



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 1774A -

ANNO: 2015

A P P U N T I

STUDENTE: Baiocco Fabio

MATERIA: Fondamenti di elettronica ed elettrotecnica - prof.
Lombardi, Reyneri

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.**

ELETTROTECNICA Lombardi

①

Grandezze Fisiche

$\underline{E}(r, t)$: CAMPO ELETTRICO $[\frac{V}{m}]$ distribuzione carica

$\underline{D}(r, t)$: INDUZIONE elettrica $[\frac{C}{m^2}]$ interazione dielettrica con \underline{E}

$\underline{H}(r, t)$: CAMPO MAGNETICO $[\frac{H}{m}]$ carica in movimento

$\underline{B}(r, t)$: INDUZIONE MAGNETICA $[\frac{Wb}{m^2}]$ interazione magnetica con \underline{H}

$\underline{J}(r, t)$: DENSITA' di corrente di conduzione $[\frac{A}{m^2}]$ moto carica

$$[\epsilon] = \frac{F}{m^2} \quad [\mu] = \frac{H}{m} \quad [\rho] = \frac{1}{\Omega \cdot m} \quad [\rho] = \frac{C}{m^3}$$

• Teoria dei circuiti: facilita analisi se:

- frequenze di lavoro lentamente variabili
- condizioni quasi stazionarie
- in un componente al max 1 fenomeno e.m. per volta

⇒ V, I grandezze scalari

⇒ Maxwell → Kirchhoff

⇒ elemento circuitale: sede fenomeni e.m.

- corrente:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad q(t) = \int_{t_0}^t i(t) dt + q(t_0)$$

- tensione:

energia trasferita per unità di carica attraverso un elemento

diff. di potenziale tra 2 punti appartenenti ad un campo elettrico

SIPOLO: elemento ideale

- \textcircled{A} è in ogni istante in entrambi i poli
- \textcircled{V} è " " " indipendente dal percorso scelto

UTILIZZATORE: corrente va dal potenziale alto al potenziale basso $P > 0$

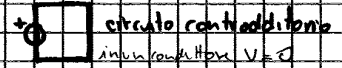
GENERATORE: corrente va dal potenziale basso al potenziale alto $P < 0$

I.B. Se $\lambda_{coroll.} \gg \ell$ (lungh. lineare scelta) ⇒ posso trascurare effetti propagativi

no limite superiore per le frequenze entro cui il modello è valido

• **GENERATORI INDIPENDENTI DI TENSIONE:**

Preciso valore di tensione ai capi del bipolo indipendentemente dagli altri elementi connesse e dalla corrente che lo attraversa.



$$v(t) = - \frac{c(t)}{a(t)}$$

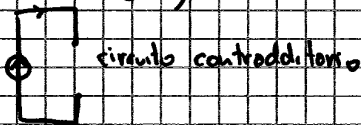
→ caso particolare ($b=c=0$ CIRCUITO CORTO, anche inteso come Resistore $R=0$)

• **GENERATORI INDIPENDENTI DI CORRENTE:**

Preciso valore di corrente ai capi del bipolo indipendentemente dagli altri elementi e dalla tensione ai suoi capi

$$i(t) = - \frac{c(t)}{b(t)}$$

→ caso particolare ($a=c=0$ CIRCUITO APERTO, anche caso $R=\infty$)



- **generatori di tensione controllati:**

controllato in tensione, controllato in corrente

tensione ai suoi capi dipende da un'altra tensione o corrente del circuito.

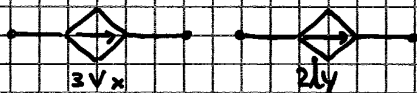
- **fattore moltiplicativo: PARAMETRO DI GUADAGNO** $\left[\frac{V}{A} \right] = \Omega$ → solo per controllato in corrente



- **generatori di corrente controllati:**

corrente ai suoi capi dipende da un'altra corrente o tensione del circuito.

- **parametro di guadagno** $\left[\frac{A}{V} \right] = \frac{1}{\Omega} = S$ → solo per controllato in tensione



Potenza in un Resistore:

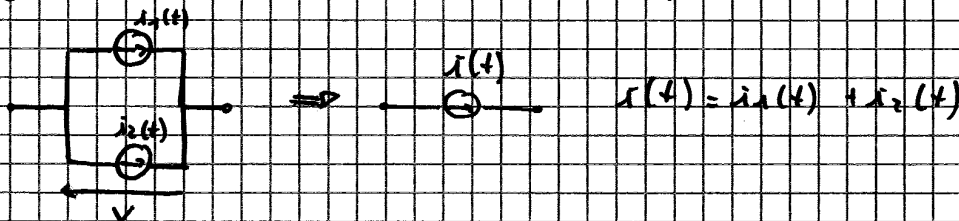
$$p = R \cdot i^2 = \frac{v^2}{R} \quad \text{resistore assorbe sempre potenza}$$

• **Collegamento in SERIE di generatori indip. di TENSIONE**



$$v(t) = e_1(t) + e_2(t)$$

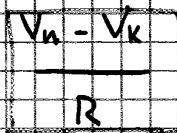
• **Collegamento in PARALLELO di generatori indip. di CORRENTE**



$$i(t) = i_1(t) + i_2(t)$$

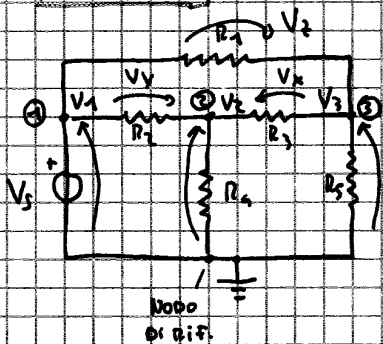
• equazioni KCL in funzione delle tensioni di nodo

③



• corrente, che attraverso una resistenza fluisce dal nodo n al nodo k

es.



• ② $\frac{V_2 - V_1}{R_2} + \frac{V_2}{R_4} + \frac{V_2 - V_3}{R_3} = 0$

• $V_1 = V_s$

• ③ $\frac{V_3 - V_1}{R_1} + \frac{V_3}{R_5} + \frac{V_3 - V_2}{R_3} = 0$

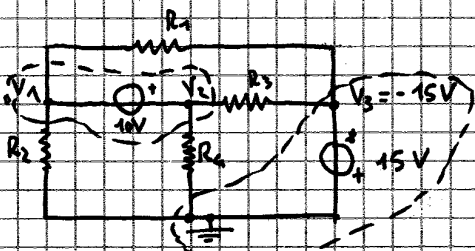
SCRITTURA STANDARD:

$$\begin{cases} g_{11} V_1 + g_{12} V_2 = i_1 \\ g_{21} V_1 + g_{22} V_2 = i_2 \end{cases} \rightarrow \begin{matrix} \text{SOSTITUZIONE} \\ \text{CRAMER} \end{matrix}$$

CIRCUITI CONTENENTI GENERATORI DI TENSIONE: [SUPERNODE]

riformulo Kirchhoff: corrente netta che fluisce attraverso una qualsiasi superficie chiusa deve essere nulla.

es.



N.B. quando uso tutti i nodi per scrivere le eq. delle correnti ottengo eq. tra loro dipendenti.

KCL: $\frac{V_1}{R_2} + \frac{V_1 - (-15)}{R_1} + \frac{V_2}{R_4} + \frac{V_2 - (-15)}{R_3} = 0$

uso KVL: $-V_1 - 10 + V_2 = 0$

ricavo V_1, V_2

CIRCUITI CON GENERATORI CONTROLLATI:

- Scrivo KCL V nodo includendo grandezza del generatore controllato
- Trovo espressione per la variabile di controllo in funzione delle tensioni di nodo
- Sostituisco nelle KCL

RIASSUMENDO:

- 1 Scegliere nodo di riferimento + assegnare tensioni di nodo
- 2 KCL di equilibrio per nodi e SUPERNODI evitando di usare tutti i nodi \rightarrow uso KVL
- 3 Se generatori dipendenti trovare espressione e sostituire negli equilibri
- 4 Scrivere eq.ni in forma standard e risolvere il sistema
- 5 Utilizzo tensioni di nodo trovate per calcolare altre tensioni, correnti di interesse.

• Riduzione del metodo del Tableau.

(5)

$$\begin{cases} \underline{A} \cdot \underline{i} = \underline{0} \\ \underline{v} = \underline{A}^T \cdot \underline{e} \\ \underline{M} \cdot \underline{v} + \underline{N} \cdot \underline{i} = \underline{u}_s \end{cases} \rightarrow \begin{pmatrix} \underline{0} & \underline{0} & \underline{A} \\ -\underline{A}^T & \underline{1} & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{M} & \underline{N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{e} \\ \underline{v} \\ \underline{i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{0} \\ \underline{0} \\ \underline{u}_s \end{pmatrix} \rightarrow \underline{I} \cdot \underline{W} = \underline{u} \text{ con un'unica soluzione se } \det(\underline{I}) \neq 0$$

sostituire le correnti delle KCL:

$$\begin{cases} i_1 = \vartheta(t) \\ i_2 = -G_2 v_2 \\ i_3 = -G_3 v_3 \\ i_4 = G_4 (e_1 - e_2) \\ i_5 = G_5 (e_2 - e_3) \\ i_6 = G_6 (e_1 - e_3) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} -i_1 + i_4 + i_6 = 0 \\ -i_2 - i_4 + i_5 = 0 \\ -i_3 - i_5 - i_6 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} -\vartheta(t) + G_4 (e_1 - e_2) + G_6 (e_1 - e_3) = 0 \\ G_2 \cdot e_2 - G_4 (e_1 - e_2) + G_5 (e_2 - e_3) = 0 \\ G_3 \cdot e_3 - G_5 (e_2 - e_3) - G_6 (e_1 - e_3) = 0 \end{cases} \Rightarrow \underline{G} \cdot \underline{e} = \underline{u}$$

sono riuscito a ricondurre ad un sistema di $n-1$ eq. e $n-1$ incognite.

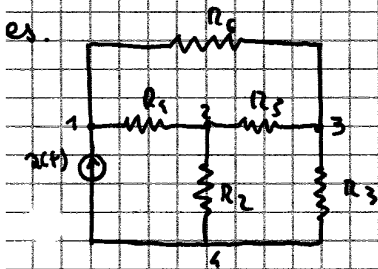
• METODO DEI NODI: funziona anche in presenza di generatori

$$\underline{G} \cdot \underline{e} = \underline{u}$$

\underline{G} : matrice delle conduttanze: g_{ii} = somma conduttanze che incidono nell'esimo nodo del circuito

\underline{u} = somma algebrica delle intensità di corrente impresse dai generatori: (+ entranti, - uscenti)

g_{ij} , con $i \neq j$ sono l'opposto delle conduttanze esistenti tra l' i -esimo e il j -esimo nodo



$$\underline{G} = \begin{pmatrix} G_1 + G_4 & -G_4 & -G_6 \\ -G_4 & G_1 + G_2 + G_5 & -G_5 \\ -G_6 & -G_5 & G_3 + G_5 + G_6 \end{pmatrix}$$

$$\underline{u} = \begin{pmatrix} \vartheta(t) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} (G_1 + G_4) e_1 - G_4 e_2 - G_6 e_3 = \vartheta(t) \\ -G_4 e_1 + (G_2 + G_4 + G_5) e_2 - G_5 e_3 = 0 \\ -G_6 e_1 - G_5 e_2 + (G_3 + G_5 + G_6) e_3 = 0 \end{cases} \rightarrow \text{coincide con risultato ottenuto con il metodo del Tableau}$$

- AMPLIFICATORE OPERAZIONALE:

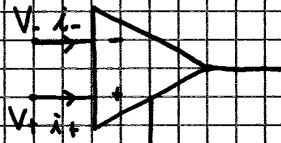
Circuito integrato per realizzare addizioni, sottrazioni, derivazioni, integrazioni sui segnali.

• 7 terminali:

1 OUT; 2 Alimentazione E_-, E_+ ; 2 Ingresso I_{n-}, I_{n+} ; 2 OFFSET

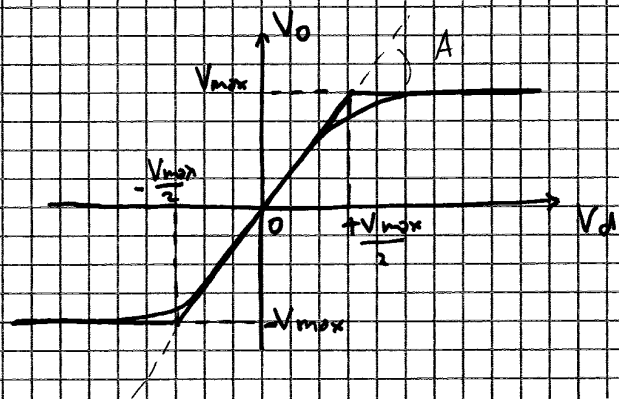
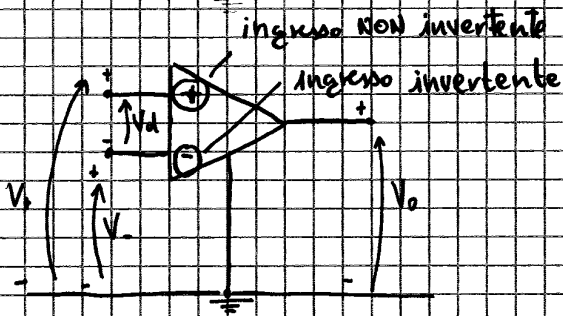
Di solito implementato in un circuito Dual InLine Package

In questo caso consideriamo solo 4 terminali



$V_d = V_+ - V_-$: TENSIONE DIFFERENZIALE

• caratteristica di trasferimento

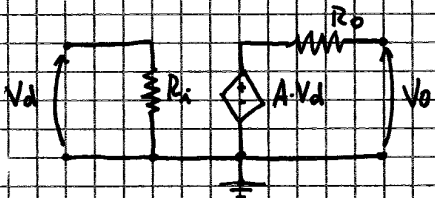


• regione lineare: $-10 \mu V < V_d < +10 \mu V$

• pendenza A: guadagno ad anello aperto

• tensioni di soglia sono circa uguali alle tensioni di alimentazione $E_+, E_- \sim 12V, 15V$

- CIRCUITO EQUIVALENTE IN REGIONE LINEARE:



- R_i : resistenza visto in ingresso: valori elevati $\sim 10^5 \Omega$
- R_o : " " in uscita: valori piccoli $\sim 5,50 \Omega$
- A: guadagno o pendenza regione lineare, val. elev. $\sim 10^5 \text{ to } 10^6$

• Amplificatore Op. IDEALE:

hyp. $R_i \rightarrow +\infty, R_o \rightarrow 0, A \rightarrow +\infty$

Circuito aperto virtuale

corto circuito virtuale

$i_+ = i_- = 0$

V_+, V_- in C.A.

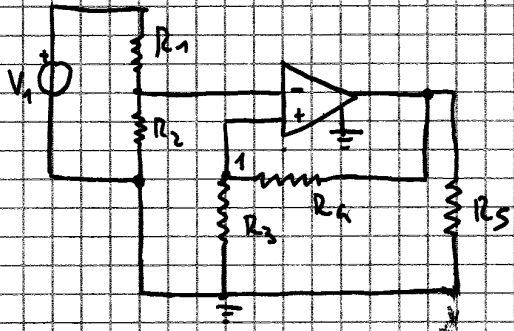
$-\frac{V_{max}}{A} < V_d < \frac{V_{max}}{A}$ $V_d \neq 10^{-4} \text{ to } 10^{-9} V$

$V_d \rightarrow 0$

come V_+ e V_- collegati da un filo

N.B. Se in uscita collego un resistore, esso non ha alcun effetto sulla tensione V_o

esempio



$V_1 = 1V$

$e_1 = V_+$ • Uso C.C. virtuale (7)

$R_1 = 10k\Omega$

$V_- = V_+ = e_1$

$R_2 = 90k\Omega$

KVL:

$\frac{V_0 - e_1}{R_3} = \frac{e_1}{R_4}$

$R_3 = 50k\Omega$

$R_4 = 100k\Omega$

$V_0 = 3 \cdot e_1$

$R_5 = 10k\Omega$

V_- è la tensione ai capi di $R_2 \Rightarrow$ partitore di tensione (poiché corrente all'ingresso invertente è nulla)

$$e_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1 = \frac{90k}{10k + 90k} \cdot 1 = 0,9V$$

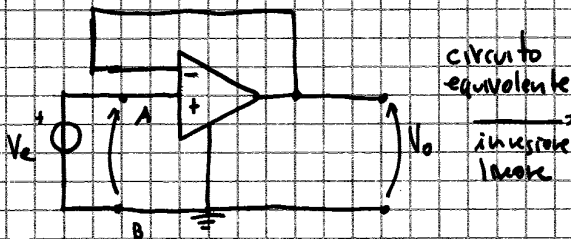
$\Rightarrow V_0 = 3 \cdot 0,9 = 2,7V$

• KCL nodo uscita: $i_0 = i_1 + i_2 \Rightarrow i_0 = V_0 \left(\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_4} \right) = 2,7 \left(\frac{1}{10k} + \frac{1}{100k} \right) = 288 \mu A$

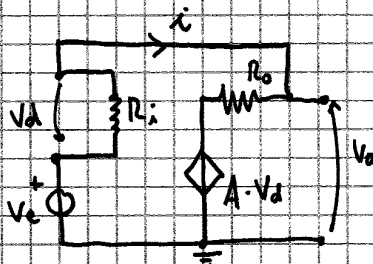
• verifica risultati ottenuti: Superficie chiusa contenente l'A.O. \Rightarrow somma correnti entranti in superficie dev'essere nulla:

$i_0 + i_1 + i_2 + i_m = 0 \Rightarrow i_0 = -i_m$

• Analisi nodale di un A.O. a guadagno unitario (BUFFER)



circuito equivalente
innesse
lavoro



$$\begin{cases} i = \frac{V_e - AV_d}{R_i + R_o} \\ V_d = R_i \cdot i \end{cases} = \begin{cases} i = \frac{V_e - R_i \cdot i \cdot A}{R_i + R_o} \\ V_d = R_i \cdot i \end{cases} = \begin{cases} i = \frac{V_e}{R_i + R_o} - \frac{A \cdot R_i \cdot i}{R_i + R_o} \\ V_d = R_i \cdot i \end{cases} = \begin{cases} i \left(1 + \frac{A R_i}{R_i + R_o} \right) = \frac{V_e}{R_i + R_o} \\ V_d = R_i \cdot i \end{cases}$$

$$\begin{cases} i = \frac{V_e}{R_i(1+A) + R_o} \\ V_d = R_i \cdot i \end{cases} = \begin{cases} i = \frac{V_e}{R_i(1+A) + R_o} \\ V_d = \frac{R_i V_e}{R_i(1+A) + R_o} \end{cases} \Rightarrow \boxed{V_0 = R_o \cdot i + A \cdot V_d} = (R_o + R_i \cdot A) \cdot i$$

• Nell'ipotesi di A.O. ideale $A \rightarrow +\infty$

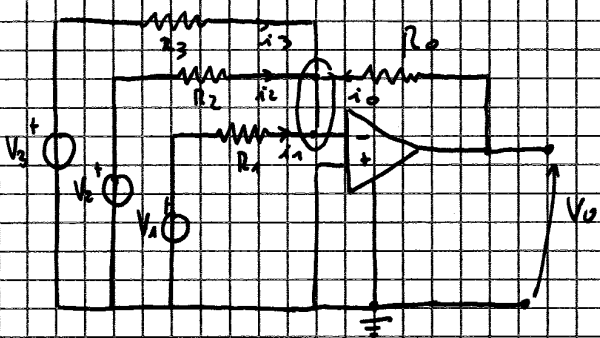
$\frac{R_o + R_i \cdot A}{(1+A) \cdot R_i + R_o} \sim \frac{R_o + R_i \cdot A}{A \cdot R_i + R_o} = 1$

$$= \boxed{\frac{R_o + R_i \cdot A}{(1+A) \cdot R_i + R_o} \cdot V_e}$$

In queste condizioni $V_0 = V_e$ $V_- = V_0$ $V_+ = V_e$

A.O. in configurazione di SOMMATORE

(8)



$$\frac{e_1 - V_1}{R_1} + \frac{e_1 - V_2}{R_2} + \frac{e_1 - V_3}{R_3} + \frac{e_1 - V_0}{R_0} = 0$$

A.O. ideale: $e_1 = V_- = V_+ = 0$

$$\Rightarrow -\frac{V_1}{R_1} - \frac{V_2}{R_2} - \frac{V_3}{R_3} - \frac{V_0}{R_0} = 0$$

$$\Rightarrow V_0 = -\frac{R_0 V_1}{R_1} - \frac{R_0 V_2}{R_2} - \frac{R_0 V_3}{R_3}$$

invertibile polarità tra ingresso e uscita

• Circuito effettivo una combinazione lineare:

$$V_0 = \alpha V_1 + \beta V_2 + \gamma V_3$$

$$\alpha = -\frac{R_0}{R_1} \quad \beta = -\frac{R_0}{R_2} \quad \gamma = -\frac{R_0}{R_3}$$

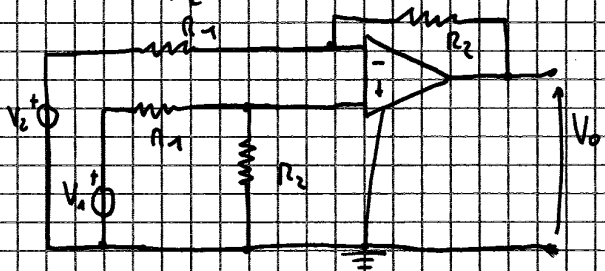
• Ciascun ingresso amplificatore: \neq ed. se $R_0 > R_1$ $R_0 < R_2$ $R_0 < R_3$

\Rightarrow ingresso V_1 amplificato altri 2 attenuati

se $R_1 = R_2 = R_3 = R_0$

$V_0 = -(V_1 + V_2 + V_3)$ \Rightarrow sommatore invertente (attuabile anche con 3 gen. a valle)

A.O. in configurazione DIFFERENZIALE:



• partitore di tensione $V_+ = V_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \stackrel{\text{cc. virtuale}}{=} V_-$

• KCL ingresso invertente

$$\frac{V_2 - V_-}{R_1} + \frac{V_0 - V_-}{R_2} = 0$$

• Amplifica la differenza tra 2 segnali eliminando eventuali segnali di disturbo comuni

$$V_0 = -\frac{R_2}{R_1} V_2 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_-$$

Uscita proporzionale alla differenza tra le tensioni dei generatori.

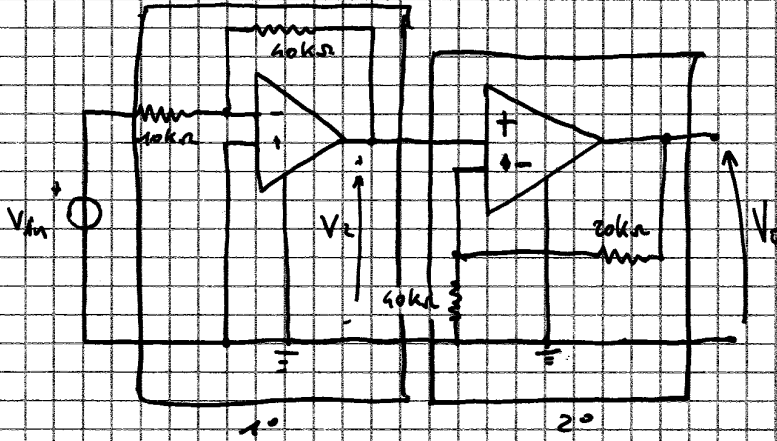
$$V_0 = -\frac{R_2}{R_1} V_2 + \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1}\right) \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1$$

[se tensioni di ingresso \neq uscita è nulla]

$$V_0 = \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2)$$

- CASCATA INVERTENTE - NON INVERTENTE

Ⓢ



$$V_2 = - \frac{40}{20} V_{in} = -2 V_{in}$$

$$V_o = 1 + \frac{20}{40} V_2 = 1,5 V_2$$

$$\Rightarrow \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_2}{V_{in}} \cdot \frac{V_o}{V_2} = -6$$

N.B. Analisi circuiti in cascata è semplice se ogni stadio termina con un operazionale

- ANALISI DEI CIRCUITI, TEOREMI:

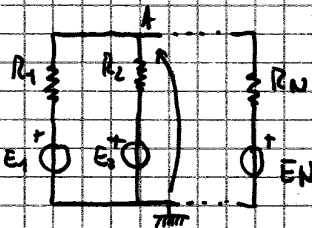
• TEOREMA DI MILLMAN: ottenere immediatamente tensione tra 2 nodi del parallelo, A, B.

$$V_{AB} = \frac{\sum_{k=1}^N G_k \cdot V_k}{\sum_{i=1}^N G_i}$$

N = nr° di rami

N.B. Se su un ramo è presente solo un resistore allora è possibile comunque utilizzare tale teorema introducendo un generatore di tensione indipendente di valore nullo

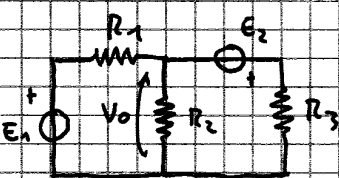
DIM: metodo dei nodi



$$\frac{V-V_1}{R_1} + \frac{V-V_2}{R_2} + \dots + \frac{V-V_N}{R_N} = 0 \quad \text{KCL a A}$$

$$V \cdot \sum_{i=1}^N G_i = \sum_{k=1}^N V_k \cdot G_k \Rightarrow V = \frac{\sum_{k=1}^N G_k \cdot V_k}{\sum_{i=1}^N G_i}$$

esempio: calcolare Vo



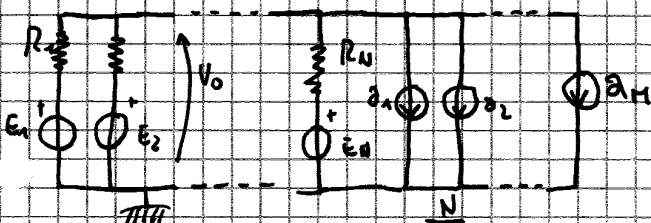
$$V_o = \frac{\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

• Teo. Millmann in presenza di generatori di corrente indipendenti

• gen. di correnti, poiché posti in // sostituiscono con 1: sommo algebrico

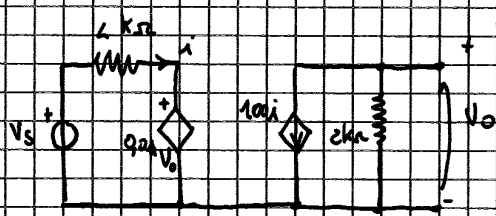
$$i(t) = \sum_{i=1}^M i_i(t)$$

i(t) > 0 se corrente è entrante nel nodo



$$\Rightarrow V = \frac{\sum_{k=1}^N G_k \cdot V_k + \sum_{j=1}^M i_j}{\sum_{i=1}^N G_i}$$

esempio:



$$V_s = 0.01 V_o = 10$$

$$V_o = \frac{V_s}{0.01} = 1000 V_s$$

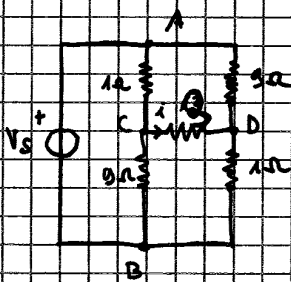
V_o : EFFETTO legato a V_s : CAUSA (10)

da $V_o = -1000 V_s$

$$i = \frac{V_s - 0.01 V_o}{1 \cdot 10^3} = 0.5 \cdot 10^{-3} V_s$$

esempio: RISONANZA $i = ?$

analisi nodale:



$$\begin{bmatrix} 13 & -3 \\ -3 & 13 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V_c \\ V_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 9V_s \\ V_s \end{pmatrix}$$

$$V_c = \frac{\begin{vmatrix} 9V_s & -3 \\ V_s & 13 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 13 & -3 \\ -3 & 13 \end{vmatrix}} = \frac{117V_s + 3V_s}{160} = 0.75 V_s$$

KCL @ C $\frac{V_c - V_s}{12} + \frac{V_c - V_D}{13} + \frac{V_c}{9} = 0$

KCL @ D $\frac{V_D - V_s}{9} + \frac{V_D + V_c}{13} + \frac{V_D}{1} = 0$

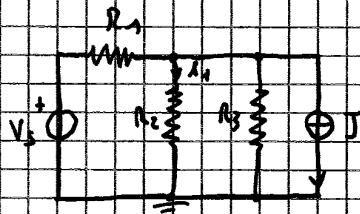
$$V_D = \frac{\begin{vmatrix} 13 & 9V_s \\ -3 & V_s \end{vmatrix}}{160} = \frac{13V_s + 27V_s}{160} = 0.25 V_s$$

$$\Rightarrow i = \frac{V_c - V_D}{3} = \frac{1}{6} V_s$$

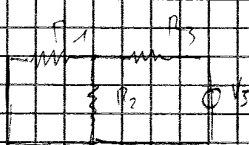
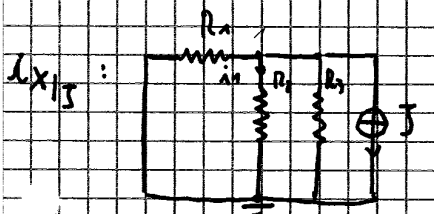
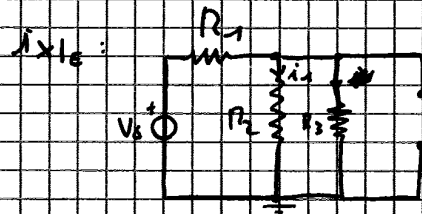
PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE DEGLI EFFETTI:

In un circuito dinamico lineare, qualunque tensione o corrente (risposta) è la somma degli effetti dovuti ai singoli generatori indipendenti quando agiscono uno alla volta. I generatori controllati restano invariati.

esempio:

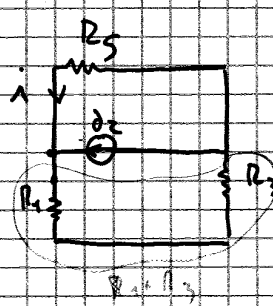
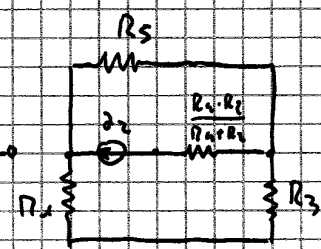
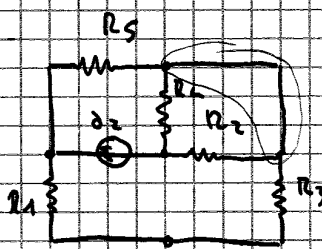


$$i_x = i_{x|E} + i_{x|J}$$



$$i_{x|E} = \frac{R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} V_s$$

$$i_{x|J} = - \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 \parallel R_3 + R_2} J$$



$$i_2 = \frac{R_1 + R_3}{R_1 + R_3 + R_5} i_2$$

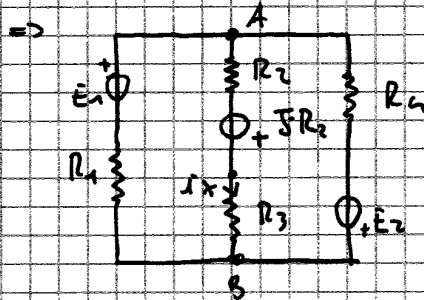
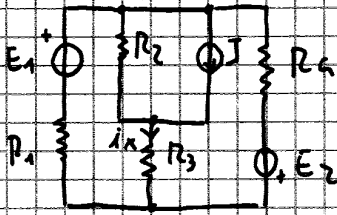
(11)

$$i = \frac{1}{R_1 + R_3 + R_5} (e_1 + e_2 + R_3 i_1 - (R_1 + R_3) i_2)$$

esempio:

$i_x = ?$

con S.E. ci si impegna un era, osservo che J, R_2 in serie

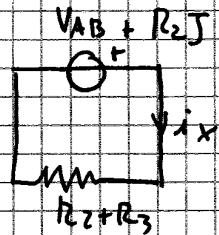


• posso applicare Millman

$$V_{AB} = \frac{\frac{E_1}{R_1} - \frac{R_2 J}{R_2 + R_3} - \frac{E_2}{R_4}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2 + R_3} + \frac{1}{R_4}}$$

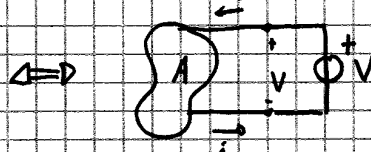
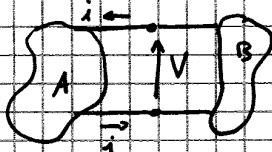
• Dato che mi serve solo i_x

posso pensare ad un circuito così fatto

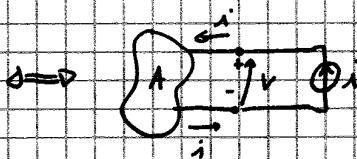
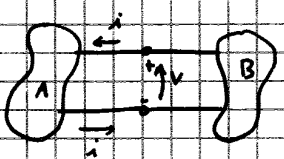


$$i_x = \frac{V_{AB} + R_2 J}{R_2 + R_3}$$

PRINCIPIO DI SOSTITUZIONE:

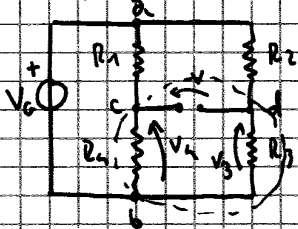


se $V=0 \Rightarrow C.C.$



se $i=0 \Rightarrow C.A.$

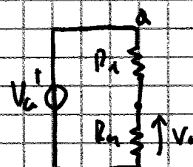
esempio:



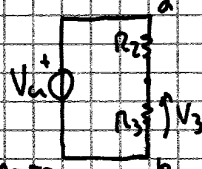
$$V + V_3 - V_4 = 0 \Rightarrow V = V_4 - V_3$$

V_G a capo di a b è NOTA

\Rightarrow PRINCIPIO DI SOSTITUZIONE:



$$\Rightarrow V_4 = \frac{R_4}{R_1 + R_4} V_G$$



$$\Rightarrow V_3 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} V_G$$

$$\Rightarrow V = \left(\frac{R_4}{R_1 + R_4} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) V_G$$

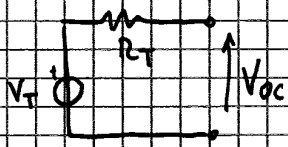
analogsimile

$V=0$ per $\frac{R_4}{R_1 + R_4} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \Rightarrow R_1 R_3 = R_2 R_4$ condizione di equilibrio del ponte

TEOREMA DI THEVENIN

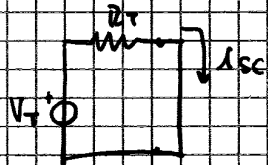
- sostituire circuiti a 2 terminali a-dinamici contenenti resistenze e generatori con circuiti equivalenti semplici.

N.B. Unica restrizione: variabili di controllo dei generatori controllati in esso presenti devono anch'esse far parte del circuito.



$$V_T = V_{oc}$$

• La tensione del generatore equivalente di Thevenin è uguale alla tensione a vuoto del circuito originale.

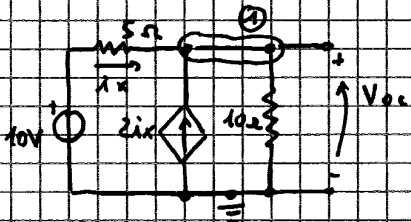


• corrente di corto circuito è uguale nel circuito originale e in quello di Th.

$$\Rightarrow R_T = \frac{V_T}{I_{sc}} \Rightarrow R_{Th} = \frac{V_{oc}}{I_{sc}}$$

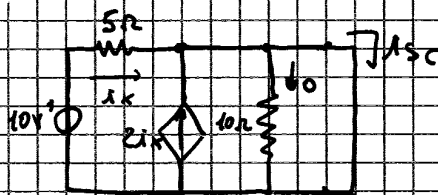
N.B. Se rete non contiene generatori dipendenti posso ricavare R_{Th} disattivando tutti i generatori indipendenti del circuito di partenza e calcolando la resistenza che si vede ai suoi capi.

rete con generatore dipendente: esempio \rightarrow determino tensione a vuoto + C. di C.C.



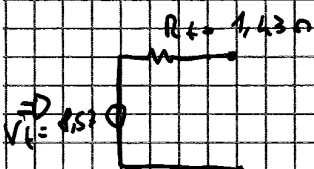
$$\text{KCL @ } \textcircled{1} : i_x + 2i_x = \frac{V_{oc}}{10}$$

$$i_x = \frac{10 - V_{oc}}{5} \Rightarrow 3 \left(\frac{10 - V_{oc}}{5} \right) = \frac{V_{oc}}{10} \Rightarrow V_{oc} = 1,57V$$



$$i_x = \frac{10V}{5\Omega} = 2A \quad I_{sc} = 3i_x = 6A$$

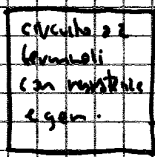
$$R_{Th} = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} = \frac{1,57}{6} = 1,43\Omega$$



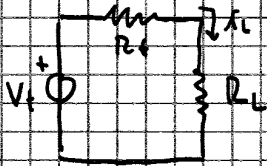
- MASSIMO TRASFERIMENTO DI POTENZA

(13)

vogliamo che venga trasferita la max potenza al carico R_L



sostituisco con l'equivalente Thevenin



$$i_L = \frac{V_t}{R_t + R_L}$$

potenza ceduta al carico

$$P_L = i_L^2 R_L = \frac{V_t^2 R_L}{(R_t + R_L)^2}$$

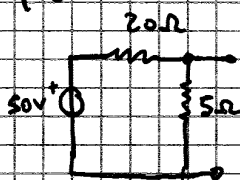
egualo a zero la derivata di P_L rispetto a R_L

$$\frac{dP_L}{dR_L} = \frac{V_t^2 (R_t + R_L)^{-2} - 2 V_t^2 R_L (R_t + R_L)^{-3}}{(R_t + R_L)^4} = 0 \Rightarrow \boxed{R_t = R_L}$$

La Resistenza di carico che assorbe la massima potenza da un circuito a 2 terminali è quella che eguaglia la resistenza di Thevenin.

$$\Rightarrow \boxed{P_{Lmax} = \frac{V_t^2}{4R_t}}$$

esempio:



- disattivo generatore $\Rightarrow R_t = 20 \Omega$

- partitore $\Rightarrow V_{th} = 50 \frac{5}{25} = 10V$

\Rightarrow resistenza di carico in grado di assorbire la massima potenza è $R_L = R_t = 20 \Omega$

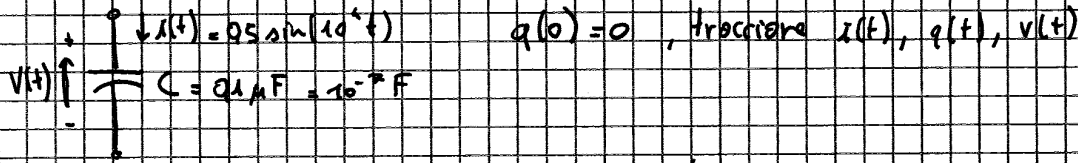
$$P_{Lmax} = \frac{V_t^2}{4R_t} = 6,25 W$$

• Tensione in termini di corrente:

$$q(t) = \int_{t_0}^t i(t) dt + q(t_0)$$

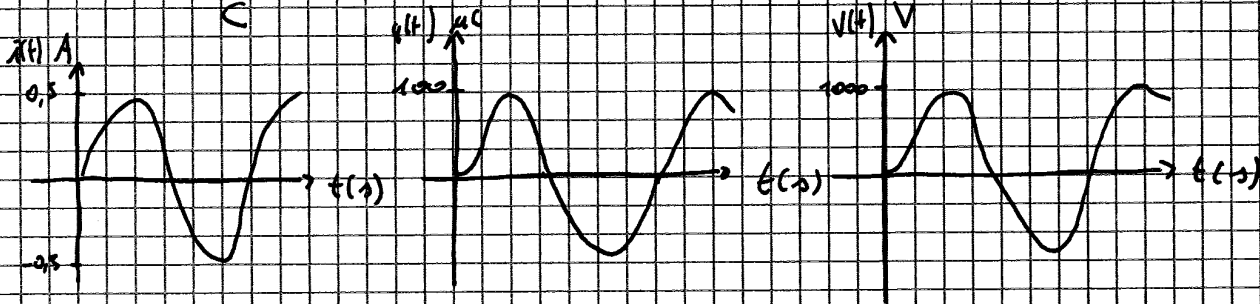
$$v(t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(t) dt + v(t_0)$$

esempio:



$$q(t) = \int_0^t i(t) dt + q(0) = \int_0^t 0.5 \sin(10^4 t) dt = 0.5 \cdot 10^{-4} [1 - \cos(10^4 t)]$$

$$v(t) = \frac{q(t)}{C} = 500 [1 - \cos(10^4 t)]$$



ENERGIA IMMAGAZZINATA

$$p(t) = v(t) i(t) = C v \frac{dv}{dt}$$

se $v(t_0) = 0$ condensatore scarico

• Al crescere della tensione l'energia fornita al condensatore è immagazzinata nel campo elettrico presente fra i piastre.

$$W(t) = \int_0^t p(t) dt = \int_0^t C v \frac{dv}{dt} dt \Rightarrow W(t) = \int_0^{v(t)} C v dv$$

$$\Rightarrow W(t) = \frac{1}{2} C v^2(t)$$

$$\text{oppure } W(t) = \frac{1}{2} v(t) q(t)$$

$$\text{oppure } W(t) = \frac{q^2(t)}{2C}$$

energia immagazzinata
 che può essere restituita
 al circuito

INDUTTORE:

(15)

In flusso variabile nel tempo che si concatena a una bobina induttore ai suoi capi una differenza di potenziale.

$$V(t) = L \frac{di}{dt} \quad \text{convenzione dell'utilizzatore} \quad [L] = 1H = \frac{V \cdot s}{A}$$

N.B. Inerzia del fluido a scorrere. → Differenza di pressione fra gli estremi del tubo si instaura solamente quando la velocità del flusso sta aumentando o diminuendo.

• corrente in funzione della tensione

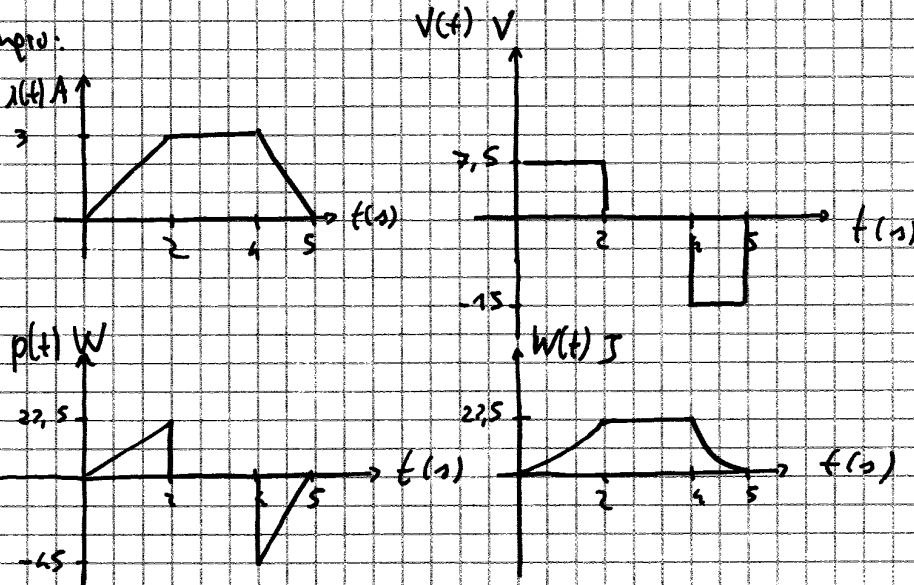
$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v(t) dt + i(t_0)$$

• energia immagazzinata:

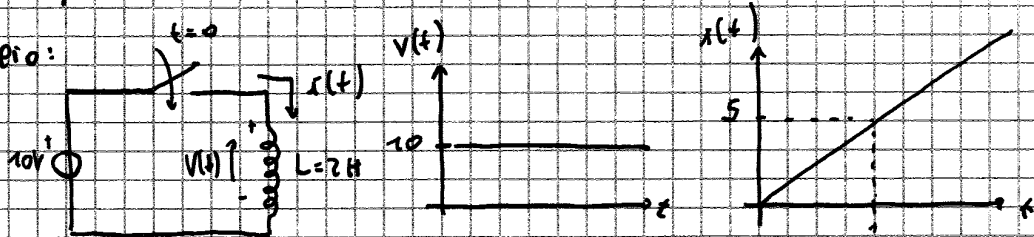
$$p(t) = v(t) i(t) \Rightarrow p(t) = L i(t) \frac{di}{dt}$$

⇒ $w(t) = \frac{1}{2} L i^2(t)$ energia immagazzinata nell'induttore che viene restituita al circuito se la corrente torna ad annullarsi.

esempio:



esempio:



• corrente nell'induttore aumenta gradualmente dopo la chiusura dell'interruttore.

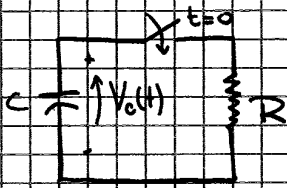
N.B. Un istantaneo annullamento della corrente determinerebbe una tensione ∞ ai capi dell'induttore. (di durata infinitesima)

TRANSITORI:

(15)

• Circuiti RC del primo ordine:

- scarica di un condensatore



KCL nodo superiore una volta chiuso l'interruttore:

$$C \frac{dV_c(t)}{dt} + \frac{V_c(t)}{R} = 0$$

$$\rightarrow RC \frac{dV_c(t)}{dt} + V_c(t) = 0$$

EQ DIFF. \Rightarrow sol. $V_c(t) = K e^{st}$

sostituisco nell'equazione per trovare $s = -\frac{1}{RC}$

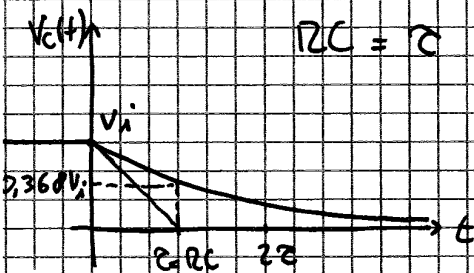
$$\Rightarrow V_c(t) = K e^{-t/RC}$$

• tensione non cambia istantaneamente una volta chiuso l'interruttore

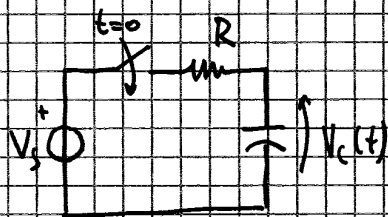
\Rightarrow non deve presentare discontinuità: $V_c(0^+) = V_c(0^-) = V_i = K e^{t=0} = K$

$$\rightarrow V_c(t) = V_i e^{-t/RC}$$

• dopo 5τ tensione del condensatore ≈ 0



- carica di un condensatore



KCL: $C \frac{dV_c(t)}{dt} + \frac{V_c(t) - V_s}{R} = 0$

$$RC \frac{dV_c(t)}{dt} + V_c(t) = V_s$$

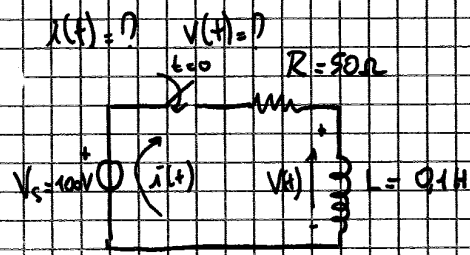
• tensione ai capi del condensatore

non può variare bruscamente: $\Rightarrow V_c(0^+) = V_c(0^-) = 0$

sol. $V_c(t) = K_1 + K_2 e^{st} \rightarrow$ sostituisco: $(1 + RCs)K_2 e^{st} + K_1 = V_s$

$$s = -\frac{1}{RC} \quad K_1 = V_s \quad V_c(0^+) = 0 = V_s + K_2 e^0 = V_s + K_2 \quad K_2 = -V_s$$

ANALISI DI UN CIRCUITO RL [chiusura interruttore]



per $t < 0$ $i(t) = 0$

KVL: $R i(t) + L \frac{di}{dt} = V_s$

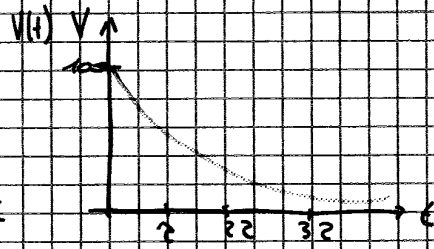
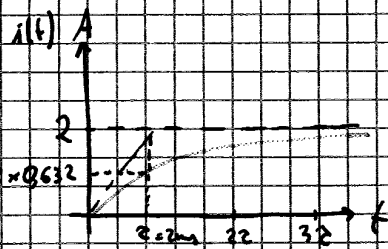
⇒ Sol: $i(t) = k_1 + k_2 e^{st}$ → sostituisco: $R k_1 + (R k_2 + s L k_2) e^{st} = V_s$

$k_1 = \frac{V_s}{R} = 2$ $s = \frac{-R}{L}$ ⇒ $i(t) = 2 + k_2 e^{-tR/L}$

C.I. istante dopo chiusura corrente ancora nulla:

$i(0^+) = 0 = 2 + k_2 e^0 = 2 + k_2 \Rightarrow k_2 = -2$

⇒ $i(t) = 2 - 2 e^{-t/\tau}$ per $t > 0$ $\tau = \frac{L}{R}$



$V(t) = 0$ per $t < 0$

$V(t) = 100 - 50 i(t)$ per $t > 0$

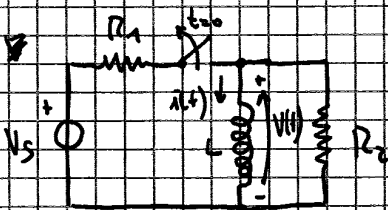
⇒ $V(t) = 100 e^{-t/\tau}$

A $t=0$ tensione sull'induttore bruscamente da 0-100V

Perché corrente cresce gradualmente, anche la tensione sul resistore cresce e la tensione sull'induttore scende

A regime $V(t) = 0$ dato che induttore → c.c.

ANALISI CIRCUITO RL [apertura interruttore]



$V(t) = 0$ $t < 0$

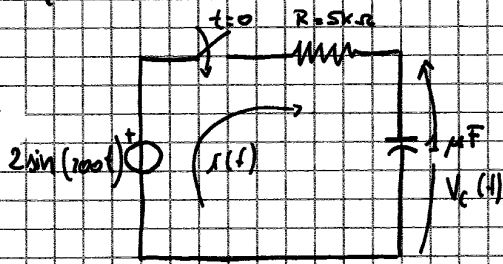
$i(t) = \frac{V_s}{R_1}$ $t < 0$

Quando apro corrente continua a scorrere su induttore, un circuito si richiude su R_2 producendo tensione → riduzione corrente istantanea.

La corrente a regime, per $t > 0$ deve essere 0.

$i(t) = K e^{-t/\tau}$ $\tau = \frac{L}{R_2}$ $i(0^+) = \frac{V_s}{R_1} = K e^0 = K$

esempio: Analisi di un circuito RC con generatore sinusoidale



$$V_c(0^+) = 1V$$

KVL:

$$R i(t) + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + V_c(0) - 2 \sin(200t) = 0$$

$$R \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} i(t) = 400 \cos(200t)$$

$$RC \frac{di(t)}{dt} + i(t) = 400 C \cos(200t) \rightarrow 5 \times 10^{-3} \frac{di(t)}{dt} + i(t) = 400 \times 10^{-6} \cos(200t)$$

$$\Rightarrow i_p(t) = A \cos(200t) + B \sin(200t)$$

$$-A \sin(200t) + B \cos(200t) + A \cos(200t) + B \sin(200t) = 400 \times 10^{-6} \cos(200t)$$

$$\begin{cases} -A + B = 0 \\ B + A = 400 \times 10^{-6} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = 200 \times 10^{-6} = 200 \mu A \\ B = 200 \times 10^{-6} = 200 \mu A \end{cases}$$

$$i_p(t) = 200 \cos(200t) + 200 \sin(200t) \mu A$$

• EQ. omogenea:

$$RC \frac{di(t)}{dt} + i(t) = 0 \Rightarrow i_h(t) = K e^{-t/RC}$$

• Sol. GENERALE

$$i(t) = 200 \cos(200t) + 200 \sin(200t) + K e^{-t/RC} \mu A$$

• C.I.

$$V_c(0^+) = 1V \Rightarrow V_R(0^+) = -1V \quad i(0^+) = \frac{V_R(0^+)}{R} = -200 \mu A$$

$$2 \sin(200 \cdot 0) = 0V \quad i(0^+) = -200 = 200 + K \mu A \Rightarrow K = -400 \mu A$$

$$\Rightarrow i(t) = 200 \cos(200t) + 200 \sin(200t) - 400 e^{-t/RC} \mu A$$

• Soluzione particolare: (risposta forzata) (19)

trovare $x_p(t)$ che soddisfi l'eq. diff.

• Nel caso di generatori DC, la soluzione particolare ricavata direttamente dal circuito sostituendo gli induttori con cortocircuiti e i condensatori con circuiti aperti.

• Soluzione complementare: (eq. omogenea)

$$\boxed{s^2 + 2\alpha s + \omega_0^2 = 0} \quad \text{eq. caratteristica}$$

- rapporto di smorzamento:

$$\boxed{\zeta = \frac{\alpha}{\omega_0}}$$

$$s_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$$

$$s_2 = -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$$

A seconda del valore di ζ :

① CASO SOVRASMOZZATO: $\zeta > 1$ radici reali e distinte

$$\boxed{x_c(t) = K_1 e^{s_1 t} + K_2 e^{s_2 t}}$$

② CASO CRITICO $\zeta = 1$ radici reali e coincidenti

$$\boxed{x_c(t) = K_1 e^{s_1 t} + K_2 t e^{s_1 t}}$$

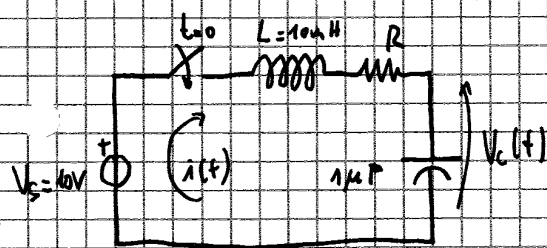
③ CASO SOTTOSMOZZATO $\zeta < 1$ radici complesse coniugate

$$s_1 = -\alpha + j\omega_n \quad s_2 = -\alpha - j\omega_n$$

$$\omega_n = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \quad \begin{array}{l} \text{PULSAZIONE} \\ \text{NATURALE} \end{array}$$

$$\boxed{x_c(t) = K_1 e^{-\alpha t} \cos(\omega_n t) + K_2 e^{-\alpha t} \sin(\omega_n t)}$$

• esempio: circuito 2° ordine con generatore DC



C.I. $i(0) = 0$
 $V_c(0) = 0$

Scrivere l'eq. diff. per $V_c(t)$
 per $R = 300, 200, 100 \Omega$

- espressioni connesse ai capi del cond.

$$i(t) = C \frac{dV_c(t)}{dt}$$

(20)

CASO II ($R = 200 \Omega$)

$$\alpha = \frac{R}{2L} = 10^4$$

$$\frac{\alpha}{\omega_0} = \alpha / \omega_0 = 1 \quad \text{smorzamento critico}$$

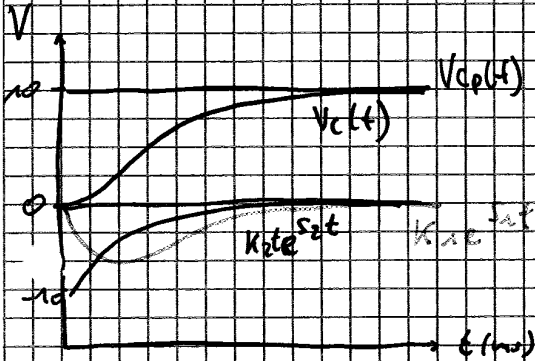
$$s_1 = s_2 = -10^4$$

$$V_c(t) = 10 + K_1 e^{s_1 t} + K_2 t e^{s_1 t}$$

$$\begin{cases} V_c(0) = 0 \\ \frac{dV_c}{dt}(0) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 10 + K_1 = 0 \\ s_1 K_1 + K_2 = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_c(t) = 10 - 10 e^{-10^4 t} - 10 t e^{-10^4 t}$$



CASO III $R = 100 \Omega$

$$\alpha = \frac{R}{2L} = 5000$$

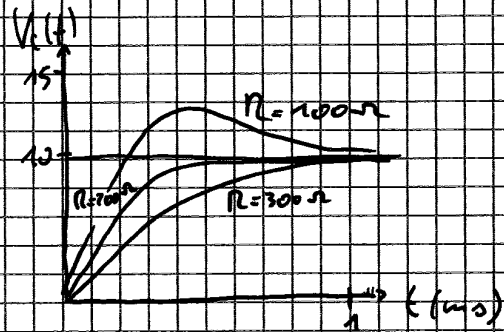
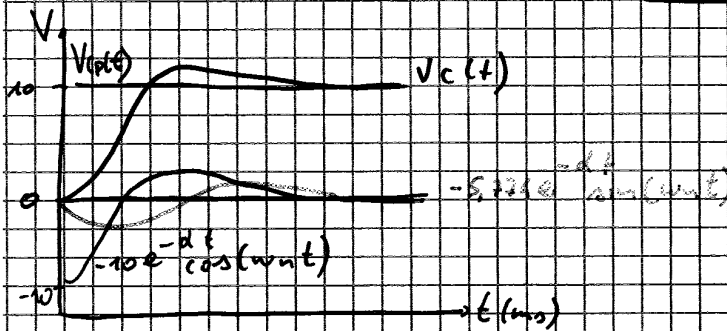
$$\frac{\alpha}{\omega_0} = \frac{\alpha}{\omega_0} = 0.5 \quad \text{CASO sottosmorzato}$$

$$\omega_n = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = 8660$$

$$V_c(t) = 10 + K_1 e^{-\alpha t} \cos(\omega_n t) + K_2 e^{-\alpha t} \sin(\omega_n t)$$

$$C.I. \begin{cases} 10 + K_1 = 0 \\ -\alpha K_1 + \omega_n K_2 = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_c(t) = 10 - 10 e^{-\alpha t} \cos(\omega_n t) - 5.774 e^{-\alpha t} \sin(\omega_n t)$$



Risposta completa per i 3 valori di resistenza:

ANALISI IN REGIME PERMANENTE SINUSOIDALE

• Correnti e tensioni sinusoidali

$$V(t) = V_m \cos(\omega t + \theta)$$

V_m : VALORE di PICCO

ω : PULSAZIONE

θ : ANGOLO DI FASE

$$\omega = 2\pi f$$

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

$$\sin(\theta) = \cos(\theta - 90^\circ)$$

• VALORI EFFICACI:

$$p(t) = \frac{V^2(t)}{R}$$

$$E_T = \int_0^T p(t) dt : \text{energia fornita in 1 periodo}$$

• POTENZA MEDIA FORNITA ALLA RESISTENZA:

$$P_{\text{avg}} = \frac{E_T}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

• Riscuo:

$$P_{\text{avg}} = \frac{\int_0^T \frac{V^2(t)}{R} dt}{T}$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{V^2(t)}{R} dt$$

$$\Rightarrow V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} \quad \text{valore efficace / root mean square}$$

$$\Rightarrow P_{\text{avg}} = \frac{V_{\text{rms}}^2}{R}$$

- Analogamente

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

$$P_{\text{avg}} = I_{\text{rms}}^2 \cdot R$$

• VALORE EFFICACE di UNA SINUSOIDE:

$$V(t) = V_m \cos(\omega t + \theta) \Rightarrow V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_m^2 \cos^2(\omega t + \theta) dt}$$

$$\cos^2(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2x)$$

$$\Rightarrow V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{V_m^2}{2T} \left[t + \frac{1}{2\omega} \sin(2\omega t + \theta) \right]_0^T}$$

$$\text{Se } x < 0: \quad \theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \pm 180^\circ \quad (22)$$

identità di Eulero

$$e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$$

$$e^{-j\theta} = \cos\theta - j\sin\theta$$

$$|e^{j\theta}| = \sqrt{\cos^2\theta + \sin^2\theta} = 1$$

$$\Rightarrow \underline{e^{j\theta} = 1 \angle \theta = \cos\theta + j\sin\theta} \quad \Rightarrow \underline{A \angle \theta = A \times (1 \angle \theta) = A e^{j\theta} = A \cos\theta + j A \sin\theta}$$

• Per sommare/sottrarre numeri complessi devo ricondurmi alla forma rettangolare

• Per moltiplicare: $Z_1 \times Z_2 = |Z_1| |Z_2| \angle \theta_1 + \theta_2 = |Z_1| |Z_2| e^{j(\theta_1 + \theta_2)}$

• Per dividere: $\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{|Z_1| \angle \theta_1}{|Z_2| \angle \theta_2} = \frac{|Z_1|}{|Z_2|} e^{j(\theta_1 - \theta_2)}$

FASORI:

$$V_1(t) = V_1 \sin(\omega t + \theta_1) \Rightarrow \text{fasore associato: } \underline{V_1 = V_1 \angle \theta_1}$$

• Numero complesso che ha un'ampiezza uguale al valore di picco e lo stesso angolo di fase della sinusoidale.

N.B. [Se i fasori non sono etichettati con il pedice rms servono da riferire associati al valore di picco.]

• convertire in $\cos(\theta)$ usando $\sin(\theta) = \cos(\theta - 90^\circ)$

Sommare le sinusoidi usando i fasori:

1) scrivo tutte in termini di funzioni coseno

$$v(t) = 10 \cos(\omega t) + 5 \cos(\omega t - 30^\circ) + 5 \cos(\omega t + 90^\circ)$$

2) formula di Eulero:

$$\cos(\theta) = \operatorname{Re}(e^{j\theta}) = \operatorname{Re}[\cos\theta + j\sin\theta]$$

$$v(t) = 10 \operatorname{Re}[e^{j\omega t}] + 5 \operatorname{Re}[e^{j(\omega t - 30^\circ)}] + 5 \operatorname{Re}[e^{j(\omega t + 90^\circ)}]$$

$$v(t) = \operatorname{Re}[10 e^{j\omega t} + 5 e^{j(\omega t - 30^\circ)} + 5 e^{j(\omega t + 90^\circ)}]$$

$$v(t) = \operatorname{Re}[(10 + 5e^{-j30^\circ} + 5e^{j90^\circ}) e^{j\omega t}]$$

• IMPEDENZE COMPLESSE

(23)

- INDUTTORE:

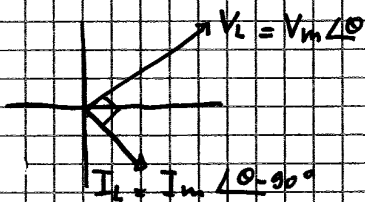
$$\Rightarrow i_L(t) = I_m \sin(\omega t + \theta) \quad v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

$$\Rightarrow v_L(t) = \omega L I_m \cos(\omega t + \theta)$$

FASORI $- I_L = I_m \angle \theta - 90^\circ$

• In un induttore ideale la corrente è in ritardo

$$- V_L = \omega L I_m \angle \theta = V_m \angle \theta \text{ di } 90^\circ \text{ sulla tensione.}$$



• riscrivo: $V_L = (\omega L \angle 90^\circ) \times (I_m \angle \theta - 90^\circ)$
 $= \omega L \angle 90^\circ \times I_L$

$$\Rightarrow V_L = j\omega L \times I_L$$

$$\boxed{Z_L = j\omega L = \omega L \angle 90^\circ} \text{ IMPEDENZA o REATANZA}$$

$$\underline{V_L = Z_L I_L}$$

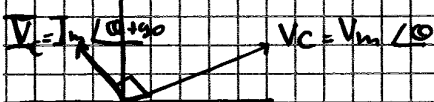
- CONDENSATORE:

$$\underline{V_C = Z_C I_C}$$

$$\boxed{Z_C = -j \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{\omega C} \angle -90^\circ}$$

suppongo $-V_C = V_m \angle \theta$: fasore della tensione

$$\Rightarrow I_C = \frac{V_C}{Z_C} = \frac{V_m \angle \theta}{\frac{1}{\omega C} \angle -90^\circ} = \omega C V_m \angle \theta + 90^\circ \Rightarrow -I_C = I_m \angle \theta + 90^\circ$$

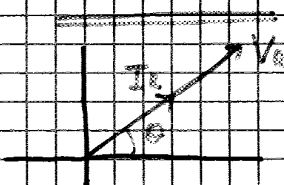


• In un condensatore la corrente è in anticipo rispetto alla tensione di 90°

Resistenza:

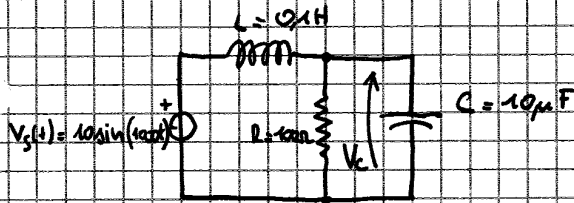
$$V_R = R I_R$$

$R \in \mathbb{R}$ • corrente e tensione sono in fase



esempio: combinazione impedenze in serie e in parallelo

26



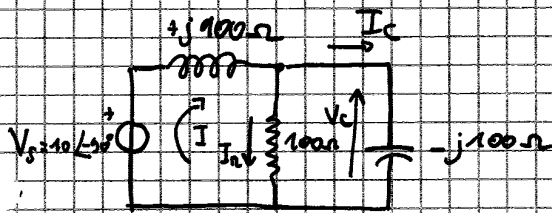
Determinare $V_c(t)$ o regime

Determinare il fasore della corrente attraverso ogni elemento e costruire il diagramma fasoriale.

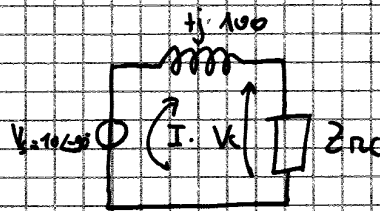
$$V_s = 10 \angle -90^\circ \quad Z_L = j100 \Omega$$

$$Z_C = -j100 \Omega$$

// RC: $Z_{RC} = \frac{1}{1/R + 1/Z_C} = 70,71 \angle +45^\circ$



in forma rettangolare: $Z_{RC} = 50 - j50$



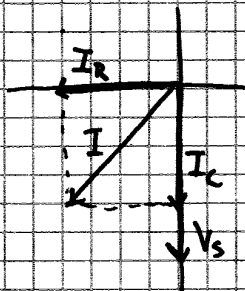
- PARTITORE di TENSIONE

$$V_c = V_s \frac{Z_{RC}}{Z_L + Z_{RC}} = 10 \angle -180^\circ \Rightarrow \textcircled{V_c(t)} = 10 \cos(1000t - 180^\circ) = \underline{\underline{-10 \cos(1000t)}}$$

$$I = \frac{V_s}{Z_L + Z_{RC}} = 0,1414 \angle -135^\circ$$

$$I_R = \frac{V_c}{R} = 0,1 \angle -180^\circ$$

$$I_C = \frac{V_c}{Z_C} = 0,1 \angle -90^\circ$$



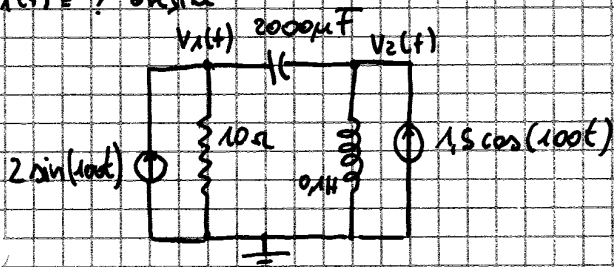
esempio: ANALISI NODALE

$V_1(t) = ?$ o regime

KCL

$$\textcircled{1} \quad \frac{V_1}{10} + \frac{V_1 - V_2}{j5} = 2 \angle -90^\circ$$

$$\textcircled{2} \quad \frac{V_2}{j10} + \frac{V_2 - V_1}{-j5} = 1,5 \angle 0^\circ$$



=> pongo eq. ai in FORMA CANONICA

$$\begin{cases} (0,1 + j0,2) V_1 - j0,2 V_2 = -j2 \\ -10,2 V_1 + j0,1 V_2 = 1,5 \end{cases} \Rightarrow V_1 = 16,1 \angle 29,7^\circ \Rightarrow \underline{\underline{V_1(t) = 16,1 \cos(1000t + 29,7^\circ)}}$$

(25)

POTENZA SU UN CARICO GENERICO :

$$v(t) = V_m \cos(\omega t)$$

$$i(t) = I_m \cos(\omega t - \phi)$$

$$p(t) = V_m I_m \cos(\omega t) \cos(\omega t - \phi)$$

serie id. trig. + $\cos(2\omega t) + \sin(2\omega t)$ che hanno
valore medio nullo

$$P = \frac{V_m I_m}{2} \cos(\phi) \quad \text{potenza media.}$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos \phi$$

FATTORE DI POTENZA:

$$\cos \phi = PF$$

in generale

$$\phi = \phi_v - \phi_i$$

ANGOLO DI POTENZA

↳ 90% in ritardo

U.B. Corrente in ANTICIPÒ ⇒ carico CAPACITIVO

" in RITARDO ⇒ carico INDUTTIVO

POTENZA REATTIVA:

scambiata con induttori e condensatori in modo bidirezionale

es. Se impiezzo tensore ar capi di C ↑ ⇒ immagazzino energia se ↓ C si riconca analogo mente ar capi di un induttore con la corrente (se ↑ in direzione immagazzino energia).

- Energia nello trasporto (sia per L che per C) è = 0
- Se ho (L e C) quando uno immagazzino l'altro eroga



• Massimo valore di potenza istantanea è chiamato POTENZA REATTIVA:

$$Q = V_{rms} I_{rms} \sin \phi$$

N.B. Nel caso di resistore $\phi = 0 \Rightarrow Q = 0$

[VAR]: Volt ampere reattivi

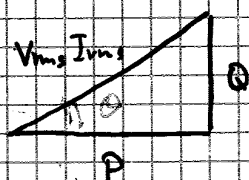
POTENZA APPARENTE:

$$Pot. App. = V_{rms} I_{rms}$$

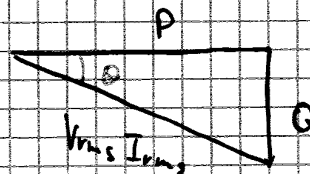
$$P^2 + Q^2 = (V_{rms} I_{rms})^2$$

[VA]

TRIANGOLO DELLE POTENZE



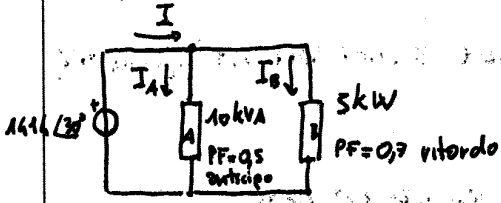
CARICO INDUTTIVO $\phi > 0$



CARICO CAPACITIVO $\phi < 0$

esempio: uso triangolo di potenza

26



- Determinare P, Q, PF globale
- Determinare il fasore I

A capacitivo
B induttivo

Determino P, Q e elemento per somma

$$\cos \theta_A = 0.95 \quad P_A = V_{rms} I_{rms} \cos(\theta_A) = 5 \text{ kW}$$

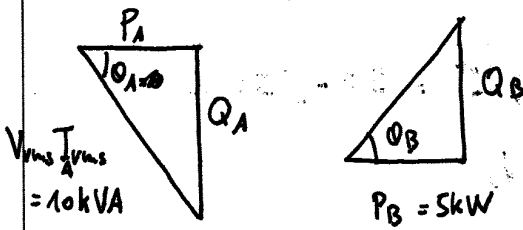
$$Q_A = \sqrt{(V_{rms} I_{A,rms})^2 - P_A^2} = -8.660 \text{ kVAR}$$

$$\theta_B = \arccos(0.97) = 45.57^\circ$$

$$Q_B = P_B \tan(\theta_B) = 5.104 \text{ kVAR}$$

$$P = P_A + P_B = 10 \text{ kW}$$

$$Q = Q_A + Q_B = -3.559 \text{ kVAR}$$

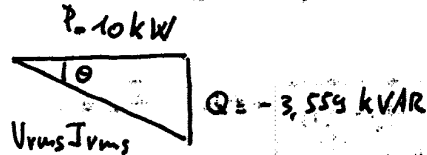


$$\theta = \arctan\left(\frac{Q}{P}\right) = -19.59^\circ$$

$$\cos \theta = 0.9421$$

PF = 94.21% anticipo

$$V_{rms} I_{rms} = \sqrt{P^2 + Q^2} = 10.61 \text{ kVA}$$



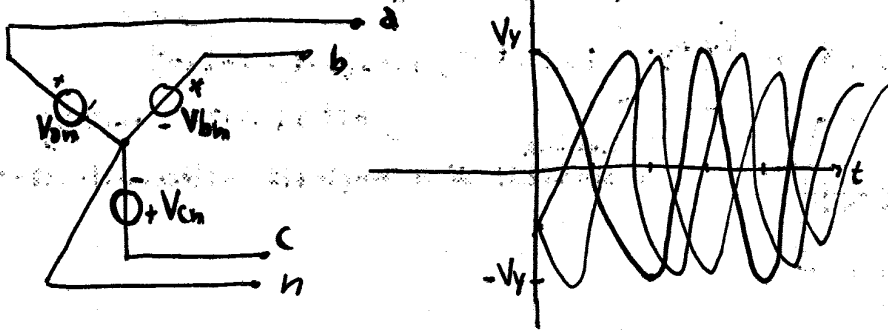
$$V_{rms} = \frac{|V|}{\sqrt{2}} = 1 \text{ kV}$$

$$I_{rms} = \frac{V_{rms} I_{rms}}{V_{rms}} = 10.61 \text{ A} \quad |I| = \sqrt{2} I_{rms} = 15 \text{ A} \quad \theta_A = \theta_V - \theta = 49.59^\circ$$

$$\Rightarrow I = |I| \angle \theta_A = 15 \angle 49.59^\circ \quad \text{• corrente è in anticipo sullo tensione}$$

CIRCUITI TRIFASE BILANCIATI

(27)



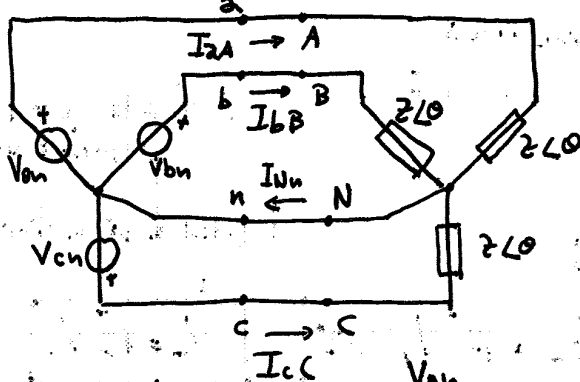
$$\begin{cases} V_{an}(t) = V_y \cos(\omega t) \\ V_{bn}(t) = V_y \cos(\omega t - 120^\circ) \\ V_{cn}(t) = V_y \cos(\omega t + 120^\circ) \end{cases}$$

V_y = ampiezza di ogni generatore
 insieme di tensioni a sequenza di fasi positiva (abc)
 (acb è negativa)

fasori corrispondenti:

$$\begin{aligned} V_{an} &= V_y \angle 0^\circ \\ V_{bn} &= V_y \angle -120^\circ \\ V_{cn} &= V_y \angle 120^\circ \end{aligned}$$

- connessione stella-stella:



aA : linea
 nN : neutro
 carico bilanciato : 3 impedenze =
 fase A dello carico = gen. $V_{an}(t)$
 fase A del carico \equiv impedenza tra A-N
 V_y = tensione di fase (linea-neutro)

I_{aA} : correnti di linea = $\frac{V_{an}}{z_{L0}} = I_L \angle -\theta$ $I_L = \frac{V_y}{z}$ ampiezza della corrente di linea

$$\begin{aligned} i_{aA}(t) &= I_L \cos(\omega t - \theta) \\ i_{bB}(t) &= I_L \cos(\omega t - 120^\circ - \theta) \\ i_{cC}(t) &= I_L \cos(\omega t + 120^\circ - \theta) \end{aligned}$$

(fasi)

conduttore di neutro può essere eliminato senza grosse conseguenze. $I_{Nn} = I_{aA} + I_{bB} + I_{cC} = 0$

POTENZA:

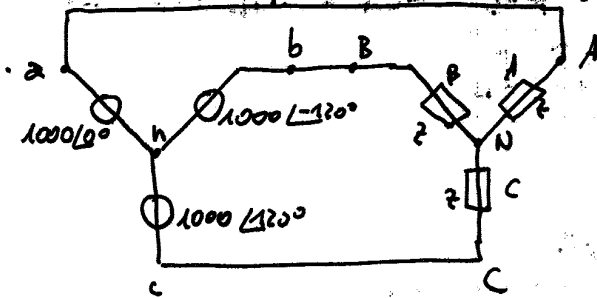
La potenza complessiva si mantiene costante. \rightarrow coppia torrice costante \rightarrow \downarrow vibrazioni.

$$p(t) = V_{an}(t) i_{aA}(t) + V_{bn}(t) i_{bB}(t) + V_{cn}(t) i_{cC}(t)$$

esempio: analisi sistema stella-stella

gen. trifase 60 Hz $V_Y = 1000V$
 $0,1H$ ma 50Ω

angolo di fase di $V_{an} = 0$



- concetti di linea = ?
- tensioni lineo-linea = ?
- potenza attiva = ?
- potenza reattiva = ?

$$Z = R + j\omega L = 50 + j2\pi \cdot 60 \cdot 0,1$$

$$= 62,62 \angle 37,02^\circ$$

• Assumo nN collegati

→ V_{nN} ai capi di A carico

$$I_{aA} = \frac{V_{an}}{Z} = 15,97 \angle -37,02^\circ$$

$$I_{bB} = \frac{V_{bn}}{Z} = 15,97 \angle -157,02^\circ$$

$$I_{cC} = \frac{V_{cn}}{Z} = 15,97 \angle 89,98^\circ$$

• fasi relativi alle correnti concatenate:

$$V_{ab} = V_{an} \times \sqrt{3} \angle 30^\circ = 1732 \angle 30^\circ$$

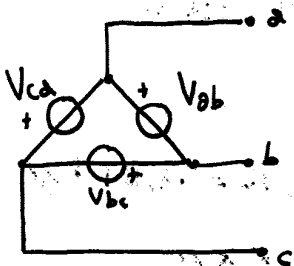
$$V_{bc} = V_{bn} \times \sqrt{3} \angle 30^\circ = 1732 \angle -90^\circ$$

$$V_{ca} = V_{cn} \times \sqrt{3} \angle 30^\circ = 1732 \angle 150^\circ$$

$$P = 3 \frac{V_Y I_L}{2} \cos \theta = 3 \left(\frac{1000 \cdot 15,97}{2} \right) \cos(37,02^\circ) = 19,13 \text{ kW}$$

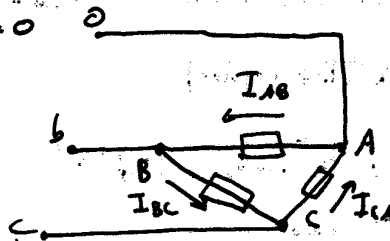
$$Q = 3 \frac{V_Y I_L}{2} \sin \theta = 14,42 \text{ kVAR}$$

CONNESSIONE A TRIANGOLO DEI GENERATORI:



$$V_{ab} + V_{bc} + V_{ca} = 0$$

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



$$V_{ab} = V_L \angle 30^\circ \quad V_{bc} = V_L \angle -90^\circ \quad V_{ca} = V_L \angle 150^\circ$$

Le impedenze conduttori di collegamento = 0 tensioni concatenate = tensioni sui carichi

$$V_{AB} = V_{ab} \quad V_{BC} = V_{bc} \quad V_{CA} = V_{ca}$$

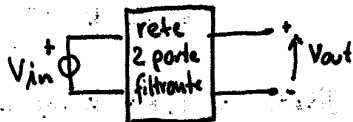
RISPOSTA IN FREQUENZA, DIAGRAMMI DI BODE E RISONANZA

ANALISI DI FOURIER, FILTRI E FUNZIONI DI TRASFERIMENTO

Tutti i segnali provenienti dal mondo reale sono costituiti da componenti sinusoidali.

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \text{ PULSAZIONE FONDAMENTALE}$$

La funzione di trasferimento per $f=0$ è l'uscita costante DC frolo l'ingresso DC



FILTRI:

Mantenere intervallo di frequenze a discapito di un altro intervallo

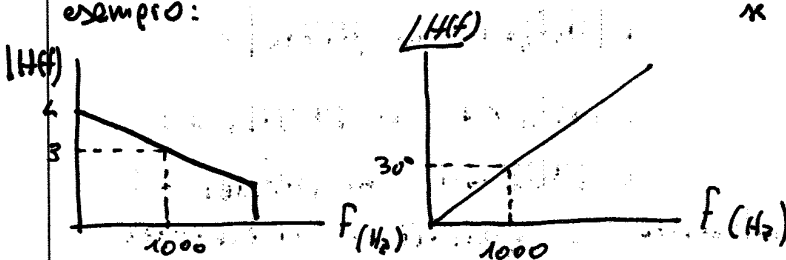
i circuiti filtranti sono reti 2 porte

FUNZIONI DI TRASFERIMENTO

$$H(f) = \frac{V_{out}}{V_{in}} \text{ : fase tensione di uscita} \rightarrow \text{ha modulo e fase entrambi funzioni della frequenza}$$

$$\text{ : fase tensione di ingresso}$$

esempio:



$$x \quad V_{in}(t) = 2 \cos(2000\pi t + 40^\circ)$$

$f = 1000 \text{ Hz}$

$$\Rightarrow |H(1000)| = 3$$

$$\angle H(1000) = 30^\circ$$

$$\Rightarrow H(1000) = 3 \angle 30^\circ = \frac{V_{in}}{V_{out}}$$

$$V_{in} = 2 \angle 40^\circ \Rightarrow \text{trovo } V_{out}$$

L'effetto del filtro sull'ampiezza e sulla fase del segnale dipendono dalla frequenza del segnale stesso.

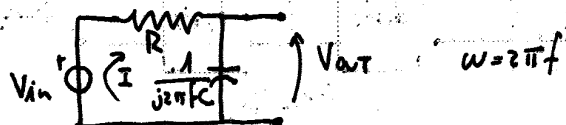
N.B. Se segnale ingresso è a componenti multiple determino componenti uscite separate e poi sommo \rightarrow avendo riconvertito fasori in segnali dip. del tempo

FILTRO PASSA-BASSO DEL 1° ORDINE

lascio passare componenti a bassa frequenza blocca quelle a più alta.

$$H(f) = \frac{1}{1 + j(f/f_B)}$$

$$f_B = \frac{1}{2\pi RC}$$



Convertendo in dB:

$$20 \log |H(f)| = 20 \log [|H_1(f)| \times |H_2(f)|]$$

$$\Rightarrow |H(f)|_{dB} = |H_1(f)|_{dB} + |H_2(f)|_{dB}$$

• scale di frequenza logaritmiche:

DECADE: intervallo di frequenze per cui il rapp. fra lo + alto e lo + bassa è 10

30 - 3000 Hz = 2 decadi

$$\text{N° decadi} = \log_{10} \left(\frac{f_2}{f_1} \right) \quad f_2 > f_1$$

OTAVA: raddoppio in frequenza : 2-16 Hz => 3 otave

$$\text{N° otave} = \log_2 \left(\frac{f_2}{f_1} \right) = \frac{\log_{10} (f_2 / f_1)}{\log_{10} (2)}$$

DIAGRAMMI DI BODE:

Diagramma dell'ampiezza in decibel di una funzione di trasferimento rapportato alla frequenza. (in scala logaritmica)

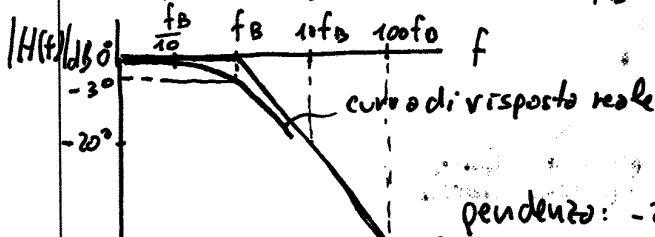
→ utili a rappresentare funzioni di rete, spesso approssimati da segmenti rettilinei

• filtro passa-basso:

$f \ll f_B$ asintoto di bassa frequenza

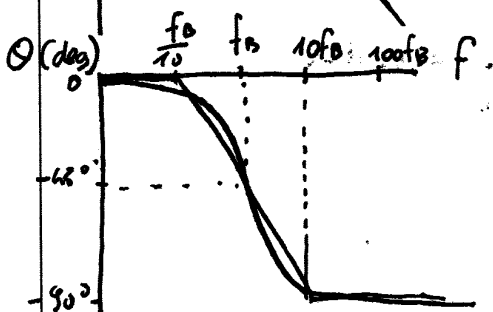
$$|H(f)|_{dB} = -10 \log \left[1 + \left(\frac{f}{f_B} \right)^2 \right] \rightarrow \begin{cases} \approx -20 \log \left(\frac{f}{f_0} \right) & f \gg f_B \text{ asintoto di alta frequenza} \end{cases}$$

I 2 asintoti si intersecano in f_B : freq. di metà potenza / fr. di spigolo / fr. di taglio



errore di solo 3 dB

→ diagramma di Ampiezza

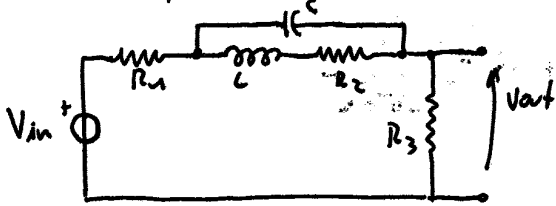


$$\angle H(f) = -\arctan \left(\frac{f}{f_B} \right)$$

curva reale, si discosta non più di 6°

(31)

- circuito filtrante RLC - filtro NOTCH



- A frequenze basse: $\omega \ll$
 INDUTTORI \equiv C.C. $j\omega L \downarrow$
 CONDENSATORI \equiv C.A. $\frac{1}{j\omega C} \uparrow$

- A frequenze elevate: $\omega \gg$
 INDUTTORI \equiv C.A.
 CONDENSATORI \equiv C.C.

alle basse: maggiori o minori di un fattore 10 rispetto alle resistenze

• a fr. basse:

$$H(0) = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \frac{V_{in}}{V_{in}} = 0,5$$

$R_1 = 90 \Omega \quad R_2 = 10 \Omega \quad R_3 = 100 \Omega \quad L = 100 \mu H$
 $C = 0,1 \mu F$

$\Rightarrow H_{dB} = 20 \log(0,5) = -6 \text{ dB}$

considero intervallo di frequenze basso:

$$2\pi f L \leq \frac{R_1 + R_2 + R_3}{10}$$

$\rightarrow f \leq 31,83 \text{ kHz}$

considero intervallo di

$$\frac{1}{2\pi f C} \geq 10 R_2$$

$\rightarrow f \leq 15,92 \text{ kHz}$

\Rightarrow affermo con certezza che sotto ai 10 kHz frequenze basse.

• a fr. alte:

$$H(\infty) = \frac{R_3}{R_1 + R_3} = 0,5263$$

$$H(\infty)_{dB} = 20 \log(0,5263) = -5,575 \text{ dB}$$

considero intervallo di frequenza alte:

$$\frac{1}{2\pi f C} \leq \frac{R_1 + R_3}{10}$$

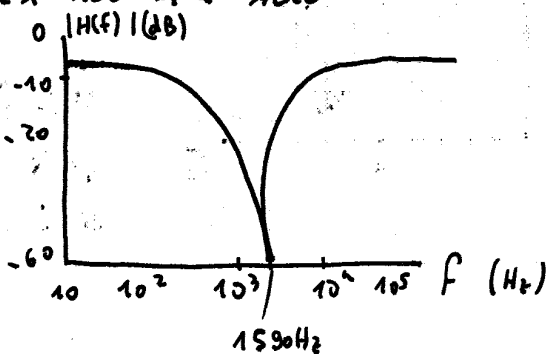
$\rightarrow f > 83,22 \text{ kHz}$

$$2\pi f L > 10 R_2$$

$\rightarrow f = 159,2 \text{ kHz}$

\Rightarrow affermo con certezza che ogni valore oltre i 100 kHz è ALTO

$$H(f) = \frac{R_3}{R_1 + R_3 + \frac{1}{j\omega L} + \frac{1}{R_2 + j\omega C}}$$



Per il circuito risonante serie ci sono 2 frequenze di metà potenza:

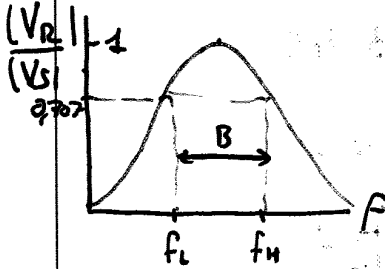
f_L, f_H

$B = f_H - f_L$

larghezza di banda

$B = \frac{f_0}{Q_s}$

x il risonante serie

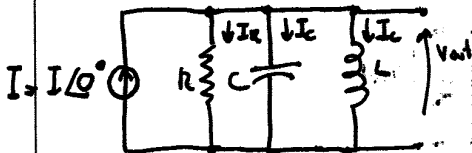


Per $Q_s \gg 1$

$f_H \approx f_0 + \frac{B}{2}$
 $f_L \approx f_0 - \frac{B}{2}$

N.B. Un $Q_s \uparrow \Rightarrow$ Amplificazione della tensione

LA RISONANZA PARALLELO



$Z_P = \frac{1}{1/R + j2\pi fC - j(1/2\pi fL)}$

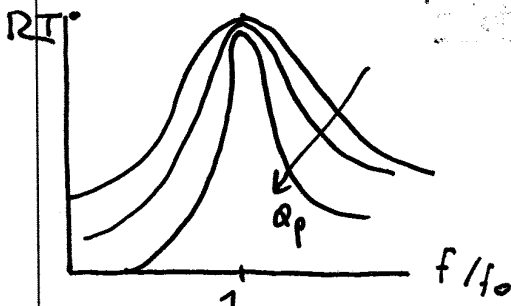
$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

$Q_P = \frac{R}{2\pi f_0 L}$

$Q_P = 2\pi f_0 CR$

$Z_P = \frac{R}{1 + jQ_P(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f})}$

$B = \frac{f_0}{Q_P} = f_H - f_L$



FILTRI IDEALI:

Lascia passare frequenze desiderate senza alterare ampiezza e interdice totalmente le componenti di frequenza non desiderate

- posso basso / alto e elimino rumore
- posso banda
- elimino banda

CAMPI MAGNETICI:

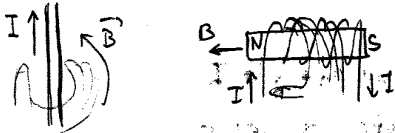
magnete permanente → da spin e⁻

omplifiro corpo m. filo percorso da i avvolto → bobina

linee di flusso: percorsi chiusi da N → S [Wb]: flusso magnetico

• densità di flusso magnetico: \vec{B}

$[\vec{B}] = \text{Wb}/\text{m}^2 = \text{T}$



• forze su cariche in movimento nei campi magnetici

$\vec{F} = q\vec{u} \times \vec{B}$ $F = quB \sin \theta$

• forze su fili percorsi da corrente in campi magnetici

$d\vec{F} = i d\vec{l} \times \vec{B}$ $F = i l B \sin \theta$: filo rettilineo di lunghezza l

N.B. FORZA è MAX se la direzione del campo è ⊥ al filo.

- FLUSSI CONCATENATI & LEGGE DI FARADAY:

$\phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$ se densità flusso m. è costante e ⊥ alla sup. A ⇒ $\phi = B \cdot A$

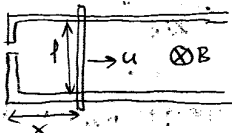
se ho bobina o N spire: $\lambda = N \phi$ (hyp: flusso concatenato sempre lo stesso ∀ spira).

legge di Faraday sull'induzione magnetica:

$e = \frac{d\lambda}{dt}$ tensione viene indotta in una bobina ogni volta che varia il flusso concatenato. → se \vec{B} varia nel tempo o bobina si muove

LEGGE DI LENZ: La polarità della tensione indotta è tale da produrre una corrente che si oppone alla variazione di flusso concatenato.

• condizioni in movimento:



$\lambda = BA = B l x \rightarrow e = \frac{d\lambda}{dt} = B l \frac{dx}{dt} \Rightarrow e = B l u$

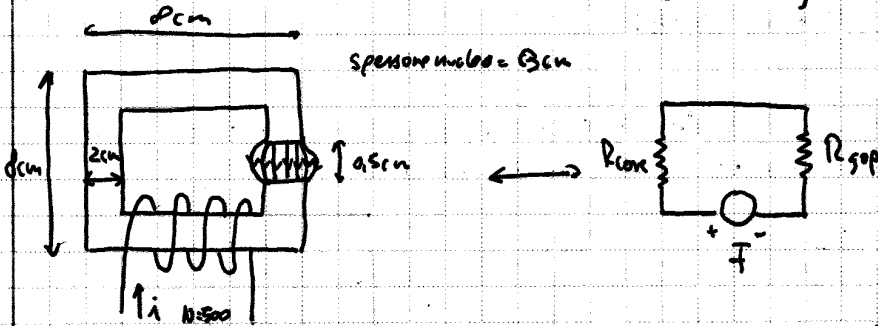
o condizione che il vettore velocità, il conduttore e \vec{B} sono reciprocamente ⊥

• INTENSITÀ DI CAMPO MAGNETICO: \vec{H}

$\vec{B} = \mu \vec{H}$ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb}/\text{A} \cdot \text{m}$ $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ $\mu_{Fe} \approx \text{oltre } 1000$

CIRCUITO MAGNETICO CON 1 TRAFERRO (AIR GAP)

(36)



$$l_{core} = 4 \times 6 - 0.5 = 23.5 \text{ cm}$$

$$A_{core} = 2 \times 2 = 6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\mu_{iron} = \mu_r \mu_0 = 7.54 \times 10^{-3}$$

$$R_{core} = \frac{l_{core}}{\mu_{iron} A_{core}} = 5.195 \times 10^6 \frac{\text{A} \cdot \text{spire}}{\text{Wb}}$$

- tengo conto dell'effetto di bordo (fringing) nel traferro sommando lo spessore nelle dimensioni delle alette

$$A_{gap} = (2 + 0.5) \times (3 + 0.5) = 8.75 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\mu_{gap} \hat{=} \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$

$$R_{gap} = 4.547 \times 10^6 \text{ A} \cdot \text{spire} / \text{Wb}$$

$$R = R_{gap} + R_{core} = 4.6 \times 10^6$$

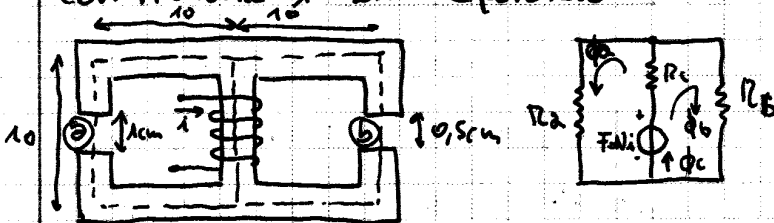
• La maggior parte delle forze magnetomotrici si stabiliscono sul traferro

$$\Phi = B_{gap} A_{gap} = 0.25 \times 8.75 \times 10^{-4} = 2.188 \times 10^{-4} \text{ Wb} \rightarrow \text{flusso nucleo} = \text{flusso traferro}$$

ma densità di flusso > nel nucleo perché il flusso è + piccola

$$F = \Phi R = 1006 \text{ A} \cdot \text{spire} = NI \Rightarrow I = \frac{F}{N} = 2.012 \text{ A}$$

• con riluttanze in serie e parallelo



$$R_c = \frac{l_c}{\mu_r \mu_0 A_{core}}$$

$$R_a = R_{gap} + R_{core}$$

$$= \frac{l_{gap}}{\mu_0 A_a} + \frac{l_{core}}{\mu_r \mu_0 A_{core}}$$

$$R_b = R_{gap} + R_{core}$$

$$R_{TOT} = R_c + \frac{1}{1/R_a + 1/R_b}$$

$$\Phi_c = \frac{Ni}{R_{tot}}$$

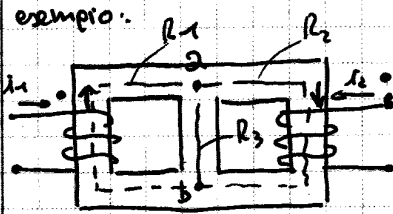
partitore di corrente: $\Phi_a = \Phi_c \frac{R_b}{R_a + R_b}$ $\Phi_b = \Phi_c \frac{R_a}{R_a + R_b}$

verifica: $\Phi_c = \Phi_a + \Phi_b$

$$B_a = \frac{\Phi_a}{A_a}$$

$$B_b = \frac{\Phi_b}{A_b}$$

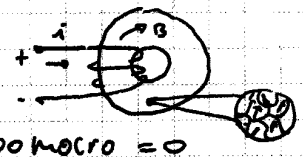
N.B. se ho traferri, la riluttanza del ferro ha effetto trascurabile



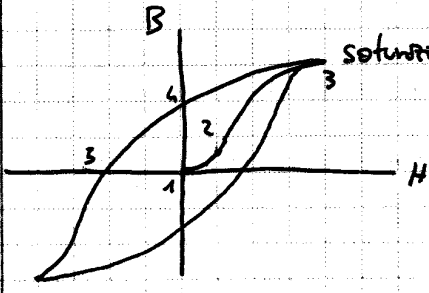
$$R_{TOT} = R_3 + R_1 \parallel R_2$$

MATERIALI MAGNETICI:

leghe di ferro usate nei motori non hanno $B = \mu H$ lineare.



• Partendo da un campione non magnetizzato: domini \rightarrow campo macro = 0



soluzione ($B = 1.2T$) \rightarrow allinearsi a B applicato

in 2 sensi reversibile

3: tutti i domini allineati con il campo \rightarrow materiale saturo (pendenza della curva tende a μ_0)

\rightarrow corrente ottenuta \Rightarrow percoso chiuso

ENERGIA:

hyp: bobina resistenza = 0

en. assorbito dalla bobina:

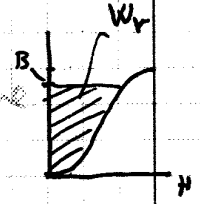
$$W = \int_0^t V i dt = \int_0^t N \frac{d\phi}{dt} i dt = \int_0^{\phi} N i d\phi$$

$$N i = H \cdot l \quad d\phi = A dB$$

$$W = \int_0^B A l H dB$$

$$W_v = \frac{W}{A \cdot l} = \int_0^B H dB$$

energia assorbita di volume del nucleo



• una parte restituito al circuito quando $H \rightarrow 0$

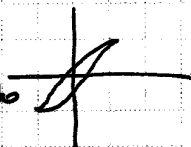
• una parte immagazzinata nel corpo residuo

• una parte convertita in calore nel processo di magnetizzazione

\rightarrow L'energia volumetrica convertita in calore \forall ciclo \equiv area ciclo d'isteresi

\rightarrow PERDITE DEL NUCLEO \propto frequenza

\rightarrow per motori, gen., transf. \Rightarrow lega con ciclo d'isteresi stretto



\rightarrow per magneti permanenti \Rightarrow lasso \rightarrow con ampio corpo residuo

• perdite per correnti parassite: (eddy current)

nucleo \rightarrow conduttore \rightarrow tante piccole spire \rightarrow quando corpo magn. cambia vengono indotte correnti parassite che circolano nel nucleo

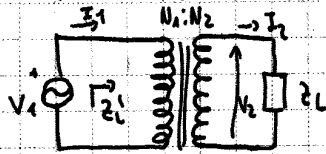
\rightarrow laminare nucleo \rightarrow isolando ogni foglio \rightarrow orientati in modo da interrompere il flusso di corrente

\rightarrow correnti parassite incontrano resistenza + grande \rightarrow - perdite

$$P = V^2/R \propto V^2$$

36

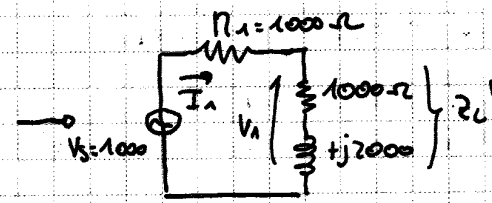
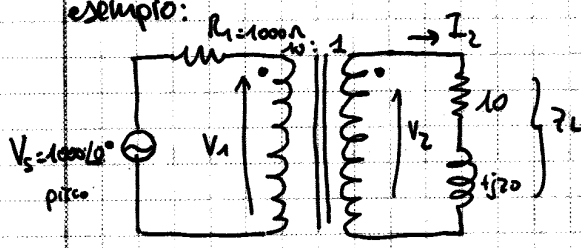
TRASFORMAZIONE DELL'IMPIEDENZA



$$Z_L' = \frac{V_1}{I_1} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_L$$

impedenza del carico si riflette sul lato primario del quadrato del rapporto di trasformazione

esempio:



$$Z_L' = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_L = 1000 + j2000$$

$$Z_S = R_1 + Z_L'$$

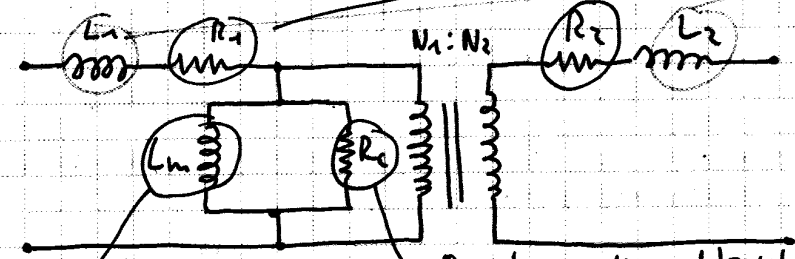
$$I_1 = \frac{V_S}{Z_S} \quad V_1 = I_1 Z_L' \quad I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1 \quad V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1$$

potenza trasmessa al carico: $P_L = I_2^2 R_L$

• Posso anche riportare V_S e R_1 al secondario

$$V_S' = \frac{N_2}{N_1} V_S \quad R_1' = \frac{N_2}{N_1} R_1$$

TRASFORMATORI REALI:



resistenze delle bobine

induttanze di dispersione (parte del flusso prodotto non si concatena)

ci sono ventanti partendo di qui ed in la

induttanze di magnetizzazione (induttanza nucleo ≠ 0)

Resistenza di perdite nel nucleo (potenza dissipata a causa delle correnti parassite e dell'isteresi)

Regolazione e rendimento:

A causa di L_1, L_2, R_1, R_2 tensione trasmessa sul lato del carico varia con la corrente del carico
 tensione efficace ai morsetti di uscita in assenza di carico

$$\text{regolazione percentuale} = \frac{V_{no\ load} - V_{load}}{V_{load}} \times 100\% \quad \text{ideale} = 0$$

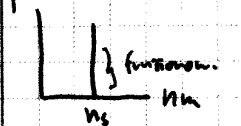
• Non tutta la potenza in entrata viene inviata al carico

$$\text{rendimento in potenza} = \frac{P_{load}}{P_{in}} \times 100\% = \left(1 - \frac{P_{loss}}{P_{in}}\right) \times 100\%$$

potenza dissipata nel trasformatore

esempio P. 360

Caratteristiche funzionamento motore sincrono in AC funz. ass. alimentatore in AC (37)



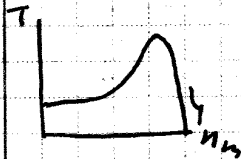
velocità di funz. cost.: $\omega_s = \frac{2\omega}{P}$ numero di poli magnetici della macchina

$$n_s = \frac{120f}{P}$$

P sempre intero e pari: $\approx 60\text{Hz}$ \Rightarrow solo 3600/1800/1200 rpm
 \rightarrow oggi: Cicloconvertitori \rightarrow convertono 60Hz in fr. desiderata $\$$

Coppio di avviamento = 0 \rightarrow faccio funzionare con asincrono fino alla velocità sincrona

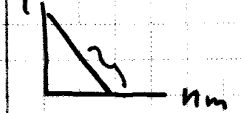
caratt. funz. motore Asincrono:



buono coppia di avviamento, velocità + basso del sincro (1200 rpm)
 Per evitare correnti eccessive all'avvio grandi motori asincroni vengono avviati a tensione ridotta.

Ad una data velocità $T \propto V^2$ es. motore 380V a rete tensione nominale lo suo coppia $\approx \frac{1}{4}$ della coppia nominale

caratt. funz. motore DC eccitazione in //:



bobine di eccitazione sullo statore \rightarrow in //
 bobine di armatura sul rotore

- Coppia all'avvio alta, assorbe molta corrente \rightarrow resistenza in serie x limitare
- Piccola variazione della velocità all'interno dell'intervallo di funzionamento.
- velocità del motore in DC non sono limitate a valori specifici.

caratt. funz. motore DC con eccitazione in serie:



valore modesto di coppia e corrente all'avvio
 motore rallenta se carichi pesanti \Rightarrow potenza uscita quasi costante!
 \rightarrow velocità si adatta automaticamente al valore della coppia di carico

non può funzionare alla potenza nominale x molti valori della coppia di carico.
 Velocità raggiunta in assenza di carico può essere eccessiva \Rightarrow sistema di controllo che disconnette motore dall'alimentazione $\&$.

esempio:
 motore asincrono trifase: 5hp 440V rms $I_{rms} = 6,8 \text{ Arms}$ $\cos\theta = 0,78$
 a pieno carico $n = 1150 \text{ rpm}$ assenza carico $n = 1195 \text{ rpm}$ $I_{rms} = 1,2 \text{ Arms}$ $\cos\theta = 0,93$

- Perdite in potenza, η a pieno carico, P_m assenza carico, reg. velocità ?

$$P_{out} = 5 \times 746 = 3730 \text{ W} \quad P_{loss} = P_{in} - P_{out} \quad \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

$$P_{in} = \sqrt{3} V_{rms} I_{rms} \cos\theta$$

In assenza di carico: $P_{in} = \sqrt{3} (440)(1,2)(0,93)$
 $P_{out} = 0 \Rightarrow \eta = 0\%$
 $P_{loss} = P_{in}$
 reg. vel. = $\frac{n_{no\text{-}load} - n_{full\text{-}load}}{n_{full\text{-}load}}$ %

(3P)

② funzionamento motore: a regime la forza totale sulla barra = 0

$$f = B l i_A = f_{load} \quad i_A = \frac{f_{load}}{B l} \quad e_A = V_T - R_A i_A$$

$$u = \frac{e_A}{B l}$$

$$P_M = f_{load} u \quad : \text{potenza nec. trasmessa al carico}$$

$$P_T = V_T i_A \quad : \text{potenza assorbita dalla batteria}$$

$$P_R = i_A^2 R \quad : \text{potenza dissipata nella resistenza}$$

$$P_T = P_M + P_R$$

$$\eta = \frac{P_M}{P_T} \times 100\%$$

③ generatore $f = B l i_A = f_{all} \quad i_A = \frac{f_{all}}{B l} \quad e_A = V_T + R_A i_A$

$$u = \frac{e_A}{B l}$$

$$P_M = f_{all} \cdot u$$

$$\eta = \frac{P_T}{P_M} \times 100\%$$

$$P_T = V_T i_A$$

$$P_R = i_A^2 R$$

MACCHINE ROTANTI IN DC:

statore cilindrico (N PAIR) POLI MAGNETICI tramite bobine ed eccitazione o M.P.
N-S alternati lungo il perimetro.

rotore: bobine d'armatura nelle scanolature del rotore

Le direzioni delle correnti nell'armatura devono essere invertite sotto i poli sud relativamente al senso sotto i poli nord per ottenere contributi a sostegno dello coppia.

→ fem. indotta e commutazioni:

conduttori, campo, direzione di movimento → reciprocamente ⊥ ⇒ indotto tensione quasi costante

→ quando ci si muove da un polo all'altro tensioni prima

→ annullano per poi tornare con polarità opposta

In ciascun conduttore quando transito sotto un polo.

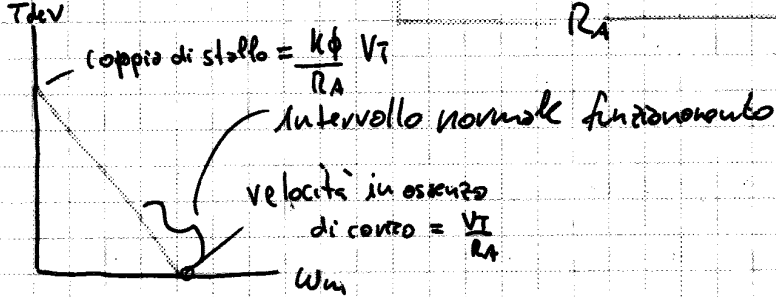
→ COLLETTORI inverte i collegamenti in modo che

potenzia indotto visto dai terminali esterni segue stesso verso.

→ tensione alternata ⇒ una oscillazione molto piccola. Per raggiungere alte tensioni: fatto in serie molti conduttori ⇒ bobine in + ci sono ≠ percorsi // di corrente sulle armature.

Caratteristiche coppia-velocità motore DC parallelo

$$V_T = R_A I_A + E_A \dots \Rightarrow T_{dev} = \frac{K\phi}{R_A} (V_T - K\phi \omega_m)$$



esempio:

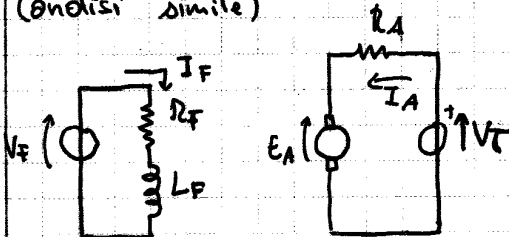
$$I_F = \frac{V_T}{R_F + R_{ads}} \quad K\phi = \frac{E_A}{\omega_m} \quad T_{rot} = \frac{P_{rot}}{\omega_m} \quad T_{dev} = T_{out} + T_{rot}$$

$$I_A = \frac{T_{dev}}{K\phi} \quad E_A = V_T - R_A I_A \quad \omega_m = \frac{E_A}{K\phi} \quad P_{out} = T_{out} \omega_m$$

$$P_{in} = V_T I_L$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

motori DC ad eccitazione separata (analisi simile)

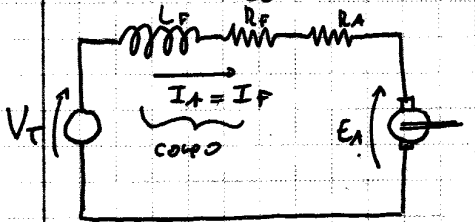


motori DC a magneti permanenti: no regolazione

no potenza x creare campo principale => ↑ η dimensioni ↓ → poco potenza

smagnetizzazione x surriscaldamento

MOTORI DC con eccitazione serie: cost. che dipende dal nro di bobine eccitatrici

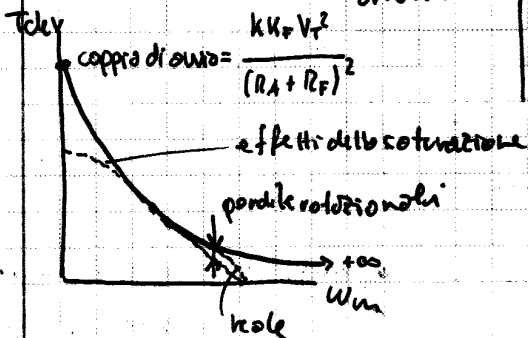


$$\phi = K_F I_F = K_F I_A$$

$$E_A = K K_F \omega_m I_A$$

$$T_{dev} = K K_F I_A^2$$

$$T_{dev} = \frac{K K_F V_T^2}{(R_A + R_F + K K_F \omega_m)^2}$$



Velocità in assenza di carico ↑↑ : pericoloso => dispositivi di protezione.

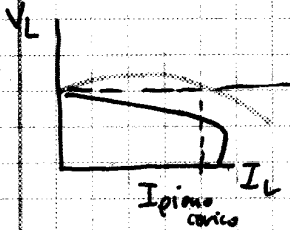
es. P. 401

Sia nel parallelo lungo che in quello corto il campo della bobina eccitatrice in serie può sia favorire che opporsi al campo della bobina eccitatrice in //.

(40)

↳ collegando cumulativo in // , collegando differenziale in //

macchina sottocompensata: tensione a pieno carico = tensione in assenza
 macchina sovrapcompensata: " > "



• PRESTAZIONE GENERATORE AD ECCITAZIONE SEPARATA:

$E_A = K\phi\omega_m$ $T_{dev} = K\phi\omega_m$ rendimento = $\frac{P_{out}}{P_{in}} \approx 100\%$

$E_A = R_A I_A + V_L$ $V_F = (R_F + R_{adj}) I_F$

$I_F = \frac{V_F}{R_{adj} + R_F}$

$E_{A1} = E_{A2} \frac{n_1}{n_2}$

$P_{out} = I_L V_{FL}$

$P_{dev} = P_{out} + R_A I_A^2$

$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta_{tot}}$

$P_{losses} = P_{in} - P_{dev}$

$T_{in} = \frac{P_{in}}{\omega_m}$

$T_{dev} = \frac{P_{dev}}{\omega_m}$

• MACCHINE IN AC

- MOTORI TRIFASE AD INDUZIONE:

Statore: avvolgimenti a cui è applicata potenza elettrica trifase stabilendo un campo magnetico rotante nel traferro tra statore e rotore. geometria cilindrica

• campo nel traferro dovuto alle correnti sull'avvolgimento a: $B_a = K I_a(t) \cos \theta$

↳ + forte per $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 180^\circ$ → rotatore solo conetti 2 avvolgimenti rotoli di 120° e 240°

$B_{gap} = B_a + B_b + B_c$

$i_a(t) = I_m \cos(\omega t)$ $i_b(t) = I_m \cos(\omega t - 120^\circ)$ $i_c(t) = I_m \cos(\omega t - 240^\circ)$

• $B_{gap} = B_m \cos(\omega t - \theta)$ $B_m = \frac{3}{2} K I_m$ Il campo nel traferro ruota in senso antiorario con una velocità angolare di ω . (massimo densità flusso per $\theta = \omega t$)

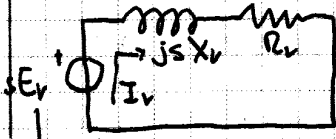
• Per una macchina a P poli il campo ruota ad una velocità ang. di

$n_s = \frac{120f}{P}$

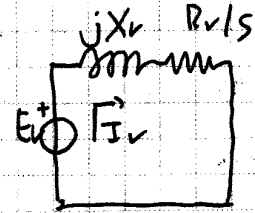
$\omega_s = \frac{\omega}{P/2}$
 velocità ang. SINCRONA

motore a induzione con il rotore bloccato: \rightarrow trasformatore trifase. (41)

Circuito equivalente per una fase degli avvolgimenti del rotore:



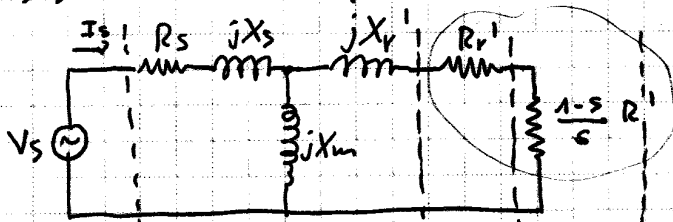
$$I_r = \frac{s E_r}{R_r + j s X_r} \rightarrow I_r = \frac{E_r}{R_r/s + j X_r}$$



\hookrightarrow tensione indotta nello fase ϕ del rotore bloccato $\propto s$

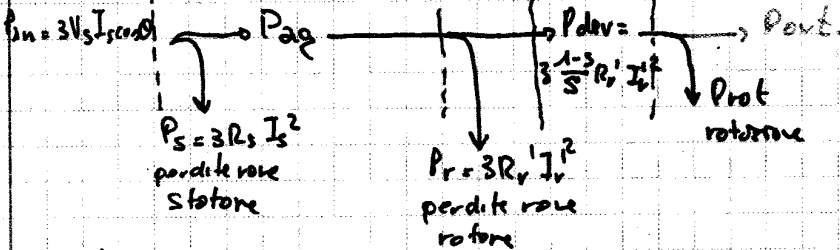
rispetto le impedenze del rotore dallo polo del primario (statore) \times avere circuito equivalente completo.

X_s : reattanza di dispersione X_m : reattanza magnetizzante



V_s, I_s : tensione e corrente di fase

Gli avvolgimenti di un motore a induzione possono essere connessi a triangolo o a stella.



⊙ $V_s = V_{line}$
 $I_{line} = I_s \sqrt{3}$

⊕ $V_s = V_{line} / \sqrt{3}$
 $I_{line} = I_s$

Corrente di avviamento può essere molto grande rispetto a quella di funzionamento a pieno carico

\rightarrow avviatori in config. a stella e per commuto a triangolo.

CALCOLO DI POTENZA e COPPIA:

$$P_{dev} = 3 \frac{1-s}{s} R_r' (I_r')^2 \quad P_r = 3 R_r' (I_r')^2 \quad P_s = 3 R_s I_s^2 \quad P_{in} = 3 I_s V_s \cos \phi$$

$$P_{out} = P_{dev} - P_{rot}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

$$T_{dev} = \frac{P_{dev}}{\omega_m}$$

$P_{\phi} = P_r + P_{dev}$ potenza ck otherwise il trafo no

$$P_{\phi} = 3 \times \frac{1}{s} R_r' (I_r')^2$$

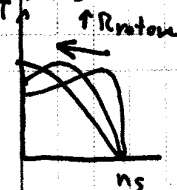
$$\frac{P_{dev} = (1-s) P_{\phi}}{T_{dev} = \frac{(1-s) P_{\phi}}{\omega_m}} \rightarrow T_{dev} = \frac{P_{\phi}}{\omega_s}$$

$$\omega_m = (1-s) \omega_s$$

$\$$, non robusto

es. P. 437

MACCHINE A INDUZIONE A ROTORE AWOLTO: rotore serie di bobine trifase in scolatura

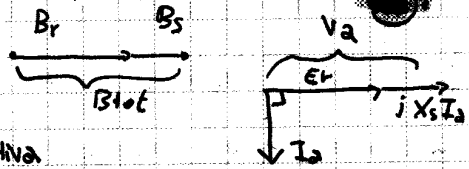


\uparrow coppia di spunto \uparrow resistenza del rotore (serie di resistenze variabili) \rightarrow ottenso un certo grado di controllo della velocità

macchine sincrone senza carico:

• Se $V_a > E_r \cos(\delta)$ macchina **SOTTOECCITATA**

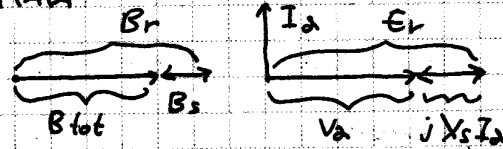
I_a anticipo V_a di $\theta = 90^\circ$ → assorbe potenza reattiva



• Se $V_a < E_r \cos(\delta)$ macchina **SOVRAECCITATA**

La macchina appare come carico capacitivo puro → eroga potenza reattiva.

→ condensatori sincroni (orotoni)



• carico variabile e corrente di campo costante

→ al variare del carico E_r può solo variare in fase non in ampiezza → cerchio

$P_{dev} \propto B_r \sin(\delta) \propto E_r \sin(\delta) \propto I_a \cos\theta$

• fattore di potenza → diventare in ritardo non meno che il carico aumenta.

$P_{dev} = P_{in} = 3 V_a I_a \cos\theta$

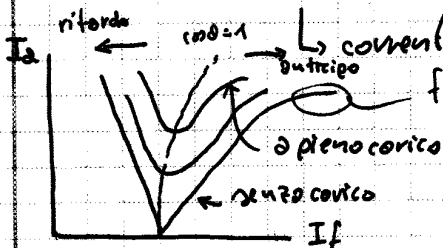
N.B.

$$\frac{\sin(\delta_2)}{\sin(\delta_1)} = \frac{P_2}{P_1}$$

• carico costante e corrente di campo variabile

$P_{dev} = \text{cost.}$ Se corrente di campo ↑ ⇒ E_r (ampiezza) ↑

quando I_a in fase con V_a



• Per ottenere 100% del fattore di potenza ↑ corrente di campo, ↑ ampiezza di E_r finché I_a non sia in fase con V_a

$$I_{f2} = I_{f1} \frac{E_{r2}}{E_{r1}}$$

Coppia massima (di pull-out) T_{max} per angolo $\delta = 90^\circ$ $T_{max} = k B_r B_{tot}$

Coppia nominale = 30% T_{max}

Non sono da carico ↑ notare rallenta, δ ↑ per subire coppia richiesta + perdite

Dipende macchina torna a girare alle velocità di sincronismo.

Se carico supera coppia di pull-out ⇒ non è + possibile portare il carico alla velocità di sincronismo. → vibrazioni.



ELETTROTECNICA:

tip. fondamentale teoria dei circuiti: condizione stazionaria o quasi stazionaria.

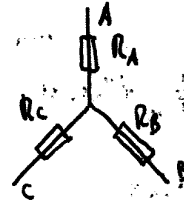
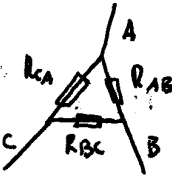
Compi lentamente variabili rispetto alle dimensioni elettriche del circuito.

$$\frac{D}{\lambda} \ll 1 \quad t_p \ll T \rightarrow \text{periodo segnale}$$

tempi di propagazione

TRASFORMAZIONI ~~STELLA-TRIANGOLO~~

$$S R = \dots R_\Delta = 3 R_Y \quad R_Y = \frac{1}{3} R_\Delta$$



$\lambda \rightarrow \Delta$:

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

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

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

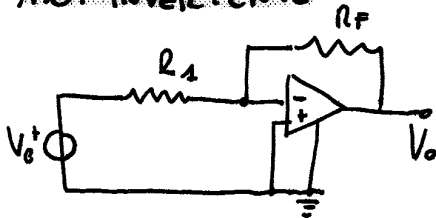
$\Delta \rightarrow Y$:

$$R_A = \frac{R_{AB} \cdot R_{CA}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}$$

$$R_B = \frac{R_{AB} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}$$

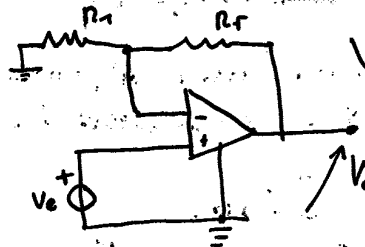
$$R_C = \frac{R_{CA} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}$$

A.O. INVERTENTE



$$V_o = - \frac{R_F}{R_A} V_e$$

A.O. NON INVERTENTE



$$V_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_A}\right) V_e$$

MAXIMO TRASFERIMENTO DI POTENZA:

$$P_{Lmax} = \frac{V_{Th}^2}{4 R_{Th}} \quad R_{Th} = R_L$$

CONDENSATORE:

CAPACITÀ: $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \cdot A}{d}$

EN. IMMAGAZZINATA: $w(t) = C V \frac{dV}{dt}$

$$i = C \frac{dV}{dt} \rightarrow q(t) = \int_{t_0}^t i(t) dt + q(t_0) \rightarrow W(t) = \frac{1}{2} C V^2(t) = \frac{q^2(t)}{2C}$$

→ può essere restituito al circuito.

$$V(t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(t) dt + V(t_0)$$

//: $C_1 + C_2$ serie: $\frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$

• Scopo e utilità del rifasamento:

Per diminuire la potenza reattiva scambiata → tale diminuzione diminuisce le perdite di potenza sulla linea di alimentazione in quanto diminuisce la corrente sulla linea.

Massimo trasferimento di potenza su impedenze e impedenze eq. di Thevenin

CIRCUITI TRIFASE BILANCIATI:

- connessione STELLA-STELLA:

$$I_{aA} = \frac{V_{an}}{Z_{L0}} \quad p(t) = V_{an}(t) I_{aA}(t) + \dots \quad p(t) = 3 \frac{V_Y I_L}{2} \cos \theta \quad V_Y = V_{an}$$

$$V_{Y_{rms}} = \frac{V_Y}{\sqrt{2}} \quad I_{L_{rms}} = \frac{I_L}{\sqrt{2}} \quad P_{avg} = 3 V_{Y_{rms}} I_{L_{rms}} \cos \theta$$

pot. reattiva:

$$Q = 3 \frac{V_Y I_L}{2} \sin \theta = 3 V_{Y_{rms}} I_{L_{rms}} \sin \theta \quad V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = \sqrt{3} V_Y \angle 30^\circ$$

- connessione triangolo-triangolo:

$$V_L = \sqrt{3} V_Y$$

$$Z_{\Delta} = 3 Z_Y \quad I_{\Delta} = \frac{V_L}{Z_{\Delta}} = I_{AB} \quad I_L = \sqrt{3} I_{\Delta}$$

Se $Z_{line} = 0 \quad V_{AB} = V_{ab} \dots$

$$V_{an_{\Delta}} = \frac{V_{ab} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} \angle 30^\circ} \quad \bullet \quad I_{aA} = \frac{V_{an}}{Z_{line} + Z_Y} \quad V_{an_{\Delta}} = I_{aA} Z_Y \quad \bullet \quad V_{AB} = V_{an_{\Delta}} \cdot \sqrt{3} \cdot \angle 30^\circ$$

$$\bullet \quad I_{AB} = \frac{V_{AB}}{Z_{\Delta}}$$

$$P_{AB} = (3) \frac{1}{2} |I_{aA}|^2 \operatorname{Re}\{Z_Y\}$$

$$P = 3 P_{AB}$$

$$P_{AB} = |I_{AB}|_{rms}^2 |Z_{\Delta}|$$

$$P_{line} = I_{aA_{rms}}^2 |Z_{line}|$$

CARICO

$$P_L = 3 \cdot \frac{1}{2} |I_{aA}|^2 \operatorname{Re}\{Z_{\Delta}\}$$

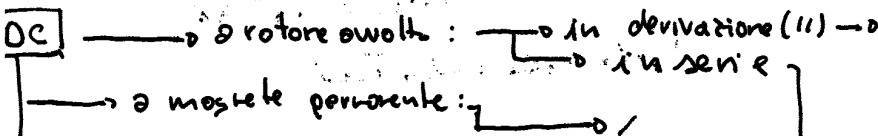
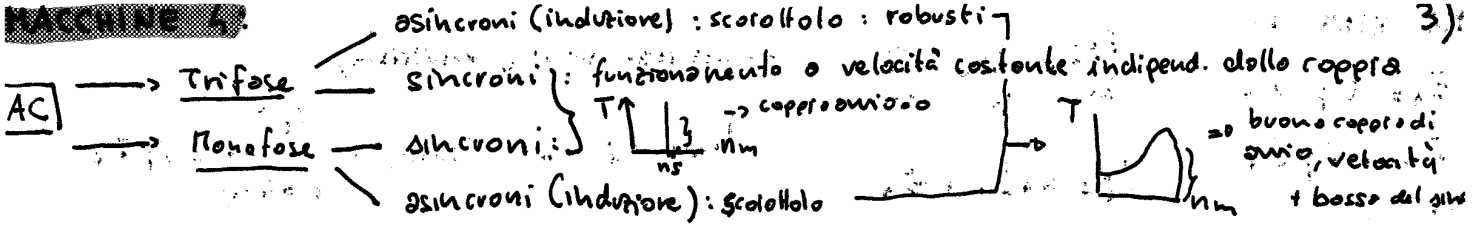
PERDITA

$$P_{loss} = 3 \cdot \frac{1}{2} |I_{aA}|^2 \operatorname{Re}\{Z_{line}\}$$

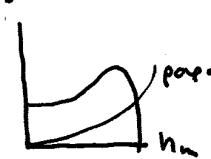
$$\eta = \frac{P_L}{P_{TOT}} \quad P_{TOT} = P_L + P_{loss}$$

$$Q = 3 \cdot \frac{1}{2} |I_{aA}|^2 \operatorname{Im}\{Z_Y\} \quad PF = \cos(\angle Z_Y) \quad \text{se } Z_Y \angle 0 \Rightarrow \text{carico capacitivo}$$

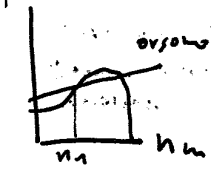
MACCHINE 4:



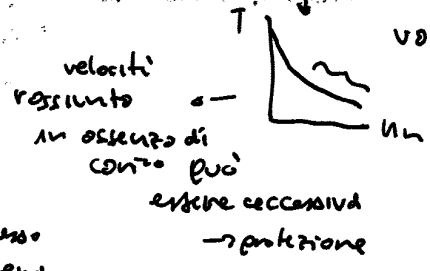
controllo rapido di direzione e velocità



2 Nm bassi
Coppia motore > qll
richiesta => qll in eccesso
produce acc. sistema
→ vel. si stabilizza nel pt.
di funzionamento.



potenza da fermo covico
non si muove, motore
potrebbe assorbire correnti
in eccesso se non protetto con
fusibili => sovraccarico



velocità
regolata
in assenza di
carico può
essere eccessiva
→ protezione

coppia avviata alta, assorbe molto
corrente (resistenze in serie a
limitare)

↳ no precisi limiti velocità

valore modesto di coppia e corrente
all'avvio, motore rallenta
su carichi pesanti
- Potenza in uscita quasi cost.
- Velocità si adatta automaticamente
al varare della coppia di carico

MACCHINA LINEARE:

dim. trifase → mot. asincrono / scorcio meccanico

$P_{in} = \sqrt{3} V_{rms} I_{rms} \cos \phi$ $P_{out} = T_{out} \omega_m$

$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$

$\omega_m = n_m \frac{2\pi}{60}$ $T_{prede-libera} = T_U \cdot m \cdot 9.7376$ $P_{CV} = \frac{P_{Wolt}}{746}$

reg. velocità = $\frac{n_{no load} - n_{full load}}{n_{full load}} \times 100\%$

motore
sincrono AC : $\omega_s = \frac{2\omega}{P}$ → f.kg. ensolva drolieutatore AC $n_s = \frac{60f}{P}$

MACCHINA LINEARE:

$\vec{F} = i_A \vec{l} \times \vec{B}$ $e_A = B l v$ $i_A = \frac{V_T - e_A}{R_A}$ @ con motore: $u = \frac{e_A}{B l}$

$P_m = f_{load} \cdot u$: pot. mec. trasmessa al carico
 $P_t = V_T i_A$: assorbito da bobine.
 $P_r = i_A^2 R$: dissipato nelle resistenze

generatore
 $P_m = f_{full} \cdot u$ $\eta = \frac{P_t}{P_m}$
 $P_t = V_T i_A$
 $P_r = i_A^2 R$

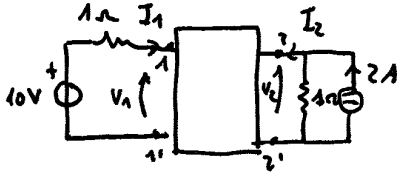
4)

ESERCIZI:

$$R_{11} = \frac{V_1}{I_1} \Big|_{i_2=0} \quad R_{12} = \frac{V_1}{i_2} \Big|_{i_1=0} \quad P_{oss} = \frac{V^2}{\|R\|} \rightarrow \det.$$

$$R_{21} = \frac{V_2}{i_1} \Big|_{i_2=0} \quad R_{22} = \frac{V_2}{i_2} \Big|_{i_1=0}$$

es.



$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$$

circuiti:

$$\begin{cases} V_1 = 10 - I_1 \cdot 1 \\ V_2 = (2 - I_2) \cdot 1 \end{cases}$$

doppio polo:

$$\begin{cases} V_1 = I_1 + I_2 \\ V_2 = I_1 + 2I_2 \end{cases}$$

U.B:

$$\cos(\alpha + 90^\circ) = -\sin(\alpha)$$

$$\cos(\alpha - 90^\circ) = \sin(\alpha)$$

~~Formule per la scrittura e disegnarli di B~~

$$H(\omega) = \frac{V(t)}{x(t)}$$

$$x(t) = 100 - 200 \cos(10t + 47.76^\circ)$$

$$x'(t) = -10 \Rightarrow H(\omega=0) = 0 \Rightarrow y'(t) = 0$$

$$x''(t) = -200 \cdot 10^2 \Rightarrow H(\omega=10) = \dots$$

le radici complesse:

$$|s_1, s_2| = \left| -\frac{1}{2} + \frac{3}{2}\sqrt{4}j \right| = 5 = \omega_0 \quad 2\omega_0 \} = 1 \quad \} = \frac{1}{10}$$

+ ZERI - POLI

$$A' = A \pm GdB \quad \text{segue} \uparrow$$

$$B' = B \pm 3dB \quad \text{doppio} \downarrow$$

$$A' = A + 20 \log \frac{1}{2}$$

se ho B (disseparata?)

$$ho A = B + 20 \log \frac{\omega B}{\omega A}$$

$$B = A \pm \text{pendenza} \log \left(\frac{B}{A} \right)$$

tipo (N):

Introdurre (Arsenico, P, Antimonio → pentavalenti) in semic. intrinseco. → atomi DONATORI
 uno dei 5 e⁻ di valenza non riesce a legarsi → e⁻ libero : n

tipo (P): (Boro, Gallio, Indio) → trivalenti → atomi ACCETTORI → richiedono e⁻ al reticolo puro.
 ↳ cariche ⊕ maggioritarie → lacune : p

↳ entità del drogaggio: 1 atomo di impurità ogni 10⁶/10⁸ atomi puri

legge di azione di massa:

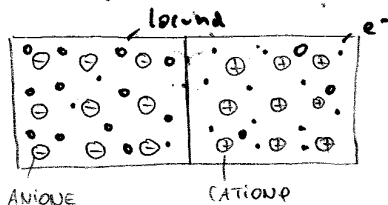
$n \cdot p = n_i^2 = \text{cost.}$ → condizione valida sia x l'intrinseco che x l'estrinseco.

VANTAGGI del DROGGAGGIO:

- 1) aumento della conducibilità
- 2) scelta del tipo di droganti e quindi delle cariche maggioritarie

LA GIUNZIONE PN: → da origine al DIODO ed al TRANSISTORE

barriera di semic. intrinseco → drogo neti p neti n



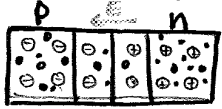
⇒ eccesso lacune a dx ↔ eccesso e⁻ a dx : GRADIENTE

• Nella regione centrale (ZONA DI SVUOTAMENTO): ricombinazione che tende a svuotare di portatori la regione circostante

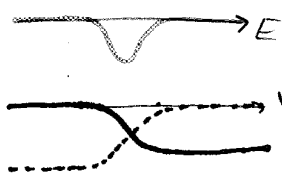
Man mano la zona di svuotamento si allarga → al suo interno: solo ioni del reticolo

Fenomeno si arresta quando pressione dei gas di e⁻ e lacune CONTROBILANCIATA dal campo E generato x effetto delle cariche scoperte.

non più neutralizzate ← CARICHE SCOPERTE dai portatori di carica

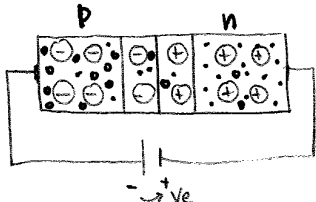


⇒ portatori maggioritari di ciascuna zona vedono davanti a sé una collina di POTENZIALE troppo alta da superare con il solo contributo termico
 → quelli minoritari discendono collina mantenendo flusso di cariche all'interno della giunzione.



Applicando dall'esterno tensione ai capi della giunzione: 2 ≠ comportamenti.

POLARIZZAZIONE INVERSA: [in interdizione]



tensione esterna si somma a quella già presente (↑ barriera potenziale)

Lacune verso il - della V_e e⁻ verso il + : cariche maggioritarie

↳ cariche minoritarie mantengono il loro flusso dando vita ad una piccola

corrente (mA) : I_S : CORRENTE INVERSA DI SATURAZIONE

I.B. CARICHE MINORITARIE hanno origine termica

POLARIZZAZIONE DIRETTA: [in conduzione] contrario (⊕ al p ⊖ al n) ⇒ V_e si oppone alla tensione interna

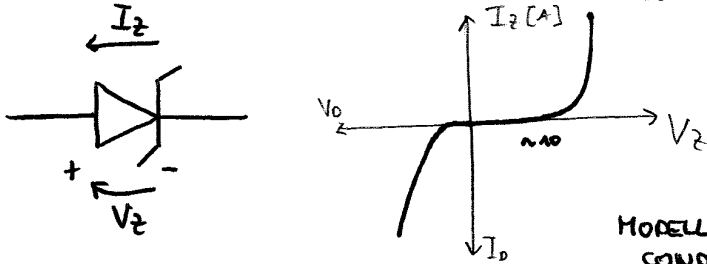
↳ riduzione della barriera di potenziale → cariche maggioritarie hanno energia suff. per attraversare

la giunzione: I_D : CORRENTE DIRETTA

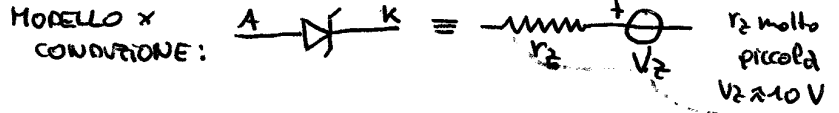
definisce il valore minimo oltre il quale la giunzione conduce ≈ 0,6V

N.B. Se in una rete compaiono dei diodi → devo risolvere (1) 1 x n interdizione e 1 x n conduzione. Se c'è + di un diodo bisogna tenere conto di tutte le possibili combinazioni

IL DIODO ZENER: (cambia il verso corrente) → inverti assi con caratteristica del diodo a giunzione ruotando di 180° nell'angolo ↗



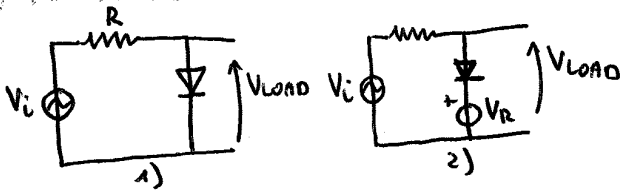
PROPRIETÀ: sostiene tensioni grandi ai suoi capi.



CIRCUITI TOSATORI (CLIPPING)

circuiti con diodi che eliminano una parte dello spettro di ingresso

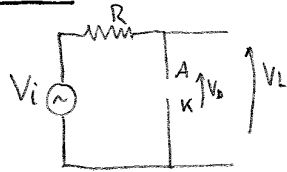
1) TOSATORE SINGOLO:



- 1) tosa per $V_i > V_Y$
 - 2) tosa per $V_i > V_Y + V_R$ → posso scegliere il valore al quale tagliare
- Se voglio tosa a 10V → posso fare onda di scelta $V_R = 3,4V$

2) ipotesi 1) interdizione del diodo:

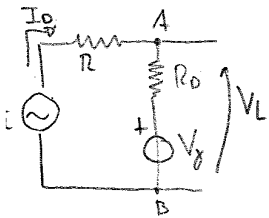
$I_D = 0 \quad I_D R = 0$



$V_L = V_D = V_i$ finché $V_i < V_Y$

3) ipotesi 2)

CONDIZIONE del DIODO



$R_0 I_0 + I_0 R + V_Y = V_i \quad I_0 = \frac{V_i - V_Y}{R + R_0}$

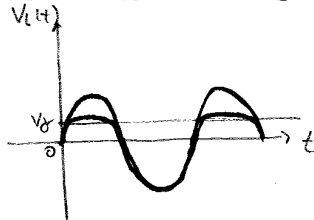
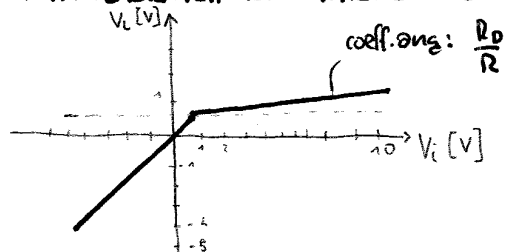
Millman: $V_L = V_{AB} = \frac{V_i}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_0}} + \frac{V_Y}{\frac{1}{R_0}} = \frac{V_i R_0 + V_Y R}{R + R_0}$

$R_0 \ll 1$ sempre

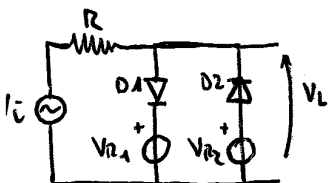
$\Rightarrow V_L = V_Y + \frac{V_i}{R} R_0$

finché $V_i > V_Y$

CARATTERISTICA DI TRASFERIMENTO DELLA TENSIONE $V_L = f(V_i)$



2) TOSATORE DOPPIO: diodi lavorano uno alla volta secondo rispettivamente le semionde positive e negative.



- a) D_1, D_2 interdetti quando $-(V_{R2} + V_Y) < V_i < V_{R1} + V_Y$
- b) D_1 interdetto, D_2 conduzione quando $V_i < -(V_{R2} + V_Y)$
- c) D_1 conduzione, D_2 interdetto $V_i > V_{R1} + V_Y$
- d) non ha significato fisico (uno dopo l'altro lavorano) inoltre ho sempre coperto tutti i casi