MACCHINE ELETTRICHE	**16 gennaio 2025**
Cognome Nome: _____	Matricola: _____

ESERCIZIO

Di un trasformatore trifase si conoscono potenza, tensioni e frequenza nominali, rispettivamente pari a $P_n = 400$ kVA, $V_{1n} = 20$ kV, $V_{2n} = 400$ V, $f = 50$ Hz; si conoscono inoltre i valori percentuali di corrente e perdite a vuoto $i_0 = 1.25\%$, $p_0 = 0.24\%$ e di tensione e perdite in corto circuito $v_{cc} = 4.1\%$, $p_{cc} = 0.32\%$. Sapendo che il trasformatore alimenta un carico equilibrato erogando una potenza attiva $P_e = 270$ kW con una corrente $I_2 = 481$ A ed una tensione ai morsetti $V_2 = 395$ V, si chiede di determinare:

- i parametri del ramo derivato del circuito equivalente semplificato riferiti al primario R_0, X_0;
- i parametri del ramo serie del circuito equivalente semplificato riferiti al primario R', X';
- la tensione di alimentazione primaria del trasformatore V_1;
- il modulo I_1 e la fase φ_1 della corrente assorbita al primario rispetto alla tensione V_1;
- il rendimento del trasformatore in tali condizioni di carico.

TEORIA

1) Potenze e coppia nella macchina asincrona per **s < 0**: ipotesi di partenza, circuito equivalente di riferimento e convenzioni di segno su potenze e coppia, identificazione del tipo di funzionamento in base alle considerazioni sul segno delle espressioni (da riportare) di P_e, P_m e C, punti notevoli, andamento della caratteristica meccanica, zona di funzionamento stabile.

2) Diagramma polare della macchina sincrona a rotore liscio: ipotesi, costruzione del diagramma vettoriale, espressioni di potenza attiva, reattiva e coppia in funzione dell'angolo di carico, influenza della corrente di eccitazione e della coppia esterna, zone di funzionamento a $P_e \lesseqgtr 0$, $Q \lesseqgtr 0$, stabilità.

RITIRATO |_| Firma _____

Valutazione esercizio	1)_____
Valutazione teoria	1)_____ 2)_____

DATI

$P_n = 400\text{kVA}$ $V_{1n} = 20\text{kV}$ $V_{2n} = 400\text{V}$ $f = 50\text{Hz}$ $i_0 = 1.25\%$ $p_0 = 0.24\%$ $v_{\text{cc}} = 4.1\%$

$p_{\text{cc}} = 0.32\%$ $P_e = 270\text{kW}$ $V_2 = 395\text{V}$ $I_2 = 481\text{A}$

SOLUZIONE

Grandezze nominali

$I_{1n} = \frac{P_n}{\sqrt{3}\cdot V_{1n}} = 11.55\text{A}$ $k = \frac{V_{1n}}{V_{2n}} = 50.0$ $I_{2n} = k \cdot I_{1n} = 577.35\text{A}$

Parametri del ramo derivato

$\cos\varphi_0 = \frac{p_0}{i_0} = 0.192$ $\varphi_0 = \arccos(\cos\varphi_0) = 78.93\text{A}$ $I_0 = i_0 \cdot I_{1\text{n}} = 0.144\text{A}$ $P_0 = p_0 \cdot P_n = 960\text{W}$

$I_a = I_0 \cdot \cos\varphi_0 = 0.0277\text{ A}$ $I_\mu = I_0 \cdot \sin(\varphi_0) = 0.142°$ $\bar{\mathbf{I}}_0 = I_0 \cdot e^{-i\cdot\varphi_0} = (0.028 - j0.142)\text{A}$

$R_0 = \frac{V_{1\text{n}}}{\sqrt{3}\cdot I_a} = 416.7\text{k}\Omega$ $X_0 = \frac{V_{1\text{n}}}{\sqrt{3}\cdot I_\mu} = 81.52\text{k}\Omega$

Parametri del ramo serie

$\cos\varphi_{cc} = \frac{p_{cc}}{v_{cc}} = 0.078$ $Z_{1cc} = \frac{v_{cc}\cdot V_{1n}}{\sqrt{3}\cdot I_{1n}} = 41\Omega$ $\varphi_{cc} = \cos^{-1}(\cos\varphi_{cc}) = 85.52°$

$R' = Z_{1cc} \cdot \cos\varphi_{cc} = 3.2\Omega$ $X' = Z_{1cc} \cdot \sin(\varphi_{cc}) = 40.88\Omega$

Parametri del carico riportati al primario

$I_{12} = \frac{I_2}{k} = 9.62\text{A}$ $\cos\varphi_e = \frac{P_e}{\sqrt{3}\cdot V_2\cdot I_2} = 0.821$ $\varphi_e = \cos^{-1}(\cos\varphi_e) = 34.87°$ $V_{12} = k \cdot V_2 = 19750\text{V}$

$Z_{1e} = \frac{V_{12}}{\sqrt{3}\cdot I_{12}} = 1.185\text{k}\Omega$ $R_{1e} = Z_{1e} \cdot \cos\varphi_e = 0.973\text{k}\Omega$ $X_{1e} = Z_{1e} \cdot \sin(\varphi_e) = 0.678\text{k}\Omega$

Tensione di alimentazione e corrente assorbita al primario

$\dot{\mathbf{Z}}_{1t} = (R' + R_{1e}) + j(X' + X_{1e}) = (975.71 + j718.51)\Omega$ $\varphi_{12} = \arg(\dot{\mathbf{Z}}_{1t}) = 36.37°$

$V_1 = \sqrt{3} \cdot |\dot{\mathbf{Z}}_{1t}| \cdot I_{12} = 20190\text{V}$ $I_{12} = I_{12} \cdot e^{-i\cdot\varphi_{12}} = (7.75 - j5.70)\text{A}$

$\bar{\mathbf{I}}'_0 = \bar{\mathbf{I}}_0 \cdot \left(\frac{V_1}{V_{1\text{n}}}\right) = (0.028 - j0.143)\text{A}$ $\bar{\mathbf{I}}_1 = \bar{\mathbf{I}}'_0 + \bar{\mathbf{I}}_{12} = (7.77 - j5.85)\text{A}$

$|\bar{\mathbf{I}}_1| = 9.73\text{A}$ $\varphi_1 = -\arg(\bar{\mathbf{I}}_1) = 36.95°$

Rendimento

$P'_0 = P_0 \cdot \left(\frac{V_1}{V_{1n}}\right)^2 = 978.33\text{W}$ $P_{ep} = 3 \cdot R' \cdot |I_{12}|^2 = 888.43\text{W}$ $\eta = \frac{P_e}{P_e + P_{ep} + P'_0} = 99.31\%$

oppure $\eta = \frac{P_e}{\sqrt{3}\cdot V_1 \cdot |\bar{\mathbf{I}}_1| \cdot \cos(\varphi_1)} = 99.31\%$

Soluzione alternativa per il calcolo di V_1

$\Delta V_{12} = \sqrt{3}\bar{\mathbf{I}}_{12}(R'\cos\varphi_e + X'\sin\varphi_e) = 433.1\text{V}$ $V_1 = V_{12} + \Delta V_{12} = 20183.1\text{V}$

Differenza rispetto alla soluzione esatta:

$$\varepsilon = \frac{20190 - 20183.1}{20190} = 0.0342\%$$

MACCHINE ELETTRICHE	**28 gennaio 2025**
Cognome Nome: _____	Matricola: _____

ESERCIZIO

Un motore asincrono trifase ($\boldsymbol{2p = 4}$ **poli**) con tensione $\boldsymbol{V_{1n} = 400}$ **V** e frequenza $\boldsymbol{f = 50}$ **Hz** nominali, con avvolgimento di statore collegato **a triangolo**, è stato sottoposto ad una serie di prove che hanno fornito i seguenti dati:

- misura di resistenza tra due morsetti dell'avvolgimento di statore $\boldsymbol{R_{AB} = 0.15\ \Omega}$;
- prova a vuoto: corrente assorbita $\boldsymbol{I_0 = 33.1}$ **A**, potenza attiva assorbita $\boldsymbol{P_0 = 2.1}$ **kW**;
- prova a rotore bloccato con tensione di alimentazione ridotta $\boldsymbol{V_{cc} = 95.7\ V}$: corrente assorbita $\boldsymbol{I_{1cc} = 120\ A}$, potenza attiva assorbita $\boldsymbol{P_{acc} = 5.7}$ **kW**;
- funzionamento in condizioni nominali: corrente assorbita $\boldsymbol{I_{1n} = 67.4\ A}$, potenza elettrica attiva assorbita $\boldsymbol{P_{en} = 38.32}$ **kW.**

Determinare
- i parametri del circuito equivalente semplificato <u>con collegamento a stella</u> R_0, X_0, R_1, R_{12} e X;
- valori nominali di velocità, potenza e rendimento n_n P_n e η_n.

TEORIA

1) Variazione di tensione da vuoto a carico in un trasformatore monofase: diagramma vettoriale per una generica condizione di carico, calcolo dell'espressione approssimata, effetti della variazione del fattore di potenza del carico, espressione in termini relativi.

2) Diagramma delle due reattanze di una macchina sincrona a poli sporgenti: ipotesi iniziali per il tracciamento, definizione delle componenti della f.m.m. di reazione di indotto e delle reattanze corrispondenti, procedimento di costruzione del diagramma vettoriale in condizioni di carico note, equazione della tensione.

RITIRATO |_| Firma _____

SOLO LAUREANDI |_| Sessione _____ Chiedo la correzione prioritaria del compito, accettando il voto conseguito e chiedendo cortesemente la verbalizzazione anticipata

Firma _____

Valutazione esercizio	1)_____
Valutazione teoria	1)_____ 2)_____

DATI D'INGRESSO

$V_n := 400\text{V}$ $f := 50\text{Hz}$ $p := 2$ $I_0 := 33.1\text{A}$ $P_0 := 2100\text{W}$ $R_{AB} := 0.44\Omega$
$V_{cc} := 95.7\text{V}$ $I_{1cc} := 120\text{A}$ $P_{acc} := 5.7\text{kW}$ $P_{en} := 38.32\text{kW}$ $I_{1n} := 67.4\text{A}$

SOLUZIONE

○ *Fattore di potenza a vuoto*

$\cos\varphi_0 := \frac{P_0}{\sqrt{3}\cdot V_n\cdot I_0} = 0.0916$

○ *Sfasamento*

$\varphi_0 := \arccos(\cos\varphi_0) = 84.75°$

○ *Corrente a vuoto (fasore)*

$I_0 := I_0 \cdot e^{-i\cdot\varphi_0} = (3.031 - j32.96)\text{A}$

○ *Impedenza a vuoto*

$Z_0 := \frac{V_n}{\left(\sqrt{3}\cdot|I_0|\right)} = 6.977\Omega$

○ *Componente reattiva*

$X_0 := \frac{Z_0}{\sin(\varphi_0)} = 7.006\Omega$

○ *Componente resistiva*

$R_0 := \frac{Z_0}{\cos\varphi_0} = 76.19\Omega$

○ *Velocità sincrona*

$\Omega_0 := \frac{2\cdot\pi\cdot f}{p} = 1500\text{rpm}$

○ *Resistenza di una fase di statore*

$R_1 := \frac{R_{AB}}{2} = 75\text{m}\Omega$

– ***Analisi a rotore bloccato e determinazione parametri R_{12} e X***

○ *Fattore di potenza*

$\cos\varphi_{1cc} := \frac{P_{acc}}{\sqrt{3}\cdot V_{cc}\cdot I_{1cc}} = 0.2866$

○ *sfasamento*

$\varphi_{1cc} := \arccos(\cos\varphi_{1cc}) = 73.35°$

○ *Corrente assorbita a rotore bloccato*

$I_{1cc} := I_{1cc} \cdot e^{-i\cdot\varphi_{1cc}} = (34.39 - j115.0)\text{A}$

○ *Corrente a vuoto (rot. bloccato)*

$I_{0cc} := \frac{V_{cc}}{V_n}\cdot I_0 = (0.7252 - j7.886)\text{A}$

○ *Perdite a vuoto (rot. bloccato)*

$P_{0cc} := \left(\frac{V_{cc}}{V_n}\right)^2 \cdot P_0 = 120.2\text{W}$

○ *Corrente nel ramo serie (rot. bloccato)*

$I_{12cc} := I_{1cc} - I_{0cc} = (33.66 - j107.1)\text{A}$

○ *Potenza trasmessa = perdite rotoriche a rotore bloccato*

$P_{tcc} := P_{acc} - P_{0cc} - 3\cdot R_1\cdot|I_{12cc}|^2 = 2745\text{W}$

○ *Resistenza di rotore*

$R_{12} := \frac{P_{tcc}}{3\cdot|I_{12cc}|^2} = 72.62\text{m}\Omega$

○ *Impedenza ramo serie a rotore bloccato*

$Z_{1cc} := \frac{V_{cc}}{\sqrt{3}\cdot I_{12cc}} = (0.1476 + j0.4696)\Omega$

○ *Resistenza rotorica (alt.)*

$R_{12} := \text{Re}(Z_{1cc}) - R_1 = 72.62\text{m}\Omega$

○ *Reattanza di dispersione*

$X := \text{Im}(Z_{1cc}) = 0.4696\Omega$

– ***Analisi in condizioni nominali***

○ *Fattore di potenza*

$\cos\varphi_{1n} := \frac{P_{en}}{\sqrt{3}\cdot V_n\cdot I_{1n}} = 0.8206$

○ *sfasamento*

$\varphi_{1n} := \arccos(\cos\varphi_{1n}) = 34.85°$

○ *Corrente assorbita (fasore)*

$I_{1n} := I_{1n} \cdot e^{-i\cdot\varphi_{1n}} = (55.31 - j38.52)\text{A}$

○ *Corrente nel ramo serie*

$I_{12n} := I_{1n} - I_0 = (52.28 - j5.556)\text{A}$

○ *Impedenza del ramo serie*

$Z_{1fn} := \frac{V_n}{\sqrt{3}\cdot I_{12n}} = (4.368 + j0.4642)\Omega$

○ *Resistenza del ramo serie*

$\text{Re}\left(Z_{1fn}\right) = R_1 + \frac{R_{12}}{s_n}$

○ *Scorrimento*

$s_n := \frac{R_{12}}{\text{Re}(Z_{1fn}) - R_1} = 1.692\%$

○ *Velocità*

$\Omega_n := \Omega_0\cdot(1 - s_n) = 1475\text{rpm}$

○ *Potenza meccanica*

$P_n := 3\cdot R_{12}\cdot\frac{1-s_n}{s_n}\cdot|I_{12n}|^2 = 35.00\text{kW}$

○ *Rendimento*

$\eta_n := \frac{P_n}{P_{en}} = 91.33\%$

– ***Analisi in condizioni nominali (con bilancio potenza)***

○ *Potenza reattiva assorbita*

$Q_{en} := P_{en}\cdot\tan(\varphi_{1n}) = 26685\text{W}$

○ *Potenza reattiva a vuoto*

$Q_0 := P_0\cdot\tan(\varphi_0) = 22836\text{W}$

○ *Corrente ramo serie*

$I_{12n} := \sqrt{\frac{Q_{en} - Q_0}{3\cdot X}} = 52.272\text{A}$

○ *Potenza attiva ramo serie*

$3\cdot\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s_n}\right)\cdot {I_{12n}}^2 = P_{en} - P_0$

○ *Resistenza del ramo serie*

$R_1 + \frac{R_{12}}{s_n} = \frac{P_{en} - P_0}{3\cdot {I_{12n}}^2} = 4.419\Omega$

○ *Scorrimento*

$s_n := \frac{R_{12}}{\frac{P_{en} - P_0}{3\cdot {I_{12n}}^2} - R_1} = 1.672\%$

○ *Velocità*

$\Omega_n := \Omega_0\cdot(1 - s_n) = 1475\text{rpm}$

○ *Potenza meccanica*

$P_n := 3\cdot R_{12}\cdot\frac{1-s_n}{s_n}\cdot|I_{12n}|^2 = 35.01\text{kW}$

○ *Rendimento*

$\eta_n := \frac{P_n}{P_{en}} = 91.36\%$

MACCHINE ELETTRICHE	**18 febbraio 2025**
Cognome Nome: _____	Matricola: _____

ESERCIZIO

Un trasformatore trifase ($P_n = 630$ kVA, $V_{1n} = 15$ kV, $V_{2n} = 400$ V) nella prova a vuoto assorbe una corrente ed una potenza attiva pari a $i_{0\%} = 1.8\%$ e $p_{0\%} = 0.45\%$. Con primario alimentato alla tensione V_{1n}, viene collegato un carico con fattore di potenza $cos\varphi_{eA}$ =0.81 che assorbe la potenza $P_{eA} = 400$ kW producendo una variazione di tensione da vuoto a carico Δv_A =2.41%. In tali condizioni il trasformatore assorbe una potenza attiva pari a P_{1A} =405 kW.

Con riferimento al circuito equivalente semplificato (collegamento a stella), determinare:

- i parametri R_0, X_0;
- l'impedenza di carico $\dot{Z}_{eA} = R_{eA} + jX_{eA}$
- la resistenza R' e la reattanza X';
- la tensione e le perdite di cortocircuito $v_{cc\%}$ e $p_{cc\%}$;
- la corrente assorbita I_{1A} ed il fattore di potenza $cos\varphi_{1A}$.

TEORIA

1) Forza magnetomotrice prodotta da un avvolgimento distribuito di tipo aperto trifase: espressione del campo magnetico rotante relativo alla fondamentale a partire dalle espressioni delle f.m.m. delle singole fasi, velocità di rotazione, ampiezze e velocità delle f.m.m. risultanti relative alle armoniche di ordine superiore.

1) Circuito equivalente di una fase della macchina asincrona a rotore avvolto
   - definizione, significato e considerazioni sui valori dei parametri di tale circuito;
   - considerazioni relative al funzionamento a vuoto, in cortocircuito e in condizioni generiche;
   - ridefinizione delle perdite a vuoto e conseguenze sul significato dei parametri del circuito;
   - passaggio al circuito equivalente semplificato: rappresentazione e considerazioni sulla semplificazione adottata (differenze rispetto al caso del trasformatore).

RITIRATO |_| Firma _____

SOLO LAUREANDI |_| Sessione _____ Chiedo la correzione prioritaria del compito, accettando il voto conseguito e chiedendo cortesemente la verbalizzazione anticipata

Firma _____

Valutazione esercizio	1)_____
Valutazione teoria	1)_____ 2)_____

DATI D'INGRESSO

$P_n := 630\ \text{kVA}$ $V_{1n} := 15\ \text{kV}$ $V_{2n} := 400\ \text{V}$ $p_0 := 0,45\ \%$ $i_0 := 1,8\ \%$

$P_{eA} := 400\ \text{kW}$ $cos\varphi_{eA} := 0,81$ $\Delta v_A := 2,41\ \%$ $P_{1A} := 405\ \text{kW}$ $\alpha_B := 0,8$

SOLUZIONE

Valori nominali

$K := \frac{V_{1n}}{V_{2n}} = 37,5$ $I_{1n} := \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_{1n}} = 24,25\ \text{A}$ $I_{2n} := K \cdot I_{1n} = 909,33\ \text{A}$

Vettore della corrente a vuoto

$P_0 := p_0 \cdot P_n = 2835\ \text{W}$ $I_0 := i_0 \cdot I_{1n} = 0,44\ \text{A}$ $cos\varphi_0 := \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot V_{1n} \cdot I_0} = 0,25$

$\varphi_0 := \text{acos}\left(cos\varphi_0\right) = 75,52\ °$

$I_a := I_0 \cdot cos\varphi_0 = 0,11\ \text{A}$ $I_\mu := I_0 \cdot \sin\left(\varphi_0\right) = 0,42\ \text{A}$ $I_0 := I_0 \cdot \mathbf{e}^{-\mathrm{i} \cdot \varphi_0} = (0,109 - 0,423 \cdot \mathrm{i})\ \text{A}$

Parametri ramo derivato

$R_0 := \frac{V_{1n}}{\sqrt{3} \cdot I_a} = 79,37\ \text{k}\Omega$ $X_0 := \frac{V_{1n}}{\sqrt{3} \cdot I_\mu} = 20,49\ \text{k}\Omega$

Grandezze di carico

$V_{12A} := V_{1n} \cdot \left(1 - \Delta v_A\right) = 14638,5\ \text{V}$ $I_{12A} := \frac{P_{eA}}{\sqrt{3} \cdot V_{12A} \cdot cos\varphi_{eA}} = 19,477\ \text{A}$ $sin\varphi_{eA} := \sqrt{1 - cos\varphi_{eA}^{\,2}} = 0,586$

$Z_{1eA} := \frac{V_{12A}}{\sqrt{3} \cdot I_{12A}} = 433,929\ \Omega$ $R_{1eA} := Z_{1eA} \cdot cos\varphi_{eA} = 351,482\ \Omega$ $X_{1eA} := Z_{1eA} \cdot sin\varphi_{eA} = 254,469\ \Omega$

$Z_{eA} := \frac{\left(R_{1eA} + \mathrm{i} \cdot X_{1eA}\right)}{K^2} = (0,25 + 0,181 \cdot \mathrm{i})\ \Omega$ $\left|Z_{eA}\right| = 0,309\ \Omega$ $\alpha_A := \frac{I_{12A}}{I_{1n}} = 0,803$

Parametri del ramo serie

$P_{epA} := P_{1A} - P_0 - P_{eA} = 2165\ \text{W}$ $R' := \frac{P_{epA}}{3 \cdot I_{12A}^{\,2}} = 1,902\ \Omega$ $Z_{12A} := \frac{V_{1n}}{\sqrt{3} \cdot I_{12A}} = 444,644\ \Omega$

X': calcolo esatto

$X' := \sqrt{Z_{12A}^{\,2} - \left(R' + R_{1eA}\right)^2} - X_{1eA} = 15,398\ \Omega$ $Z_{1cc} := \sqrt{R'^{\,2} + X'^{\,2}} = 15,515\ \Omega$

X': calcolo approssimato

$X'_{app} := \frac{V_{1n} - V_{12A}}{\sqrt{3} \cdot I_{12A} \cdot sin\varphi_{eA}} - R' \cdot \frac{cos\varphi_{eA}}{sin\varphi_{eA}} = 15,646\ \Omega$

tensione e perdite di corto circuito

$v_{cc\%} := \frac{\sqrt{3} \cdot Z_{1cc} \cdot I_{1n}}{V_{1n}} = 4,344\ \%$ $p_{cc\%} := \frac{3 \cdot R' \cdot I_{1n}^{\,2}}{P_n} = 0,533\ \%$

Corrente assorbita e rendimento

$\varphi_{12A} := \text{atan}\left(\frac{X' + X_{1eA}}{R' + R_{1eA}}\right) = 37,368\ °$ $I_{12A} := I_{12A} \cdot \mathbf{e}^{-\mathrm{i} \cdot \varphi_{12A}} = (15,479 - 11,821 \cdot \mathrm{i})\ \text{A}$

$I_{1A} := I_{12A} + I_0 = (15,588 - 12,244 \cdot \mathrm{i})\ \text{A}$ $\left|I_{1A}\right| = 19,822\ \text{A}$ $cos\varphi_{1A} := \cos\left(\arg\left(I_{1A}\right)\right) = 0,786$

MACCHINE ELETTRICHE	**17 giugno 2025**
Cognome Nome: _____	Matricola: _____

ESERCIZIO

Un motore asincrono trifase (numero poli $2p = 6$, collegamento fasi di statore **a triangolo**) presenta i seguenti dati nominali:

Tensione nominale V_{1n} = 500 V	Frequenza f = 50 Hz	Velocità n_n = 979 giri/min

In fase di collaudo è stato sottoposto ad una serie di prove che hanno fornito i seguenti dati:

Tipo prova	*Grandezza*	*Valore*
A vuoto	Corrente assorbita	I_0 = 22.0 A
	Potenza assorbita	P_0 = 2720 W
A rotore bloccato	Tensione di alimentazione	V_{1cc} = 81 V
	Corrente assorbita	I_{1cc} = 113 A
	Potenza assorbita	P_{1cc} = 3980 W
	Coppia all'albero	C_{acc} = 22.5 Nm

Con riferimento al circuito equivalente semplificato (rappresentato con collegamento a stella), determinare:
- i parametri del ramo derivato $\boldsymbol{R_0}$ e $\boldsymbol{X_0}$;
- i parametri $\boldsymbol{R_1}$, $\boldsymbol{R_{12}}$ e $\boldsymbol{X}$;
- i valori nominali di potenza $\boldsymbol{P_n}$, corrente assorbita $\boldsymbol{I_{1n}}$ e fattore di potenza $\boldsymbol{\cos\varphi_{1n}}$;
- la coppia $\boldsymbol{C_{aY}}$ e la corrente assorbita $\boldsymbol{I_{aY}}$ all'avviamento con motore alimentato alla tensione $\boldsymbol{V_{1n}}$ e con fasi di statore collegate **a stella**.

TEORIA

1) **Autotrasformatore monofase**: similitudini e differenze costruttive rispetto al trasformatore, ipotesi di lavoro, relazioni tra tensioni, f.m.m. e correnti, potenza scambiata tra primario e secondario, potenza di dimensionamento e relazione tra di esse, vantaggi e svantaggi dell'autotrasformatore rispetto al trasformatore corrispondente, considerazioni sull'autotrasformatore elevatore.
2) **Fenomeni legati al funzionamento a carico in un generatore sincrono**: variazione di tensione, coppia frenante, posizioni relative di f.m.m. di eccitazione e di reazione di indotto, sfasamento tra f.e.m. a vuoto e corrente.

RITIRATO |_| Firma _____

SOLO LAUREANDI |_| Sessione _____ Chiedo la correzione prioritaria del compito, accettando il voto conseguito e chiedendo cortesemente la verbalizzazione anticipata

Firma _____

Valutazione esercizio	1)_____
Valutazione teoria	1)_____ 2)_____

DATI

$p := 3$ $V_{1n} := 500\ V$ $f := 50\ Hz$ $n_n := 979\ rpm$ $I_0 := 22\ A$ $P_0 := 2720\ W$

$V_{1cc} := 81\ V$ $I_{1cc} := 113\ A$ $P_{1cc} := 3980\ W$ $C_{acc} := 22,5\ Nm$

SOLUZIONE

Velocità di sincronismo, scorrimento e velocità nominale

$\Omega_0 := \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = 104,7\ s^{-1}$ $n_0 := \Omega_0 = 1000\ rpm$ $s_n := \frac{n_0 - n_n}{n_0} = 2,100\ \%$

ANALISI A VUOTO

$cos\varphi_0 := \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot V_{1n} \cdot I_0} = 0,1428$ $\varphi_0 := acos\left(cos\varphi_0\right) = 81,79\ °$ $Z_0 := \frac{V_{1n}}{\sqrt{3} \cdot I_0} = 13,12\ \Omega$

$X_0 := \frac{Z_0}{\sin\left(\varphi_0\right)} = 13,26\ \Omega$ $R_0 := \frac{V_{1n}^{\ 2}}{P_0} = 91,91\ \Omega$ $I_0 := I_0 \cdot e^{-j \cdot \varphi_0} = (3,141 - 21,77 \cdot i)\ A$

ANALISI A ROTORE BLOCCATO

corrente e perdite a vuoto a tensione ridotta

$\alpha_{vcc} := \frac{V_{1cc}}{V_{1n}} = 0,1620$ $I_{0cc} := \alpha_{vcc} \cdot I_0 = (0,5088 - 3,527 \cdot i)\ A$ $P_{0cc} := \alpha_{vcc}^{\ 2} \cdot P_0 = 71,38\ W$

bilancio potenza e corrente di rotore

$P_{tcc} := C_{acc} \cdot \Omega_0 = 2356\ W$ $P_{ep1cc} := P_{1cc} - P_{0cc} - P_{tcc} = 1552\ W$

$cos\varphi_{1cc} := \frac{P_{1cc}}{\sqrt{3} \cdot V_{1cc} \cdot I_{1cc}} = 0,2510$ $\varphi_{1cc} := acos\left(cos\varphi_{1cc}\right) = 75,46\ °$

$I_{1cc} := I_{1cc} \cdot e^{-j \cdot \varphi_{1cc}} = (28,37 - 109,4 \cdot i)\ A$ $I_{12cc} := I_{1cc} - I_{0cc} = (27,86 - 105,9 \cdot i)\ A$

Parametri del ramo serie

$R_{12} := \frac{P_{tcc}}{3 \cdot \left|I_{12cc}\right|^2} = 65,55\ m\Omega$ $R_1 := \frac{P_{ep1cc}}{3 \cdot \left|I_{12cc}\right|^2} = 43,19\ m\Omega$ $Z_{fcc} := \frac{V_{1cc}}{\sqrt{3} \cdot \left|I_{12cc}\right|} = 0,4272\ \Omega$

$X := \sqrt{Z_{fcc}^{\ 2} - \left(R_1 + R_{12}\right)^2} = 0,4132\ \Omega$ $\frac{R_1 + R_{12}}{X} = 0,2632$

ANALISI IN CONDIZIONI NOMINALI

Potenza nominale

$Z_{fn} := \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s_n}\right)^2 + X^2} = 3,192\ \Omega$ $\varphi_{12n} := atan\left(\frac{X}{R_1 + \frac{R_{12}}{s_n}}\right) = 7,438\ °$

$I_{12n} := \frac{V_{1n}}{\sqrt{3} \cdot Z_{fn}} = 90,45\ A$ $P_n := 3 \cdot R_{12} \cdot I_{12n}^{\ 2} \cdot \left(\frac{1 - s_n}{s_n}\right) = 75,00\ kW$

Corrente nominale e rendimento

$I_{12n} := I_{12n} \cdot e^{-j \cdot \varphi_{12n}} = (89,69 - 11,71 \cdot i)\ A$ $I_{1n} := I_{12n} + I_0 = (92,83 - 33,48 \cdot i)\ A$

$\left|I_{1n}\right| = 98,68\ A$ $cos\varphi_{1n} := \cos\left(arg\left(I_{1n}\right)\right) = 0,9407$ $P_{1n} := \sqrt{3} \cdot V_{1n} \cdot \left|I_{1n}\right| \cdot cos\varphi_{1n} = 80,39\ kW$

$P_{epn} := 3 \cdot \left(R_1 + R_{12}\right) \cdot \left|I_{12n}\right|^2 = 2669\ W$

$\eta_n := \frac{P_n}{P_{1n}} = 93,30\ \%$ $\eta'_n := \frac{P_n}{P_n + P_{epn} + P_0} = 93,30\ \%$ Verifica

ANALISI AVVIAMENTO A STELLA

Coppia e corrente avviamento a tensione nominale con coll. Δ

$I_{a\Delta} := \frac{\left|I_{1cc}\right|}{\alpha_{vcc}} = 697,5\ A$ $C_{a\Delta} := \frac{C_{acc}}{\alpha_{vcc}^{\ 2}} = 857,3\ Nm$

Coppia e corrente rotore a tensione nominale con coll. Y

$C_{aY} := \frac{C_{a\Delta}}{3} = 285,8\ Nm$ $I_{aY} := \frac{\left|I_{a\Delta}\right|}{3} = 232,5\ A$

MACCHINE ELETTRICHE	**4 settembre 2025**
Cognome Nome: _____	Matricola: _____

ESERCIZIO

Di un motore asincrono trifase a rotore avvolto si conoscono le seguenti caratteristiche:

- tensione nominale: $V_{1n} = 690$ V
- potenza nominale: $P_n = 75$ kW
- velocità nominale: $n_n = 1451$ giri/min
- corrente assorbita nominale: $I_{1n} = 77.2$ A
- fattore di potenza nominale: $\cos\varphi_{1n} = 0.915$
- numero di poli: $2p = 4$
- frequenza nominale: $f = 50$ Hz
- corrente a vuoto: $I_0 = 18.1$ A
- potenza assorbita a vuoto: $P_0 = 4050$ W

Con riferimento al circuito equivalente semplificato, determinare:

- i parametri R_0, X_0, R_1, R_{12} e X;
- i rapporti coppia di avviamento/coppia nominale e coppia massima/coppia nominale;
- volendo ottenere la coppia massima all'avviamento inserendo delle resistenze addizionali in serie alle fasi di rotore, il rapporto tra il valore di tali resistenze e quello delle fasi rotoriche, supponendo che sia gli avvolgimenti che le resistenze addizionali siano collegati a stella;
- la velocità a cui si ottiene la coppia massima con le resistenze addizionali collegate a triangolo.

TEORIA

1) Espressione della f.e.m. indotta in un avvolgimento monofase di tipo aperto costituito da più conduttori collegati in serie e sottoposti ad un'induzione variabile sinusoidalmente nel tempo: schema dell'avvolgimento con q=2, rappresentazione vettoriale delle f.e.m. nei conduttori, coefficienti di avvolgimento e di raccorciamento per la fondamentale e per le armoniche (solo formule, no dimostrazione).
2) Potenze e coppia nella macchina asincrona per $1 > s > 0$: ipotesi di partenza e circuito equivalente di riferimento, convenzioni di segno su potenze e coppia, espressioni della potenza (elettrica P_e, persa P_{ep}, trasmessa P_t, elettromagnetica P_{em} e meccanica P_m) e della coppia elettromagnetica C, identificazione del tipo di funzionamento in base ai segni di P_e, P_m e C.

RITIRATO |_| Firma _____

SOLO LAUREANDI |_| Sessione _____ Chiedo la correzione prioritaria del compito, accettando il voto conseguito e chiedendo cortesemente la verbalizzazione anticipata

Firma _____

Valutazione esercizio	1)_____
Valutazione teoria	1)_____ 2)_____

- ***Dati iniziali***

$P_n = 75\text{kW}$ $V_{1n} = 690\text{V}$ $f = 50\text{Hz}$ $p = 2$ $I_{1n} = 77.2\text{A}$

$n_n = 1451\text{rpm}$ $\Omega_n = 151.32\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ $\cos\varphi_{1n} = 0.915$ $I_0 = 18.1\text{A}$ $P_0 = 4050\text{W}$

SOLUZIONE

- ***Velocità sincrona e scorrimento nominale***

$\Omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = 157.08\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ $n_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = 1500\text{rpm}$ $s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = 3.267\%$

- ***Parametri ramo derivato***

$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot V_{1n} \cdot I_0} = 0.187$ $\varphi_0 = \cos^{-1}(\cos\varphi_0) = 79.209°$ $Z_0 = \frac{V_{1n}}{\sqrt{3} \cdot I_0} = 22.01\Omega$

$R_0 = \frac{{V_{1n}}^2}{P_0} = 117.56\Omega$ $X_0 = \frac{Z_0}{\sin(\varphi_0)} = 22.41\Omega$ $\bar{\mathbf{I}}_0 = I_0 \cdot e^{-j \cdot \varphi_0} = (3.39 - j \cdot 17.78)\text{A}$

- ***Corrente di rotore riportata allo statore nel punto nominale***

$\varphi_{1n} = \cos^{-1}(\cos\varphi_{1n}) = 23.79°$ $\bar{\mathbf{I}}_{1n} = I_{1n} \cdot e^{-j \cdot \varphi_{1n}} = (70.64 - j \cdot 31.15)\text{A}$

$\bar{\mathbf{I}}_{12n} = \bar{\mathbf{I}}_{1n} - \bar{\mathbf{I}}_0 = (67.25 - j \cdot 13.37)\text{A}$ $|\bar{\mathbf{I}}_{12n}| = 68.56\text{A}$ $\varphi_{12n} = -\arg(\bar{\mathbf{I}}_{12n}) = 11.24°$

- ***Parametri X, R_1, R_{12}***

$\dot{\mathbf{Z}}_{fn} = \frac{V_{1n}}{\sqrt{3} \cdot \bar{\mathbf{I}}_{12n}} = \left(R_1 + \frac{R_{12}}{s_n}\right) + jX = (5.7 + j \cdot 1.13)\Omega$ $C_n = \frac{P_n}{\Omega_n} = 493.6\text{Nm} = \frac{3 R_{12} |\bar{\mathbf{I}}_{12n}|^2}{\Omega_0}$

$R_{12} = \frac{C_n}{3 \cdot |\bar{\mathbf{I}}_{12n}|^2} \cdot s_n \cdot \Omega_0 = 179.58\text{m}\Omega$ $R_1 = \text{Re}\left(\dot{\mathbf{Z}}_{fn}\right) - \frac{R_{12}}{s_n} = 201.21\text{m}\Omega$ $X = \text{Im}\left(\dot{\mathbf{Z}}_{fn}\right) = 1.13\Omega$

- ***Rapporti C_a/C_n e C_M/C_n***

$C_a = \frac{R_{12} \cdot {V_{1n}}^2}{\Omega_0 \cdot ((R_1 + R_{12})^2 + X^2)} = 381.2\text{Nm}$ $Z = \sqrt{{R_1}^2 + X^2} = 1.15\Omega$ $C_M = \frac{{V_{1n}}^2}{2 \cdot \Omega_0 \cdot (R_1 + Z)} = 1121.2\text{Nm}$

$\frac{C_a}{C_n} = 0.772$ $\frac{C_M}{C_n} = 2.27$

- ***Rapporto tra resistenza addizionale e resistenza rotorica per avere C_M all'avviamento***

$s'_M = \frac{R_{12} + R_{12a}}{Z} = 1$ $R_{12a} = s'_M \cdot Z - R_{12} = 0.9708\Omega$ $\frac{R_{12a}}{R_{12}} = 5.41$

- ***Velocità corrispondente alla coppia massima con resistenze addizionali collegate a triangolo***

$R_{12a\Delta} = \frac{R_{12a}}{3} = 0.324\Omega$ $s'_{M\Delta} = \frac{R_{12} + R_{12a\Delta}}{Z} = 43.74\%$ $n'_{M\Delta} = n_0 \cdot (1 - s'_{M\Delta}) = 843.9\text{rpm}$

MACCHINE ELETTRICHE	**16 settembre 2025**
Cognome Nome: _____	Matricola: _____

ESERCIZIO

Un trasformatore trifase ($P_n = 315$ kVA, $V_{1n} = 15$ kV, $V_{2n} = 400$ V, collegamento Dy11) presenta resistenza di fase primaria $R_1 = 3.56\ \Omega$ e secondaria $R_2 = 2.44$ mΩ (si faccia riferimento al circuito equivalente semplificato riferito al primario con collegamento a stella).

Alimentando il primario alla tensione V_{1n} e collegando il secondario ad un carico con fattore di potenza $\cos\varphi_e = 0.85$, il trasformatore lavora con grado di carico $\alpha = 0.87$, dando luogo ad una variazione di tensione da vuoto a carico $\Delta v_{\%} = 2.75\%$. In questa stessa condizione di carico, la corrente e la potenza assorbita risultano rispettivamente $I_1 = 11.2$ A e $P_1 = 232$ kW.

Si chiede di determinare:

- la tensione sul carico V_2 e l'impedenza di carico $\dot{Z}_e = R_e + jX_e$;
- i parametri R' e X';
- i parametri del circuito equivalente R_0 e X_0;
- la tensione e le perdite di corto circuito $v_{cc\%}$ e $p_{cc\%}$;
- il rendimento η quando il trasformatore alimenta la stessa impedenza con grado di carico in corrente uguale al grado di carico in potenza.

TEORIA

1) Funzionamento a carico del trasformatore monofase: definizione dei parametri e delle correnti del circuito primario e secondario, bilancio delle f.m.m., correnti nominali, grado di carico e diagramma vettoriale.
2) Diagramma vettoriale di una macchina sincrona a rotore liscio con circuito magnetico saturo (diagramma di Potier): identificazione delle f.m.m. coinvolte, ipotesi iniziali (influenza della geometria del traferro, caratteristica di magnetizzazione, condizioni di carico, parametri circuitali), obiettivi di calcolo, procedura di tracciamento del diagramma, variazione di tensione da vuoto a carico e angolo di coppia, influenza del fattore di potenza del carico (solo carico puramente induttivo e puramente capacitivo).

RITIRATO |_| Firma _____

Valutazione esercizio	1)_____
Valutazione teoria	1)_____ 2)_____

Dati

$P_n = 315\text{kVA}$, $V_{1n} = 15\text{kV}$, $V_{2n} = 400\text{V}$, $R_1 = 3.56\Omega$, $R_2 = 2.44\ \text{m}\Omega$, $\cos\varphi_e = 0.85$, $\alpha = 0.87$,

$\Delta v_{\%} = 2.75\%$, $I_1 = 11.2\text{A}$, $P_1 = 232\text{kW}$

Soluzione

Grandezze nominali

$I_{1n} = \frac{P_n}{\sqrt{3}\cdot V_{1n}} = 12.12\text{A}$, $K = \frac{V_{1n}}{V_{2n}} = 37.5$ $I_{2n} = K \cdot I_{1n} = 454.66\text{A}$

Corrente, tensione ed impedenza di carico

$I_{12} = \alpha \cdot I_{1n} = 10.55\text{A}$ $\Delta V_{12} = \Delta v_{\%} \cdot V_{1n} = 412.5\text{V}$ $V_{12} = (V_{1n} - \Delta V_{12}) = 14587.5\text{V}$

$V_2 = \frac{V_{12}}{K} = 389\text{V}$ $Z_{1e} = \frac{V_{12}}{\sqrt{3}\cdot I_{12}} = 798.44\Omega$

$\varphi_e = \arccos(\cos\varphi_e) = 31.79°$ $\sin\varphi_e = \sin(\varphi_e) = 0.527$

$R_{1e} = Z_{1e} \cdot \cos\varphi_e = 678.67\Omega$ $X_{1e} = Z_{1e} \cdot \sin\varphi_e = 420.6\Omega$

$R_e = \frac{R_{1e}}{K^2} = 0.48\Omega$ $X_e = \frac{X_{1e}}{K^2} = 0.3\Omega$

Resistenza, reattanza, tensione e perdite di cortocircuito

$R' = R_1 + K^2 \cdot R_2 = 6.991\Omega$ $\Delta V_{12} = \sqrt{3} \cdot I_{12} \cdot (R' \cdot \cos\varphi_e + X' \cdot \sin\varphi_e)$

$Z_{\Delta 12} = \frac{\Delta V_{12}}{\sqrt{3}\cdot I_{12}} = 22.58\Omega$ $X' = \frac{Z_{\Delta 12}}{\sin\varphi_e} - \frac{R'}{\tan(\varphi_e)} = 31.58\Omega$ $Z_{1cc} = \sqrt{R'^2 + X'^2} = 32.34\Omega$

$V_{1cc} = \sqrt{3} \cdot Z_{1cc} \cdot I_{1n} = 679.2\text{V}$ $v_{cc} = \frac{V_{1cc}}{V_{1n}} = 4.53\%$

$P_{1cc} = 3 \cdot R' \cdot {I_{1n}}^2 = 3083.1\text{W}$ $p_{cc} = \frac{P_{1cc}}{P_n} = 0.979\%$

Correnti assorbite

$\varphi_{12} = \arctan\left(\frac{X\prime + X_{1e}}{R\prime + R_{1e}}\right) = 33.4°$ $I_{12} = I_{12} \cdot e^{-i\cdot\varphi_{12}} = (8.806 - 5.807 \cdot i)\text{A}$

$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}\cdot V_{1n}\cdot I_1} = 0.797$ $\varphi_1 = \arccos(\cos\varphi_1) = 37.13°$ $I_1 = I_1 \cdot e^{-i\cdot\varphi_1} = (8.93 - 6.76 \cdot i)\text{A}$

$I_0 = I_1 - I_{12} = (0.124 - 0.953 \cdot i)\text{A}$ $I_a = \text{Re}(I_0) = 0.124\text{A}$ $I_\mu = -\text{Im}(I_0) = 0.953\text{A}$

Parametri e perdite a vuoto

$R_0 = \frac{V_{1n}}{\sqrt{3}\cdot I_a} = 69.86\text{k}\Omega$ $X_0 = \frac{V_{1n}}{\sqrt{3}\cdot I_\mu} = 9.09\text{k}\Omega$ $P_0 = \frac{{V_{1n}}^2}{R_0} = 3220.8\text{W}$

Funzionamento con $\alpha' = \alpha'_p$

$\alpha' = \alpha'_p \Rightarrow V'_{12} = V_{1n}$ $I'_{12} = \frac{V'_{12}}{\sqrt{3}\cdot|Z_{1e}|} = 10.85\text{A}$ $Z'_{12} = \sqrt{(R' + R_{1e})^2 + (X' + X_{1e})^2} = 821.34\Omega$

$V'_1 = \sqrt{3} \cdot Z'_{12} \cdot I'_{12} = 15430\text{V}$

$P'_0 = \left(\frac{V'_1}{V_{1n}}\right)^2 \cdot P_0 = 3408.23\text{W}$ $P'_{ep} = 3 \cdot R' \cdot |I'_{12}|^2 = 2.47\text{kW}$

$P'_e = 3 \cdot R_{1e} \cdot |I'_{12}|^2 = 239.53\text{kW}$ $\eta' = \frac{P'_e}{P\prime_e + P'_0 + P'_{ep}} = 97.61\%$