

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

Appunti Corso di Sistemi Elettrici

Tensione e Corrente omopolare

Anno Accademico 2018-2019

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

Tensione e corrente omopolare: definizioni e misure

Analizzeremo il controllo dei **guasti a terra** nelle reti trifasi in Media Tensione. Definiremo tensione e correnti **omopolari** ed indicheremo i circuiti di misura secondo le **Regole Tecniche di Connessione**, trattate dalla norma **CEI 0-16**.

La tensione omopolare: definizione e circuito di misura

La **tensione omopolare** rappresenta la differenza di potenziale tra il centro stella ideale, coincidente con il baricentro del triangolo delle tensioni concatenate del sistema, ed il centro stella reale.

I trasformatori di misura sono di due tipi fondamentali: trasformatori di tensione (**TV**) e trasformatori di corrente (**TA**). In generale si hanno due valori secondari unificati: 5 A per la corrente nei TA e 100 V per la tensione nei TV.

Nella figura 1 è rappresentato il guasto della fase 1 a terra.

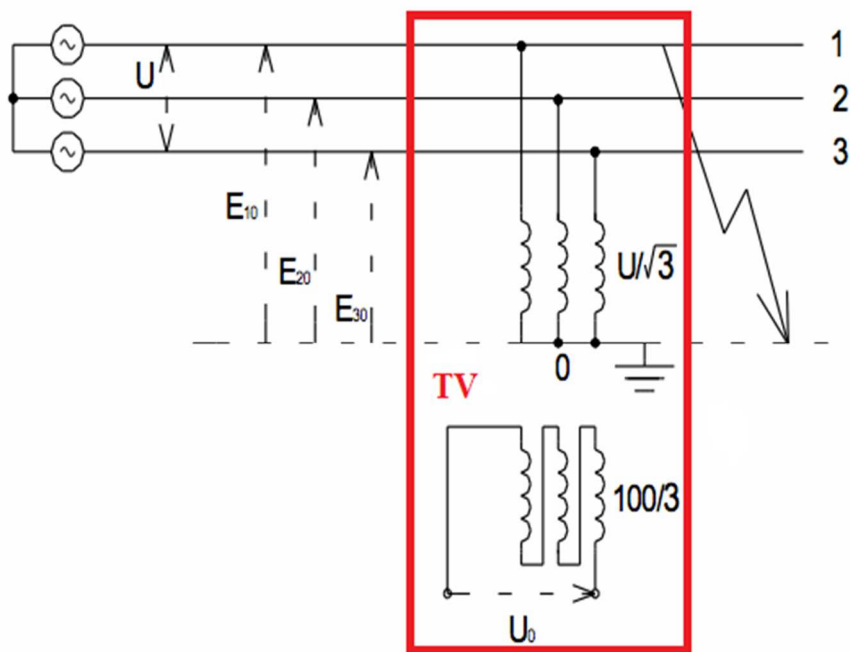


Fig.1

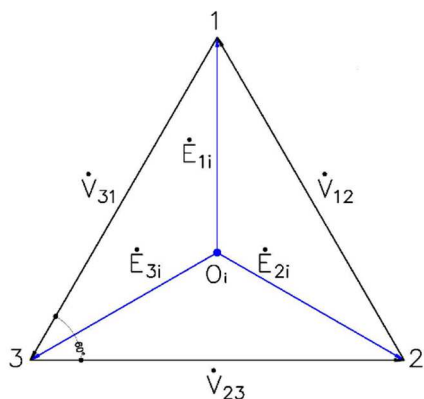


Fig.2–Sistema Simmetrico ed Equilibrato
O_i=Centro Stella Ideale

In caso di guasto della fase 1 a terra, essendo $\dot{E}_{1i} = 0$, il centro stella O_i si sposta, nel grafico vettoriale, nel vertice superiore del triangolo e diventa il centro stella reale O_r.

La **tensione omopolare** è così definita (vedasi Allegato 1):

$$\dot{V}_{0ior} = \frac{\dot{E}_{1r} + \dot{E}_{2r} + \dot{E}_{3r}}{3}$$

In tali condizioni le fasi 2 e 3 assumono, rispetto a terra, il valore della tensione concatenata.

Infatti:

$$\dot{V}_{12} = \dot{E}_{1r} - \dot{E}_{2r} = 0 - \dot{E}_{2r} = -\dot{E}_{2r}$$

$$\dot{V}_{31} = \dot{E}_{3r} - \dot{E}_{1r} = \dot{E}_{3r} - 0 = \dot{E}_{3r}$$

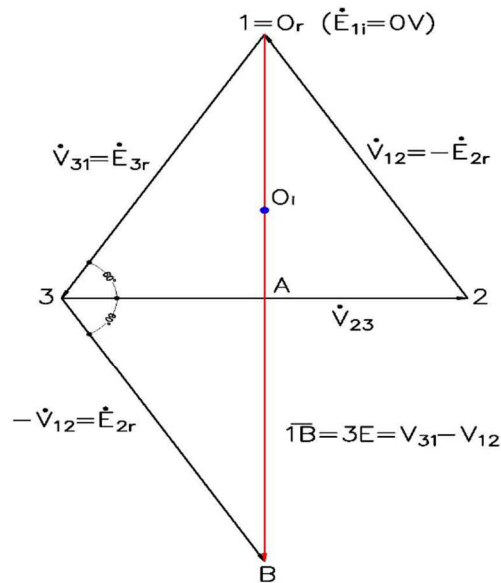


Fig.3—Sistema Simmetrico ed Equilibrato con Guasto della Fase 1 a Terra
 O_i =Centro Stella Ideale
 O_r =Centro Stella Reale (Condizione di Guasto)

Quindi

$$\dot{V}_{0ior} = \frac{-\dot{V}_{12} + \dot{V}_{31}}{3}$$

E dalla figura 3 ricaviamo che il vettore $-\dot{V}_{12} + \dot{V}_{31}$ è uguale al segmento 1B, per cui:

$$-\dot{V}_{12} + \dot{V}_{31} = 1A + AB$$

Dai triangoli rettangoli A3B e A12 di figura 3 abbiamo:

$$AB = -V_{12} \text{sen} \frac{\pi}{3} = -V_{12} \frac{\sqrt{3}}{2}; \quad 1A = V_{31} \text{sen} \frac{\pi}{3} = V_{31} \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$AB + 1A = \frac{\sqrt{3}}{2} (V_{21} + V_{31}) = \frac{\sqrt{3}}{2} (\sqrt{3}E + \sqrt{3}E) = \frac{\sqrt{3}}{2} (2\sqrt{3}E) = 3E$$

Per cui la tensione omopolare sarà (il vettore $\overline{1B}$ è in opposizione di fase):

$$\dot{V}_{0ior} = \frac{-\dot{V}_{12} + \dot{V}_{31}}{3} = \frac{-3\dot{E}}{3} = -\dot{E}_{1i}$$

In definitiva quindi, la tensione omopolare al primario del trasformatore assume il valore della tensione stellata del sistema, figura 4.

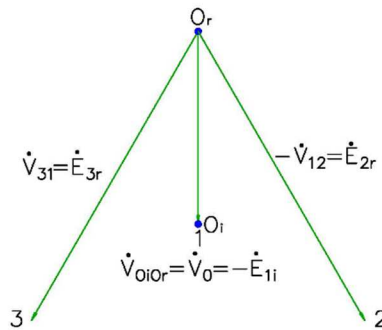


Fig.4—Tensioni Stellate con Guasto della Fase 1 a Terra
 O_i =Centro Stella Ideale
 O_r =Centro Stella Reale in Condizione di Guasto

Il TV per il rilievo della tensione omopolare è del tipo con primario collegato a stella e secondario a triangolo aperto.

In assenza di guasto, la tensione su ogni avvolgimento primario è pari alla stellata $\frac{V}{\sqrt{3}}$, mentre su ogni avvolgimento secondario si hanno $\frac{100}{3}$ Volt perchè il TV ha sempre al secondario una tensione di 100 Volt. Poiché le tre tensioni secondarie sono in tal caso sfasate di 120° , la tensione misurata ai terminali del triangolo aperto, che è la somma vettoriale, è nulla.

In presenza del guasto, fase 1 a terra, la tensione sulle due fasi non interessate dal guasto è $\sqrt{3}$ volte maggiore, figura 4. Ai capi del triangolo secondario aperto si ha allora la somma vettoriale di due tensioni pari a $\sqrt{3} \frac{100}{3}$ Volt tra loro sfasate di 60° , che è lo sfasamento delle concatenate primarie \dot{V}_{12} e \dot{V}_{31} che corrispondono, rispettivamente a $-\dot{E}_{2r}$ ed \dot{E}_{3r} nella situazione di guasto. (vedi diagonale vettoriale figura 3).

In definitiva si ha:

$$|V_{0ior}| = \frac{100}{3} \sqrt{3} \frac{\sqrt{3}}{2} 2 = 100 \text{ Volt}$$

Il TV, come detto, durante il guasto franco a terra sulla MT ha gli avvolgimenti primari sottoposti ad una tensione pari a $\sqrt{3}$ volte la tensione nominale.

Per questo la norma CEI 0-16 richiede per il TV omopolare un fattore di tensione pari a 1,9 per 30 secondi. Quando si deve impostare la regolazione fornita dal Distributore (p.e. $V_0 = 520$ Volt primari cioè lato MT) della tensione omopolare per la protezione direzionale di terra 67N vuol dire che all'ingresso del relè di protezione si ha una tensione $V_{relè}$ così calcolata ($V_{relè}$ è la soglia di tensione omopolare della 67N):

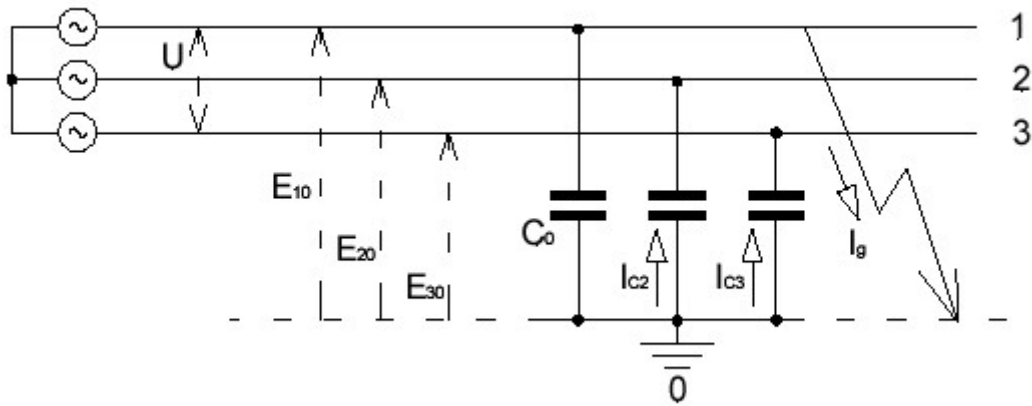
$$\frac{100}{V} \sqrt{3} = \frac{V_{relè}}{V_0}$$

cioè

$$V_{relè} = 100 V_0 \frac{\sqrt{3}}{V}$$

Nell'esempio se $V = 15$ kVolt, allora $V_{rete} = 100 \times 520 \times \frac{1,73}{15000} = 6$ Volt

Corrente omopolare: definizione e circuito di misura



Nelle condizioni di guasto illustrate nello schema di figura precedente si ha il seguente diagramma vettoriale

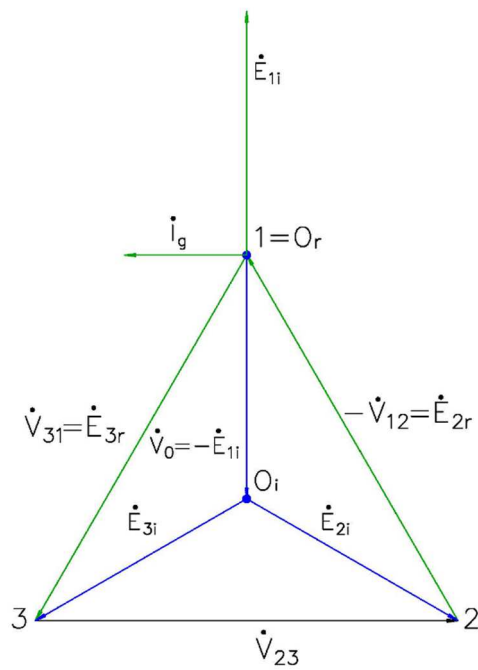


Fig.5

$$I_g = I_{c2} + I_{c3}$$

La tensione ai morsetti di C è (la I_{c2} entra dal basso ed il centro stella è sulla fase 1 essendo questa a terra e quindi la tensione ai morsetti della capacità inserita tra la fase 1 e la terra è nulla):

$$\dot{V}_{21} + \dot{V}_C = 0 \text{ da cui } \dot{V}_C = -\dot{V}_{21} = \dot{V}_{12}$$

$$I_{c2} = \frac{\dot{V}_{12}}{-jX_c} = j\omega C_0 \dot{V}_{12}$$

Analogamente

$$\dot{V}_{31} + \dot{V}_C = 0 \text{ da cui } \dot{V}_C = -\dot{V}_{31} = \dot{V}_{13}$$

$$I_{c3} = \frac{\dot{V}_{13}}{-jX_c} = j\omega C_0 \dot{V}_{13}$$

Quindi:

$$\dot{I}_g = \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{c3} = j\omega C_0(\dot{V}_{12} + \dot{V}_{13}) = j\omega C_0(\dot{E}_{1i} - \dot{E}_{2i} + \dot{E}_{1i} - \dot{E}_{3i}) = j\omega C_0(2\dot{E}_{1i} - \dot{E}_{2i} - \dot{E}_{3i})$$

e da $\dot{E}_{1i} + \dot{E}_{2i} + \dot{E}_{3i} = 0$, sistema simmetrico, ricaviamo $-\dot{E}_{2i} - \dot{E}_{3i} = \dot{E}_{1i}$ per cui si ha:

$$\dot{I}_g = 3\dot{E}_{1i}j\omega C_0 = -j\omega C_0 3\dot{V}_0$$

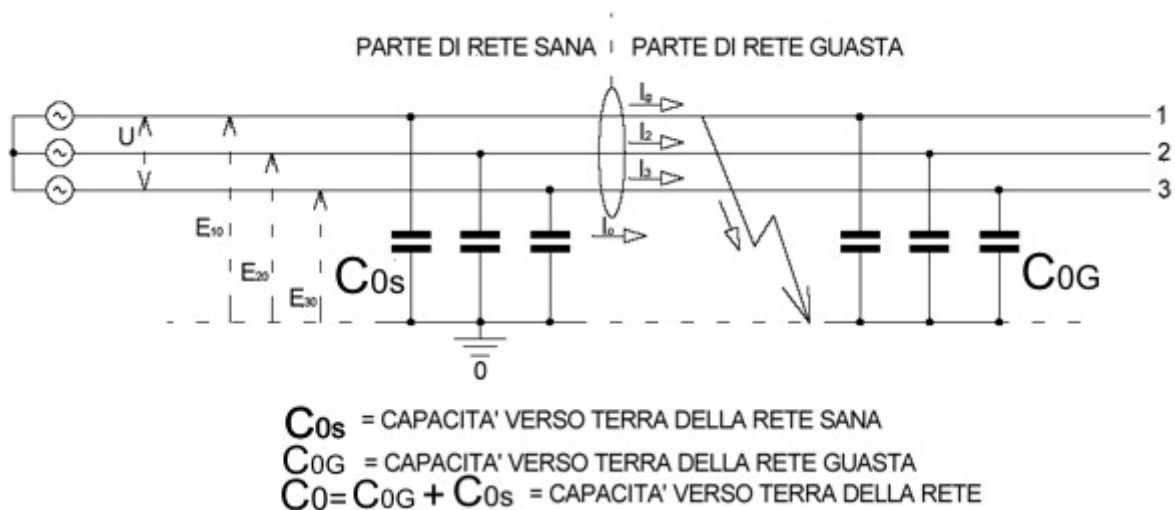
(da pag. 3 $\dot{V}_{0ior} = \dot{V}_0 = \frac{-\dot{V}_{12} + \dot{V}_{31}}{3} = \frac{-3\dot{E}}{3} = -\dot{E}_{1i}$)

La cosa più importante da sottolineare è che **la corrente di guasto I_g è indipendente dal punto di guasto all'interno della rete**, ma dipende solo dalla sua capacità complessiva verso terra $3C_0$ (ovviamente a parità di tensione nominale di esercizio).

Si consideri ora un punto generico della rete dove, per esempio, si abbia un guasto franco a terra della fase 1, ed immaginiamo di dividere la rete in due parti, una a valle ed una a monte di tale punto di guasto. La situazione è rappresentata nello schema seguente.

Guasto franco a terra (a valle)

p.e. della fase 1 è:



Per definizione la corrente omopolare vale

$$\dot{I}_0 = \frac{1}{3}(\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3)$$

Ed essendo $\dot{I}_1 = \dot{I}_g$, abbiamo

$$\dot{I}_0 = \frac{1}{3}(\dot{I}_g + \dot{I}_2 + \dot{I}_3)$$

e ricordando le relazioni:

$$\begin{aligned} \dot{I}_g &= 3\dot{E}_{1i}j\omega C_0 \\ \dot{I}_2 &= \dot{I}_{c2} = j\omega C_{0G}\dot{V}_{12} = j\omega C_{0G}(\dot{E}_{1i} - \dot{E}_{2i}) \\ \dot{I}_3 &= \dot{I}_{c3} = j\omega C_{0G}\dot{V}_{13} = j\omega C_{0G}(\dot{E}_{1i} - \dot{E}_{3i}) \end{aligned}$$

Abbiamo:

$$\begin{aligned} i_0 &= \frac{1}{3} [j\omega C_0 3\dot{E}_{1i} + j\omega C_{0G}(\dot{E}_{1i} - \dot{E}_{2i}) + j\omega C_{0G}(\dot{E}_{1i} - \dot{E}_{3i})] \\ &= \frac{1}{3} (j\omega C_0 3\dot{E}_{1i} + j\omega C_{0G}\dot{E}_{1i} - j\omega C_{0G}\dot{E}_{2i} + j\omega C_{0G}\dot{E}_{1i} - j\omega C_{0G}\dot{E}_{3i}) \\ &= \frac{1}{3} [j\omega C_0 3\dot{E}_{1i} + 2j\omega C_{0G}\dot{E}_{1i} + j\omega C_{0G}(-\dot{E}_{2i} - \dot{E}_{3i})] \end{aligned}$$

e rammentando che

$$\dot{E}_{1i} + \dot{E}_{2i} + \dot{E}_{3i} = 0 \text{ da cui } \dot{E}_{1i} = -\dot{E}_{2i} - \dot{E}_{3i}$$

si ottiene

$$\dot{i}_0 = \frac{1}{3} (j\omega C_0 3\dot{E}_{1i} - j\omega C_{0G} 3\dot{E}_{1i}) = j\omega \dot{E}_{1i} (C_0 - C_G)$$

In termini tecnici si usa dire che la corrente omopolare nella sezione in esame è fornita dalla parte di rete sana a monte (il guasto è localizzato a valle) di capacità equivalente $C_{0S} = C_0 - C_G$.

Il diagramma vettoriale delle tensioni e correnti omopolari è quello sottostante:

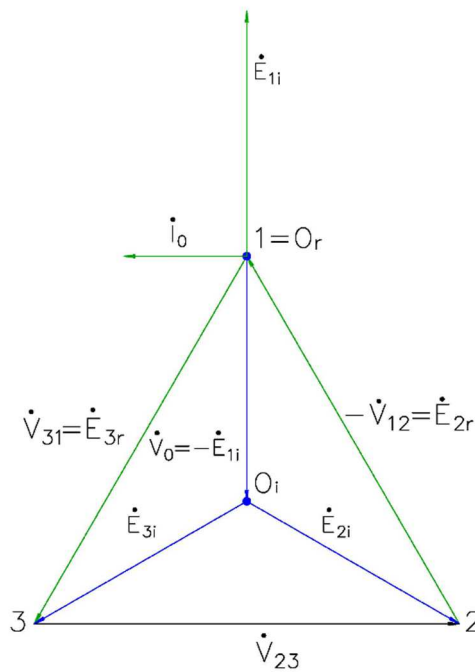
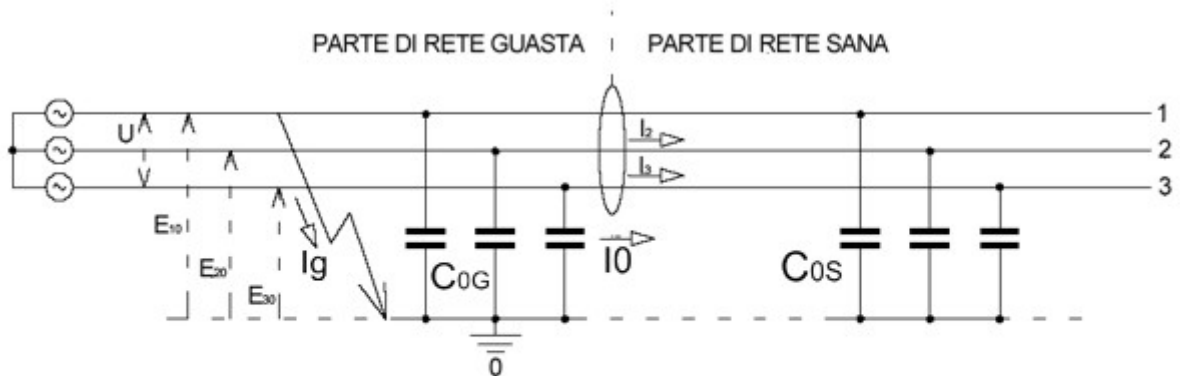


Fig.6

Se consideriamo la solita sezione di rete, ma con un

Guasto franco a terra (a monte)

p.e. della fase 1, si ha la situazione in figura:



C_{0S} = CAPACITA' VERSO TERRA DELLA RETE SANA
 C_{0G} = CAPACITA' VERSO TERRA DELLA RETE GUASTA
 $C_0 = C_{0S} + C_{0G}$ = CAPACITA' VERSO TERRA DELLA RETE

La solita definizione della corrente omopolare, nella sezione di rete sana, fornisce ora

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_2 + i_3)$$

e ricordando la relazione della corrente di guasto a terra si ottiene

$$i_0 = \frac{1}{3}[j\omega C_{0S}(\dot{E}_{20} - \dot{E}_{10}) + j\omega C_{0S}(\dot{E}_{30} - \dot{E}_{10})]$$

e ricordando che

$$\dot{E}_{10} + \dot{E}_{20} + \dot{E}_{30} = 0$$

in conclusione è

$$i_0 = \frac{1}{3}(-j\omega C_{0S}3\dot{E}_{10}) = -j\omega C_{0S}\dot{E}_{10}$$

Anche in questo caso la corrente omopolare nella sezione di rete in esame è fornita dalla parte di rete sana a valle (il guasto è localizzato a monte) di capacità equivalente C_{0S} .

Il relativo diagramma vettoriale risulta:

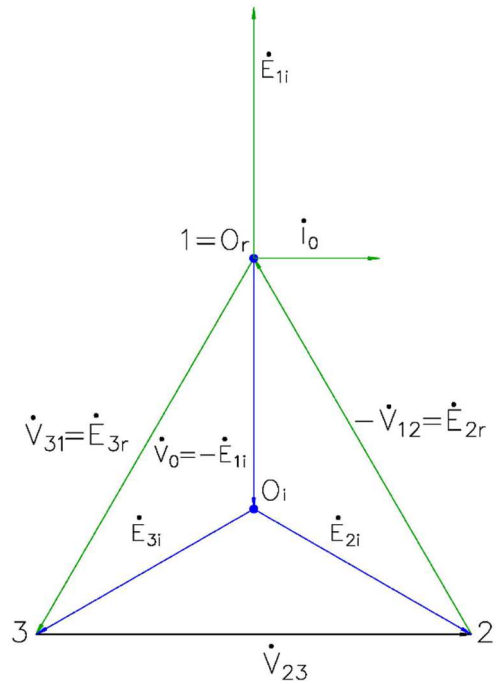


Fig. 7

È perciò evidente che si può distinguere la posizione del guasto rispetto al punto della rete in cui è posizionato il rilevatore di corrente omopolare semplicemente esaminando la relazione di fase della corrente omopolare con la tensione omopolare già definita al primo paragrafo:

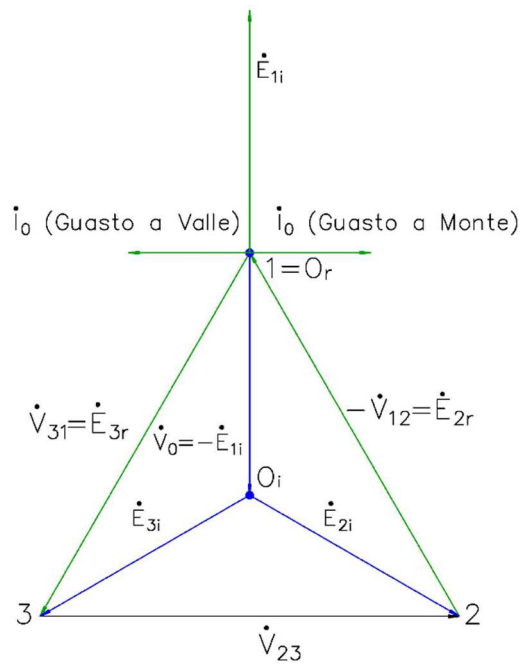


Fig. 8

In pratica questo compito viene svolto dal relè di protezione.

Dispositivi di protezione

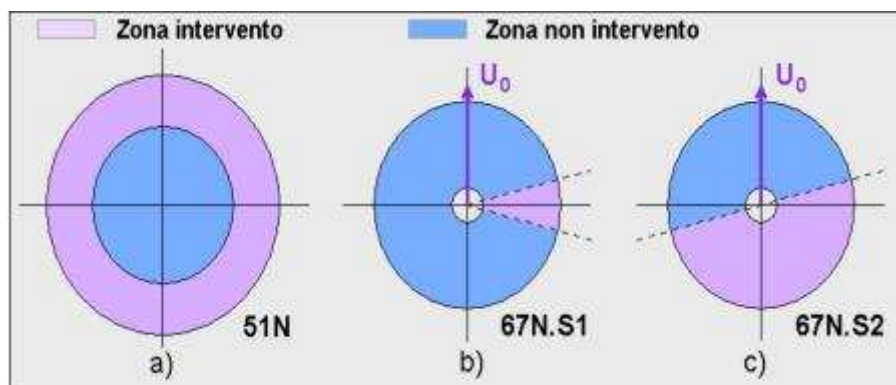


Fig. 11 – Dispositivi di protezione contro i guasti a terra

Affinché i guasti che si verificano sull'impianto dell'utente non abbiano ripercussioni sull'esercizio di tutta la rete, l'utente deve predisporre delle protezioni generali di massima corrente e contro i guasti a terra:

- protezione 50-51, relè di massima corrente per far fronte alle sovracorrenti di fase;
- protezione 51N, relè di massima corrente omopolare per la rimozione dei guasti monofase a terra;
- protezione 67N, relè direzionali di terra per la rimozione dei guasti monofase a terra

Siccome durante il normale esercizio della propria rete il Distributore può modificare senza preavviso lo stato del neutro le protezioni contro i guasti a terra (fig. 11) devono poter funzionare correttamente indipendentemente dallo stato del neutro.

La scelta del sistema di gestione del neutro comporta dover scegliere un sistema di protezione il più possibile idoneo al tipo di impianto che si intende proteggere da cortocircuito. In altre parole le caratteristiche delle protezioni devono essere diverse a seconda di come si decide di gestire il neutro in un impianto elettrico. Quindi il sistema di protezione deve adeguarsi al variare dello stato di gestione del neutro. La scelta del sistema di protezione (e delle sue caratteristiche) più idoneo a proteggere un impianto che può essere gestito con neutro isolato, oppure con neutro connesso a terra tramite resistenza, tramite induttanza ecc. viene denominata adeguamento del sistema di protezione all'impianto da proteggere.

Per proteggere un impianto da un guasto monofase a terra si utilizzano apposite protezioni note con il nome di relè di terra. In particolare i due tipi di protezioni che si devono usare in media tensione sono noti come:

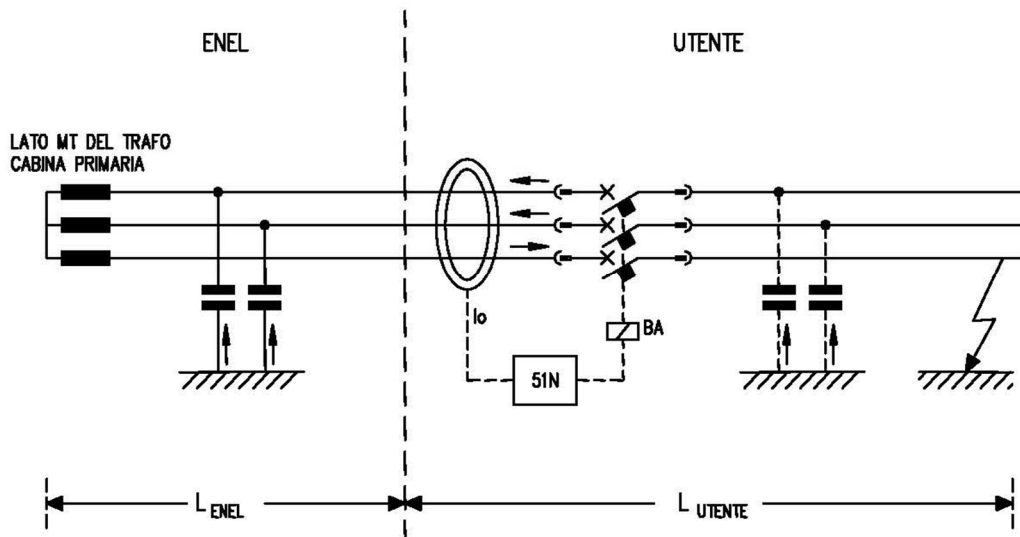
- *Relè di massima corrente omopolare 51N*
- *Relè direzionale di terra 67N*

Per garantire una efficace protezione contro il guasto fase terra le norme impongono l'utilizzo o del solo relè di massima protezione 51N, oppure l'utilizzo sia della protezione 51N sia della protezione direzionale 67N. Per stabilire ciò si devono valutare opportune considerazioni, che tratteremo nei paragrafi successivi.

Come premessa esaminiamo il principio di funzionamento delle due protezioni.

Relè di massima corrente omopolare 51n

Lo schema di principio di questo tipo di protezione è riportato qui di seguito:



La protezione 51N deve essere alimentata tramite un riduttore di corrente (TA) toroidale omopolare, il quale deve essere in grado di riprodurre al secondario anche la massima corrente di cortocircuito in caso di doppio guasto a terra su linee diverse. In regime di normale funzionamento la somma vettoriale delle correnti nelle tre fasi è nulla; di conseguenza risulta nullo pure il flusso magnetico da esse prodotto. In regime di guasto a terra la somma vettoriale delle tre correnti di fase è diversa da zero. Ciò comporta che il flusso magnetico risultante da esse prodotto si concatena con l'avvolgimento secondario del riduttore toroidale, dando luogo ad una corrente non nulla.

La corrente omopolare così generata viene percepita dalla protezione 51N, la quale eccita una bobina (nella figura indicata con BA) la quale determina l'intervento delle protezioni e quindi l'interruzione del circuito.

Le caratteristiche del TA toroidale omopolare indicate dall'ENEL sono le seguenti:

Rapporto 100/1

Classe 5P20

Corrente Nominale Primaria 100 (A)

Errore < 5%

Generalmente la protezione 51N è tarata ad una corrente I_0 pari a 2 A con una soglia di sicurezza prevista pari al 70%.

I relè per la protezione di massima corrente omopolare, identificabili con la sigla 51N, rilevano le correnti di guasto verso terra. La caratteristica di intervento (fig. 11a) individua due zone, una di blocco e una di funzionamento. Per valori di corrente inferiori alla sensibilità del dispositivo, la corrente si trova nella zona di blocco e il relè non interviene, per correnti superiori, se il vettore corrente si trova nella zona di funzionamento, dopo un tempo prefissato, si ha l'intervento del dispositivo di protezione. Secondo la Norma CEI 0-16 deve possedere due soglie di regolazione non inferiori ai seguenti limiti:

Reti a neutro isolato

prima soglia, $I_0 >$ (impiegata solo in assenza della 67N):

- valore 2 A;
- tempo di estinzione del guasto: 170 ms;

seconda soglia, $I_0 >>$ (impiegata solo con presenza della 67N):

- valore 140% della corrente di guasto monofase a terra comunicata dal Distributore;
- tempo di estinzione del guasto: 170 ms (salvo casi particolari di coordinamento selettivo tra le protezioni MT di utenza basate su scambio di informazioni)

Reti a neutro compensato

prima soglia, $I_{0>}$ (impiegata solo in assenza della 67N):

- valore 2 A;
- tempo di estinzione del guasto: 450 ms (salvo i casi di Utenti con DG semplificato in impianto passivo con trasformatore MT/BT di potenza nominale pari o inferiore a 400 kVA, per i quali il tempo ammissibile per la completa estinzione del guasto a terra da parte del DG è elevabile a 800 ms);

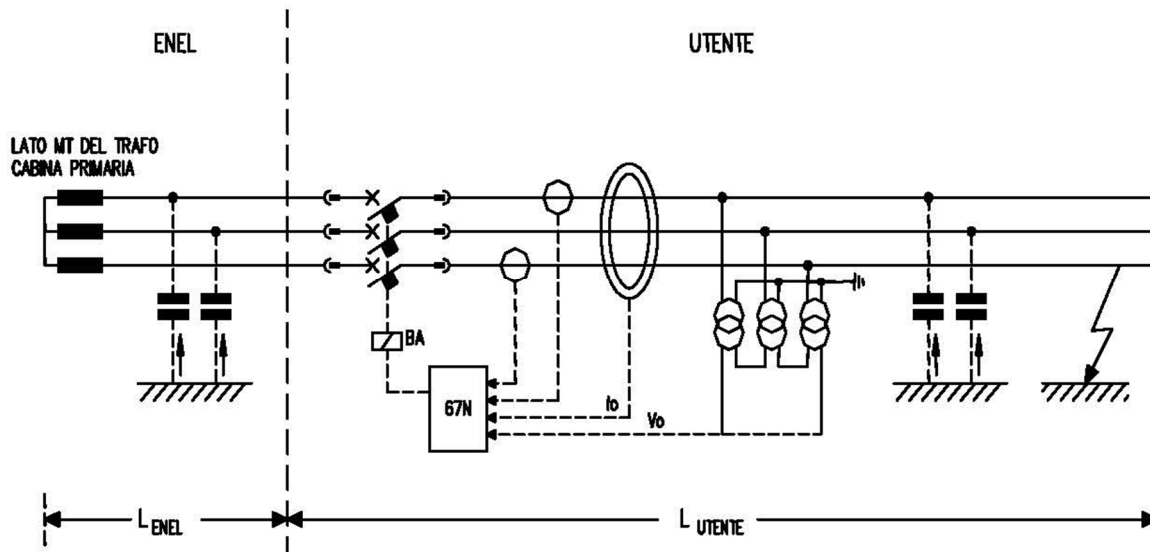
seconda soglia $I_{0>>}$ (sempre presente anche con 67 N):

- valore 140 % della corrente di guasto monofase a terra comunicata dal Distributore (tipicamente, 70 A reti a 20 kV e 56 A per reti a 15 kV);
- tempo di estinzione del guasto: 170 ms (salvo casi particolari di coordinamento selettivo tra le protezioni MT di utenza basate su scambio di informazioni)

In alternativa alle regolazioni sopra esposte, per gli utenti di reti a neutro compensato che non necessitano della protezione 67N, può essere impiegata la sola soglia $I_{0>}$, con le seguenti regolazioni: valore 2 A; tempo di estinzione del guasto: 170 ms.

Relè direzionale di terra 67n

Lo schema di principio di questo tipo di protezione e riportato qui di seguito:



La struttura generale ed il principio di funzionamento risultano più complessi della protezione precedente. Per prima cosa notiamo che anche questa protezione è provvista di un **riduttore di corrente toroidale** (TA) omopolare del tutto analogo, sia per caratteristiche costruttive che per modo di funzionare, della 51N. Oltre che un TA toroidale atto alla rilevazione della corrente I_0 omopolare presente in caso di guasto a terra sono previsti anche due **riduttori di corrente di fase**, in grado di riprodurre al secondario una corrente proporzionale alla corrente presente nella rispettiva fase. L'ENEL prevede per i suddetti TA di fase le seguenti caratteristiche:

Rapporto 300/5
Classe 10P30
Errore < 10 %

La protezione 67N oltre che a misurare la corrente residua omopolare in caso di guasto a terra **deve misurare anche la tensione residua V_0** . A tal fine si devono impiegare **tre riduttori di tensione** con polo a terra e con secondario collegato a triangolo aperto; connessi rigidamente alle sbarre di MT. I tre secondari dei TV risultano connessi in serie, per cui ognuno di essi presenterà al secondario una tensione circa pari a $100/3$ V. In regime di normale funzionamento la somma vettoriale delle tre tensioni presenti sui secondari dei TV è nulla, la protezione rileva in tal caso una tensione omopolare V_0 nulla. In caso di guasto fase terra la somma delle tensioni presenti nei tre secondari dà un risultato non nullo ed in caso di totale annullamento di una tensione rispetto a terra la tensione risultante è pari a 100 V. Una volta rilevati il vettore corrente omopolare I_0 , il vettore tensione omopolare V_0 ed il loro sfasamento d la protezione è in grado di stimare la potenza messa in gioco, la quale sarà pari a $P_0 = V_0 I_0 \cos d$.

Il segno di tale potenza (positiva o negativa) consente al relè 67N di stabilire la direzione della corrente di guasto, e quindi di stabilire se il guasto è avvenuto a monte o a valle di essa. Proprio per questa sua proprietà la protezione 67N viene denominata **relè direzionale di terra**. Dovendo essere le protezioni selettive, è logico che il relè direzionale 67N comanderà l'apertura del circuito solo in presenza di guasti a terra **presenti a valle** di essa. Il relè può essere così tarato in tensione, corrente e angolo. L'angolo d dipende dal tipo e dalle caratteristiche della rete, in particolare dal sistema di gestione del neutro. Recentemente vengono sempre più richiesti relè direzionali di terra dotati di due tarature diverse sempre attive, questo perché lo stato del neutro della rete MT può subire repentini mutamenti, ed il più delle volte senza alcun preavviso.

I relè direzionali di terra, identificabili con la sigla 67N, effettuano il confronto in modulo e fase della corrente omopolare rispetto alla tensione omopolare. Una prerogativa di questo dispositivo, rispetto al relè 51N, è quella di intervenire solo per guasti interni alla linea protetta e di essere invece insensibile ai guasti che si manifestano sulle altre linee. Si ha l'intervento quando, in relazione alla tensione omopolare rilevata V_0 , la corrente omopolare I_0 si trova in ritardo, mentre quando il guasto si è verificato su un'altra linea, diversa da quella protetta con il relè direzionale, la corrente I_0 risulta in anticipo rispetto la tensione e non si ha l'intervento.

La curva di intervento è caratterizzata da due zone:

- zona di non intervento, se il vettore corrente si trova in questa zona significa che il guasto è avvenuto su una linea diversa da quella protetta e il relè non interviene;
- zona di intervento, se la corrente e la tensione omopolare hanno superato il limite imposto e l'angolo di sfasamento fra tensione e corrente è compreso in un determinato intervallo si ha l'intervento del dispositivo perché questo significa che il guasto è accaduto sulla linea protetta.

La protezione 67N deve poter funzionare sia con neutro compensato (fig. 11b) sia con neutro isolato (fig. 11c) deve essere pertanto a doppia soglia (escludibili indipendentemente l'una dall'altra, il Distributore potrebbe trovarsi nella necessità di alimentare a neutro compensato o a neutro isolato), indicate rispettivamente con le sigle 67.S1 e 67.S2.

Di seguito sono riportati i valori minimi di regolazione indicati dalla Norma CEI 0-16 per la protezione direzionale di terra relativamente ai livelli di tensione maggiormente diffusi di **15 kV e 20 kV**.

67.S1 (neutro compensato):

- I_0 : 2 A
- V_0 : 5 V;
- settore di intervento (ritardo di I_0 rispetto a V_0): $60^\circ \div 250^\circ$;
- tempo di estinzione del guasto: 450 ms.

67.S2 (neutro isolato):

- I_0 : 2 A
- V_0 : 2 V;
- settore di intervento (ritardo di I_0 rispetto a V_0): $60^\circ \div 120^\circ$;
- tempo di estinzione del guasto: 170 ms.

I_0 = corrente omopolare, V_0 =tensione omopolare,

La protezione contro i guasti a terra si ottiene generalmente con il relè omopolare il quale interviene quando la somma vettoriale delle correnti che lo attraversano supera il valore impostato.

La somma vettoriale delle correnti che attraversano il relè omopolare può superare il valore impostato non solo per guasto a terra sull'impianto dell'Utente ma, se la rete MT dell'Utente è estesa, anche per guasto a terra sulla rete pubblica.

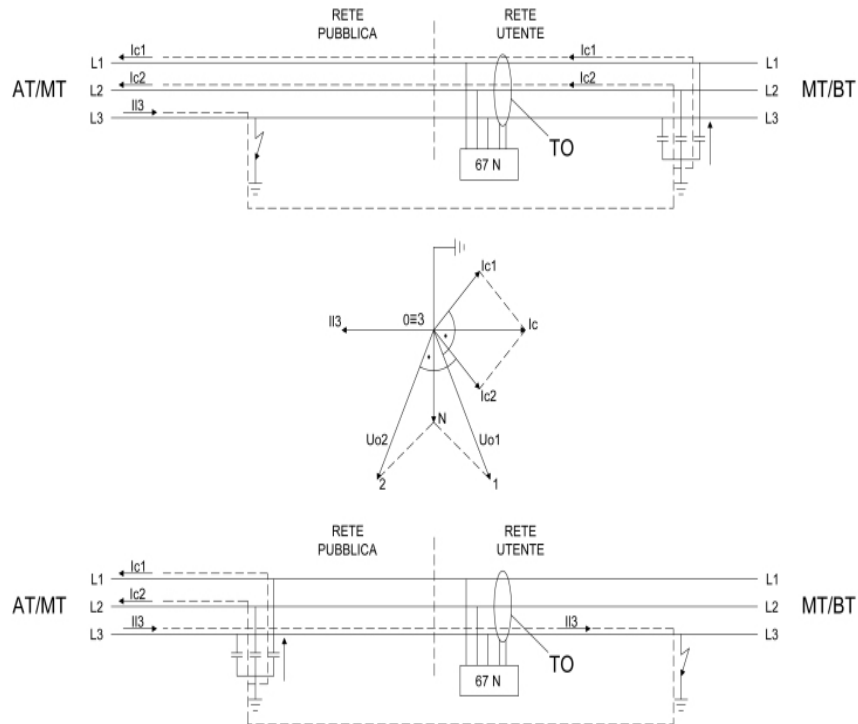


Fig. 1 Schema per corto sulla rete Distributore e per corto sulla rete Utente

In caso di cc su L_3 nella rete pubblica, le correnti capacitive I_{C2} e I_{C3} che attraversano il relè omopolare sono in ritardo rispetto alle tensioni U_{O2} e U_{O3} . La risultante I_C è in controfase rispetto la corrente di cc I_{L3} che attraversa il relè omopolare quando il cc – guasto a terra – si manifesta sulla rete Utente.

Il verso della corrente I_C che attraversa il relè omopolare di terra per un cc sulla rete di distribuzione di competenza del distributore è opposto a quello della corrente I_{L3} che attraversa lo stesso relè omopolare quando il cc si presenta sulla rete di competenza dell'Utente.

La corrente omopolare I_{L3} risulta quindi in anticipo di 90° rispetto alla tensione omopolare U_{0N} . Il relè 67N interviene solo se la corrente omopolare è in anticipo compreso nell'intervallo $60^\circ - 120^\circ$

Per evitare l'intervento della protezione Utente per guasto a monte sulla rete pubblica, serve quindi il relè direzionale di terra che oltre alla somma vettoriale delle correnti sul toroide controlla anche la tensione omopolare e l'angolo di sfasamento fra tensione omopolare e corrente omopolare. Solo il relè direzionale di terra può stabilire se il guasto è a monte o a valle.

L'angolo del settore viene misurato in senso orario a partire dal vettore della tensione omopolare U_0 .

Protezione 67N per distribuzione MT a 23 kV

Se il contributo della rete dell'Utente per guasto monofase franco a terra è inferiore a 3,2 A, il dispositivo di protezione deve essere di massima corrente omopolare a due soglie.

Massima corrente omopolare:

-I soglia $I \leq 2 \text{ A}$ $t \leq 0,5 \text{ s}$ serve per neutro compensato

-II soglia $I \leq 70 \text{ A}$ $t \leq 0,17 \text{ s}$ serve per neutro isolato

Se il contributo della rete dell'Utente per guasto monofase franco a terra è superiore a 3,2 A, il dispositivo di protezione deve essere direzionale di terra a due soglie e di massima corrente omopolare ad una soglia.

Direzionale di terra a due soglie:

-I° soglia serve per neutro isolato:

$I \leq 2 \text{ A}$ $V \leq 2 \text{ V}$ $t \leq 0,17 \text{ s}$ Settore angolare $60^\circ \div 120^\circ$

-II° soglia serve per neutro compensato:

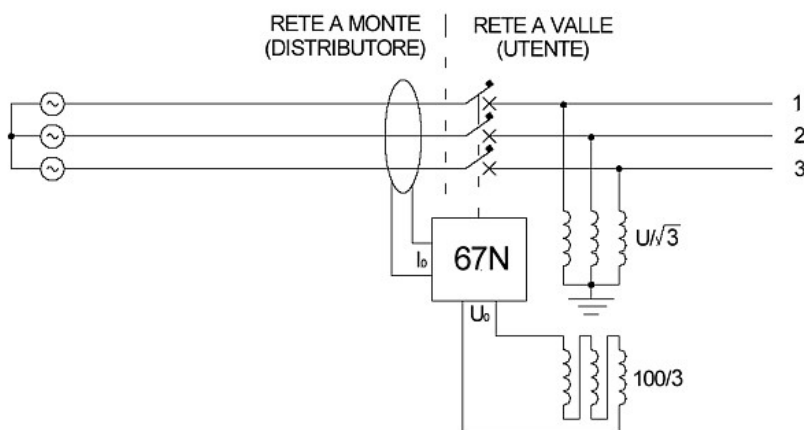
$I \leq 2 \text{ A}$ $V \leq 5 \text{ V}$ $t \leq 0,5 \text{ s}$ Settore angolare $60^\circ \div 250^\circ$

Massima corrente omopolare:

$I \leq 70 \text{ A}$ $t \leq 0,17 \text{ s}$ serve per secondo guasto a terra

Con queste tarature la protezione è funzionante sia con il neutro isolato sia con neutro compensato.

Agli effetti pratici negli impianti di distribuzione MT è importante discriminare il guasto a terra a valle (di utente) da quello a monte (del Distributore) assunto che la sezione di misura della corrente omopolare sia coincidente con il punto di consegna dell'energia (la **RTC CEI 0-16** riporta lo schema seguente):



I settori d'intervento della protezione 67N per le soglie a neutro isolato e neutro compensato riportate nella norma CEI 0-16 Allegato B sono rappresentate nelle figure seguenti:

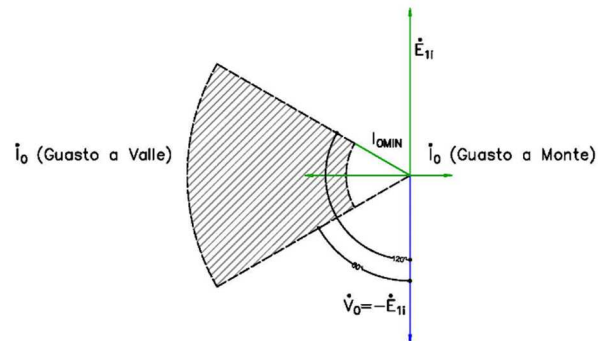


Fig.9–Settore d'Intervento Soglia S2 Neutro Isolato I_0 in Ritardo rispetto a V_0

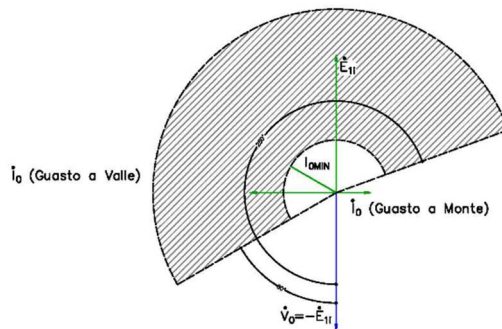
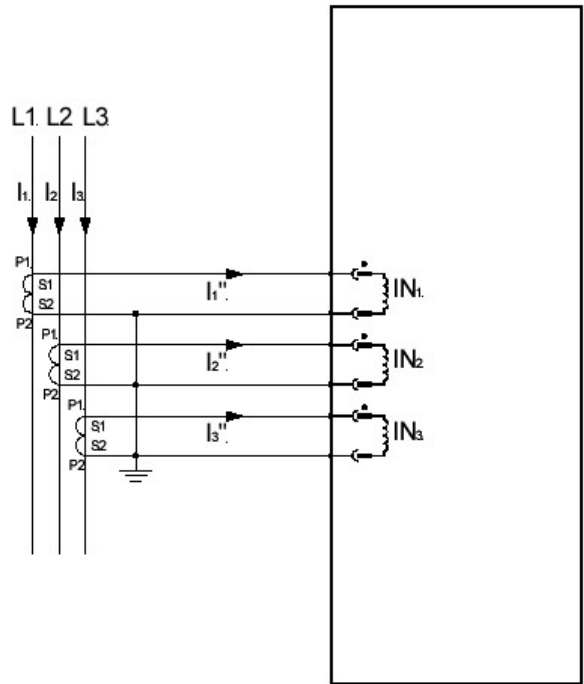


Fig.10–Settore d'Intervento Soglia S1 Neutro Compensato I_0 in Ritardo rispetto a V_0

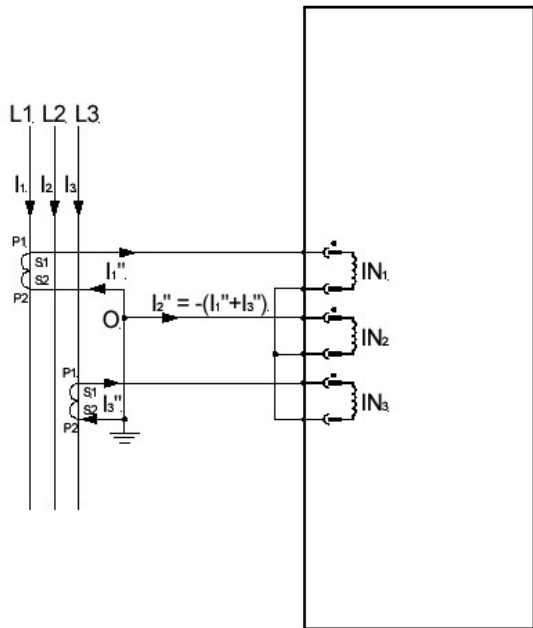
La corrente omopolare I_0 per guasto a valle del punto di consegna è rappresentata più grande di quella per guasto a monte perché la rete MT del Distributore è di regola più estesa, quindi con COS maggiore, di quella di utente.

La corrente omopolare I_{0min} rappresenta la soglia di regolazione minima sotto la quale la protezione 67N non interviene.

**Le correnti di ingresso del relè.
Collegamento con 3 TA**



Collegamento con 2 TA



Per le correnti di linea si ha : $I_1 + I_2 + I_3 = 0$
 Al nodo "O" si ha : $I_2'' = -(I_1'' + I_3'')$
 All'ingresso del relè si ha : $I_1'' + I_2'' + I_3'' = 0$

Allegato 1

Consideriamo il baricentro O_b ottenuto derivando dalla linea tre impedenze uguali \bar{Z} (figura 1). Indicando con I_{1b}, I_{2b}, I_{3b} , le correnti che percorrono tali impedenze (la loro somma per l'equazione al nodo O_b è nulla), si ha:

$$\dot{V}_{1b} + \dot{V}_{2b} + \dot{V}_{3b} = \bar{Z}(I_{1b} + I_{2b} + I_{3b}) = 0$$

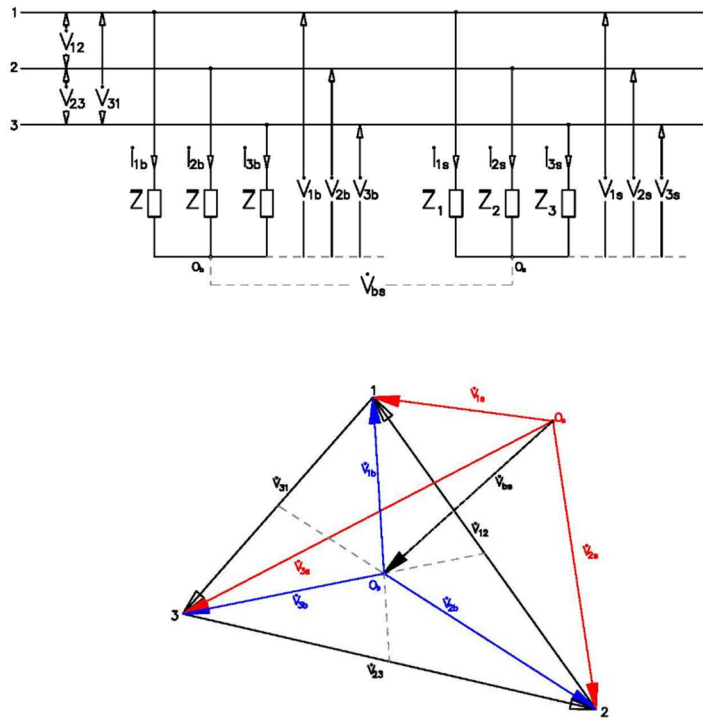


Figura 1

Vale a dire che la *terna delle tensioni baricentriche è sempre pura*. È evidente inoltre che il punto O_b coincide con il baricentro geometrico del triangolo i cui lati rappresentano le tensioni di linea.

La differenza di potenziale esistente tra il baricentro O_b del sistema ed un qualunque centro stella O_s è rappresentata nel diagramma polare della figura 1 dal vettore \dot{V}_{bs} che unisce O_s con O_b . L'espressione simbolica si deduce dalle relazioni:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{bs} + \dot{V}_{1b} &= \dot{V}_{1s} \\ \dot{V}_{bs} + \dot{V}_{2b} &= \dot{V}_{2s} \\ \dot{V}_{bs} + \dot{V}_{3b} &= \dot{V}_{3s} \end{aligned}$$

Infatti, sommandole membro a membro e ricordando che la terna baricentrica è pura, si ottiene:

$$\dot{V}_{bs} = \frac{\dot{V}_{1s} + \dot{V}_{2s} + \dot{V}_{3s}}{3}$$

Vale a dire, la *tensione \dot{V}_{bs} fra il baricentro del sistema ed un centro stella generico O_s è espressa, in termini simbolici, dalla media aritmetica delle tre tensioni stellate rispetto ad O_s .*

La formula:

$$\dot{V}_{bs} = \frac{\dot{V}_{1s} + \dot{V}_{2s} + \dot{V}_{3s}}{3}$$

consente di stabilire delle semplici relazioni tramite le quali si possono esprimere le *tensioni stellate baricentriche in funzione delle tensioni di linea*. Supponiamo, essendo il centro stella O_s arbitrario, di far coincidere O_s con il vertice 1 del triangolo di figura 1. Le tensioni stellate rispetto a tale centro stella saranno:

$$\dot{V}_{1s}^{(1)} = 0$$

$$\dot{V}_{2s}^{(1)} = -\dot{V}_{12}$$

$$\dot{V}_{3s}^{(1)} = \dot{V}_{31}$$

sostituendo otteniamo

$$\dot{V}_{bs}^{(1)} = \frac{\dot{V}_{1s}^{(1)} + \dot{V}_{2s}^{(1)} + \dot{V}_{3s}^{(1)}}{3} = \frac{-\dot{V}_{12} + \dot{V}_{31}}{3}$$

e poiché $\dot{V}_{bs}^{(1)}$ non è altro che l'opposto della tensione stellata baricentrica \dot{V}_{1b} , si ha:

$$\dot{V}_{bs}^{(1)} = \frac{-\dot{V}_{12} + \dot{V}_{31}}{3} = -\dot{V}_{1b}$$

ed infine

$$\dot{V}_{1b} = \frac{\dot{V}_{12} - \dot{V}_{31}}{3}$$

Banalmente, con analogo procedimento, è cioè facendo coincidere O_s con i vertici 2 e 3 del triangolo delle tensioni di linea, otteniamo:

$$\dot{V}_{2b} = \frac{\dot{V}_{23} - \dot{V}_{12}}{3}$$

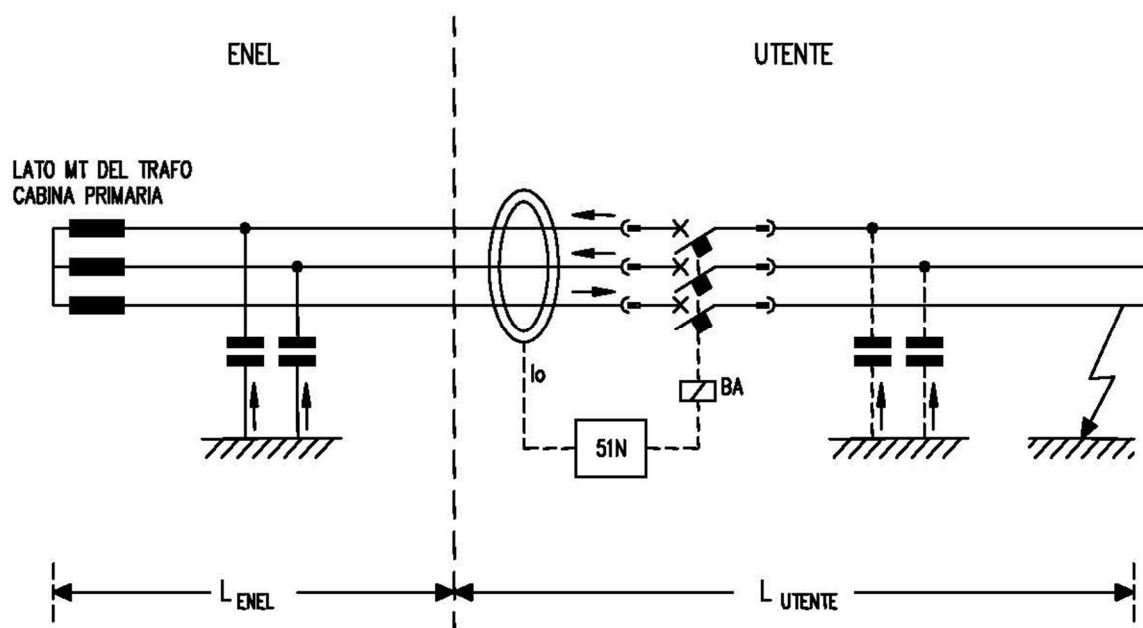
$$\dot{V}_{3b} = \frac{\dot{V}_{31} - \dot{V}_{23}}{3}$$

Sommario

Tensione e corrente omopolare: definizioni e misure	2
La tensione omopolare: definizione e circuito di misura	2
Corrente omopolare: definizione e circuito di misura	5
Guasto franco a terra (a valle)	6
Guasto franco a terra (a monte)	8
67N: direzionale di terra	Errore. Il segnalibro non è definito.
Dispositivi di protezione	Errore. Il segnalibro non è definito.
Sommario	20

5.1 Rele' di massima corrente omopolare 51n

Lo schema di principio di questo tipo di protezione e riportato qui di seguito:



La protezione 51N deve essere alimentata tramite un riduttore di corrente (TA) toroidale omopolare,

il quale deve essere in grado di riprodurre al secondario anche la massima corrente di cortocircuito in caso di doppio guasto a terra su linee diverse. In regime di normale funzionamento la somma vettoriale delle correnti nelle tre fasi e nulla; di conseguenza risulta nullo pure il flusso magnetico da esse prodotto. In regime di guasto a terra la somma vettoriale delle tre correnti di fase è diversa da zero. Ciò comporta che il flusso magnetico risultante da esse prodotto si concatena con l'avvolgimento secondario del riduttore toroidale, dando luogo ad una corrente non nulla.

La corrente omopolare così generata viene percepita dalla protezione 51N, la quale eccita una bobina (nella figura indicata con BA) la quale determina l'intervento delle protezioni e quindi l'interruzione del circuito.

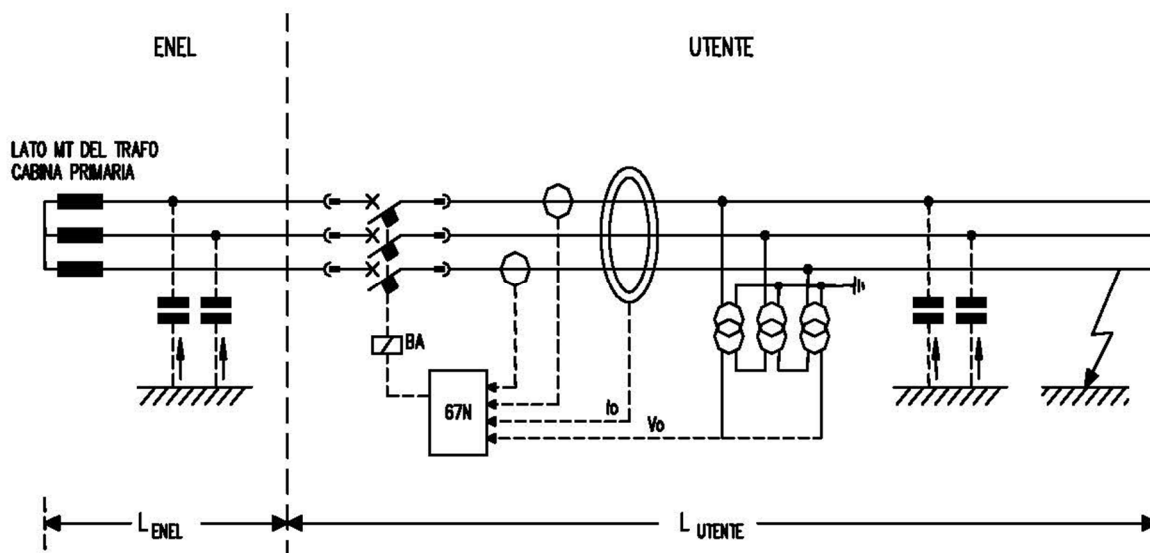
Le caratteristiche del TA toroidale omopolare indicate dall' ENEL sono le seguenti

- RAPPORTO 100/1
- CLASSE 5P20
- CORRENTE NOMINALE PRIMARIA 100 (A)
- ERRORE < 5%

Generalmente la protezione 51N è tarata ad una corrente I_0 pari a 2 (A) con una soglia di sicurezza prevista pari al 70 %.

5.2 Rele' direzionale di terra 67n

Lo schema di principio di questo tipo di protezione è riportato qui di seguito:



La struttura generale ed il principio di funzionamento risultano più complessi della protezione precedente. Per prima cosa notiamo che anche questa protezione è provvista di un riduttore di corrente toroidale (TA) omopolare del tutto analogo, sia per caratteristiche costruttive che per modo di funzionare, della 51N. Oltre che un TA toroidale atto alla rilevazione della corrente I_0 omopolare presente in caso di guasto a terra sono previsti anche due riduttori di corrente di fase, in grado di riprodurre al secondario una corrente proporzionale alla corrente presente nella rispettiva fase. L' ENEL prevede per i suddetti TA di fase le seguenti caratteristiche:

- RAPPORTO 300/5
- CLASSE 10P30
- ERRORE < 10 %

Adeguamento del sistema di protezione

La protezione 67N oltre che a misurare la corrente residua omopolare in caso di guasto a terra

deve misurare anche la tensione residua V_o . A tal fine si devono impiegare tre riduttori di tensione

con polo a terra e con secondario collegato a triangolo aperto; connessi rigidamente alle sbarre di MT. I tre secondari dei TV risultano connessi in serie, per cui ognuno di essi presenterà al secondario una tensione circa pari a $100/3$ V. In regime di normale funzionamento la somma vettoriale delle tre tensioni presenti sui secondari dei TV è nulla, la protezione rileva in tal caso una tensione omopolare V_o nulla. In caso di guasto fase terra la somma delle tensioni presenti nei tre secondari danno un risultato non nullo ed in caso di totale annullamento di una tensione rispetto a terra la tensione risultante è pari a 100 V. Una volta rilevati il vettore corrente omopolare I_o , il vettore tensione omopolare V_o ed il loro sfasamento δ la protezione è in grado di stimare la potenza messa in gioco, la quale sarà pari a $P_o = V_o \cdot I_o \cdot \cos\delta$.

Il segno di tale potenza (positiva o negativa) consente al rele 67N di stabilire la direzione della corrente di guasto, e quindi di stabilire se il guasto è avvenuto a monte o a valle di essa. Proprio per questa sua proprietà la protezione 67N viene denominata **rele direzionale di terra**. Dovendo essere le protezioni selettive, è logico che il rele direzionale 67N comanderà l'apertura del circuito solo in presenza di guasti a terra presenti a valle di essa. Il rele può essere così tarato in tensione, corrente e angolo. L'angolo δ dipende dal tipo e dalle caratteristiche della rete, in particolare dal sistema di gestione del neutro. Recentemente vengono sempre più richiesti rele direzionali di terra dotati di due tarature diverse sempre attive, questo perché lo stato del neutro delle rete MT può subire repentini mutamenti, ed il più delle volte senza alcun preavviso.