

APPENDICE A: Guasti Monofase a Terra

A.1 INTRODUZIONE

Nella presente Appendice verranno esposti alcuni riferimenti teorici riguardanti guasti monofasi a terra e le grandezze da cui questi dipendono.

Nel paragrafo A.2 vengono elencate le grandezze dalle quali un guasto in genere dipende. Al fine di conoscere le grandezze caratterizzanti il guasto monofase è necessaria la conoscenza dello stato del neutro; tuttavia è possibile ricavare delle espressioni analitiche generali, per es., delle grandezze omopolari, valide per le diverse modalità con cui il neutro è esercito (par. A.2.1).

Inoltre, nel par. A.3 sono evidenziate le motivazioni fondamentali che inducono oggi a preferire l'esercizio della rete con neutro compensato rispetto a quello con neutro isolato.

Infine, nel par. A.4 è ricavata una relazione in grado di definire quale sia la massima resistenza di guasto oltre la quale il guasto stesso non può essere individuato dalle protezioni.

A.2 GRANDEZZE DA CUI UN GUASTO MONOFASE DIPENDE

Ogniqualevolta si verifichi un guasto monofase a terra in un sistema trifase simmetrico ed equilibrato, questo altera la simmetria e l'equilibrio delle fasi. Per tale motivo l'analisi delle grandezze di guasto deve essere eseguita col metodo dei componenti simmetrici ed, in particolare, nei casi presi in esame bisognerà riferirsi alle componenti omopolari.

Dato che generalmente le linee MT hanno lunghezza limitata, si ha che l'impedenza longitudinale delle stesse può, in genere, essere trascurata se confrontata con l'impedenza capacitiva verso terra.

Ciò che rende differente un guasto a terra da un altro è, sostanzialmente:

- Tipo di posa dei conduttori delle linee;
- Tipo di conduttori usati;
- Il numero e lunghezza delle linee alimentate dallo stesso nodo;
- Resistenza di guasto;¹
- Tipo di connessione del centro stella degli avvolgimenti (lato MT) dei trasformatori presenti in rete.

Quest'ultimo aspetto è quello che ha maggiori ripercussioni sulle grandezze caratterizzanti i guasti monofase.

A.2.1 RICHIAMI TEORICI SULL'INFLUENZA DELLO STATO DEL NEUTRO SUL REGIME DI GUASTO MONOFASE A TERRA

Per le linee MT di ENEL esistono le seguenti modalità per il collegamento del neutro MT :

- Isolato da terra;
- Connesso a terra tramite impedenza.²

¹ In genere il contributo fornito dagli elementi reattivi all'impedenza di guasto monofase a terra può ritenersi trascurabile, pertanto solitamente si parla di "resistenza" di guasto.

² L'impedenza a cui si fa riferimento può essere costituita da una Bobina e una resistenza o anche una sola delle due; in caso di sola resistenza si parlerà di impedenza di tipo ohmica.

Per la comprensione di quanto di seguito riportato si farà riferimento alla Fig. A- 1.

Come è possibile evincere dalla figura, le n-1 linee non affette dal guasto sono assimilabili ad un'unica linea la cui capacità è data, fase per fase, dalla somma delle capacità delle singole linee; ci si può, quindi, riportare al caso di due linee con capacità differente.

Si supponga di avere il neutro connesso a terra tramite una impedenza Z_N , che comprende la bobina di neutro, le resistenze poste in parallelo e/o in serie alla bobina, l'impedenza omopolare del trasformatore di messa a terra (è lo stesso trasformatore AT/MT di cabina primaria oppure un apposito trasformatore a zig-zag) e la resistenza di terra della Cabina Primaria. L'impedenza Z_N è prevalentemente induttiva anche nel caso di soluzione con resistenza in parallelo alla bobina.

Detta C la capacità totale per ciascuna fase di tutta la rete (n linee), C_g quella della sola linea affetta da guasto³ e C_s quella del complesso delle rimanenti linee ($C=C_g+C_s$), se si indica con λ il rapporto C_g/C , cioè la percentuale di capacità propria della linea in questione rispetto al totale (contributo della linea guasta) si ha:

$$C_g = \lambda \cdot C \quad C_s = (1 - \lambda) \cdot C$$

Tra le correnti di fase nella linea guasta e nella linea sana si hanno le seguenti relazioni:

$$\begin{cases} \bar{I}_{sR} = (\bar{I}_{gR} - \bar{I}_g) \cdot \frac{C_s}{C_g} \\ \bar{I}_{sS} = \bar{I}_{gS} \cdot \frac{C_s}{C_g} \\ \bar{I}_{sT} = \bar{I}_{gT} \cdot \frac{C_s}{C_g} \end{cases}$$

che si ottengono facilmente uguagliando le cadute di tensione fase-terra sulle capacità rappresentative delle linee dello schema adottato.

³ In realtà con C_g si indica la capacità del tratto di linea guasta dal punto di guasto fin a fondo linea.

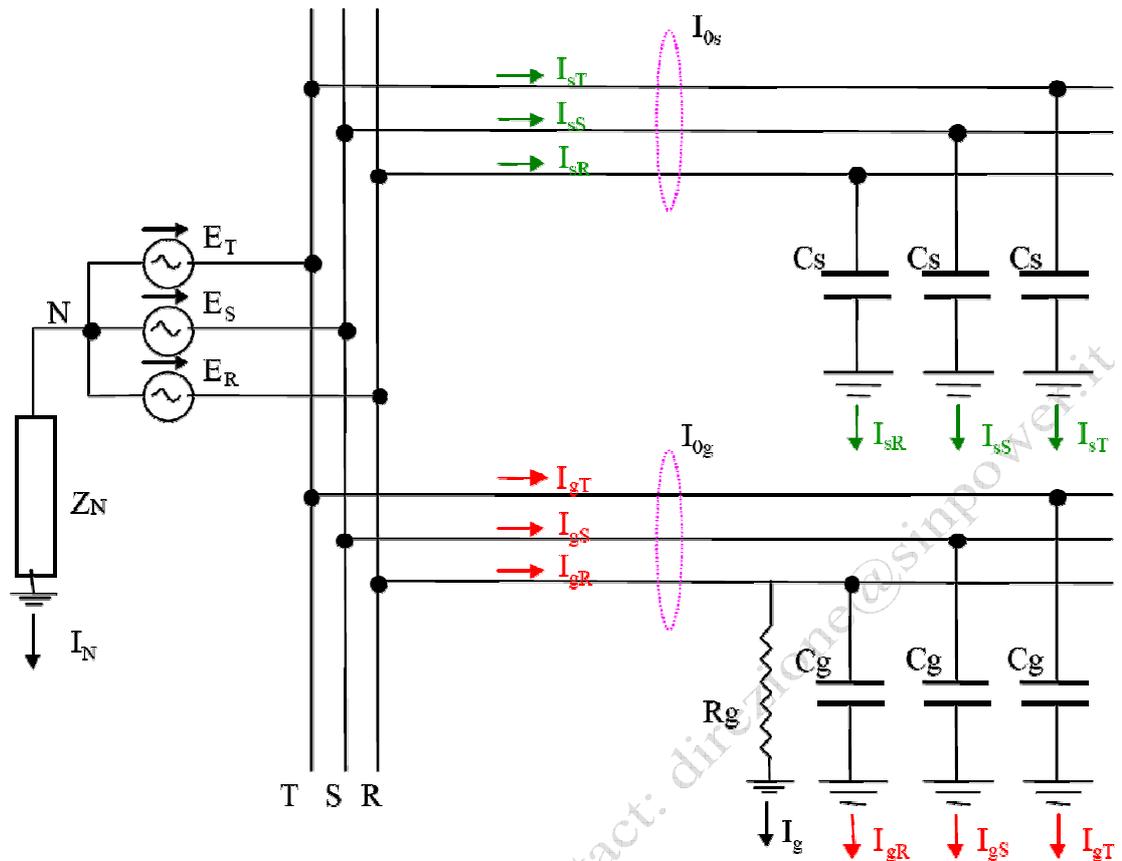


Fig. A- 1 Schematizzazione della rete MT in caso di guasto monofase a terra.

L'equilibrio delle correnti al nodo di neutro (scritto esprimendo tutte le correnti di fase in termini di quelle relative alla linea guasta) fornisce la relazione :

$$-\bar{I}_N = -\bar{I}_g \cdot \frac{C_s}{C_g} + \left(1 + \frac{C_s}{C_g}\right) \cdot (\bar{I}_{gR} + \bar{I}_{gS} + \bar{I}_{gT})$$

mentre la Legge di Kirchhoff alle maglie scritta per le tre fasi della linea guasta fornisce le relazioni:

$$\begin{cases} \bar{Z}_N \bar{I}_N + \bar{E}_R = \frac{\bar{I}_{gR}}{j\omega C_g} - \frac{\bar{I}_g}{j\omega C_g} \\ \bar{Z}_N \bar{I}_N + \bar{E}_S = \frac{\bar{I}_{gS}}{j\omega C_g} \\ \bar{Z}_N \bar{I}_N + \bar{E}_T = \frac{\bar{I}_{gT}}{j\omega C_g} \end{cases}$$

Sommando membro a membro queste ultime e tendendo presente che $E_R + E_S + E_T = 0$ si ottiene l'equazione :

$$\bar{I}_{gR} + \bar{I}_{gS} + \bar{I}_{gT} = 3\bar{Z}_N \bar{I}_N \cdot j\omega C_g + \bar{I}_g$$

che posta in sistema con quella di equilibrio delle correnti permette di ottenere una relazione diretta tra I_g e I_N :

$$\bar{I}_g = -\bar{I}_N (1 + 3j\omega C \cdot Z_N)$$

Una seconda relazione tra le due grandezze si ricava osservando che la legge alla maglia sulla fase R si può scrivere anche come:

$$\bar{Z}_N \bar{I}_N + \bar{E}_R = R_g \bar{I}_g$$

Dalle ultime due relazioni si ricavano le espressioni per le correnti di guasto e di neutro:

$$\bar{I}_N = \frac{-\bar{E}_R}{\bar{Z}_N + R_g \cdot (1 + 3j\omega C \cdot \bar{Z}_N)}$$

$$\bar{I}_g = \frac{-\bar{E}_R \cdot (1 + 3j\omega C \cdot \bar{Z}_N)}{\bar{Z}_N + R_g \cdot (1 + 3j\omega C \cdot \bar{Z}_N)}$$

nonché per la tensione di neutro:

$$\bar{V}_N = \bar{Z}_N \cdot \bar{I}_N = \frac{-\bar{Z}_N \cdot \bar{E}_R}{\bar{Z}_N + R_g \cdot (1 + 3j\omega C \cdot \bar{Z}_N)}$$

A partire dalle espressioni ricavate, è immediato ottenere le tensioni e correnti di fase attraverso le relazioni riportate in Tab. A- 1.

Tab. A- 1 Tabella riassuntiva delle relazioni

Fase sede del guasto	Fase sana	Fase sana
$\bar{V}_R = R_g \cdot \bar{I}_g$	$\bar{V}_S = \bar{E}_S + \bar{V}_N$	$\bar{V}_T = \bar{E}_T + \bar{V}_N$
$\bar{I}_{gR} = j\omega C_g \cdot \bar{V}_R + \bar{I}_g$	$\bar{I}_{gS} = j\omega C_g \cdot \bar{V}_S$	$\bar{I}_{gT} = j\omega C_g \cdot \bar{V}_T$
$\bar{I}_{sR} = j\omega C_s \cdot \bar{V}_R$	$\bar{I}_{sS} = j\omega C_s \cdot \bar{V}_S$	$\bar{I}_{sT} = j\omega C_s \cdot \bar{V}_T$

Passando alle grandezze omopolari, si ottiene:

- La tensione omopolare: $\bar{V}_o = \bar{V}_N$;
- La corrente omopolare per la linea guasta: $\bar{I}_{og} = \bar{V}_o \cdot \left(j\omega C_s + \frac{1}{3Z_N} \right)$;
- La corrente omopolare per le linee sane: $\bar{I}_{os} = j\omega C_s \cdot \bar{V}_o$

Tutte le formule finora ricavate sono valide sia nel caso di neutro a terra tramite impedenza che di neutro isolato.

Nel caso di collegamento a terra tramite impedenza bisognerà assegnare a Z_N un opportuno valore. In questo caso Z_N continua ad essere un numero complesso in quanto in tale parametro è inglobata anche l'impedenza omopolare del trasformatore utilizzato per la connessione del neutro.

Se il neutro è, invece, isolato nelle formule prima analizzate si dovrà assumere $Z_N \rightarrow \infty$, così facendo si ottiene:

$$\bar{V}_o = \frac{-\bar{E}_R}{1 + 3j\omega C R_g}$$

$$\bar{I}_{og} = -\bar{V}_o \cdot j\omega C_s$$

$$\bar{I}_{os} = \bar{V}_o \cdot j\omega C_s$$

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

Dal confronto delle espressioni ricavate per le diverse configurazioni con cui il neutro può essere esercito si nota che le tensioni di fase e di neutro della linea guasta, così come anche le correnti nelle linee e nelle fasi sane non cambiano da una

configurazione all'altra. Per le correnti della fase guasta della linea sede del guasto si ha che rispetto a quelle con neutro isolato, è necessaria l'aggiunta delle correnti I_R e I_L che interessano l'impedenza di messa a terra.

Inoltre, dall'analisi dell'espressioni ricavate è possibile dedurre che:

- In entrambi i casi esaminati, la corrente omopolare delle linee sane risulta essere 90° in anticipo rispetto alla V_o ;
- Il modulo della corrente in ciascuna linea è proporzionale al contributo che la linea dà alla capacità totale della rete;
- La corrente omopolare sulla fase guasta può assumere una fase qualsiasi tra i 90° e i 270° in ritardo rispetto alla V_o .

La capacità (di fase) delle linee aeree di MT risulta essere di alcuni nF/km, mentre quella delle linee in cavo è di alcune centinaia di nF/km.

Il contributo apportato da tali capacità alla corrente di guasto è di $0,05 \div 0,1$ A/km per le linee aeree, mentre è di $3 \div 5$ A/km per le linee in cavo.

Con riferimento alle lunghezze medie delle linee in MT e al numero medio di linee per ogni Cabina Primaria, si ha che le correnti di guasto monofase franco possono variare da alcuni A (linee aeree di estensione modesta) a diverse centinaia di A (reti in cavo molto estese).

A.3 CONFRONTO TRA LE DIVERSE MODALITÀ DI GESTIONE DEL NEUTRO

Nel caso di rete esercita con neutro compensato, rispetto a quella con neutro isolato, si hanno dei sensibili effetti positivi sulle correnti di guasto, sui fenomeni d'estinzione o di riadescamento dell'arco e sulle sovratensioni transitorie.

A.3.1 SOVRATENSIONI

In seguito ad un guasto monofase a terra si presentano delle sovratensioni sia sulle fasi sane, sia su quella in cui ha sede il guasto.

Le sovratensioni sulle fasi sane hanno origine all'insorgere del guasto, mentre le sovratensioni sulla fase sede del guasto nascono in seguito all'autoestinzione dell'arco o all'apertura dell'interruttore posto a protezione della linea.

Gli effetti che lo stato del neutro ha sulle sovratensioni sono di seguito riportati:

- Sulle fasi sane, come si può evincere dalla Fig. A- 2, non si ha nessuna influenza sull'entità delle sovratensioni durante il guasto.

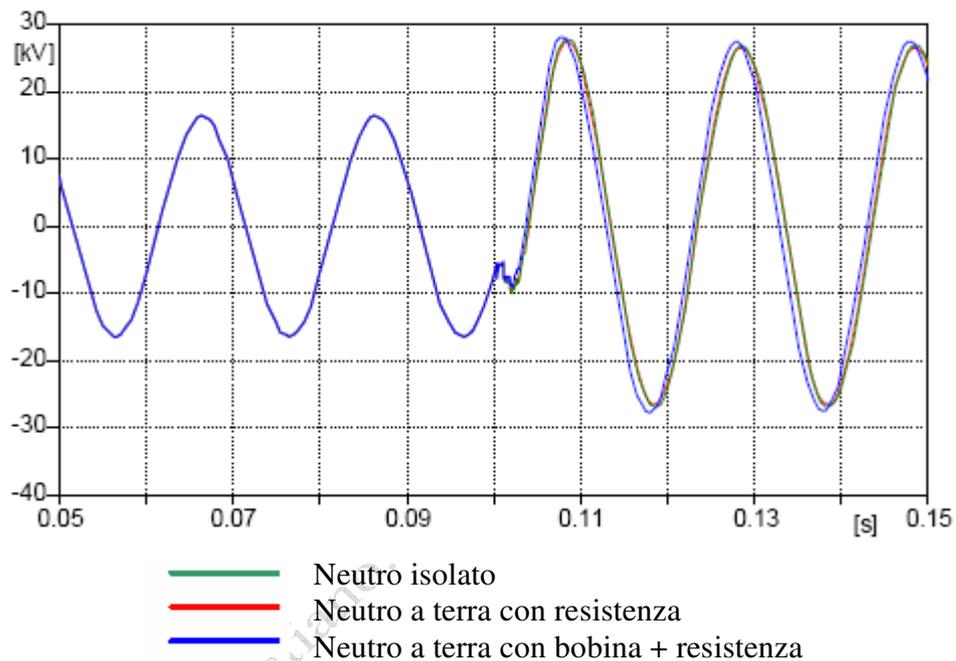


Fig. A- 2 Effetto dello stato del neutro sulle sovratensioni nelle fasi sane.

- La tensione di ripristino, come si può evincere dalla Fig. A- 3, negli istanti successivi all'estinzione del guasto è ridotta drasticamente; ciò porta ad una diminuzione della probabilità che l'arco si riadeschi e quindi ad una più probabile estinzione del guasto senza che sia necessario l'intervento definitivo delle protezioni.
- L'entità e la durata della sovratensione sostenuta all'eliminazione del guasto nel caso di neutro a terra con bobina sono ridotte.(Fig. A- 4).

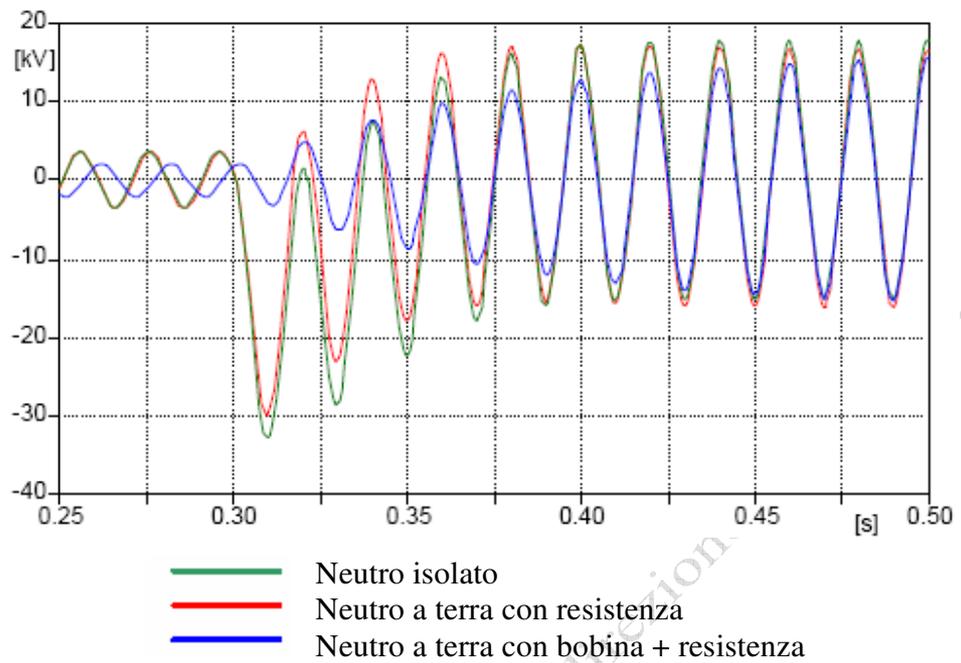


Fig. A- 3 Effetto dello stato del neutro sulla tensione di ripristino.

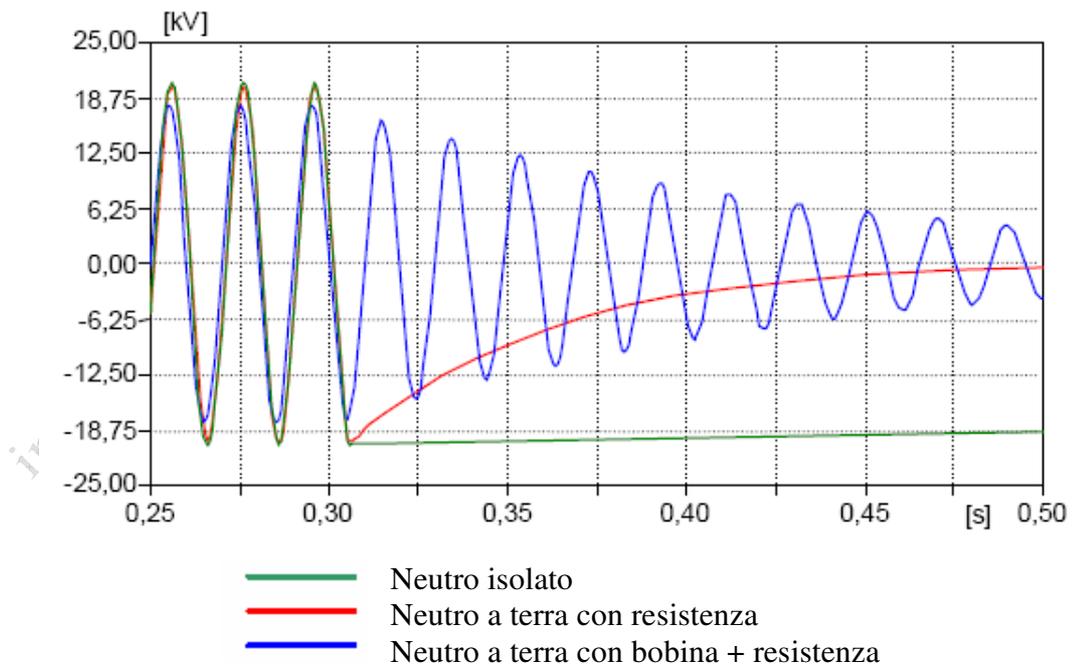


Fig. A- 4 Effetto dello stato del neutro sulle sovratensioni.

A.4 RESISTENZA DI GUASTO VISTA DALLE PROTEZIONI DIREZIONALI AL VARIARE DELLO STATO DEL NEUTRO

Con riferimento alle formule ricavate nei paragrafi precedenti è possibile affermare che:

- Al crescere della R_g la V_o si riduce in modulo e si sfasa in ritardo rispetto al caso con R_g nulla;
- La I_{og} , così come la I_{os} , ha uno sfasamento rispetto alla V_o che non varia al variare di R_g ; tuttavia il loro modulo, all'aumentare della R_g , si riduce in maniera proporzionale a quello della V_o (e di conseguenza della R_g).

Quindi l'effetto della resistenza di guasto sulle grandezze omopolari è quello di ruotare rigidamente tali vettori e di ridurli in ampiezza; ciò implica che gli sfasamenti relativi tra le grandezze omopolari non dipendono da R_g e possono essere calcolati in un caso qualunque e continuare sempre ad essere validi.

Si vuole adesso ricavare una relazione in grado di definire quale sia la massima resistenza con cui un guasto può avvenire ed essere individuato dalle protezioni.

Dall'espressione della V_o riportata nel par.A-2 è possibile ricavare il valore della R_g . Svolgendo una serie di passaggi algebrici si ottiene:

$$R_g = \frac{-(aX_N + bR_N) + \sqrt{(aX_N + bR_N)^2 - (a^2 + b^2) \cdot (Z_N^2 - K^2)}}{(a^2 + b^2)}$$

dove:

E = tensione nominale della rete;

$$Z_N = R_N + j\omega X_N;$$

$$a = 3\omega C \cdot R_N;$$

$$b = 1 - 3\omega C \cdot X_N;$$

$$K = Z_N \cdot E/V_o$$

Se nell'espressione di R_g si pone la V_o uguale alla soglia voltmetrica della protezione direzionale è possibile ricavare il valore della massima resistenza di guasto individuabile dalla stessa.

Analogamente, si può procedere per la determinazione della massima resistenza rilevabile dalla soglia amperometrica della protezione.

Si procede ricavando l'espressione di R_g dall'espressione di I_{og} , ottenendo:

$$R_g = \frac{-(aX_N + bR_N) + \sqrt{(aX_N + bR_N)^2 - (a^2 + b^2) \cdot (Z_N^2 - K_1^2)}}{(a^2 + b^2)}$$

con:

$$K_1^2 = \left(\frac{E}{3I_{og}} \right)^2 \cdot (1 + 9\omega^2 \cdot C_s^2 \cdot Z_N^2 - 6\omega \cdot C_s \cdot X_N)$$

Sostituendo in questa nuova espressione di R_g al posto di I_o il valore della soglia amperometrica si ricava il valore ricercato.

È importante notare che le soglie amperometriche e voltmetriche devono operare contemporaneamente; è per questo che per determinare quale sia il massimo valore della R_g è necessario considerare il minimo tra i valori di R_g ricavati per le due soglie.

Benché già introdotto nel Capitolo 2, si riporta qui per comodità di lettura, la definizione del "grado di compensazione", che esprime il grado d'"accordo" raggiunto tra la corrente capacitiva (I_C) della rete e quella induttiva (I_L) della bobina nel caso di guasto monofase a terra.

È possibile definire tale grandezza in termini relativi tramite la seguente espressione:

$$c = \frac{I_L}{I_C}$$

Una rete è detta "sottocompensata" o "sovracompensata" a seconda che la componente induttiva, dovuta alla bobina, sia minore o maggiore della corrente di guasto presente nella rete in caso di neutro isolato.

Nella Fig. A- 5 sono riportati, per una rete a 20 kV, gli andamenti delle grandezze omopolari (in p.u. rispetto al loro valore assunto per $R_g=0$) al variare di R_g per diversi valori di c .

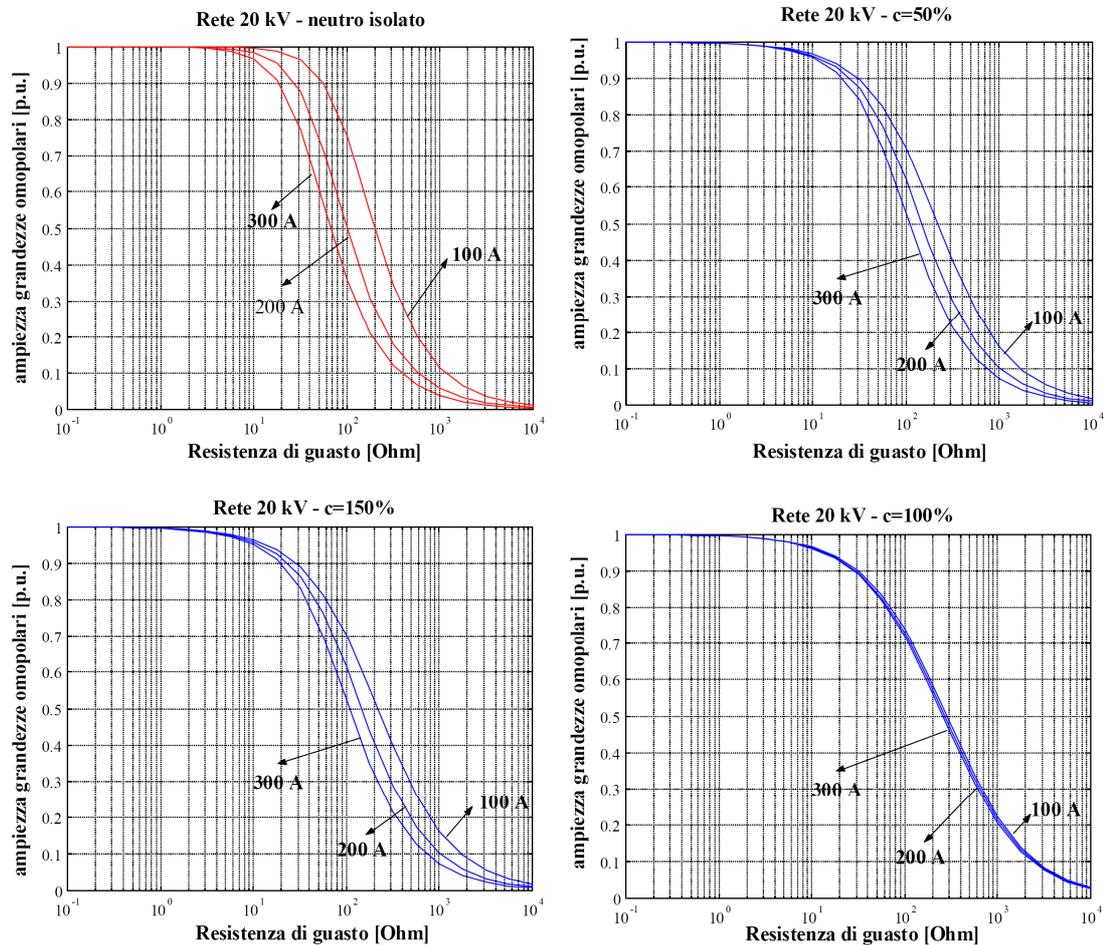


Fig. A- 5 Dipendenza delle grandezze omopolari dalla R_g .

BIBLIOGRAFIA

- [1] CALI' A. – VAGLIASINDI U. , “Influenza dello stato del neutro sul regime di guasto monofase”, editore CULC.
- [2] ENEL Distribuzione S.p.A., DK4451 ed. 2.1, “Criteri di protezione della rete MT di distribuzione” , pubblicata nel Marzo 2005.