



Elettrotecnica
Cap. 14

M. Repetto

Elettrotecnica

Capitolo 14: sicurezza elettrica

M. Repetto

Dipartimento di Ingegneria Elettrica
Politecnico di Torino



Maggio 2011



sicurezza elettrica

- la sicurezza elettrica e' una materia complessa che studia gli aspetti dell'ingegneria elettrica legati alla prevenzione e all'attenuazione di possibili danni dovuti a guasti e/o utilizzi impropri dell'elettricit'
- lo studio e' multi-disciplinare perche' richiede:
 - conoscenze ingeneristiche per capire e controllare i fenomeni coinvolti
 - conoscenze pratiche e giuridiche per valutare le conseguenze dei pericoli connessi all'utilizzo dell'elettricit'



sicurezza elettrica

- come in ogni apparecchiatura tecnica, un guasto o un malfunzionamento in un sistema elettrico puo' renderlo fonte di rischi, questa pericolosita' viene giudicata in base a:
 - tempo (quello che era un rischio accettabile 20 anni fa non lo e' piu' ora)
 - luogo (paesi diversi hanno una differente percezione del rischio)
- sono comunque ritenuti indicatori di sicurezza:
 - tasso di guasto (numero di guasti per untia' di tempo)
 - conseguenze del danno derivante da un guasto



regolamentazione tecnica

- la sicurezza non e' l'unico criterio utilizzato nel progetto di un dispositivo
- altri criteri come il costo del dispositivo, semplicita' di fabbricazione possono essere utilizzati
- un compromesso tra questi criteri spesso contrastanti non puo' essere lasciato alla buona volonta' del progettista/fabbricante/gestore del sistema ma deve essere regolamentato da una serie di norme di carattere tecnico
- queste regole tecniche possono essere stabilite da leggi nazionali o da comitati tecnici che decidono il miglior modo di progettare/costruire/esercire un componente o un sistema



regolamentazione tecnica

- le leggi nazionali hanno generalmente un iter approvativo lungo e, una volta promulgate, sono difficili da mutare
- questo fatto contrasta con i mutamenti della materia tecnica che può rendere una regolamentazione obsoleta in pochi anni
- in molte nazioni il potere legislativo ha delegato la regolamentazione tecnica ad organismi privati
- in aggiunta, per mantenere un livello di scambio di beni tra paesi differenti, è necessaria un'armonizzazione delle regole per evitare che i prodotti possano circolare solo in una nazione
- per evitare questi problemi è stato sviluppato un insieme di organismi internazionali che studiano la materia tecnica



IEC

- Commission Electrotechnique Internationale: *"the IEC is the world's leading organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies - collectively known as "electrotechnology". <http://www.iec.ch>*



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
МеждународнаяЭлектротехническаяКомиссия

- l'IEC gestisce i sistemi di conformita' agli standard internazionali e la certificazione per componenti e sistemi
- a livello europeo il *CENELEC* ha lo stesso compito



European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung



normativa italiana CEI

- il *Comitato Elettrotecnico Italiano* e' l'organismo italiano che si occupa di regolamentazione della materia elettrica



- tutte le principali normative italiane scritte dal *CEI* sono comunque all'interno dello schema della regolamentazione internazionale
- per esempio la norma italiana *CEI EN 62226-1* e' legata ai documenti internazionali

COLLEGAMENTI/RELAZIONI TRA DOCUMENTI

Nazionali

Europei (IDT) EN 62226-1:2005-03;

Internazionali (IDT) IEC 62226-1:2004-11;

normativa italiana CEI

NORMA ITALIANA CEI

Norma Italiana

CEI EN 62226-1

La seguente Norma è identica a: EN 62226-1:2005-03.

Data Pubblicazione

Edizione

2006-04

Prima

Classificazione

Fascicolo

106-10

8230

Titolo

**Esposizione ai campi elettrico e magnetico nell'intervallo delle frequenze basse e intermedie - Metodi di calcolo della densità di corrente e del campo elettrico interno indotti nel corpo umano
Parte 1: Aspetti generali**

Titolo

Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body
Part 1: General



ELETTROTECNICA GENERALE E MATERIALI PER
USO ELETTRICO



CEI COMITATO ELETTROTECNICO ITALIANO
AIEF FEDERAZIONE ITALIANA DI ELETTROTECNICA, ELETTRONICA, AUTOMAZIONE, INFORMATICA E TELECOMUNICAZIONI
CNR CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE





norme e legislazione

- le norme sono scritte da organismi privati e quindi non hanno in generale valore legale
- tuttavia essi possono essere considerati dalla legislazione come una buona regola
- in Italia la legge n. 186 del 1968, dice che
 - *le installazioni tecniche devono essere "a regola d'arte"*
 - *le installazioni tecniche realizzate mediante le norme CEI sono a "regola d'arte"*



norme e legislazione

- anche se l'utilizzo delle norme CEI non e' obbligatorio, praticamente ogni progettista/fabbricante/gestore le utilizza in quanto esse sono una garanzia contro possibili cause legali
- in caso di danni infatti il progettista/fabbricante/gestore puo' essere citato in giudizio per le sue responsabilita'
- le norme sono quindi spesso utilizzate in controversie legali
- le normative dividono la materia della sicurezza elettrica in due parti:
 - sicurezza del sistema
 - sicurezza delle persone



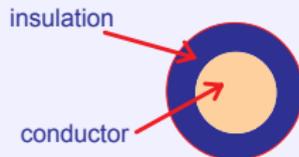
guasti nei sistemi elettrici

- le normative devono indicare come si debbano ideare e realizzare i sistemi elettrici in modo che il **tasso di guasto** sia il piu' basso possibile e che i possibili **danni** derivanti siano i piu' contenuti possibili
- tra le molte categorie di guasti nei sistemi elettrici, quelli alle linee di trasmissione sono i piu' frequenti
- in aggiunta, il piu' frequente danno alla linea di trasmissione puo' derivare dai problemi termici
- i problemi termici possono avvenire perche', a causa delle perdite Joule sulle linee, i conduttori possono aumentare la propria temperatura fino al punto di danneggiare il proprio isolamento e creando conseguenze gravi, come nel caso di incendio



comportamento termico delle linee

- una linea a di trasmissione in un impianto industriale e' realizzata con cavi isolati
- ogni conduttore della linea ha un isolamento spesso realizzato in materiale organico (tra i piu' usati: PVC, gomma, resine etc.)
- questi materiali sono utilizzati perche' hanno basso costo ed hanno caratteristiche elettriche (elevata rigidita' elettrica) e meccaniche (resistenza meccanica alla piegatura etc.)
- queste proprieta' sono pero' alterate da valori di temperatura relativamente bassi (maggiori di $90^{\circ}C$)





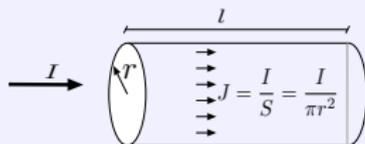
bilancio termico

- la corrente che fluisce nel conduttore crea una potenza dissipata che lo riscalda
- il valore di temperatura che viene raggiunto dipende da:
 - quantità' di calore prodotta RI^2
 - quantità' di energia immagazzinata nella capacità termica del conduttore C_t
 - quantità' di calore scambiata con l'ambiente, prevalentemente per convezione

$$C_t \frac{d\theta}{dt} + \lambda S_{lat} \theta = P_{joule} \quad (1)$$



bilancio termico



- per un segmento rettilineo di lunghezza l e raggio r :

$$c_t (\pi r^2 l) \frac{d\theta}{dt} + \lambda \theta (2\pi r l) = \rho \frac{l}{\pi r^2} I^2 \quad (2)$$

- dividendo per il volume $\pi r^2 l$:

$$c_t \frac{d\theta}{dt} + \lambda \frac{2\pi}{r} \theta = \rho \frac{1}{(\pi r^2)^2} I^2 = \rho \left(\frac{I}{\pi r^2} \right)^2 = \rho J^2 \quad (3)$$

- il termine noto dipende dalla resistività del materiale e dal valore di densità di corrente al quadrato



bilancio termico

- la soluzione dell'equazione differenziale del primo ordine tende ad un valore di regime costante pari a:

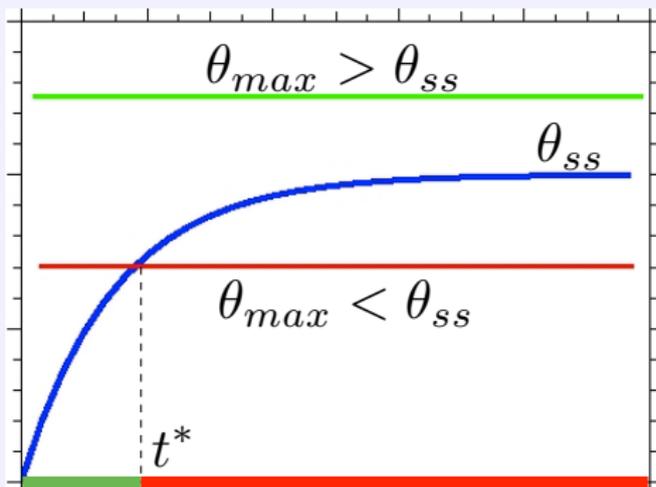
$$\theta_{ss} = r\rho \frac{J^2}{\lambda} \quad (4)$$

- analizzando lo stato di un materiale conduttore per una certa (ρ) e per le sue dimensioni (r), esso dipende da:
 - λ cioè la capacità di trasmettere il calore all'aria esterna
 - densità di corrente J^2
- la costante di tempo del sistema dipende dal coefficiente di capacità termica λ , solitamente le costanti di tempo termiche sono dell'ordine dei minuti



bilancio termico

- il transitorio termico puo' dar luogo a due casi:
 - $\theta_{ss} < \theta_{max}$ caso accettabile
 - $\theta_{ss} > \theta_{max}$ caso pericoloso



- anche nel caso pericoloso pero' per $t < t^*$ la temperatura assume valori accettabili



portata di un cavo

- dato il massimo valore di temperatura che l'isolamento di un cavo puo' sostenere, la portata di un cavo e' quel valore di corrente che, a regime termico, mantiene la temperatura del cavo in zona di sicurezza
- la portata dipende dalla sezione del cavo ma anche dal modo in cui esso e' posato nell'impianto
- ad esempio un cavo in aria libera puo' scambiare piu' calore dello stesso cavo posato in un cunicolo vicino ad altri cavi
- per una data tipologia di impianto, materiale conduttore ed isolante, sezione le normative specificano il valore di portata del cavo



tabella di portate

- per un conduttore in rame isolato in PVC (temperatura massima 90°C) in aria libera, la portata e' stabilita come

diametro, mm	sez, mm^2	portata, A efficaci
2.05	3.3	41
4.11	13.3	101
5.82	26.6	158
9.26	67.3	283

- es. un carico monofase $P=100\text{ kW}$, $V=230\text{ V}$, $\cos\varphi=0.9$ assorbe una corrente pari a $I=96.6\text{ A}$ e' quindi richiesta la sezione di conduttore $S=13.3\text{ mm}^2$

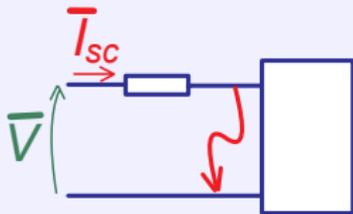


sovracorrente

- in fase di progetto della linea: le condizioni di posa (in aria libera, in cunicolo etc.) e la corrente nominale dell'impianto sono dati del problema
- dalle norme il progettista puo' definire il valore della sezione del cavo che consente di portare il valore di corrente necessario
- una volta che il cavo sia posato, il valore di corrente di progetto diventa un vincolo del sistema
- ogni corrente che ecceda il valore di portata per un tempo sufficientemente lungo e' un pericolo per il cavo
- ogni valore di corrente che eccede la nominale e' chiamato quindi **sovracorrente**

corrente di sovraccarico e di corto-circuito

- la normativa stabilisce due tipi di **sovracorrente**:
- **corrente di sovraccarico**: corrente che fluisce in un circuito con isolamento funzionante il cui valore è maggiore della portata: corrente di sovraccarico
 $I_N < I_{OL} < 8I_N$
- **corrente di corto circuito**: corrente che fluisce in un circuito il cui isolamento sia stato danneggiato. In questo caso l'impedenza che limita la corrente è solitamente molto piccola e quindi la corrente di corto-circuito può raggiungere valori che sono da 10 a 20 volte la portata del cavo





dispositivi di sicurezza

- qualsiasi sia la causa che la crea, una sovracorrente deve essere interrotta prima che gli effetti termici causino danni permanenti al sistema
- **dispositivi di sicurezza** sono interruttori automatici composti da:
 - un sensore che deve valutare le condizioni del sistema e deve inviare un segnale in caso di situazione pericolosa (relais)
 - un interruttore di potenza capace di interrompere la corrente indipendentemente dal valore elevato e dalla presenza di componenti induttive sulla linea
- per salvaguardare la **continuita' del servizio** gli interruttori automatici devono intervenire solo quando il sistema sia in condizioni di reale pericolo



interruttore termico

- in caso di sovraccarico la sollecitazione termica della linea aumenta in maniera graduale
- le costanti di tempo termiche consentono solitamente un certo intervallo di tempo prima che la temperatura raggiunga valori pericolosi
- gli interruttori termici consentono di accettare valori di corrente superiori alla portata solo per tempi inferiori al raggiungimento della temperatura limite
- questo tipo di comportamento e' accettabile per valori di corrente che siano al massimo otto volte la nominale



interruttore termico

- la potenza dissipata nel cavo e' data da:

$$P_{joule} = R_{cable} I_{OL}^2 \quad (5)$$

- la temperatura del cavo aumenta proporzionalmente all'energia dissipata

$$W_{joule} = P_{joule} t = R_{cable} I_{OL}^2 t \quad (6)$$

- valori minori di I_{OL} raggiungono il valore di W_{joule} in un tempo maggiore secondo la:

$$R_{cable} I_{OL}^2 t^* = constant \quad (7)$$



interruttore termico

- il tempo di intervento dell'interruttore termico e' quindi inversamente proporzionale al valore della corrente al quadrato

$$t^* = \frac{k}{I_{OL}^2} \quad (8)$$

dove k e' una costante dipendente dal cavo

- prima dell'uso dell'elettronica, i relais termici erano realizzati con lamine bimetalliche che modificavano la loro forma in funzione della loro temperatura
- oltre una certa deformazione la lamina, agendo su di un meccanismo, e' in grado di interrompere il circuito
- il **fusibile** e' un componente sacrificale che protegge dalle correnti di sovraccarico con comportamento simile all'interruttore termico



interruttore magnetico

- se la corrente in un conduttore è maggiore di otto volte la corrente nominale, questo fatto indica che è presente un difetto di isolamento
- in questo caso la corrente deve essere interrotta nel più breve tempo possibile in modo da non causare danni
- un circuito magnetico usa un relais basato sull'attrazione di un elettromagnete: non appena la corrente supera un certo valore istantaneamente si verifica l'intervento del dispositivo
- a causa dei tempi dovuti agli interventi meccanici, in un fenomeno a 50Hz il tempo di interruzione non può essere minore di 20ms



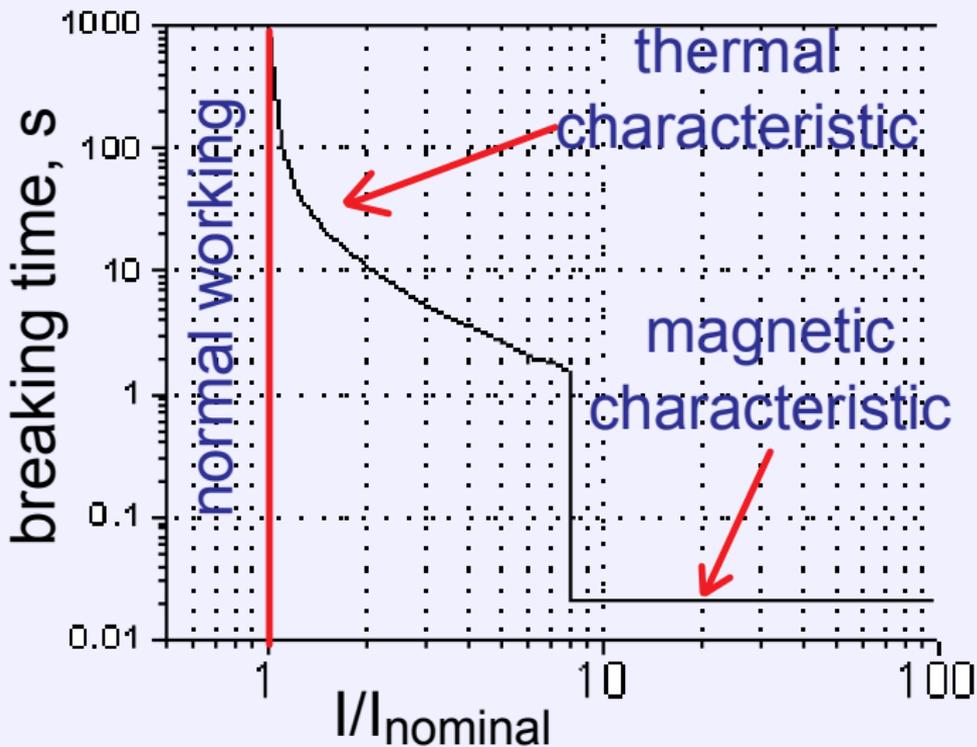
interruttore magneto-termico

- dato che entrambe le caratteristiche sono utili al sistema questi due sistemi sono spesso integrati in un unico dispositivo con:
 - flessibilita' di intervento termica se la corrente non e' molto elevata
 - rapidita' di intervento magnetica se e presente un corto circuito
- l'interruttore risultante viene quindi chiamato **interruttore magneto-termico**





caratteristica dell'interruttore magneto-termico





pericoli nei sistemi elettrici

- l'uso dei sistemi elettrici in modo non corretto o in condizioni di guasto puo' essere pericoloso per le persone
- l'uso della potenza elettrica nei sistemi industriali e domestici e' molto diffuso e spesso la sua pericolosita' e' sottostimata
- infatti le condizioni di shock elettrico sono una delle principali cause di incidenti a livello industriale e domestico
- al fine di valutare la pericolosita' delle installazioni vanno valutati gli effetti elettrici sul corpo umano



effetti biologici delle correnti

- i tessuti umani sono conduttivi e quindi, in caso di applicazione di una tensione, in essi puo' circolare una corrente
- una corrente che scorre all'interno del corpo umano puo' creare danni a causa della sua interazione con le correnti fisiologiche presenti nell'organismo
- le correnti fisiologiche sono infatti utilizzate dal sistema nervoso per inviare impulsi dal sistema nervoso centrale agli organi attuatori (muscoli)
- un malfunzionamento muscolare puo' avere conseguenze diverse in funzione di:
 - intensita' della corrente
 - percorso della corrente nel corpo
 - durata della corrente



effetti biologici delle correnti

- **tetanizzazione**: la corrente crea contrazioni muscolari non controllate dalla persona
- **asfissia**: in caso di perdita di controllo della muscolatura del torace, la respirazione può essere compromessa (effetto reversibile e tempo di intervento dell'ordine dei minuti)
- **fibrillazione ventricolare**: il cuore è un muscolo molto reattivo agli stimoli elettrici ed il suo funzionamento è regolato elettricamente da un organo nervoso periferico detto nodo seno-atriale



effetti biologici delle correnti

- **fibrillazione ventricolare**: le fibre muscolari cardiache sono molto reattiva agli stimoli elettrici ma anche piu' vulenrabili e un'esposizione a correnti piu' elevate di quelle fisiologiche, puo' danneggiarne il comportamento in maniera irreversibile anche quando venga rimossa la corrente
- i tempi di reazione sono brevissimi (max decine di secondi) e l'intervento puo' essere effettuato solo mediante un'appropriata strumentazione medica (defibrillatore)
- **ustioni**: il riscaldamento dovuto alle perdite Joule e' molto pericoloso perche' il calore viene generato all'interno del corpo



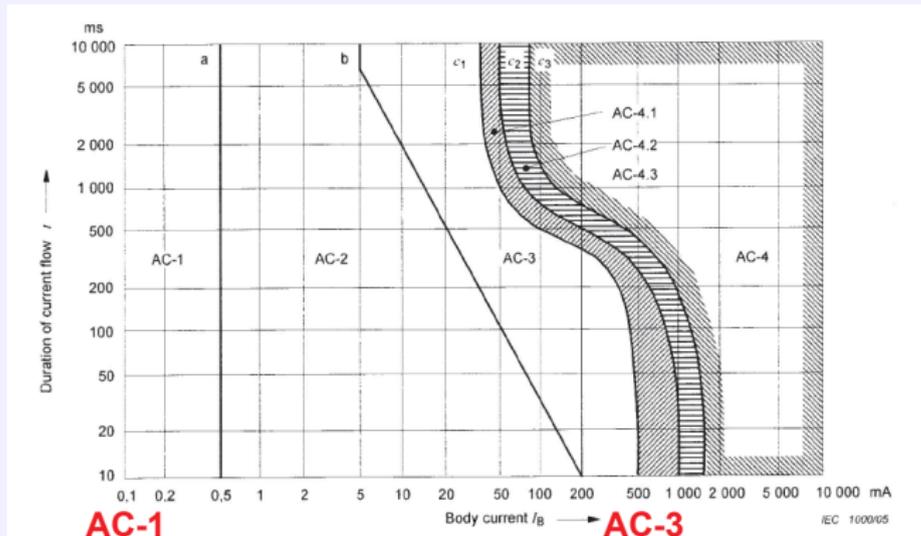
livelli di pericolosità delle correnti

- alla frequenza industriale di 50 Hz e al livello di tensione di 230 V, la normativa IEC specifica i seguenti valori:
- **soglia di percezione**: valore al di sotto del quale la corrente non viene percepita dalla persona **0.5 mA**
- **soglia di rilascio**: valore al di sopra del quale la persona non può controllare i suoi movimenti e che può causare fenomeni irreversibili (fibrillazione) **10 mA**
- **curva di sicurezza**: caratteristica tempo-corrente, in mA e s, la curva è approssimata da:

$$I = 10 + \frac{10}{t} \quad (9)$$



TS 60479 IEC:2005



AC-1

perceptible
but not
dangerous

AC-2

muscle
contraction

AC-3

breathing and
cardiac effects
(reversible)

AC-4

cardiac
fibrillation



TUV document

EFFECTS OF ELECTRICAL CURRENT IN THE HUMAN BODY	
Current	Reaction
Below 1 Milliampere	Generally not perceptible
1 Milliampere	Faint Tingle
5 Milliampere	Slight shock felt. Not painful but disturbing. Average individual can let go. Strong involuntary reactions can lead to other injuries.
6 to 25 Milliampere (women)	Painful shocks. Loss of muscle control.
9 to 30 Milliampere (men)	The freezing current or "let go" range. If extensor muscles are excited by shock, the person may be thrown away from the power source. Individuals cannot let go. Strong involuntary reactions can lead to other injuries.
50 to 150 Milliampere	Extreme pain, respiratory arrest, severe muscle reactions. Death is possible.
1.0 to 4.3 Amperes	Rhythmic pumping action of the heart ceases. Muscular contraction and nerve damage occur; death is likely.
10 Amperes	Cardiac arrest, severe burns, death is probable.



valori numerici delle grandezze biologiche

- la soglia di rilascio (**10 mA**) e' utilizzata come valore limite ammissibile il cui valore non dovrebbe mai essere superato in caso di guasto
- **resistenza del corpo umano**: i tessuti sono conduttivi sono molto complessi e le norme specificano che a 50 Hz e al valore di 230 V, essi possono essere ben approssimati da **$R=1000 \Omega$**
- dato che sono noti il massimo livello di corrente e il valore di impedenza, si puo' calcolare il massimo valore di tensione applicabile ad una persona come:

$$V = RI = 1000 * 0.01 = 10V \quad (10)$$



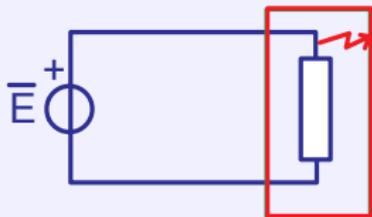
limiti di pericolo

- dato che nelle installazioni usuali (industria e civile) la tensione non viene applicata direttamente alla persona ma sono presenti materiali interposti (vestiario, calzature etc.), le normative specificano valori leggermente piu' elevati
- **tensione di contatto**: tensione massima a cui una persona puo' venire a contatto
 - ambiente ordinario: $V_L = 50V$
 - ambienti speciali: $V_L = 25V$
- sono ambienti speciali: bagni, piscine, cantieri, locali ad uso medico etc.



interazione del corpo umano con le correnti

- la persona può entrare in contatto con un sistema elettrico in due modi
- **contatto diretto**: contatto della persona con un conduttore nominalmente in tensione esposto senza isolamento
- **contatto indiretto**: contatto di una persona con una parte conduttiva normalmente non in tensione che va in tensione a causa di un difetto di isolamento
- **massa**: parte del sistema che può andare in tensione a causa di un difetto di isolamento





stato del neutro

- le normative analizzano in maniera dettagliata le possibili configurazioni elettriche relative al contatto indiretto
- in questo caso e' molto importante definire l'interazione del circuito elettrico con l'ambiente circostante e gli eventuali punti di contatto tra il circuito e l'ambiente
- i principali sistemi di collegamento sono:
 - **sistema TT**: neutro a terra **T** - masse a terra **T**
 - **sistema TN**: neutro a terra **T** - masse al neutro **N**
- le ragioni di queste scelte dipendono principalmente dall'estensione del sistema elettrico

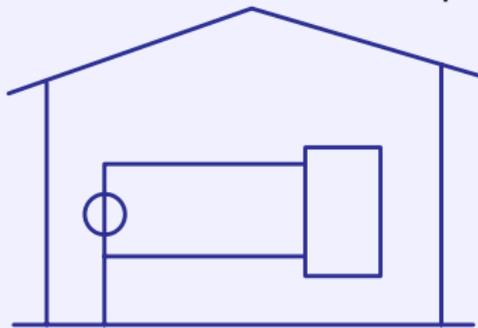


stato del neutro

Sistema TT: sistema esteso geograficamente



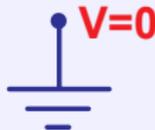
Sistema TN: sistema di estensione spaziale limitata





potenziale di terra

- mentre il contatto diretto deve essere evitato mediante barriere isolanti, il contatto indiretto puo' avvenire con parti nominalmente accessibili
- lo studio dei contatti indiretti richiede la valutazione del comportamento elettrico dell'ambiente circostante il circuito (terreno, edificio, strutture metalliche etc.)
- in un ambiente conduttivo in assenza di correnti il potenziale elettrico e' uniforme e convenzionalmente si assume che le parti conduttive a riposo abbiano potenziale zero o siano al **potenziale di terra**
- se un punto del circuito e' collegato al terreno, allora i suoi potenziali sono riferiti al potenziale di terra

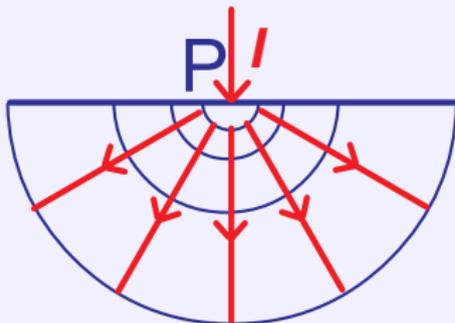




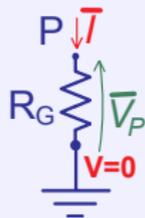
resistenza di terra

- in caso di difetto di isolamento del circuito verso terra, il terreno e' percorso da corrente e quindi non ha piu' lo stesso potenziale
- la resistenza elettrica del terreno e' \propto resistivita' terreno, $\propto \frac{1}{dimensioni}$ oggetto disperdente

emi-spazio conduttore



potenziale del punto P



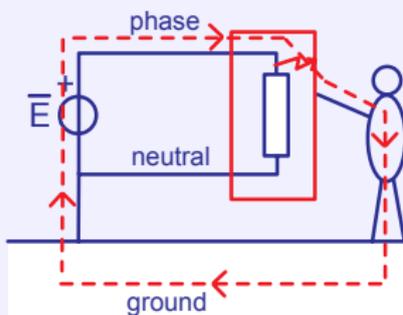
$$V_P = R_G I \quad (11)$$



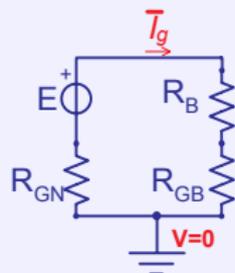
guasto di isolamento a terra

- un difetto di isolamento verso terra crea un circuito di **guasto a terra** che puo' interessare la persona

corrente nel corpo umano



circuito di terra



$$I_g = \frac{E}{R_{GN} + R_B + R_{GN}} \quad (12)$$



valutazione della corrente nella persona

- le resistenze interessate nel circuito di guasto sono:
 - resistenza del filo di neutro verso terra R_{GN} collegamento realizzato e mantenuto dall'ente distributore per ragioni di sicurezza e tipicamente di valore basso (1 – 10 Ω)
 - resistenza della persona verso terra R_{GN} nel caso peggiore puo' essere nulla (contatto con un oggetto metallico a terra)
 - resistenza del corpo umano R_B circa uguale a 1000 Ω
 - resistenza degli altri conduttori (filo di fase etc.) solitamente trascurabile
- nel caso peggiore la corrente nel corpo umano diventa

$$I_B = \frac{E}{R_B} = \frac{230}{1000} = 0.23 = 230mA \quad (13)$$



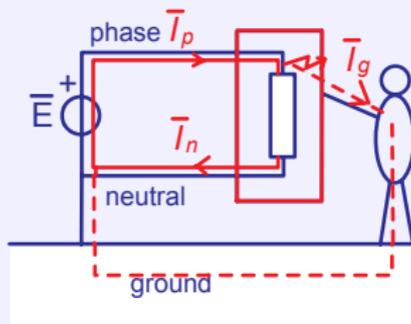
valutazione della corrente nella persona

- nel caso peggiore la corrente di $230mA$ e' 23 volte maggiore del limite sulla corrente ($10mA$)
- anche se e' di pericolosita' elevata, questo valore e' normale in un impianto (lampadina da $100 W$
$$I = \frac{P}{V} = \frac{100}{230} = 0.4A$$
)
- come conseguenza la corrente non viene rilevata come pericolosa nell'impianto e puo' permanere indefinitamente
- da queste considerazioni emerge la necessita' di un ulteriore dispositivo di sicurezza



protezione delle persone

- il caso di corrente che fluisce al di fuori dei fili del circuito e' una situazione potenzialmente pericolosa
- questa situazione puo' essere rilevata da un interruttore differenziale dato che il suo intervento non dipende dal valore di corrente ma da una differenza



$$\bar{I}_g = \bar{I}_p - \bar{I}_n$$

(14)



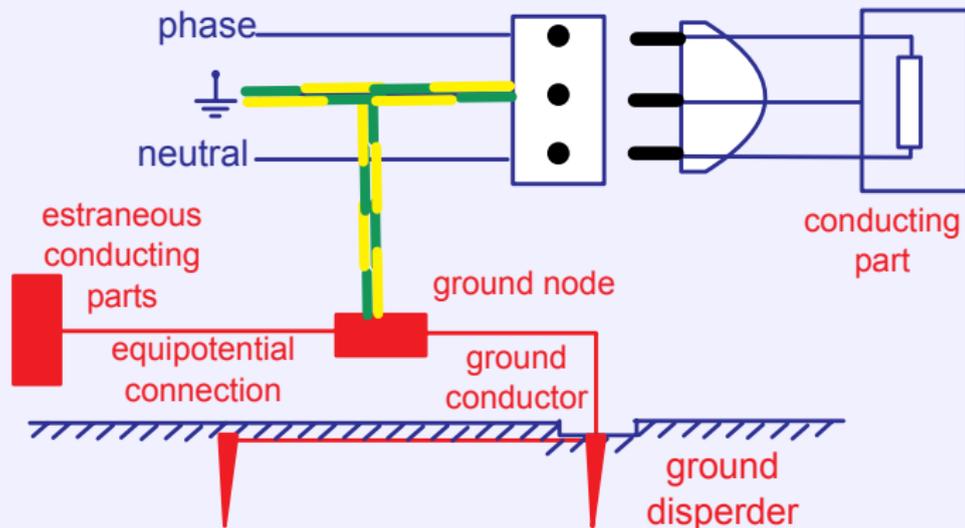
corrente di intervento

- se e' presente un interruttore differenziale, la sua soglia di intervento puo' essere tarata su un valore dell'ordine di $10mA$
- tipicamente questo valore di corrente e' commercialmente un po' piu' elevato ($30mA$) ma i tempi di intervento sono comunque rapidi e tali da rimanere all'interno della curva di sicurezza
- anche se il dispositivo interviene non appena la corrente supera il valore di soglia, la I_g puo' passare nella persona
- una connessione permanente delle masse al terreno consente di rivelare il guasto a terra non appena questo si verifica



connessione delle masse a terra

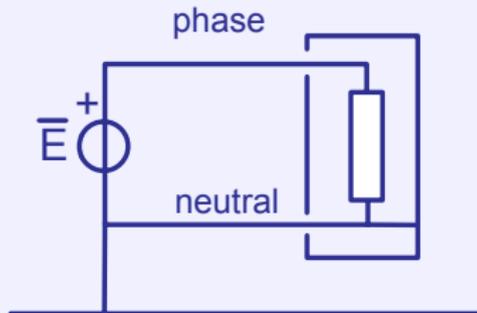
- in un impianto le parti conduttrici sono collegate a terra da un sistema detto **impianto di terra** i cui principali componenti sono:





collegamento masse

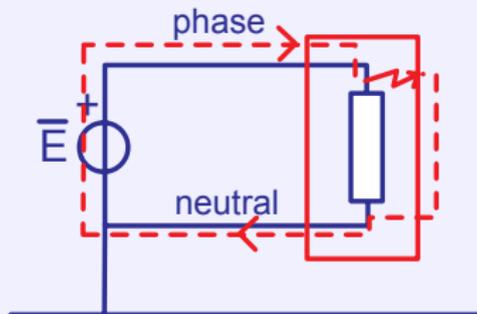
- nei sistemi limitati non esiste la necessita' di convogliare la corrente di guasto nel terreno
- in questo caso e' possibile collegare le masse direttamente al neutro





guasto TN

- in caso di mancanza di isolamento tra le parti attive e la massa si crea un circuito di guasto che interessa solo le parti conduttrici



- un guasto verso massa diventa quindi in questo caso un corto-circuito e puo' essere protetto mediante un interruttore magnetico