

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

**TEMPO A DISPOSIZIONE: 120 minuti.** (IL PUNTEGGIO TOTALE DEGLI ESERCIZI (MAX 26) SI SOMMA (SE PARI ALMENO A 16=SUFFICIENZA) A QUELLO DEL LABORATORIO: MAX 1 PUNTI PER LA DOMANDA, MAX 5 PUNTI PER LA RELAZIONE.

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

**ESERCIZIO 1** (max punti 14) – È dato l'impianto elettrico di figura, alla frequenza  $f=50\text{Hz}$ , costituito da: (i) un trasformatore MT/BT (punto di partenza), (ii) una linea trifase realizzata con tre cavi unipolari, (iii) un carico trifase equilibrato connesso in fondo alla linea (punto di arrivo). Sono fissati i seguenti dati:

- Trasformatore MT/BT – Dotato di tre prese sul secondario trifase così da rendere disponibili le seguenti tensioni al punto di partenza (**tensione di partenza  $V_p$ , efficace, concatenata**): 400 - 410 - 420 V (valori da assumere non influenzati dalle condizioni di carico).
- Linea trifase – in rame  $\rho = 0.02 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ , lunghezza  $\ell = 750 \text{ m}$ , induttanza chilometrica  $L_x=0.6 \text{ mH/km}$ , sezione  $S_{Cu}$  a scelta disponibile fra 10 - 16 - 25  $\text{mm}^2$ .
- Carico trifase equilibrato – tensione nominale  $V_N = 400 \text{ V}$ , potenza attiva nominale  $P_N = 8 \text{ kW}$ ,  $\cos\phi = 0.7$  induttivo.  
Per il carico allora si ha: (non tutti questi dati serviranno)  
 $\sin\phi = 0.714$ ;  $I_N = P_N / (\sqrt{3} V_N \cos\phi)$ ;  $Q_{[var]} = \sqrt{3} V_N I_N \sin\phi = 8.16 \text{ kvar}$ ;  $S = P_N / \cos\phi = \sqrt{3} V_N I_N = 11.42 \text{ KVA}$



- a) Usando la formula di Kapp per il calcolo della caduta di tensione di linea, determinare la minore sezione dei conduttori di linea (fra quelle disponibili) e la presa sul secondario del trasformatore MT/BT (tensione di partenza  $V_p$ ) che garantiscono sul carico una tensione di arrivo  $V_a$  pari alla tensione nominale  $V_N \pm 2\%$ . *Ove serve, svolgere i calcoli con la corrente nominale del carico.*

$$\Delta V = \sqrt{3} I_N (R_l \cos \phi + X_l \sin \phi) \quad \text{caduta di tensione concatenata di Kapp per sistema trifase (Cap21)}$$

$$\Delta V = \sqrt{3} I_N (R_l \cos \phi) + \sqrt{3} I_N (X_l \sin \phi) = \Delta V_R + \Delta V_X$$

$$\Delta V_X = \sqrt{3} I_N (X_l \sin \phi) = \sqrt{3} I_N ((2\pi f L_x \ell_{[km]}) \sin \phi) = \dots \quad \text{Tutto dato; sempre lo stesso valore per qualsiasi scelta di sezione o tensione di partenza.}$$

$$\Delta V_R = \sqrt{3} I_N (R_l \cos \phi) = \sqrt{3} I_N ((\rho \ell / S_{Cu}) \cos \phi) = \dots \quad \text{Tutto dato; So ottiene un valore per ogni } S_{Cu} : \Delta V_{R-10}, \Delta V_{R-16}, \Delta V_{R-25}.$$

$$V_a = V_p - \Delta V = V_p - (\Delta V_R + \Delta V_X) \quad \text{per ogni valore di } V_p \text{ e di } \Delta V_R \text{ si ottiene la conseguente } V_a \text{ che deve soddisfare la condizione } V_a = V_N \pm 2\% = 400 \pm 2\% = 392 \div 408 \text{ V.}$$

Si trova che:

con  $S_{Cu} = 10 \text{ mm}^2$  la condizione non è mai soddisfatta, qualunque sia la scelta di  $V_p$  fra le tre possibili.

con  $S_{Cu} = 16 \text{ mm}^2$  la condizione è soddisfatta (solo) con  $V_p = 420 \text{ V}$ .

con  $S_{Cu} = 25 \text{ mm}^2$  la condizione è soddisfatta sia con  $V_p = 410 \text{ V}$  che con  $V_p = 420 \text{ V}$  (ma non con  $V_p = 400 \text{ V}$ )

La soluzione (sezione minore) è allora  $S_{Cu} = 16 \text{ mm}^2$  con  $V_p = 420 \text{ V}$ .

- b) Con la tensione di partenza e con la sezione dei conduttori scelti in a) (cioè  $V_p = 420 \text{ V}$  e  $S_{Cu} = 16 \text{ mm}^2$ ), valutare la tensione  $V_a$  all'arrivo della linea qualora il carico venisse sconnesso.

Se il carico viene sconnesso la corrente va a zero (linea elettrica a vuoto) e quindi anche la  $\Delta V = 0$ .

$$\text{Allora } V_a = V_p - \Delta V = V_p = 420 \text{ V.}$$

- c) Progettare un banco trifase di condensatori (configurazione del banco e capacità dei condensatori), da installare all'arrivo della linea, per rifasare il carico dato a  $\cos\varphi = 1.0$ . Ove serva, svolgere i calcoli con la tensione nominale del carico.

*Se  $\cos\varphi = 1.0$  (cioè  $\sin\varphi = 0$ ) non ci deve essere potenza reattiva per l'insieme carico + rifasamento e quindi  $Q_{c[VAC]} = Q_{[var]}$ . Si può anche dire:  $Q_{c[VAC]} = -Q_{[var]}$ .*

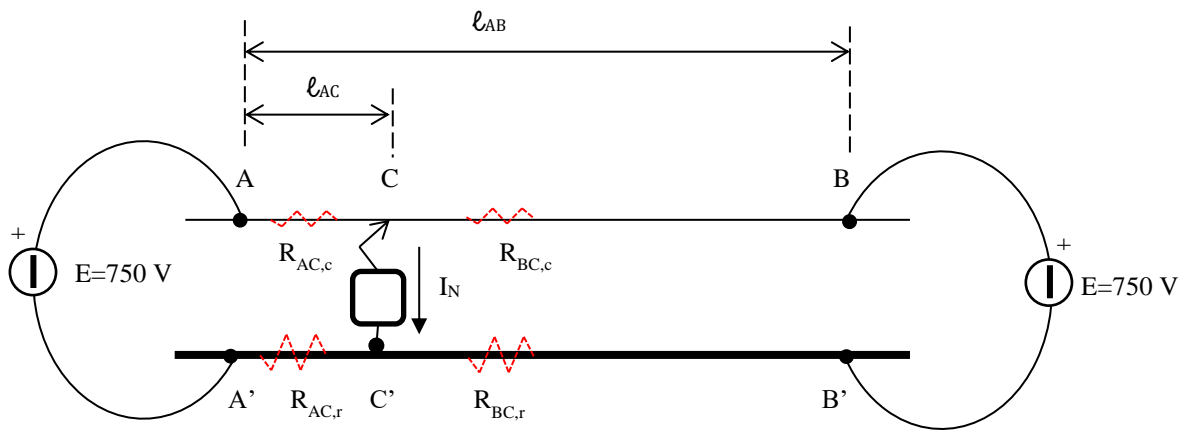
*Assumendo il collegamento a triangolo:  $Q_{c[VAC]} = 3(2\pi f) C_{rif} V_N^2$  da cui si ricava  $C_{rif}$ .*

- d) Usando la formula di Kapp, calcolare la nuova caduta di tensione di linea, con i conduttori scelti in a) e con il rifasamento progettato in c).

*La nuova corrente è  $I' = P_N / (\sqrt{3} V_N \cdot 1)$ ; con  $\sin\varphi = 0$  la nuova  $\Delta V_X$  va a zero. Si ricalcola allora la nuova  $\Delta V_{R-16}$  (sarà uguale a quella di prima! Dimostrare perché!).*

*Allora  $V_a' = V_p - \Delta V_{R-16} = 420 - \Delta V_{R-16}$*

**ESERCIZIO 2** (max punti 12) – Una linea tramviaria come quella di Padova, alimenta i veicoli (tram) 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 di  $E = 750 \text{ V}$  rispetto alla rotaia. La figura mostra due sottostazioni, in A e B, e la tratta di linea tramviaria fra di esse della lunghezza  $\ell_{AB} = 1200 \text{ m}$ .



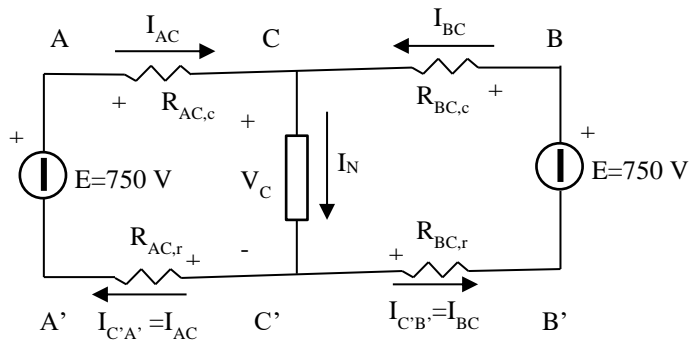
Si supponga presente un solo veicolo avente tensione nominale  $V_N = 750 \text{ V}$  e potenza nominale  $P_N = 300 \text{ kW}$ , nella posizione C la cui distanza da A è  $\ell_{AC} = 400 \text{ m}$ . Calcolare:

- a) La corrente nominale  $I_N$  del veicolo tranviario.

*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) La tensione  $V_C$  fra il filo di contatto e la rotaia nel punto C, assumendo che il veicolo prelevi dal filo di contatto la sua corrente nominale  $I_N$ , calcolata in a). Trattare le sottostazioni elettriche come generatori ideali di tensione.
- c) Le correnti  $I_A$  e  $I_B$  che percorrono il filo di contatto nel tratto AC e nel tratto BC rispettivamente, nelle condizioni di cui al punto b).

*Lo schema elettrico è:*



(Le R sono indicate anche nella fig. preced.)

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

Le equazioni del circuito sono:

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

che è un sistema di tre equazioni in tre incognite  $I_{AC}, I_{BC}, V_C$ .

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  $I_N$  (si potrebbe rappresentarlo (inutilmente) con un generatore ideale di corrente, ma le equazioni non cambierebbero)
2. Il fatto che il veicolo assorba la corrente nominale  $I_N$  non vuole dire che la sua tensione sia  $V_N$ . I valori nominali non sono necessariamente valori operativi, tutti contemporaneamente presenti.
3. 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 residenze 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  $I_{BC}, V_C$ .

d) Le perdite joule sul filo di contatto e sulla rotaia nelle condizioni operative di cui al punto b).

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

e) L'energia erogata dalle due sottostazioni nell'intervallo di tempo di  $\Delta t=150$  s, impiegato dal veicolo per passare da A a B, assumendo che prelevi dal filo di contatto sempre la sua corrente nominale  $I_N$ .

$$E_n = (E_{sinistra} * I_{AC} + E_{destra} * I_{BC}) \Delta t = E * (I_{AC} + I_{BC}) \Delta t = E * I_N \Delta t = \dots$$

Nota finale: i dati di questo esercizio sono quasi tutti realistici di un sistema tramviario, anche se non esattamente coincidenti con quelli del tram di Padova.

Non è invece realistico che il veicolo assorba sempre la stessa corrente  $I_N$  lungo tutta la tratta; la corrente assorbita dipende dalle condizioni di moto: accelerazione, velocità costante, frenatura. Durante la frenatura la corrente potrebbe anche cambiare di segno, inviando potenza sulla linea di contatto invece di prelevarne (frenatura elettrica a recupero).