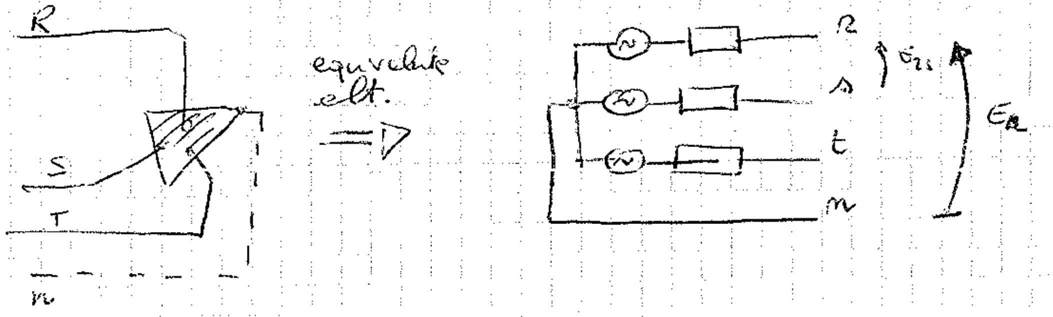
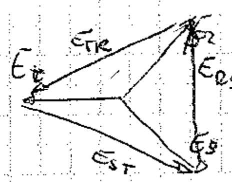
I sistemi elettrici con cui abbiamo a che fare sono tutti sistemi 3-fase.
Consideriamo il modello del generico tripolo



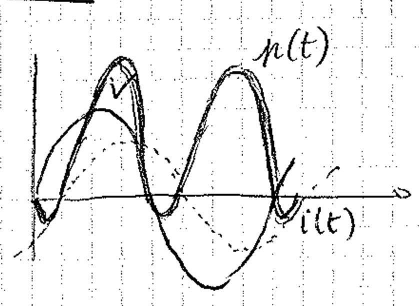
Possiamo avere sistemi 3-fase a 3/4 fili a seconda se è presente o meno il neutro. Il tripolo può essere realizzato con collegamento a stella o a triangolo. Noi utilizzeremo sempre il circuito equivalente a stella.

E_R: tensione stellata
E_{RS}: tensione concatenata. $(E_{RS} = E_R - E_S)$



Quando si parla di tensioni in sistema 3-fase si parla di TENSIONI CONCATENATE

Potenza



$p(t) = v(t)\, i(t)$ sinusoide di freq. doppia risp. a v ed i.

P è il valor medio di p(t)
S è il valor max dell'oscillazione rispetto al valor medio.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$P = VI\cos\varphi$ $\quad S = VI$ $\quad Q = VI\sin\varphi$

Con i numeri complessi $\quad S = P + jQ = VI^*$

Sistemi 3φ vs MONOFASE

La potenza elt. in un sistema 3φ è la somma delle potenze elettriche di ogni fase. La potenza totale 3φ è costante ed è pari alla somma delle potenze attive di ogni singola fase. In un sistema monofase la potenza varia a $f = 100$ Hz. In un sistema 3φ no. Il sistema 3φ è in grado di fornire una coppia costante.

Notazioni:

$$E = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \qquad I = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \qquad I^T = \begin{bmatrix} I_a & I_b & I_c \end{bmatrix}$$

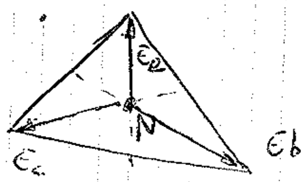
$$I^* = \begin{bmatrix} I_a^* \\ I_b^* \\ I_c^* \end{bmatrix} \qquad I^+ = (I^T)^*$$

$$S = I^+ E = \begin{bmatrix} I_a^* & I_b^* & I_c^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = E_a I_a^* + E_b I_b^* + E_c I_c^*$$

$$P = \sqrt{3}\, V I \cos\varphi \qquad S = \sqrt{3}\, V I \qquad Q = \sqrt{3}\, V I \sin\varphi$$

V: tensioni concatenate

I: correnti di linea.



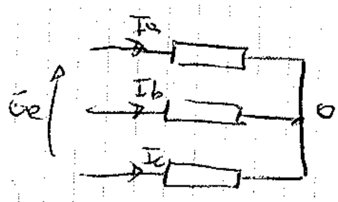
N è il baricentro delle tensioni concatenate

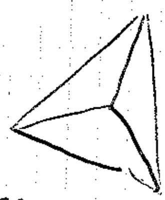
$$E_a + E_b + E_c = 0$$

Inoltre N è il centrostella teorico.

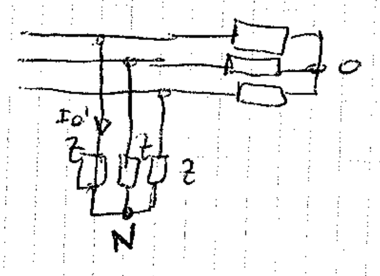
In generale il centrostella non coincide con N.

Consideriamo un 3-polo realizzato a stella. Se I_a, I_b, I_c ed $E_a, \ldots, E_c$ sono del tutto generici ci troviamo nella situazione disegnata:





Per trovare il centrostella reale è sufficiente creare un circuito del genere

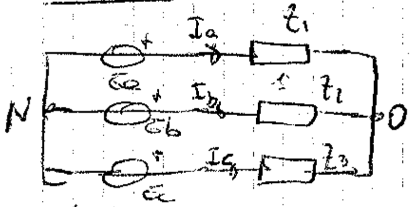


$$E_a' = Z I_a'$$
$$E_b' = Z I_b'$$
$$E_c' = Z I_c'$$

$$\underbrace{E_a' + E_b' + E_c'}_{=0} = Z \underbrace{(I_a' + I_b' + I_c')}_{=0}$$

Abbiamo così creato il centrostella teorico. Ora possiamo misurare la diff. di potenziale tra il centrostella teorico N ed il centro stella reale O.

Richiamo: tecniche di soluzione dei circuiti 3-fase.

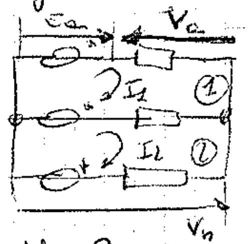


Prendiamo 3 tensioni E_a, E_b, E_c tale che la somma sia 0.

Noti E_a, E_b, E_c e note Z_1, Z_2, Z_3 determinare I_a, I_b, I_c.

Tecnica delle correnti di maglia:

Definisco due correnti di maglia I_1 e I_2



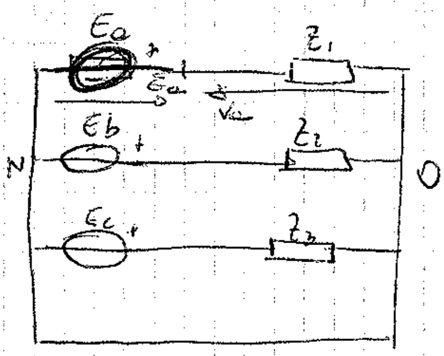
M. 1: $E_a - E_b = Z_1 I_1 + Z_2 (I_1 - I_2)$

$$(Z_1 + Z_2) I_1 - Z_2 I_2 = E_a - E_b$$

M. 2: $E_b - E_c = -Z_2 I_1 + (Z_2 + Z_3) I_2$

$$\begin{bmatrix} Z_1+Z_2 & -Z_2 \\ -Z_2 & Z_2+Z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a - E_b \\ E_b - E_c \end{bmatrix} \Rightarrow I_1, I_2$$

Se il sistema è a 4 fili

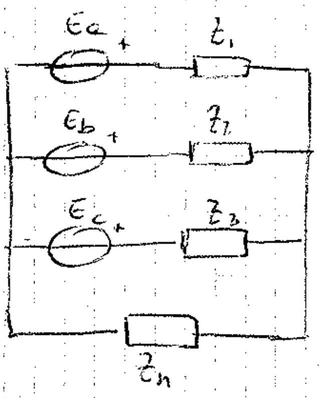


In questo caso $V_n = 0$

$E_a = Z_1 I_a \qquad I_a = \frac{E_a}{Z_1}$

idem per I_b ed I_c

Il sistema può essere anche il seguente

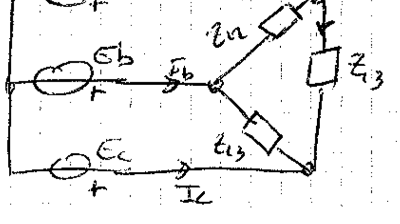


$E_a = 230 \angle 30$

$E_b = 230 \angle -30 \qquad E_c = 230 \angle -150°$

$Z_a = 10 \angle 0°$
$Z_b = 15 \angle 20$
$Z_c = 12 \angle 20$

Se

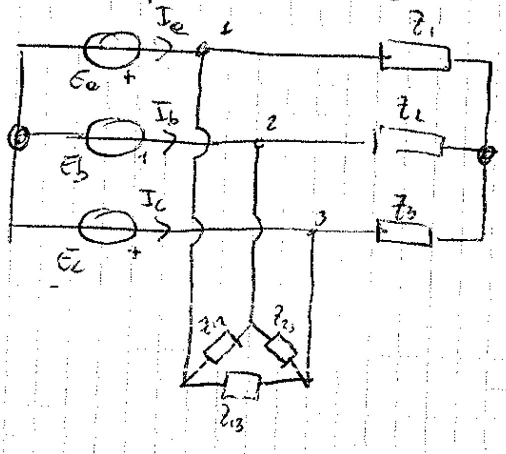


La tensione a Z_{12} non è che $E_a - E_b$

$I_{12} = \frac{E_a - E_b}{Z_{12}}$ Idem per I_{23} e I_{13}

$I_a = I_{12} + I_{13}$

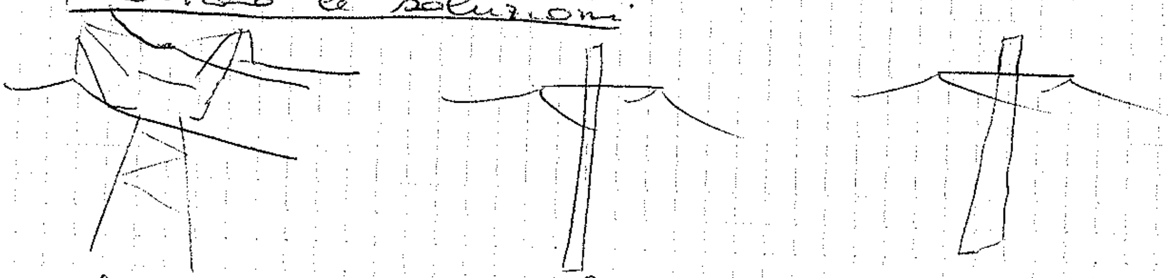
Altro tipo di esercizio



Per il triangolo le correnti sono le stesse della volta precedente.

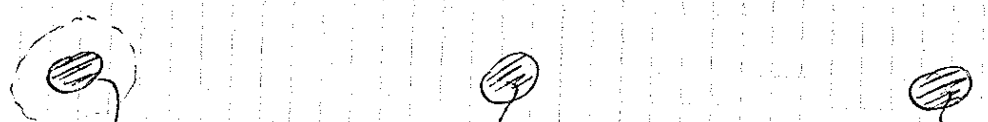
Il passo successivo è di aggiungere 3 impedenze (Z'_1, Z'_2 e Z'_3) prima delle derivazioni 1, 2 e 3.

<u>Analizziamo le soluzioni</u>



trifase ca — monofase ca — c.c.

Qual è la potenza che può essere trasmessa da ciascuna soluzione a parità di rame e di isolamento verso terra e a parità di lunghezza L delle linee



$S_{trif/3}$ — $S_{monofase}$ — $S_{c.c.}$

Parità di rame significa che il volume deve essere lo stesso

	trifase	monofase	continua
volume	$3\, S_{trif/3}\, L$	$L \cdot 2 \cdot S_{monofase}$	$2 \cdot S_{cc} \cdot L$
max V verso terra	$\sqrt{2}\, E$	$\sqrt{2}\, E$	$\sqrt{2}\, E$
corrente	$\delta\, S_{trif/3}$	$\delta\, S_{mono}$	$\delta\, S_{cc}$

$$S_{monofase} = S_{cc} = \frac{3}{2} S_{trif/3} \Rightarrow S_{trif/3} = \frac{2}{3} S_{mono}$$

$$P_{trif} = 3EI\cos\varphi = 3E\delta S_{trif/3}\cos\varphi$$

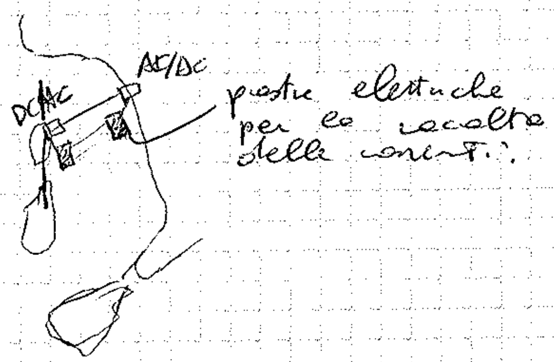
$$P_{mono} = EI\cos\varphi = E\delta S_{mono}\cos\varphi$$

$$P_{cc} = \sqrt{2}EI = \sqrt{2}E\delta S_{cc} = \frac{\sqrt{3}}{2} P_{trif} / \cos\varphi$$

La potenza 3 fase è doppia rispetto a quella monofase

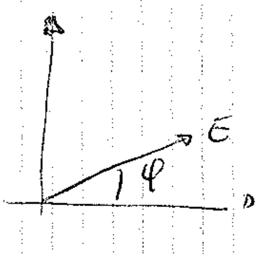
Il sistema trifase trasporta più potenza. Inoltre se correttamente gestito è in grado di trasportare una potenza costante (fornisce coppia costante ai motori).

I sistemi ca sono tornati in auge perché è stato inventato un convertitore statico che consente di aumentare la tensione. Quindi per lunghe distanze e alte potenze può convenire usare la corrente continua. Inoltre la corrente continua filtra i disturbi. Si usa anche la corrente continua per mettere in comunicazione di 2 aree ac per evitare la propagazione dei disturbi.
La continua viene utilizzata per le connessioni via mare. (Si usa un solo cavo, perché il ritorno è il mare).



Per determinare univocamente una sinusoide occorrono:
- Valore max oppure valore efficace
- sfasamento
- frequenza oppure la pulsazione.

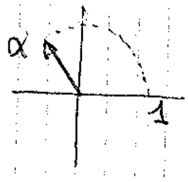
Se non sottointendiamo $f = 50\ Hz$ ci bastano solo 2 parametri.
Possiamo individuare le sinusoidi con dei vettori nel piano complesso (i fasori)



$$E\cos\varphi + jE\sin\varphi.$$

Alcune terne di vettori sono interessanti:
vettori uguali in modulo, ma sfasati di 120° l'uno rispetto all'altro. Se si susseguono in senso orario la terna è diretta, se si susseguono in senso antiorario la terna è inversa

definiamo $\alpha = 1\angle 120°$



$\underline{E} = E_{\angle\varphi}$

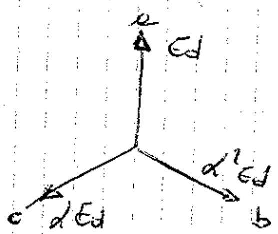
$\underline{E}\alpha = E_{\angle 120°+\varphi}$

L'applicazione del vettore α ad un generico vettore E porta ad un vettore che ha lo stesso modulo di E, ma è ruotato di 120° in senso antiorario.

$\alpha^2 = 1_{\angle 240°} = 1_{\angle -120°}$

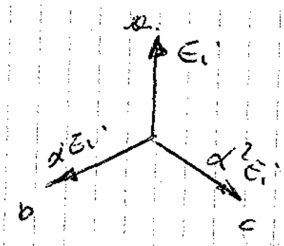
$\alpha^3 = 1_{\angle 360°} = 1$

$$E_d = \begin{bmatrix} E_d \\ \alpha^2 E_d \\ \alpha E_d \end{bmatrix}$$



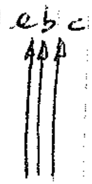
terna diretta

$$E_i = \begin{bmatrix} E_i \\ \alpha E_i \\ \alpha^2 E_i \end{bmatrix}$$



Terna inversa

$$E_0 = \begin{bmatrix} E_0 \\ E_0 \\ E_0 \end{bmatrix}$$



Terna omopolare

Una terna è pura se la somma dei vettori ~~pari~~ è nulla. Le terne inversa e diretta sono pure. (Anche $1+\alpha+\alpha^2=0$ è una terna pura).

$E_{abc} = \begin{vmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{vmatrix}$ può essere scomposta in una terna diretta + una terna inversa + una terna omopolare.

$$E_{abc} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_d \\ \alpha^2 E_d \\ \alpha E_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_i \\ \alpha E_i \\ \alpha^2 E_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_0 \\ E_0 \\ E_0 \end{bmatrix}$$

cioè:

$$\begin{cases} E_a = E_d + E_i + E_0 = E_0 + E_d + E_i \\ E_b = \alpha^2 E_d + \alpha E_i + E_0 = E_0 + \alpha^2 E_d + \alpha E_i \\ E_c = \alpha E_d + \alpha^2 E_i + E_0 = E_0 + \alpha E_d + \alpha^2 E_i \end{cases}$$

In notazione matriciale

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \bar E_a \\ \bar E_b \\ \bar E_c \end{bmatrix}}_{\text{generica terna}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}}_{\text{trasformazione di Fortescue}} \underbrace{\begin{bmatrix} \bar E_o \\ \bar E_d \\ \bar E_i \end{bmatrix}}_{\text{terna delle componenti simmetriche}}$$

$$\bar E_{abc} = \bar F \; \bar E_{odi} \qquad \text{trasformazione lineare}$$

La trasformazione è non degenere $(\det(F) \cancel{=3} \neq 0)$ quindi F è invertibile. Perciò è possibile

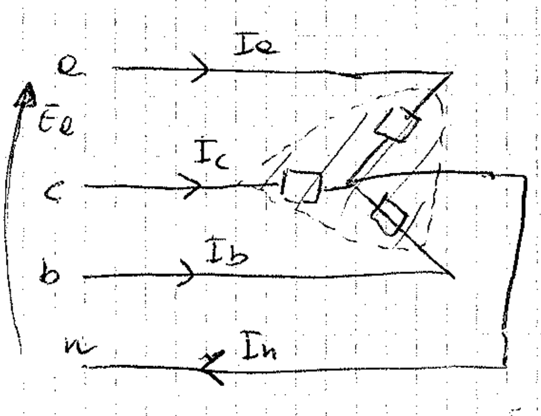
$$\bar E_{odi} = F^{-1} \bar E_{abc} \qquad F^{-1} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar E_o \\ \bar E_d \\ \bar E_i \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \bar E_a \\ \bar E_b \\ \bar E_c \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{cases} \bar E_o = \frac{1}{3}(\bar E_a + \bar E_b + \bar E_c) \\ \bar E_d = \frac{1}{3}(\bar E_a + \alpha \bar E_b + \alpha^2 \bar E_c) \\ \bar E_i = \frac{1}{3}(\bar E_a + \alpha^2 \bar E_b + \alpha \bar E_c) \end{cases}$$

Ovviamente $F \cdot F^{-1} = F^{-1} F = \mathbb{I}$

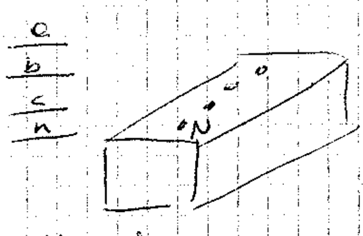
Consideriamo il generico 3-polo stellato



$$\bar I_n = \bar I_a + \bar I_b + \bar I_c$$

Ipotesi: il tripolo è lineare cioè le impedenze sono costanti.

$$\begin{bmatrix} \bar E_a \\ \bar E_b \\ \bar E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & Z & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & Z \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \bar I_a \\ \bar I_b \\ \bar I_c \end{bmatrix}$$



N noto.

Dire che il sistema è fisicamente simmetrico significa che le 3 fasi sono indistinguibili. (Posso collegare come voglio le tre fasi allo scatolotto e non succede nulla). cioè $Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc} = Z$.

Poichè i fili nei sistemi trifase viaggiano vicini si avranno mutue induttanze tra i sistemi.
Poichè il sistema è simmetrico gli accoppiamenti tra due fasi sono identici. Quindi la matrice delle impedenze sarà simmetrica ciclica.

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z & Z_{m1} & Z_{m2} \\ Z_{m2} & Z & Z_{m1} \\ Z_{m1} & Z_{m2} & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \qquad \begin{matrix} Z_{m1} = Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} \\ Z_{m2} = Z_{ba} = Z_{cb} = Z_{ac} \end{matrix}$$

Se il sistema è passivo le mutue sono bidirezionali ($Z_{m1} = Z_{m2}$).
In alcuni casi (esempio macchine in cui si ha conversione di energia come motori e generatori) $Z_{m1} \neq Z_{m2}$.

Chiamano $E_{abc} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix}$ $I_{abc} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$ $Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z & Z_{m1} & Z_{m2} \\ Z_{m2} & Z & Z_{m1} \\ Z_{m1} & Z_{m2} & Z \end{bmatrix}$

Si ottiene $E_{abc} = Z_{abc} I_{abc}$.

$\Downarrow$ passo da coordinate di fase a coordinate simmetriche.

$E_{odi} = Z_{odi} I_{odi}$

Trovate le correnti I_{odi} ritorno alle correnti I_{abc}.

Se Z_{abc} è quella vista prima si ha che

$Z_{odi} = \begin{bmatrix} Z_o & 0 & 0 \\ 0 & Z_d & 0 \\ 0 & 0 & Z_i \end{bmatrix}$ Per cui le equazioni interallacciate si sono disaccoppiate

Le macchine vengono definite solo con Z_o, Z_d e Z_i.

Ipotesi fatte sino ad ora:
- linearità $\rightarrow$ le Z sono cost.
- sinusoidalità $\rightarrow$ V ed I sinusoid.
- simmetria $\rightarrow$ simmetria ciclica della matrice delle Z.

- Dimostriamo che la $Z_{odi} = \begin{bmatrix} Z_o & 0 & 0 \\ 0 & Z_d & 0 \\ 0 & 0 & Z_i \end{bmatrix}$

$E_{abc} = Z_{abc} I_{abc}$. moltiplichiamo entrambi i termini per F^{-1}

$\underbrace{F^{-1} E_{abc}} = F^{-1} Z_{abc} I_{abc}$

$E_{odi} = F^{-1} Z_{abc} F I_{odi}$

$E_{odi} = \underbrace{(F^{-1} Z_{abc} F)}_{Z_{odi}} I_{odi}$

$$Z_{odi} = F^{-1} Z_{abc} F = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z & Z_{m1} & Z_{m2} \\ Z_{m2} & Z & Z_{m1} \\ Z_{m1} & Z_{m2} & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_d & 0 \\ 0 & 0 & Z_i \end{bmatrix}$$

$Z_0 = Z + Z_{m1} + Z_{m2}$ impedenza omopolare

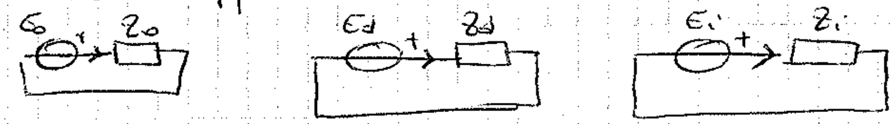
$Z_d = Z + \alpha^2 Z_{m1} + \alpha Z_{m2}$ impedenza diretta

$Z_i = Z + \alpha Z_{m1} + \alpha^2 Z_{m2}$ impedenza inversa.

Quindi possiamo usare le equazioni:

$$\begin{cases} E_0 = Z_0 I_0 \\ E_d = Z_d I_d \\ E_i = Z_i I_i \end{cases}$$

la cui rappresentazione circuitale è:



In condizioni normali la terna è ~~simmetrica~~ diretta e quindi sia E_0 che E_i sono nulli.

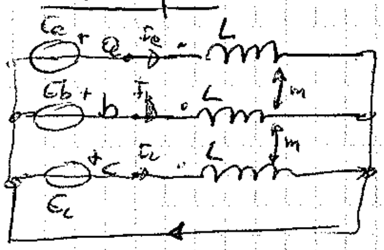
Nel suo funzionamento normale ~~di~~ un sistema trifase può essere rappresentato da un sistema monofase.

$I_{abc} = Y_{abc} E_{abc}$

$I_{odi} = Y_{odi} E_{odi}$

Per i componenti passivi (linee di rete o trafo) $Z_0 = Z + 2Z_m$, $Z_d = Z_i = Z + (\alpha + \alpha^2) Z_m =$
$= Z - Z_m$.

Esempio:



Supponiamo E_a, E_b ed E_c siano del tutto generiche

$E_a = (j\omega L) I_a + (j\omega M) I_b + (j\omega M) I_c$

applico le componenti simmetriche, cioè immagino di alimentare con una terna diretta di tensione. In questo caso la corrente di neutro vale 0 ($I_a + I_b + I_c = 0$).

Per la terna diretta $E_d = (j\omega L) I_d + (j\omega M)(I_b + I_c) =$

$$= (j\omega L - j\omega M) I_d = \underbrace{j\omega (L - M)}_{Z_d} I_d$$

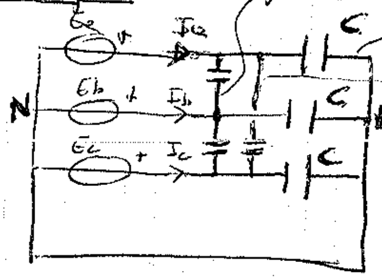
Z_d è detta anche impedenza di servizio.

Consideriamo la terna di alimentazione omopolare. Si avranno 3 correnti I_0 uguali. La corrente di neutro sarà $3I_0$

$$E_0 = (j\omega L) I_0 + j\omega M I_0 + j\omega M I_0 = \underbrace{j\omega (L + 2M)}_{Z_0} I_0$$

Se il sistema è a 3 fili la corrente omopolare non può circolare. Cosa succede se alimento con una terna di tensioni omopolari? Non circola corrente. In questo caso l'impedenza ~~opo~~ omopolare è infinita

Esempio



$j\omega C'(E_a - E_b)$ $\cancel{\frac{1}{j\omega C} E_a}$ $j\omega C E_a$

$j\omega C'(E_a - E_c)$

Se alimentiamo con terna diretta:

$$I_a = j\omega C E_a + j\omega C'(E_a - E_c) + j\omega C'(E_a - E_b)$$

$$= j\omega(C + 2C')E_a - j\omega C' E_b - j\omega C' E_c =$$

$$= j\omega(C + 2C')E_a - j\omega C' \underbrace{(E_b + E_c)}_{-E_a} =$$

$$= j\omega(C + 3C')E_a$$

$$I_d = j\omega \underbrace{(C + 3C')}_{C_d \to \text{capacità di servizio}} E_d$$

Se alimento con terna omopolare $\quad I_0 = j\omega C E_0$ ↳ capacità omopolare.

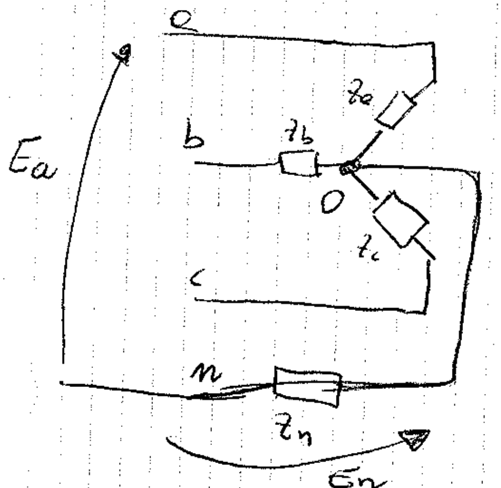
Se togliamo il neutro non circolano le correnti omopolari.

Ricordiamo che

Z_{abc} per sistemi fisicamente simmetrici è a simmetria ciclica $\begin{vmatrix} \circ & \triangle & \square \\ \square & \circ & \triangle \\ \triangle & \square & \circ \end{vmatrix}$

mentre $\quad Z_{odi} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_i & 0 \\ 0 & 0 & Z_d \end{bmatrix}$

Analizziamo il seguente quadripolo.



L'impedenza Z_n è mutuamente concatenata con le fasi.

Scriviamo l'equazione per la fase a:

$$\begin{cases} E_a = Z I_a + Z_{m1} I_b + Z_{m2} I_c + Z_{mn} I_n + E_n \\ E_b = Z_{m2} I_a + Z I_b + Z_{m1} I_c + Z_{mn} I_n + E_n \\ E_c = Z_{m1} I_a + Z_{m2} I_b + Z_{m} I_c + Z_{mn} I_n + E_n \\ E_n = Z_{mn} I_a + Z_{mn} I_b + Z_{mn} I_c + Z_n I_n \\ I_n = I_a + I_b + I_c \end{cases}$$

$$E_n = (Z_{mn} + Z_n) I_a + (Z_{mn} + Z_n) I_b + (Z_{mn} + Z_n) I_c$$

Sostituiamo E_n

$$E_a = \underbrace{(Z + 2Z_{mn} + Z_n)}_{Z'} I_a + \underbrace{(Z_{m1} + 2Z_{mn} + Z_n)}_{Z'_{m1}} I_b + \underbrace{(Z_{m2} + 2Z_{mn} + Z_n)}_{Z'_{m2}} I_c$$

$$\begin{cases} E_a = Z' I_a + Z'_{m1} I_b + Z'_{m2} I_c \\ E_b = Z'_{m2} I_a + Z' I_b + Z'_{m1} I_c \\ E_c = Z'_{m1} I_a + Z'_{m2} I_b + Z' I_c \end{cases}$$

ottengo una matrice a simmetria ciclica che tiene conto del neutro

Cosa succede se faccio la trasformazione in Z_{odi}?

$$Z_{odi} = \begin{bmatrix} Z'_o & 0 & 0 \\ 0 & Z_d & 0 \\ 0 & 0 & Z_i \end{bmatrix}$$

Z_d e Z_i rimangono uguali

$$Z'_o = Z_o + 6 Z_{mn} + 3 Z_n$$

Applichiamo la sovr. degli effetti sul quadripolo.
Se applico terna diretta o inversa non circola corrente nel neutro (e Z_d e Z_i rimangono le stesse)
Se applico terna omopolare (metto I_o per ogni fase) nel neutro passa $3I_o$.
Se l'impedenza di neutro è priva di accoppiamenti mutui si elimina Z_{mn} ($Z'_o = Z_o + 3Z_n$).

Ragioniamo ora sulle potenze:

$$S = E_a I_a^* + E_b I_b^* + E_c I_c^* = \underbrace{[I_a^* \; I_b^* \; I_c^*]}_{(I_{abc}^*)^T = I_{abc}^\dagger} \underbrace{\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix}}_{E_{abc}} =$$

$$= I_{abc}^\dagger E_{abc}$$

$$E_{abc} = F E_{odi}$$

$$I_{abc} = F I_{odi} \Rightarrow I_{abc}^* = F^* I_{odi}^* \Rightarrow I_{abc}^\dagger = (F^* I_{odi}^*)^T$$

Ricordiamo

$$(AB)^T = B^T A^T$$

Quindi $\quad I_{abc}^\dagger = (I_{odi}^*)^T (F^*)^T = I_{odi}^\dagger F^\dagger$

$$S = I_{odi}^\dagger (F^\dagger F) E_{odi}$$

$$F^\dagger = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}$$

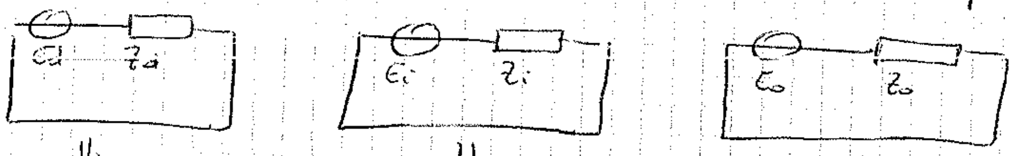
$F^+ = 3F^{-1}$ Quindi $F^+F = 3\underbrace{F^{-1}F}_{1} = 3$

Di conseguenza

$S = 3\, I_{odi}^+ E_{odi}$

il sistema è scomponibile in tre reti.

rete diretta, rete inversa e rete omopolare



$S_d = I_d^* E_d$ $\quad$ $S_i = I_i^* E_i$ $\quad$ $S_o = I_o^* E_o$

$$\boxed{S = 3\,(S_o + S_d + S_i)}$$

Ricavo Z_{abc} partendo da Z_{odi}

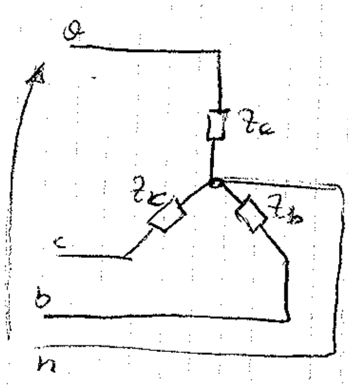
$Z_{odi} = F^{-1} Z_{abc} F$ moltiplico per F a sx

$F Z_{odi} = \underbrace{F F^{-1}}_{I} Z_{abc} F$ moltiplico per F^{-1} a dx

$F Z_{odi} F^{-1} = Z_{abc}$

Supponiamo di partire da una Z_{odi} a simmetria ciclica

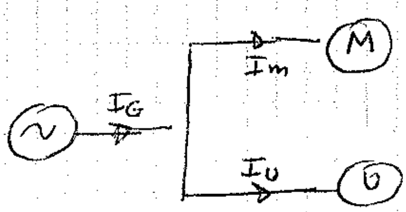
$$\underset{Z_{odi}}{\begin{bmatrix} \circ & \square & \triangle \\ \triangle & \circ & \square \\ \square & \triangle & \circ \end{bmatrix}} \xrightarrow{F Z_{odi} F^{-1}} \underset{Z_{abc}}{\begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix}}$$



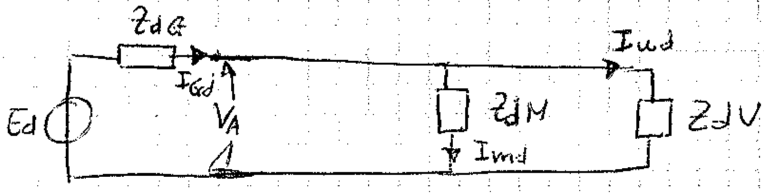
Se non ho mutue

$$\begin{cases} E_a = Z_a I_a \\ E_b = Z_b I_b \\ E_c = Z_c I_c \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} E_o = Z_\alpha I_o + Z_\beta I_d + Z_\gamma I_c \\ E_i = Z_\gamma I_o + Z_\alpha I_d + Z_\beta I_c \\ E_d = Z_\beta I_o + Z_\gamma I_d + Z_\alpha I_c \end{cases}$$

Supponiamo di avere un generatore che alimenti due carichi: un motore ed un utilizzatore 3ϕ fisicamente simmetrici.

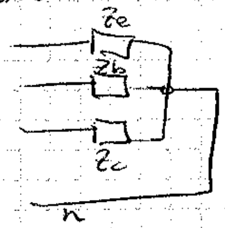


Suppongo che la terna sia diretta, il sist. fis. simmetrico quindi immagino che le correnti abbiano seq. diretta.



In questo caso non ci sono reti di seq inversa o omopolare.

Supponiamo che U sia dissimmetrico cioè U sia rappresentato da



.. U provoca circolazione di correnti di sequenza diretta, ed inversa ed omopolare (se neutro portato fuori).

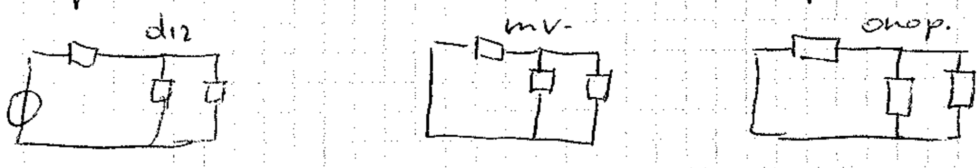
Va ora non è più una terna di sequenza diretta. Il motore vede ai suoi capi una terna dissimmetrica.

La corrente diretta genera una coppia diretta, la corrente inversa genera coppia inversa, mentre la coppia omopolare scalda soltanto.

Lo spunto del motore è complicato perché ~~ch~~ il motore deve vincere la coppia inversa e la coppia resistente.

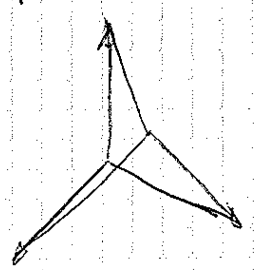
E' utile che tutti cerchino di essere il più simmetrici possibile.

Disegno i circuiti dirett. inv. e omopolare



Si hanno accoppiamenti mutui tra sequenza diretta, omopolare ed inversa in modo che circolino correnti inverse ed omopolari.

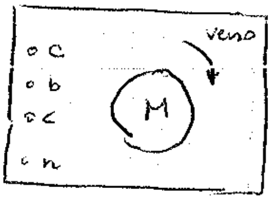
Il carico non equilibrato fa danni perché la terna non è più diretta.



Quando si dà in consegna un impianto bisogna sempre verificare:

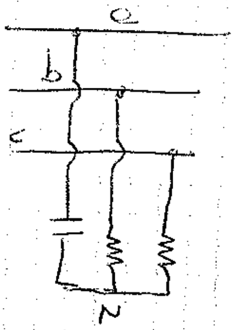
- l'equilibrio delle fasi
- il senso ciclico.

Per verificare il senso ciclico ci sono vari metodi: esempio: volgetta



con rotorino. Il motore viene collegato, se ruota nella direzione giusta allora l'ordine delle fasi è corretto.

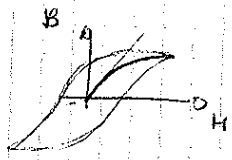
Un altro metodo è questo



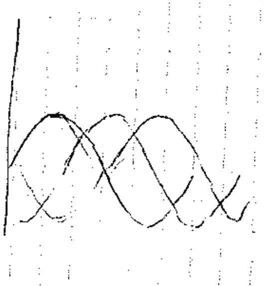
le resistenze sono due impedenze. Se non c'è il condensatore il punto N è a metà dei potenziali B e C. Se al posto del cond. c'è un corto circuito il punto N va al potenziale a.
Variando C il punto N si sposta. Scegliamo il condensatore in modo da ~~postare~~ aggiungere il minimo di $\bar{E}_a$. Questo implica che le impedenze in serie a C si illuminano poco, mentre quella in serie a b molto. (se la sequenza è diretta).

La condizione normale di funzionamento si ha per utilizzatori simmetrici e la sequenza è diretta. In questo caso nel neutro non circola corrente. (Infatti il neutro si faceva di sezione ridotta).
In alcuni casi si riscontravano negli impianti correnti omopolari elevate. Ciò accadeva perché il sistema è sempre meno lineare. Tra le cause di non linearità ci sono:

- ferro (fenomeno di saturazione)
- utilizzatori elettronici

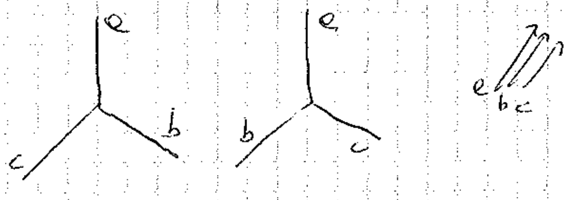


Da ciò consegue che le correnti non sono più sinusoidali, questo comporta che ~~non~~ devo avere:



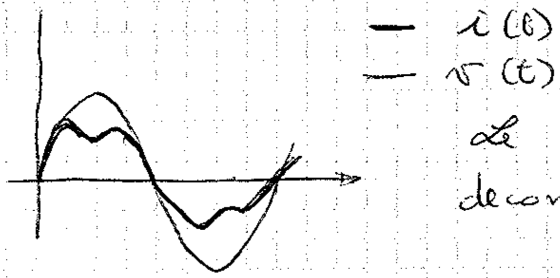
$f = 50$ Hz
sfasate 120°
uguali in modulo

invece potevo anche avere 3 terne distinte diretta + inversa + omopolare.



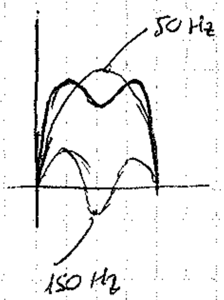
Però Fortescue non copre i casi non lineari. (A V sinusoidale corrisp. I non sinusoidale).

il generatore fornisce v sinusoidale, ma la corrente è distorta



Le correnti distorte si studiano con la decomposizione armonica (serie di Fourier).

Supponiamo ci sia una componente di prima ed una di terza armonica. Date la simmetria fisica si ha la stessa distorsione su tutte le fasi.

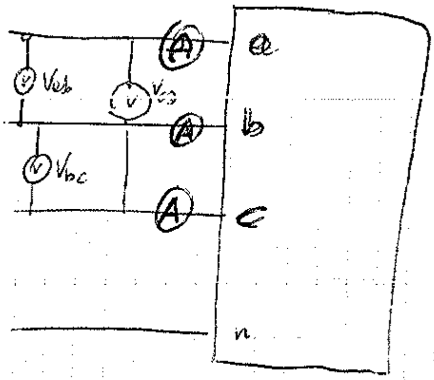


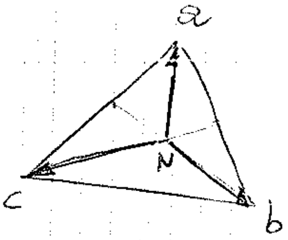
Tuttavia le terze armoniche sono in fase tra loro (ma a 150 Hz)
la componente di 1ª armonica da luogo ad una terna diretta, mentre le componenti di 3ª armonica da luogo ad una terna omopolare. Questa componente omopolare circola nel neutro. Tanto più il sistema diventa non lineare tanto più la componente omopolare aumenta.

Forme d'onda distorte possono essere rappresentate come serie di fourier. L'armonica a 50 Hz è definita fondamentale. Le armoniche di ordine 1-4,-7-10 danno vita a terne dirette
Le armoniche di ordine 2-8-5-11 danno luogo a terne inverse
Le armoniche di ordine 3-6-9-12 danno luogo a terne omopolari
Si può studiare il sistema con la sovrapposizione degli effetti (anche se il sistema è non lineare).

Misure su un sistema trifase

Oggi si usano strumenti digitali, cioè campionano la forma d'onda. Le misure vengono inviate ad un convertitore A/D. Il valore viene mandato ad un μP che è in grado di calcolare valori sui campioni ottenuti.

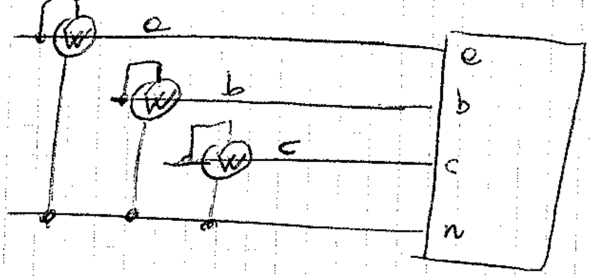




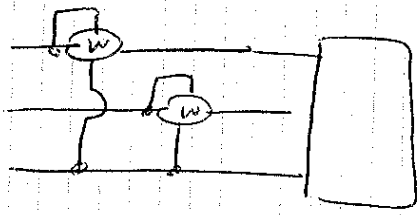
determinazione della potenza:

$P = V \times I = VI \cos\varphi$

sistema a 4 fili



sistema a 3 fili

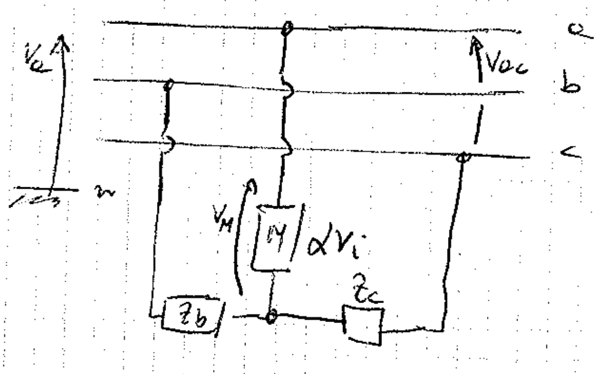


$W_1 = V_{ac} \times I_a = (E_a - E_c) \times I_a$

$W_2 = V_{bc} \times I_b = (E_b - E_c) \times I_b$

$W_1 + W_2 = P$

Misura della componente diretta ed inversa di tensione



$$V_i = \frac{1}{3}\left(V_a + \alpha^2 V_b + \alpha V_c\right) =$$

$$= \frac{1}{3}\left(V_a + \alpha^2 V_b + (-1-\alpha^2) V_c\right) =$$

$$= \frac{1}{3}\left((V_a - V_c) + \alpha^2 (V_b - V_c)\right) =$$

$$= \frac{1}{3}\left[V_{ac} + \alpha^2 V_{bc}\right]$$

$$V_M = V_{ac} + V_{zc}$$

Per ottenere $V_m \propto V_i \Rightarrow V_m \propto V_{ac} + \alpha^2 V_{bc}$ quindi che

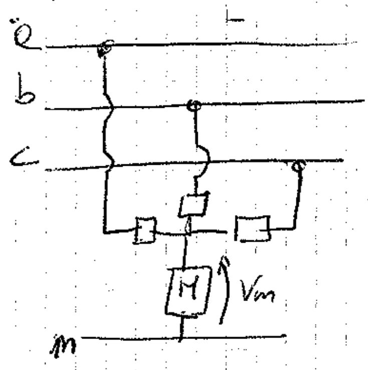
$V_{zc} \propto \alpha^2 V_{bc}$ $\qquad V_{zc} = V_{bc} / (z_b + z_c) \cdot z_c = \frac{V_{bc}}{z_b + z_c} \cdot z_c$

Se voglio che $V_{zc} \propto \alpha^2 V_{bc}$ devo fare in modo che

$$\frac{z_c}{z_b + z_c} = \alpha^2 \Rightarrow z_c = \alpha^2 (z_b + z_c) \Rightarrow z_c = \frac{z_b \alpha^2}{1 - \alpha^2}$$

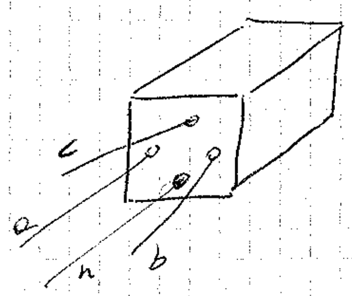
Da cui si deduce che $\frac{z_b}{z_c} = \frac{1-\alpha^2}{\alpha^2}$

Verificare se si ha componente omopolare



Se $V_m = 0$ non si ha componente omopolare.

Dato un sistema trifase come faccio a dire che è fisicamente simmetrico.



Verifichiamo l'alimentazione (sistema diretto), misuriamo le correnti su ogni fase (devono avere stesso modulo) devo anche verificare gli sfasamenti delle correnti. Cioè le correnti devono formare una terna diretta.

Ottenuto ciò posso concludere che il sistema è ragionevolmente lineare e fisicamente simmetrico.

Se trovo le correnti sfasate in modo diverso o non dello stesso modulo allora ci sarà qualcosa che rende il sistema non lineare.

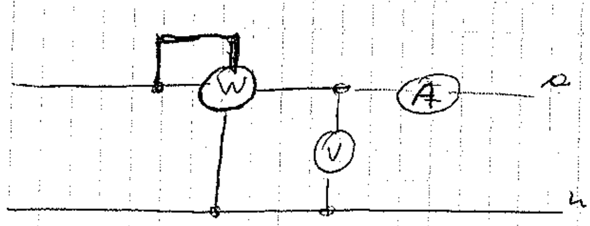
Ora, visto il sistema fis. simmetrico, voglio sapere le impedenze del sistema.

Applico al sistema una terna diretta $\begin{bmatrix} E_d \\ \alpha^2 E_d \\ \alpha E_d \end{bmatrix}$ e so che a questa corrisponde una terna $\begin{bmatrix} I_d \\ \alpha^2 I_d \\ \alpha I_d \end{bmatrix}$.

$$|Z_d| = \frac{|E_d|}{|I_d|}$$

$W = E_d I_d \cos\varphi$

$$\cos\varphi = \frac{W}{E_d I_d}$$



Se volessi trovare Z_i devo invertire due fasi. Facciamo ~~lo~~ stesso procedimento di prima. Ci aspettiamo di trovare $Z_i = Z_d$

Se volessimo trovare Z_o applichiamo una terna omopolare di tensione. Misuriamo le correnti e verifichiamo che siano omopolari.

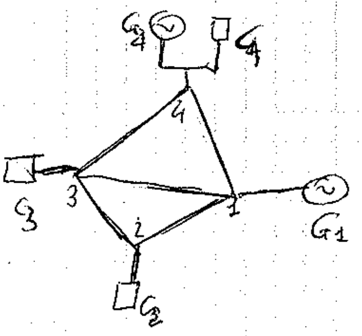
$$|Z_o| = \frac{|E_o|}{|I_o|} \qquad \cos\varphi = \frac{W}{E_o I_o}$$

Possiamo anche collegare l'amperometro sul neutro.

Ora alimento con una tensione costituita da una terna diretta più una terna inversa. (sinodali diversi, sfasamenti ≠ 120°, somma delle sinusoidi ~~costante~~ per istante nulla).
Verifichiamo se comunque funziona. Misuriamo le correnti. Ci calcoliamo le componenti simmetriche delle tensioni (E_d ed E_i). Facciamo lo stesso per le correnti (I_d ed I_i). Verifico $Z_d \cdot I_d = E_d$ e se $Z_i I_i = E_i$.
Se i conti non corrispondono, ma non ho sbagliato nulla. È possibile che nel sistema si trovi un motore. In questo caso i conti non tornano. (Ho sbagliato a misurare l'impedenza inversa. Infatti devo misurare l'impedenza inversa quando il motore ruota in senso ~~inverso~~ diretto).
Quindi solo l'ultima prova è in grado di fornirmi le Z_i.
~~(Nel caso...)~~

Nota le Z_d (o impedenza di servizio Z_s), Z_i e Z_o possiamo analizzare un sistema trifase.

Se ho un sistema costituito solo da generatori e da carichi:

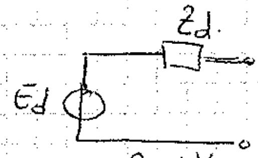


In alta tensione il neutro non viene usato. Quindi in condizioni normali non ci sono correnti omopolari.

Fornisco al G_1 una potenza P_1 e tens. V_1 –
Il generatore G_4 fornirà potenza P_4 e tens. V_4.

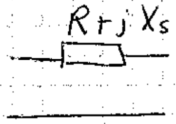
La potenza immessa andrà a finire ai carichi.
Noto il modo in cui ho settato i generatori devo trovare le correnti che circolano nei rami.
Possiamo studiare il sistema equivalente alla sequenza diretta.

generatore :



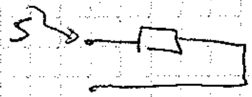
Zd è l'impedenza sincrona.

linea :



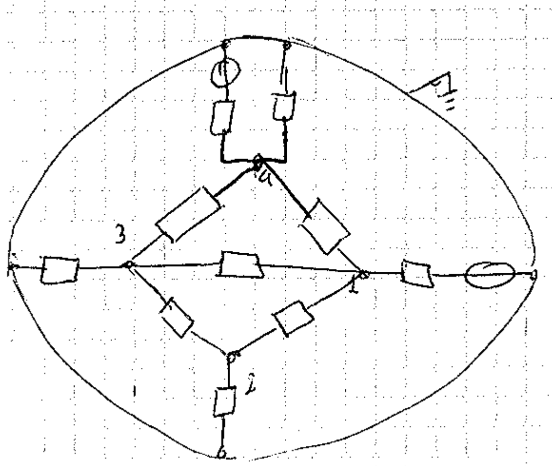
Xs è la reattanza di servizio e tiene conto ~~degli tutte e 3~~ eccopponent mutui

carichi :



Il modo migliore per rappresentare il carico è misurare la potenza S assorbita dal carico

Facciamo l'equivalente alla sequenza diretta



Tipicamente non si disegna la chiusura.

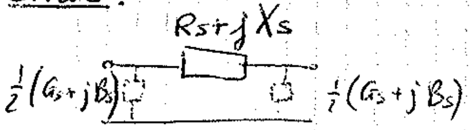
Se conoscessi V_1, V_2, V_3 e V_4 completamente non si hanno difficoltà a calcolare ~~le~~ correnti.

$S = \sqrt{3}\, V_4\, I_4^*$

Nelle volte posso fissare le tensioni V_1 e V_4, ma non ai nodi 2 e 3.
In questo caso non è facile calcolare le correnti, prima devo ~~semplificare~~ risolvere il circuito

Determinazione delle impedenze simmetriche:

<u>Linee</u>:



R_s: resistenza di servizio

$$R_s = K \rho \frac{\lambda}{S}$$

λ — lunghezza linea

S — sezione

ρ — resistività

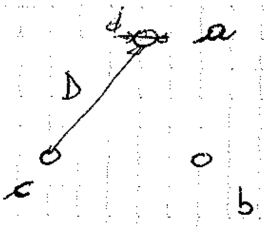
K: coefficiente che maggiora la lunghezza in pianta.

ρ varia con la temperatura seguendo la legge:

$$\rho_\theta = \rho_{20} \left[1 + \alpha_{20} (\theta - 20) \right].$$

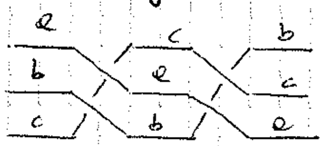
il valore della resistenza è frutto di un'approssimazione

$$X_s = L - M$$



$$l_s = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(1 + 4 \ln \frac{D}{r} \right) \quad \left[\frac{H}{m} \right]$$

I conduttori non sono disposti sui vertici di un triangolo equilatero. Per rendere la linea fisicamente simmetrica vengono fatte ruotare le fasi in modo che occupino la stessa posizione per la medesima lunghezza.



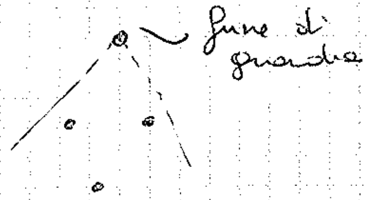
Gs rappresenta le perdite dovute alla tensione. Gli isolatori tendono a scaldarsi e mano a mano che aumenta la sporcizia sull'isolatore Gs aumenta (e l'isolatore si scalda ancora di più). È necessaria una pulizia periodica degli isolatori.

Si hanno perdite dovute anche all'effetto corona.

Bs (perdite suscettive) = $j\omega C_s$ e tiene conto della capacità tra le fasi e la capacità verso terra. Tipicamente la corrente che passa attraverso $G_s + jB_s$ è molto più piccola rispetto a quella di $R_s + jX_s$.

Il sistema è simmetrico e quindi l'induttanza diretta è uguale a quella inversa.

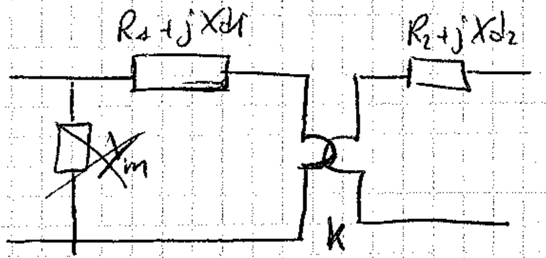
Nelle linee è presente un quarto filo che non è il neutro, ma la messa a terra. Questo filo è la fune di guardia e serve a proteggere la linea dalle scariche atmosferiche. L'angolo di protezione è di circa 30°. La fune di guardia è connessa a terra in modo che l'eventuale fulmine sia scaricato a terra.



Oggi si cerca di sostituire la fune di guardia con un cilindro cavo e all'interno si mette una fibra ottica per dotare il paese di una connessione in fibra ottica.

L'impedenza omopolare non è infinita. Infatti si ha un accoppiamento mutuo tra i conduttori e fune di guardia.

TRASFORMATORI

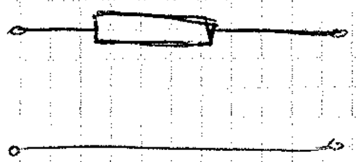


Y_m dipende dalle perdite nel ferro

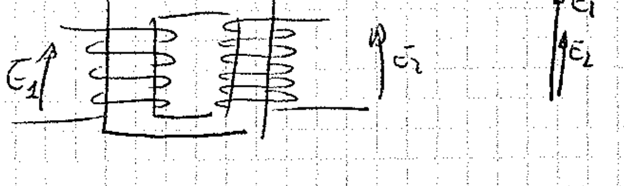
R_1 e R_2 dipende dalle perdite nel rame.

Y_m la trascuriamo perchè è molto elevata.

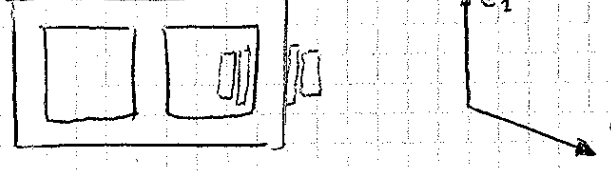
l_{d1}: reattanza di dispersione avv. primario.



trafo monofase



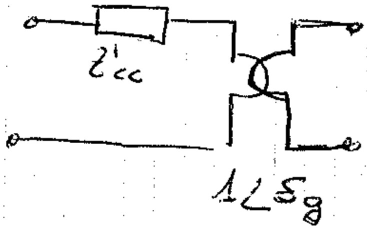
trafo trifase



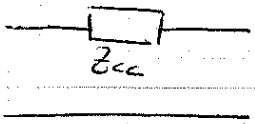
Lo sfasamento tra $\bar{E}_1$ ed $\bar{E}_2$ dipende dal gruppo del trasformatore.

$V_{1\angle\varphi_1}$ k $V_{2\angle\varphi_2}$

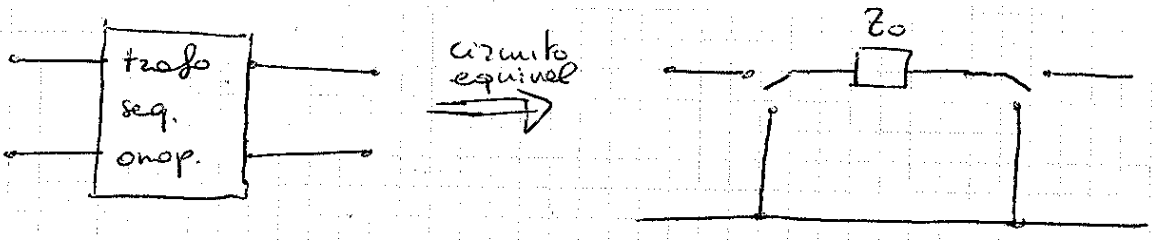
Il circuito equivalente da noi considerato sarà sempre a stella.



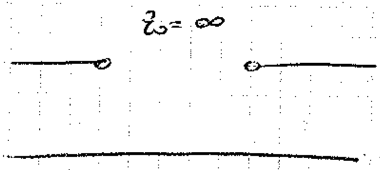
Per la sequenza diretta o inversa il circuito equivalente è



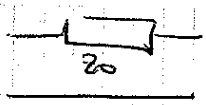
Per la sequenza omopolare le cose si complicano



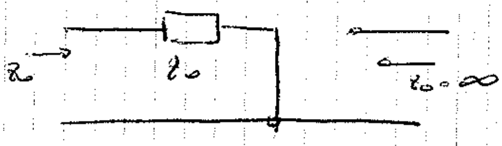
Se la corrente omopolare non può circolare né al primario né al secondario il circuito equivalente è



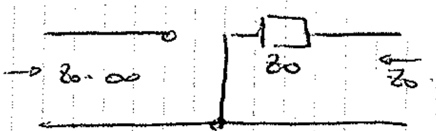
Se la corrente omopolare può circolare ~~solo~~ sia a primario sia a sec.



Se la corrente omopolare può circolare solo a primario

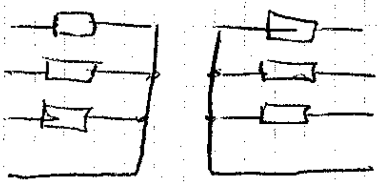


Se la corrente può circolare solo a secondario



Il valore di Z_0 dipende dal punto di funzionamento magnetico.

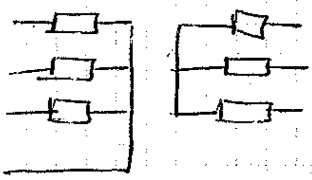
Supponiamo che il trafo sia $Y_n Y_n$



le correnti omopolari possono circolare sia a primario, sia a secondario

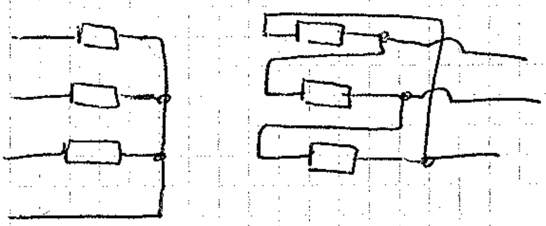
In questo caso $Z_0 \simeq Z_{cc}$

Supponiamo che il collegamento del trafo sia $Y_n y$

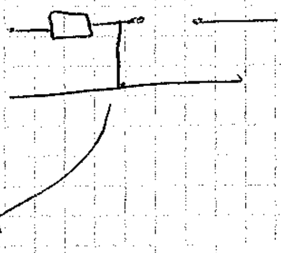


In questo caso Z_0 si avvicina alla Z a vuoto.

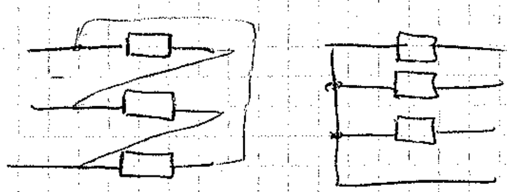
$Y_n \Delta$



$Z_0 \rightarrow Z_m$

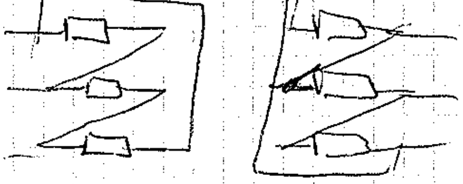


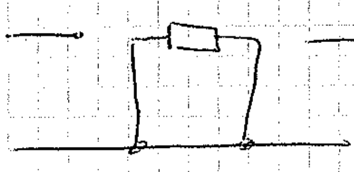
$D y_n$



$Z_0 \rightarrow Z_m$

$D d$

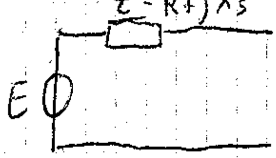




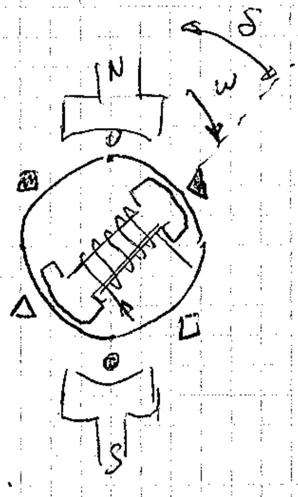
$Z_0 \rightarrow \infty$

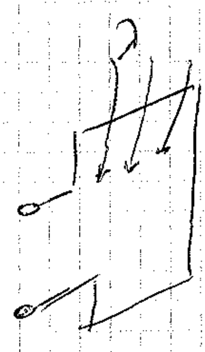
Alternatore

$Z = R + jX_s$



seq. diretta



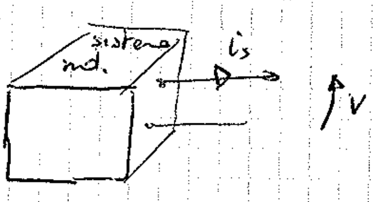


i poli sostituiscono l'avvolgimento.

δ è l'angolo di carico.

Le spire sono investite da un flusso magnetico totale λ

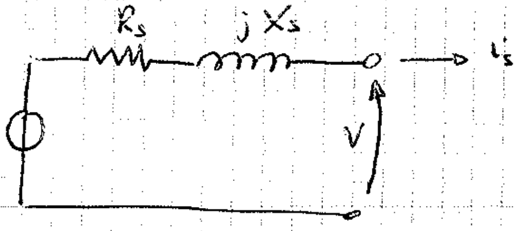
$$\lambda = \lambda(i_{ecc}, i_s) = \lambda(i_{ecc}) + \lambda(i_s)$$



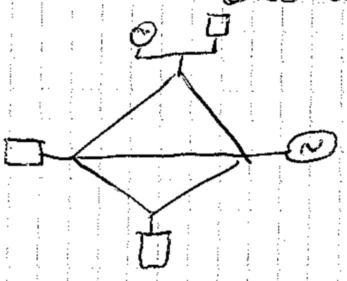
$$V = -R\,i_s + \frac{d\lambda}{dt} =$$

termine resistivo — termine induttivo

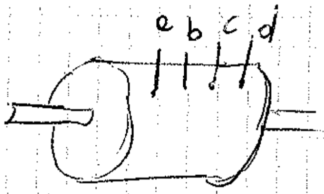
$$= -R\,i_s - \underbrace{\frac{d\lambda_{ecc}}{dt}}_{E} - \underbrace{\frac{d\lambda_s}{dt}}_{-jX_s i_s}$$

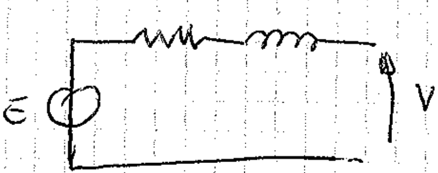


Torniamo alla rete in AT

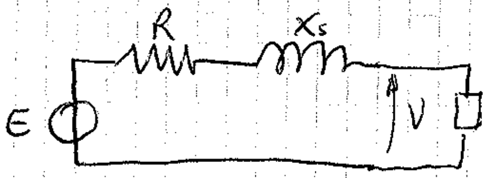


Per poterla studiare devo sostituire i circuiti equivalenti alla seq. diretta.
Mi interessa studiare la rete in situazione di guasto.





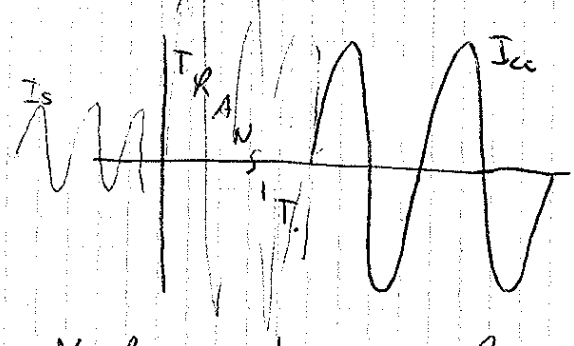
Se la macchina funziona a vuoto $V=E$
Se inserisco un carico inizia a circolare una corrente i



$\bar{Z}_c = R_c + jX_c$

$$I = \frac{E}{(R_s+R_c)+j(X_s+X_c)}$$

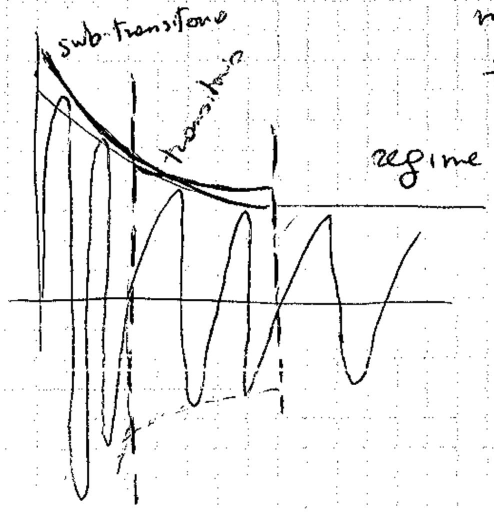
Se c'è un corto mentre la macchina funziona, al termine del transitorio quale sarà la I_{cc}?



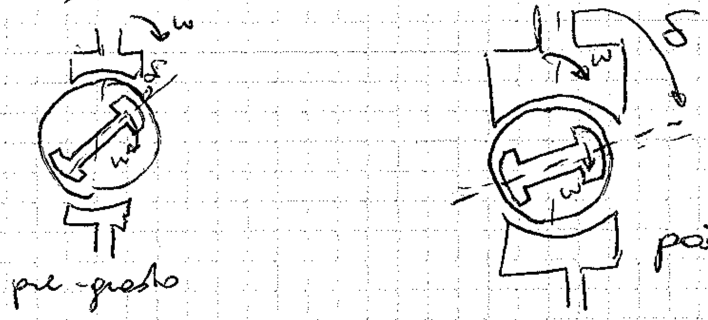
$$I_{cc} = \frac{E}{R_s + jX_s}$$

Vogliamo trovare il valore max della corrente nel transitorio.

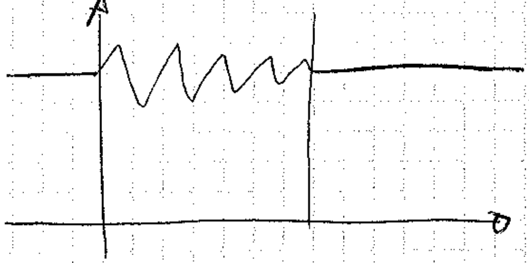
Se zoomo mi accorgo che il transitorio può essere suddiviso in due esponenziali (cioè 2 regimi transitori).



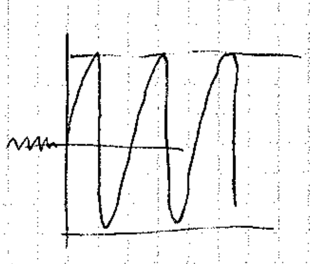
Bisogna analizzare la situazione sul rotore.
Prima del guasto i poli e il rotore ruotano sincroni e il flusso è costante.
Dopo il transitorio si avrà un δ diverso, un flusso diverso, ma i poli e il rotore ruotano sincroni (la corrente di eccitazione è sempre la stessa, ma è variata quella di statore).

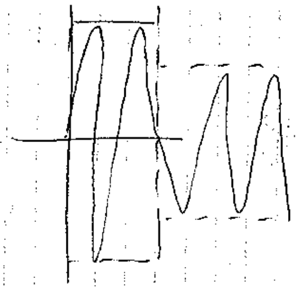


Durante il transitorio ci deve essere stato un moto relativo tra rotore e poli (variazione di δ). Il circuito di eccitazione vede una variazione di flusso e inizia a circolare una corrente indotta.



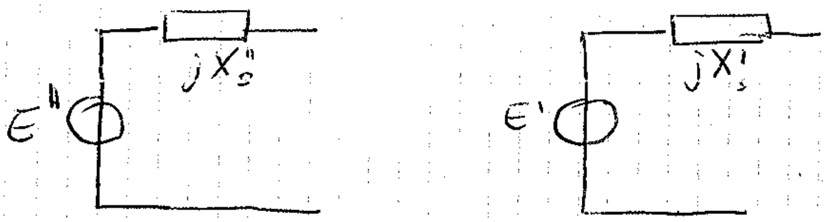
Se la resistenza fosse nulla avrei una f.m.m. di ampiezza costante. (Hp. di invarianza sub-transitoria). Poi si ha un gradino e ho l'ipotesi di invarianza transitoria





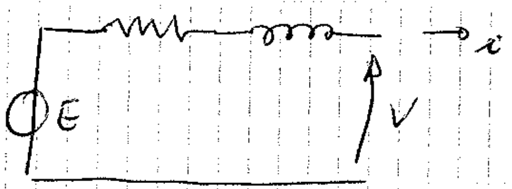
Inoltre immagino le onde puramente sinusoidali.

Circuito eq. regime sub-transitorio e transitorio



X_s'' reatt. sub-transitoria
X_s' reatt. transitoria
E'' f.e.m sub-transitoria

Ci sono due distinti regimi perché c'è un terzo protagonista le gabbie smorzatrici
La differenza tra regime sub tran e trans. è che nel sub-trans. tutti sono interessati da correnti, poi le gabbie smorzatrici terminano il transitorio, mentre gli altri circuiti sono ancora interessati da correnti e fem indotte (reg. trans.)



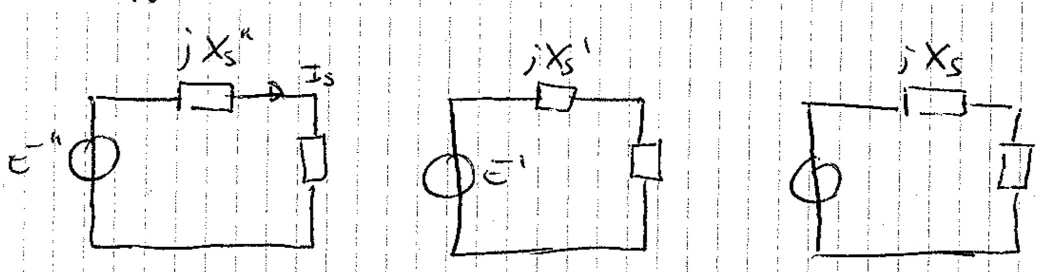
$$v = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{d\lambda_{ec}}{dt} + \frac{d\lambda_s}{dt} =$$
$$= \frac{d\lambda_{gs}}{dt} + \frac{d\lambda_s''}{dt} \to X_s'' I$$
$$= \frac{d\lambda_{avv\text{-}ecc}}{dt} + \frac{d\lambda'}{dt} \to X_s' I$$

flusso totale concatenato con avv eccitazione

g.s.: gabbie smorz.

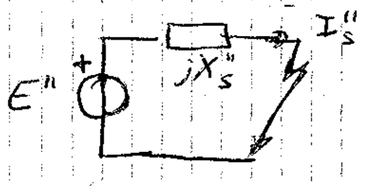
$$\frac{d\lambda_{avv\text{-}ecc}}{dt} = E'$$

$$\frac{d\lambda_{gs}}{dt} = E''$$



Tutti e 3 i circuiti portano allo stesso risultato se si analizza il funz. pre-guasto

Quando sono in transitorio:



trovo la corrente sub-transitoria

$$I''_s = \frac{E''}{j X''_s}$$

Il regime sub-transitorio non è sinusoidale, ma per le approx che abbiamo visto ci va bene calcolare così la corrente sub-transitoria.

Dati di targa dell'alternatore
E, X_s, X'_s, X''_s

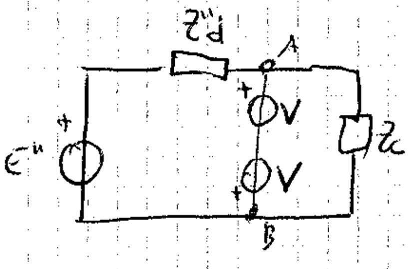
E' ed E'' sono funzioni della corrente preguasto

$E' = V + jX'_s I_{preg.}$

$E'' = V + jX''_s I_{preg.}$

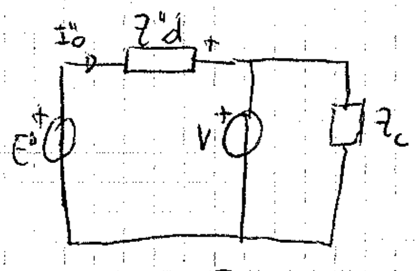
In caso di corto circuito $\quad I'' = \dfrac{E''}{jX''_s}$

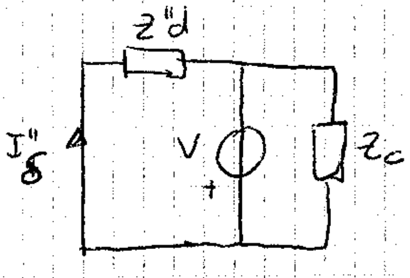
Le norme dicono che I''_p va maggiorata di un coeff. di sicurezza del 60% $\left(I''_{p_{max}} = 1{,}6\, I''_p\right)$



Simulare il guasto significa avere tensione nulla tra A e B. Per avere tensione nulla posso mettere due generatori uguali e contrari (di tensione pari a quella preguasto).

Applichiamo la sovrapposizione degli effetti:

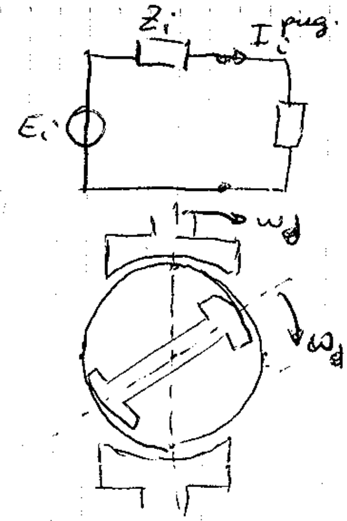




$I''_0 = I_{preg.}$

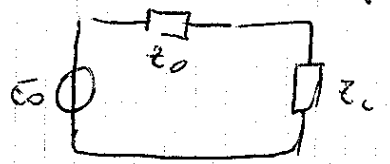
$I''_\delta =$

$I'' = I_{preg} + I''_\delta \simeq I''_\delta$ perché la corrente $I_{preg} << I''_\delta$



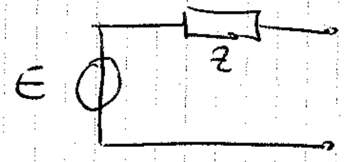
Bipolo equivalente alla seq. inversa
la componente inversa coesiste con quella diretta.
La sequenza inversa fa sì che le ruote polari e le espansioni non ruotino insieme, ma la ruota polare ruota a velocità $-\omega$.
Quindi il circuito di eccitazione è percorso da corrente dovuta alla variazione di flusso.
Anche le gabbie smorzatrici sono percorse da corrente. Alla sequenza inversa si ha una situazione simile al funzionamento sub-transitorio.

Sequenza omopolare

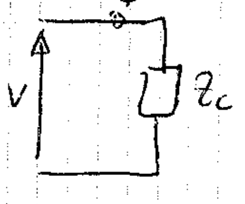


Se manca il neutro Z_0 è infinito. Se c'è il neutro la I_0 circola.
Le correnti omopolari non creano un campo magnetico rotante di statore. Si crea una coppia pulsante e valor medio nullo. Unica conseguenza il' ~~rot~~ alternatore si scalda.

Circuiti equivalenti motori a induzione (asincroni)



Carico



$$V_{pu} = \frac{V}{V_b} \rightarrow \text{unità base (ad esempio } V_n)$$

$$V_{\%} = \frac{V}{V_b} \cdot 100$$

è più conveniente usare le grandezze relative

Grandezze con cui abbiamo a che fare
- potenza S_b
- tensione v_B
- corrente i_B
- impedenza Z_B

$$|S_b| = |v_b|\,|i_b|$$

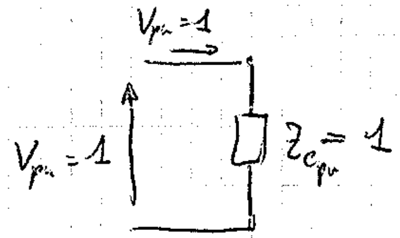
$$Z_B = \frac{|V_b|}{|i_b|}$$

Le grandezze base sono quelle nominali.

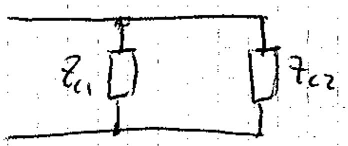
$S_b = 3\,kVA$ $\qquad V_n = 230\,V$ $\qquad i_b = \dfrac{3000}{230} = 13{,}04\ A$

$Z_n = 17{,}64\ \Omega$

Caso monofase



Se la tensione può variare al max del 10% posso avere valori compresi tra 0,9 e 1,1 V_{pu}.



Z_{C1}

S_{b1}

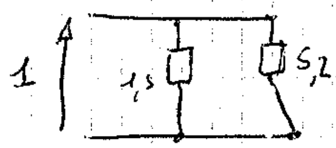
V_{b1}

$Z_b = \dfrac{V_{b1}^2}{S_{b1}}\ [\Omega] = 30\,\Omega$

Z_{C2}

$Z_b = \dfrac{V_{b1}^2}{S_{b2}}$

Circuiti in per unità:



S_b è la potenza base dei due carichi

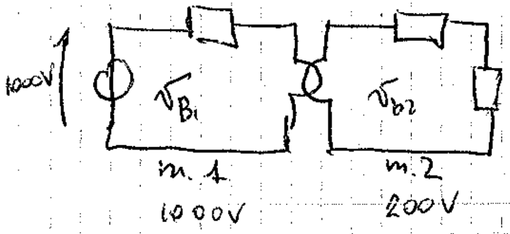
$S_b = S_{b1} + S_{b2}$

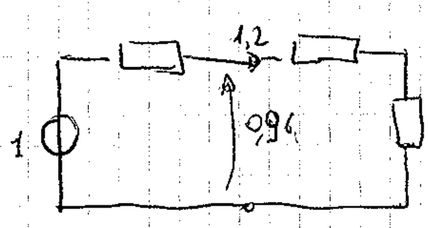
$i_b = \dfrac{S_b}{V_b}$

$Z_b = \dfrac{V_b}{i_b} = 20\,\Omega$

Uso solo le grandezze unitarie o percentuali.

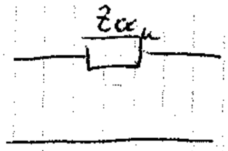
<u>Circuito con 2 maglie legate da un trafo</u>





$\dfrac{V_{b1}}{V_{b1}} = K$

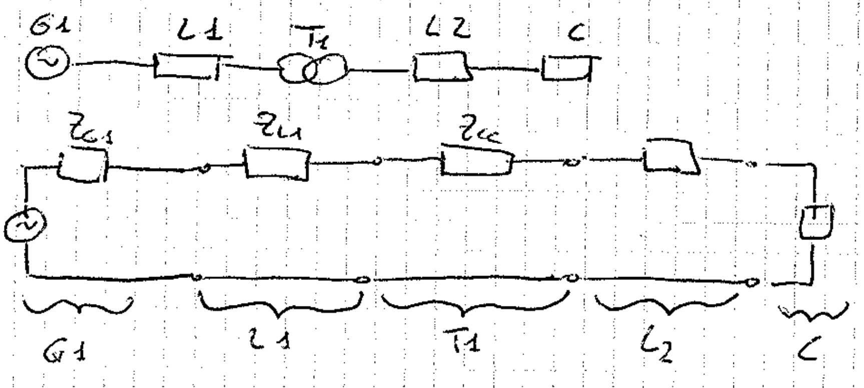
S_b è costante sia a primario che a secondario. Posso ricavare i_{b1}, Z_{b1} e i_{b2}, Z_{b2}



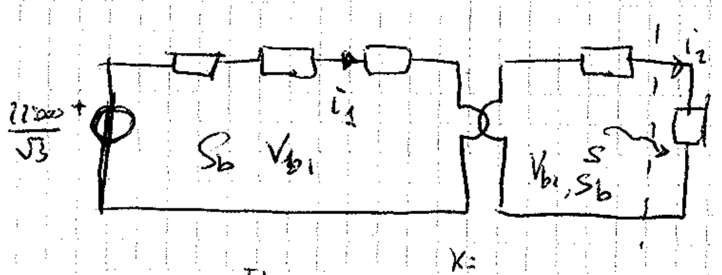
Schema equivalente per unità del trafo.

p.u.

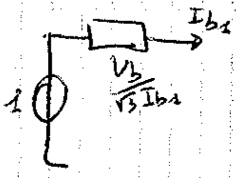
Schema unifilare



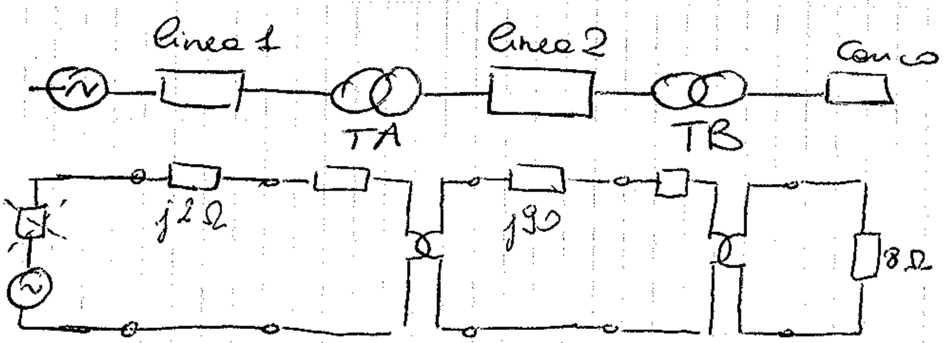
Se il circuito è trifase



$$I_{b1} = \frac{S_b}{\sqrt3\, V_{b1}}$$



Calcolo unitario nei sistemi trifase



Circuito eq. alla sequenza diretta

G: 30 kVA, 600 V

TA: 30 kVA, 600/10000 V, $V_{cc} = 5\%$

TB: 40 kVA, 22000/440 V, $V_{cc} = 6\%$

Supponiamo che l'impedenza del generatore sia trascurabile

Con il calcolo unitario ci accorgiamo di avere 3 maglie.
Adottiamo un sistema base diverso da maglia a maglia.

Grandezze base: - S_b [kVA], V_b [V]

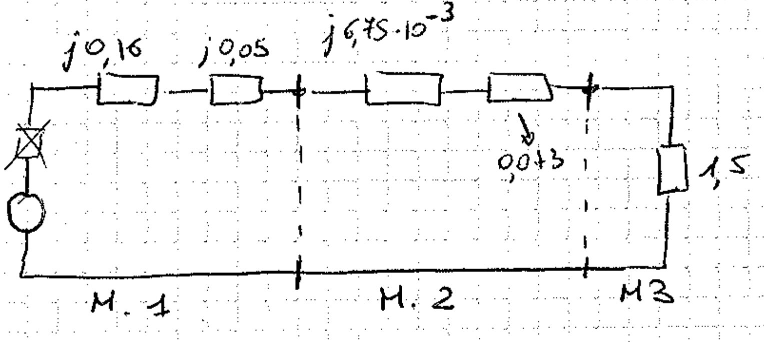
	M 1	M 2	M 3
S_b	30 kVA	30 kVA	30 kVA
V_b	600 V	20'000 V	400 V
I_b	28,9 A	0,87 A	43,3 A
Z_b	12	13'333	5,33

$$\frac{440\cdot 20'000}{22'000}=400$$

$$S_b=\sqrt{3}\,V_b I_b \Rightarrow I_b=\frac{S_b}{\sqrt{3}\,V_b}$$

$$\frac{V_b}{\sqrt{3}}=Z_b I_b \Rightarrow Z_b=\frac{V_b}{\sqrt{3}\,I_b}=\frac{V_b^2}{S_b}$$

Disegnamo lo schema unitario



Nota: nelle diverse maglie le unità di misura sono diverse.

Troviamo le resistenze dei due trafo.
Nel 1° non sono necessari riporti. (valori base usati dal costruttore = valori base nostri)
Nel 2° è diversa la potenza base e la tensione. Devo aggiustare il 4% (riferito a 40 kVA → 22000/440 V)

$$Z_{b\,costr.}=\frac{400^2}{40'000}=\frac{160'000}{40'000}=4\ \Omega \qquad Z_{cc}=0,16\ \Omega$$

$$Z_{b_3}=5,33\ \Omega \qquad z_{cc_3}=\frac{0,16}{5,33}=$$

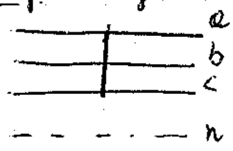
$$Z_{tot}=1,53\angle 11,17° \qquad i=\frac{1\angle 0}{1,53\angle 11,17°}=0,719\angle -11,17°$$

Nota non abbiamo tenuto presente del gruppo del trafo.

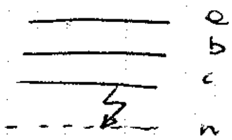
Studio dei guasti nei sistemi trifase

Generalmente un guasto genera una dissimmetria.

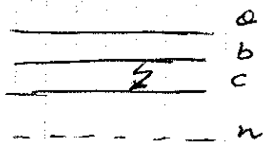
Esempi di guasti:



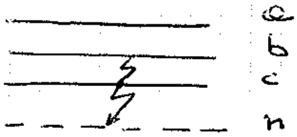
c.c. trifase



c.c. fase-neutro



c.c. fase-fase

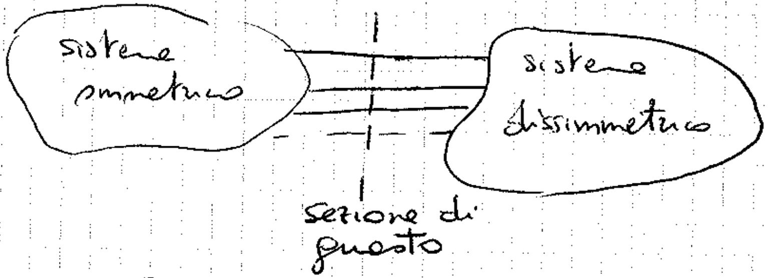


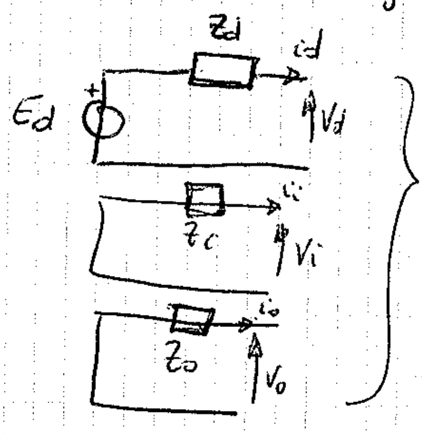
c.c. fase-fase-neutro

Il corto circuito più probabile è quello fase-neutro o fase-fase.
A noi interessa la configurazione che provoca correnti più alte.

Ci conviene rappresentare il sistema guasto come somma di 2 sistemi:

- sistema simmetrico
- sistema dissimmetrico che dipende dal tipo di guasto.





Tensioni che si manifestano sulle sezione di guasto

$$E_d = Z_d I_d + V_d$$

$$0 = Z_i I_i + V_i$$

$$\underbrace{0 = Z_o I_o + V_o}$$

Equazioni parte simmetrica

$$\begin{cases} V_a = V_o + V_i + V_d \\ V_b = V_o + \alpha^2 V_d + \alpha V_i \\ V_c = V_o + \alpha V_d + \alpha^2 V_i \end{cases} \qquad \begin{cases} I_a = I_o + I_i + I_d \\ I_b = I_o + \alpha^2 I_d + \alpha I_i \\ I_c = I_o + \alpha I_d + \alpha^2 I_i \end{cases}$$

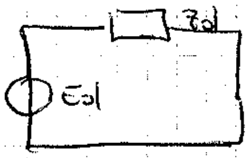
Consideriamo il guasto trifase

Si ha che $V_a = V_b = V_c$ e che $I_a + I_b + I_c = 0$

$$\left.\begin{aligned} V_0 &= \frac{1}{3}\left(V_a + V_b + V_c\right) \\ V_d &= \frac{1}{3}\left(V_a + \alpha V_b + \alpha^2 V_c\right) \\ V_i &= \frac{1}{3}\left(V_a + \alpha^2 V_b + \alpha V_c\right) \end{aligned}\right\} \text{ Per Fortescue}$$

Per effetto del guasto $V_d = 0$ e anche $V_i = 0$

$V_d = 0$ implica che



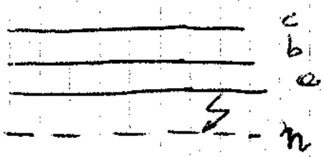
$$I_d = \frac{E_d}{Z_d}$$

$V_i = 0$ implica $I_i = 0$

Inoltre anche V_0 e I_0 sono nulli (perché il guasto è simmetrico)

È quindi sufficiente studiare il circuito eq. alla sequenza diretta

Consideriamo il guasto fase-neutro

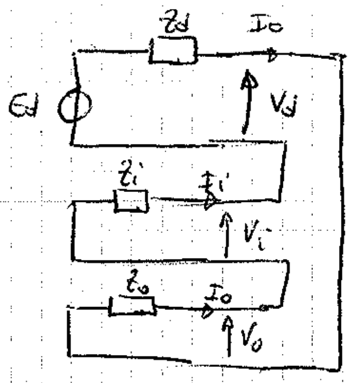


$V_a = 0 \Rightarrow V_0 + V_i + V_d = 0$

$I_b = I_c = 0 \Rightarrow I_0 = I_d = I_i$

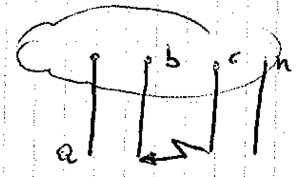
$$E_d = (Z_d + Z_i + Z_0)\, I_d \Rightarrow I_d = \frac{E_d}{Z_d + Z_i + Z_0}$$

$$I_a = I_0 + I_d + I_i = 3 I_d = 3 \frac{E_d}{Z_d + Z_i + Z_0}$$



In conseguenza del guasto le 3 reti di seq. dir., inv, omopolare sono diventate interconnesse.

Corto circuito fase - fase



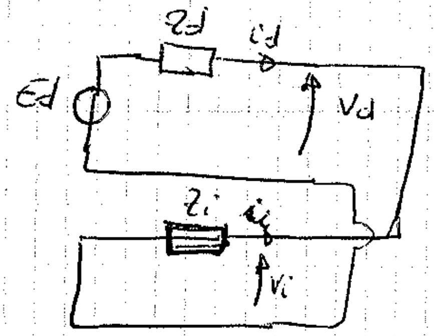
$i_a = 0$

$V_b = V_c$

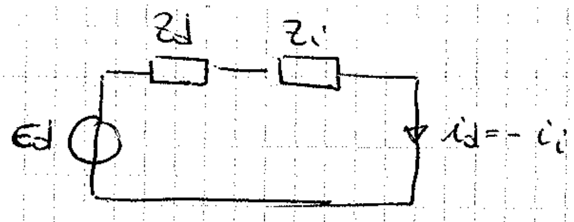
$i_b + i_c = 0$ (i_b e i_c uguali e contrarie)

$I_a = 0 \implies I_0 + I_d + I_i = 0$

$$\left.\begin{array}{l} I_0 = 0 \\ I_d = -I_i \end{array}\right\} \implies I_b + I_c = 0$$



$\implies$



$$I_d = \frac{E_d}{Z_d + Z_i}$$

$$I_{ff} = I_b = (\alpha^2 - \alpha) I_d = \sqrt{3}\,\frac{E_d}{Z_d + Z_i}$$

Caso fase-fase neutro: $I_d = \dfrac{E_d}{\dfrac{Z_0\, Z_i}{Z_0 + Z_i} + Z_d}$

~~Norm~~

Dei casi che abbiamo considerato il corto circuito peggiore è quello **trifase**.

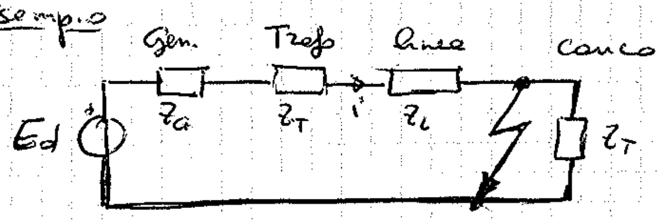
La corrente fase-neutro è maggiore di quella trifase $Z_0 < Z_d$. Questo è un caso che capita di rado ($Z_0 < Z_d$)

Guasti che accadono più spesso

- c.c. fase-neutro
- c.c. fase - fase
- fase - fase - neutro
- trifase.

Abbiamo supposto che il contatto sia perfetto. Nella realtà non è così, ma a noi non interessa perché la resistenza di contatto abbassano la corrente e non la alzano.

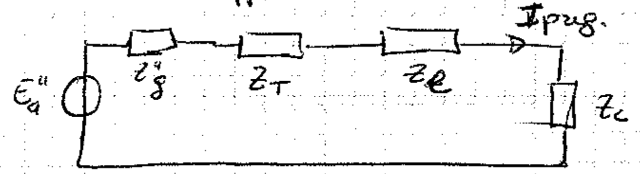
Esempio



Guasto: corto-circuito trifase.

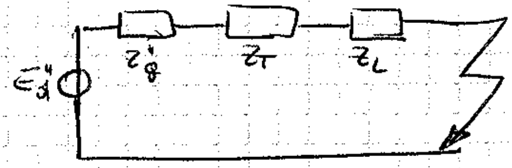
$$I_{pug.} = \frac{E_d}{Z_g + Z_T + Z_L + Z_C}$$

Posso rappresentare la rete come



$$E''_d = I_{pug}\left(Z''_g + Z_T + Z_c + Z_L\right)$$

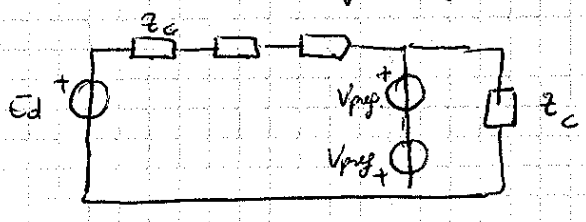
Disegno circuito post-guasto



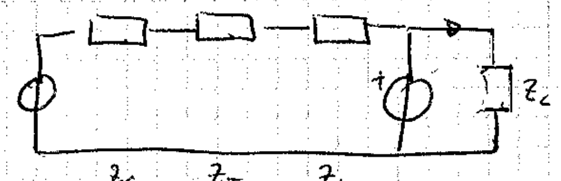
$$I'' = \frac{E''}{Z''_G + Z_T + Z_L}$$

Ricordiamo di moltiplicare $I'' \cdot 1,6$ per tenerci al sicuro.

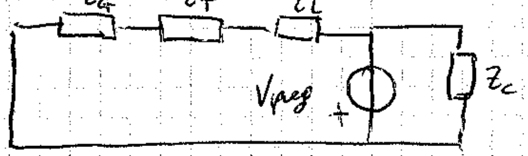
La condizione post-guasto può essere rappresentata



che con l'utilizzo della sovrapposizione degli effetti



Circuito preguasto (la sua corrente è bassa rispetto all'altro circuito)

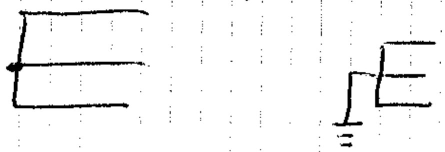


$$I'' \simeq \frac{V_{pug}}{Z_G + Z_T + Z_L}$$

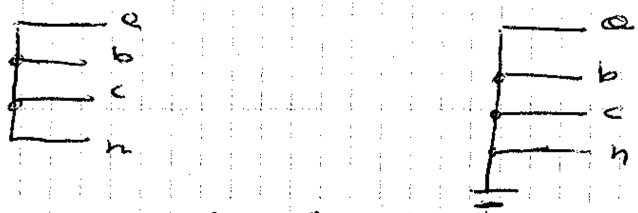
Quando si calcolano le correnti di c.c. la norma richiede di mettersi nelle condizioni peggiori

Stato del neutro

Possiamo avere sistema 3ϕ a 3 fili con neutro non collegato a nessun riferimento, oppure con neutro a terra



Possiamo anche avere un sistema a 4 fili e neutro isolato oppure con neutro a terra

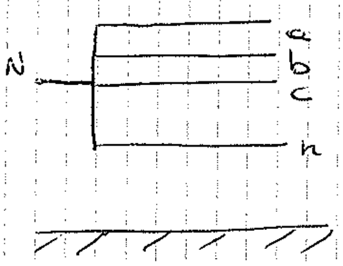


Ci sono anche le varianti con neutro messo a terra con impedenza

Nei sistemi A.T. sono i costi di realizzazione a fare la differenza. Si utilizzano sistemi a 3 fili - il neutro viene collegato a terra.
Nei sistemi B.T. siamo obbligati ad usare sistemi a 4 fili di solito con neutro a terra (raramente si usa neutro isolato).
Nei sistemi M.T. in Italia si usa il sistema a 3 fili (alcune nazioni usano neutro ~~a terra~~ isolato (Italia fino a qualche anno fa) altre con neutro a terra (Italia negli ultimi anni). Negli USA usano il sistema a 4 fili.

Messa a terra del neutro

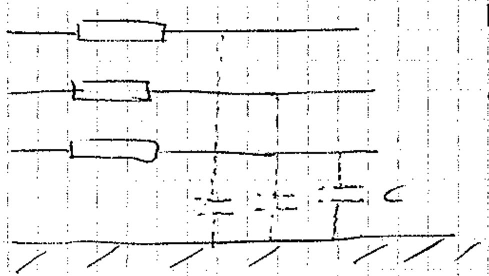
Ha effetti sul circuito nel caso di guasto fase-neutro.



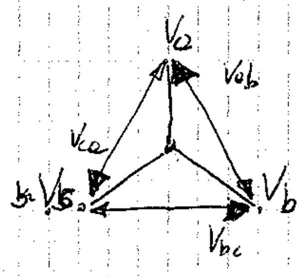
Nel caso di guasto fase-~~neutro~~ terra se il neutro è perfettamente isolato non si ha circolazione di correnti. Tuttavia poiché non circola corrente non ci accorgiamo del guasto. Se si verifica un secondo guasto iniziano a circolare delle correnti. Tipicamente quando avviene il secondo guasto le protezioni non sono adeguate. Si può accettare ciò se si riesce ad individuare il primo guasto.
Si usa neutro isolato se è fondamentale mantenere la continuità del servizio. Il neutro isolato è obbligatorio

il neutro isolato. C'è un dispositivo (misuratore della resistenza di isolamento) che misura la resistenza di isolamento tra neutro e terra. Se durante l'operazione si ha guasto verso terra il misuratore fornisce un segnale. Al termine dell'operazione bisogna riparare il guasto.

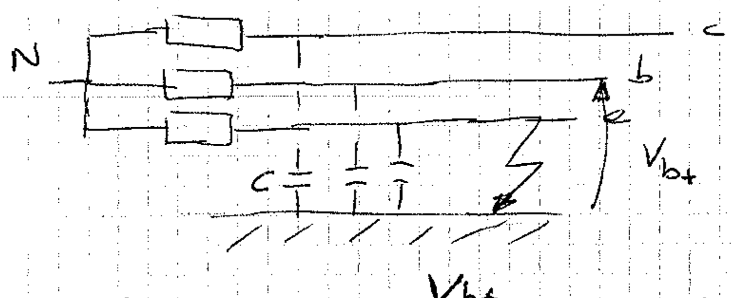
In M.T. la scelta di neutro isolato dipende dalla capacità del gestore di fornire una buona manutenzione.
Il neutro collegato a terra invece implica una corrente di guasto (elevata). I sistemi di protezione si accorgono della corrente di guasto e possono intervenire. Molti guasti sono di natura provvisoria.
Nella realtà non si ha neutro perfettamente isolato o perfettamente a terra.



Nel caso di neutro isolato in caso di guasto fase-terra si ha un circuito che fa circolare correnti (ordine decine di A)



Analizziamo le tensioni. In caso di guasto fase-terra il centro stella diventa ad esempio Va. Di conseguenza se non è collegato tra fase e terra si trova ai capi la tensione concatenata invece di quella stellata. A causa delle capacità parassite il centro stella non è esattamente Va, ma è prossimo.



Definiamo $K_T = \frac{V_{b+}}{E_d}$ il coefficiente di messa a terra

Ricordiamo che nel caso di guasto fase neutro $V_0 = -Z_0 I_0$,
$V_d = E_d - Z_d I_d \qquad V_i = -Z_i I_i$

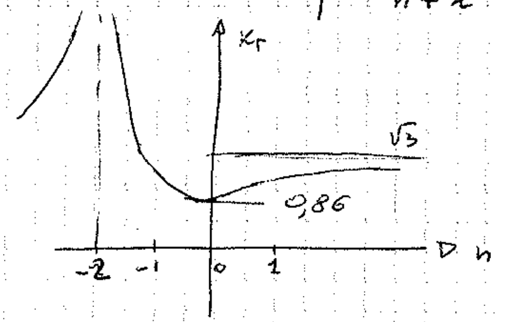
$V_o = -\frac{Z_o}{Z_o+Z_d+Z_i} E_d$ $\quad V_d = E_d\left[1-\frac{Z_d}{Z_o+Z_d+Z_i}\right]$ $\quad V_i = -\frac{Z_i}{Z_o+Z_d+Z_i} E_d$

$$V_{b+} = V_o + \alpha^2 V_d + \alpha V_i = E_d\left[-\frac{Z_o}{Z_o+Z_d+Z_i}\right] + \alpha^2 E_d\left[1-\frac{Z_d}{Z_o+Z_d+Z_i}\right] + \alpha E_d\left[-\frac{Z_i}{Z_o+Z_d+Z_i}\right]$$

Ne segue che $V_{b+} = \frac{Z_i - \alpha Z_o}{Z_o+Z_d+Z_i} E_d \sqrt{3}$

Si possono fare ipotesi semplificative. Possiamo trascurare le resistenze.
Supponiamo che $X_d = X_i$.
Definiamo $n = \frac{X_o}{X_d}$. Ne segue che $V_{b+} = \frac{\sqrt{n^2+n+1}}{n+2} E_d \sqrt{3}$

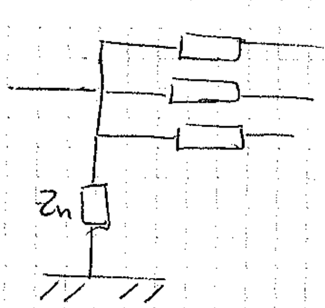
e che $K_T = \left|\frac{\sqrt{n^2+n+1}}{n+2}\right| \sqrt{3}$



~~Dev~~ Bisogna cercare di avere $0 < n < 1$.

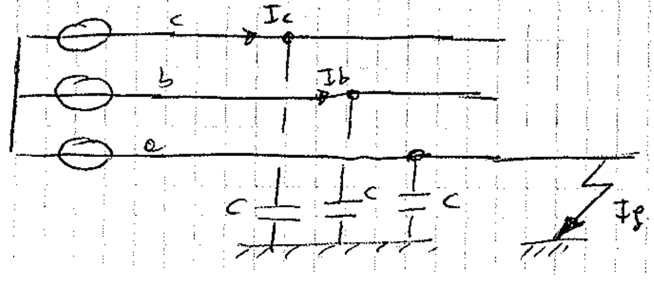
Per questo si cerca di mettere il neutro a terra tramite una impedenza. È necessario trovare una giusta quadratura.

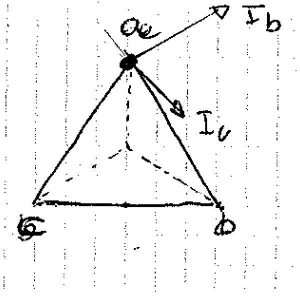
Ne segue che:
- in BT il neutro è sempre messo a terra
- in AT " " " è messo francamente a terra (prevale il problema delle sovra tensioni)
- in MT negli ultimi anni si preferisce il neutro a terra.



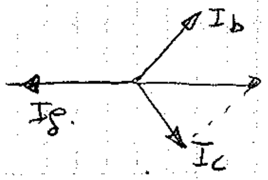
Con l'inserimento della Z_n tra neutro e terra si modifica la Z_o che diventa $Z_o = Z_o + 3Z_n$.

~~Cons~~ Consideriamo la M.T.



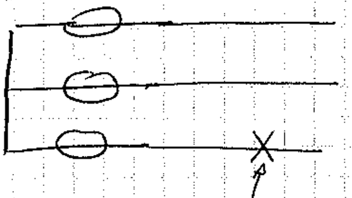


Supponiamo che
Dopo il guasto il centro stella si sposta in a. Cosa succede alle capacità?



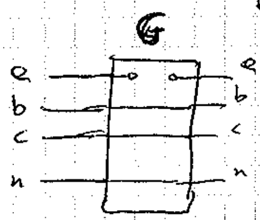
Le correnti I_b e I_c passano nel guasto. La corrente di guasto sostiene l'arco. Lo spegnimento dell'arco è tanto più difficile tanto sono più forti le capacità. Un tedesco (Petersen) ebbe l'idea di mettere un'induttanza tra Ne terra per compensare la capacità del sistema. Cercò di compensare completamente la capacità. Se la bobina è sintonizzata diminuiscono le correnti.
Il problema è dovuto al fatto che le capacità parassite variano nel tempo. (Di conseguenza la bobina di Petersen non è utilizzata).
Viene messa un impedenza tale che fornisce una soluzione di compromesso tra sovra tensioni e correnti di guasto.

Fino ad ora abbiamo considerato guasti di tipo additivo. Ci possono essere anche guasti di tipo sottrattivo.

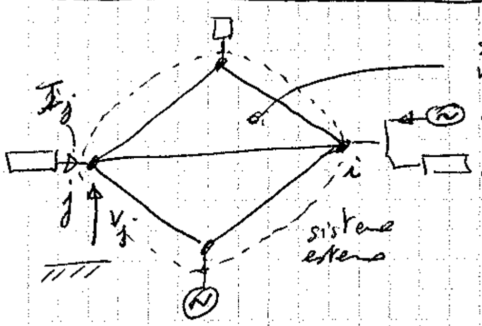


Nei guasti additivi si aveva un tripolo simmetrico più uno di guasto.

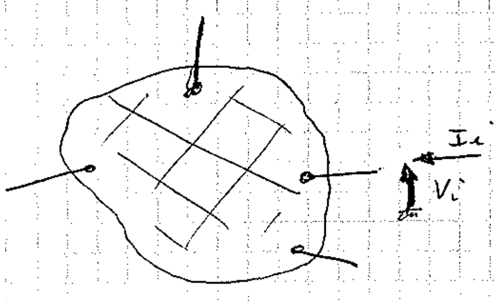
Adesso invece abbiamo un doppio tripolo che rappresenta il guasto. All'esterno del doppio tripolo abbiamo il sistema simmetrico. Si possono risolvere con il metodo delle componenti simmetriche.



ANALISI dei FLUSSI di POTENZA (Load flow)



Il generatore G_i immette in rete S_{Gi}, mentre il carico assorbe una potenza S_{Ci}.
Ne segue che $S_i = S_{Gi} - S_{Ci}$
Indichiamo con V_j la tensione nodale, e con I_j le correnti immesse nel ~~nodo~~ sistema nel nodo j.



Supponiamo che il sistema funzioni in condizioni normali.