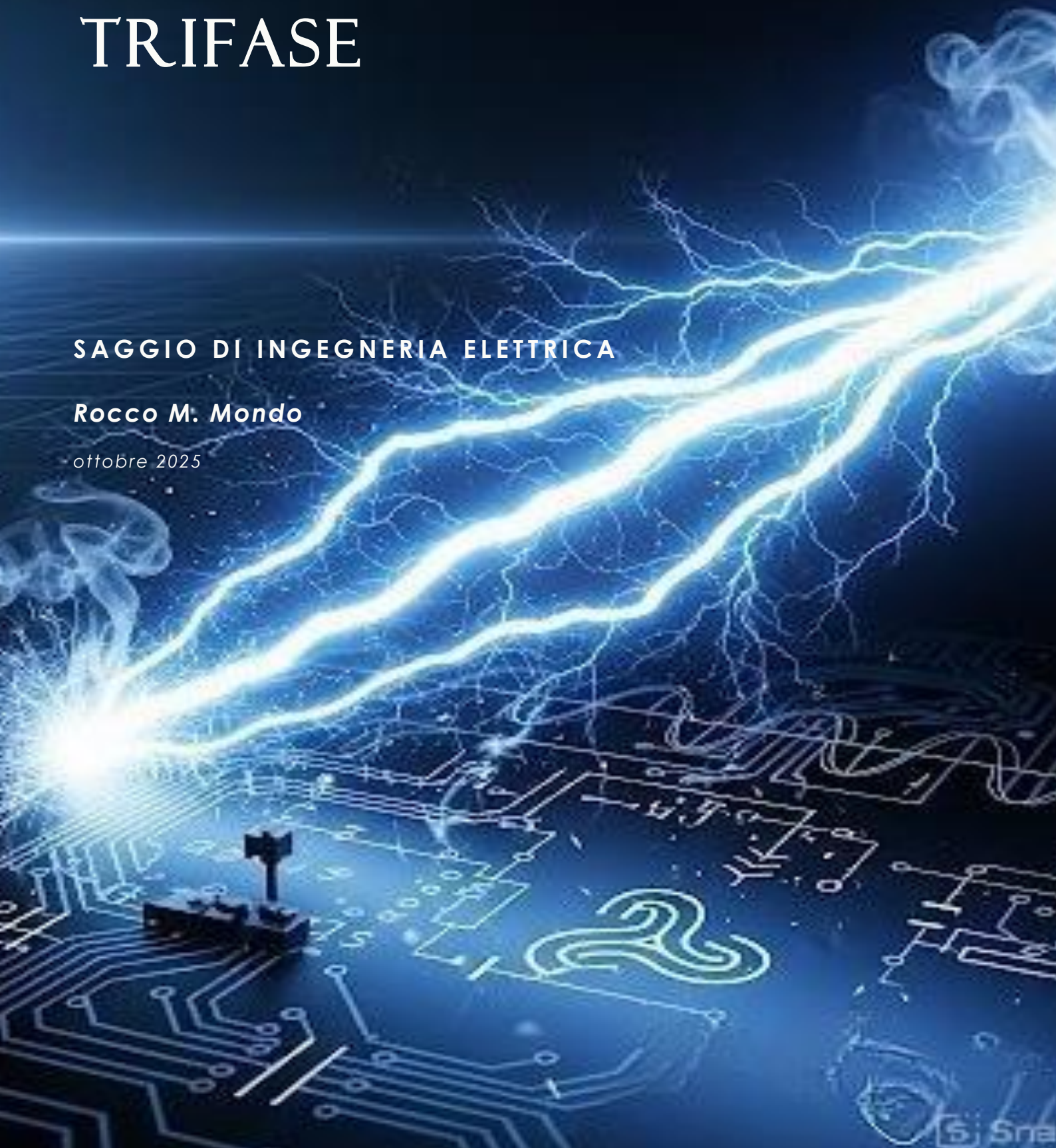


DINAMICA DELLE CORRENTI DI CORTO CIRCUITO NELLE RETI TRIFASE

SAGGIO DI INGEGNERIA ELETTRICA

Rocco M. Mondo

ottobre 2025



SOMMARIO

PARTE 0	ABSTRACT
PARTE 1	❖ INTRODUZIONE ▪ PRINCIPIO DEL GUASTO
PARTE 2	❖ LE CORRENTI DI C.C NEL TRANSITORIO ▪ PREMESSA ▪ IL TRANSITORIO ▪ ALCUNE CONSIDERAZIONI DI ORDINE PRATICO
PARTE 3	❖ LE CORRENTI DI C.C A REGIME PERMANENTE ▪ NOTA INTRODUTTIVA ▪ IL TEOREMA DI FORTESCUE E LA TEORIA DELLE COMPONENTI SIMMETRICHE ▪ CIRCUITI EQUIVALENTI ▪ CORTO CIRCUITO TRIFASE SIMMETRICO A REGIME ▪ CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE
	❖ RIFERIMENTI ▪ BIBLIOGRAFIA ▪ CONTENUTI • FIGURE • FORMULE MATEMATICHE • TABELLE

PARTE 0

ABSTRACT

Questo saggio scientifico esplora in dettaglio il fenomeno delle correnti di corto circuito (c.c.) nelle reti elettriche trifasi. Si analizzano le cause e le conseguenze di tali eventi, che rappresentano una delle principali minacce alla sicurezza e all'integrità dei sistemi di potenza. Il documento si concentra sulle caratteristiche delle c.c., distinguendo tra componenti simmetriche e asimmetriche, e sull'importanza del loro calcolo per il dimensionamento delle apparecchiature di protezione. Vengono presentati i metodi analitici più comuni per la determinazione delle c.c. massime, con particolare enfasi sul metodo delle componenti simmetriche. Infine, si descrive un'applicazione software, sviluppata in Python con un'interfaccia grafica, per il calcolo della corrente di c.c. istantanea utilizzando il metodo numerico di Eulero.

PARTE 1

INTRODUZIONE

PRINCIPIO DEL GUASTO: INTRODUZIONE

Il corto circuito elettrico rappresenta uno degli eventi più critici delle reti elettriche trifasi. Si manifesta quando due o più conduttori entrano in contatto diretto o indiretto, causando un passaggio di corrente molto elevato. Le conseguenze possono essere catastrofiche: danni alle apparecchiature, stress elettrodinamici, surriscaldamento e rischi per la sicurezza. La corretta determinazione delle correnti di corto circuito è essenziale per la progettazione degli impianti, la scelta delle protezioni e la stabilità della rete.

In presenza di un corto circuito si sviluppano in tutto il sistema correnti anomale che causano eventi negativi come:

- Effetti termici significativi sui conduttori;
- Sforzi elettrodinamici significativi sulle sbarre e sugli avvolgimenti delle macchine elettriche.
- Problemi sulla sicurezza dell'impianto e delle persone.

Tutto ciò compromette la continuità di servizio del sistema elettrico o del singolo impianto elettrico. Per evitare tali conseguenze devono essere predisposte le corrette protezioni, sensibili alle grandezze elettriche da limitare e in grado di dare il consenso di apertura all'organo di manovra, ponendo così fuori tensione tutta la rete elettrica o parte di essa che è soggetta al guasto.

Lo studio della posizione di inserimento dei relè è molto delicato, oltre che per motivi di sicurezza anche per motivi economici. È infatti inutile e dispendioso inserire protezioni nei rami della rete in cui si registrano flussi di corrente contenuti entro la portata dei cavi elettrici.

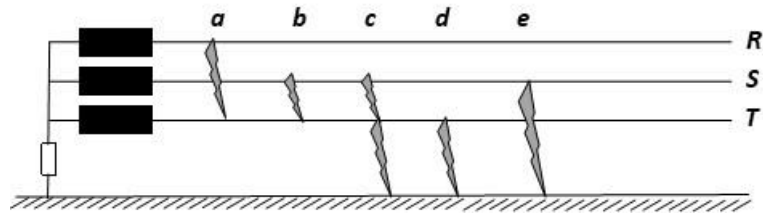
Per quanto detto, oltre al calcolo delle correnti di corto circuito è importante la conoscenza dei flussi di corrente transitoria e delle tensioni in tutti i nodi della rete a seguito del guasto.

Nelle reti trifasi si possono distinguere i seguenti tipi di guasto a seconda del numero di fasi che vengono a trovarsi in corto circuito tra di loro oppure con la terra:

- a) corto circuito tripolare;
- b) corto circuito bipolare senza contatto a terra;
- c) corto circuito bipolare con contatto a terra;
- d) guasto a terra unipolare (contatto a terra di una fase);
- e) doppio guasto a terra.;

PARTE 1

INTRODUZIONE



[Figura 1]

Tra i casi su riportati il **corto circuito tripolare** rappresenta un caso di carico simmetrico della rete. In questo caso tutte e tre le fasi sono interessate nello stesso modo dal guasto e vengono attraversate dalla stessa corrente efficace di corto circuito, sarà sufficiente, durante il calcolo, riferirsi ad **una sola fase** come si fa abitualmente in tutti casi di carico simmetrico. In tutti gli altri casi di corto circuito invece si ha a che fare con la presenza di **carichi asimmetrici** ed il loro calcolo richiede particolari accorgimenti per rilevare le disimmetrie presenti.

Uno dei procedimenti per il calcolo delle correnti di corto circuito asimmetriche è quello dei componenti simmetrici. Il metodo dei componenti simmetrici non è del tutto nuovo, tuttavia la conoscenza dei suoi fondamenti ed il pratico impiego del calcolo non è in generale diffuso. Per questo motivo premetteremo alla trattazione dei singoli casi di guasto un'esposizione dei fondamenti del **metodo dei componenti simmetrici**.

Lo studio del corto circuito si suddivide in almeno due fasi:

Studio del transitorio (prima fase)

Studio della c.to a regime permanente (seconda fase)

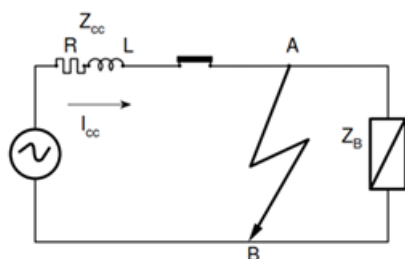
Nei seguenti paragrafi tratteremo dello sviluppo delle correnti di corto circuito sia nella **fase di transitorio** che in quella **in regime permanente**.

PARTE 2

IL TRANSITORIO

LA CORRENTE DI C.C. NEL TRANSITORIO: PREMESSA

In condizioni di normale funzionamento, nel circuito elettrico transita una corrente di esercizio pari al rapporto tra la tensione nominale U e la somma delle impedenze del circuito Z_L e del carico Z_B . In caso di guasto (*figura 2*) tra i punti **A** e **B**, l'impedenza del carico Z_B viene cortocircuitata, ed il circuito assume la configurazione vista in figura. La corrente, improvvisamente, si trova ad attraversare i punti **A** e **B**, modificando così il suo valore in modulo e la sua forma d'onda. Il valore risulta dipendere da U e dalla sola impedenza Z_L di linea, come conseguenza di ciò tale corrente si incrementerà in modo anomalo e darà vita alla corrente di cortocircuito.



[Figura 2]

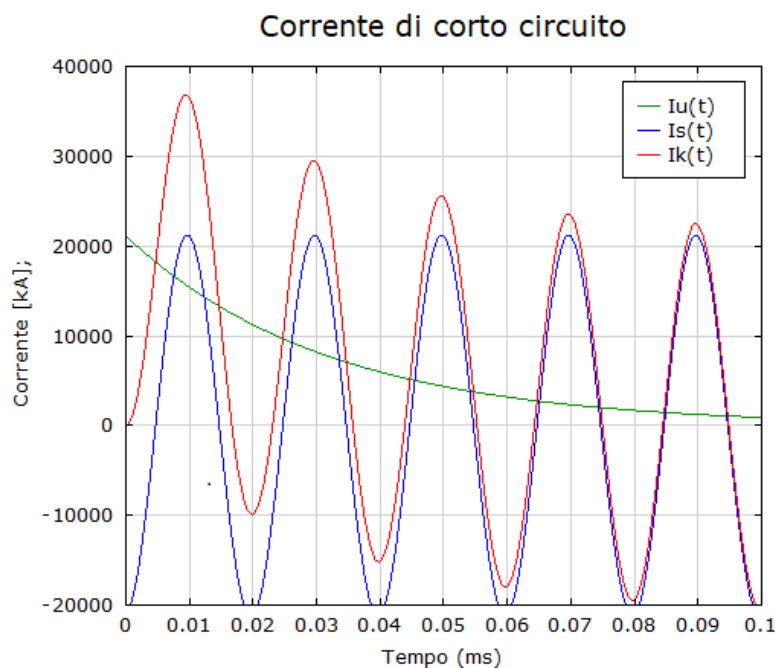
IL TRANSITORIO

Come visto, in caso di cortocircuito, la rete passa da una condizione di esercizio normale ad una di guasto. A prescindere dalle condizioni iniziali da cui la corrente di corto inizia a manifestarsi, quindi sia che la corrente passi dallo zero che non, avremo sempre e comunque, come per qualsiasi inserzione, un **transitorio**.

Di seguito definiamo i punti chiavi dell'andamento del transitorio nel tempo, per individuare i principali componenti che intervengono nei primi istanti dello stabilirsi della corrente di corto circuito. La situazione di corto circuito nei primi istanti di tempo, prima che esso si configuri come un corto permanente, può essere rappresentato dal seguente grafico:

PARTE 2

IL TRANSITORIO



[Figura 3]

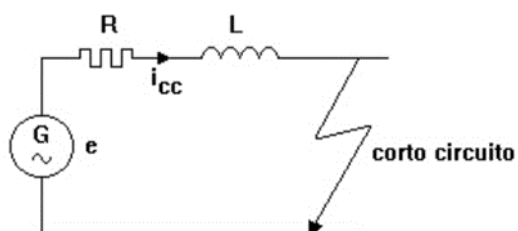
I_k : Corrente di c.to. asimmetrica

I_s : Corrente simmetrica con forma d'onda sinusoidale

I_u : Corrente unidirezionale

Come si può osservare dal grafico, la corrente di corto circuito I_k nei primissimi istanti, risulta essere uguale alla sommatoria di due distinte correnti, la I_s (di forma sinusoidale) e la I_u di forma unidirezionale. Di seguito formuleremo delle equazioni che ci permettono di definire queste correnti matematicamente e quindi poterle calcolare istante per istante.

Consideriamo il circuito rappresentato nella figura 4.



[Figura 4]

PARTE 2

IL TRANSITORIO

Applicando il secondo principio di Kirchhoff relativo alle maglie (uguaglianza fra f.e.m. e caduta di tensione), si ottiene la seguente equazione per il circuito elettrico di figura 4:

$$e + e_L = R i_{cc} \quad [1]$$

Dove:

e = f.e.m. fornita dal generatore;

e_L = f.e.m. di autoinduzione nell'induttanza **L**

R * i_{cc} = Caduta di tensione sulla resistenza **R** prodotta dalla corrente di corto circuito **i_{cc}**

Essendo: $e = \sqrt{2} E \sin \omega t$ $e_L = -L \frac{di_{cc}}{dt}$

Si ottiene dall'equazione [1]: $\sqrt{2} E \sin \omega t - L \frac{di_{cc}}{dt} = R * i_{cc}$ [2]

La risoluzione della precedente equazione differenziale [2] fornisce la corrente di corto circuito in funzione del tempo: **i_{cc} = f(t)**. Chiamiamo per comodità la **i_{cc}**, **I_k**. Adesso è facile notare come nella figura 3 e nell'equazione [1] la **I_k** è costituita da due componenti:

- a) una **simmetrica (I_s)**, variabile con legge sinusoidale, di ampiezza massima $\sqrt{2} I_k$ e pulsazione ω :

$$I_s = \sqrt{2} I_k \sin(\omega t - \varphi_{cc}) \quad [3]$$

- b) una **transitoria unidirezionale (I_u)**, decrescente nel tempo con legge esponenziale:

$$I_u = \sqrt{2} I_k \sin(\varphi_{cc} e^{-\frac{R}{L}t}) \quad [4]$$

Dove: $I_k = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$; (valore efficace)

La corrente di corto circuito vale per tanto: $I_k = I_s + I_u$ [5]

cioè: $I_k = \sqrt{2} I_p \sin(\omega t - \varphi_{cc}) + \sqrt{2} I_p \sin \varphi_{cc} e^{-\frac{R}{L}t}$ [6]

PARTE 2

IL TRANSITORIO

che può anche essere scritta nel seguente modo:

$$I_k = \sqrt{2} I_k \sin(\omega t - \varphi_{cc}) + \sqrt{2} I_k \sin \varphi_{cc} e^{-\frac{\omega}{\tan \varphi_{cc}} t} \quad [7]$$

- **L/R** costante di tempo del circuito di guasto espressa in secondo [s], R = resistenza [W], L = induttanza [H] del circuito a monte del punto di guasto.
- **J_{cc}** = angolo caratteristico dell'impedenza di corto circuito.

La componente simmetrica (**I_s**) risulta essere simmetrica rispetto all'asse dei tempi.

La componente unidirezionale ha un andamento esponenziale dovuto alla presenza di una componente induttiva. Tale componente è caratterizzata da una costante **τ = L/R** (con "R" e "L" rispettivamente resistenza e induttanza del circuito a monte del punto di guasto) e si estingue dopo 3-6 volte **τ**.

La componente unidirezionale durante il periodo transitorio rende la corrente **I_k** asimmetrica, quest'ultima è caratterizzata da un **valore di picco** che risulta essere superiore rispetto a quello che sarà il valore permanente dopo il transitorio. In generale possiamo dire che, considerando il valore efficace della corrente di corto circuito **I_{keff}** a regime (quindi simmetrica) il valore del primo picco di corrente può variare da:

$$\sqrt{2} I_k \text{ a } 2\sqrt{2} I_k$$

Trascorso il periodo transitorio la corrente di cortocircuito diventa praticamente simmetrica. L'andamento delle correnti è riportato nella figura 3.

ALCUNE CONSIDERAZIONI DI ORDINE PRATICO

Come è noto, le prestazioni in cortocircuito di un interruttore, con riferimento alla tensione di esercizio del dispositivo, sono definite principalmente dai seguenti parametri:

- **I_{cu}** = *potere di interruzione*;
- **I_{cm}** = *potere di chiusura*;

Il potere di interruzione **I_{cu}** è definito con riferimento al valore efficace della componente simmetrica della corrente di cortocircuito a regime permanente, che possiamo calcolare con la classica formula:

$$I_k = \frac{V}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

PARTE 2

IL TRANSITORIO

Il potere di chiusura I_{cm} è definito con riferimento al valore di picco massimo della corrente presunta di cortocircuito.

Poiché ogni elemento con impedenza modifica la corrente di cortocircuito a valle dello stesso, e poiché l'interruttore è un elemento con impedenza propria, si definisce la corrente presunta come quella corrente che fluisce quando il dispositivo di protezione è sostituito con un elemento di impedenza nulla.

La norma di prodotto CEI EN 60947-2 fornisce una tabella che permette di passare dal valore della corrente di cortocircuito in valore efficace simmetrico al rispettivo valore di picco, attraverso un coefficiente moltiplicativo legato anche al fattore di potenza dell'impianto.

Questa tabella costituisce il riferimento per determinare il valore di I_{cu} e di I_{cm} dei vari interruttori.

Passando dalle caratteristiche dell'interruttore a quelle dell'impianto, se risulta immediato il calcolo del valore efficace della componente simmetrica della corrente di cortocircuito determinarne il relativo valore di picco potrebbe essere meno immediato. I parametri necessari, quali il fattore di potenza in cortocircuito o il rapporto tra la resistenza e l'induttanza del circuito a monte del punto di guasto, non sempre risultano essere disponibili.

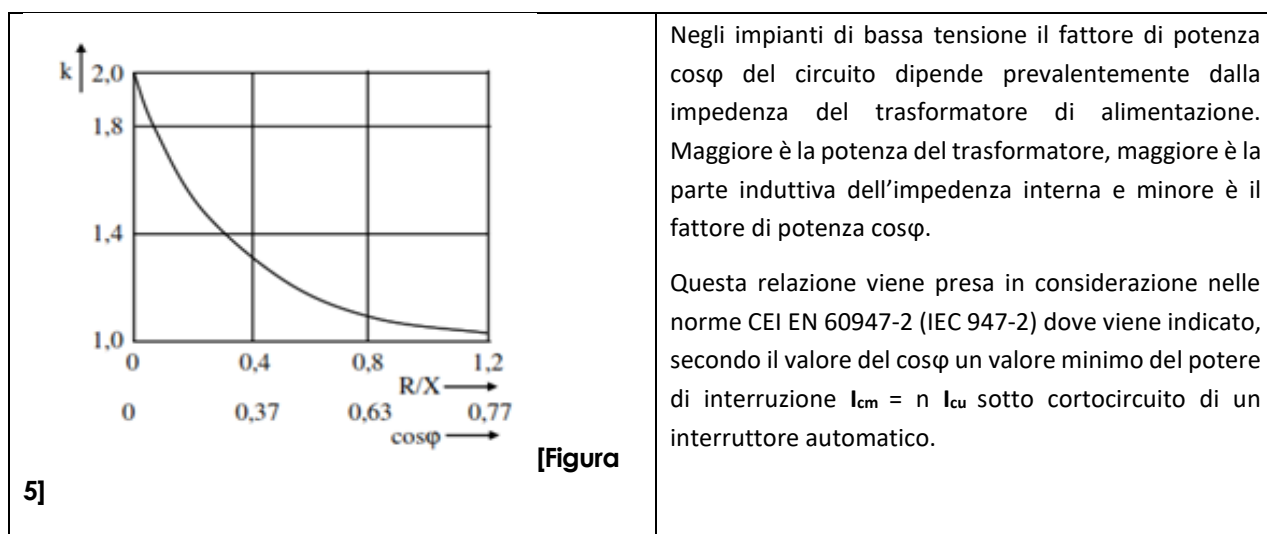
La norma CEI EN 60909-0 fornisce indicazioni utili per il calcolo della corrente di picco o di cresta, in particolare indica la relazione seguente:

$$I_p = k \sqrt{2} I_k$$

dove il valore di "k" può essere valutato con la seguente formula approssimata:

$$k = 1.02 + 0.98 e^{\frac{-3R}{X}}$$

Il fattore k dipende dal rapporto R/X o dal $\cos \varphi$ del circuito, vedi figura sotto:



PARTE 3

REGIME PERMANENTE

LA CORRENTE DI C.C. A REGIME PERMANENTE: INTRODUZIONE

Dallo studio del transitorio della corrente di corto circuito abbiamo visto che la componente unidirezionale (I_u) ha un andamento esponenziale, che dipende da una costante $\tau = L/R$ (con "R" e "L" rispettivamente resistenza e induttanza del circuito a monte del punto di guasto) e si estingue dopo 3-6 volte τ . Estinta la componente unidirezionale, resta la componente sinusoidale che rappresenterà la corrente di corto circuito nello stato di permanenza, ossia che permarrà fin tanto che il guasto verrà estinto con l'ausilio dell'intervento di un interruttore a monte del **punto di guasto stesso**.

Questa corrente permanente di corto circuito è quella che va studiata e calcolata per dimensionare correttamente la rete elettrica a valle del generatore e scegliere le giuste apparecchiature per garantire la sicurezza delle persone.

Un primo elemento importante da tenere in considerazione nell'affrontare in processo di studio a regime permanente è la tipologia del guasto ossia in quale circostanza sta avvenendo il corto circuito. come abbiamo già visto nelle prime pagine di questi appunti nelle reti trifasi si possono distinguere i seguenti tipi di guasto a seconda del numero di fasi che vengono a trovarsi in corto circuito tra di loro oppure con la terra:

- a) **corto circuito tripolare;**
- b) **corto circuito bipolare senza contatto a terra;**
- c) **corto circuito bipolare con contatto a terra;**
- d) **guasto a terra unipolare (contatto a terra di una fase);**
- e) **doppio guasto a terra.**

Tra i casi riportati nei primi paragrafi, il **corto circuito tripolare** rappresenta un caso di carico simmetrico della rete. In questo caso tutte e tre le fasi sono interessate nello stesso modo dal guasto e vengono attraversate dalla **stessa corrente efficace di corto circuito**. Quindi nello sviluppo del calcolo sarà sufficiente riferirsi ad **una sola fase** come si fa abitualmente in tutti casi di carico simmetrico. In tutti gli altri casi di corto circuito invece si ha a che fare con la presenza di **carichi asimmetrici** ed il loro calcolo richiede particolari accorgimenti per rilevare le dissimmetrie presenti.

PARTE 3

REGIME PERMANENTE

Lo studio dei carichi asimmetrici realizzato direttamente sulla rete trifase è sicuramente molto difficile da sviluppare poiché implicherebbe la conoscenza di variabili che non sempre sono conosciute apriori ed il cui comportamento andrebbe analizzato specificatamente impianto per impianto e circuito per circuito.

Necessitiamo di riferirci a modelli standard per poter circoscrivere, con buona approssimazione, il comportamento della corrente e la sua intensità quando questa è a regime e circola nella rete trifase.

Si può ricorrere al sistema di equazioni derivato dai principi di Kirchhoff, che ci permette di analizzare i sistemi equilibrati ed anche comprendere meglio la dipendenza di tensioni e correnti dai componenti dell'impianto. Quindi ci servirebbe passare da un sistema squilibrato ad uno *equivalente* ma equilibrato, per fare ciò sfrutteremo *la teoria delle componenti simmetriche* conosciuta anche come *trasformata di Fortescue*.

In elettrotecnica, in particolare nell'ambito dei sistemi elettrici di potenza, la trasformata di Fortescue, che prende il nome dal suo ideatore, l'ingegnere Charles LeGeyt Fortescue è un operatore utilizzato al fine di semplificare i calcoli relativi allo studio di sistemi trifase non bilanciati. Questa trasformata opera un cambiamento di base che permette di pensare ciascuna terna di fasori come somma di tre terne di fasori. La nuova base ottenuta dopo la trasformazione viene usualmente definita come "dominio delle sequenze".

IL TEOREMA DI FORTESCUE E LA TEORIA DELLE COMPONENTI SIMMETRICHE

Il teorema afferma che una terna di vettori dissimmetrica (fasori) qualsiasi è univocamente scomponibile in tre terne simmetriche, una di sequenza diretta, una di sequenza inversa e una di sequenza omopolare.

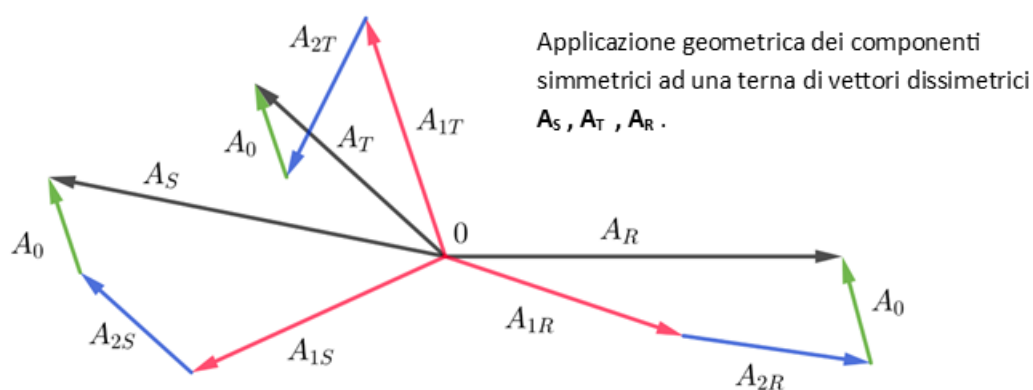
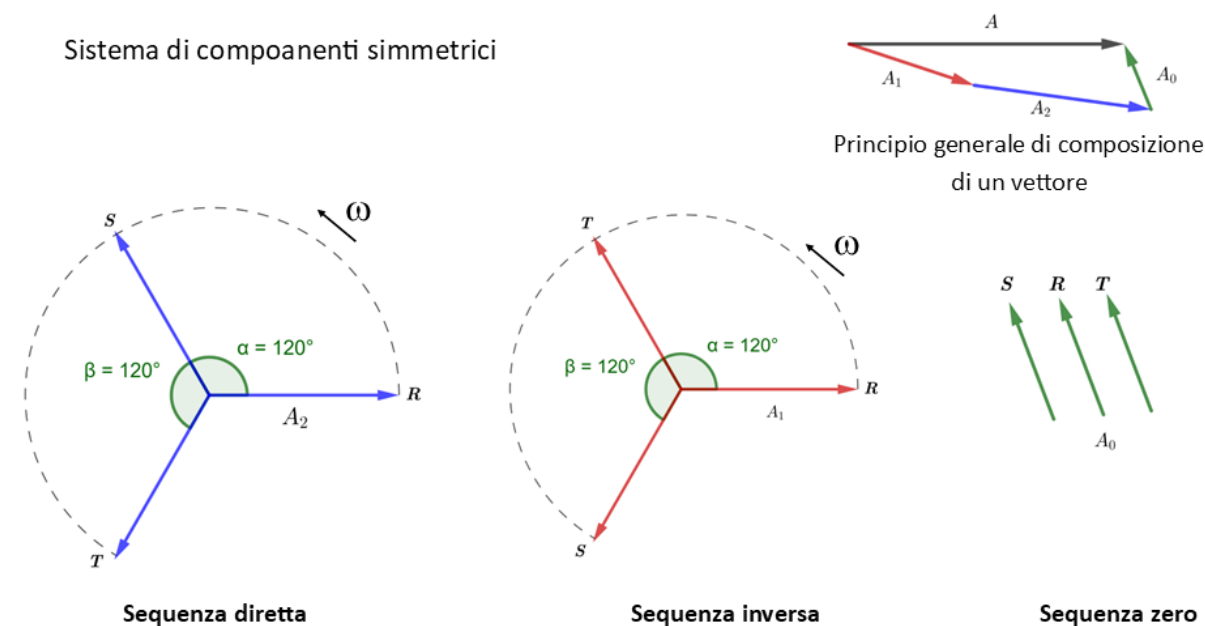
Vale a dire: un qualsivoglia vettore **A** nel piano come risulta nella figura 6 può essere pensato come dovuto alla composizione di tre vettori sommati l'uno all'altra: **A1**, **A2** e **A0**.

Supponiamo ora che la componente **A1** faccia parte di un sistema trifase simmetrico rotante in senso antiorario secondo la successione delle tre fasi **R**, **S** e **T**. Facciamo lo stesso per il vettore **A2** supponendo che faccia parte di un sistema trifase rotante in senso orario. Infine supponiamo che il vettore **A0** faccia parte di un sistema di tre vettori aventi tutti la stessa fase. Vedi Figura 6.

PARTE 3

REGIME PERMANENTE

[Figura 6]



[Figura 7]

Ebbene con questi tre sistemi di componenti simmetrici, si può rappresentare qualsiasi sistema trifase asimmetrico. Si può facilmente constatare che sono valide le seguenti relazioni:

$$A_R = A_0 + A_{1R} + A_{2R}$$

$$A_S = A_0 + A_{1S} + A_{2S} = A_0 + a^2 A_{1R} + a A_{2R} \quad [8]$$

$$A_T = A_{1T} + A_{2T} + A_0 = A_0 + a A_{1R} + a^2 A_{2R}$$

La trasformazione dei componenti simmetrici, una volta applicata ad una terna di variabili fasoriali, fornisce i fasori di sequenza diretta, inversa ed omopolare a quella terna.

PARTE 3

REGIME PERMANENTE

[Nota] - Elemento fondamentale di questa trasformazione è la costante complessa α essa rappresenta un versore che, moltiplicato per un vettore, ne provoca la rotazione di 120° in senso positivo (ovvero antiorario). Il versore $\bar{\alpha}$ gode di tre proprietà molto importanti:

$\bar{\alpha}^2 = \underline{\alpha}$ dove $\underline{\alpha}$ indica il complesso coniugato del versore $\bar{\alpha}$

$$\bar{\alpha}^3 = 1$$

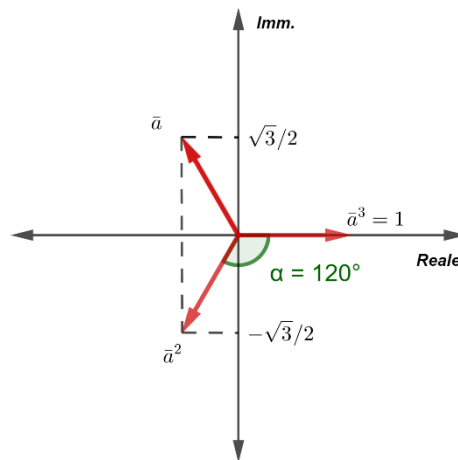
$$1 + \bar{\alpha} + \bar{\alpha}^2 = 0$$

Per quanto detto, la costante complessa $\bar{\alpha}$ è rappresentata nel piano di Gauss da un vettore di modulo unitario e fase pari a 120° (ovvero pari a $2/3 \pi$ radianti). Si riportano di seguito le espressioni polare e cartesiana e una raffigurazione grafica della terna $[\bar{\alpha}; \bar{\alpha}^2; \bar{\alpha}^3]$.

$$\bar{\alpha} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = 0.5 + j0.866; \quad (\text{che indica una rotazione del vettore di } +120^\circ)$$

$$\bar{\alpha}^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = 0.5 - j0.866; \quad (\text{che indica una rotazione del vettore di } +240^\circ)$$

$$\bar{\alpha}^3 = 1$$



[Figura 8]

Seguendo il processo inverso, dato un sistema trifase asimmetrico se ne possono determinare i corrispondenti componenti simmetrici. Per eseguire questo procedimento, si impegnano le seguenti relazioni:

$$A_{1R} = \frac{1}{3}(A_R + \alpha A_S + \alpha^2 A_T)$$

$$A_{2R} = \frac{1}{3}(A_R + \alpha^2 A_S + \alpha A_T)$$

[9]

$$A_0 = \frac{1}{3}(A_R + A_S + A_T)$$

PARTE 3

REGIME PERMANENTE

Possiamo riscrivere il tutto in forma matriciale per compattare le espressioni sopra riportate:

$$\begin{bmatrix} A_R \\ A_S \\ A_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ A_{1R} \\ A_{2R} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} A_R \\ A_S \\ A_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ A_{1R} \\ A_{2R} \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\rightarrow [\bar{A}_F] = [T_S][\bar{A}_S]; \quad [10]$$

Con: $[T_S] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$ (**Matrice di Sequenza**)

La [10], rappresenta la trasformazione della terna di vettori dal dominio delle sequenze al dominio dei fasori delle grandezze di fase.

In conclusione si può affermare che un sistema trifase non bilanciato può essere studiato mediante **l'algebra delle sequenze**. La terna di fasori squilibrati viene dunque scomposta in tre terne simmetriche:

- **una terna di sequenza diretta o positiva**
- **una terna di sequenza inversa o negativa**
- **una terna di sequenza omopolare o zero**

La trasformazione dei componenti simmetrici è una tecnica efficace per trattare i sistemi trifase in regime sinusoidale. Si applica nel dominio dei fasori a terne di variabili, come tensioni, correnti, flussi concatenati, cariche elettriche.

PARTE 3

REGIME PERMANENTE

CIRCUITI EQUIVALENTI è APPLICAZIONE DELLA TEORIA DELLE SEQUENZE PER LA DEFINIZIONE DELLA CORRENTE DI CORTO CIRCUITO.

Adesso che abbiamo degli strumenti matematici che ci permettono di poter passare da un sistema trifasico squilibrato ad un sistema di terne di vettori simmetriche e viceversa, è arrivato il momento di applicare questa teoria ai circuiti elettrici.

La teoria sul metodo delle sequenze ci è utile per poter effettuare il calcolo delle correnti di nei sistemi elettrici di potenza.

Lo scopo è quello di determinare i circuiti equivalenti di Thevenin, visti dal nodo di guasto, rispettivamente alla sequenza diretta, inversa e omopolare e successivamente, a seconda delle condizioni di vincolo imposte da tipo di cortocircuito, collegare fra di loro tali circuiti. In sostanza, una volta determinato il generatore equivalente di Thevenin e le impedenze equivalenti di Thevenin alle tre sequenze arriviamo alla condizione di Figura 8:

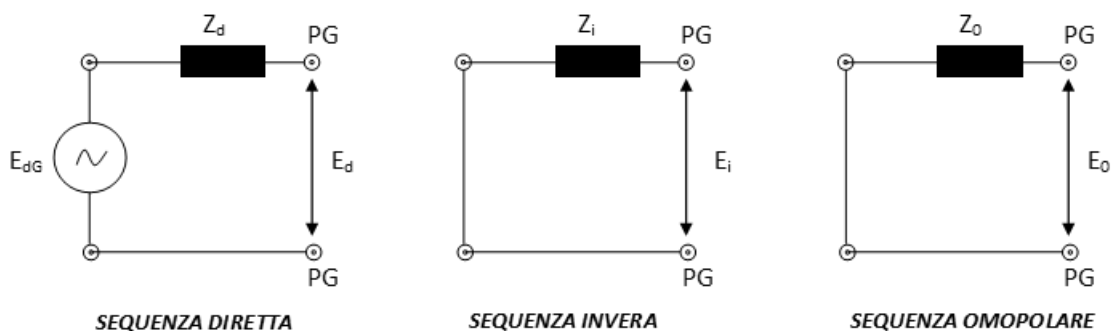


FIGURA [9]

Circuiti equivalenti di Thevenin visti dal nodo di guasto. Fig. 9.

Dove la grandezza E_{dg} rappresenta il fasore della tensione di fase alla sequenza diretta prima del verificarsi del guasto e le grandezze E_d , E_i , E_0 , rappresentano i fasori delle tensioni di fase alle sequenze diretta, inversa e omopolare a seguito del guasto. Dai circuiti equivalenti, rappresentati in Figura 9, è facile osservare che il generatore equivalente che rappresenta la tensione di fase prima del verificarsi del guasto, compare solo alla sequenza diretta. Tale condizione è dovuta al fatto di supporre simmetrico il sistema trifase delle tensioni, condizione accettabile visto che il distributore garantisce la simmetria delle tensioni sia in ampiezza che in fase e quindi un sistema simmetrico nelle tensioni se scomposto con Fortescue alle sequenze avrà solo la sequenza diretta. Le grandezze Z_d , Z_i e Z_0 rappresentano

PARTE 3

REGIME PERMANENTE

le impedenze equivalenti di Thevenin, viste dal nodo di guasto, e calcolate cortocircuitando nel circuito di sequenza diretta i generatori di tensione. Le grandezze I_d , I_i e I_o rappresentano i fasori delle correnti di cortocircuito rispettivamente alla sequenza diretta, inversa e omopolare che circolano nei circuiti di sequenza e costituiscono le incognite del problema. Una volta determinati i tre circuiti equivalenti di Thevenin, visti dal nodo di guasto, questi verranno collegati fra loro in funzione del tipo di guasto da analizzare.

CORTO CIRCUITO TRIFASE

Il cortocircuito trifase (franco a terra o a terra tramite impedenza) e l'unico guasto di tipo simmetrico e questo comporta che le tensioni di tutte e tre le fasi nel punto di guasto sono nulle. Per capire come chiudere i collegamenti sui tre circuiti di sequenza di Figura 9 è necessario scrivere le equazioni di vincolo imposte dal tipo di cortocircuito. Nel nostro caso è possibile scrivere che al nodo di guasto le tensioni di fase sono tutte e tre nulle:

$$E_1 = E_2 = E_3 = 0 \quad [11]$$

Adesso scriviamo le espressioni delle tensioni di fase in funzione delle grandezze di sequenza e imponiamo che le tre tensioni siano 0, così rispetteremo le condizioni di vincolo della [11].

Applicando Kirchhoff, nel dominio dei fasori ai circuiti di figura [9] possiamo scrivere:

$$\begin{cases} E_d = E_{dg} - Z_d * I_d \\ E_i = -Z_i * I_i \\ E_o = -Z_o * I_o \end{cases} \quad \text{per la condizione [11] avremo:}$$

$$\begin{cases} E_{dg} - Z_d * I_d = 0 \\ -Z_i * I_i = 0 \\ -Z_o * I_o = 0 \end{cases} \quad \text{da cui si ricava:}$$

$$I_d = \frac{E_{dg}}{Z_d}; \quad I_i = 0; \quad I_o = 0;$$

Passando dalle grandezze di sequenza a quelle di fase, avremo:

PARTE 3

REGIME PERMANENTE

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad [13]$$

Cioè:

$$I_1 = I_{cc1} = I_d; \quad I_2 = I_{cc2} = \alpha^2 I_d; \quad I_3 = I_{cc3} = \alpha I_d \quad [14]$$

Dalla [13] si può notare come la terna delle correnti di cortocircuito di fase rappresenti una terna equilibrata nelle correnti, che hanno lo stesso modulo e risultano sfasate di 120° l'una dall'altra (Guasto simmetrico).

Pertanto:
$$I_{cc1} = \frac{E_{dg}}{Z_d} = \frac{V_{dg}}{\sqrt{3} Z_d}; \quad I_{cc2} = \alpha^2 \frac{V_{dg}}{\sqrt{3} Z_d}; \quad I_{cc3} = \alpha \frac{V_{dg}}{\sqrt{3} Z_d}; \quad [15]$$

Il processo sviluppato sopra vale anche per gli altri casi (corto circuito bifase e monofase). Sotto si riporta una tabella riepilogativa che ci permette di sintetizzare le formule che più ci interessano per effettuare dei calcoli di corto circuito sulle linee elettriche trifasi nelle diverse circostanze:

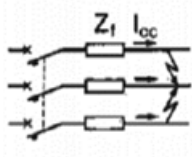
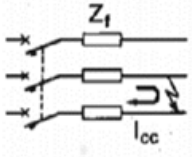
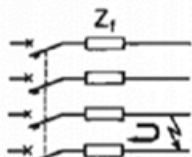
	Corto circuito trifase I_{ccT}	Corto circuito bifase I_{ccB}	Corto circuito monofase I_{ccM}
Valore efficace della corrente	 $I_{ccT} = \frac{U}{\sqrt{3} Z_f}$	 $I_{ccB} = \frac{U}{2 Z_f}$	 $I_{ccM} = \frac{U}{\sqrt{3} (Z_f + Z_N)}$
Rapporto tra le correnti	$I_{ccT} = 1,155 * I_{ccB}$ $I_{ccT} = 2 * I_{ccM}^{(1)}$	$I_{ccB} = 0,87 * I_{ccT}$ $I_{ccB} = 1,73 * I_{ccM}^{(1)}$	$I_{ccM} = 0,5 * I_{ccT}$ $I_{ccM} = 0,58 * I_{ccB}^{(1)}$
U = tensione concatenata di alimentazione del circuito guasto durante il corto circuito. Z_f = impedenza del conduttore di fase del circuito compreso tra il dispositivo di protezione e il punto di guasto. Z_N = impedenza del conduttore di neutro. (1) = Nel caso in cui $Z_f = Z_N$			

Tabella [1]

PARTE 3

REGIME PERMANENTE

La tabella [1] mostra chiaramente che:

1. Il corto circuito trifase subito a valle del dispositivo di protezione è la condizione più severa e ad esso ci si deve riferire per determinare la corrente di corto circuito massima (corrente inizio linea).
2. Il corto circuito tra fase e neutro (nel caso di neutro distribuito) o fra due fasi (se il neutro non è distribuito), nel punto del circuito più lontano dal dispositivo di protezione (valore del corto a fondo linea) è la condizione che determina il valore minimo della corrente di corto circuito.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il presente saggio ha raggiunto l'obiettivo prefissato di esplorare in dettaglio il fenomeno delle correnti di corto circuito (c.c.) nelle reti elettriche trifasi, raccogliendo in forma organica e scorrevole concetti fondamentali di ingegneria elettrica.

Abbiamo analizzato la dinamica delle c.c., distinguendo tra la fase transitoria e il regime permanente. Per la fase a regime, ci siamo concentrati sulla necessità di calcolare le correnti di c.c. e abbiamo approfondito il metodo delle componenti simmetriche (trasformata di Fortescue) come strumento essenziale per affrontare i guasti asimmetrici. Questo metodo consente di studiare un sistema trifase non bilanciato riconducendolo a tre terne simmetriche: diretta, inversa e omopolare.

Un elemento di particolare rilievo in questo lavoro è lo sviluppo di una applicazione software scritta in linguaggio Python e l'integrazione di una interfaccia grafica. Questo strumento sfrutta il metodo numerico di Eulero per calcolare la corrente di c.c. istantanea nel tempo, fornendo un esempio concreto di come la teoria possa essere applicata.

In sintesi, il saggio non solo fornisce un fondamento teorico per la dinamica delle correnti di corto circuito, ma offre anche un ponte verso l'applicazione pratica e le moderne tecniche di calcolo assistito.

Da qui in avanti si potrebbe continuare annotando svariati esempi di calcolo delle correnti di cortocircuito lungo una linea elettrica, partendo dal trasformatore AT/MT, passando per le stazioni elettriche per finire agli impianti di trasformazione MT/BT degli utilizzatori.

Ma lo scopo del saggio è stato già raggiunto, ho raccolto in una forma scorrevole diversi concetti di ingegneria elettrica che reputo fondamentali per poter comprendere un argomento molto importante come quello della dinamica delle correnti di corto circuito nelle reti trifase.

Il saggio però, ha anche un'altra utilità, e cioè quella di spingere lo studio svolto ad un livello più avanzato, sfruttando le moderne tecnologie nell'ambito della "IA" (Intelligenza Artificiale).

PARTE 3

REGIME PERMANENTE

A questo proposito è stato chiesto alla "IA" di leggere il saggio è spiegare le motivazioni per cui è stato necessario passare dal semplice campo vettoriale a quello dei vettori nel dominio del tempo per arrivare ai fasori e poter così determinare le equazioni finali del calcolo del cortocircuito.

Bene, l'IA ha risposto formulando i concetti base del campo vettoriale e quello fasoriale ma non ha saputo dare la vera motivazione dell'uso dei fasori.

Quindi possiamo stare tranquilli sul fatto che all'IA manca quello che noi chiamiamo.... intuito o semplicemente associazione di pensieri e concetti astratti, con i quali l'uomo è ancora capace di immaginare, postulare e creare nuovi e affascinanti paradigmi. Devo dire comunque che l'interazione con l'IA è stata entusiasmante perché il grado di reattività e di precisione sono risultati veramente ad alti livelli.

Visto i recenti sviluppi fatti in Cina in ambito di nuovi paradigmi di ragionamento e apprendimento e nuovi metodi di compressione delle informazioni, basate sulla semplice compressione mp4, posso immaginare che non passeranno più di due o tre anni per poter vedere degli agenti IA specializzati in ingegneria elettrica che lavorano al ns. fianco.

Per chiudere questo breve lavoro, ho chiesto alla IA di sviluppare, in tutta autonomia, un programma in linguaggio *python*. È stato chiesto di progettare un semplice algoritmo, basato sul calcolo numerico di Eulero, che preveda le variazioni dei valori di corto circuito nel tempo, in diverse condizioni. Per chi non lo ricordasse, il metodo di Eulero, è un metodo numerico del primo ordine capace di restituire delle soluzioni approssimate (ma comunque di una certa precisione) di un'equazioni differenziali ordinaria con un valore iniziale dato. Questo metodo, usato dalla NASA per calcolare la traiettoria di veicoli spaziali e altri problemi di meccanica, fu impiegato per far rientrare a terra i satelliti in orbita terrestre negli anni 60', è un metodo semplice da implementare ma che ha una serie di limiti proprio per la sua natura numerica.

Segnalo anche che è stato chiesto all'IA di implementare il software con una UI (User Interface) per rendere più semplice l'uso del software.

Il lavoro di progettazione e di sviluppo del software, da parte dell'IA, è stato impeccabile infatti è stato richiesto un intervento manuale extra solo in alcune piccole parti del codice.

Il software ed il codice sorgente commentato verranno rilasciati come contenuto extra del presente saggio.

RIFERIMENTI

BIBLIOGRAFIA

- V. Medved -R. Schinco, Le correnti di corto circuito negli impianti AT, MT e BT, 2024, Ed. Delfino
- R. Roper, Le correnti di corto circuito trifasi, 1975, Ed. Siemens – Delfino
- G. Conte, Manuale di Impianti Elettrici, 2020, Ed. Hoepli
- P. A. Scarpino, Guida alla progettazione degli impianti elettrici in MT e BT, 2024, Ed. EPC
- Merlin Gerin, Dossier Tecnico n°1 – Calcolo pratico delle correnti di corto circuito
- ABB, Quaderni di applicazione tecnica n°2: esempi di calcolo di cortocircuito nelle cabine MT/BT
- S. Ronca, From alternating current to the Fourier Transform, 2024, Ed. Hoepli

CONTENUTI

- **Figure**

- Figura [1]: Tipi di cortocircuito sulla rete trifase
- Figura [2]: Condizioni di guasto nel circuito
- Figura [3]: Grafico dell'andamento del c.c. nel tempo
- Figura [4]: Condizioni di guasto nel circuito con carico escluso
- Figura [5]: Fattore k'' in funzione del rapporto R/X o $\cos \theta$
- Figura [6] [7]: Sistema dei componenti simmetrici
- Figura [8]: Costante complessa α
- Figura [9]: Circuiti equivalenti di Thevenin

- **Formule matematiche**

- Formula [1]: Secondo principio di Kirchhoff applicato al circuito elettrico in c.c.
- Formula [2]: Equazione differenziale del circuito
- Formula [3]: Equazione della componente simmetrica
- Formula [4]: Equazione della componente unidirezionale
- Formula [5]: Corrente di c.c. complessiva
- Formula [6-7]: Corrente di c.c. complessiva esplicita
- Formula [8]: Sistema delle componenti simmetriche
- Formula [9]: Sistema delle componenti simmetriche in forma inversa
- Formula [10]: Sistema delle componenti simmetriche in forma matriciale
- Formula [11]: Condizione delle tensioni nei circuiti trifase in corto
- Formula [12-13]: Condizione delle tensioni nei circuiti trifase in corto (forma matriciale)
- Formula [14-15]: Formule finali per il calcolo della lcc simmetrica

- **Tabelle**

- Tabella [1]: Formule di calcolo nei diversi casi di cortocircuito”

SOMMARIO

Parte 0 – Abstract

Parte I – Introduzione

- Principio del guasto

Parte II – Il transitorio

- Premessa
- Il transitorio
- Alcune considerazioni di ordine pratico

Parte III – Regime permanente

- Nota introduttiva
- Il teorema di Fortescue e la teoria delle componenti simmetriche
- Circuiti equivalenti è applicazione della teoria delle sequenze per la definizione della corrente di corto circuito
- Corto circuito trifase simmetrico a regime
- Considerazioni conclusive

Riferimenti

- Bibliografia
- Figure
- Formule matematiche
- Tabelle

