

Capitolo 9

Elementi di sicurezza elettrica

INDICE

9.1	Introduzione	1
9.2	Pericolosità della corrente elettrica	2
9.2.1	La curva di sicurezza espressa in termine di legame corrente - tempo	3
9.2.2	Il meccanismo di dispersione della corrente nel terreno	4
9.2.3	La curva di sicurezza espressa in termine di legame tensione - tempo	7
9.2.4	Confronto contatto mano-mano e mano-piedi	11
9.3	Contatti diretti e indiretti	11
9.4	Protezione combinata dai contatti diretti e indiretti (sistemi SELV o PELV)	12
9.5	Protezione dai contatti indiretti mediante interruzione automatica del circuito	12
9.5.1	Il sistema TT	15
9.5.2	Il sistema TN	21
9.5.3	Il sistema IT	26
9.5.4	Sistema completo a diversi livelli di tensione	32
9.6	Protezione dai contatti indiretti senza interruzione del circuito	33
9.6.1	Protezione attraverso isolamento doppio o rinforzato	33
9.6.2	Protezione mediante luoghi non conduttori	34
9.7	Protezione dai contatti diretti	34
	Riferimenti Bibliografici	37

9.1 Introduzione

Nel presente capitolo sono trattati gli elementi fondamentali di quell'importante argomento dell'ingegneria elettrica che va sotto il nome di *sicurezza* elettrica.

Vengono pertanto fornite informazioni di base sulla pericolosità della corrente elettrica e dei sistemi utilizzati nella progettazione degli impianti elettrici per prevenire il rischio di infortuni dovuti al contatto accidentale di una persona con parti in tensione. Quest'ultimo argomento è svolto secondo l'approccio della normativa CEI 64-8, norma di fondamentale importanza di ambito terrestre; è quindi molto utile per comprendere come viene impostata la protezione dai contatti in impianti terrestri, ma non è immediatamente trasferibile agli impianti navali.

La ragione della presenza di questo capitolo all'interno di un volume dedicato ai Sistemi Elettrici di Bordo consiste principalmente nel fatto che parte degli allievi a cui questo volume è dedicato potrebbe essere chiamata a condurre, o anche a progettare, impianti elettrici terrestri.

Peraltro il capitolo fornisce inoltre informazioni di base per comprendere il tema della sicurezza elettrica in generale, utili a chiunque abbia a gestire un sistema elettrico, quindi anche un sistema elettrico navale.

9.2 Pericolosità della corrente elettrica

Come è noto il funzionamento del nostro organismo è regolato fra l'altro dalla circolazione di segnali elettrici che a vario livello trasmettono segnali e coordinano le attività muscolari.

Questi segnali sono di entità non trascurabile e sono agevolmente misurati per ragioni cliniche attraverso registrazioni nel tempo, ad esempio con gli elettrocardiogrammi e gli elettroencefalogrammi.

L'eventuale attraversamento del corpo umano da parte di correnti esterne, anche di modesta entità, spesso non è dannoso per l'energia che trasporta, che può essere modesta, ma per il fatto che questa corrente costituisce un segnale che si va a sovrapporre ai segnali biologici, ed altera quindi il funzionamento di quelle cellule che sono deputate all'interpretazione e l'utilizzazione di questi segnali biologici.

I principali effetti letali della corrente elettrica sono connessi alla contrazione muscolare che la corrente, specie se alternata a bassa frequenza, può ingenerare in muscoli vitali. I due casi fondamentali sono:

Arresto respiratorio. Se una corrente esogena causa una contrazione (o *tetanizzazione*) continua nel tempo dei muscoli respiratori, l'alternarsi fisiologico di contrazione e rilascio di detti muscoli e, conseguentemente, la stessa funzione respiratoria, vengono a mancare. La morte può intervenire in pochissimi minuti per arresto respiratorio; parimenti può verificarsi arresto respiratorio se la corrente esogena "confonde" i centri nervosi che devono coordinare la contrazione dei muscoli respiratori, e quindi gli stessi segnali fisiologici sono errati o assenti.

Fibrillazione ventricolare. Se una parte della corrente introdotta nell'organismo in conseguenza del contatto con una parte in tensione (o, meglio con due parti a tensioni differenti) attraversa il cuore, essa si sovrappone al sistema di segnali elettrici che regola la contrazione di questo muscolo. Di conseguenza può accadere che si inneschi una contrazione caotica, irregolare e ad alta frequenza (svariate decine di Hz) delle fibrille muscolari del cuore, in particolare di quelle deputate alla contrazione ventricolare. Il complesso di questi fenomeni è detto fibrillazione ventricolare, il quale è un fenomeno che, una volta innescato, non regredisce spontaneamente, provoca l'interruzione della funzionalità cardiaca (in queste condizioni il cuore non è in grado di pompare il sangue), e, in breve, la morte per mancanza di ossigenazione dei tessuti.

L'arresto respiratorio è causa di morte nel 6% circa di morti per folgorazione, nella quasi totalità dei rimanenti casi la morte è dovuta a fibrillazione ventricolare.

In tutti i casi quello che va considerato come esposizione alla folgorazione è la coppia "intensità di corrente - tempo di esposizione"; più breve è l'esposizione alla corrente, più elevata è la corrente sopportabile; occorre però notare come la considerazione dei limiti di pericolosità va effettuata sempre su base statistica, in quanto sussiste una marcata variabilità di tale sensibilità da individuo a individuo, come anche in funzione del sesso, dello stato di salute, dell'età, ecc. della persona sottoposta a folgorazione.

9.2.1 La curva di sicurezza espressa in termini di legame corrente - tempo

Da quanto visto discende la necessità di individuare quantitativamente le correnti pericolose per l'organismo.

Studi di elettrofisiologia hanno consentito di determinare sul piano corrente - tempo dei confini, espressi sempre in termini probabilistici, fra le varie zone di pericolosità della corrente elettrica, le quali sono state poi oggetto di standardizzazione normativa. A titolo di esempio si riportano nella fig. 9.1, due curve che delimitano vari livelli di pericolosità, le quali sono state denominate con le stesse lettere con le quali vengono designate dalla normativa nazionale ed internazionale¹. Le correnti riportate nella figura sono relative al percorso fra una mano (o anche entrambe le mani assieme) e i piedi.

La curva *b* è molto importante in quanto separa la zona per la quale non sono statisticamente apprezzabili effetti dannosi della corrente elettrica dalle zone potenzialmente pericolose.

Essa può essere matematicamente descritta dalla seguente equazione:

$$I = 10 + 10/t$$

nella quale la corrente *I* è espressa in mA e il tempo *t* è espresso in secondi.

La zona delle correnti non pericolose finisce comunque, qualunque sia il tempo di applicazione, in corrispondenza della corrente di 500mA.

Nella zona compresa fra la curva *b* e la curva *c*₁ non si hanno abitualmente danni organici. Sono possibili contrazioni muscolari e difficoltà respiratoria, ed in generale effetti patologici reversibili in quanto scompaiono non appena cessa l'applicazione dello stimolo elettrico.

Nella zona compresa fra la curva *c*₁ e la curva *c*₃ si ha una probabilità progressivamente crescente di innesco di fibrillazione ventricolare; la curva *c*₃ designa quelle coppie tempo - corrente per le quali tale probabilità è pari al 50%.

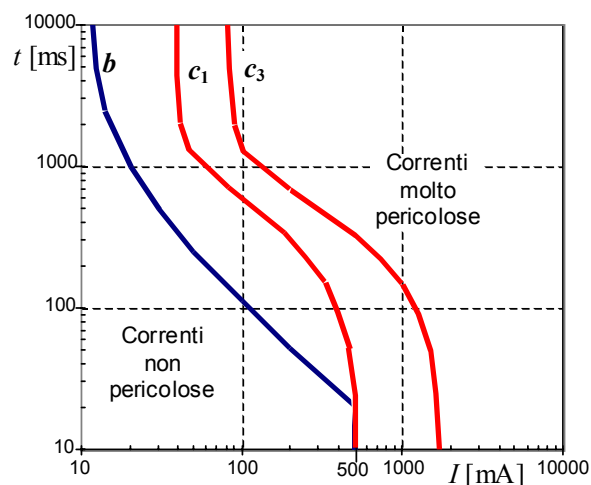


Fig. 9.1: andamento qualitativo dei limiti di pericolosità della corrente elettrica.

Al fine di semplificare il lavoro di progettazione dei sistemi elettrici, peraltro, in sostituzione delle curve riportate in fig. 9.1, è stata adottata una curva convenzionale di pericolosità della corrente elettrica che, trovandosi interamente nella zona compresa fra la curva *b* e la curva *c* è senz'altro cautelativa per il rischio di fibrillazione ventricolare che, come si è detto, è la causa della stragrande maggioranza di morti per folgorazione.

Tale curva è riportata in maniera quantitativa nella fig. 9.2.

¹ Ad esempio si può considerare la norma CEI 64, fascicolo 4985R. In questa norma sono anche definite una curva *a* e una curva *c*₂ che qui non si sono riportate per semplicità di esposizione.

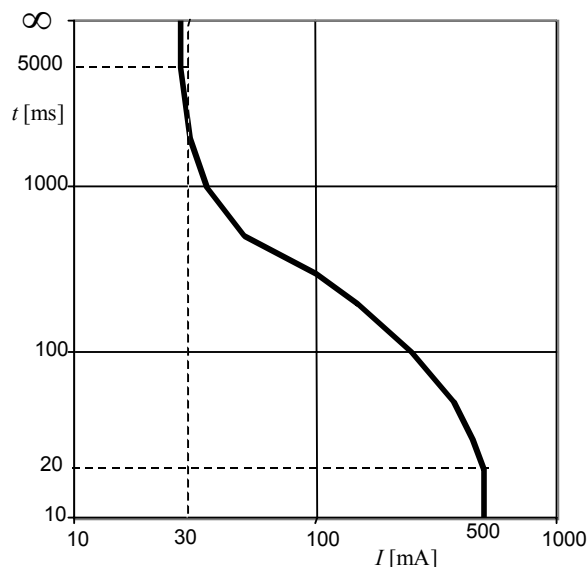


Fig. 9.2: Curva di sicurezza convenzionale assunta in sede internazionale.

Nella curva si osserva in particolare che il valore asintotico di corrente sopportabile, di poco inferiore ai 30 mA, è già praticamente raggiunto con tempi di esposizione di 5 s.

Le correnti continue appaiono meno pericolose delle alternate e per esse vale una versione differente della curva di sicurezza, che consente a parità di tempo di esposizione correnti più elevate; parimenti sono meno pericolose le correnti a frequenze più elevate di quella industriale, e per esse vengono utilizzati fattori correttivi, funzione della frequenza, da applicare alla curva di sicurezza di fig. 9.2.

Notiamo infine che la curva di fig. 9.2 è valida per il percorso della corrente detto “mano-piedi”; per altri tipi di percorsi valgono ancora dei fattori correttivi.

Per la sua importanza citiamo il fatto che il contatto mano-mano, a parità di corrente, è molto meno pericoloso del contatto mano-piedi. Se I_{mm} e I_{mp} sono due correnti di pari pericolosità relative, rispettivamente, al contatto mano-mano e mano-piedi, vale infatti, vale la seguente relazione sperimentale:

$$I_{mm} = 2,5 I_{mp}$$

9.2.2 Il meccanismo di dispersione della corrente nel terreno

Quando una persona entra in contatto con una mano con una parte in tensione avendo i piedi appoggiati sul pavimento, essa viene ad essere attraversata da una corrente che può essere immaginata come entrante nella mano ed uscente dai piedi (o viceversa).

Il circuito in cui detta corrente circola comprende una parte relativa all'alimentazione, il corpo umano, il terreno sotto i piedi della persona.

Pertanto occorre fare un rapido richiamo sui meccanismi con cui, nei vari casi, la corrente immessa da un elettrodo sul terreno si disperde attraverso di esso.

Si consideri un circuito in cui viene fatta circolare nel terreno una certa corrente I ponendo sotto tensione due elettrodi A e C i quali, costituiti da conduttori in intimo contatto con il terreno, sono detti *dispersori* (fig. 9.3).

Si può ora immaginare di utilizzare un terzo elettrodo **B**, posizionarlo ad una generica distanza x dall'elettrodo **A**, e misurare la tensione esistente fra **A** e **B**. Se ne ricava un diagramma che ha qualitativamente l'andamento mostrato in fig. 9.3. Inoltre si rileva sperimentalmente che, entro ampi limiti, le ordinate di tale diagramma sono proporzionali alla corrente fatta circolare: il terreno cioè si comporta come un componente lineare.

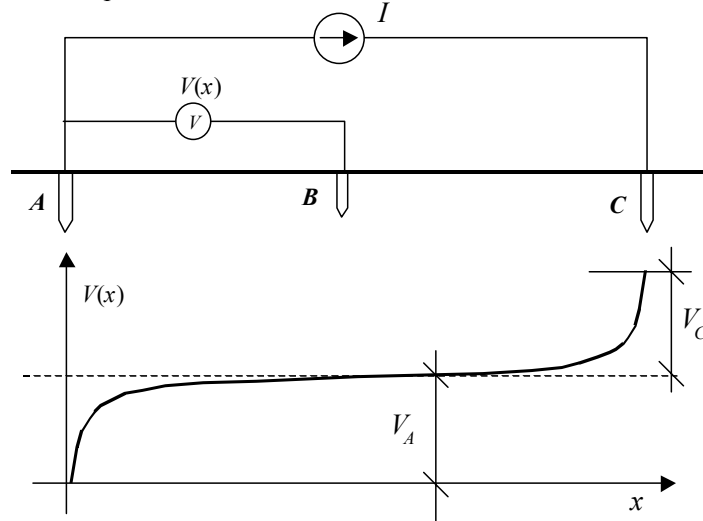
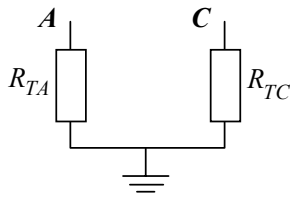


Fig. 9.3: Potenziale assunto dal terreno quando disperde la corrente I attraverso gli elettrodi **A** e **C**.

Se la distanza fra **A** e **C** è elevata rispetto alle dimensioni dei dispersori stessi (in pratica almeno cinque volte del diametro del più grande dei due) si individua un tratto del profilo di tensione sostanzialmente orizzontale, a cui può essere attribuito convenzionalmente il potenziale 0; allora, rispetto a questo riferimento sarà $V_A \cong I$ e $V_C \cong I$, ovvero, chiamando rispettivamente R_{TA} e R_{TC} i coefficienti di proporzionalità che hanno le dimensioni di una resistenza:

$$V_A = R_{TA} I \quad V_C = R_{TC} I$$

R_{TA} e R_{TC} dipendono dalla geometria del dispersore **A** e **B** rispettivamente e vengono detti rispettivamente resistenza di terra del dispersore **A** e resistenza di terra del dispersore **C**.



Qualora abbiano interesse solo i punti **A**, **C**, e il punto a potenziale orizzontale del sistema a parametri distribuiti mostrato in fig. 9.3, quest'ultimo può quindi essere schematizzato con il sistema a parametri concentrati rappresentato qui accanto, in cui il punto del sistema avente il tratto pseudo-orizzontale del profilo del potenziale (perfettamente orizzontale se si immaginano i due elettrodi a distanza infinita) è rappresentato con il simbolo \perp , detto di terra.

Il valore numerico della resistenza di terra di un dispersore può essere valutato con formule empiriche approssimate oppure essere calcolato con opportuni programmi di calcolo.

Esso è sempre proporzionale alla resistività del terreno, per cui ogni valutazione di resistenza di terra deve partire da valutazioni di resistività del terreno considerato. Valutazioni di primo orientamento possono essere ottenute dai dati riportati nella seguente tabella:

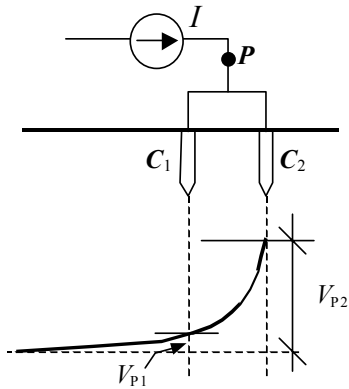
tipologia terreno	resistività [Ωm]
argille	1-10
marne	5-15
calcari	100-200
rocce cristalline	200-5000

Come si vede la variabilità è massima, anche se nei casi molto frequenti di terreno argilloso si hanno valori molto bassi, che favoriscono la realizzazione economica di dispersori a bassa resistenza di terra.

Per quanto riguarda la stima della resistenza di terra dei dispersori che si intendono realizzare, due formule semiempiriche particolarmente semplici che possono essere utilizzate sono le seguenti:

- dispersore composto da picchetto di lunghezza l infisso verticalmente in terreno di resistività ρ_t (cautelativamente di considera l'infissione con la parte superiore del picchetto in corrispondenza della superficie del terreno; infissioni più profonde comportano resistenze inferiori):
 $R_r = \rho_t / l$
- dispersore composto da corda di rame disposta orizzontalmente lungo un percorso rettangolare di perimetro p in terreno di resistività ρ_t : $R_r = \rho_t / (p / 2)$

Un dispersore può avere forma più complessa di quella di un semplice picchetto o una spira rettangolare di corda interrata. In particolare esso può essere realizzato collegando elettricamente i morsetti accessibili di più dispersori semplici, secondo lo schema raffigurato in fig. 9.4.



Dispersori così connessi vengono spesso detti “dispersori in parallelo”, sebbene questa nomenclatura non sia corretta in quanto per realizzare un collegamento in parallelo fra due resistenze vanno collegate elettricamente fra di loro *entrambe* le coppie di morsetti (non solo la coppia superiore).

Se però i dispersori connessi fra loro ai morsetti accessibili sono sufficientemente lontani uno dall'altro in modo che si possa assumere che il potenziale del terreno in corrispondenza della posizione del secondo quando il primo è alimentato sia uguale al potenziale a terreno indisturbato, allora i due dispersori sono effettivamente in parallelo e si può applicare l'usuale formula dell'elettrotecnica:

Fig. 9.4: Dispersore C composto dai due dispersori C_1 e C_2 elettricamente connessi

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (9.1)$$

Se invece i dispersori semplici sono fra loro vicini (a distanze paragonabili alle loro lunghezze), la resistenza equivalente dell'assieme realizzato sarà minore della resistenza di ognuno dei dispersori semplici fra loro connessi, ma maggiore del valore ottenibile tramite la (9.1).

Questo risultato è abbastanza intuitivo per quanto detto finora. Per maggiore chiarezza si consideri comunque la fig. 9.4 immaginando, senza perdita di generalità sul risultato, il dispersore C composto da due dispersori identici C_1 e C_2 connessi elettricamente ai morsetti accessibili. Per ragioni di simmetria appare evidente che la corrente I si ripartisce in due correnti uguali $I_1 = I_2 = I/2$ che penetrano rispettivamente in C_1 e C_2 .

Al fine di calcolare il potenziale del punto P del circuito rispetto al terreno indisturbato, si può applicare la sovrapposizione degli effetti, e considerare questo potenziale scomposto nei due contributi dovuti alla corrente I_1 e I_2 : Il potenziale indotto su C_1 dalla corrente in C_2 , per la linearità del terreno, è proporzionale a quest'ultima ed il coefficiente di proporzionalità ha le dimensioni di una resistenza, e verrà indicato con R_{T21} .

Il potenziale indotto su C_2 dalla corrente in C_2 è pari al prodotto della corrente stessa per la resistenza di terra R_{T2} del dispersore C_2 .

$$V_p = V_{P1} + V_{P2} = (I/2)R_{T21} + (I/2)R_{T2} = I \cdot R_{eq} \Rightarrow R_{eq} = (R_{T2} + R_{T21})/2$$

Considerato che, qualunque sia la distanza fra i due dispersori semplici, è

$$V_{P1} \leq V_{P2}, \text{ quindi } R_{T21} \leq R_{T2}$$

si ha, come previsto, che:

$$R_{T2} / 2 \leq R_{eq} \leq R_{T2}$$

e R_{eq} tende ad essere pari a R_{T2} per interdistanze molto piccole, e a $R_{T2}/2$ per interdistanze grandi.

In conclusione per la realizzazione di un dispersore si può procedere come segue:

1. si stima la resistività del terreno sulla base della conoscenza della tipologia del terreno o da informazioni ricavabili da altri dispersori realizzati nella stessa area
2. si dimensionano i dispersori da realizzare con formule empiriche del tipo di quelle sopra riportate; per terreni a bassa resistività è bene prevedere un consistente sovradimensionamento del dispersore, che è sempre a favore della sicurezza e a basso costo
3. una volta che il dispersore è realizzato si effettua una misura finale di resistenza di terra con tecniche che si ispirano allo schema della figura 9.3, un cui ad esempio il dispersore A è il dispersore in prova
4. solo in casi particolarmente difficili (realizzazione di dispersori per cabine o stazioni di trasformazione fra sistemi a tensione alta e/o media, terreni ad alta resistività) può risultare opportuno ricorrere ad un dimensionamento accurato partendo da misure di resistività e dall'utilizzo di programma di calcolo per la valutazione dell'efficacia del dispersore.

9.2.3 La curva di sicurezza espressa in termine di legame tensione - tempo

La stragrande maggioranza dei sistemi elettrici per l'energia è gestita a tensione costante. Ovvero si fa in modo che, entro ampi limiti, la tensione di distribuzione dell'energia resti sostanzialmente costante a prescindere dal valore di corrente assorbita dal carico.

Per questa ragione risulta importante poter disporre di informazioni sulla pericolosità della corrente elettrica espresse non già in termini di coppie corrente-tempo, ma in termini di coppie tensione-tempo.

Per far ciò occorre considerare il circuito che si viene a creare quando una persona entra in contatto con una parte in tensione. Si fa riferimento al contatto mano-piedi sia in quanto più frequente.

Si consideri a titolo di esempio la situazione schematizzata in fig. 5, in cui una persona entra in contatto con un conduttore in tensione alimentato da un sistema BT a sua volta alimentato da un trasformatore MT/BT con secondario avente il centro-stella connesso al terreno. La persona ha i piedi appoggiati sul pavimento il quale a sua volta è elettricamente connesso al terreno.

Il collegamento del centro stella del trasformatore MT/BT viene effettuato realizzando dei dispersori di notevole efficacia, con tecniche costruttive la cui descrizione esula dai contenuti del presente corso, ma che, in linea di principio, può essere immaginato costituito da un conduttore infisso verticalmente nel terreno (*picchetto*) o da una maglia rettangolare stesa in apposito scavo nel terreno.

La figura mostra sia lo schema a parametri distribuiti, in cui, ovviamente il profilo di tensione riportato è soltanto qualitativo (in particolare manca dei dettagli in prossimità dei piedi della persona i quali, essendo due, causano in realtà un profilo di tensione con due massimi relativi), sia il corrispondente circuito equivalente a parametri concentrati visto dai punti di immissione delle correnti nel terreno A e C .

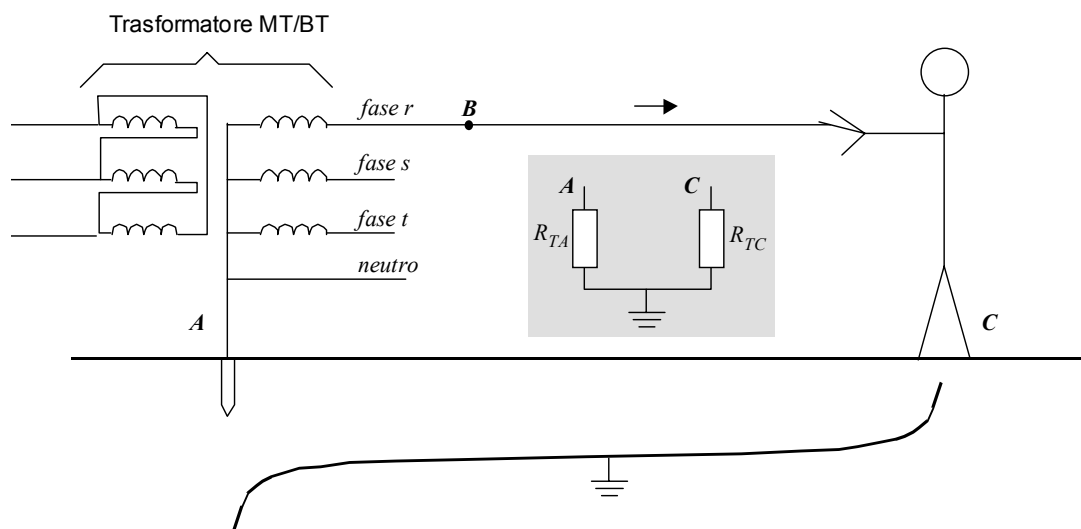


Fig. 9.5: Influenza del terreno nella individuazione del circuito di riferimento durante un contatto con parte in tensione.

Per completare il circuito inseriamo fra **A** e **B** il modello del sistema di generazione della tensione, ottenibile attraverso il teorema di Thevenin con un generatore equivalente; chiamiamo forza elettromotrice ed impedenza interna di questo generatore rispettivamente E_{BA} , e Z_{BA} .

Per quanto riguarda il corpo umano, studi di elettrofisiologia hanno mostrato che può essere rappresentato con buona approssimazione con un modello puramente resistivo, la cui resistenza, però, dipende dalla tensione ad esso applicata. Pertanto il circuito in cui viene a trovarsi il corpo umano è quello rappresentato in fig. 9.6 a), in cui, in particolare il corpo umano è modellizzato come una resistenza non lineare (dipendente dalla tensione applicata) $R_C(V_C)$, mentre il simbolo R_{TC} rappresenta la resistenza di terra del dispersore naturale che si realizza sotto i piedi dell'omino.

In pratica si ha che Z_{BA} e R_{TA} sono sempre trascurabili rispetto a $R_{TC}+R_C$, per cui il circuito utilizzabile in pratica è quello, particolarmente semplice, rappresentato in fig. 9.6 b), nel quale, per ragioni di chiarezza, alla forza elettromotrice di Thevenin E_{BA} è stato attribuito un nuovo simbolo V_{C0} , che è particolarmente efficace in quanto essa costituisce il valore a vuoto della tensione di contatto V_C .

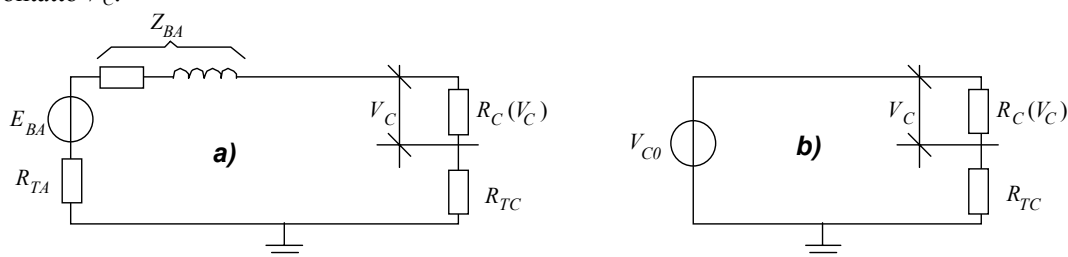


Fig. 9.6: Circuito a parametri concentrati che schematizza la situazione rappresentata in fig. 9.5.

L'andamento della resistenza del corpo umano R_C rispetto alla tensione di contatto V_C è ovviamente variabile da individuo ad individuo. Occorre pertanto disporre di valori statistici e, in qualche modo, convenzionali. Si sceglie convenzionalmente di assumere il quinto percentile, ovvero il valore che non viene superato dal 5% della popolazione. E' evidente il carattere sostanzialmente cautelativo di questa scelta: nella maggioranza dei casi si sarà sottostimata la resistenza effettiva

dell'organismo, e quindi, a parità di tensione si sarà sovrastimata la corrente che attraversa il corpo, il tutto a vantaggio della sicurezza.

Inoltre la resistenza del corpo umano dipende ovviamente dal tipo di percorso che la corrente effettua. Il percorso più frequente è quello mano-piedi, ma sono relativamente frequenti anche i contatti mano-mano e mano-piedi.

Esperienze effettuate su organismi umani a correnti ridotte, e su cadaveri a correnti superiori hanno mostrato che la resistenza del corpo si concentra sugli arti, e che la resistenza di tutti e quattro gli arti è praticamente uguale. Questo fatto può essere rappresentato graficamente dal semplice circuito mostrato in fig. 9.7, da cui si ricava, ad esempio la resistenza per contatto mano-mano è il doppio di quella per contatto mani-piedi ($2R_a$ contro R_a).

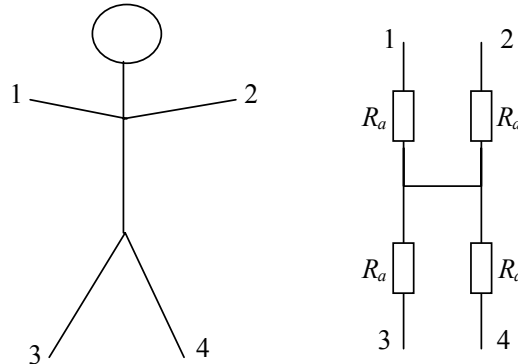


Fig. 9.7: Modello semplificato del corpo umano (resistenze degli arti tutte uguali, resistenza del tronco trascurabile).

Ai fini della individuazione della curva di sicurezza espressa in termini di tensione si prende a riferimento la resistenza mani-piedi, inferiore a quella del contatto più probabile (ovvero il mano-piedi), e questo a vantaggio della sicurezza.

Inoltre, si considerano i valori di impedenza relativi a contatto “asciutto”, anche se questo non è a favore della sicurezza.

I valori della resistenza del corpo umano nel contatto asciutto fra due mani ($R_C=2R_a$) al variare della tensione, tratti da [2], sono riportati nella tabella 9.I.

Tab.9. I: Valori della resistenza del corpo umano non superati dal 5% della popolazione (fra due mani).

V_C [V]	25	50	75	100	125	220	700
R_C [Ω]	1750	1450	1250	1200	1125	1000	750

Disponendo di una valutazione universalmente accettata della resistenza interna del corpo umano, quale quella riportata in tab. 9.I, risulta già possibile riportare la curva di sicurezza dal piano corrente-tempo al piano tensione di contatto - tempo.

Però si preferisce mettere sull'asse della tensione la tensione di contatto a vuoto piuttosto che la tensione di contatto a carico (la V_{C0} piuttosto che la V_C nel circuito di fig. 9.6 b). Di conseguenza occorre possedere una valutazione anche della resistenza R_{TC} (cfr. ancora fig. 9.6 b).

Come si può immaginare il valore di R_{TC} è estremamente variabile con le varie situazioni: si va da un valore pressoché infinito quando il pavimento è di materiale isolante a poche centinaia di Ohm nel caso di piedi in buon contatto con il terreno, ad esempio piedi scalzi sopra un giardino umido. L'approccio alla valutazione di R_{TC} , quindi, non può che essere, ancora una volta, convenzionale. Prima di tutto si trascura sempre l'eventuale resistenza delle calzature per la sua grande variabilità; per convenzione internazionale si considerano, degli infiniti possibili, due soli valori di R_{TC} :

- $R_{TC}=1000$ Ohm, per le condizioni dette ordinarie (ad esempio all'interno degli edifici)

- $R_{TC}=200$ Ohm, per condizioni dette particolari (ad esempio negli ambienti zootecnici, nei cantieri, ed in generale all'esterno degli edifici).

A questo punto si possiedono tutte le informazioni necessarie per tracciare la curva di sicurezza in un piano tensione (di contatto a vuoto) - tempo anziché corrente (attraversante il corpo umano) - tempo:

- un modello circuitale di riferimento (fig. 9.6 b)
- una valutazione universalmente accettata della resistenza del corpo umano R_C
- una valutazione universalmente accettata della resistenza di terra di quel dispersore naturale che si realizza sotto i piedi di una persona attraversata da corrente R_{TC} .

Basterà, per ogni valore tensione V_C , calcolare la relativa R_C partendo dalla tab. 9.1², la corrispondente corrente che attraversa il corpo umano $I_C=V_C/R_C$, la tensione $V_{CO}=I_C(R_C+R_{TC})$ e dalla curva di sicurezza della fig. 9.2 il tempo limite di permanenza t_{lim} associato a I_C .

Il risultato, per i due valori convenzionali di R_{TC} , è riportato in maniera quantitativa nella fig. 9.8, che risolve il problema che ci siamo posti all'inizio del presente paragrafo.

In realtà le curve di fig. 9.8 sono calcolate, a vantaggio della sicurezza, con valori di resistenza del corpo umano inferiori a quelli ricavabili da quelli riportati nella tab. 9.1 mediante moltiplicazione per 0,5.

Ad esempio i valori di tensione di contatto a vuoto tollerabili in condizioni sia normali che particolari sono ottenibili utilizzando una resistenza mani-piedi di 650 Ohm, riferita ad una V_C di 20 V. Infatti con questa resistenza la corrente che attraversa il corpo nel contatto mani-piedi è 30 mA, che è la massima corrente che lo può attraversare per un tempo indefinito e la tensione di contatto a vuoto, rispettivamente per le condizioni ordinarie e particolare viene 50 e 26V (quest'ultimo valore può poi essere approssimato a 25 V).

Anche in questo caso si osserva come i valori asintotici, pari rispettivamente per condizioni ordinarie e particolari a 50 e 25 V, sono in pratica raggiunti già per tempi di 5 secondi.

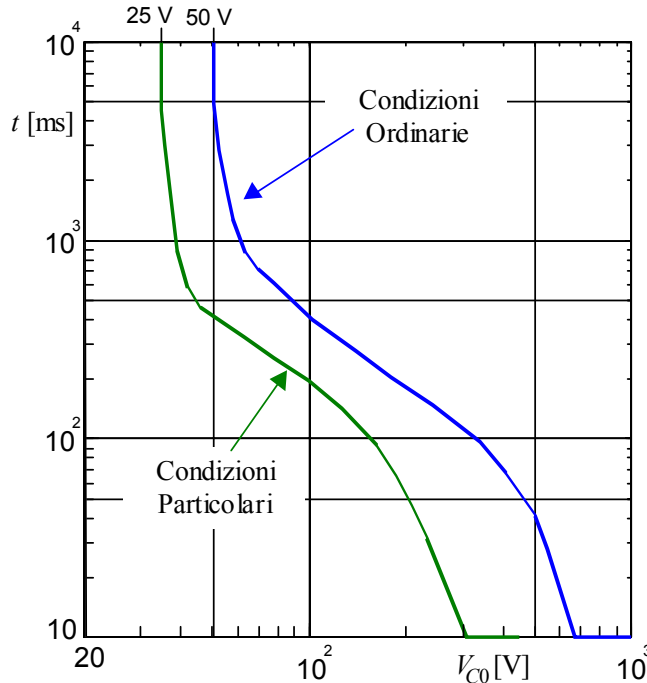


Fig. 9.8: Curve di sicurezza espresse con riferimento alla tensione di contatto a vuoto.

² Prima occorre moltiplicarli per 0,5 per ottenere i corrispondenti valori relativi al contatto mani-piedi.

9.2.4 Confronto contatto mano-mano e mano-piedi

Come si è visto, le curve riportate nella fig. 9.8 fanno riferimento al caso di contatto mani-piedi, più pericoloso del contatto mano-piedi, a sua volta più pericoloso del contatto mano-mano.

La maggior pericolosità del contatto mani-piedi rispetto al contatto mano-piedi è conseguenza del fatto sperimentale che a parità di intensità la corrente mani piedi ha pericolosità pari a quella mano-piedi, mentre la resistenza mano-piedi è maggiore (cfr. fig. 9.7).

La maggior pericolosità del contatto mano-piedi rispetto a quella del contatto mano-mano, a parità di tensione applicata, discende da due fattori concomitanti:

- a parità di durata dell'esposizione, la corrente avente pari pericolosità nel contatto mano - mano è 2,5 volte quella del contatto mano - piedi³;
- la resistenza del corpo umano nel contatto mano - mano è superiore a quella che si ha nel contatto mano - piedi (il rapporto fra le due, come si è visto, è 0,75).

Quindi, a parità di tensione applicata, nel contatto mano - mano circola nel corpo umano una corrente inferiore a quella che circola nel contatto mano - piedi; inoltre la corrente nel percorso mano-mano, a parità di intensità, è meno pericolosa di analoga corrente che attraversi il corpo nel percorso mano-piedi.

Nei casi pratici, peraltro, occorre tener conto che il sistema è progettato per fornire una certa tensione di contatto a vuoto, a partire dalla quale la tensione applicata al corpo è funzione delle condizioni in cui avviene il contatto. Il risultato che si ottiene è che per resistenze R_{TC} "sotto i piedi" inferiori a 1750 Ohm il contatto mano-piedi è sempre più gravoso del contatto mano-mano.

Per fare il confronto si consideri per il contatto mano-mano il caso in cui una mano è in contatto con una massa in tensione e l'altra con una parte in contatto franco con il terreno (ad esempio una tubazione metallica estesa e interrata) per la quale si può assumere $R_{TC}=0$. Allora (utilizzando i pedici "mm" per il contatto mano-mano, e "mp" per quello mano piedi) si ha:

$$I_{mm} = V_{c0} / R_{mm} \quad I_{mp} = V_{c0} / (R_{TC} + 0,75R_{mm})$$

"mp" è più gravoso di "mm" se: $I_{mp} > I_{mm} / 2,5$, quindi se:

$$\frac{I_{mm}}{I_{mp}} = \frac{R_{TC}}{R_{mm}} + 0,75 < 2,5 \Rightarrow R_{TC} < 1,75R_{mm}$$

Considerando un sistema in b.t. in cui la tensione di contatto a vuoto, e a maggior ragione, la tensione di contatto non possono superare 230V, assumendo il valore di resistenza riportato nella tab. 9.I con riferimento a 220 V, si ha quindi che il contatto mano-piedi è più gravoso qualora sia $R_{TC} < 1750 \Omega$.

9.3 Contatti diretti e indiretti

Un *contatto diretto* è un contatto con una parte normalmente in tensione, ad esempio se tocchiamo la parte interna di un filo elettrico con l'isolante danneggiato.

Se per un problema di guasto dell'isolamento entra in tensione una parte metallica che normalmente non lo è, e una persona entra in contatto con essa, si ha un *contatto indiretto*.

La parte metallica suscettibile di andare in tensione per guasto dell'isolamento è detta *massa* (il concetto di massa è stato già introdotto nel par. 1.6).

Si nota esplicitamente che né qui né nel citato par. 1.6 è stata fornita la definizione "ufficiale" di massa, che è riportata nella norma CEI 64-8.

Nel prosieguo verranno descritte:

- la protezione combinata da contatti diretti e indiretti.
Essa consta sostanzialmente nell'utilizzo di tensioni talmente basse che intrinsecamente forniscono una protezione dai rischi di folgorazione;

³ Questo rapporto è frutto di molteplici studi, e codificato a livello internazionale. Per approfondimenti si può ad esempio consultare la tab. 3.A di [1], ovvero la tab. 3 del documento [2].

- la protezione dai contatti indiretti mediante interruzione automatica del circuito.
Questo tipo di protezione è importantissimo in quanto è quello di gran lunga più utilizzato per la protezione dai contatti indiretti;
- la protezione dai contatti indiretti senza interruzione del circuito;
- la protezione dai contatti diretti.

9.4 Protezione combinata dai contatti diretti e indiretti (sistemi SELV o PELV)

Se un impianto elettrico è alimentato a tensioni estremamente basse, esso è intrinsecamente sicuro.

Ad esempio i giocattoli dei bambini sono alimentati attraverso accumulatori elettrochimici a tensioni (3, 4,5, 6V) che consentono di ritenere superfluo qualsiasi tipo di intervento atto ad evitare il contatto con parti in tensione.

Questo concetto può essere esteso anche a tensioni più elevate.

Vengono definiti due tipi di sistemi a bassissima tensione di sicurezza (si riportano i concetti e non le definizioni esatte della norma; di conseguenza qualche approssimazione è inevitabile):

- SELV (Safety Extra-Low Voltage): il sistema ha tensione nominale non superiore a 50 V, se in c.a. o 120 V se in c.c.; non ha parti connesse a terra ed un isolamento doppio o rinforzato (cfr. par. 9.6.1) o equivalente con tutti i sistemi elettrici a tensione superiore
- PELV (Protective Extra Low Voltage): come il SELV, ma il sistema ha un punto collegato a terra.

Il PELV è meno sicuro del SELV, in quanto il dispersore a cui sono collegate le masse può assumere in taluni casi, ad esempio quando fa da dispersore anche a sistemi a tensione più elevata, tensioni superiori a quella nominale del sistema PELV.

Esso è comunque considerato sufficientemente sicuro da non richiedere in combinazione con esso altre misure di protezione dai contatti indiretti. In particolari condizioni (ad es. cantieri di costruzione) però il PELV non è accettato.

I sistemi SELV e PELV possono assicurare anche la protezione dai contatti diretti se:

- la tensione nominale non supera 25 V se in c.a. o 60 V, se in c.c., se il componente elettrico è usualmente utilizzato solo in luoghi asciutti e non si prevedono contatti estesi di parti in tensione con il corpo umano;
- la tensione nominale non supera 6 V se in c.a. o 15 V, se in c.c., in tutti gli altri casi.

In tal caso si realizza una protezione *combinata* dai contatti diretti e indiretti.

Occorre avere una elevata certezza che questi sistemi, normalmente alimentati da sistemi a tensione più elevata, non possano trovarsi ad operare a tensioni pericolose, che poi si potrebbero trasferire (a seguito di ulteriori guasti) sulle masse e lì permanere. Ecco perché vengono nella norma riportate precise prescrizioni atte a garantire una certa separazione elettrica da sistemi ad altre tensioni, in via semplificativa riconducibile ad una specie di richiesta di “doppio isolamento” o sistema equivalente, fra il sistema SELV/PELV e tutti gli altri sistemi a tensione più elevata.

9.5 Protezione dai contatti indiretti mediante interruzione automatica del circuito

Per fare una corretta protezione bisogna tener conto di tutto l'intero circuito, dalla cabina MT/BT che alimenta il nostro impianto fino alle nostre case, perché si realizza, in realtà, un unico circuito elettrico.

La protezione viene effettuata con uno dei 3 seguenti modi:

1. TT
2. TN
3. IT

Dove la prima delle due lettere sta ad indicare come viene connesso il neutro nella cabina, mentre la seconda sta ad indicare come vengono connesse le masse.

Ognuno di questi sistemi ha vantaggi e svantaggi, ma ci sono alcune situazioni in cui uno di essi è migliore degli altri e quindi anche il normatore ci pone degli obblighi. Non possiamo dunque scegliere arbitrariamente, in qualsiasi momento, se fare un impianto di protezione TT, TN o IT. Dobbiamo rispettare dei vincoli imposti dal normatore.

In fig. 9.9 vediamo un collegamento TT. In esso il neutro è collegato direttamente a terra tramite una resistenza R_N e le masse degli utilizzatori sono collegate ad un impianto di terra locale, elettricamente indipendente da quello del neutro, tramite una resistenza di terra R_T .

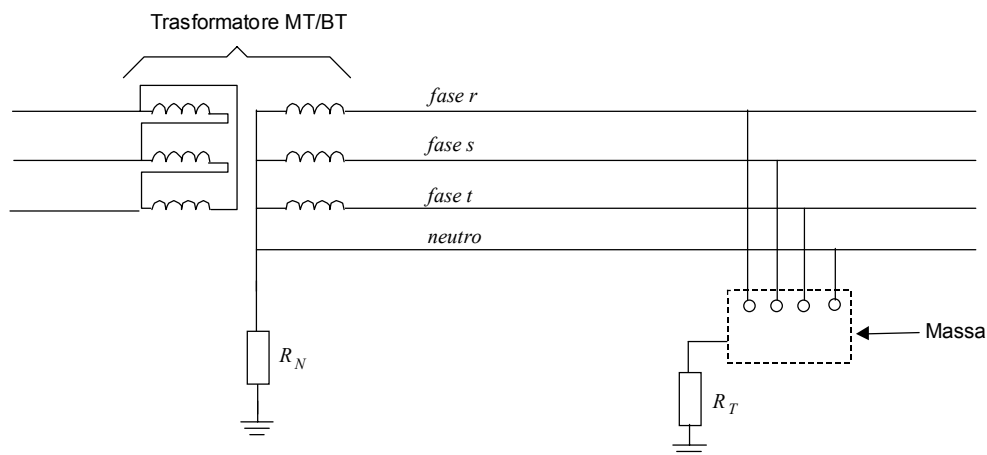


Figura 9.9: Collegamento di tipo TT.

In fig. 9.10 sono mostrati due possibili collegamenti di tipo TN. Nella parte superiore della figura la connessione è realizzata tramite un unico conduttore detto PEN (protezione e neutro) e il sistema si definisce TN-C (combinato). Nella parte inferiore, invece, è realizzata con 2 conduttori separati, PE e N, e il sistema si definisce TN-S (separato). Nel primo caso la massa è collegata direttamente al PEN, mentre nel secondo caso è collegata al PE, il quale viene poi collegato al neutro di cabina.

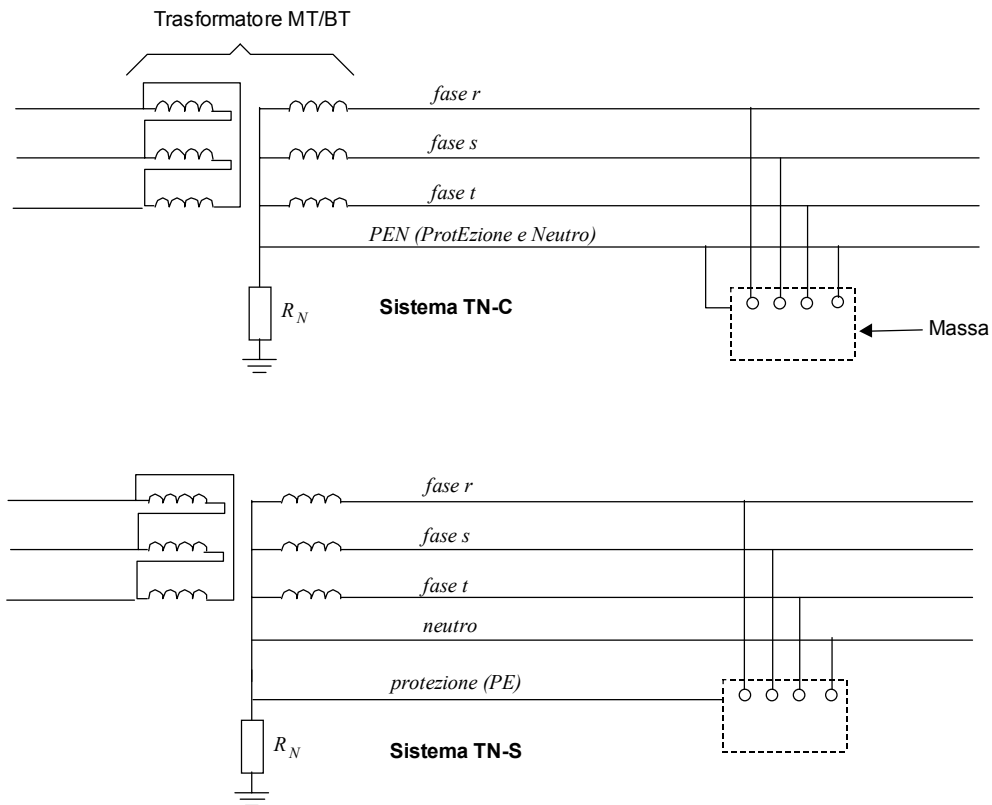


Fig. 9.10: Collegamenti di tipo TN-C e TN-S.

Il sistema TN-C, più economico del TN-S, è anche meno sicuro, in quanto l'eventuale interruzione del conduttore PEN porterebbe direttamente in tensione tutte le masse dell'impianto attraverso le resistenze dei carichi; questo concetto è mostrato nella fig. 9.11, in cui la massa del carico monofase di resistenza R_C va alla tensione della fase r . Pertanto esso è consentito soltanto nei casi in cui risulta possibile adottare tutta una serie di precauzioni che consentano di considerare l'eventualità dell'interruzione del PEN come avente probabilità trascurabile. L'interruzione del PE nel sistema TN-S, pur riducendo il livello di sicurezza del sistema, non comporta l'immediata andata in tensione delle masse, da cui discende la maggior sicurezza di questo tipo di sistema.

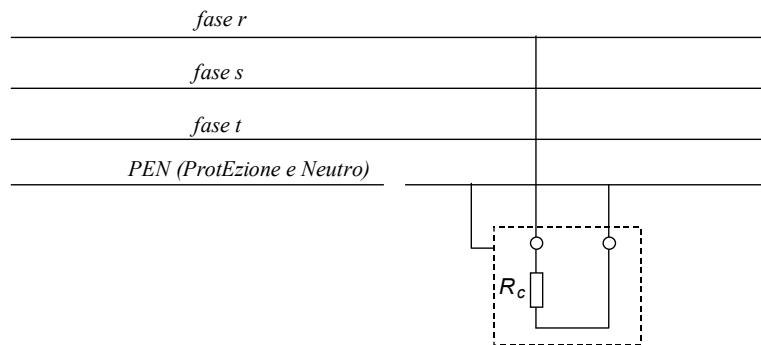


Fig. 9.11: Come un PEN interrotto può causare l'andata in tensione delle masse.

In fig. 9.12 è mostrato il collegamento di tipo IT nel caso più frequente di *neutro non distribuito*. Il neutro di cabina è tenuto isolato, oppure connesso a terra con un'impedenza di valore molto elevato, mentre le masse degli utilizzatori vengono connesse a terra tramite la R_T .

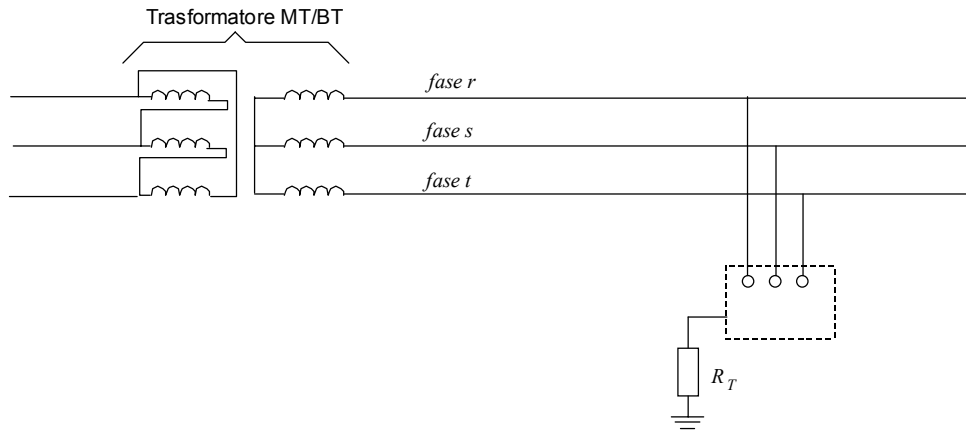


Fig. 9.12: Collegamento di tipo IT.

Vediamo adesso come uno di questi tre sistemi può essere in grado di garantire un'adeguata sicurezza contro il rischio di infortunio elettrico per contatto indiretto.

Occorre rilevare che a bordo delle navi della Marina Militare Italiana di norma si utilizza il sistema IT, che quindi ha particolare importanza nel presente volume.

Peraltro a partire dal 1992 è stato introdotto, solo per alimentazione di carichi non vitali, anche il sistema a 380 V, 60Hz, che utilizza la protezione dai contatti indiretti con il sistema TT.

9.5.1 Il sistema TT

Nei sistemi di distribuzione dell'energia di tipo terrestre il Sistema TT è l'unico utilizzato nei casi in cui l'utilizzatore elettrico non sia anche il proprietario della cabina di trasformazione MT/BT. Questo sistema consente infatti, come vedremo a breve, di realizzare la protezione dai contatti indiretti dell'utente attraverso il coordinamento della resistenza di terra e delle protezioni dell'utente, e non richiede quindi un particolare coordinamento ai fini della sicurezza fra distributore ed utilizzatore dell'energia.

Altri sistemi, quale ad esempio il TN, richiederebbero questo coordinamento, con grosse difficoltà di gestione e di individuazione di responsabilità nella malaugurata ipotesi che si realizzi un infortunio.

Per valutare l'efficacia di un sistema per la protezione dai contatti indiretti come il TT occorre ipotizzare che, a seguito di un guasto dell'isolamento principale, un conduttore in tensione venga in contatto con una massa, e vedere le conseguenze che esso può portare ai fini dell'eventualità del contatto con la massa da parte di una persona.

L'impedenza (o, nel caso più frequente la resistenza) che può sussistere fra i due punti che vengono in contatto è detta *impedenza di guasto*. Se ad esempio si ha un deterioramento progressivo di un isolante, esso viene attraversato da una certa corrente e fra le due facce dell'isolante può sussistere una tensione non nulla: il rapporto fra questa tensione e la corrente transitante è proprio l'impedenza di guasto.

Un guasto è detto *franco* se l'impedenza di guasto è nulla o trascurabile, ovvero non - franco in caso contrario.

Si ha la situazione rappresentata nella fig. 9.13, nella quale si osserva che qualunque sia l'impedenza di guasto vale la relazione (essendo V_{c0} la tensione di contatto a vuoto):

$$V_{c0} = R_T I_g \quad (9.2)$$

Si possono presentare due situazioni:

1. il sistema è progettato per fare in modo che la V_{c0} sia non pericolosa qualunque sia il tempo di permanenza (quindi dalla 9.8 discende che $R_T I_g$ deve essere inferiore a 50 o 25 V, rispettivamente per le condizioni ordinarie o particolari)
2. la V_{c0} è tale da essere pericolosa, se applicata per un tempo elevato all'organismo, e allora occorre fare in modo che essa permanga per un tempo ridotto, idealmente un tempo compatibile con le curve di sicurezza riportate nella fig. 9.8.

Per realizzare la situazione 1, detta V_L la massima tensione di contatto a vuoto ammissibile, (pari a 50 V in condizioni ordinarie), occorre imporre: $V_{c0} = \frac{E_{pA} R_T}{R_T + R_N} \leq V_L$, questa condizione si realizza se

$$R_T \leq \frac{V_L}{E_{pA} - V_L} \cdot R_N \quad (9.3)$$

E_{pA} può, in pratica, per il sistema BT (ampiamente utilizzato in tutta Europa) a 400/230 V, essere assunta pari a 230 V. Pertanto R_T è l'unica variabile sulla quale si può agire per realizzare la suddetta condizione.

Questa soluzione presenta due grossi inconvenienti: la R_T che si ricava dalla (9.3) di solito è molto piccola (quindi difficilmente realizzabile in pratica), ed inoltre realizza quella correlazione fra dispersore dell'utente e dispersore dell'ente erogatore dell'energia che, come si è detto, si vuole evitare nei casi in cui il TT è utilizzato.

In pratica la tecnica si è orientata all'utilizzo della soluzione progettuale 2, la quale è l'unica ammessa dalla normativa. Quindi nel sistema TT in caso di guasto a massa occorre effettuare la protezione dai contatti indiretti, come si dice, *mediante interruzione automatica del circuito*.

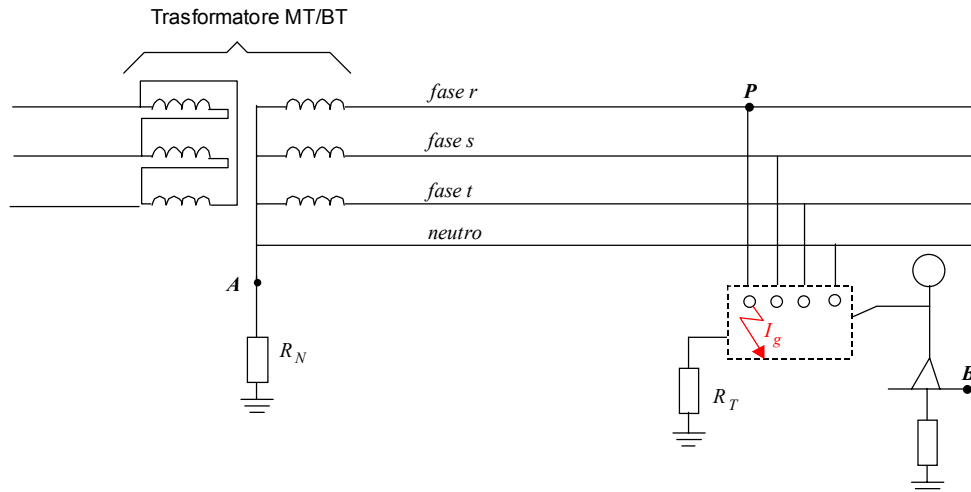


Fig. 9.13: Schema che si realizza quando avviene un contatto indiretto in un sistema TT.

Per poter assicurare una buona protezione dai contatti indiretti l'interruzione automatica del circuito, deve avvenire secondo curve tensione - tempo meno gravose rispetto alle curve limite riportate nella fig. 9.8; in sostanza, tenuto conto che la curva di sicurezza divide il piano tensione - tempo in due zone (fig. 9.14, che per semplicità è riferita alle sole condizioni ordinarie), l'interruzione dell'alimentazione deve avvenire secondo curve tensione - tempo che si trovino tutte nella zona indicata con **A** in fig. 9.14.

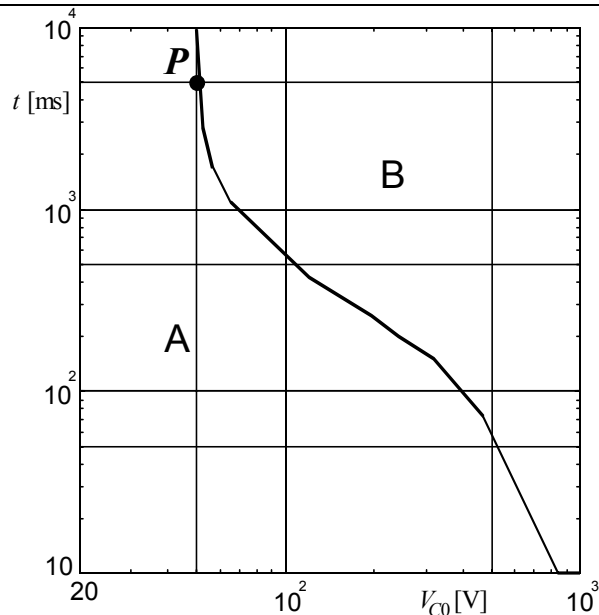


Fig. 9.14: Zone in cui viene diviso il piano tensione - tempo dalla curva di sicurezza
 A: zona in cui si deve trovare la caratteristica di interruzione automatica per una buona protezione.

Consideriamo il valore che le curve della fig. 9.8 hanno per $t=5s$: la tensione che può permanere per questo tempo, cautelativamente può essere assunta pari a 50 V per condizioni ordinarie e 25 V per condizioni particolari. Questo valore di tensione è indicato con V_L .

Occorre imporre che la caratteristica del dispositivo che realizza l'interruzione automatica del circuito interrompa in 5 secondi tutte le correnti che comportano una tensione di contatto a vuoto maggiore o uguale a V_L ; occorre pertanto, indicando con I_{5s} la corrente di sicuro scatto entro 5 secondi della protezione, imporre che:

$$R_T \cdot I_{5s} \leq V_L = 50V \rightarrow \text{Cond. Ordin.} \quad (9.4)$$

$$R_T \cdot I_{5s} \leq V_L = 25V \rightarrow \text{Cond. Part.}$$

Il rispetto della condizione (9.4) mi assicura però che un solo punto (il punto **P** in figura) della caratteristica di intervento della protezione, nel piano tensione - tempo, sia nella zona **A** della figura 9.14; per vedere cosa accade più in generale, si può rappresentare nel medesimo piano sia la caratteristica di intervento della protezione che la curva di sicurezza. La caratteristica della protezione è espressa tramite una curva corrente - tempo; per ottenere la caratteristica nel piano tensione - tempo da confrontare con la curva di sicurezza, basta moltiplicare, vista la relazione (9.2), tutte le correnti per R_T .

Peraltro la norma non richiede al progettista di fare questa verifica, dovendo egli assicurarsi soltanto del rispetto della (9.4). Nel caso di utilizzo di interruttori differenziali⁴ le norme CEI che regolamentano la realizzazione di questi dispositivi danno prescrizioni tali che, una volta rispettata la (9.4), l'intera curva di sicurezza è rispettata.

Modalità per realizzare l'interruzione automatica del circuito

Finora si è parlato della corrente di interruzione in 5 secondi, ma non si è detto quale è il dispositivo che deve effettuare questa interruzione.

Si consideri, a titolo di esempio il circuito monofase rappresentato nella fig. 9.15 a).

⁴ L'uso di interruttori differenziali per il rispetto della relazione (4) non è prescritto dalle norme CEI, ma è obbligatorio in Italia in quanto prescritto dalla legge italiana N. 46 del 1990 e relativo decreto di attuazione.

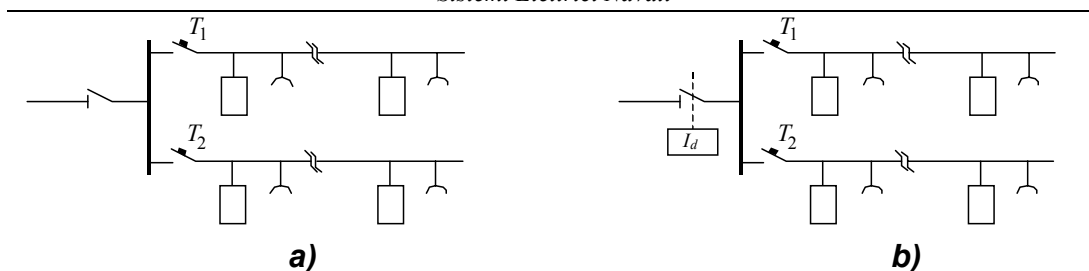


Fig. 9.15: Schema di distribuzione di un piccolo appartamento (due circuiti).

E' presente un possibile schema di alimentazione di un piccolo appartamento.

Sono presenti due *circuiti* di alimentazione dei carichi, a ciascuno dei quali sono connessi sia carichi permanentemente connessi (ad es. uno scaldacqua elettrico) sia prese a spina. All'inizio di ogni circuito deve essere presente un dispositivo di interruzione, di solito un interruttore magnetotermico, che ha il compito di proteggere il circuito dalle *sovracorrenti*, ovvero *sovraccarichi* e *corti circuiti*.

Sorge quindi spontanea la domanda: questo tipo di dispositivo di interruzione è adeguato anche al soddisfacimento della (9.4)?

La risposta è nella (9.4) stessa: se si riesce a realizzare senza eccessivo sforzo un valore di resistenza di terra che soddisfi questa equazione, considerando come I_s la corrente di sicuro intervento entro 5s dell'interruttore (o fusibile) posto come protezione dalle sovracorrenti, almeno dal punto di vista delle norme CEI, l'impianto è a regola d'arte. Dobbiamo però tenere conto di alcuni importanti fatti:

- molto spesso l'interruzione del circuito per i contatti indiretti utilizzando gli interruttori di protezione dalle sovracorrenti risulta problematica in quanto comporterebbe valori di resistenza di terra molto bassi, quindi difficili da realizzare;
- peraltro esistono ormai da molti decenni gli interruttori differenziali, il cui principio di funzionamento è dappresso specificato, che, con modesto aggravio di costo consentono invece di rispettare la condizione (9.4) anche con valori della resistenza di terra particolarmente elevati (anche parecchie centinaia di Ohm)⁵

Di conseguenza il buon impiantista oggi prevede praticamente sempre per la protezione dai contatti indiretti con il sistema TT la presenza di un interruttore differenziale; una possibile soluzione può essere quella di dotare ogni interruttore di circuito (T_1 e T_2 in figura) di relè differenziale; in alternativa si può adottare la soluzione di fig. 9.15 b), più economica, in cui si dota di relè differenziale il solo sezionatore posto a monte della sbarra del centralino.

Se, per esempio, si ha un interruttore differenziale con una corrente nominale 30 mA (il tempo di intervento di un interruttore differenziale per corrente pari alla corrente nominale non può mai superare i 5s), la resistenza di terra deve essere $R_T \leq \frac{50}{30 \cdot 10^{-3}} = 1667\Omega$. Se invece si fosse utilizzato

il normale interruttore magnetotermico per la protezione dalle sovracorrenti, poteva ad esempio capitare di avere una corrente di scatto in 5s di 100 A; in tal caso la resistenza di terra doveva essere $R_T \leq \frac{50}{100} = 0,5\Omega$.

⁵ La legge 46/90, e relativo regolamento di attuazione prevedono, sia per gli impianti civili che industriali, l'utilizzazione di un interruttore differenziale con corrente differenziale nominale di intervento non superiore ad 1 A ovvero *sistemi di protezione equivalenti*. Questo potrebbe far pensare all'imposizione dell'utilizzazione dell'interruttore differenziale da parte della legge italiana. In realtà questo non è vero in quanto il DPR 447/91 (art. 6) ha chiarito che per sistema di protezione equivalente si intende *ogni sistema previsto dalle norme CEI contro i contatti indiretti*.

In pratica si cerca comunque, salvo casi particolarmente difficili, di realizzare resistenze di terra non superiori a 20 Ohm, sia perché questo non è normalmente di difficile attuazione, sia perché in tal modo si rispetta una prescrizione, obsoleta ma mai abrogata, del DPR 547/55 che richiede l'utilizzo di resistenze di terra di valore non superiore ai 20 Ohm.

Principio di funzionamento degli interruttori differenziali

Si consideri il circuito che si realizza per guasto a massa nel circuito rappresentato in fig. 9.16, per semplicità relativo al carico monofase ivi rappresentato.

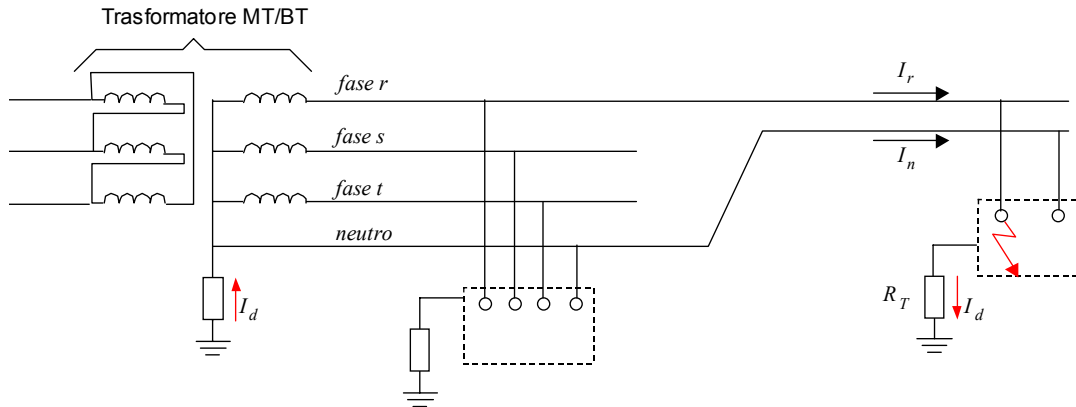


Fig. 9.16: Rappresentazione di come una corrente di guasto a massa sia una corrente differenziale.

E' evidente che prima dell'occorrenza del guasto le correnti circolanti nei due fili di alimentazione del carico sono uguali e opposte, per il primo principio di Kirchhoff:

$$\dot{I}_r = -\dot{I}_n$$

Quando interviene il guasto, invece si rompe quest'uguaglianza delle correnti in quanto vale la:

$$\dot{I}_r + \dot{I}_n = \dot{I}_d$$

Ecco quindi una maniera per discriminare efficacemente l'occorrenza del guasto a massa: se si dispone di un sensore di corrente differenziale esso sarà in grado di individuare con grande precisione l'occorrenza del guasto.

Non è difficile convincersi che il concetto può essere esteso al caso di guasto trifase, per il quale vale la relazione:

$$\dot{I}_r + \dot{I}_s + \dot{I}_t + \dot{I}_n = \dot{I}_d$$

in cui in assenza di guasti a massa I_d è 0.

E' appena il caso di notare che le condizioni ideali di I_d perfettamente pari a 0 non si realizzano mai in pratica in quanto esistono sempre correnti di dispersione attraverso l'isolante delle condutture verso le masse. Se l'impianto però non è molto esteso e/o degradato, queste correnti di dispersione sono modeste rispetto alle correnti differenziali di guasto a massa. E' questa la ragione per cui non si possono utilizzare interruttori differenziali con corrente differenziale nominale di intervento troppo piccole, e al crescere dell'estensione dell'impianto cresce il valore minimo di corrente differenziale che è possibile adottare evitando scatti intempestivi.

Da un punto di vista realizzativo, una maniera di realizzare l'interruttore differenziale consiste nel generare un *flusso differenziale* proporzionale alla corrente differenziale.

Lo schema di principio è rappresentato in fig. 9.17.

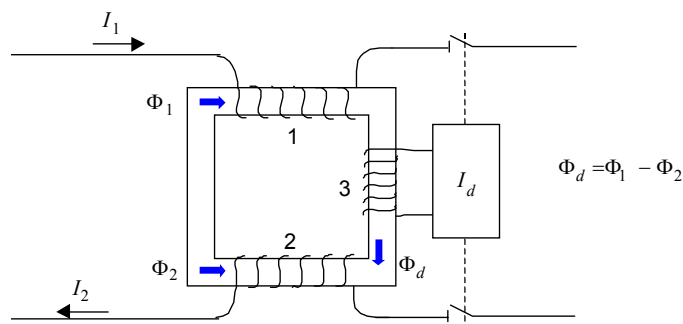


Fig. 9.17: Possibile schema realizzativo di sensore differenziale.

Si realizza in sostanza un circuito magnetico sul quale vengono avvolti due avvolgimenti, il n° 1 porta la corrente I_1 , il n° 2 porta la I_2 . Se il numero di spire è il medesimo per entrambi e il verso con cui sono avvolte le spire è opposto, il flusso che circola nel toro è proporzionale alla corrente differenziale. Basta dunque captare con l'avvolgimento n° 3, più piccolo perché attraversato da correnti più modeste, il suddetto flusso che in condizioni ordinarie è nullo mentre in caso di contatto è dato dalla somma dei flussi indotti dagli altri due avvolgimenti. L'avvolgimento n° 3, di solito di piccola potenza, aziona un piccolo relè che è in grado di causare l'apertura dei contatti degli interruttori.

Anche nel caso dell'utilizzo di interruttori differenziali si verifica che le prescrizioni delle norme CEI riguardo alla caratteristica di intervento sono tali che, una volta soddisfatta (9.4), l'intera caratteristica della protezione, riportata sul piano tensione tempo mediante moltiplicazione delle correnti per R_T , risulta nella zona protettiva, ovvero la zona A della fig. 9.14.

Il problema delle masse estranee

Nei precedenti paragrafi è stato mostrato come la presenza della resistenza R_{TC} sotto i piedi di una persona può limitare fortemente la corrente a cui la persona stessa è sottoposta, e gioca quindi, in definitiva, in favore della sicurezza. In particolare si è visto che nei luoghi ordinari si assume convenzionalmente $R_{TC}=1000 \Omega$ e in condizioni particolari $R_{TC}=200 \Omega$, e che la curva convenzionale di sicurezza espressa con riferimento alla tensione di contatto a vuoto è tracciata proprio a partire da tali valori convenzionali.

Tutti gli elementi che tendono a rendere più basso dell'usuale il valore di R_{TC} giocano quindi a sfavore della sicurezza. Può essere ad esempio il caso di una estesa tubazione metallica che passi nel pavimento, sotto i piedi della persona la quale, per il fatto di avere essa stessa un ottimo contatto con il terreno, può portare R_{TC} a valori molto più bassi di quelli presi a riferimento.

Tali elementi vengono detti *masse estranee*. Per essere precisi la definizione di masse estranee della norma CEI è la seguente:

Parte conduttrice non facente parte dell'impianto elettrico in grado di introdurre un potenziale, generalmente il potenziale di terra.

Sono da considerare masse estranee (che possono introdurre il potenziale di terra) le parti metalliche non facenti parti dell'impianto elettrico (tubazioni, infissi, ecc.) che presentano verso terra una resistenza inferiore a 1000Ω (condizioni ordinarie) o 200Ω (condizioni particolari)

Il sistema che viene adoperato per contrastare gli effetti avversi delle masse estranee sono i cosiddetti *collegamenti equipotenziali*.

Si tratta di connessioni elettriche fra le masse e le masse estranee in modo che, se per qualche ragione una massa dovesse andare in tensione per difetto di isolamento, la differenza di tensione fra di essa e le masse estranee sia nulla o comunque trascurabile.

Dal punto di vista pratico si opera come mostrato schematicamente nella fig. 9.18 (adattata, con talune semplificazioni da analoga figura della norma CEI 64-8/5).

Si realizza per un medesimo edificio, se possibile, un unico punto equipotenziale detto “collettore principale di terra” a cui si connettono:

- i conduttori di protezione (i quali all’altro capo sono connessi alle masse dell’impianto elettrico)
- i conduttori di terra (i quali all’altro capo sono collegati al dispersore)
- i conduttori equipotenziali principali (i quali all’altro capo sono collegati a tutte le masse estranee che entrano dentro l’edificio, di norma esse sono tutte le tubazioni metalliche entranti nell’edificio)

Si realizza quindi un tutt’uno equipotenziale fra parte dispersore, masse, e masse estranee.

In realtà la situazione è un poco più complessa di come descritta qui in quanto si realizzano, per ambienti particolari, anche le cosiddette connessioni equipotenziali supplementari di cui qui non si è parlato e per le quali si rimanda alla norma CEI 64-8; da un punto di vista concettuale, peraltro, le connessioni equipotenziali supplementari non fanno che ripetere quanto visto per le connessioni equipotenziali principali.

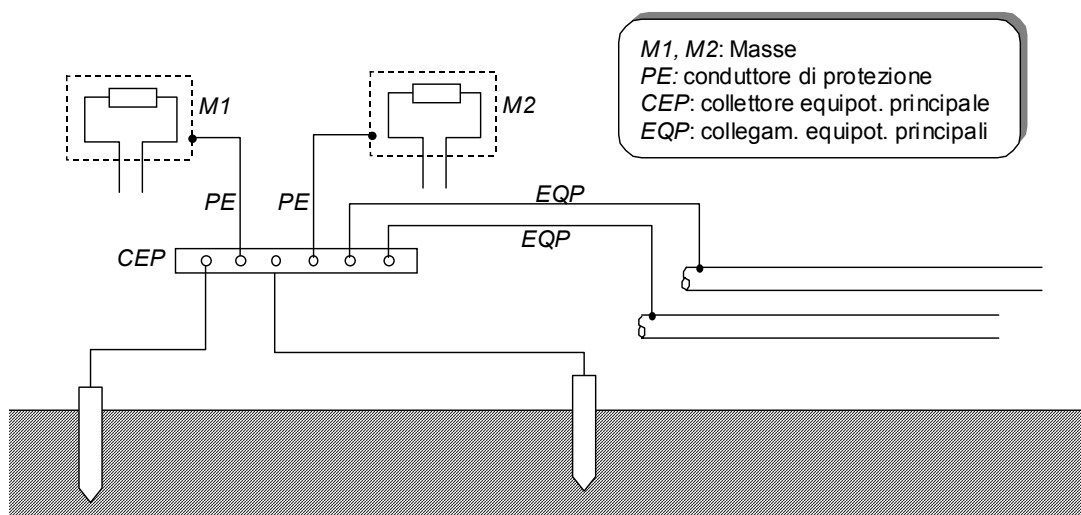


Fig. 9.18: Esempio di collegamenti di un impianto di terra
(si trascurano per semplicità i collegamenti equipotenziali supplementari).

9.5.2 Il sistema TN

Il Sistema TN è adottabile soltanto nel caso in cui l’utente sia proprietario o comunque responsabile dell’esercizio della cabina di trasformazione MT/BT.

In corrispondenza di questa cabina si collega il secondario del trasformatore a terra, mentre le masse vanno collegate al conduttore di protezione che a sua volta è collegato al neutro (fig. 9.10). Se dovesse avvenire il cedimento dell’isolamento principale attraverso un apparecchio utilizzatore, si realizzerebbe la situazione schematizzata in fig. 9.19, tracciata, a titolo di esempio, con riferimento ad una configurazione in cui la connessione delle masse al centro stella del trasformatore è effettuata con un conduttore diverso da quello di neutro (questa configurazione è detta TN-S).

Esiste anche la possibilità di combinare le funzioni di conduttore di protezione (PE) e neutro (N) in un unico conduttore detto PEN. In tal caso si realizza uno schema detto TN-C. Esiste infine anche una soluzione ibrida, detta TN-C-S. Tali configurazioni non verranno però trattate nel presente volume.

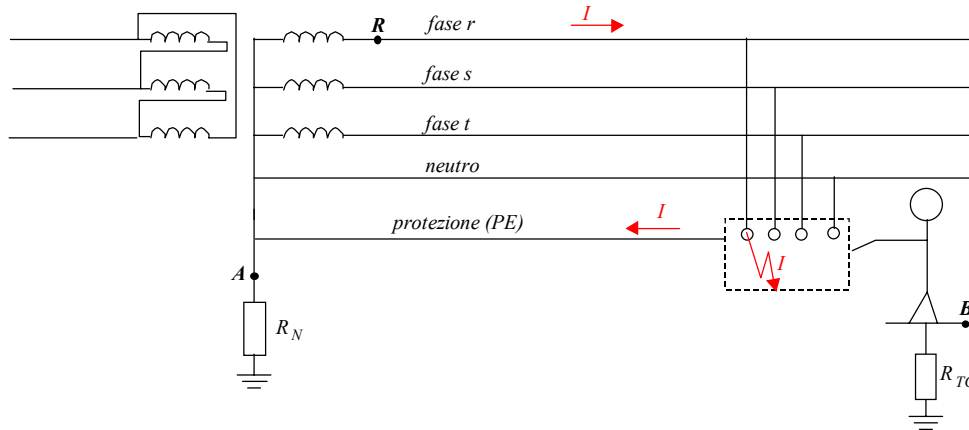


Fig. 9.19: Esempio di guasto monofase a massa su sistema TN-S.

Come è stato fatto nel caso dei sistemi TT, si può tracciare un circuito a parametri concentrati rappresentativo della situazione illustrata nella fig. 9.10, ovvero il circuito rappresentato nella fig. 9.20 a) in cui l'impedenza della fase r è stata rappresentata genericamente come impedenza di fase attraverso il simbolo Z_f , mentre con E_{Th} e Z_{Th} si sono indicate rispettivamente forza elettromotrice e resistenza equivalente di Thevenin dell'alimentazione della fase r , vista dai morsetti RA . Convenzionalmente si assume che in condizioni di corto circuito la tensione fra i punti R e A riportati nella fig. 9.19 sia l'80% della tensione nominale del sistema (essendo la caduta dovuta all'impedenza interna del sistema). Se ne ottiene, trascurando anche R_N rispetto a $R_C + R_{TC}$, il circuito di fig. 9.20 b). Facendo poi l'equivalente di Thevenin ai morsetti di $R_C + R_{TC}$, e tenendo conto che $Z_f Z_{PE} / (Z_f + Z_{PE})$ è senz'altro trascurabile rispetto a $R_C + R_{TC}$, si ottiene il circuito equivalente di fig. 9.20 c), in cui:

$$V_{C0} = V_{PA} \frac{Z_{PE}}{Z_{PE} + Z_f} \approx 0,8V_n \frac{Z_{PE}}{Z_{PE} + Z_f} \quad (9.5)$$

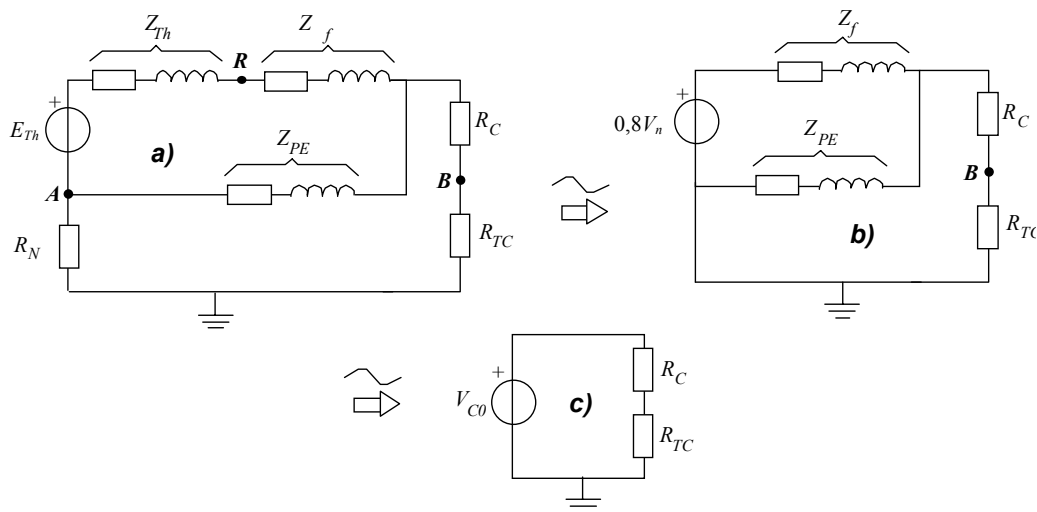


Fig. 9.20: Circuiti a parametri concentrati per la descrizione dello schema di fig. 9.10.

Si vede dalla figura 9.19 come nel caso del sistema TN il guasto a massa comporta la creazione di un anello di guasto nel quale sono presenti tutte impedenze molto modeste: impedenze del ca-

blaggio, impedenze del trasformatore MT-BT, a differenza del sistema TT nel quale venivano attraversate resistenze di terra, di norma molto più grandi di ampiezza.

Si può pertanto dire, in un certo senso, che tramite la connessione della massa al neutro, si converte un guasto a massa in un corto circuito. Risulta quindi molto più agevole realizzare la protezione dai contatti indiretti appoggiandosi alle normali protezioni dal corto circuito (interruttori magnetotermici, fusibili); nel caso del sistema TT, invece, abbiamo osservato come la presenza di interruttori differenziali, sebbene non indispensabile, sia cosa praticamente scontata.

Analogamente a quanto visto nel caso dei sistemi TT, per realizzare una adeguata protezione dai contatti indiretti si può procedere in teoria in due direzioni:

1. progettare il sistema per fare in modo che la V_{c0} sia non pericolosa qualunque sia il tempo di permanenza (quindi dalla fig. 9.8 discende che $R_T I_g$ deve essere inferiore a 50 o 25 V, rispettivamente per le condizioni ordinarie o particolari)
2. la V_{c0} è tale da essere pericolosa, se applicata per un tempo elevato all'organismo, e allora occorre fare in modo che essa permanga per un tempo ridotto, idealmente un tempo compatibile con le curve di sicurezza riportate nella fig. 9.8.

La soluzione 1 richiederebbe l'utilizzo di conduttori di protezione di sezione molto maggiore a quella del conduttore di fase, e risulta antieconomica. Pertanto la tecnica si è orientata all'utilizzo della soluzione progettuale 2, la quale è l'unica ammessa dalla normativa. Quindi, come per il sistema TT, anche nel sistema TN in caso di guasto a massa occorre effettuare la protezione dai contatti indiretti, come si dice, *mediante interruzione automatica del circuito*.

Come nel caso del sistema TT, la verifica di trovarsi nella zona **A** della figura 9.14 anziché essere effettuata per tutti i valori di impedenza di guasto viene fatta, secondo normativa, per un unico punto, ovvero per il solo caso di guasto franco a massa.

In tale caso, inoltre, si fa riferimento alla condizione, anche se essa non è sempre verificata in pratica, di $Z_f = Z_{PE}$. Quindi si ha (cfr. (9.5):

$$V_{c0} = 0,4V_n \tag{9.6}$$

qualunque sia il valore di $Z_f = Z_{PE}$.

La protezione dai contatti indiretti nei sistemi TN si realizza quindi verificando che l'impedenza dell'anello di guasto che si viene a creare nel caso di guasto franco a massa sia coordinata con il dispositivo di interruzione automatica del circuito in modo che la tensione di contatto a vuoto, data dalla (9.6), sia congruente con la curva di sicurezza.

Per prima cosa vengono individuati i tempi di intervento delle protezioni in funzione della V_n , a partire dalla (9.6) e dalle curve di sicurezza per le condizioni ordinarie le condizioni particolari. I risultati nella tab. 9.II, ripresi da analoga tabella della norma CEI 64-8⁶. Ovviamente, sono di particolare importanza i valori riportati in tabella in corrispondenza del valore di tensione di 230 V, di gran lunga il più diffuso per la bassa tensione, e standardizzato in tutta l'Unione Europea.

⁶ L'unico valore di tabella non corrispondente alle curve di sicurezza così come riportate nel presente testo è il tempo di interruzione in condizioni ordinarie per sistemi a tensione nominale di 120 V.

Tab. 9.II: Tempi di interruzione massimi ammessi nei sistemi TN, in funzione del valore nominale della tensione fase-terra V_n .

V_n [V]	tempo massimo di interruzione [s]	
	Condizioni Ordinarie 64-8-IV-Tab41A	Condizioni Particolari 64-8-IV-Tab48A
120	0,8	0,4
230	0,4	0,2
400	0,2	0,06
>400	0,1	0,02

Per valori di tensione intermedi (quindi non unificati) si sceglie il valore prossimo superiore presente in tabella

A questo punto non resta che prescrivere che le protezioni intervengano in tempi minori o uguali di quelli di tabella, nelle condizioni prese a riferimento, cioè guasto franco e uguaglianza di impedenza del conduttore di fase e di protezione.

Tenendo conto che le caratteristiche di intervento di tutti i tipi di protezione sono tali che all'aumentare della corrente di guasto diminuisce il tempo d'intervento, occorrerà quindi prescrivere che la più grande impedenza dell'anello di guasto sia tale da far circolare in caso di guasto franco correnti superiori o uguali a quelle che causano l'intervento delle protezioni nei tempi della tabella 9.II:

$$I_g = V_n / Z_s \geq I^* \quad (9.7)$$

in cui:

- $Z_s = Z_{Th} + Z_f + Z_{PE}$ è l'impedenza dell'anello di guasto
- I^* è la corrente che provoca l'interruzione automatica del dispositivo di protezione entro il tempo definito dalla tab. 9.II.
- V_n è la tensione nominale in c.a., valore efficace fra fase e terra.

Tenendo quindi conto che le caratteristiche di intervento di tutti i tipi di protezioni sono tali che all'aumentare della corrente di guasto diminuisce il tempo di intervento, sarà sufficiente verificare che la I^* della (9.7) è sufficiente allo scatto tempestivo delle protezioni nel caso di guasto più lontano dall'alimentazione, cioè nel caso in cui l'impedenza $Z_f = Z_{PE}$, quindi Z_s , è massima.

Come osservato nel caso dell'analisi dei sistemi TT, anche in questo caso è necessario osservare che la (9.7) assicura che la tensione di contatto a vuoto è coordinata con il tempo di intervento delle protezioni soltanto in un punto della caratteristica delle protezioni, quella che corrisponde al guasto franco. La verifica del rispetto dell'intera caratteristica non è compito del progettista, ma un risultato accettabile è comunque implicitamente assicurato dal fatto che le caratteristiche di intervento delle protezioni sono a loro volta soggette al rispetto delle corrispondenti norme CEI.

Una ulteriore approssimazione consiste nel fatto che la prescrizione della norma CEI (9.7) è conseguenza dell'ipotesi, non cautelativa, di aver assunto $Z_f = Z_{PE}$.

Nulla viene richiesto dalla (9.7) riguardo al valore della resistenza di terra.

Pertanto il dimensionamento delle protezioni in bassa tensione per un sistema TN non è funzione, a differenza del sistema TT del valore della resistenza di terra realizzato. Il dimensionamento della resistenza di terra si effettua considerando aspetti di protezione legati alla realizzazione dell'interfaccia fra il sistema in BT e il sistema in MT che lo alimenta, che non verranno però considerati in questa sede.

Il problema delle masse estranee si presenta nel caso del sistema TN in maniera alquanto diversa del sistema TT. Questo argomento non viene, per semplicità, affrontato nel presente volume.

Resistenza di terra del neutro nei sistemi TN

Nei precedenti paragrafi ci si è soffermati sugli elementi di progettazione degli impianti utilizzatori senza considerare quanto accade nell'interfaccia di detti impianti con i sistemi che li alimentano, solitamente in media tensione.

Questa interfaccia assume una notevole importanza ai fini della sicurezza dell'insieme, in particolare modo nel caso del sistema TN, per cui, come più volte ricordato, il gestore della cabina è l'utilizzatore stesso.

La soluzione normalmente adottata consiste nel realizzare nella cabina MT/BT un unico impianto di terra per le reti MT e BT, secondo lo schema riportato in fig. 9.21, nella quale è anche evidenziato come un guasto monofase a terra sul sistema MT introduce sulle masse presenti sul sistema BT della cabina di trasformazione delle tensioni che devono essere limitate.

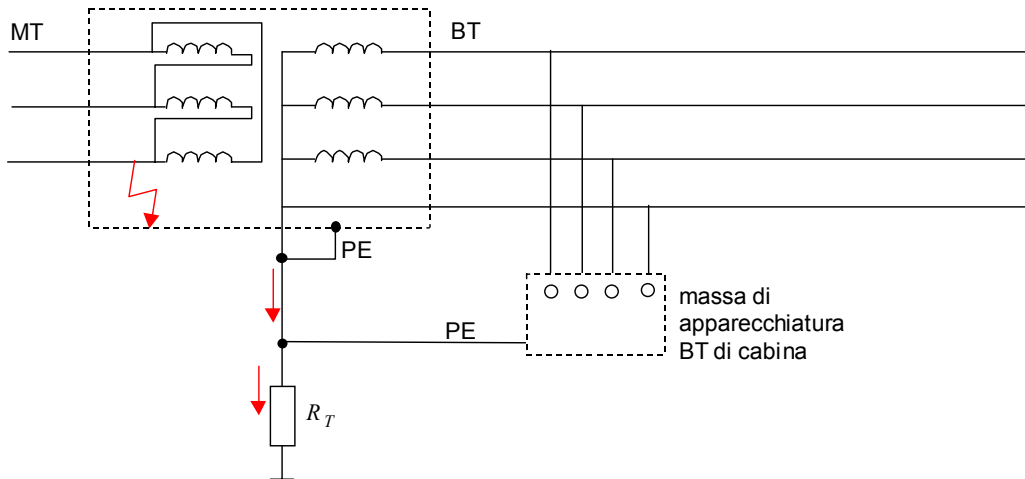


Fig. 9.21: Effetti del corto circuito a massa sul lato MT con sistema TN e impianto di terra di cabina unico.

Occorre notare che in Italia il sistema MT è gestito a neutro isolato, per cui le correnti di guasto monofase a terra sono modeste rispetto alle correnti normalmente circolanti, in quanto si richiudono attraverso le capacità verso terra dei conduttori MT collegati.

Queste correnti dipendono inoltre dalla estensione della rete MT collegata al trasformatore (maggiore l'estensione, maggiori le correnti), e dall'eventuale presenza di tratti in cavo (maggiore l'estensione di questi ultimi, maggiori le correnti). Di norma le correnti di guasto monofase a massa sulle reti MT vanno da pochi Ampere ad alcune decine di Ampere.

Le protezioni installate sui sistemi MT interrompono queste correnti, che da un punto di vista funzionale potrebbero, analogamente con quanto si fa con i sistemi IT in BT, permanere per lunghi periodi, in tempo molto modesti (frazioni di secondo).

Pertanto, per garantire a fronte di guasti del tipo di quello rappresentato in fig. 9.21 una sicurezza paragonabile a quella ottenuta con il coordinamento della protezioni del sistema TN sopra visto, occorrerà che:

$$R_T \cdot I_{SS} \leq V_{SS} = 50V \rightarrow \text{Cond. Ordin.} \quad (9.4)$$

$$R_T \cdot I_{SS} \leq V_{SS} = 25V \rightarrow \text{Cond. Partic.}$$

che costituiscono una regola di dimensionamento della resistenza R_T .

In taluni casi, invece del rispetto delle (9.4) si procede direttamente alla misura delle tensioni di contatto con opportuni sistemi di misura che simulano il contatto di una persona (ad es. resistenza interna del voltmetro 1000 Ohm, valore che convenzionalmente riproduce la resistenza del corpo umano) con la massa in esame, e si verifica che le tensioni di contatto misurate rispettino oppor-

tuni valori limite fissati dalle norme (diversi da quelli riportati nella fig. 9.8 che, fra l'altro, è relativa a tensioni di contatto a vuoto e non a tensioni di contatto).

9.5.3 Il sistema IT

Anche il sistema IT, come il sistema TN, è adottabile soltanto nel caso in cui l'utente sia proprietario o comunque responsabile dell'esercizio della cabina di trasformazione MT/BT.

Esso si realizza tenendo isolato il neutro in cabina e mettendo a terra le masse (fig. 9.12).

Come già osservato, il sistema IT è quello utilizzato a bordo per tutti i carichi vitali. Solo per carichi non vitali può essere utilizzato sulle navi MMI anche il sistema 380/220 V, 60 Hz, di tipo TT.

Supponiamo che avvenga il solito cedimento dell'isolamento principale. Non esiste un circuito metallico per il transito della corrente di guasto; peraltro occorre considerare che l'isolamento delle condutture non ha né conduttanza nulla né suscettanza nulla. Si avrà pertanto il transito di una piccola corrente attraverso questi parametri, secondo uno schema del tipo di quello di fig. 9.25, in cui essi sono rappresentati in forma concentrata.

Questa corrente è trascurabile rispetto alle correnti di normale funzionamento dovute alle potenze attive e reattive assorbite dai carichi e pertanto non è necessario interrompere tempestivamente l'alimentazione per rimuoverla.

I sistemi IT dunque si adottano quando si vuole, per ragioni di continuità, evitare una interruzione automatica del circuito.

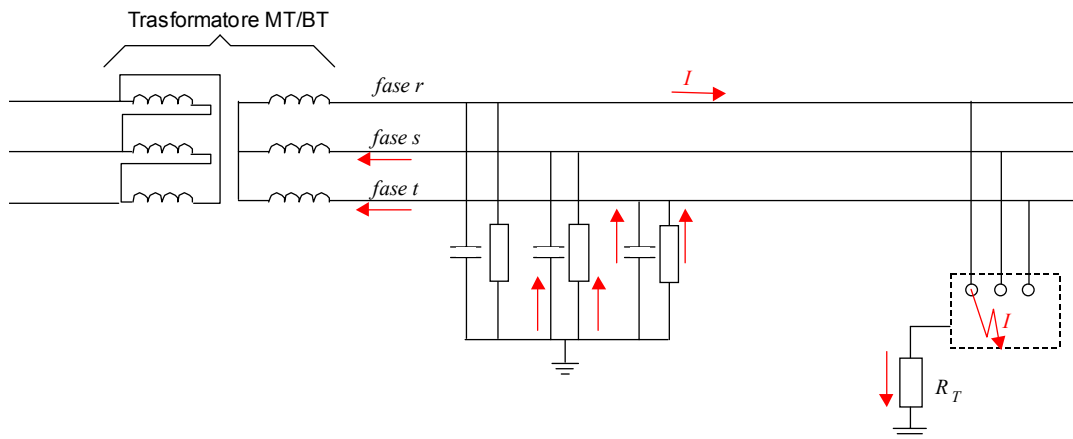


Fig. 9.22: Circolazione delle correnti di guasto a massa in un sistema IT.

Occorre però verificare che la tensione di contatto a vuoto sia inferiore a V_L (50 V e 25 V rispettivamente per condizioni ordinarie o particolari). Si dovrà quindi verificare che:

$$R_t \cdot I_g \leq V_L \quad (9.8)$$

Questa è dunque una relazione di dimensionamento di R_t .

Anche se non è necessario interrompere tempestivamente l'alimentazione a seguito del primo guasto, non si può lasciare il sistema indefinitamente nel tempo il guasto nel sistema perché altrimenti un guasto successivo potrebbe configurarsi come corto circuito bifase (fig. 9.23), e dovrebbe essere immediatamente eliminato attraverso interruzione automatica del circuito, vanificando così il vantaggio in termini di continuità dell'alimentazione del sistema IT.

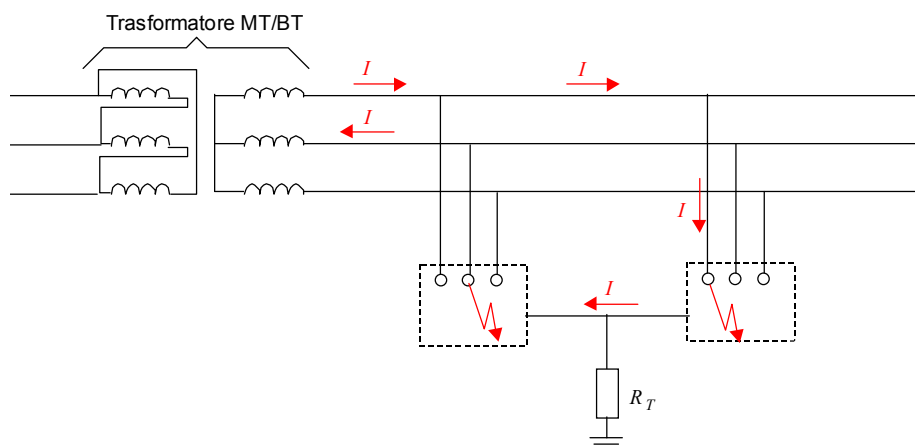


Fig. 9.23: Un secondo guasto a massa nel sistema IT può configurarsi come guasto bifase.

Occorre pertanto predisporre un sistema che sia in grado di riconoscere la presenza di un guasto per poter procedere poi alla sua successiva rimozione. Un sistema semplice ed economico adatto a questo scopo è costituito da tre lampadine connesse fra le fasi e terra (fig. 9.24 a).

Quando avviene il guasto di una fase a massa una lampadina si spegne perché la fase corrispondente va al potenziale del terreno, mentre le altre due lampadine vanno alla tensione concatenata, aumentando la loro luminanza. Le lampadine devono avere una potenza modesta (pochi W), in quanto esse costituiscono delle resistenze in parallelo alle resistenze di isolamento e tendono ad aumentare il valore di I_g . Questo sistema, ben efficace in caso di guasti franchi⁷, presenta l'inconveniente che in caso di semplice deterioramento dell'isolamento può risultare inefficace, in quanto esso può indurre soltanto variazioni modeste di luminanza, di difficile interpretazione da parte dell'operatore.

Un metodo più efficace per individuare il primo guasto a terra di un sistema IT è costituito da un gruppo di misura continuativa dell'impedenza di isolamento verso terra attraverso lo schema riportato in fig. 9.24 b per sistemi con neutro accessibile, ovvero 9.24 c per sistemi con neutro non accessibile. Esso è composto da:

- una forza elettromotrice E di valore modesto (di norma è dell'ordine di 10-20V)
- una impedenza interna Z_i di valore sufficientemente elevato da non inficiare la caratteristica IT del sistema (dell'ordine delle decine o centinaia di k Ω),
- un amperometro per la misura della corrente transitante attraverso $E-Z_i$

⁷ Cioè tali che si realizzi un contatto, per così dire "netto" fra una fase e la massa, in cui alla corrente circolante attraverso questo contatto corrisponde una tensione fra i punti a contatto trascurabile.

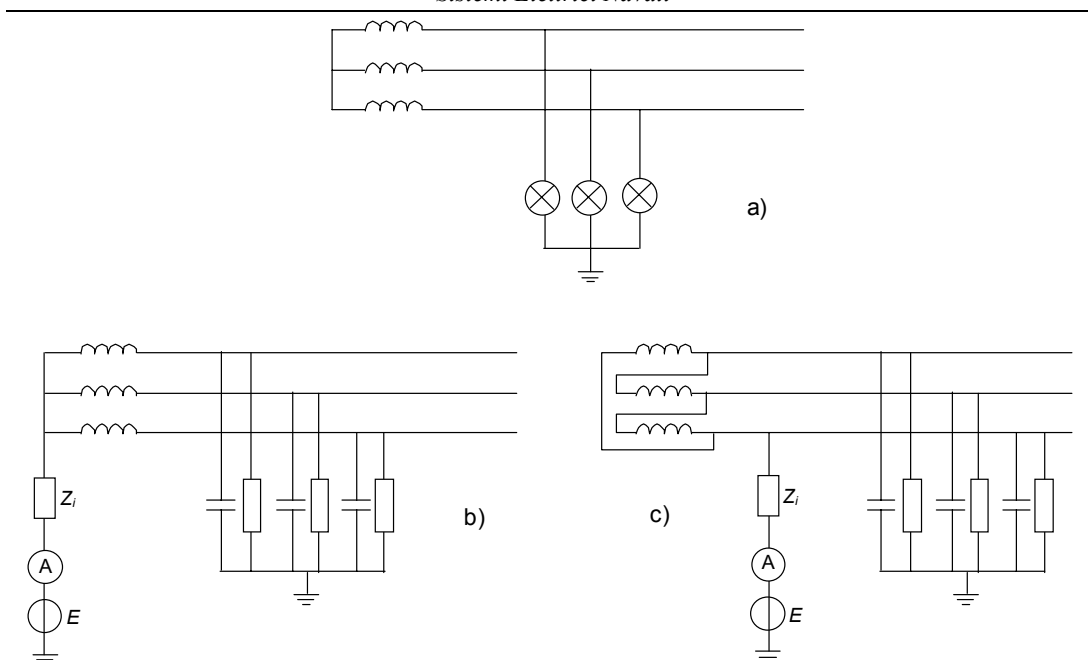


Fig. 9.24: Sistemi per l'identificazione di un guasto a massa su sistemi IT.

Dal rapporto fra tensione applicata e corrente misurata, nota la Z_i , si può agevolmente ricavare il valore della impedenza di isolamento verso massa del sistema; il dispositivo normalmente visualizza il risultato direttamente in Ohm. Quando il livello della ammettenza di isolamento supera una soglia prefissata viene attivata una segnalazione, di norma acustica e luminosa, eventualmente anche trasmessa a distanza. Evidentemente questo sistema è in grado di valutare non solo la presenza di guasti franchi ma anche semplici deterioramenti parziali dell'isolamento.

Il sistema può essere permanentemente attivo ovvero essere attivato manualmente (ad es. attraverso la pressione di un tasto per controlli periodici dello stato dell'isolamento). Esso può operare introducendo una corrente continua ovvero alternata; nel primo caso verrà evidentemente misurata solo la parte conduttiva della ammettenza di isolamento; la forza elettromotrice continua viene generata localmente attraverso un raddrizzatore a diodi.

Come si è detto non è opportuno far funzionare il sistema IT con un guasto a massa per tempi eccessivamente lunghi per evitare che un successivo guasto debba necessariamente provocare l'interruzione automatica dell'alimentazione. Per poter procedere alla rimozione del guasto, o all'esclusione del tratto guasto di linea dal sistema, esso deve essere evidentemente localizzato. Per fare questo si citano due possibili tecniche.

1) Metodo per tentativi.

Si procede nel seguente modo:

- si attende un momento in cui sia accettabile, considerato il ciclo produttivo del sistema alimentato, effettuare una temporanea disalimentazione;
- a questo punto si staccano tutti i carichi (ad esempio linee derivate) dalla linea principale alimentata dal trasformatore di isolamento;
- si rialimenta il sistema; se il guasto permane, esso è evidentemente lungo la linea dorsale;
- se invece in seguito alla rialimentazione il guasto non è presente, e quindi la dorsale è sana, si connettono successivamente tutti i carichi, finché si individua quello che causa la segnalazione di basso isolamento.

In tal modo si è individuato il carico su cui è presente il difetto di isolamento. Se quest'ultimo ha una struttura interna in quanto è una derivazione che alimenta un quadro con ulteriori ramificazioni, il procedimento può essere ripetuto fino ad individuare il carico elementare, o la linea, su cui è presente il guasto.

Questo metodo di localizzazione del guasto ha l'inconveniente di richiedere disalimentazione dei carichi, che nelle prime fasi è addirittura totale.

2) Misura selettiva della corrente introdotta dal sistema di misura dell'isolamento.

Quando avviene un guasto a massa in sistema IT dotato di sistema di misura dell'isolamento circolano nel sistema correnti dovute sia al guasto che al sistema di misura dell'isolamento. L'andamento qualitativo di queste correnti può essere ricavato con riferimento alla figura 9.25, tracciata immaginando l'uso di un generatore per la produzione dell'energia in bassa tensione in luogo del trasformatore utilizzato nei precedenti schemi, in quanto questa soluzione è quella più frequente in ambito navale. Ovviamente tutte le considerazioni che qui si svolgono sono applicabili anche al caso di sistema generato attraverso un trasformatore MT/BT.

Il generatore è modellizzato con tre forze elettromotrici, essendo possibile trascurare le impedenze interne, piccole rispetto alle altre impedenze in gioco, e cioè le impedenze di isolamento dei cavi verso il terreno e all'impedenza interna del sistema di misura dell'isolamento.

L'andamento delle correnti che circolano nel sistema può essere visualizzato ricorrendo al principio della sovrapposizione degli effetti ed immaginando quindi applicate separatamente prima le forze elettromotrici di alimentazione (figura b), poi la forza elettromotrice presente entro il misuratore di isolamento (figura c).

L'andamento delle correnti dovuto ad E è particolarmente semplice, e consente di determinare la presenza del guasto attraverso un sensore di corrente differenziale: infatti la corrente I_g , in grado di stimolare il sensore differenziale è presente solo nelle linee a monte del guasto, a partire dalla derivazione che alimenta direttamente il guasto stesso.

Al fine di identificare la presenza del guasto occorre quindi fare in modo di misurare selettivamente la corrente I_g , filtrando via le correnti dovute al generatore principale; questo può essere fatto realizzando il generatore interno al sistema di misura dell'isolamento a frequenza differente da quella di normale funzionamento del generatore principale e rendendo il sensore differenziale selettivamente sensibile solo a quella frequenza.

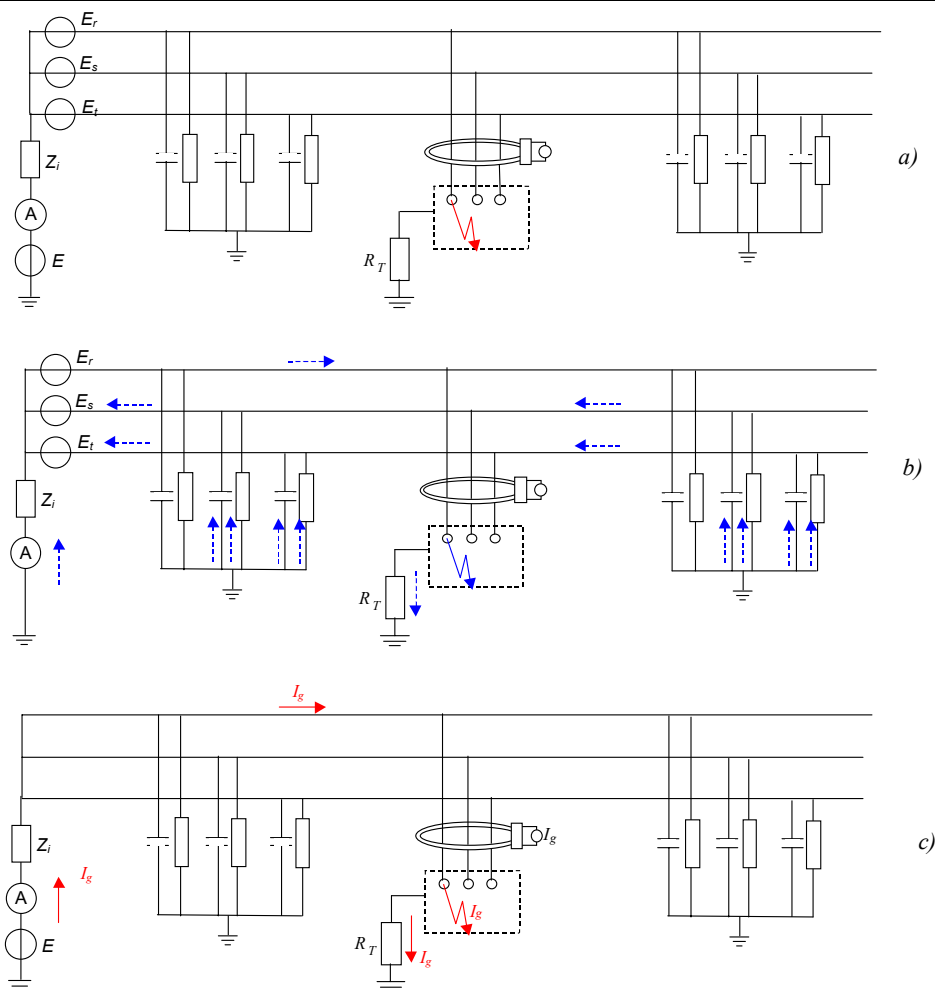


Fig. 9.25: Correnti di guasto nei sistemi IT con misuratore di isolamento visualizzate con l'uso del principio di sovrapposizione degli effetti.

Prescrizioni per evitare la pericolosità del secondo guasto a massa

Come si è visto, dovendo essere nei sistemi IT rispettata la (9.8), è ammesso che il primo guasto a massa permanga per un tempo indefinito; soltanto ragioni di continuità del servizio, e non la necessità del rispetto della normativa inducono alla rimozione, possibilmente veloce, del primo guasto a massa.

Pertanto ha probabilità non trascurabile l'evento di un secondo guasto a massa, che può configurarsi come già rammentato come un guasto bifase (fig.9.23).

Per l'interruzione del secondo guasto a massa che avvenga su una fase diversa da quella del primo guasto si considerano separatamente i casi di neutro distribuito e neutro non distribuito.

Sistemi con neutro non distribuito.

La situazione può essere schematizzata come rappresentato in fig. 9.26.

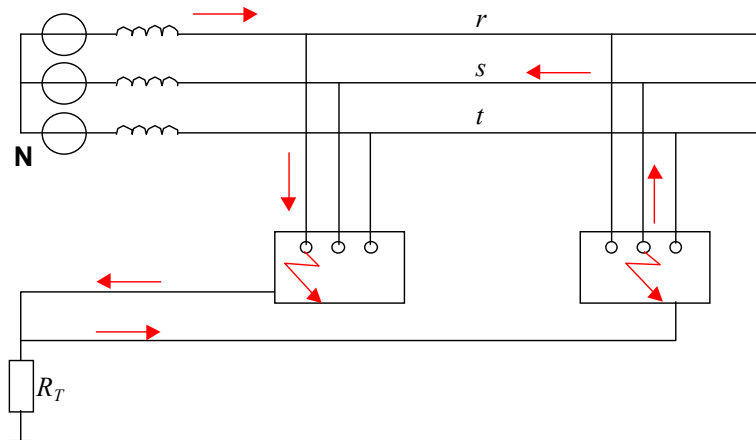


Fig. 9.26: Doppio guasto a massa su sistema IT con neutro non distribuito.

In figura si è ipotizzata una situazione di maggior estensione del circuito di guasto rispetto a quella riportata nel circuito di fig. 9.23: in effetti può capitare sia che le masse interessate dai due guasti abbiano fra loro un collegamento corto attraverso i conduttori di protezione come in detta figura, sia che lo abbiano lungo come in fig. 9.26.

In entrambi i casi si ha un anello di guasto che è simile a quello che si realizza nei sistemi TN: l'unica differenza consiste nel fatto che la tensione di alimentazione in questo caso è quella concatenata anziché quella stellata. Si applica quindi, in linea teorica, la prescrizione per l'eliminazione del guasto a massa già introdotta per il sistema TN, ovvero:

$$Z_s \cdot I_a \leq V_n$$

Il problema, in questo caso, consiste nella stima dell'impedenza dell'anello di guasto Z_s , che andrebbe effettuata non più per ogni apparecchio, ma per ogni coppia di apparecchi interessati. Questo risulterebbe troppo oneroso, e la norma, per semplicità, ci consente di computare per ogni carico dette impedenze come

$$Z_s = 2Z_{cp}$$

cioè come al doppio dell'impedenza di guasto che si avrebbe se il circuito comprendesse l'andata attraverso il conduttore di fase alimentante il carico considerato e il ritorno attraverso il relativo conduttore di protezione. In sostanza, quindi, si usano le stesse impedenze dell'anello di guasto che si userebbero per un sistema TN, moltiplicate per due.

In definitiva la prescrizione da adoperare per sistemi IT con neutro non distribuito è la:

$$2Z_s \cdot I_a \leq \sqrt{3}V_n \quad (9.9)$$

in cui I_a è, come nel caso di sistema TN, la corrente interrotta nei tempi indicati nella tab. 9.II (utilizzata con riferimento alla tensione nominale di fase).

Secondo i tempi riportati nella tab. 9.II Nel caso delle navi a 440, a rigore, il tempo da utilizzare sarebbe 0,06s, essendo le condizioni operative delle navi assimilabili a condizioni particolari ed essendo $440/\sqrt{3} > 230V$. Peraltro i tempi in essa riportati sono prescritti per gli impianti terrestri, mentre non esistono analoghe normative in campo navale.

La prassi usuale della MMI è di utilizzare protezioni che intervengano comunque entro 0,4s; questa regola, pur non congruente con la tab. 9.II, appare senz'altro ragionevole, e consente di utilizzare le normali protezioni dai cortocircuiti (cioè normali interruttori magnetotermici) anche per la protezione dai contatti indiretti, senza rinunciare alla selettività di intervento, di grande importanza dal punto di vista della continuità dell'alimentazione.

Sistemi con neutro distribuito.

Questo tipo di sistemi può essere realizzato, ma si tende ad evitarlo in quanto presenta i seguenti inconvenienti:

- un guasto a terra sul neutro non è rilevato e ciò vanifica parzialmente l'efficacia del sistema in termini di continuità dell'alimentazione
- i carichi monofasi devono essere isolati per la tensione concatenata, potendosi tale tensione realizzare nel caso di guasto franco a massa di una fase.

Per questi sistemi (fig. 9.27) la situazione è analoga al caso di sistemi con neutro non distribuito, salvo che è possibile ipotizzare il doppio guasto fase-neutro, il che impone di prescrivere la seguente condizione:

$$2Z_s \cdot I_a \leq V_n \quad (9.10)$$

in cui I_a è, come nel caso di sistema TN, la corrente interrotta nei tempi indicati nella tab. 9.II (utilizzata con riferimento alla tensione nominale di fase).

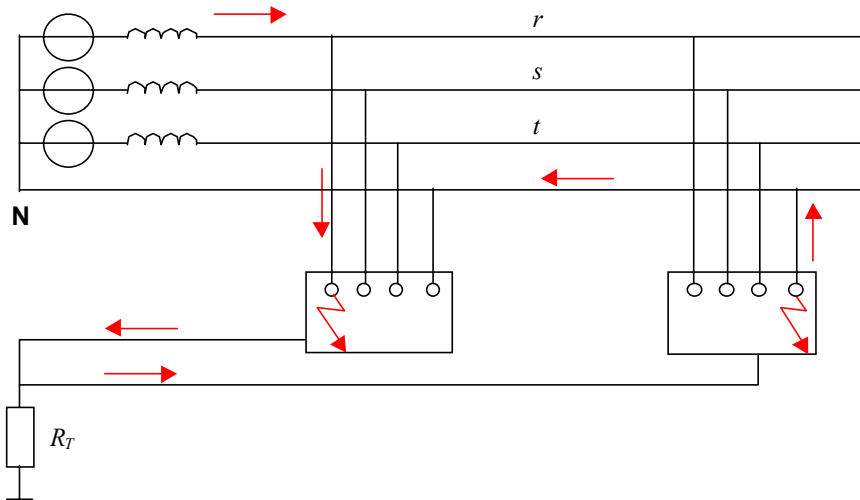


Fig. 9.27: Doppio guasto a massa (fase-neutro) su sistema IT con neutro distribuito.

La (9.10) implica la (9.9) ed è quindi l'equazione che dovrà essere rispettata nei sistemi IT con neutro distribuito.

9.5.4 Sistema completo a diversi livelli di tensione

Il sistema elettrico di una nave comprende normalmente più livelli di tensione, ottenuti mediante l'interposizione di trasformatori.

La presenza di trasformatori introduce una separazione galvanica fra primario e secondario e quindi:

- è possibile utilizzare una tecnica di protezione dai contatti indiretti differente fra il sistema presente sul primario e il secondario del trasformatore
- nel caso si adottino su primario e secondario sistemi IT, occorre prevedere per entrambi sistemi individuali di verifica dell'integrità dell'isolamento.

Una situazione frequente sulle navi MMI è rappresentata in fig. 9.28.

Si osservano i due livelli di tensione sono 440 V, 60 Hz e 115 V, 60 Hz, realizzati con sistemi IT a tre fili, e il livello di tensione 380/220 60 Hz realizzato con sistema TT, come noto (cap. 1) utilizzabile soltanto per carichi non vitali

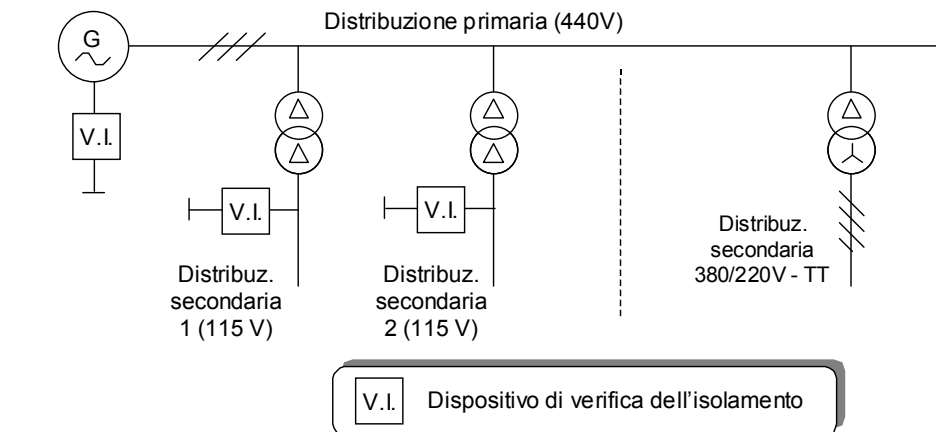


Fig. 9.28: Schema di sistema IT con verifica dell'isolamento nel caso di distribuzione primaria e secondaria.

Un altro esempio, che fra l'altro evidenzia soluzioni diverse per la verifica dell'isolamento fra il sistema di distribuzione primaria e il sistema IT presente su una distribuzione secondaria, è riportato in fig. 9.29 con rappresentazione multifilare.

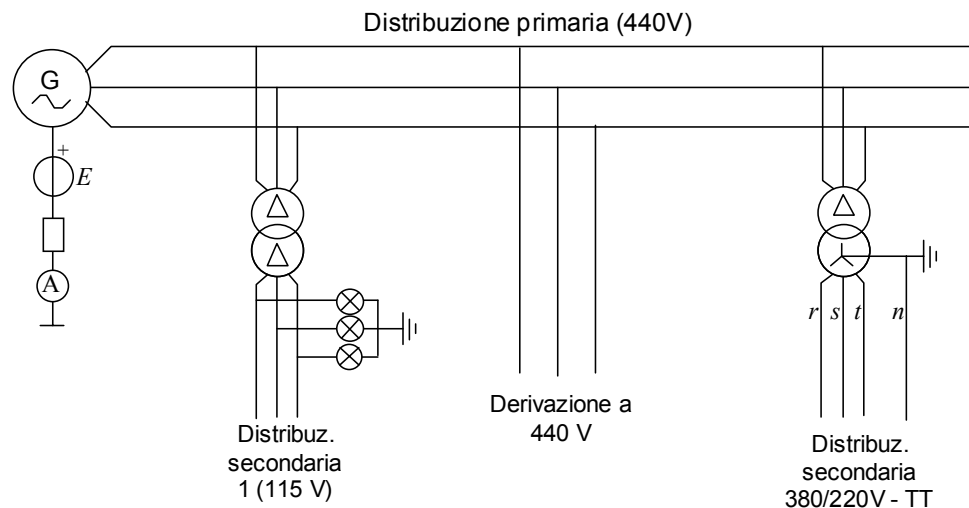


Fig. 9.29: Esempio di distribuzione IT con verifica dell'isolamento (schema multifilare).

9.6 Protezione dai contatti indiretti senza interruzione del circuito

Finora si è parlato di sistemi per la protezione dai contatti indiretti basati sull'interruzione automatica del circuito di alimentazione, quando necessaria.


Esistono altre tecniche per la protezione dai contatti indiretti, che sono rapidamente descritte nel presente paragrafo.

9.6.1 Protezione attraverso isolamento doppio o rinforzato

Come si è già discusso in precedenza, nella definizione fornita dalla norma CEI di massa si fa riferimento al cedimento dell'“isolamento principale”.

Prendiamo un conduttore di rame, rivestiamolo con un primo strato di isolante e poi con un secondo strato. Il primo strato viene detto isolamento principale, il secondo isolamento rinforzato.

Si consideri un apparecchio elettrico dotato di doppio isolamento (o, equivalentemente, di un isolamento particolarmente robusto, detto “isolamento rinforzato”), contenente nella sua parte esterna parti metalliche. In questo caso fra le parti metalliche accessibili e le parti attive sono interposti due strati di isolante con una protezione equivalente, ed appare quindi superfluo prevedere l’interruzione automatica del circuito per l’evento, ritenuto estremamente improbabile di cedimento di entrambi gli strati di isolamento.

Pertanto per gli apparecchi a isolamento doppio o rinforzato, i quali sono detti di Classe II e sono marchiati con un corrispondente simbolo composto da due quadrati concentrici () , non è prevista la connessione a terra di parti metalliche esterne.

Questi apparecchi (ad esempio gli asciugacapelli), non sono dotati di conduttore di protezione per la messa a terra e nemmeno, evidentemente, dell’elettrodo centrale della presa a spina, se portatili.

Si ritiene che l’eventuale messa a terra di parti metalliche accessibili di apparecchi di classe II sia addirittura controproducente ai fini della sicurezza, in quanto è concepibile l’eventualità che, per effetto di un guasto a massa su un altro apparecchio dello stesso impianto elettrico e nell’ipotesi di un errato dimensionamento dell’impianto di terra (o di un decadimento delle sue caratteristiche elettriche nel tempo) la parte metallica del nostro apparecchio venga messa in tensione dalla stessa connessione, attraverso il conduttore di protezione, al dispersore di terra. Questa eventualità potrebbe in certi casi essere addirittura più probabile del cedimento dell’isolamento doppio o rinforzato.

Si conclude il paragrafo ricordando che per poter classificare un apparecchio come apparecchio di classe II è necessario che esso rispecchi una apposita norma CEI, che ne definisce nel dettaglio le prescrizioni.

9.6.2 Protezione mediante luoghi non conduttori

Se un ambiente ha pavimento e pareti isolanti, e, inoltre, viene evitata la possibilità di contatto simultaneo con due masse o con una massa ed una massa estranea (attraverso distanziamento, ostacoli, isolamento), la protezione dai contatti indiretti è assicurata.

L’isolamento di pavimento e pareti deve essere in ogni punto non inferiore a 50 kΩ per tensioni fino a 500 V, 100 kΩ per tensioni superiori.

Gli apparecchi destinati ad essere utilizzati in questi locali hanno semplice isolamento e sono privi di morsetto per la connessione al conduttore di protezione; essi vengono detti *Apparecchi di classe 0*. Dato il loro scarso utilizzo, normalmente essi non vengono progettati appositamente: è sufficiente utilizzare apparecchi di classe I dei quali non si connetta il morsetto per il collegamento al conduttore di protezione.

Si cita qui testualmente il commento della CEI 64-8 a questo tipo di protezione.

In pratica esistono pochi locali in grado di soddisfare le condizioni richieste per l’applicazione di questa misura di protezione soprattutto per le seguenti ragioni:

- presenza di un numero sempre più grande di masse estranee nei locali;
- possibilità di modifiche dei rivestimenti dei pavimenti che possano trasformare un locale da non conduttore in conduttore
- presenza di prese a spina e uso di cordoni prolungatori che rendano variabili le distanze tra gli apparecchi utilizzatori e li possono rendere simultaneamente accessibili

9.7 Protezione dai contatti diretti

Un *contatto diretto* è un contatto con una parte normalmente in tensione, ad esempio se tocchiamo la parte interna di un filo elettrico con l’isolante danneggiato.

Con maggior rigore si può fare riferimento alle definizioni delle norme CEI.

Contatto diretto: contatto con parti attive

Parte attiva: conduttore o parte conduttrice in tensione nel servizio ordinario, compreso il conduttore di neutro ma escluso, per convenzione il conduttore PEN.

Della protezione combinata da contatti diretti e indiretti si è già parlato nel par. 9.4. Si tratta però di situazioni particolari; nella grande maggioranza dei casi la protezione dai contatti diretti viene realizzata in maniera indipendente dalla protezione da quelli indiretti; di questo caso si tratta nel presente paragrafo.

9.7.1 **Protezione fondamentale**

La protezione fondamentale dai contatti diretti, quando non realizzata in maniera combinata alla protezione dai contatti indiretti, avviene con l'uso di isolamento, involucri, barriere, ostacoli, distanziamento dalle parti attive.

Per chiarezza specifichiamo che l'involucro è una parte che assicura la protezione dai contatti diretti *in ogni direzione*; la barriera solo nelle direzioni abituali di accesso, gli ostacoli non assicurano la protezione dai contatti diretti volontari neanche nella direzione abituale di accesso, ma costituiscono uno strumento per impedire contatti involontari con parti in tensione (ad esempio un corrimano che definisce un percorso da seguire in un'area dove sono presenti parti in tensione).

L'isolamento, gli involucri e le barriere sono detti *misure di protezione totale*, mentre gli ostacoli e il distanziamento dalle parti attive sono detti *misure di protezione parziale*.

Gli involucri sono classificati in base alla norma CEI 70-1 mediante una sigla composta da alle lettere IP seguite da due cifre caratteristiche ed eventualmente da una o due lettere aggiuntive, aventi il seguente significato:

- la prima cifra caratteristica indica il livello di protezione contro l'ingresso all'interno dell'involucro di corpi solidi; questa protezione implica anche protezione contro l'accesso a parti pericolose
- la seconda cifra caratteristica indica il livello di protezione contro l'ingresso all'interno dell'involucro dell'acqua
- la prima lettera addizionale è utilizzata per specificare il livello di protezione contro l'accesso di parti che potrebbero creare specifici pericoli per l'uomo, in maniera indipendente da quanto implicito nel valore della prima cifra caratteristica
- la seconda lettera addizionale, raramente utilizzata, non è presa qui in considerazione.

Più è grande una cifra caratteristica, maggiore è il grado di protezione; per quanto riguarda inoltre la prima lettera caratteristica, una lettera successiva in ordine alfabetico rispetto ad un'altra indica un maggiore livello di protezione.

Per la loro importanza si riporta il significato dei valori della prima lettera addizionale:

- lettera A: protetto contro l'accesso con il dorso della mano (protezione verificata mediante sfera del diametro di 50 mm)
- lettera B: protetto contro l'accesso con un dito (un dito meccanico articolato simulante il dito umano, detto "dito di prova", può penetrare nell'involucro, ma non deve toccare parti attive)
- lettera C: protetto contro l'accesso con un attrezzo (un corpo cilindrico lungo 100 mm e avente diametro di 2,5 mm, simulante un attrezzo può penetrare nell'involucro, ma non deve toccare parti attive)
- lettera D: protetto contro l'accesso di un filo conduttore (un corpo cilindrico lungo 100 mm e avente diametro di 1,0 mm, detto "filo di prova" può penetrare nell'involucro, ma non deve toccare parti attive)

Al fine di una maggiore chiarezza si fanno i seguenti esempi di gradi di protezione a due cifre caratteristiche:

- IP20: protetto contro l'ingresso di corpi estranei aventi di 12,5 mm o superiore⁸; non protetto contro l'ingresso dell'acqua
- IP40: protetto contro l'ingresso di corpi estranei aventi diametro di 1 mm o superiore; non protetto contro l'ingresso dell'acqua
- IP55: protetto contro la polvere e contro i getti d'acqua

E' importante notare che quando una o entrambe le due cifre caratteristiche non sono specificate in corrispondenza di ognuna di esse viene riportata una X

ad esempio è:

- IPX5: protetto contro i getti d'acqua; protezione contro l'ingresso di corpi solidi non specificata
- IPXXB protetto contro l'accesso di un dito a parti pericolose; protezione contro l'ingresso di corpi estranei e di acqua non specificata
- IPXXD protetto contro l'accesso di un filo a parti pericolose; protezione contro l'ingresso di corpi estranei e di acqua non specificata

La norma CEI 64-8 (sezione 412) prescrive che l'impianto elettrico sia realizzato in maniera da ottenere, negli ambienti a cui ha accesso anche personale non elettricamente addestrato, quindi le persone comuni, i lavoratori non esperti di elettricità, ecc, almeno i seguenti gradi di protezione:

- protezione IPXXB per tutte le parti dell'impianto elettrico
si possono tuttavia avere gradi di protezione temporaneamente minori durante la sostituzione di componenti di impianto: tipico è il caso della sostituzione delle lampadine.
- protezione IPXXD per tutte le superfici orizzontali degli involucri che sono a portata di mano
Le parti orizzontali sono infatti più pericolose in quanto in fori orizzontali è più probabile che vadano a cadere oggetti conduttori filiformi che possono rendere accessibili potenziali pericolosi, viene prescritto che non deve essere possibile accedere alle parti attive con un filo metallico di caratteristiche standard.

E' importante notare che una protezione IP20 è più restrittiva della protezione IPXXB, e la IP40 più restrittiva della IPXXD⁹. Pertanto è sufficiente (ma non necessario), e di norma si procede in tal senso, realizzare l'impianto elettrico in maniera da assicurare una protezione IP20 per le superfici verticali e IP40 per quelle orizzontali.

Nei locali invece cui hanno accesso solo persone elettricamente addestrate (ad es. le centrali elettriche, le cabine elettriche), possono essere utilizzate anche le misure di protezione parziale, ma sempre rispettando precise prescrizioni sulla loro scelta e installazione, riportate nelle norme CEI.

9.7.2 Protezione addizionale

Oltre alla cosiddetta protezione fondamentale contro i contatti diretti esiste la possibilità di utilizzare una misura di protezione addizionale, attraverso l'adozione di interruttori differenziali ad alta sensibilità. Nel precedente paragrafo 9.5.1 si è descritto il principio di funzionamento degli interruttori differenziali. Gli interruttori differenziali sono detti *ad alta sensibilità*¹⁰ se hanno una corrente differenziale nominale di intervento non superiore a 30 mA.

⁸ Inoltre il "dito di prova" non deve penetrare (cfr. oltre, alla descrizione delle lettere addizionali)

⁹ Infatti le cifre caratteristiche citate impongono rispettivamente che dito di prova e filo di prova non penetrino nell'involucro; le lettere addizionali, invece, considerano sufficiente che essi, pur penetrando, non arrivino a toccare parti attive.

¹⁰ Qui si fa riferimento alla definizione delle norme CEI. Purtroppo tale definizione non coincide, per ragioni particolarissime relative alla nascita della legge 46/90, con la definizione della legge italiana, data nel regolamento di attuazione della legge 46/90, nella quale si definiscono ad alta sensibilità gli interruttori differenziali con corrente differenziale nominale di intervento non superiore ad 1A.

Nella figura 9.30 sono mostrate, nel medesimo piano cartesiano, la curva di intervento di un interruttore differenziale da 30 mA e la curva di sicurezza convenzionalmente stabilita per il corpo umano, discussa in precedenza e già riportata nella fig. 9.2.

Come si vede la curva di intervento risulta in ampia parte del suo sviluppo cautelativa rispetto alla curva di sicurezza; fa eccezione la zona relativa a tempi molto elevati per la quale la curva di sicurezza consentirebbe correnti di poco inferiori a 30 mA, ma la differenza è modesta e ha quindi scarsi effetti pratici ai fini della sicurezza. Fa eccezione ancora la zona delle correnti elevate, le quali vengono interrotte in tempi troppo lunghi. Anche questa zona ha peraltro scarso interesse pratico, almeno se si analizzano sistemi a tensione di 230 V, in quanto la resistenza del corpo umano è tale che anche un contatto alla piena tensione di 230 V non è in grado far attraversare il corpo umano da correnti così elevate.

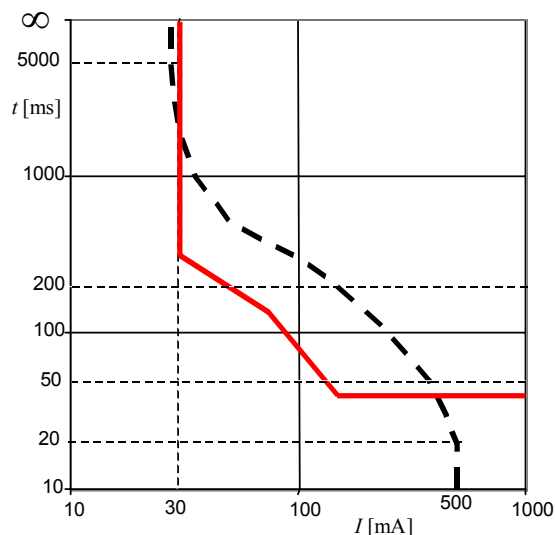


Fig. 9.30: Confronto della caratteristica di intervento dell'interruttore differenziale da 30 mA (linea a tratto continuo) e della curva di sicurezza (linea tratteggiata).

Sembra quindi ragionevole concludere che l'interruttore differenziale rappresenta un efficace sistema di protezione dai contatti diretti. Questa conclusione è solo parzialmente corretta, in quanto non si ritiene opportuno affidare la sicurezza delle persone alla tempestività ed efficacia dell'intervento dell'interruttore differenziale, ad esempio rinunciando all'uso dell'isolamento. Infatti si tratta pur sempre di un tipo di protezione *attivo*, in cui un dispositivo al momento dell'infortunio deve intervenire e nei tempi corretti, a differenza della protezione passiva data dagli isolamenti e dagli involucri, molto più affidabile in quanto sempre presente, e non solo nell'istante, di importanza vitale, in cui deve effettuare la protezione.

E' essenzialmente per queste ragioni che l'interruttore differenziale ad alta sensibilità può essere utilizzato come misura di protezione *addizionale* dai contatti diretti, non potendosi sostituire alle altre misure di protezione, di tipo passivo, precedentemente descritte.

Riferimenti Bibliografici

- [1] V. Carrescia: "Fondamenti di sicurezza elettrica", edizioni TNE, maggio 1997
- [2] Norma CEI 64, fasc. 4985R: "Effetti della corrente attraverso il corpo umano"