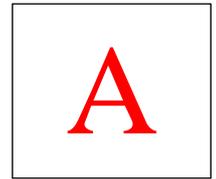


Compito di Applicazioni Industriali Elettriche
 per Ingegneria Meccanica, a.a. 2021-22
08 luglio 2022
VALIDITA' DEL VOTO FINO A TUTTO Settembre 2022

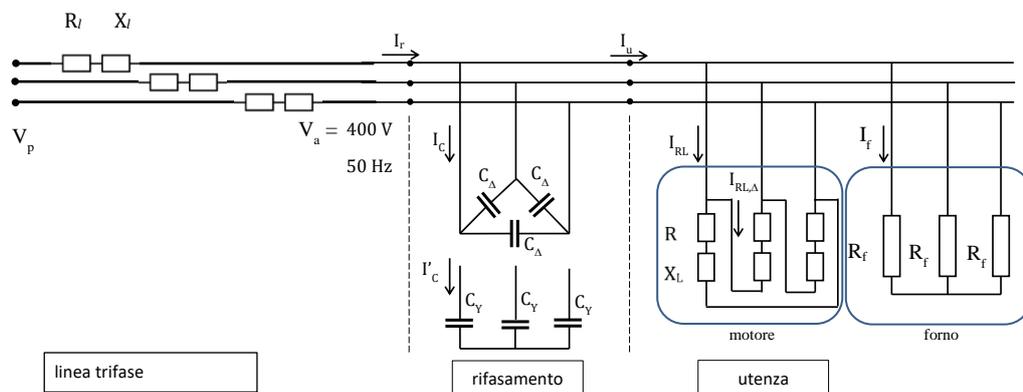


TEMPO A DISPOSIZIONE: 120 minuti. (IL PUNTEGGIO TOTALE DEGLI ESERCIZI, AUMENTATO DI 1, (MAX 27) SI SOMMA (SE PARI ALMENO A 16=SUFFICIENZA) A QUELLO DEL LABORATORIO: MAX 1 PUNTI PER LA DOMANDA, MAX 4 PUNTI PER LA RELAZIONE (Totale max 32 = 30 e lode, 31 = 30).

Traccia della soluzione (i dati sono quelli del compito A, ma il procedimento è uguale per tutti)

ESERCIZIO 1 (max punti 13) – È dato l'impianto elettrico di figura alla frequenza di 50 Hz costituito da: (i) una linea trifase, (ii) un'utenza connessa in fondo alla linea (punto di arrivo), (iii) un banco di condensatori di rifasamento (in parallelo all'utenza). Sono noti i seguenti dati:

- Linea trifase: in rame ($\rho = 0.02 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$), lunghezza $\ell = 500 \text{ m}$, induttanza chilometrica $L_x = 0.75 \text{ mH/km}$, sezione 25 mm^2 .
- Utenza: tensione di esercizio $V_a = 400 \text{ V}$, costituita da due carichi trifase equilibrati aventi i seguenti dati
 - Motore trifase potenza attiva assorbita $P_{\text{ass}} = 14 \text{ kW}$, $\cos\phi = 0.70$ induttivo.
 - Forno elettrico realizzato con tre resistori R_f connessi a stella ciascuno di valore $R_f = 25 \Omega$.
- Banco di condensatori di rifasamento avente potenza reattiva $Q_C = 10 \text{ kVAC}$ a 400 V .

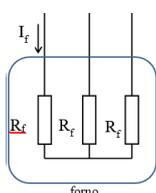


Si chiede di:

- Calcolare i parametri R , X_L dello schema equivalente che rappresenta il motore, assumendo per esso una configurazione a triangolo. (max 3 punti)
- Calcolare la corrente efficace I_u dei conduttori che alimentano l'utenza. (max 3 punti)
- Calcolare le capacità dei condensatori del banco di rifasamento scegliendo per esso, a piacere, una delle due configurazioni mostrate. (max 2 punti)
- Calcolare la tensione V_p in partenza alla linea supponendo di avere la tensione $V_a = 400 \text{ V}$ all'arrivo, con l'utenza specificata e il rifasamento inserito. (max 3 punti)
- Nelle stesse condizioni calcolare le perdite joule in linea. (max 2 punti)

Conviene innanzitutto completare i dati per ciascuno dei carichi.

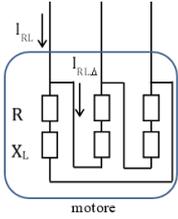
FORNO



È un carico puramente resistivo; non impegna potenza reattiva; $\cos\phi_f = 1$, $\sin\phi_f = 0$. Su ogni R_f (data) cade la tensione $E = V/\sqrt{3} = 230 \text{ V}$.

$$P_f = 3 E^2/R_f; \quad Q_f = 0; \quad S_f = P_f; \quad I_f = E/R_f$$

MOTORE



Carico resistivo-induttivo a triangolo con $\cos\phi_m=0.7$; $\sin\phi_m = +0.714$

$$S_m = P_m / \cos\phi_m; \quad Q_m = S_m \sin\phi_m; \quad I_m = I_{RL} = S_m / (\sqrt{3} V); \quad I_{RL\Delta} = I_{RL} / \sqrt{3}$$

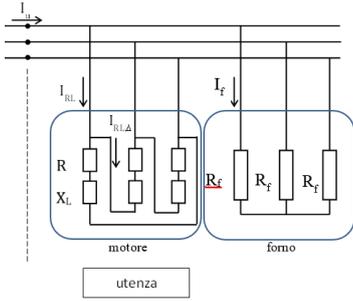
La potenza attiva P_m è assorbita dalle 3 R percorse dalla corrente $I_{RL\Delta}$.

$$P_m = 3 R (I_{RL\Delta})^2 \quad \text{da cui} \quad R = P_m / 3 (I_{RL\Delta})^2$$

La potenza reattiva Q_m è assorbita dalle 3 X_L percorse dalla corrente $I_{RL\Delta}$.

$$Q_m = 3 X_L (I_{RL\Delta})^2 \quad \text{da cui} \quad X_L = Q_m / 3 (I_{RL\Delta})^2$$

UTENZA

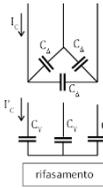


$$P_u = P_m + P_f; \quad Q_u = Q_m + Q_f; \quad S_u = \sqrt{(P_u^2 + Q_u^2)}; \quad \text{NON } S_u = S_m + S_f \text{ !!!!}$$

$$I_u = S_u / (\sqrt{3} V); \quad \text{NON } I_u = I_{RL} + I_f \text{ !!!!}$$

$$\cos\phi_u = P_u / S_u; \quad \sin\phi_u = Q_u / S_u .$$

RIFASAMENTO



E' un carico puramente capacitivo; non impegna potenza attiva $P_C=0$; $\cos\phi_C = 0$, $\sin\phi_C = -1$ (negativo!). Su ogni C_Δ cade la tensione $V=400$ V; su ogni C_Y cade la tensione $E=V/\sqrt{3}=230$ V. Se Q_C è la stessa allora $I_C = I_C'$.

Vale per entrambe le configurazioni $Q_C = \sqrt{3} V I_C \sin\phi_C = -\sqrt{3} V I_C$ [var] (negativa)

Oppure, cambiando unità di misura, $Q_C = \sqrt{3} V I_C$ [VAC] (positiva)

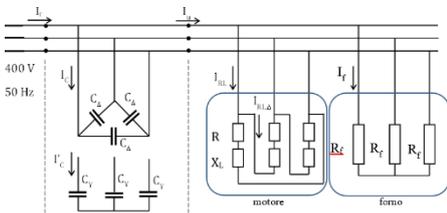
$$S_C = |Q_C| = \sqrt{3} V I_C$$

Da cui $I_C = S_C / (\sqrt{3} V) = Q_C$ [VAC] / $(\sqrt{3} V) = I_C'$.

Per la configurazione a stella: $I_C' = (2\pi f) C_Y E$ da cui C_Y . Oppure Q_C [VAC] = $3 (2\pi f) C_Y E^2$ da cui C_Y .

Per la configurazione a triangolo: $I_{C,\Delta} = I_C / \sqrt{3} = (2\pi f) C_\Delta V$ da cui C_Y . Oppure Q_C [VAC] = $3 (2\pi f) C_\Delta V^2$ da cui C_Δ .

INTERO CARICO VISTO DALLA LINEA (RETE)



$$P_r = P_C + P_u = P_u; \quad Q_{r[\text{var}]} = Q_C[\text{var}] + Q_u[\text{var}] = -Q_C[\text{VAC}] + Q_u[\text{var}];$$

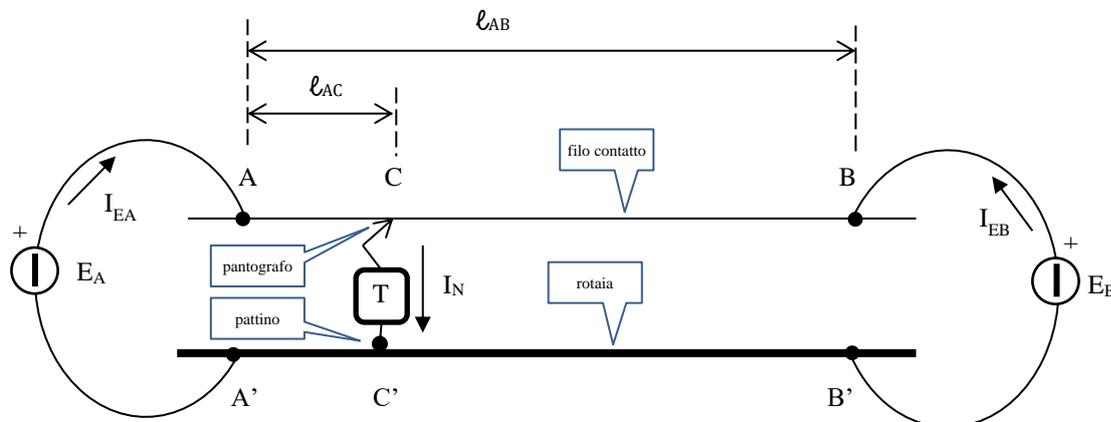
$$S_r = \sqrt{(P_r^2 + Q_r^2)}; \quad \text{NON } S_r = S_C + S_u \text{ !!!!}$$

$$I_r = S_r / (\sqrt{3} V); \quad \text{NON } I_r = I_C + I_u \text{ !!!!}$$

$$\cos\phi_r = P_r / S_r; \quad \sin\phi_r = Q_r / S_r .$$

Infine $V_p - V_a = \Delta V = \sqrt{3} I_r (R_{\text{linea}} \cos\phi_r + X_{\text{linea}} \sin\phi_r)$ da cui V_p .

ESERCIZIO 2 (max punti 13) – Una linea tramviaria come quella di Padova, alimenta i veicoli (tram T) mediante un filo di contatto in rame ($\rho_{Cu} = 0.02 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$) avente sezione $S_{Cu} = 120 \text{ mm}^2$ e una monorotaia in ferro ($\rho_{Fe} = 0.13 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$) avente sezione $S_{Fe} = 2400 \text{ mm}^2$. Sottostazioni elettriche disposte lungo il tracciato applicano alla linea di contatto una tensione continua E rispetto alla rotaia. La figura mostra due sottostazioni, in A e B, e la tratta di linea tramviaria fra di esse della lunghezza $\ell_{AB} = 1200 \text{ m}$. Si supponga presente un solo veicolo T avente tensione nominale $V_N = 750 \text{ V}$ e potenza nominale (elettrica) $P_N = 300 \text{ kW}$, posto nella posizione C la cui distanza da A è $\ell_{AC} = 400 \text{ m}$.

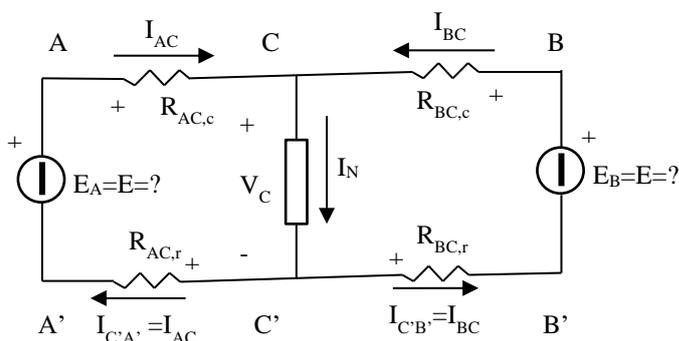


Calcolare:

- La corrente nominale I_N del veicolo tramviario. (max 2 punti)
- Le tensioni $E_A = E_B = E$ imposte dalle sottostazioni fra il filo di contatto e la rotaia nei punti A e B, assumendo che il veicolo nel punto C capti al pantografo la sua tensione nominale V_N e prelevi dal filo di contatto la sua corrente nominale I_N . Trattare le sottostazioni elettriche come generatori ideali di tensione. (max 4 punti)
- Le correnti I_{EA} e I_{EB} erogate dalle due sottostazioni E_A ed E_B rispettivamente, nelle condizioni di cui al punto b). (max 3 punti)
- Le perdite joule sul filo di contatto e sulla rotaia nelle condizioni operative di cui al punto b). (max 2 punti)
- La tensione captata dal pantografo del veicolo quando esso si trova nel punto A. (max 2 punti)
- Ferme restando le tensioni $E_A = E_B = E$ calcolate in b), individuare la posizione del veicolo per la quale si ha la minima tensione al pantografo (minima tensione fra filo di contatto e rotaia), con corrente captata pari ad I_N , e trovare il valore V_{min} di tale tensione minima. (facoltativa)

a) Siamo in corrente continua, quindi $I_N = P_N / V_N$. Si ricorda che i valori nominali (valori di targa) NON sono in generale valori di funzionamento.

b) e c) Lo schema elettrico è (vedi anca traccia soluzione 22 giugno):



$$\text{con } E_A = E_B = E; \quad I_{AC} = I_{EA}; \quad I_{BC} = I_{EB}.$$

$$R_{AC,c} = \rho_{Cu} \ell_{AC} / S_{Cu}; \quad R_{BC,c} = \rho_{Cu} \ell_{BC} / S_{Cu}; \quad R_{AC,r} = \rho_{Fe} \ell_{AC} / S_{Fe}; \quad R_{BC,r} = \rho_{Fe} \ell_{BC} / S_{Fe};$$

Le equazioni del circuito sono:

$$\begin{aligned} I_{AC} + I_{BC} &= I_N && (1^a \text{ K al nodo}) \\ R_{AC,c} I_{AC} + V_C + R_{AC,r} I_{AC} &= E_A = E && (2^a \text{ K maglia di sinistra}) \\ R_{BC,c} I_{BC} + V_C + R_{BC,r} I_{BC} &= E_B = E && (2^a \text{ K maglia di destra}) \end{aligned}$$

che è un sistema di tre equazioni in tre incognite I_{AC} , I_{BC} , E . Risulterà $E > V_N$.

NB:

1. Del bipolo che rappresenta il veicolo non serve trovare lo "schema equivalente" perché è già risolto: il testo dice che è percorso dalla corrente I_N e sottoposto alla tensione V_N .
2. Un attento esame del circuito mostra che le correnti I_{AC} , I_{BC} sono frazioni di I secondo la regola del partitore di corrente (con le resistenze del filo di contatto ed anche con quelle della rotaia; verificare e dimostrare!). Allora $I_{AC} = I R_{BC,c} / (R_{BC,c} + R_{AC,c})$ e poi con la prima e la seconda delle equazioni sopra si calcolano I_{BC} , E .

d) Sono le perdite Joule (RI^2) delle 4 resistenze del circuito, con le rispettive correnti.

e) Quando il veicolo è in A la tensione captata (tensione fra pantografo e rotaia) è pari a $E_A = E > V_N$.

f) La tensione minore al pantografo si ha quando il veicolo è a metà della tratta (equidistante da A e B). Sarà minore di V_N e si ricava dal circuito equivalente sopra disegnato, adeguando i valori delle resistenze. Sarà anche, in quella condizione, $I_{EA} = I_{EB} = I_N / 2$.