



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 1473A -

ANNO: 2015

# A P P U N T I

STUDENTE: Chezzi

MATERIA: Elettrotecnica e Macchine Elettriche + temi + eserc.  
Prof.Canova-Griva

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

# FORMULARIO MACCHINE ELETTRICHE

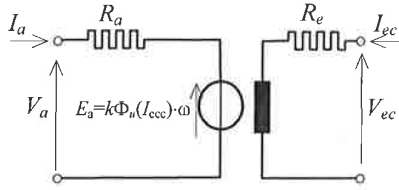
## Motore CC

$$P_N = C_N \cdot \omega_N \text{ (se motore)} \quad P_N = V_{aN} \cdot I_{aN} \text{ (se dinamo)}$$

### Motore CC

#### Eccitazione separata

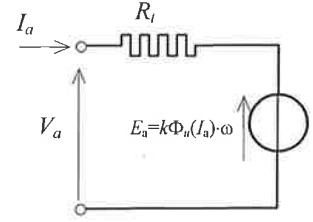
$$\begin{aligned} V_{ecc} &= R_{ecc} \cdot I_{ecc} \\ \Phi_u &= M \cdot I_{ecc} \\ E_a &= k \Phi_u \cdot \omega \\ V_a &= R_a \cdot I_a + E_a = R_a \cdot I_a + k \Phi_u \cdot \omega \\ C &= k \Phi_u \cdot I_a \end{aligned}$$



### Motore eccitazione serie

Caso lineare:

$$\begin{aligned} \Phi_u(I_a) &= M \cdot I_a \\ E_a &= k \cdot M \cdot I_a \cdot \omega \\ V_a &= R_f \cdot I_a + k \cdot M \cdot I_a \cdot \omega \\ C &= k \cdot M \cdot I_a^2 \\ R_t &= R_a + R_{ecc} \end{aligned}$$



Se la macchina non è lineare dal punto di vista magnetico si **DEVE** usare la tabella coppia-corrente

Se motore:  $\eta = \frac{P_u}{P_i}$   $P_i = P_{ja} + P_{je} + P_{fe} + P_{mecc} + P_u = \sum \text{Perdite} + P_u$   $P_u = C_u \cdot \omega$   $P_0 = P_{mecc} + P_{Fe} = C_0 \cdot \omega_0$

Se  $P_0 = 0 \rightarrow I_0 = 0, C_0 = 0$

Se  $P_0 > 0 \rightarrow P_0 = E_0 \cdot I_{a0} = k \Phi_u \cdot \omega_0 \cdot I_{a0}$   $C_0 = k \Phi_u \cdot I_{a0} = \frac{P_0}{\omega_0}$   $C_u = C_m - C_0 = k \Phi_u \cdot (I_a - I_{a0})$

Nel funzionamento da dinamo il flusso di potenza sull'armatura si inverte di segno (coppia e corrente di armatura cambiano di segno). Prestare attenzione al calcolo dei bilanci di potenza e dei rendimenti.

## Trasformatore trifase

$$S_N = \sqrt{3} \cdot V_{1N} \cdot I_{1N} = \sqrt{3} \cdot V_{20} \cdot I_{2N}$$

$$n = N_1 / N_2 \text{ (rapporto spire)}$$

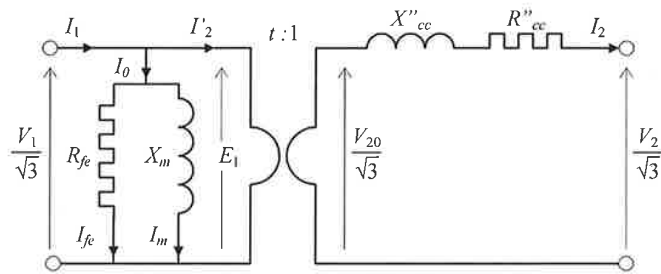
$$t = V_{1N} / V_{20} \text{ (rapporto di trasformazione)}$$

$$\Delta V_{industriale} = V_{20} - V_2 \approx \sqrt{3} \cdot I_2 (R_{cc}'' \cdot \cos(\varphi_2) + X_{cc}'' \cdot \sin(\varphi_2))$$

$$I_{2cc} = \frac{V_{20}}{\sqrt{3} \cdot Z_{cc}''} \text{ (corrente di guasto di cortocircuito al secondario)}$$

$$\eta = \frac{P_{erogata}}{P_{erogata} + \sum \text{Perdite}} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_2)}{\sqrt{3} \cdot V_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_2) + 3 \cdot R_{cc}'' \cdot I_2^2 + P_{Fe}}$$

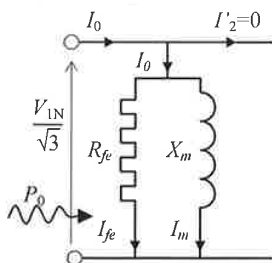
$$\eta_{convenzionale} = \frac{\alpha \cdot S_N \cdot \cos(\varphi_2)}{\alpha \cdot S_N \cdot \cos(\varphi_2) + \alpha^2 \cdot P_{cc} + P_0} \quad (\alpha = I_2 / I_{2N})$$



Condizioni di parallelo perfetto  $\rightarrow V_{1NA} = V_{1NB}, t_A = t_B, \text{ Gruppo}_A = \text{Gruppo}_B, v_{cc\%A} = v_{cc\%B}, \varphi_{ccA} = \varphi_{ccB}$

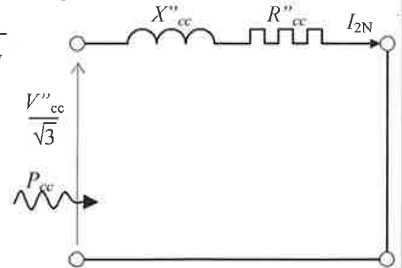
### Prova a vuoto (parametri riferiti al primario)

$$\begin{aligned} R_{Fe} &= \frac{V_{1N}^2}{P_0} \\ X_m &= \frac{V_{1N}^2}{Q_0} \\ I_0\% &= \frac{I_0 \text{ lato prova}}{I_N \text{ lato prova}} \cdot 100 \\ P_0\% &= \frac{P_0}{S_N} \cdot 100 \end{aligned}$$



### Prova in cortocircuito (parametri riferiti al secondario)

$$\begin{aligned} V_{2cc} &= \sqrt{3} \cdot Z_{cc}'' \cdot I_{2N} \quad R_{cc}'' = \frac{P_{cc}}{3 \cdot I_{2N}^2} \\ X_{cc}'' &= R_{cc}'' \cdot \text{tg}(\varphi_{cc}) = \frac{Q_{cc}}{3 \cdot I_{2N}^2} \\ v_{cc\%} &= \frac{V_{cc} \text{ lato prova}}{V_N \text{ lato prova}} \cdot 100 \\ P_{cc}\% &= \frac{P_{cc}}{S_N} \cdot 100 \end{aligned}$$



## Motore asincrono (PN = CN · ωN)

$$P_s = 3 \cdot V_s \text{ fase} \cdot I_s \cdot \cos(\varphi_s) = \sqrt{3} \cdot V_s \cdot I_s \cdot \cos(\varphi_s)$$

$$P_{js} = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2 \quad P_{Fe} = 3 \cdot \frac{E_s^2 \text{ fase}}{R_{Fe}}$$

$$P_t = P_s - P_{js} - P_{Fe}$$

$$P_t = 3 \cdot \frac{R_r'}{s} \cdot I_r'^2 \quad P_{jr} = 3 \cdot R_r' \cdot I_r'^2$$

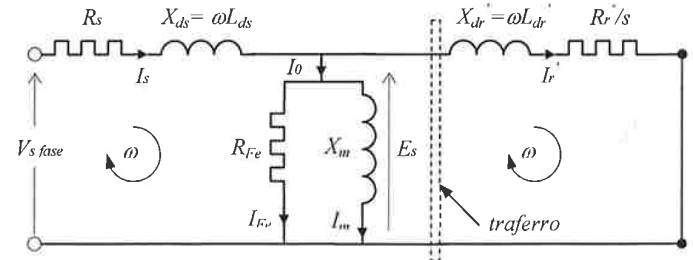
$$P_{convertita} = P_t - P_{jr} = 3 \cdot \frac{1-s}{s} \cdot R_r' \cdot I_r'^2$$

$$P_{convertita} = (1-s) \cdot P_t = P_{utile} + \text{Perdite}_{meccaniche}$$

$$P_{jr} = s \cdot P_t$$

$$\text{Perdite}_{meccaniche} = C_0 \cdot \omega_s$$

Fissato lo scorrimento ed i parametri, i valori di coppia sono proporzionali al quadrato della tensione.



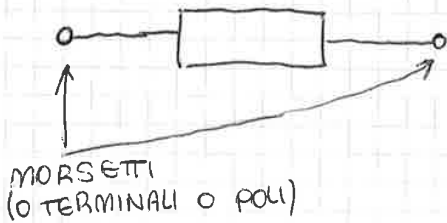
$$C_m = 3 \cdot \frac{p}{\omega} \cdot \frac{R_r'}{s} \cdot V_{eq}^2 \sqrt{\left[ \left( R_{eq} + \frac{R_r'}{s} \right)^2 + \left( X_{eq} + X_{dr}' \right)^2 \right]}$$

NB: Equazione valida solo per il circuito indicato, facendo Thevenin del circuito a monte della sezione di traferro.

**ATTENZIONE:** Se non diversamente specificato nel testo dell'esercizio, nell'elaborazione della prova a rotore bloccato si possono trascurare i parametri trasversali ( $R_{fe}$  ed  $X_m$ ), mentre nell'elaborazione della prova a vuoto **NON** si possono trascurare i parametri di statore ( $R_s$  e  $X_{ds}$ ) e le perdite meccaniche dal bilancio di potenza a vuoto.

MODELLO TERMICO SEMPLIFICATO:  $\Delta \theta_{regime} = R_{termica} \cdot P_{dissipata}$

$$\Delta \theta(t) = \Delta \theta_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + P_d \cdot R_{th} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$



BI-POLI      2 POLI  
 TRI-POLI    3 POLI (SISTEMI TRIFASE)

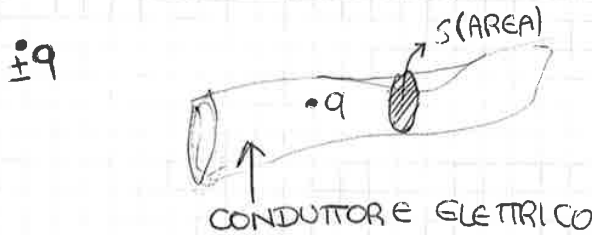
LEGGI DI MAXWELL: DESCRIVONO IL FUNZIONAMENTO DEI SISTEMI ELETTRICI

LEGGI DI KIRCHOFF: SOTTO INSIEME DELLE LEGGI DI MAXWELL, BASATE SU PRECISE CORRELAZIONI TRA LE VARIE GRANDEZZE FISICHE

$$\lambda = \frac{u}{f}$$

$u \rightarrow$  VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE (=  $v_{UCE}$ )  
 $f \rightarrow$  FREQUENZA

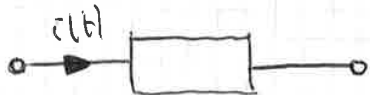
GRANDEZZE ELETTRICHE DI BASE: TENSIONE E CORRENTE



$$\frac{dq}{dt} = i(t) = \text{CORRENTE ELETTRICA [A]}$$

$$\frac{i(t)}{AREA} = j(t) = \text{DENSITÀ DI CORRENTE [A/m²]}$$

CONVENZIONALMENTE, LE CARICHE CHE SI MUOVONO SONO QUELLE POSITIVE.



IL VERSO DELLA CORRENTE È IMPORTANTE!

AMPEROMETRO



TENSIONE ELETTRICA



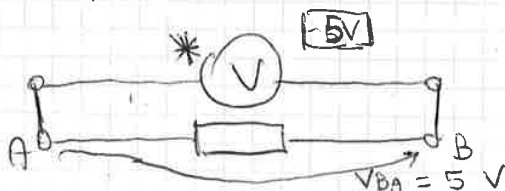
$$\vec{F} = \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad (\text{FORZA DI COULOMB})$$

$$V_A = \frac{L}{q} = \int_{\infty}^A \vec{F} \cdot d\vec{l} = \text{POTENZIALE ELETTRICO DEL PUNTO A [V]}$$

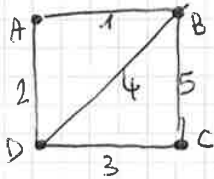
$$V_{AB} = V_A - V_B = \text{DIFFERENZA DI POTENZIALE o TENSIONE ELETTRICA [V]}$$



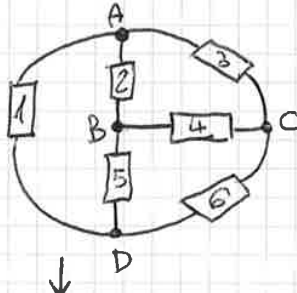
VOLTMETRO



- NODO: PUNTO DI CONNESSIONE DI LATI
- LATO: PARTE DI CIRCUITO COMPRESA FRA DUE NODI
- GRAFO: RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DI UN CIRCUITO CHE RESTITUISCE SOLO I NODI E I LATI DI UN CIRCUITO



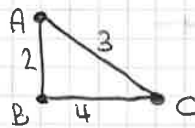
- MAGLIA: INSIEME DI LATI CHE SODDISFA 2 REQUISITI:
  - TUTTI I LATI DELLA MAGLIA SONO CONNESSI
  - A TUTTI I NODI DELLA MAGLIA SONO CONNESSI 2 E SOLO 2 LATI



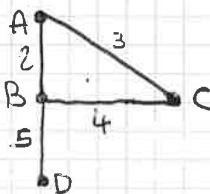
$L = 6$

$N = 4$

2, 3, 4 È UNA MAGLIA? SÌ!



2, 3, 4, 5 È UNA MAGLIA?

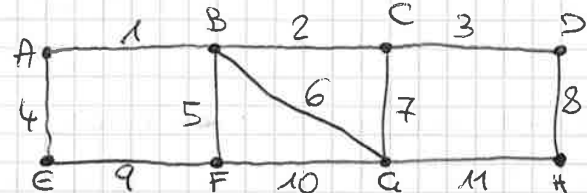
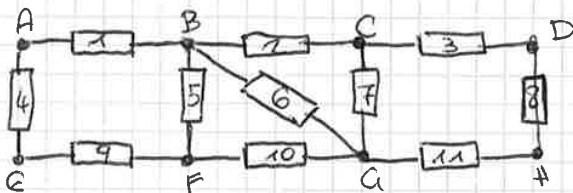


NO, PERCHÈ AL NODO D NON SONO CONNESSI 2 LATI. INOLTRE, AL NODO B CONVERGONO 3 LATI.

MAGLIE SONO:

- 2, 3, 4
- 4, 5, 6
- 1, 2, 5
- 1, 2, 4, 6
- 1, 3, 4, 5
- 1, 3, 6
- 2, 3, 6, 5

- INSIEME DI TAGLIO (IT): È UN INSIEME DI LATI CHE SODDISFA 2 REQUISITI:
  - RIMUOVENDO TUTTI I LATI DELL' IT SI OTTENGONO 2 GRAFI SEPARATI (NON CONNESSI)
  - RIMUOVENDO TUTTI I LATI DELL' IT TRANNE UNO QUALSIASI SI OTTIENE UN SOLO GRAFO



2, 6, 10 È UN IT? ~~NO, PERCHÈ LA SECONDA~~ SÌ!

2, 6, 10, 7 È UN IT? NO, PERCHÈ RIMUOVENDO <sup>TUTTI I LATI TRANNE</sup> IL LATO 7 NON SI OTTIENE UN SOLO GRAFO

6, 7, 10, 11 È UN IT? ~~SÌ~~, PERCHÈ LA PRIMA CONDIZIONE ~~NON È~~ VERIFICATA IN QUANTO IL NODO G È COMUNQUE UN GRAFO

PER INDIVIDUARE UN INSIEME DI TAGLIO SI CONSIDERA UNA SUPERFICIE CHIUSA CHE INGLOBA UNA PARTE DEL CIRCUITO. I LATI CHE INTERSECANO LA SUPERFICIE FORMANO UN INSIEME DI TAGLIO. SECONDO QUESTA REGOLA, ~~OGNI~~ SE LA SUPERFICIE È CHIUSA INTORNO AD UN NODO INDIVIDUO GLI IT ASSOCIATI A QUEL NODO.

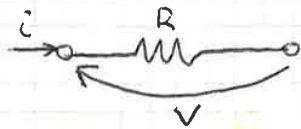
- |               |                 |
|---------------|-----------------|
| A) 1, 4       | E) 4, 9         |
| B) 1, 5, 6, 2 | F) 9, 5, 10     |
| C) 2, 7, 3    | G) 10, 6, 7, 11 |
| D) 3, 8       | H) 11, 8        |

EQUAZIONI COSTITUTIVE → LEGANO LE GRANDEZZE ELETTRICHE (TENSIONE E CORRENTE) IN UN DIPOLO

• RESISTORE IDEALE

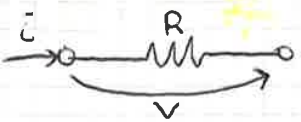


R: RESISTENZA [ $\Omega$ ]  $\geq 0$



CONVENZIONE DEGLI UTILIZZATORI

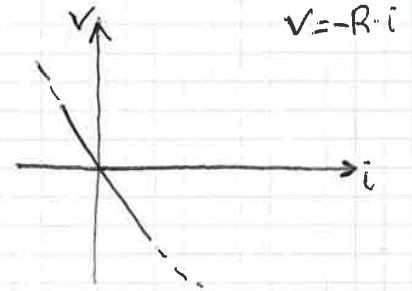
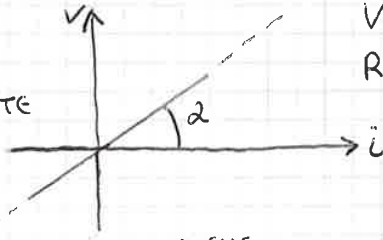
$V = +R \cdot i$        $i = G \cdot V$



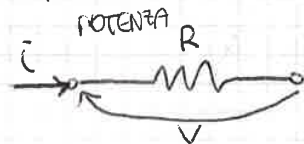
CONVENZIONE DEI GENERATORI

$V = -R \cdot i$        $i = -G \cdot V$

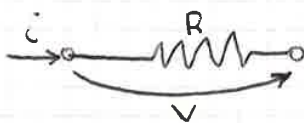
CARATTERISTICA ESTERNA:  
RAPPRESENTAZIONE GRAFICA  
NEL PIANO TENSIONE-CORRENTE  
DELL'EQUAZIONE  
COSTITUTIVA



$\frac{1}{R} = G$  (CONDUTANZA) [ $S$ ] <sup>SIEMENS</sup>



$P_{ASS} = V \cdot i = R \cdot i^2$   $\begin{cases} R \geq 0 \\ i^2 \geq 0 \end{cases} \Rightarrow P_{ASS} \geq 0$



$P_{ERQ} = V \cdot i = -R \cdot i^2 \leq 0$

• GENERATORE DI TENSIONE IDEALE

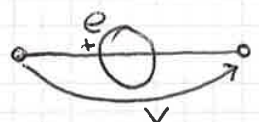
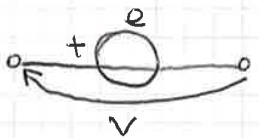
NEI GENERATORI DI TENSIONE REALI LA TENSIONE NON RIMANE COSTANTE MA DIMINUISCE ALL'AUMENTARE DELLA CORRENTE

e: FORZA ELETTRICITRICE [ $V$ ]  $\geq 0$



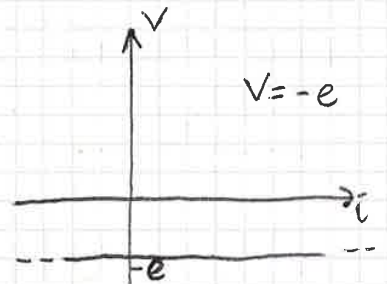
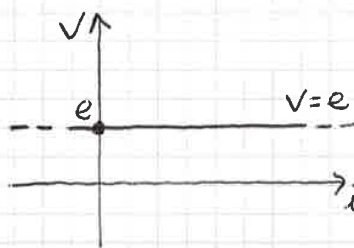
$V = +e$      $V_i$

MORS BIPOLO CHE IMPONE LA SUA TENSIONE AI MORSETTI INDIPENDENTEMENTE DA TUTTO

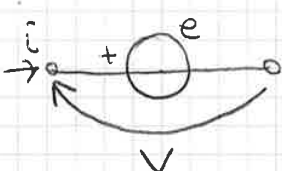


$V = -e$      $V_i$

CARATTERISTICA ESTERNA:



POTENZA



$V = e$

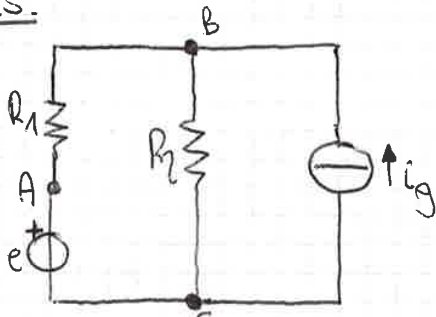
CONVENZIONE DEGLI UTILIZZATORI

$P_{ASS} = V \cdot i = e \cdot i$   
 $\geq 0$  DEVE RISOLVERE (IDEM PER LA CONVENZIONE DEI GENERATORI)



L: LATI ⇒ INCOGNITE 2L ⇒ 2·L EQUAZIONI  $\left\{ \begin{array}{l} L \text{ EQUAZIONI COSTITUTIVE} \\ L \left\{ \begin{array}{l} LKT (L-N+1) \\ LKC (N-1) \end{array} \right. \end{array} \right.$

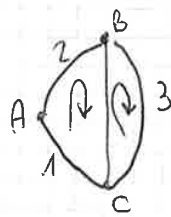
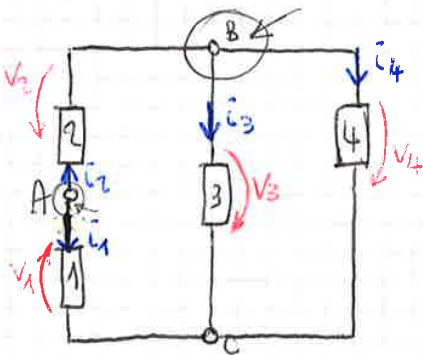
Es.



N = 3  
L = 4  
SONO DATI e, R1, R2, ig

NUMERO MAGLIE INTERNE DEL CIRCUITO

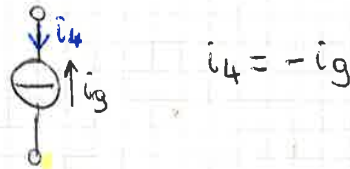
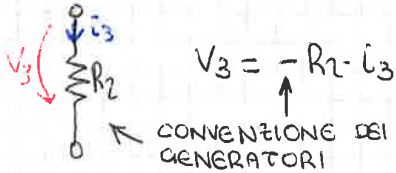
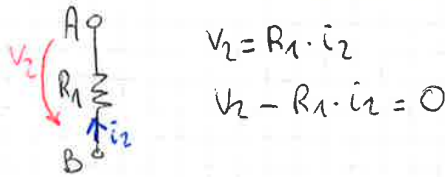
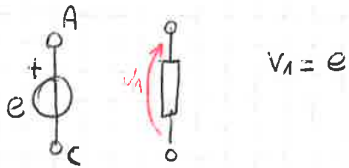
LKT: L - N + 1 = 4 - 3 + 1 = 2 EQUAZIONI



$$\begin{cases} v_1 - v_2 + v_3 = 0 \\ e - R_1 \cdot i_2 - R_2 \cdot i_3 = 0 \\ -v_3 + v_4 = 0 \\ R_2 \cdot i_3 + v_4 = 0 \end{cases}$$

LKC: N - 1 = 3 - 1 = 2 EQUAZIONI

NODO A)  $-i_1 - i_2 = 0$   
 NODO B)  $i_2 - i_3 - i_4 = 0$   $i_2 - i_3 + i_4 = 0$

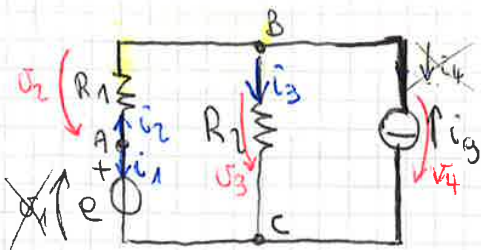


$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -R_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ e \\ 0 \\ 0 \\ i_4 \end{bmatrix}$$

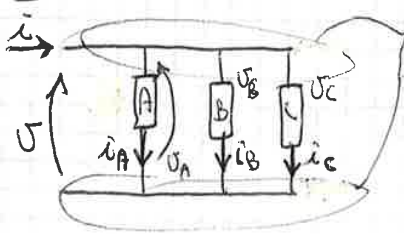
INCOGNITE:  $i_1, i_2, i_3, v_4$

MANCA  $v_1$  PERCHÉ IL GENERATORE DI TENSIONE IMPONE LA SUA TENSIONE.

MANCA  $i_4$  PERCHÉ IL GENERATORE DI CORRENTE IMPONE LA SUA CORRENTE.



## PARALLELO



NODI EQUIVALENTI

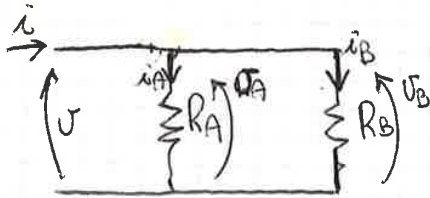
$$U = U_A = U_B = U_C$$

$$i = i_A + i_B + i_C$$

$$i = \sum_{k=1}^N \pm i_k$$

DUE O PIU' COMPONENTI SONO CONNESSI IN PARALLELO QUANDO HANNO TUTTI E DUE I NODI IN COMUNE. QUESTO IMPLICA CHE LA TENSIONE A CUI E' SOTTOPOSTO UN COMPONENTE E' UGUALE A QUELLA A CUI SONO SOTTOPOSTI GLI ALTRI COMPONENTI IN PARALLELO.

### RESISTENZE IN PARALLELO



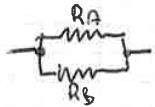
$$U = U_A = U_B$$

$$i = i_A + i_B = \frac{U}{R_A} + \frac{U}{R_B} = U \left( \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} \right)$$

$$U = \left( \frac{1}{\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B}} \right) \cdot i \rightarrow R_{eq}$$

$$i_A = \frac{U}{R_A} = i \frac{R_{eq}}{R_A} = i \cdot \frac{1}{R_A} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B}} = \frac{1}{R_A} \cdot \frac{1}{\frac{R_A + R_B}{R_A R_B}} \cdot i = \frac{1}{R_A} \cdot \frac{R_A R_B}{R_A + R_B} \cdot i$$

$$R_{eq} = \frac{1}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{R_k}}$$



$$R_{eq} = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B}$$

$$R_{eq} < R_1, R_2, \dots, R_N$$

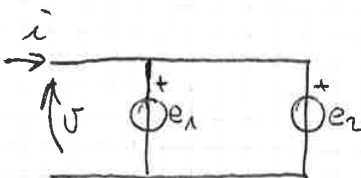
PARTITORE DI CORRENTE

$$i_k = \frac{1}{R_k} \cdot \frac{1}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{R_k}} \cdot i$$

SE HO 3 O PIU' RESISTENZE MI RICONDUCA A QUESTO CASO

CONOSCENDO LA TENSIONE COMPLESSIVA E IL VALORE DI OGNI SINGOLA RESISTENZA, SI PUO' CALCOLARE LA CORRENTE CHE FLUISCE IN UN RESISTORE QUALSIASI

### GENERATORI DI TENSIONE IN PARALLELO



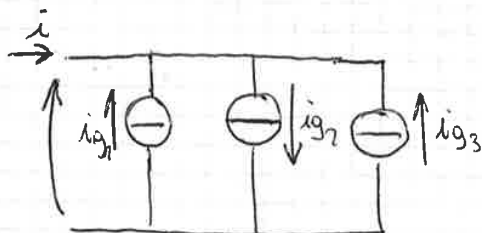
$$e_1 - e_2 = 0 \Rightarrow e_1 = e_2$$

UNICO CASO IN CUI DUE GENERATORI DI TENSIONE POSSONO ESSERE MESSI IN PARALLELO

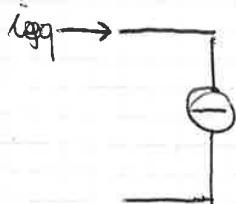
$e_1 \neq e_2$  NO!

UN UNICO PUNTO NON PUO' ASSUMERE DUE DIVERSI POTENZIALI

### GENERATORI DI CORRENTE IN PARALLELO



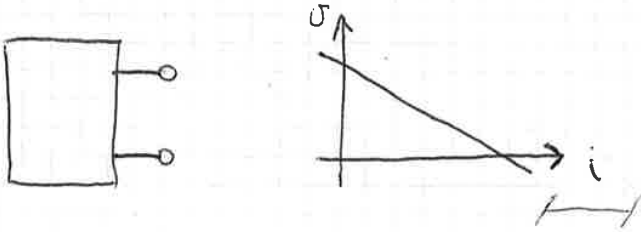
$$i = -i_{g1} + i_{g2} - i_{g3}$$



$$i_{eq} = i_{g1} - i_{g2} + i_{g3}$$

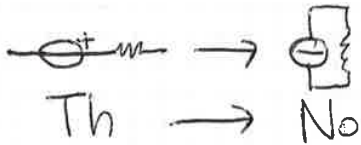
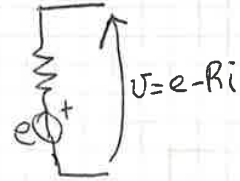
$$i_{eq} = \sum_{k=1}^N \pm i_{gk}$$





NON SI PUÒ DIRE SE È UN GENERATORE DI TENSIONE O DI CORRENTE

$$U = e - Ri \rightarrow \frac{U}{R} = \frac{e}{R} - i \rightarrow i = i_g - \frac{U}{R}$$

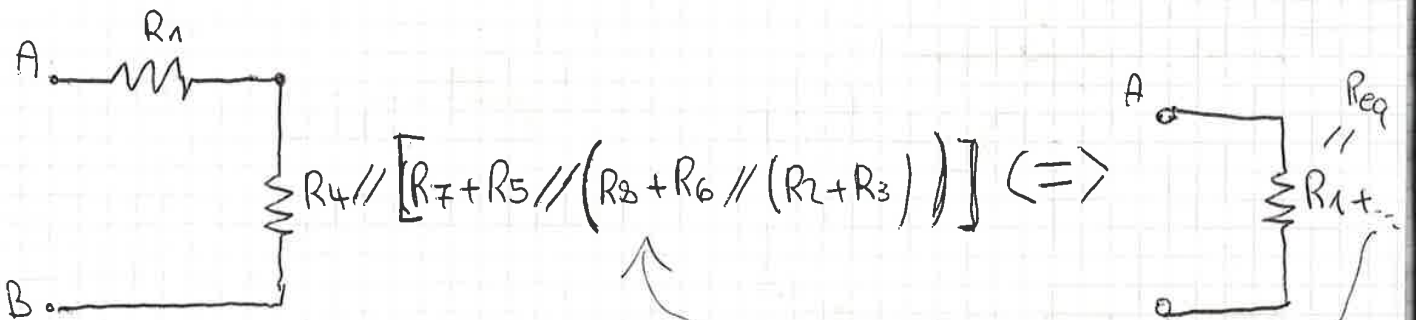
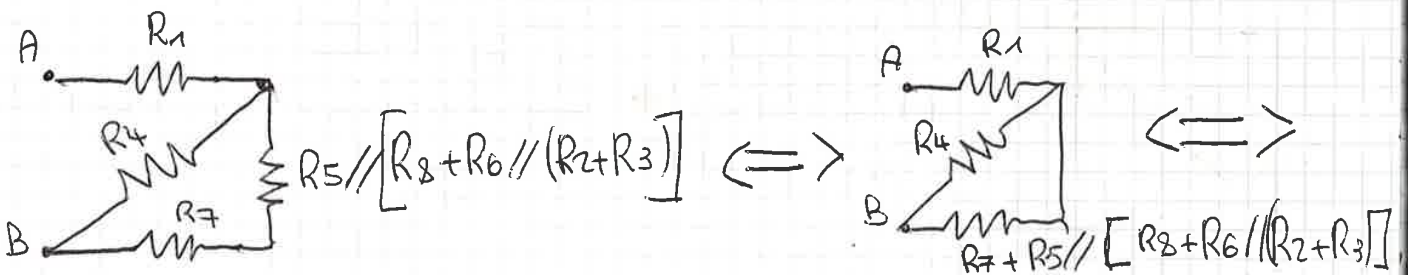
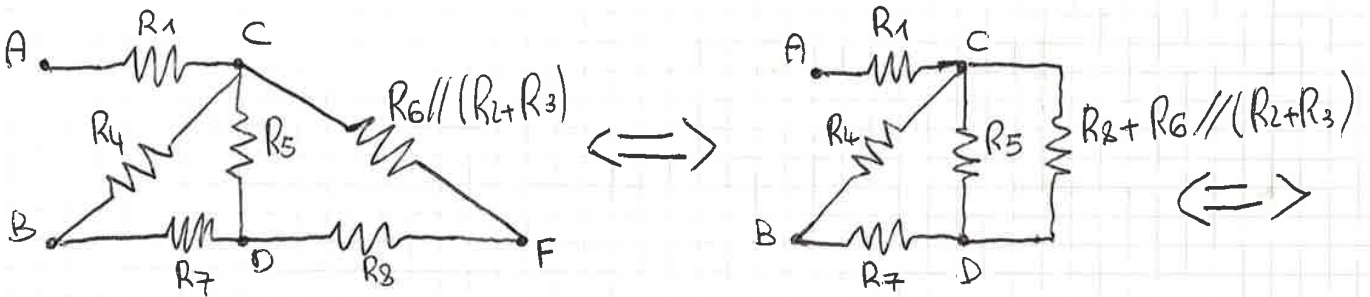
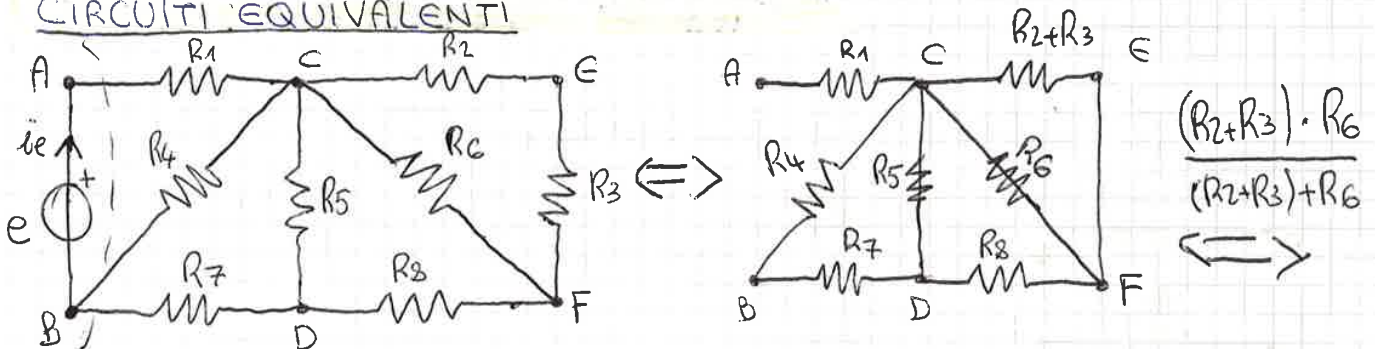


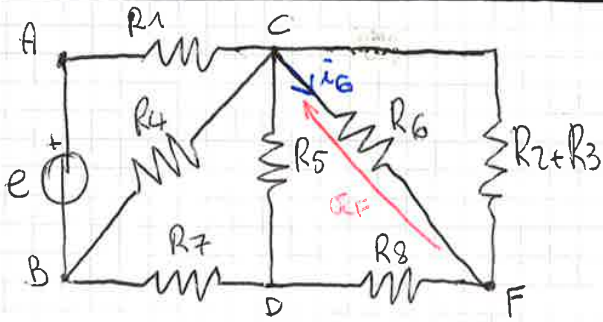
No → Th

$$i_g = \frac{e}{R}$$

$$e = i_g \cdot R$$

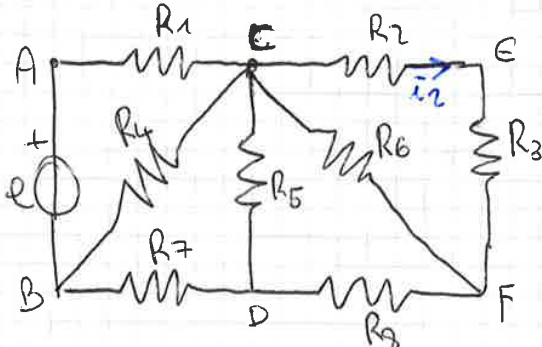
CIRCUITI EQUIVALENTI





$$i_G = \frac{U_{CF}}{R_6}$$

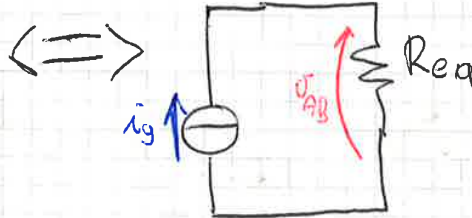
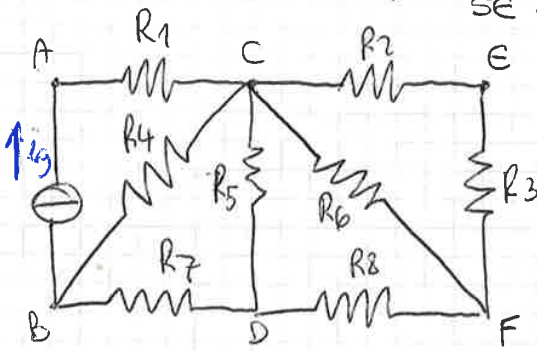
$$i_2 = \frac{U_{CF}}{R_2 + R_3}$$



$$i_2 = i_3$$

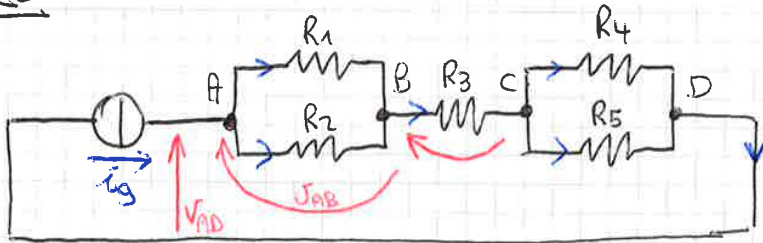
← CIRCUITO DI PARTENZA

SE SOSTITUISCO IL GENERATORE DI TENSIONE CON UNO DI CORRENTE:



$$U_{AB} = R_{eq} \cdot i_G$$

Es.



$$R_{eq} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5}$$

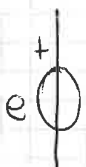
$$U_{CD} = R_{eq} \cdot i_G$$



$$U_{AB} = R_{eq} \cdot i_G$$

$$P_{CR0} = U_{AD} \cdot i_G$$

PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE DEGLI EFFETTI



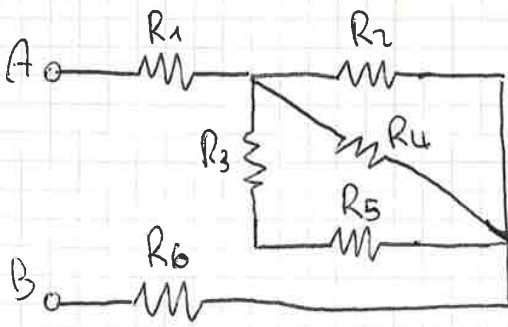
SPEGNERE UN GENERATORE DI TENSIONE EQUIVALE AD UN CORTOCIRCUITO  
 $U = 0$



SPEGNERE UN GENERATORE DI CORRENTE EQUIVALE AD UN CIRCUITO APERTO  
 $i = 0$

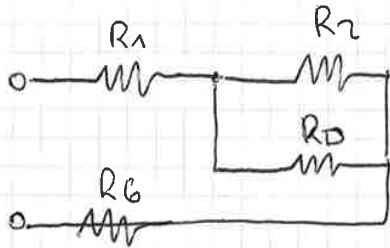
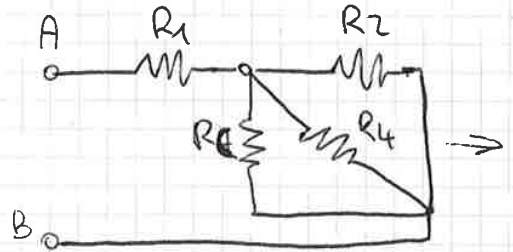
SI CONSIDERA UN GENERATORE ALLA VOLTA E SI STUDIOGLI EFFETTI SUL CIRCUITO. POI SI SOMMANO TUTTI GLI EFFETTI.

ES. 1

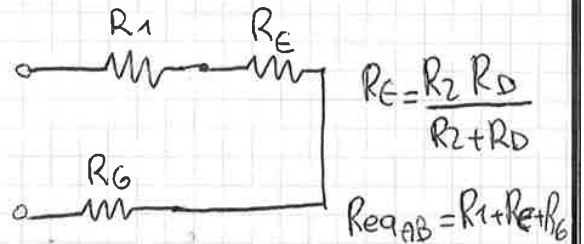


$R_{AB} = ?$

$R_E = R_3 + R_5$



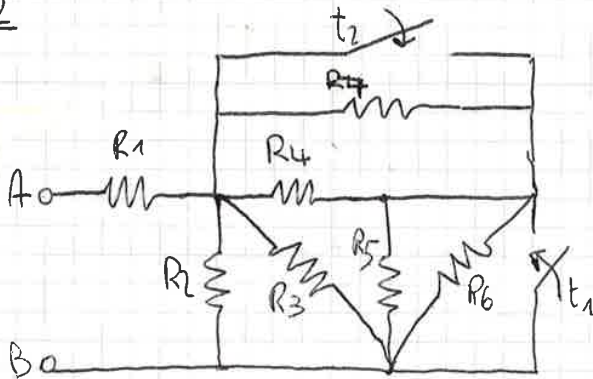
$R_D = \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4}$



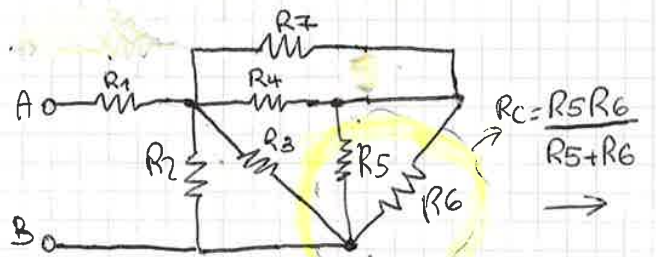
$R_E = \frac{R_2 R_D}{R_2 + R_D}$

$R_{eqAB} = R_1 + R_E + R_6$

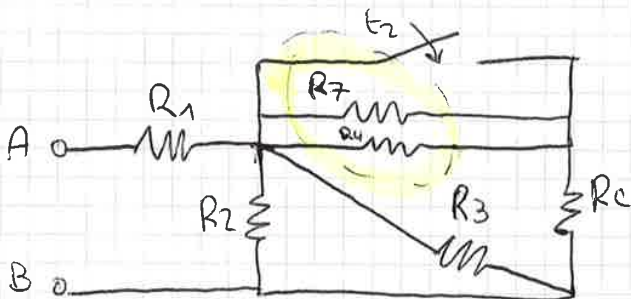
ES. 2



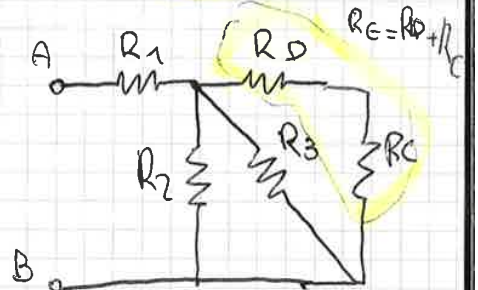
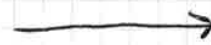
CASO 1:  $t_1$  APERTO,  $t_2$  ~~CHIUSO~~ APERTO



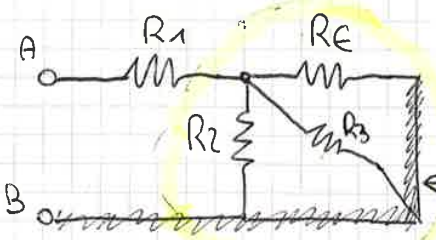
$R_C = \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6}$



$R_D = \frac{R_4 \cdot R_7}{R_4 + R_7}$

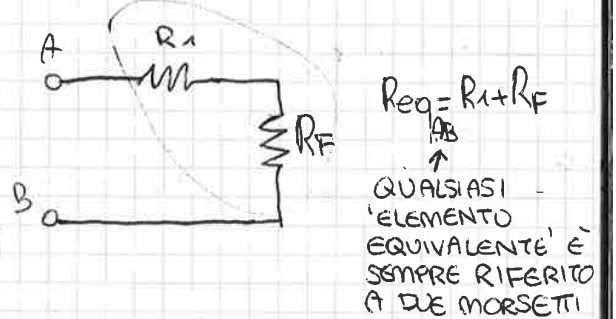
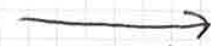


$R_E = R_D + R_C$



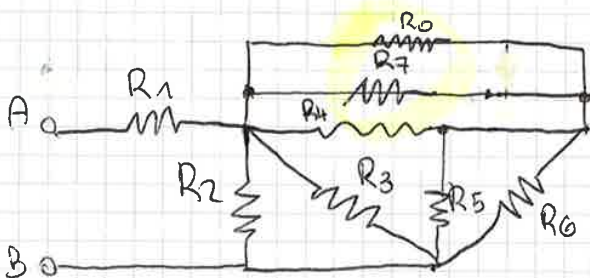
$R_F = R_E // (R_3 // R_2)$

AREA DI POTENZIALE (IN REALTA' E' LO STESSO NODO PER TUTTE E 3 LE RESISTENZE)

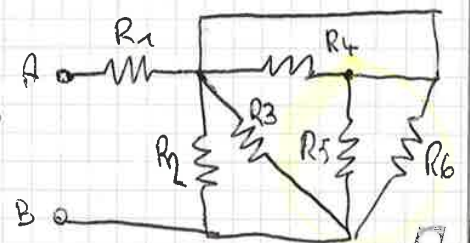


$R_{eqAB} = R_1 + R_F$   
 ↑  
 QUALSIASI 'ELEMENTO EQUIVALENTE' E' SEMPRE RIFERITO A DE MORSETTI

CASO 2:  $t_1 = OFF, t_2 ON$

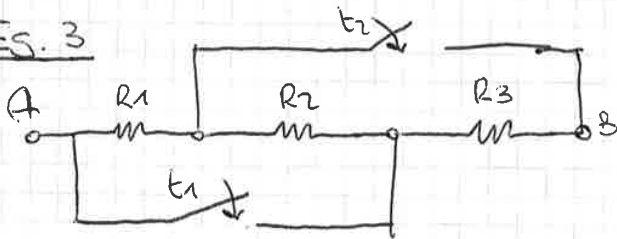


$R_{eq} = \frac{R_0 R_7}{R_0 + R_7} = 0 \Omega$

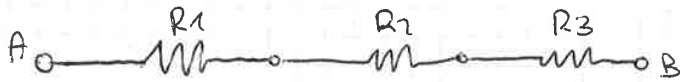




Es. 3

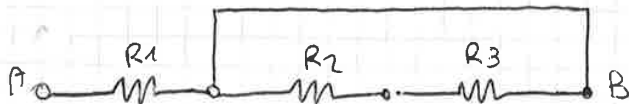


CASO A:  $t_1 = t_2 = \text{OFF}$



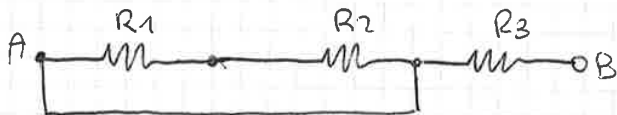
$$R_{eqAB} = R_1 + R_2 + R_3$$

CASO B:  $t_1 = \text{OFF}, t_2 = \text{ON}$



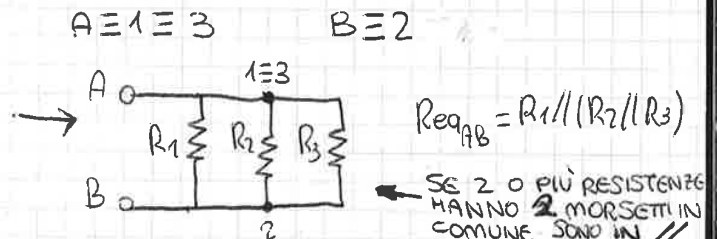
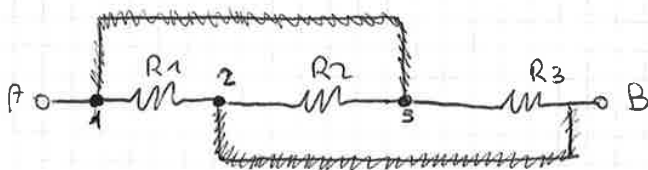
$$R_{eqAB} = R_1$$

CASO C:  $t_1 = \text{ON}, t_2 = \text{OFF}$



$$R_{eqAB} = R_3$$

CASO D:  $t_1 = t_2 = \text{ON}$



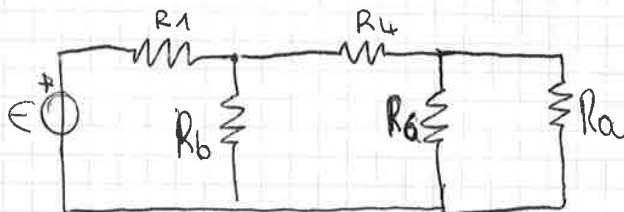
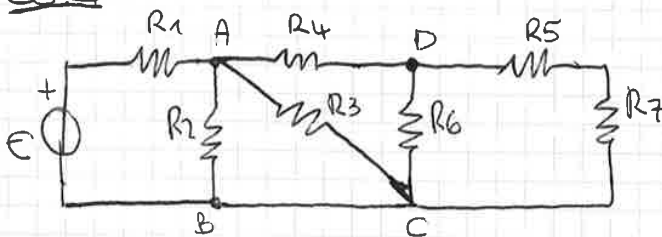
$$R_{eqAB} = R_1 // (R_2 // R_3)$$

SE 2 O PIU' RESISTENZE HANNO 2 MORSETTI IN COMUNE SONO IN //

TENSIONI

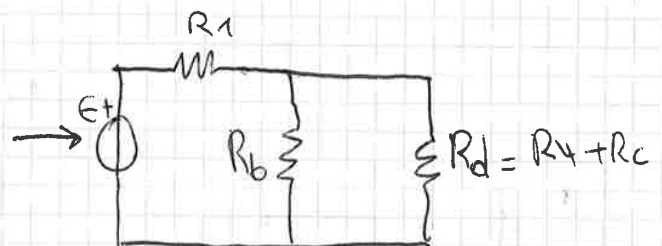
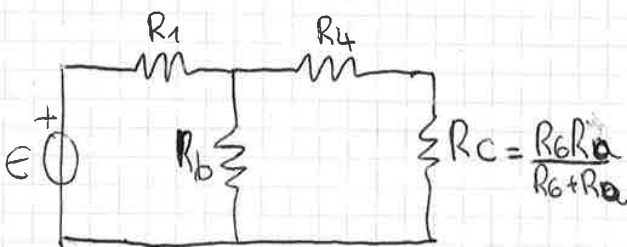
CALCOLARE TUTTE LE CORRENTI E LE TENSIONI  
 ATTRAVERSO IL PARTITORE DI CORRENTE E DI TENSIONE

Es. 5

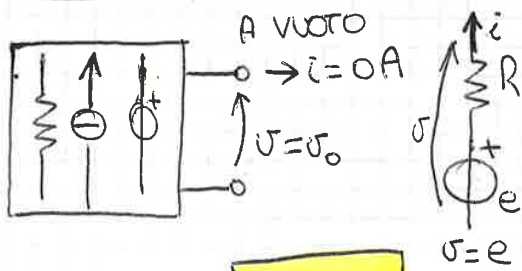


$$R_a = R_5 + R_7$$

$$R_b = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

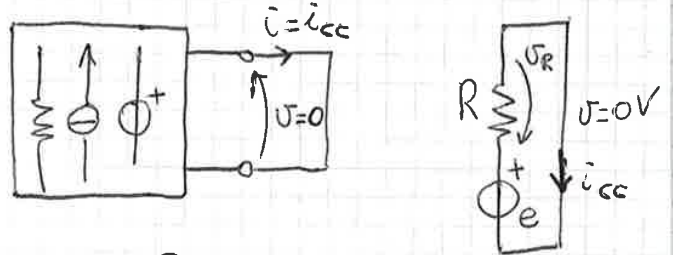


## EQUIVALENTE DI THEVENIN



$U = U_0 = e$

## IN CORTO CIRCUITO

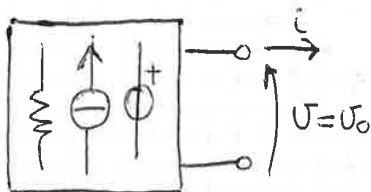


$e - U_R = 0$   
 $e - R \cdot i_{cc} = 0$

$R = \frac{e}{i_{cc}} = \frac{U_0}{i_{cc}}$

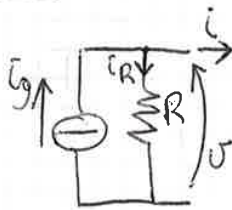
## EQUIVALENTE DI NORTON

### A VUOTO



$U = U_0$   
 $i = 0$

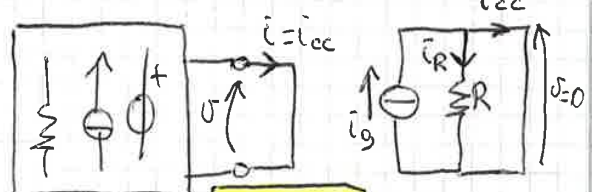
1. SI DISATTIVANO I GENERATORI
2. SI CALCOLA LA RESISTENZA TRA I TERMINALI DI USCITA



$i_g = i_R$   
 $U = R \cdot i_g$

$R = \frac{U}{i_g} = \frac{U_0}{i_{cc}}$

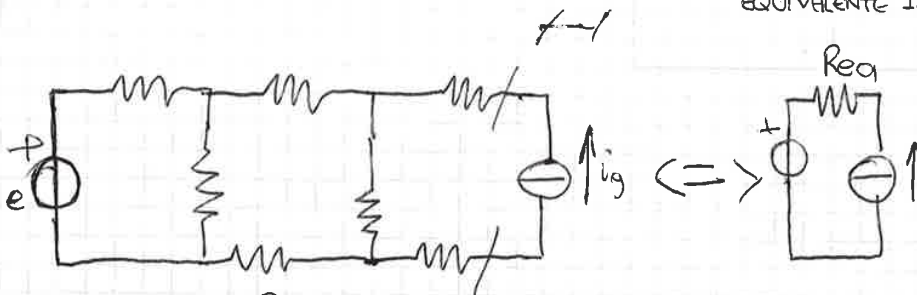
### IN CORTOCIRCUITO



1. SI CC I TERMINALI IN USCITA
2. SI CALCOLA LA CORRENTE I CHE ATTRAVERSA IL CC. QUESTA SARÀ LA CORRENTE EQUIVALENTE  $i_{cc}$

$i_R = 0$  PERCHÉ LA DIFFERENZA DI POTENZIALE AI CAPI DI R È NULLA

$i_g = i_{cc}$



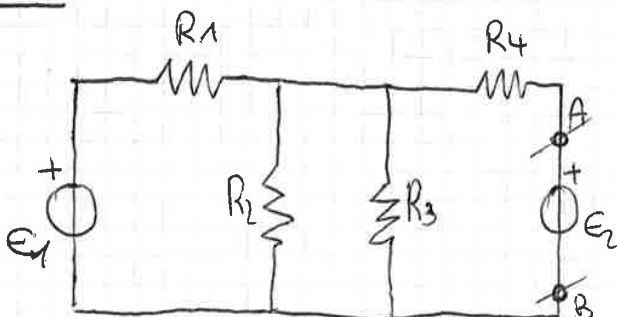
CALCOLO DI  $R_{eq}$ :

- INDIVIDUARE I MORSETTI (PORZIONE DI RETE DA SEMPLIFICARE)
- DISATTIVARE I GENERATORI

SE  $R = 0 \Rightarrow$  THEVENIN

SE  $R \rightarrow \infty \Rightarrow$  NORTON

Es.



SE  $R \neq 0$  E  $R \neq \infty$  L'EQUIVALENTE DI THEVENIN E QUELLO DI NORTON SONO INTERCAMBIABILI.



LKC NODO A:  $i_1 + i_2 + i_3 + i_{g1} - i_{g2} = 0$

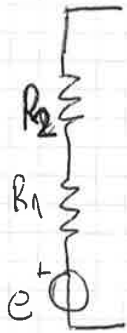
$$\frac{e_1}{R_1} - \frac{V_{AB}}{R_1} - \frac{e_2}{R_2} - \frac{V_{AB}}{R_2} - \frac{V_{AB}}{R_3} + i_{g1} - i_{g2} = 0$$

$$\frac{e_1}{R_1} - \frac{e_2}{R_2} + i_{g1} - i_{g2} = V_{AB} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

$$V_{AB} = \frac{\frac{e_1}{R_1} - \frac{e_2}{R_2} + i_{g1} - i_{g2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

← SOMMA CONTRIBUTI GENERATORI / SOMMA CONDUTTANZE

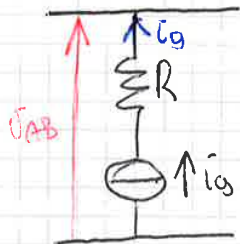
GENERATORI COL + SE IL + È RIVOLTO VERSO IL POTENZIALE SUPERIORE E COL - SE IL + È RIVOLTO VERSO IL POTENZIALE INFERIORE.



$$V_{AB} = \frac{e}{\frac{1}{R_1 + R_2} + \dots}$$

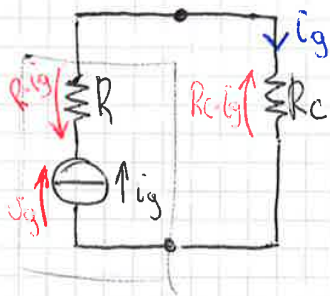


$$V_{AB} = \frac{e_1 + e_2}{\frac{1}{R_1} + \dots}$$



IL GENERATORE DI CORRENTE IMPONE LA SUA CORRENTE NEL LATO, QUINDI LA R NON COMPARIRÀ NELLA FORMULA DI MILLMAN.

ES.



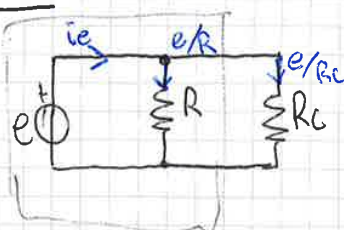
$$V_g - R \cdot i_g - R_c i_g = 0$$

$$V_g = i_g (R + R_c)$$

$$P_{Rc} = R_c \cdot i_g^2 \leftarrow \text{NON DIFENDE DA R!}$$

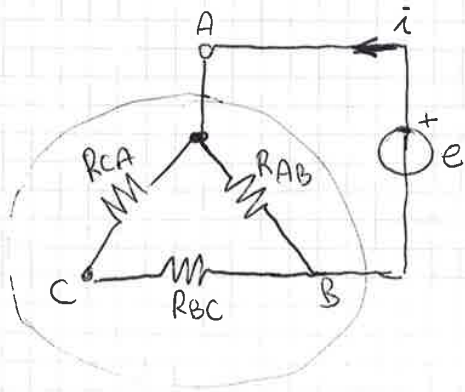
$$P_{ig} = i_g \cdot V_g = i_g^2 (R + R_c) = i_g^2 \cdot R + i_g^2 \cdot R_c \leftarrow \text{DIFENDE DA R!}$$

ES.



$$P_{Rc} = R_c \left( \frac{e}{R_c} \right)^2$$

$$i_e = \frac{e}{R} + \frac{e}{R_c}$$



$$A-B: i = \frac{e}{R_{AB} // (R_{CA} + R_{BC})}$$

$$B-C: i = \frac{e}{R_{BC} // (R_{CA} + R_{AB})}$$

$$C-A: i = \frac{e}{R_{CA} // (R_{AB} + R_{BC})}$$

$$R_A + R_B = \frac{R_{AB} (R_{CA} + R_{BC})}{R_{AB} + R_{CA} + R_{BC}}$$

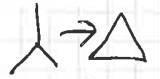
$$R_B + R_C = \frac{R_{BC} (R_{CA} + R_{AB})}{R_{BC} + R_{CA} + R_{AB}}$$

$$R_A + R_C = \frac{R_{CA} (R_{AB} + R_{BC})}{R_{CA} + R_{AB} + R_{BC}}$$

$$\begin{cases} R_A = \frac{R_{AB} \cdot R_{CA}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}} \\ R_B = \frac{R_{AB} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}} \\ R_C = \frac{R_{CA} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}} \end{cases}$$

$\Delta \rightarrow \star$   
 ↓ PRODOTTO DELLE RESISTENZE CHE CONVERGONO AL NODO DIVISO LA SOMMA DELLE RESISTENZE

$$\begin{cases} R_{AB} = \frac{R_A \cdot R_B + R_B \cdot R_C + R_C \cdot R_A}{R_C} \\ R_{BC} = \frac{R_A \cdot R_B + R_B \cdot R_C + R_C \cdot R_A}{R_A} \\ R_{CA} = \frac{R_A \cdot R_B + R_B \cdot R_C + R_C \cdot R_A}{R_B} \end{cases}$$



SE  $R_{AB} = R_{BC} = R_{CA} = R_{\Delta} \Rightarrow R_A = \frac{R_{\Delta}}{3}$

$$R_A = \frac{R_{\Delta}}{3} = R_{\lambda}$$

$$R_B = \frac{R_{\Delta}}{3}$$

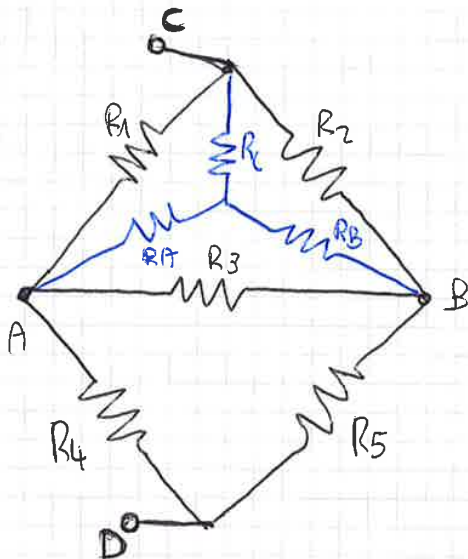
$$R_B = \frac{R_{\Delta}}{3} = R_{\lambda}$$

$$R_C = \frac{R_{\Delta}}{3}$$

$$R_C = \frac{R_{\Delta}}{3} = R_{\lambda}$$

$$R_{\Delta} = 3R_{\lambda}$$

SOMMA DEI PRODOTTI INCROCIATI DELLE RESISTENZE DELLA STELLA DIVISO LA RESISTENZA DELLA STELLA RELATIVA ALLO SPIGOLLO OPPOSTO.



$$R_C = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

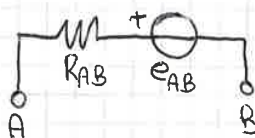
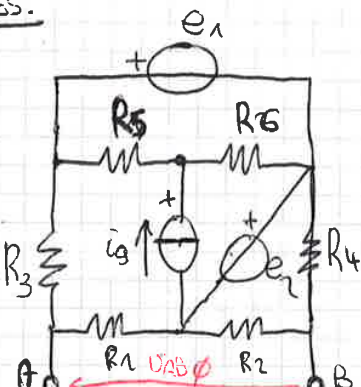
$$R_B = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$R_A = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

CANCELLO IL TRIANGOLO  $\triangle ABC$  E TROVO:

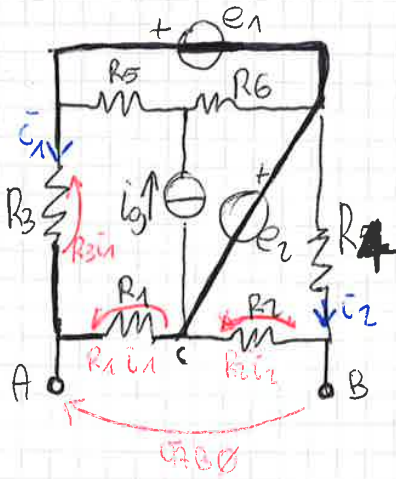
$$R_{CD} = R_C + (R_A + R_4) // (R_B + R_5)$$

Es.



CALCOLARE L'EQUIVALENTE DI THEVENIN DEL CIRCUITO

DIFFICOLTÀ SIMILE AD ESAME!



LKT:  $R_3 i_1 - e_1 - e_2 + R_1 i_1 = 0$

$i_1 = \frac{e_1 + e_2}{R_1 + R_3}$

" $U_{AC} = R_1 \cdot i_1 = R_1 \cdot \frac{e_1 + e_2}{R_1 + R_3}$ "

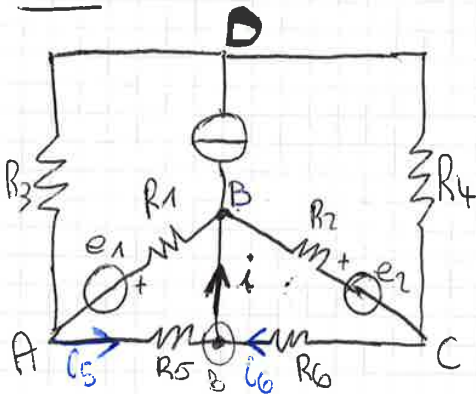
" $U_{CB} = R_2 \cdot i_2 = -R_2 \cdot \frac{e_2}{R_2 + R_4}$ "

CONVENZIONE DEI GENERATORI  $\Rightarrow$  CAMBIO SEGNO A  $i_2$

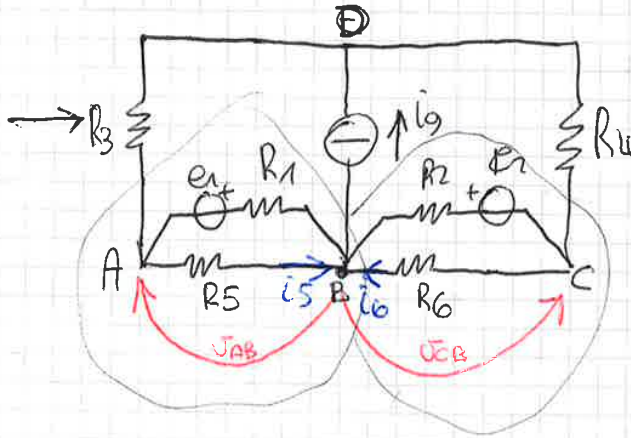
$U_{AB} = U_{AC} + U_{CB} = R_1 \frac{e_1 + e_2}{R_1 + R_3} - R_2 \frac{e_2}{R_2 + R_4}$

PROCEDIMENTO 30L!  
VERY NICE! :D

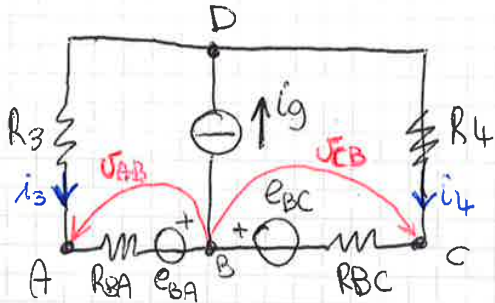
Es.



$i = i_5 + i_6$



$i_5 = \frac{U_{AB}}{R_5}$   
 $i_6 = \frac{U_{CB}}{R_6}$



$e_{BA} = e_1 \frac{R_5}{R_1 + R_5}$

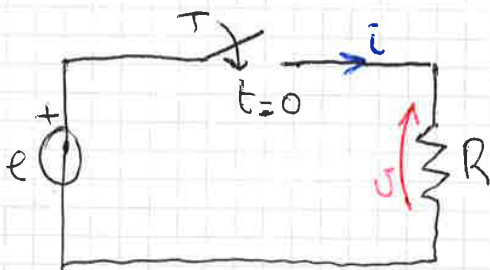
$R_{BA} = R_1 // R_5$

$e_{BC} = e_2 \frac{R_6}{R_2 + R_6}$

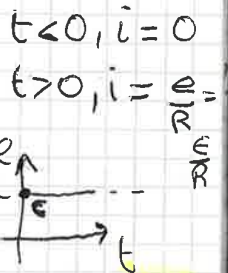
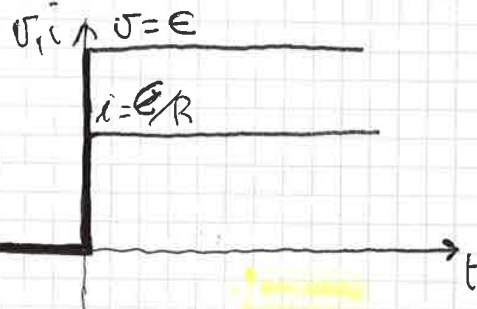
$R_{BC} = R_2 // R_6$

$U_{DB} = \frac{-\frac{e_{BA}}{R_3 + R_{BA}} + i_g - \frac{e_{BC}}{R_{BC} + R_4}}{\frac{1}{R_3 + R_{BA}} + \frac{1}{R_4 + R_{BC}}}$

RICAVO  $i_3$  E  $i_4$   $\rightarrow$  RISALGO A  $U_{AB}$  E  $U_{CB}$   $\rightarrow$  CALCOLO  $i$



H



LE RETI RESISTIVE SONO RETI ADINAMICHE CIOÈ RETI IN CUI IL PASSAGGIO DA UNO STATO ALL'ALTRO NON È CARATTERIZZATO DA UN'EVOLUZIONE DINAMICA

RESISTORE  
INDUTTORE  
CONDENSATORE

RETI DINAMICHE:

LE GRANDEZZE ELETTRICHE NON VARIANO INSTANTANEAMENTE MA HANNO BISOGNO DI UN CERTO LASSO DI TEMPO



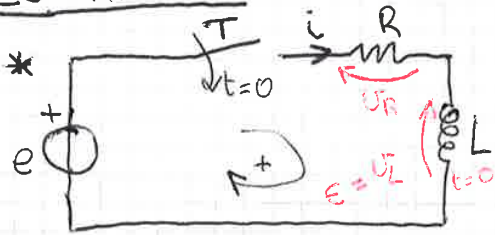
$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t v dt = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} v dt + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v dt$$

CONDIZIONE INIZIALE  $\leftarrow i(t_0)$

$$p = v \cdot i = i \cdot L \frac{di}{dt} \leftarrow \text{POTENZA}$$

$$W(t) = \int_{-\infty}^t p dt = L \int_{-\infty}^t i di = \frac{1}{2} L i^2(t) \leftarrow \text{ENERGIA}$$

Es: TRANSITORI



CIRCUITO DI CARICA DELL'INDUTTORE

$t < 0$  T APERTO  $\Rightarrow i(t < 0) = 0$

$i(t=0^-) = 0 \rightarrow$  CONDIZIONE INIZIALE

$$U_R = R \cdot i \quad U_L = L \frac{di}{dt}$$

$$e - U_R - U_L = 0$$

$$e - R \cdot i - L \frac{di}{dt} = 0 \rightarrow \boxed{\frac{di}{dt} + \frac{R}{L} i = \frac{e}{L}} \leftarrow \text{EQUAZIONE DIFFERENZIALE LINEARE DEL 1° ORDINE A COEFFICIENTI COSTANTI}$$

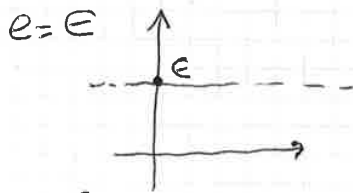
SOLUZIONE GENERALE:  $i(t) = i_0(t) + i_p(t)$

SOLUZIONE OMOGENEA

SOLUZIONE PARTICOLARE (O SOLUZIONE A REGIME)

EQUAZIONE DIFFERENZIALE OMOGENEA:  $\frac{di}{dt} + \frac{R}{L} \cdot i = 0 \quad i_0 = k \cdot e^{-st}$

EQUAZIONE ALGEBRICA AUSILIARIA:  $s^1 + \frac{R}{L} s^0 = 0 \rightarrow s = -\frac{R}{L} \quad i(t \rightarrow \infty) \rightarrow \emptyset$   
 (NELL'EQ. DIFF. OMOGENEA, SOSTITUISCO LA CORRENTE CON 'S' ELEVATA ALL'ORDINE DI DERIVAZIONE)



$i_p = I_p = \text{COSTANTE}$

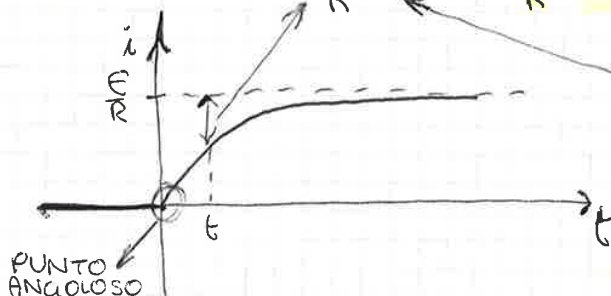
$$\frac{dI_p}{dt} + \frac{R}{L} I_p = \frac{e}{L} \rightarrow I_p = \frac{e}{R}$$

$$i(t) = k \cdot e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{e}{R}$$

$$i(0^-) = \emptyset = i(0^+) = k + \frac{e}{R}$$

$$k = \emptyset - \frac{e}{R} = -\frac{e}{R}$$

$$i = i_0 + i_p = -\frac{e}{R} \cdot e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{e}{R} = \frac{e}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t})$$



TERMINE TRANSITORIO

$\frac{L}{R} = \tau$ : COSTANTE DI TEMPO [S]

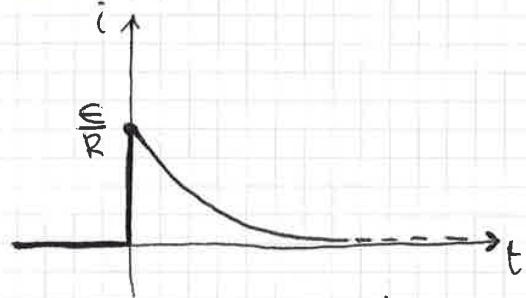
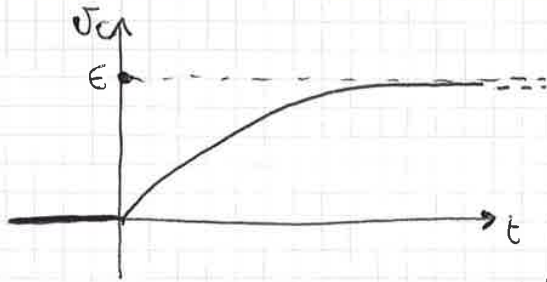
$$i = \frac{e}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad t = 4.5 \tau \rightarrow e^{-4.5}$$

IL TRANSITORIO SI ESTINGUE E RIMANE SOLO LA

\* NON POSSO UTILIZZARE IL CIRCUITO PER STUDIARE L'APERTURA DELL'INTERRUTTORE PERCHÉ NON POSSO ANNULLARE LA CORRENTE CHE PASSA NELL'INDUTTORE ALTRIMENTI AVREI UNA DISCONTINUITÀ CHE NON È AMMESSA. PER POTERLO STUDIARE, DEVO METTERE UNA RESISTENZA IN PARALLELO ALL'INDUTTANZA

$\tau = R \cdot C$

$U_c = (U_c(0) - U_c(\infty)) e^{-t/\tau} + U_c(\infty)$  ← FORMULA GENERALE



$i = C \frac{dU_c}{dt} = \cancel{C} (-E) \left(-\frac{1}{RC}\right) e^{-t/RC} = \frac{E}{R} e^{-t/RC}$

$t < 0, i = 0$  PERCHÉ CIRCUITO APERTO  
 $t = 0, i = \frac{E}{R}$   
 $t \rightarrow \infty, i \rightarrow 0$

CON GENERATORE  $e = E$  IL CONDENSATORE SI COMPORTA A REGIME COME UN CIRCUITO APERTO.

	INDUTTORE	CONDENSATORE
$t = 0$	= $\uparrow i(0)$	= $\uparrow U_c(0)$
$t \rightarrow \infty$	= $\left( \begin{array}{l} \text{O GENERATORE} \\ \text{DI TENSIONE} \\ \text{NULLO} \end{array} \right)$	= $\left( \begin{array}{l} \text{O GENERATORE} \\ \text{DI CORRENTE} \\ \text{DI VALORE} \\ \text{NULLO} \end{array} \right)$

CORRENTE ALTERNATA

REGIME SINUSOIDALE

$a(t) = \hat{A} \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi)$

$\hat{A}$  → VALORE MASSIMO (O DI PICCO)  
 $\omega$  → PULSAZIONE ELETTRICA  
 $\varphi$  → FASE INIZIALE  
 $t$  → TEMPO

$[\omega] = (\text{RAD}/\text{S})$

$[\varphi] = (\text{RAD})$

$[t] = (\text{S})$

$T$ : INTERVALLO DI TEMPO TRASCORSO IL QUALE LA GRANDEZZA  $a(t)$  RIPRENDE IL SUO VALORE

$a(t) = a(t+T) \quad \forall t$

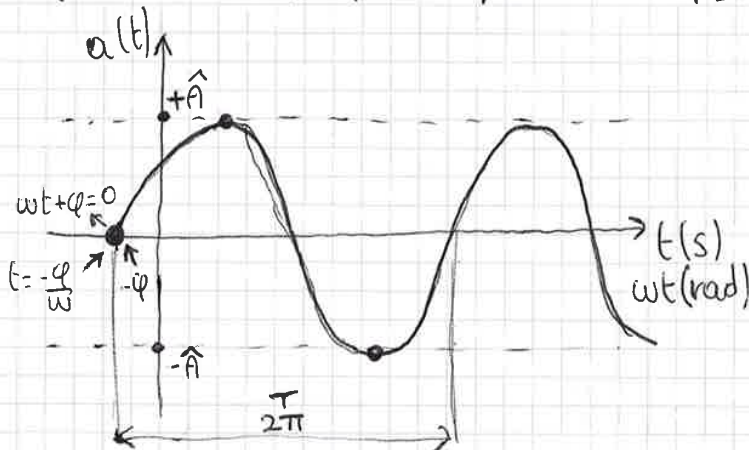
$\text{sen}(\omega(t+T) + \varphi) \stackrel{\text{sen}}{=} \text{sen}(\omega t + \varphi)$   
 $\text{sen}(\omega t + 2\pi + \varphi) \stackrel{\text{sen}}{=} \text{sen}(\omega t + \varphi)$

$T = \frac{2\pi}{\omega}$

$T = \frac{1}{f}$

$f$ : FREQUENZA (Hz)

$f = \frac{\omega}{2\pi}$



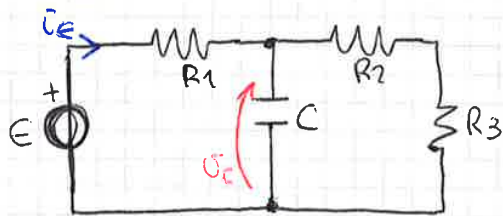
VALORE EFFICACE:  $A = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} a(t)^2 dt}$   
 VALORE QUADRATICO MEDIO (ROOT MEAN SQUARE)

NEL CASO DELLE SINUSOIDI:

$A = \frac{\hat{A}}{\sqrt{2}}$

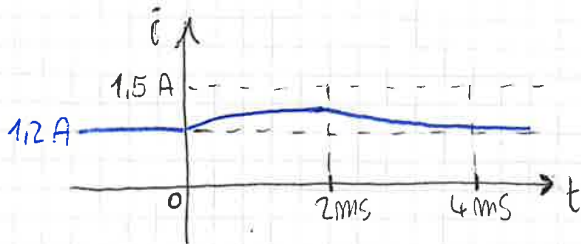


$t > 2 \text{ ms}$ :

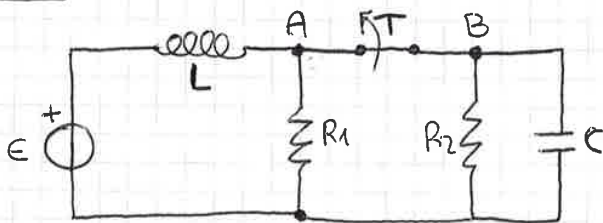


$$\mathcal{E} - R_1 \cdot i_e - V_c = 0$$

$$i_e = \frac{\mathcal{E} - V_c}{R_1} = 1,2 + 0,17 e^{-\frac{t-2\text{ms}}{\tau'}}$$



Es.



$$\mathcal{E} = 48 \text{ V}$$

$t < 0$  T CHIUSO <sup>REGIME</sup>

$$C = 200 \mu\text{F}$$

$t = 0$  APERTO

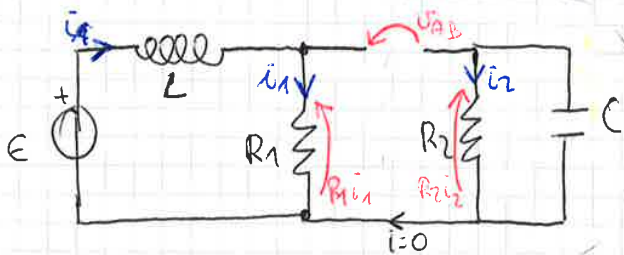
$$L = 25 \text{ mH}$$

$$R_1 = 5 \Omega$$

$$V_{AB} = ?$$

$$R_2 = 20 \Omega$$

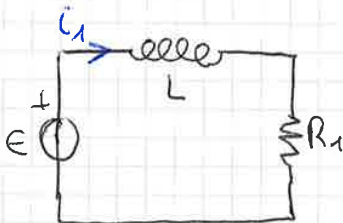
$t$



$$R_1 \cdot i_1 - V_{AB} - R_2 \cdot i_2 = 0$$

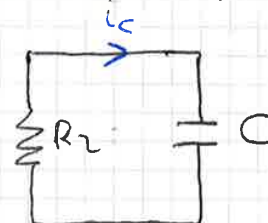
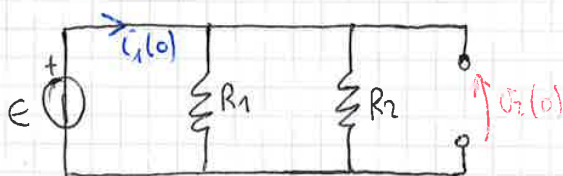
$$V_{AB} = R_1 \cdot i_1 - R_2 \cdot i_2 = R_1 i_1 - V_c(t)$$

I DUE SOTTOCIRCUITI SONO COLLEGATI DA UN NODO MA NEL RAMO CHE LI COLLEGA NON PASSA CORRENTE QUINDI POSSONO ESSERE STUDIATI SEPARATAMENTE.



$$i_1 = (i_1(0) - i_1(\infty)) \cdot e^{-t/\tau_1} + i_1(\infty)$$

$t < 0$  : REGIME



$$V_c = (V_c(0) - V_c(\infty)) e^{-\frac{t}{\tau_2}} + V_c(\infty)$$

$$\left. \begin{aligned} i_1(0) &= \frac{\mathcal{E}}{R_1 // R_2} \\ V_c(0) &= \mathcal{E} \end{aligned} \right\} \text{CONDIZIONI INIZIALI}$$

$$\tau_1 = \frac{L}{R_1} =$$

$$i_1(\infty) = \frac{\mathcal{E}}{R_1} = 9,6 \text{ A}$$

$$\tau_2 = R_2 \cdot C$$

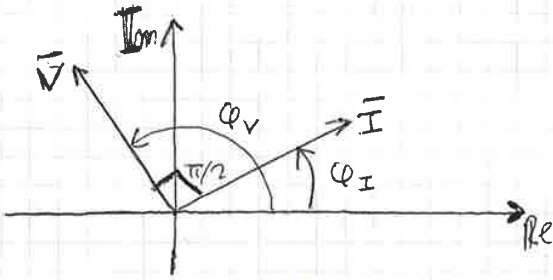
$$V_c(\infty) = 0 \text{ PERCHÉ NON C'È GENERATORE}$$

$$i_c = C \frac{dV_c}{dt}$$

$$i_2 = -i_c$$

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

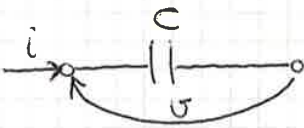
$v \Rightarrow \int \frac{di}{dt} \rightarrow \bar{V} = L j \omega \bar{I} = j \cdot X_L \cdot \bar{I} = X_L \cdot e^{j\pi/2} \cdot \hat{I} \cdot e^{j\varphi_I} = X_L \cdot \hat{I} \cdot e^{j(\varphi_I + \pi/2)}$



$\bar{V}, \bar{I}$  SONO IN QUADRATURA

QUANDO LA CORRENTE È A 0 LA TENSIONE È AL MASSIMO.  
QUANDO LA CORRENTE È AL MASSIMA LA TENSIONE DÀ PROIEZIONE 0.

CONDENSATORE



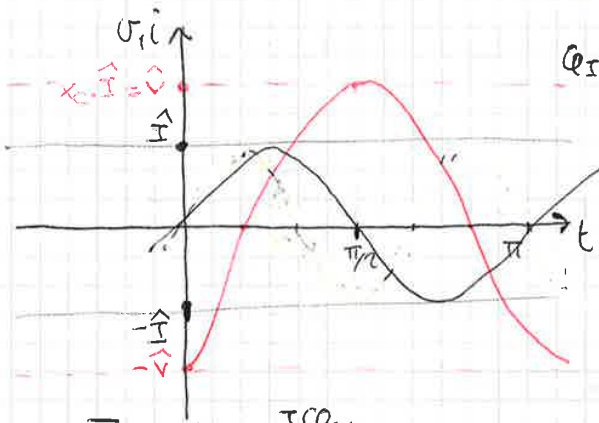
$v = \hat{V} \sin(\omega t + \varphi_V)$

$i = c \frac{dv}{dt} = \omega c \hat{V} \cos(\omega t + \varphi_V) = \omega c \hat{V} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} + \varphi_V)$

$\hat{I} = \omega c \hat{V}$   
 $\varphi_I = \varphi_V + \frac{\pi}{2}$

$\hat{V} = \frac{1}{\omega c} \hat{I} = X_C \cdot \hat{I}$   
 $\varphi_V = \varphi_I - \frac{\pi}{2}$

$\frac{1}{\omega c} = X_C$ : REATTANZA CAPACITIVA ( $\Omega$ )



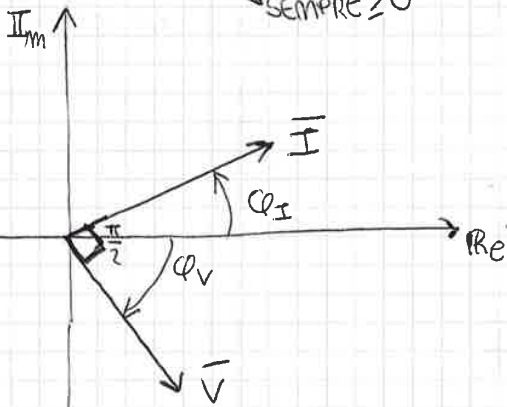
$\varphi_I = 0$

$v$  È IN RITARDO DI  $\pi/2$  SU  $i$   
 $i$  È IN ANTICIPO DI  $\pi/2$  SU  $v$   
 $v$  È IN QUADRATURA IN RITARDO SU  $i$   
 $i$  È IN QUADRATURA IN ANTICIPO SU  $v$

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

$i = c \frac{dv}{dt} \rightarrow \bar{I} = c \cdot j \cdot \omega \bar{V}$

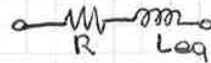
$\bar{V} = \frac{1}{j\omega c} \bar{I} = -j X_C \cdot \bar{I} = e^{-j\pi/2} \cdot X_C \cdot \hat{I} \cdot e^{j\varphi_I} = X_C \cdot \hat{I} \cdot e^{j(\varphi_I - \pi/2)}$



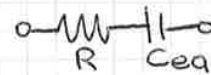
$\bar{V}, \bar{I}$  SONO IN QUADRATURA

$\text{---} R \text{---} \quad \bar{V} = R \cdot \bar{I}$  (IMPEDENZA PURAMENTE RESISTIVA)  $\text{---} R \text{---} \text{---} L \text{---} \quad \bar{V} = (R + jX_L) \cdot \bar{I}$  (IMPEDENZA OHMICO-INDUTTIVA)  
 $\text{---} L \text{---} \quad \bar{V} = jX_L \cdot \bar{I}$  (IMPEDENZA PURAMENTE INDUTTIVA) PER TUTTI:  $\bar{V} = \bar{Z} \cdot \bar{I}$   
 $\text{---} C \text{---} \quad \bar{V} = -jX_C \cdot \bar{I}$  (IMPEDENZA PURAMENTE CAPACITIVA)  $\text{---} R \text{---} \text{---} C \text{---} \quad \bar{V} = (R - jX_C) \cdot \bar{I}$  (IMPEDENZA OHMICO-CAPACITIVA)

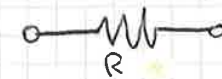
$X_L > X_C \quad \bar{Z} = R + jX \quad \text{CON } X = X_L - X_C$



$X_L < X_C \quad \bar{Z} = R - jX \quad \text{CON } X = X_C - X_L$

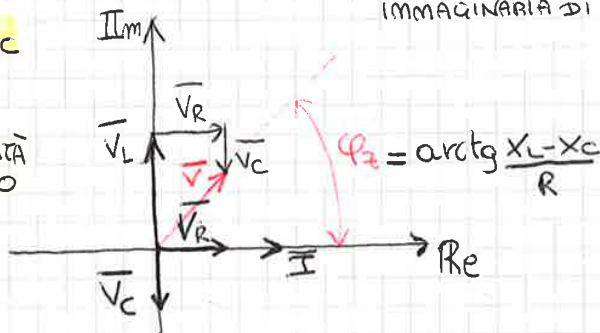


$X_L = X_C \quad \bar{Z} = R \quad \text{CON } X = X_L - X_C$



MODULO DELLA PARTE IMAGINARIA DI  $\bar{Z}$

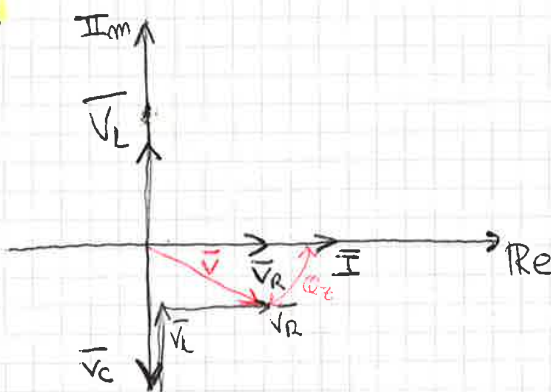
$X_L > X_C$   
 $\varphi_I = 0$   
 ↑  
 PER COMODITÀ DI DISEGNO



$X_L > X_C \Rightarrow \bar{V}_L > \bar{V}_C$

ESSENDO UN BIPOLO CON IMPEDENZA OHMICO-INDUTTIVA,  $\bar{V}$  È SFASATO IN ANTICIPAZIONE RISPETTO A  $\bar{I}$  DI  $\varphi_Z$ .

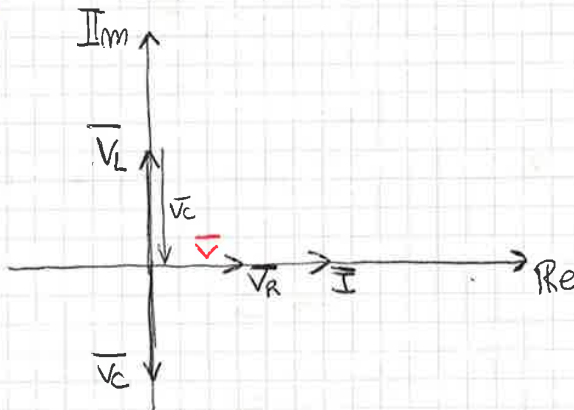
$X_L < X_C$   
 $\varphi_I = 0$



$\varphi_Z = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$

ESSENDO UN BIPOLO COMPLESSIVAMENTE CON IMPEDENZA OHMICO-CAPACITIVA,  $\bar{V}$  È SFASATO IN RITARDO RISPETTO AD  $\bar{I}$  DI  $\varphi_Z$ .

$X_L = X_C$   
 $\varphi_I = 0$



$\bar{V} = \bar{V}_R \rightarrow$  RISONANZA SERIE

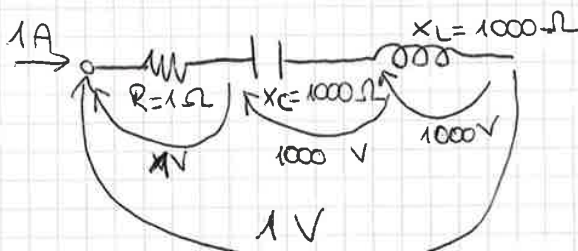
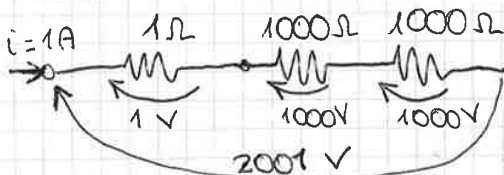
$X_L = X_C \text{ SE } \omega L = \frac{1}{\omega C} \rightarrow LC = \frac{1}{\omega^2} \rightarrow$

$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \Rightarrow f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$

FREQUENZA DI RISONANZA

QUANDO LE DUE IMPEDENZE SI COMPENSANO SI PARLA DI RISONANZA. PER OGNI VALORE DI L E C ESISTE UNA FREQUENZA A CUI AVVIENE QUESTO FENOMENO.  $V_L - V_C = 0$ ; SI ANNULLA LA TENSIONE

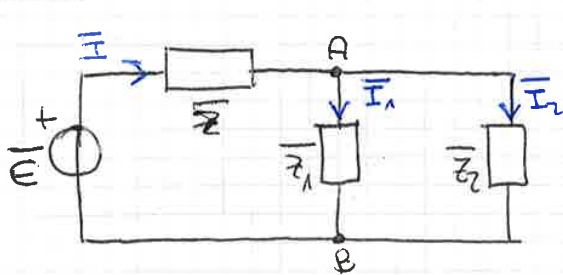
ES.



IN QUESTO CASO, SI HANNO FENOMENI DI SOMMA FASORIALE CHE NON PERMETTONO DI ACCORGERSI DELLA SITUAZIONE DI RISCHIO. BISOGNA SOMMARE ~~NO~~ I FASORI E NON SOLO I MODULI, QUINDI BISOGNA TENERE CONTO ANCHE DELLE VARIE FASI!



Es.



$$\begin{aligned} \bar{E} &= 5100 \text{ V} \\ \bar{Z} &= 5,5 + j10 \Omega \\ \bar{Z}_1 &= 4 - j8 \Omega \\ \bar{Z}_2 &= 3 + j6 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I &=? \\ I_1 &=? \\ I_2 &=? \\ \bar{V}_{AB} &=? \end{aligned}$$

$$\bar{I} = \frac{\bar{E}}{\bar{Z} + (\bar{Z}_1 // \bar{Z}_2)} = \frac{5100 \text{ V}}{13,42 + j12,26 \Omega} = 5,5 e^{j47,58^\circ} = 5,5 \angle 47,58^\circ \text{ A}$$

FACENDO I CONTI SI VEDE CHE SI HA UN BIPOLO EQUIVALENTE OHMICO-INDUTTIVO

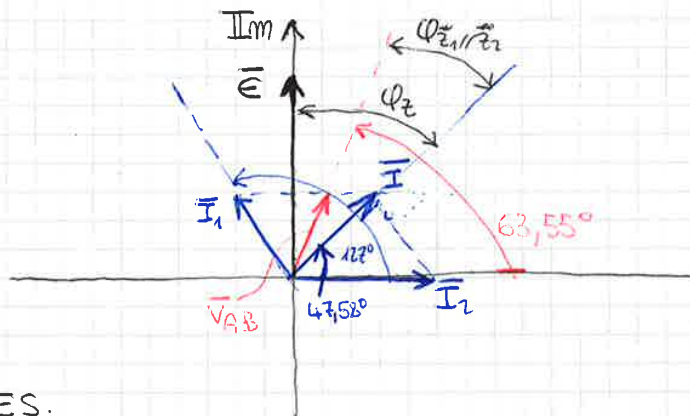
NOTAZIONE DI KENNELLY

$$\bar{I}_1 = \bar{I} \cdot \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} = 5,07 \angle 127^\circ \text{ A}$$

USARE I GRADI SESSAGESIMALI!

$$\bar{I}_2 = \bar{I} \cdot \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} = 6,75 \angle 0,09^\circ \text{ A}$$

$$\bar{V}_{AB} = \bar{Z}_1 \cdot \bar{I}_1 = \bar{Z}_2 \cdot \bar{I}_2 = (\bar{Z}_1 // \bar{Z}_2) \cdot \bar{I} = 45,35 \cdot e^{j63,55^\circ} \text{ V}$$

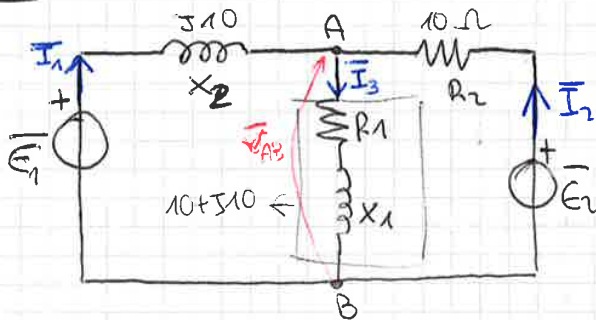


$$\begin{aligned} |V_{AB}| &= 20 \text{ V} \\ |I| &= 2 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\varphi_Z = \arctg \frac{12,26}{13,42} = 42,42^\circ$$

V<sub>AB</sub> È IN ANTICIPO SU I, QUINDI ANCHE Z<sub>1</sub>//Z<sub>2</sub> È UN BIPOLO CON IMPEDENZA OHMICO-INDUTTIVA

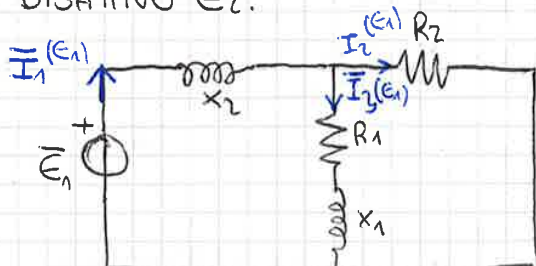
Es.



$$\begin{aligned} \bar{E}_1 &= 150 \text{ V} \\ \bar{E}_2 &= j150 \text{ V} \\ R_1 &= 10 \Omega \\ R_2 &= 10 \Omega \\ X_1 &= 10 \Omega \\ X_2 &= 10 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &=? \\ \bar{I}_2 &=? \\ \bar{I}_3 &=? \end{aligned}$$

DISATTIVO E<sub>2</sub>:

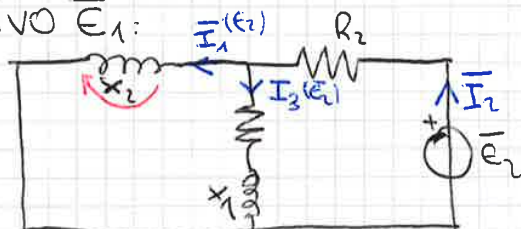


$$\bar{I}_1^{(E_1)} = \frac{\bar{E}_1}{(R_1 + jX_1) // R_2 + jX_2} = 5 - j10 \text{ A}$$

$$\bar{I}_2^{(E_1)} = \bar{I}_1^{(E_1)} \frac{R_1 + jX_1}{R_1 + jX_1 + R_2} = 5 - j8 \text{ A}$$

$$\bar{I}_3^{(E_1)} = \bar{I}_1^{(E_1)} - \bar{I}_2^{(E_1)} = -j5 \text{ A}$$

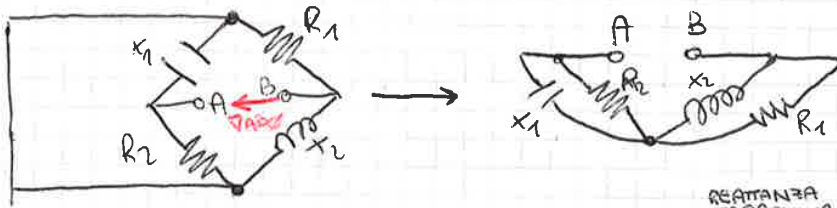
DISATTIVO E<sub>1</sub>:



$$\bar{I}_2^{(E_2)} = \frac{\bar{E}_2}{jX_2 // (R_1 + jX_1) + R_2} = 5 + j10 \text{ A}$$

$$\bar{I}_3^{(E_2)} = \bar{I}_2^{(E_2)} \frac{jX_1}{jX_2 + (R_1 + jX_1)} = j5 \text{ A}$$

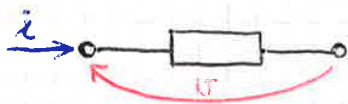
CALCOLO  $\bar{z}_{eq}$ :



$$\bar{z}_{eq} = R_2 // jX_1 + jX_2 // R_1 = \frac{R_2 \cdot (-jX_1)}{R_2 - jX_1} + \frac{R_1 (jX_2)}{R_1 + jX_2} = 6,48 - j2,64 \Omega$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \frac{\bar{E}}{R_2 - jX_1} = \dots A \\ \bar{I}_2 &= \frac{\bar{E}}{R_1 + jX_2} = \dots A \end{aligned} \left. \vphantom{\begin{aligned} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \end{aligned}} \right\} + \bar{V}_{AB} (-jX_1 \cdot \bar{I}_1) - R_1 \cdot \bar{I}_2 = 0 \quad \bar{V}_{AB} = 37,95 \angle 220,31^\circ V$$

POTENZE IN REGIME SINUSOIDALE



$p = i \cdot v$

$$\begin{cases} i = \hat{I} \sin(\omega t + \varphi_i) \\ v = \hat{V} \sin(\omega t + \varphi_v) \end{cases}$$

$$p = \hat{I} \sin(\omega t + \varphi_i) \cdot \hat{V} \sin(\omega t + \varphi_v) = \frac{1}{2} \hat{V} \cdot \hat{I} \cos \varphi [1 + \cos(2\omega t + 2\varphi_v)] + \frac{1}{2} \hat{V} \cdot \hat{I} \sin \varphi \sin(2\omega t + 2\varphi_v)$$

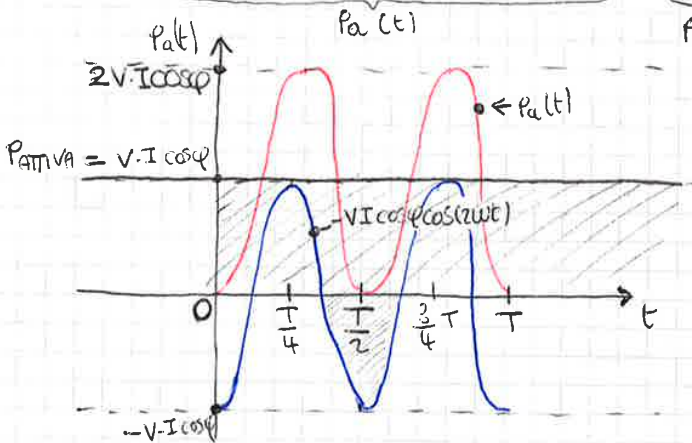
↑  
ISOFREQUENZIALI

$\varphi = \varphi_v - \varphi_i$

$\hat{V} = V \cdot \sqrt{2}$

$\varphi_v = 0 \rightarrow \bar{V}$  sull'ASSE REALE

$p = VI \cos \varphi [1 + \cos(2\omega t)] + V \cdot I \sin \varphi \cdot \sin(2\omega t)$

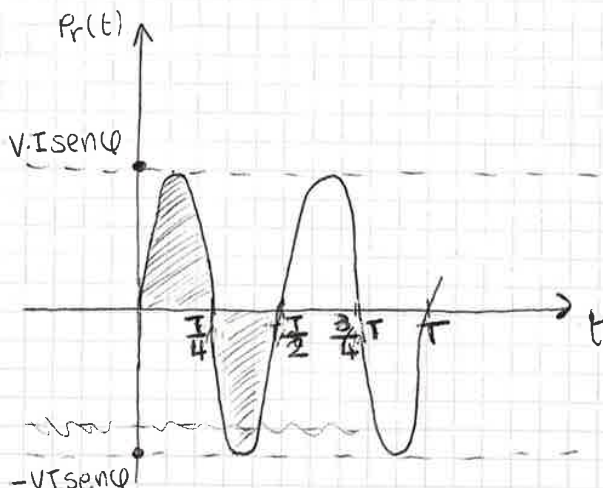


$p_a(t)$ : POTENZA ATTIVA Istantanea

T: PERIODO DI  $v, i$

$p_r(t)$ : POTENZA REATTIVA Istantanea

$V, I, \cos \varphi$  SONO DEI NUMERI REALI COSTANTI NEL TEMPO



$p_r(t)$  UN QUARTO DI PERIODO VIENE ASSORBITA E UN QUARTO DI PERIODO VIENE RESTITUITA E QUINDI NON VIENE CONVERTITA ( $\int p_r(t) dt = 0$ ).



### POTENZA COMPLESSA

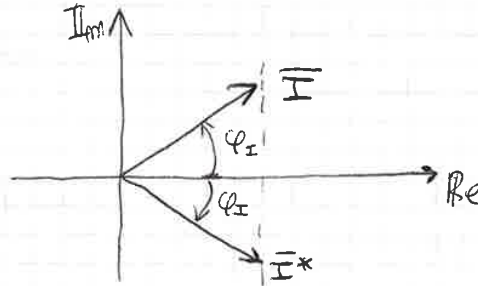
$$\bar{S} = \bar{V} \cdot \bar{I}^*$$

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

RMS

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

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

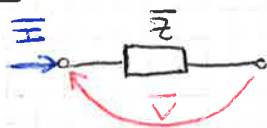


$$\bar{I} = I_{Re} + jI_{Im}$$

$$\bar{I}^* = I_{Re} - jI_{Im}$$

$$\bar{S} = V \cdot e^{j\varphi_V} \cdot I \cdot e^{-j\varphi_I} = V \cdot I \cdot e^{j(\varphi_V - \varphi_I)} = \underbrace{V \cdot I \cdot e^{j\varphi}}_S = \underbrace{S \cos \varphi}_P + j \underbrace{S \sin \varphi}_Q$$

es.



$$\bar{Z} = Z \cdot e^{j\varphi_Z}$$

$$\varphi = \varphi_Z$$

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R}$$



$$\bar{V} = \bar{Z} \cdot \bar{I} \Rightarrow \hat{V} = \hat{Z} \cdot \hat{I}; V = Z \cdot I$$

$$\varphi_V = \varphi_I + \varphi_Z \rightarrow \varphi = \varphi_Z$$

$$\bar{S} = V \cdot I \cdot e^{j\varphi} = \underbrace{Z \cdot I^2}_S \cdot e^{j\varphi_Z} = \underbrace{Z \cdot I^2 \cos \varphi_Z}_R \text{ (PARTE REALE DELL'IMPIEDENZA)} + j \underbrace{Z \cdot I^2 \sin \varphi_Z}_X = \underbrace{R \cdot I^2}_P + j \underbrace{X \cdot I^2}_Q$$

es.

$$\bar{Z} = 10 + j5 = \sqrt{10^2 + 5^2} \cdot e^{j \arctg \frac{5}{10}} = 11,18 \cdot e^{j26,56^\circ}$$

$$\bar{V} = 100 \cdot e^{j\pi/4} = 100 \cdot \cos \frac{\pi}{4} + j 100 \sin \frac{\pi}{4} = \frac{100}{\sqrt{2}} + j \frac{100}{\sqrt{2}}$$

RMS (DEVE ESSERE SPECIFICATO NELL'ES.)

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot 100 \sin(\omega t + \frac{\pi}{4})$$

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}}{\bar{Z}} = \frac{100 \cdot e^{j\pi/4}}{11,18 \cdot e^{j26,56^\circ}} = 8,95 \cdot e^{j18,44} \text{ A}$$

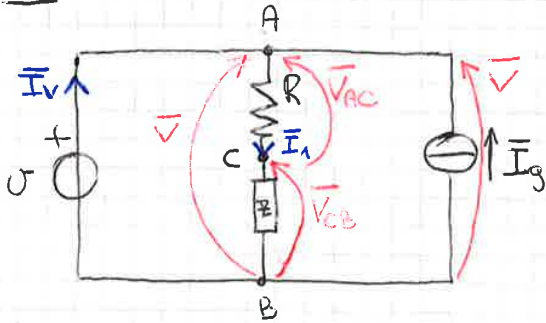
$$1^{\circ} \text{ MODO} \begin{cases} P = R \cdot I^2 = 10 \cdot 8,95^2 = 801,02 \text{ W} \\ Q = X \cdot I^2 = 5 \cdot 8,95^2 = 400,51 \text{ VAR} \\ S = Z \cdot I^2 = 11,18 \cdot 8,95^2 = 895,55 \text{ VA} \end{cases}$$

CALCOLO DELLE POTENZE 'TIPO LEGGE DI JOULE'

$$2^{\circ} \text{ MODO} \begin{cases} P = V \cdot I \cdot \cos \varphi = 100 \cdot 8,95 \cdot \cos(26,56^\circ) = 800,55 \text{ W} \\ Q = V \cdot I \cdot \sin \varphi = 100 \cdot 8,95 \cdot \sin(26,56^\circ) = 400,19 \text{ VAR} \\ S = V \cdot I = 100 \cdot 8,95 = 895,00 \text{ VA} \end{cases}$$

$$3^{\circ} \text{ MODO} \begin{cases} \bar{S} = \bar{V} \cdot \bar{I}^* = 100 \cdot e^{j45^\circ} \cdot 8,95 \cdot e^{-j18,44} = 895 \cos(26,56^\circ) + j 895 \sin(26,56^\circ) = 800,55 + j 400,19 \end{cases}$$

ES.



$$U = 42,4 \text{ sen}(wt) \text{ V}$$

$$R = 3 \Omega$$

$$\bar{V}_{CB} = 19,2 + j14,4 \text{ V}$$

$$\bar{I}_g = 1,6 + j1,2 \text{ A}$$

$\bar{V}_{CB}, \bar{I}_g$  SONO RMS ← NEGLI ES. DEVE ESSERE SEMPRE SPECIFICATO!

$$\bar{I}_1 = ?$$

$$Z = ?$$

$$\bar{S}_V (\text{EROG.}) = ?$$

$$\bar{S}_{I_g} (\text{EROG.}) = ?$$

$$U \rightarrow \bar{V} = \frac{42,4}{\sqrt{2}} e^{j0} = 30 + j0 = 30 \text{ V}$$

$$A \rightarrow C \rightarrow B : -\bar{V}_{AC} - \bar{V}_{CB} + \bar{V} = 0$$

$$\bar{V}_{AC} = \bar{V} - \bar{V}_{CB} = 30 - (19,2 + j14,4) = 10,8 - j14,4 \text{ V}$$

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{V}_{AC}}{R} = \frac{10,8 - j14,4 \text{ V}}{3 \Omega} = 3,6 - j4,8 = 6 e^{-j53,13^\circ} \text{ A}$$

$$i_1 = 6 \cdot \sqrt{2} \cdot \text{sen}(wt - 53,15^\circ)$$

$$\bar{Z} = \frac{\bar{V}_{CB}}{\bar{I}_1} = 34 \Omega \left( \frac{m}{X_L = 4 \Omega} \right)$$

$\frac{V_{CB}}{I} = 4 \Omega = Z$  ← FACENDO IL RAPPORTO TRA I MODULI NON SI CAPIESCE LA NATURA DEL DIPOLO

NOIDA A:  $\bar{I}_V = \bar{I}_1 - \bar{I}_g = 2 - j6 \text{ A}$

$$\bar{S}_V = \bar{V} \cdot \bar{I}_V^* = 30 \cdot e^{j0} (2 + j6) = \underbrace{60}_{P_a = P_V} + j \underbrace{180}_{P_r = Q_V} \text{ V} \cdot \text{A}$$

$$P_V = V \cdot I_V \cos(\bar{V} \wedge \bar{I}_V) = 60 \text{ W}$$

$\phi = \phi_V - \phi_{I_V} = 0 + 53,13^\circ = 53,13^\circ \quad ? \quad \phi = 71,57^\circ!$

$$Q_V = V \cdot I_V \text{ sen}(\bar{V} \wedge \bar{I}_V)$$

$$\bar{S}_{I_g} = \bar{V} \cdot \bar{I}_g^* = 30 \cdot (1,6 - j1,2) = \underbrace{48}_{P_{I_g}} - j \underbrace{36}_{Q_{I_g}} \text{ VA}$$

$$P_{I_g} = V \cdot I_g \cos(\bar{V} \wedge \bar{I}_g)$$

$$Q_{I_g} = V \cdot I_g \text{ sen}(\bar{V} \wedge \bar{I}_g)$$

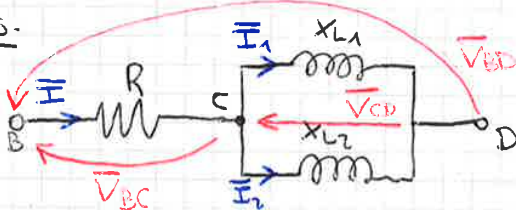
$$P_{\text{EROG.}} = P_V + P_{I_g} = 60 + 48 = 108 \text{ W}$$

$$P_R (\text{ASS.}) = R \cdot I_1^2 = 3 \cdot 6^2 = 108 \text{ W}$$

$$Q_{\text{EROG.}} = Q_V + Q_{I_g} = 180 - 36 = 144 \text{ VAR} \leftarrow \text{POSITIVA PERCHÈ REATTANZA INDUTTIVA}$$

$$Q_{X_L} (\text{ASS.}) = X_L \cdot I_1^2 = 4 \cdot 6^2 = 144 \text{ VAR}$$

ES.



$$I = 100 \text{ A}$$

$$V_{BC} = 50 \text{ V}$$

$$V_{BD} = 100 \text{ V}$$

$$X_{L1} = 10 \Omega$$

$$R = ?$$

$$X_{L2} = ?$$

$$V_{BC} = |V_{BC}| = 50 \text{ V}$$

$$\bar{V}_{BC} = R \cdot \bar{I} \Rightarrow V_{BC} = R \cdot I \rightarrow R = \frac{V_{BC}}{I} = \frac{50 \text{ V}}{100 \text{ A}} = 0,5 \Omega$$



$$\frac{jX_{L1} \cdot jX_{L2}}{jX_{L1} + jX_{L2}} = -\frac{X_{L1} X_{L2}}{j(X_{L1} + X_{L2})} = j \left( \frac{X_{L1} \cdot X_{L2}}{X_{L1} + X_{L2}} \right)$$

$$V, I, \cos\varphi \text{ NOTI} \Rightarrow \begin{cases} P = V \cdot I \cdot \cos\varphi \\ S = V \cdot I \\ Q = \pm \sqrt{S^2 - P^2} \rightarrow \text{INDETERMINAZIONE COME PRIMA} \end{cases}$$

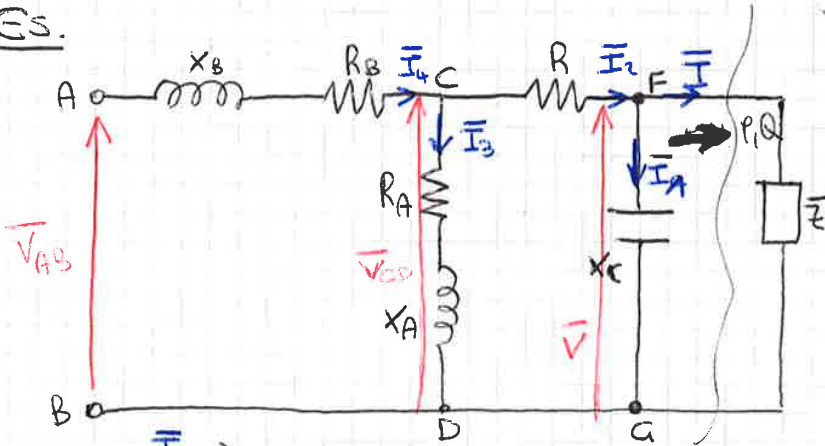
$$P, Q, V \text{ NOTI} \Rightarrow \begin{cases} S = \sqrt{P^2 + Q^2} \\ I = S/V \\ \cos\varphi = P/S \end{cases}$$

DATI ELETTRICI:  $V, I$

DATI DI POTENZA:  $P, Q, S, \cos\varphi$

PER CALCOLARE TUTTE LE GRANDEZZE, BISOGNA AVERE 2 DATI ELETTRICI E UNO DI POTENZA O VICEVERSA

Es.



$$V = 500 \text{ V (RMS)}$$

$$P = 20 \text{ kW}$$

$$Q = 15 \text{ kVAR}$$

$$X_C = 50 \Omega$$

$$X_B = 0,1 \Omega$$

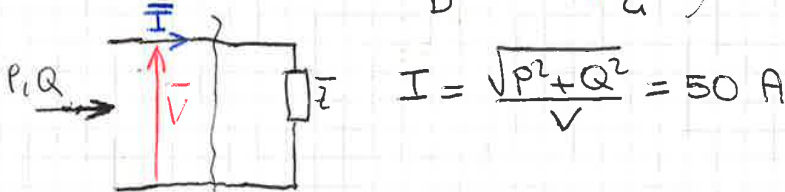
$$R = 0,1 \Omega$$

$$R_B = 0,1 \Omega$$

$$X_A = 20 \Omega$$

$$R_A = 15 \Omega$$

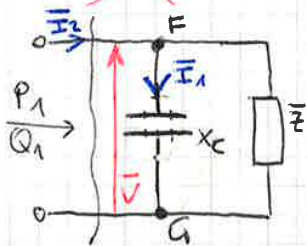
$$V_{AB} = ?$$



TUTTE LE RELAZIONI NON SONO TRA NUMERI COMPLESSI MA TRA I LORO MODULI, QUINDI TRA NUMERI REALI.

$$I_A = \frac{V}{X_C} = \frac{500 \text{ V}}{50 \Omega} = 10 \text{ A}$$

~~$I_2 = I + I_1$~~  NO! HO I MODULI, NON I FASORI!



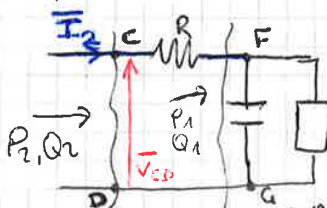
$$Q_C = -X_C \cdot I_1^2$$

$$\begin{cases} P_1 = P = 20 \text{ kW} \rightarrow \text{IL CONDENSATORE NON ASSORBE POTENZA ATTIVA} \\ Q_1 = Q + Q_C = 10 \text{ kVAR} \end{cases}$$

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = 22,36 \text{ kVA}$$

$$I_2 = \frac{S_1}{V} = 44,72 \text{ A}$$

$$P_R = R \cdot I_2^2 = 0,1 \cdot 44,72^2 = 200 \text{ W} \leftarrow \text{POTENZA ASSORBITA DAL RESISTORE}$$



$$P_2 = P_1 + P_R = 20,2 \text{ kW}$$

$$Q_2 = Q_1 = 10 \text{ kVAR}$$

$$S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} = 22,54 \text{ kVA}$$

$$V_{CD} = \frac{S_2}{I_2} = \frac{22,54 \text{ kVA}}{44,72 \text{ A}} = 504 \text{ V}$$

$$V_{CD} = Z_A \cdot I_3 = Z_A \cdot I_3 \rightarrow I_3 = \frac{V_{CD}}{Z_A} = \frac{V_{CD}}{\sqrt{R_A^2 + X_A^2}} = 20,16 \text{ A}$$

IL CONDENSATORE RIDUCE LA POTENZA COMPLESSIVA ED ANCHE IL MODULO DELLA CORRENTE PER IL GIUOCO DELLE FASI. IL CONDENSATORE 'EROGA' POTENZA REATTIVA ALL'IMPIEDENZA Z. ANDANDO VERSO IL GENERATORE LA CORRENTE DIMINUISCE.

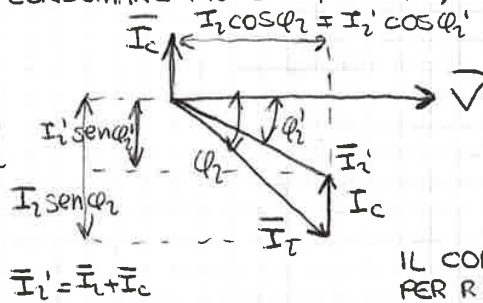
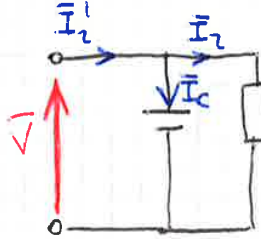
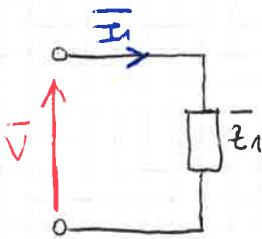
IL RAMO DI R È UN RAMO LONGITUDINALE E NON MODIFICA LA CORRENTE. R MODIFICA PERÒ LA TENSIONE. SE IL RAMO È TRASVERSALE, CAMBIA LA CORRENTE MA LA TENSIONE È LA STESSA.



$3 \text{ KW}$        $6 \text{ KW}$        $10 \text{ KW}$       ← POTENZE APPARENTI  
 $\text{KVA}$        $\text{KVA}$        $\text{KVA}$        $V = 220 \text{ V}$   
 $I = \frac{3 \cdot 10^3}{220} = 13,64 \text{ A}$      $I = \frac{6 \cdot 10^3}{220} = 27,27 \text{ A}$      $I = \frac{10 \cdot 10^3}{220} = 45,46 \text{ A}$     ← MASSIMA CORRENTE EFFICACE ASSORBIBILE

LA TENSIONE È FISSA, QUINDI I PRIVATI SONO LIMITATI IN CORRENTE

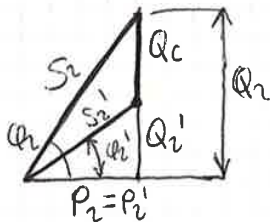
$\cos \varphi \geq 0,9 \rightarrow$  VECCHIO VINCOLO  
 $\tan \varphi = \frac{Q}{P} \leq 0,5 \rightarrow$  NUOVO VINCOLO  
 $Q \leq 0,5 P \rightarrow$  LA POTENZA REATTIVA NON DEVE ESSERE SUPERIORE AL 50% DI QUELLA ATTIVA (PER OGNI KW/h NON SI DEVE CONSUMARE PIÙ DI 0,5 KVAR/h)



LA NATURA È INDUTTIVA: C'È UN ECCESSO DI INDUTTIVITÀ, QUINDI USO

IL CONDENSATORE PER RIDURRE LO SFASAMENTO (IN // ALTRIMENTI V CAMBIA).

IL CONDENSATORE MANTIENE LA POTENZA ATTIVA INALTERATA MA RIDUCE LA POTENZA REATTIVA ASSOCIATA.



$\text{opp} \equiv \tan \varphi_1' = \frac{Q_1'}{P_2} = \frac{Q_2 + Q_c}{P_2}$

$Q_c = P_2 \tan \varphi_1' - Q_2 = P_2 \tan \varphi_1' - P_2 \tan \varphi_2 = P_2 (\tan \varphi_1' - \tan \varphi_2)$

$Q_c = \omega C \cdot V^2 = -\omega C \cdot \left(\frac{V}{\omega C}\right)^2 = -\frac{V^2}{\omega C} = -V^2 \cdot \omega C$

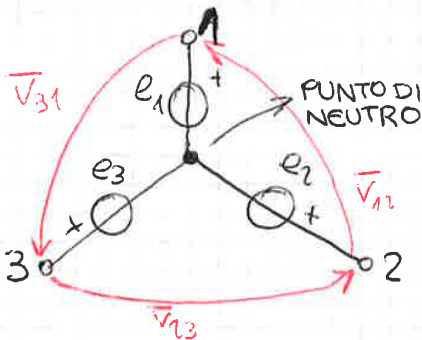
↑ POTENZA ATTIVA ASSORBITA DAL CARICO  
 ↑ TARGET (0,5)  
 ↑ SFASAMENTO NATURALE DEL CARICO

$C = -\frac{Q_c}{V^2 \cdot \omega} = \frac{P_2 (\tan \varphi_2 - \tan \varphi_1')}{V^2 \cdot \omega}$

→ CAPACITÀ DEL CONDENSATORE NECESSARIA PER RIFASARE UN CARICO DA  $\varphi_2$  A  $\varphi_1'$

SISTEMI SINUSOIDALI TRIFASE

• GENERATORE TRIFASE



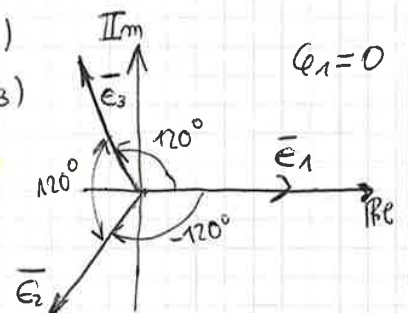
DISPONIBILE TRA IL MORSETTO DEL DIPOLO E IL PUNTO DI NEUTRO

$$\begin{cases} e_1 = \hat{E}_1 \sin(\omega t + \varphi_1) \\ e_2 = \hat{E}_2 \sin(\omega t + \varphi_2) \\ e_3 = \hat{E}_3 \sin(\omega t + \varphi_3) \end{cases}$$

$$\hat{E}_1 = \hat{E}_2 = \hat{E}_3 = \hat{E}$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 - 120^\circ$$

$$\varphi_3 = \varphi_1 + 120^\circ$$

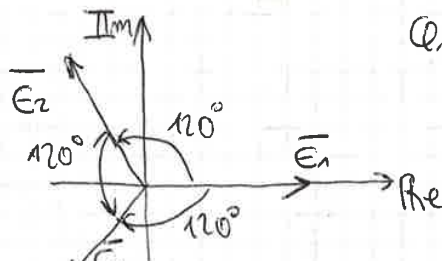


TERNA SIMMETRICA DESTROSA  
ORARIO

- GENERATORI ISOFREQUENZIALI
- STESSA AMPIEZZA
- SFASATI DI 120° TRA DI LORO

$\bar{V}_{12}, \bar{V}_{31}, \bar{V}_{23}$ : TENSIONI CONCATENATE (0 DI LINEA)

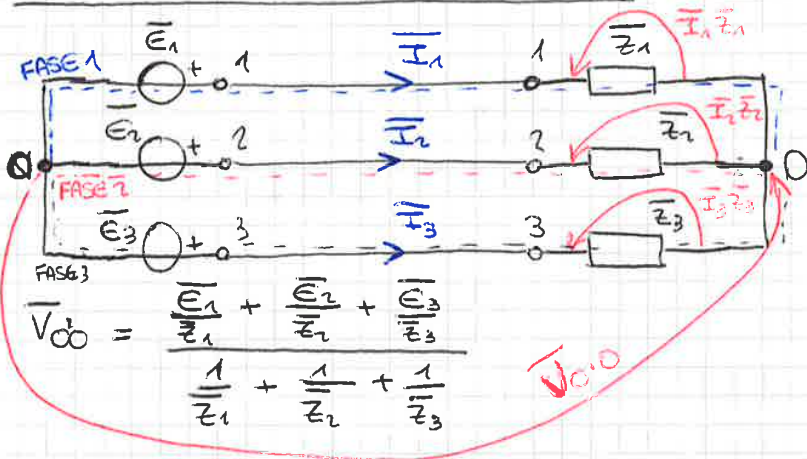
$\varphi_2 = \varphi_1 + 120$   
 $\varphi_3 = \varphi_1 - 120$



$\varphi_1 = 0$   
 TERNA SIMMETRICA SINISTRORSA  
 ANTIORARIO

$\begin{cases} z_{12} = z_{23} = z_{31} = z_{\Delta} \\ \varphi_{z_{12}} = \varphi_{z_{23}} = \varphi_{z_{31}} = \varphi_{z_{\Delta}} \end{cases}$ 
 ← UN'UGUAGLIANZA TRA NUMERI COMPLESSI  
 CHE FRA LE FASI DEI NUMERI COMPLESSI

**SISTEMA TRIFASE ELEMENTARE**



$\bar{I}_1 = ?$   
 $\bar{I}_2 = ?$   
 $\bar{I}_3 = ?$

1-1, 2-2, 3-3: LINEE DI FASE

FASE: PARTE DI CIRCUITO CHE SI INDIVIDUA PARTENDO DAL CENTRO STELLA (O) FINO AD ARRIVARE ALL'ALTRO CENTRO STELLA (O').

$$\bar{V}_{0'0} = \frac{\bar{E}_1}{z_1} + \frac{\bar{E}_2}{z_2} + \frac{\bar{E}_3}{z_3}$$

$$\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_3}$$

$$\bar{E}_1 - z_1 \bar{I}_1 - \bar{V}_{0'0} = 0 \rightarrow \bar{I}_1 = \frac{\bar{E}_1 - \bar{V}_{0'0}}{z_1}$$

$$\bar{E}_2 - z_2 \bar{I}_2 - \bar{V}_{0'0} = 0 \rightarrow \bar{I}_2 = \frac{\bar{E}_2 - \bar{V}_{0'0}}{z_2}$$

$$\bar{E}_3 - z_3 \bar{I}_3 - \bar{V}_{0'0} = 0 \rightarrow \bar{I}_3 = \frac{\bar{E}_3 - \bar{V}_{0'0}}{z_3}$$

• SISTEMA SIMMETRICO (NELLE TENSIONI) ED EQUILIBRATO (NEI CARICHI):

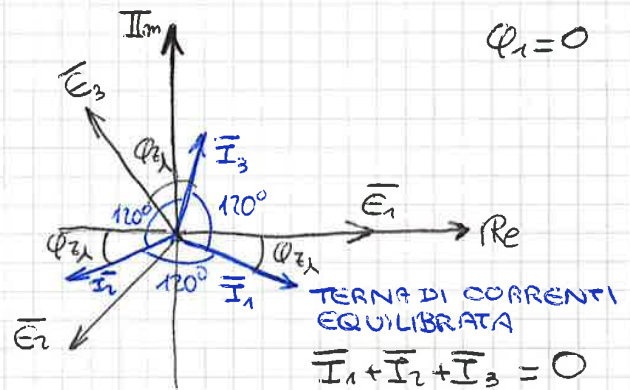
$$\bar{V}_{0'0} = \frac{1}{z_{\Delta}} (\bar{E}_1 + \bar{E}_2 + \bar{E}_3) = 0$$

$$z_1 = z_2 = z_3 = z_{\Delta}$$

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}_1}{z_{\Delta}} = \frac{E \angle 0}{z_{\Delta} \angle \varphi_{z_{\Delta}}} = \frac{E}{z_{\Delta}} \angle -\varphi_{z_{\Delta}}$$

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{E}_2}{z_{\Delta}} = \frac{E \angle -120}{z_{\Delta} \angle \varphi_{z_{\Delta}}} = \frac{E}{z_{\Delta}} \angle -120 - \varphi_{z_{\Delta}}$$

$$\bar{I}_3 = \frac{\bar{E}_3}{z_{\Delta}} = \frac{E \angle 120}{z_{\Delta} \angle \varphi_{z_{\Delta}}} = \frac{E}{z_{\Delta}} \angle 120 - \varphi_{z_{\Delta}}$$



OGNI CORRENTE È INDIPENDENTE DALLE ALTRE DUE.

- $z_{\Delta} > 0$ : CARICO SUPPOSTO INDUTTIVO
- TERNA SIMMETRICA DESTROSA
- È CONSIDERATA RMS

OGNI CORRENTE È SFASATA IN RITARDO DI  $\varphi_{z_{\Delta}}$  RISPETTO ALLA TENSIONE DEL GENERATORE CORRISPONDENTE

• SISTEMA A 4 FILI CON FILO DI NEUTRO = CIRCUITO CIRCUITO IDEALE

$\bar{V}_{0'0} = 0 \rightarrow$  È ANNULLATA DAL CIRCUITO CIRCUITO IDEALE, INDIPENDENTEMENTE DALLE CONDIZIONI DEL CIRCUITO.

$$\bar{E}_1 - z_1 \bar{I}_1 = 0 \rightarrow \bar{I}_1 = \bar{E}_1 / z_1$$

$$\bar{E}_2 - z_2 \bar{I}_2 = 0 \rightarrow \bar{I}_2 = \bar{E}_2 / z_2$$

$$\bar{E}_3 - z_3 \bar{I}_3 = 0 \rightarrow \bar{I}_3 = \bar{E}_3 / z_3$$

FORZO OGNI FASE, RICHIEDENDOSI VERSO IL FILO DI NEUTRO, A LAVORARE INDIPENDENTEMENTE DALLE ALTRE.



$$\bar{V}_{AB} = \bar{V}_{AC} + \bar{V}_{CD} + \bar{V}_{DB} = 78 + j30 \text{ V}$$

RISOLTO CON BUCHEROT (METODO DELLE POTENZE):

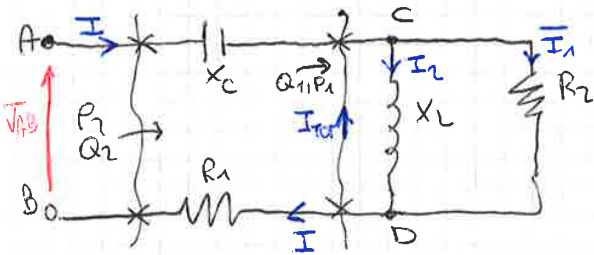
$$Q_{X_L} = I_2^2 \cdot X_L = Q_1 = 90 \text{ VAR}$$

$$V_{CD} = X_L \cdot I_2 = 30 \text{ V}$$

$$I_1 = \frac{V_{CD}}{R_2} = 15 \text{ A}$$

$$P_{R_2} = R_2 \cdot I_1^2 = P_1 = 450 \text{ W}$$

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = V_{CD} \cdot I_{TOT} = 458,191 \text{ VA}$$



$$I_{TOT} = \frac{S_1}{V_{CD}} = 15,3 \text{ A}$$

$$Q_{X_C} = -X_C \cdot I^2 = -1170 \text{ VAR}$$

$$P_{R_1} = R_1 \cdot I^2 = 234 \text{ W}$$

$$P_2 = P_1 + P_{R_1} = 684 \text{ W}$$

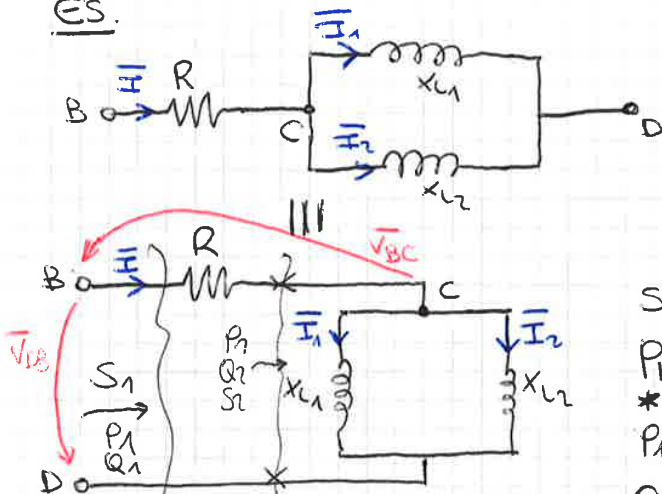
$$Q_2 = Q_1 + Q_{X_C} = -1080 \text{ VAR}$$

$$S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} = V_{AB} \cdot I = 1278,38 \text{ VA}$$

$$V_{AB} = S_2 / I = 83,55 \text{ V}$$

NON USARE KIRCHOFF CON BUCHEROT!

ES.



$$I = 100 \text{ A}$$

$$V_{BC} = 50 \text{ V}$$

$$V_{DB} = 100 \text{ V}$$

$$X_{L1} = 10 \Omega$$

$$R = ?$$

$$X_{L2} = ?$$

$$S_1 = V_{DB} \cdot I = 10 \text{ KVA}$$

$$P_R = \frac{V_{BC} \cdot I}{S} = 5 \text{ KW}$$

$$P_1 = P_R = 5 \text{ KW}$$

$$Q_1 = \pm \sqrt{S_1^2 - P_1^2} = \pm 8,66 \text{ KVAR} \leftarrow \text{I BIPOLI SONO DI TIPO INDUTTIVO QUINDI CONSIDERO IL RISULTATO COLT.}$$

$$P_2 = 0 \text{ W} \leftarrow \text{CI SONO SOLO ELEMENTI INDUTTIVI}$$

$$Q_2 = Q_1 = 8,66 \text{ KVAR} \leftarrow \text{C'È SOLO LA RESISTENZA TRA LE 2 PARTI DI CIRCUITO ED ASSORBE POTENZA ATTIVA}$$

$$S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} = |Q_2| = Q_2 = 8,66 \text{ KVA}$$

$$S_2 = V_{CD} \cdot I = 8,66 \text{ KVA}$$

$$* R = \frac{P_R}{I^2} = 0,5 \Omega$$

$$V_{CD} = \frac{S_2}{I} = 86,6 \text{ V}$$

$$Q_{x1} = -X_1 \cdot I_1^2 = -201,91 \text{ VAR}$$

$$P_2 = 0 \text{ W}$$

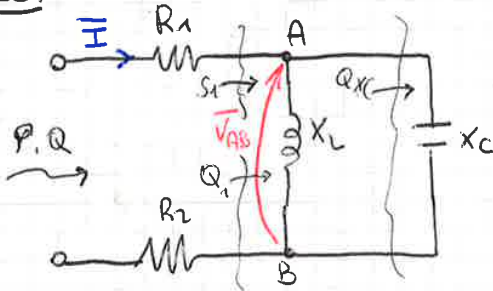
$$Q_2 = Q_1 - Q_{x1} = \pm 222 - (-201,91) = \pm 423,91 \text{ VAR} \rightarrow \text{REATT. INDUT.} \Rightarrow Q_2 > 0$$

$$S_2 = |Q_2| = Q_2 = 423,91 \text{ VA}$$

$$Q_2 = \frac{V_{CB}^2}{X_2}$$

$$X_2 = \frac{V_{CB}^2}{Q_2} = 23,41 \Omega$$

ES.



$$P = 1 \text{ kW}$$

$$Q = 70 \text{ VAR}$$

$$X_C = 2 \Omega$$

$$R_1 = 10 \Omega$$

$$V_{AB} = 10 \text{ V (RMS)}$$

$$R_2, X_L = ?$$

$$Q_{XC} = -\frac{V_{AB}^2}{X_C} = -50 \text{ VAR}$$

$$Q = Q_{XL} + Q_{XC} \rightarrow Q_{XL} = Q - Q_{XC} = 120 \text{ VAR}$$

$$X_L = \frac{V_{AB}^2}{Q_{XL}} = 0,83 \Omega$$

$$Q_1 = Q = 70 \text{ VAR}$$

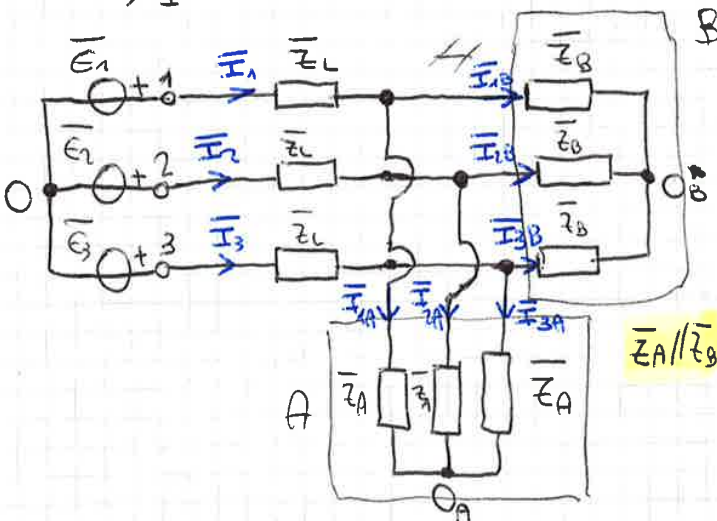
$$S_1 = |Q_1| = V_{AB} \cdot I$$

$$I = \frac{S_1}{V_{AB}} = 7 \text{ A}$$

$$P_{R1} = R_1 \cdot I^2 = 490 \text{ W}$$

$$P = P_{R1} + P_{R2} \rightarrow P_{R2} = P - P_{R1} = 510 \text{ W}$$

$$R_2 = P_{R2} / I^2 = 10,41 \Omega$$



METODO DEL MONOFASE EQUIVAL.

$\bar{Z}_L$ : IMPEDENZA DI LINEA

$H_p$ : SISTEMA SIMMETRICO ED EQUILIBRATO

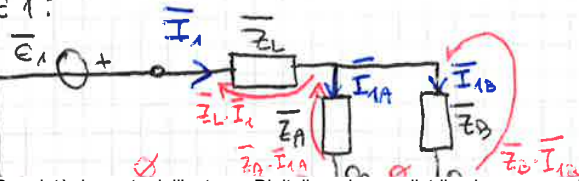
$\bar{V}_{OA} = \bar{V}_{OB} = \bar{V}_{OC} = 0$   
 POSSO CONSIDERARE UNA FASE ALLA VOLTA

$A, B$ : CARICHI A STELLA (TRIFASE)

$\bar{Z}_A$ : IMPEDENZA CARICO A  
 $\bar{Z}_B$ : IMPEDENZA CARICO B

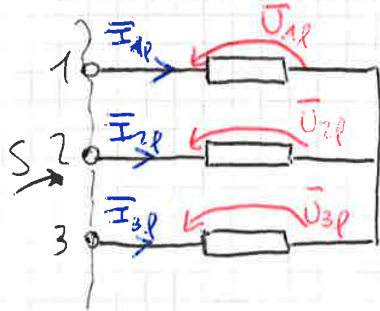
→ NELLA NOSTRA IPOTESI SONO UGUALI PER TUTTE E 3 LE FASI

FASE 1:



$$\begin{cases} \bar{E}_1 - \bar{Z}_L \cdot \bar{I}_1 - \bar{Z}_A \cdot \bar{I}_{1A} = 0 \\ \bar{Z}_A \cdot \bar{I}_{1A} - \bar{Z}_B \cdot \bar{I}_{1B} = 0 \\ \bar{I}_1 = \bar{I}_{1A} + \bar{I}_{1B} \end{cases}$$

## POTENZE NEL TRIFASE



$$\vec{S} = \vec{S}_1 + \vec{S}_2 + \vec{S}_3 = P_1 + jQ_1 + P_2 + jQ_2 + P_3 + jQ_3 = (P_1 + P_2 + P_3) + j(Q_1 + Q_2 + Q_3)$$

$$\begin{cases} P_1 = U_{1\phi} I_{1\phi} \cos(\bar{U}_{1\phi} \wedge \bar{I}_{1\phi}) \\ Q_1 = U_{1\phi} I_{1\phi} \sin(\bar{U}_{1\phi} \wedge \bar{I}_{1\phi}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_2 = U_{2\phi} \cdot I_{2\phi} \cdot \cos(\bar{U}_{2\phi} \wedge \bar{I}_{2\phi}) \\ Q_2 = U_{2\phi} \cdot I_{2\phi} \cdot \sin(\bar{U}_{2\phi} \wedge \bar{I}_{2\phi}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_3 = U_{3\phi} \cdot I_{3\phi} \cdot \cos(\bar{U}_{3\phi} \wedge \bar{I}_{3\phi}) \\ Q_3 = U_{3\phi} \cdot I_{3\phi} \cdot \sin(\bar{U}_{3\phi} \wedge \bar{I}_{3\phi}) \end{cases}$$

### • SISTEMA SIMMETRICO ED EQUILIBRATO

$$|\bar{U}_{1\phi}| = |\bar{U}_{2\phi}| = |\bar{U}_{3\phi}| = U_\phi$$

$$|\bar{I}_{1\phi}| = |\bar{I}_{2\phi}| = |\bar{I}_{3\phi}| = I_\phi$$

$$\bar{U}_{1\phi} \wedge \bar{I}_{1\phi} = \bar{U}_{2\phi} \wedge \bar{I}_{2\phi} = \bar{U}_{3\phi} \wedge \bar{I}_{3\phi} = \varphi$$

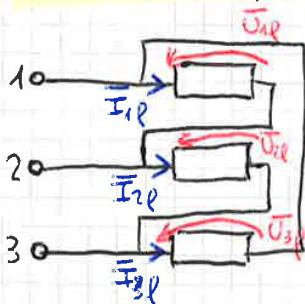
$$\begin{cases} P = P_1 + P_2 + P_3 = 3 U_\phi I_\phi \cos \varphi \\ Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 3 U_\phi I_\phi \sin \varphi \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_\phi = V/\sqrt{3} \\ I_\phi = I \end{cases} \rightarrow \begin{cases} P = 3 \frac{V}{\sqrt{3}} I \cos \varphi = \sqrt{3} V I \cos \varphi \\ Q = 3 \frac{V}{\sqrt{3}} I \sin \varphi = \sqrt{3} V \cdot I \sin \varphi \\ S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} V \cdot I \end{cases}$$

→ SFASAMENTO TRA LA TENSIONE DI FASE E LA CORRENTE DI FASE

→ GRANDEZZE DI LINEA

### • TRIPOLLO A TRIANGOLO

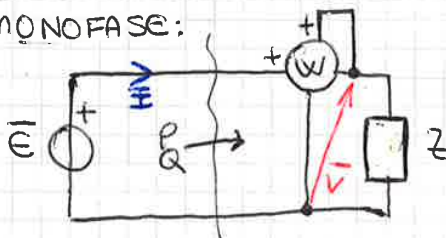


$$\begin{cases} P = 3 U_\phi I_\phi \cos \varphi \\ Q = 3 U_\phi I_\phi \sin \varphi \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_\phi = V \\ I_\phi = \frac{I}{\sqrt{3}} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} P = \sqrt{3} V I \cos \varphi \\ Q = \sqrt{3} V \cdot I \sin \varphi \\ S = \sqrt{3} V \cdot I \end{cases}$$

## COME MISURARE LA POTENZA NEL TRIFASE

### MONOFASE:



WATT METRO: MISURA SOLO LA POTENZA ATTIVA

$$P = V \cdot I \cdot \cos(\bar{V} \wedge \bar{I})$$



VAR METRO: MISURA SOLO LA POTENZA REATTIVA

$$Q = V \cdot I \sin(\bar{V} \wedge \bar{I})$$

SE VOLESSI LA POTENZA APPARENTE, USO UN AMPEROMETRO E UN VOLTMETRO E CALCOLO I VAL E EFFICACI



$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} V_N \cos\phi} \Rightarrow \frac{100 \cdot 10^3 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 0,9} = 160,38 \text{ A}$$

$$R = \frac{P_N}{3 I_N^2} = 1,3 \Omega$$

SIAMO IN TRIFASE

$$X = \frac{Q_N}{3 I_N^2} \Rightarrow \frac{P_N \cdot \tan\phi}{3 I_N^2}$$

$$\bar{Z}_L = R + jX = 1,32 + j33,49 \Omega$$

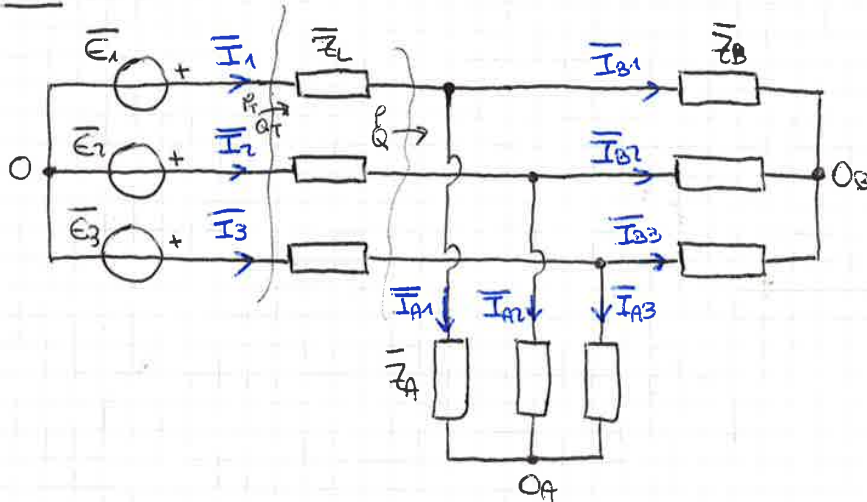
IMPEDENZA DEL CARICO

R e  $\cos\phi$  NON SONO NOMINALI PERCHÉ IL LORO VALORE È INDIPENDENTE DALLA TENSIONE APPLICATA

$$V = 400 \text{ V}$$

$$E = \frac{V}{\sqrt{3}} \begin{cases} \bar{E}_1 = E \angle 0^\circ \\ \bar{E}_2 = E \angle -120^\circ \\ \bar{E}_3 = E \angle +120^\circ \end{cases}$$

Es.



$$\begin{cases} \bar{E}_1 = 220 \angle 0^\circ \\ \bar{E}_2 = 220 \angle -120^\circ \\ \bar{E}_3 = 220 \angle +120^\circ \end{cases} \text{ RMS}$$

$$\bar{Z}_L = 1 + j0,7 \Omega$$

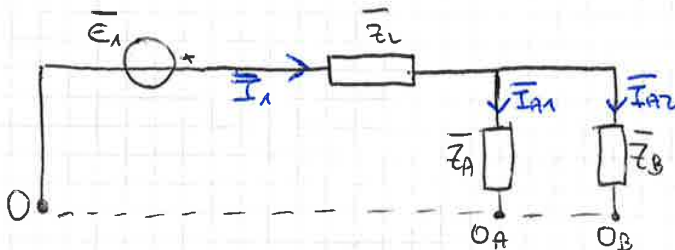
$$\bar{Z}_A = 15 + j25 \Omega$$

$$\bar{Z}_B = 10 - j5 \Omega$$

- DETERMINARE TUTTE LE CORRENTI

- DETERMINARE  $P_A, P_B, \eta$

MONOFASE EQUIVALENTE (FASE 1):



$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}_1}{\bar{Z}_A // \bar{Z}_B + \bar{Z}_L} = 19,8 \angle 2,05^\circ$$

$$\bar{I}_{A1} = \bar{I}_1 \frac{\bar{Z}_B}{\bar{Z}_A + \bar{Z}_B} = 6,9 \angle -63,18^\circ$$

$$\bar{I}_{B1} = \bar{I}_1 - \bar{I}_{A1} = 18,0 \angle 22,42^\circ$$

MONOFASE EQUIVALENTE (FASE 2):

$$\bar{I}_2 = 19,8 \angle -117,95^\circ$$

$$\bar{I}_{A2} = 6,9 \angle -183,18^\circ \Rightarrow \phi_{I_{A1}} - 120^\circ$$

$$\bar{I}_{B2} = 18,0 \angle -97,58^\circ$$

PER LE ALTRE DUE FASI BASTA PRENDERE LE GRANDEZZE OTTENUTE DAL MONOFASE EQUIVALENTE DELLA FASE 1 E SFASARLE DELLO STESSO ANGOLO DI CUI SONO SFASATI I RISPETTIVI GENERATORI DI FASE.

MONOFASE EQUIVALENTE (FASE 3):

$$\bar{I}_3 = 19,8 \angle 122,05^\circ$$

$$\bar{I}_{A3} = 6,9 \angle 56,82^\circ$$

$$\bar{I}_{B3} = 18,0 \angle 142,42^\circ$$

$$P_A = 3 R_A I_A^2$$

$$P_B = 3 R_B I_B^2$$

$$Q_A = 3 X_A I_A^2$$

$$Q_B = 3 X_B I_B^2$$

$$P = P_A + P_B$$

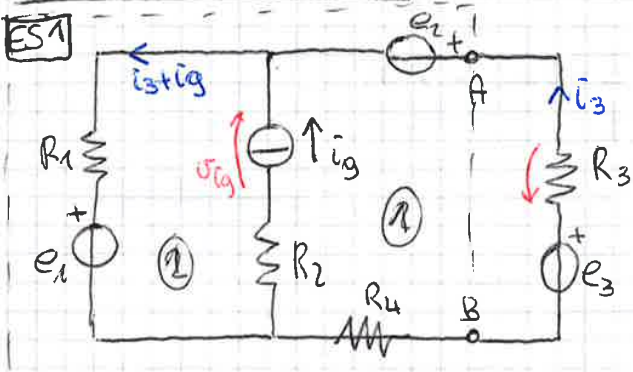
$$Q = Q_A + Q_B$$

$$P_L = 3 R_L \cdot I^2$$

$$Q_L = 3 X_L \cdot I^2$$

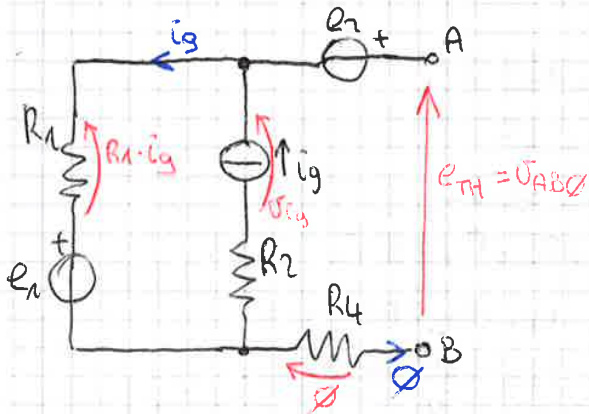
ES: ESAME 28.01.2013

ES1

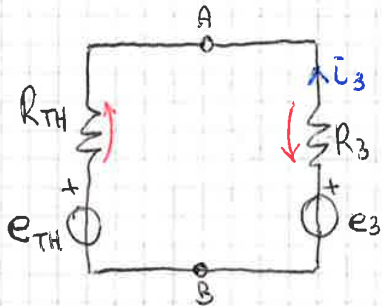


- $e_1 = 10 \text{ V}$
- $e_2 = 10 \text{ V}$
- $e_3 = 65 \text{ V}$
- $i_g = 1 \text{ A}$
- $R_1 = 5 \Omega$
- $R_2 = 5 \Omega$
- $R_3 = 10 \Omega$
- $R_4 = 7,5 \Omega$

- a)  $\epsilon_{\text{THEV A-B}} = ?$   
 $R_{\text{TH}} = ?$
- b)  $P_{e_3} \text{ (EROGATA)} = ?$
- c)  $P_{i_g} \text{ (EROGATA)} = ?$



$e_{\text{TH}} = U_{AB0} = e_2 + R_1 i_g + e_1 = 25 \text{ V}$   
 DISATTIVO I GENERATORI:  
 $R_{\text{TH}} = R_1 + R_4 = 12,5 \Omega$

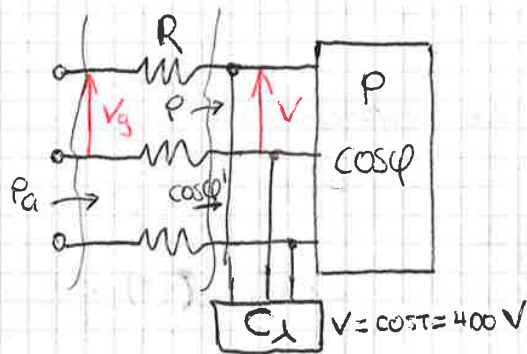


$P_{e_3} = e_3 \cdot i_3$   
 $i_3 = \frac{e_3 - e_{\text{TH}}}{R_3 + R_{\text{TH}}} = 1,78 \text{ A}$   
 $P_{e_3} = 115,6 \text{ W}$

SE USO LA MAGLIA ①:  $U_{ig} + e_2 + R_3 i_3 - e_3 + R_4 i_3 - R_2 i_g = 0 \rightarrow U_{ig} = 28,9 \text{ V}$   
 SE USO LA MAGLIA ②:  $U_{ig} - R_1 (i_3 + i_g) - e_1 - R_2 i_g = 0$

$P_{i_g} = U_{ig} \cdot i_g = 28,9 \text{ W}$

ES.2



- $V = 400 \text{ V}$
- $P = 30 \text{ kW}$
- $\cos \varphi = 0,6 \text{ (INDUTTIVO)}$
- $R = 0,1 \Omega$
- $f = 50 \text{ Hz}$
- RMS
- a)  $V_g, \eta = ?$
- b)  $C_\lambda: \cos \varphi' = 0,9 = ?$
- c)  $\eta' = ?$

$I = \frac{P}{\sqrt{3} V \cdot \cos \varphi} = 72,16 \text{ A}$

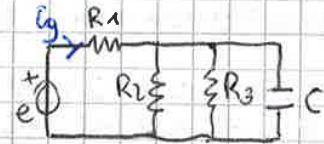
$P_R = 3 R \cdot I^2 = 1562,5 \text{ W}$

$\eta = \frac{P}{P + P_R} = 0,951 = 95,1\%$

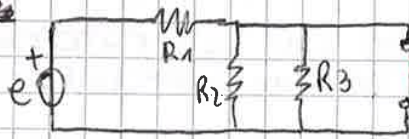


$t \geq 0$ :

$$v_c(t) = (v_c(t=0) - v_c(t=\infty)) e^{-\frac{t}{\tau}} + v_c(t=\infty)$$



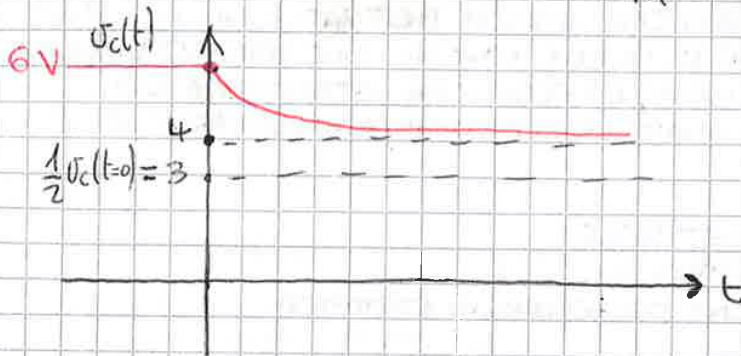
$$\tau = R_{eq} \cdot C = R_1 // R_2 // R_3 \cdot C = 1,33 \Omega \cdot 1 \mu F = 1,33 \mu s$$



$$v_c(t=\infty) = e \cdot \frac{R_2 // R_3}{R_1 + R_2 // R_3} = 4 \text{ V}$$

$$v_c(t) = 2 e^{-t/\tau} + 4 \text{ V}$$

$$e - R_1 i_e - v_c(t) = 0 \rightarrow i_e = \frac{e - v_c(t)}{R_1} = \frac{2}{1,33} - 0,15 e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ A}$$



$t^* = \infty$  NON CI ARRIVA MAI!

MASCHERE

ELETTRICITÀ





- QUANDO SI STUDIANO IL FUNZIONAMENTO E LE PERFORMANCE, SI USANO CIRCUITI ELETTRICI EQUIVALENTI PER SEMPLIFICARE I CALCOLI
- IL CIRCUITO EQUIVALENTE CONTIENE INFORMAZIONI SIA SULLA PARTE ELETTRICA CHE SU QUELLA MAGNETICA DELLA MACCHINA.

LA CONVERSIONE DI ENERGIA AVVIENE A CAUSA DELLE INTERAZIONI TRA QUANTITÀ ELETTRICHE E QUANTITÀ MAGNETICHE.  
OGNI CONVERSIONE AVVIENE CON UNA PERDITA DI ENERGIA CHE DETERMINA L'INCREMENTO DI TEMPERATURA. LA TEMPERATURA DI FUNZIONAMENTO SI RIFERISCE POI SULLE PERFORMANCE E SULLA DURATA DELLA MACCHINA.

LA CONVERSIONE ELETTROMECCANICA DI ENERGIA IMPLICA LA TRASFORMAZIONE DI ENERGIA ELETTRICA IN MECCANICA E VICEVERSA.  
L'ACCOPLIAMENTO TRA I DUE SISTEMI SI HA PER VIA DI UN CAMPO MAGNETICO:

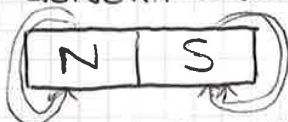


LA CONVERSIONE ELETTROMECCANICA SI BASA SU DIVERSI PRINCIPI FISICI:

- FORZE MECCANICHE SU CONDUTTORI PERCORSI DA CORRENTE
- FORZE ELETTROMOTRICI (TENSIONI) AI CAPI DI CONDUTTORI IN MOVIMENTO IN UN CAMPO MAGNETICO
- FORZE MECCANICHE SUI MATERIALI FERROMAGNETICI IMMERSI IN UN CAMPO MAGNETICO TALI DA CERCARE DI ALLINEARE L'OGGETTO CON LE LINEE DI CAMPO
- FORZE MECCANICHE CHE SI ESERCITANO SULLE ARMATURE DI UN CONDENSATORE SOTTOPOSTE A TENSIONE
- EFFETTO PIEZOELETTRICO: GENERAZIONE DI FORZA ELETTROMOTRICE QUANDO SI SOTTOPONE A PRESSIONE UN CRISTALLO
- MAGNETOSTRIZIONE: SOTTO PONENDO A PRESSIONE UN OGGETTO MAGNETOSTRITTIVO SI GENERA UN CAMPO MAGNETICO

### LEGGI FONDAMENTALI DELL'ELETTROMAGNETISMO

UN MAGNETE PERMANENTE È LA SORGENTE PIÙ SEMPLICE CAPACE DI GENERARE UN CAMPO MAGNETICO.



ESSO PRESENTA DUE POLARITÀ: PER CONVENZIONE, LE LINEE DI FLUSSO ESCONO DALL'NORD ED ENTRANO DAL SUD. POLI OMOLOGHI SI RESPINGONO, MENTRE POLI CON POLARITÀ DIVERSA SI ATTRAGGONO.

LE LINEE DI POLO SI CHIUDONO SEMPRE, QUINDI NON È POSSIBILE TROVARE UN 'MONOPOLO MAGNETICO'.

LA MAGGIOR PARTE DEI FENOMENI MAGNETICI PUÒ ESSERE DESCRITTA IN TERMINI DI:

- CAMPO MAGNETICO  $\vec{H}$  (A/m) } VETTORI
  - INDUZIONE MAGNETICA  $\vec{B}$  (T o Wb/m<sup>2</sup>) } VETTORI
  - FLUSSO MAGNETICO  $\Phi$  (Wb) } GRANDEZZA SCALARE
- WEBER (V·s)

LE LINEE DI ~~FLUSSO~~ CAMPO SONO TANGENTI IN OGNI PUNTO DELLO SPAZIO AD UNO DEI VETTORI CHE DESCRIVONO UN CAMPO ( $\vec{H}$  o  $\vec{B}$ ).

LE 4 DITA DELLA MANO INDICANO IL VERSO DELLE CORRENTI, MENTRE IL POLLICE INDICA LA DIREZIONE DELLE LINEE DI CAMPO.

• PROPRIETÀ MAGNETICHE DEI MATERIALI

$B = \mu \cdot H = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H \rightarrow$  CAMPO MAGNETICO

INDUZIONE MAGNETICA

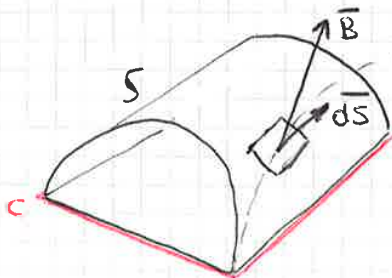
PERMEABILITÀ RELATIVA MEDIA =  $\frac{\mu}{\mu_0}$

PERMEABILITÀ MAGNETICA NEL VUOTO ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m)

PERMEABILITÀ MAGNETICA MEDIA DEL MATERIALE (H/m)

• INDUZIONE ELETTROMAGNETICA (LEGGE DI LENZ)

LE VARIAZIONI DI FLUSSO MAGNETICO PRODUCONO DELLE FORZE ELETTROMOTRICI AI CAPI DEI CONDUTORI; QUESTE FEM PRODUCONO UN PASSAGGIO DI CORRENTE CHE A SUA VOLTA GENERERÀ UN CAMPO MAGNETICO.

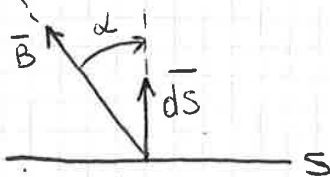


$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$

FLUSSO MAGNETICO

SE S È UNA SUPERFICIE CHIUSA  $\Rightarrow \Phi = 0$

SE L'INDUZIONE MAGNETICA NON È ALLINEATA A  $d\vec{S}$ :

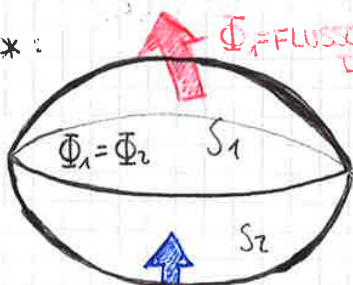


$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$

SE  $B \perp S \Rightarrow \Phi = B \cdot S$

SE  $B \parallel S \Rightarrow \Phi = 0$

DIM\*:



$\Phi_1 + \Phi_2 = 0 \Rightarrow |\Phi_1| = |\Phi_2|$

LINEA DI FLUSSO



UN TUBO DI FLUSSO È UNA REGIONE DELLO SPAZIO LIMITATA DA LINEE DI FLUSSO PASSANTI ATRAVVERSO UNA LINEA DI CONTORNO C.

$B_1 \cdot S_1 = B_2 \cdot S_2$

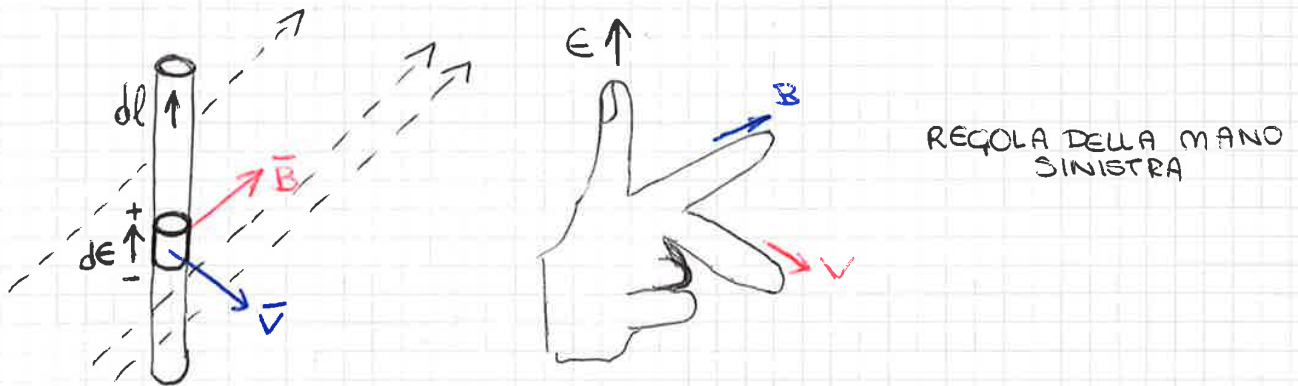
SICCOME IL FLUSSO NEL TUBO È COSTANTE, SE LA SUPERFICIE È PIÙ PICCOLA B DIVENTA PIÙ GRANDE.

IL CONCETTO DI TUBO DI FLUSSO È IMPORTANTE PER DEFINIRE IL FLUSSO CONCATENATO CON UN AVVOLGIMENTO.



## 1<sup>a</sup> LEGGE DI LORENTZ

UN ALTRO MODO DI PRODURRE UNA VARIAZIONE DI FLUSSO MAGNETICO È FAR MUOVERE UN CONDUTTORE IN UN CAMPO MAGNETICO GENERATO ESTERNAMENTE.

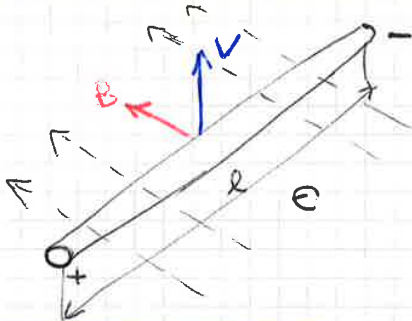


REGOLA DELLA MANO SINISTRA

AI CAPI DEL CONDUTTORE VIENE INDOTTA UNA FEM PROPORZIONALE AL PRODOTTO VETTORIALE TRA IL VETTORE INDUZIONE E IL VETTORE VELOCITÀ DEL CONDUTTORE:

$$dE = (\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

ES: CAMPO MAGNETICO UNIFORME - CONDUTTORE RETTILINEO



PER AVERE UNA PRODUZIONE DI FEM IL CONDUTTORE DEVE AVERE UNA COMPONENTE DI MOVIMENTO ORTOGONALE ALLE LINEE DI CAMPO MAGNETICO.

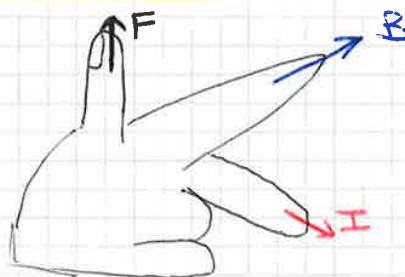
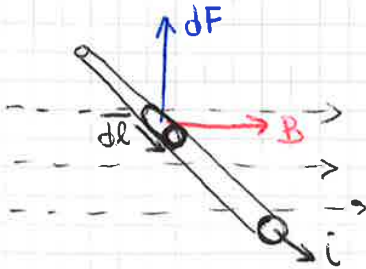
$$E = v \cdot B \cdot l$$

SE IL CONDUTTORE SI MUOVE PARALLELAMENTE ALLE LINEE DI CAMPO:  $E = 0$

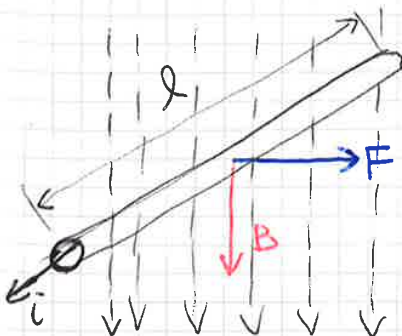
## 2<sup>a</sup> LEGGE DI LORENTZ

UN CONDUTTORE PERCORSO DA CORRENTE IMMERSO IN UN CAMPO MAGNETICO GENERATO ESTERNAMENTE È SOGGETTO AD UNA FORZA F PARI A:

$$d\vec{F} = I (d\vec{l} \wedge \vec{B})$$



ES: CAMPO MAGNETICO UNIFORME - CONDUTTORE RETTILINEO



SE IL CONDUTTORE È ORTOGONALE ALLE LINEE DI CAMPO:

$$F = I \cdot B \cdot l \quad (\text{max})$$

SE IL CONDUTTORE È PARALLELO ALLE LINEE DI CAMPO:

$$F = 0$$

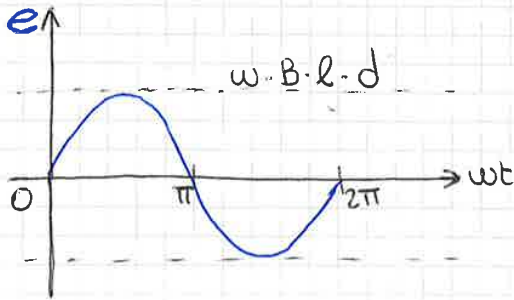


$$\left. \begin{aligned} e_1 &= B \cdot l \cdot v \cdot \sin \beta = e_2 \\ e &= 2 \cdot e_1 = 2 \cdot B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha \\ \alpha &= \omega t, \quad v = \omega \frac{d}{2} \end{aligned} \right\} e = \omega \cdot B \cdot l \cdot d \cdot \sin(\omega t)$$

LA POSIZIONE DELLA SPIRA RELATIVA TRA LE LINEE DEL CAMPO MAGNETICO E IL VERSORE DELLA SPIRA INDIVIDUA UN ANGOLO  $\alpha$  CHE VARIA AL RUOTARE DELLA SPIRA. QUINDI, A SECONDA DELLA POSIZIONE DELLA SPIRA NEL CAMPO MAGNETICO SI AVRANNO FEM DI VALORE DIVERSO. PER ESEMPIO, CON LA SPIRA DISPOSTA IN POSIZIONE 2 SI AVRA FEM NULLA E DISPOSTA IN POSIZIONE 1 SI AVRA FEM MASSIMA.

$\alpha = \frac{\pi}{2}, \beta = 0$

$\alpha = \frac{\pi}{2}, \beta = \frac{\pi}{2}$



MAN MANO CHE LA SPIRA RUOTA, SI TROVA UNA FEM INDOTTA DI TIPO SINUSOIDALE.

### MATERIALI PER MACCHINE ELETTRICHE

I MATERIALI UTILIZZATI PER LA REALIZZAZIONE DELLE MACCHINE ELETTRICHE SERVONO PER REALIZZARE DEI CIRCUITI ELETTRICI O MAGNETICI. PER QUANTO RIGUARDA I CIRCUITI MAGNETICI, VERRANNO UTILIZZATI QUEI MATERIALI CHE PERMETTONO DI REALIZZARE UN TUBO DI FLUSSO IL PIU' PERFETTO POSSIBILE.

LE PROPRIETA' DEI MATERIALI INFLUENZANO LE PERFORMANCE E IL COSTO DELLA MACCHINA.

DAL PUNTO DI VISTA MAGNETICO, I MATERIALI SONO CLASSIFICATI IN BASE ALLA LORO PERMEABILITA' MAGNETICA RELATIVA IN:

- DIAMAGNETICI (ES. RAME, ORO, ARGENTO)  $\mu_r < 1 (\approx 1)$
- PARAMAGNETICI (ES. ARIA, ALLUMINIO, PLATINO)  $\mu_r > 1 (\approx 1)$
- FERROMAGNETICI (ES. FERRO, COBALTO, NICHEL)  $\mu_r \gg 1$

↓  
UTILI PER LA REALIZZAZIONE DEI TUBI DI FLUSSO  $\mu_r = \mu_r(H) = (10^2 \div 10^4)$



GLI ANDAMENTI DELL'INDUZIONE MAGNETICA DELLE VARIE CLASSI DI MATERIALI SONO LINEARI PERCHE' LA PERMEABILITA' MAGNETICA DI QUESTI MATERIALI NON CAMBIA AL VARIARE DEL CAMPO.

CIÒ IMPLICA CHE L'INDUZIONE MAGNETICA È DIRETTAMENTE PROPORZIONALE AL CAMPO

MAGNETICO SECONDO UN COEFFICIENTE COSTANTE CHE NON DIFENDE DAL CAMPO MAGNETICO.

I MATERIALI FERROMAGNETICI, INVECE, HANNO UNA PERMEABILITA' RELATIVA ELEVATA SOLO PER UN ~~numero~~ NUMERO LIMITATO DI VALORI DI CAMPO MAGNETICO: PIU' IL CAMPO MAGNETICO AUMENTA E PIU' IL LORO COMPORTAMENTO TENDE AL PARAMAGNETISMO, CIOE' LA PERMEABILITA' RELATIVA NON È COSTANTE IN FUNZIONE DEL CAMPO MAGNETICO.

ALL'INTERNO DEI MATERIALI FERROMAGNETICI, SI POSSONO INDIVIDUARE DELLE STRUTTURE MICROSCOPICHE DETTE DOMINI DI WEISS ALL'INTERNO DEI QUALI TUTTE LE MOLECOLE HANNO LO STESSO MOMENTO DI DIPOLO MAGNETICO E OGNI UNO DI QUESTI DOMINI SI COMPORTA COME UN MICROSCOPICO MAGNETE PERMANENTE ORIENTATO CASUALMENTE.

SE SI IMMERGE IL MATERIALE IN UN CAMPO MAGNETICO GENERATO ESTERNAMENTE,

IL CICLO DI ISTERESI PUÒ ESSERE SIMMETRICO SE IL VALORE MASSIMO E MINIMO DI CAMPO MAGNETICO SONO UGUALI ED OPPOSTI O ASIMMETRICO SE QUESTI VALORI SONO DIVERSI. IN QUESTO CASO, PER OGNI COPPIA DI VALORI DI CAMPO MASSIMO E MINIMO, SI AVRANNO DEI CICLI DI ISTERESI DI FORMA E AREA DIVERSA, CON GLI ESTREMI NON SIMMETRICI RISPETTO ALL'ORIGINE. SE IL CICLO DI ISTERESI È SIMMETRICO  $+H_m$  E  $-H_m$  SI TROVANO SULLA CURVA DI PRIMA MAGNETIZZAZIONE DEL MATERIALE.

I MATERIALI FERROMAGNETICI POSSONO ESSERE SUDDIVISI IN MATERIALI DOLCI E DURI IN FUNZIONE DELLA FORMA DEI LORO CICLI DI ISTERESI.

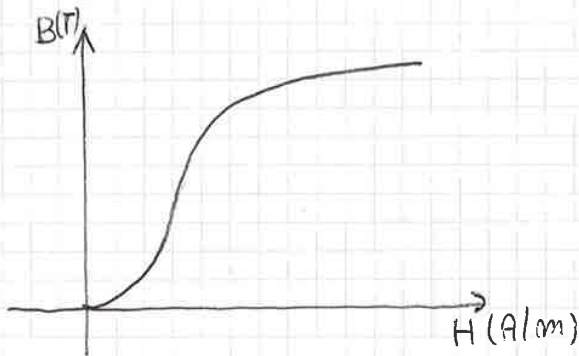
I MATERIALI MAGNETICI DOLCI HANNO CICLI DI ISTERESI CON AREA MOLTO RIDOTTA MENTRE I MATERIALI MAGNETICI ~~PERICOLOSI~~ DURI HANNO CICLI DI ISTERESI CON AREA MOLTO AMPIA.

QUANDO SI CONSIDERANO MATERIALI FERROMAGNETICI DOLCI, IN PRIMA APPROSSIMAZIONE, SI PUÒ TRASCURARE LA PRESENZA DEL CICLO DI ISTERESI (IL VALORE DELLA SUA AREA VA COMUNQUE CONSIDERATO MA VIENE OMESSO NEL GRAFICO PER COMODITÀ DI RAPPRESENTAZIONE).

QUESTO TIPO DI MATERIALI È UTILE PER REALIZZARE QUELLE PARTI CHE NON DEVONO RIMANERE MAGNETIZZATE DURANTE IL FUNZIONAMENTO, OVVERO QUELLE CHE VANNO A COSTITUIRE IL TUBO DI FLUSSO.

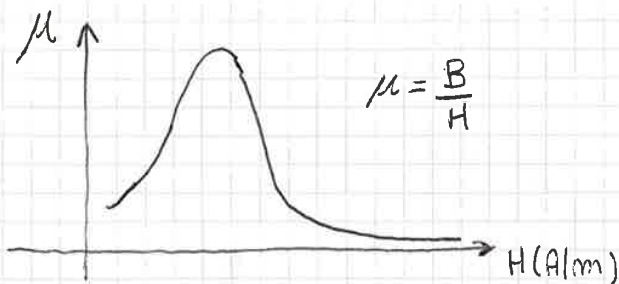
I MATERIALI MAGNETICI DURI, INVECE, SONO USATI PER LA REALIZZAZIONE DI MAGNETI PERMANENTI IN QUANTO PRESENTANO DEI VALORI DI INDUZIONE RESIDUA NOTEVOLI E QUINDI POSSONO ESSERE UTILIZZATI COME SORCENTI DI CAMPO MAGNETICO STAZIONARIO.

### MATERIALI DOLCI:



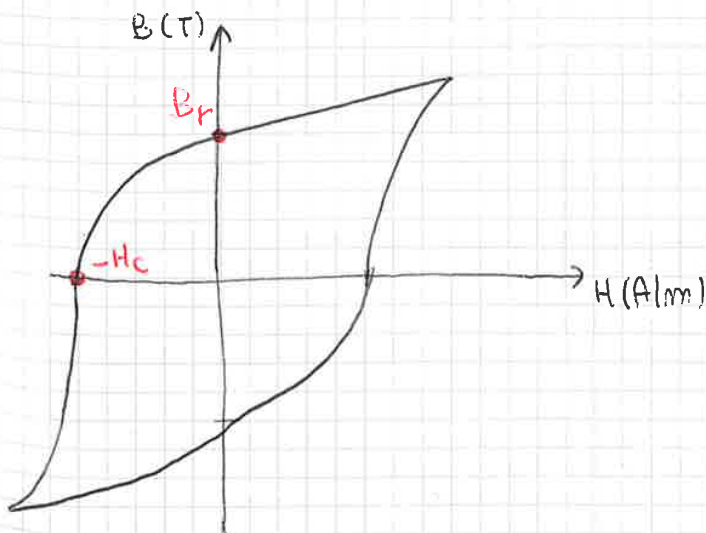
CURVA DI PRIMA MAGNETIZZAZIONE ALTAMENTE NON LINEARE. IL CICLO DI ISTERESI È PRATICAMENTE NON VISIBILE IN QUANTO È MOLTO STRETTO.

I MATERIALI DOLCI SPESSE SONO REALIZZATI IN FOGLI SPESSE QUALCHE DECIMO DI MM E RICOPERTI DI UNO STRATO ISOLANTE DAL PUNTO DI VISTA ELETTRICO.



ANDAMENTO DELLA PERMEABILITÀ IN FUNZIONE DEL CAMPO MAGNETICO

### MATERIALI DURI:



L'AREA DEL CICLO DI ISTERESI È MOLTO PIÙ AMPIA. QUANDO L'INDUZIONE RESIDUA È ABBASTANZA ELEVATA (0,8 ÷ 1,1) IN MATERIALI PRECIATI.

ALTRI ESEMPLI:

- FERRITE (0,4 - 0,5 T)
- ALNICO (2 T) → CAMPO COERCITIVO MOLTO BASSO

- SmCo } MAGNETI ALLE TERRE RARE  
 - NdFeB } (CICLO DI ISTERESI MOLTO RETTILINEO NEL SECONDO QUADRANTE)

VEDERE SLIDES. 3.24 - 3.27

PER I MATERIALI MAGNETICI DURI È MOLTO IMPORTANTE LA TEMPERATURA DI FUNZIONAMENTO. QUANDO LA TEMPERATURA RAGGIUNGE LA



MATERIALE (USANDO PER ESEMPIO LEGHE Fe-Si) E/O RIDURRE IL PERCORSO DELLE CORRENTI PARASSITE STESSE REALIZZANDO I MATERIALI MAGNETICI DOLCI IN FORMA LAMINATA (LAMINAZIONE // DIREZIONE FLUSSO).

SE L'OGGETTIVO È QUELLO DI CONVERTIRE ENERGIA LE CORRENTI PARASSITE VANNO EVITATE. SE SI VUOLE OTTENERE UNA FRENATURA PER DISSIPAZIONE DI ENERGIA CINETICA, LE CORRENTI PARASSITE SONO UTILIZZATE PER OTTENERLA COME ACCADE PER ESEMPIO NEI FRENI ELETTROMAGNETICI, DOVE L'ENERGIA CINETICA DI UN ROTORE VIENE DISSIPATA TRASFORMANDOLA IN CORRENTI PARASSITE IN UN MATERIALE MAGNETICO PIENO.

LE CORRENTI PARASSITE VENGONO UTILIZZATE ANCHE NEL RISCALDAMENTO PER INDUZIONE. SE IN UN MATERIALE SI PROVOCANO DELLE CORRENTI PARASSITE COSÌ INTENSE DA SURRISCALDARLO SI POSSONO OTTENERE EFFETTI DI TEMPERATURA DEL MATERIALE. IN FUNZIONE DELLA FREQUENZA DI QUESTE CORRENTI SI SURRISCALDERÀ L'INTERA MASSA DEL MATERIALE O DELLE SEZIONI PIÙ SUPERFICIALI: PIÙ LA FREQUENZA È BASSA E PIÙ LE CORRENTI PARASSITE SCORRERANNO NELLA MASSA DEL MATERIALE; PIÙ È ALTA E PIÙ SI RISCALDERÀ SOLO LA SUPERFICIE DEL MATERIALE.

$$P_{sp} = \underbrace{K \cdot \hat{B}^2 \cdot f}_{\text{POTENZA TERMICA DOVUTA ALL'ISTERESI}} + \underbrace{h \cdot \hat{B}^2 \cdot f^2}_{\text{POTENZA TERMICA DOVUTA ALLE CORRENTI PARASSITE}} \quad [W/Kg]$$

POTENZA PRODOTTA ALL'INTERNO DEL MATERIALE (PERDITE)

POTENZA TERMICA DOVUTA ALL'ISTERESI

POTENZA TERMICA DOVUTA ALLE CORRENTI PARASSITE

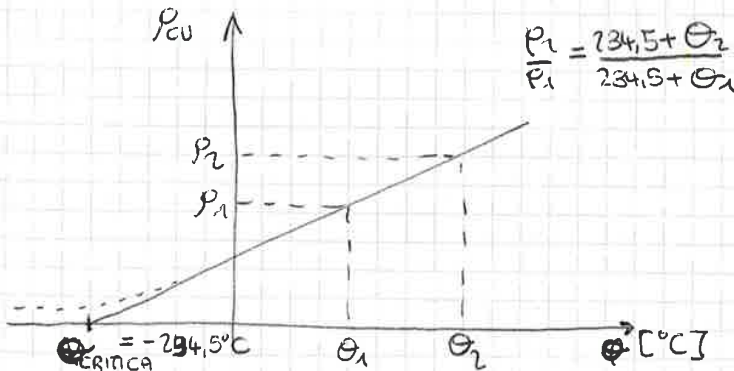
VEDERE SLIDES 3.35-3.37

PER QUANTO RIGUARDA I MATERIALI CONDUTTORI, LA CARATTERISTICA PRINCIPALE DI CUI SI TIENE CONTO È LA RESISTIVITÀ. ESSA VARIA CON LA TEMPERATURA.

RAME	$\rho = 17 \cdot 10^{-9} \Omega m$	} A 20°C
ALLUMINIO	$\rho = 28 \cdot 10^{-9} \Omega m$	
ARGENTO	$\rho = 16 \cdot 10^{-9} \Omega m$	
FERRO	$\rho = 101 \cdot 10^{-9} \Omega m$	

IL PIÙ UTILIZZATO È IL RAME, MENTRE ORO E ARGENTO SONO UTILIZZATI SOLO IN CIRCUITI MINIATURIZZATI PERCHÉ IL LORO COSTO È ELEVATO.

LA RESISTENZA DI UN CONDUTTORE SI CALCOLA A PARTIRE DALLA RESISTIVITÀ CONOSCENDO LA LUNGHEZZA E LA SEZIONE DI QUEST'ULTIMO:  $R = \rho \frac{l}{S} [\Omega]$ .



$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{234.5 + \theta_2}{234.5 + \theta_1}$$

A TEMPERATURE NORMALI, LA RESISTIVITÀ HA UN ANDAMENTO RETTILINEO. QUINDI, DATO IL VALORE DI RESISTIVITÀ PER DUE TEMPERATURE DIVERSE SI OTTIENE UN COEFFICIENTE CHE PERMETTE DI MODELIZZARE LA RESISTIVITÀ COME UN ANDAMENTO RETTILINEO. PER VALORI DI TEMPERATURA MOLTO VICINI ALLO ZERO ASSOLUTO SI INIZIANO A SENTIRE FENOMENI DI SUPERCONDUTTIVITÀ.

CONOSCENDO IL VALORE DI RESISTENZA PER DIVERSI PUNTI DI FUNZIONAMENTO SI PUÒ UTILIZZARE LA RESISTENZA PER FARE UNA STIMA DELLA TEMPERATURA DI FUNZIONAMENTO DI UN MATERIALE:

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} \cdot (\theta_1 + \theta_C) - \theta_C \quad [^{\circ}C]$$

LA POTENZA PERSA SU UNA RESISTENZA PER EFFETTO IOULE VALE:  $P_f = R \cdot I^2 [W]$

LA DENSITÀ DI CORRENTE, CIOÈ LA CORRENTE PER UNITÀ DI SEZIONE, DI UN CONDUTTORE È UTILE PER CAPIRE COME DIMENSIONARE LA SEZIONE ~~CONDUTTORE~~ A SECONDA DELLA CORRENTE CHE DOVRÀ SCORRERE. SOLITAMENTE, LA DENSITÀ MASSIMA DI CORRENTE È IL VALORE TALE PER CUI LA TEMPERATURA DEL CONDUTTORE È INFERIORE A 75°C.

L'EFFETTO PELLE SI PRESENTA SOLO PER LE CORRENTI ALTERNATE. IN QUESTO CASO, LA CORRENTE TENDE AD ADDENSARSI SULLA SUPERFICIE ESTERNA DEL CONDUTTORE, ~~PERCHÉ~~ SE SI CONSIDERA LA DENSITÀ DI CORRENTE ATTRAVERSO LA SEZIONE DEL CONDUTTORE SI HA CHE AL CENTRO LA DENSITÀ È RELATIVAMENTE BASSA



- LA MACCHINA È COSTITUITA DA MATERIALE OMOGENEO
- LA TEMPERATURA NELLA MACCHINA È UNIFORME
- LO SCAMBIO TERMICO CON L'AMBIENTE AVVIENE SOLO PER IL FENOMENO DELLA CONVEZIONE

FATTE QUESTE SEMPLIFICAZIONI SI AVRANNO LE SEGUENTI VARIABILI PER I VARI MODELLI MATEMATICI:

- $\theta$ : TEMPERATURA DELLA MACCHINA
- $\theta_A$ : TEMPERATURA AMBIENTE
- $G$ : MASSA DELLA MACCHINA
- $S$ : SUPERFICIE DI SCAMBIO TERMICO CON L'AMBIENTE
- $C$ : CALORE SPECIFICO DEL MATERIALE DI CUI È COSTITUITA LA MACCHINA
- $P_d$ : POTENZA DISSIPATA, CIOÈ LA POTENZA TERMICA PRODOTTA ALL'INTERNO DELLA MACCHINA CHE DEVE ESSERE TRASFERITA ALL'AMBIENTE
- $K$ : COEFFICIENTE DI SCAMBIO TERMICO PER CONVEZIONE

DEFINITE QUESTE VARIABILI, L'EQUAZIONE DEL MODELLO TERMICO PUÒ ESSERE DESCRITTA COME UN'EQUAZIONE DI BILANCIAMENTO:

$$dQ = P_d \cdot dt = c \cdot G \cdot d\theta + k \cdot S \cdot (\theta - \theta_A) \cdot dt \quad [J]$$

$\downarrow$   
 CALORE PRODOTTO ALL'INTERNO DELLA MACCHINA

$\underbrace{\hspace{10em}}$   
 QUANTITÀ DI CALORE IMMAGAZZINATA NELLA MASSA DELLA MACCHINA  
 $\downarrow$   
 DIPENDE DALLA TEMPERATURA DELLA MACCHINA

$\underbrace{\hspace{10em}}$   
 QUANTITÀ DI CALORE CHE DALLA MACCHINA VIENE TRASFERITA ALL'AMBIENTE  
 $\downarrow$   
 DIPENDE DALLA DIFFERENZA DI TEMPERATURA TRA LA MACCHINA E L'AMBIENTE

RISCRIVENDO L'EQUAZIONE PER EVITARE  $P_d \cdot dt$  AL PRIMO MEMBRO SI HA ( $\theta_A = \text{cost.}$ ):

$$P_d = c \cdot G \cdot \frac{d\theta}{dt} + k \cdot S \cdot (\theta - \theta_A)$$

$$\rightarrow = \frac{d(\theta - \theta_A)}{dt}, \quad \tau = \frac{c \cdot G}{k \cdot S} : \text{ COSTANTE DI TEMPO TERMICA}$$

$$\tau \cdot \frac{d(\theta - \theta_A)}{dt} + (\theta - \theta_A) = \frac{P_d}{k \cdot S}$$

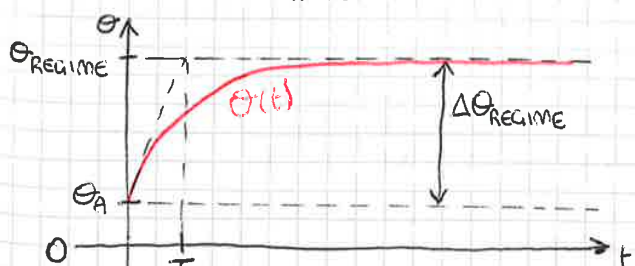
ASSUMENDO CHE LA TEMPERATURA INIZIALE DELLA MACCHINA SIA UGUALE ALLA TEMPERATURA AMBIENTE SI HA:

$$\theta(t) = \theta_A + \frac{P_d}{k \cdot S} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad [^{\circ}C]$$

$t = 0 \Rightarrow \theta_0 = \theta_A$  TEMPERATURA INIZIALE

$t = \infty \Rightarrow \theta_{\text{REGIME}} = \theta_A + \frac{P_d}{k \cdot S}$  TEMPERATURA A REGIME

$\Delta\theta_{\text{REGIME}} = \theta_{\text{REGIME}} - \theta_A$  DIFFERENZA DI TEMPERATURA



$\tau$  È UNA DURATA DI TEMPO CHE IMPLICA UNA VARIAZIONE ~~INIZIALE~~ DEL 63% ~~TRA~~ LA TEMPERATURA DI REGIME E QUELLA INIZIALE

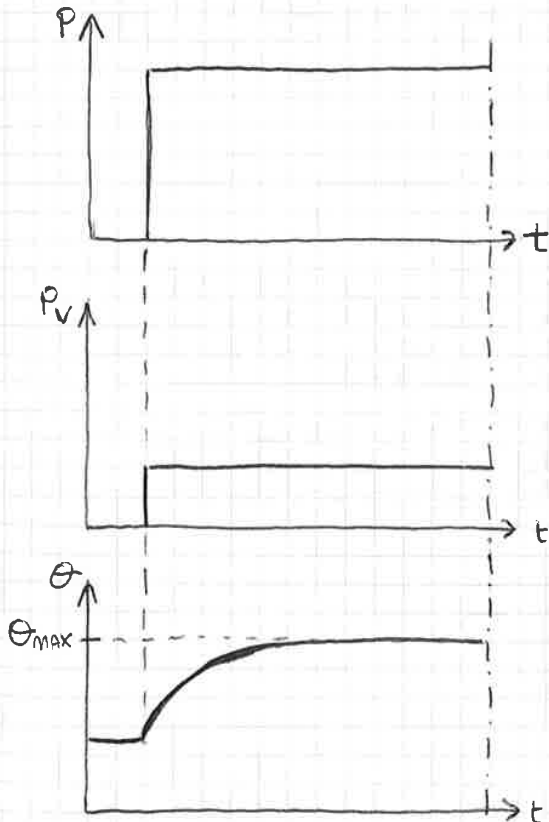
- $\tau$  {
- DECINA DI MINUTI PER MACCHINE PICCOLE
  - ORE PER MACCHINE GRANDI

PARTI DELLA MACCHINA E DEL TRASFERIMENTO DI CALORE TRA LE VARIE PARTI.

LE FASI DI FUNZIONAMENTO DEFINITE DALLO STANDARD CEI EN 60034-1/IEC 34-1 SONO:

- S1 - FUNZIONAMENTO CONTINUATIVO
- S2 - FUNZIONAMENTO DI DURATA LIMITATA
- S3 - FUNZIONAMENTO PERIODICO INTERMITTENTE
- S4 - FUNZIONAMENTO PERIODICO INTERMITTENTE CON AVVIAMENTI
- S5 - FUNZIONAMENTO PERIODICO INTERMITTENTE CON AVVIAMENTI E FRENATURE
- S6 - FUNZIONAMENTO CONTINUATIVO PERIODICO
- S7 - FUNZIONAMENTO CONTINUATIVO PERIODICO CON FRENATURA ELETTRICA
- S8 - FUNZIONAMENTO CONTINUATIVO PERIODICO CON VARIAZIONI CORRELATE TRA VELOCITÀ E CARICO
- S9 - FUNZIONAMENTO NON PERIODICO DI CARICO E VELOCITÀ

S1 - FUNZIONAMENTO CONTINUATIVO



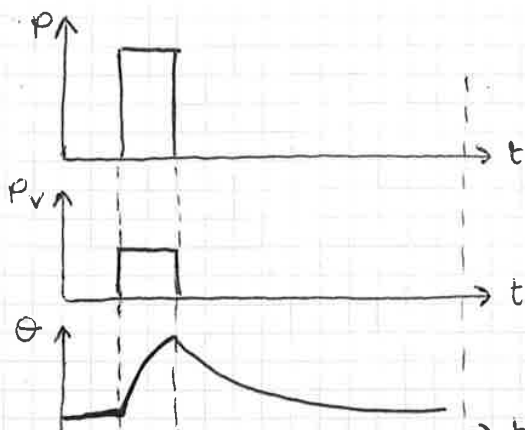
IL CARICO VIENE MANTENUTO COSTANTE PER UN TEMPO SUFFICIENTEMENTE LUNGO PER INSTAURARE IL FUNZIONAMENTO A REGIME TERMICO. TALE CONDIZIONE SI PUÒ CONSIDERARE RAGGIUNTA QUANDO SONO TRASCORSE 5 COSTANTI DI TEMPO. (SLIDES 5.20)

P: POTENZA DI CARICO DELLA MACCHINA

P<sub>v</sub>: POTENZA PERSA DALLA MACCHINA

θ: TEMPERATURA RAGGIUNTA DALLA MACCHINA

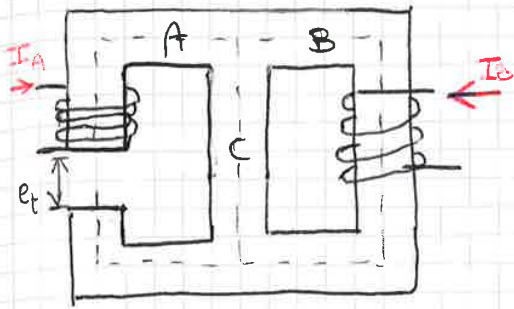
S2 - FUNZIONAMENTO DI DURATA LIMITATA



IL CARICO VIENE APPLICATO PER UN TEMPO LIMITATO NON SUFFICIENTE A RAGGIUNGERE IL FUNZIONAMENTO A REGIME TERMICO, POI VIENE RIMOSSO PER UN TEMPO SUFFICIENTE A RAGGIUNGERE IL REGIME TERMICO CIOÈ A RIPORTARE LA TEMPERATURA DELLA MACCHINA A TEMPERATURA AMBIENTE.

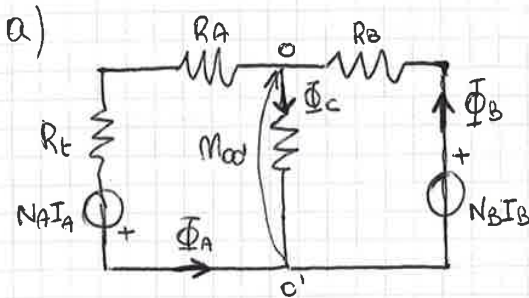
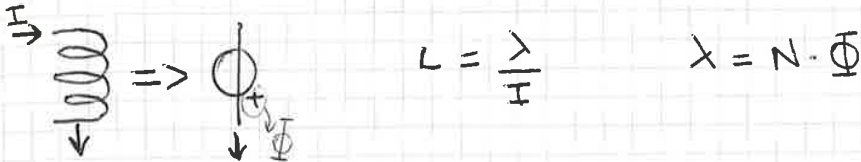
(ESEMPIO SLIDES 5.24)

Es.

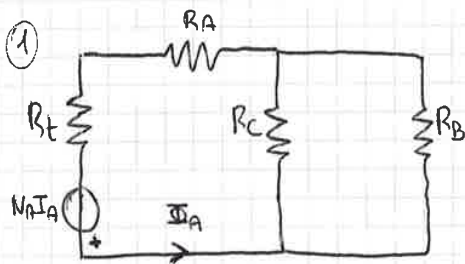


$N_A = 200$   
 $N_B = 50$   
 $R_A = 2,5 \cdot 10^5 \text{ H}^{-1}$   
 $R_B = 8 \cdot 10^5 \text{ H}^{-1}$   
 $R_C = 4 \cdot 10^5 \text{ H}^{-1}$   
 $R_t = 27,5 \cdot 10^5 \text{ H}^{-1}$

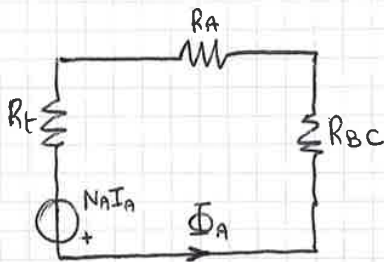
- a)  $L_A, L_B (M_{AB}) = ?$   
 b)  $I_A: \varphi_C = 0$  PER  $I_B = 5A$ ?



$L_A = \frac{\lambda_A}{I_A} \Big|_{I_B=0} = \frac{N_A \cdot \Phi_A}{I_A} \Big|_{I_B=0}$



$R_{BC} = \frac{R_B R_C}{R_B + R_C} = \frac{8 \cdot 4 \cdot 10^{10} \text{ H}^{-2}}{(8+4) 10^5 \text{ H}^{-1}} = 2,67 \cdot 10^5 \text{ H}^{-1}$

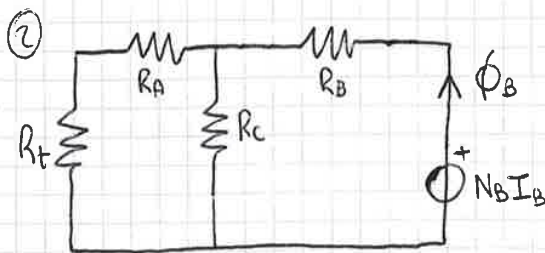


$\Phi_A = \frac{N_A \cdot I_A}{(R_A + R_{BC} + R_t)}$   
 $R_{eqA} = 32,67 \cdot 10^5 \text{ H}^{-1}$

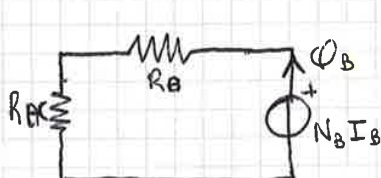
$L_A = \frac{N_A \cdot \Phi_A}{I_A} = \frac{N_A}{I_A} \cdot \frac{N_A \cdot I_A}{R_{eqA}} = \frac{N_A^2}{R_{eqA}} = 12,2 \text{ mH}$

$\Phi_B = \Phi_A \frac{R_C}{R_B + R_C} = \frac{N_A \cdot I_A}{R_{eqA}} \cdot \frac{R_C}{R_B + R_C} = \frac{N_A \cdot I_A}{3 R_{eqA}}$

$M_{AB} = \frac{\lambda_B}{I_A} = \frac{N_B \cdot \Phi_B}{I_A} = \frac{N_B}{I_A} \cdot \frac{N_A \cdot I_A}{3 R_{eqA}} = \frac{N_B N_A}{3 R_{eqA}} = \frac{N_B}{3 N_A} \cdot \frac{N_A^2}{R_{eqA}} = \frac{N_B}{3 N_A} L_A = 1,02 \text{ mH}$



$R_{AC} = R_C \parallel (R_A + R_t) = \frac{R_C \cdot (R_A + R_t)}{R_C + R_A + R_t} = 3,53 \cdot 10^5 \text{ H}^{-1}$



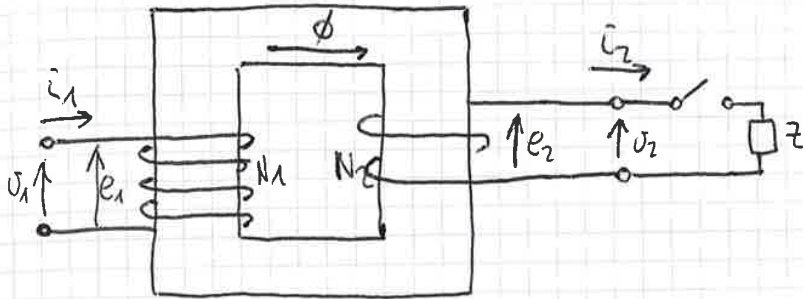
$\Phi_B = \frac{N_B \cdot I_B}{R_{eqB}}$

$R_{eqB} = R_{AC} + R_B = (8 + 3,53) \cdot 10^5 \text{ H}^{-1} = 11,53 \cdot 10^5 \text{ H}^{-1}$



A SECONDA SE BISOGNA MISURARE LA TENSIONE O LA CORRENTE, SI UTILIZZANO DEI TRASFORMATORI TV O TA.

L'ULTIMA APPLICAZIONE DEI TRASFORMATORI È QUELLA CHE RIGUARDA L'ALIMENTAZIONE DEI CIRCUITI ELETTRONICI. ESSI DI SOLITO FUNZIONANO IN BASSA TENSIONE ( $\approx 15-20\text{ V}$ ).



UN TRASFORMATORE È COSTITUITO DA 2 PARTI FONDAMENTALI: UNA STRUTTURA RETTANGOLARE CHE RAPPRESENTA IL NUCLEO FERROMAGNETICO SULLA QUALE SONO AVVOLTI ALMENO 2 AVVOLGIMENTI CHE VENGONO RAPPRESENTATI CON UN CERTO NUMERO DI SPIRE E SONO MAGNETICAMENTE ACCOPPIATI DALLA PRESENZA DEL NUCLEO FERROMAGNETICO.

IL NUCLEO FERROMAGNETICO SERVE A CONVOGLIARE LE LINEE DI CAMPO IN UNA REGIONE DI SPAZIO BEN DEFINITA IN MODO DA AVERE POCHE LINEE DI CAMPO CHE SI CHIUDONO IN ARIA E NON CONCATENINO ENTRAMBI GLI AVVOLGIMENTI.

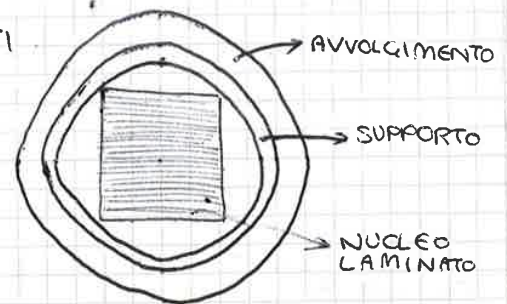
IL TRASFORMATORE RAPPRESENTATO È DI TIPO MONOFASE: QUELLI TRIFASE HANNO 3 COPPIE DI AVVOLGIMENTI MA SEMPRE UN SOLO NUCLEO FERROMAGNETICO.

IL NUCLEO FERROMAGNETICO È REALIZZATO IN MATERIALE FERROMAGNETICO DOLCE CON ELEVATA PERMEABILITÀ E BASSE PERDITE.

È ANCHE POSSIBILE REALIZZARE I TRASFORMATORI IN ARIA: SE SI DISPONGONO 12 AVVOLGIMENTI IN MANIERA CONCENTRICA SI OTTIENE UN ACCOPPIAMENTO MAGNETICO RELATIVAMENTE BUONO. QUESTO TIPO DI TRASFORMATORI È UTILIZZATO QUANDO NON SERVE RIDURRE LE CORRENTI DI MAGNETIZZAZIONE, CIOÈ QUANDO SI LAVORA A FREQUENZE COSÌ ELEVATE DA AVERE IMPEDENZE INTRINSECAMENTE ELEVATE CHE SONO SUFFICIENTI A RIDURRE LA CORRENTE DI MAGNETIZZAZIONE.

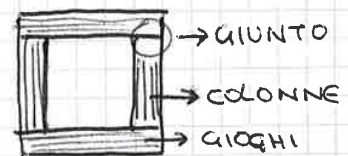
GLI AVVOLGIMENTI VENGONO DISTINTI IN PRIMARI, CHE SONO QUELLI COLLEGATI ALL'ALIMENTAZIONE ELETTRICA, E SECONDARI, CHE SONO QUELLI CHE VENGONO COLLEGATI AL CARICO.

GLI AVVOLGIMENTI VENGONO TIPICAMENTE AVVOLTI SU UN SUPPORTO CIRCOLARE RIGIDO CHE È FATTO DI MATERIALE ISOLANTE. IL NUCLEO È LAMINATO PER RIDURRE LE CORRENTI PARASSITE E PUÒ AVERE SEZIONE QUADRATA O DEI GRADINI PER SFRUTTARE AL MEGLIO LO SPAZIO CIRCOLARE ATTORNO AL QUALE VENGONO AVVOLTI GLI AVVOLGIMENTI. LA SEZIONE QUADRATA VIENE UTILIZZATA PER TRASFORMATORI DI PICCOLA POTENZA E DI BASSO COSTO MENTRE QUELLA A GRADINI VIENE USATA PER POTENZE E COSTI PIÙ ELEVATI.



VISTO LATERALMENTE, IL NUCLEO ASSUME UNA FORMA PER CUI HA DELLE PARTI VERTICALI DETTE COLONNE E DELLE PARTI ORIZZONTALI DETTE GIOCHI.

LE COLONNE SONO SOLITAMENTE QUELLE ATTORNO ALLE QUALI SI AVVOLGONO GLI AVVOLGIMENTI E QUINDI POSSONO AVERE SEZIONE REALIZZATA A GRADINI IN MODO DA SFRUTTARE IL SUPPORTO CIRCOLARE DISPOSTO ATTORNO ALLA COLONNA.



I GIOCHI, INVECE, HANNO TIPICAMENTE SEZIONE QUADRATA O RETTANGOLARE. COLONNE E GIOCHI SONO COLLEGATE TRA LORO ATRAVVERSO DEI GIUNTI.

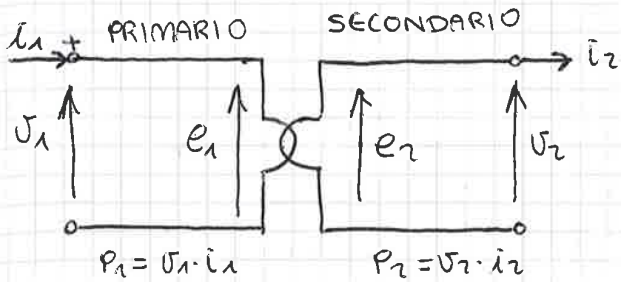
I GIUNTI POSSONO ESSERE PIANI, ORIZZONTALI O A 45°, OPPURE A SEZIONI INTERSECATE PER LE APPLICAZIONI PIÙ COSTOSE. (SLIDES 7.1.12)

I GIUNTI PIANI HANNO UNA STRUTTURA MECCANICAMENTE MENO SOLIDA RISpetto A QUELLA DEI GIUNTI A SEZIONE INTERSECATA.

### PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO (SLIDES 7.1.15-7.1.24)

UN TRASFORMATORE SI PUÒ CONSIDERARE IDEALE SE VENGONO FATTE LE IPOTESI OPPORTUNE:

- RILUTTANZA MAGNETICA DEL NUCLEO = 0 ( $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$ )
- ASSENZA DI FLUSSI DISPERSI



$$v_1 = t \cdot v_2$$

$$i_2 = t \cdot i_1$$

$$P = v_1 \cdot i_1 = v_2 \cdot i_2 = P_2$$

$$\eta = 1 \leftarrow \text{TRASFORMATORE IDEALE}$$

1) L'ALIMENTAZIONE COLLEGATA ALL'AVVOLGIMENTO PRIMARIO GENERA IL FLUSSO NEL NUCLEO:

$$v_1 = e_1 = N_1 \cdot \frac{d\phi_p}{dt} \Rightarrow \phi_p = \frac{1}{N_1} \int v_1 dt$$

2) COME CONSEGUENZA DELLA PRESENZA DEL FLUSSO VIENE INDOTTA UNA FEM SULL'AVVOLGIMENTO SECONDARIO CHE CONCATENA IL FLUSSO  $\phi_p$ :

$$v_2 = e_2 = N_2 \cdot \frac{d\phi_p}{dt}$$

3)  $e_2$  ALIMENTA IL CARICO CHE ASSORBE CORRENTE

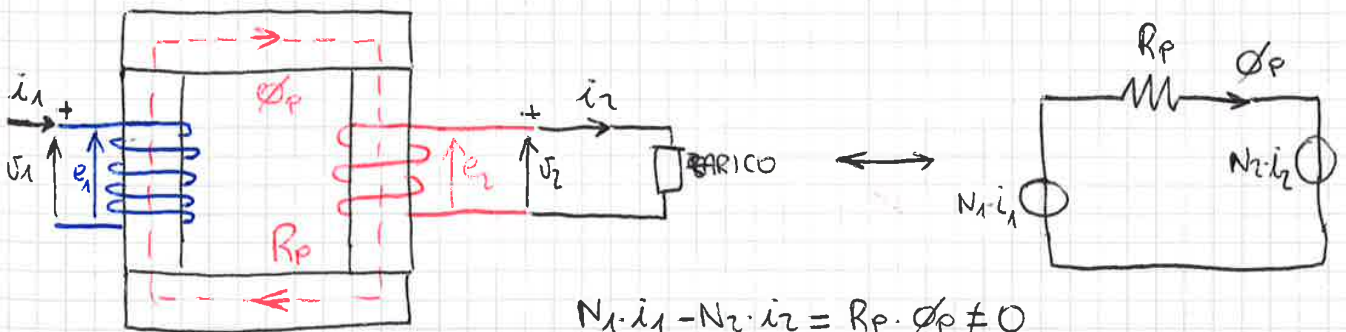
4) QUESTA CORRENTE SECONDARIA (DEMAGNETIZZANTE) È PROPORZIONALE ALLA CORRENTE PRIMARIA ATTRAVERSO IL RAPPORTO  $N_1/N_2$ :

$$N_1 i_1 = N_2 \cdot i_2 \Rightarrow i_1 = \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \cdot i_2 = \frac{1}{t} \cdot i_2 \quad P_1 = v_1 \cdot i_1 = v_2 \cdot i_2 = P_2$$

SE NON CI FOSSE VARIAZIONE DI FLUSSO NEL TEMPO NON CI SAREBBERO FEM, QUINDI IL TRASFORMATORE NON FUNZIONA IN CORRENTE CONTINUA

### TRASFORMATORE REALE

- RILUTANZA MAGNETICA DEL NUCLEO  $\neq 0$  ( $\mu_{Fe} \neq \infty$ )
- PRESENZA DI FLUSSI DISPERSI NEGLI AVVOLGIMENTI
- PRESENZA DI PERDITE PER EFFETTO JOULE NEGLI AVVOLGIMENTI ( $R_{wind} \neq 0$ )
- PRESENZA DI PERDITE <sup>NEL FERRO</sup> DOVUTE AD ISTERESI E CORRENTI PARASSITE
- RILUTANZA MAGNETICA DEL NUCLEO  $\neq 0$



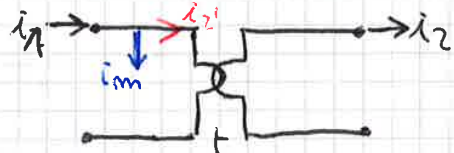
$$N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2 = R_p \cdot \phi_p \neq 0$$

LA CONSEGUENZA DELLA RILUTANZA DIVERSA DA 0 È CHE PER MANTENERE UN FLUSSO  $\phi_p$  ALL'INTERNO DEL NUCLEO MAGNETICO SERVE UNA CORRENTE MAGNETIZZANTE.

IMMAGINANDO CHE QUESTA CORRENTE SIA GENERATA DALL'AVVOLGIMENTO PRIMARIO, DA UNA FORZA MAGNETOMOTRICE EQUIVALENTE PARI A  $N_1 \cdot i_m$ .

$$i_m = i_1 - \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \cdot i_2 \Leftrightarrow i_1 = i_m + i_2'$$

$$i_2' = \frac{1}{t} \cdot i_2 \leftarrow \text{CORRENTE DEL SECONDARIO RIPORTATA AL PRIMARIO}$$





$$v_2 = \underbrace{N_2 \cdot \frac{d\Phi_p}{dt}}_{e_2} - \underbrace{\frac{N_2^2}{R_{d2}} \cdot \frac{di_2}{dt}}_{L_{d2}} = e_2 - L_{d2} \cdot \frac{di_2}{dt} \quad [V]$$

INDUTTANZA DEI FLUSSI DISPERSI AL SECONDARIO

CONSIDERANDO CHE I TERMINI DOVUTI ALLA PRESENZA DEI FLUSSI DISPERSI SI SOMMANO O SI SOTTRAGGONO (IN BASE ALLE CONVENZIONI DI SEGNO) ALLE FEM, NEI MODELLI CIRCUITALI VERRANNO INSERITE LE INDUTTANZE DISPERSE COLLEGATE IN SERIE ALLE FEM. ( $e_1$  e  $e_2$ ).

- PRESENZA DI PERDITE PER EFFETTO JOULE NEGLI AVVOLGIMENTI

QUESTE PERDITE VENGONO MODELLIZZATE DALLA RESISTENZA OHMICA DEI DUE AVVOLGIMENTI (IN SERIE):

$$v_1 = e_1 + L_{d1} \cdot \frac{di_1}{dt} + R_1 \cdot i_1 \qquad v_2 = e_2 - L_{d2} \cdot \frac{di_2}{dt} - R_2 \cdot i_2$$

- PRESENZA DI PERDITE NEL FERRO DOVUTE AD ISTERESI E CORRENTI PARASSITE

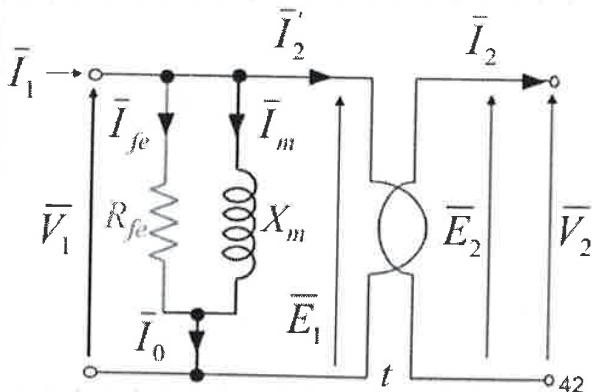
ESSE SONO DOVUTE ALLE VARIAZIONI DEL FLUSSO NEL NUCLEO MAGNETICO. COME PRIMA APPROSSIMAZIONE, POSSONO ESSERE CONSIDERATE LE PERDITE COME PROPORZIONALI AL QUADRATO DELL' INDUZIONE NEL NUCLEO MAGNETICO, CHE È DIRETTAMENTE PROPORZIONALE AL FLUSSO.

$$P_{Fe} \propto B^2 \propto \Phi_p^2$$

IL FLUSSO AL QUADRATO A SUA VOLTA È PROPORZIONALE ALLA FEM:

$$P_{Fe} \propto B^2 \propto \Phi_p^2 \propto E_1^2$$

QUINDI, LE PERDITE POSSONO ESSERE MODELLIZZATE COME UNA RESISTENZA IN PARALLELO CON L' INGRESSO DEL TRASFORMATORE IDEALE; CIOÈ IN PARALLELO AL PRIMARIO DEL TRASFORMATORE IDEALE.



$$P_{Fe} = \frac{E_1^2}{R_{Fe}} \quad [W]$$

IN CASO DI ALIMENTAZIONE SINUSOIALE A FREQUENZA COSTANTE, SI PUÒ STUDIARE IL FUNZIONAMENTO DEL TRASFORMATORE STUDIANDO IL METODO DEI FASORI

$$\bar{E}_1 = j\omega \cdot N_1 \cdot \frac{\bar{\Phi}_p}{\sqrt{2}} = j \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} \cdot N_1 \cdot \bar{\Phi}_p = j \cdot 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \bar{\Phi}_p$$

VALORE EFFICACE DEL FLUSSO CONCATENATO      VALORE DI PICCO DEL FLUSSO PRINCIPALE

$$\bar{E}_2 = j\omega \cdot N_2 \cdot \frac{\bar{\Phi}_p}{\sqrt{2}} = j \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} \cdot N_2 \cdot \bar{\Phi}_p = j \cdot 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \bar{\Phi}_p$$

PER QUANTO RIGUARDA I RAPPORTI TRA FEM E CORRENTI AL PRIMARIO E AL SECONDARIO NON CAMBIA NULLA NELLA RAPPRESENTAZIONE FASORIALE:

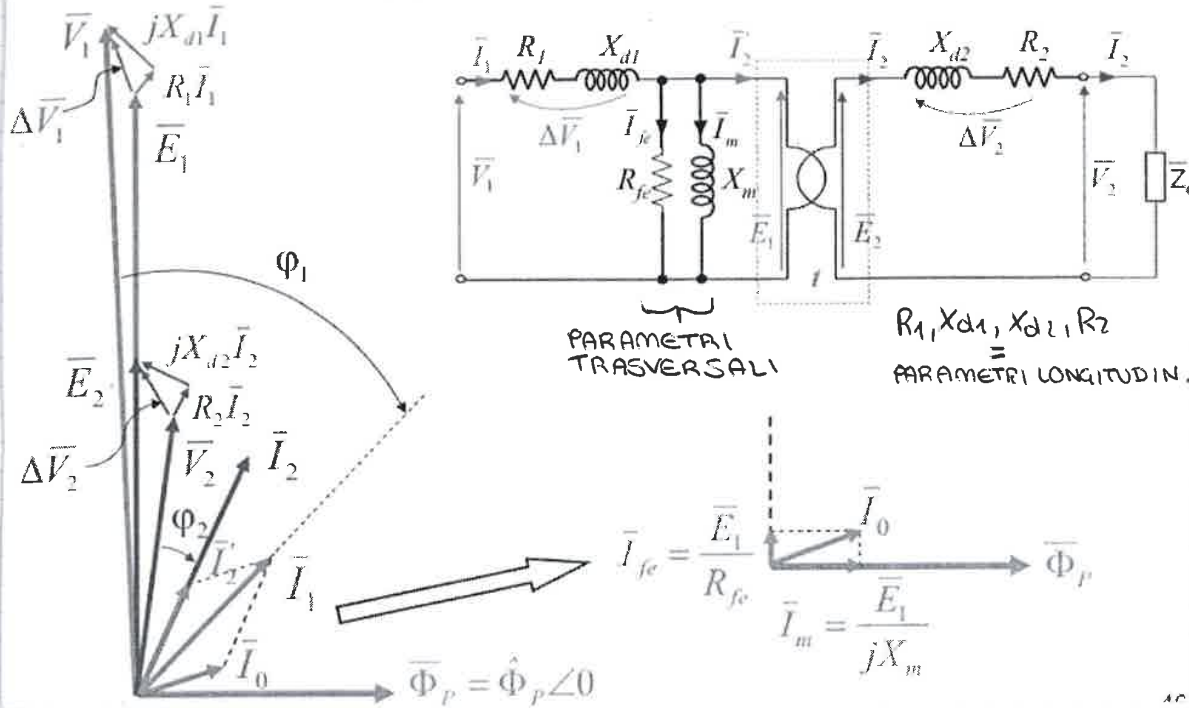
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = t = \frac{V_1}{V_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{t}$$

← EQUAZIONE ESATTA SE IL TRASFORMATORE È IDEALE. SE È REALE, SI USA  $I_2'$  CIOÈ LA  $I_2$  DEPURATA DELLA CORRENTE DI MAGNETIZZAZIONE.

$$E_1 \cdot I_1 = \underbrace{E_2 \cdot t}_{E_1} \cdot \underbrace{\frac{I_2}{t}}_{I_1} = E_2 \cdot I_2$$





RISPETTO AD ESSE CHE CORRISPONDE A UNA DIVISIONE PER I. IN REALTÀ, LA DIVISIONE È PER JW E QUINDI IL FLUSSO È UGUALE ALLA FEM DI VIJO.

PARAMETRI TRASVERSALI

$R_1, X_{d1}, X_{d2}, R_2$   
PARAMETRI LONGITUDIN.

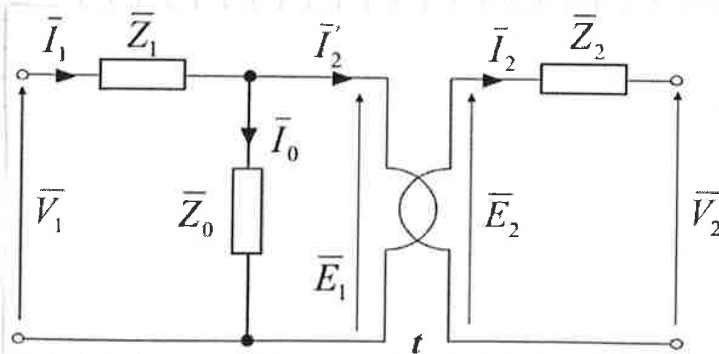
**CONSIDERAZIONI SUL CIRCUITO EQUIVALENTE:**

- PARAMETRI CONCENTRATI: I DIVERSI PARAMETRI NON PRENDONO IN CONSIDERAZIONE LE DIMENSIONI GEOMETRICHE DEL TRASFORMATORE
- A VUOTO ( $I_2 = 0$ ), LA CORRENTE ASSORBITA  $I_0$  È MOLTO MINORE DELLA CORRENTE A PIENO CARICO  $\Rightarrow I_1 \approx I_2'$ .
- IL NUCLEO FERROMAGNETICO HA COMPORTAMENTO NON LINEARE E QUINDI AL VARIARE DELLA CORRENTE DI MAGNETIZZAZIONE L'INDUTTANZA DI MAGNETIZZAZIONE NON È COSTANTE ( $L_m = f(I_m)$ ).
- LE CADUTE DI TENSIONE SU  $R_1, X_{d1}, R_2, X_{d2}$  SONO TRASCURABILI RISPETTO ALE FEM. ( $\Delta V_1$  e  $\Delta V_2$ )

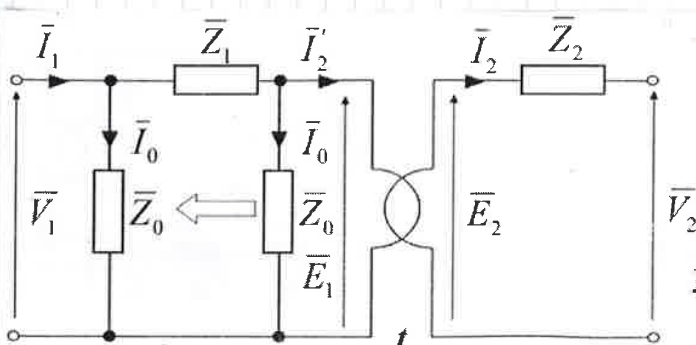
$$V_1 \approx E_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_p$$

IN PRATICA, IL NUCLEO FUNZIONA A FLUSSO COSTANTE

**CIRCUITO EQUIVALENTE A "T"**



$\bar{Z}_1 = R_1 + jX_{d1}$  ← IMPEDENZA DELL'AVVOLGIMENTO PRIMARIO  
 $\bar{Z}_2 = R_2 + jX_{d2}$  ← IMPEDENZA DELL'AVVOLGIMENTO SECONDARIO  
 $\bar{Z}_0 = R_{fe} / jX_m = \frac{R_{fe} \cdot I \cdot X_m}{R_{fe} + jX_m}$   
 $= R_0 + jX_0$  ← IMPEDENZA A VUOTO

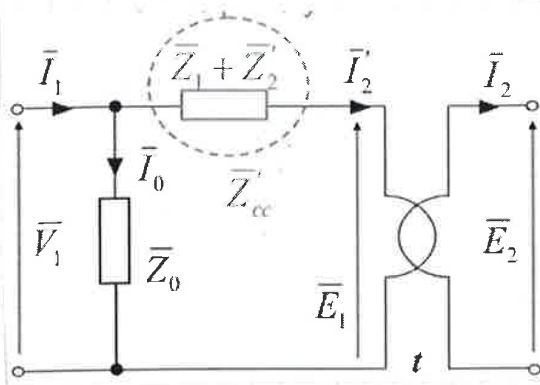


IL MODELLO A T PUÒ ESSERE RIELABORATO PER SEMPLIFICARE I CALCOLI.

$$|\bar{Z}_1| \ll |\bar{Z}_0|$$

$$I_0 = 2 \div 5\% I_1$$

$$\Rightarrow \bar{I}_0 \approx \frac{\bar{V}_1}{\bar{Z}_0} \text{ [CA]}$$



$$\bar{Z}'_{cc} = (R_1 + R_2) + j(X_{d1} + X'_{d2})$$

## VALUTAZIONE DEI PARAMETRI DEL TRASFORMATORE

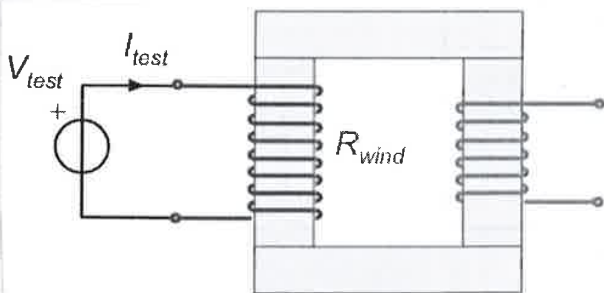
PARAMETRI DEL TRASFORMATORE POSSONO ESSERE VALUTATI IN DUE MODI:

- IN FASE DI PROGETTAZIONE IN BASE A DELLE RELAZIONI DI PROGETTO (GEOMETRIA, DIMENSIONI, SEZIONI DEI CONDUTORI, CARATTERISTICHE DEI MATERIALI, ECC...)
- OTTENUTI CON TEST SPERIMENTALI:
  - 1) MISURA IN CORRENTE CONTINUA PER DETERMINARE LA RESISTENZA DEGLI AVVOLGIMENTI;
  - 2) PROVA A VUOTO PER DETERMINARE I PARAMETRI TRASVERSALI DEL MODELLO EQUIVALENTE;
  - 3) PROVA DI CORTOCIRCUITO PER DETERMINARE I PARAMETRI LONGITUDINALI (NON SI RIESCE A DISTINGUERE TRA PRIMARIO E SECONDARIO, QUINDI CON QUESTA PROVA SI RICAVA LA RESISTENZA COMPLESSIVA DI CORTOCIRCUITO E LA REATTANZA COMPLESSIVA DI DISPERSIONE).

PER DEFINIRE LE CONDIZIONI DI FUNZIONAMENTO DELLA MACCHINA IN FUNZIONE DEL PROGETTO, SI HA UNA 'TARGA' NELLA QUALE VENGONO RIPORTATE LE CONDIZIONI DI NORMALE FUNZIONAMENTO:

- TENSIONI NOMINALI AL PRIMARIO E AL SECONDARIO ( $V_N$ )
- CORRENTI NOMINALI AL PRIMARIO E AL SECONDARIO ( $I_N$ )
- POTENZA NOMINALE DEL TRASFORMATORE (APPARENTE,  $S_N$ )
- FREQUENZA NOMINALE DI FUNZIONAMENTO ( $f_N$ )

### 1) MISURA DELLE RESISTENZE NEGLI AVVOLGIMENTI



SI ALIMENTA IN CORRENTE CONTINUA L'AVVOLGIMENTO DEL QUALE SI VUOLE CALCOLARE LA RESISTENZA.

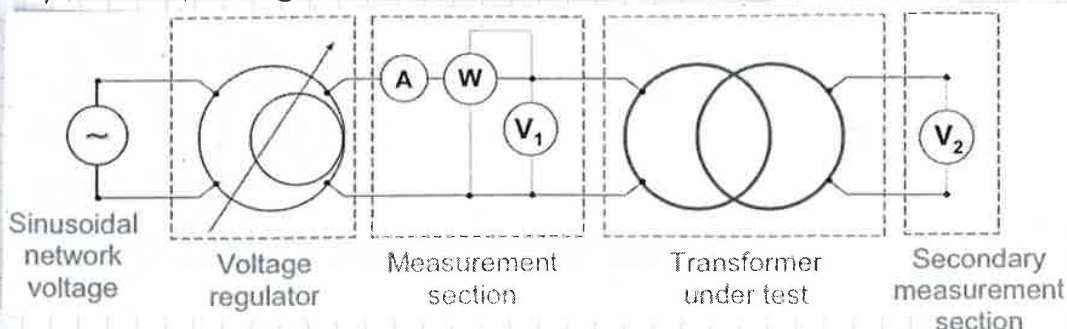
$$R_{WIND} = \frac{V_{TEST}}{I_{TEST}} \quad [\Omega]$$

LA MISURA VA ESEGUITA 'A FREDDO' CIOE' CON LA MACCHINA A TEMPERATURA AMBIENTE.

DURANTE L'ESECUZIONE DELLA PROVA, LA CORRENTE CHE SCORRE NELL'

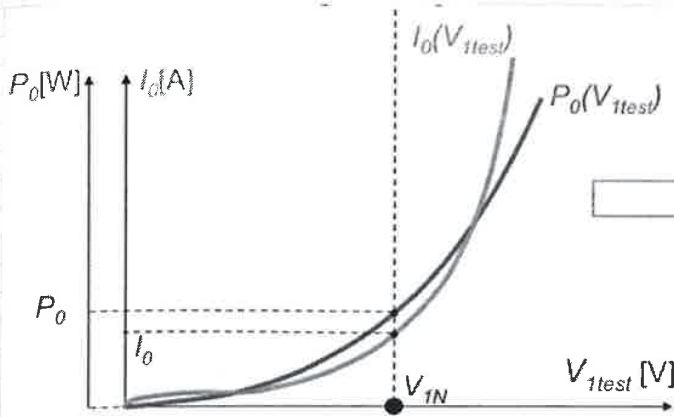
AVVOLGIMENTO ( $I_{TEST}$ ) DEVE ESSERE INFERIORE DEL 10% DELLA CORRENTE NOMINALE DELL'AVVOLGIMENTO STESSO IN MODO DA EVITARE IL RISCALDAMENTO DELL'AVVOLGIMENTO DURANTE LA PROVA.

### 2) TEST A VUOTO



SI ALIMENTA UNO DEGLI AVVOLGIMENTI ATTRAVERSO UN REGOLATORE DI TENSIONE. VENGONO INSERITI UN AMPEROMETRO PER MISURARE LA CORRENTE ASSORBITA DALL'AVVOLGIMENTO,





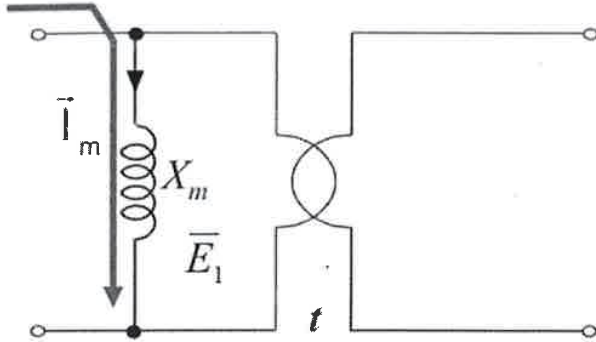
OLTRE LA TENSIONE NOMINALE, IL NUCLEO INIZIA A SATURARE, E QUINDI  $L_m$  DIMINUISCE E LA CORRENTE AUMENTA.

VALORI TIPICI @  $V_{1PROVA} = V_{1N}$ :

CORRENTE A VUOTO PERCENTUALE  
 $I_{0\%} = 2 \div 5\%$

POTENZA A VUOTO PERCENTUALE  
 $P_{0\%} = 1 \div 3\%$

SE LA TENSIONE DI ALIMENTAZIONE SUPERA IL VALORE NOMINALE, IL NUCLEO FERROMAGNETICO LAVORA NELLA REGIONE DI SATURAZIONE:

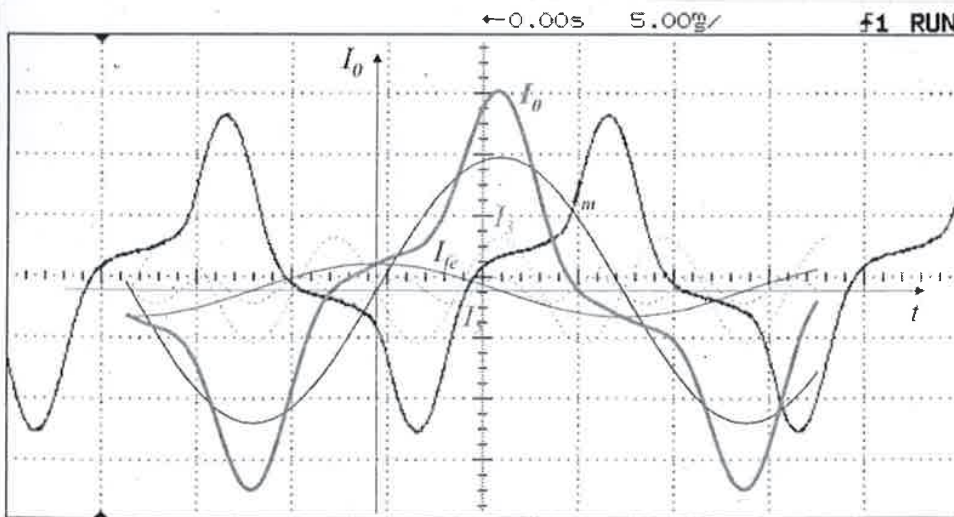


- LA PERMEABILITÀ MAGNETICA DEL MATERIALE DIMINUISCE
- LA RIWITANZA DEL CIRCUITO MAGNETICO AUMENTA
- L'INDUTTANZA DI MAGNETIZZAZIONE DIMINUISCE
- AUMENTANO LE PERDITE PER UNITÀ DI VOLUME DELLA MACCHINA

- CRESCE LA CORRENTE DI MAGNETIZZAZIONE  $I_m = \frac{V_1}{\omega \cdot L_m}$

- CRESCE LA RESISTENZA DELLE PERDITE NEL FERRO

QUINDI, SI GENERA UN RISCALDAMENTO DELLA MACCHINA SUPERIORE A QUELLO PREVISTO PER LE CONDIZIONI NOMINALI DI FUNZIONAMENTO.

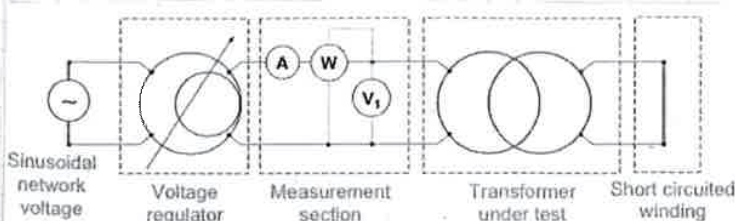


ANDAMENTO EFFETTIVO DELLA CORRENTE DI MAGNETIZZAZIONE DOVUTO ALLA SATURAZIONE DEL NUCLEO FERROMAGNETICO

LA TENSIONE APPLICATA ALL'INDUTTANZA DI MAGNETIZZAZIONE È SINUSOIDALE E MAN MANO CHE IL SUO VALORE AUMENTA IL TRASFORMATORE SATURA MAGGIORMENTE E QUINDI SI HA UN AUMENTO DELLA CORRENTE ASSORBITA. INVECE, IN PROSSIMITÀ DEI

PASSAGGI PER LO ZERO SI HA UN FUNZIONAMENTO NELLA PARTE LINEARE DELLA CARATTERISTICA E QUINDI LA CORRENTE ASSORBITA RISULTA PIÙ BASSA.

### 3) TEST IN CORTO CIRCUITO

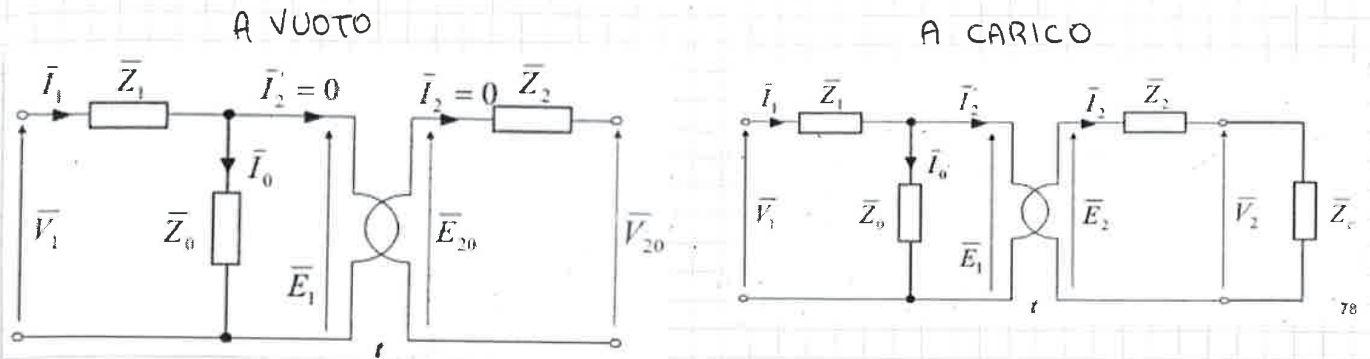


ANCHE IN QUESTO CASO, SI HA L'ALIMENTAZIONE SINUSOIDALE SU UN LATO DEL TRASFORMATORE, UN REGOLATORE DI TENSIONE PER FAR VARIARE EVENTUALMENTE IL VALORE DI CORRENTE ASSORBITA DURANTE LA PROVA E POI GLI STESSI STRUMENTI DI MISURA DELLA PROVA A VUOTO.

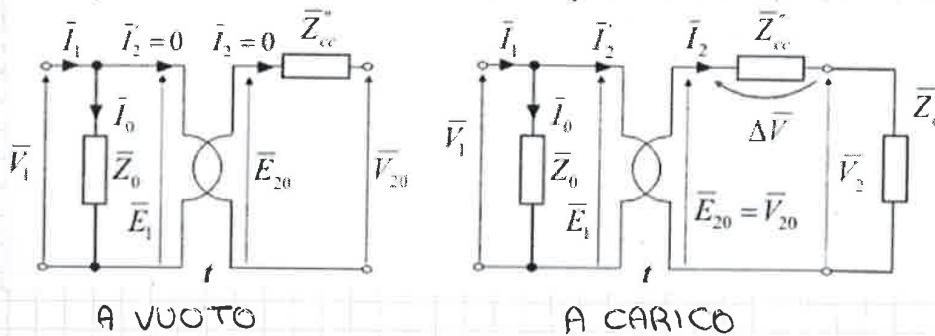


LA CADUTA DI TENSIONE DEL TRASFORMATORE VIENE DEFINITA COME LA DIFFERENZA ALGEBRICA TRA LE TENSIONI NEL FUNZIONAMENTO A VUOTO E NEL FUNZIONAMENTO A PIENO CARICO.

$$\Delta V = |\bar{V}_{20}| - |\bar{V}_2| \quad (\neq |\bar{V}_{20} - \bar{V}_2|)$$



PER CALCOLARE IL VALORE DELLA CADUTA DI TENSIONE, BISOGNA RIPORTARE I PARAMETRI LONGITUDINALI TUTTI AL SECONDARIO. TIPICAMENTE LA CADUTA DI TENSIONE VIENE VALUTATA AL SECONDARIO CHE È IL LATO AL QUALE SI COLLEGA IL CARICO DEL TRASFORMATORE.



C.D.T =  $|\bar{V}_{20}| - |\bar{V}_2| \neq |\bar{V}_{20} - \bar{V}_2| = |\Delta \bar{V}|$

RAPPRESENTANDO LA CADUTA DI TENSIONE NEL DIAGRAMMA FASORIALE:

$$\bar{V}_{20} = \bar{V}_2 + \Delta \bar{V} = \bar{V}_2 + R''_{cc} \cdot \bar{I}_2 + jX''_{cc} \cdot \bar{I}_2$$

POTENDO TRASCURARE IL SEGMENTO CD:

$$C.D.T. = AD \approx AC = AB + BC$$

VALE PER C.D.T < 10÷15% E  $\cos \varphi > 0,3 \div 0,9$

$$AB = R''_{cc} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$$

$$BC = X''_{cc} \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2$$

$$C.D.T. \approx I_2 (R''_{cc} \cos \varphi_2 + X''_{cc} \sin \varphi_2) \quad [V]$$

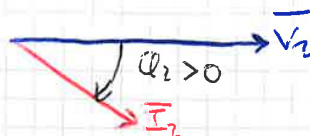
FATTORE DI CARICO DEL TRASFORMATORE:  $\alpha = \frac{I_2}{I_{2N}}$

$$\Delta V_{\%} = V_{cc\%} \cdot \alpha (\cos \varphi_{cc} \cos \varphi_2 + \sin \varphi_{cc} \sin \varphi_2)$$

CARICO INDUTTIVO

$$\cos \varphi_2 > 0 \Rightarrow \Delta V > 0$$

$$\sin \varphi_2 > 0$$

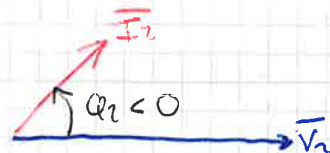


LA TENSIONE DEL CARICO DIMINUISCE (I CARICHI DI GRANDE POTENZA SONO DI QUESTO TIPO)

CARICO CAPACITIVO

$$\cos \varphi_2 > 0 \Rightarrow \Delta V \text{ PUÒ ESSERE } < 0$$

$$\sin \varphi_2 < 0$$



LA TENSIONE DEL CARICO PUÒ AUMENTARE (I CARICHI DI PICCOLA POTENZA POSSONO ESSERE DI QUESTO TIPO)