



Zeno Martini (admin)

## TEMA DI ELETTROTECNICA

28 June 2008

### Premessa

Come si sa la novità ( una vera novità?) della Maturità 2008 sono gli errori nelle tracce dei temi. Si è parlato molto di quello relativo alla poesia di Montale. Nel testo della versione di greco mancava una parola; errori c'erano nei temi di lingua. Electroportal, anche su sollecitazioni dei suoi visitatori, analizza qui il tema di Elettrotecnica relativo all'indirizzo: ELETTROTECNICA E AUTOMAZIONE, scoprendo anche in esso incongruenze piuttosto incredibili, come si vedrà. Vediamo dunque il

### Tema di ELETTROTECNICA

*(testo valevole per i corsi di ordinamento, per i corsi sperimentali del Progetto "SIRIO" ) Elettrotecnica,*

*Due trasformatori con le seguenti caratteristiche:*

potenza nominale	tensione nominale primaria	tensione secondaria a vuoto	potenza di corto circuito	potenza a vuoto	$\cos\varphi_{CC}$
120 kVA	20 kV	400 V	2,4 %	0,9 %	0,4
160 kVA	20 kV	400 V	2,2 %	0,8 %	0,4

*sono collegati in parallelo per alimentare, alle loro tensione nominale di 380 V, i seguenti tre motori asincroni trifase a 4 poli:*

numero motori	potenza nominale	rendimento	$\cos\varphi$	coppia nominale

2	90 kW	0,94	0,86	581 N m
1	30 kW	<b>0,92</b>	0,83	195 N m

*Il candidato, fatte eventuali ipotesi aggiuntive, calcoli:*

1. la corrente erogata da ogni trasformatore e il rendimento complessivo del parallelo considerando che i motori lavorano nelle condizioni nominali;
2. lo scorrimento per ogni motore;

*Inoltre, considerando che il motore di potenza 30 kW ha un rapporto di trasformazione tra statore e rotore di 1,3, che le perdite meccaniche sono pari a 750 W e che nella prova a vuoto il motore ha assorbito una potenza di 1800 W con  $\cos\varphi_0 = 0,25$ , si determini:*

1. il rendimento nominale del motore;
2. il valore della resistenza del reostato da inserire su ciascuna fase del rotore per ottenere una riduzione del 10% della velocità del motore, con la stessa coppia applicata;

*Infine, considerando che uno dei motori di potenza nominale 90 kW lavora in modo non continuativo, il candidato illustri le conseguenze sull'impianto, durante la fase di fermo, in particolare in riferimento al suo rendimento complessivo*

### **Procedimento per le prime due domande**

Dopo aver verificato che le condizioni di parallelo dei trasformatori siano verificate, tratteremo il circuito equivalente dell'impianto, determinando con esso le grandezze elettriche che consentiranno di determinare il rendimento delle macchine nelle condizioni di funzionamento. Per lo scorrimento dei motori è necessario calcolare la potenza meccanica prodotta effettivamente da ciascuno di essi che, divisa per la coppia nominale fornisce la velocità angolare effettiva

### **Il rendimento del parallelo**

Per un corretto funzionamento in parallelo ( non dimenticando però di osservare che, per quanto possibile, è una soluzione impiantistica che sarebbe meglio evitare) occorre che i trasformatori appartengano allo stesso gruppo, abbiano lo stesso rapporto di trasformazione , la stessa tensione percentuale di cortocircuito, lo stesso fattore di potenza in cortocircuito.

Per il gruppo il testo non specifica nulla, ma evidentemente dobbiamo supporre che la condizione sia sottintesa. Assumiamo siano ad esempio del gruppo Dy11. Il rapporto di trasformazione è  $K_T=20000/400=50$  identico per i due trasformatori; il fattore di potenza di cortocircuito è lo stesso (0,4). La tensione di cortocircuito percentuale dobbiamo ricavarla dai dati della prova in cortocircuito. A questo proposito osserviamo che il testo avrebbe dovuto specificare che per potenza di cortocircuito si intende quella misurata nella prova in cortocircuito, anche se il valore % fa chiaramente capire che di quella si tratta. Si ha:

$$p_{cc} \% = 100 \frac{P_{cc}}{S_n} = 100 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot u_{cc} \cdot I_n \cdot \cos \varphi_{cc}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n} = 100 \cdot \frac{u_{cc} \cdot \cos \varphi_{cc}}{U_n}$$

$$u_{cc} = U_n \cdot \frac{p_{cc} \%}{100 \cdot \cos \varphi_{cc}}$$

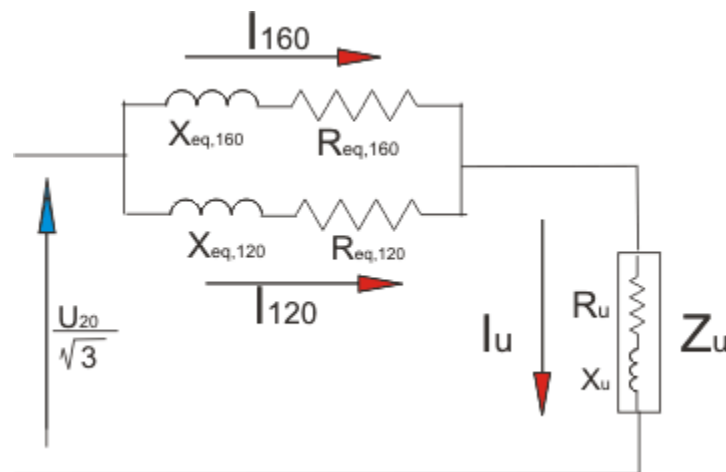
$$e = 100 \frac{u_{cc}}{U_n} = \frac{p_{cc} \%}{\cos \varphi_{cc}}$$

$$e_{120} = \frac{2,4}{0,4} = 6\%$$

$$e_{160} = \frac{2,2}{0,4} = 5,5\%$$

Notiamo una diversità nella tensione di cortocircuito il che ci dice non trattarsi di un parallelo perfetto. Ad ogni modo, per semplicità dei calcoli, lo assumeremo tale.

Il circuito equivalente su cui ragionare è il seguente, dove i trasformatori in parallelo sono rappresentati solo dalle loro impedenze di cortocircuito ed i due motori dalla impedenza equivalente relativa al funzionamento specificato.



Determiniamo ora i parametri del circuito equivalente semplificato dei due trasformatori. Per il funzionamento a carico, quindi per ripartire la corrente tra i

due trasformatori, ci è sufficiente conoscere i parametri longitudinali: Resistenza equivalente,  $R_{eq}$  e reattanza equivalente  $X_{eq}$ , deducibili dai dati della prova in cortocircuito.

$$P_{cc} = 3 \cdot R_{eq} \cdot I_n^2 = S_n \frac{P_{cc} \%}{100}$$

$$R_{eq} = S_n \cdot \frac{P_{cc} \%}{3 \cdot I_n^2} = S_n \cdot \frac{P_{cc} \%}{100} \cdot \frac{1}{3 \cdot \left( \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} \right)^2} = \frac{P_{cc} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}$$

$$R_{eq,120} = \frac{P_{cc,120} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{n,120}} = \frac{2,4}{100} \cdot \frac{400^2}{120000} = 0,032 \Omega$$

$$R_{eq,160} = \frac{P_{cc,160} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{n,160}} = \frac{2,2}{100} \cdot \frac{400^2}{160000} = 0,022 \Omega$$

$$X_{eq} = R_{eq} \cdot \tan \varphi_{cc} = R_{eq} \cdot \tan (\arccos \varphi_{cc})$$

$$X_{eq,120} = R_{eq,120} \cdot \tan (\arccos 0,4) = 0,032 \cdot \tan 66,4 = 0,0733 \Omega$$

$$X_{eq,160} = R_{eq,160} \cdot \tan (\arccos 0,4) = 0,022 \cdot \tan 66,4 = 0,0504 \Omega$$

$$\dot{Z}_{eq,120} = 0,032 + j0,0733 = 0,0799 \angle 66,4 \Omega$$

$$\dot{Z}_{eq,160} = 0,022 + j0,0504 = 0,055 \angle 66,4 \Omega$$

I motori, nelle condizioni specificate di funzionamento nominale, sono visti dai trasformatori come un'impedenza:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_u &= R_u + jX_u \\ Z_u &= \frac{U_{n,m}^2}{S_u} \\ S_u &= \sqrt{P_u^2 + Q_u^2} \\ P_u &= 2 \cdot P_{a,m1} + P_{a,m2} = 2 \cdot \frac{P_{n1}}{\eta_1} + \frac{P_{n2}}{\eta_2} = 2 \cdot \frac{90}{0,94} + \frac{30}{0,92} = 2 \cdot 95,7 + 32,6 = 224 \text{ kW} \\ Q_u &= 2 \cdot Q_{a,m1} + Q_{a,m2} = 2 \cdot P_{a,m1} \cdot \tan(\arccos \varphi_{n1}) + P_{a,m2} \cdot \tan(\arccos \varphi_{n2}) = \\ &= 2 \cdot 95,7 \cdot \tan(\arccos 0,86) + 32,6 \cdot \tan(\arccos 0,83) = 113,6 + 21,9 = 135 \text{ kvar} \\ S_u &= \sqrt{224^2 + 135^2} = 262 \text{ kVA} \\ Z_u &= \frac{(380)^2}{262 \cdot 10^3} = 0,551 \Omega \\ \tan \varphi_u &= \frac{Q_u}{P_u} = \frac{135}{224} = 0,603 \\ R_u &= Z_u \cdot \cos \varphi_u = 0,573 \cdot \cos(\arctan \varphi_u) = 0,551 \cdot \cos 31 = 0,472 \Omega \\ X_u &= Z_u \cdot \sin \varphi_u = 0,573 \cdot \sin(\arctan \varphi_u) = 0,551 \cdot \sin 31 = 0,283 \Omega \end{aligned}$$

La corrente complessiva assorbita dai due motori è perciò

$$I_u = \frac{\left( \frac{380}{\sqrt{3}} \right)}{0,551} = 398 \text{ A}$$

sfasata di  $31^\circ$  in ritardo rispetto alla tensione.

Per determinare la corrente su ogni trasformatore, basta ripartirla tra le loro impedenze interne mediante la formula del partitore

$$\begin{aligned} I_{120} &= I_u \left| \frac{\dot{Z}_{eq,160}}{\dot{Z}_{eq,160} + \dot{Z}_{eq,120}} \right| = 398 \cdot \left| \frac{0,055 \angle 66,4}{0,055 \angle 66,4 + 0,0799 \angle 66,4} \right| = 398 \cdot 0,407 = 162 \text{ A} \\ I_{160} &= I_u \left| \frac{\dot{Z}_{eq,120}}{\dot{Z}_{eq,160} + \dot{Z}_{eq,120}} \right| = 398 \cdot \left| \frac{0,0799 \angle 66,4}{0,055 \angle 66,4 + 0,0799 \angle 66,4} \right| = 398 \cdot 0,592 = 236 \text{ A} \end{aligned}$$

Il rendimento complessivo dei due trasformatori è dato dal rapporto tra la potenza attiva assorbita dai motori e la potenza in ingresso. Quest'ultima è data dalla potenza assorbita dai motori aumentata delle perdite nel ferro e nel rame del trasformatore.

$$\eta_T = \frac{P_u}{P_u + P_{0T} + P_{cuT}}$$

$$P_{0T} = P_{0,160} + P_{0,120}$$

$$P_{0,160} = \frac{P_{0,160}^{\%}}{100} \cdot S_{n,160} = 0,008 \cdot 160 \cdot 10^3 = 1280 \text{ W}$$

$$P_{0,120} = \frac{P_{0,120}^{\%}}{100} \cdot S_{n,160} = 0,009 \cdot 120 \cdot 10^3 = 1080 \text{ W}$$

$$P_{cuT} = 3 \cdot R_{eq,160} \cdot I_{160}^2 + 3 \cdot R_{eq,120} \cdot I_{120}^2$$

$$= 3 \cdot 0,022 \cdot 236^2 + 3 \cdot 0,032 \cdot 160^2 = 3676 + 2458 = 6134 \text{ W}$$

$$\eta_T = \frac{P_u}{P_u + P_{0T} + P_{cuT}} = \frac{224}{224 + 1,28 + 1,08 + 6,134} = 0,963$$

**Osservazione:** i calcoli precedenti sono stati fatti nell'ipotesi che la tensione sui motori sia esattamente quella nominale, condizione peraltro specificata dal testo. Questo richiederebbe, nel caso la tensione primaria del trasformatore fosse esattamente 20 kV, che la caduta interna dei trasformatori sia di 20 V.

Verifichiamo quant'è in realtà se i motori lavorano nelle condizioni nominali.

$$\vec{Z}_{eq} = \frac{\vec{Z}_{eq,160} \cdot \vec{Z}_{eq,120}}{\vec{Z}_{eq,160} + \vec{Z}_{eq,120}} = \frac{0,055 \angle 66,4 \cdot 0,0799 \angle 66,4}{0,055 \angle 66,4 + 0,0799 \angle 66,4} =$$

$$= \frac{0,00439 \angle 132,8}{0,160 \angle 66,4} = 0,0274 \angle 66,4$$

$$R_{eq} = 0,0274 \cdot \cos 66,4 = 0,011 \Omega$$

$$X_{eq} = 0,0274 \cdot \sin 66,4 = 0,0251 \Omega$$

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I_u \cdot (R_{eq} \cdot \cos \varphi_u + X_{eq} \cdot \sin \varphi_u)$$

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot 398 \cdot (0,011 \cdot \cos 31^\circ + 0,0251 \cdot \sin 31^\circ) =$$

$$= 689 \cdot (0,00943 + 0,0129) = 15,4 \text{ V}$$

Quindi è inferiore a 20 V. La tensione realmente applicata ai carichi è, se 400 è l'effettiva tensione a vuoto dei trasformatori,  $400 - 15,4 = 384,6$  V. E' l'1,2% in più rispetto alla nominale, valore ampiamente nei limiti. Si ritiene pertanto inutile correggere i valori effettivi delle correnti assorbite. D'altra parte il testo afferma che i motori lavorano nelle condizioni nominali, quindi implicitamente che la tensione a vuoto del trasformatore sia non 400 V ma 395,4 V, quindi che la tensione primaria non è 20000 V ma  $395,4 \cdot 50 = 19770$  V. Se la tensione primaria fosse stata esattamente 20 kV basta trovare la corrente con

$$\begin{aligned}
 \vec{i}_u &= \frac{\frac{U_n}{\sqrt{3}}}{\vec{Z}_u + \vec{Z}_{eq}} = \frac{231}{0,472 + j0,283 + 0,011 + j0,025} = \\
 &= \frac{231}{0,483 + j0,308} = 403 \angle -32,5
 \end{aligned}$$

## Lo scorrimento nominale

Il calcolo dello scorrimento nominale è molto semplice. Basta trovare la velocità nominale dividendo la potenza nominale per la coppia nominale, entrambi valori dati e la velocità di sincronismo.

$$\begin{aligned}
 n_0 &= 60 \cdot \frac{f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ rpm} \\
 n_{90} &= \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{P_{n1}}{C_{n1}} = 9,55 \cdot \frac{90 \cdot 10^3}{581} = 1479 \text{ rpm} \\
 n_{30} &= \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{P_{n2}}{C_{n2}} = 9,55 \cdot \frac{30 \cdot 10^3}{195} = 1469 \text{ rpm} \\
 s_{n,90} &= \frac{n_0 - n_{90}}{n_0} = \frac{1500 - 1479}{1500} = 0,014 \\
 s_{n,30} &= \frac{n_0 - n_{30}}{n_0} = \frac{1500 - 1469}{1500} = 0,021
 \end{aligned}$$

## Le due domande successive

Queste ulteriori domande sono state inserite certo per testare più a fondo le conoscenze dei maturandi e pilotare i migliori verso le valutazioni più elevate della sufficienza già raggiunta rispondendo alle prime. Ma è agli esperti del ministero che per queste due domande la valutazione deve essere diminuita. Vediamo il perché.

### Il rendimento nominale( !? )

La prima è evidentemente errata (o insensata, a scelta): chiede un dato del problema! Il rendimento nominale del motore da 30 kW è appunto 0,92, riportato in tabella. Potremmo dunque rispondere semplicemente ricopiando quel dato. Verrebbe da pensare ad uno scherzo, una di quelle domande tipo: "Di che colore era il cavallo bianco di Napoleone?". Sembra però che non sia così perché non c'è solo quella domanda scherzosa. A seguire ci sono dati non realistici.

Se osserviamo cataloghi di motori reali quadripolari di quella potenza il rendimento fornito è realistico. Anche la coppia fornita. Eccone per esempio uno

$P_N$ kW	$P_N$ HP	$n_n$ min <sup>-1</sup>	$\eta$ %	$\cos\phi$	$I_N$ (400V) A	$\frac{L_p}{L_s}$	$M_N$ Nm
11	15	1430	85	0.85	22.5	6	75.0
11	15	1450	89	0.86	21	7	72.5
15	20	1450	89	0.86	29	7	99
18.5	25	1470	91	0.86	34	7	120
22	30	1470	92	0.86	41	7	143
30	40	1470	92	0.87	54	7	195
37	50	1480	92	0.87	67	7	239
45	60	1480	92	0.88	80	7	291
55	75	1480	93	0.88	98	7	355
75	100	1480	93	0.88	133	7	484
90	125	1480	94	0.89	156	7	591

- [http://www.electroyou.it/vis\\_resource.php?section=Link&id=3403](http://www.electroyou.it/vis_resource.php?section=Link&id=3403)
- [http://www.electroyou.it/vis\\_resource.php?section=Link&id=509](http://www.electroyou.it/vis_resource.php?section=Link&id=509)

Non c'è dunque alcun bisogno di calcolarlo per cui la domanda è incomprensibile, a meno che gli esperti non fossero in vena di scherzi. Ma supponiamo che l'aggettivo "nominale" sia di troppo e che sia richiesto il rendimento del motore nelle condizioni di lavoro. E' evidente che tali condizioni devono essere specificate. L'unica precisazione presente nel testo sta nella prima domanda, cui si è già risposto, dove si dice: "[...] considerando che i motori lavorano nelle condizioni nominali". Quindi è proprio il rendimento nominale che viene chiesto. Supponiamo allora che il dato fornito in tabella sia sfuggito e che in realtà sia da calcolare con i dati successivamente forniti. Trascuriamo il particolare che ciò avrebbe reso impossibile rispondere alle prime due domande, per l'impossibilità di determinare la corrente del motore, che avrebbe dovuto in tal caso essere un dato, ci si accorge che non ancora non si può rispondere. Per il rendimento occorre calcolare le perdite nel rame di statore, quindi occorre conoscere la corrente e la resistenza dell'avvolgimento. L'inconsistenza della domanda è poi aggravata dall'incongruenza dei dati ulteriori, incompatibili con le caratteristiche di un motore reale. Infatti supponiamo di riferirci ai dati di un motore reale, come quello di tabella. La totale potenza persa è:

$$P_p = \frac{P}{\eta} - P = P \cdot \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) = 30 \cdot 10^3 \cdot \left( \frac{1}{0,92} - 1 \right) = 2608 \text{ W}$$

Le perdite a vuoto fornite dal testo sono  $P_0=1800 \text{ W}$  comprendono le perdite nel ferro e quelle meccaniche. La differenza di  $P_p-P_0=808 \text{ W}$  deve comprendere le perdite nel rame di rotore e statore,  $P_{cu}$ , e le perdite addizionali,  $P_{add}$ . Francamente non è realistico che le perdite nel rame a carico siano la metà di quelle a vuoto. Si deve quindi dedurre che anche  $P_0$  è un dato errato. Io stenderei a questo punto il famoso



velo pietoso sulla domanda. Se si cerca di determinare il rendimento tenendo per buona una corrente nominale di 54 A (vedi tab. riportata per il motore di 30 kW) ed ipotizzando una resistenza di statore di 0,2 ohm, si ottiene e trascurando le perdite addizionali

$$P_{jstat} = 3 \cdot R_s \cdot I_n^2 = 3 \cdot 0,2 \cdot 54^2 = 1750W$$

$$P_{jrot} = (P_n + P_{mecc}) \cdot \left( \frac{s_{n,30}}{1 - s_{n,30}} \right) = (30 \cdot 10^3 + 750) \cdot \left( \frac{0,021}{0,979} \right) = 660W$$

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + P_{jstat} + P_{jrot} + P_0} = \frac{30}{30 + 1,75 + 0,660 + 1,8} = 0,877$$

mentre se teniamo buoni tutti i dati avremo, sempre trascurando le perdite addizionali

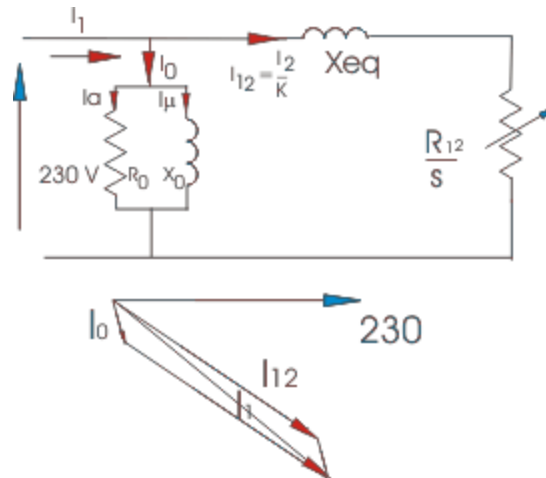
$$P_{jstat} = P_p - P_0 - P_{jrot} = 2608 - 1800 - 660 = 148W$$

un valore evidentemente impossibile per un motore reale.

Finiamola dunque qui con questa domanda. I dati sono incoerenti dal punto di vista logico in quanto fanno cadere in un circolo vizioso ed inconsistenti dal punto di vista di una macchina reale. Inventare i dati per un circuito elettrico qualsiasi senza specificare la realtà cui si riferisce è anche possibile, ma quando il circuito deve rappresentare macchine reali non si può andare a caso.

### **Vediamo se va meglio con la seconda**

L'espressione della coppia, che deve rimanere costante, è data dalla potenza trasmessa al rotore diviso la velocità di sincronismo. Quest'ultima è una costante, quindi la costanza della coppia richiede la costanza della potenza trasmessa al rotore. Con riferimento al circuito equivalente semplificato del motore



si ha dunque

$$C = \frac{P_t}{\Omega_0}$$

$$P_t = 3 \cdot \frac{R_{12}}{s} \cdot I_{12}^2$$

$$3 \cdot I_{12}^2 = \frac{U^2}{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s}\right)^2 + X_{eq}^2}$$

$$R_{12} = R_2 \cdot k^2$$

$k$  è il rapporto di trasformazione che è costante, quindi

$$\frac{R_2}{s} = \text{costante} \Rightarrow P_t = \text{costante}$$

La resistenza reostatica fa variare la resistenza rotorica,  $R_2$  e, contemporaneamente, varia lo scorrimento  $s$ . La condizione che soddisfa al requisito di mantenere la coppia costante di volta allora

$$\frac{R_2}{s} = \frac{R_2 + R_{add}}{s'}$$

$R_2$  : resistenza di rotore

$R_{add}$  : resistenza addizionale

$s$ : scorrimento iniziale

$s'$ : scorrimento con resistenza aggiunta

Occorre perciò calcolare la resistenza di rotore e lo scorrimento nella nuova condizione di funzionamento.

Cominciamo da quest'ultimo che è più semplice determinare. La nuova velocità è il 10% inferiore a quella nominale e la velocità di sincronismo è la stessa

$$n' = 0,9 \cdot n = 0,9 \cdot 1469 = 1322 \text{ rpm}$$

$$s' = \frac{n_0 - n'}{n_0} = \frac{1500 - 1322}{1500} = \frac{178}{1500} = 0,119$$

Più laborioso è il calcolo della resistenza di rotore, per il quale, si devono comunque utilizzare, facendo finta di niente, alcuni degli inaffidabili dati forniti.

NB: nella figura precedente è stato anche disegnato il diagramma vettoriale delle correnti, qui utilizzato per la scrittura delle correnti come numeri complessi, avendo assunto come asse reale quello della tensione  $U=230 \text{ V}$ .

$$R_2 = \frac{P_{jra}}{3 \cdot I_2^2}$$

$$I_2 = k \cdot |\dot{I}_1 - \dot{I}_0|$$

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{30 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,92 \cdot 0,83} = 59,7 \text{ A}$$

$$\dot{I}_1 = I_1 \cdot \cos \varphi - j \cdot I_1 \cdot \sin \varphi = 59,7 \cdot 0,83 - j 59,7 \cdot 0,558 =$$

$$= 49,5 - j 33,3 = 59,7 \angle -34$$

$$I_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_n \cdot \cos \varphi_0} = \frac{1800}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,25} = 10,9$$

$$\dot{I}_0 = I_0 \cdot \cos \varphi_0 - j \cdot I_0 \cdot \sin \varphi_0 = 10,9 \cdot 0,25 - j 10,9 \cdot 0,968 =$$

$$= 2,725 - j 10,55 = 10,9 \angle -75,5$$

$$\dot{I}_1 - \dot{I}_0 = 49,5 - j 33,3 - 2,725 + j 10,55 = 46,8 - j 22,8 =$$

$$= 52 \angle -26$$

$$I_2 = k \cdot 52 = 1,3 \cdot 52 = 67,6 \text{ A}$$

$$R_2 = \frac{660}{3 \cdot 67,6^2} = 0,048 \Omega$$

infine

$$R_{\text{add}} = R_2 \cdot \left( \frac{s' - s}{s} \right) = 0,048 \cdot \left( \frac{0,119 - 0,021}{0,021} \right) = 0,225 \Omega$$

La domanda conclusiva non esige calcoli, che comunque non è nemmeno proibito fare. Ciò che si può dire, senza fare calcoli, è che la corrente complessiva diminuirà, quindi diminuiranno le perdite nel rame dei trasformatori, mentre le perdite nel ferro rimarranno sostanzialmente invariate. Poiché nella condizione già studiata le perdite

nel rame erano abbastanza maggiori di quelle nel ferro, nella nuova condizione potrebbero diventare molto simili, quindi ci si potrebbe trovare nella condizioni di massimo rendimento per i trasformatori che si verifica quando le perdite nel rame sono uguali a quelle nel ferro. Quindi si potrebbe dire che, probabilmente, il rendimento complessivo aumenta. I calcoli possono essere questi

$$\vec{Z}'_u = R'_u + jX'_u$$

$$Z'_u = \frac{U_{n,m}^2}{S'_u}$$

$$S'_u = \sqrt{P'^2_u + Q'^2_u}$$

$$P'_u = P_{a,m1} + P_{a,m2} = \frac{P_{n1}}{\eta_1} + \frac{P_{n2}}{\eta_2} = \frac{90}{0,94} + \frac{30}{0,92} = 95,7 + 32,6 = 128 \text{ kW}$$

$$Q'_u = Q_{a,m1} + Q_{a,m2} = P_{a,m1} \cdot \tan(\arccos \varphi_{n1}) + P_{a,m2} \cdot \tan(\arccos \varphi_{n2}) = 95,7 \cdot \tan(\arccos 0,86) + 32,6 \cdot \tan(\arccos 0,83) = 56,8 + 21,9 = 79 \text{ kvar}$$

$$S'_u = \sqrt{128^2 + 79^2} = 150 \text{ kVA}$$

$$Z'_u = \frac{(380)^2}{150 \cdot 10^3} = 0,963 \Omega$$

$$\tan \varphi'_u = \frac{Q'_u}{P'_u} = \frac{79}{128} = 0,617$$

$$R'_u = Z'_u \cdot \cos \varphi'_u = 0,963 \cdot \cos(\arctan \varphi'_u) = 0,963 \cdot \cos 31,7 = 0,819 \Omega$$

$$X'_u = Z'_u \cdot \sin \varphi'_u = 0,963 \cdot \sin(\arctan \varphi'_u) = 0,963 \cdot \sin 31,7 = 0,506 \Omega$$

Immaginando che la tensione sia quella che dava luogo ai 380 V nella condizione precedente, quindi 395,4 V, la corrente da ripartire sui due trasformatori è

$$\begin{aligned} i'_u &= \frac{\frac{395,4}{\sqrt{3}}}{\vec{Z}'_u + \vec{Z}'_{eq}} = \frac{228}{0,819 + j0,506 + 0,011 + j0,025} = \\ &= \frac{228}{0,83 + j0,531} = 231 \angle -32,6 \end{aligned}$$

per cui le nuove perdite nel rame si possono calcolare con

$$P'_{cu} = 3 \cdot R_{eq} \cdot I'^2_u = 3 \cdot 0,011 \cdot 231^2 = 1761 \text{ W}$$

quindi il rendimento complessivo nuovo è

$$\eta' = \frac{P_u'}{P_u' + P_{cu}' + P_{Fe}} = \frac{128000}{128000 + 1761 + 2360} = 0,967$$

## Conclusione

Il tema assegnato è un esercizio classico di macchine elettriche con le due più classiche macchine, trasformatore e motore asincrono con cui avrà a che fare un perito industriale. E' indubbiamente laborioso anche se le difficoltà non sono grandiose, se si esclude quelle create dalla commissione che ha deciso i dati. Non so quale sia la percentuale di allievi che effettivamente è arrivata a completare il tema. Temo non alta, considerando il livello medio dei nostri ragazzi. Ma spero di sbagliarmi. Certo che, per farli confondere, non era assolutamente necessario che gli esperti ministeriali si impegnassero a tal punto fornendo addirittura domande che tali non sono e dati troppo inventati. I nostri ragazzi sanno benissimo confondersi anche con dati corretti.