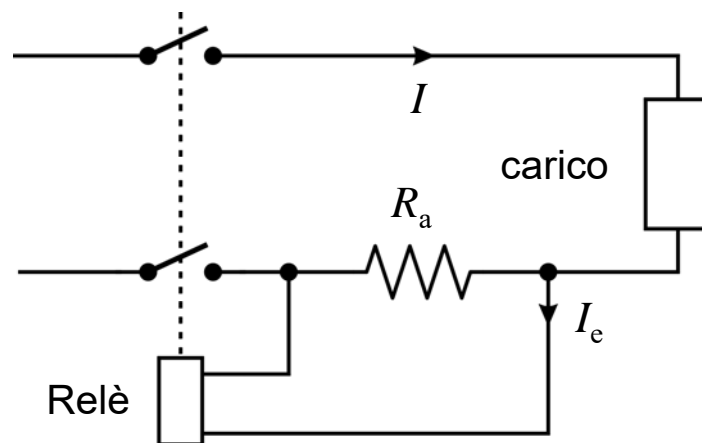
## Relè termico

- Si può dimostrare che, per un dato valore delle corrente  $i$ , la temperatura della lamina aumenta nel tempo con legge esponenziale tendendo ad un valore asintotico che cresce con  $i$
- Per  $i$  minore di un valore di soglia  $I_S$  il valore asintotico è inferiore alla temperatura  $\theta_S$  che provoca l'azionamento del relè
- Per  $i > I_S$  la temperatura cresce sempre più rapidamente, quindi il tempo necessario per raggiungere il valore  $\theta_S$  diviene sempre più breve



42

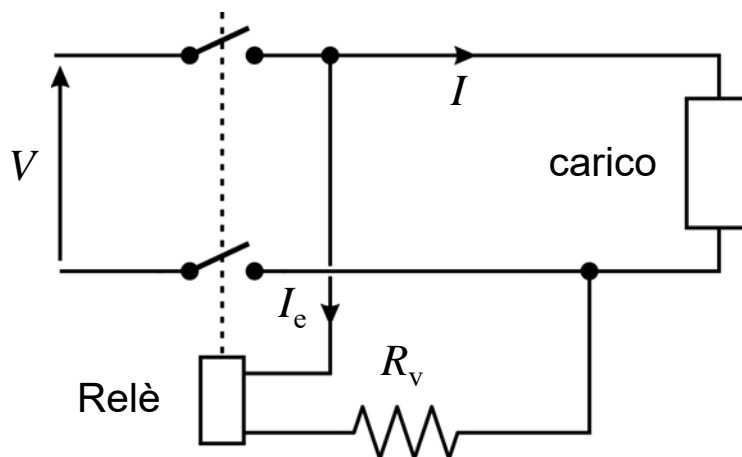
## Interruttore di massima corrente



- Quando la corrente  $I$  supera il valore per cui la corrente  $I_e$  nel relè diviene maggiore della sua corrente di soglia  $I_S$ , il relè provoca l'apertura del circuito
- Il valore massimo di  $I$  viene fissato mediante la resistenza  $R_a$

43

## Interruttore di massima tensione



- Collegando il relè in serie a una resistenza  $R_v$  si fa in modo che la corrente di eccitazione  $I_e$  sia proporzionale alla tensione applicata al carico
- Quando la tensione  $V$  supera un valore di soglia dipendente da  $R_v$  la corrente del relè risulta maggiore di  $I_S$  e il relè provoca l'apertura del circuito

44

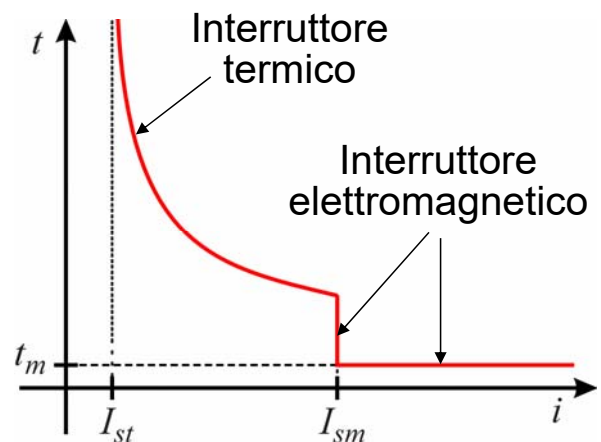
## Interruttore termico

- E' un interruttore di massima corrente realizzato con un relè termico
- Questo tipo di interruttore è particolarmente idoneo alle protezioni contro i sovraccarichi dato che non interviene nel caso di sovracorrenti anche relativamente intense ma di breve durata mentre interviene quando la sovracorrente si protrae nel tempo
- A causa del tempo di intervento relativamente elevato non è idoneo alla protezione contro i cortocircuiti, per la quale sono più adatti gli interruttori con relè elettromagnetici

45

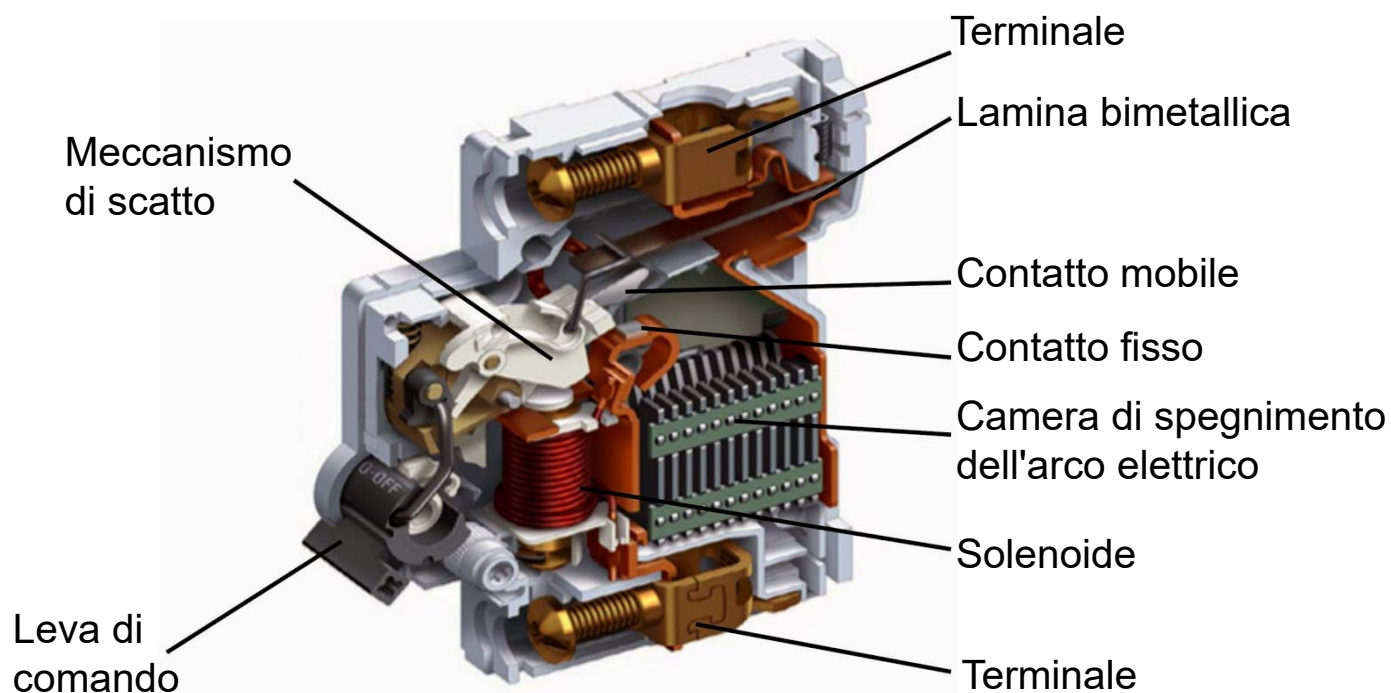
## Interruttore magnetotermico

- E' ottenuto combinando un relè termico e un relè elettromagnetico
- Per valori non troppo elevati della corrente interviene il relè termico, che agisce in tempo inversamente proporzionali all'intensità della sovracorrente
- Per valori più elevati e, in particolare, in caso di cortocircuito interviene il relè elettromagnetico
- Complessivamente si ottiene un sistema idoneo a garantire protezione sia contro i sovraccarichi sia contro i cortocircuiti



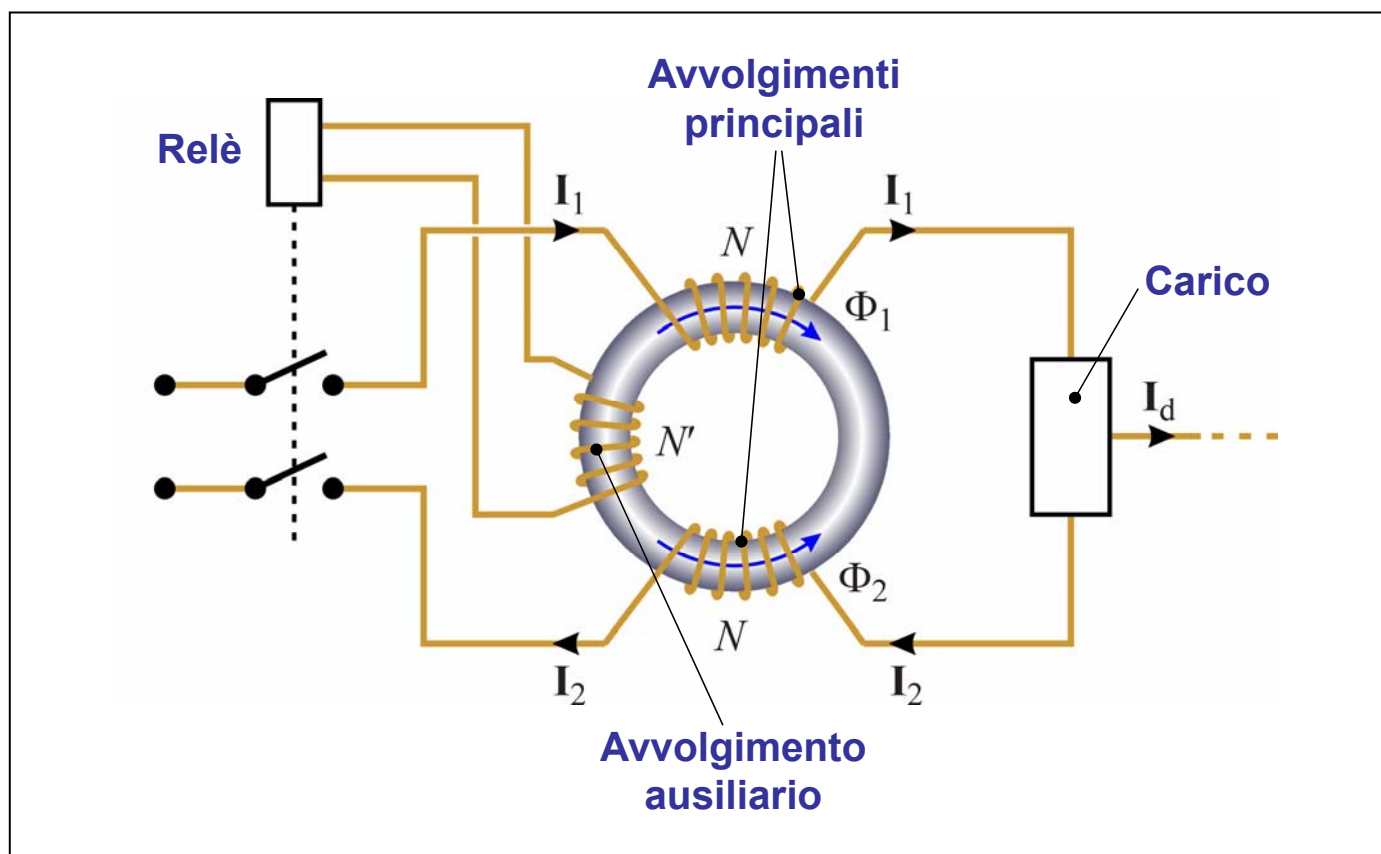
46

## Interruttore magnetotermico



47

## Interruttore differenziale



48



## Interruttore differenziale

- E' costituito da un nucleo ferromagnetico toroidale su cui sono disposti
  - ◆ due avvolgimenti principali simmetrici con  $N$  spire percorsi dalla corrente che alimenta il carico
  - ◆ un avvolgimento ausiliario con  $N'$  spire i cui terminali sono collegati alla bobina di un relè
- Se le correnti negli avvolgimenti principali  $I_1$  e  $I_2$  sono uguali, i flussi  $\Phi_1$  e  $\Phi_2$  risultano uguali e opposti
  - ➔ Il flusso concatenato con l'avvolgimento ausiliario è nullo
- Se per un guasto viene derivata una corrente  $I_d$ , le correnti  $I_1$  e  $I_2$  sono diverse e quindi i flussi non si bilanciano
  - ➔ Si hanno un flusso concatenato diverso da zero e una f.e.m. indotta nell'avvolgimento ausiliario
  - ➔ Nell'avvolgimento ausiliario circola una corrente che eccita il relè e provoca il distacco dell'alimentazione

49

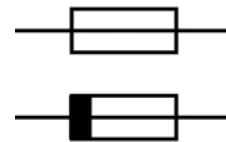
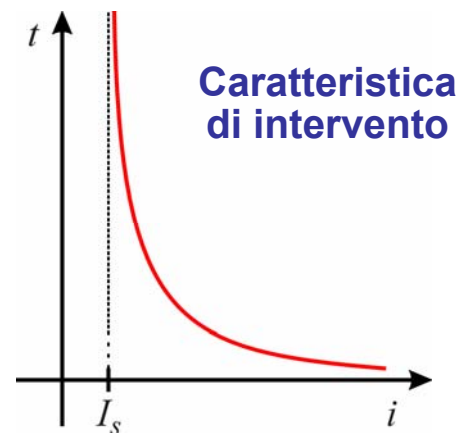
## Interruttore differenziale

- **Corrente differenziale di soglia:** valore minimo  $I_{\Delta s}$  della differenza tra i valori efficaci di  $I_1$  e  $I_2$  in grado di provocare l'attivazione del relè
- I valori tipici di  $I_{\Delta s}$  sono compresi tra 10 mA e 1 A
  - ◆ i valori minori (10 – 30 mA) sono impiegati per la protezione delle persone
  - ◆ i valori più elevati si utilizzano per la protezione degli impianti
- Esistono anche versioni trifase a 3 o 4 fili
  - ◆ si ha un numero di avvolgimenti principali pari al numero dei fili
  - ◆ la somma delle correnti negli avvolgimenti è nulla in condizioni normali e diversa da zero in presenza di guasti

50

# Fusibili

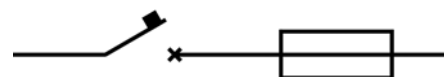
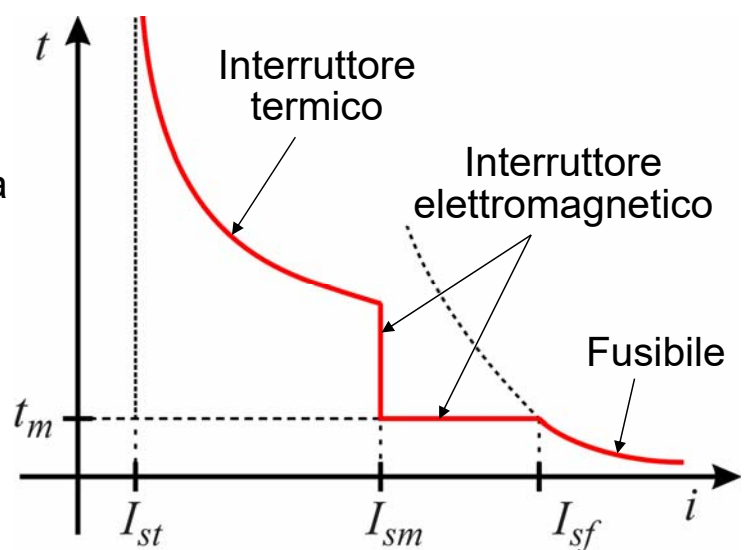
- Un fusibile è costituito da un conduttore in lega a basso punto di fusione alloggiato in un apposito contenitore
- E' un dispositivo che può eseguire l'apertura irreversibile di un circuito
- Il conduttore percorso da corrente si surriscalda e se la corrente supera un valore di soglia  $I_S$  può raggiungere la temperatura di fusione
- La caratteristica di intervento è analoga a quella di un relè termico
- Esistono anche fusibili in cui, per ridurre il tempo di intervento, il conduttore è caricato con una molla che ne forza la rottura prima che sia completato il processo di fusione



51

## Coordinamento di interruttore magnetotermico e fusibile

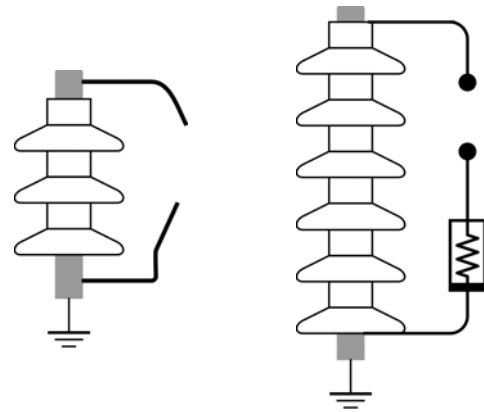
- Spesso in serie a un interruttore magnetotermico si collega un fusibile che interviene nel caso di correnti molto elevate
- In particolare il fusibile può intervenire nei casi in cui la corrente di cortocircuito supera il potere di interruzione dell'interruttore magnetotermico



52

## Scaricatori

- Sono dispositivi di protezione contro sovratensioni transitorie
- Il tipo più comune (**scaricatore spinterometrico**) è costituito da due elettrodi separati da un'opportuna distanza
- Un elettrodo è collegato alla linea da proteggere mentre l'altro è collegato a massa
- Quando la tensione della linea supera la rigidità dielettrica dell'aria tra gli elettrodi si innesca un arco elettrico che provoca un'immediata riduzione della tensione
- Per tensioni elevate si utilizzano **scaricatori a resistenza non lineare** ottenuti collegando in serie uno scaricatore spinterometrico con un resistore a ossido di zinco che, grazie alla sua non linearità mantiene la tensione praticamente costante, indipendentemente dalla corrente



53

## Effetti della corrente elettrica sul corpo umano

- Il passaggio della corrente elettrica attraverso il corpo umano (**elettrocuzione**) può avere effetti ampiamente variabili, dipendenti dal valore della corrente, dalla frequenza dalla durata del contatto, dalla zona del corpo in cui il fenomeno ha luogo e dalla sensibilità individuale
- La soglia di sensibilità, cioè il valore della corrente al di sotto del quale non si percepisce nessun effetto, per la corrente alternata a frequenza industriale (50 Hz) e per un contatto sulle dita della mano è di circa 0.5 mA
- Di seguito sono indicati brevemente gli effetti che si verificano all'aumentare del valore efficace della corrente (nel caso di correnti alternate con frequenza di 50 Hz)

54

## Effetti della corrente elettrica sul corpo umano

### ● Tetanizzazione

- ◆ I muscoli sottoposti a corrente alternata sono soggetti ad una serie di stimoli che danno luogo ad una contrazione permanente (simile a quella prodotta dal tetano)
- ◆ In queste condizioni, l'infortunato che ha impugnato un oggetto sotto tensione può non essere in grado di lasciarlo a causa delle contrazioni muscolari
- ◆ Il valore massimo di corrente che consente di lasciare la presa è detto corrente di rilascio (il suo valore è di circa 10-15 mA )

55

## Effetti della corrente elettrica sul corpo umano

### ● Blocco respiratorio

- ◆ Correnti di intensità sufficientemente elevata (>30 mA) che interessino la regione toracica possono causare la tetanizzazione dei muscoli coinvolti nella respirazione e quindi causare l'arresto respiratorio e, se il blocco dura più di 2-3 minuti, danni cerebrali irreversibili

### ● Fibrillazione ventricolare

- ◆ Correnti di intensità superiore a circa 75 mA che interessino la regione toracica possono causare la perdita del coordinamento dei muscoli cardiaci che si contraggono in modo disordinato

### ● Arresto cardiaco

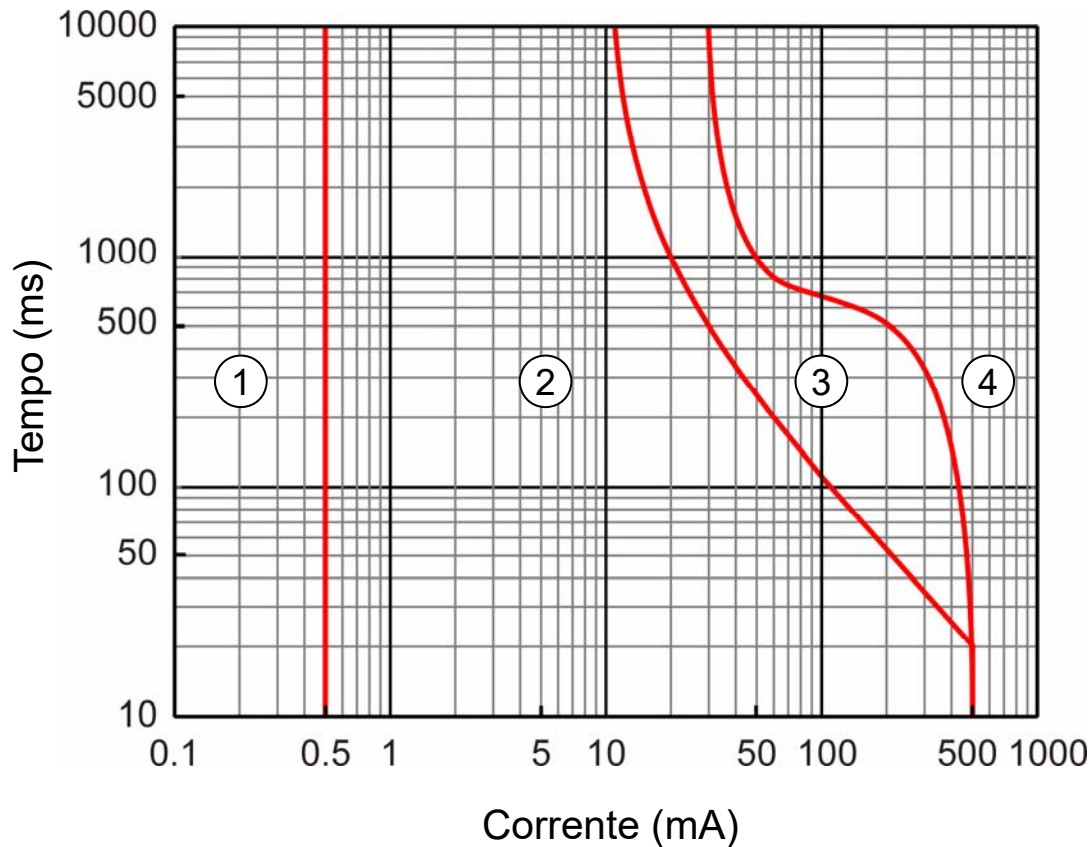
- ◆ Correnti di intensità maggiore possono provocare l'arresto cardiaco

### ● Ustioni

- ◆ Il passaggio della corrente causa sviluppo di calore per effetto Joule
- ◆ Densità di correnti di pochi mA/mm<sup>2</sup> possono essere sufficienti a causare gravi ustioni

56

## Curva di sicurezza corrente-tempo



57

## Curva di sicurezza corrente-tempo

- Gli effetti, e quindi la pericolosità, della corrente dipendono oltre che dall'intensità anche dal tempo di permanenza
- I limiti di pericolosità convenzionali della corrente sono possono essere rappresentati mediante un diagramma corrente-tempo nel quale si distinguono 4 regioni
  - ◆ **Regione 1:** nessuna reazione al passaggio della corrente
  - ◆ **Regione 2:** nessun effetto pericoloso
  - ◆ **Regione 3:** effetti generalmente reversibili, che possono diventare pericolosi se, a causa della tetanizzazione che impedisce il rilascio, ci si porta nella regione 4
  - ◆ **Regione 4:** probabilità di fibrillazione ventricolare, arresto respiratorio, arresto cardiaco, gravi ustioni

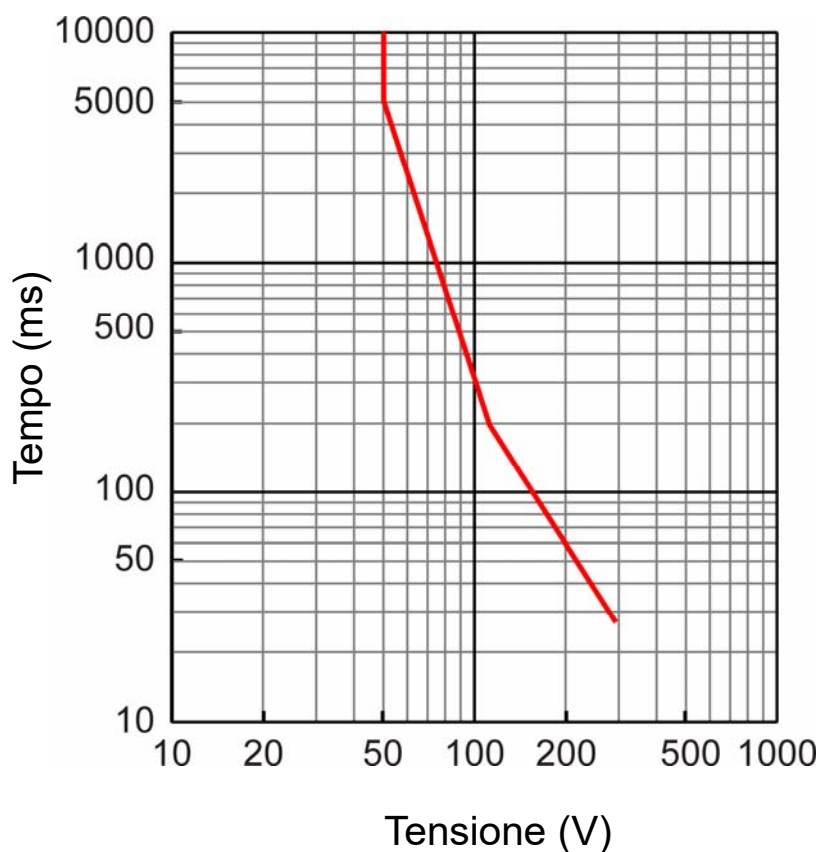
58

## Curva di sicurezza tensione-tempo

- Il corpo umano presenta al passaggio della corrente elettrica una resistenza che dipende da numerosi fattori (punti di contatto, estensione delle superfici di contatto, pressione di contatto, stato della pelle ecc.)
- Inoltre la resistenza diminuisce all'aumentare della tensione e con la durata del contatto
- Dato che, per tensioni dell'ordine delle decine di volt, la resistenza risulta normalmente superiore a  $2000 \Omega$ , se si considerano non pericolose correnti di 25-30 mA si possono ritenere non pericolose tensioni di valore efficace minore o uguali a 50 V
- A partire dalle curve di sicurezza corrente-tempo e tenendo conto della resistenza del corpo umano è possibile ricavare una curva tensione tempo che indica, per ogni livello di tensione il tempo di permanenza del contatto che non comporta pericoli
- Queste curve forniscono un'indicazione dei tempi di intervento richiesti ai sistemi automatici di protezione

59

## Curva di sicurezza tensione-tempo



60

## Effetti della corrente continua

- Per la corrente continua la soglia di percezione è più elevata (circa 2 mA)
- Tetanizzazione, blocco respiratorio e fibrillazione ventricolare si possono verificare anche con la corrente continua, ma in presenza di intensità di corrente molto maggiori
- Per quanto riguarda le ustioni e l'arresto cardiaco la corrente continua ha effetti simili alla corrente alternata
- Inoltre la corrente continua può produrre gravi fenomeni di elettrolisi dei liquidi organici
- Per le tensioni continue si può ritenere che non siano pericolosi, con tempi di permanenza illimitati, valori minori o uguali a 120 V


61

## Contatti diretti e indiretti

- **Contatto diretto**: si verifica quando una persona viene in contatto con una **parte attiva**, cioè con una parte del sistema elettrico che normalmente è in tensione
- **Contatto indiretto**: si verifica quando una persona viene in contatto con una **massa**, cioè con una parte metallica normalmente non in tensione, che si trova accidentalmente in tensione a causa di un difetto di isolamento

62

## Protezione contro i contatti diretti e indiretti

- Protezione contro i contatti diretti
  - ◆ Isolamento delle parti attive
  - ◆ Involucri o barriere
  - ◆ Interruttori differenziali
- Protezione contro i contatti indiretti
  - ◆ Messa a terra delle masse
  - ◆ Interruzione automatica dell'alimentazione
  - ◆ Doppio isolamento delle parti attive
    - riduce le probabilità di cedimento completo dell'isolamento
    - le apparecchiature che ne sono dotate sono contraddistinte dal marchio 
  - ◆ Separazione elettrica
    - alimentazione mediante trasformatore di isolamento
    - circuito secondario isolato verso terra

63

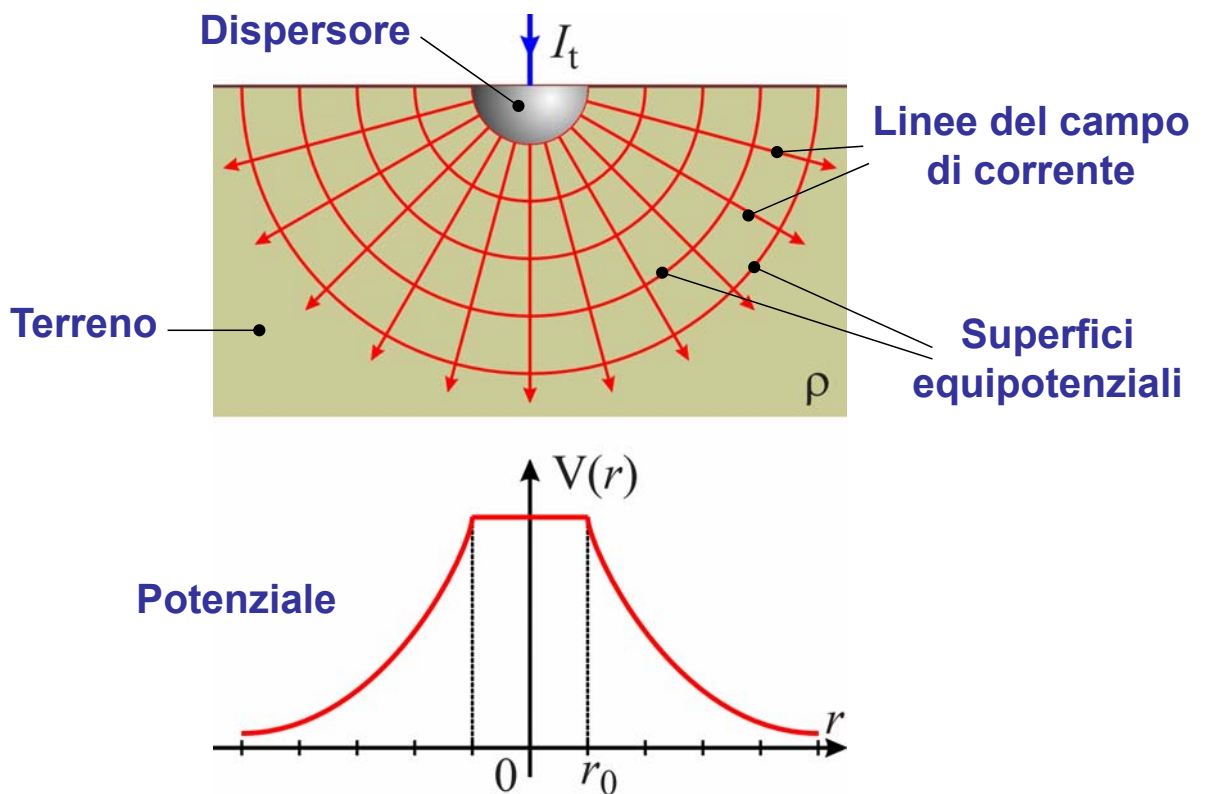
## Impianto di terra

- Un impianto di terra è formato da
  - ◆ **dispersori**, costituiti da elementi conduttori immersi nel terreno
  - ◆ un **collettore di terra**, costituito da un morsetto o una sbarra metallica
  - ◆ **conduttori di terra** che collegano i dispersori al collettore
  - ◆ **conduttori di protezione (PE)** che collegano il collettore alle masse delle apparecchiature elettriche

64



## Dispensore di terra emisferico



65

## Dispensore di terra emisferico

- Si considera, per semplicità, il caso in cui il dispensore è costituito da un conduttore di forma emisferica con raggio  $r_0$
- In presenza di una corrente di terra  $I_t$ , se il terreno è omogeneo, si ha un campo di corrente con andamento radiale
- Dato che il vettore densità di corrente  $\mathbf{J}$  è solenoidale, il suo modulo su una superficie emisferica di raggio  $r$  concentrica con il dispensore può essere ottenuto da

$$I_t = \int_{S(r)} \mathbf{J}(r) \cdot \hat{\mathbf{n}} dS = 2\pi r^2 J(r) \Rightarrow J(r) = \frac{I_t}{2\pi r^2}$$

66

## Dispensore di terra emisferico

- Anche il campo elettrico ha andamento radiale e vale

$$E(r) = \rho J(r) = \frac{\rho I_t}{2\pi r^2} \quad \rho = \text{resistività del terreno}$$

- Quindi le superfici equipotenziali sono semisfere concentriche con il dispersore
- Assumendo che il potenziale si annulli a distanza infinita dal dispersore si ottiene

$$V(r) = \int_r^{\infty} E(r) dr = \frac{\rho I_t}{2\pi r}$$

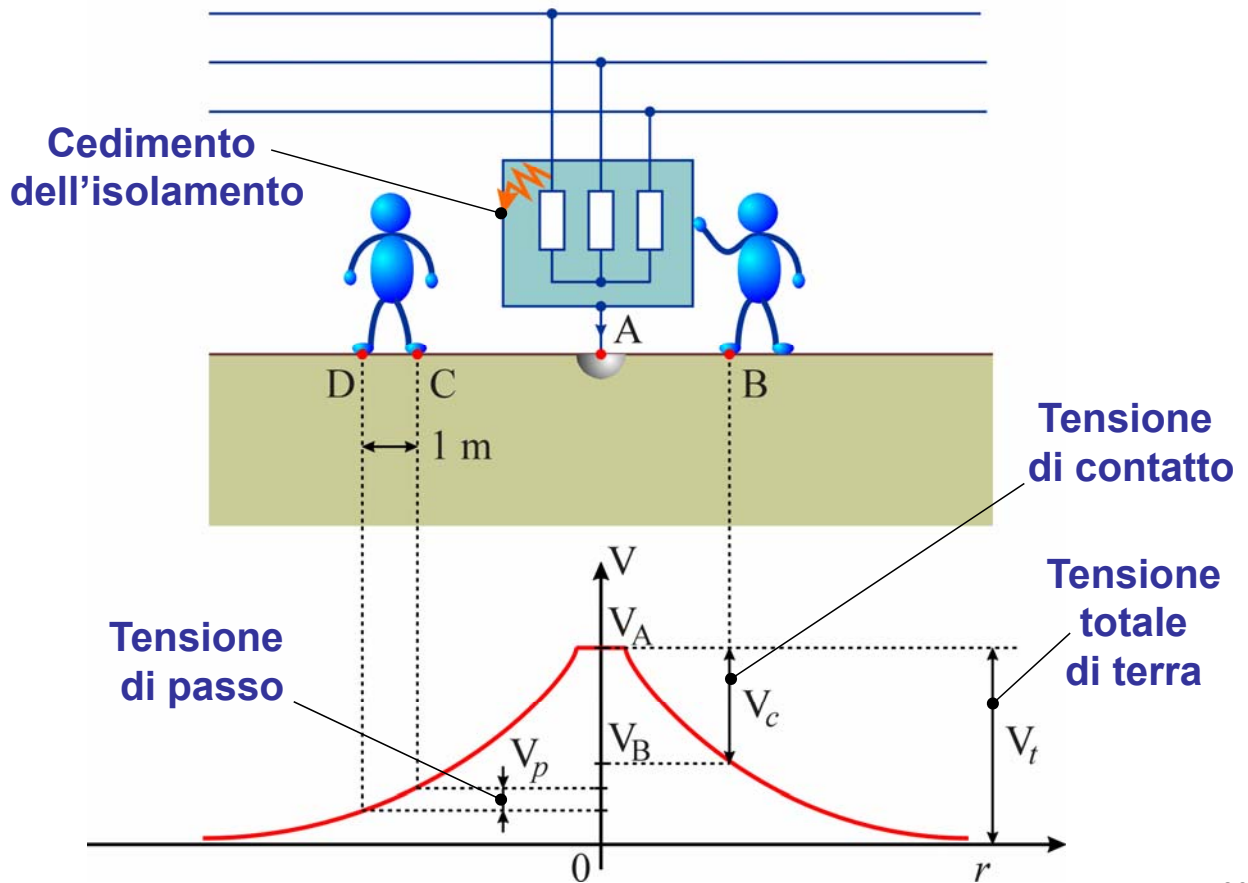
67

## Note

- Ovviamente perché si possa avere una corrente nel terreno dovrà essere presente almeno un altro dispersore, che comunque si suppone collocato a distanza molto grande (praticamente infinita) e quindi tale da non perturbare il campo di corrente in prossimità del primo dispersore
- In pratica, per ragioni di costo, il dispersore non viene realizzato di forma emisferica
  - ➔ Di solito il dispersore è costituito da un picchetto o da una piastra metallica, oppure da una grata

68

## Tensioni di terra



69

## Tensione e resistenza di terra

- **Tensione totale di terra** ( $V_t$ ): tensione tra il dispersore e un punto a distanza praticamente infinita

$$V_t = V_A = \frac{\rho I_t}{2\pi r_0}$$

- **Resistenza di terra** ( $R_t$ ): rapporto tra la tensione totale di terra e la corrente di terra
  - ◆ Se il terreno è costituito da un mezzo lineare, dipende unicamente dalla forma del dispersore e dalla resistività  $\rho$  del terreno
  - ◆ Nel caso di un dispersore emisferico di raggio  $r_0$  si ha

$$R_t = \frac{V_t}{I_t} = \frac{\rho}{2\pi r_0}$$

70

## Tensione di contatto e tensione di passo

- **Tensione di contatto** ( $V_c$ ): tensione a cui può essere sottoposta una persona in caso di contatto indiretto:  $V_c = V_A - V_B$
- **Tensione di passo** ( $V_p$ ): massima tensione tra due punti del terreno distanti un metro (che convenzionalmente rappresenta la distanza di un passo):  $V_p = V_C - V_D$
- ➔ La tensione di contatto e la tensione di passo soddisfano sempre le condizioni  $V_c < V_t$  e  $V_p < V_t$
- ➔ Il collegamento a terra delle masse consente di limitare la tensione a cui può essere sottoposta una persona in caso di contatto indiretto

71

## Impianti utilizzatori in bassa tensione

- I sistemi elettrici di categoria 0 e 1 sono identificati mediante una sigla composta da gruppi di lettere che indicano lo stato del neutro e delle masse
- **Prima lettera:**
  - ◆ **T**: neutro collegato direttamente a terra
  - ◆ **I**: neutro isolato da terra o collegato a terra mediante un'impedenza elevata
- **Seconda lettera:**
  - ◆ **T**: masse collegate a terra con impianto di terra proprio
  - ◆ **N**: masse collegate al punto del sistema connesso a terra
- **Eventuali lettere successive:**
  - ◆ **C**: funzioni di neutro (N) e protezione (PE) svolte dallo stesso conduttore
  - ◆ **S**: neutro e conduttore di protezione separati

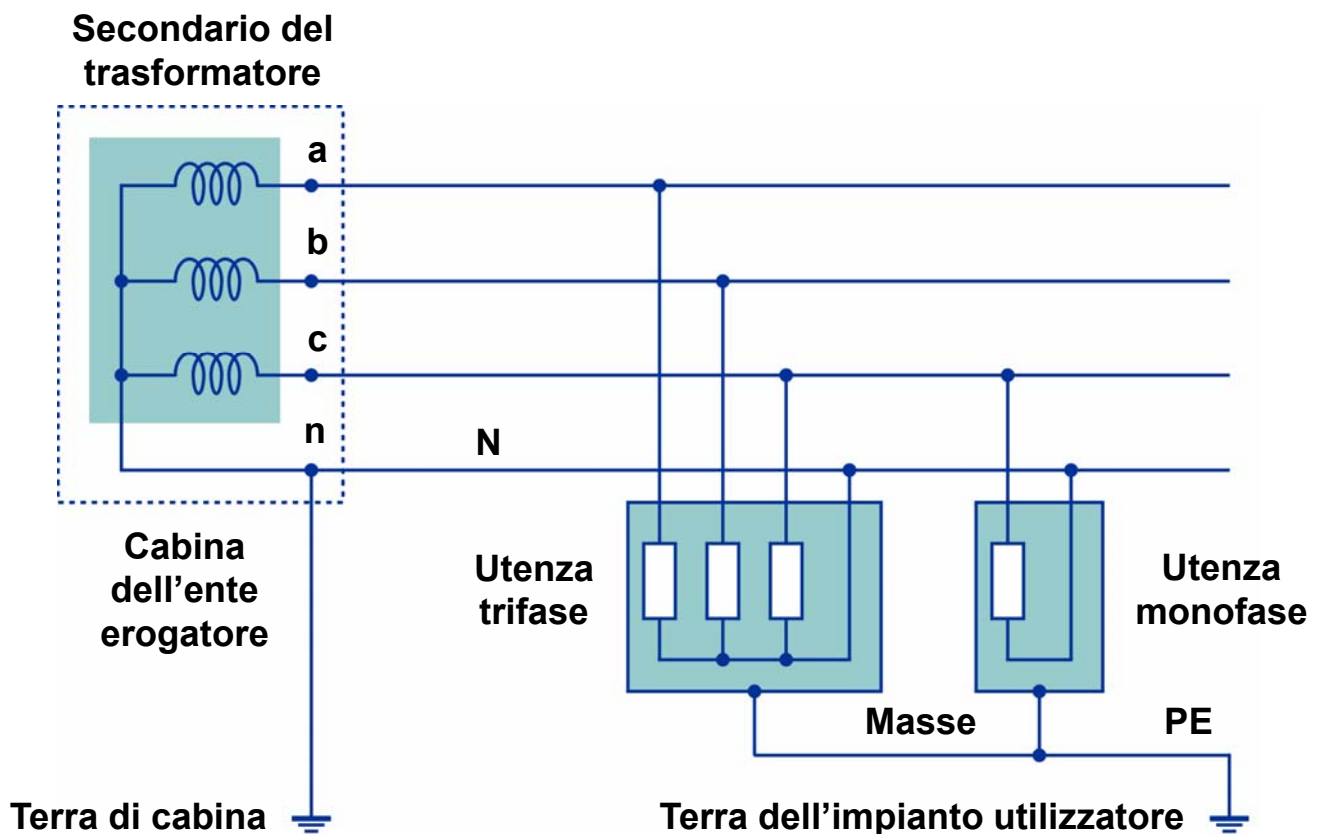
72

## Sistema TT

- Impiegato per alimentare impianti di piccola potenza privi di cabina di trasformazione propria (come le utenze domestiche)
- Il neutro è collegato all'impianto di terra della cabina di distribuzione
- Gli impianti utilizzatori sono dotati di un impianto di terra autonomo
- Le masse degli utilizzatori sono collegate all'impianto di terra tramite conduttori di protezione (PE)

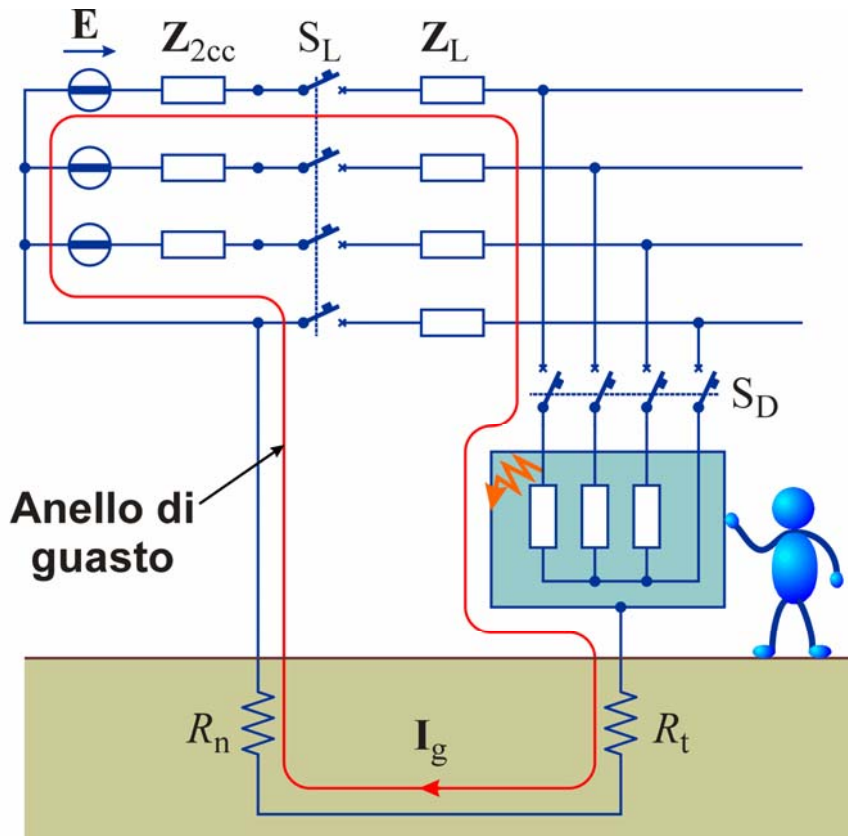
73

## Sistema TT



74

## Protezione nei sistemi TT



$S_L$  = interruttori magnetotermici  
 $S_D$  = interruttori differenziali

75

## Protezione nei sistemi TT

- Si considera una condizione di guasto fase-terra dovuta al cedimento di un isolamento
- Si forma un anello di guasto in cui circola la corrente

$$I_G = \frac{E}{Z_{2cc} + Z_L + R_t + R_n} \cong \frac{E}{R_t + R_n}$$

- La tensione di contatto  $V_c$  non supera la tensione di terra  $V_t$

$$V_c \leq V_t = \frac{ER_t}{R_t + R_n}$$

- In genere, con i valori praticamente realizzabili di  $R_t$ ,  $V_c$  può assumere valori pericolosi (cioè maggiori di 50 V)
- ➔ Occorre utilizzare un interruttore automatico che interrompa la corrente di guasto

76

## Protezione nei sistemi TT

- Affinché l'interruttore intervenga quando la tensione di contatto supera 50 V, occorre che la corrente di attivazione,  $I_a$ , dell'interruttore automatico soddisfi la condizione
$$I_a \leq 50 / R_t$$
- Gli interruttori magnetotermici (sempre presenti negli impianti per la protezione contro i sovraccarichi e i cortocircuiti) intervengono quando la corrente supera un valore nominale  $I_n$
- In genere, per i valori praticamente realizzabili di  $R_t$ , risulta  $I_n > I_a$
- Di conseguenza la protezione viene affidata agli interruttori differenziali, per i quali la corrente di attivazione ha valori molto minori, e quindi consente di impiegare valori di  $R_t$  più elevati
- Inoltre, per correnti di attivazione  $\leq 30$  mA gli interruttori differenziali forniscono anche la protezione contro i contatti diretti

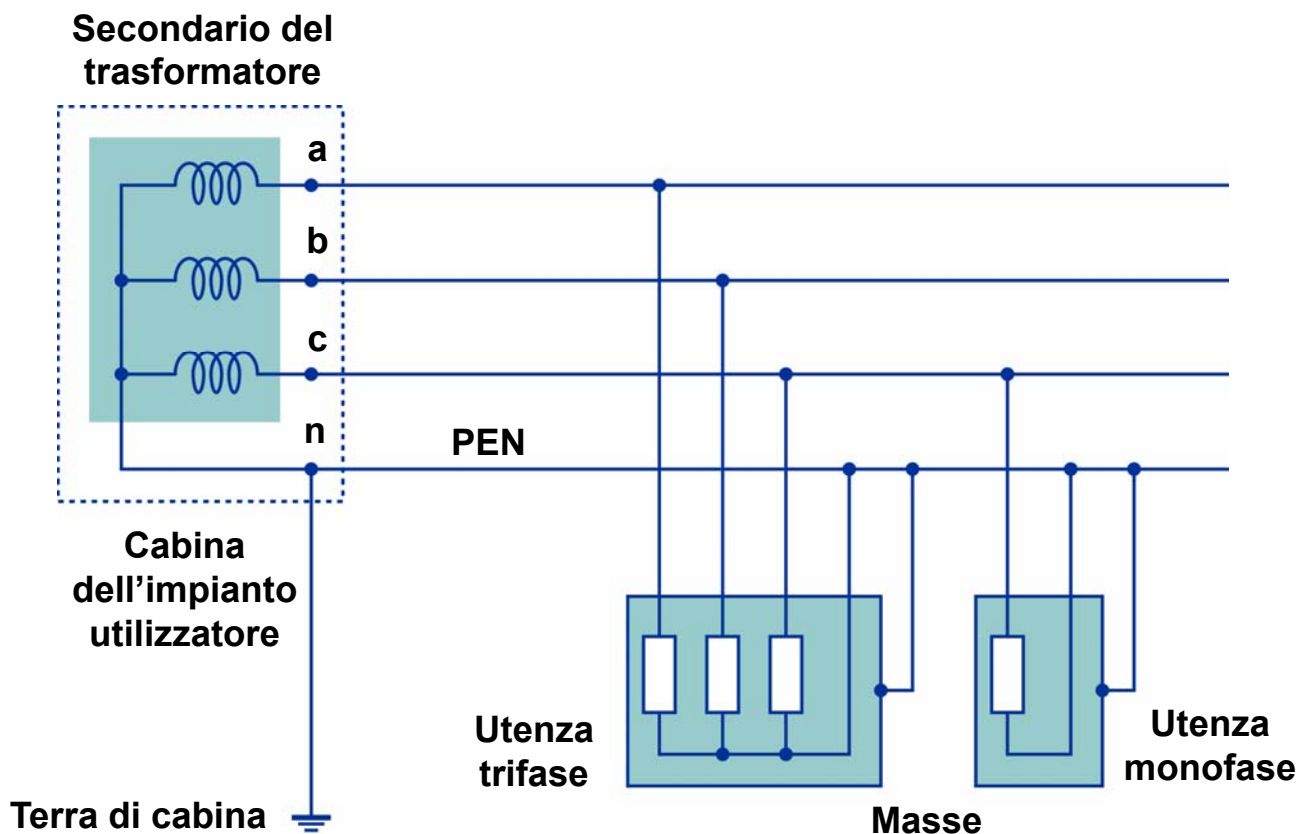
77

## Sistemi TN

- Impiegato per alimentare impianti dotati di cabina di trasformazione propria (come utenze industriali o utenze comuni di grandi condomini)
- Il neutro e il conduttore di protezione sono collegati all'impianto di terra della cabina
- Sistema TN-C: un unico conduttore (PEN) svolge le funzioni di neutro e di conduttore di protezione
- Sistema TN-S: le funzioni sono svolte separatamente dal neutro e dal conduttore di protezione
- Sistema TN-C-S: le funzioni sono in parte combinate in un unico conduttore e in parte separate

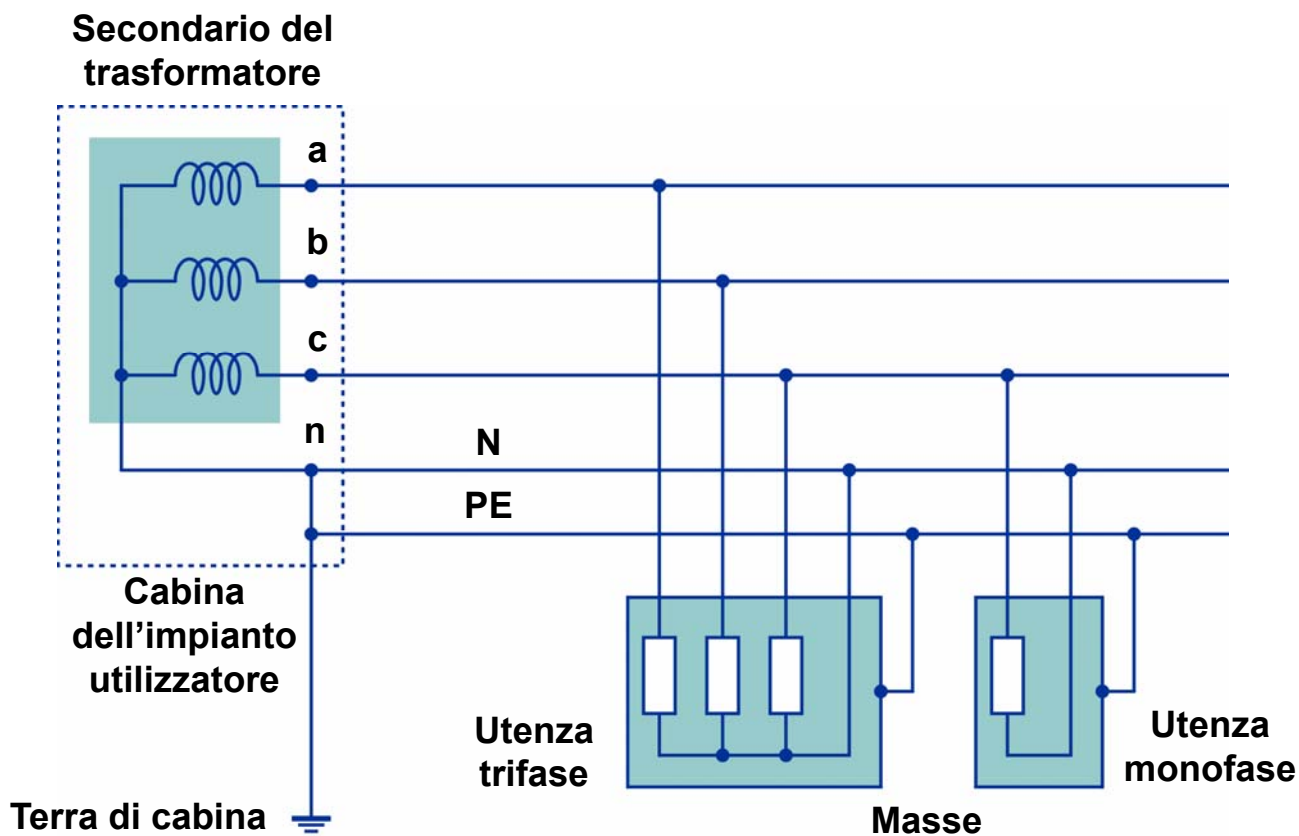
78

## Sistema TN-C



79

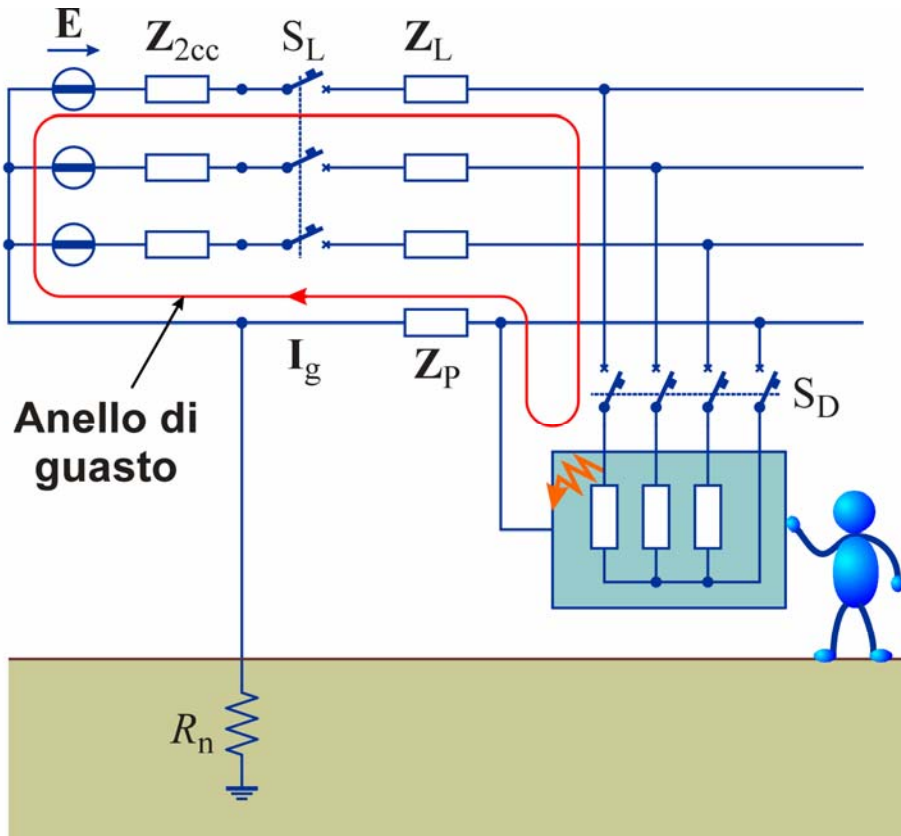
## Sistema TN-S



80



## Protezione nei sistemi TN



81

## Protezione nei sistemi TN

- In questo caso un guasto fase-terra dà origine ad un anello di guasto che non interessa il terreno

- La corrente di guasto è

$$I_g = \frac{E}{Z_{2cc} + Z_L + Z_P}$$

- Non essendoci corrente nel dispersore, il terreno è equipotenziale
- La tensione di contatto coincide con la tensione di  $Z_P$

$$V_c = \frac{EZ_P}{Z_{2cc} + Z_L + Z_P}$$

- Questa tensione, può assumere valori pericolosi (in genere circa  $E/2$ ), quindi è necessario utilizzare un interruttore automatico
- In questo caso si ha sempre  $I_g \gg I_n$ , quindi è possibile utilizzare gli interruttori magnetotermici
- Inoltre, è possibile impiegare anche gli interruttori differenziali, che devono essere comunque presenti per assicurare la protezione contro i contatti diretti

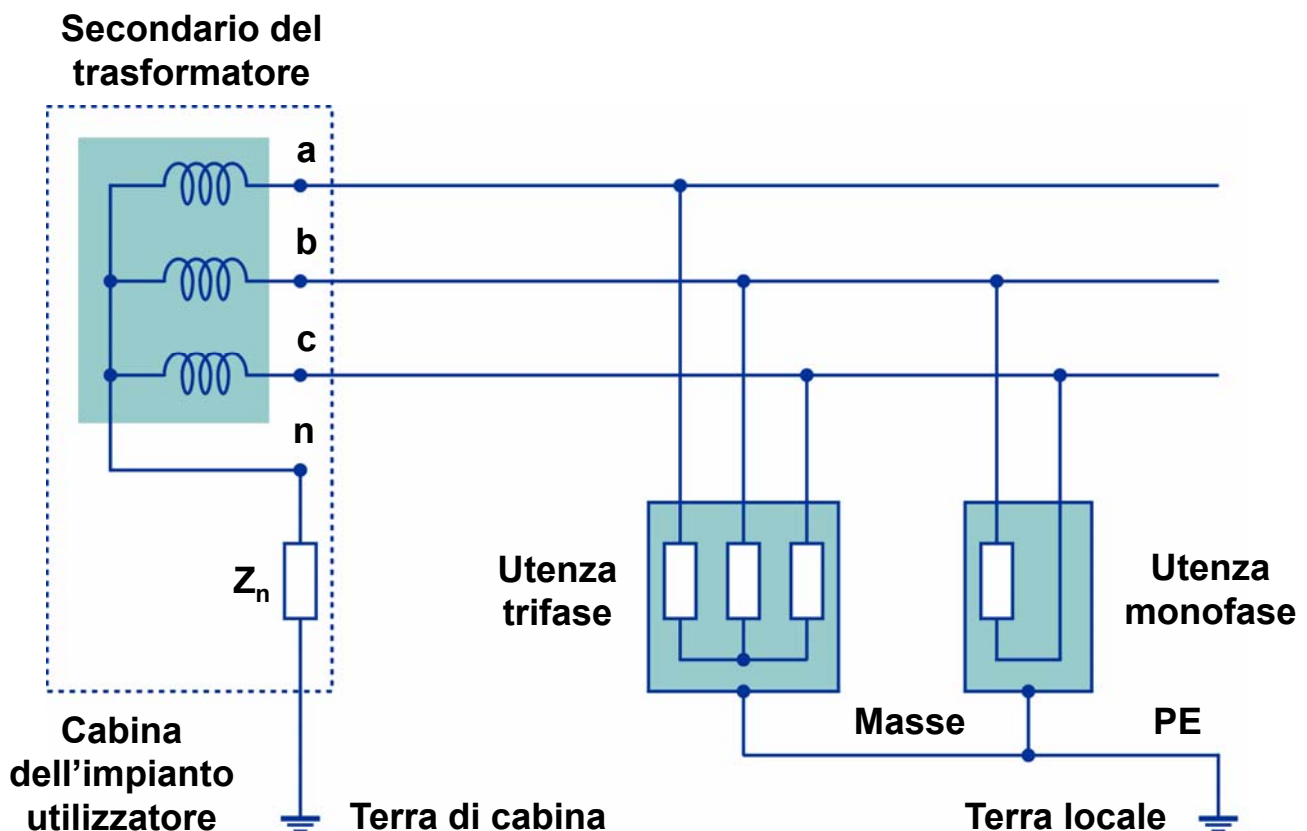
82

## Sistema IT

- Viene impiegato in casi particolari che richiedono continuità di esercizio (es. sale operatorie, impianti a ciclo continuo)
- L'impianto utilizzatore è dotato di una cabina di trasformazione propria
- Il centro stella del secondario del trasformatore è collegato a terra mediante un'impedenza  $Z_n$  di valore elevato
- Il neutro normalmente non viene distribuito
- Le masse degli utilizzatori sono collegate ad impianti di terra locali

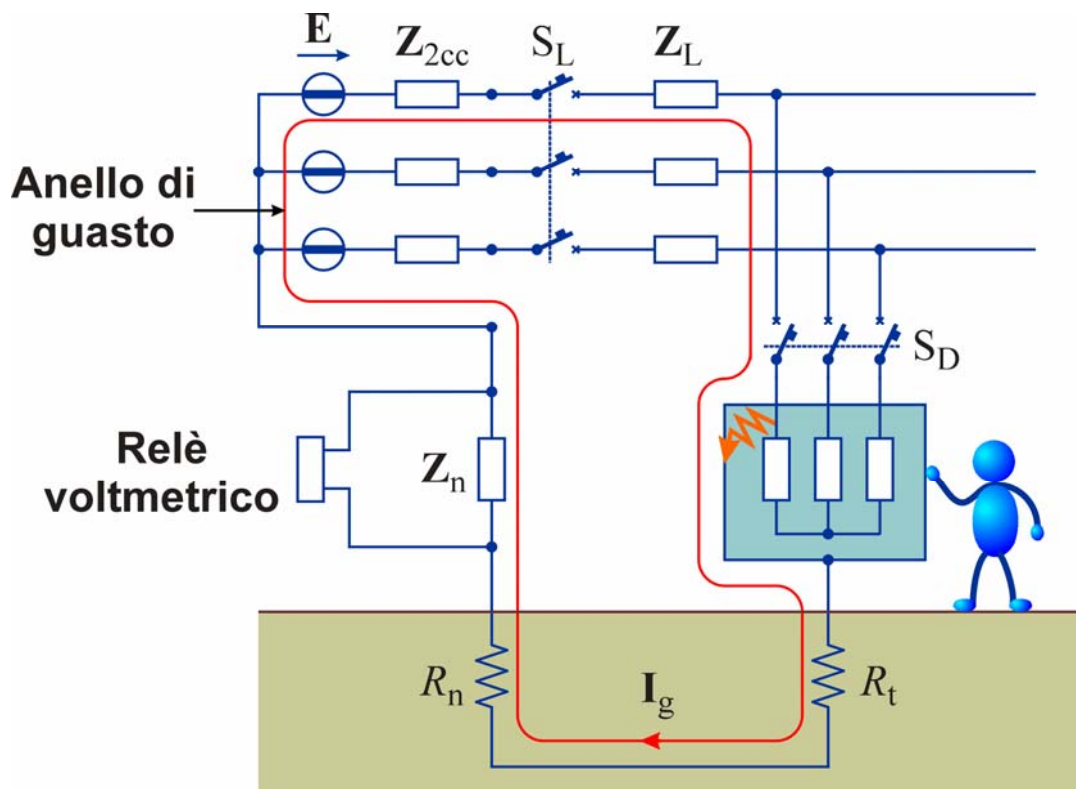
83

## Sistema IT



84

## Protezione nei sistemi IT



85

## Protezione nei sistemi IT

- Un guasto fase-terra dà origine ad un anello di guasto che comprende l'impedenza  $Z_n$ , e quindi ha un'impedenza totale di modulo elevato
- La corrente di guasto  $I_g$  è piccola, quindi con i valori praticamente realizzabili per  $R_t$  è possibile fare in modo che risulti
$$R_t I_g \leq 50 \text{ V}$$
- In queste condizioni la tensione di contatto non è pericolosa, quindi non è richiesto l'intervento degli interruttori automatici
- Di conseguenza, il primo guasto fase-terra non determina l'interruzione dell'alimentazione

86

## Protezione nei sistemi IT

- Dopo il primo guasto una delle fasi è al potenziale di terra
- Un secondo guasto fase-terra determina un cortocircuito tra due fasi e quindi un anello di guasto con impedenza molto piccola
- In queste condizioni si ha una corrente di guasto elevata che causa l'intervento degli interruttori magnetotermici
- Per evitare che si verifichi questa situazione, occorre rilevare il primo guasto e intervenire immediatamente per eliminarlo
- Dato che su  $Z_n$  si ha comunque una tensione elevata, si collega in parallelo a  $Z_n$  un relè voltmetrico, che attiva un sistema di segnalazione del guasto