

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI MESSINA  
*Dipartimento di Ingegneria*  
*Contrada Di Dio I, 98166 – Villaggio S. Agata Messina*

## ***Appunti Corso di Sistemi Elettrici***

***Capitolo 03 Il terreno come conduttore elettrico***

*Anno Accademico 2015-2016*

*prof. ing. Bruno Azzerboni*

**Fonti:**

*Manuali, guide e cataloghi*  
*ABB, bTicino, Gewiss, Merlin Gerin*  
*Schneider, Siemens*

**Web:**

[www.elektro.it](http://www.elektro.it),  
[www.voltimum.it](http://www.voltimum.it)  
[www.electroyou.it](http://www.electroyou.it)

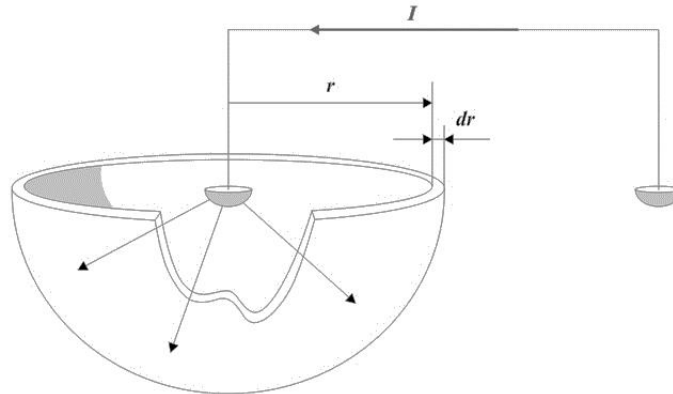
## ***Sommario***

|   |   |
|---|---|
| 3. Il terreno come conduttore elettrico               | 3 |
| 3.1 La resistenza di terra                            | 3 |
| 3.2 I potenziali del terreno                          | 3 |
| 3.3 Dispersori in parallelo                           | 4 |
| 3.4 Resistenza verso terra di una persona             | 4 |
| 3.5 Tensione di contatto ( $U_C$ ) di passo ( $U_P$ ) | 5 |
| 3.6 Tensione totale e tensione di contatto            | 6 |
| 3.7 La curva di sicurezza                             | 8 |

### 3. Il terreno come conduttore elettrico

#### 3.1 La resistenza di terra

Il terreno svolge la funzione di conduttore elettrico tutte le volte che tra due suoi punti viene applicata, tramite due elettrodi, una d.d.p., gli elettrodi immersi nel terreno si chiameranno **dispersori**. Ogni porzione elementare del terreno offre una resistenza tanto più piccola quanto più è lontana dal dispersore (per la verifica si è usato un dispersore emisferico di raggio  $r_0$  perché a una certa distanza, qualunque sia la forma del dispersore, le linee equipotenziali diventano emisferiche). Si consideri un dispersore emisferico distante dall'elettrodo di ritorno abbastanza da considerare il campo di corrente radiale, ogni strato di terreno presenta una resistenza  $dR$  al passaggio di corrente. Si dice resistenza di terra  $R_t$  la somma delle resistenze elettriche elementari di queste porzioni di terreno.



$dr$  = lunghezza percorso della corrente

$2\pi r^2$  = sezione attraversata dalla corrente (area emisferica)

$\rho$  = resistività del terreno supposto omogeneo

$$dR = \rho \frac{dr}{2\pi r^2}$$

$$R_t = \rho \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{2\pi r^2} = \frac{\rho}{2\pi r_0} \text{ resistenza di terra del dispersore}$$

A una certa distanza dal dispersore la sezione diventa così grande che la resistenza è pressoché nulla, mentre nelle immediate vicinanze le sezioni attraverso le quali fluisce la corrente si rimpiccioliscono e la resistenza aumenta. Per quanto detto sopra si **definisce equivalente emisferico di un dispersore qualsiasi, il dispersore di forma emisferica avente la stessa resistenza.**

#### 3.2 I potenziali del terreno

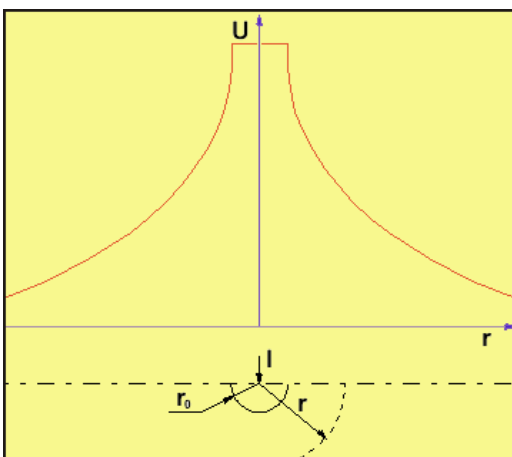


Fig. 3.1 - Andamento del potenziale nel terreno per dispersione con elettrodo emisferico.

$$U = I \int_r^{\infty} \frac{\rho dr}{2\pi r^2} = \frac{\rho I}{2\pi r} \text{ potenziale del terreno}$$

Nel circuito (bipolo) equivalente alla  $R_t$  un polo è rappresentato dal dispersore, l'altro da un punto all'infinito a potenziale zero (*punto sufficientemente lontano dal dispersore tale da poter essere considerato a potenziale zero*).

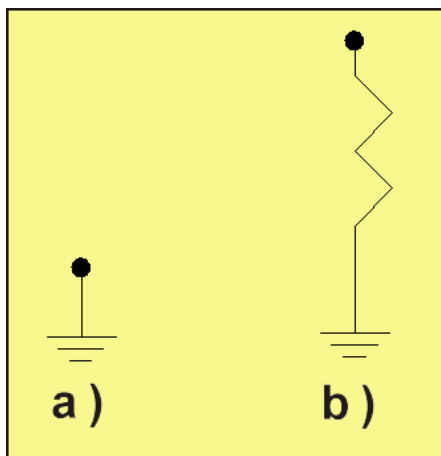
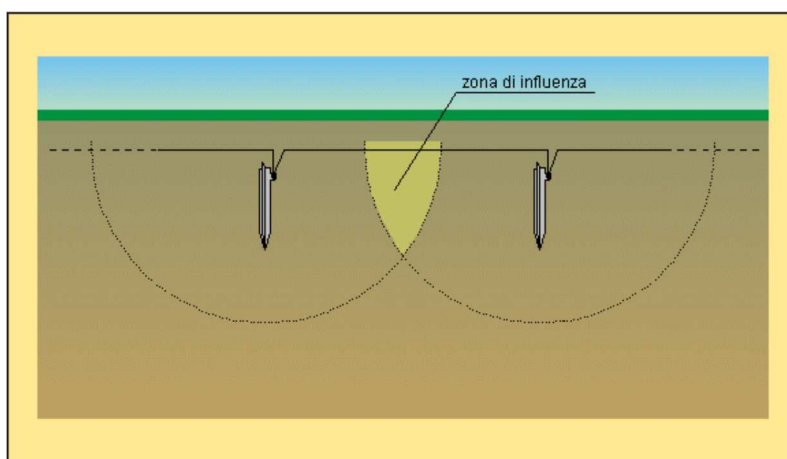


Fig. 3.2 - a) Punto all'infinito a potenziale zero. b) Resistenza di terra di un dispersore.

### 3.3 Dispersori in parallelo

Due elettrodi possono essere considerati in parallelo quando è zero il potenziale prodotto dall'uno sull'altro. In teoria i dispersori non sono mai in parallelo (solo all'infinito l'influenza reciproca è nulla) anche se in pratica è sufficiente che siano distanti circa  $d > 10r_0$  per essere considerati in parallelo ( $r_0$ =raggio dell'equivalente emisferico del dispersore).



Influenza reciproca fra picchetti

### 3.4 Resistenza verso terra di una persona

I piedi possono essere assimilati a due piastre circolari di raggio  $r_p$ . Per comodità assumiamo la piastra di raggio  $r_p = \frac{1}{10} m$  per cui la resistenza di terra di ciascun piede vale:

$$R_t = \frac{2\rho}{5r_p} = \frac{2\rho}{5 \cdot \frac{1}{10}} = 4\rho \quad (3.1)$$

( $\rho$  = resistività del terreno in  $\Omega m$ )

Potendoli considerare come due dispersori in parallelo la resistenza di terra del “dispersore piedi”  $R_{tc}$  di una persona vale circa  $2\rho$ . Se si indica con  $R_c$  la resistenza del corpo umano,  $R_c + R_{tc}$  rappresenta la resistenza della persona e del terreno fino ad un punto preso all'infinito. A questa, se la persona si trova in locale chiuso, andrebbe aggiunta la resistenza del pavimento.

### 3.5 Tensione di contatto ( $U_c$ ) di passo ( $U_p$ )

Le tensioni di passo e di contatto sono due grandezze fondamentali per la sicurezza. Si riferiscono, infatti, ai rischi di fenomeni di elettrocuzione e rappresentano le tensioni alle quali possono essere accidentalmente sottoposti gli esseri umani. La *tensione di contatto* è la differenza di potenziale alla quale può essere soggetto il corpo umano in contatto con parti simultaneamente accessibili, escluse le parti attive, durante il cedimento dell'isolamento (fig. 3.3).

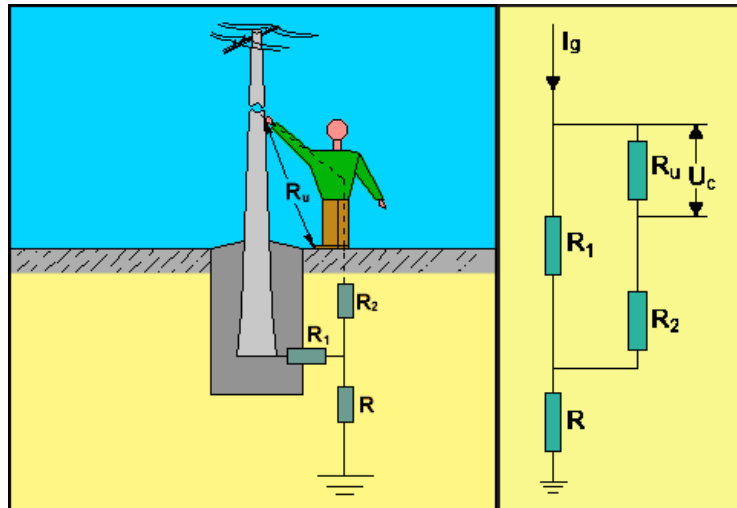


Fig. 3.3 - Tensione di contatto - Significato e circuito equivalente

dove:

- $R_u$ : resistenza del corpo umano nel percorso mano-piede
- $R_2$ : resistenza rappresentativa della resistenza di contatto tra la persona e la terra
- $R_1$ : resistenza che si ha nel collegamento tra l'apparecchiatura elettrica e la terra
- $R$ : resistenza rappresentativa della terra

Il circuito equivalente consente di risalire con facilità alla tensione  $U_c$ . Ricordando che *la corrente che attraversa il corpo umano è una piccola frazione della corrente di guasto  $I_g$* , per cui l'intera  $I_g$  passa in  $R_1$ , con sufficiente approssimazione si ottiene:

$$U_c = \frac{R_u}{R_u + R_2} R_1 x I_g \quad (3.2) \quad \text{dove } R_1 x I_g \text{ è la tensione applicata all'intera serie}$$

La *tensione di passo* è la differenza di potenziale che può risultare applicata tra i piedi di una persona alla distanza di un passo (convenzionalmente un metro) durante il cedimento dell'isolamento (fig. 3.4).

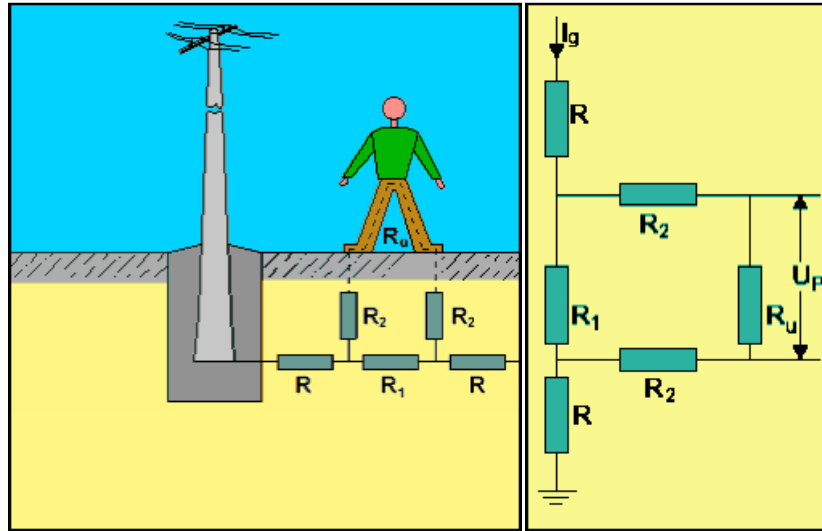


Fig. 3.4 - Tensione di passo - Significato e circuito equivalente

dove:  
 $R_u$ : resistenza del corpo umano nel percorso piede-piede  
 $R_2$ : resistenza rappresentativa della resistenza di contatto tra la persona e la terra  
 $R_1$ : resistenza del terreno tra i due piedi della persona  
 $R$ : resistenza rappresentativa della terra

Con riferimento allo schema equivalente, la  $U_p$  indicando con  $I_c$  la corrente che scorre in  $R_u$ , sarà data dalla formula:

$$U_p = R_u \times I_c = R_u \times I_g \frac{R_1}{R_1 + R_u + R_2 + R_2} = \frac{R_u R_1}{R_1 + R_u + 2R_2} \times I_g \quad (3.3)$$

Dagli schemi equivalenti si può rilevare l'importanza che può assumere il valore delle resistenze  $R_2$  legate alla resistenza dello strato superficiale del terreno. Il terreno quindi potrebbe essere, per ottenere un resistività più alta, realizzato con materiali appositi quali ghiaia, bitume, ardesia, ecc.

### 3.6 Tensione totale e tensione di contatto

La carcassa di un apparecchio messa a terra (collegata ad un dispersore) che disperde la corrente di guasto  $I_g$  assume una tensione:

$$U_t = R_t \times I_g \quad (3.4)$$

$U_t$  = tensione totale di terra

Una persona che toccasse tale carcassa durante un guasto d'isolamento è soggetta ad una tensione  $U_c$  (tensione di contatto) che può essere minore o al limite uguale alla  $U_t$ . La situazione più pericolosa si ha se il contatto avviene lontano dal dispersore in un punto del terreno in cui il potenziale è prossimo allo zero. Se ad esempio il punto di contatto avvenisse tramite una conduttura idrica la resistenza di contatto verso terra della persona  $R_{tc}$  sarebbe molto piccola aumentando la tensione di contatto  $U_c$  fino a farla coincidere in modo sensibile alla tensione totale di terra  $U_t$ . La tensione, preesistente al contatto, che si stabilisce tra la carcassa e il posto che potrebbe essere occupato dalla persona, si chiama tensione di contatto a vuoto  $U_{c0}$  che può essere usata, in favore della sicurezza, al posto della  $U_c$ . La tensione di contatto dipende essenzialmente dalla  $R_c$  del corpo umano. Se al limite la  $R_c$  fosse infinita, attraverso il corpo umano non passerebbe alcuna corrente pur avendo applicata la  $U_{c0}$  e la sicurezza sarebbe la più elevata possibile. Purtroppo la  $R_c$  non solo non è infinita ma pure di difficile valutazione e quindi si è dovuto raggiungere un compromesso assumendo dei valori di  $R_c$  convenzionali (valori non superati dal 5% della popolazione), in condizioni asciutte con area degli elettrodi di  $80\text{cm}^2$ . La resistenza del corpo umano dipende da diversi fattori ma soprattutto dal percorso della corrente, dalle condizioni ambientali, dalla superficie di contatto degli elettrodi con la pelle e dalla tensione. Normalmente la corrente fluisce in un percorso mani-mani o mani-piedi mentre se è elevata la probabilità che il percorso della corrente sia diverso si configura il *“luogo conduttore ristretto”* per il quale occorre prendere particolari misure di sicurezza.

Il percorso mano-mano è meno pericoloso del percorso mani-piedi (la  $R_c$  è minore e la probabilità di innescare la fibrillazione cardiaca è minore rispetto al percorso verticale) tuttavia nel percorso verticale la  $R_c$  ha in serie la resistenza verso terra della persona  $R_{tc}$  che è a favore della sicurezza, tanto che per valori di  $R_{tc}$  elevati diventa più pericoloso in certi casi il percorso trasversale mano-mano. Da queste considerazioni per tracciare la curva di sicurezza ci si è prudenzialmente riferiti al percorso mani-piedi di una persona che afferra un apparecchio elettrico con le due mani e con i due piedi appoggiati al suolo. Sono stati esaminati diversi tipi di pavimenti a secco e a umido ed è stato assunto un valore di  $R_{tc}$  di 1000  $\Omega$  (largamente cautelativo) per i luoghi ordinari e di 200  $\Omega$  in condizioni particolari (all'aperto, in mancanza del pavimento, la  $R_{tc}$  equivale a circa due volte la resistività del terreno, identificata come la resistenza di una piastra metallica appoggiata sul terreno di area equivalente a quella dei piedi, e quindi è prudenziale per resistività del terreno superiori a 100  $\Omega$  m) trascurando, a favore della sicurezza, la resistenza delle calzature. Nella tabella 3.1 sono riportati i valori di resistenza in funzione della tensione nel percorso mani-piedi (CEI 1335 P, art.5) dalla quale si ricava per ogni valore di tensione la corrente che fluisce attraverso la resistenza  $R_c+R_{tc}$ . Il valore di corrente così calcolato va riportato sulla curva di sicurezza tempo corrente dalla quale è facile ricavare il tempo per cui può essere tollerato quel valore di tensione. Questi valori sono raccolti nella tabella 3.1 e vengono utilizzati per tracciare la curva di sicurezza tensione/tempo (la  $R_c$  ha lo stesso valore sia in condizioni ordinarie che in condizioni particolari in quanto non è influenzata in modo significativo dalle condizioni ambientali).

| <i>Tensione di contatto</i> | <i>Valori di <math>R_c</math> che non sono superati dal 5% della popolazione (percorso mani - piedi)</i> |
|-----------------------------|--|
| 25V                         | 875 $\Omega$   |
| 50V                         | 725 $\Omega$   |
| 75V                         | 625 $\Omega$   |
| 100V                        | 600 $\Omega$   |
| 125V                        | 562 $\Omega$   |
| 220V                        | 500 $\Omega$   |
| 700V                        | 375 $\Omega$   |
| 1000V                       | 350 $\Omega$   |
| val. asintotico             | 325 $\Omega$   |

Tab. 3.1. - Valori della resistenza  $R_c$  al variare della tensione

| <i>Tensione di contatto</i> | <i>Condizioni ordinarie</i> |        |        | <i>Condizioni particolari</i> |        |        |
|-----------------------------|-----------------------------|--------|--------|-------------------------------|--------|--------|
|                             | $R_c+R_{tc}$                | $I$    | $t$    | $R_c+R_{tc}$                  | $I$    | $t$    |
| 25 V                        | -----                       | -----  | -----  | 1075 $\Omega$                 | 23 mA  | 5 s    |
| 50 V                        | 1725 $\Omega$               | 29 mA  | 5 s    | 925 $\Omega$                  | 54 mA  | 0,47 s |
| 75 V                        | 1625 $\Omega$               | 46 mA  | 0,60 s | 825 $\Omega$                  | 91 mA  | 0,30 s |
| 90 V                        | 1600 $\Omega$               | 56 mA  | 0,45 s | 780 $\Omega$                  | 115 mA | 0,25 s |
| 110 V                       | 1535 $\Omega$               | 72 mA  | 0,36 s | 730 $\Omega$                  | 151 mA | 0,18 s |
| 150 V                       | 1475 $\Omega$               | 102 mA | 0,27 s | 660 $\Omega$                  | 227 mA | 0,10 s |
| 230 V                       | 1375 $\Omega$               | 167 mA | 0,17 s | 575 $\Omega$                  | 400 mA | 0,03 s |
| 280 V                       | 1370 $\Omega$               | 204 mA | 0,12 s | 570 $\Omega$                  | 491 mA | 0,02 s |
| 500 V                       | 1360 $\Omega$               | 368 mA | 0,04 s | -----                         | -----  | -----  |

Tab. 3.2. - Curve di sicurezza tensione – tempo

### 3.7 La curva di sicurezza

Per la sicurezza, più che ai limiti di corrente pericolosa, ci si riferisce ai limiti di tensione pericolosa.

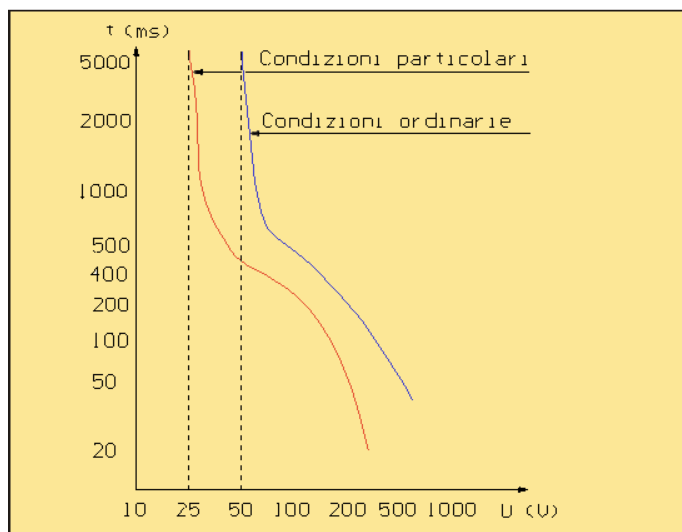


Fig. 3.5 - Curve di sicurezza tensione-tempo in condizioni ambientali particolari e ordinarie

Ovviamente sia la corrente sia la tensione sono legati dalla legge di Ohm:  $R_c$  e  $U_c$  oppure, a favore della sicurezza,  $R_c + R_{tc}$  e  $U_{c0}$ . Poiché i valori di  $R_c$  variano secondo il percorso della corrente nel corpo umano per semplificare l'individuazione delle tensioni pericolose si sono stabiliti in modo convenzionale valori prudenziali di  $R_c$  e di  $R_{tc}$  tali da ottenere i valori massimi delle tensioni di contatto a vuoto sopportabili dal corpo umano in funzione del tempo. Si è in questo modo costruita una "curva di sicurezza" dei limiti tensione-tempo in condizioni normali e in condizioni particolari. La tensione corrispondente al tempo 5s è denominata tensione di contatto limite  $U_L$ . Questo è il limite superiore delle tensioni che possono permanere su una massa per un tempo indefinito senza pericolo per le persone. In condizioni normali si considera  $U_L=50V$  mentre in condizioni particolari  $U_L=25V$  (Ad esempio ambienti bagnati, strutture adibite ad uso zootecnico, ecc.).

| Tensione di contatto (c.a.) | Tensione di contatto (c.c.) | Tempo di sopportabilità |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| <50 V                       | <120 V                      | Infinito                |
| 50 V                        | 120 V                       | 5 s                     |
| 75 V                        | 140 V                       | 1 s                     |
| 90 V                        | 160 V                       | 0.5 s                   |
| 110 V                       | 175 V                       | 0.2 s                   |
| 150 V                       | 200 V                       | 0.1 s                   |
| 220 V                       | 250 V                       | 0.05 s                  |
| 280 V                       | 310 V                       | 0.03 s                  |

Tab. 3.3 - Massime tensioni di contatto a vuoto