

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

Appunti Corso di Sistemi Elettrici

Il conduttore neutro

Anno Accademico 2015-2016

prof. ing. Bruno Azzerboni

Fonti:

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

Web:

www.elektro.it,
www.voltimum.it
www.electroyou.it

Il conduttore neutro

1. Generalità

Il neutro è il conduttore (fig. 1.1), collegato al punto a potenziale zero del sistema elettrico, che concorre, nei sistemi trifase a quattro fili, alla trasmissione dell'energia elettrica (fig. 1.2).

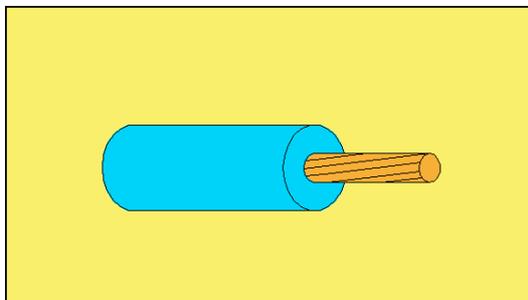


Fig. 1.1 - Il colore identificativo del conduttore di neutro è il blu chiaro

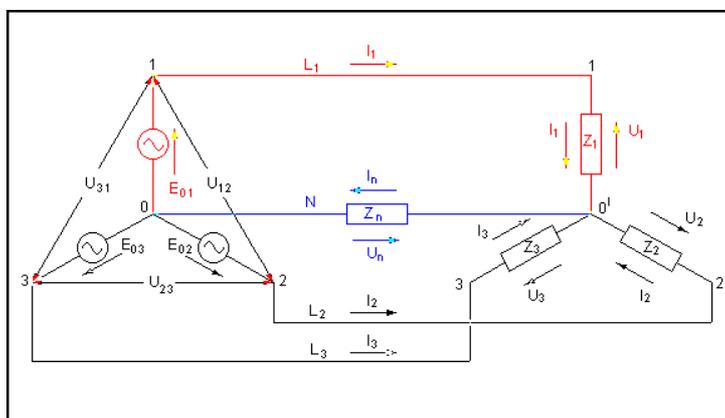


Fig. 1.2 - Circuito trifase con neutro

Il neutro, *nei sistemi monofase*, è il conduttore utilizzato come ritorno al generatore della corrente erogata dallo stesso al fine di alimentare un carico.

Nei sistemi trifase, invece, con sistema squilibrato e a quattro conduttori, funge da ritorno al centro stella dei generatori per la corrente di squilibrio.

Il conduttore neutro è quindi da considerarsi, alla stregua del conduttore di fase, un **conduttore attivo** che si differenzia dal conduttore di fase perché, nella maggioranza dei casi, ha una **tensione rispetto terra di pochi volt**.

Negli impianti elettrici è necessario collegare a terra il conduttore neutro almeno per tre motivi fondamentali:

- 1) dare a tutto il sistema elettrico un sicuro riferimento col potenziale di terra, che come è noto si trova convenzionalmente a zero volt;
- 2) fornire al sistema elettrico di bassa tensione, che ha origine dalla cabina MT/BT, una sicura via di ritorno per un'eventuale corrente di guasto nel trasformatore fra media e bassa tensione;
- 3) consentire alle correnti di guasto a terra del sistema TT (guasto sulle masse degli impianti) la via di ritorno al centro stella del trasformatore e quindi al generatore.

Al fine di comprendere pienamente il funzionamento del conduttore neutro occorre avere chiaro il concetto di centro stella di un sistema trifase, che è il punto di partenza del conduttore neutro, quindi è necessario illustrarlo sinteticamente.

Generalmente si parla di due tipi di centro stella, uno reale ed un altro virtuale.

- *Centro stella reale*: è quel nodo fisico in corrispondenza del quale sono collegati gli estremi finali degli avvolgimenti secondari del trasformatore. Questo nodo è poi collegato al cosiddetto morsetto neutro nella morsettiera esterna posta sulla carcassa del trasformatore; al morsetto neutro è quindi collegato il conduttore neutro del sistema di alimentazione.
- *Centro stella virtuale*: è il punto d'incontro dei vettori rotanti rappresentativi delle tensioni stellate o di fase per collegamento a stella. Esso coincide con il baricentro del triangolo equilatero i cui lati, per i sistemi trifase simmetrici, sono i vettori rotanti rappresentativi delle tensioni concatenate o di linea.

Nella maggioranza degli impianti, in assenza di guasto, i due centri stella coincidono (N, lettera che identifica il conduttore neutro, e T, lettera che identifica il conduttore o collegamento di terra, sono coincidenti) o sono poco distanti, il che vuol dire che la differenza di potenziale tra i due centri stella è dell'ordine di pochi Volt (fig. 1.3).

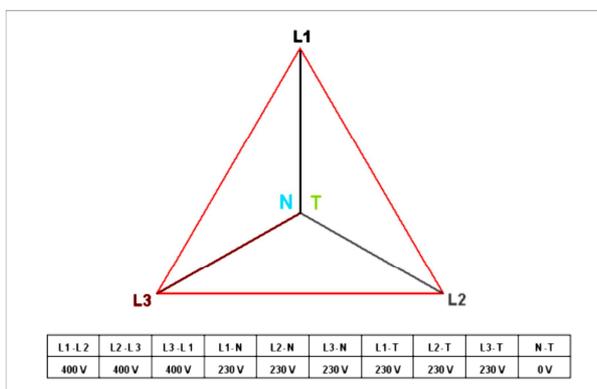


Fig. 1.3 - Rappresentazione del sistema in assenza di guasto

Tensione alternata sinusoidale *Frequenza nominale 50 Hz* *Distribuzione per gli utenti sistema TT*
Distribuzione trifase + neutro *Neutro a terra* *Tensione di fase (verso terra) 230 V (Valore efficace)*
Tensione concatenata (verso le altre fasi) 400 V (Valore efficace)

In un impianto elettrico di distribuzione in bassa tensione se il sistema è simmetrico ed equilibrato, il conduttore di neutro non è percorso da alcuna corrente e il suo potenziale corrisponde al baricentro del triangolo equilatero delle tensioni di fig. 1.3a. Se invece il sistema è simmetrico, ma non è equilibrato, il potenziale del neutro si sposta dal baricentro del triangolo, in misura tanto maggiore quanto maggiore è lo squilibrio, aumenta infatti la c.d.t. nell'impedenza del neutro e di conseguenza la $U_n = V_{00'} = Z_n I_n$ (fig. 1.3b).

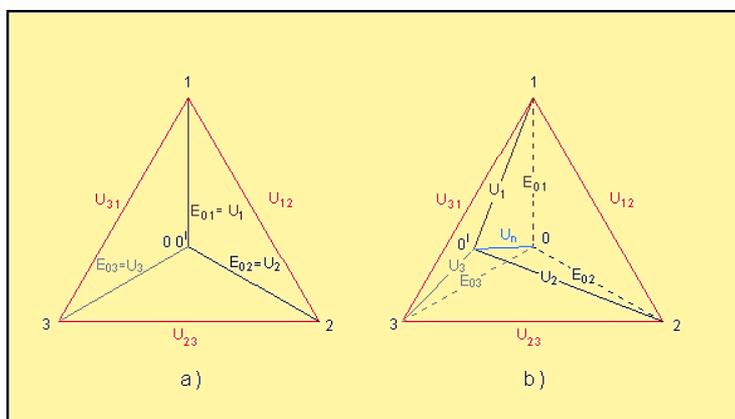


Fig. 1.3 - a) Sistema simmetrico equilibrato con conduttore di neutro. Il neutro non è percorso da corrente ed il suo potenziale corrisponde al baricentro del triangolo equilatero delle tensioni. b) In presenza di forti squilibri nel carico, il potenziale del neutro si sposta rispetto al baricentro del triangolo, in misura tanto maggiore quanto maggiore è lo squilibrio

Il collegamento di neutro è possibile solo se si ha un circuito collegato a stella come indicato nella fig. 1.4.

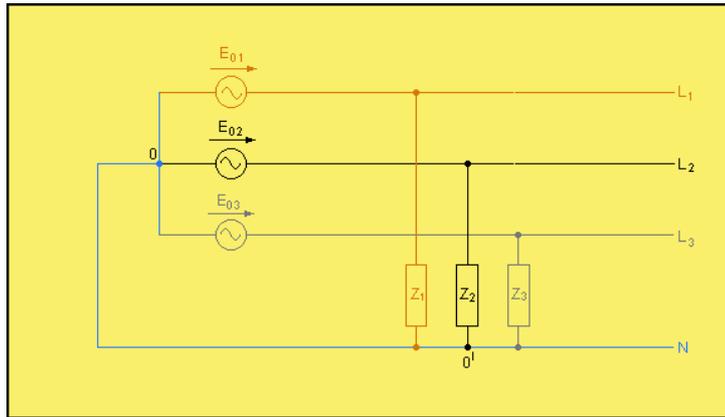


Fig. 1.4 - Un circuito collegato a stella rende accessibile un punto a potenziale nullo al quale collegare il conduttore di neutro

Viceversa se il circuito è collegato a triangolo il collegamento al neutro può essere ottenuto collegando alle fasi tre impedenze identiche con una configurazione a stella (fig. 1.5).

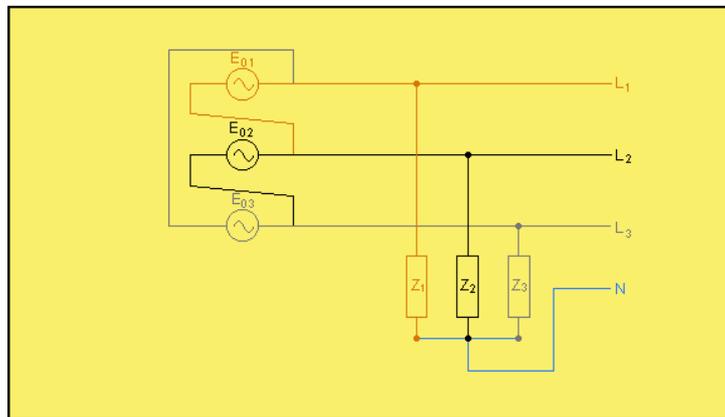


Fig. 1.5 - Tre impedenze uguali collegate a stella e alimentate da tre tensioni di linea uguali possono fornire un punto a potenziale nullo per il collegamento del conduttore di neutro

2. I sistemi elettrici con riferimento al collegamento a terra del neutro e delle masse

In funzione della messa a terra del neutro e delle masse, un sistema elettrico può essere classificato mediante due lettere indicanti rispettivamente lo stato del neutro e delle masse (fig. 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5):

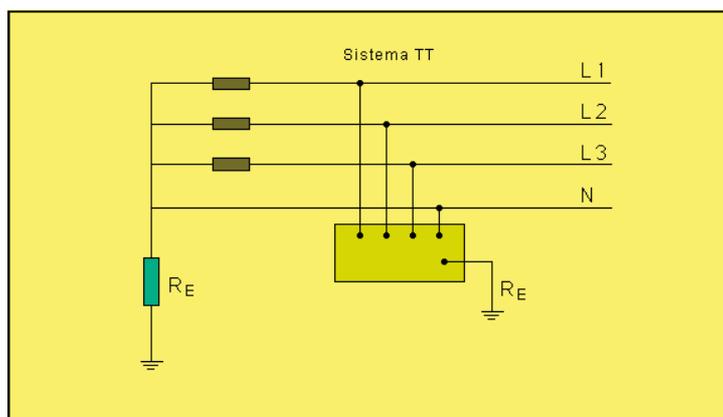


Fig. 2.1 - Sistema TT - Sistema di distribuzione dell'energia elettrica alle utenze di prima categoria. **La cabina di trasformazione è in genere di proprietà dell'ente distributore. Il neutro è collegato direttamente a terra e le masse sono collegate mediante PE ad un impianto di terra indipendente da quello del neutro.**

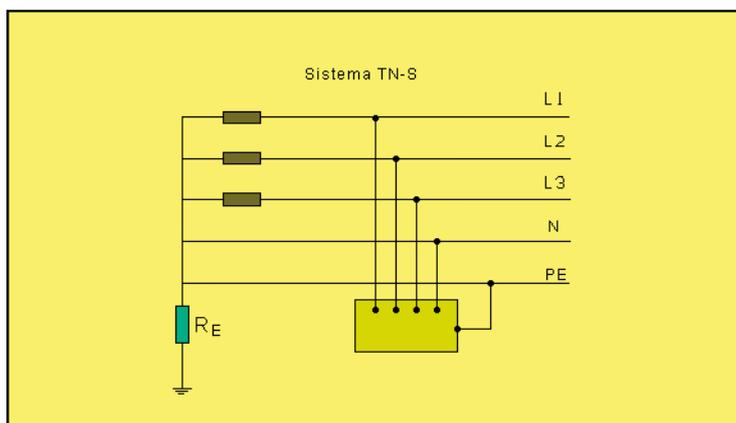


Fig. 2.2 - Sistema TN-S - Sistema di distribuzione dell'energia elettrica alle utenze dotate di propria cabina di trasformazione. **Il neutro è collegato direttamente a terra e le masse sono connesse allo stesso impianto di terra del neutro. Il neutro e il conduttore di protezione sono separati.**

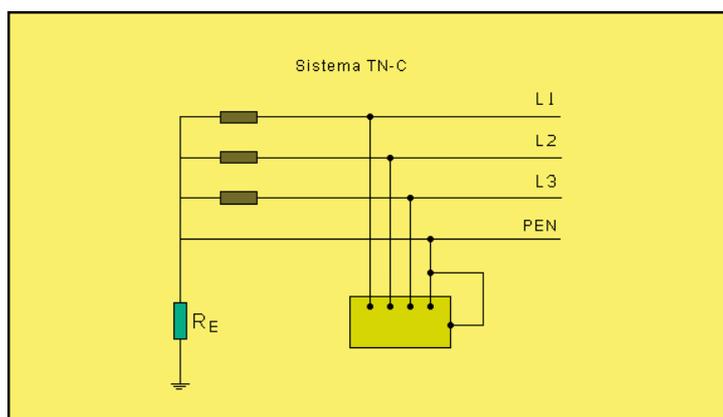


Fig. 2.3 - Sistema TN-C - Sistema di distribuzione dell'energia elettrica alle utenze dotate di propria cabina di trasformazione. **Il neutro è collegato direttamente a terra e le masse sono connesse allo stesso impianto di terra del neutro. Le funzioni di neutro e PE sono svolte da un unico conduttore denominato PEN (sistema TN-C).**

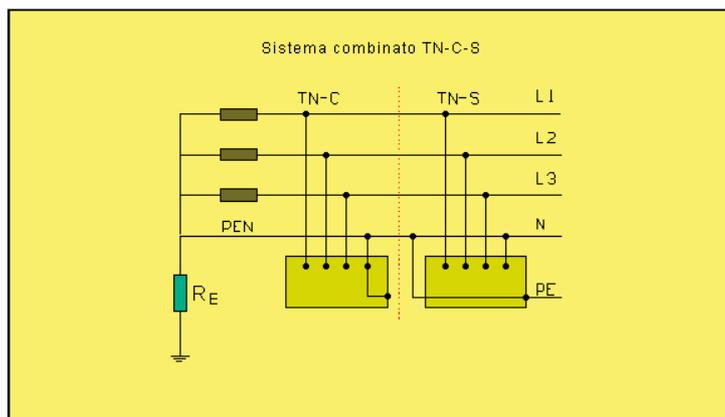


Fig. 2.4 - Sistema combinato TN-C-S - Sistema di distribuzione dell'energia elettrica alle **utenze dotate di propria cabina di trasformazione**. Il neutro è collegato direttamente a terra e le masse sono connesse allo stesso impianto di terra del neutro. Il sistema è una combinazione dei due sistemi TN-S e TN-C.

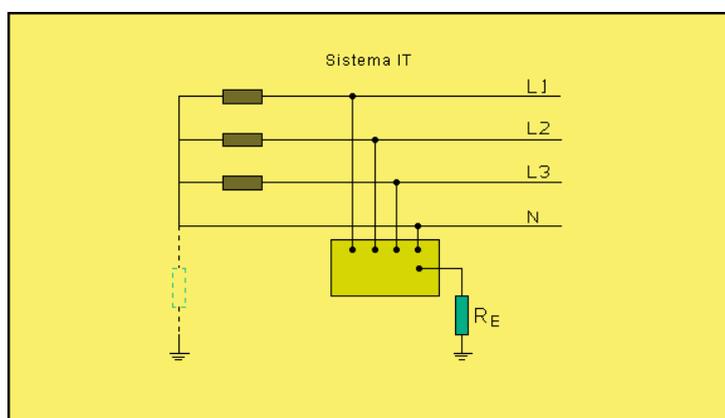


Fig. 2.5 - Sistema IT - Sistema di distribuzione dell'energia elettrica adatto in tutti i casi nei quali deve essere **garantita la continuità di servizio**. Il neutro può essere isolato da terra oppure collegato a terra mediante impedenza. Le masse sono collegate ad una terra indipendente, separatamente o in comune, oppure alla terra del sistema.

3. Condizioni del neutro nei sistemi trifase

Il neutro dei sistemi di trasmissione e di distribuzione nelle reti trifase può trovarsi in una delle seguenti condizioni (fig. 3.6a, b, c):

- collegato a terra in modo **franco**, quando è trascurabile l'impedenza di tale collegamento;
- isolato da terra;
- collegato a terra mediante un'impedenza apposita, di valore determinato e non trascurabile; appartengono a questa categoria anche i sistemi con **neutro compensato**, per i quali il neutro è connesso a terra mediante un'induttanza di resistenza trascurabile (bobina di Petersen).

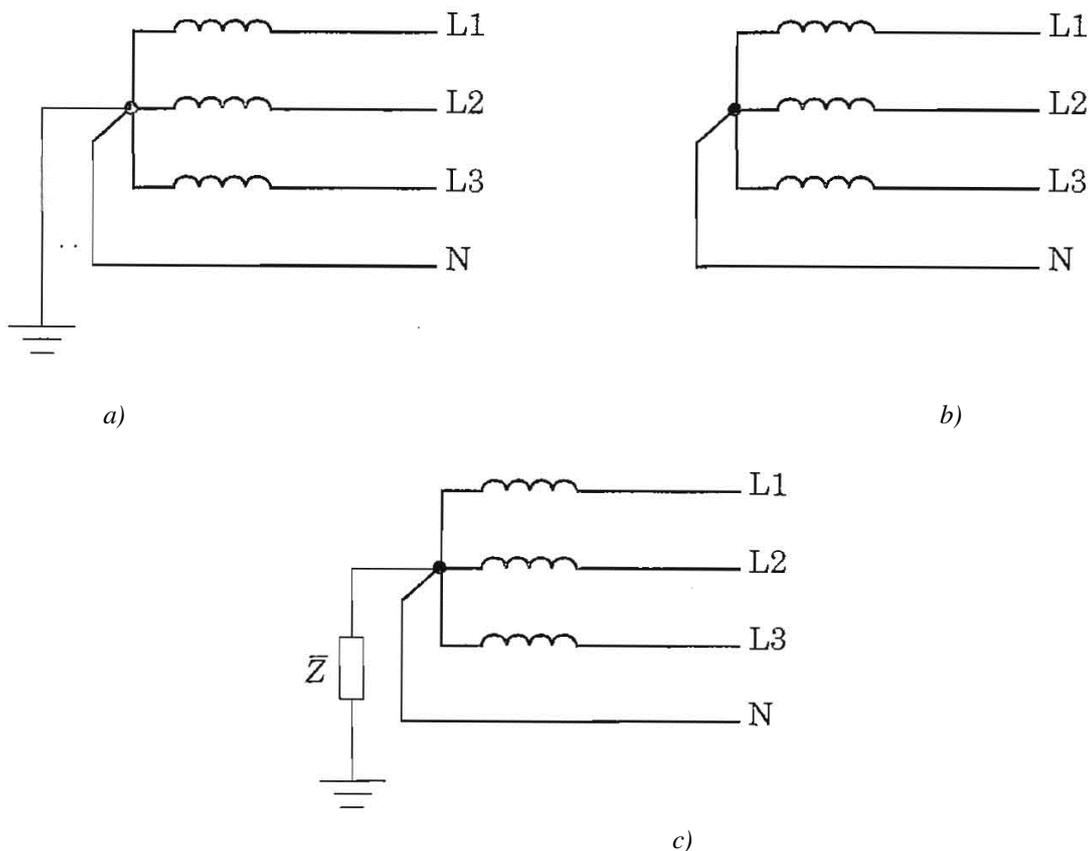


Fig. 3.6 – a) Neutro collegato a terra in modo franco; b) Neutro isolato da terra; c) Neutro a terra tramite impedenza

La differenza tra i diversi sistemi riguarda essenzialmente le tensioni ed il comportamento in caso di guasto a terra di una fase.

Nel caso del sistema con **neutro francamente a terra**, il vantaggio è che il potenziale del centro stella del sistema è vincolato a quello di terra e le tensioni verso terra delle fasi sono uguali alla tensione di fase del funzionamento normale; nel caso di guasto a terra di una fase le tensioni verso terra delle fasi sane possono arrivare, al massimo, al valore della tensione concatenata e questo costituisce un vantaggio per il dimensionamento dell'isolamento delle apparecchiature.

Per gli impianti di bassa tensione questa soluzione è anche vantaggiosa per la sicurezza delle persone, in relazione al pericolo di contatti diretti e indiretti.

La corrente di guasto a terra (fig. 3.7) assume però valori molto elevati, essendo limitata soltanto dall'impedenza del trasformatore di alimentazione e da quella di linea fino al punto di guasto, e provoca l'intervento delle protezioni, interrompendo la continuità del servizio.

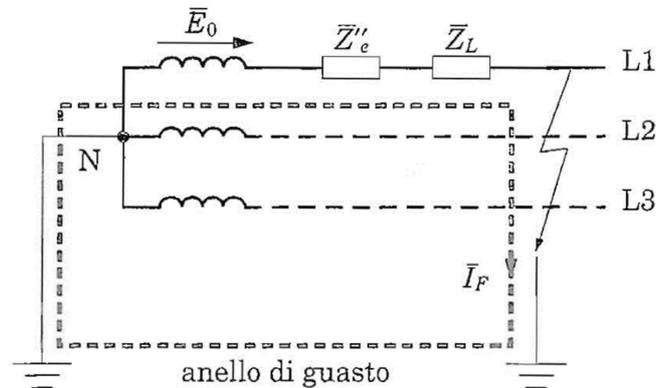


Fig. 3.7 – Sistema trifase con neutro francamente a terra, guasto a terra della fase L1

Un sistema trifase con **neutro isolato**, collegato al secondario di un trasformatore a stella (fig. 3.8) presenta delle capacità parassite tra ogni conduttore e terra (o verso massa nel caso di linee in cavo). Supponendo che vi sia un guasto franco a terra della fase 1, il centro stella del sistema delle tensioni si sposta nel vertice 1 del triangolo delle tensioni concatenate, si annulla la tensione di fase \bar{V}_{10} , mentre le altre due tensioni di fase diventano uguali a quelle concatenate. Il centro stella si sposta sul vertice 1 del triangolo delle tensioni concatenate.

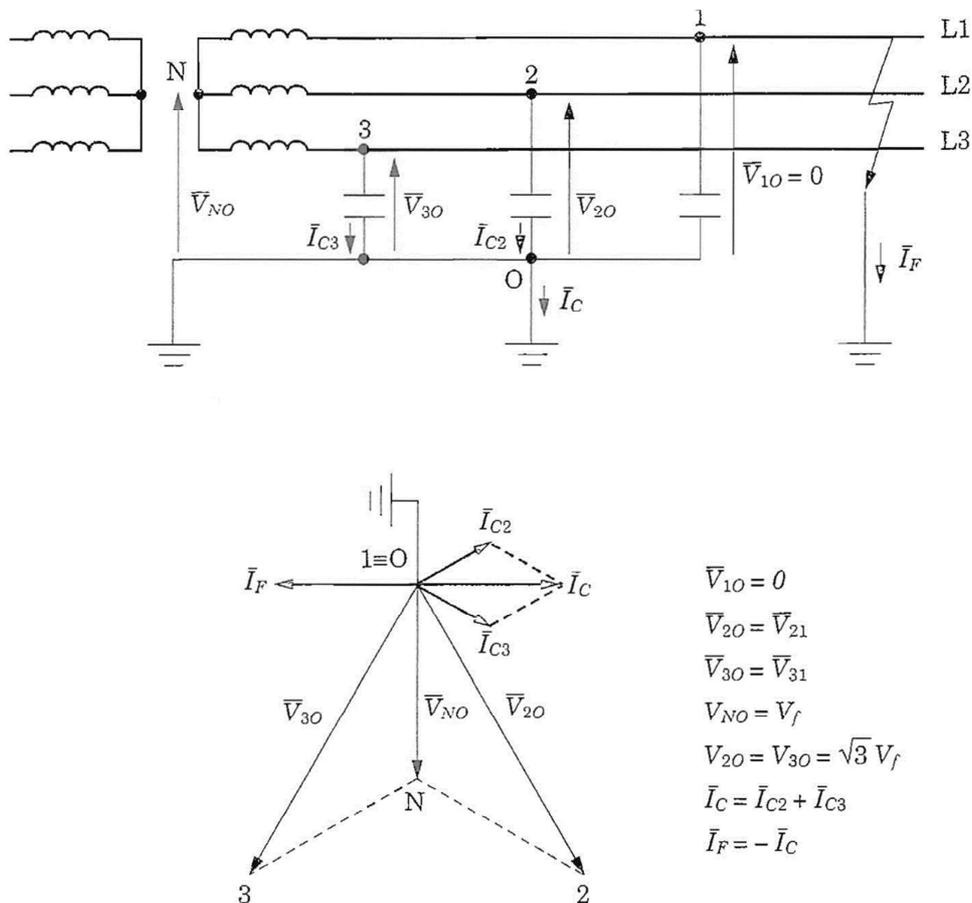


Fig. 3.8– Sistema trifase con neutro isolato e diagramma vettoriale delle tensioni e delle correnti di guasto a terra della fase L1

La corrente di guasto a terra \bar{I}_F di natura capacitiva, dovuta alle correnti di dispersione delle fasi, è:

$$\bar{I}_F = -\bar{I}_C = -(\bar{I}_{C2} + \bar{I}_{C3})$$

dove \bar{I}_{C2} ed \bar{I}_{C3} sono in quadratura in anticipo rispetto alle tensioni che le generano, rispetto cioè a \bar{V}_{20} e \bar{V}_{30}

A causa dell'elevata impedenza del collegamento a terra delle fasi, la corrente di guasto a terra è meno elevata rispetto al caso di neutro francamente a terra, ma aumenta con la tensione della linea e con l'estensione della stessa, dato che aumenta il valore della capacità verso terra dei conduttori.

Per esempio, in un sistema a 20 kV si può ritenere la corrente di guasto a terra pari a 4 A per kilometro di linea nel caso di condutture in cavo e solo di 0,06 A/km per le linee aeree, che presentano una capacità verso terra molto più ridotta.

Per contenere il valore della corrente di guasto a terra **nel caso di reti molto estese** si può usare il sistema con **neutro compensato**, collegato a terra mediante la bobina di Petersen (fig. 3.9).

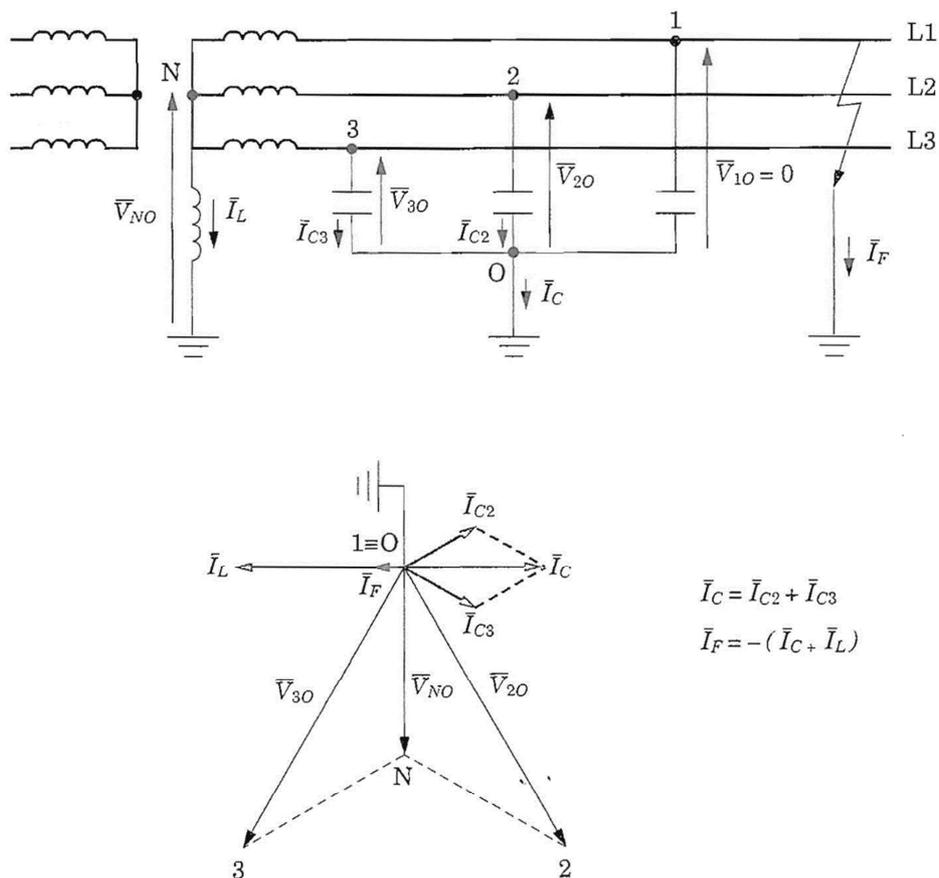


Fig. 3.9– Sistema trifase con neutro compensato e diagramma vettoriale delle tensioni e delle correnti di guasto a terra della fase L1

In questo caso nella bobina circola una corrente induttiva \bar{I}_L in quadratura in ritardo rispetto alla tensione \bar{V}_{NO} che la genera e quindi in opposizione di fase rispetto a \bar{I}_C ; la corrente di guasto a terra, data da

$$\bar{I}_F = -(\bar{I}_C + \bar{I}_L) = -(\bar{I}_{C2} + \bar{I}_{C3} + \bar{I}_L)$$

risulta molto minore rispetto al caso precedente e questo permette di dimensionare in modo meno severo l'impianto di terra.

La scelta della soluzione da adottare dipende prevalentemente dal valore della tensione di esercizio del sistema, dalle diverse esigenze concernenti l'isolamento delle apparecchiature, dalla sicurezza e dal contenimento del valore della corrente di guasto a terra.

Nelle **reti di bassa tensione** è preminente l'esigenza di sicurezza delle persone, che è meglio tutelata collegando il neutro a terra senza impedenza. Per tale ragione la norma CEI-64/8 relativa agli impianti utilizzatori fino a 1000 V in alternata e 1500 V in continua, stabilisce che venga usata la distribuzione TT o TN con il neutro direttamente a terra limitando l'uso del neutro isolato (sistema IT) a pochi casi aventi particolari esigenze di continuità di esercizio.

Nelle **reti di alta tensione** e, in particolare, per tensioni nominali superiori a 100 kV, si adotta ancora la soluzione del neutro francamente terra, in modo da ridurre il livello di isolamento delle macchine e delle apparecchiature, che in questo caso risulta l'esigenza fondamentale. L'elevato valore della corrente di guasto a terra impone di proporzionare in modo opportuno l'impianto di terra delle stazioni, al fine di limitare convenientemente le tensioni di passo e di contatto.

Nelle **reti di media tensione** la soluzione non è così ben individuabile come nei casi precedenti, essendo vari i fattori da considerare; in particolare si deve tener conto che:

- il vantaggio economico dato dalla riduzione del livello d'isolamento nelle reti con neutro a terra diventa assai meno rilevante rispetto all'alta tensione;
- le cabine MT/BT hanno valori della resistenza di terra maggiori rispetto alle stazioni AT, molto più estese e complesse, per cui l'elevata corrente di guasto che si ha col neutro francamente a terra può dar luogo a tensioni di passo e di contatto intollerabili, cosa che fa propendere per la soluzione con neutro isolato oppure compensato nei casi di reti molto estese;
- la rete MT è più ramificata e sono quindi più frequenti le occasioni di guasto a terra che, nel caso di utilizzazione della soluzione col neutro a terra, determinerebbero l'intervento degli interruttori di massima corrente, interrompendo il servizio.

Per queste ragioni il sistema più adatto risulta quello col neutro isolato da terra; tuttavia per le reti gestite dall'Enel si è deciso, di recente, di passare alla soluzione col neutro compensato, in modo da ridurre le correnti di guasto a terra che, pur con il neutro isolato, possono diventare troppo elevate a causa della crescente estensione e ramificazione della rete MT in cavo interrato.

4. Caratteristiche funzionali del neutro

La corrente \dot{I}_n nel neutro, dovendo rispondere ai principi di Kirchoff, ai nodi 0 e 0' (fig.4.1) è uguale alla somma vettoriale delle correnti di linea (con il collegamento a stella le correnti di linea coincidono con le correnti di fase):

$$\dot{I}_n = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3$$

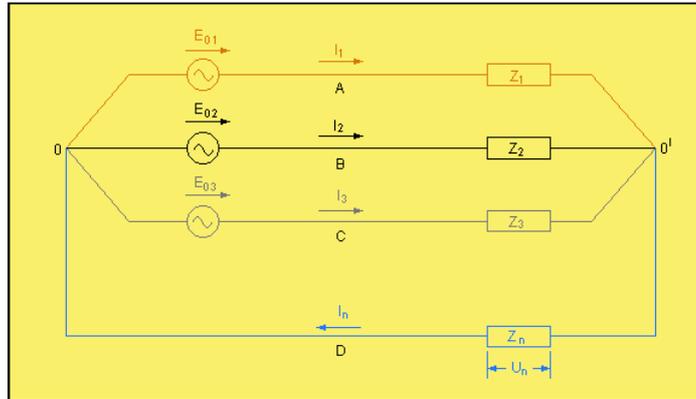


Fig. 4.1 - Applicando il principio di Kirchoff ai nodi 0 e 0' è possibile calcolare la corrente I_n che circola sul conduttore di neutro $\dot{I}_n = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3$

Se, come abbiamo visto, il sistema è simmetrico ed equilibrato, la corrente \dot{I}_n risultante è nulla, altrimenti tanto maggiore è lo squilibrio delle correnti di fase tanto più elevata risulta la corrente sul conduttore di neutro che funge da ritorno (fig. 4.2 e 4.3). In queste condizioni il potenziale del neutro non coincide più col potenziale del centro stella delle fasi provocando una modesta disimmetria delle tensioni di fase, aumenta, infatti, la c.d.t. nell'impedenza del neutro e di conseguenza la $U_n = V_{00'} = Z_n I_n$.

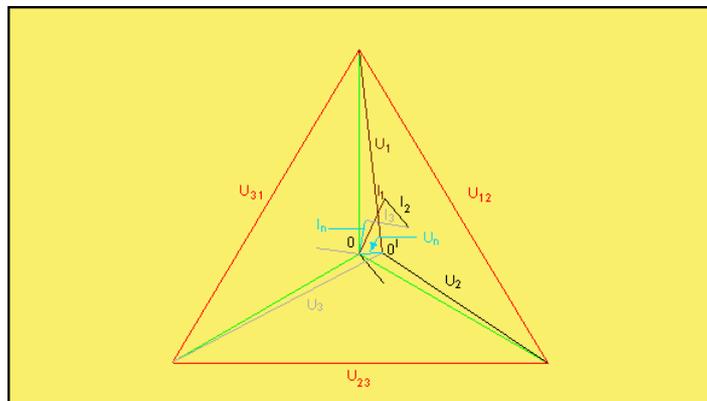


Fig. 4.2 - Spostamento dal centro stella del potenziale di neutro in presenza del conduttore di neutro. Quando il carico è squilibrato il conduttore di neutro è attraversato da una corrente \dot{I}_n risultante dalla somma vettoriale delle correnti di fase. Il centro stella si sposta da 0 a 0' provocando una modesta dissimmetria delle tensioni di fase.

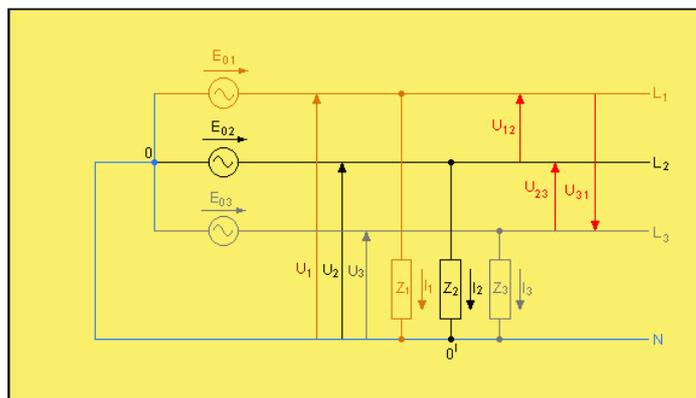


Fig. 4.3 - Sistema con neutro distribuito (c'è il conduttore neutro).

La presenza del neutro si rivela in questi casi particolarmente utile perché consente, anche con carichi fortemente squilibrati, di limitare lo spostamento del potenziale del neutro rispetto a quello delle fasi essendo l'impedenza del neutro di valore basso.

L'assenza, l'interruzione o una connessione non franca del neutro e un contemporaneo forte squilibrio delle correnti determina invece un'elevata disimmetria delle tensioni di fase, con una conseguente sollecitazione, a volte inaccettabile, degli utilizzatori monofasi (fig. 4.4 e 4.5).

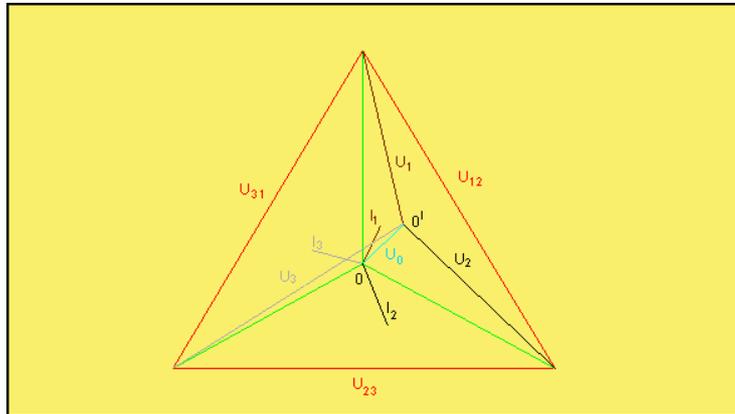


Fig. 4.4 - Spostamento dal centro stella del potenziale di neutro in caso di interruzione del conduttore di neutro. In presenza di carichi fortemente squilibrati si stabilisce una elevata disimmetria delle tensioni di fase che alimentano gli utilizzatori monofasi, provocando sollecitazioni a volte inaccettabili.

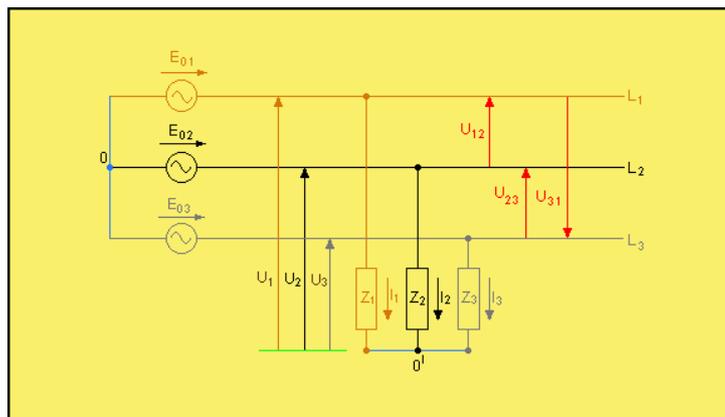


Fig. 4.5 - Sistema con neutro non distribuito (non c'è il conduttore neutro).

Gli effetti derivanti dalla mancanza del neutro sono particolarmente evidenti se si ha l'interruzione di una fase. L'assenza del neutro (fig. 4.6) impone sulle **utenze con lo stesso valore di impedenza \bar{Z}_2 e \bar{Z}_3** , temporaneamente collegate in serie tra di loro a causa di un guasto (interruzione della fase 1), una tensione pari alla metà della tensione di linea, diversa da quella nominale. Chiamando, infatti, A e B i nodi cui sono collegate rispettivamente le impedenze \bar{Z}_2 e \bar{Z}_3 , la $\dot{V}_{AB} = \dot{U}_{23}$ e quindi ai morsetti di ciascuna impedenza si localizza la tensione $\dot{V}_{AO'} = \dot{V}_{BO'} = \dot{U}_{23}/2$

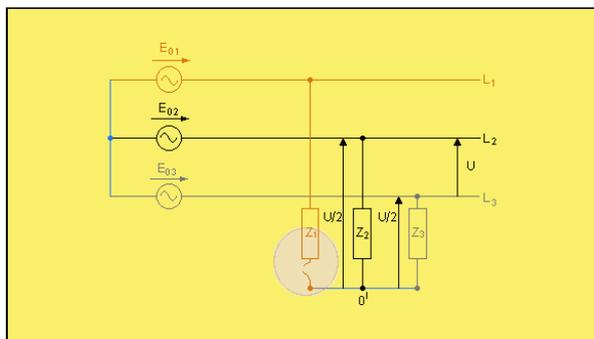


Fig. 4.6 - In assenza del neutro, le utenze \bar{Z}_2 e \bar{Z}_3 , collegate in serie tra di loro a causa della momentanea interruzione della fase 1, sono sottoposte, se di impedenza uguale, ad una tensione $\dot{U}_{23}/2$ diversa da quella di fase.

La presenza del neutro rende invece indipendenti le utenze che, anche con l'interruzione di una fase, continuano a funzionare alla loro tensione nominale pari a quella di fase (fig.4.7).

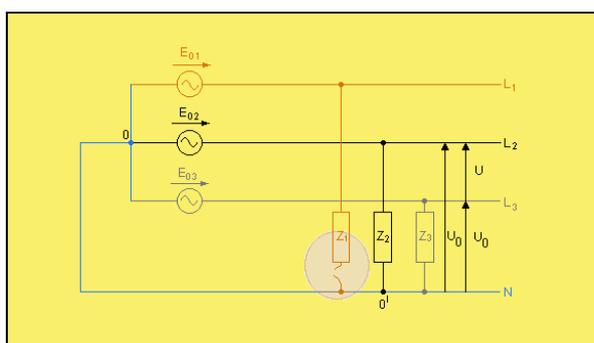


Fig. 4.7 - In presenza del neutro le utenze \bar{Z}_2 e \bar{Z}_3 continuano a funzionare correttamente perché, nonostante l'interruzione della fase 1, sono sempre alimentate dalla tensione di fase.

Il neutro può interrompersi e le utenze monofase a valle dell'interruzione diventeranno funzionalmente dipendenti dal guasto mentre quelle a monte continueranno ad essere correttamente alimentate. In fig. 4.8 l'interruzione del neutro a valle dell'utenza \bar{Z}_1 sottopone le utenze \bar{Z}_2 e \bar{Z}_3 , se uguali, alla metà della tensione concatenata, per i motivi già visti. L'utenza \bar{Z}_1 , funzionalmente indipendente dal guasto, continuerà a funzionare correttamente.

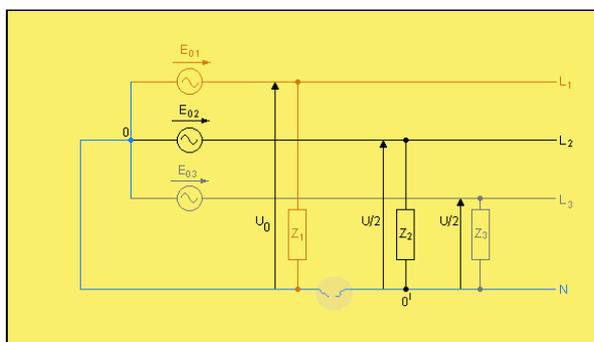
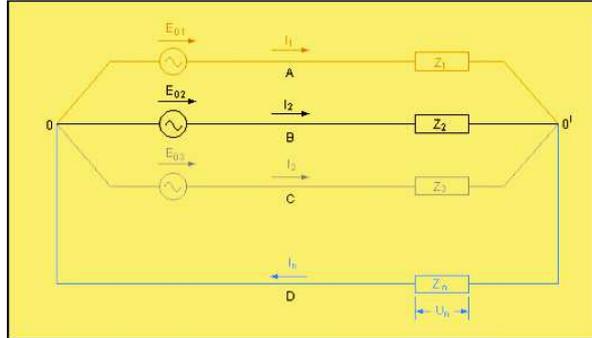


Fig. 4.8 - Con l'interruzione del neutro a valle dell'utenza \bar{Z}_1 , ai capi delle utenze \bar{Z}_2 e \bar{Z}_3 , se di uguale valore, si stabilisce metà della tensione concatenata \dot{U}_{23} pregiudicandone il corretto funzionamento. L'utenza \bar{Z}_1 a monte del guasto continuerà ad essere alimentata dalla tensione di fase e quindi a funzionare regolarmente.

Dalle considerazioni di cui sopra si comprende l'importanza di determinare, in alcuni casi particolari, il valore della differenza di potenziale \dot{U}_n tra il centro stella delle tensioni di fase del generatore (0) e il centro stella degli utilizzatori (0') nelle condizioni limite in cui può trovarsi il conduttore di neutro. Sempre con riferimento al circuito a quattro fili della fig. 4.1, applicando i principi di Kirchhoff alle maglie e ai nodi è possibile impostare dal punto di vista teorico la risoluzione del circuito. **In questo caso si ipotizza che il sistema sia simmetrico nelle tensioni, avendo assunto uguali le tensioni concatenate di linea $\dot{U}_{12} = \dot{U}_{23} = \dot{U}_{31}$ e squilibrato nelle correnti, essendo $\bar{Z}_1 \neq \bar{Z}_2 \neq \bar{Z}_3$ le impedenze di tre carichi monofase**, diversi tra loro, collegati a stella in un punto (0') che fa capo al conduttore di neutro.

Si generalizza ipotizzando un circuito in cui l'impedenza del conduttore di neutro può assumere un valore compreso tra lo zero e l'infinito e si trascurano, per semplificare la trattazione, le impedenze interne dei generatori e dei conduttori di linea.



Rispettando queste condizioni si possono ricavare le correnti sia nelle tre fasi costituite dagli utilizzatori sia nel conduttore di neutro:

$$i_1 = \frac{\dot{U}_1}{\bar{Z}_1} \quad (1)$$

$$i_2 = \frac{\dot{U}_2}{\bar{Z}_2} \quad (2)$$

$$i_3 = \frac{\dot{U}_3}{\bar{Z}_3} \quad (3)$$

$$i_n = \frac{\dot{U}_n}{\bar{Z}_n} \quad (4)$$

essendo $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \text{ e } \dot{U}_3$ le tensioni di fase ai capi degli utilizzatori e \dot{U}_n la caduta di tensione dovuta all'impedenza \bar{Z}_n del conduttore neutro.

Applicando Kirchhoff:

$$\text{Maglia } 0\text{-A-}0'\text{-D-}0) \quad \dot{E}_{01} = \bar{Z}_1 x i_1 + \bar{Z}_n x i_n = \bar{Z}_1 x i_1 + \dot{U}_n \quad (5)$$

$$\text{Maglia } 0\text{-B-}0'\text{-D-}0) \quad \dot{E}_{02} = \bar{Z}_2 x i_2 + \bar{Z}_n x i_n = \bar{Z}_2 x i_2 + \dot{U}_n \quad (6)$$

$$\text{Maglia } 0\text{-C-}0'\text{-D-}0) \quad \dot{E}_{03} = \bar{Z}_3 x i_3 + \bar{Z}_n x i_n = \bar{Z}_3 x i_3 + \dot{U}_n \quad (7)$$

$$\text{Nodo } 0 \text{ oppure } 0') \quad i_1 + i_2 + i_3 - i_n = 0 \quad (8)$$

Risolvendo le equazioni alle maglie in funzione della corrente:

$$i_1 = \frac{\dot{E}_{01} - \dot{U}_n}{\bar{Z}_1} \quad (9)$$

$$i_2 = \frac{\dot{E}_{02} - \dot{U}_n}{\bar{Z}_2} \quad (10)$$

$$i_3 = \frac{\dot{E}_{03} - \dot{U}_n}{\bar{Z}_3} \quad (11)$$

Ricordando che l'ammettenza vale

$$\bar{Y} = 1/\bar{Z} \quad (12)$$

è possibile riscrivere le tre equazioni (9), (10) e (11):

$$i_1 = \dot{E}_{01}x\bar{Y}_1 - \dot{U}_nx\bar{Y}_1 \quad (13)$$

$$i_2 = \dot{E}_{02}x\bar{Y}_2 - \dot{U}_nx\bar{Y}_2 \quad (14)$$

$$i_3 = \dot{E}_{03}x\bar{Y}_3 - \dot{U}_nx\bar{Y}_3 \quad (15)$$

Allo stesso modo è possibile riscrivere anche l'equazione (4):

$$i_n = \dot{U}_nx\bar{Y}_n$$

Sostituendo nella (8) le quattro correnti così calcolate:

$$\dot{E}_{01}x\bar{Y}_1 - \dot{U}_nx\bar{Y}_1 + \dot{E}_{02}x\bar{Y}_2 - \dot{U}_nx\bar{Y}_2 + \dot{E}_{03}x\bar{Y}_3 - \dot{U}_nx\bar{Y}_3 - \dot{U}_nx\bar{Y}_n = 0$$

Raccogliendo e risolvendo l'equazione in funzione di U_n si ottiene:

$$\dot{E}_{01}x\bar{Y}_1 + \dot{E}_{02}x\bar{Y}_2 + \dot{E}_{03}x\bar{Y}_3 - \dot{U}_nx(\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3 + \bar{Y}_n) = 0$$

da cui

$$\dot{U}_n = \frac{\dot{E}_{01}x\bar{Y}_1 + \dot{E}_{02}x\bar{Y}_2 + \dot{E}_{03}x\bar{Y}_3}{\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3 + \bar{Y}_n} \quad (16) \quad \text{Teorema di Millmann}$$

Avendo ora scritto la formula risoltrice, può essere interessante analizzare una generica situazione, con valori di impedenza del conduttore di neutro variabili tra zero ed infinito, compresi i **due casi limite** con impedenza uguale a zero (**condizione ideale**) e con impedenza uguale ad infinito (**neutro interrotto**), sempre riferendoci ad un **sistema simmetrico nelle tensioni e squilibrato nelle correnti**.

Primo caso – ammettenza \bar{Y}_n tendente a infinito (impedenza \bar{Z}_n tendente a zero)

È il caso che più frequentemente s'incontra negli impianti trifase con neutro. Il centro stella teorico (0) praticamente coincide con quello reale (0'), possedendo il conduttore di neutro un'ammettenza \bar{Y}_n di valore molto alto. Anche in caso di forti squilibri nelle correnti, le tensioni di fase sui carichi monofasi si mantengono, a meno di un leggero scostamento, quasi uguali fra di loro.

$$\bar{Y}_n \rightarrow \infty \quad \bar{Z}_n \rightarrow 0$$

$$\dot{U}_n = \frac{\dot{E}_{01}x\bar{Y}_1 + \dot{E}_{02}x\bar{Y}_2 + \dot{E}_{03}x\bar{Y}_3}{\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3 + \infty} = 0$$

Secondo caso – ammettenza \bar{Y}_n tendente a zero (impedenza \bar{Z}_n tendente all'infinito)

Il conduttore di neutro è assente oppure è interrotto. L'ammettenza \bar{Y}_n è prossima o uguale a zero. Il centro stella teorico e quello ideale non sono collegati fra di loro, il sistema non è più a quattro fili ma a tre fili e fra 0 e 0' esiste una differenza di potenziale **chiamata normalmente \dot{U}_0** (fig. 4.4). Lo scostamento dal centro stella, in presenza di carichi fortemente squilibrati, provoca una elevata dissimmetria delle tensioni di fase che alimentano gli utilizzatori monofasi.

$$\bar{Y}_n \rightarrow 0 \quad \bar{Z}_n \rightarrow \infty$$

$$\dot{U}_n = \frac{\dot{E}_{01}x\bar{Y}_1 + \dot{E}_{02}x\bar{Y}_2 + \dot{E}_{03}x\bar{Y}_3}{\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3 + 0} = \dot{U}_0$$

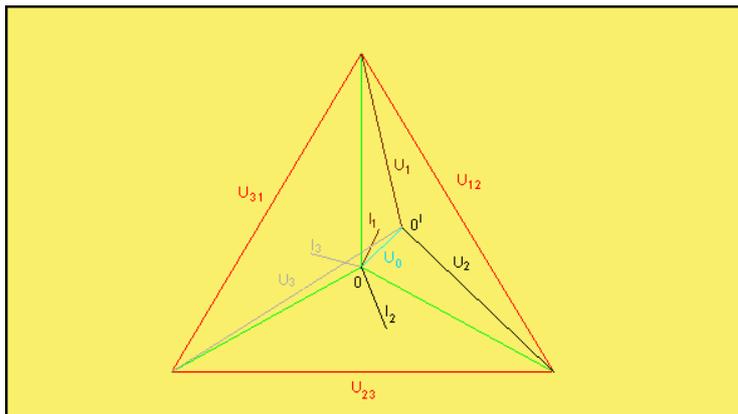


Fig. 44 - Spostamento dal centro stella del potenziale di neutro in caso di interruzione del conduttore di neutro. In presenza di carichi fortemente squilibrati si stabilisce una elevata disimmetria delle tensioni di fase che alimentano gli utilizzatori monofasi, provocando sollecitazioni a volte inaccettabili.

Durante il normale funzionamento di un sistema trifase con neutro alimentante un insieme di carichi monofase, trifase senza neutro e trifase con neutro, per tutti i conduttori deve essere garantita, ovviamente, la continuità fisica e quindi elettrica.

Se invece, per qualsiasi motivo si dovesse interrompere la continuità del conduttore neutro, allora ci troveremo ad avere il funzionamento con il cosiddetto "neutro appeso". Per capire bene il funzionamento del sistema in questa condizione di guasto, è sufficiente riferirsi alla fig. 4.9 dalla quale si evince che ora il centro stella reale e quello virtuale non coincidono più, il **centro stella reale**, infatti, va a coincidere ciclicamente sui vertici del triangolo costituito dai vettori concatenati. Se supponiamo che l'impedenza di una fase diventi trascurabile rispetto a quella delle altre due fasi in queste ultime la tensione tende al valore della concatenata; quindi 400V invece di 230V.

Se ipotizziamo che, per esempio, il centro stella si sposti sulla fase L1, avremo che la tensione stellata, cioè la tensione di fase, non sarà più di 230 V ma coinciderà con la tensione di linea o concatenata di 400 V; di conseguenza la tensione che insisterà ai morsetti del carico monofase sarà nettamente superiore alla tensione nominale del carico e quindi quest'ultimo sarà sottoposto ad una sovratensione pericolosa e non sopportabile.

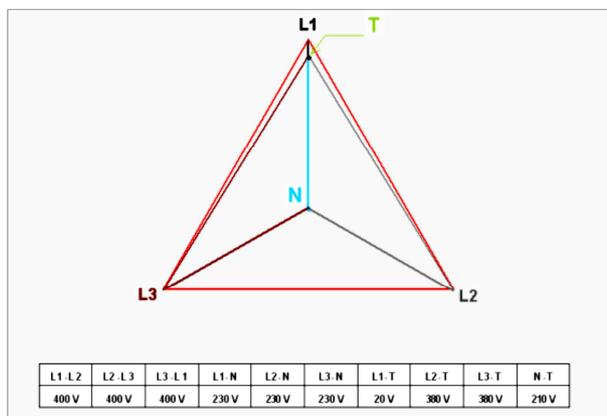


Fig. 4.9 - Guasto a terra in corrispondenza della fase L1

Terzo caso - ammettenza \bar{Y}_n compresa tra infinito e zero (impedenza \bar{Z}_n compresa tra zero e infinito)

L'impedenza del neutro, di valore trascurabile in condizioni normali, a causa di un guasto potrebbe aumentare di valore creando mutamenti e variabilità nelle tensioni di fase applicate ai carichi monofasi. La tensione \dot{U}_n può assumere uno tra i diversi valori dipendenti dall'ammettenza \bar{Y}_n che può variare tra infinito e zero.

$$\infty < \bar{Y}_n < 0 \quad 0 < \bar{Z}_n < \infty$$

$$\dot{U}_n = \frac{\dot{E}_{01}x\bar{Y}_1 + \dot{E}_{02}x\bar{Y}_2 + \dot{E}_{03}x\bar{Y}_3}{\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3 + \bar{Y}_n}$$

5. Il sezionamento del neutro

Il sezionamento dei circuiti di un impianto elettrico serve a garantire la sicurezza delle persone che eseguono lavori sull'impianto o nelle immediate vicinanze. Le parti dell'impianto sulle quali operare devono essere messe fuori tensione e deve essere assicurata la separazione di ogni parte attiva da qualsiasi sorgente di energia elettrica. Anche il conduttore di neutro è in alcuni casi da considerare un conduttore attivo a tutti gli effetti e come tale, con alcune eccezioni, è richiesto il suo sezionamento. La norma raccomanda di non distribuire il neutro nei sistemi IT per la difficoltà che si riscontra sia nel rispettare la condizione stabilita per l'impedenza dell'anello di doppio guasto sia nel mantenere isolato il neutro rispetto alla terra. In ogni caso, ove fosse indispensabile distribuirlo, il suo sezionamento deve essere sempre previsto su ogni circuito perché, non avendo in questo caso il potenziale vincolato a terra, deve essere trattato come un conduttore attivo vero e proprio. Nei sistemi TT (fig. 2.1) il neutro è collegato a terra e in condizioni normali non assume potenziali pericolosi. Si possono però verificare particolari situazioni nelle quali sul neutro si generano tensioni pericolose verso terra. Il neutro infatti può andare in tensione a causa di (fig. 5.1):

- 1) fulminazione di origine atmosferica nei pressi del punto di messa a terra del neutro;
- 2) un guasto a terra sul sistema di media tensione;
- 3) correnti di squilibrio di una certa consistenza;
- 4) un corto circuito fase neutro sul lato bassa tensione (in linea o presso un utente);
- 5) un guasto a terra sul sistema di bassa tensione;
- 6) interruzione del conduttore di neutro;
- 7) intervento di un fusibile.

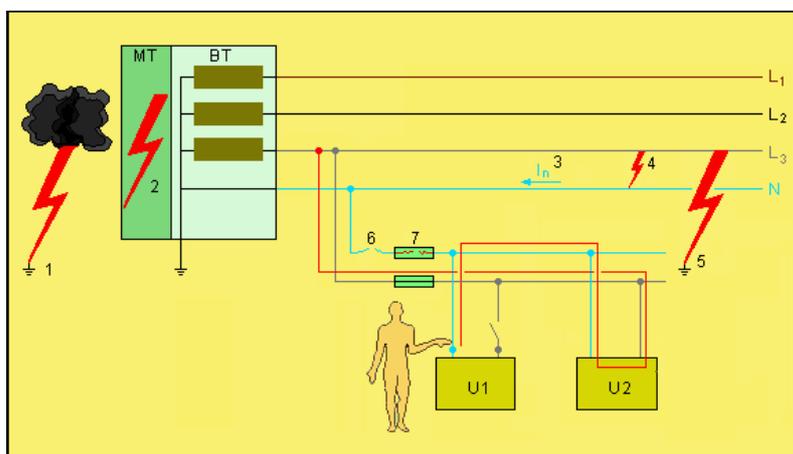


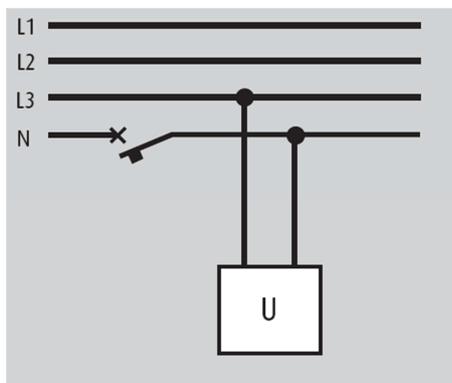
Fig. 5.1 - Sul conduttore di neutro possono stabilirsi tensioni pericolose a causa di:

- 1) fulminazione di origine atmosferica nei pressi del punto di messa a terra del neutro;
- 2) un guasto a terra sul sistema di alta tensione;
- 3) correnti di squilibrio di una certa consistenza;
- 4) un corto circuito fase neutro sul lato bassa tensione;
- 5) un guasto a terra sul sistema di bassa tensione (in linea o presso un utente);
- 6) interruzione del conduttore di neutro;
- 7) intervento di un fusibile.

NOTA: Il conduttore neutro non deve mai essere interrotto se prima o contemporaneamente non si interrompono tutti i conduttori di fase che interessano il circuito.

La stessa regola vale per la richiusura, nel senso che il neutro non deve mai essere chiuso dopo le fasi.

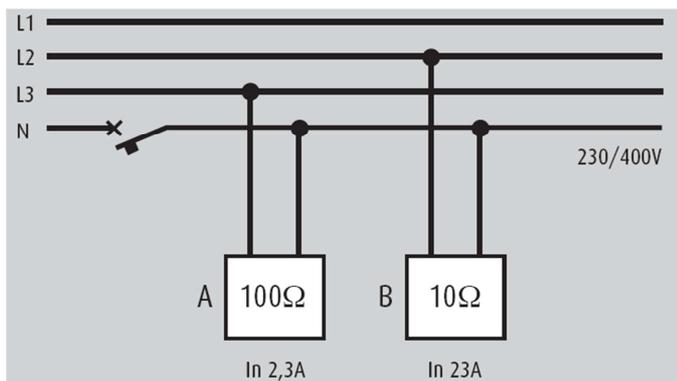
Questa regola riguarda la sicurezza: infatti, il neutro assumerebbe la tensione di fase attraverso gli utilizzatori e, in caso di distribuzione trifase, gli utilizzatori monofase con alimentazione fase-neutro potrebbero subire danni.



Vietato interrompere solo il neutro.

$$\bar{Z}_n \rightarrow \infty$$

Il conduttore di neutro è interrotto. L'impedenza \bar{Z}_n è uguale a infinito. Il centro stella teorico e quello ideale non sono collegati fra di loro, il sistema non è più a quattro fili ma a tre fili e fra 0 e 0 esiste una differenza di potenziale chiamata normalmente \dot{U}_0 (fig. 4.4). Lo scostamento dal centro stella, in presenza di carichi fortemente squilibrati, provoca una elevata dissimmetria delle tensioni di fase che alimentano gli utilizzatori monofasi.



Vietato interrompere solo il neutro.

Gli utilizzatori A e B risultano collegati in serie tra L_2 e L_3 alla tensione di 400V e con un assorbimento di

$$I = \frac{V}{R_A + R_B} = \frac{400}{100 + 10} = 3,63 \text{ A}$$

l'utilizzatore A è sovraccaricato.

Risulta quindi evidente che anche nei sistemi TT il neutro deve essere considerato un conduttore attivo a tutti gli effetti e come tale deve essere sempre sezionabile. Sono ammessi tutti i diversi modi di sezionamento ad esclusione dei fusibili sul conduttore di neutro dei circuiti quadripolari. Si vuole con questo evitare che gli utilizzatori monofasi, normalmente alimentati alla tensione di fase, a causa dell'interruzione del solo conduttore di neutro siano alimentati in serie dalla tensione concatenata (fig. 5.2).

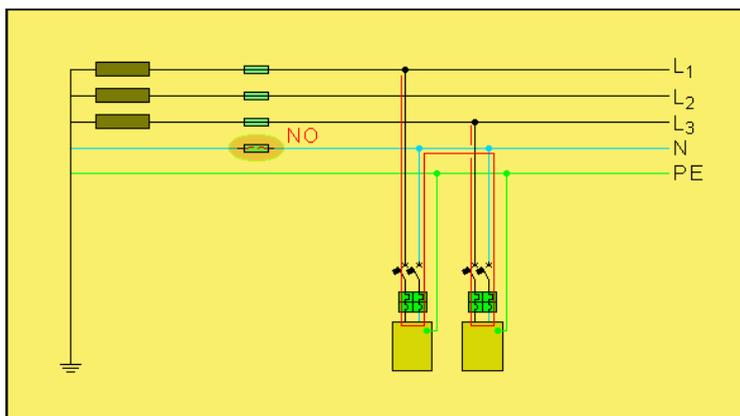


Fig. 5.2 - Nei circuiti quadripolari sono vietati i fusibili sul neutro che alimenta utenze monofasi per evitare che gli utilizzatori possano essere alimentati in serie dalla tensione concatenata

Le situazioni di guasto prospettate in fig. 5.1 possono interessare anche i sistemi di tipo TN con cabina di proprietà dell'utente, ma con conseguenze in parte diverse. Un guasto in media tensione (fig. 5.1 - caso 2) non provoca in genere situazioni di pericolo perché il neutro è collegato alla stessa terra delle masse; se non ci sono masse al di fuori del comune impianto di terra sul neutro non si generano solitamente tensioni pericolose. Nemmeno un guasto in bassa tensione fa assumere potenziali pericolosi al neutro (fig. 5.1 - caso n. 5). La resistenza verso terra di un guasto presenta in genere valori elevati e anche se il guasto si verifica attraverso una massa estranea, per definizione a bassa resistenza verso terra, il suo collegamento all'impianto di terra, unico e generale, impedisce la messa in tensione del neutro. La corrente di guasto viene infatti deviata attraverso i conduttori di protezione al centro stella del trasformatore senza interessare la resistenza di terra dell'impianto (fig. 5.3).

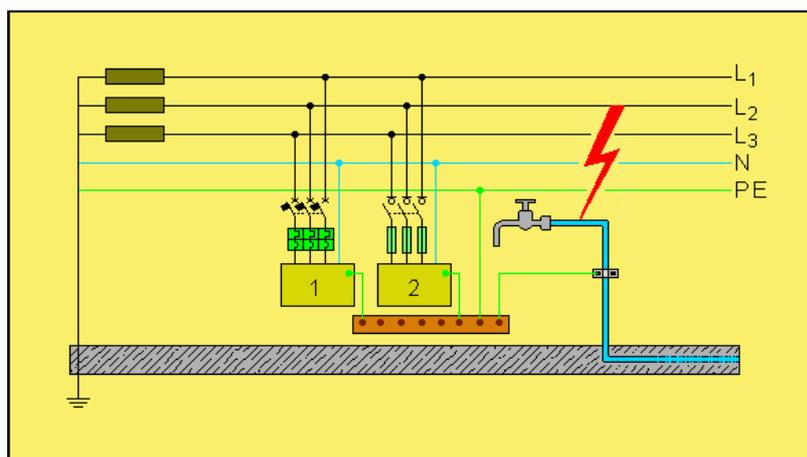


Fig. 5.3 - Negli impianti di tipo TN, con cabine di trasformazione di proprietà dell'utente, un guasto a terra sulla bassa tensione non provoca in genere tensioni pericolose sul neutro. Nemmeno se il guasto avviene su una massa estranea. Infatti la corrente di guasto, essendo deviata verso il centro stella del trasformatore attraverso il collegamento della massa estranea all'impianto di terra, non interessa la resistenza di terra dell'impianto

Anche il corto circuito fase neutro non crea in genere particolari pericoli (fig. 5.1 - caso n. 4). Devono però essere approntati i collegamenti equipotenziali principali e deve essere verificata la condizione relativa all'impedenza dell'anello di guasto. Se la nota relazione è verificata la corrente di guasto I_a provoca l'intervento delle protezioni entro 5 s per i circuiti di distribuzione ed entro 0,4 s per i circuiti terminali. Una condizione di pericolo può invece crearsi sui circuiti bipolari per l'interruzione accidentale del neutro o per l'intervento di un fusibile (fig. 5.1 - casi n.6 e 7). Chiunque si trovasse ad operare sul neutro a valle dell'interruzione sarebbe sottoposto ad una situazione di sicuro pericolo. Queste considerazioni ci portano quindi ad affermare che in un sistema TN-S il sezionamento del neutro è essenziale solo per i circuiti bipolari fase-neutro (nei circuiti quadripolari la norma non lo ritiene necessario anche se non lo vieta) quando il dispositivo di protezione a monte è costituito da fusibili. In un sistema di tipo TN-C il neutro svolge anche la funzione di conduttore di protezione e viene chiamato PEN. Una sua interruzione porta, come sappiamo, tutte le masse a valle del guasto alla tensione di fase. Anche con un PEN perfettamente sano una piccola tensione è sempre presente sulle masse perché, a causa degli squilibri che solitamente si hanno sulle fasi, tale conduttore è sempre percorso da una piccola corrente. Questi ed altri problemi normalmente sconsigliano l'uso del sistema TN-C, ricordando comunque che, ove fosse necessario l'utilizzo del PEN, per i suddetti motivi, come espressamente indicato dalle norme, è vietato il suo sezionamento (in un successivo paragrafo si affronteranno nei dettagli tutte le problematiche inerenti l'impiego di tale conduttore). Di seguito, con riferimento alle fig. 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8, e alla luce di quanto fin qui esposto, si descrivono le caratteristiche circuitali più comuni inerenti il sezionamento del neutro.

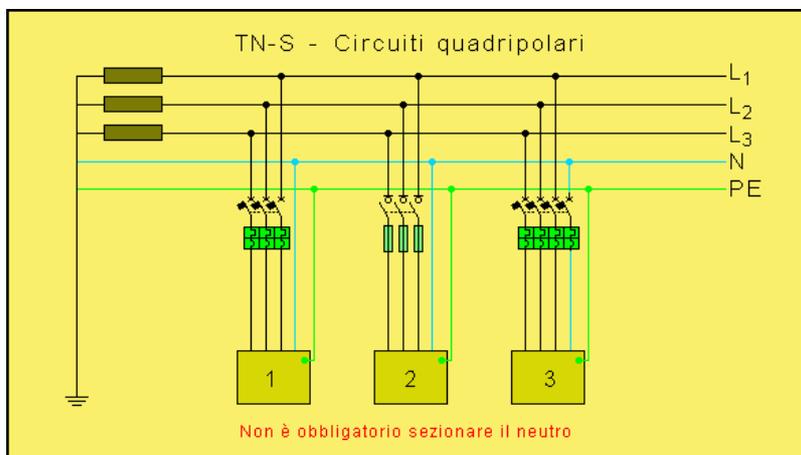


Fig. 5.4 - Nei circuiti quadripolari dei sistemi TN-S non è obbligatorio sezionare il neutro

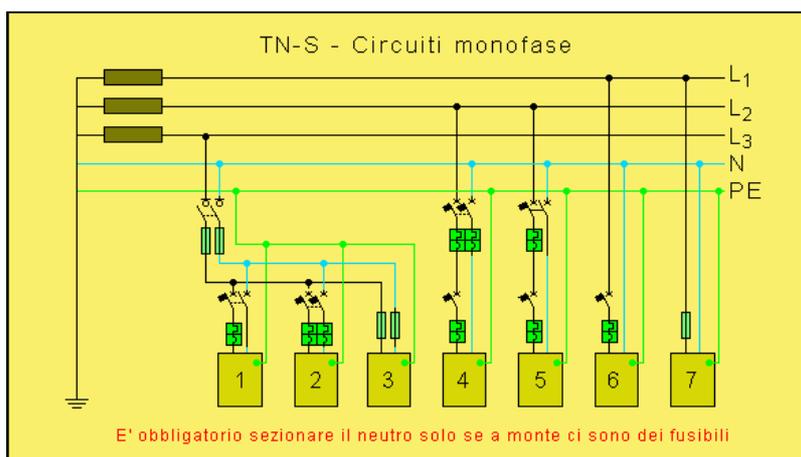


Fig. 5.5 - Nei sistemi TN-S è richiesto il sezionamento del neutro nei circuiti bipolari fase-neutro protetti a monte per mezzo di fusibili.

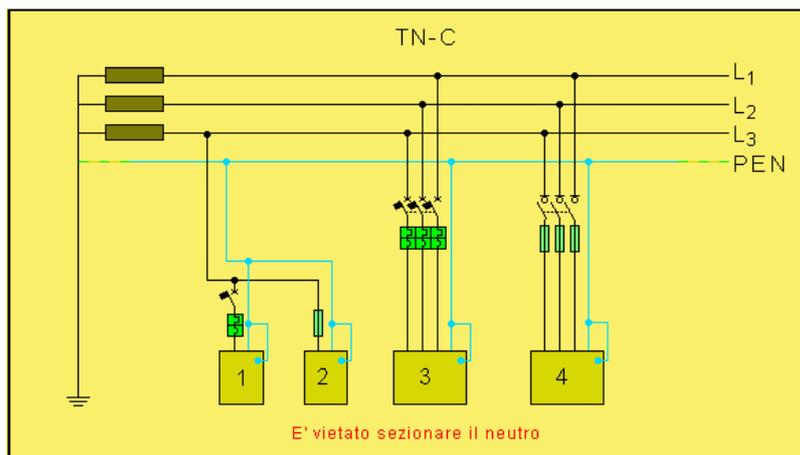


Fig. 5.6 - Nei sistemi TN-C il neutro svolge anche funzioni di protezione e non deve mai essere sezionato

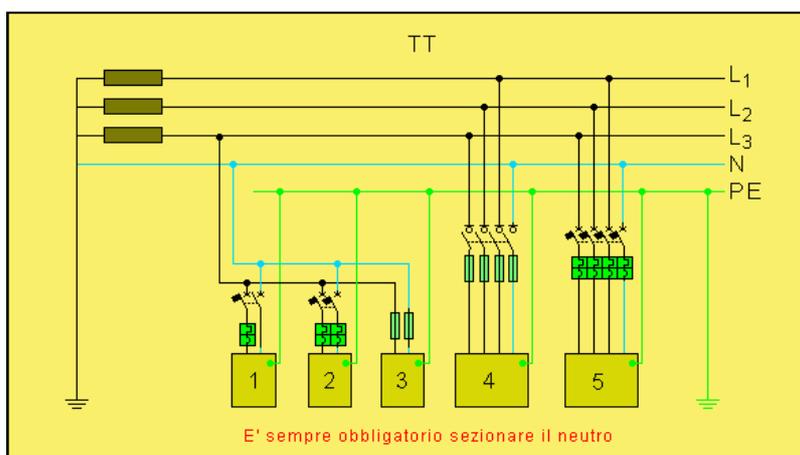


Fig. 5.7 - Nei sistemi TT il neutro è considerato un conduttore attivo a tutti gli effetti e come tale deve essere sempre sezionabile.

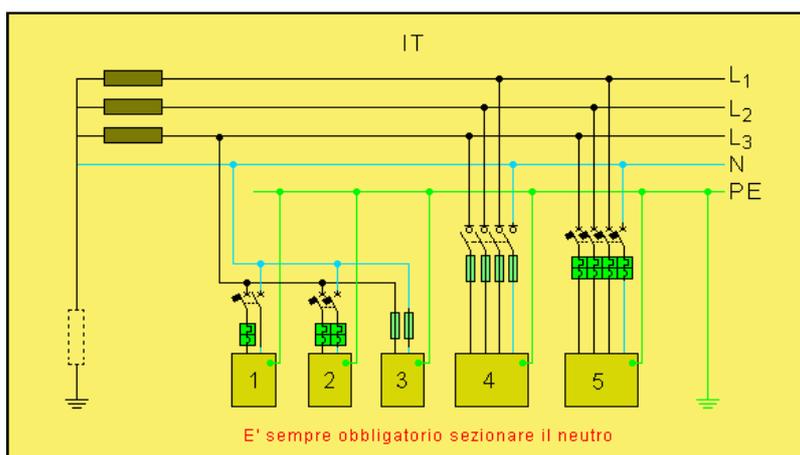


Fig. 5.8 - Nei sistemi IT il neutro è da considerare conduttore attivo e quindi deve essere sempre sezionabile.

6. Il conduttore PEN

In un sistema TN il conduttore di protezione (PE) può essere distinto dal conduttore di neutro, si dice allora sistema TN-S (fig. 2.2), oppure le funzioni di conduttore di neutro e di protezione possono essere svolte da un unico conduttore (PEN), si dice allora sistema TN-C (fig. 2.3).

Poco prima degli anni settanta il conduttore di neutro poteva essere impiegato anche come conduttore di protezione previa autorizzazione da parte dell'Ente distributore. Dagli anni settanta in poi, fino alla pubblicazione della prima edizione della Norma 64-8, il PEN è stato addirittura vietato. Con la nuova Norma è stato di nuovo riscattato ma, per il suo utilizzo, sono state dettate alcune condizioni. Certo ci si può chiedere il perché di tante preoccupazioni e raccomandazioni nell'uso del PEN se sono così evidenti i vantaggi che si conseguono dal punto di vista economico, (risparmio di rame che si ottiene soprattutto per le grandi sezioni), con l'impiego di un unico conduttore che svolga le funzioni sia di neutro sia di protezione. I motivi di una tale intolleranza nei suoi confronti possono essere così riassunti. Il conduttore PEN non può essere installato in ambienti a maggior rischio in caso d'incendio o con pericolo d'esplosione. Si vuole evitare, come sappiamo, che la normale corrente di squilibrio che fluisce attraverso il PEN provochi delle correnti parassite che possano riguardare le masse e le masse estranee collegate a tale conduttore (fig. 6.3.).

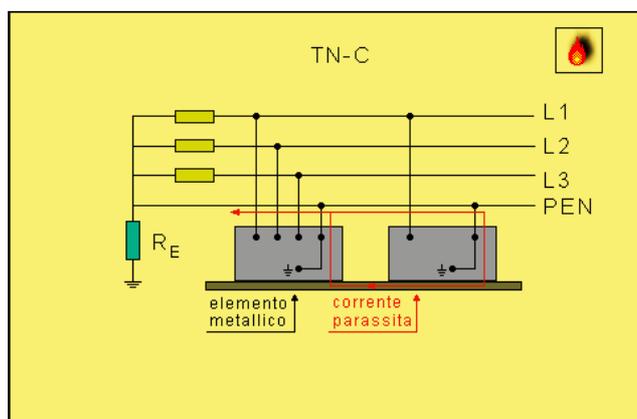


Fig. 6.3 - La corrente di squilibrio che fluisce attraverso il PEN nelle normali condizioni di esercizio può riguardare le masse e le masse estranee collegate a tale conduttore. In luoghi con pericolo di esplosione o a maggior rischio in caso d'incendio può provocare pericolose scintille o surriscaldamenti con conseguente esplosione o innesco d'incendio

Queste correnti possono eludere ogni possibile controllo e provocare pericolose scintille o surriscaldamenti con conseguente pericolo di esplosione o innesco d'incendio. Questo, come è noto, non può verificarsi se il sistema è TN-S perché il conduttore di protezione (PE), in condizioni di normale esercizio, non è percorso da corrente. La corrente di squilibrio percorre il solo conduttore di neutro senza interessare masse e masse estranee. Un'altra obiezione viene mossa nei confronti del PEN in presenza di circuiti elettronici per il trasferimento di dati. Le correnti parassite che sfuggono attraverso le masse e le masse estranee inducono nei circuiti dei disturbi che possono produrre malfunzionamento delle apparecchiature e perdita di dati. Questo problema può essere particolarmente sentito negli edifici con installazioni essenziali o sensibili come ad esempio negli ospedali. Anche un'interruzione del conduttore PEN (per guasto o errata manovra di sezionamento) comporta, anche senza un guasto d'isolamento e in presenza di utenze monofasi, un grave pericolo perché le masse ad esso collegate possono andare in tensione (fig. 6.4).

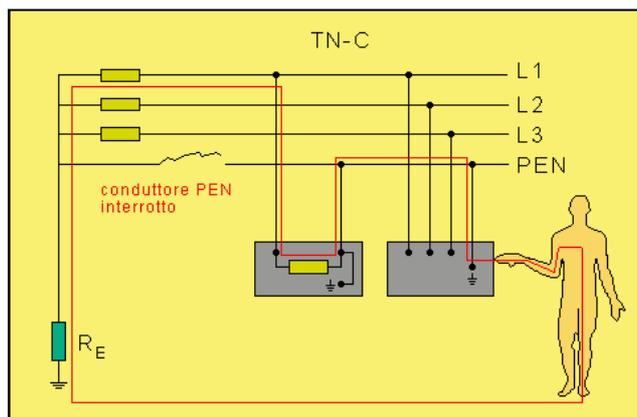


Fig. 6.4 - L'interruzione del PEN determina tensioni pericolose sulle masse ad esso collegate anche senza guasto d'isolamento

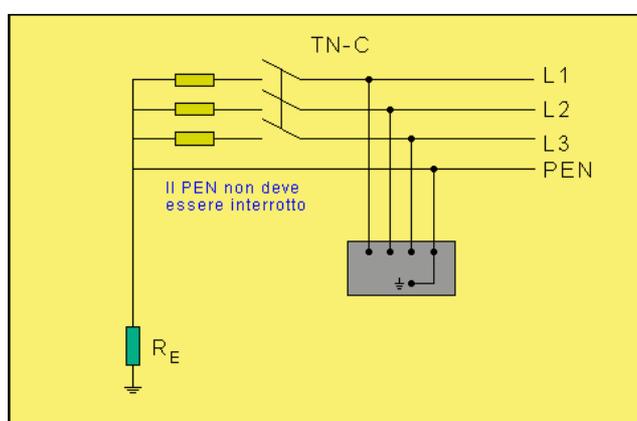


Fig. 6.5 - Il PEN non deve essere interrotto nemmeno con interruttori onnipolari. L'interruttore generale dovrà pertanto essere tripolare

Negli ambienti ad uso medico il PEN è vietato a valle del quadro elettrico principale. In caso di interruzione del conduttore PEN a monte del quadro di distribuzione principale, a valle del quadro, dove il sistema di distribuzione non è più TN-C ma è diventato TN-S, tensioni pericolose possono stabilirsi sulle masse del locale. Queste considerazioni portano quindi a sconsigliare caldamente l'adozione del sistema TN-C, nonostante sia ammesso dalle Norme, anche a monte del quadro di distribuzione principale (fig. 6.6).

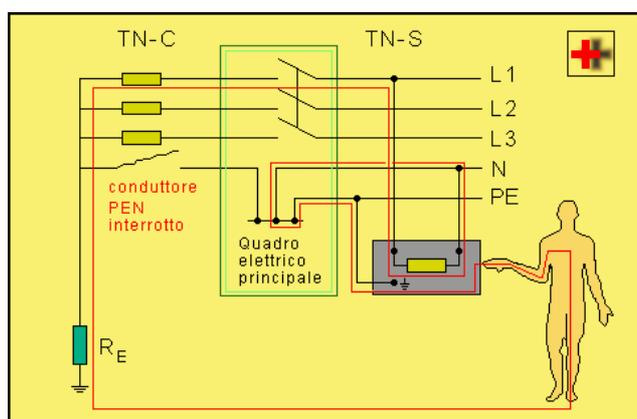


Fig. 6.6 - Negli ambienti ad uso medico il PEN è accettato a monte del quadro elettrico principale ma è vietato a valle. Con l'interruzione del conduttore PEN a monte del quadro di distribuzione principale, tensioni pericolose si possono stabilire sulle masse a valle del quadro dove il sistema di distribuzione non è più TN-C ma è diventato TN-S.

Il conduttore PEN non può essere giallo-verde come un normale conduttore di protezione ma non può essere nemmeno blu chiaro come un normale conduttore di neutro. Deve essere facilmente identificabile attraverso una duplice colorazione. Il blu chiaro ad indicare la funzione di neutro e il giallo-verde ad indicare la caratteristica di protezione. Un conduttore giallo-verde con fascette blu chiaro ai due capi oppure un conduttore blu chiaro con fascette giallo-verde sempre ai due capi potrebbe essere una buona soluzione (fig. 6.7).

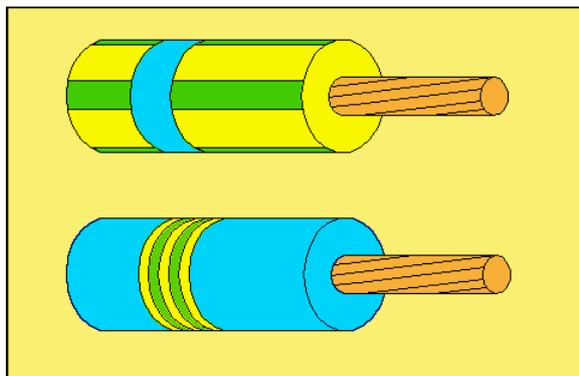


Fig. 6.7 - Colori identificativi del conduttore PEN

7. Protezione del neutro contro le sovracorrenti

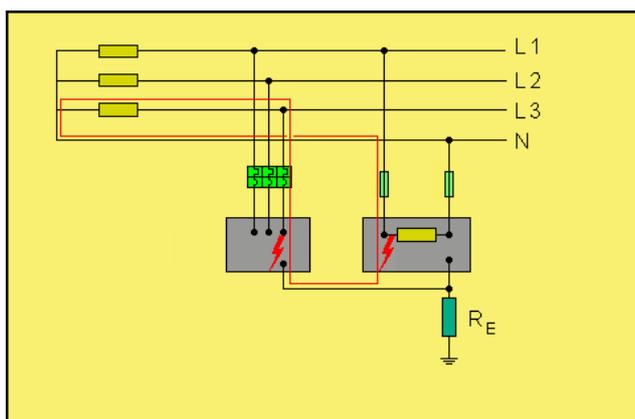


Fig. 7.1 - Sistema IT. Una sovracorrente dovuta ad un doppio guasto a terra può provocare l'intervento del fusibile installato sul conduttore neutro.

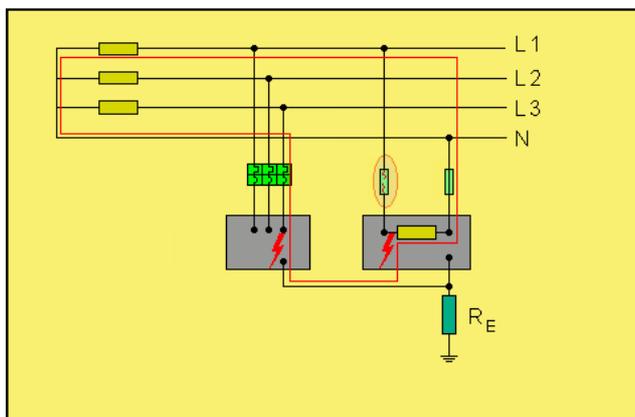


Fig. 7.2 - E' vietato installare un fusibile sul neutro in un sistema IT. Con l'intervento del fusibile l'utilizzatore è alimentato alla tensione concatenata anziché alla normale tensione di fase. La corrente di guasto, di valore limitato dall'impedenza interna dell'utilizzatore, non viene interrotta dal fusibile installato sulla fase e si mantiene nel circuito per un tempo indefinito.

Una tale evenienza determina l'alimentazione alla tensione concatenata dell'utilizzatore e una corrente di guasto, limitata dalla sola impedenza dell'apparecchio, può stabilirsi nel circuito di guasto per un tempo indefinito senza provocare l'intervento del fusibile posto a protezione del conduttore di fase. Per questo motivo nei sistemi IT il dispositivo di protezione contro le sovracorrenti deve avere tutti i poli protetti sia nei circuiti trifase con neutro sia nei circuiti fase-neutro. In fig. 7.3 sono riassunte le varie situazioni che si presentano nella protezione dei conduttori di fase e di neutro utilizzando come dispositivo di protezione un interruttore automatico. Queste considerazioni valgono anche per i fusibili che però, come abbiamo detto, non sempre possono essere inseriti sul neutro. Nei casi in cui il conduttore di neutro non può essere interrotto prima dei conduttori di fase con i fusibili non è sempre possibile rispettare l'esatta sequenza di apertura.

Sistema	Tipo di circuito				
	Fase Neutro	Fase Fase	Trifase più neutro		Trifase
			$S_n \geq S_F$	$S_n < S_F$	
	F N	F F	F F F N	F F F N	F F F
IT					
TT					
TN-S					
TN-C					

X - Vietata la protezione sul conduttore PEN
 P - E' necessaria la protezione
 -- - La protezione non è richiesta ma nemmeno vietata
 S_n - Sezione del conduttore di neutro
 S_F - Sezione del conduttore di fase

Fig. 7.3 - Protezione dalle sovracorrenti sui conduttori di fase e di neutro. La protezione del neutro non è sempre necessaria e in alcuni casi è addirittura vietata.

Note:

- 1) L'interruzione del neutro deve avvenire dopo quella del conduttore di fase mentre la richiusura deve avvenire prima di quella delle fasi.
- 2) Non è indispensabile proteggere il neutro se questo è protetto contro i cortocircuiti da un adatto dispositivo di protezione collocato a monte.
- 3) Su un conduttore di fase può essere evitata la protezione dalle sovracorrenti se il circuito è protetto da idoneo dispositivo differenziale installato a monte (deve avere un potere d'interruzione differenziale superiore alla corrente presunta di corto circuito monofase a terra). Tale interruttore deve provocare la simultanea interruzione di tutti i conduttori di fase e il neutro non deve essere ricavato da un centro stella artificiale ottenuto a valle dell'interruttore differenziale stesso.
- 4) Un rivelatore di sovracorrenti deve essere posto sul conduttore PEN in presenza di armoniche che lo possono sovraccaricare. Il rivelatore deve determinare l'interruzione dei conduttori di fase ma non del conduttore PEN. Il dispositivo di rivelazione non è necessario se il conduttore di neutro è protetto contro i corto circuiti dal dispositivo di protezione dei conduttori di fase.
- 5) La protezione del neutro è indispensabile solo quando può essere attraversato da una corrente superiore alla sua portata (armoniche)

8. Sommario

Il neutro, un conduttore molto "attivo"	2
1. Generalità	2
2. I sistemi elettrici co riferimento al collegamento a terra del neutro e delle masse	5
3. Condizioni del neutro nei sistemi trifase	7
4. Caratteristiche funzionali del neutro	11
5. Il sezionamento del neutro	17
6. Il conduttore PEN	22
7. Protezione del neutro contro le sovracorrenti	24
8. Sommario	26