



**Analisi dei guasti a terra nei sistemi MT a
neutro isolato e neutro compensato
- Problematiche inerenti alle protezioni 51N e 67N -**

**A cura di:
Ing. Claudio Ciucciarelli
Ing. Marco Ciucciarelli**

1. Introduzione

Di seguito viene svolta l'analisi teorica generale di una rete MT 20 kV *tipo* allo scopo di sviluppare le procedure più idonee per il calcolo delle grandezze elettriche più significative necessarie per la comprensione dei fenomeni elettrici e fisici che si sviluppano in queste tipologie di impianti, per spiegare le disposizioni introdotte dalla specifica ENEL DK5600 ediz. V e dunque adottare le migliori tarature delle protezioni per garantire una corretta selettività nella rete. L'analisi viene effettuata nel caso di rete MT esercita con neutro isolato o con neutro a terra mediante impedenza (bobina Petersen).

Rete MT tipo

Il caso in studio sviluppa l'analisi di una rete MT 20 kV *tipo* in partenza da una Cabina Primaria (CP) caratterizzata dai seguenti componenti:

- Trasformatore:
 - $A_n=25$ MVA -potenza nominale;
 - $V_{cc\%}=12\%$ -tensione di corto circuito;
 - $K=132/20$ kV -rapporto di trasformazione a vuoto;
- Linee:
 - 1 linea di lunghezza L_R (5 km) per l'alimentazione dell'Utente mediante linea d'utente di lunghezza L_U (450 m);
 - 5 linee di lunghezza 10 km;
 - le linee ENEL sono costituite da terne di cavi unipolari di sezione pari a 150 mq posati in configurazione a trifoglio;

Lo fig.1 mostra lo schema unificare della rete in esame.

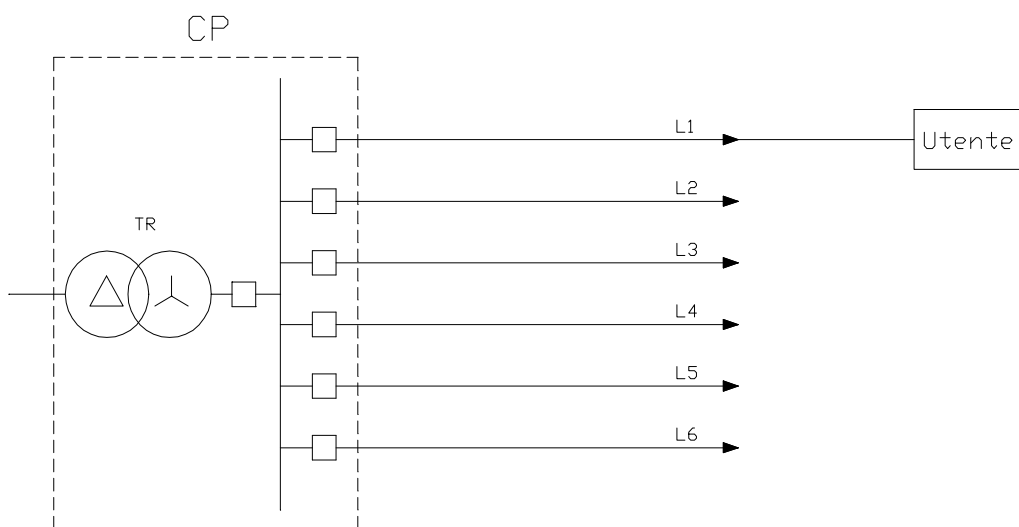


Fig.1

Tale sistema è rappresentabile mediante lo schema equivalente di Fig.2 nel quale l'insieme delle 5 linee MT ENEL in partenza dalla CP, che costituiscono di fatto la rete MT, esclusa la linea per l'alimentazione dell'utente, sono state rappresentate come una linee equivalente. Nella Fig.2a la rete è a neutro isolato, nella fig.2b la rete è con neutro a terra mediante impedenza.

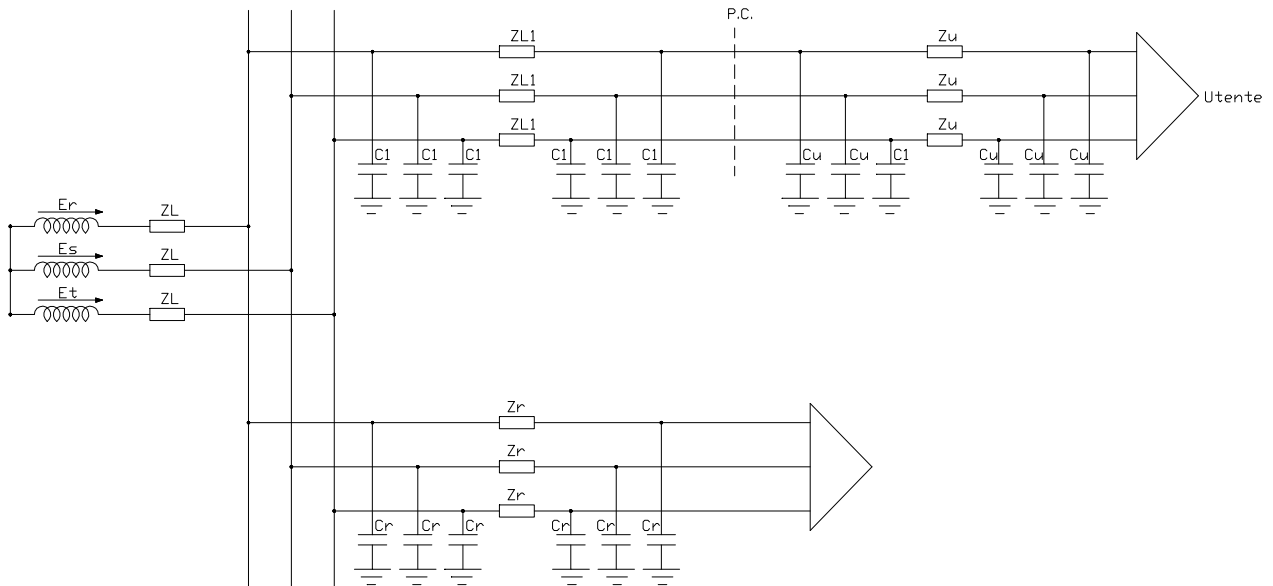


Fig.2a

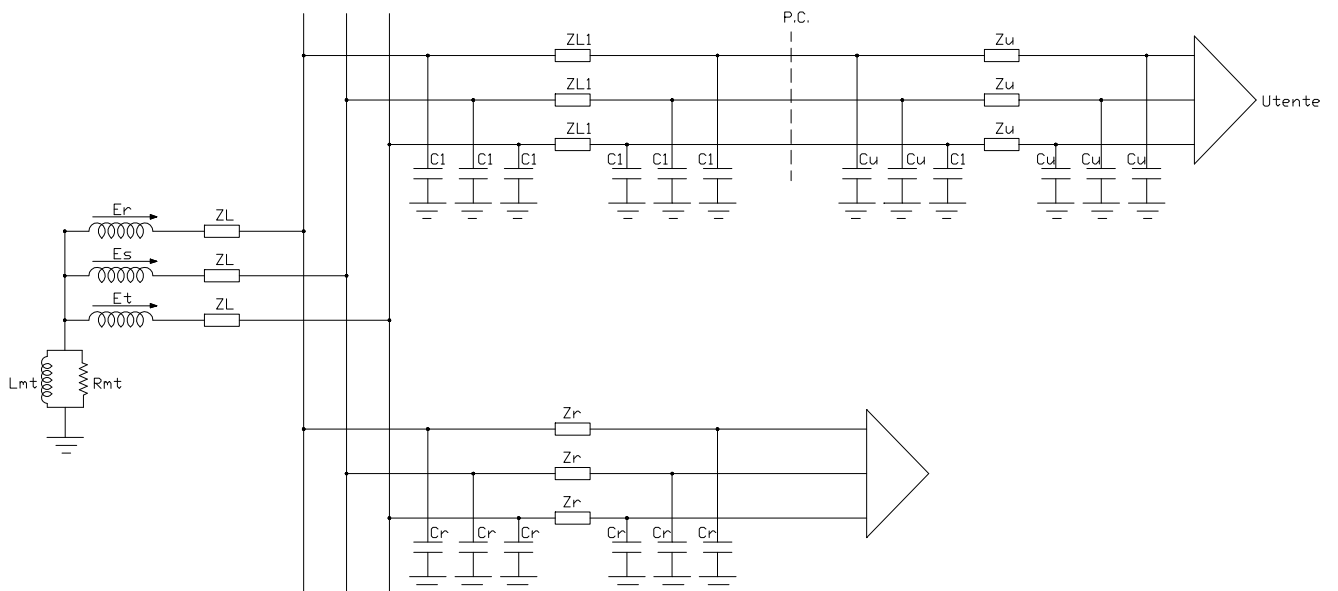


Fig.2b

I casi di guasto significativi da analizzare, per la valutazione generale del funzionamento di questi impianti, sono sostanzialmente 3:

- a) corto circuito trifase;
- b) corto circuito bifase (e bifase a terra);
- c) guasto monofase a terra;

- a) per il calcolo delle correnti di corto circuito trifase è possibile trascurare le capacità trasversali delle linee che non influiscono significativamente;
- b) anche per il corto circuito bifase si possono trascurare le capacità verso terra delle linee in quanto, sia con neutro isolato, sia con neutro compensato, le correnti capacitive verso terra sono trascurabili; nel caso di guasto bifase e terra il coinvolgimento del terreno può essere trascurato, essendo le impedenze capacitive verso terra dei cavi molto maggiori di quelle di linea; la protezione in questi è svolta dunque dai relè di massima corrente;
- c) per analizzare il funzionamento della rete in regime di guasto a terra è possibile, in prima approssimazione, risolvere il circuito equivalente delle rete trascurando le impedenze di linea in quanto molto minori di quelle capacitive verso terra; tale ipotesi è necessaria per ottenere delle relazioni rappresentative dei fenomeni fisici che si verificano in questi casi di guasto; per ottenere risultati più accurati è possibile comunque ricorrere a programmi computerizzati in grado di tenere in conto tutti i parametri circuitali presenti;

Di seguito vengono analizzati i casi di guasto a terra significativi per i due diversi stati del neutro.

2. Guasto monofase a terra – neutro isolato

L'analisi del guasto monofase a terra, come detto, viene effettuata trascurando le impedenze di linea e del trasformatore in CP come rappresentato in Fig.3.

Infatti in base ai dati di targa del TR in CP, ed ai parametri kilometrici delle linee ed alla loro rispettiva lunghezza si possono ottenere le impedenze equivalenti rappresentate in fig.2a e 2b:

$|\bar{Z}_L| = 1,93 \Omega$ modulo dell'impedenza di corto circuito del TR di CP;

$|\bar{Z}_{L1}| = 1 \Omega$ modulo dell'impedenza longitudinale della linea ENEL di alimentazione d'Utente;

$|\bar{Z}_U| = 0,09 \Omega$ modulo dell'impedenza longitudinale della linea d'Utente;

$|\bar{Z}_{C1}| = 2654 \Omega$ modulo dell'impedenza capacitiva trasversale associata alla capacità C_1 della linea ENEL di alimentazione d'Utente;

$|\bar{Z}_{CL1}| = 1327 \Omega$ modulo dell'impedenza capacitiva trasversale totale della linea ENEL di alimentazione d'Utente;

$|\bar{Z}_{CU}| = 29490 \Omega$ modulo dell'impedenza capacitiva trasversale associata alla capacità C_U della linea d'Utente;

$|\bar{Z}_{CLU}| = 14745 \Omega$ modulo dell'impedenza capacitiva trasversale totale della linea d'Utente;

Come si può vedere dunque le impedenze di linea e del TR sono trascurabili rispetto alle impedenze capacitive delle linee stesse e ciò giustifica l'ipotesi posta in precedenza.

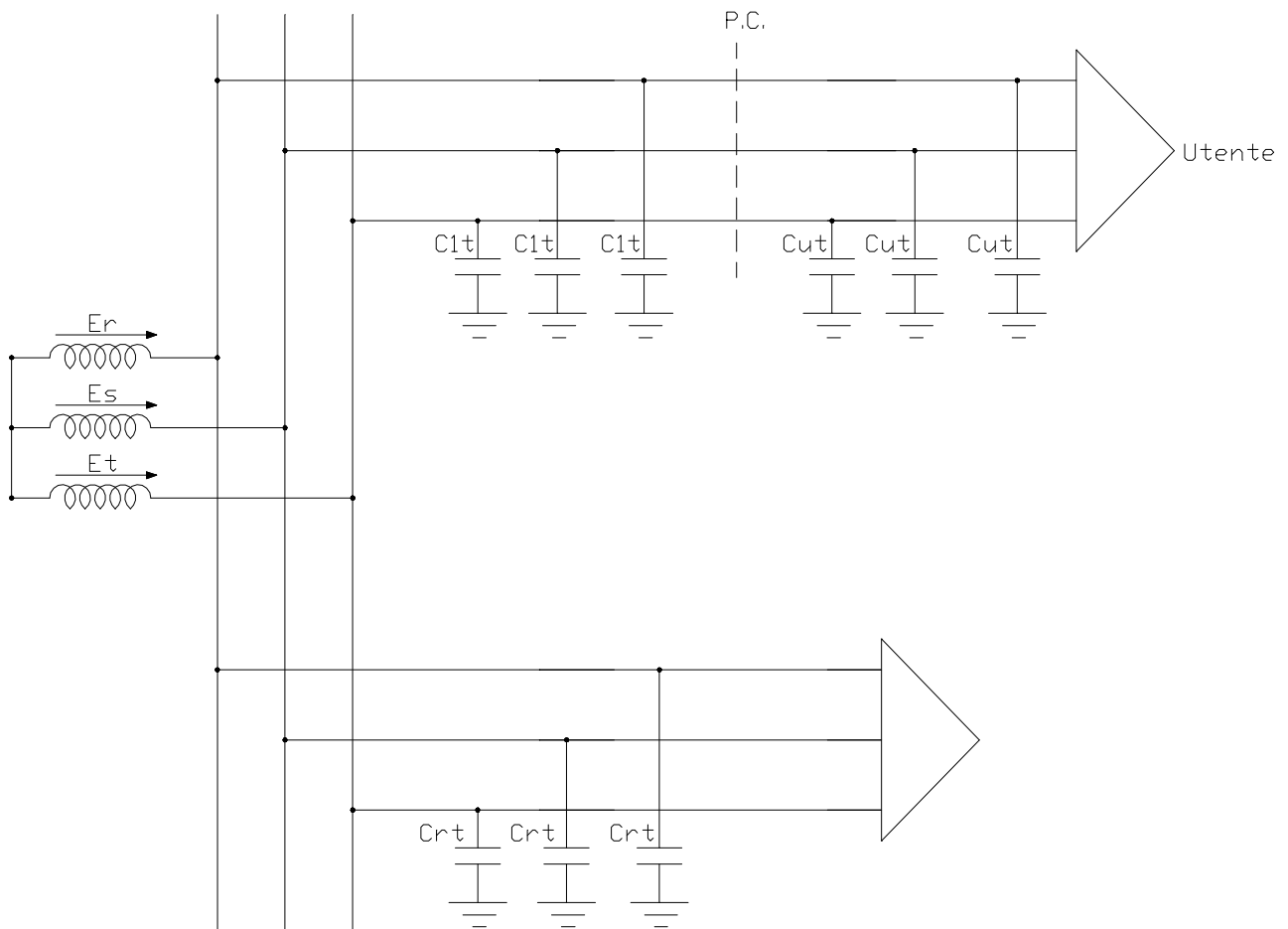


Fig.3

I casi in studio sono 2:

- guasto a terra nella rete ENEL;
- guasto a terra nella linea d'Utente;

2.1. Guasto a terra nella rete ENEL

Consideriamo il caso in cui avvenga un guasto sulla rete ENEL come mostrato in Fig.4; tale guasto modifica la configurazione ed il funzionamento della rete introducendo ovviamente dissimetrie di tensione e squilibri di corrente nei conduttori di fase del sistema. In particolare il guasto monofase a terra determina lo spostamento del potenziale verso terra del centro stella come mostrato in Fig.5.

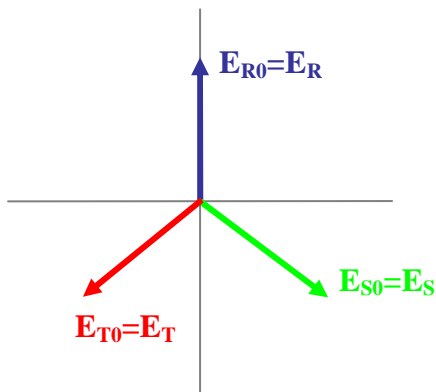


Fig.5a - Diagramma delle tensioni in assenza di guasto

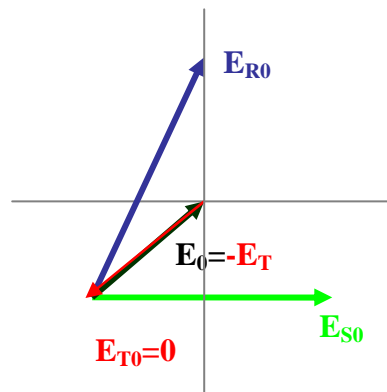


Fig.5b - Diagramma delle tensioni con guasto monofase a terra franco ($R_g=0$)

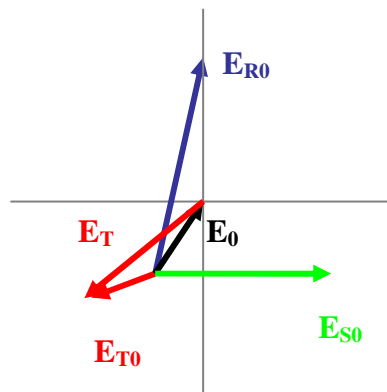


Fig.5b - Diagramma delle tensioni con guasto monofase a terra non franco ($R_g \neq 0$)

Come si può vedere dalle fig.5b e 5c, durante il guasto, siamo in presenza di una deformazione del triangolo delle tensioni che determina un regime elettrico squilibrato. Poiché le capacità delle linee rappresentano l'unico collegamento a terra delle linee stesse, durante il guasto tali capacità costituiscono la via di richiusura della corrente di guasto a terra. Nel caso in esame, con guasto sulla rete ENEL, Fig.6, essa dunque si richiude nelle capacità della rete stessa, nella capacità del tratto di linea ENEL per l'alimentazione dell'Utente e in quella della linea d'Utente stessa; tutte capacità sulla fase guasta vengono, con le ipotesi poste, "shuntate" dal guasto e dunque non sono interessate dalla corrente di richiusura.

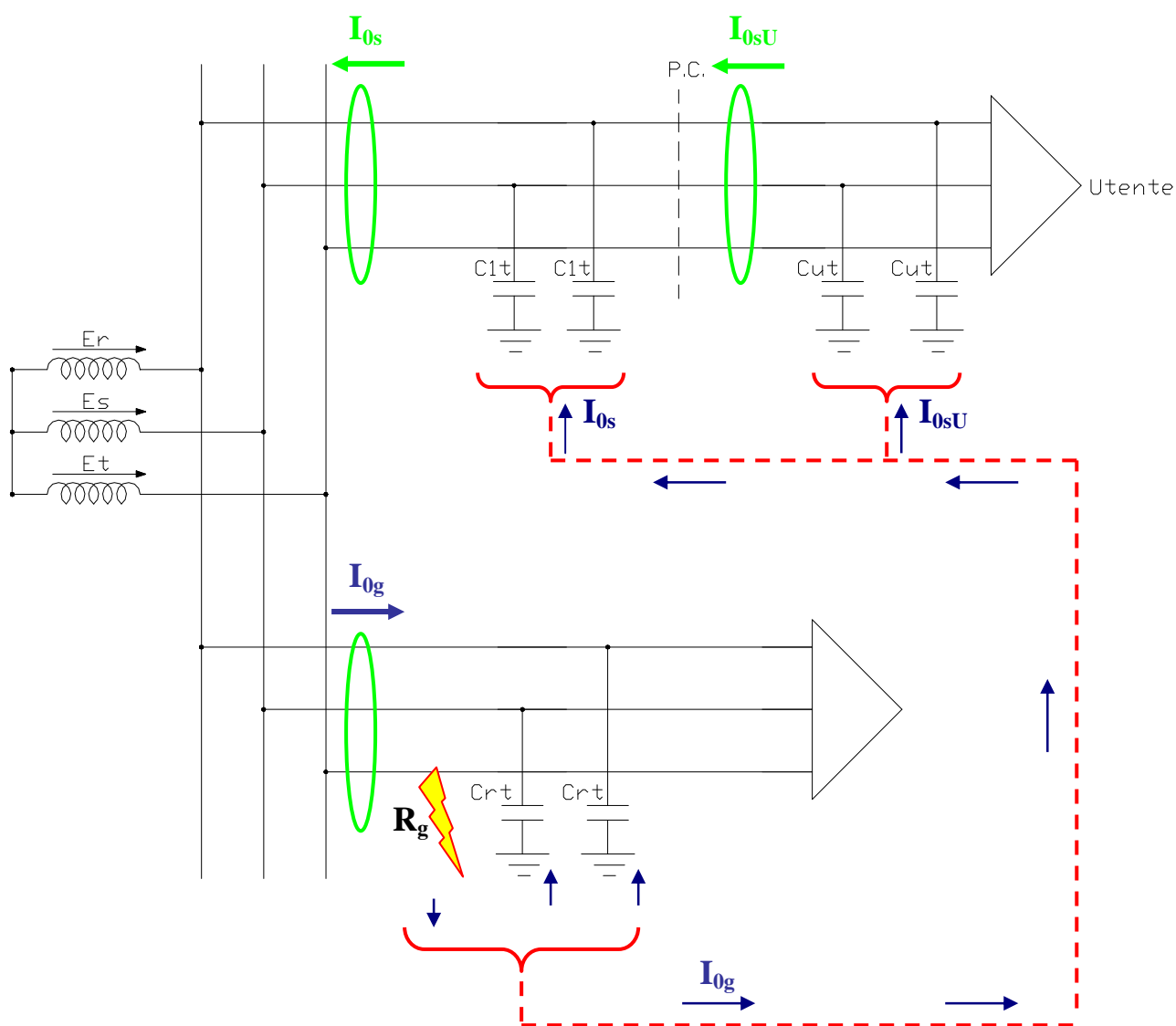


Fig.6

Ovviamente, essendo il valore della corrente funzione dell'impedenza offerta dal circuito di guasto, essa è funzione del valore della capacità che la totalità della rete offre verso terra; le capacità delle linee, avendo trascurato le impedenze longitudinali sono tutte in parallelo e pari a:

$$C_t = C_1 + C_r + C_u$$

Il circuito equivalente nella condizione di guasto considerata è dunque quello di Fig.7.

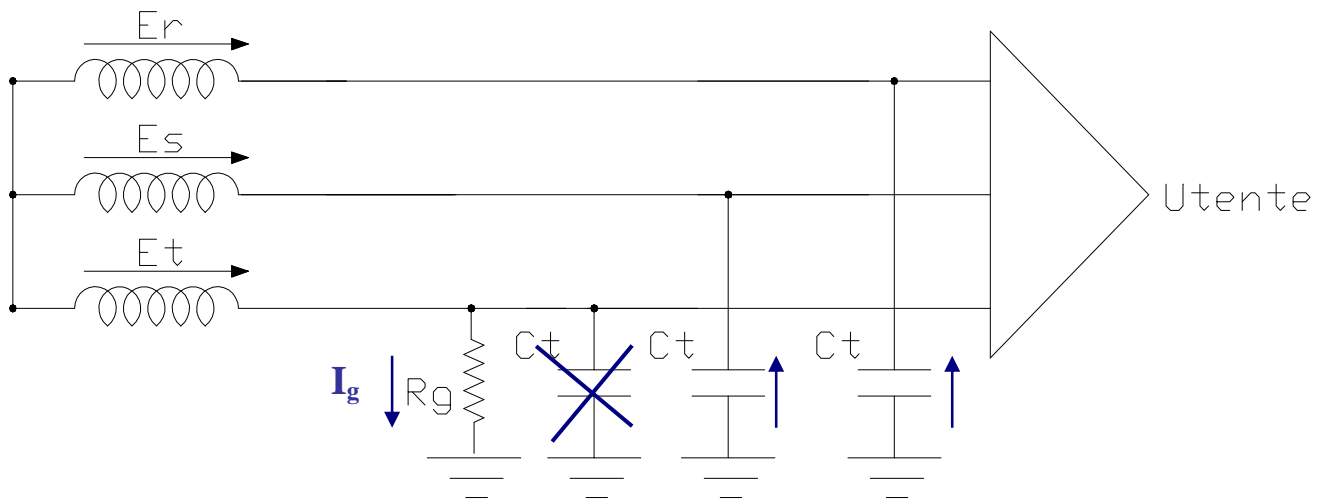


Fig.7

Indicando con R_g la resistenza di guasto, la corrente di guasto è rappresentabile con la seguente relazione:

$$\bar{I}_g = \frac{j \cdot 3 \cdot \omega \cdot C_t \cdot \bar{E}_t}{1 + j \cdot 3 \cdot \omega \cdot C_t \cdot R_g}$$

Con le ipotesi qui poste, tale corrente è indipendente dalla posizione del guasto in quanto la capacità C_t rimane costante. Sviluppando tale circuito è possibile individuare anche la relazione per il calcolo della tensione omopolare E_0 che rappresenta la tensione a cui si porta il centro stella del trasformatore verso terra:

$$\bar{E}_0 = \frac{-\bar{E}_t}{1 + j \cdot 3 \cdot \omega \cdot C_t \cdot R_g}$$

Si dà cenno, ma ciò è chiaro anche dai diagrammi di fig.5, che la E_0 è calcolabile come 1/3 della tensione residua V_r (somma delle tre tensioni di fase) misurata al secondario a triangolo aperto del TV installato ad inizio linea.

Ottenuta la corrente di guasto monofase a terra, risulta fondamentale, ai fini di una corretta taratura delle protezioni, comprendere quale sia la sua distribuzione nelle varie capacità di rete, come rappresentato in Fig.6.

In particolare è necessario calcolare le correnti differenziali, o meglio omopolari (1/3 della corrente differenziale), rilevate dai TA toroidali installati all'inizio di ogni linea.

Infatti, la presenza di correnti e tensioni omopolari, ed i loro valori danno informazioni fondamentali sul tipo di guasto in corso e sulla sua posizione.

Sviluppando l'analisi del circuito di Fig.6 è possibile ottenere le seguenti relazioni:

$$\bar{I}_{0g} = \frac{j \cdot \varpi \cdot (C_{lt} + C_{ut}) \cdot \bar{E}_t}{1 + j \cdot 3 \cdot \varpi \cdot C_t \cdot R_g} \quad \text{corrente omopolare in uscita dalla linea ENEL equivalente guasta}$$

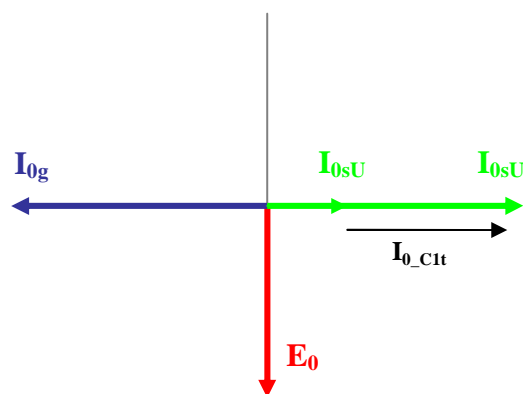
$$\bar{I}_{0sU} = \frac{-j \cdot \varpi \cdot C_{ut} \cdot \bar{E}_t}{1 + j \cdot 3 \cdot \varpi \cdot C_t \cdot R_g} \quad \text{corrente omopolare in uscita dalla linea d'Utente sana}$$

$$\bar{I}_{0_{-Clt}} = \frac{-j \cdot \varpi \cdot C_{lt} \cdot \bar{E}_t}{1 + j \cdot 3 \cdot \varpi \cdot C_t \cdot R_g} \quad \text{corrente omopolare nelle capacità della linea ENEL d'alimentazione Utente sana}$$

$$\bar{I}_{0s} = \bar{I}_{0sU} + \bar{I}_{0_{-Clt}} = -\bar{I}_{0g} = \frac{-j \cdot \varpi \cdot (C_{lt} + C_{ut}) \cdot \bar{E}_t}{1 + j \cdot 3 \cdot \varpi \cdot C_t \cdot R_g} \quad \text{corrente omopolare vista dalla linea ENEL d'alimentazione Utente in CP}$$

Ovviamente essendo la linea d'Utente alimentata da una linea ENEL, la relativa corrente in CP risulta la somma delle correnti omopolari associate alle C_{lt} e C_{Ut} (I_{0sU}).

Il diagramma vettoriale della grandezze omeopolari, indipendente dal valore assunto dalla R_g , è mostrato in Fig.8.



E_0 - tensione omopolare

I_{0g} - corrente omopolare in partenza dalla linea equivalente ENEL guasta

I_{0s} - corrente omopolare in partenza dalla linea d'Utente sana

I_{0s} - corrente omopolare in partenza dalla linea ENEL d'alimentazione Utente sana

I_{0_CIt} - corrente omopolare nelle capacità della linea ENEL di alimentazione d'Utente

Fig.8

La presenza di correnti e tensioni omopolari, in un sistema normalmente equilibrato, indica la presenza di un guasto verso terra. Dunque asservendo gli interruttori con relè sensibili alle grandezze omopolari, opportunamente tarati e gestiti, è possibile effettuare la protezione dai guasti a terra.

2.2.Cenni sulle protezioni in cabina primaria

Facendo riferimento ancora alla fig.6, qualora avvenga un guasto a terra nella rete ENEL, in ogni linea viene richiamata una corrente omopolare funzione della capacità propria, ed anche di quella totale della rete. Come è visibile dalle relazioni precedenti maggiore è la lunghezza di una linea in partenza dalla CP, maggiore è la corrente omopolare richiamata dalle capacità proprie durante il guasto a terra. Risulta dunque nota, con un certo margine di sicurezza, la distribuzione delle correnti omopolari su ogni linea in partenza dalla CP; sarebbe dunque possibile attuare la protezione delle linee in CP esclusivamente con protezioni 51N, tarate in base a tale distribuzione delle correnti omopolari, in particolare, nelle linee sane, in modo da evitare l'apertura degli interruttori.

Non esiste, però, nelle reali reti MT, una differenza significativa tra le correnti omopolari associate ad una linea, nel caso essa sia guasta e nel caso rimanga sana, e questo rende impossibile l'utilizzo di tarature amperometriche tali da rendere selettiva la sola protezione 51N; a ciò va ad aggiungersi la configurazione variante della rete (linee fuori servizio) con capacità totali quindi variabili e dunque distribuzioni delle dette correnti variabili; infine non trascurabile è certo

l'influenza della resistenza di guasto, non nota, che può significativamente "sovrapporre" i valori delle correnti omopolari nel caso di linea sana e nel caso di linea guasta.

È comprensibile dunque la necessaria adozione di una protezione 67N in grado di leggere il verso della potenza reattiva e dunque capace di distinguere la posizione del guasto; tale protezione acquisisce i valori delle grandezze omopolari della propria linea, tensione, corrente e relativo sfasamento, valutando il verso della potenza reattiva assorbita/erogata dal circuito di guasto (omopolare) e dunque inibendo lo scatto dell'interruttore qualora la linea sia sana. Si sottolinea che a tale protezione viene aggiunta anche una protezione 51N adirezionale tarata su correnti e tempi di intervento superiori a quelli della 67N e tali comunque da non intervenire durante guasti a terra in altre linee.

2.3.Cenni sulle protezioni d'Utente

Data una certa configurazione di rete e di guasto (vedi fig.6), la ripartizione della corrente omopolare è nota, ed i suoi valori variano in un certo range in base ai valori che può assumere la R_g ; è dunque possibile stabilire con buona approssimazione, e con un certo margine di sicurezza, la corrente omopolare minima che interessa ogni singola linea.

Utilizzando dunque una semplice protezione di massima corrente omopolare 51N, tarata sotto tale soglia minima, essa interviene sempre indipendentemente dalla posizione del guasto nella rete ENEL.

Ovviamente tale soluzione non è accettabile in quanto un qualsiasi guasto sulla rete ENEL fa intervenire tutte le protezioni del sistema, compresa quella dell'Utente, annullando ogni concetto di selettività delle protezioni.

Se però la capacità totale della linea d'Utente risulta trascurabile, o comunque molto minore della capacità della linea ENEL che la alimenta, la ripartizione della corrente omopolare è fortemente squilibrata a favore della linea ENEL. La corrente rilevata dal toroide d'Utente risulta trascurabile o molto minore rispetto a quella associata alla linee ENEL che la alimenta. In tale caso dunque è possibile tarare la soglia della protezione 51N d'Utente a valori superiori alla corrente omopolare massima che si può verificare in esso con guasto nella rete ENEL.

Tale soluzione è comunque compatibile con lo scatto della protezione 51N durante il guasto sulla linea d'Utente, in quanto in questo caso, la corrente omopolare assume valori molto maggiori della soglia impostata rappresentando la somma di tutte le correnti omopolari che si vanno a richiudere nella capacità dell'intera rete.

In conclusione, nel caso in cui $C_{It} \gg C_{ut}$ una accurata taratura amperometrica e cronometrica della sola protezione 51N garantisce la dovuta selettività.

Qualora invece la linea d'Utente sia di lunghezza rilevante e dunque la sua capacità assume un valore confrontabile con quello della capacità della linea ENEL che la alimenta, la ripartizione della corrente omopolare non presenta uno squilibrio così drastico ed importante tra i due trochi di linea (fig.6). Dunque non esiste una forte differenza tra corrente omopolare nel toroide d'Utente durante il guasto a terra sulla rete ENEL e quella che si verifica per guasto a terra sulla rete d'Utente e ciò non permette di effettuare una discriminazione del guasto in base alla semplice taratura amperometrica e cronometrica della protezione 51N.

Si rende necessaria quindi l'adozione della protezione 67N in grado di leggere il segno della potenza reattiva e dunque in grado di distinguere la posizione del guasto; tale protezione acquisisce i valori delle grandezze omopolari della propria linea, tensione, corrente e relativo sfasamento, valutando il verso della potenza reattiva assorbita/erogata dal circuito di guasto (omopolare).

Conoscendo con buona approssimazione le caratteristiche della rete (capacità delle linee) ed ipotizzando un certo range di variazione della resistenza di guasto R_g , è possibile calcolare una serie di punti di funzionamento (E_0 , I_0 e $\cos\varphi_0$) in regime di guasto a terra individuando una *zona di intervento* per la quale la protezione comanda l'apertura dell'interruttore di linea. In questo modo l'intervento della protezione è assicurato esclusivamente nel caso di guasto a terra lato Utente. Si sottolinea anche l'esigenza di assicurare un ricalzo di sicurezza alla protezione 67N effettuato con una protezione 51N adirezionale tarata su correnti e tempi di intervento superiori a quelli della 67N e tali comunque da non intervenire durante guasti a terra nella rete ENEL.

In conclusione, nel caso in cui $C_{It} \approx C_{ut}$ è necessario predisporre per l'Utente una protezione 67N da accompagnare alla 51N di ricalzo.

2.4. Guasto a terra nella linea d'Utente

Come si vede in Fig.6, la corrente di guasto a terra si richiude attraverso le capacità della rete stessa, del tratto di linea ENEL per l'alimentazione dell'Utente e nella linea equivalente alla totalità della rete ENEL.

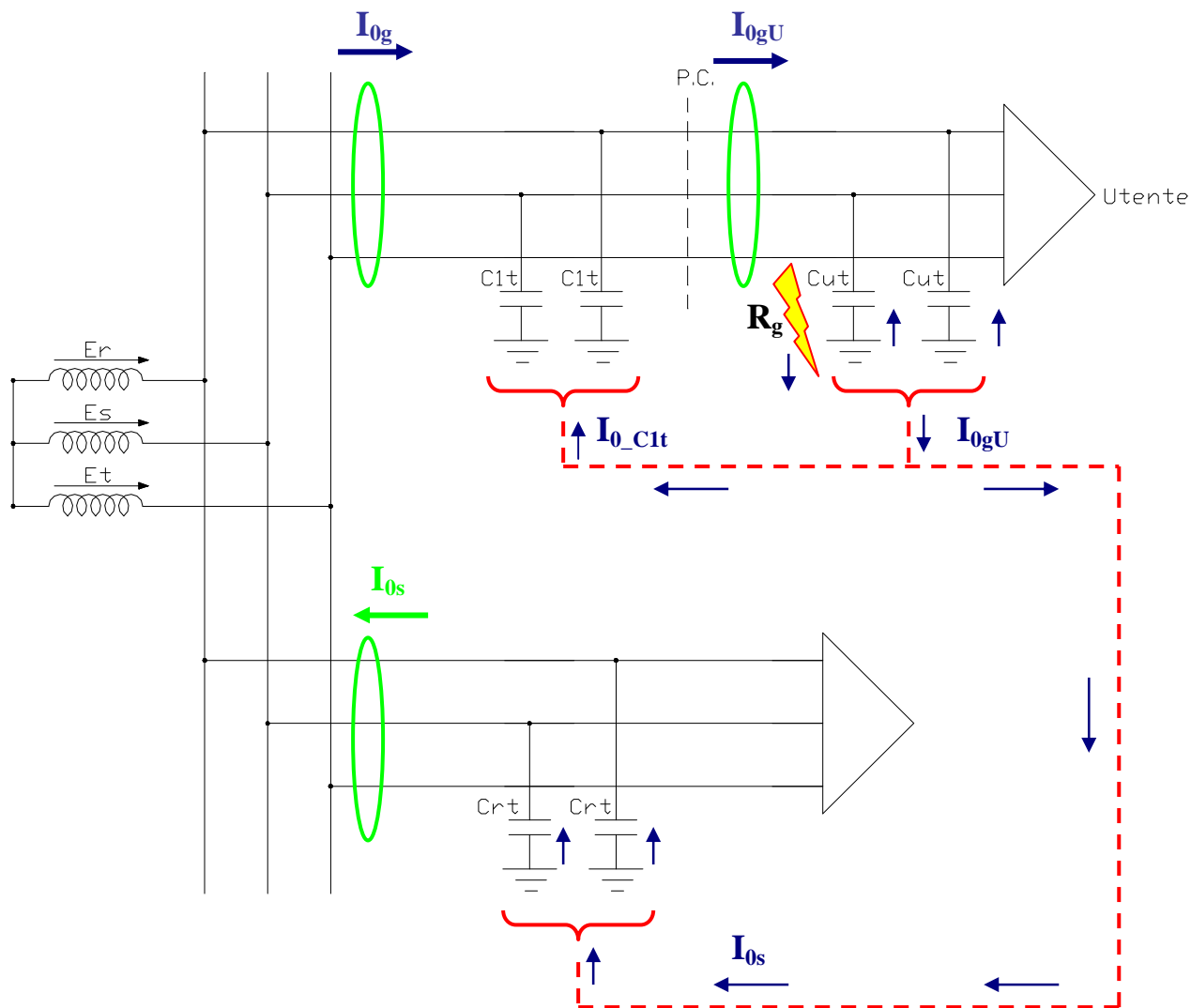


Fig.9

Come nel caso precedente la corrente è funzione delle capacità che la totalità della rete offre verso terra; essendo la rete nella totalità identica a quella di Fig.7, la corrente di guasto è la stessa ricavata in precedenza.

Anche in questo caso, risulta fondamentale comprendere quale sia la sua distribuzione nelle varie capacità di rete, come rappresentato in Fig.9.

Sviluppando il circuito equivalente si ottengono le seguenti relazioni:

$$\bar{I}_{0s} = \frac{-j \cdot \varpi \cdot C_{rt} \cdot \bar{E}_t}{1 + j \cdot 3 \cdot \varpi \cdot C_t \cdot R_g} \quad \text{corrente omopolare in uscita dalla linea ENEL equivalente sana}$$

$$\bar{I}_{0Ug} = \frac{j \cdot \varpi \cdot (C_{lt} + C_{rt}) \cdot \bar{E}_t}{1 + j \cdot 3 \cdot \varpi \cdot C_t \cdot R_g} \quad \text{corrente omopolare in uscita dalla linea d'Utente guasta}$$

$$\bar{I}_{0_{-}C1t} = \frac{-j \cdot \varpi \cdot C_{lt} \cdot \bar{E}_t}{1 + j \cdot 3 \cdot \varpi \cdot C_t \cdot R_g} \quad \text{corrente omopolare nelle capacità della linea ENEL d'alimentazione Utente sana}$$

$$\bar{I}_{0g} = \bar{I}_{0Ug} + \bar{I}_{0_{-}C1t} = -\bar{I}_{0s} = \frac{j \cdot \varpi \cdot C_{rt} \cdot \bar{E}_t}{1 + j \cdot 3 \cdot \varpi \cdot C_t \cdot R_g} \quad \text{corrente omopolare vista dalla linea ENEL d'alimentazione Utente in CP}$$

Ovviamente essendo la linea d'Utente alimentata da una linea ENEL, la relativa corrente in CP risulta la somma vettoriale delle correnti omopolari associate alle C_{lt} e C_{Ug} .

Il diagramma vettoriale della grandezze omeopolarì, indipendente dal valore assunto dalla R_g , è mostrato in Fig.10

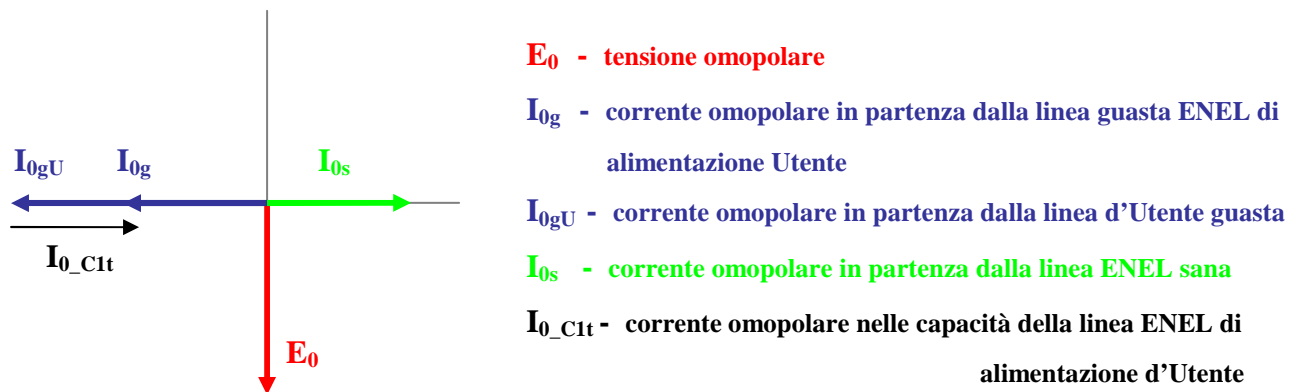


Fig.10

3. Guasto monofase a terra – neutro a terra con bobina di Petersen

Prima di analizzare il guasto a terra in sistemi con neutro compensato risultano fondamentali alcune premesse.

Le moderne reti MT presentano, per l'elevata estensione dei cavi, correnti di guasto a terra che ormai raggiungono valori di circa 250-300 A, particolarmente critiche per la progettazione di corretti impianti di terra. Inoltre il passaggio da neutro isolato a neutro compensato permette di conseguire i seguenti benefici:

- aumentare la probabilità di autoestinzione dei guasti monofase evitando l'apertura dell'interruttore di linea;
- inibire il riaccensione dei guasti e quindi ridurre le interruzioni lunghe;
- ridurre il numero, l'ampiezza, la durata delle sovratensioni sostenute;
- ridurre i rischi dell'arco intermittente;
- limitare la corrente di guasto monofase a terra facilitando la realizzazione degli impianti di terra delle cabine MT/BT;
- incrementare la sensibilità per i guasti a terra ad alta resistenza;

L'analisi qualitativa del funzionamento di una rete MT a neutro compensato può essere fatta analizzando il circuito di fig.11. La bobina Petersen collega il neutro a terra; lo scopo è di ridurre il valore della corrente di guasto la quale, teoricamente, è nulla se l'induttanza della bobina è accordata (in risonanza) con la totale capacità di esercizio.

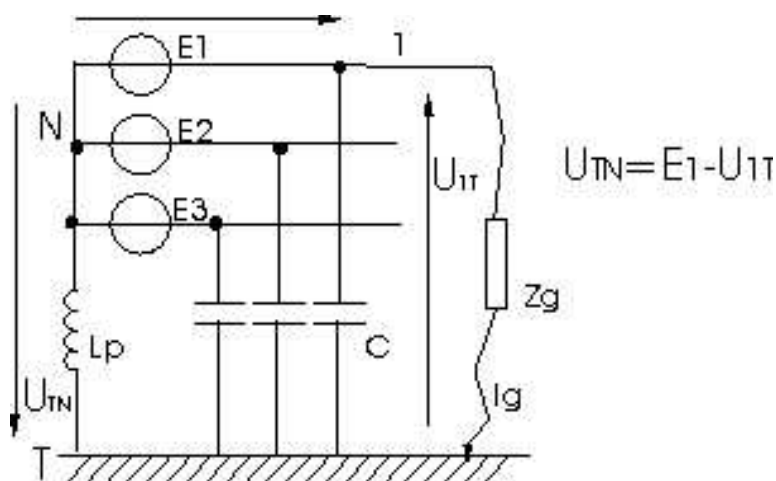
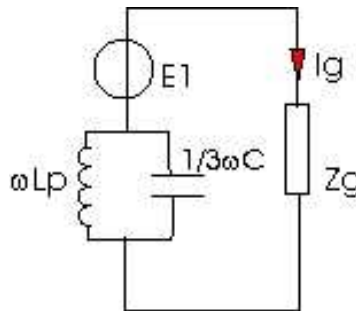


fig. 11

Analizzando il circuito di fig.11 si costruisca la rete equivalente di Thevenin vista tra i nodi 1 e T. Come si vede l'impedenza equivalente di Thevenin, Z_{th} , è pari a:

$$\bar{Z}_{Th} = \bar{Z}_{Lp} // \frac{\bar{Z}_C}{3} = \frac{\omega \cdot L_p \cdot \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C}}{j \cdot \left[\omega \cdot L_p - \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C} \right]}$$

L'impedenza interna, Z_{Th} , è il parallelo delle tre reattanze capacitive $1/\omega C$, quindi $X' = 1/3\omega C$, con la reattanza induttiva della bobina di Petersen schematizzata con elementi in parallelo, $X_p = \omega L_p$. In parallelo c'è anche la resistenza R_p che, per le considerazioni precedentemente fatte si può trascurare.



La corrente di guasto assume la forma:

$$\bar{I}_g = \frac{\bar{E}_1}{\bar{Z}_{Th} + \bar{Z}_g}$$

bobina accordata:

$$L_p = \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C}$$

Nel caso in cui venga installata una bobina accordata sulle capacità della rete si verifica una risonanza parallelo che determina una impedenza di Thevenin infinita, annullando la corrente di guasto; cioè la corrente capacitiva associata a tutte le capacità di linea, viene compensata dalla corrente induttiva della bobina di Petersen; nel punto di guasto tali correnti si sommano annullando la corrente di guasto a terra. Normalmente l'accordo della bobina non è mai verificato con massima precisione per una serie di motivi; in questo caso si verifica o una sottocompensazione o una sovracompensazione della corrente capacitiva della rete. Di norma in parallelo la bobina di Petersen è costituita anche da una resistenza parallelo di 400-600 Ω; dunque la corrente di guasto presenta sempre una componente resistiva anche in caso di guasto franco. La presenza della resistenza permette di smorzare rapidamente le sovratensioni di manovra ed impedisce la formazione di archi intermittenti a terra; inoltre la corrente di guasto rimane comunque limitata garantendo l'autoestinsione del 95% circa dei guasti non permanenti.

Anche nel caso di rete con neutro compensato, l'analisi del guasto monofase a terra, come detto, viene effettuata trascurando le impedenze di linea e procedendo analogamente al caso precedente.

3.1. Guasto a terra nella rete ENEL

Come si vede in Fig.12, la corrente di guasto a terra si richiude attraverso le capacità della rete stessa, del tratto di linea ENEL per l'alimentazione dell'Utente e nella linea d'Utente stessa.

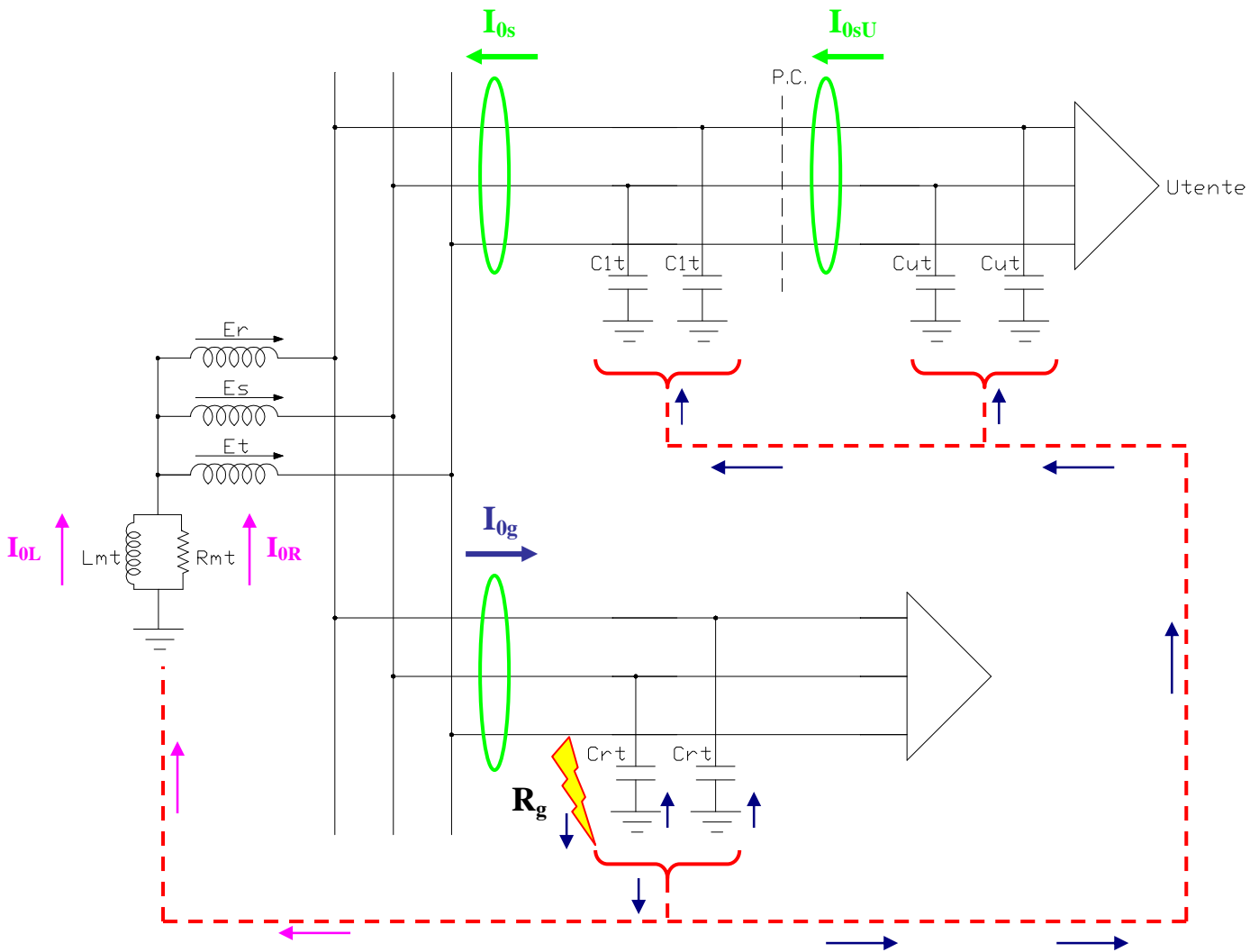


Fig.12

La corrente è dunque funzione delle capacità che la totalità della rete offre verso terra; tali capacità, avendo trascurato le impedenze longitudinali sono tutte in parallelo e pari a:

$$C_t = C_1 + C_r + C_u$$

Il circuito equivalente è dunque quello di Fig.8.

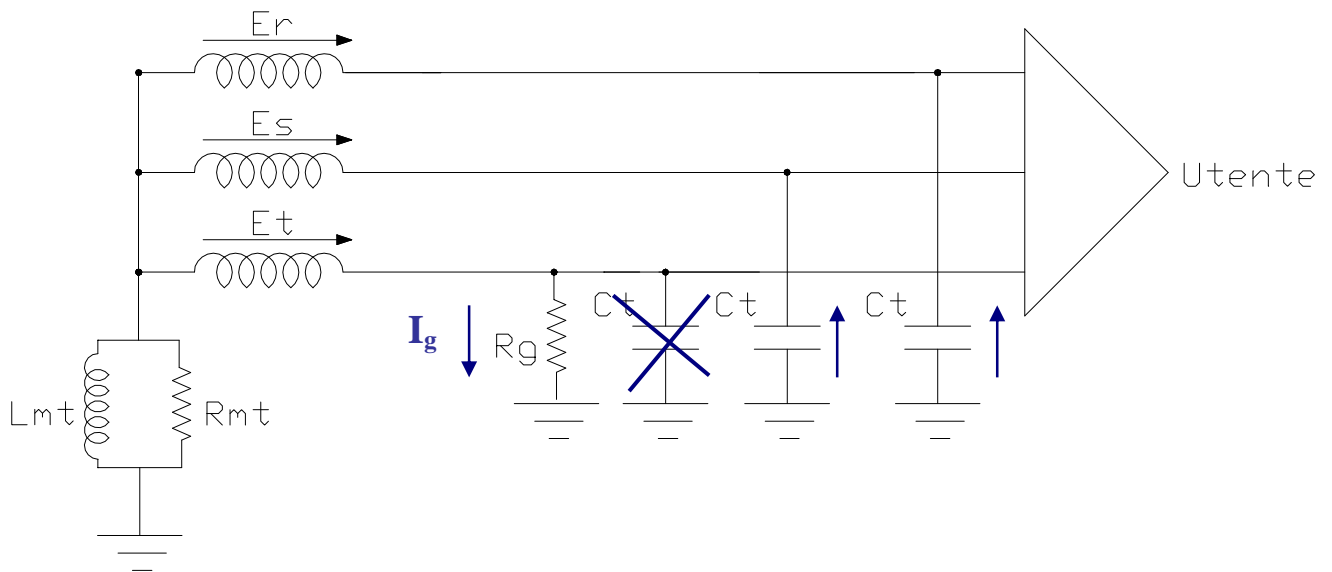


Fig.13

Analizzando il circuito di Fig.13 è possibile calcolare la corrente di guasto con la seguente relazione:

$$\bar{I}_g = \frac{3 \cdot \bar{E}_t}{3 \cdot R_g + \bar{Z}_0}$$

con:

$$\bar{Z}_0 = \bar{Z}_{Ct} // 3 \cdot \bar{Z}_{mt} \quad \text{impedenza omopolare del sistema;}$$

$$\bar{Z}_{Ct} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_t} \quad \text{impedenza capacitiva totale del sistema;}$$

$$\bar{Z}_{mt} = \frac{j \cdot \omega \cdot R_{mt} \cdot L_{mt}}{R_{mt} + j \cdot \omega \cdot L_{mt}} \quad \text{impedenza di messa a terra del sistema;}$$

estendendo i calcoli della Z_0 si ha:

$$\bar{Z}_0 = \frac{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_0} \cdot \frac{3 \cdot j \cdot \omega \cdot R_{mt} \cdot L_{mt}}{R_{mt} + j \cdot \omega \cdot L_{mt}}}{\frac{3 \cdot j \cdot \omega \cdot R_{mt} \cdot L_{mt}}{R_{mt} + j \cdot \omega \cdot L_{mt}} + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_0}}$$

Tali relazioni permettono di calcolare la corrente I_{mt} che attraversa l'impedenza di messa a terra:

$$\bar{I}_{mt} = \frac{-3 \cdot \bar{E}_t \cdot \bar{Z}_{Ct}}{(\bar{Z}_0 + 3 \cdot R_g) \cdot (\bar{Z}_{Ct} + 3 \cdot \bar{Z}_{mt})}$$

Ottenuta la corrente di guasto, risulta fondamentale comprendere quale sia la sua distribuzione nelle varie capacità di rete tenendo conto anche della presenza dell'impedenza di messa a terra, come rappresentato in Fig.12.

Considerando:

La risoluzione del circuito di fig.12 mostra i seguenti risultati:

$$\bar{I}_{0g} = \frac{\bar{E}_t}{3 \cdot R_g + \bar{Z}_0} \cdot \frac{\bar{Z}_{Ct}}{\bar{Z}_{Ct} + 3 \cdot \bar{Z}_{mt}} + j \cdot \omega \cdot (C_{ut} + C_{lt}) \cdot \frac{\bar{Z}_0 \cdot \bar{E}_t}{3 \cdot R_g + \bar{Z}_0}$$

$$\bar{I}_{0g} = \frac{\bar{E}_t}{3 \cdot R_g + \bar{Z}_0} \cdot \left[\frac{\bar{Z}_{Ct}}{\bar{Z}_{Ct} + 3 \cdot \bar{Z}_{mt}} + j \cdot \omega \cdot (C_{ut} + C_{lt}) \cdot \bar{Z}_0 \right] \quad \begin{array}{l} \text{corrente omopolare in uscita dalla linea} \\ \text{equivalente ENEL guasta} \end{array}$$

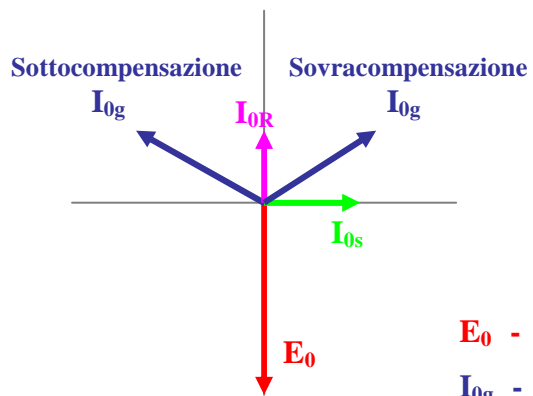
$$\bar{I}_{0sU} = -j \cdot \omega \cdot C_{Ut} \cdot \frac{\bar{Z}_0 \cdot \bar{E}_t}{3 \cdot R_g + \bar{Z}_0} \quad \text{corrente omopolare in uscita dalla linea d'Utente sana}$$

$$\bar{I}_{0_{-Clt}} = -j \cdot \omega \cdot C_{lt} \cdot \frac{\bar{Z}_0 \cdot \bar{E}_t}{3 \cdot R_g + \bar{Z}_0} \quad \begin{array}{l} \text{corrente omopolare nelle capacità della linea ENEL} \\ \text{d'alimentazione Utente sana} \end{array}$$

$$\bar{I}_{0s} = \bar{I}_{0_{-Clt}} + \bar{I}_{0sU} = -j \cdot \omega \cdot (C_{Ut} + C_{lt}) \cdot \frac{\bar{Z}_0 \cdot \bar{E}_t}{3 \cdot R_g + \bar{Z}_0} \quad \begin{array}{l} \text{corrente omopolare vista dalla linea ENEL} \\ \text{d'alimentazione Utente in CP} \end{array}$$

Ovviamente essendo la linea d'Utente alimentata da una linea ENEL, la relativa corrente in CP risulta la somma delle correnti omopolari associate alle C_{lt} e C_{Ut} .

Il diagramma vettoriale delle grandezze omopolari, indipendente dal valore assunto dalla R_g , è mostrato in Fig.14



E_0 - tensione omopolare

I_{0g} - corrente omopolare in partenza dalla linea guasta

I_{0gU} - corrente omopolare in partenza dalla linea d'Utente guasta

I_{0s} - corrente omopolare in partenza dalla linea ENEL d'alimentazione

Utente sana

I_{0R} - componente resistiva della corrente nell'impedenza di messa a terra

Fig.14

3.2. Guasto a terra nella linea d'Utente

Come si vede in Fig.15 la corrente di guasto a terra si richiude attraverso le capacità della rete stessa, del tratto di linea ENEL per l'alimentazione dell'Utente e nella linea equivalente alla totalità della rete ENEL.

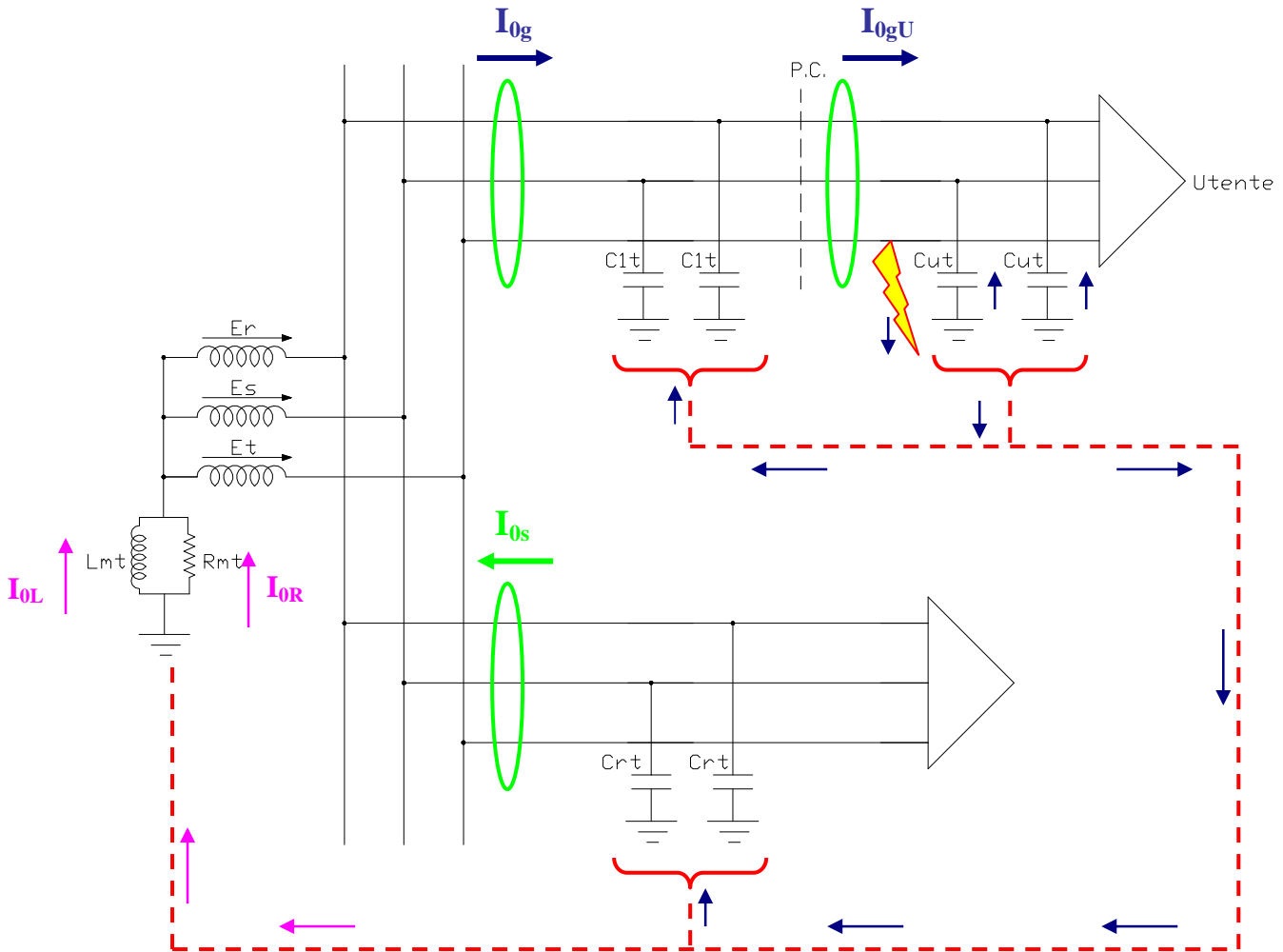


Fig.15

Come nel caso precedente la corrente è funzione delle capacità che la totalità della rete offre verso terra; essendo la rete nella totalità identica a quella di Fig.13, la corrente di guasto è la stessa ricavata in precedenza.

Anche in questo caso, risulta fondamentale comprendere quale sia la sua distribuzione nelle varie capacità di rete, come rappresentato in Fig.15.

Procedendo analogamente a quanto fatto in precedenza si ha:

$$\bar{I}_{0s} = -j \cdot \omega \cdot C_{rt} \cdot \frac{\bar{Z}_0 \cdot \bar{E}_t}{3 \cdot R_g + \bar{Z}_0}$$

corrente omopolare in uscita dalla linea ENEL equivalente sana

$$\bar{I}_{0gU} = \frac{\bar{E}_t}{3 \cdot R_g + \bar{Z}_0} \cdot \left[\frac{\bar{Z}_{Ct}}{\bar{Z}_{Ct} + 3 \cdot \bar{Z}_{mt}} + j \cdot \omega \cdot (C_{rt} + C_{lt}) \cdot \bar{Z}_0 \right] \quad \text{corrente omopolare in uscita dalla linea d'Utente guasta}$$

$$\bar{I}_{0_Clt} = -j \cdot \omega \cdot C_{lt} \cdot \frac{\bar{Z}_0 \cdot \bar{E}_t}{3 \cdot R_g + \bar{Z}_0} \quad \text{corrente omopolare nelle capacità della linea ENEL d'alimentazione Utente sana}$$

$$\bar{I}_{0g} = \bar{I}_{0_Clt} + \bar{I}_{0gU} \quad \text{corrente omopolare vista dalla linea ENEL d'alimentazione Utente in CP}$$

Ovviamente essendo la linea d'Utente alimentata da una linea ENEL, la relativa corrente in CP risulta la somma delle correnti omopolari associate alle C_{lt} e C_{Ut} .

Il diagramma vettoriale della grandezze omopolari, indipendente dal valore assunto dalla R_g , è mostrato in Fig.16

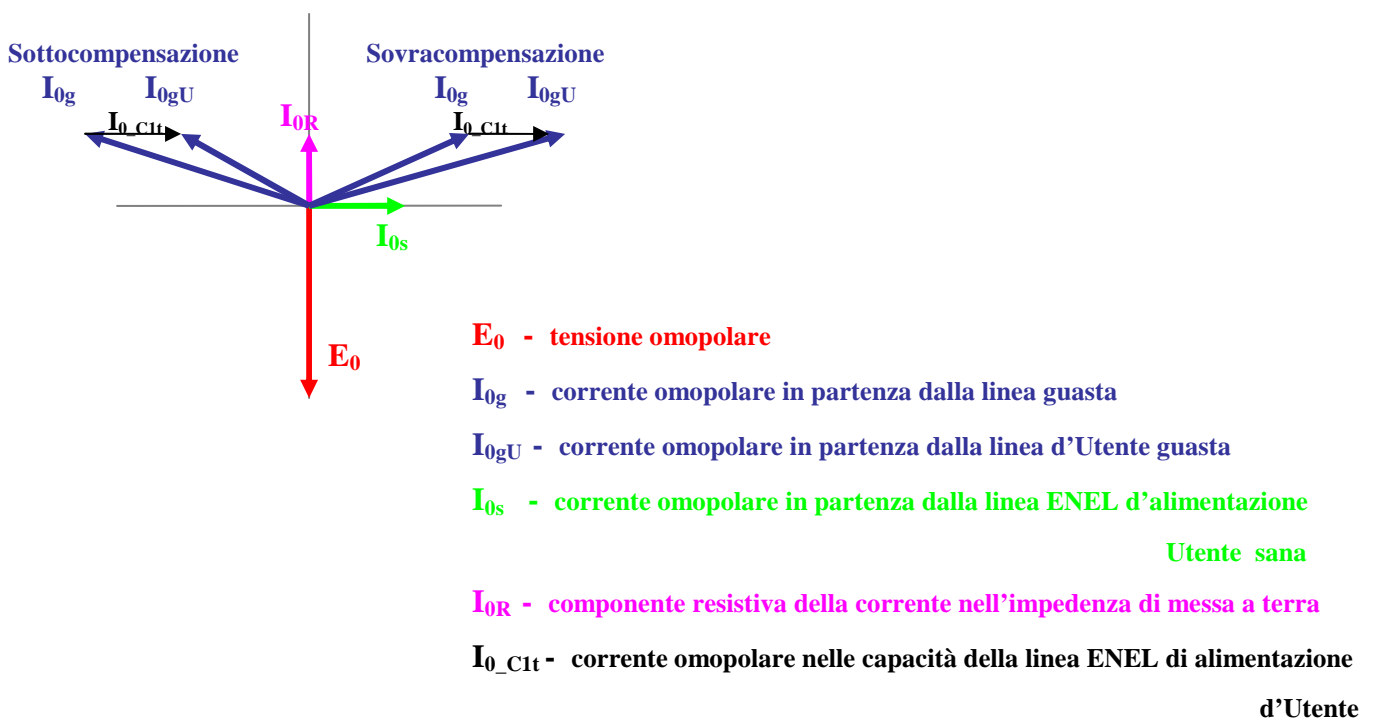


Fig.16

Per quanto riguarda la taratura delle protezioni 67N, in base alla conoscenza della rete ed delle modalità di esercizio è possibile valutare i limiti di sovracompensazione e sottocompensazione che implicano un range di sfasamento tra le tensioni e correnti omopolari (Fig.17). Inoltre, tenendo conto dei valori delle resistenze di guasto si può stimare il valore minimo del modulo della tensione e della corrente omopolare e dunque procedere alla taratura delle protezioni nel range di sfasamento previsto. Sulle reti MT con neutro a terra tramite impedenza si devono impiegare nuove protezioni direzionali con due soglie di taratura distinte:

- la prima (**67N.1**) rileva il guasto quando la rete è gestita con neutro compensato;
- la seconda(**67N.2**) rileva il guasto quando la rete è gestita con neutro isolato (situazione che si verifica per periodi all'anno in occasione di guasti o manutenzioni);

