

Rifasamento di carichi industriali

Mauro Forti

April 18, 2020

- La potenza attiva fornita ad un carico vale

$$P = VI \cos \varphi_z = VI \cos(\varphi_v - \varphi_i) \quad W$$

- supponiamo che sia una linea fase-neutro che trasporta potenza al carico; in questo caso la tensione V è fissa. Si nota che, a parità di corrente I , e cioè a parità di potenza apparente $A = VI$, la potenza attiva dipende in modo sostanziale da

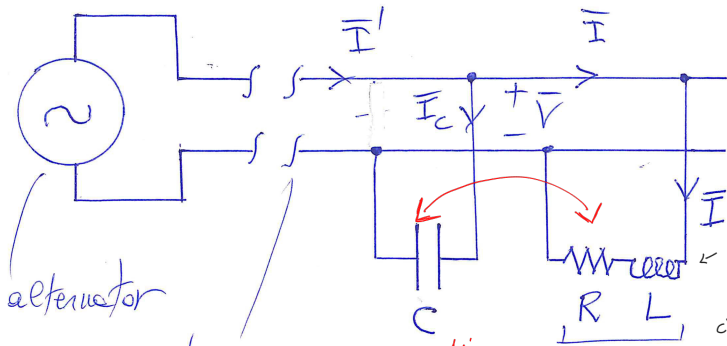
$$\cos \varphi_z = \cos(\varphi_v - \varphi_i)$$

che è chiamato *fattore di potenza* (fp) del carico e che assume valori $\text{fp} \in [0, 1]$ per un carico passivo

- si dice che il fattore di potenza è in ritardo se la corrente è in ritardo rispetto alla tensione e cioè il carico è di tipo ohmico-induttivo; si dice che il fattore di potenza è in anticipo se la corrente è in anticipo sulla tensione e cioè il carico è di tipo ohmico-capacitivo

emotori

- la rete elettrica e' concepita e progettata per trasportare potenza attiva ai carichi; ci sono pero' degli utilizzatori (tipicamente i motori) che necessitano di potenza reattiva per funzionare correttamente. I motori hanno un fattore di potenza in ritardo e determinano una diminuzione del fattore di potenza di una linea; cio' comporta una serie di problemi pratici che discuteremo
- quando il fattore di potenza e' troppo basso (diciamo < 0.5), e' conveniente migliorarlo con l'inserzione di carichi capacitivi (sappiamo che si comportano da sorgenti di potenza reattiva, come discusso in precedenza) *a livello industriale la potenza reattiva costa*
- discutiamo meglio quanto detto; consideriamo lo schema in figura dove un alternatore eroga potenza a un motore (un carico ohmico induttivo) con impedenza $\bar{Z}_L = Ze^{j\varphi_z}$ per mezzo di una lunga linea di potenza a tensione $\bar{V}$. Il diagramma fasoriale rappresenta $\bar{V}$ (supponiamo $\varphi_v = 0$), la corrente di carico ($\bar{I}$) e la componente attiva ($\bar{I}_a$) e reattiva ($\bar{I}_r$) della corrente $\bar{I}$. Il motore ha un fattore di potenza in ritardo dato da $\cos \varphi_z < 1$



alternator

transmission-distribution line
linea trasmissione distributrice

C di rifasamento, di correzione

motore, carico attivo industriale
c'è anche potenza reattiva
potenzia, quella ultimata, da potenziale o meccanica

Se non ci fosse corrente reattiva

$\bar{I}_a$

$\bar{V}$

$-\varphi_z$

Corrente reattiva
(qui domina, φ_z ampio)

$\bar{I}$

valore eff. corrente di linea

e della corrente perso considerare componente in fase e quadratura

Correggo

$\bar{I}_c$

$\bar{I}_a$

$\bar{V}$

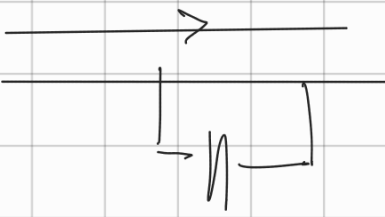
$-\varphi_z$

$\bar{I}$

$$\bar{I}_c = -\bar{I}_r$$

;

$$\Rightarrow \bar{I}' = \bar{I} + \bar{I} + \bar{I}_c = \bar{I}_a$$



giude sulla linea per solo

$$\bar{I}' = \bar{I}_a$$

La potenza attiva non cambia, ma la corrente

prima del disfasamento

$$\bar{I} = \sqrt{\bar{I}_a^2 + \bar{I}_r^2}$$

$$\bar{I}' = \bar{I}_a < \bar{I}$$

vantaggi

si abbassa la corrente di linea (la linea ha una piccola resistenza di linea)

R linea $\bar{I}^2 \Rightarrow$ pot dissipata in eff. Joule sulla linea

Se non ci fosse il C corr. L'anelle anche un
 scambio di energetico a media nulla, la corrente
 cresce e aumenta la pot. apparente
 l'alleggerimento es. tra alternatore e motore.

Con C corr. c'è un alleggerimento locale tra
 L e C

Come si costruisce?

$Q_L = -Q_L$ usando Boucherot
 P. attivo

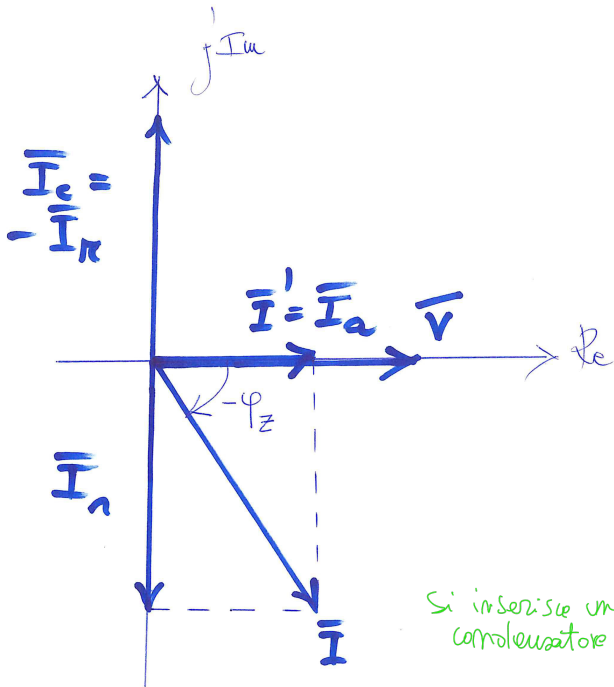
$\omega C_{corr} V^2 = Q_L = P \tan \varphi_z$

o si conosce Q_L
 o argomento ipotesi
 di carico

$C_{corr} = \frac{P \tan \varphi_z}{\omega V^2}$ Formula per rifasamento
 (perfetto)

Si conos. $\cos \varphi$, rifasamento parziale, sforzi V e I di 10°

$C_{corr} = \frac{P \tan \varphi_z - P_{corico} \tan \varphi_{corr}}{\omega V^2}$ F



Si inserisce un
condensatore o molo

- sappiamo che solo la componente $\bar{I}_a$ **trasporta potenza attiva al carico**. Cio' corrisponde alla potenza che da elettrica viene trasformata in potenza meccanica dal motore. Al contrario, $\bar{I}_r$ non trasporta potenza attiva ed e' invece legata a uno **scambio reversibile di energia a media nulla su un periodo fra alternatore e campo magnetico del motore**; tale scambio coinvolge l'intera linea di distribuzione
- supponiamo di inserire in derivazione, vicino al motore, un condensatore da rifasamento e indichiamo con $\bar{I}_C$ la corrente del condensatore. Sia inoltre $\bar{I}' = \bar{I}_C + \bar{I}$ la corrente di linea a monte del condensatore. Scegliendo C in modo che

$$\bar{I}_C = -\bar{I}_r$$

si ha

$$\bar{I}' = \bar{I}_a$$

- così facendo non cambia la potenza attiva che viene fornita al motore; però, la corrente sulla linea a monte del condensatore è diminuita dato che

$$I' = I_a < I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$$

- correnti di linea più basse sono ovviamente desiderabili, dato che è possibile usare conduttori di linea di minor sezione per trasportarle; inoltre, se la linea ha una resistenza R_{linea} , il rifasamento garantisce che le perdite si riducano da $R_{\text{linea}} I^2$ a $R_{\text{linea}} (I')^2$
- da un punto di vista fisico, la potenza reattiva necessaria per creare il campo magnetico del motore viene fornita dal condensatore (che sappiamo essere una sorgente di potenza reattiva magnetizzante); l'alternatore e la linea sono invece disimpegnati dal generare e trasportare potenza reattiva; la linea non è più coinvolta dallo scambio reversibile di energia

- il condensatore necessario per il rifasamento puo' essere ottenuto tramite il teorema di Boucherot imponendo

$$Q_C = -\omega CV^2 = -Q_{\text{carico}}$$

e quindi

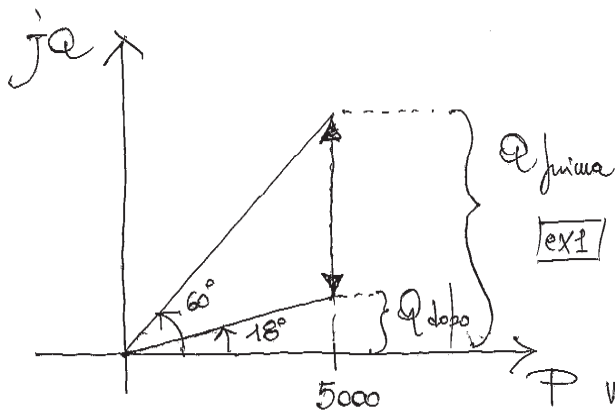
$$C = C_{\text{corr}} = \frac{Q_{\text{carico}}}{\omega V^2} = \frac{P_{\text{carico}} \tan \varphi_z}{\omega V^2} \quad F$$

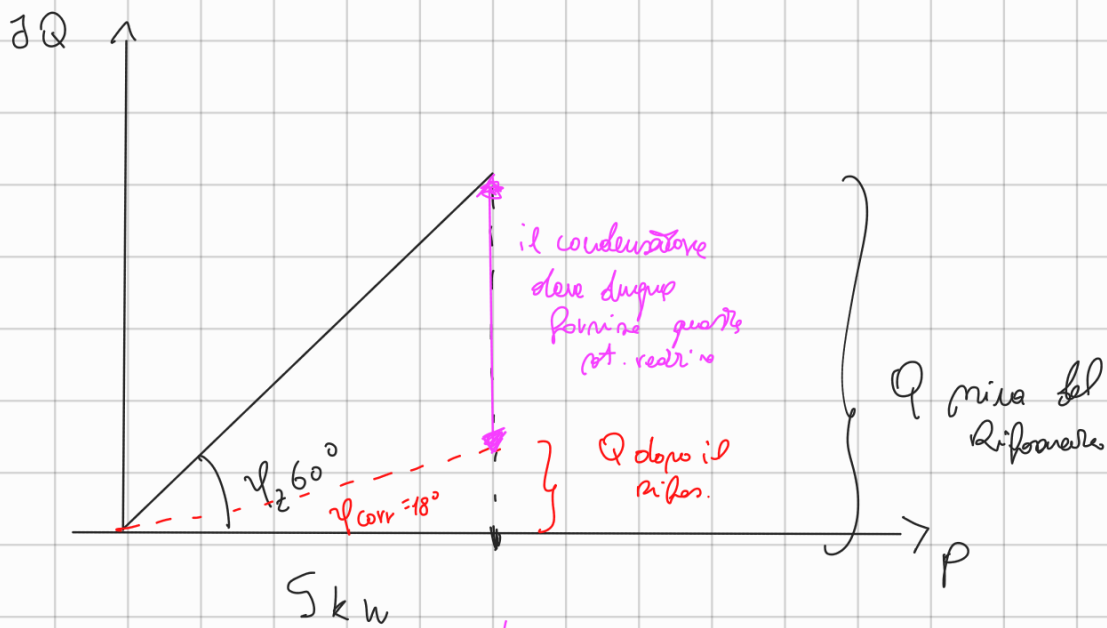
- cio' corrisponde ad un rifasamento perfetto, dato che con l'inserzione del condensatore il carico dato da motore e condensatore ha un fattore di potenza massimo pari a 1
- in pratica, sono accettabili valori del fattore di potenza leggermente minori di 1, per esempio, $\cos \varphi_{\text{corr}} = 0.95$. In questo caso (rifasamento parziale) il condensatore e' scelto con la formula

$$C = C_{\text{corr}} = \frac{P_{\text{carico}} \tan \varphi_z - P_{\text{carico}} \tan \varphi_{\text{corr}}}{\omega V^2} \quad F.$$

Esempio. Un motore di potenza 5 kW ha un fattore di potenza 0.5 (in ritardo). Inserire un C da rifasamento che elevi il fattore di potenza a 0.95 (in ritardo). Si ha $\omega = 314$ rad/sec e $V = 160$ V efficaci.

- Da un punto di vista delle potenze, la situazione e' rappresentata in figura





$$|Q_c| = \omega C_{corr} V^2 = P \tan \varphi_2 - P \tan \varphi_{corr}$$

$$C_{corr} = \frac{5000 (\tan 60^\circ - \tan 18^\circ)}{\underbrace{2\pi \times 50 \times 160^2}_{314 \text{ Vool/sec.}}} = 873 \times 10^{-6} \text{ F} = 873 \mu\text{F}$$

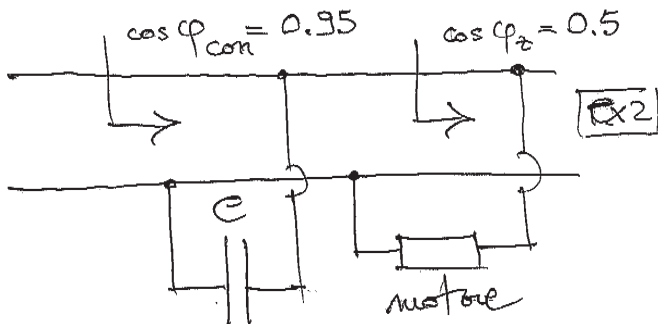
- si ha

$$C = C_{\text{corr}} = \frac{P_{\text{carico}} \tan \varphi_z - P_{\text{carico}} \tan \varphi_{\text{corr}}}{\omega V^2}$$

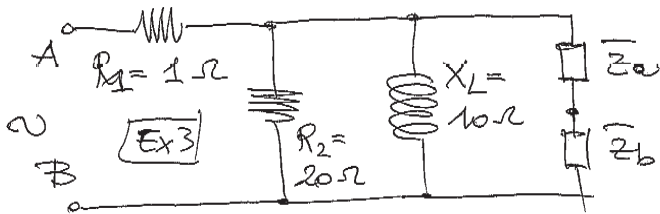
dove $\varphi_z = \arccos(0.5) = 60^\circ$ e $\varphi_{\text{corr}} = \arccos(0.95) = 18^\circ$. Quindi

$$C = \frac{5000(1.732 - 0.329)}{314 \cdot 160^2} = 873 \mu\text{F}$$

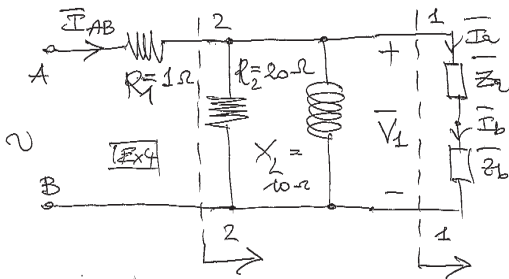
- dal punto di vista della linea la situazione e' sintetizzata in figura.



Esempio. Il bipolo AB è in regime sinusoidale alla frequenza di 50 Hz. L'impedenza $\bar{Z}_a$ assorbe 1500 W con fattore di potenza 0.7 induttivo ed è soggetta a 100 Veff. L'impedenza $\bar{Z}_b$ ha un fattore di potenza 0.3 capacitivo ed è soggetta a una tensione di 100 Veff. Determinare potenza attiva, reattiva e fattore di potenza del bipolo AB. Effettuare un rifasamento completo del bipolo.



- Per $\bar{\mathbf{Z}}_a$ si ha $A_a = P_a / \cos \varphi_a = 1500 / 0.7 = 2142$ VA, quindi $I_a = I_b = A_a / V_a = 2142 / 100 = 21.42$ Aeff.
- Allora $A_b = I_b V_b = 21.42 \cdot 100 = 2142$ VA e quindi $P_b = A_b \cos \varphi_b = 643$ W, $Q_b = A_b \sin \varphi_b = -2043$ VAR.



- sezione 11: $P_1 = P_a + P_b = 2143 \text{ W}$; $Q_1 = Q_a + Q_b = -513 \text{ VAR}$, $A_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = 2203 \text{ VA}$, e $V_1 = A_1/I_a = 2203/21.42 = 103 \text{ Veff}$.
- Si ha

$$Q_{X_L} = \frac{V_1^2}{X_L} = 1058 \text{ VAR}; P_{R_2} = \frac{V_1^2}{R_2} = 530 \text{ W}$$

- allora $P_2 = 2673 \text{ W}$; $Q_2 = 545 \text{ VAR}$; $A_2 = 2728 = I_{AB} V_1$ da cui

$$I_{AB} = 26.5 \text{ Aeff}$$

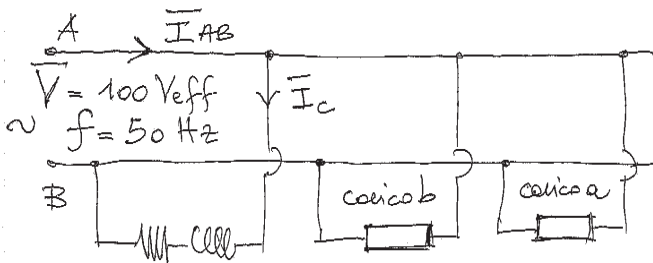
• a questo punto $P_{AB} = 2673 + 26.5^2 = 3374 \text{ W}$; $Q_{AB} = 545 \text{ VAR}$; $A_{AB} = 3418 = V_{AB} \cdot I_{AB}$, quindi $V_{AB} = 129 \text{ Veff}$. Si ottiene

$$\cos \varphi_{AB} = \frac{P_{AB}}{A_{AB}} = 0.987$$

induttivo e

$$C_{\text{corr}} = \frac{Q_{AB}}{\omega V_{AB}^2} = \frac{545}{314 \cdot 129^2} = 104 \text{ } \mu F.$$

Esempio. Il carico a, di potenza apparente pari a 1000 VA, ha un fattore di potenza 0.8 induttivo. Il carico b assorbe una corrente attiva di 5 Aeff e una corrente reattiva induttiva di 5 Aeff. Effettuare un rifasamento che elevi il fattore di potenza del bipolo AB a 0.9 induttivo e valutare la diminuzione di corrente assorbita dal bipolo AB in valore efficace ottenuta con il rifasamento



- si ha $P_a = A_a \cos \varphi_a = 800 \text{ W}$, $Q_a = A_a \sin \varphi_a = 600 \text{ VAR}$;
 $P_b = VI_{\text{att},b} = 100 \cdot 5 = 500 \text{ W}$, $Q_b = VI_{\text{reatt},b} = 100 \cdot 5 = 500 \text{ VAR}$

- inoltre

$$I_c = \frac{V}{Z_c} = \frac{100}{\sqrt{100 + 100}} = 7.07 \text{ Aeff}$$

per cui $P_c = RI_c^2 = 500 \text{ W}$ e $Q_c = X_L I_c^2 = 500 \text{ VAR}$

- per il teorema di Boucherot

$$P_{AB} = P_a + P_b + P_c = 1800 \text{ W}; \quad Q_{AB} = A_a + Q_b + Q_c = 1600 \text{ VAR}$$

- si ha

$$C = \frac{Q_{AB} - P_{AB} \tan \varphi_{\text{corr}}}{\omega V^2} = \frac{728}{314 \times 100^2} = 232 \text{ } \mu\text{F}$$

- valutiamo la corrente del bipolo prima e dopo il rifasamento; si ha

$$A_{AB, \text{prima}} = \sqrt{P_{AB}^2 + Q_{AB}^2} = 2410 = VI_{AB, \text{prima}}$$

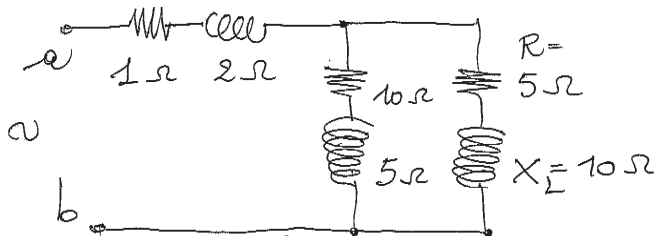
quindi $I_{AB, \text{prima}} = 24.1 \text{ Aeff}$; inoltre

$$A_{AB, \text{dopo}} = \sqrt{P_{AB}^2 + Q_{AB, \text{dopo}}^2} = 2000 = VI_{AB, \text{dopo}}$$

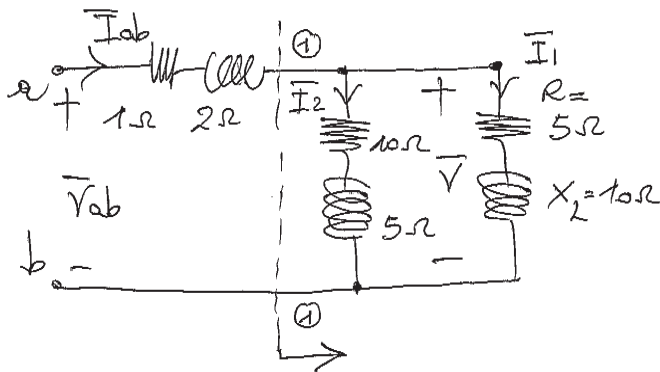
e quindi $I_{AB, \text{dopo}} = 20 \text{ Aeff}$. Infine

$$\Delta I_{AB} = I_{AB, \text{prima}} - I_{AB, \text{dopo}} = 4.1 \text{ Aeff}.$$

Esempio. Il bipolo ab e' in regime permanente sinusoidale alla frequenza di 50 Hz. La reattanza X_L assorbe una potenza reattiva di 2 kVAR. Determinare potenza attiva, reattiva e fattore di potenza del bipolo ab. Effettuare un rifasamento che elevi il fattore di potenza a 0.9 induttivo



- si ha $Q_L = 2000 = X_L I_1^2$, quindi $I_1 = 14.1$ Aeff; inoltre $P_R = R I_1^2 = 1$ kW. Da qui otteniamo $V = I_1 \sqrt{5^2 + 10^2} = 158$ Veff e $I_2 = I_1 = 14.1$ Aeff



- alla sezione 11 abbiamo $P_1 = 3 \text{ kW}$, $Q_1 = 3 \text{ kVAR}$ e $A_1 = 4243 \text{ VA}$, quindi $I_{ab} = A_1/V = 26.85 \text{ Aeff}$
- $P_{ab} = P_1 + 26.85^2 = 3721 \text{ W}$, $Q_{ab} = Q_1 + 2 \cdot 26.85^2 = 4442 \text{ VAR}$, $A_{ab} = 5794 \text{ VA}$ e $\cos \varphi_{ab} = P_{ab}/A_{ab} = 0.642$ induttivo; inoltre $V_{ab} = A_{ab}/I_{ab} = 216 \text{ Veff}$
- infine

$$C_{\text{corr}} = \frac{4442 - 3721 \cdot 0.4843}{314 \cdot 216^2} = 180 \mu\text{F}.$$