MACCHINE ELETTRICHE - ESERCIZI			**26 gennaio 2009**	
Cognome Nome: _____			Matricola: _____	
Elettrotecnica |_|	Energetica |_|	Elettrica V.O. |_|	6 / 7 CFU |_|	9 CFU |_|

ESERCIZIO N.1

In occasione della prova a vuoto su di un trasformatore monofase vengono misurati i seguenti valori:

tensione primaria di alimentazione	V_{10}= 11 kV
corrente assorbita	I_0 = 0.33 A
potenza assorbita	P_0 = 726 W

Successivamente il trasformatore, alimentato a tensione V_1 = 10 kV, viene connesso a un carico. In tali condizioni la macchina assorbe dalla rete la corrente I_1 = 8.5 A sfasata di φ_1 = 39.12° in ritardo rispetto alla tensione e funziona con rendimento $\eta_{\%}$ = 97.22% e caduta di tensione $\Delta v_{Zcc\%}$ pari al 3.72% della tensione di alimentazione.
Determinare, con riferimento al circuito equivalente semplificato:

1) i parametri R_0, X_0, R', X';
2) la tensione secondaria V_{12} nel funzionamento a carico.

ESERCIZIO N.2

Un motore asincrono trifase (f = 50 Hz, $2p$ = 4, statore collegato a stella) presenta i seguenti dati:

potenza nominale	P_n = 95 kW	
resistenza misurata tra due morsetti di statore	R_{ab} = 80 mΩ	
resistenza e reattanza di corto circuito	R = 90 mΩ	X = 400 mΩ

In condizioni nominali il motore assorbe una corrente pari a 171.37 A con fattore di potenza 0.927; alimentato a tensione nominale ma senza carico meccanico connesso all'albero, il motore assorbe invece una corrente pari a 16.44 A con fattore di potenza 0.229.
Determinare velocità, coppia, tensione e rendimento nominali.

Valutazione esercizi	1)_____ 2)_____
	Totale_____

RISULTATI

ESERCIZIO N.1

Resistenza e reattanza a vuoto	R_0 = 166.6 kΩ	X_0 = 34.0 kΩ
Resistenza e reattanza di corto circuito	R' = 18.0 Ω	X' = 41.2 Ω
Tensione secondaria	V_{12} = 9675 V	

ESERCIZIO N.2

Velocità nominale	n_n = 1440 giri/min
Coppia nominale	C_n = 630 Nm
Tensione nominale	V_n = 380 V
Rendimento nominale	η_n = 0.909

ESERCIZIO N.1

A vuoto

$\cos\varphi_0 = \dfrac{P_0}{V_{10}\cdot I_0} = 0.200$ $\qquad$ $\bar{\mathbf{I}}_0 = I_0\ \angle -\varphi_0 = 0.33\angle -78.46° = 0.066 - j0.323$ A

$\dot{\mathbf{Z}}_0 = \dfrac{\overline{\mathbf{V}}_{10}}{\bar{\mathbf{I}}_0} = 6.67 + j32.66 = 33.33\angle 78.46°$ kΩ

$R_0 = \dfrac{Z_0}{\cos\varphi_0} = 166.67$ kΩ $\qquad$ $X_0 = \dfrac{Z_0}{\operatorname{sen}\varphi_0} = 34.02$ kΩ

A carico

$\bar{\mathbf{I}}_1 = I_1\ \angle -\varphi_1 = 8.5\angle -39.12° = 6.595 - j5.363$ A $\qquad$ $\bar{\mathbf{I}}_0 = \dfrac{\overline{\mathbf{V}}_1}{\dot{\mathbf{Z}}_0} = 0.060 - j0.294 = 0.300\angle -78.46°$ A

$\bar{\mathbf{I}}_{12} = \bar{\mathbf{I}}_1 - \bar{\mathbf{I}}_0 = 6.535 - j5.069 = 8.27\angle -37.80°$ A

$P = V_1 I_1 \cos\varphi_1 = 65945$ W $\qquad$ $P_{Fe} = \left(\dfrac{V_1}{V_{10}}\right)^2 P_0 = 600$ W $\qquad$ $P_{Cu} = P(1-\eta) - P_{Fe} = 1233$ W

$R' = \dfrac{P_{Cu}}{I_{12}^2} = 18.03\ \Omega$ $\qquad$ $\Delta V_{1Zcc} = \dfrac{\Delta v_{1Zcc\%}}{100} V_1 = 372$ V $\qquad$ $Z_{1cc} = \dfrac{\Delta V_{1Zcc}}{I_{12}} = 44.98\ \Omega$

$X' = \sqrt{Z_{1cc}^2 - R'^2} = 41.21\ \Omega$ $\qquad$ $\dot{\mathbf{Z}}_{1cc} = 18.03 + j41.21 = 44.98\angle 66.37°\ \Omega$

$\Delta\overline{\mathbf{V}}_{1Zcc} = \dot{\mathbf{Z}}_{1cc}\cdot\bar{\mathbf{I}}_{12} = 326{,}72 + j177.87 = 372\angle 28.57°$ V

$\overline{\mathbf{V}}_{12} = \overline{\mathbf{V}}_1 - \Delta\overline{\mathbf{V}}_{1Zcc} = 9673 - j177.87 = 9675\angle -1.05°$ V

ESERCIZIO N.2

$n_0 = \dfrac{60\cdot f}{p} = 1500$ giri/min $\qquad$ $\Omega_0 = \dfrac{2\pi n_0}{60} = 157.08\ s^{-1}$

$\bar{\mathbf{I}}_0 = I_0\ \angle -\varphi_0 = 16.44\angle -76.76° = 3.76 - j16.00$ A

$\bar{\mathbf{I}}_{1n} = I_{1n}\ \angle -\varphi_{1n} = 171.37\angle -22.03° = 158.86 - j64.27$ A

$\bar{\mathbf{I}}_{12n} = \bar{\mathbf{I}}_{1n} - \bar{\mathbf{I}}_0 = 155.09 - j48.27 = 162.43\angle -17.29°$ A $\qquad$ $R_1 = \dfrac{R_{ab}}{2} = 40$ mΩ

$R_{12} = R - R_1 = 50$ mΩ $\qquad$ $P_{Cu2n} = 3R_{12}I_{12n}^2 = 3958$ W $\qquad$ $P_{tn} = P_n + P_{Cu2n} = 98958$ W

$s_n = \dfrac{P_{Cu2n}}{P_{tn}} = 0.04$ $\qquad$ $n_n = n_0(1-s_n) = 1440$ giri/min $\qquad$ $\Omega_n = \dfrac{2\pi n_n}{60} = 150.80\ s^{-1}$

$C_n = \dfrac{P_n}{\Omega_n} = 630$ Nm $\qquad$ $Z_f = \sqrt{\left(R_1 + \dfrac{R_{12}}{s_n}\right)^2 + X^2} = 1.351\ \Omega$

$V_{1n} = \sqrt{3}\cdot Z_f \cdot I_{12n} = 380$ V

$P_{en} = \sqrt{3}V_{1n}I_{1n}\cos\varphi_{1n} = 104567$ W $\qquad$ $\eta_n = \dfrac{P_n}{P_{en}} = 0.909$

MACCHINE ELETTRICHE - ESERCIZI			**26 gennaio 2009**	
Cognome Nome: _____			Matricola: _____	
Elettrotecnica |_|	Energetica |_|	Elettrica V.O. |_|	6 / 7 CFU |_|	9 CFU |_|

ESERCIZIO N.1

In occasione della prova a vuoto su di un trasformatore monofase vengono misurati i seguenti valori:

tensione primaria di alimentazione	V_{10}= 11 kV
corrente assorbita	I_0 = 0.33 A
potenza assorbita	P_0 = 726 W

Successivamente il trasformatore, alimentato a tensione V_1 = 10 kV, viene connesso a un carico. In tali condizioni la macchina assorbe dalla rete la corrente I_1 = 8.5 A sfasata di φ_1 = 39.12° in ritardo rispetto alla tensione e funziona con rendimento $\eta_{\%}$ = 97.22% e caduta di tensione $\Delta v_{Zcc\%}$ pari al 3.72% della tensione di alimentazione.
Determinare, con riferimento al circuito equivalente semplificato:

1) i parametri R_0, X_0, R', X';
2) la tensione secondaria V_{12} nel funzionamento a carico.

ESERCIZIO N.2

Un motore asincrono trifase (f = 50 Hz, $2p$ = 4, statore collegato a stella) presenta i seguenti dati:

potenza nominale	P_n = 95 kW	
resistenza misurata tra due morsetti di statore	R_{ab} = 80 mΩ	
resistenza e reattanza di corto circuito	R = 90 mΩ	X = 400 mΩ

In condizioni nominali il motore assorbe una corrente pari a 171.37 A con fattore di potenza 0.927; alimentato a tensione nominale ma senza carico meccanico connesso all'albero, il motore assorbe invece una corrente pari a 16.44 A con fattore di potenza 0.229.
Determinare velocità, coppia, tensione e rendimento nominali.

Valutazione esercizi	1)_____ 2)_____
	Totale_____

RISULTATI

ESERCIZIO N.1

Resistenza e reattanza a vuoto	R_0 = 166.6 kΩ	X_0 = 34.0 kΩ
Resistenza e reattanza di corto circuito	R' = 18.0 Ω	X' = 41.2 Ω
Tensione secondaria	V_{12} = 9675 V	

ESERCIZIO N.2

Velocità nominale	n_n = 1440 giri/min
Coppia nominale	C_n = 630 Nm
Tensione nominale	V_n = 380 V
Rendimento nominale	η_n = 0.909

MACCHINE ELETTRICHE - ESERCIZI			**11 febbraio 2009**	
Cognome Nome: _____			Matricola: _____	
Elettrotecnica |_|	Energetica |_|	Elettrica V.O. |_|	6 / 7 CFU |_|	9 CFU |_|

ESERCIZIO N.1

Di un trasformatore trifase sono note le seguenti caratteristiche:

potenza nominale	P_n	= 80 kVA
tensione nominale primaria	V_{1n}	= 1000 V
tensione nominale secondaria	V_{2n}	= 400 V
perdite a vuoto	$p_{0\%}$	= 1.625 %
tensione di corto circuito	$v_{cc\%}$	= 6.00 %
fattore di potenza di corto circuito	$\cos\varphi_{cc}$	= 0.400

Il trasformatore, alimentato alla tensione nominale, eroga la corrente nominale a un carico ohmico-induttivo ($\cos\varphi_e$=0.8).
Determinare, con riferimento al circuito equivalente semplificato:

- i parametri R', X';
- la tensione V_2 ai capi del carico;
- il grado di carico riferito alla potenza;
- la fase della corrente secondaria rispetto alla tensione di alimentazione;
- la potenza attiva che il trasformatore assorbe dalla rete.

ESERCIZIO N.2

Un motore asincrono trifase (4 poli, 60 Hz), funzionante in condizioni nominali, presenta i seguenti dati:

tensione di alimentazione	V_{1n}= 220 V	
corrente di rotore	I_{12} = 56.74 A	$\cos\varphi_{12}$ = 0.991
perdite a vuoto	P_0 = 605 W	
perdite rame statore	P_{ep1} = 609 W	
rendimento	η = 0.909	

Ricavare:

- i parametri R_1, R_{12}, X del circuito equivalente semplificato;
- la caratteristica meccanica, valutandone almeno i punti caratteristici corrispondenti a coppia nominale, coppia massima e coppia di avviamento.

Valutazione esercizi	1)_____ 2)_____
	Totale_____

RISULTATI

ESERCIZIO N.1

Resistenza e reattanza di corto circuito	R' = 0.30 Ω	X' = 0.69 Ω	
Tensione secondaria	V_2 = 379 V		
Grado di carico potenza	a_P = 0.948		
Fase corrente secondaria	φ_{12} = - 38.56°		
Potenza attiva assorbita	P = 63880 W		

ESERCIZIO N.2

Resistenze e reattanza di corto circuito	R_1 = 63 mΩ	R_{12} = 82 mΩ	X = 300 mΩ
Scorrimento e coppia nominale	s_n= 3.80 %	C_n = 110 Nm	
Scorrimento e coppia massima	s_M = 26.74 %	C_M = 348 Nm	
Coppia avviamento		C_a = 190 Nm	

ESERCIZIO N.1

$I_{1n} = \frac{P_n}{\sqrt{3}V_{1n}} = 46.19\,\text{A}$ $\quad K = \frac{V_{1n}}{V_{2n}} = 2.5$

$P_0 = \frac{p_{0\%} \cdot P_n}{100} = 1300\ \text{W}$ $\quad V_{1cc} = \frac{v_{cc\%} \cdot V_{1n}}{100} = 60\ \text{V}$ $\quad P_{cc} = \sqrt{3}V_{1cc}I_{1n}\cos\varphi_{cc} = 1920\ \text{W}$

$Z_{1cc} = \frac{V_{1cc}}{\sqrt{3}\,I_{1n}} = 0.75\ \Omega$ $\quad \dot{\mathbf{Z}}_{1cc} = Z_{1cc}\angle\varphi_{cc} = 0.75\angle 66.42° = R' + jX' = 0.30 + j0.69\ \Omega$

$I_{12} = I_{1n} = 46.19\,\text{A}$ $\quad \Delta V_{12} \cong \sqrt{3}I_{12}(R'\cos\varphi_e + X'\text{sen}\varphi_e) = 52\ \text{V}$

$V_{12} = V_{1n} - \Delta V_{12} = 948\,\text{V}$ $\quad V_2 = \frac{V_{12}}{K} = 379\,\text{V}$ $\quad P_a = \sqrt{3}V_{12}I_{12} = 75824\ \text{VA}$

$\alpha_P = \frac{P_a}{P_n} = 0.948$ $\quad Z_{1e} = \frac{V_{12}}{\sqrt{3}\,I_{12}} = 11.85\ \Omega$

$\dot{\mathbf{Z}}_{1e} = Z_{1e}\angle\varphi_e = 11.85\angle 36.87° = 9.48 + j7.11\ \Omega$

$\dot{\mathbf{Z}}_t = \dot{\mathbf{Z}}_{1cc} + \dot{\mathbf{Z}}_{1e} = 9.78 + j7.80 = 12.50\angle 38.56°\ \Omega$ $\quad \bar{\mathbf{I}}_{12} = I_{12}\angle -\varphi_{12} = 46.19\angle -38.56°\,\text{A}$

$P_u = P_a\cos\varphi_e = 60660\ \text{W}$ $\quad P_p = P_0 + P_{cc} == 3220\ \text{W}$ $\quad P_i = P_u + P_p = 63880\ \text{W}$

ESERCIZIO N.2

$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} = 1800\ \text{giri/min}$ $\quad \Omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60} = 188.50\ \text{s}^{-1}$

$\bar{\mathbf{I}}_{12} = I_{12}\angle -\varphi_{12} = 56.74\angle -7.69° = 56.23 - j7.59\ \text{A}$

$\dot{\mathbf{Z}}_{1f} = \frac{\overline{\mathbf{V}}_{1n}}{\sqrt{3}\,\bar{\mathbf{I}}_{12}} = 2.218 + j0.300 = 2.239\angle 7.69°\Omega$ $\quad R_{1f} = R_1 + \frac{R_{12}}{s_n} = R_1 + R_s = 2.218\ \Omega$

$X = 300\ \text{m}\Omega$ $\quad R_1 = \frac{P_{ep1}}{3I_{12}^2} = 63\ \text{m}\Omega$ $\quad R_s = R_{1f} - R_1 = 2.155\ \Omega$

$P_t = 3R_sI_{12}^2 = 20817\ \text{W}$ $\quad P_e = P_0 + P_{ep1} + P_t = 22031\ \text{W}$ $\quad P_n = \eta \cdot P_e = 20026\ \text{W}$

$s_n = \frac{P_t - P_n}{P_t} = 3.80\ \%$ $\quad R_{12} = s_n \cdot R_s = 82\ \text{m}\Omega$

$n_n = n_0(1 - s_n) = 1732\ \text{giri/min}$ $\quad \Omega_n = \frac{2\pi n_n}{60} = 181.33\ \text{s}^{-1}$ $\quad C_n = \frac{P_n}{\Omega_n} = 110\,\text{Nm}$

$Z = \sqrt{R_1^2 + X^2} = 306\ \text{m}\Omega$ $\quad s_M = \frac{R_{12}}{Z} = 26.74\ \%$ $\quad C_M = \frac{V_{1n}^2}{2\Omega_0(R_1 + Z)} = 348\,\text{Nm}$

$C_a = \frac{R_{12}}{\Omega_0}\frac{V_{1n}^2}{(R_1 + R_{12})^2 + X^2} = 190\,\text{Nm}$

MACCHINE ELETTRICHE - ESERCIZI	**17 giugno 2009**
Cognome Nome: _____	Matricola: _____
Elettrotecnica |_| Energetica |_| Elettrica V.O. |_|	6 / 7 CFU |_| 9 CFU |_|

ESERCIZIO N.1

Di un trasformatore monofase sono noti i seguenti dati:

tensione nominale primaria	V_{1n}	= 10 kV
tensione nominale secondaria	V_{2n}	= 220 V
frequenza nominale	f	= 50 Hz
resistenza primaria	R_1	= 11.21 Ω
induttanza di dispersione primaria	L_1	= 56 mH
resistenza secondaria	R_2	= 12 mΩ
induttanza di dispersione secondaria	L_2	= 0.083 mH
tensione di corto circuito	$v_{cc\%}$	= 4.0 %

Condizioni di funzionamento 1	tensione sul carico	$V_2 = V_{2n}$	
	grado di carico	α =1.0	
	fattore di potenza del carico	$\cos\varphi_e$ = 0.8	in ritardo

Determinare la tensione di alimentazione V_1 e il rendimento percentuale.

Condizioni di funzionamento 2	tensione di alimentazione	$V_1 = V_{1n}$	
	grado di carico	α =0.75	
	fattore di potenza del carico	$\cos\varphi_e$ = 0.9	in ritardo

Determinare la tensione V_2 ai capi del carico, il grado di carico α_P riferito alla potenza e il rendimento percentuale.

NB: Trascurare la corrente a vuoto.

ESERCIZIO N.2

Un motore asincrono trifase (4 poli, 50 Hz, collegamento fasi statore a stella) è alimentato alla tensione V_1.
Le prove eseguite sulla macchina hanno permesso di determinare i seguenti dati:

resistenza di una fase di statore	R_1 = 410 mΩ
corrente a vuoto alla tensione V_1	I_0 = 3.815 A
fattore di potenza a vuoto	$\cos\varphi_0$ = 0.111

Il funzionamento del motore alla coppia massima è caratterizzato dai seguenti valori:

coppia	C_M =43.56 Nm
scorrimento	s_M = 17.91 %
corrente assorbita	I_{1M} =29.935 A
fattore di potenza	$\cos\varphi_{1M}$ = 0.693

Determinare:

1) i parametri R_{12}, X, R_0, X_0 del circuito equivalente semplificato;
2) il rendimento nel funzionamento alla coppia massima.

Valutazione esercizi	1)_____ 2)_____
	Totale_____

RISULTATI

ESERCIZIO N.1

Resistenza e reattanza di corto circuito	R' = 36.00 Ω	X' = 71.47 Ω
1 - Tensione primaria	V_1 = 10360 V	
Rendimento	$\eta_{\%}$ = 97.80 %	
2 - Tensione secondaria	V_2 = 215 V	
Grado di carico potenza	a_P = 0.732	
Rendimento	$\eta_{\%}$ = 98.49 %	

ESERCIZIO N.2

Resistenza secondaria e reattanza di corto circuito	R_{12} = 560 mΩ	X = 3.10 Ω
Resistenza e reattanza a vuoto	R_0 = 300 Ω	X_0 = 33.5 Ω
Rendimento	η_M = 0.711	

ESERCIZIO N.1

$K = \frac{V_{1n}}{V_{2n}} = 45.45$ $\quad R_{12} = K^2 R_2 = 24.79\ \Omega$ $\quad R' = R_1 + R_{12} = 36.00\ \Omega$

$X_1 = 2\pi f \cdot L_1 = 17.59\ \Omega$ $\quad X_2 = 2\pi f \cdot L_2 = 0.026\ \Omega$ $\quad X_{12} = K^2 X_2 = 53.87\ \Omega$

$X' = X_1 + X_{12} = 71.47\ \Omega$

$\dot{\mathbf{Z}}_{1cc} = R' + jX' = 36.00 + j71.47 = Z_{1cc}\angle\varphi_{cc} = 80.00\angle 63.26°\ \Omega$

$V_{1cc} = \frac{v_{cc\%} \cdot V_{1n}}{100} = 400\ \text{V}$ $\quad I_{1n} = \frac{V_{cc}}{Z_{1cc}} = 5.00\ \text{A}$

1)

$I_1 = \alpha \cdot I_{1n} = 5.00\,\text{A}$ $\quad Z_{1e} = \frac{V_{1n}}{I_1} = 2.00\ \text{k}\Omega$ $\quad \dot{\mathbf{Z}}_{1e} = Z_{1e}\angle\varphi_e = 2.00\angle 36.87° = 1.60 + j1.20\ \text{k}\Omega$

$\dot{\mathbf{Z}}_t = \dot{\mathbf{Z}}_{1cc} + \dot{\mathbf{Z}}_{1e} = 1.64 + j1.27 = Z_t\angle\varphi_t = 2.07\angle 37.85°\ \text{k}\Omega$ $\quad V_1 = Z_t \cdot I_1 = 10360\ \text{V}$

$P_e = V_1 I_1 \cos\varphi_t = 40888\ \text{W}$ $\quad P = V_{1n} I_1 \cos\varphi_e = 40000\ \text{W}$ $\quad \eta = \frac{P}{P_e} = 97.80\%$

2)

$I_1 = \alpha \cdot I_{1n} = 3.75\,\text{A}$ $\quad \Delta V_{12} \cong I_1(R'\cos\varphi_e + X'\text{sen}\varphi_e) = 238\ \text{V}$

$V_{12} = V_{1n} - \Delta V_{12} = 9762\ \text{V}$ $\quad V_2 = \frac{V_{12}}{K} = 215\ \text{V}$ $\quad v_2 = \frac{V_2}{V_{2n}} = 0.976$

$\alpha_P = \alpha \cdot v_2 = 0.732$ $\quad P = V_{12} I_1 \cos\varphi_e = 32936\ \text{W}$ $\quad P_{ep} = R' \cdot I_1^2 = 506\ \text{W}$

$\eta = \frac{P}{P + P_{ep}} = 98.49\%$

ESERCIZIO N.2

$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} = 1500\ \text{giri/min}$ $\quad \Omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60} = 157.08\ \text{s}^{-1}$

$\bar{\mathbf{I}}_0 = I_0\ \angle -\varphi_0 = 3.815\angle -83.63° = 0.423 - j3.791\ \text{A}$

$\bar{\mathbf{I}}_{1M} = I_{1M}\ \angle -\varphi_{1M} = 29.935\angle -46.16° = 20.733 - j21.593\ \text{A}$

$\bar{\mathbf{I}}_{12M} = \bar{\mathbf{I}}_{1M} - \bar{\mathbf{I}}_0 = 20.310 - j17.801 = 27.007\angle -41.23° = \text{A}$

$R_{12} = \frac{C_M s_M \Omega_0}{3 I_{12M}^2} = 0.560\ \Omega$ $\quad Z = \frac{R_{12}}{s_M} = 3.127\ \Omega$ $\quad X = \sqrt{Z^2 - R_1^2} = 3.100\ \Omega$

$V_1 = \sqrt{C_M \cdot 2\Omega_0 (R_1 + Z)} = 220\,\text{V}$

$\dot{\mathbf{Z}}_0 = \frac{\bar{\mathbf{V}}_1}{\sqrt{3}\,\bar{\mathbf{I}}_0} = 3.696 + j33.090 = Z_0\angle\varphi_0 = 33.296\angle 83.63°\ \Omega$

$R_0 = \frac{Z_0}{\cos\varphi_0} = 300\ \Omega$ $\quad X_0 = \frac{Z_0}{\sin\varphi_0} = 33.50\ \Omega$

$P_{eM} = \sqrt{3} V_1 I_{1M} \cos\varphi_{1M} = 7901\ \text{W}$ $\quad P_{mM} = C_n \Omega_0 (1 - s_M) = 5617\ \text{W}$

$\eta_M = \frac{P_{mM}}{P_{eM}} = 0.711$

MACCHINE ELETTRICHE - ESERCIZI			**15 luglio 2009**	
Cognome Nome: _____			Matricola: _____	
Elettrotecnica |_|	Energetica |_|	Elettrica V.O. |_|	6 / 7 CFU |_|	9 CFU |_|

ESERCIZIO N.1

Un trasformatore trifase presenta i seguenti dati:

potenza nominale	P_n	= 100 kVA
tensione nominale primaria	V_{1n}	= 10 kV
tensione nominale secondaria	V_{2n}	= 400 V
perdite a vuoto	$p_{0\%}$	= 0.44 %
perdite di corto circuito	$p_{cc\%}$	= 1.20 %

Il trasformatore è alimentato alla tensione primaria V_1 = 9720 V e funziona con un carico costituito da un motore asincrono di potenza all'asse P_m = 70.3 kW, rendimento η_m = 0.938 e fattore di potenza $\cos\varphi_m$ = 0.918. Quando il motore è stato inserito, è stata osservata una diminuzione della tensione secondaria del trasformatore pari al 2.24 %. Determinare, con riferimento al circuito equivalente semplificato:

- la tensione di alimentazione del motore;
- la corrente assorbita dal motore;
- la tensione di corto circuito percentuale del trasformatore;
- la caduta di tensione percentuale sull'impedenza di corto circuito del trasformatore nelle condizioni di funzionamento considerate;
- il rendimento del complesso trasformatore-motore.

ESERCIZIO N.2

Un motore asincrono trifase è caratterizzato dai seguenti dati nominali:

potenza	P_n	= 100 kW
numero di poli	$2p$	= 6
frequenza	f	= 50 Hz
tensione	V_{1n}	= 380 V
scorrimento	$s_{n\%}$	= 2.44 %

Nel funzionamento in condizioni nominali il motore assorbe una corrente pari a 173.86 A con fattore di potenza 0.953; nel funzionamento a vuoto a tensione nominale, assorbe invece una corrente pari a 14.96 A con fattore di potenza 0.210. Determinare:

1) i parametri del circuito equivalente semplificato (R_0, X_0, R_1, R_{12}, X);
2) il comportamento del motore all'avviamento in termini di coppia e di corrente (rapporto tra la coppia prodotta e quella nominale; rapporto tra la corrente assorbita e quella nominale).

Valutazione esercizi	1)_____ 2)_____
	Totale_____

RISULTATI

ESERCIZIO N.1

Tensione alimentazione motore	$V_2 = 380$ V
Corrente assorbita dal motore	$I_2 = 124$ A
Tensione di corto circuito	$v_{cc\%} = 3.81$ %
Caduta di tensione interna	$\Delta v_{Zcc\%} = 3.36$ %
Rendimento complessivo	$\eta = 0.922$

ESERCIZIO N.2

Resistenza e reattanza a vuoto	$R_0 = 70\ \Omega$	$X_0 = 15\ \Omega$	
Resistenze e reattanza di corto circuito	$R_1 = 54$ mΩ	$R_{12} = 30$ mΩ	$X = 300$ mΩ
Rapporti	$C_a/C_n = 0.44$	$I_{1cc}/I_{1n} = 4.14$	

ESERCIZIO N.1

$K = \frac{V_{1n}}{V_{2n}} = 25$ $\quad I_{1n} = \frac{P_n}{\sqrt{3}V_{1n}} = 5.77\ \text{A}$ $\quad I_{2n} = \frac{P_n}{\sqrt{3}V_{2n}} = 144.34\ \text{A}$

$P_0 = \frac{p_{0\%} \cdot P_n}{100} = 440\,\text{W}$ $\quad P_{cc} = \frac{p_{cc\%} \cdot P_n}{100} = 1200\,\text{W}$ $\quad R' = \frac{P_{cc}}{3I_{1n}^2} = 12.00\ \Omega$

$\Delta V_{12} = \frac{\Delta v_{\%} \cdot V_1}{100} = 218\ \text{V}$ $\quad V_{12} = V_1 - \Delta V_{12} = 9502\ \text{V}$ $\quad V_2 = \frac{V_{12}}{K} = 380\ \text{V}$

$P = \frac{P_m}{\eta_m} = 74947\ \text{W}$ $\quad P_a = \frac{P}{\cos\varphi_m} = 81641\ \text{VA}$ $\quad I_{12} = \frac{P_a}{\sqrt{3}V_{12}} = 4.96\ \text{A}$

$I_2 = K \cdot I_{12} = 124.01\ \text{A}$ $\quad \alpha = \frac{I_{12}}{I_{1n}} = 0.859$

$$X' = \frac{\frac{\Delta V_{12}}{\sqrt{3}I_{12}} - R'\cos\varphi_m}{\text{sen}\,\varphi_m} = 36.12\ \Omega$$

$Z_{1cc} = \sqrt{R'^2 + X'^2} = 38.06\ \Omega$ $\quad V_{1cc} = \sqrt{3}Z_{1cc}I_{1n} = 380.64\ \text{V}$ $\quad v_{cc\%} = \frac{V_{1cc}}{V_{1n}}100 = 3.81\%$

$\Delta V_{Z1cc} = \alpha \cdot V_{1cc} = 327.03\ \text{V}$ $\quad \Delta v_{Z1cc\%} = \frac{\Delta V_{Z1cc}}{V_1}100 = 3.36\%$

$v_1 = \frac{V_1}{V_{1n}} = 0.972$ $\quad P_{Fe} = v_1^2\,P_0 = 416\ \text{W}$ $\quad P_{Cu} = \alpha^2\,P_{cc} = 886\ \text{W}$

$\eta_t = \frac{P}{P + P_{Fe} + P_{Cu}} = 0.983$ $\quad \eta = \eta_t \cdot \eta_m = 0.922$

ESERCIZIO N.2

$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} = 1000\ \text{giri/min}$ $\quad \Omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60} = 104.72\ \text{s}^{-1}$

$n_n = n_0(1 - s_n) = 976\ \text{giri/min}$ $\quad \Omega_n = \frac{2\pi n_n}{60} = 102.16\ \text{s}^{-1}$

$C_n = \frac{P_n}{\Omega_n} = 979\ \text{Nm}$ $\quad P_{en} = \sqrt{3}V_{1n}I_{1n}\cos\varphi_{1n} = 109053\ \text{W}$

$\bar{\mathbf{I}}_{1n} = I_{1n}\angle -\varphi_{1n} = 173.86\angle -17.64° = 165.69 - j52.67\ \text{A}$

$P_0 = \sqrt{3}V_{1n}I_0\cos\varphi_0 = 2068\ \text{W}$ $\quad \bar{\mathbf{I}}_0 = I_0\angle -\varphi_0 = 14.96\angle -77.88° = 3.14 - j14.63\ \text{A}$

$\dot{\mathbf{Z}}_0 = \frac{\bar{\mathbf{V}}_{1n}}{\sqrt{3}\,\bar{\mathbf{I}}_0} = 3.80 + j14.34 = Z_0\angle\varphi_0 = 14.67\angle 77.88°\ \Omega$

$R_0 = \frac{Z_0}{\cos\varphi_0} = 70\ \Omega$ $\quad X_0 = \frac{Z_0}{\sin\varphi_0} = 15\ \Omega$

$\bar{\mathbf{I}}_{12n} = \bar{\mathbf{I}}_{1n} - \bar{\mathbf{I}}_0 = 162.55 - j38.05 = I_{12n}\angle -\varphi_{12n} = 166.94\angle -13.17°\ \text{A}$ $\quad R_{12} = \frac{C_n s_n \Omega_0}{3I_{12n}^2} = 30\ \text{m}\Omega$

$P_{epn} = P_{en} - P_n - P_0 = 6985$ W $\quad R = \frac{P_{epn}}{3I_{12n}^2} = 84$ mΩ $\quad R_1 = R - R_{12} = 54$ mΩ

$X = \tan\varphi_{12n}\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s_n}\right) = 300$ mΩ

$C_a = \frac{R_{12}}{\Omega_0}\frac{V_{1n}^2}{R^2 + X^2} = 427$ Nm $\quad \frac{C_a}{C_n} = 0.44$

$\dot{\mathbf{Z}}_{1cc} = R + jX = 84 + j300 = 311\angle 74.41°$ mΩ

$\bar{\mathbf{I}}_{12cc} = \frac{\overline{\mathbf{V}}_{1n}}{\sqrt{3}\,\dot{\mathbf{Z}}_{1cc}} = 189.56 - j679.60 = 705.54\angle -74.41°$ A

$\bar{\mathbf{I}}_{1cc} = \bar{\mathbf{I}}_{12cc} + \bar{\mathbf{I}}_0 = 192.70 - j694.23 = I_{1cc}\angle -\varphi_{1cc} = 720.48\angle -74.49°$ A $\quad \frac{I_{1cc}}{I_{1n}} = 4.14$

MACCHINE ELETTRICHE - ESERCIZI	**27 agosto 2009**
Cognome Nome: _____	Matricola: _____
Elettrotecnica |_| Energetica |_| Elettrica V.O. |_|	6 / 7 CFU |_| 9 CFU |_|

ESERCIZIO N.1

Un trasformatore monofase presenta i seguenti dati:

tensione nominale primaria	V_{1n}	= 3 kV
fattore di potenza a vuoto	$\cos\varphi_0$	= 0.250
fattore di potenza di corto circuito	$\cos\varphi_{cc}$	= 0.450

La macchina, alimentata a tensione nominale, funziona su di un carico puramente resistivo, presentando perdite nel ferro e nel rame pari rispettivamente a P_{Fe} = 150 W e P_{Cu} = 119 W.
Quando il carico è stato inserito, la tensione secondaria del trasformatore è diminuita dell' 1.12 % mentre la corrente erogata è risultata pari al 70.9% di quella nominale.
Determinare, con riferimento al circuito equivalente semplificato:

- corrente e perdite a vuoto ($i_{0\%}$, $p_{0\%}$);
- tensione e perdite di corto circuito ($v_{cc\%}$, $p_{cc\%}$);
- rendimento η e corrente assorbita I_1 nelle condizioni di carico considerate.

ESERCIZIO N.2

Un motore asincrono trifase è caratterizzato dai seguenti dati:

tensione nominale	V_{1n}	= 240 V
numero di poli	$2p$	= 4
frequenza	f	= 60 Hz
coppia di avviamento	C_a	= 19 Nm
coppia massima	C_M	= 52 Nm

Le prove eseguite sulla macchina hanno fornito i seguenti risultati:

	Prova a vuoto	*Prova a rotore bloccato*
tensione di prova	V_{1n}	V_{1n}
corrente assorbita	3.23 A	55.83 A
potenza assorbita	121 W	7024 W

Determinare:

- i parametri del circuito equivalente semplificato (R_0, X_0, R_1, R_{12}, X);
- il rendimento del motore nel funzionamento alla coppia massima.

Valutazione esercizi	1)_____ 2)_____ Totale_____

RISULTATI

ESERCIZIO N.1

Corrente e perdite a vuoto	$i_{0\%}$= 4.00 %	$p_{0\%}$= 1.00 %
Tensione e perdite di corto circuito	$v_{cc\%}$= 3.51 %	$p_{cc\%}$= 1.58 %
Rendimento	η = 0.975	
Corrente assorbita	I_1= 3.6 A	

ESERCIZIO N.2

Resistenza e reattanza a vuoto	R_0 = 476 Ω	X_0 = 43 Ω	
Resistenze e reattanza di corto circuito	R_1 = 0.40 Ω	R_{12} = 0.43 Ω	X = 2.50 Ω
Rendimento	η_M = 0.709		

ESERCIZIO N.1

$I_0 = \dfrac{P_{Fe}}{V_{1n} \cdot \cos\varphi_0} = 0.200$ A $\qquad \bar{\mathbf{I}}_0 = I_0 \angle -\varphi_0 = 0.200\angle -75.52° = 0.050 - j0.194$ A

$\Delta V_{12} = \dfrac{\Delta v_{\%} \cdot V_{1n}}{100} = 33.60$ V $\qquad \Delta V_{12} = R' \cdot I_{12}, \quad P_{Cu} = R' \cdot I_{12}^2 \quad \Rightarrow \quad I_{12} = \dfrac{P_{Cu}}{\Delta V_{12}} = 3.54$ A

$I_{1n} = \dfrac{I_{12}}{\alpha} = 4.99$ A $\qquad P_n = V_{1n} I_{1n} = 14.99$ kVA

$R' = \dfrac{P_{Cu}}{I_{12}^2} = 9.49\ \Omega \qquad X' = R' \tan\varphi_{cc} = 18.83\ \Omega$

$\dot{\mathbf{Z}}_{1cc} = R' + jX' = 9.49 + j18.83 = 21.08\angle 63.26°\ \Omega \qquad V_{1cc} = Z_{1cc} \cdot I_{1n} = 105.31$ V

$i_{0\%} = \dfrac{I_0}{I_{1n}} 100 = 4.0\% \qquad P_0 = \dfrac{P_{Fe}}{v_1^2}$ 150 W $\qquad p_{0\%} = \dfrac{P_0}{P_n} 100 = 1.0\%$

$v_{cc\%} = \dfrac{V_{1cc}}{V_n} 100 = 3.51\% \qquad P_{cc} = \dfrac{P_{Cu}}{\alpha^2} = 237$ W $\qquad p_{cc\%} = \dfrac{P_{cc}}{P_n} 100 = 1.58\%$

$V_{12} = V_1 - \Delta V_{12} = 2966$ V $\qquad R_{1e} = \dfrac{V_{12}}{I_{12}} = 838\ \Omega \qquad P = V_{12} I_{12} = 10506$ W

$\eta = \dfrac{P}{P + P_{Fe} + P_{Cu}} = 0.975 \qquad \dot{\mathbf{Z}}_{1cce} = \dot{\mathbf{Z}}_{1cc} + \dot{\mathbf{Z}}_{1e} = 847 + j18.83 = Z_{1cce} \angle\varphi_{1cce} = 847\angle 1.27°\ \Omega$

$\bar{\mathbf{I}}_{12} = I_{12} \angle -\varphi_{1cce} = 3.54\angle -1.27° = 3.54 - j0.08$ A

$\bar{\mathbf{I}}_1 = \bar{\mathbf{I}}_{12} + \bar{\mathbf{I}}_0 = 3.59 - j0.27 = I_1 \angle -\varphi_1 = 3.60\angle -4.34°$ A

ESERCIZIO N.2

$n_0 = \dfrac{60 \cdot f}{p} = 1800$ giri/ min $\qquad \Omega_0 = \dfrac{2\pi n_0}{60} = 188.50$ s^{-1}

A vuoto

$\cos\varphi_0 = \dfrac{P_0}{\sqrt{3} V_{1n} I_0} = 0.090 \qquad \bar{\mathbf{I}}_0 = I_0 \angle -\varphi_0 = 3.23\angle -84.83° = 0.291 - j3.217$ A

$\dot{\mathbf{Z}}_0 = \dfrac{\overline{\mathbf{V}}_{1n}}{\sqrt{3}\,\bar{\mathbf{I}}_0} = 3.87 + j42.72 = Z_0 \angle\varphi_0 = 42.90\angle 84.83°\ \Omega$

$R_0 = \dfrac{Z_0}{\cos\varphi_0} = 476\ \Omega \qquad X_0 = \dfrac{Z_0}{\sin\varphi_0} = 43\ \Omega$

A rotore bloccato

$\cos\varphi_{1cc} = \dfrac{P_{cc}}{\sqrt{3} V_{1n} I_{1cc}} = 0.303 \qquad \bar{\mathbf{I}}_{1cc} = I_{1cc} \angle -\varphi_{1cc} = 55.83\angle -72.38° = 16.90 - j53.21$ A

$\bar{\mathbf{I}}_{12cc} = \bar{\mathbf{I}}_{1cc} - \bar{\mathbf{I}}_0 = 16.60 - j50.00 = I_{12cc} \angle -\varphi_{12cc} = 52.68\angle -71.63°$ A

$P_{ep2} = P_t = C_a \Omega_0 = 3581$ W $\qquad P_{ep1} = P_{cc} - P_0 - P_{ep2} = 3322$ W

$R_1 = \dfrac{P_{ep1}}{3 I_{12cc}^2} = 0.40\ \Omega \qquad R_{12} = \dfrac{P_{ep2}}{3 I_{12cc}^2} = 0.43\ \Omega \qquad R = R_1 + R_{12} = 0.83\ \Omega$

$$Z_{1cc} = \frac{V_{1n}}{\sqrt{3}\, I_{12cc}} = 2.63\ \Omega \qquad X = \sqrt{Z_{1cc}^2 - R^2} = 2.50\ \Omega$$

Alla coppia massima

$$Z = \sqrt{R_1^2 + X^2} = 2.53\ \Omega \qquad s_M = \frac{R_{12}}{Z} = 0.170 \qquad n_M = n_0(1 - s_M) = 1494 \text{ giri/ min}$$

$$\Omega_M = \frac{2\pi n_M}{60} = 156.42 \text{ s}^{-1} \qquad P_m = C_M \Omega_M = 8134 \text{ W}$$

$$I_{12M} = \sqrt{\frac{C_M s_M \Omega_0}{3R_{12}}} = 35.95 \text{ A} \qquad P_{ep} = 3RI_{12M}^2 = 3215 \text{ W} \qquad P_p = P_{ep} + P_0 = 3336 \text{ W}$$

$$\eta_M = \frac{P_m}{P_m + P_p} = 0.709$$

MACCHINE ELETTRICHE - ESERCIZI			**16 settembre 2009**	
Cognome Nome: _____			Matricola: _____	
Elettrotecnica |_|	Energetica |_|	Elettrica V.O. |_|	6 / 7 CFU |_|	9 CFU |_|

ESERCIZIO N.1

Un trasformatore trifase (P_n = 160 kVA, V_{1n} = 15 kV, V_{2n} = 400 V) è caratterizzato dai seguenti dati percentuali:

tensione e perdite di corto circuito	$v_{cc\%}$	= 4.50 %	$p_{cc\%}$	= 1.935 %
corrente e perdite a vuoto	$i_{0\%}$	= 2.50 %	$p_{0\%}$	= 0.675 %

Il trasformatore è connesso a un carico ohmico-induttivo ($\cos\varphi_e$=0.992) e funziona con gradi di carico $\alpha = \alpha_P$ = 0.827. Valutare:

- l'impedenza di carico;
- la tensione primaria di alimentazione, verificando l'errore che si commette usando la formulazione approssimata;
- la corrente assorbita al primario;
- il rendimento percentuale.

ESERCIZIO N.2

Un motore asincrono trifase presenta i seguenti dati nominali:

numero di poli	$2p$	= 2
frequenza	f	= 50 Hz
tensione	V_{1n}	= 380 V
corrente	I_{1n}	= 69.36 A
fattore di potenza	$\cos\varphi_{1n}$	= 0.881
velocità	n_n	= 2910 giri/min

Il motore, alimentato alla tensione nominale, produce la coppia massima C_M = 208 Nm alla velocità n_M =2701 giri/min. Sapendo che le perdite nel rame di statore sono uguali a quelle nel rame di rotore, determinare:

- la corrente a vuoto, in modulo e fase;
- il rendimento alla velocità di 2880 giri/min.

Valutazione esercizi	1)_____ 2)_____
	Totale_____

RISULTATI

ESERCIZIO N.1

Impedenza di carico	$Z_e = 1.21\ \Omega$	$\varphi_e = 7.25°$
Tensione primaria	$V_1 = 15309$ V	$V_1 \approx 15302$ V
Corrente primaria	$I_1 = 5.16$ A	$\varphi_1 = -10.60°$
Rendimento	$\eta_{\%} = 97.59$ %	

ESERCIZIO N.2

Corrente a vuoto	$I_0 = 15.87$ A	$\varphi_1 = -81.78°$
Rendimento	$\eta = 0.895$	

ESERCIZIO N.1

$I_{1n} = \dfrac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_{1n}} = 6.16 \text{ A}$ $\qquad K = \dfrac{V_{1n}}{V_{2n}} = 37.5$

$I_{0n} = \dfrac{i_{0\%} \cdot I_{1n}}{100} = 0.154 \text{ A}$ $\qquad Z_0 = \dfrac{V_{1n}}{\sqrt{3} I_{0n}} = 56.25 \text{ k}\Omega$ $\qquad \cos\varphi_0 = \dfrac{p_{0\%}}{i_{0\%}} = 0.270$

$\dot{\mathbf{Z}}_0 = Z_0 \angle \varphi_0 = 56.25 \angle 74.34° = 15.19 + j54.16 \text{ k}\Omega$

$V_{1cc} = \dfrac{v_{cc\%} \cdot V_{1n}}{100} = 675 \text{ V}$ $\qquad Z_{1cc} = \dfrac{V_{1cc}}{\sqrt{3} I_{1n}} = 63.28 \ \Omega$ $\qquad \cos\varphi_{cc} = \dfrac{p_{cc\%}}{v_{cc\%}} = 0.430$

$\dot{\mathbf{Z}}_{1cc} = Z_{1cc} \angle \varphi_{cc} = 63.28 \angle 64.53° = R' + jX' = 27.21 + j57.13 \ \Omega$

$\alpha = \alpha_P \quad \Rightarrow \quad V_{12} = V_{1n} = 15000 \text{ V}$ $\qquad I_{12} = \alpha \cdot I_{1n} = 5.09 \text{ A}$ $\qquad Z_{1e} = \dfrac{V_{12}}{\sqrt{3} I_{12}} = 1700 \ \Omega$

$\dot{\mathbf{Z}}_{1e} = Z_{1e} \angle \varphi_e = 1700 \angle 7.25° = 1687 + j215 \ \Omega$ $\qquad Z_e = \dfrac{Z_{1e}}{K^2} = 1.21 \ \Omega$

$\dot{\mathbf{Z}}_{1cce} = \dot{\mathbf{Z}}_{1cc} + \dot{\mathbf{Z}}_{1e} = 1714 + j272 = Z_{1cce} \angle \varphi_{1cce} = 1735 \angle 9.01° \ \Omega$

$\bar{\mathbf{I}}_{12} = I_{12} \angle -\varphi_{1cce} = 5.09 \angle -9.01° = 5.03 - j0.80 \text{ A}$ $\qquad V_1 = \sqrt{3} Z_{1cce} I_{12} = 15309 \text{ V}$

$\Delta V_{12} \approx \sqrt{3} I_{12} (R' \cos\varphi_e + X' \sin\varphi_e) = 302 \text{ V}$ $\qquad V_1 \approx V_{12} + \Delta V_{12} = 15302 \text{ V}$

$\bar{\mathbf{I}}_0 = \dfrac{\overline{\mathbf{V}}_1}{\sqrt{3} \dot{\mathbf{Z}}_0} = 0.042 - j0.151 \text{ A}$ $\qquad \bar{\mathbf{I}}_1 = \bar{\mathbf{I}}_{12} + \bar{\mathbf{I}}_0 = 5.07 - j0.95 = I_1 \angle -\varphi_1 = 5.16 \angle -10.60° \text{ A}$

$\eta_{\%} = \dfrac{\sqrt{3} V_{12} I_{12} \cos\varphi_e}{\sqrt{3} V_1 I_1 \cos\varphi_1} 100 = 97.59\%$

ESERCIZIO N.2

$n_0 = \dfrac{60 \cdot f}{p} = 3000 \text{ giri/ min}$ $\qquad \Omega_0 = \dfrac{2\pi n_0}{60} = 314.16 \text{ s}^{-1}$

$s_n = \dfrac{n_0 - n_n}{n_0} = 0.03$ $\qquad s_M = \dfrac{n_0 - n_M}{n_0} = 0.0997$

$P_{ep1} = P_{ep2} \quad \Rightarrow \quad R_1 = R_{12} \quad \Rightarrow \quad s_M = \dfrac{R_{12}}{Z} = \dfrac{R_1}{Z} \quad \Rightarrow \quad C_M = \dfrac{V_{1n}^2}{2\Omega_0 Z \left(1 + \dfrac{R_1}{Z}\right)} \quad \Rightarrow \quad C_M = \dfrac{V_{1n}^2}{2\Omega_0 Z (1 + s_M)}$

$Z = \dfrac{V_{1n}^2}{2\Omega_0 C_M (1 + s_M)} = 1.005 \ \Omega$ $\qquad R_1 = R_{12} = s_M Z = 0.100 \ \Omega$ $\qquad X = \sqrt{Z^2 - R_1^2} = 1.000 \ \Omega$

$\bar{\mathbf{I}}_{1n} = I_{1n} \angle -\varphi_{1n} = 69.36 \angle -28.24° = 61.11 - j32.82 \text{ A}$ $\qquad \dot{\mathbf{Z}}_{fn} = \left(R_1 + \dfrac{R_{12}}{s_n}\right) + jX = 3.44 + j1.00 \ \Omega$

$\bar{\mathbf{I}}_{12n} = \dfrac{\overline{\mathbf{V}}_{1n}}{\sqrt{3} \dot{\mathbf{Z}}_{fn}} = 58.84 - j17.11 \text{ A}$ $\qquad \bar{\mathbf{I}}_0 = \bar{\mathbf{I}}_{1n} - \bar{\mathbf{I}}_{12n} = 2.27 - j15.71 = I_0 \angle -\varphi_0 = 15.87 \angle -81.78° \text{ A}$

$s = \dfrac{n_0 - n}{n_0} = 0.04$ $\qquad Z_f = \sqrt{\left(R_1 + \dfrac{R_{12}}{s}\right)^2 + X^2} = 2.79 \ \Omega$ $\qquad I_{12} = \dfrac{V_{1n}}{\sqrt{3} Z_f} = 78.66 \text{ A}$

$P_m = 3R_{12} \dfrac{1 - s}{s} I_{12}^2 == 44616 \text{ W}$ $\qquad P_0 = \sqrt{3} V_{1n} I_0 \cos\varphi_0 = 1494 \text{ W}$

$P_{ep} = 3(R_1 + R_{12}) I_{12}^2 = 3718 \text{ W}$ $\qquad \eta = \dfrac{P_m}{P_m + P_0 + P_{ep}} = 0.895$