NUMERO: 724

DATA: 07/10/2013

A P P U N T I

STUDENTE: Zito

MATERIA: Impianti Elettrici
Prof. Tommasini

POLITECNICO di TORINO

anno accademico 2012 - 2013

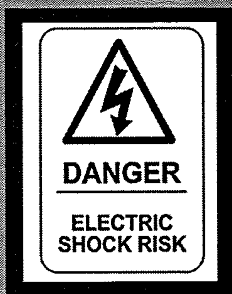
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica

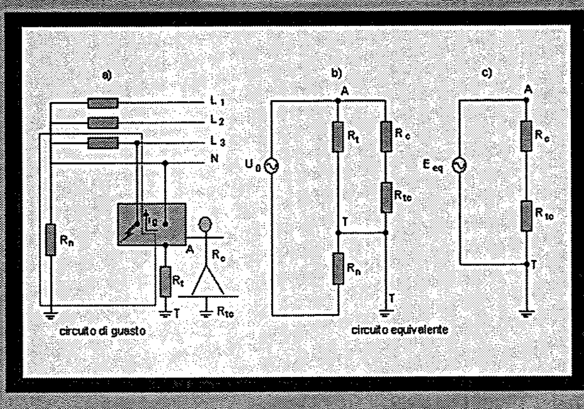
Facoltà di INGEGNERIA EDILE

Appunti del Corso di IMPIANTI ELETTRICI

Docente : Ing. Riccardo TOMMASINI

a cura di Alessandro ZITO





ELETTROTECNICA - Prof. ING. GIACOONE

MODELLO ELETTROMAGNETICO → contempla i FENOMENI ELETTRO=MAGNETICI.

si basano sulle EQUAZIONI DIF=FERENZIALI di MAXWELL

EQUAZIONI alle DERIVATE PARZIA=LI

GRADIENTE

ROTORE

DIVERGENZA

RISOLUZIONE:
Richiede una SOLUZIONE sia nello SPAZIO che nel TEMPO

METODO degli ELEMENTI FINITI !!

APPROCCIO con i **PARAMETRI CONCENTRATI**

nel **CAMPO MAGNETICO**: non si limitano ai MEZZI MATERIALI ma si ESTENDONO anche allo SPAZIO

puo' DIMINUIRE la COMPLESSITA' del PROBLEMA

occorre definire **MODELLO CONCENTRATO**

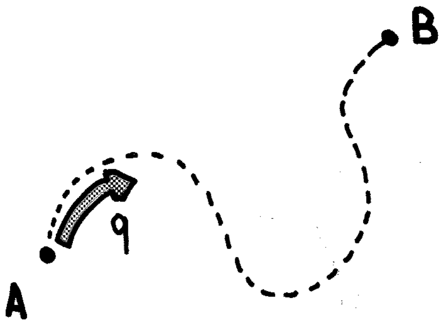
Cond. necessaria affinche' possa esser definito: **LIMITAZIONE dell'ESTEN=SIONE SPAZIALE del FENOMENO.** → VARIABILI in GIOCO: **TENSIONI** **CORRENTI**

TENSIONE

è definita come il LAVORO necessario per UNITÀ di CARICA per ottenere tale SPOSTAMENTO.

Rappresenta la DIFFERENZA di POTENZIALE tra i 2 ESTREMI dell'ELEMENTO CIRCUITALE.

Il concetto di POTENZIALE è analogo a quello del CAMPO GRAVITAZIONALE.



$$V_{AB} = \frac{L_{AB}}{q} = \mu(A) - \mu(B) \qquad [V]$$

UNITÀ S.I.: VOLT

A,B: PUNTI nello SPAZIO
q = CARICA ELETTRICA

spostiamo la CARICA q da A a B lungo un **PERCORSO ARBITRARIO**

La TENSIONE dipende dal solo PUNTO di PARTENZA e quello di ARRIVO.

si può definire una FUNZIONE (**POTENZIALE ELETTRICO**) associata ad ogni pt dello SPAZIO

N.B. La SCELTA del VERSO di PERCORRENZA è del tutto ARBITRARIA !!!

PUNTO di PARTENZA:

CORRENTE + TENSIONE

ARRIVO: GRANDEZZE DERIVATE

POTENZA

ENERGIA

3

CORRENTI

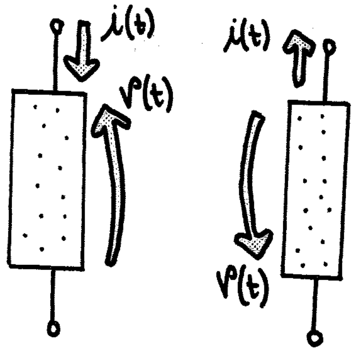
TENSIONI

sono **GRANDEZZE SCALARI** } NOTAZIONE GRAFICA per individuare il loro SEGNO

CONVENZIONI di SEGNO

definiscono

UTILIZZATORI



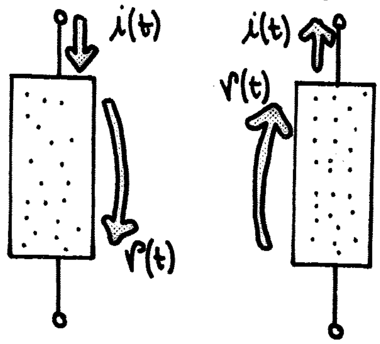
● $p = v \cdot i > 0 \Rightarrow$ POTENZA ASSORBITA dal DIPOLO

○ $p = v \cdot i < 0 \Rightarrow$ POTENZA EROGATA dal DIPOLO

$\forall$ DIPOLO è possibile definire arbitrariamente la POLARITÀ della TENSIONE ed il VERSO della CORRENTE.

La CONVENZIONE GENERATORI/UTILIZZATORI stabilisce una relazione tra il segno della POTENZA e il suo significato FISICO.

GENERATORI



○ $p = v \cdot i > 0 \Rightarrow$ POTENZA EROGATA/GENERATA dal DIPOLO

● $p = v \cdot i < 0 \Rightarrow$ POTENZA ASSORBITA dal DIPOLO

POTENZA

$p(t) = v(t) \cdot i(t)$ → il suo SEGNO dipende da quelli di i e di v.

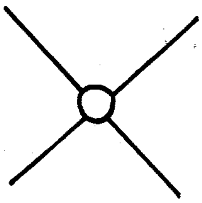
CIRCUITO ELETTRICO: in generale è la CONNESSIONE di ELEMENTI attraverso dei FILI. L'ELEMENTO CIRCUITALE comunica con il MONDO ESTERNO per mezzo dei suoi TERMINALI. I FILI che collegano tali ELEMENTI devono essere intesi come CONDUTTORI IDEALI, per cui sono EQUIPOTENZIALI. Le VARIAZIONI di ENERGIA possono avvenire solo all'interno degli ELEMENTI e non dei CONDUT=

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 9 di 217

CIRCUITO → può essere descritto da poche ENTITÀ

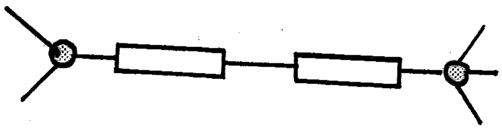
NODO

PUNTO di CONNESSIONE tra più COLLEGAMENTI



LATO

INSIEME di COMPONENTI CONNESSI senza alcun NODO INTERMEDIO



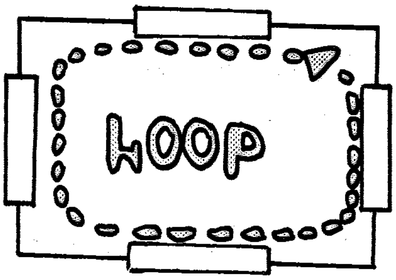
ENTITÀ TOPOLOGICHE

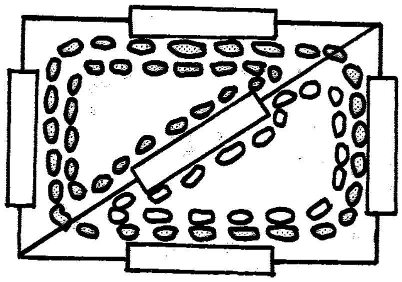
MAGLIA ELEMENTARE

una MAGLIA che non contiene altre MAGLIE

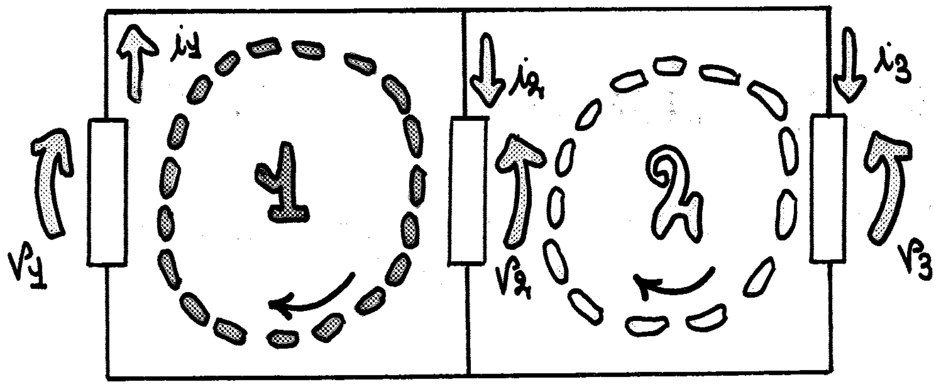
MAGLIA: qualsiasi insieme di LATI che costituiscono un percorso CHIUSO.

Def. si definisce **MAGLIA** un PERCORSO CHIUSO di un CIRCUITO che partendo da un NODO attraversa un NUMERO LIMITATO di ELEMENTI, toccandoli una sola volta e ritornando nel PUNTO di PARTENZA.





CONSERVAZIONE della POTENZA



SISTEMA composto da 3 BIPOLI

○ LKC: $+i_1 = i_2 + i_3$

● LKT 1: $+v_1 - v_2 = 0 \Rightarrow v_1 = v_2$

● LKT 2: $+v_2 - v_3 = 0 \Rightarrow v_2 = v_3$

$\Rightarrow v_1 = v_2 = v_3 = v$

$\Rightarrow v \cdot i_1 = v \cdot i_2 + v \cdot i_3$

$$\downarrow$$

$$\underline{P_1 = P_2 + P_3}$$

La SOMMA delle POTENZE EROGATE risulta uguale alla SOMMA delle POTENZE ASSORBITE.

PRIMA CLASSE di CARICHI ⟹ RESISTORE

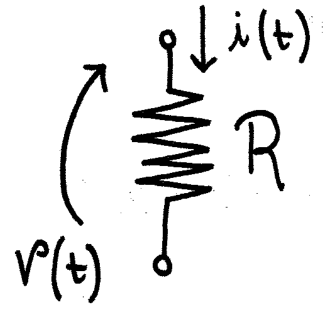
EFFETTO JOULE: definisce che una CORRENTE ELETTRICA fluente in un CONDUTTORE genera CALORE.

PRIMA CLASSE di CARICHI: classe di componenti descritta da una EQUAZIONE COSTITUTIVA di TIPO ALGEBRICO che lega CORRENTE e TENSIONE al medesimo ISTANTE:

$$v(t) = R(i,t) \cdot i(t)$$

PRIMA LEGGE di OHM

SIMBOLO

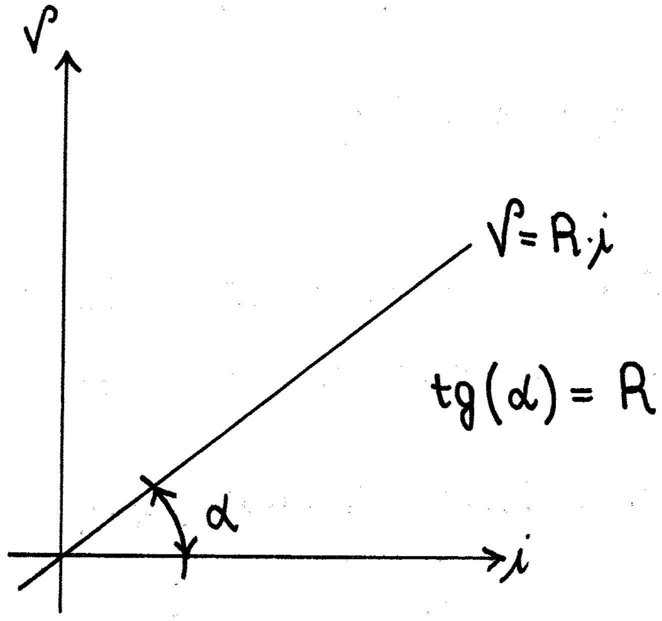


CONVENZIONE degli UTILIZZATORI

NOME: RESISTORE ⟹ definito dal PARAMETRO R

$R: [\Omega]$

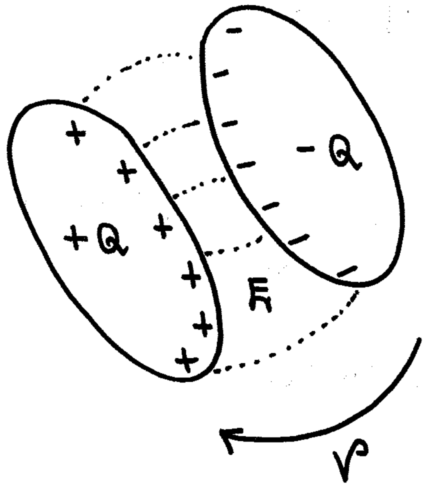
Se R e' COSTANTE, allora e' INDIPENDENTE dal TEMPO, il COMPONENTE e' detto LINEARE e TEMPO INVARIANTE (LTI)



PENDENZA della RETTA: R

SECONDA CLASSE di COMPONENTI

CONDENSATORE: è un COMPONENTE in grado di IMMAGAZZINARE ENERGIA nel CAMPO ELETTRICO.



Il CAMPO ELETTRICO può essere creato prevalentemente nella regione compresa tra 2 parti conduttrici isolate e sottoposte ad una differenza di potenziale.

CONSERVAZIONE della CARICA

$|+Q| = |-Q| = Q \mapsto$ FENOMENO CONSERVATIVO

La CARICA del CONDENSATORE cresce PROPORZIONALMENTE al VALORE della TENSIONE APPLICATA.

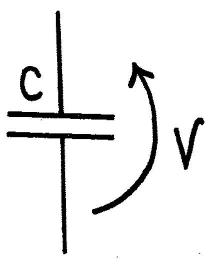
$$Q(t) = C \cdot v(t)$$

C = CAPACITÀ $\mapsto$ coefficiente di PROPORZIONALITÀ

C dipende da: * Geometria della struttura $\mapsto C \propto \frac{1}{\text{distanza}}$

* Materiali presenti nel DOMINIO $\mapsto C \propto \varepsilon$

SIMBOLO:



CAPACITÀ: si esprime in FARAD

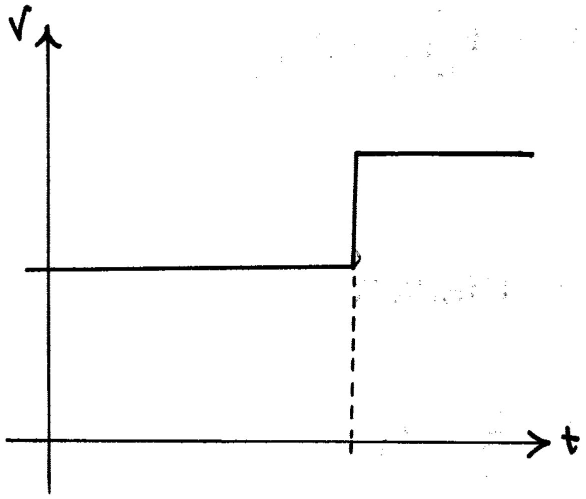
sono dell'ordine dei mF, μF

A.L.

* la TENSIONE su un CONDENSATORE e' detta VARIABILE di STATO

* qualsiasi VARIAZIONE di TENSIONE ai capi del condensatore implica un TRASFERIMENTO di POTENZA, il cui INTEGRALE nel tempo deve bilanciare la VARIAZIONE di ENERGIA IMMAGAZZINATA.

VARIAZIONE ISTANTANEA di TENSIONE ⟼ implica che la POTENZA ha VALORE ∞



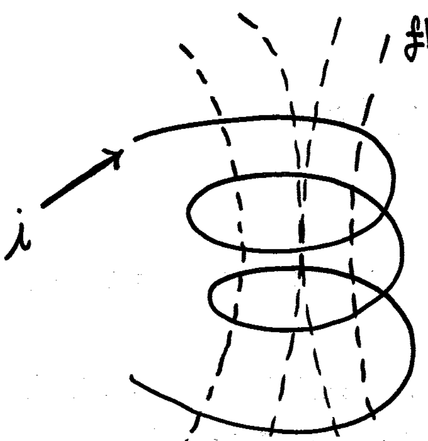
$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = v(t) \cdot \left(C \cdot \frac{dv}{dt}\right) \to \infty$$

Nessun componente in realta' e' in grado di fornire potenza infinita, ⟼ la tensione in un CONDENSATORE e' una funzione continua.

TERZA CLASSE di UTILIZZATORI

INDUTTORE: e' un COMPONENTE in grado di immagazzinare ENERGIA nel CAMPO MAGNETICO.

CORRENTE che fluisce in un CONDUTTORE crea, nella REGIONE di SPAZIO circostante, un CAMPO MAGNETICO ed un FLUSSO MAGNETICO concatenato con l' AVVOLGIMENTO.



flusso magnetico ⟼ dipende da i

$$\Phi = L \cdot i$$ ⟶ non e' una equazione caratteristica dato che v non compare

$$L = L(i)$$

TENSIONE v ⟼ la si puo' ottenere dalla LEGGE dell' INDUZIONE ELETTROMAGNETICA.

$$\Phi = L\, i(t) \longmapsto v = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt}(L i) = L \cdot \frac{di}{dt}$$ ⟶ se L non dipende dal tempo!!

ENERGIA:

$$dW = p(t)\,dt \Rightarrow W = \int_{t_1}^{t_2} L \cdot \frac{di}{\cancel{dt}} \cdot i(t)\,\cancel{dt} =$$

$$= \int_{i_1}^{i_2} L \cdot i(t)\,di = \frac{1}{2} L \cdot i^2 \Big|_{i_1}^{i_2} \qquad \begin{matrix} i_1 = 0 \\ i_2 = I \end{matrix} \Rightarrow W = \frac{1}{2} L \cdot I^2$$

INDUTTORE ⇒ L'ENERGIA immagazzinata è proporzionale alla CORRENTE

→ nell'INDUTTORE la CORRENTE è una VARIABILE CONTINUA rispetto al TEMPO

→ indica lo stato ENERGETICO del COMPONENTE

GENERATORI → sono COMPONENTI in grado di FORNIRE POTENZA ad altri COMPONENTI

→ la POTENZA è GENERATA a SPESE di altre forme di ENERGIA (es. elettrochimica, elettromeccanica, ecc...)

→ si definisce IDEALE quel GENERATORE che è in grado di fornire POTENZA INFINITA ad altri COMPONENTI.

→ Nella REALTÀ non ∄

GENERATORE di TENSIONE IDEALE: è un DIPOLO in grado di fornire una TENSIONE $e(t)$ ai suoi MORSETTI, indipendentemente dai componenti ad esso collegati

TENSIONE $e(t)$: è nota. Il VALORE della CORRENTE che lo attraversa dipende dai

A.7
17

POTENZA EROGATA

$$p(t) = e(t) \cdot i(t) \gtreqless 0$$

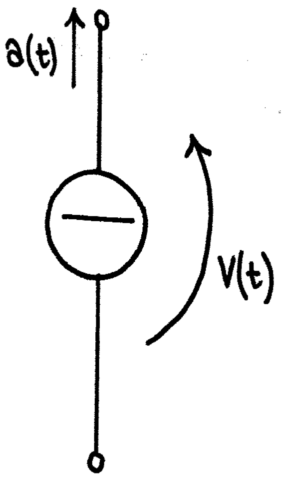
$$E = \int p(t)\,dt = \int e(t) \cdot i(t)\,dt \gtreqless 0$$

È un BIPOLO ATTIVO → non EROGA sempre ENERGIA ma può EROGARE ENERGIA.

GENERATORE di CORRENTE IDEALE: è un bipolo che è in grado di fornire una DATA CORRENTE $a(t)$ indipendentemente dai CARICHI ad esso COLLEGATI.

CORRENTE $a(t)$: è nota. La TENSIONE ai MORSETTI del GENERATORE dipende dai carichi ad esso collegati

SIMBOLO



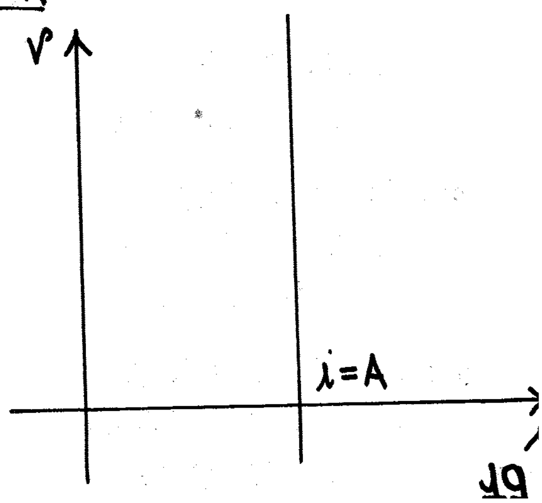
$\forall$ VALORE di TENSIONE $v(t)$ la CORRENTE nel BIPOLO è $a(t)$.

GENERATORE di CORRENTE IDEALE e COSTANTE

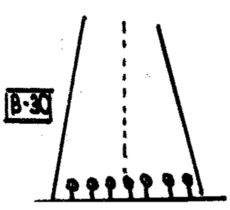
↓

se il VALORE della CORRENTE è COSTANTE

$\Rightarrow a(t) = A$

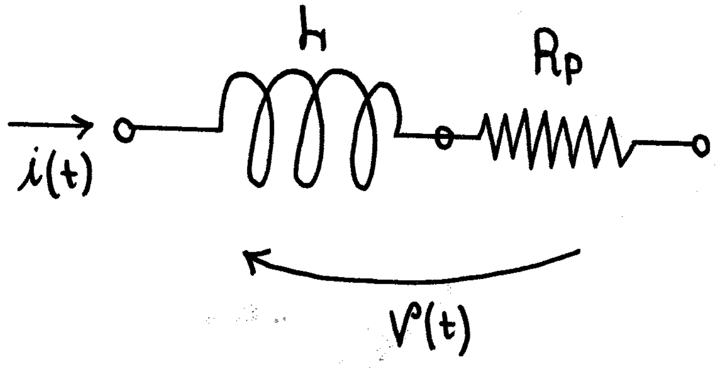


ES. IMPIANTI delle PISTE degli AEROPORTI alimentati con GENERATORI di CORRENTE



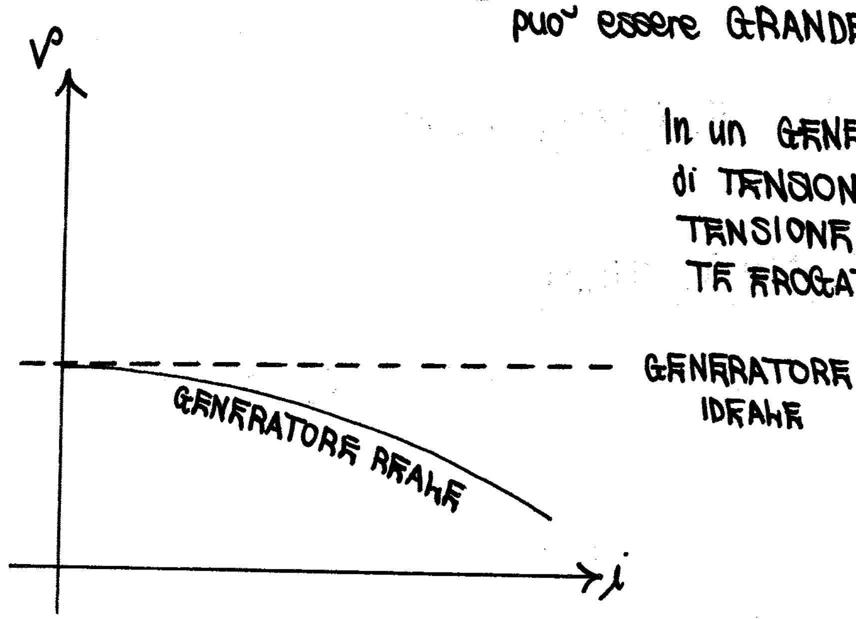
COMPONENTI REALI: hanno un COMPORTAMENTO che li fa e a più CLASSI di COMPONENTI

INDUTTORE REALE



$$\boxed{v(t) = L \cdot \frac{di}{dt} + R_p \cdot i}$$

GENERATORE REALE di TENSIONE: la POTENZA convertita in ELETTRICITÀ può essere GRANDE ma non INFINITA



In un GENERATORE REALE di TENSIONE diminuisce la TENSIONE, quando la CORRENTE EROGATA diventa GRANDE!

MODELLO MATEMATICO: può essere ottenuto da uno SVILUPPO in SERIE di TAYLOR della sua CARATTERISTICA centrata nel VALORE $i=0$

$$v(i) = v(i=0) + \left.\frac{dv}{di}\right|_{i=0} \cdot i$$

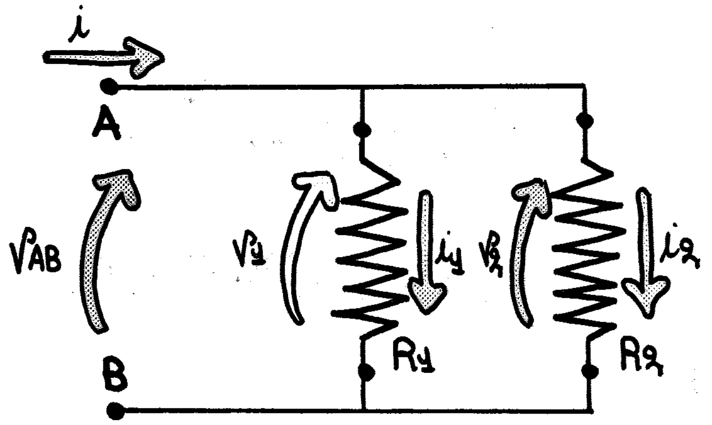
* $\frac{dv}{di}$ ⟼ possiede le DIMENSIONI FISICHE di una RESISTENZA.

è NEGATIVA perché diminuisce v se i aumenta ⟼ $\left.\frac{dv}{di}\right|_0 = -R_{int}$ → RESISTENZA FITTIZIA, tiene conto del comportamento della SORGENTE REALE.

* $v(0) = E$

CONNESSIONE in PARALLELO

2 o più COMPONENTI sono CONNESSI in **PARALLELO** se sono sottoposti alla medesima TENSIONE.



EQUAZIONI COSTITUTIVE

- $V_1 = R_1 \cdot i_1$
- $V_2 = R_2 \cdot i_2$

LEGGI di KIRCHHOFF

- $i = i_1 + i_2$
- $V_{AB} = V_1 = V_2$

$$\Rightarrow i = i_1 + i_2 = \frac{V_{AB}}{R_1} + \frac{V_{AB}}{R_2} = V_{AB}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = V_{AB} \cdot \frac{1}{R_{eq}}$$

V

$$\Rightarrow i = V_{AB}(G_1 + G_2) = V_{AB} \cdot G_{eq}$$

$$R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

La FORMULA è VALIDA per 2 RESISTORI in **PARALLELO**

In generale, la FORMULA vale in caso di N RESISTORI in PARALLELO.

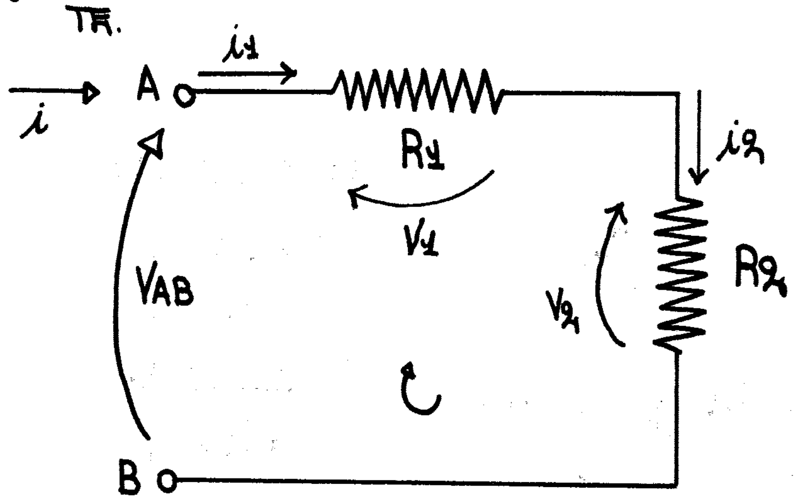
$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}$$

Le CONNESSIONI in SERIE / PARALLELO si possono applicare per tutti i COMPONENTI

A.L.

PARTITORE di TENSIONE ↦ CONNESSIONE in SERIE

Def. 2 o più componenti sono collegati in SERIE, se sono percorsi dalla stessa CORRENTE.



$$i = i_1 = i_2$$

$$V_1 = R_1 \cdot i_1$$

$$V_2 = R_2 \cdot i_2$$

$$+V_{AB} - V_1 - V_2 = 0$$

$$V_{AB} = R_1 \cdot i_1 + R_2 \cdot i_2 \qquad i_1 = i_2 = i$$

$$\Rightarrow V_{AB} = \underbrace{(R_1 + R_2)}_{Req.} \cdot i$$

$R_1 \mapsto R_2$ collegate in SERIE

$$\Rightarrow V_{AB} = Req \cdot i$$

$$i = \frac{V_{AB}}{Req} \Rightarrow i = \frac{V_{AB}}{R_1 + R_2}$$

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{AB} \qquad V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{AB}$$

TENSIONE V_{AB} ⇒ Si ripartisce tra i RESISTORI

$$V_K = \frac{R_K}{\sum_{j=1}^{2} R_j} V_{AB}$$

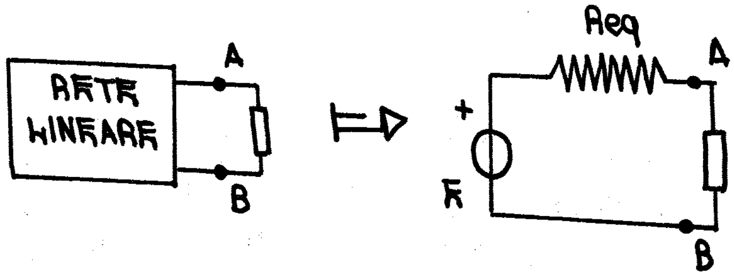
A.F.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 29 di 217

TEOREMA di THEVENIN

Estende la NOZIONE di EQUIVALENZA ad una generica RETE.

Esso viene enunciato in TERMINI di RETI RESISTIVE, ma la sua VALIDITÀ è GENERALE !!

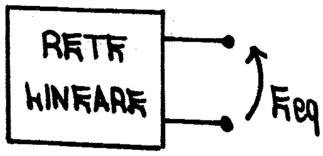


Hp: RETE LINEARE alla SINISTRA dei TERMINALI AB, nessun ACCOPPIAMENTO tra il CARICO e la RETE LINEARE.

Nessuna Hp fatta sul CARICO collegato ad AB.

TEOREMA di THEVENIN → FORNISCE gli STRUMENTI OPERATIVI per determinare i PARAMETRI della RETE EQUIVALENTE.

PARAMETRI → GENERATORE Eeq

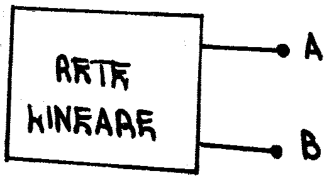


↓

VALORE del GENERATORE IDEALE di TENSIONE che è UGUALE alla TENSIONE MISURATA ai MORSETTI A e B LASCIATI APERTI.

↓

RESISTORE Req



↓

VALORE della RESISTENZA EQUIVALENTE misurata ai MORSETTI A e B della RETE LINEARE con PASSIVAZIONE di tutti i GENERATORI.

A.L.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 31 di 217

- **NUMERATORE:**
  - SOMMA PESATA dei GENERATORI di TENSIONE divisi per le loro RESISTENZE in SERIE, con SEGNO + se hanno la STESSA POLARITÀ di V'_{AB} e − se viceversa. *

- **DENOMINATORE:**
  - SOMMA degli INVERSI di tutte le RESISTENZE eccetto quelle che sono in SERIE ai GENERATORI IDEALI di CORRENTE

- **NUMERATORE *:**
  - SOMMA di tutti i GENERATORI di CORRENTE di SEGNO + se il verso della CORRENTE è verso il POLO A o − se viceversa.

TEOREMA di SOVRAPPOSIZIONE

La RISPOSTA del SISTEMA si può ottenere SOMMANDO le CAUSE.

Hp: CIRCUITO LINEARE ⟶ PROPRIETÀ di LINEARITÀ

FUNZIONE LINEARE quando si soddisfa:

- **ADDITIVITÀ**: $f(x_1+x_2) = f(x_1) + f(x_2)$
- **OMOGENEITÀ**: $f(Kx_1) = Kf(x_1)$

Def. In un CIRCUITO LINEARE con N-GENERATORI, ogni TENSIONE e CORRENTE di LATO è la SOMMA di N-CONTRIBUTI ciascuno dei quali è CALCOLATO risolvendo il CIRCUITO in cui tutte le SORGENTI eccetto una, sono PASSIVATE.

VALORE EFFICACE di una FUNZIONE SINUSOIDALE

$$A = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} a^2(t)\,dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} A_x^2 \cdot \operatorname{sen}^2(\omega t+\varphi)\,dt}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T}\cdot\frac{A_x^2}{2}\left[1 - \underline{\cos(2\omega t+\varphi)}\right]dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\cdot\frac{A_x^2}{2}\cdot\int_{t_0}^{t_0+T} dt}$$

$$= \sqrt{\frac{A_x^2}{2T}\cdot T} = \frac{A_x}{\sqrt{2}}$$

TERMINE che non da' CONTRIBUTO all'INTEGRALE perche' essendo INTEGRATO su di un INTERVALLO PARI a 2 PERIODI da CONTRIBUTO NULLO per DEFINIZIONE di FUNZIONE ALTERNATA.

ES. consideriamo una CORRENTE SINUSOIDALE $i(t) = I_x \cdot \operatorname{sen}(\omega t)$ che fluisce in un RESISTORE di RESISTENZA R. L'ENERGIA dissipata in un PERIODO e' data da:

$$W^e(0,T) = \int_0^T p(t)\,dt$$

$$p(t) = v(t)\cdot i(t)$$
$$p(t) = R\cdot i(t)^2$$
$$v = R\cdot i(t)$$

$$W^e(0,T) = \int_0^T R\cdot I_x^2\cdot \operatorname{sen}^2(\omega t)\,dt$$

$$= R\cdot T\cdot\left(\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)\,dt}\right)^2 = RI^2T$$

In un PERIODO T, $i(t)$ dissipa su R lo stesso VALORE di una CORRENTE CONTINUA di VALORE pari al VALORE EFFICACE I.

PROIEZIONI sugli ASSI REALI ed IMMAGINARI:

$$a(t) = Re\left[\bar{z}(t)\right] = |\bar{z}| \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

$$b(t) = Im\left[\bar{z}(t)\right] = |\bar{z}| \cdot sen(\omega t + \varphi)$$

OSSERVAZIONE: $\exists$ LEGAME tra $\bar{z}(t)$ e la FUNZIONE SINUSOIDALE ottenuta applicando l'OPERATORE $Im[\bar{z}]$

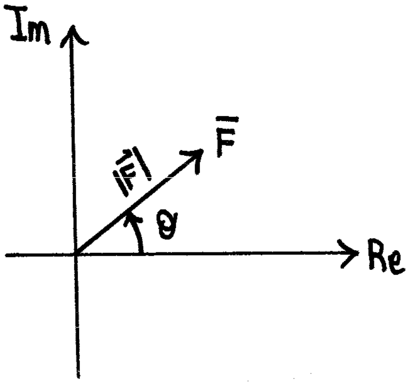
La generica FUNZIONE SINUSOIDALE $f(t) = \sqrt{2}\, F \cdot sen(\omega t + \varphi)$ e' legata alla FUNZIONE COMPLESSA $\bar{z}(t)$ da:

$$\bar{z}(t) = \sqrt{2}\, F \cdot e^{j(\omega t + \varphi)} = \sqrt{2}\, F \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{j\varphi}$$

$F \cdot e^{j\varphi}$: e' una QUANTITA' che non dipende dal TEMPO t e contiene a parte il FATTORE $\sqrt{2}$:

* la FASE
* l'AMPIEZZA attraverso il VALORE EFFICACE

viene detta FASORE della funzione sinosoidale $f(t)$



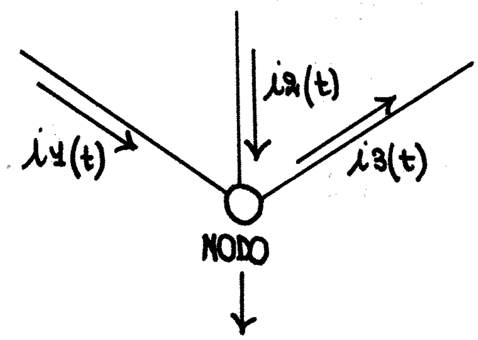
SINUSOIDE	FASORE
$f(t) = \sqrt{2}\, F \cdot sen(\omega t + \varphi)$ $\longleftrightarrow$	$\bar{F} = F \cdot e^{j\varphi}$

REGIME SINUSOIDALE

- è CARATTERIZZATO da GENERATORI VARIABILI nel TEMPO con LEGGE SINUSOIDALE.
- tutte le GRANDEZZE saranno delle SINUSOIDI

LEGGI di KIRCHHOFF in forma FASORIALE

RETE LINEARE alimentata da un INGRESSO SINUSOIDALE. In un ISTANTE SUCCESSIVO all'ESTINZIONE della RISPOSTA LIBERA, tutte le VARIABILI di RETE sono FUNZIONI SINUSOIDALI ISOFREQUENZIALI con l'INGRESSO.



afferiscono 3 CORRENTI

LKC

$\mapsto i_1(t) + i_2(t) - i_3(t) = 0$

$$\sqrt{2}\, I_1 \cdot \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_1) + \sqrt{2} \cdot I_2 \cdot \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_2) - \sqrt{2} \cdot I_3 \cdot \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_3) =$$

$$\operatorname{Im}\left[\sqrt{2} \cdot I_1 \cdot e^{j\varphi_1} \cdot e^{j\omega t}\right] + \operatorname{Im}\left[\sqrt{2}\, I_2 \cdot e^{j\varphi_2}\, e^{j\omega t}\right] - \operatorname{Im}\left[\sqrt{2}\, I_3 \cdot e^{j\varphi_3} \cdot e^{j\omega t}\right] = 0$$

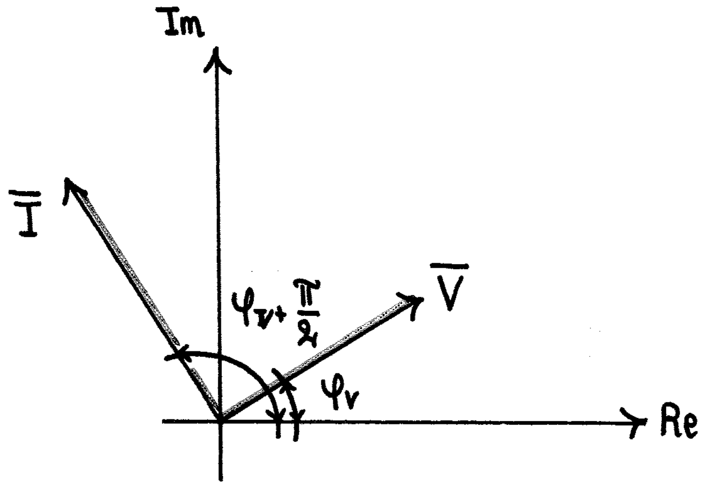
APPLICANDO la DEFINIZIONE di FASORE si ottiene un'EQUAZIONE nel DOMINIO delle FREQUENZE:

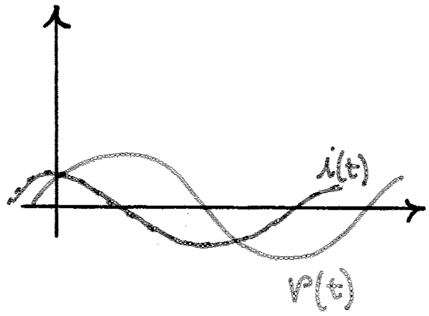
$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 - \bar{I}_3 = 0$$

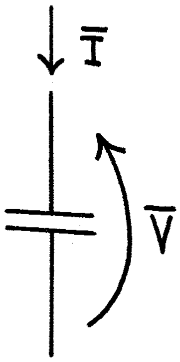
LKC nel DOMINIO del TEMPO
è equivalente
a
LKC nel DOMINIO della ω

$\mapsto$ Le EQUAZIONI COSTITUTIVE possono essere scritte in FORMA FASORIALE solo se la SOLUZIONE ha raggiunto lo STATO di REGIME SINUSOIDALE.

A.Z.







$$\overline{I} = j\omega C \overline{V}$$

$$\Rightarrow \overline{V} = \frac{\overline{I}}{j\omega C} = \frac{-j}{\omega C}\overline{I}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow \text{REATTANZA CAPACITIVA } [\Omega]$$

INDUTTORE

Alimentato da una CORRENTE SINUSOIDALE

$$i(t) = \sqrt{2}\, I \cdot \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_I) = \sqrt{2} \cdot I \cdot e^{j\varphi_I} \cdot e^{j\omega t}$$

EQUAZIONE COSTITUTIVA

$$v(t) = L \cdot \frac{di}{dt} = \operatorname{Im}\left[\sqrt{2}\, L j\omega I\, e^{j\varphi_I} \cdot e^{j\omega t}\right]$$

FASORE della TENSIONE ai CAPI di L

$$\overline{V} = j\omega L \overline{I} \qquad \begin{cases} |\overline{V}| = \omega L I \\ \varphi_V = \varphi_I + \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

A.L.

$$\bar{Z} = Z e^{j\theta} \mapsto V e^{j\varphi_V} = Z e^{j\theta} I e^{j\varphi_I}$$

$$Z = \frac{V}{I}$$

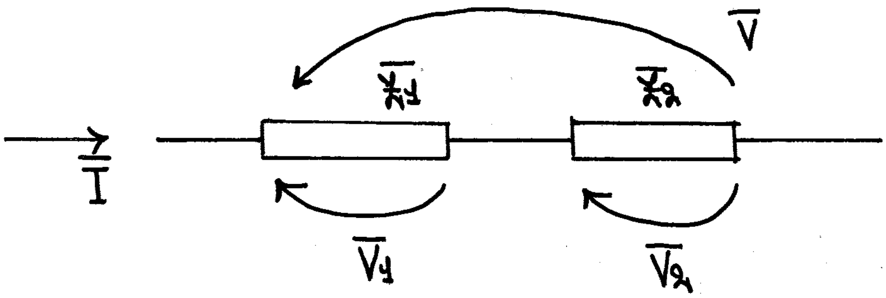
$$\theta = \varphi_V - \varphi_I$$

Il VALORE ASSOLUTO di Z e' il RAPPORTO tra V ed I $\mapsto$ espresso in Ohm

ANGOLO di FASE dell' IMPEDENZA

$$\left.\begin{array}{l} \circ \text{ RESISTORE} \mapsto \bar{Z} = R \mapsto \theta = 0 \\ \circ \text{ CONDENSATORE} \mapsto \bar{Z} = -\dfrac{j}{\omega C} \mapsto \theta = -\dfrac{\pi}{2} \\ \circ \text{ INDUTTORE} \mapsto \bar{Z} = j\omega L \mapsto \theta = \dfrac{\pi}{2} \end{array}\right\} \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq +\frac{\pi}{2}$$

<u>CONNESSIONI CANONICHE</u> $\mapsto$ <u>COLLEGAMENTO in SERIE</u>

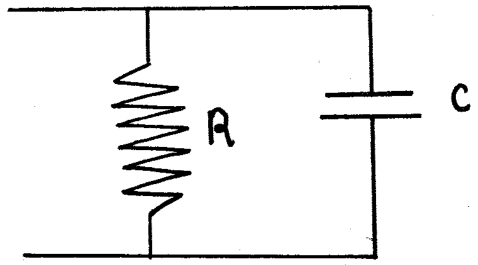


$$\bar{V} = \bar{V}_1 + \bar{V}_2 = \bar{Z}_1 \cdot \bar{I} + \bar{Z}_2 \cdot \bar{I} = (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) \cdot \bar{I}$$

$$Z_{eq} = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2$$

A.R.

COLLEGAMENTO OHMICO-CAPACITIVO



$\overline{V} = R \cdot \overline{I} \mapsto$ RESISTORE

$\overline{V} = \dfrac{-j}{\omega C} \cdot \overline{I} \mapsto$ CONDENSATORE

$$\frac{1}{\overline{Z}_{eq}} = \frac{1}{\overline{Z}_1} + \frac{1}{\overline{Z}_2} \mapsto \frac{1}{\overline{Z}_{eq}} = \frac{1}{R} - \frac{\omega C}{j}$$

$$\frac{1}{\overline{Z}_{eq}} = \frac{1}{R} + \left(\frac{1}{j\omega C}\right)^{-1}$$

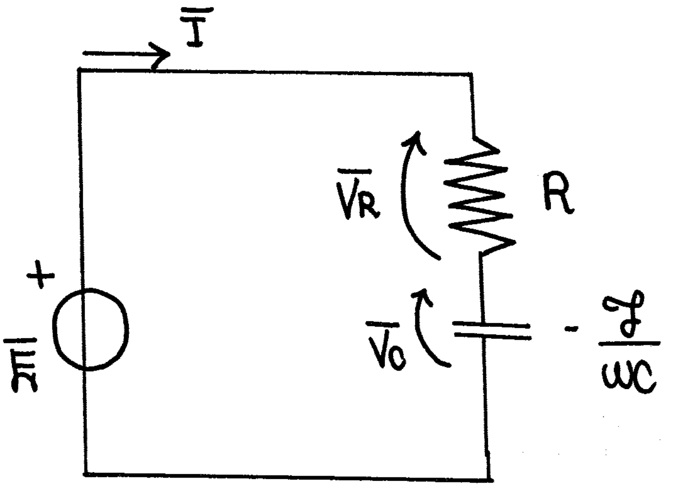
$$\frac{1}{\overline{Z}_{eq}} = \frac{1}{R} + j\omega C$$

$$\overline{Z}_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C} = \frac{R}{1 + Rj\omega C} =$$

$$= \frac{R(1 - j\omega CR)}{(1 + j\omega CR)(1 - j\omega CR)} = \frac{R - j\omega CR^2}{1 + (\omega CR)^2}$$

A.F.

CIRCUITO RC



$$\overline{E} = E \cdot e^{j0}$$

$$\overline{E} = \left(R - \frac{j}{\omega C}\right) \cdot \overline{I}$$

$$\overline{I} = \frac{\overline{E}}{\left(R - \frac{j}{\omega C}\right)} \Rightarrow |\overline{I}| = \frac{|\overline{E}|}{\left|R - \frac{j}{\omega C}\right|}$$

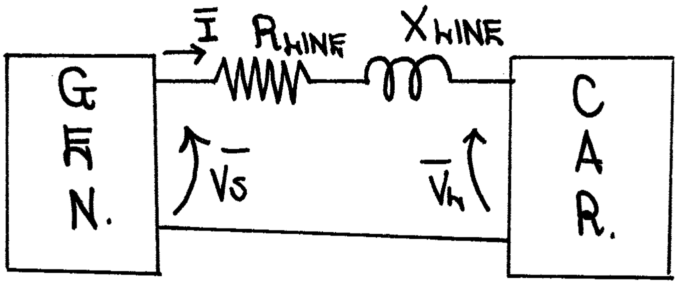
$$\Rightarrow |\overline{I}| = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

$$\varphi_I = \varphi_E - \varphi_{\left(R - j\frac{1}{\omega C}\right)}$$

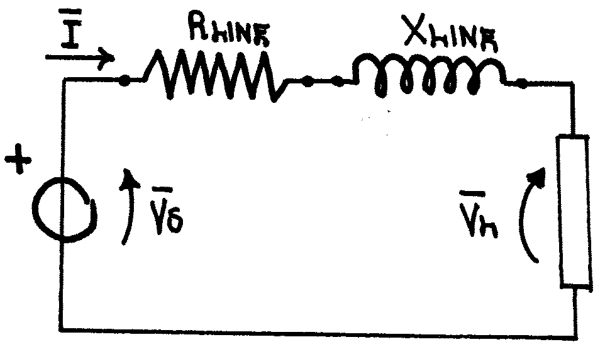
$$\varphi_I = +\operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\omega C R}\right)$$

A.F.

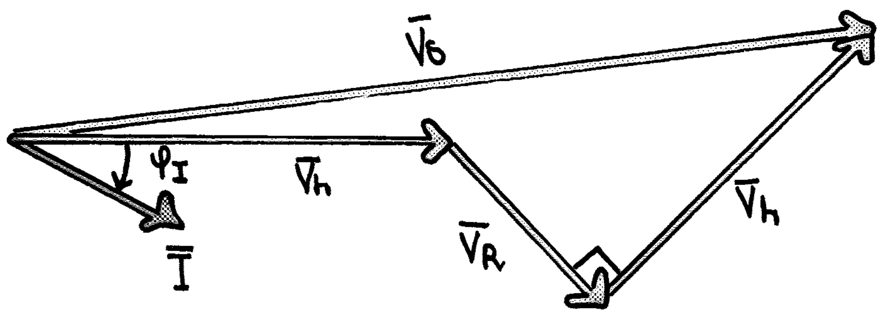
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 47 di 217



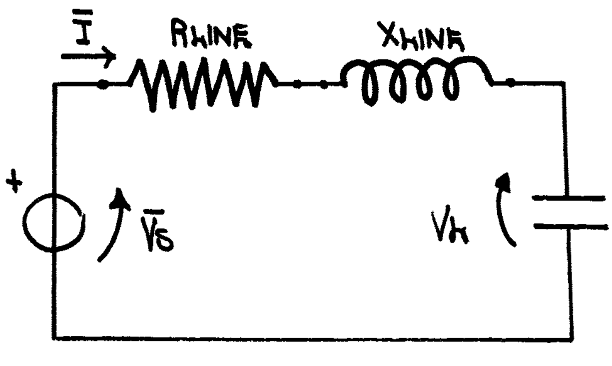
Utilizzando la TENSIONE sul CARICO come RIFERIMENTO di FASE $\varphi_L = 0$, il VALORE di Vs si può ottenere come



$$\bar{V}_S = \bar{V}_L + \bar{V}_R + \bar{V}_X = \bar{V}_L + R_{LINE} \cdot \bar{I} + j X_{LINE} \cdot \bar{I}$$



N.B. particolari combinazioni di carichi possono dare LUOGO a SITUAZIONI PERICOLOSE, come, ad es., il CASO di CARICO CAPACITIVO a FINE LINEA che crea TENSIONI sul CARICO SUPERIORI a quelle del GENERATORE.



POTENZA in REGIME SINUSOIDALE

APPLICAZIONI INDUSTRIALI $\longrightarrow$ RETI in REGIME SINUSOIDALE $\longrightarrow$ Servono per TRASFERIRE POTENZA dai GENERATORI ai CARICHI

PUNTO di PARTENZA: POTENZA ISTANTANEA in un COMPONENTE DIPOLARE

$$\Rightarrow \quad p(t) = v(t) \cdot i(t)$$

IN REGIME SINUSOIDALE TENSIONE e CORRENTE possono essere espresse in termini di FUNZIONI SINUSOIDALI:

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot V \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_V)$$

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_I)$$

$$\Rightarrow \quad p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad \Rightarrow p(t) = \sqrt{2}\, V \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_V) \cdot \sqrt{2}\, I \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_I)$$

$$\Rightarrow p(t) = 2\, V \cdot I \cdot \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_V) \cdot \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_I)$$

FORMULA TRIGONOMETRICA

$$\operatorname{sen}\alpha \cdot \operatorname{sen}\beta = \frac{1}{2}\left[\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)\right]$$

$$\alpha = \omega t + \varphi_V \qquad \beta = \omega t + \varphi_I$$

$$p(t) = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot V \cdot I \cdot \left[\cos(\underbrace{\varphi_V - \varphi_I}_{\varphi}) - \cos(2\omega t + \varphi_V + \varphi_I)\right]$$

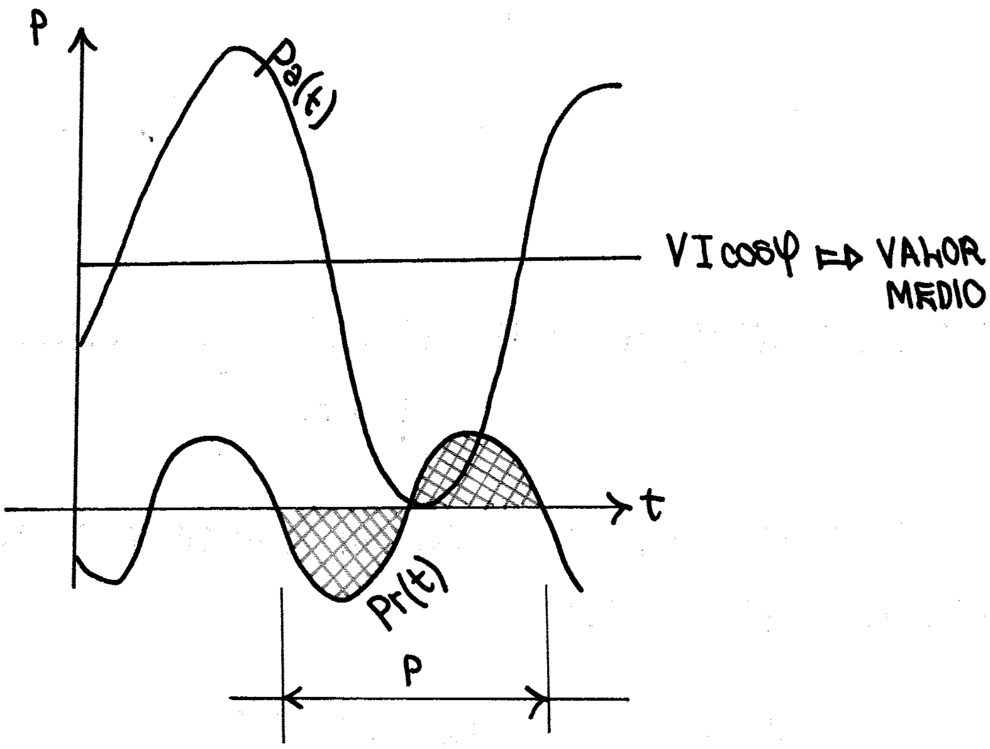
$\varphi \longrightarrow$ FISICAMENTE molto IMPORTANTE!!! COINCIDE con l'ANGOLO dell'IMPEDENZA del DIPOLO (θ)

$$P_a(t) = V \cdot I \cdot \cos\varphi \left[1 - \cos(2\omega t + 2\varphi_I)\right] \Rightarrow$$ COMPONENTE ATTIVA della POTENZA ISTANTANEA

$$P_r(t) = V \cdot I \cdot \text{sen}\varphi \cdot \text{sen}(2\omega t + 2\varphi_I) \Rightarrow$$ COMPONENTE REATTIVA della POTENZA ISTANTANEA

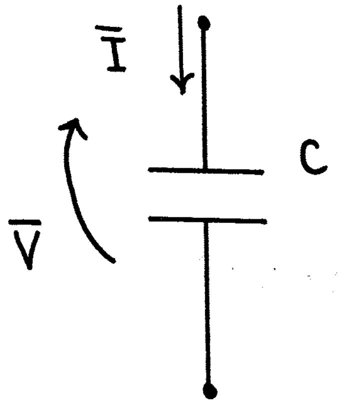
$P_a(t) \Rightarrow$ forma d'ONDA <u>sempre</u> POSITIVA con VALOR MEDIO non NULLO pari al VALORE di $V \cdot I \cdot \cos\varphi \Rightarrow$ POTENZA ASSORBITA dai COMPONENTI DISSIPATIVI

$P_r(t) \Rightarrow$ forma d'ONDA con VALOR MEDIO NULLO $\Rightarrow$ in un PERIODO l'ENERGIA ASSORBITA risulta essere NULLA.
È LEGATA ai COMPONENTI CONSERVATIVI.



A.R.
49

CONDENSATORE



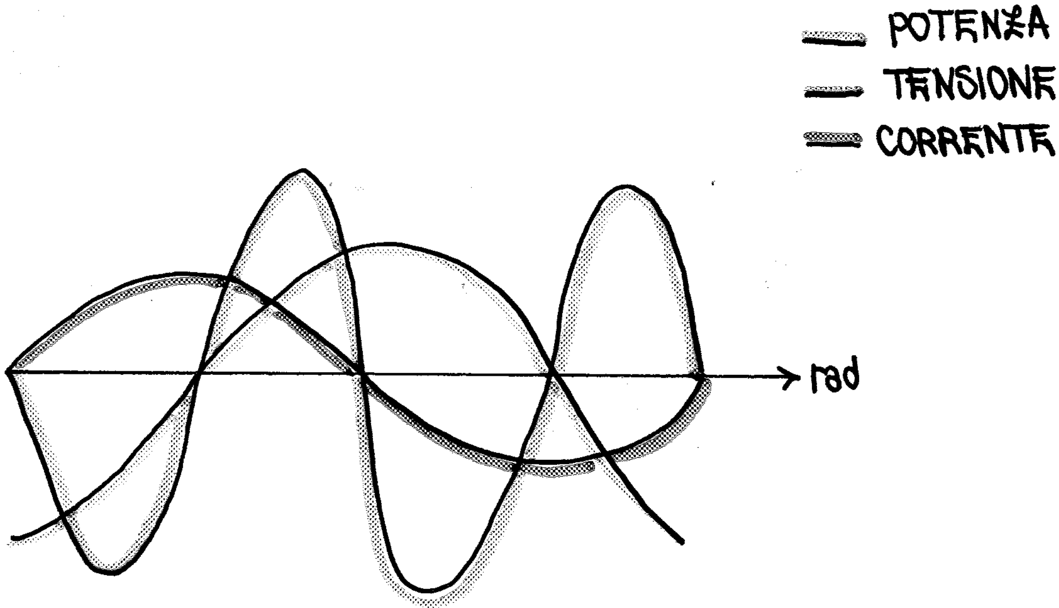
$$\bar{Z} = \frac{-j}{\omega C} \Rightarrow \varphi = \theta = -\frac{\pi}{2}$$

$$\cos\varphi = 0$$

$\Rightarrow P_a = 0$ POTENZA ATTIVA NULLA!!!

$$\operatorname{sen}\varphi = \operatorname{sen}\left(-\frac{\pi}{2}\right) = -1$$

$$P_r(t) = -VI \cdot 1 \cdot \operatorname{sen}\left[2\left(\omega t + \varphi_I\right)\right]$$



POTENZA ATTIVA

VALOR MEDIO di $p_a(t)$ ⇒ ENERGIA scambiata dal DIPOLO può essere ottenuta dall'INTEGRALE nel TEMPO di p_a.

Hp: $\varphi_I = 0$

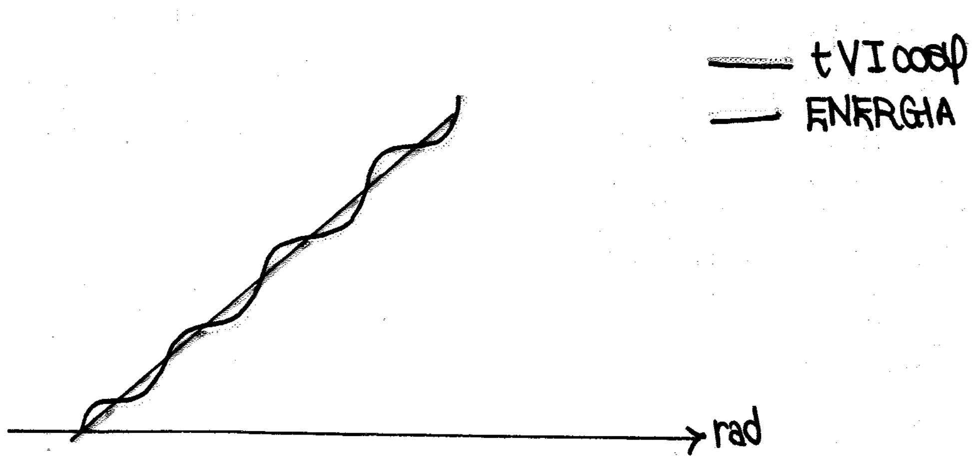
$$p(t) = V \cdot I \cdot \cos\varphi \left[1 - \cos(2\omega t \cancel{+2\varphi_I})\right]$$

$$\Rightarrow p(t) = V \cdot I \cdot \cos\varphi \left[1 - \cos 2\omega t\right]$$

$$W^p(0,t) = \int_0^t VI\cos\varphi \left[1 - \cos 2\omega t'\right] dt'$$

$$W^p(0,t) = \int_0^t VI\cos\varphi \, dt' + \int_0^t VI\cos\varphi \left[-\cos 2\omega t'\right] dt'$$

$$\Rightarrow W^p(0,t) = VI\cos\varphi \left[t - \frac{1}{2\omega} \operatorname{sen} 2\omega t\right]$$



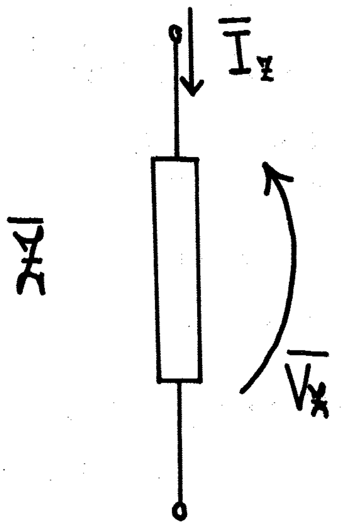
AL

POTENZA COMPLESSA

POTENZA in una IMPEDENZA

P ⟹ POTENZA ATTIVA
Q ⟹ POTENZA REATTIVA

} Definite in TERMINI dei VALORI EFFICACI di V ed I e dell' ANGOLO di SFASAMENTO tra loro



$$\bar{V} = V \cdot e^{j\varphi_V}$$

$$\bar{I} = I \cdot e^{j\varphi_I}$$

CONIUGATO di $\bar{I}$

$$\bar{I}^* = I \cdot e^{-j\varphi_I}$$

$$\bar{V} \cdot \bar{I}^* = Ve^{j\varphi_V} \cdot Ie^{-j\varphi_I}$$

$$\Rightarrow \bar{V} \cdot \bar{I}^* = V \cdot I \cdot e^{j\underbrace{(\varphi_V - \varphi_I)}_{\varphi}}$$

$$\Rightarrow \bar{V} \cdot \bar{I}^* = V \cdot I \cdot e^{j\varphi}$$

$$\Rightarrow \boxed{\bar{V} \cdot \bar{I}^* = VI\left(\cos\varphi + j \operatorname{sen}\varphi\right)}$$ POTENZA COMPLESSA

↓

contiene INFORMAZIONI su P e su Q

$$\bar{S} = \bar{V} \cdot \bar{I}^* = V \cdot I\left(\cos\varphi + j \operatorname{sen}\varphi\right) =$$

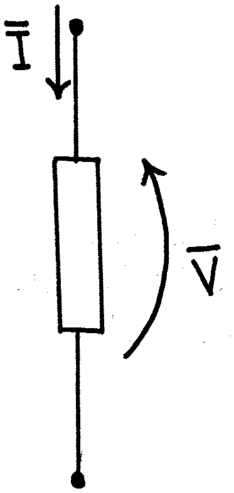
$$= \underline{VI\cos\varphi} + j \cdot \underline{VI\operatorname{sen}\varphi} =$$

$$= P + jQ$$

A.Z.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 59 di 217

POTENZA COMPLESSA in funzione di V



$$\bar{S} = \bar{V} \cdot \bar{I}^* = \bar{Z} I^2 = \bar{Z} \cdot \left(\frac{V}{Z}\right)^2$$

$$= \frac{R \pm jX}{Z^2} V^2 = \frac{R \pm jX}{Z} \cdot \frac{V^2}{Z}$$

$$P = \frac{V^2}{Z}\left(\frac{R}{Z}\right) = \frac{V^2}{Z} \cos\varphi$$

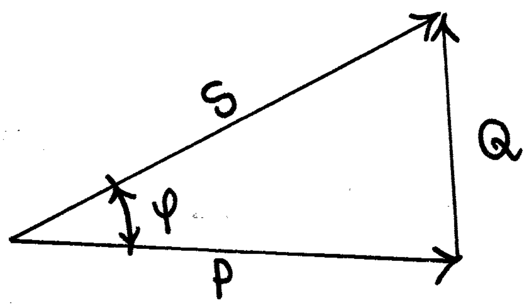
$$Q = \frac{V^2}{Z}\left(\frac{\pm X}{Z}\right) = \frac{V^2}{Z} \cdot \operatorname{sen}\varphi$$

TRIANGOLO delle POTENZE

$$\underline{S = V \cdot I}$$

$$\underline{P = V \cdot I \cdot \cos\varphi}$$

$$\underline{Q = V \cdot I \cdot \operatorname{sen}\varphi}$$



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 61 di 217

$$\sum_{k=1}^{N_{SOURCE}} \bar{S}_k = \sum_{n=1}^{N_{LOAD}} \bar{S}_n$$

$$\sum_{k=1}^{N_{SOURCE}} P_k + jQ_k = \sum_{n=1}^{N_{LOAD}} P_n + jQ_n$$

$$\sum_{k=1}^{N_{SOURCE}} P_k = \sum_{n=1}^{N_{LOAD}} P_n \qquad \sum_{k=1}^{N_{SOURCE}} Q_k = \sum_{n=1}^{N_{LOAD}} Q_n$$

$\Rightarrow$ **TEOREMA di BOUCHEROT** $\longrightarrow$ IMPONE il BILANCIAMENTO delle POTENZE tra SORGENTI e CARICHI.

$\downarrow$

Il BILANCIO vale anche se la POTENZA ATTIVA P e' stata determinata come il VALOR MEDIO della $p_a(t)$; medesima considerazione vale per la POTENZA REATTIVA Q (non e' una vera e propria grandezza fisica).

Q $\Rightarrow$ POTENZA REATTIVA
- $\nearrow$ SEGNO POSITIVO: **INDUTTIVA**
- $\searrow$ SEGNO NEGATIVO: **CAPACITIVA**

$\downarrow$

$\sum_{n=1}^{N_{LOAD}} Q_n$ potrebbe essere uguale a $\emptyset$ anche se i singoli TERMINI non lo sono.

RENDIMENTO di LINEA

LINEA di TRASMISSIONE: vista come un DISPOSITIVO che TRASFERISCE POTENZA dai GENERATORI ai CARICHI

$\downarrow$

e' un DISPOSITIVO che gestisce una ENERGIA $\longrightarrow$ viene associato un RENDIMENTO

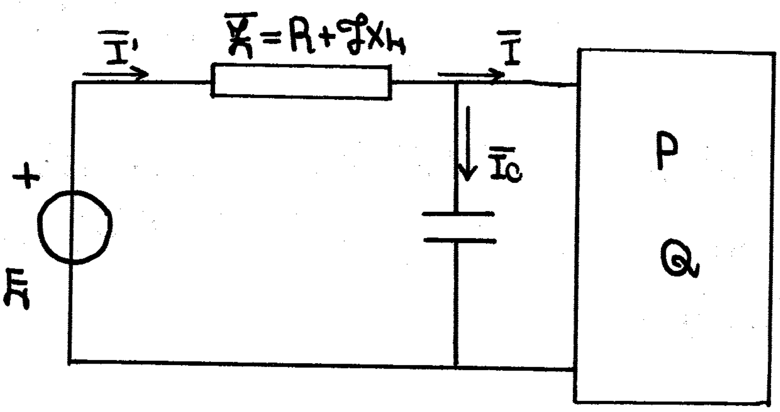
A.L.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 63 di 217

$$\boxed{P_{LINEA} = R_L \cdot I^2}$$

- A PARITÀ di POTENZA ATTIVA TRASFERITA al CARICO, il RENDIMENTO η di TRASFERIMENTO sarà MINORE per ELEVATI VALORI di Q.
- Le PERDITE di TRASMISSIONE sono a CARICO del DISTRIBUTORE
- È possibile RIDURRE le PERDITE in LINEA per mezzo del RIFASAMENTO.

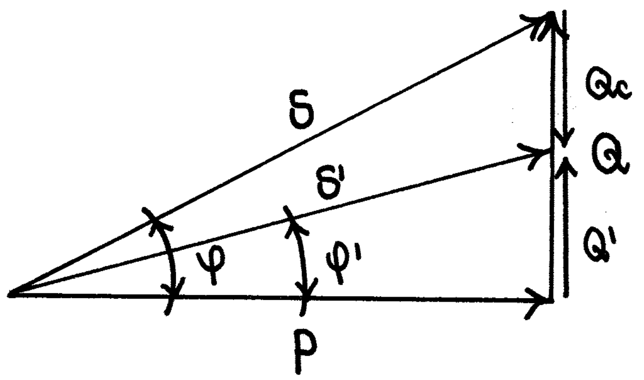
RIFASAMENTO → Si può RIFASARE il CARICO connettendo in PARALLELO allo stesso un CARICO CAPACITIVO (CONDENSATORE di CAPACITÀ C)



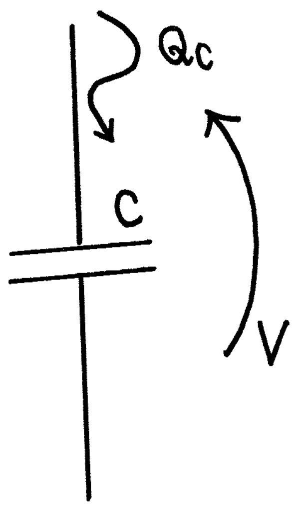
OBIETTIVI:

- MINIMIZZARE la POTENZA REATTIVA richiesta alla RETE ⟹ AUMENTARE il FATTORE di POTENZA del CARICO COMPLESSIVO (compreso anche il CONDENSATORE)
- EVITARE un ECCESSO di RIFASAMENTO
- ci si impone che $\boxed{\cos\varphi' = 0{,}9}$

PROCEDIMENTO $\Rightarrow$ può essere riassunto per mezzo di un PROCEDIMENTO GRAFICO mediante il TRIANGOLO delle POTENZE.



NOTA la POTENZA Qc, allora rimane da VALUTARE il VALORE della CAPACITÀ C



Hp: $Q_c \Rightarrow$ nota

$V \Rightarrow$ nota

$$Q_c = -\frac{V^2}{X_c^*} = -\omega C V^2$$

$$C = -\frac{Q_c}{\omega V^2}$$

RIFASAMENTO: mantiene INVARIATA la PARTE REALE della CORRENTE assorbita dal CARICO

$$\Rightarrow \quad Re(I) = Re(I')$$

$$\Rightarrow P = P' \Rightarrow V \cdot I \cdot \cos\varphi = V \cdot I' \cdot \cos\varphi' \Rightarrow I\cos\varphi = I'\cos\varphi'$$

CONSEGUENZA: si è ridotto il VALORE EFFICACE della CORRENTE in LINEA

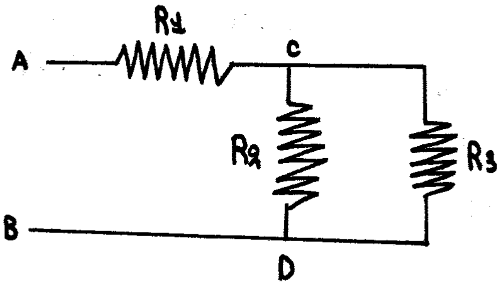
$$I' < I \Rightarrow P'_{LINEA} < P_{LINEA}$$

4£.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 67 di 217

ESERCIZI - CALCOLO RESISTENZA EQUIVALENTE

1



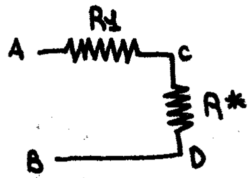
$R_1 = 1\,\Omega$

$R_2 = 2\,\Omega$

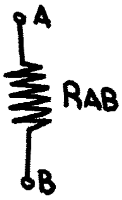
$R_3 = 2\,\Omega$

$R_{AB} = ?$

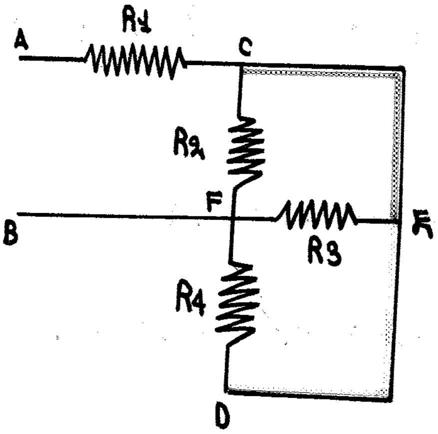
$$R_2 \,//\, R_3 \Rightarrow R^* = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} = 1\,\Omega$$



$R_1 \mapsto R^*$ collegate in SERIE $\Rightarrow R_{AB} = R^* + R_1 = 1\,\Omega + 1\,\Omega = 2\,\Omega$



2



$R_1 = 1\,\Omega$

$R_2 = 3\,\Omega$

$R_3 = 3\,\Omega$

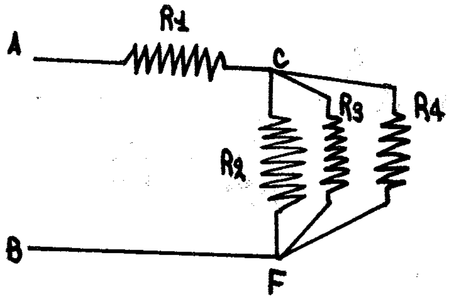
$R_4 = 3\,\Omega$

$R_{AB} = ?$

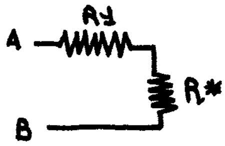
CORTOCIRCUITI

C, E, D sono al medesimo potenziale

$\Rightarrow$



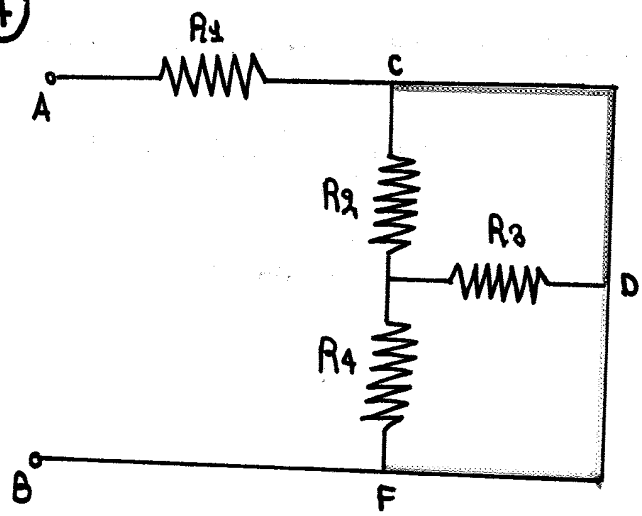
$$R_2 \,//\, R_3 \,//\, R_4 \Rightarrow R^* = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{1}{\frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3}} = 1\,\Omega$$



$R_1 \mapsto R^*$ collegate in SERIE $\Rightarrow R_{AB} = R_1 + R^* = 1\,\Omega + 1\,\Omega = 2\,\Omega$

A.L.

4



$R_1 = 10\Omega$

$R_2 = 3\Omega$

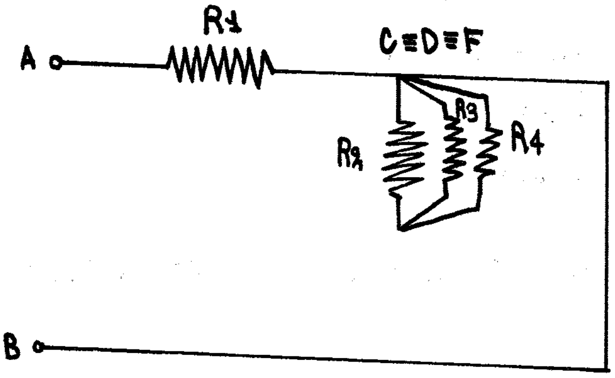
$R_3 = 6\Omega$

$R_4 = 2\Omega$

$R_{AB} = ?$

═ CORTOCIRCUITI

C, D, F: sono NODI al medesimo POTENZIALE perche' collegati da CORTOCIRCUITI

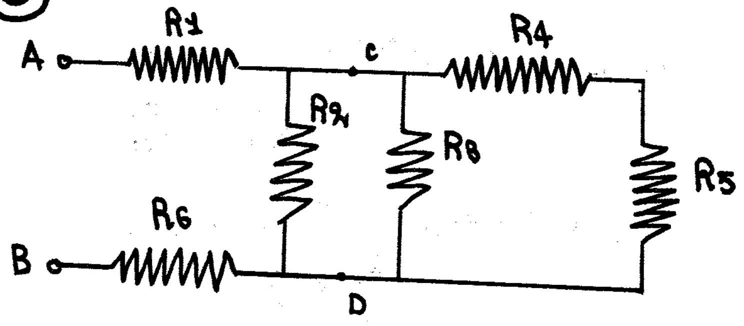


$R_{eq} = R_1 = 10\Omega$ perche'

$R_2 \,//\, R_3 \,//\, R_4 \,//$ CORTOCIRCUITO

⇒ ININFLUENTI !!

5



$R_1 = 10\Omega$

$R_2 = 30\Omega$

$R_3 = 30\Omega$

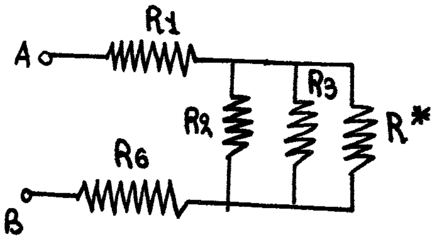
$R_4 = 15\Omega$

$R_5 = 15\Omega$

$R_6 = 10\Omega$

$R_{AB} = ?$

$R_4 \mapsto R_5$ collegate in SERIE $\mapsto R^* = R_4 + R_5 = 15 + 15 = 30\Omega$



$R_2 \,//\, R_3 \,//\, R^*$

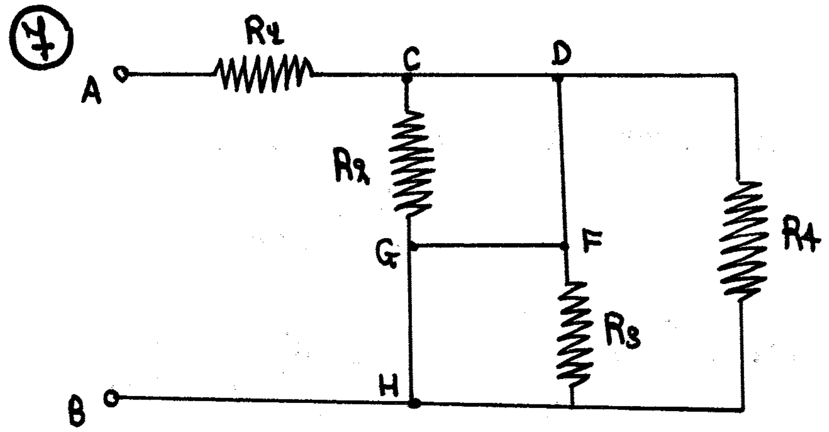
$$R^{**} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R^*}} = \frac{1}{\frac{1}{30} + \frac{1}{30} + \frac{1}{30}} = \frac{30}{3}$$

$\mapsto R^{**} = 10\Omega$

47

67

7



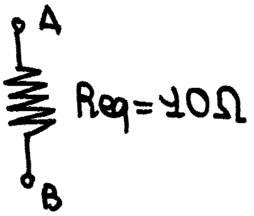
$R_1 = 10\Omega$
$R_2 = 20\Omega$
$R_3 = 20\Omega$
$R_4 = 60\Omega$

R_2 // CORTOCIRCUITO $\rightarrow R^* = 0$

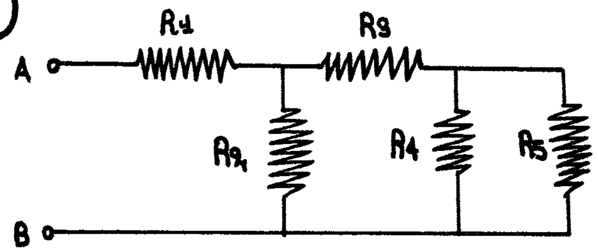
R_3 // CORTOCIRCUITO $\rightarrow R^{**} = 0$

R_4 // CORTOCIRCUITO $\rightarrow R^{***} = 0$

$R_{eq} = R_{AB} = R_1 = 10\Omega$

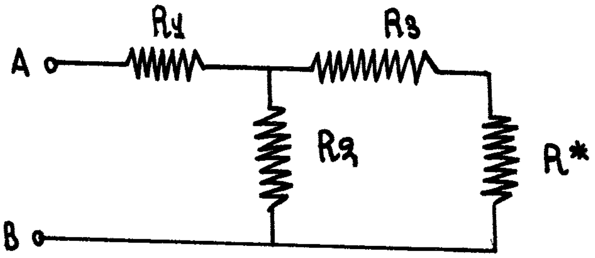


8



$R_1 = 1\Omega$
$R_2 = 3\Omega$
$R_3 = 3\Omega$
$R_4 = 3\Omega$
$R_5 = 1\Omega$
$R_{AB} = ?$

$$R_4 \,//\, R_5 \Rightarrow R^* = \frac{1}{\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}} = \frac{1}{\frac{1}{3} + \frac{1}{1}} = \frac{3}{4}\Omega$$

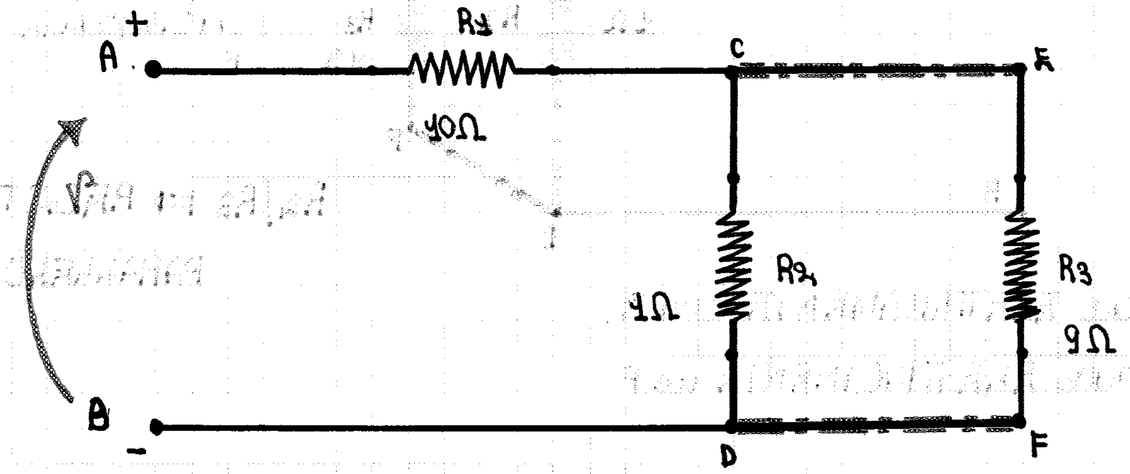


$R_3 \mapsto R^*$ collegate in SERIE

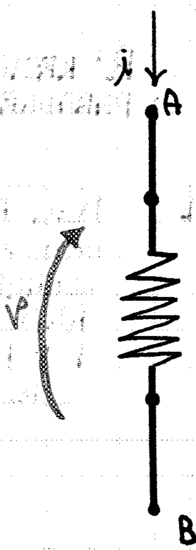
$$R^{**} = R_3 + R^* = 3 + \frac{3}{4} = \frac{15}{4}\Omega$$

ESERCITAZIONE

1



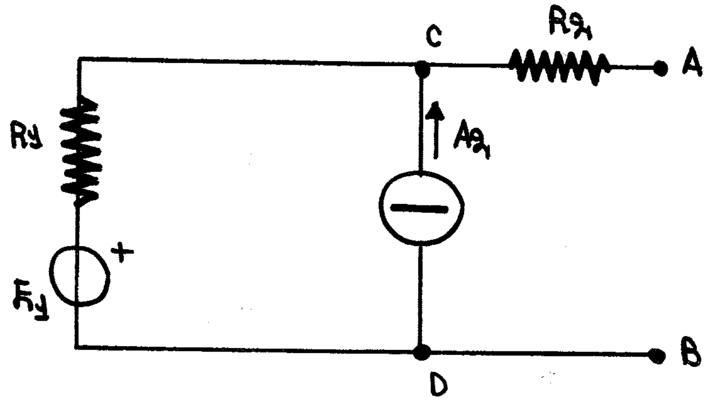
R_{AB} = Resistenza equivalente = ?



$R_{AB} = ?$ $\qquad V = R_{AB} \cdot i$ LEGGE COSTITUTIVA

CE | DF ⇒ rappresentano 2 CORTOCIRCUITI. Il CORTOCIRCUITO impone che la DIFFERENZA di POTENZIALE sia NULLA.

ESERCIZIO



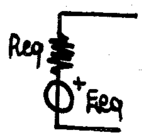
DATI:

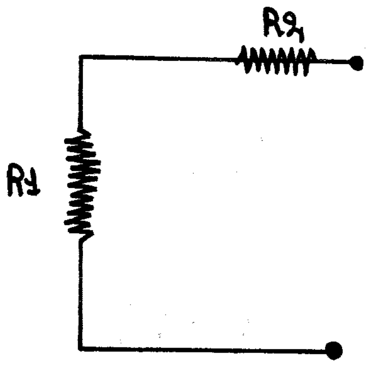
$E_1 = 70\,V$ $\quad R_1 = 6\,\Omega$

$A_2 = 8\,A$ $\quad R_2 = 4\,\Omega$

TESI:

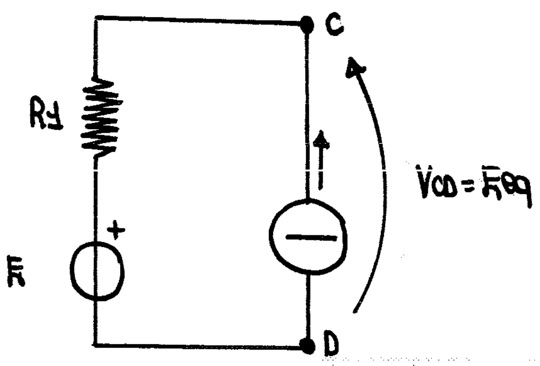
CIRCUITO di THEVENIN





R_1 ed R_2 sono collegate in SERIE.

$$R_{eq} = R_1 + R_2 = 6 + 4 = 10\,\Omega$$



$$E_{eq} = E_1 + R_1 \cdot A_2 = 118\,V$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 77 di 217

$$\overline{I} = 1,9 \cdot e^{17°,87 j} \ A$$

CALCOLO delle TENSIONI

$$\overline{V_R} = R \cdot \overline{I} = 50 \cdot 1,9 e^{j17,87} = 95 \cdot e^{j17,87} \ V$$

$$\overline{V_L} = j\omega L \cdot \overline{I} = 15,71 \cdot 1,9 e^{j\left(17,87 + \frac{\pi}{2}\right)} = 29,85 e^{j107°,87}$$

$$\overline{V_C} = -\frac{j}{\omega C} \cdot \overline{I} = -j31,83 \cdot 1,9 e^{j\left(17,87 - \frac{\pi}{2}\right)} = 60,48 e^{-j72°,13}$$

A7.

90

CALCOLO del FASORE della CORRENTE

EQUAZIONE COSTITUTIVA: LEGGE di OHM in forma FASORIALE

$$\overline{V} = \overline{Z}_T \cdot \overline{I}$$

$$|\overline{I}| = \frac{|\overline{E}|}{|\overline{Z}_T|} = \frac{100}{52,66} = 1,90 \text{ A}$$

$$\varphi_I = \varphi_V - \varphi_{Z_T} = -18°,29$$

$$\overline{I} = 1,9 \cdot e^{-j18°,29}$$

CALCOLO delle TENSIONI

$$\overline{V}_R = R\,\overline{I} = 50 \cdot 1,9e^{-j18°,29} = 95e^{-j18°,29} \text{ V}$$

$$\overline{V}_L = j\omega L \cdot \overline{I} = j \cdot 15,71 \cdot 1,9e^{+j(18°,29+\frac{\pi}{2})} = j29,85e$$

SISTEMA TRIFASE — Prof. ING. PIGLIONE

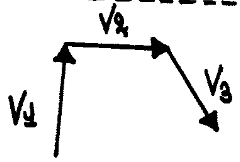
STUDIO SISTEMI TRIFASE → Richiede l'impiego di **TERNE di FASORI**

V_1, V_2, V_3 : FASORI GENERICI

possono essere:

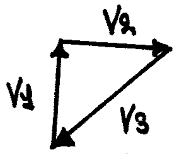
SPURIA

quando la SOMMA dei 3 FASORI e' ≠ da 0



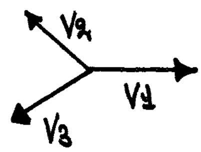
PURA

quando la SOMMA dei 3 FASORI e' = 0



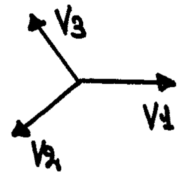
SIMMETRICA INVERSA

quando 3 FASORI V_1, V_2, V_3 formano i LATI di un TRIANGOLO EQUILATERO, e si susseguono in SENSO ANTIORARIO.



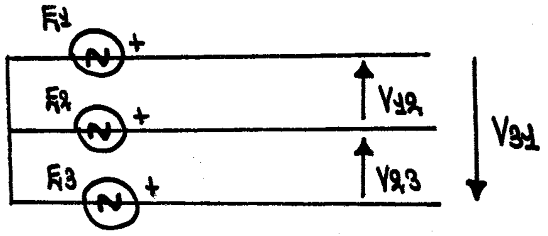
SIMMETRICA DIRETTA

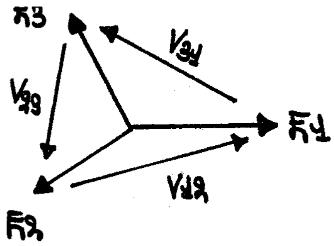
quando 3 FASORI V_1, V_2, V_3 formano i LATI di un TRIANGOLO EQUILATERO, e si susseguono in SENSO ORARIO.



Def. SISTEMA POLIFASE: e' una RETE ELETTRICA formata da una n-upla di RAMI in //, alimentata da una n-upla di GENERATORI di TENSIONE, di MODULO UGUALE e SFASATI ognuno rispetto al successivo di $2\pi/n$.

1





N.B. $e^{j120°} = -0,5 + j\cdot\frac{\sqrt{3}}{2}$

$e^{-j120°} = -0,5 - j\cdot\frac{\sqrt{3}}{2}$

⇒ $\underline{V_{12}} = \underline{E_1} - \underline{E_2} = E\left(1 - e^{-j120°}\right) = E\left(\underbrace{1 + 0,5}_{1,5} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) =$

$= E\left(1,5 + j\cdot\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \sqrt{3}\cdot E\left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j\,0,5\right) = \sqrt{3}\cdot E\, e^{j30°}$

$V_{12} = \sqrt{3}\cdot \underline{E_1}\cdot e^{j30°}$

La TENSIONE CONCATENATA $\underline{V_{12}}$ risulta **SFASATA** in ANTICIPO di 30° rispetto ad $\underline{E_1}$ e MOLTIPLICATA per il FATTORE $\sqrt{3}$. Le TENSIONI CONCATENATE risultano di AMPIEZZA $\sqrt{3}$ **MAGGIORE** delle TENSIONI STELLATE.

OSSERVAZIONE: una TERNA SIMMETRICA di GENERATORI si può rappresentare agli EFFETTI ESTERNI secondo **2 CONFIGURAZIONI**, a STELLA ★ e a TRIANGOLO ▲, CONFIGURAZIONI DUALI tra loro ⇒ La DIFFERENZA che si nota è che nella RAPPRESENTAZIONE a TRIANGOLO ▲ il MORSETTO di CENTRO ★ non ESISTE.

Anche i **CARICHI TRIFASE** sono FORMATI da **TERNE** di **IMPEDENZE** disposte a STELLA o a TRIANGOLO.

⇒ se le **3 IMPEDENZE** sono **UGUALI** allora il **CARICO** si dice **EQUILIBRATO**, in caso contrario **SQUILIBRATO**.

Si osserva che un CARICO EQUILIBRATO, che risulta essere ALIMENTATO da una TERNA di GENERATORI SIMMETRICA assorbe una TERNA di CORRENTI anch'essa SIMMETRICA.

A.Z.

Se I_Δ e' il MODULO della CORRENTE di LATO, si ottiene, in forma ANALITICA:

$$\underline{I_1} = \underline{I_{12}} - \underline{I_{31}} = I_\Delta \left(1 - e^{j120°}\right) =$$

$$= I_\Delta \left(1 + 0{,}5 - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right) = I_\Delta \left(1{,}5 - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) =$$

$$= \sqrt{3}\, I_\Delta \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - j \cdot 0{,}5\right) = \sqrt{3}\, I_\Delta \cdot e^{-j30°} =$$

$$= \sqrt{3}\, \underline{I_{12}}\, e^{-j30°}$$

⟹ quando le **CORRENTI** di **LINEA** formano una **TERNA SIMMETRICA**, risultano di AMPIEZZA $\sqrt{3}$ VOLTE MAGGIORE di quelle di **LATO** del TRIANGOLO ▲.

SISTEMA TRIFASE SIMMETRICO

SISTEMA — FORMATO da → **TERNA SIMMETRICA di GENERATORI di TENSIONE** → ★ / ▲

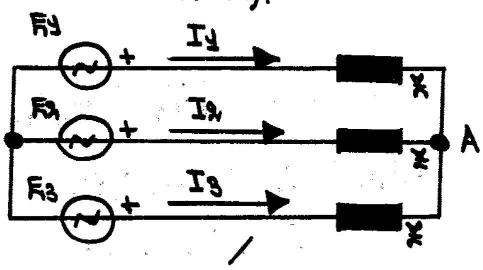
SISTEMA → **SIMMETRICO ed EQUILIBRATO**

TERNA SIMMETRICA di GENERATORI di TENSIONE — che ALIMENTA → **CARICO EQUILIBRATO** → ★ / ▲

CARICO EQUILIBRATO — DEFINITO → **SIMMETRICO ed EQUILIBRATO**

SIMMETRICO ed EQUILIBRATO → Le CORRENTI che CIRCOLANO sono **SIMMETRICHE**

Consideriamo una CONNESSIONE ★ - ★ (GENERATORI CONNESSI a STELLA, CARICHI CONNESSI a STELLA).



Utilizzando il **TEOREMA** di **MILLMAN** per calcolare la TENSIONE **VAO** tra i 2 CENTRI ★ si ottiene:

$$V_{AO} = \frac{\frac{\underline{E_1}}{\underline{Z}} + \frac{\underline{E_2}}{\underline{Z}} + \frac{\underline{E_3}}{\underline{Z}}}{\frac{3}{\underline{Z}}} = \frac{\frac{(\underline{E_1} + \underline{E_2} + \underline{E_3})}{\underline{Z}}}{\frac{3}{\underline{Z}}} = 0$$

Anche le **CORRENTI** di **LATO** sono **SIMMETRICHE**, e definite come:

- $I_{12} = \dfrac{V_{12}}{Z_\Delta}$
- $I_{23} = \dfrac{V_{23}}{Z_\Delta}$
- $I_{31} = \dfrac{V_{31}}{Z_\Delta}$

Si sono ottenute dividendo le **TENSIONI CONCATENATE** per il VALORE dell' **IMPEDENZA** di **LATO**.

N.B.! SISTEMA TRIFASE SIMMETRICO ed EQUILIBRATO

↓

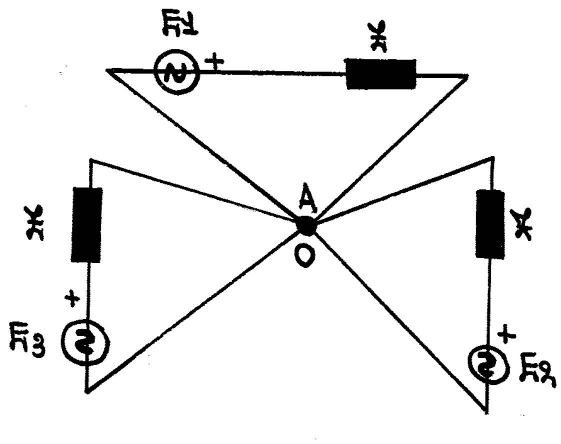
costituisce il **SISTEMA TRIFASE** per **ECCELLENZA**.

FASORI CORRENTE e **TENSIONE** relativi ad OGNI FASE sono UGUALI in MODULO a quelli delle altre 2 FASI SFASATI rispetto a questi di $\pm 120°$ Ogni **FASE** TRASMETTE **1/3** della **POTENZA TOTALE TRANSITANTE**

Dato che il SISTEMA risulta **SIMMETRICO** allora le **3 FASI** risultano disaccoppiate tra loro.

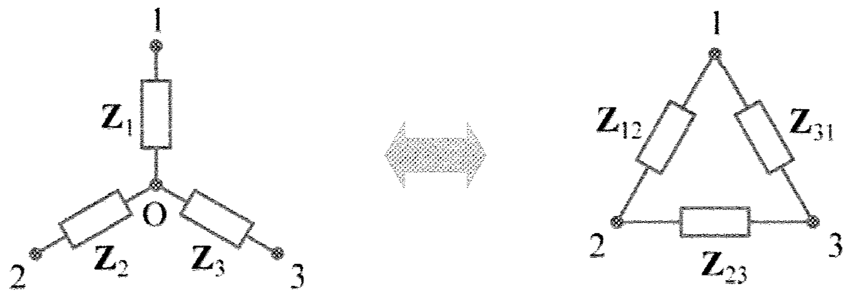
↓

$V_{AO} = 0 \Rightarrow O \equiv A$



A.Z 7

Equivalenza stella-triangolo



$$Z_1 = \frac{Z_{12}Z_{13}}{Z_{12}+Z_{13}+Z_{23}} \qquad Z_{12} = \frac{Z_1Z_2+Z_1Z_3+Z_2Z_3}{Z_3}$$

$$Z_2 = \frac{Z_{12}Z_{23}}{Z_{12}+Z_{13}+Z_{23}} \qquad Z_{31} = \frac{Z_1Z_2+Z_1Z_3+Z_2Z_3}{Z_2}$$

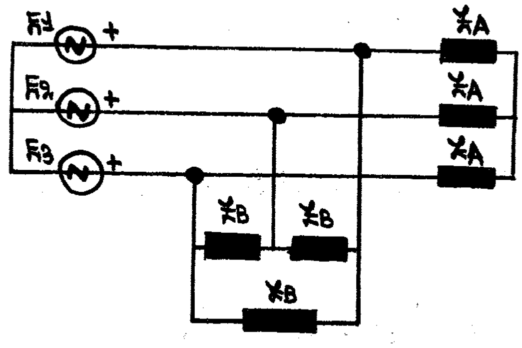
$$Z_3 = \frac{Z_{13}Z_{23}}{Z_{12}+Z_{13}+Z_{23}} \qquad Z_{23} = \frac{Z_1Z_2+Z_1Z_3+Z_2Z_3}{Z_1}$$

Nel CASO di <u>CARICO EQUILIBRATO:</u>

$$Z_Y = \frac{Z_\Delta}{3}$$

$$Z_\Delta = 3 \cdot Z_Y$$

PARALLELO di CARICHI EQUILIBRATI



I 2 CARICHI **TRIFASE** sono collegati in // perche' hanno i MORSETTI sottoposti alla mede= sima TERNA di TENSIONI CONCATENATE.

se vogliamo STUDIARE il PROBLEMA, applicando la DEFINIZIONE di **MONOFASE EQUIVALENTE** bisogna TRASFORMARE a ★ il CARICO a ▲.

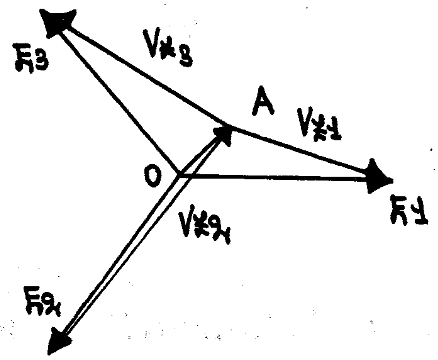
I_1, I_2, I_3 formano una **TERNA DISSIMETRICA** ⇒

- $I_1 = \dfrac{V_{Z1}}{Z_1}$
- $I_2 = \dfrac{V_{Z2}}{Z_2}$
- $I_3 = \dfrac{V_{Z3}}{Z_3}$

Nel **NODO A** vale la seguente EQUAZIONE:

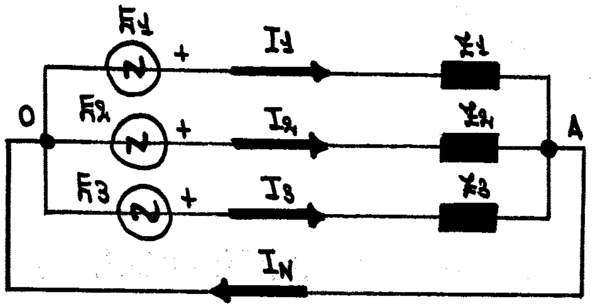
- $$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

DIAGRAMMA FASORIALE



Le TENSIONI sui CARICHI (SQUILIBRATI) assumono VALORI DIFFERENTI, MAGGIORI o MINORI della TENSIONE di FASE.

SISTEMA TRIFASE a 4 FILI

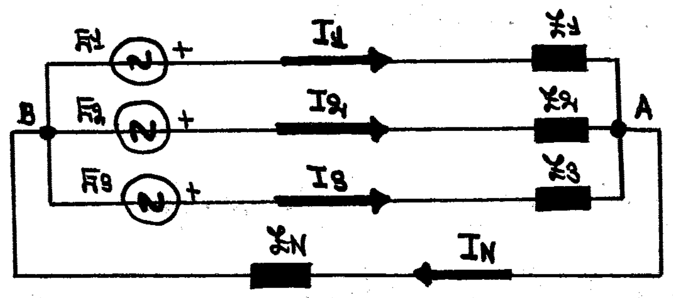


Un SISTEMA **TRIFASE a 3 FILI** non può soddisfare le ESIGENZE di UTENTI MONOFASE collegati a ★, in quanto ad ogni VARIAZIONE del CARICO ASSORBITO da una delle FASI corrisponde una VARIAZIONE delle TENSIONI su tutte le FASI ⇒ Queste VARIAZIONI oltre a non rispettare i **LIMITI CONTRATTUALI**, produrrebbero **EFFETTI DANNOSI** ed anche **PERICOLOSI** per le **UTENZE**.

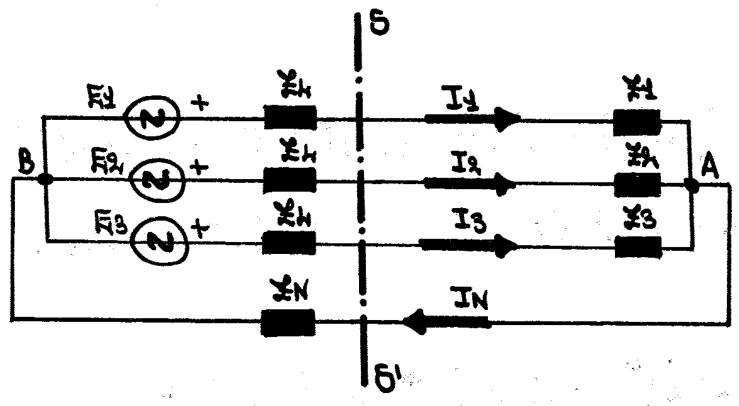
↓

Per ovviare a questi INCONVENIENTI si aggiunge un **QUARTO FILO**, detto **NEUTRO**, che congiunge i 2 CENTRI STELLA.

11



Se teniamo conto anche dell' **IMPEDENZA** dei **CONDUTTORI** di **LINEA**, che hanno il medesimo ORDINE di GRANDEZZA di quelle del NEUTRO ⟹ si ottiene un NUOVO SCHEMA:



La PARTE di CIRCUITO a SINISTRA della SEZIONE SS' si può assumere come GENERATORE EQUIVALENTE di **THÉVENIN** del **SISTEMA TRIFASE** a **MONTE**, il circuito stesso costituisce il MODELLO di un SISTEMA di DISTRIBUZIONE PUBBLICA **TRIFASE/ /MONOFASE**.

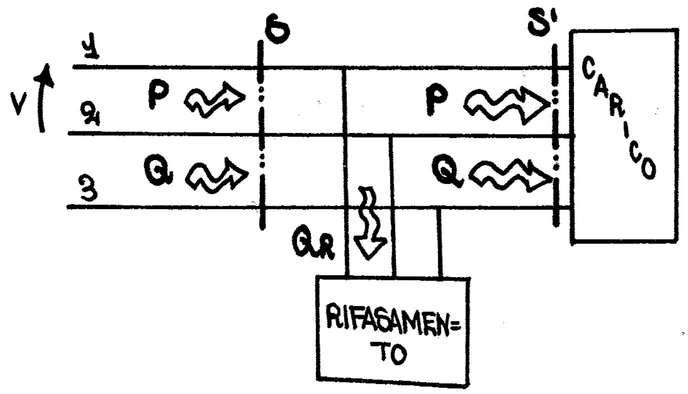
La PRESENZA delle IMPEDENZE di LINEA + quella di NEUTRO fa sì che la TERNA delle **TENSIONI CONCATENATE** sul **CARICO SQUILIBRATO** risulti **DISSIMMETRICA**.

Se Z_L, Z_N vengano MANTENUTE **SUFFICIENTEMENTE BASSE** ⟹ la **DISSIMMETRIA** risulta **TRASCURABILE** ⟹ $Z_1, Z_2, Z_3 \approx E_1, E_2, E_3$.

⟹ Il **SISTEMA TRIFASE** con **NEUTRO** è generalmente ADOTTATO per la DISTRIBUZIONE PUBBLICA dell' ENERGIA ELETTRICA alle **UTENZE MONOFASE** che per loro NATURA costituiscono dei **CARICHI SQUILIBRATI**. In **ITALIA** questa DISTRIBUZIONE viene effettuata a **230 V** di **TENSIONE STELLATA** e conseguentemente a $230 \cdot \sqrt{3} \cong 400V$ di **TENSIONE CONCATENATA**, che è la **TENSIONE NOMINALE** del **SISTEMA TRIFASE** di **DISTRIBUZIONE**

A.Z.

RIFASAMENTO CARICHI TRIFASE



Ipotizziamo di avere un **CARICO TRIFASE EQUILIBRATO OHMICO-INDUTTIVO** che viene ALIMENTATO da una **TERNA SIMMETRICA** di **TENSIONE CONCATENATA V.**
Il **CARICO**, ALIMENTATO a questa TENSIONE, ASSORBE una **POTENZA ATTIVA P** con **FATTORE** di **POTENZA** $\cos\varphi$.
La **POTENZA REATTIVA** ASSORBITA sarà

$$Q = P \cdot tg\varphi$$

La POTENZA REATTIVA effettivamente RICHIESTA alla RETE deve essere RIDOTTA al **VALORE DESIDERATO** $Q_d \leq 0{,}5 \cdot P$ (in **ITALIA** $tg\varphi_d = Q_d/P = 0{,}5 \Rightarrow \cos\varphi_d = 0{,}9$)

$\Rightarrow$ Bisogna FORNIRE al **CARICO** parte della **POTENZA REATTIVA Q** NECESSARIA mediante una **BATTERIA** di **CONDENSATORI** di **RIFASAMENTO** che contribuisce per la QUOTA Q_R (<0). Tale **BATTERIA** è COLLEGATA in **PARALLELO** al CARICO e non INFLUISCE sulla POTENZA ATTIVA ASSORBITA **P.**

BATTERIA di RIFASAMENTO

Nel caso più semplice è costituita da 3 **CONDENSATORI** collegati a ★ o a ▲ $\Rightarrow$ In generale può essere considerata come un **CARICO CAPACITIVO EQUILIBRATO** disposto a ★ o a ▲.