

Elementi di impianti elettrici e sicurezza elettrica

www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm
(versione del 29-5-2017)

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

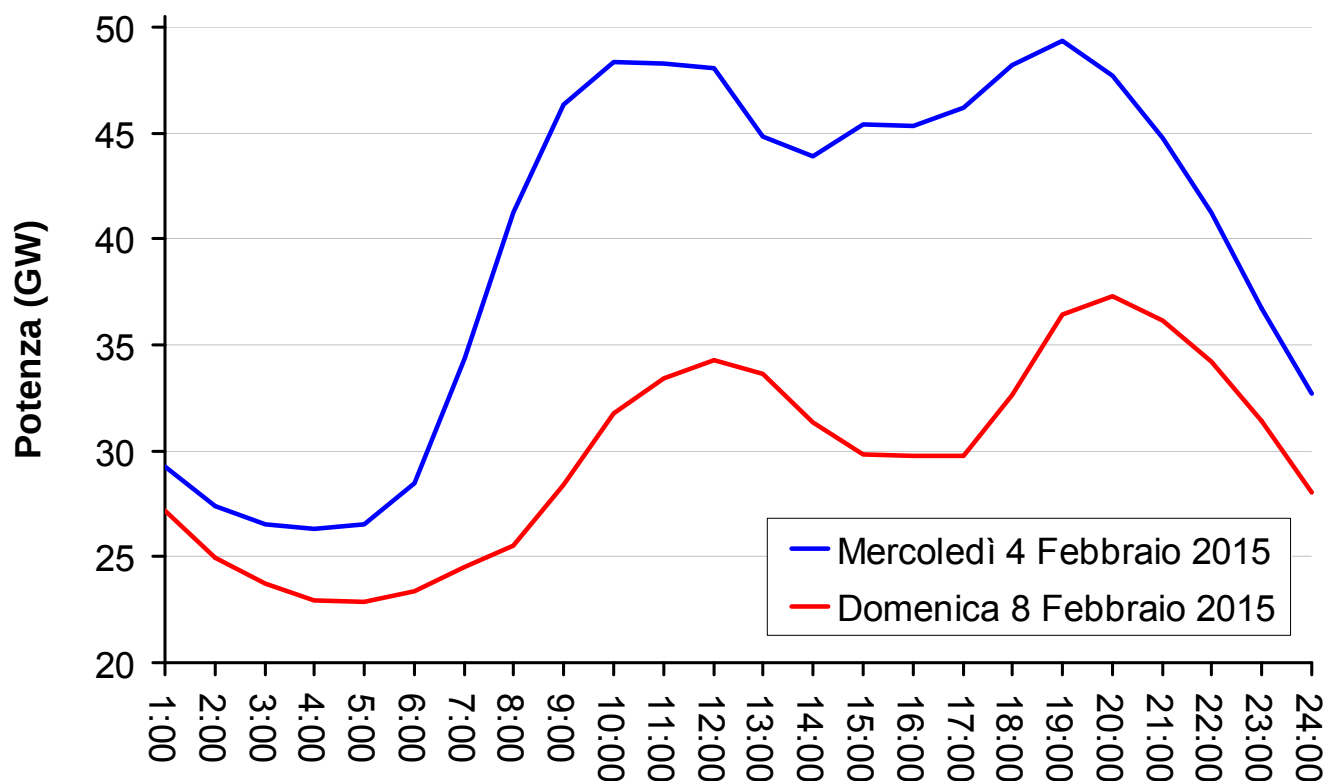
3

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 2014

(Valori in GWh)

Produzione netta	
• Idroelettrica	58 067
• Termoelettrica	165 684
• Geotermoelettrica	5 541
• Eolica	14 966
• Fotovoltaica	23 299
Produzione netta totale	267 557
Importazione	46 724
Esportazione	3 021
Saldo estero	43 703
Consumo pompaggi	2 254
Richiesta di energia elettrica	309 006

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

9

Livelli di tensione nei sistemi elettrici

Classificazione di uso corrente dei livelli di tensione

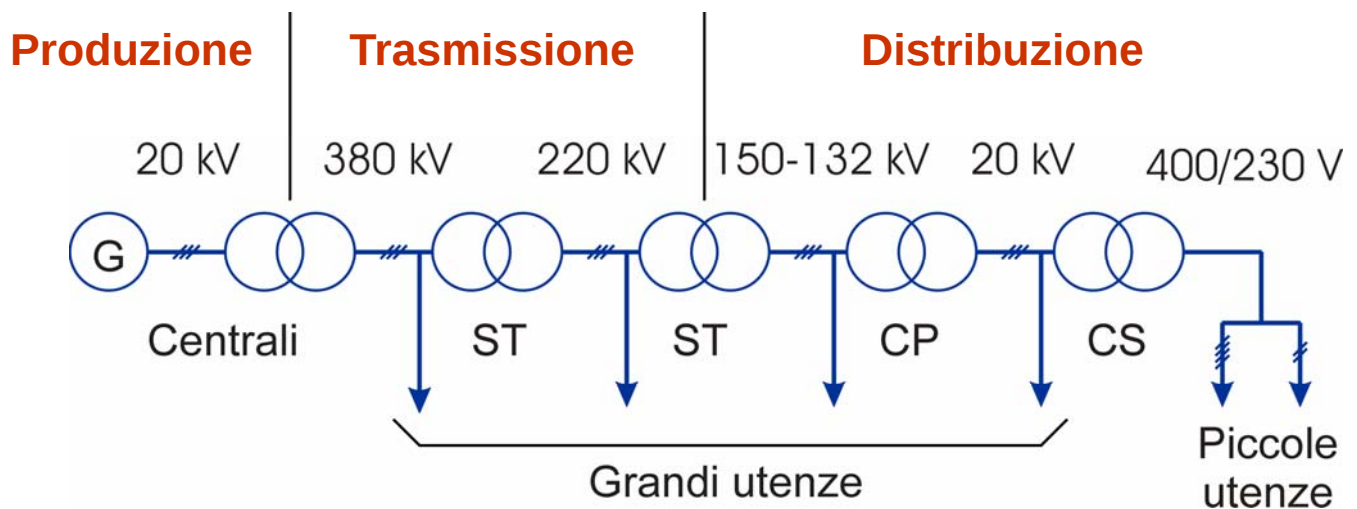
Fascia di tensione	Tensione nominale
bt: bassa tensione	$V_n \leq 1000 \text{ V}$
MT: media tensione	$1000 \text{ V} < V_n \leq 30000 \text{ V}$
AT: alta tensione	$30000 \text{ V} < V_n \leq 150000 \text{ V}$
AAT: altissima tensione	$V_n \geq 150000 \text{ V}$

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	$V_n \geq 30000 \text{ V}$	$V_n \geq 30000 \text{ V}$

10

Struttura del sistema elettrico nazionale



G = generatori

ST = stazioni di trasformazione

CP = cabine di trasformazione primarie

CS = cabine di trasformazione secondarie

11

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

12

Trasmissione

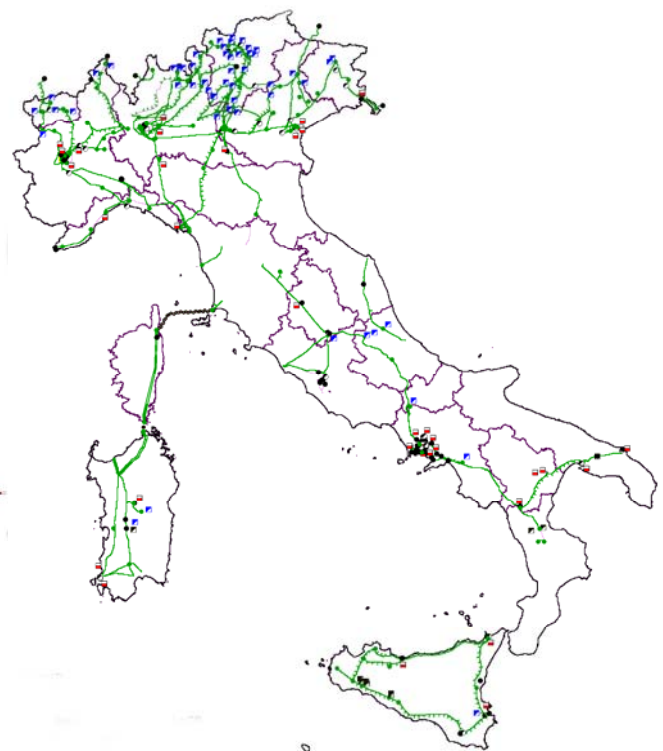
- La rete di trasmissione (o trasporto) ha una struttura magliata ed è costituita da linee trifase senza neutro a 380 kV (con estensione nazionale) o 220 kV (con estensione regionale)
- Le linee a 380 kV e 220 kV sono interconnesse mediante autotrasformatori nelle stazioni di trasformazione
- La rete a 380 kV include un collegamento mediante cavo sottomarino a corrente continua (500 kV) tra la penisola italiana e la Sardegna
- Le 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

13

Trasmissione



**Rete a 380 kV
(31-12-2013)**



**Rete a 220 kV
(31-12-2013)**

14

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

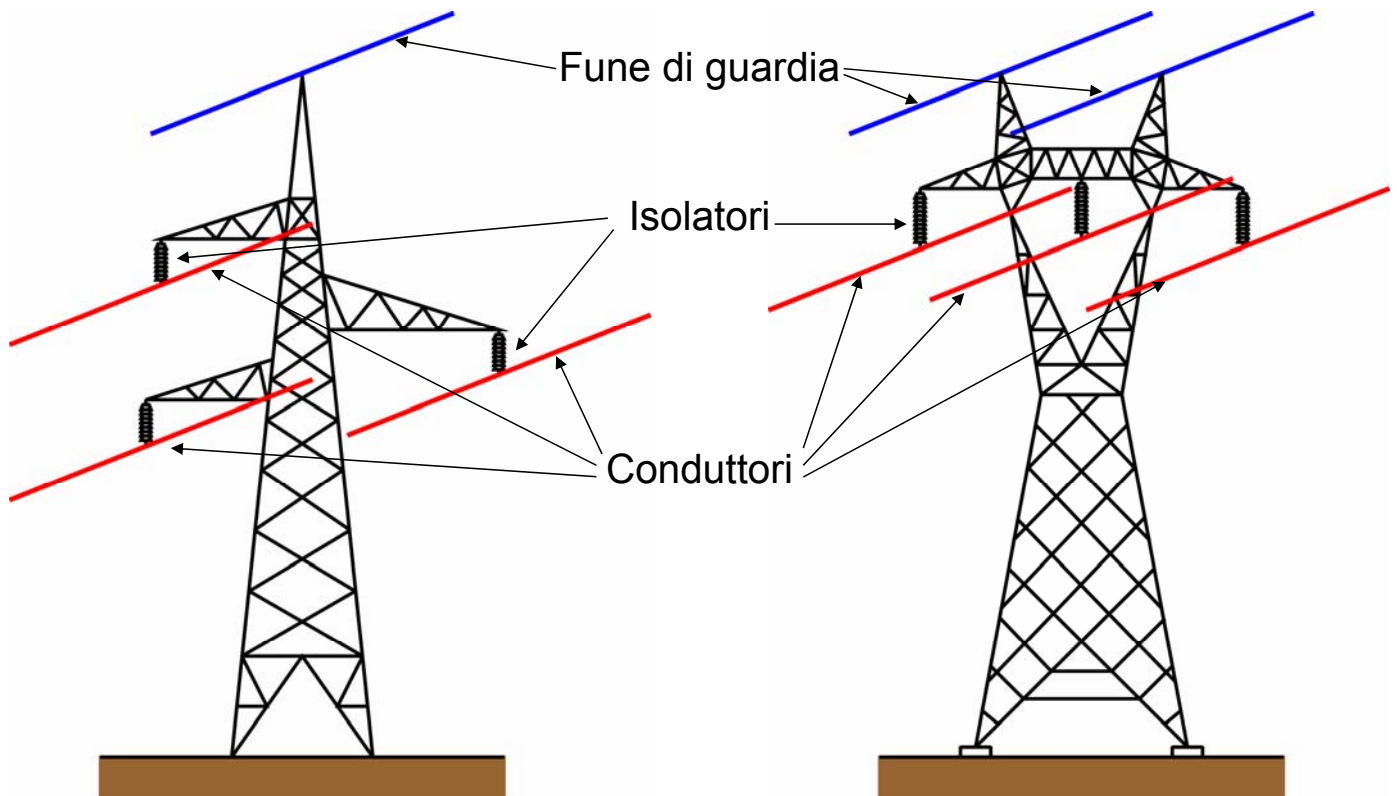
15

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

16

Linee aeree



17

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

18

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

19

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

20

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 maggiorequeste sovratensioni possono superare di alcune volte i valori nominali e hanno tempi caratteristici di evoluzione dell'ordine dei millisecondi

21

Sovratensioni

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

22

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

23

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)

24

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*

25

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)

26

Arco elettrico

- Quando l'apertura avviene in presenza di corrente, in genere si ha l'innesco 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

27

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

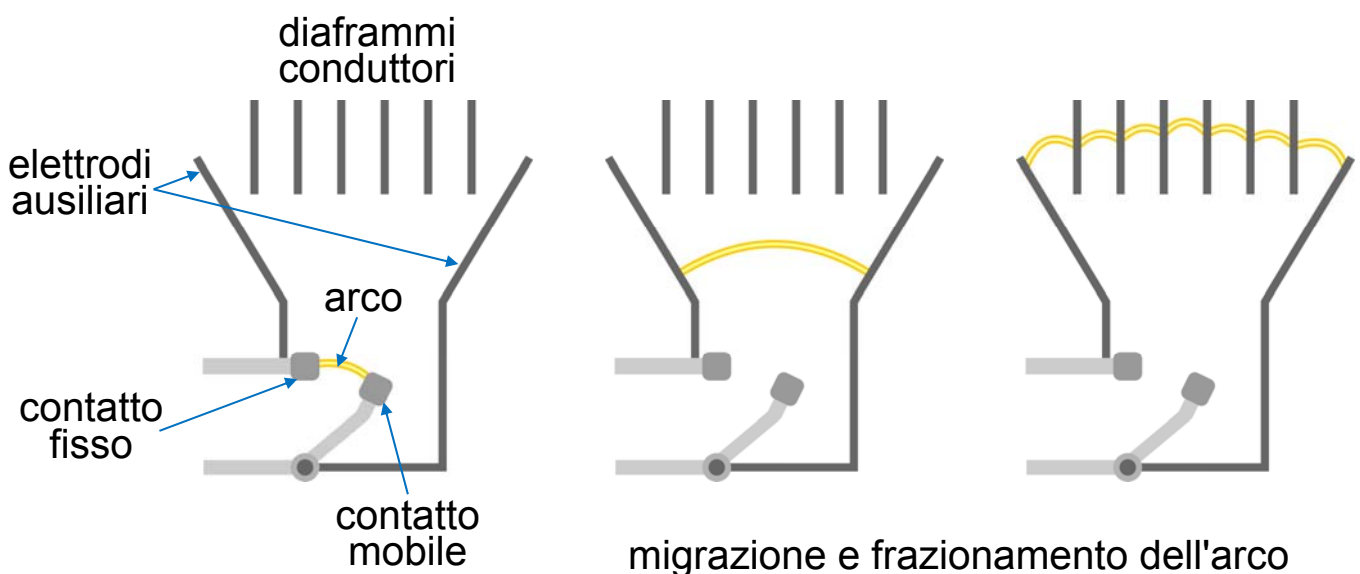
28

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

29

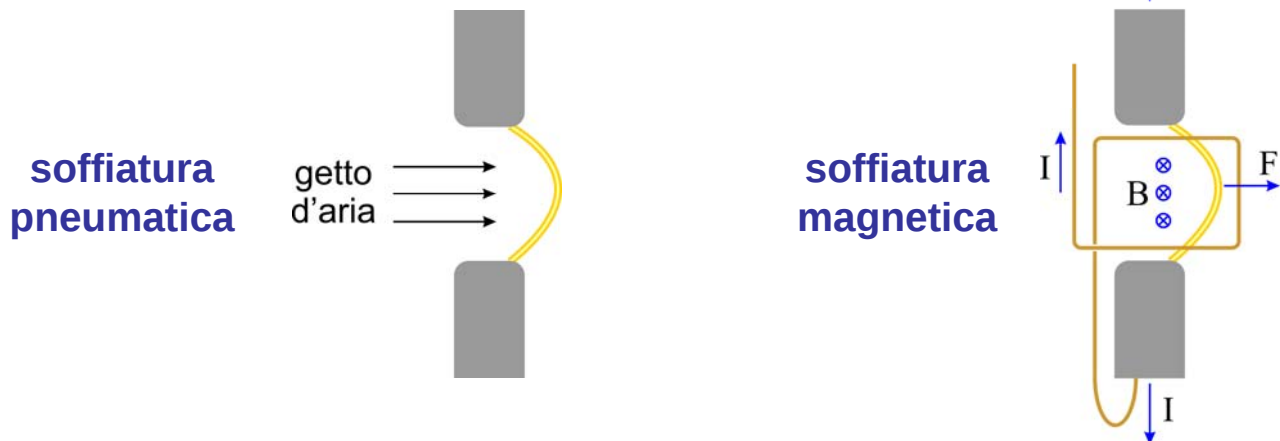
Frazionamento dell'arco



30

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



31

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_6)**
 - ♦ All'apertura dell'interruttore si apre anche una valvola che immette SF_6 ad alta pressione nella camera di interdizione, provocando lo spegnimento dell'arco
 - ♦ l' SF_6 oltre ad avere elevata rigidità dielettrica ha anche la proprietà, se scaldato ad alta temperatura, di decomporsi in zolfo e fluoro
 - ♦ quest'ultimo tende a catturare gli elettroni liberi a cui è dovuta principalmente la conduzione nell'arco

32

Dispositivi di interruzione

	Azionamento manuale	Azionamento automatico
Interruttore di potenza		
Interruttore di manovra		
Sezionatore		
Contattore (teleruttore)		

33

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

34

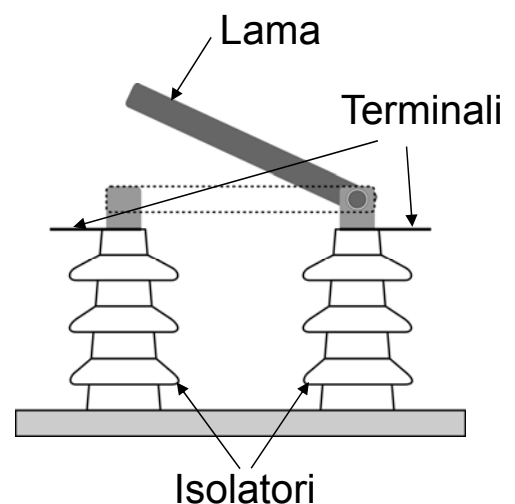
Interruttori di manovra

- 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

35

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



36

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)

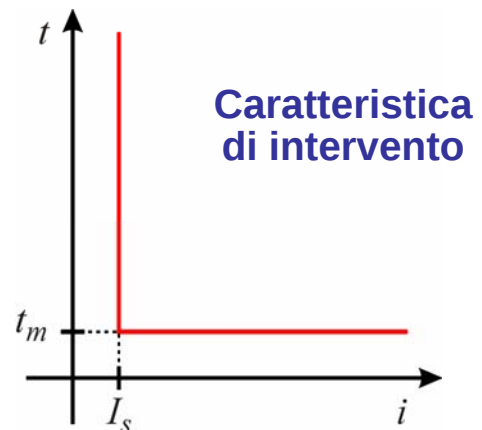
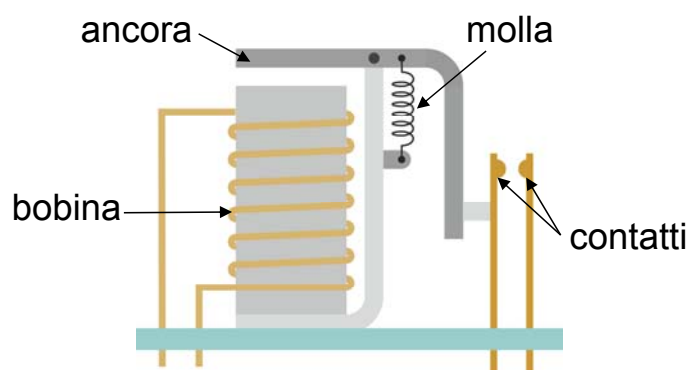
37

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)

38

Relè elettromagnetico

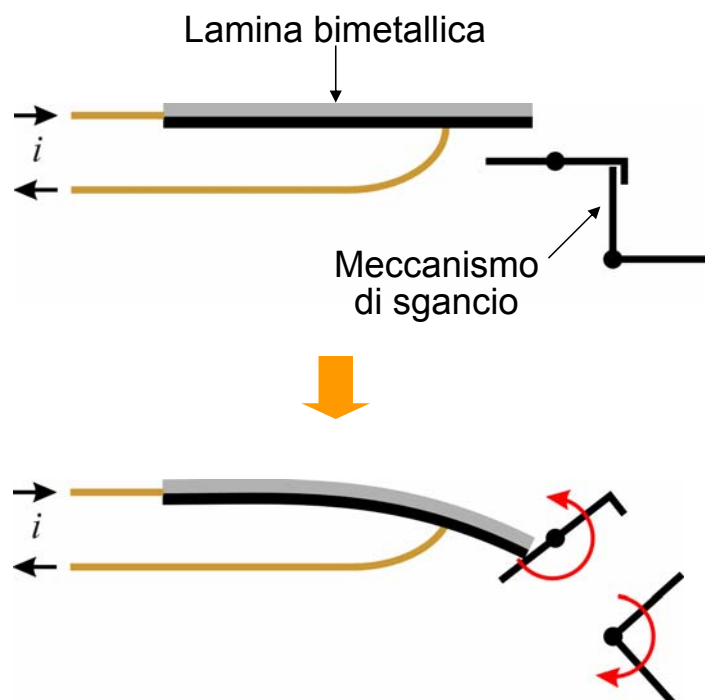


- Sfrutta l'azione esercitata da un solenoide percorso da corrente i su un'ancora mobile trattenuta da una molla
- Quando la corrente supera il valore di soglia I_s in corrispondenza del quale la forza dell'elettromagnete è uguale alla forza di richiamo della molla, l'ancora si sposta e aziona un interruttore
- 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)

39

Relè termico

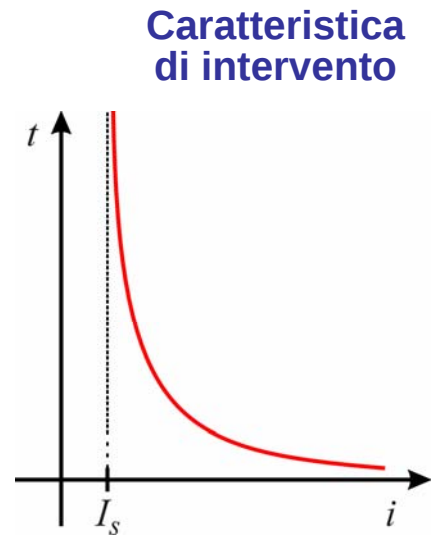
- La corrente i scorre attraverso una lamina formata da due conduttori con diverso coefficiente di dilatazione termica
- A causa del riscaldamento dovuto all'effetto Joule la lamina si deforma
- La lamina incurvandosi causa l'azionamento di un meccanismo di sgancio e quindi l'apertura di un interruttore



40

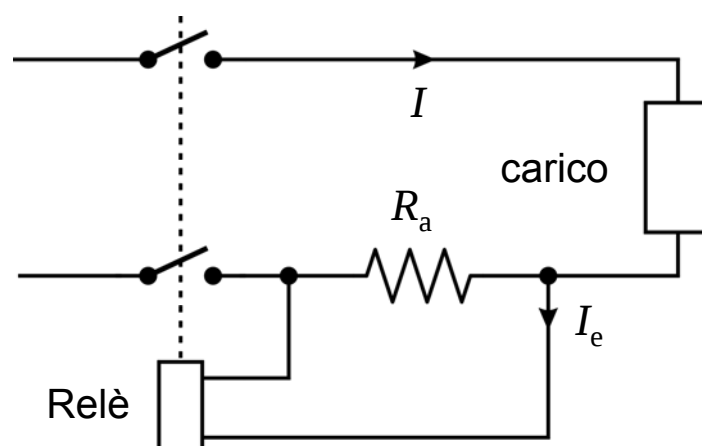
Relè termico

- Si può dimostrare che, per un dato valore della 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 θ_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 θ_S diviene sempre più breve



41

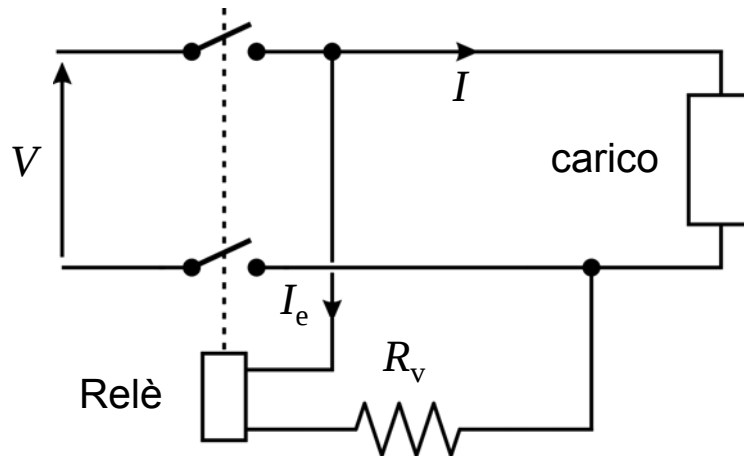
Interruttore di massima corrente



- 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 è viene fissato mediante la resistenza R_a

42

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

43

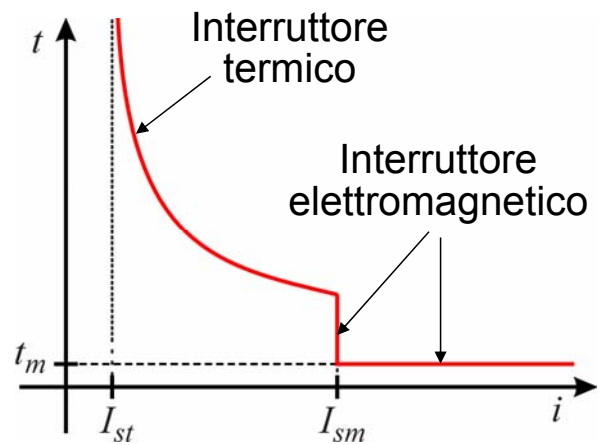
Interruttore termico

- 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

44

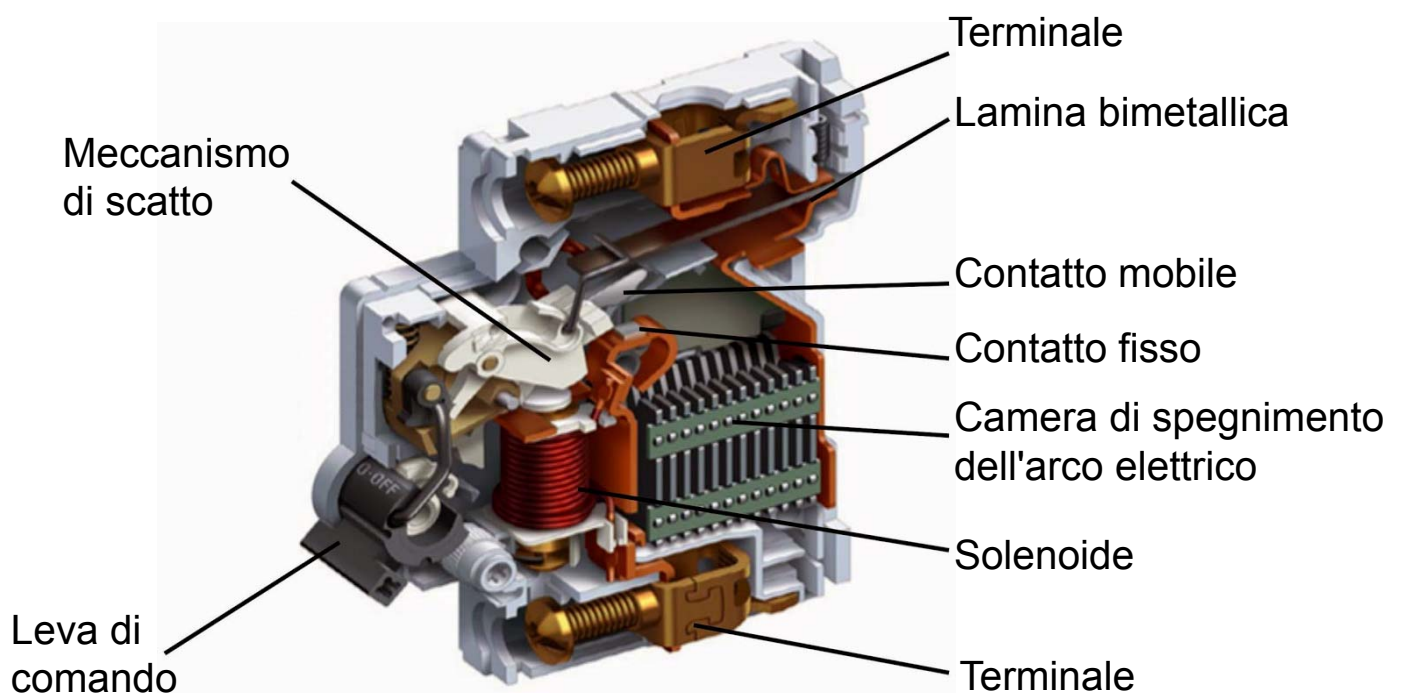
Interruttore magnetotermico

- 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



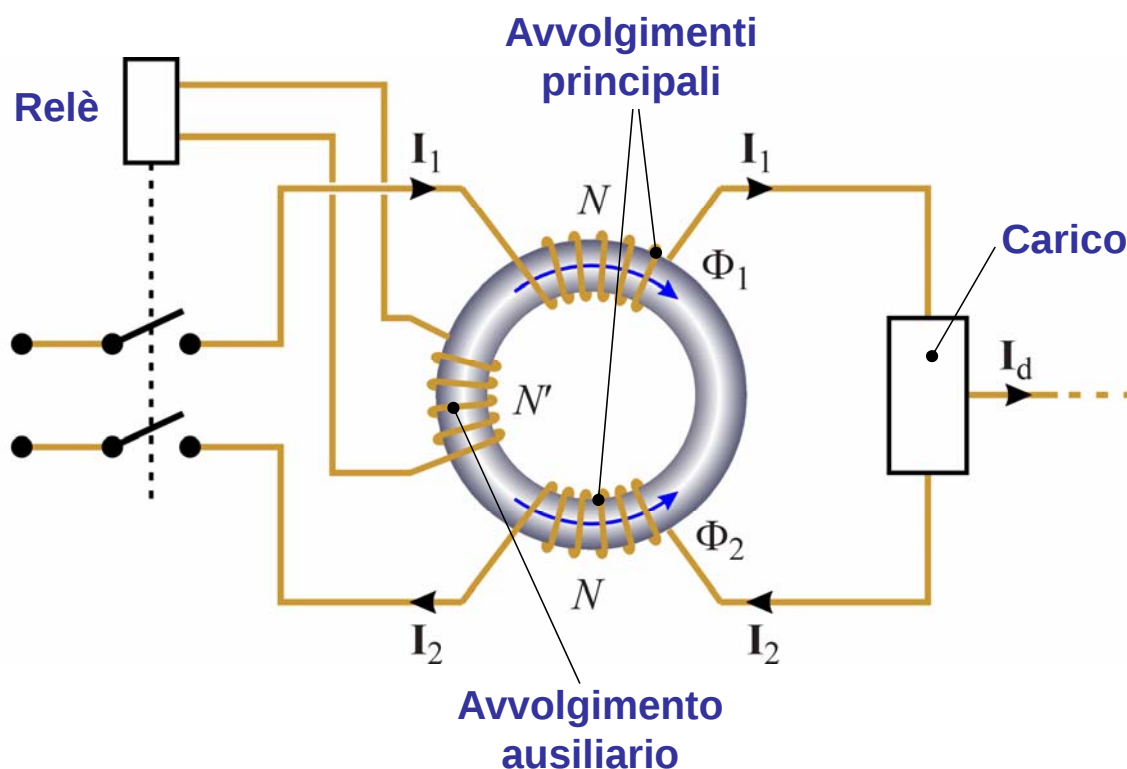
45

Interruttore magnetotermico



46

Interruttore differenziale



47

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 Φ_1 e Φ_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

48

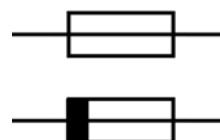
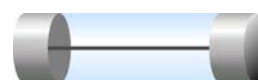
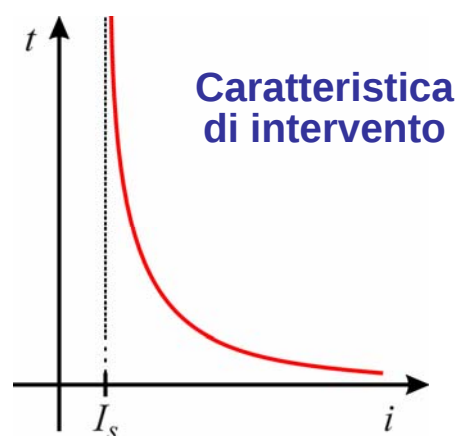
Interruttore differenziale

- **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

49

Fusibili

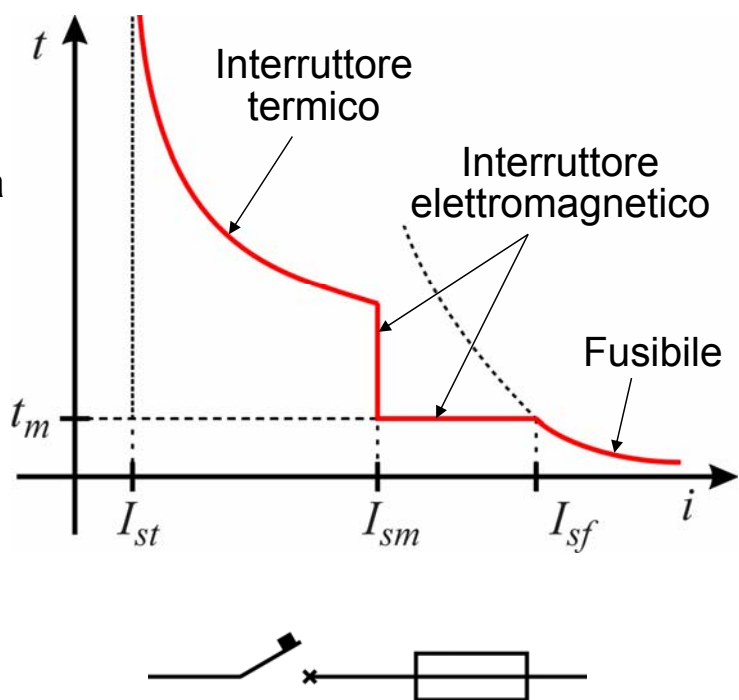
- Un fusibile è costituito da un conduttore in lega a basso punto di fusione alloggiato in un apposito contenitore
- E' un dispositivo che può eseguire l'apertura irreversibile di un circuito
- Il conduttore percorso da corrente si surriscalda e se la corrente supera un valore di soglia I_s può raggiungere 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



50

Coordinamento di interruttore magnetotermico e fusibile

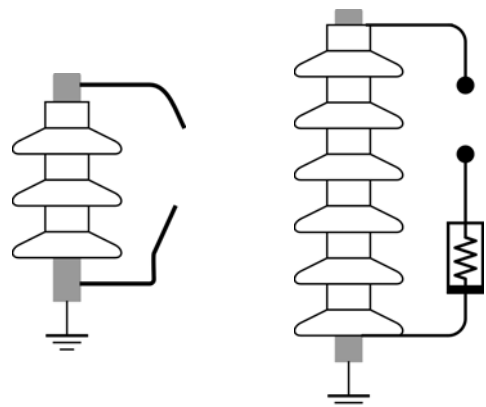
- Spesso in serie a un interruttore magnetotermico si collega un fusibile che interviene nel caso di correnti molto elevate
- In particolare il fusibile può intervenire nei casi in cui la corrente di cortocircuito supera il potere di interruzione dell'interruttore magnetotermico



51

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



52

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)

53

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)

54

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

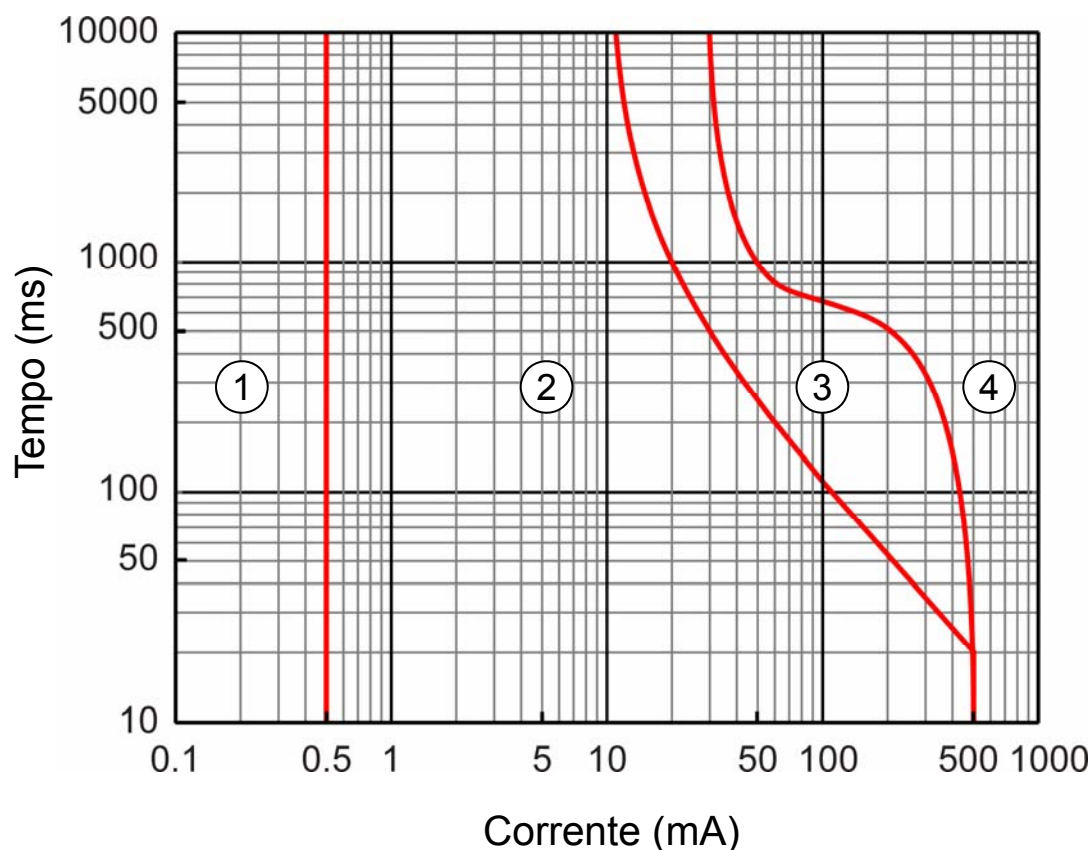
- ◆ Correnti di intensità maggiore possono provocare l'arresto cardiaco

● Ustioni

- ◆ Il passaggio della corrente causa sviluppo di calore per effetto Joule
- ◆ Densità di correnti di pochi mA/mm² possono essere sufficienti a causare gravi ustioni

55

Curva di sicurezza corrente-tempo



56

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

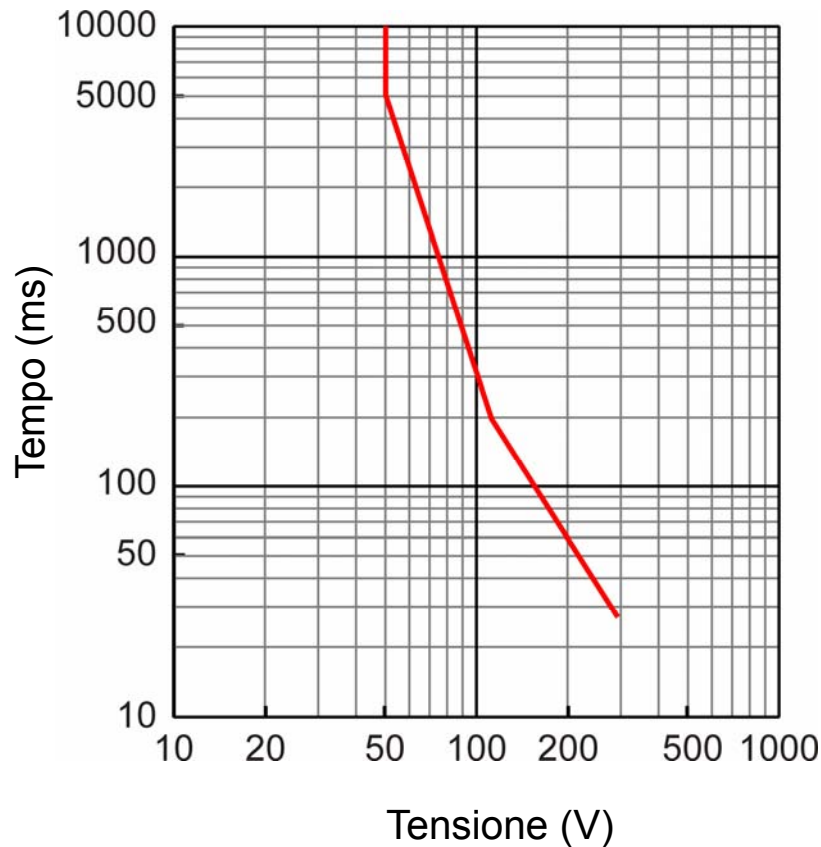
57

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

58

Curva di sicurezza tensione-tempo



59

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

60

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

61

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

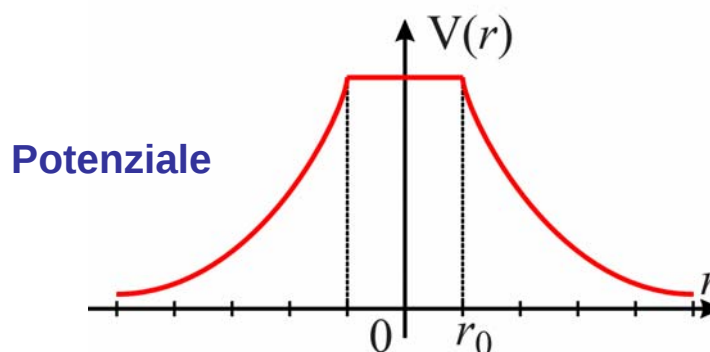
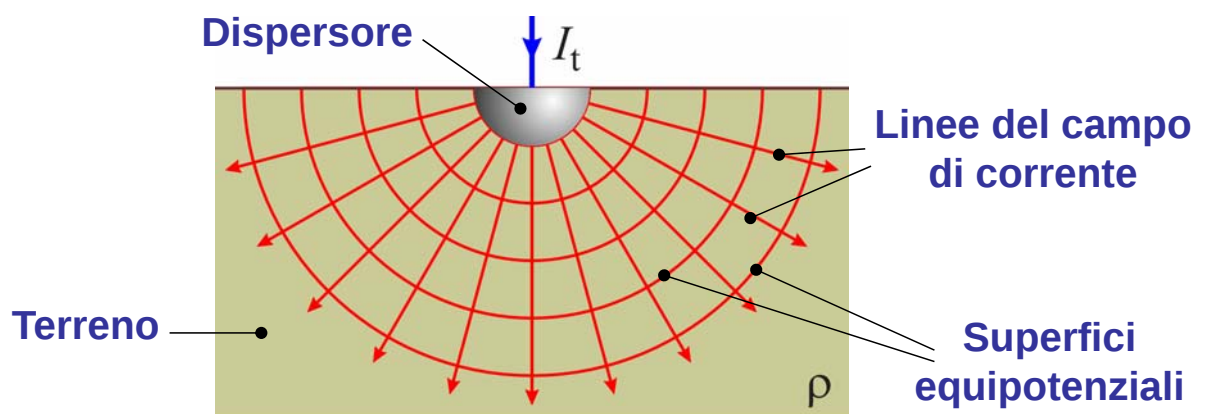
62

Impianto di terra

- Un impianto di terra è formato da
 - ◆ un **dispersore**, costituito da uno o più elementi conduttori immersi nel terreno
 - ◆ un **collettore di terra**, costituito da un morsetto o una sbarra metallica
 - ◆ un **conduttore di terra** che collega gli elementi del dispersore al collettore
 - ◆ **conduttori di protezione (PE)** che collegano il collettore alle masse delle apparecchiature elettriche

63

Dispersore di terra emisferico



64

Dispersore di terra emisferico

- Si considera, per semplicità, il caso in cui il dispersore 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 dispersore può essere ottenuto da

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

65

Dispersore 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

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

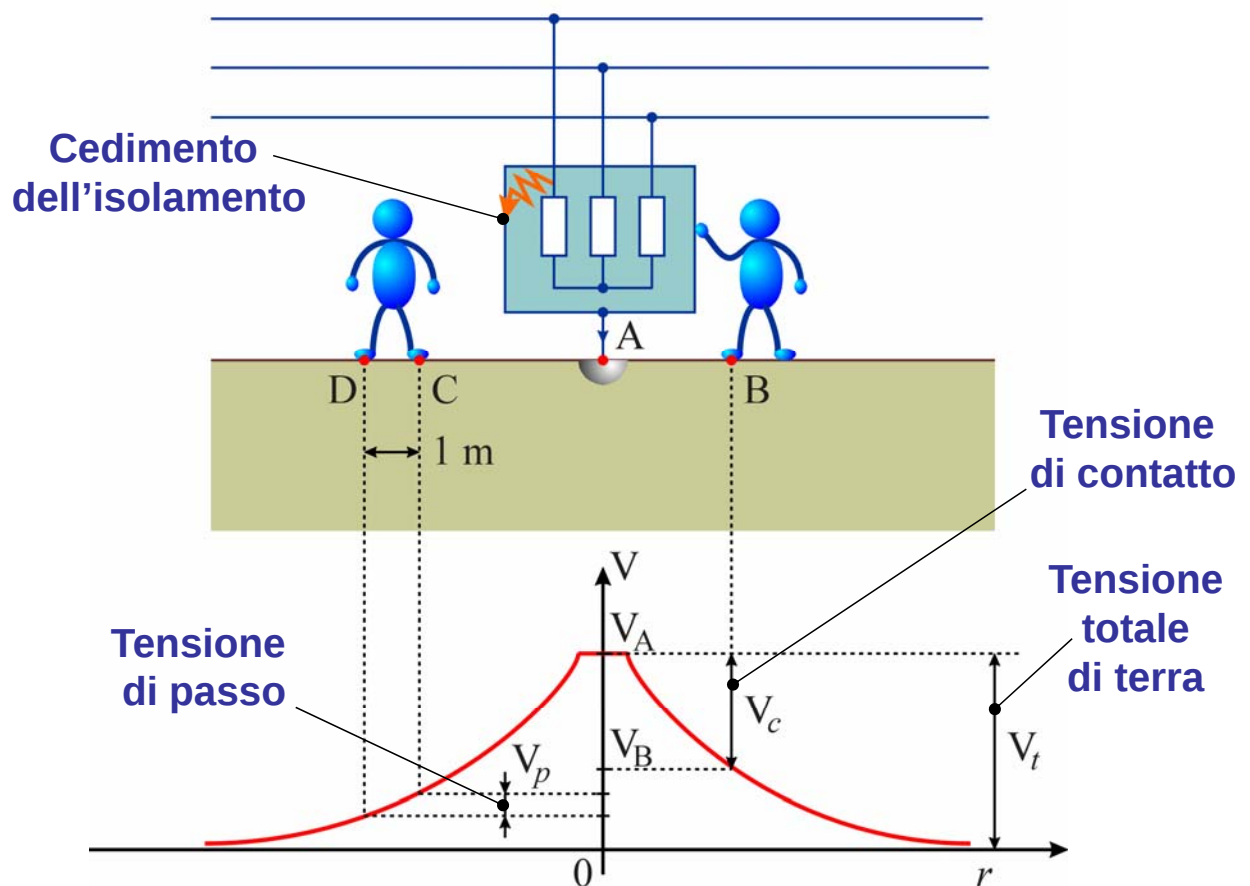
66

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

67

Tensioni di terra



68

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 ρ del terreno
 - ◆ Nel caso di un dispersore emisferico di raggio r_0 si ha

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

69

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

70

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

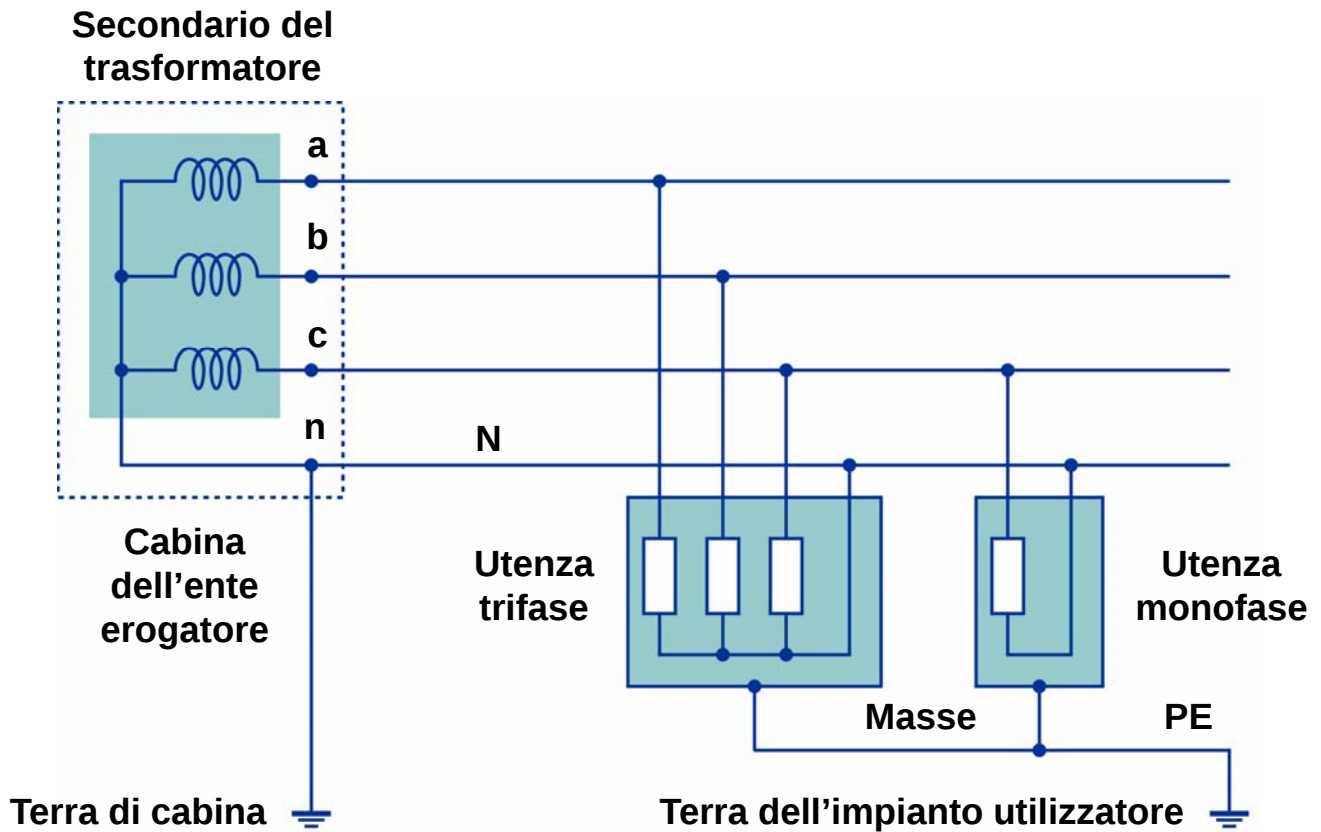
71

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)

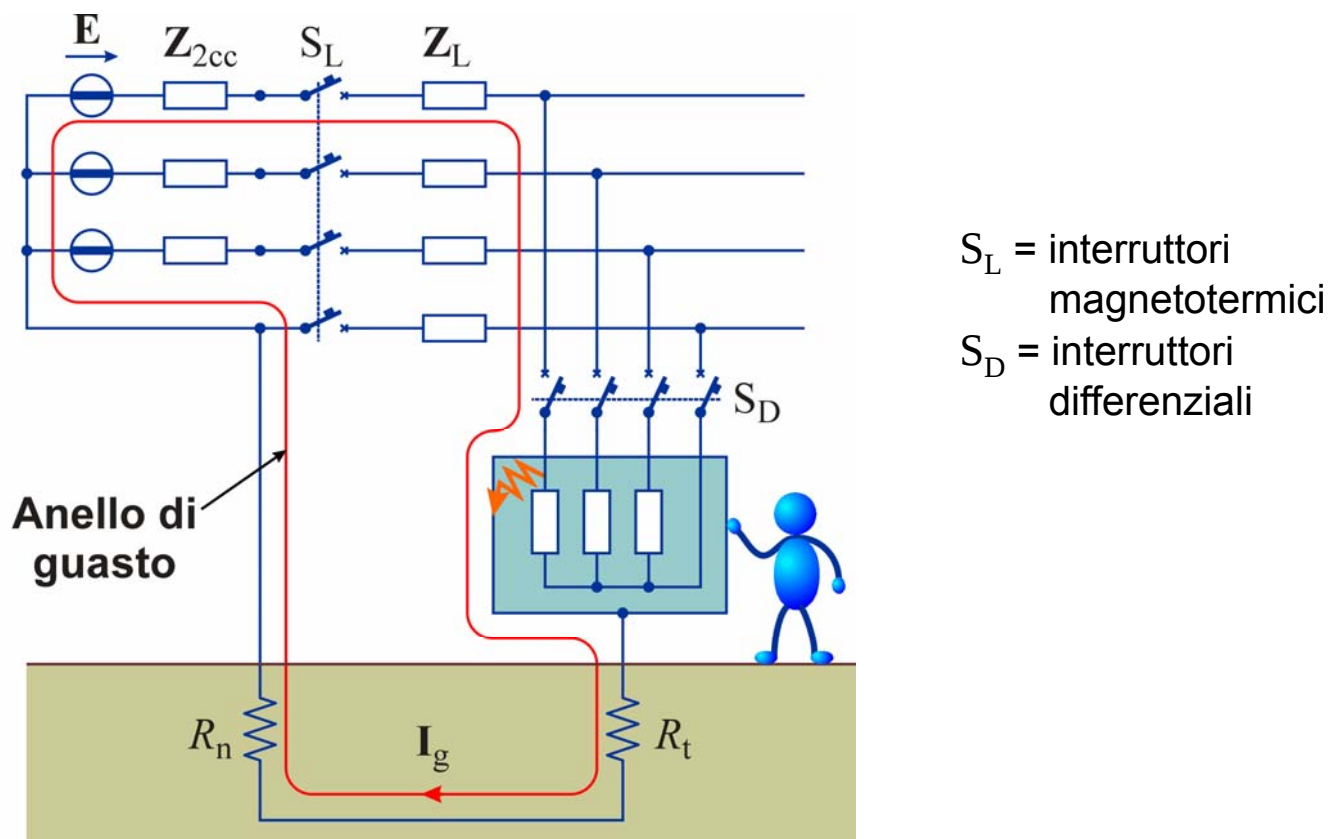
72

Sistema TT



73

Protezione nei sistemi TT



74

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

75

Protezione nei sistemi TT

- Per impedire che la tensione di contatto superi 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 ≤ 30 mA gli interruttori differenziali forniscono anche la protezione contro i contatti diretti

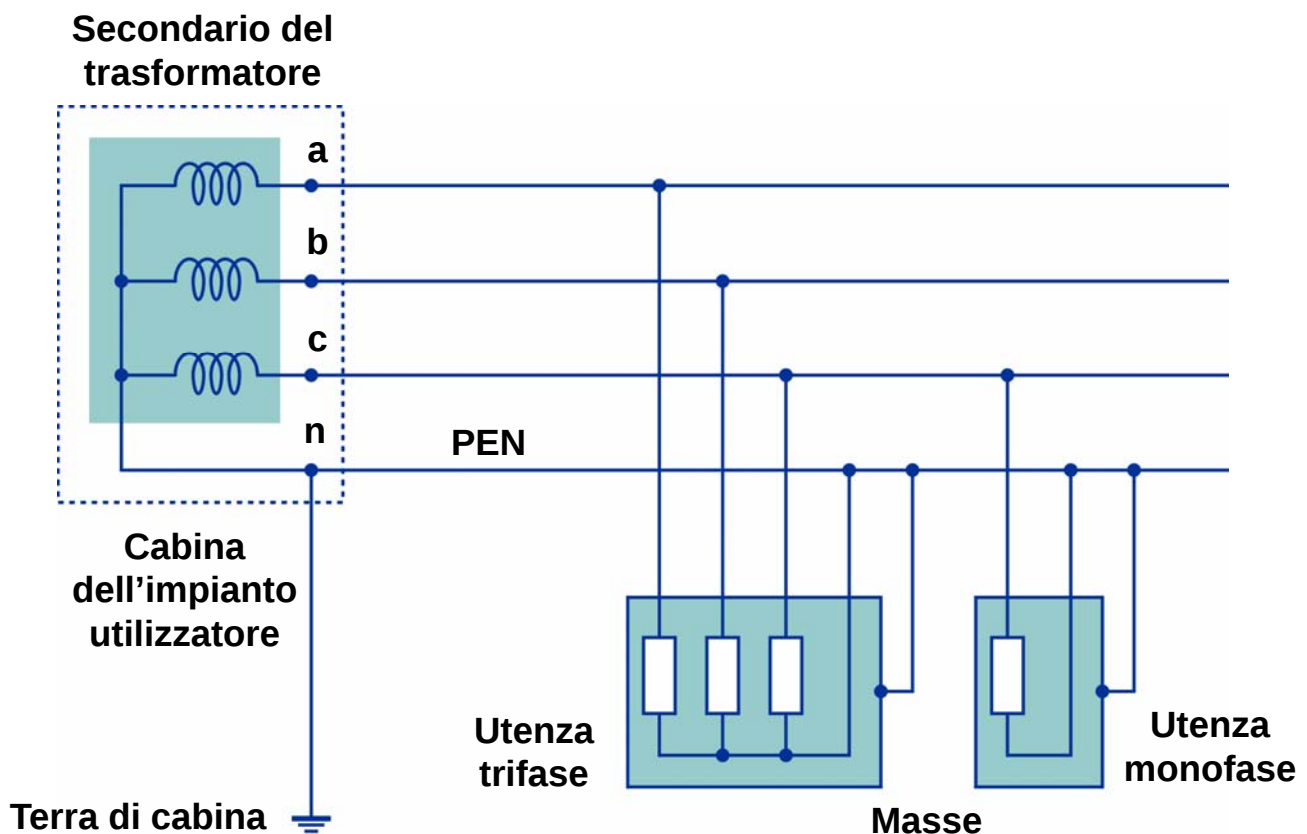
76

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

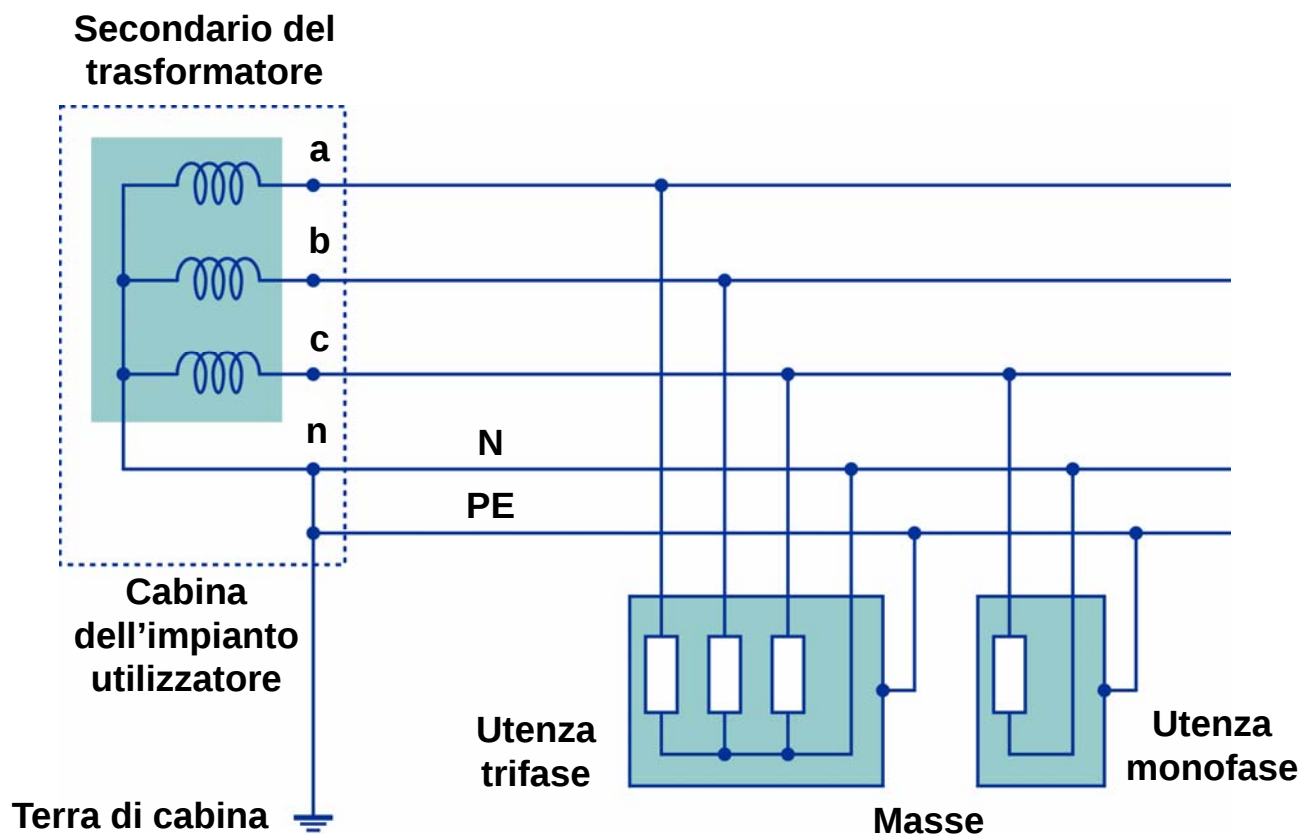
77

Sistema TN-C



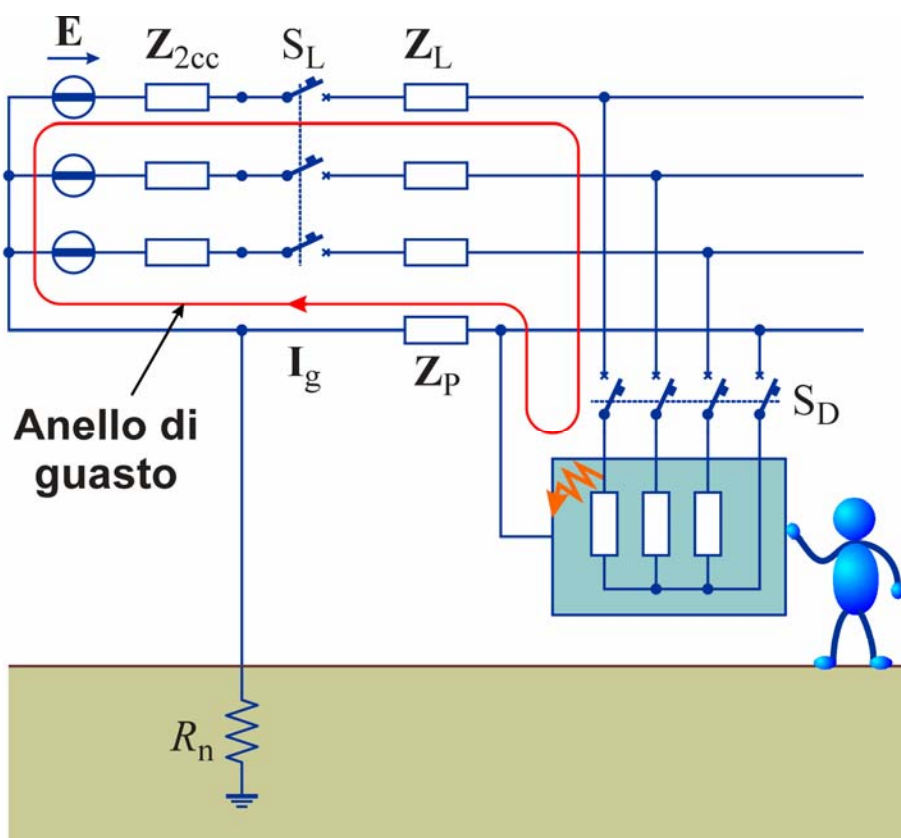
78

Sistema TN-S



79

Protezione nei sistemi TN



80

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

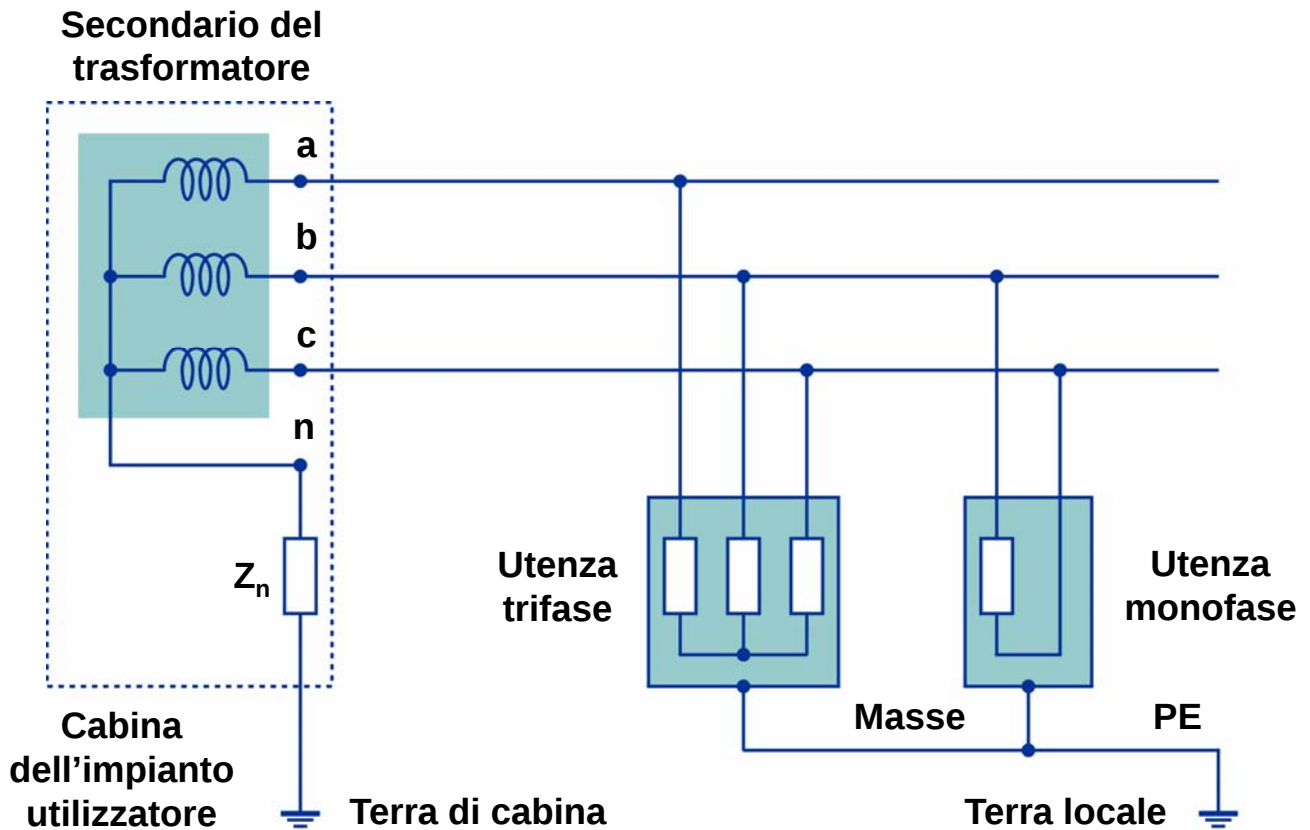
81

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

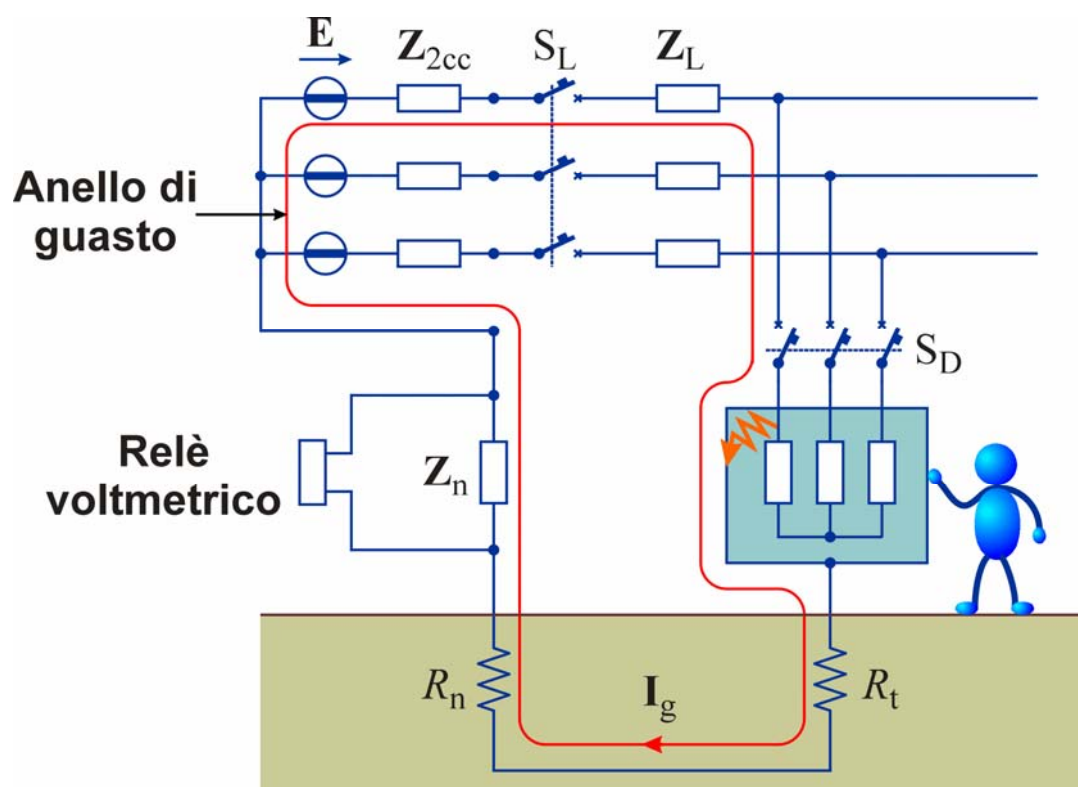
82

Sistema IT



83

Protezione nei sistemi IT



84

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

85

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

86