



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO : 297

DATA : 28/05/2012

A P P U N T I

STUDENTE : Barberis

MATERIA : Elettrotecnica e Impianti Elettrici

Prof. Tommasini

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 e Impianti Elettrici

Anno 2011/2012

FABIANA BARBERIS

S162015

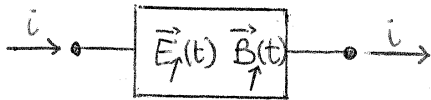
Il fenomeno descritto dipende dal tempo $q_n(t)$

$$i(t) = \frac{dq_n}{dt}$$

← corrente elettrica: variazione della carica netta nell'unità di tempo

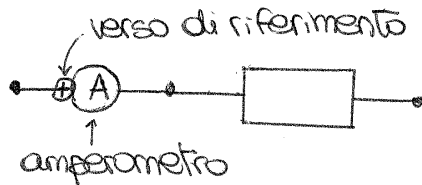
la corrente elettrica si misura in ampere $[i] = A$

$$A = \frac{C}{s} \leftarrow \begin{array}{l} C \leftarrow \text{coulomb} \\ s \leftarrow \text{secondo} \end{array}$$



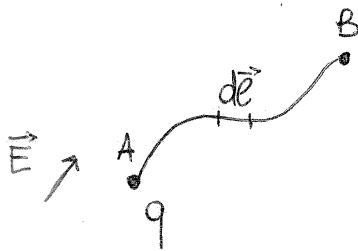
la corrente generalmente si disegna entrante o uscente dal morsetto

la corrente si misura con l'ampmetro



(se la corrente e' positiva significa che sta entrando nel morsetto)

Tensione: chi e' che muove gli elettroni? Il campo elettrico



se applico un campo elettrico ad una carica positiva questa si muove

$$L = \int_A^B q \vec{E} \cdot d\vec{e} \leftarrow \text{lavoro}$$

$$V = \frac{L}{q} = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{e} \leftarrow \text{tensione}$$

se il campo varia nel tempo anche la tensione varia nel tempo

$$[V] = V = \text{volt}$$

la tensione si definisce tra due morsetti, se ci sono piu' morsetti in un componente allora possiamo definire tante tensioni quante coppie di morsetti ci sono.

Potenza elettrica

È una grandezza derivata, prodotto della tensione per la corrente

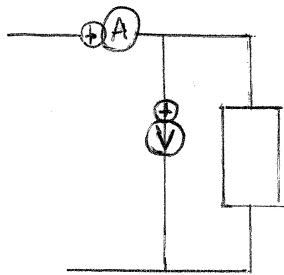
$$p(t) = v(t) \cdot i(t)$$

$$[p] = W = \text{watt} = V \cdot A$$

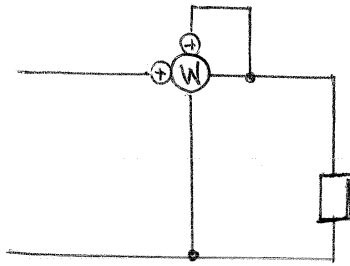
Se studio un bipolo con la convenzione (V) il prodotto $p(t) = v(t) \cdot i(t) \geq 0$ indica la potenza assorbita dal bipolo

Se studio un bipolo con la convenzione (G) il prodotto $p(t) = v(t) \cdot i(t) \leq 0$ indica la potenza erogata dal bipolo

La potenza si ottiene facendo il prodotto di un singolo bipolo

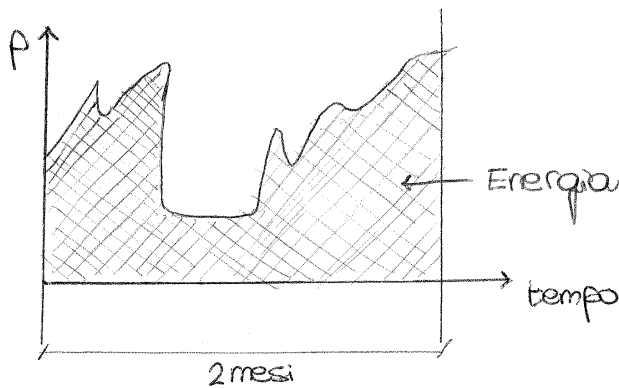


Esiste anche il wattmetro che è costituito da un voltmetro e un amperometro

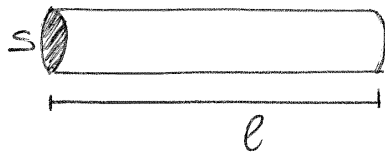


= morsetti voltmetrici

Il contatore di casa misura l'energia consumata che è l'integrale della potenza



$$E = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt$$



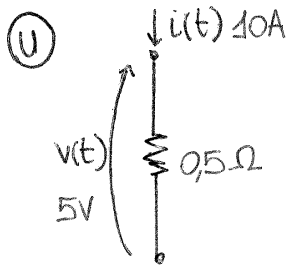
ρ resistività
 σ conducibilità $\sigma = \frac{1}{\rho}$
 $[\rho] = \Omega \cdot m$

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

$$i(t) = \frac{1}{R} v(t) = \text{---} v(t)$$

$G = \frac{1}{R}$ conduttanza $[G] = \Omega^{-1} = S = \text{siemens}$

Potenza del resistore

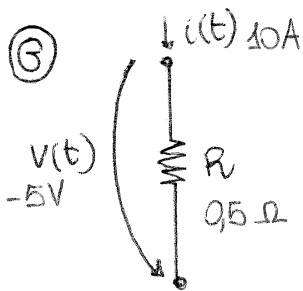


Misura potenza assorbita

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

$$p(t) = R \cdot i^2(t) = G v^2(t) = \frac{v^2(t)}{R}$$

da potenza assorbita dal resistore e' sempre positiva
 Un resistore non e' mai in grado di fornire potenza al circuito



Misura potenza erogata

$$v(t) = -R i(t)$$

perche' ho scritto la legge di Ohm con la convenzione del generatore

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = -R i^2(t) = -G v^2(t) = -\frac{v^2(t)}{R}$$

da potenza erogata dal resistore e' sempre negativa

Casi particolari

■ $R=0$ resistore con resistenza nulla
 $(G \rightarrow \infty)$

legge di Ohm $v(t) = 0 \quad \forall i(t), \forall t$

} Cortocircuito

■ $G=0$ componente con resistenza grandissima
 $(R \rightarrow \infty)$

$i(t) = 0 \quad \forall v, \forall t$

} Circuito aperto

Integro l'equazione costitutiva

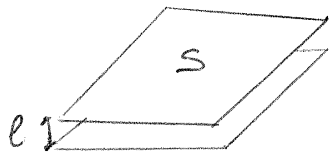
$$\int_{-\infty}^t dv(t') = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(t') dt'$$

$$v(t) = \underbrace{\frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(t') dt'}_{\text{l'integrale e' additivo quindi... lo spezziamo}} = \underbrace{\frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(t') dt'}_{V_0 \text{ "costante iniziale"}} + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(t') dt'$$

$$v(t) = V_0 + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(t') dt'$$

Equazione costitutiva in forma integrale

■ Condensatore a facce piane parallele



Materiali isolante (dielettrico) tra le due piastre

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$$

$$C = \epsilon \frac{S}{l}$$

Ho una capacità ogni qual volta ci sono due conduttori vicini con isolante tra loro, più la superficie aumenta o la distanza tra i conduttori è piccola, più la capacità aumenta.

Potenza del condensatore

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

$$P_A = C v(t) \frac{dv(t)}{dt} \begin{matrix} > 0 \\ < 0 \\ = 0 \end{matrix}$$

Un condensatore può assorbire potenza o fornire potenza mentre C è sempre positivo

$$E = \int P(t) dt = \frac{1}{2} C v^2(t) \geq 0 \text{ sempre}$$

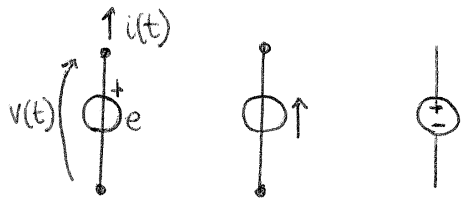
$$E = \frac{1}{2} C v^2(t)$$

Il condensatore quindi assorbe sempre energia, al più lui la può restituire è come un silos dove si mette acqua e a volte si può prendere l'acqua dal silos ma il silos non può creare acqua.
È come un magazzino

Condensatore e resistore sono

componenti passivi → assorbono sempre energia positiva

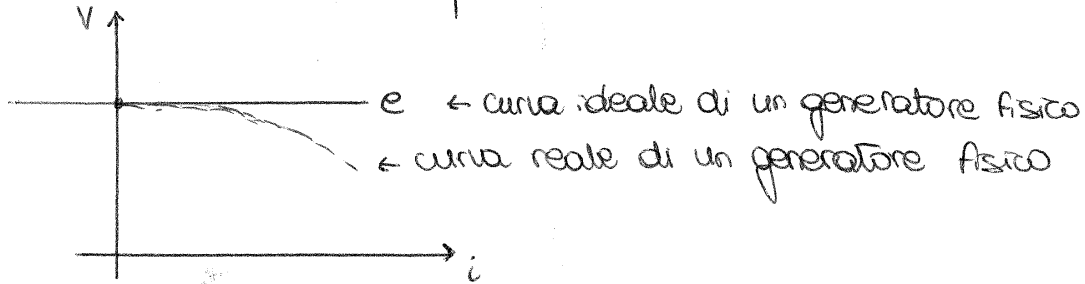
GENERATORE DI TENSIONE



Impone la sua tensione ai morsetti
cui lo vado ad applicare

$e =$ forza elettromotrice

$$\boxed{v(t) \equiv e(t)} \quad \forall t, \forall i$$



Potenza generatore di tensione

$$P_E = v(t) i(t) = e(t) i(t) \geq 0$$

$$\boxed{P_E = e(t) i(t)}$$

↑
potenza erogata

Anche l'energia e' positiva, negativa o uguale a zero

$$E = \int p(t) dt = \int e(t) i(t) dt \geq 0$$

E' un bipolo attivo \rightarrow non eroga sempre energia ma puo' erogare energia

da presa, le batterie sono generatori di tensione

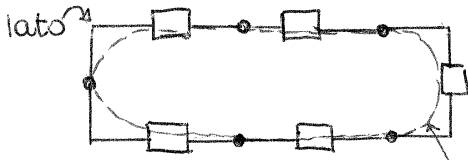
EQUAZIONI TOPOLOGICHE

Dipendono da come sono collegati i componenti



•

• nodo = punto in cui si collegano due o più bipoli



lato = connessione tra due nodi che si appoggia sul bipolo

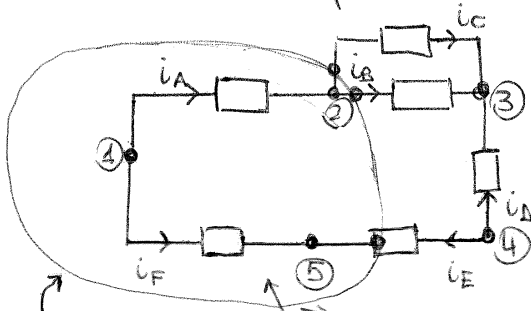
grafo: formato da lati e nodi

Numero di nodi: N

Numero di lati: L

LKC: legge di Kirchhoff delle correnti (legge dei nodi)

→ In un circuito elettrico la somma algebrica delle correnti che attraversano una superficie chiusa e orientata e' nulla in ogni istante di tempo (in condizioni stazionarie)



Definiamo una corrente per ogni lato

Prendiamo una superficie qualunque chiusa e orientata: superficie gaussiana

Operazioni "arbitrarie":

- orientamento della superficie \vec{n} entrante
- segno di attraversamento positive correnti concordi a \vec{n}

Attraversano la superficie i_B , i_C e i_E

$$-i_C - i_B + i_E = 0 \quad \forall t \quad \leftarrow \text{legge di Kirchhoff}$$

OSSERVAZIONI: • equazione omogenea quindi posso cambiare di segno

$$i_C + i_B - i_E = 0$$

• legge dei nodi: posso prendere una superficie attorno a un nodo e lo faccio bilanciamento delle correnti

$$\text{Nodo } 2: i_A - i_C - i_B = 0$$

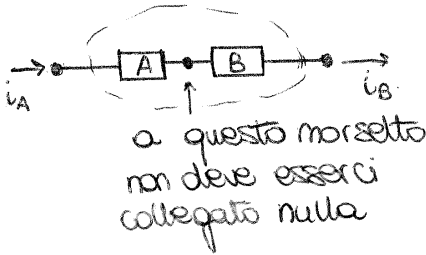
RETI ADINAMICHE (RESISTIVE)

Circuiti senza condensatori e senza induttori, hanno solo resistenze e quindi non hanno equazioni differenziali

Collegamenti tra dipoli:

- serie
- parallelo
- altri

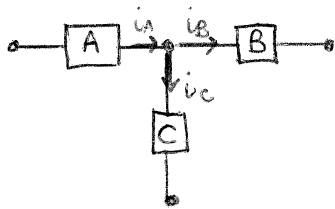
Collegamenti in serie



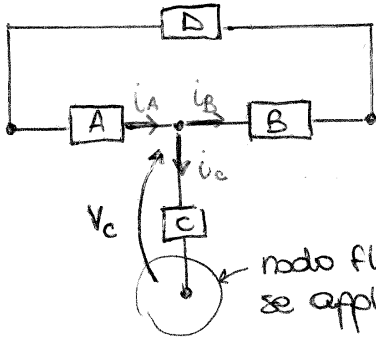
Due bipoli sono collegati in serie se hanno un morsetto in comune e a quel morsetto non e' collegato nessun altro bipolo

conseguenza: due bipoli collegati in serie sono attraversati dalla stessa corrente (dimostrato con legge di Kirchhoff $i_A = i_B$)

Non in serie



$i_A = i_B + i_C$ ← possiamo dire solo quello
se per caso $i_C = 0$ sempre allora A e B sono in serie

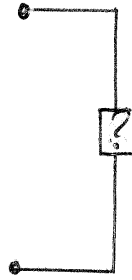
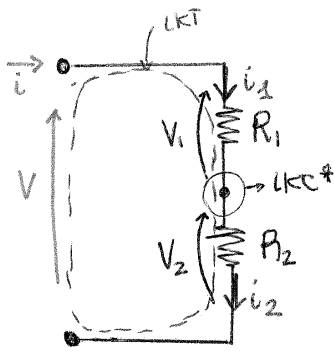


Possiamo sempre dire $i_C = 0$

modo flottante
se applico legge di Kirchhoff trovo $i_C = 0$
 V_C non può essere conteggiato nella legge di K perché e' considerato un morsetto ma non l'altro

ESEMPIO

Resistori in serie



Esiste qualcosa che abbia la stessa legge costitutiva dei due resistori in serie?

Equazioni costitutive

① $V_1 = R_1 i_1$
 $V_2 = R_2 i_2$

KCL

$i_1 - i_2 = 0 \rightarrow i_1 = i_2 = i$

KVL

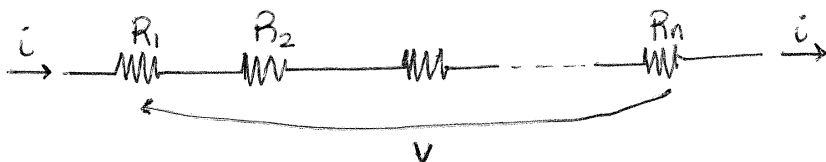
$V - V_1 - V_2 = 0 \quad V = V_1 + V_2$

Mettiamo insieme le equazioni

$V = V_1 + V_2 = R_1 i_1 + R_2 i_2 = (R_1 + R_2) i$
↑
KCL

$V = \underbrace{(R_1 + R_2)}_{R_s} i \quad \leftarrow \text{equazione che lega } V \text{ e } i$

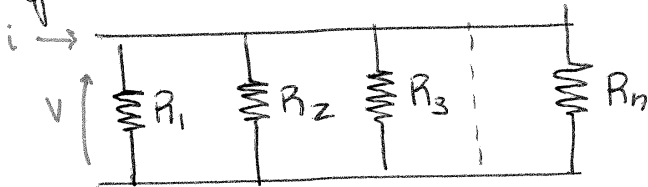
Due resistori in serie può essere scritto come un unico resistore la cui resistenza è la somma delle resistenze dei due resistori iniziali $R_s = R_1 + R_2$



$V = R_s i$
 $R_s = \sum_{i=1}^n R_i$

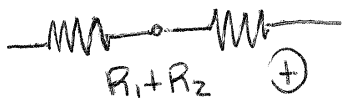
la resistenza R_s è sempre maggiore delle resistenze dei resistori collegati in serie

In generale

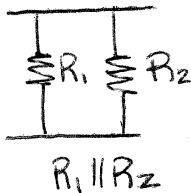


$$V = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}} i = \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} \right)^{-1} i$$

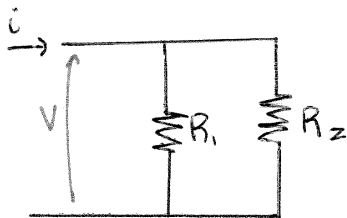
Il simbolo grafico per dire che due resistori sono in serie e' +



Per due resistori in parallelo



Partizione di corrente



Conosco i R1 e R2
voglio calcolare i1 e i2?

legge di Ohm

$$V = R_p i = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} i$$

$$i_1 = \frac{V}{R_1} \quad i_2 = \frac{V}{R_2}$$

$$i_1 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} i = \left[\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] i$$

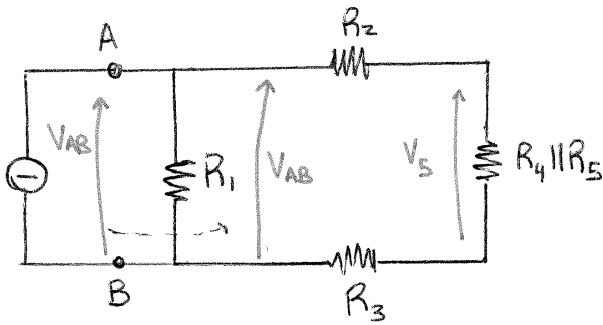
← coefficiente di partizione

Tanto piu' grande e' R2 tanto piu' grande e' i1

$$i_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} i = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i$$

Da' c'e' resistenza minore passa piu' corrente

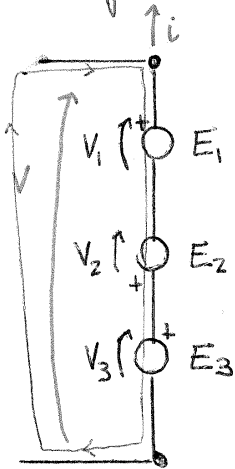
$$i_j = \frac{\left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} \right)^{-1}}{R_j} i = \frac{1}{R_j \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}} i$$



$V_4 = V_5$ perché sono in parallelo
 R_1 è in parallelo con tutto il resto quindi V_{AB} può essere messo dopo R_1

$V_5 = \frac{R_4 || R_5}{R_2 + R_3 + R_4 || R_5} V_{AB}$ ho usato la formula $V_e = \frac{R_e}{R_s} V$

Serie di generatori di tensione



Equazioni costitutive

$V_1 = E_1$

$V_2 = -E_2$

il + è verso il basso la punta della freccia V_2 verso l'alto, sono discordi

$V_3 = E_3$

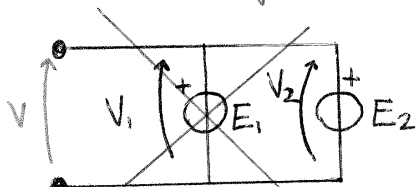
KKT: $V - V_1 - V_2 - V_3 = 0$

$V = V_1 + V_2 + V_3 = E_1 - E_2 + E_3$

$V = E_1 - E_2 + E_3 \quad \forall t, \forall i$

tensione equivalente

Parallelo di generatori di tensione



Kirchoff ci dice $V_1 = V_2$

d'equazione costitutiva è discorde

Si può fare solo se $E_1 = E_2$

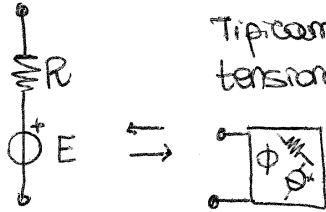
$V = E_1 = E_2$

Nella realtà se io metto due generatori di tensione in parallelo avrò una tensione media tra le due tensioni del generatore. Il generatore ideale non semplifica bene la realtà di due generatori in parallelo

Generatore di tensione in serie a un resistore

Modello piu' raffinato di generatore

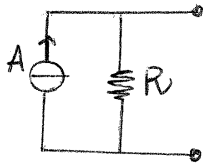
Tipicamente tutte le prese impongono una certa tensione



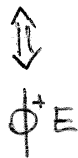
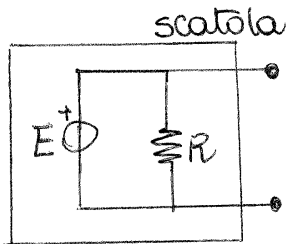
BIPOLO DI THEVENIN

Generatore di corrente in parallelo a un resistore

BIPOLO DI NORTON

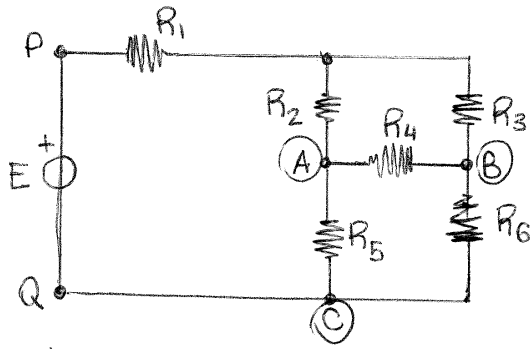


Generatore di tensione in parallelo a un resistore



Ai capi dei morsetti vedremo solo una tensione imposta E indipendentemente dalla resistenza R . Questo solo per il resto del circuito

Esempio



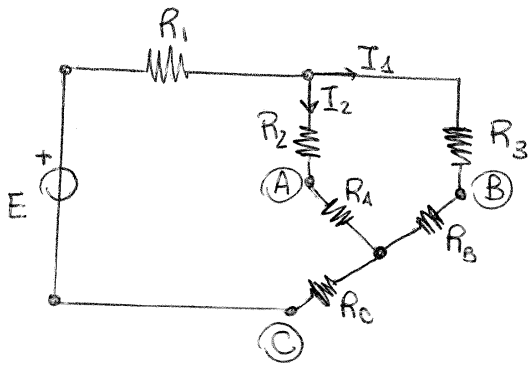
Voglio calcolare la corrente nel generatore
 $I = ?$

Triangoli: 2-3-4
 4-5-6

stelle: 2-4-5
 3-4-6
 1-2-3

Si cerca di non far sparire i componenti di cui vogliamo calcolare le grandezze

Proviamo a trasformare 4-5-6



se $R_4 = R_5 = R_6 = R_d$
 allora $R_A = R_B = R_C = R_y$

$$R_d = 3R_y$$

$$R_y = \frac{1}{3} R_d$$

Ora abbiamo $R_2 R_A$ serie } tra loro sono in parallelo
 $R_3 R_B$ serie }

con questi sono in serie R_1 e R_C

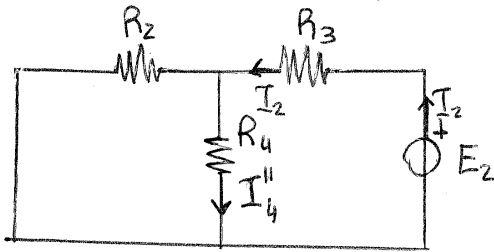
$$R_{PQ} = (R_2 + R_A) // (R_3 + R_B) + R_C + R_1$$

$$I = \frac{E}{R_{PQ}}$$

Se uno volesse calcolare I_2 uso la formula del partitore di corrente

$$I_2 = \frac{R_3 + R_B}{(R_3 + R_B) + (R_2 + R_A)} \cdot I$$

$E_1 = 0$ $E_2 \neq 0$ spegno generatore 1



$$R_2 // R_4$$

$$I_2 = \frac{E_2}{R_3 + R_2 // R_4}$$

$$I_4'' = \frac{R_2}{R_2 + R_4} I_2$$

Somma gli effetti parziali

$$I_4 = I_4' + I_4''$$

Osservazione: vogliamo calcolare la potenza assorbita da R_4

$$P_4' = R_4 \cdot I_4'^2$$

$$P_4'' = R_4 \cdot I_4''^2$$

$$P_4 = P_4' + P_4'' = R_4 (I_4'^2 + I_4''^2)$$

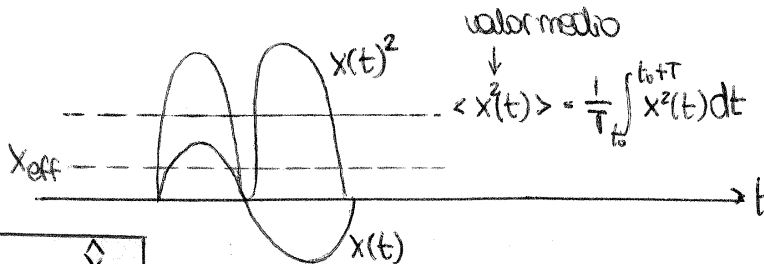
Stagionato perché non è lineare non si può applicare il principio di sovrapposizione degli effetti

$$P_4 = I_4^2 \cdot R_4 = R_4 (I_4' + I_4'')^2$$

φ : fase $[\varphi]$: rad

Valore efficace

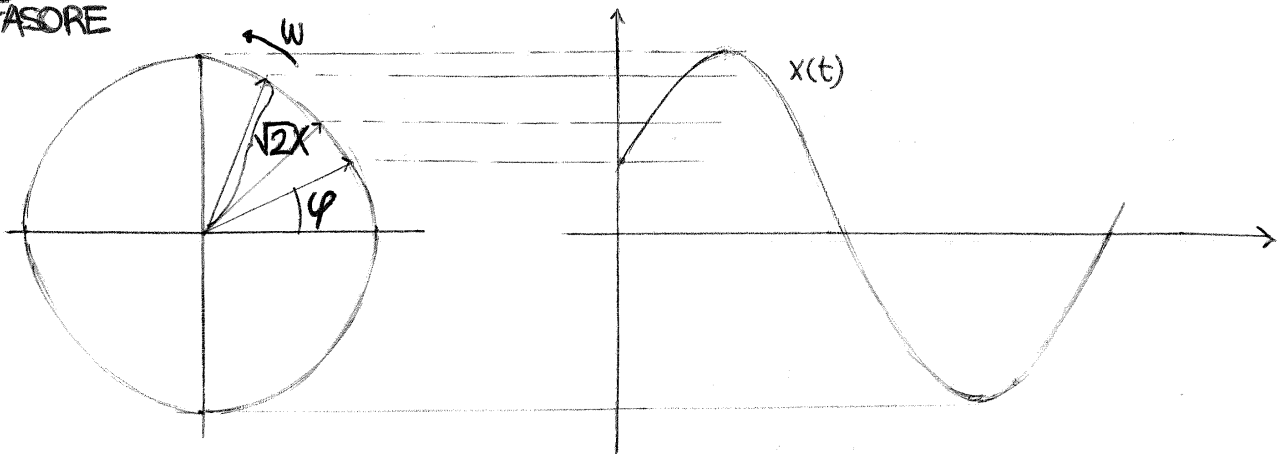
$$X_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt}$$



$$X_{\text{eff}} = \frac{\hat{x}}{\sqrt{2}} \quad (\text{per le sinusoidi})$$

$$x(t) = \sqrt{2} X_{\text{eff}} \sin(\omega t + \varphi)$$

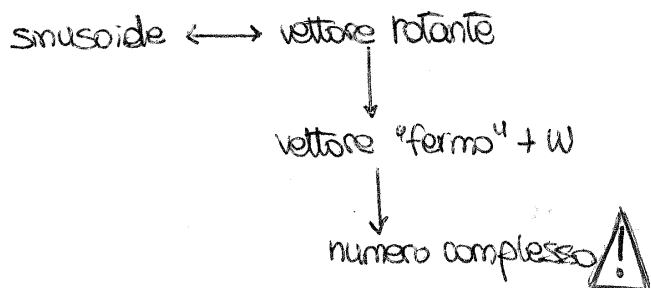
FASORE



Esiste una corrispondenza tra un vettore che ruota nel piano e una sinusoidale

In circuito funzionante in regime sinusoidale, tutte le grandezze sono sinusoidali e sono tutte alla stessa frequenza

Caratterizzo le sinusoidi con un vettore "fermo" nel piano, tramite X e φ



PROPRIETA' DEI FASORI

- 1 ■ Unicità
- 2 ■ linearità
- 3 ■ derivazione (integrazione)

1 ■ $x_1(t) = x_2(t)$

$$\begin{matrix} \updownarrow \\ \underline{X}_1 = \underline{X}_2 \end{matrix}$$

E' unica la trasformazione tra sinusoidi e fasori

2 ■ $k_1 x_1(t) + k_2 x_2(t) = y(t) \quad k_1, k_2 \in \mathbb{R}$



↑ ottengo sempre una sinusoida da combinazioni lineari di sinusoidi

$\frac{Y}{\omega} = k_1 \underline{X}_1 + k_2 \underline{X}_2$ ← somma di fasori, si ottiene nuovamente un fasore
 ↑
 fasore di $y(t)$

Es: $\sqrt{2} 2 \sin(3t) + 4\sqrt{2} \cos(3t + \frac{\pi}{2})$

↓
 valore efficace: 2
 fase: 0
 $2 \angle 0^\circ$

↓ bisogna trasformarlo prima in seno
 $-4\sqrt{2} \sin(3t)$
 ↓
 $-4 \angle 0^\circ$

$\underline{S} = 2 \angle 0^\circ + (-4 \angle 0^\circ) = -2 \angle 0^\circ \rightarrow s(t) = -2\sqrt{2} \sin(3t)$
 ↑
 fasore
 somma

3 ■ $x(t) = \sqrt{2} X \sin(\omega t + \varphi)$

$y(t) = \frac{d}{dt} x(t) = \sqrt{2} X \cos(\omega t + \varphi) \cdot \omega = \sqrt{2} X \omega \sin(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2})$

$\underline{Y} = \omega X e^{j(\varphi + \frac{\pi}{2})} = \omega X e^{j\varphi} e^{j\frac{\pi}{2}}$

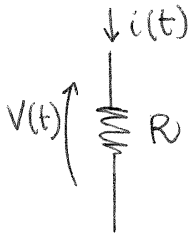
$e^{j\frac{\pi}{2}} = \underbrace{\cos \frac{\pi}{2}}_0 + j \underbrace{\sin \frac{\pi}{2}}_1 = j$

$= j\omega X e^{j\varphi} = j\omega \underline{X}$

$$\boxed{\frac{d \cdot}{dt} \rightarrow j\omega}$$

$$\boxed{\int \cdot dt \rightarrow \frac{1}{j\omega}}$$

Resistore



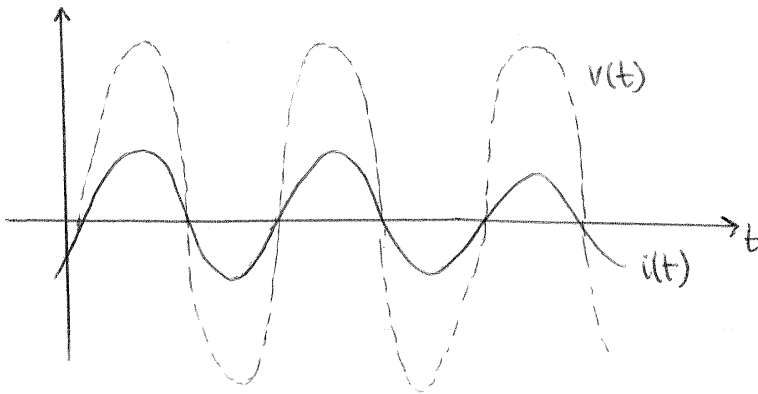
$$V(t) = Ri(t)$$

$$i(t) = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \varphi_I)$$

$$V(t) = \sqrt{2} V \sin(\omega t + \varphi_V) = \sqrt{2} RI \sin(\omega t + \varphi_I)$$

$$\boxed{V = RI \quad \varphi_V = \varphi_I}$$

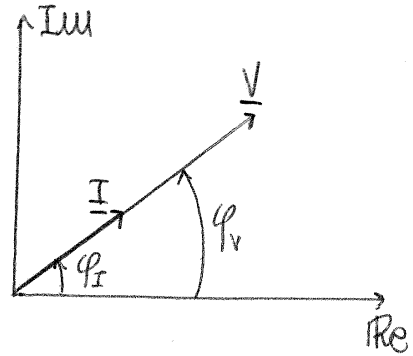
sono valori
efficiaci non fasori



$$i(t) \longleftrightarrow \underline{I}$$

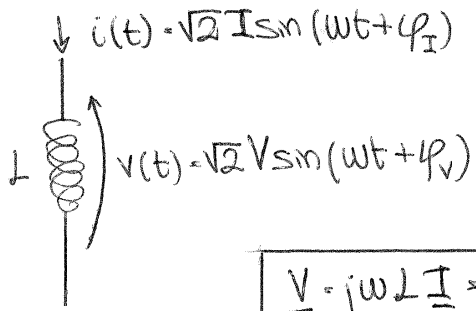
$$V(t) \longleftrightarrow \underline{V}$$

$$\boxed{\underline{V} = R \underline{I}}$$



In un regime sinusoidale
corrente e tensione sono in FASE

Induttore

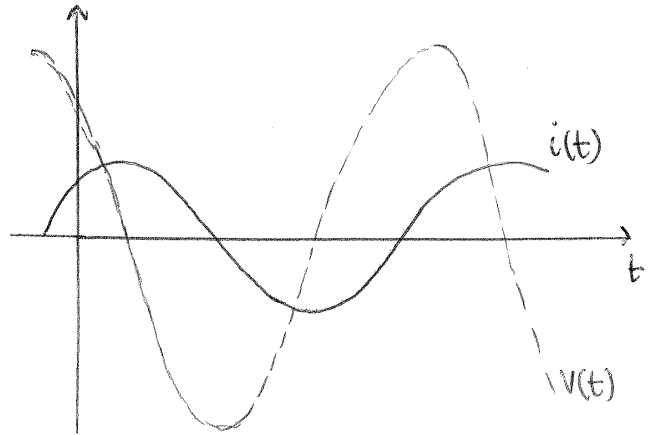
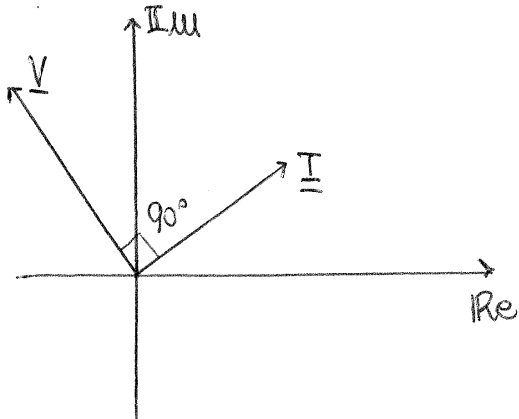


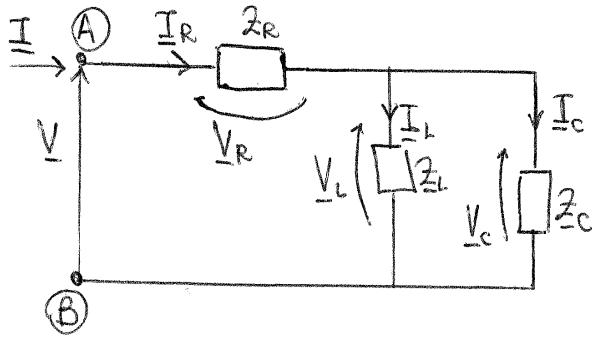
$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

$$\underline{V} = j\omega L \underline{I} = j X_L \underline{I}$$

$$X_L = \omega L \quad [X_L] = \Omega$$

REATTANZA INDUTTIVA





$$Z_R = R$$

$$Z_L = jX_L = j\omega L$$

$$Z_C = jX_C = j \frac{-1}{\omega C}$$

$$V_R = R I_R \quad V_L = V_C$$

$$V_L = jX_L I_L \quad V_L + V_R = V$$

$$V_C = jX_C I_C \quad I = I_R \quad I_R = I_L + I_C$$

$$\textcircled{1} jX_L I_L + R I = V$$

$$I = I_L + \frac{V_C}{jX_C} = I_L + \frac{jX_L I_L}{jX_C}$$

$$I = \frac{X_L + X_C}{X_C} I_L \longrightarrow I_L = \frac{X_C}{X_L + X_C} I \quad \text{inserendolo nell'equazione 1}$$

$$j \frac{X_L X_C}{X_L + X_C} I + R I = V$$

$$V = \left(R + j \frac{X_L X_C}{X_L + X_C} \right) I$$

$$R + (jX_C \parallel jX_C)$$

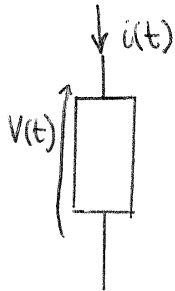
$$Z_{eq} = Z_R + Z_L \parallel Z_C$$

$$V = Z_{eq} I$$

Potenze in regime sinusoidale

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$$

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta$$



$p(t) = i(t)v(t)$ ← nel dominio del tempo

$$v(t) = \sqrt{2} V \sin(\omega t + \varphi_V) \longleftrightarrow \underline{V} = V e^{j\varphi_V}$$

$$i(t) = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \varphi_I) \longleftrightarrow \underline{I} = I e^{j\varphi_I}$$

Posso fare $P = \underline{I} \underline{V}$?

$$p(t) = 2 VI \sin(\omega t + \varphi_V) \sin(\omega t + \varphi_I)$$

$$\alpha = \omega t + \varphi_V$$

$$\beta = \omega t + \varphi_I$$

$$p(t) = 2 VI \frac{1}{2} [\cos(\underbrace{\varphi_V - \varphi_I}_{\varphi}) - \cos(2\omega t + \underbrace{\varphi_V + \varphi_I}_{+ \varphi_I - \varphi_I} \rightarrow (2\omega t + 2\varphi_I + \varphi))]$$

φ = sfasamento tra tensione e corrente

$$\varphi = \varphi_V - \varphi_I$$

$$p(t) = VI [\cos \varphi - \cos(2\omega t + 2\varphi_I + \varphi)]$$

$$p(t) = VI [\cos \varphi - \cos(2\omega t + 2\varphi_I) \cos \varphi + \sin(2\omega t + 2\varphi_I) \sin \varphi]$$

$$p(t) = VI \cos \varphi [1 - \cos(2\omega t + 2\varphi_I)] + VI \sin \varphi \sin(2\omega t + 2\varphi_I)$$

Le oscillazioni della potenza hanno frequenza doppia rispetto a quella della corrente. Ha una frequenza di 100 Hz

È una sinusoide traslata

$$p(t) = p_a(t) + p_r(t)$$

potenza attiva istantanea

potenza reattiva istantanea

$$\underline{V} \underline{I}^* = V e^{j\varphi_V} I e^{-j\varphi_I} = V I e^{j(\varphi_V - \varphi_I)} = V I e^{j\varphi}$$

$$= V I \cos\varphi + j V I \sin\varphi$$

$$\underline{S} = P + jQ \quad \text{potenza complessa}$$

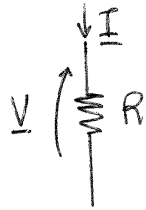
$$|\underline{S}| = S$$

\underline{S} non è un fasore perché non è una sinusoidale

[S] - VA - volt-ampere

RESISTORE

$$\underline{V} = R \underline{I}$$



\underline{z} impedenza

$$\underline{z} = R \quad \varphi = 0$$

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

||
1

Assorbe potenza attiva e non scambia potenza reattiva

$$Q = 0$$

$$Q = V I \sin\varphi = 0$$

||
0

$$P = V I = R I^2$$

$$\underline{S} = P$$

$$P = V I = R I^2 = \frac{V^2}{R}$$

↑
 $V = R I$

V e I sono valori efficaci

INDUTTORE

$$\underline{V} = j X I = j \omega L I$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2}$$

$$\frac{\underline{V}}{\underline{I}} = jX = X e^{j\frac{\pi}{2}}$$

$$P = V I \cos\varphi = 0$$

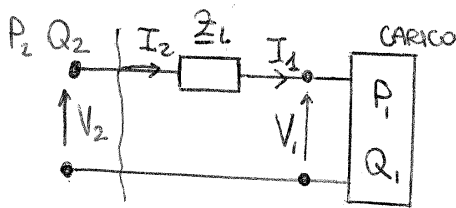
$$P = 0$$

$$Q = V I$$

$$Q = V I \sin\varphi = V I = X I^2 = \frac{V^2}{X} \geq 0$$

↑
 $V = X I$

METODO DELLE POTENZE (solo con serie e parallelo)



è un induttore
perché
 P e $Q > 0$

DATI

$P = 10 \text{ kW}$
 $Q = 10 \text{ kvar}$
 $V = 230 \text{ V}$

$$Z_L = 0,15 + j0,2 \ \Omega$$

reattanza induttiva perché positiva

supponiamo ω dato da $f = 50 \text{ Hz}$ e quindi

$$\omega = 2\pi f = 314 \text{ rad/s}$$

DOMANDE

$V_2?$ $P_2?$ $Q_2?$

Se si fa $\frac{\omega}{0,2} = L$ troviamo l'induttanza



$$Z_{CAR} = R_{CAR} + jX_{CAR}$$

con $X_{CAR} > 0$

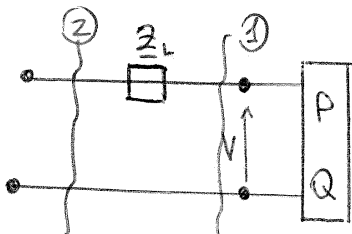
metodo dei fasori

Ho bisogno di trovare la fase per risolvere con i fasori

Posso imporre $\varphi = 0$ alla tensione

Utilizzo però il metodo delle potenze

1) Si divide il circuito in sezioni



2) Si identifica la sezione in cui sono note 3 grandezze di cui almeno una è una tensione o una corrente

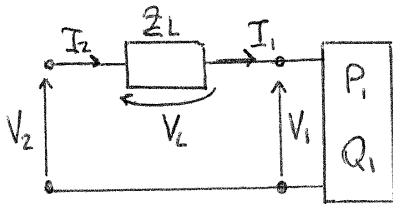
3) Si calcolano le grandezze non note
Posso calcolare I_1

$$I_1 = \frac{S_1}{V_1} = \frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}{V_1} = 61,5 \text{ A} \quad \text{perché } \underline{S} = \underline{V} \underline{I}^*$$

4) Mi sposto di una sezione: devo identificare quale tra V e I rimane invariato

Passo alla sezione 2: $I_2 = I_1$ perché la corrente che attraversa l'impedenza è la stessa, infatti gli elementi sono in serie

RIFASAMENTO



$$I_1 = \frac{P_1}{V_1 \cos \varphi_1}$$

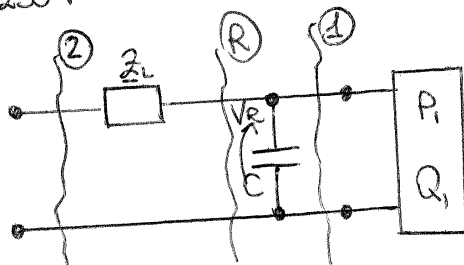
per avere piu' corrente servirebbe avere $\cos \varphi_1$ basso

Per avere I_1 basso quindi devo avere $\cos \varphi_1$ alto, in questo modo le perdite sono piu' basse.

$$\cos \varphi_1 = \cos \left[\arctan \frac{Q_1}{P_1} \right]$$

$\cos \varphi_1$ dipende dal rapporto Q_1/P_1
 se diminuisco Q_1 aumento $\cos \varphi_1$
 Devo mettere qualcosa nella sezione
 (R) per far diminuire Q_1

$P_1 = 10 \text{ kW}$ $I_1 = 61,5 \text{ A}$
 $Q_1 = 10 \text{ kvar}$
 $V_1 = 230 \text{ V}$



$$Q_R = Q_1 + Q_{1R} < Q_1$$

$$\uparrow$$

$$Q_{1R} < 0$$

Posso mettere un condensatore

scego C tale che $\cos \varphi_R = 0,9$
 \hookrightarrow imposto

Processo mentale:

$$\cos \varphi \uparrow \Rightarrow \varphi \downarrow \Rightarrow \tan \varphi \downarrow \Rightarrow Q \downarrow \Rightarrow Q_{1R} < 0$$

Occupiamo di sezione (R)

Il condensatore e' in parallelo al carico quindi $V_R = V_1$

$$V_R = V_1$$

$$P_R = P_1 + P_{1R}$$

$$Q_R = Q_1 + Q_{1R}$$

$P_{1R} = 0$ non assorbe potenza attiva

$$Q_{1R} = Q_R - Q_1$$

$$Q_R = P_R \tan \varphi_R \Rightarrow \text{noto perche' ho imposto } \cos \varphi_R = 0,9$$

$$Q_{1R} = P_R \tan \varphi_R - P_1 \tan \varphi_1 = P_1 (\tan \varphi_R - \tan \varphi_1) = -5160 \text{ var}$$

$$\downarrow$$

$$P_R = P_1$$

angolo dopo il rifasamento

angolo prima del rifasamento

9 nov 2011

SISTEMI TRIFASE

- origine - definizioni
- monofase equivalente
- potenza
- convenienza

Circuito in regime sinusoidale caratterizzato da equazioni differenziali

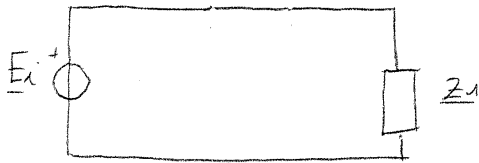
- termine esponenziale (STUDIO DE TRANSITORI)
- termine differenziale particolare (sinusoidale)

1^a parte: TRANSITORIO
 le grandezze sono sinusoidali + esponenziali (del tipo e^{-t} , quindi va a zero nel giro di qualche ms)
 2^a parte: sinusoidale permanente

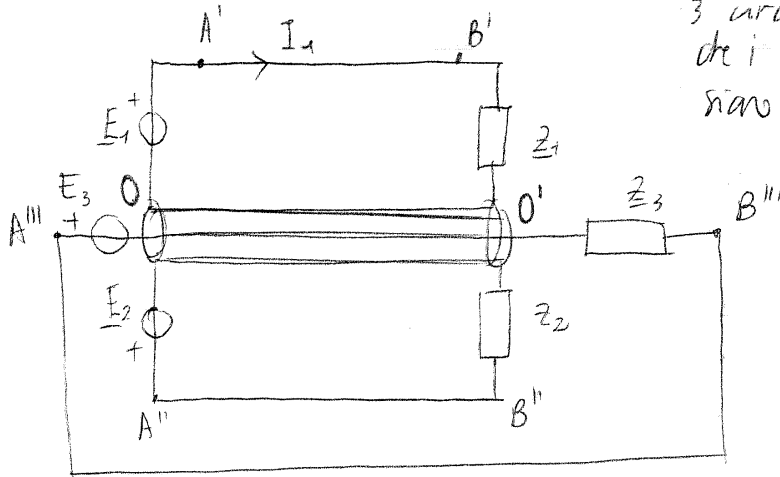
Systema con 3 fasi.

1 fase = 1 generatore
 3 fasi = 3 generatori

CIRCUITO MONOFASE



CIRCUITO TRIFASE



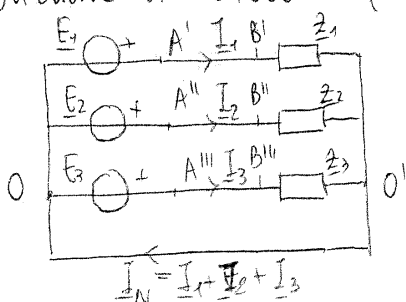
3 circuiti indipendenti in modo che i poli negativi dei 3 generatori siano tutti vicini.

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1}$$

tensione
 impedenza equivalente di rete

uniamo quindi i 3 circuiti

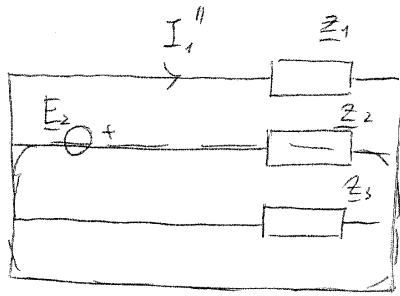
Otteniamo un circuito equivalente a:



- L1 fase 1 (E_1)
- L2 fase 2 (E_2)
- L3 fase 3 (E_3)

n conduttore di neutro (corrente di neutro)

$$I_N = I_1 + I_2 + I_3$$



$$\underline{E}_2 \neq 0, \quad \underline{E}_1 = \underline{E}_3 = 0$$

$$\underline{I}_1'' = 0$$

allo stesso modo

$$\underline{I}_1''' = 0$$

\underline{z}_1 e \underline{z}_3 sono circuitate.

Se ho in sistema simmetrico ed equilibrato:

$$\rightarrow \underline{I}_1 = \frac{\underline{E}_1}{\underline{z}_1} \leftarrow$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_1' + \underline{I}_1'' + \underline{I}_1'''$$

$$\rightarrow \underline{I}_2 = \frac{\underline{E}_2}{\underline{z}_2} \leftarrow$$

$$\rightarrow \underline{I}_3 = \frac{\underline{E}_3}{\underline{z}_3} \leftarrow$$

□ Quanto vale la corrente di neutro \underline{I}_N
(LKC)

$$\begin{aligned} \underline{I}_N &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 \\ &= \frac{\underline{E}_1}{\underline{z}_1} + \frac{\underline{E}_2}{\underline{z}_2} + \frac{\underline{E}_3}{\underline{z}_3} \end{aligned}$$

Il sistema è equilibrato:

$$= \frac{1}{\underline{z}} (\underline{E}_1 + \underline{E}_2 + \underline{E}_3) \quad \text{dove } \underline{z} = \underline{z}_1 = \underline{z}_2 = \underline{z}_3$$

Il sistema è simmetrico

$$= 0$$

$$\text{perché } \underline{E}_1 + \underline{E}_2 + \underline{E}_3 = 0$$

Le correnti sono uguali in modulo e sfasate anch'esse di 120°

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}_1}{\underline{z}} = \underbrace{\frac{E}{z}}_{\text{modulo}} e^{j(\varphi_{E_1} - \varphi_z)} = \frac{E}{z} e^{-j\varphi_z}$$

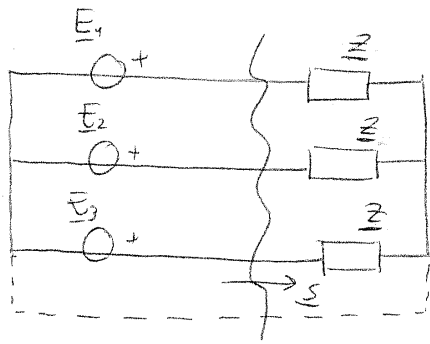
$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{E}_2}{z} = \frac{E}{z} e^{j(\varphi_{E_2} - \varphi_z)} = \frac{E}{z} e^{-j(\varphi_z + 120^\circ)}$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{E}_3}{z} = \frac{E}{z} e^{j(\varphi_{E_3} - \varphi_z)} = \frac{E}{z} e^{-j(\varphi_z - 120^\circ)}$$

$$\varphi_{E_2} = -120^\circ$$

$$\varphi_{E_3} = 120^\circ$$

POTENZA nei sistemi simmetrici ed equilibrati



somma delle potenze delle tre fasi prese singolarmente

POTENZA COMPLESSA

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_3 \\ &= \underline{E}_1 \underline{I}_1^* + \underline{E}_2 \underline{I}_2^* + \underline{E}_3 \underline{I}_3^* \\ &= \underline{E} \underline{I} e^{j(\varphi_{E1} - \varphi_{I1})} + \end{aligned}$$

$$+ \underline{E} \underline{I} e^{j(\varphi_{E2} - \varphi_{I2})} + \underline{E} \underline{I} e^{j(\varphi_{E3} - \varphi_{I3})}$$

$$= 3 \underline{E} \underline{I} e^{j\varphi_2}$$

i tre addendi sono uguali:

$$\varphi_2 = \varphi$$

sfasamento tra tensione e corrente

quindi:

$$\underline{S} = 3 \underline{E} \underline{I} e^{j\varphi} = 3 \underline{E} \underline{I} \cos \varphi + j 3 \underline{E} \underline{I} \sin \varphi =$$

$$P + jQ$$

$$Q = P \operatorname{tg} \varphi$$

$$\frac{Q}{P} = \operatorname{tg} \varphi$$

$$\begin{aligned} \rightarrow P &= 3 \underline{E} \underline{I} \cos \varphi \\ \rightarrow Q &= 3 \underline{E} \underline{I} \sin \varphi \end{aligned}$$

$$V = \sqrt{3} \underline{E}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow P &= \sqrt{3} V \underline{I} \cos \varphi \\ \rightarrow Q &= \sqrt{3} V \underline{I} \sin \varphi \end{aligned}$$

potenza attiva
potenza passiva

$$\underline{S} = P + jQ$$

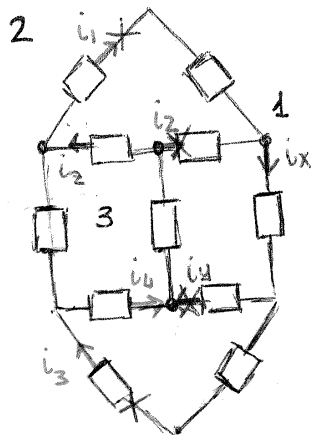
POTENZA APPARENTE

$$\underline{S} = \sqrt{3} V \underline{I}$$

Il metodo delle potenze si applica ai sistemi trifase ricordarsi del fattore $\sqrt{3}$

ESERCITAZIONE 1

①



Trovare i_x i_y i_z conoscendo i_1 i_2 i_3 i_4

1 Calcoliamo i_x

Usando LKC: $i_x = i_1 + i_2$

2 Calcolo i_y (considero positive le correnti entranti)

$$i_y + i_3 - i_1 - i_2 = 0$$

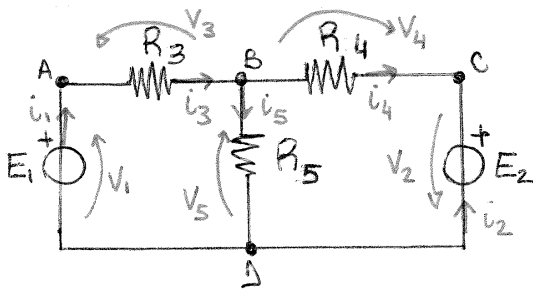
$$i_y = i_1 + i_2 - i_3$$

3 Calcolo i_z (considero positive le correnti entranti)

$$-i_1 + i_2 + i_3 - i_4 = 0 \quad i_2 = i_1 - i_3 + i_4$$

Le equazioni lineari sono valide per bipoli lineari

②

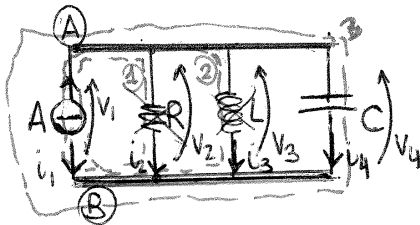


node $N=4$
lato $L=5$

Incognite: $2L=10 \rightarrow$ devo scrivere 2L equazioni linearmente indipendenti

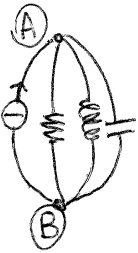
- equazioni costitutive L
- LKC $N-1$ } L scrivo 4 LKC una per ogni nodo
- LKT $L-N+1$ } L 3 LKT una per ogni maglia

3



$L=4$ (tanti quanti le componenti)

$N=2$ (segnati in rosso)



sono tutti collegati in parallelo

Se i 4 componenti sono in parallelo hanno la stessa tensione. Ma la stessa tensione può essere solo tra 2 nodi, quindi abbiamo 2 nodi.

■ Equazioni costitutive

$$\begin{cases} i_1 = -A \\ V_2 = R i_2 \\ V_3 = L \frac{di_3}{dt} \\ i_4 = C \frac{dV_4}{dt} \end{cases}$$

Il sistema è un sistema differenziale

$$\begin{cases} i_3(t=0) = i_{30} \\ V_4(t=0) = V_{40} \end{cases} \text{ condizioni iniziali}$$

■ LKC (N-1)

ⓑ $i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = 0$

■ LKT (L-N+1)

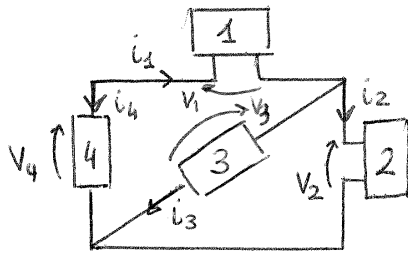
$$\begin{cases} \text{[1]} & V_1 - V_2 = 0 \\ \text{[2]} & V_1 - V_3 = 0 \\ \text{[3]} & V_1 - V_4 = 0 \end{cases}$$

7.2

3

Esercitazione 2

①



$i_1 = 2A$
 $i_3 = 3A$
 $v_2 = 4V$
 $v_4 = 2V$

$v_3 = ?$
 $v_1 = ?$
 $i_2 = ?$
 $i_4 = ?$

$v_3 = v_2 = 4V$

KKT $v_1 = -v_3 + v_4 = -2V$

$i_4 = -i_1 = -2A$

$i_2 = -i_3 - i_4 = -3 - (-2) = -1A$

$P_1 = v_1 i_1 = -4W$

$P_2 = v_2 i_2 = -4W$

$P_3 = v_3 i_3 = 12W$

$P_4 = v_4 i_4 = -4W$

} potenze assorbite dai bipoli

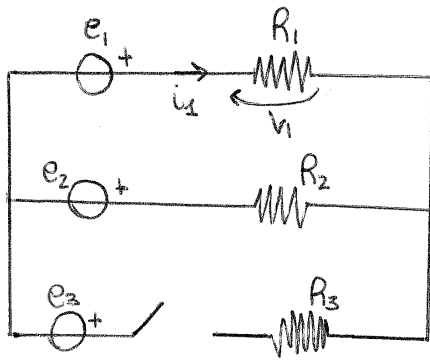
o se sommo le potenze assorbite e' zero

In un circuito si conserva la potenza istante per istante

$$\sum_{k=1}^L P_k = \sum_{k=1}^L v_k i_k = 0$$

→ TEOREMA DI TELLEGEN

3



$V_1 = ?$

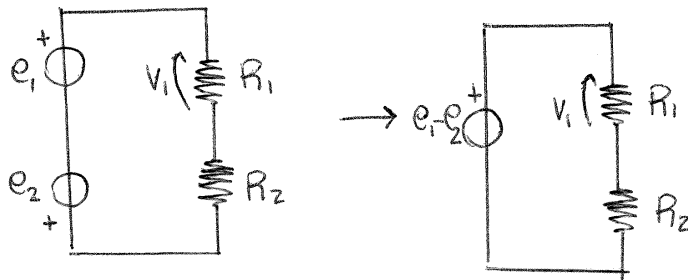
R_3 e e_3 non contano nulla perche' i_3 non puo' che essere uguale a 0

- Esiste un'unica corrente i_1

LKT $e_1 - R_1 i_1 - R_2 i_1 - e_2 = 0$

$$i_1 = \frac{e_1 - e_2}{R_1 + R_2} \quad V_1 = R_1 i_1 = R_1 \frac{e_1 - e_2}{R_1 + R_2}$$

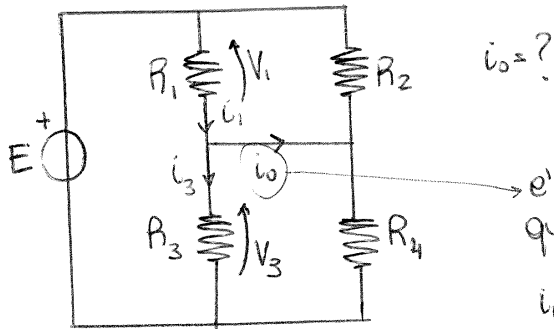
- Si poteva disegnare così



partitore di tensione

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (e_1 - e_2)$$

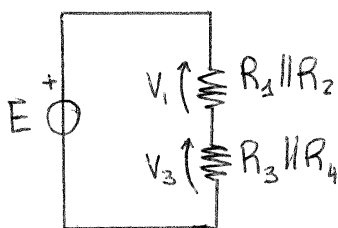
4



$i_0 = ?$

e' una corrente su un cortocircuito, devo quindi appoggiarmi ad altre grandezze

$$i_1 = i_0 + i_3 \quad i_0 = i_1 - i_3$$



Partitore di tensione

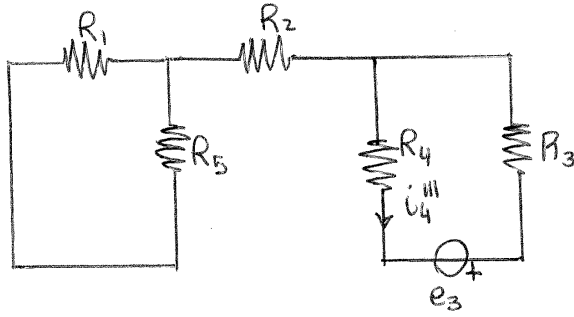
$$V_1 = \frac{R_1 // R_2}{R_1 // R_2 + R_3 // R_4} E$$

$$V_3 = E - V_1$$

$$i_1 = \frac{V_1}{R_1} \quad i_3 = \frac{V_3}{R_3}$$

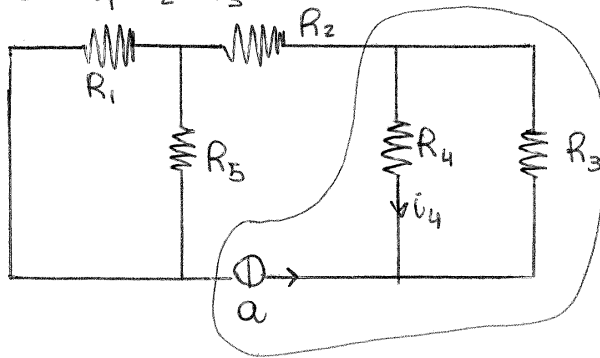
$$i_0 = \frac{V_1}{R_1} - \frac{V_3}{R_3}$$

• $e_3 \neq 0$ $a = e_1 = e_2 = 0$



$$i_4^{III} = \frac{e_3}{R_3 + R_4}$$

• $a \neq 0$ $e_1 = e_2 = e_3 = 0$



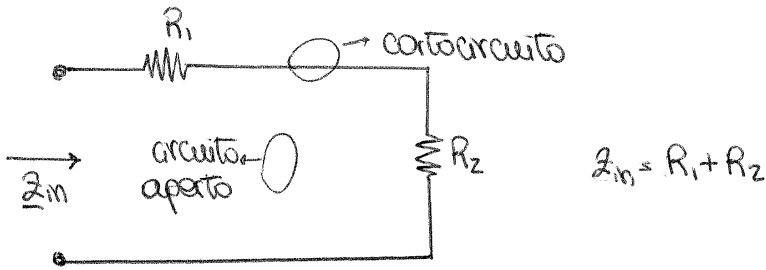
→ partitore di corrente

$$i_4^{IV} = - \frac{R_3}{R_3 + R_4} a$$

Corrente totale

$$i_4 = \frac{e_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} a = \frac{(e_3 - R_3) a}{R_3 + R_4}$$

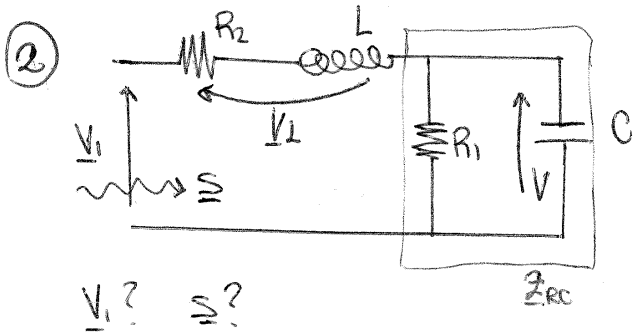
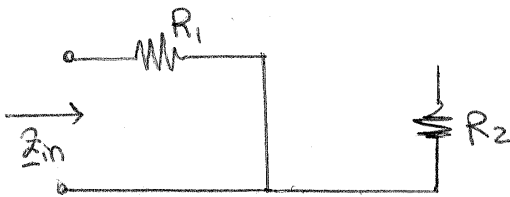
$$P_4 = R_4 i_4^2 = R_4 \frac{(e_3 - R_3) a}{R_3 + R_4}$$



$f \rightarrow \infty$

$X_L = \omega L \rightarrow \infty$ circuito aperto

$X_C = \frac{-1}{\omega C} = \frac{-1}{\infty} = 0$ cortocircuito



assumo $f = 50 Hz$

$X_L = \omega L = 94,25 \Omega$

$X_C = \frac{-1}{\omega C} = -106,10 \Omega$

$\underline{V} = 400 e^{j0} = 400 \angle 0^\circ V$

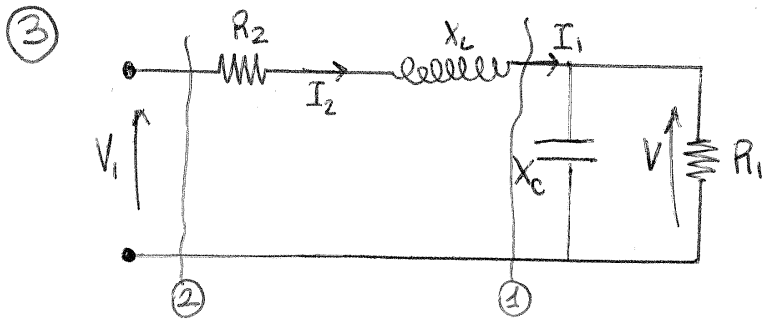
$\underline{I} = \frac{\underline{V}}{Z_{RC}} = \frac{\underline{V}}{R_1 // jX_C} = \frac{\underline{V}}{\frac{jR_1 X_C}{R_1 + jX_C}} = 8,84 \angle 125,23^\circ A$

$Z_{RC} = 40,91 - j19,28 \Omega$

$\underline{V}_L = Z_L \cdot \underline{I} = (R_2 + jX_L) \underline{I} = -195,31 + j829,38 V$

LKT: $\underline{V}_1 = \underline{V} + \underline{V}_L = 400 - 195,31 + j829,38 V = 204,69 + j829,38 V$

$$\underline{S} = \underline{V}_1 \underline{I}_1^* = 4764,2 + j5863,4 \text{ VA}$$



stessi dati e magnitudi di prima

sezione ①

$$P_1 = \frac{V^2}{R_1} = 3200 \text{ W}$$

$$Q_1 = \frac{V^2}{X_c} = -1508 \text{ var}$$

$$I_1 = \frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}{V} = 8,84 \text{ A}$$

sezione ②

$I_2 = I_1$ grandezza che resta invariata

Teorema di Boucherot

$$P_2 = P_1 + P_{12}$$

$$Q_2 = Q_1 + Q_{12}$$

$$P_{12} = R_2 I_2^2$$

$$P_2 = P_1 + R_2 I_2^2 = 4764,2 \text{ W} \text{ parte reale di } \underline{S}$$

$$Q_2 = Q_1 + X_L I_2^2 = 5863,4 \text{ var} \text{ parte immaginaria di } \underline{S}$$

Calcolo la tensione

$$V_1 = \frac{\sqrt{P_2^2 + Q_2^2}}{I_2}$$

UPS rotante: Il motore continua a girare aspettando che si avvii il motore diesel

- Vantaggi:
- non ci sono BATTERIE (da controllare e cambiare)
 - ho BREAK di POTENZA (non serve GE)

Svantaggi: • costo enorme

Alimentazione d'emergenza	ALIMENTAZ. SICUREZZA (salute) ALIMENTAZ. DI RISERVA (problema economico)	③ Interruzione dell'energia elettrica
Classificazione zone ↓ costruzioni adatte NB. E' inneschi elettrici meccanici, ...		④ Innesco in atmosfere esplosive (ATEX) Ogni volta che si interrompe una corrente si crea una scintilla (piu' o meno grande, a seconda della corrente che passa) se l'atmosfera e' esplosiva si puo' essere un'esplosione. Luoghi in cui sono presenti o e' possibile che siano presenti atmosfere esplosive gli impianti elettrici devono essere dotati di componenti speciali per non produrre l'innesco. Impianti antidegradanti // -> rispettano le normative ATEX a sicurezza Sistemi di segnalazione e controllo che vivono a contatto con l'atmosfera esplosiva SEMPRE PRESENTE (serbatoio con gas) Oppure luoghi in cui puo' essere presente atmosfera esplosiva (centrale termica con caldaia a gas) -> rottura di una barriera MTRF ↓ tempo medio tra 2 guasti servono piu' barriere: il singolo guasto non puo' mai mettere a rischio l'intero impianto

1^a CLASSIFICAZIONE DEI LUOGHI

Porta ad identificare certe zone aventi una certa dimensione e una certa forma nell'intorno della sorgente di emissione, alle quali io assegno una classificazione del tipo

- ZONA 0 20 zona in cui l'atmosfera esplosiva e' presente con continuita'

GLI IMPIANTI ELETTRICI

Gli impianti elettrici si suddividono in 3 tipologie fondamentali

■ PRODUZIONE (GENERAZIONE) ENERGIA ELETTRICA

Si produce energia elettrica a partire da un'altra forma di energia (centrali idroelettriche / termoelettriche)

■ TRASMISSIONE ENERGIA ELETTRICA

L'energia elettrica non viene quasi mai prodotta dove serve: si trasferisce E_{el} dai nodi di produzione ai nodi di carico

■ DISTRIBUZIONE ENERGIA ELETTRICA

Consegna energia elettrica alle singole utenze

PRODUZIONE

In Italia la produzione di Energia elettrica è:

- 77,2% energia termoelettrica
prodotta bruciando combustibili (gas, olio combustibile, carbone)
- 17,8% energia idroelettrica
Acqua da invasi, bacini artificiali e fiumi
- 1,7% energia geotermoelettrica
usiamo il riscaldamento naturale dell'acqua
- 2,7% energia eolica
- 0,6% fotovoltaico

Quello che produciamo copre l'85% del fabbisogno, il resto lo compriamo dall'estero: Francia, Svizzera, Slovenia

Energia termoelettrica nucleare Energia idroelettrica

CENTRALE IDROELETTRICA

Diga che sbarrata il bacino, l'acqua viene fatta cadere in condotte forzate quasi verticali (interne o esterne alla montagna) → l'acqua con una certa energia potenziale (E_{pot}), scendendo nella condotta forzata acquista velocità e quindi cinetica: viene utilizzata per far girare la turbina idraulica.

Meno costoso più efficiente e pulito. da fonte e rinnovabile.

N'emissione di energia elettrica e' nulla.

Costruzioni che hanno bisogno di poca manutenzione

Non c'è però più spazio per fare altri bacini. Ora si recuperano le piccole stazioni di produzione che erano state abbandonate a inizio secolo perché poco economiche

GEOTERMICO

Antichissimo. fine dell'avvento dell'energia elettrica (1800)

I flussi di vapore venivano usati per far girare un albero a cui erano collegate cinghie di cuoio che distribuivano energia meccanica nei dintorni. Poi utilizzati per energia elettrica. Ottimizzato il rendimento pompando dell'acqua nel sottosuolo (non solo sfruttando passivamente il contatto H_2O -roccia calda)

EOLICO

Grossi vantaggi, non richiede manutenzione.

Grosso difetto in Italia: impatto sul territorio

1 soluzione (Spagna): off shore (alcune miglia dalla costa)

in zone distaccate: non ci sono ostacoli e quindi il vento è più costante, non sono di impatto ambientale

Impura però costi maggiori di produzione e maggior manutenzione (l'ambiente marino è più aggressivo)

FOTOVOLTAICO

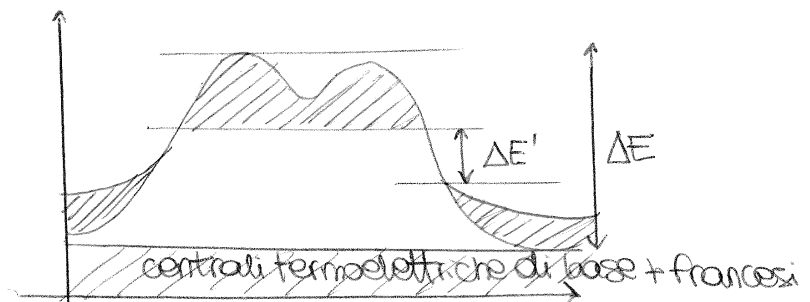
Energia che arriva: 1300 W/m^2 (dal sole)

Con un sistema molto efficiente riusciremmo ad incanalare tutti. E' già tanto incanalare il 20-30%

Richiede molto spazio.

Soddisfare la richiesta

ΔE / più è difficile da gestire



si usano centrali di pompaggio } centrali idroelettriche per ridurre ΔE

Impianti di trasmissione dell'energia elettrica

Esistono tre tipi di tensione

- bassa tensione
- media tensione
- alta tensione

d'energia elettrica e' generalmente prodotta dalle centrali: centrali idroelettriche in montagna, termoelettriche negli anni '50 '60 fatte nei posti in riva al mare per poter rifornirsi di olio combustibile tramite petroliere.

(G) ← Generazione

da potenza e' tensione per corrente, per trasferire potenza, la stessa medesima posso avere corrente piu' elevata e tensione piu' bassa o viceversa. d'energia elettrica e' trasferita tramite conduttori → metalli con resistenza R effetto joule dipende dalla corrente al quadrato

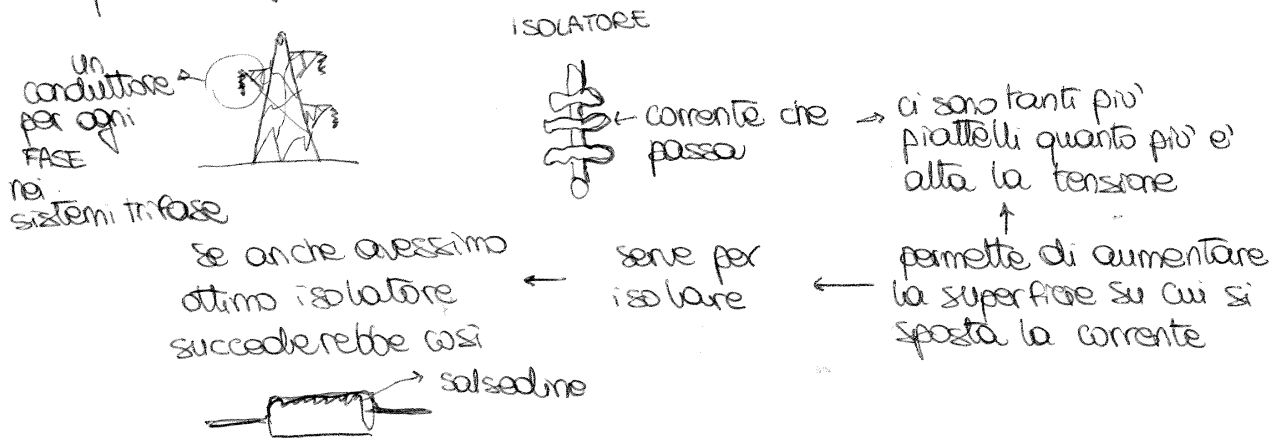
↳ scalda il conduttore, si perde energia

IMPIANTI DI TRASMISSIONE

Conviene trasportare energia ad ALTA TENSIONE

Problemi:

• Piu' alta la tensione piu' i conduttori devono essere rialzati da terra e quindi vengono ad essere ad impatto ambientale sempre piu' elevato



■ Campo elettrico $E \approx \frac{U}{d}$ ← tensione / ← distanza tra due punti in tensione

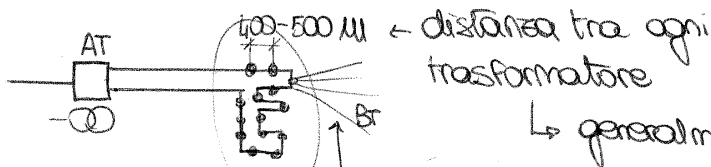
Gi sara' un campo elettrico tra i poli e la terra



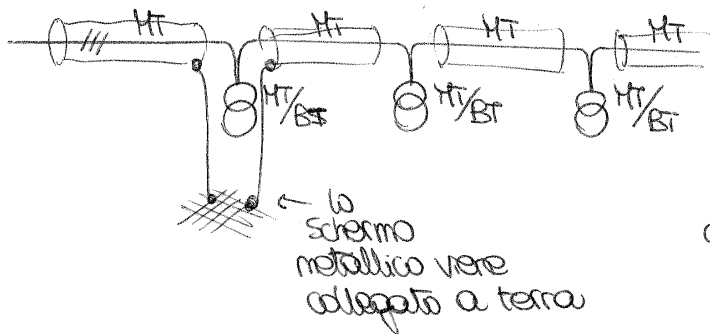
Nelle città l'energia arriva nelle stazioni di trasformazione dette CABINE PRIMARIE dove i trasformatori cambiano l'alta tensione in media tensione.

Dalla cabina primaria partono linee a media tensione in parte in linea aerea e in parte in cavo.

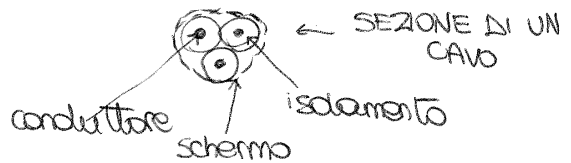
In città avremo linee in cavo → avremo degli anelli lungo i quali ci saranno trasformatori che da media tensione fanno passare a bassa tensione.



↳ generalmente le cabine sono sotterranee
Dalle cabine partono cavi in bassa tensione che alimentano le varie utenze



Il cavo di media tensione è un cavo schermato



→ la distribuzione si fa in parte in media tensione e in parte in bassa tensione
la trasmissione si fa in alta tensione

Perché si passa non direttamente da alta tensione a bassa tensione?
Ci sarebbe troppa dispersione di potenza perché la parte di rete in media tensione dovrebbe essere percorsa in bassa tensione

||| Bisogna arrivare il più vicino possibile all'utente con la tensione più alta possibile.

↓ la bassa tensione deve essere lunga al massimo di qualche centinaio di metri

Se si prende una spira e la si immerge in un campo magnetico si produce una forza elettromotrice proporzionale al flusso del campo magnetico concatenato in variazione col tempo

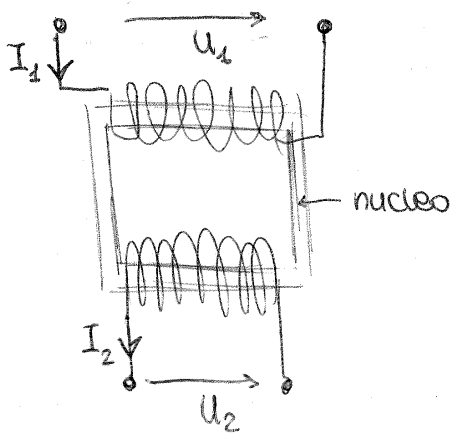
$$u = - \frac{d\phi_B}{dt}$$



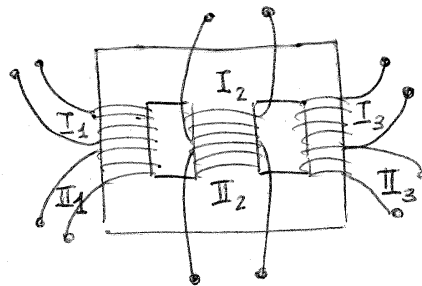
Piu' spire mette nell'avvolgimento secondario piu' tensione ho

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

N_2 = numero di spire secondario
 N_1 = numero di spire primario

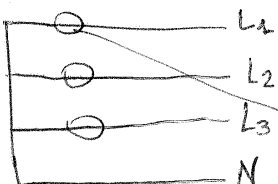


Si puo' realizzare un trasformatore trifase usando 3 trasformatori monofase
 Se no un trasformatore trifase e' fatto cosi

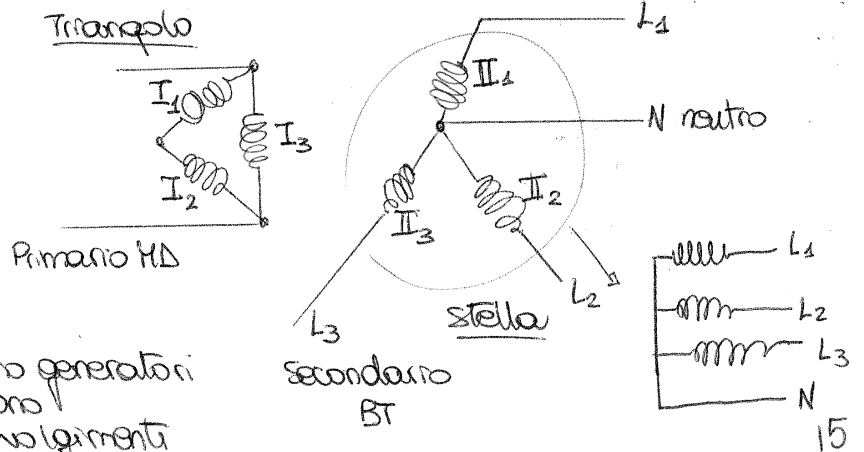


6 avvolgimenti collegati a triangolo o a stella

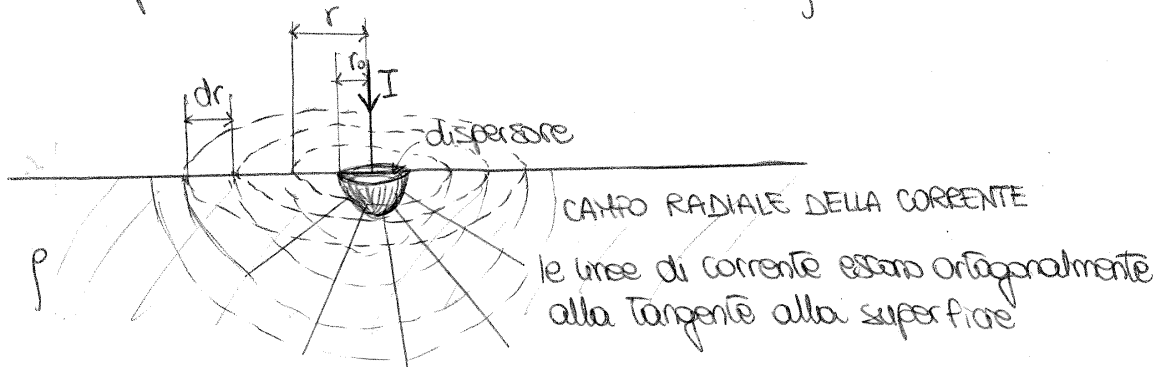
Noi ci occuperemo della bassa tensione per cui la nostra alimentazione sara' il secondario del trasformatore trifase



Non sono generatori ma sono gli avvolgimenti



Ipotesiamo però che il terreno abbia resistività ρ media



Vogliamo calcolare la resistenza di terra cioè la resistenza del terreno dal punto in cui la corrente lascia il dispersore e arriva in un punto infinitamente lontano.

Dividiamo in infinite straterelli circolari il terreno (come una cipolla)

Immaginiamo che il raggio del dispersore sia r_0

Tra uno strato e l'altro c'è una distanza dr

Il raggio del primo strato è r

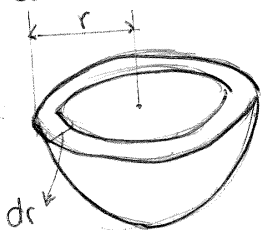
Elementi messi uno dopo l'altro sono in serie

$dR \rightarrow$ contributo del mio ennesimo straterello

$$R_E = \sum_{i=1}^n dR$$

↑ resistenza equivalente ↑ sommatoria di cose infinitesime è un integrale

Consideriamo uno straterello \rightarrow calcoliamo dR per questo strato



$$dR = \rho \frac{\text{lunghezza percorso}}{\text{superficie}} = \rho \frac{dr}{2\pi r^2}$$

↳ che è funzione di r ↳ superficie emisferica

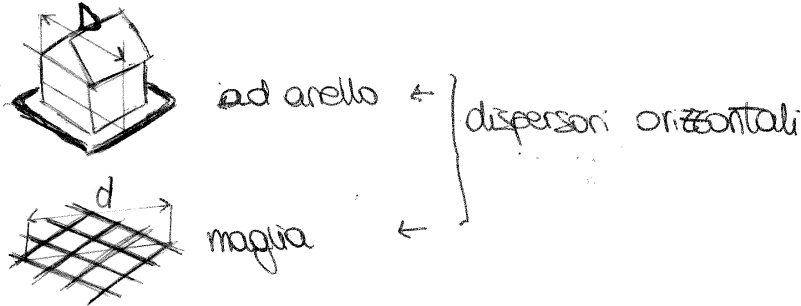
perché quando ci si allontana gli strati sono sempre più grandi

$$R_E = \int_{r_0}^{\infty} dR = \frac{\rho}{2\pi} \int_{r_0}^{\infty} \frac{1}{r^2} dr = \frac{\rho}{2\pi} \left[-\frac{1}{r} \right]_{r_0}^{\infty} = \frac{\rho}{2\pi r_0}$$

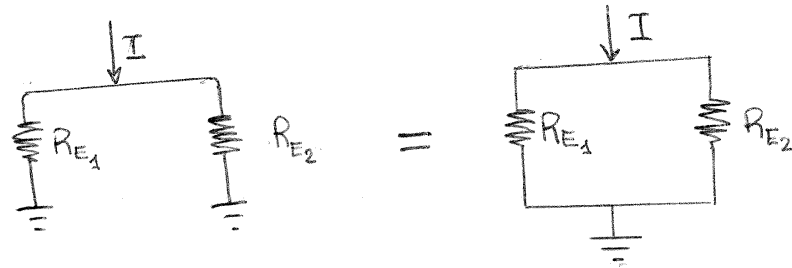
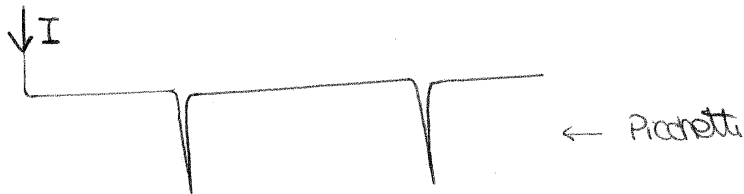
$$\rightarrow \boxed{R_E = \frac{\rho}{2\pi r_0}} \quad \text{RESISTENZA DI TERRA}$$

- Non esistono però emisferi come dispersori
 Generalmente avremo dispersori ad anello o dispersori a maglia

e ↑ ↓ picchetto ← dispersore verticale $R_E \cong \frac{\rho}{l}$



Se si avessero più picchetti collegati tra loro

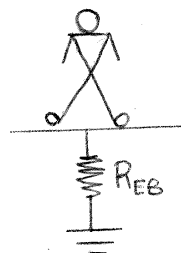


Se le resistenze R_{E1} e R_{E2} sono uguali, la resistenza totale è la metà
 ← le resistenze sono in parallelo

- Se prendo un picchetto, lo intorro per solo 50 cm, quanto è la resistenza di terra?

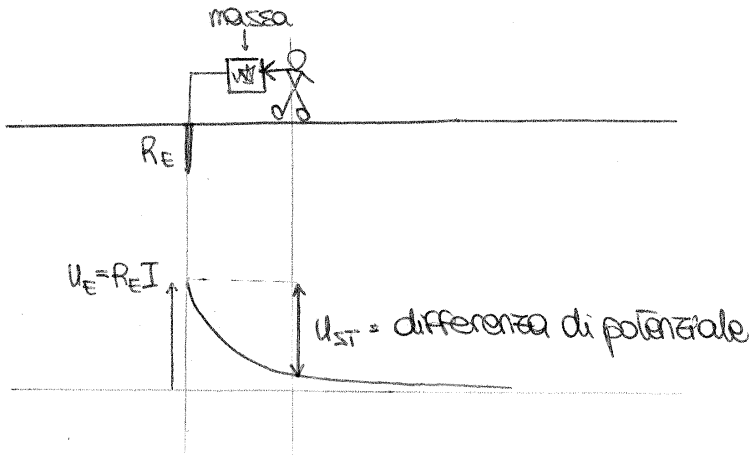
Devo considerare sempre solo la lunghezza interrata.

- R_{EB} = resistenza di terra del corpo
 EARTH ← BODY



⇒ le persone sono dei dispersori ambulanti

$R_{EB} \neq R_B$
 ↳ resistenza del corpo (interna)



U_{ST} = tensione di contatto a vuoto

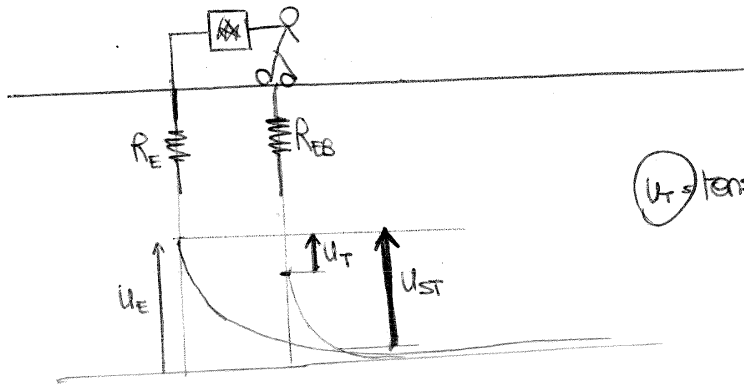
$U_{ST} \leq U_E$

→ Go' che fa' transitare la corrente nel corpo umano e' la differenza di potenziale tra i piedi e le mani

U_{ST} e' la tensione a cui e' soggetto l'omo che tocca la massa (pochi secondi prima)

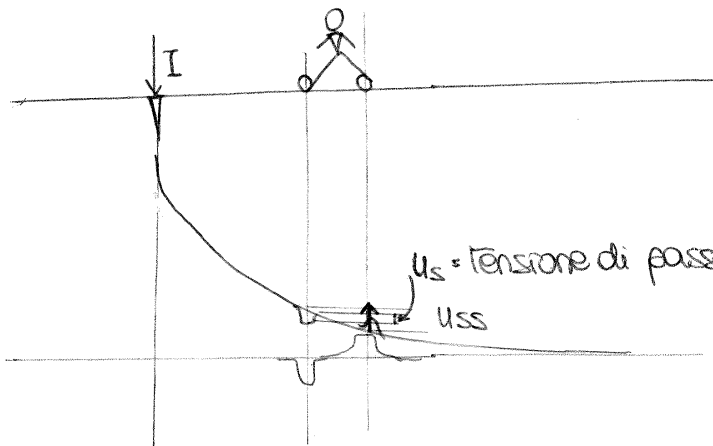
Quando in effetti tocca la massa succede:

- l'uomo e' un dispersore ambulante → la corrente gli passa attraverso e scarica a terra



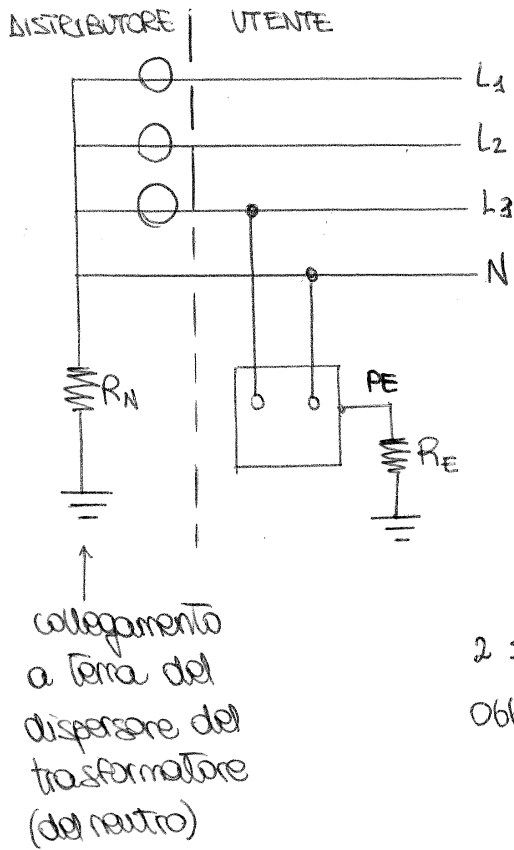
U_T = tensione di contatto

se l'uomo sta camminando in una zona a potenziale con gradiente elevato



U_S = tensione di passo a vuoto

↑
si verifica solo nei sistemi ad alta tensione



BASSA TENSIONE

Il centro stella del neutro del trasformatore sta nella cabina e ha un impianto di terra de masse invece stanno a casa e so hanno un loro impianto di terra

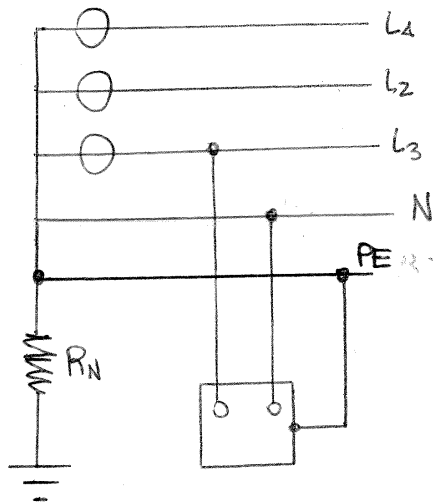


Conduttore di protezione = protective earthing
e' colorato giallo verde

2 sistemi di messa a terra distinti
Obbligatorio per la bassa tensione



Utente con cabina propria → ci fa' un dispersore dentro
MEDIA TENSIONE



TN-S

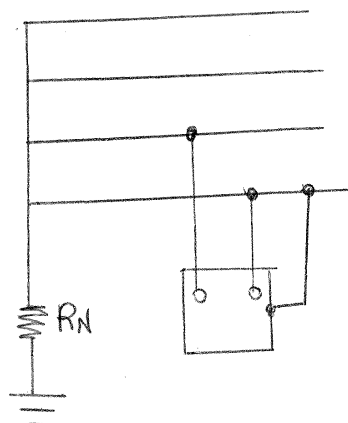
↑
separati
PE e Neutro

la massa e' collegata al centro stella e quindi al neutro

1° lettera collegamento del centro stella del secondario del trasformatore

2° lettera stato delle masse nell'impianto utilizzatore

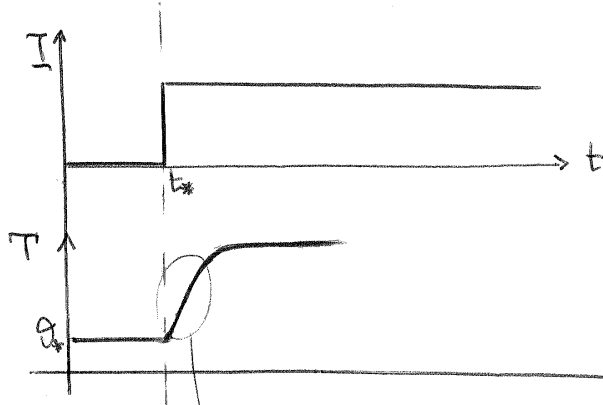
Puo' anche fare



TN-C

↑
combined

T = terra
N = neutro



All'istante t_* il cavo viene attraversato da una corrente

la temperatura sale non appena abbiamo il passaggio della corrente

la temperatura del cavo sale molto perché inizialmente non c'è differenza di temperatura tra cavo e esterno quindi il calore rimane nel cavo e non viene trasmesso.

Con il passare del tempo il gradiente di temperatura aumenta tanto da arrivare ad una stabilizzazione tra il calore del conduttore e quello ceduto all'esterno

l'effetto Joule dipende da:

- corrente
- tipo di conduttore (Al raggiungerà temperatura più elevata di Cu)
- h, coefficiente di trasmissione → dipende dalle condizioni di posa

★ Isolante:

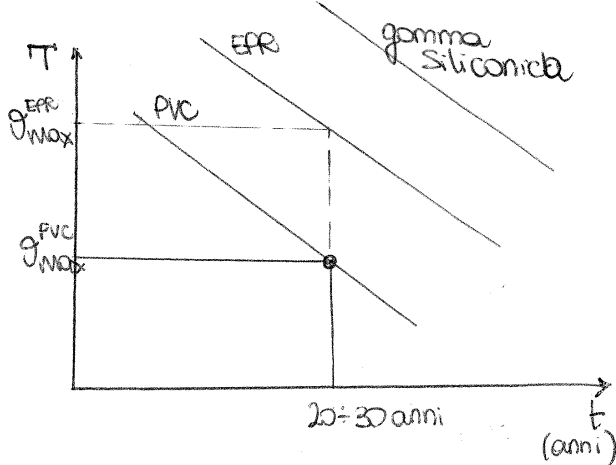
il cavo si scalda di più se è posto in un ambiente dove non può trasmettere calore

qual è la massima temperatura che possiamo applicare all'isolante? fino a che l'isolante non perde le sue caratteristiche meccaniche e dielettriche?

No ancora prima.

Tutti i polimeri sono soggetti ad invecchiamento naturale, accelerato anche dalla temperatura che deve sostenere.

Devo guardare la curva di invecchiamento degli isolanti e scegliere una

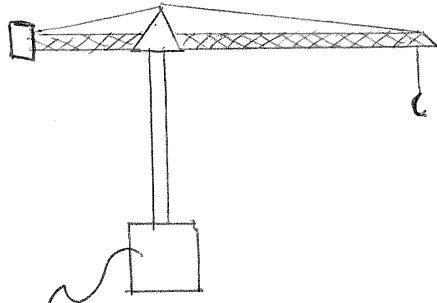


temperatura a seconda di quanto tempo vogliamo che viva l'impianto (20-30 anni)

Ci sono differenze enormi tra gli invecchiamenti degli isolanti

$$I_{max}^{EPR} > I_{max}^{PVC}$$

de temperature e quindi la corrente che passa nell'impianto dipendono quindi anche dal tipo di isolante usato.



che cavo dobbiamo mettere per alimentare la gru?

$P_n = 14 \text{ kW}$ ← potenza attiva

$\cos \varphi = 0,85$

$U_n = 400 \text{ V}$ ← tensione nominale in trifase
tensione massima

Potenza apparente del trifase: $S = 3 U_o I = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} U_o I_o = \sqrt{3} U_n I_o$
 corrente che passa in un conduttore
 tensione ai capi del generatore

$P = S \cos \varphi$

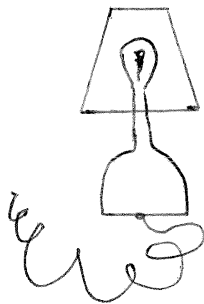
$Q = S \sin \varphi$

$P = \sqrt{3} U_n I \cos \varphi = 14$

le correnti in un sistema trifase hanno stesso modulo e sono sfasate tra loro di 120°

$I = \frac{P}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi} = \frac{14 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 400 \cos 0,85} = 20 \text{ A}$

↓
corrente che

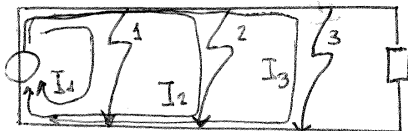


$P_n = 25 \text{ W}$

$\cos \varphi = 1$

$U_o = 230$

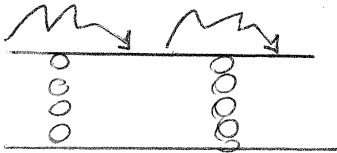
$P = U_n I \quad I = \frac{25}{230} = 0,11 \text{ A}$



la corrente del corto circuito decresce man mano che ci allontaniamo dal generatore

Allontanandosi dal generatore la impedenza dei cavi assume la prevalenza rispetto all'impedenza del generatore.

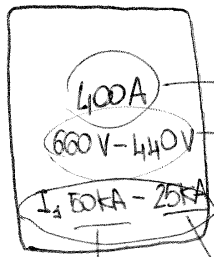
Fusibili



Fusibile → più archi fanno sì che il tutto si raffreddi prima

la tensione si concentra ai capi dell'arco

la tensione in arco da solo è più bassa che in più archi



I_n corrente nominale

U_n tensione nominale

potere di interruzione = massima corrente di cortocircuito che il fusibile è in grado di avere

alternata continua

È sempre più facile interrompere una corrente alternata piuttosto che una continua.

Il minimo di una corrente alternata è zero quindi vuol dire che periodicamente la corrente in quel momento non passa.

I fusibili generalmente interrompono la corrente sullo zero naturale.

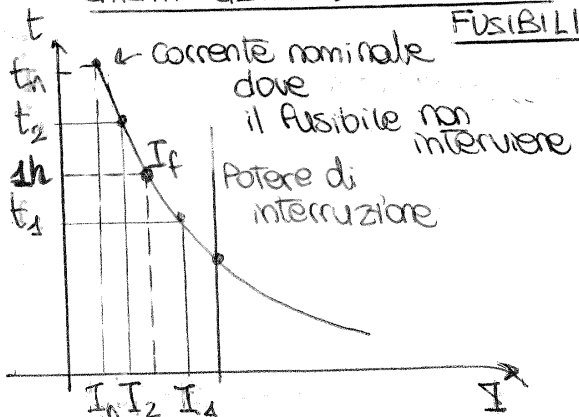
È più difficile interrompere una corrente sfasata rispetto alla tensione, perché se quando la corrente è zero anche la tensione è zero è più difficile ripristinare l'arco, se invece c'è tensione mentre corrente è zero la tensione tende a ripristinare l'arco più facilmente.



corrente nominale → sopporta, lascia passare corrente fino a 6 ampere

Quando interviene il fusibile allora?

CARATTERISTICA DI INTERVENTO curva corrente-tempo



se $I_1 > I_2 \rightarrow t_1 < t_2$

più c'è corrente più velocemente il fusibile agisce

I_f corrente di sicuro funzionamento entro un tempo stabilito di un'ora

Interruttori modulari

sono piccoli, veloci e possono essere assemblati tra loro però in



quanto piccoli non possono intervenire per correnti troppo alte

↳ si ricorre allora ad interruttori scatoleari

CARATTERISTICA DI INTERVENTO INTERRUPTORI MAGNETOTERMICI

