

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,
www.voltimum.it
www.electroyou.it

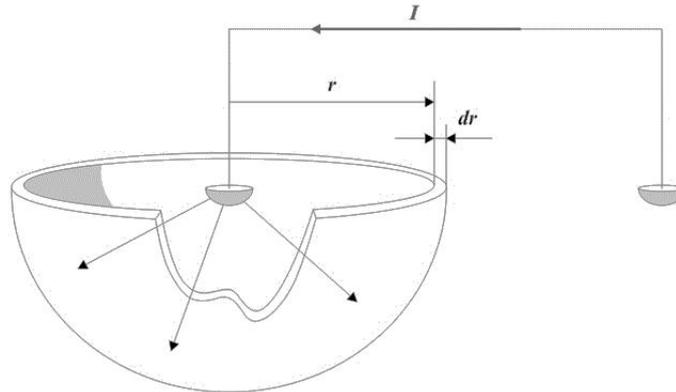
Sommario

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)

ρ = 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

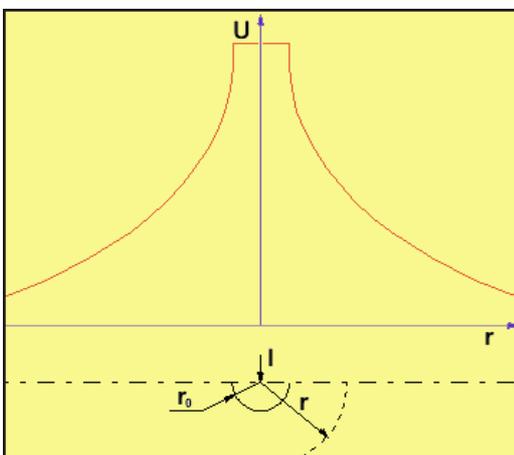


Fig. 3.1 - Andamento del potenziale nel terreno per dispersione con elettrodo emisferico.

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

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*).

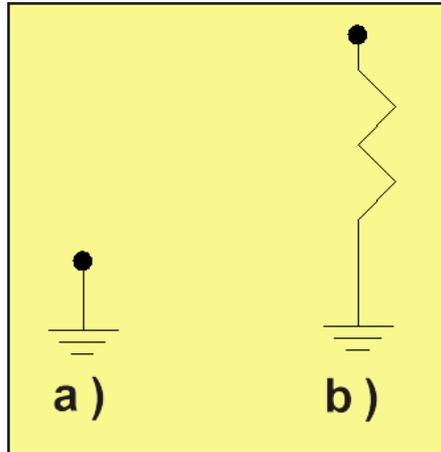
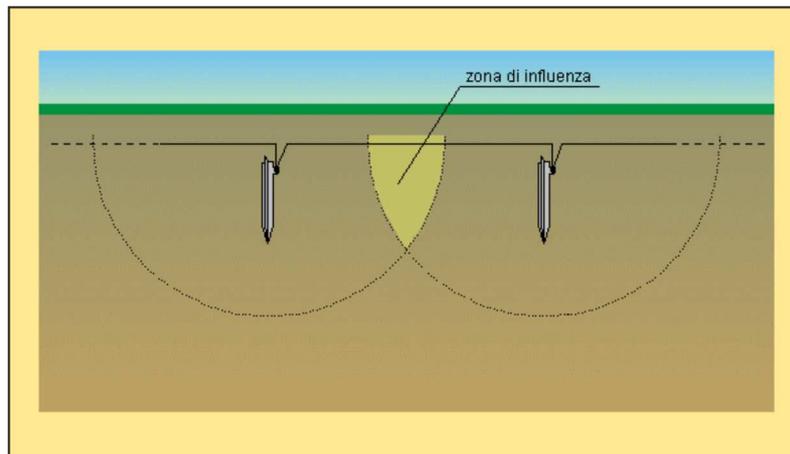


Fig. 3.2 - a) Punto all'infinito a potenziale zero. b) Resistenza di terra di un dispersore.

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:

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

(ρ = resistività del terreno in Ωm)

Potendoli considerare come due dispersori in parallelo la resistenza di terra del “dispersore piedi” R_{tc} di una persona vale circa 2ρ . 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).

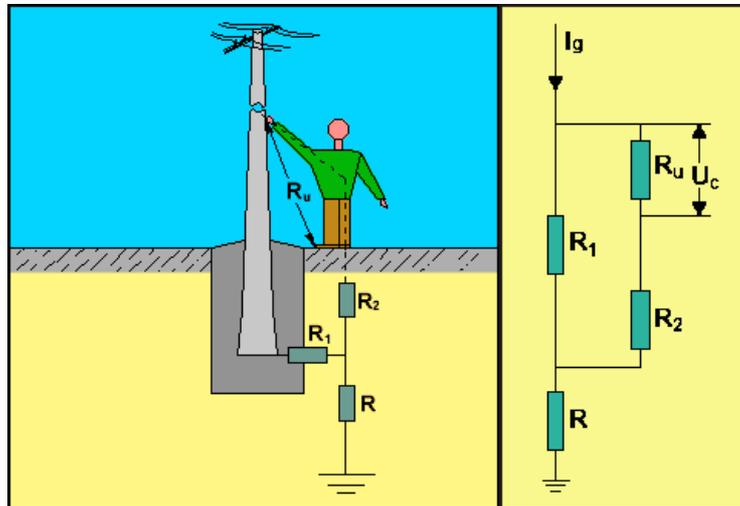


Fig. 3.3 - Tensione di contatto - Significato e circuito equivalente

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).

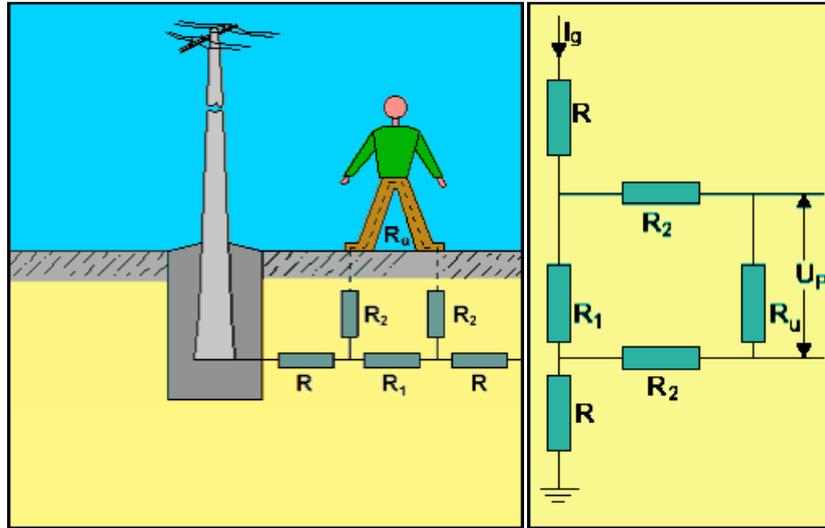


Fig. 3.4 - Tensione di passo - Significato e circuito equivalente

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 80cm^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 Ω (largamente cautelativo) per i luoghi ordinari e di 200 Ω 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 Ω 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 R_c che non sono superati dal 5% della popolazione (percorso mani - piedi)</i>
25V	875 Ω
50V	725 Ω
75V	625 Ω
100V	600 Ω
125V	562 Ω
220V	500 Ω
700V	375 Ω
1000V	350 Ω
val. asintotico	325 Ω

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 Ω	23 mA	5 s
50 V	1725 Ω	29 mA	5 s	925 Ω	54 mA	0,47 s
75 V	1625 Ω	46 mA	0,60 s	825 Ω	91 mA	0,30 s
90 V	1600 Ω	56 mA	0,45 s	780 Ω	115 mA	0,25 s
110 V	1535 Ω	72 mA	0,36 s	730 Ω	151 mA	0,18 s
150 V	1475 Ω	102 mA	0,27 s	660 Ω	227 mA	0,10 s
230 V	1375 Ω	167 mA	0,17 s	575 Ω	400 mA	0,03 s
280 V	1370 Ω	204 mA	0,12 s	570 Ω	491 mA	0,02 s
500 V	1360 Ω	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.

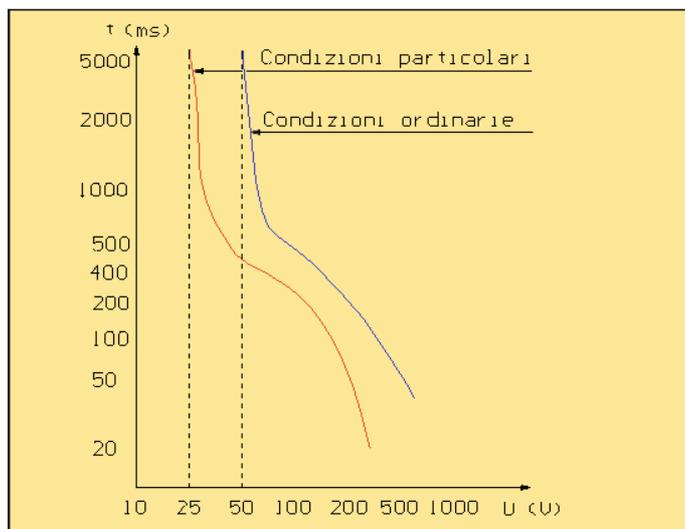


Fig. 3.5 - Curve di sicurezza tensione-tempo in condizioni ambientali particolari e ordinarie

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