MACCHINE ELETTRICHE	**14 gennaio 2026**
Cognome Nome: _____	Matricola: _____

ESERCIZIO

Un trasformatore trifase ($P_n = 500$ kVA, $V_{1n} = 20$ kV, $V_{2n} = 400$ V) nella prova a vuoto assorbe una corrente ed una potenza attiva pari a $i_{0\%} = 2.15\%$ e $p_{0\%} = 0.31\%$. Con primario alimentato alla tensione V_{1n}, viene collegato un carico che assorbe la potenza $P_A = 350$ kW con un grado di carico α_A =78.8%, determinando una variazione di tensione da vuoto a carico Δv_A =2.1%. In tali condizioni il trasformatore assorbe una potenza attiva pari a $P_{1A} = 355$ 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}, il suo fattore di potenza $\cos\varphi_{1A}$ ed il rendimento η_A.

TEORIA

1) Regolazione della velocità di un motore asincrono trifase con variazione della frequenza e dell'ampiezza della tensione di alimentazione: relazione frequenza/velocità, condizioni per un funzionamento regolare, relazione per scorrimento e tensione in base all'espressione approssimata della corrente di rotore ed analisi delle caratteristiche di funzionamento nel caso di **riduzione della velocità** al di sotto del valore nominale ($\boldsymbol{\alpha \leq 1}$).
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 _____

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

DATI D'INGRESSO

$P_n := 500\ \text{kVA}$ $V_{1n} := 20\ \text{kV}$ $V_{2n} := 400\ \text{V}$ $p_0 := 0,31\ \%$ $i_0 := 2,15\ \%$

$P_A := 350\ \text{kW}$ $\alpha_A := 78,8\ \%$ $\Delta v_A := 2,1\ \%$ $P_{1A} := 355\ \text{kW}$ $\alpha_B := 0,8$

SOLUZIONE

Valori nominali

$K := \frac{V_{1n}}{V_{2n}} = 50$ $I_{1n} := \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_{1n}} = 14,43\ \text{A}$ $I_{2n} := K \cdot I_{1n} = 721,69\ \text{A}$

Parametri ramo derivato

$P_0 := p_0 \cdot P_n = 1550\ \text{W}$ $I_0 := i_0 \cdot I_{1n} = 0,31\ \text{A}$ $cos\varphi_0 := \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot V_{1n} \cdot I_0} = 0,14$ $\varphi_0 := \text{acos}\left(cos\varphi_0\right) = 81,71\ °$

$I_0 := I_0 \cdot \mathbf{e}^{-i \cdot \varphi_0} = (0,045 - 0,307 \cdot i)\ \text{A}$

$R_0 := \frac{V_{1n}}{\sqrt{3} \cdot \text{Re}\left(I_0\right)} = 258,06\ \text{k}\Omega$ $X_0 := \frac{V_{1n}}{\sqrt{3} \cdot \left(-\text{Im}\left(I_0\right)\right)} = 37,6\ \text{k}\Omega$

Parametri del carico

$V_{12A} := V_{1n} \cdot \left(1 - \Delta v_A\right) = 19580\ \text{V}$ $I_{12A} := \alpha_A \cdot I_{1n} = 11,3738\ \text{A}$ $Z_{1eA} := \frac{V_{12A}}{\sqrt{3} \cdot I_{12A}} = 993,909\ \Omega$

$cos\varphi_{eA} := \frac{P_A}{\sqrt{3} \cdot V_{12A} \cdot I_{12A}} = 0,907$ $sin\varphi_{eA} := \sqrt{1 - cos\varphi_{eA}^{\,2}} = 0,42$

$R_{1eA} := Z_{1eA} \cdot cos\varphi_{eA} = 901,853\ \Omega$ $X_{1eA} := Z_{1eA} \cdot sin\varphi_{eA} = 417,751\ \Omega$

$Z_{eA} := \frac{\left(R_{1eA} + i \cdot X_{1eA}\right)}{K^2} = (0,361 + 0,167 \cdot i)\ \Omega$ $\left|Z_{eA}\right| = 0,398\ \Omega$

Parametri del ramo serie

$P_{epA} := P_{1A} - P_0 - P_A = 3450\ \text{W}$ $R' := \frac{P_{epA}}{3 \cdot I_{12A}^{\,2}} = 8,89\ \Omega$ $Z_{12A} := \frac{V_{1n}}{\sqrt{3} \cdot I_{12A}} = 1015,228\ \Omega$

Calcolo esatto di X'

$X' := \sqrt{Z_{12A}^{\,2} - \left(R' + R_{1eA}\right)^2} - X_{1eA} = 30,843\ \Omega$ $Z_{1cc} := \sqrt{R'^{\,2} + X'^{\,2}} = 32,099\ \Omega$

tensione e perdite di corto circuito

$v_{cc\%} := \frac{\sqrt{3} \cdot Z_{1cc} \cdot I_{1n}}{V_{1n}} = 4,012\ \%$ $p_{cc\%} := \frac{3 \cdot R' \cdot I_{1n}^{\,2}}{P_n} = 1,111\ \%$

Corrente assorbita (modulo e fattore di potenza) e rendimento

$\varphi_{12A} := \text{atan}\left(\frac{X' + X_{1eA}}{R' + R_{1eA}}\right) = 26,223\ °$ $I_{12A} := I_{12A} \cdot \mathbf{e}^{-i \cdot \varphi_{12A}} = (10,203 - 5,026 \cdot i)\ \text{A}$

$I_{1A} := I_{12A} + I_0 = (10,248 - 5,333 \cdot i)\ \text{A}$

$\left|I_{1A}\right| = 11,552\ \text{A}$ $cos\varphi_{1A} := \cos\left(\arg\left(I_{1A}\right)\right) = 0,887$ $\eta_A := \frac{P_A}{P_{1A}} = 98,59\ \%$

Calcolo approssimato con formula caduta di tensione

$I_{12A} := \left|I_{12A}\right|$

$X' := \frac{V_{1n} - V_{12A}}{\sqrt{3} \cdot I_{12A} \cdot sin\varphi_{eA}} - R' \cdot \frac{cos\varphi_{eA}}{sin\varphi_{eA}} = 31,532\ \Omega$ $Z_{1cc} := \sqrt{R'^{\,2} + X'^{\,2}} = 32,762\ \Omega$

tensione e perdite di corto circuito

$v_{cc\%} := \frac{\sqrt{3} \cdot Z_{1cc} \cdot I_{1n}}{V_{1n}} = 4,095\ \%$ $p_{cc\%} := \frac{3 \cdot R' \cdot I_{1n}^{\,2}}{P_n} = 1,111\ \%$

Corrente assorbita (modulo e fattore di potenza)

$\varphi_{12A} := \text{atan}\left(\frac{X' + X_{1eA}}{R' + R_{1eA}}\right) = 26,258\ °$ $I_{12A} := I_{12A} \cdot \mathbf{e}^{-i \cdot \varphi_{12A}} = (10,2 - 5,032 \cdot i)\ \text{A}$

$I_{1A} := I_{12A} + I_0 = (10,245 - 5,339 \cdot i)\ \text{A}$

$\left|I_{1A}\right| = 11,553\ \text{A}$ $cos\varphi_{1A} := \cos\left(\arg\left(I_{1A}\right)\right) = 0,887$

MACCHINE ELETTRICHE	**21 gennaio 2026**
Cognome Nome: _____	Matricola: _____

ESERCIZIO

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

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

Da una prova a rotore bloccato con tensione di alimentazione $V_{1cc} = 118\ V$ si sono poi ricavati i seguenti dati:

- corrente assorbita $I_{1cc} =$ 60.2 A
- potenza assorbita $P_{1cc} =$ 3847 W
- coppia all'albero $C_{acc} =$ 11.2 Nm

Con riferimento al circuito equivalente semplificato, determinare:

- i parametri R_0, X_0, R_1, R_{12} e X;
- valori nominali di velocità, potenza, corrente, fattore di potenza e rendimento n_n, P_n, I_{1n}, $\cos\varphi_{1n}$ e η_n.
- la tensione V_1 a cui deve essere alimentato il motore per ottenere una coppia pari al valore nominale C_n ad una velocità $n_1 = 1405$ giri/min.

TEORIA

1) F.m.m. prodotta da un avvolgimento distribuito monofase (q > 1): rappresentazione rettificata dell'avvolgimento, andamento delle f.m.m. delle singole bobine e risultante, coefficiente di avvolgimento (è richiesto il diagramma vettoriale, non è richiesta la dimostrazione), ampiezza delle componenti di f.m.m (fondamentale e armoniche).
2) 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

$p := 2$ $V_{1n} := 690\ V$ $f := 50\ Hz$ $n_n := 1451\ rpm$ $I_0 := 18,1\ A$ $P_0 := 4050\ W$

$V_{1cc} := 118\ V$ $I_{1cc} := 60,2\ A$ $P_{1cc} := 3847\ W$ $C_{acc} := 11,2\ Nm$ $n_1 := 1405\ rpm$

SOLUZIONE

Velocità di sincronismo, scorrimento e velocità nominale

$\Omega_0 := \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = 157,1\ s^{-1}$ $n_0 := \Omega_0 = 1500\ rpm$ $s_n := \frac{n_0 - n_n}{n_0} = 3,267\ \%$

ANALISI A VUOTO

$cos\varphi_0 := \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot V_{1n} \cdot I_0} = 0,1872$ $\varphi_0 := acos\left(cos\varphi_0\right) = 79,21\ °$ $Z_0 := \frac{V_{1n}}{\sqrt{3} \cdot I_0} = 22,01\ \Omega$

$X_0 := \frac{Z_0}{\sin\left(\varphi_0\right)} = 22,41\ \Omega$ $R_0 := \frac{V_{1n}^{\ 2}}{P_0} = 117,6\ \Omega$ $I_0 := I_0 \cdot e^{-j \cdot \varphi_0} = (3,389 - 17,78 \cdot i)\ A$

ANALISI A ROTORE BLOCCATO

corrente e perdite a vuoto a tensione ridotta

$\alpha_{vcc} := \frac{V_{1cc}}{V_{1n}} = 0,1710$ $I_{0cc} := \alpha_{vcc} \cdot I_0 = (0,5795 - 3,041 \cdot i)\ A$ $P_{0cc} := \alpha_{vcc}^{\ 2} \cdot P_0 = 118,4\ W$

bilancio potenza e corrente di rotore

$P_{tcc} := C_{acc} \cdot \Omega_0 = 1759\ W$ $P_{ep1cc} := P_{1cc} - P_{0cc} - P_{tcc} = 1969\ W$

$cos\varphi_{1cc} := \frac{P_{1cc}}{\sqrt{3} \cdot V_{1cc} \cdot I_{1cc}} = 0,3127$ $\varphi_{1cc} := acos\left(cos\varphi_{1cc}\right) = 71,78\ °$

$I_{1cc} := I_{1cc} \cdot e^{-j \cdot \varphi_{1cc}} = (18,82 - 57,18 \cdot i)\ A$ $I_{12cc} := I_{1cc} - I_{0cc} = (18,24 - 54,14 \cdot i)\ A$

Parametri del ramo serie

$R_{12} := \frac{P_{tcc}}{3 \cdot \left|I_{12cc}\right|^2} = 179,7\ m\Omega$ $R_1 := \frac{P_{ep1cc}}{3 \cdot \left|I_{12cc}\right|^2} = 201,1\ m\Omega$ $Z_{fcc} := \frac{V_{1cc}}{\sqrt{3} \cdot \left|I_{12cc}\right|} = 1,192\ \Omega$

$X := \sqrt{Z_{fcc}^{\ 2} - \left(R_1 + R_{12}\right)^2} = 1,130\ \Omega$ $\frac{R_1 + R_{12}}{X} = 0,337$

ANALISI IN CONDIZIONI NOMINALI

Potenza nominale

$Z_{fn} := \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s_n}\right)^2 + X^2} = 5,812\ \Omega$ $\varphi_{12n} := atan\left(\frac{X}{R_1 + \frac{R_{12}}{s_n}}\right) = 11,21\ °$

$I_{12n} := \frac{V_{1n}}{\sqrt{3} \cdot Z_{fn}} = 68,54\ A$ $P_n := 3 \cdot R_{12} \cdot I_{12n}^{\ 2} \cdot \left(\frac{1 - s_n}{s_n}\right) = 74,99\ kW$

Corrente nominale e rendimento

$I_{12n} := I_{12n} \cdot e^{-j \cdot \varphi_{12n}} = (67,24 - 13,33 \cdot i)\ A$ $I_{1n} := I_{12n} + I_0 = (70,62 - 31,11 \cdot i)\ A$

$\left|I_{1n}\right| = 77,17\ A$ $cos\varphi_{1n} := \cos\left(arg\left(I_{1n}\right)\right) = 0,9152$ $P_{1n} := \sqrt{3} \cdot V_{1n} \cdot \left|I_{1n}\right| \cdot cos\varphi_{1n} = 84,40\ kW$

$P_{epn} := 3 \cdot \left(R_1 + R_{12}\right) \cdot \left|I_{12n}\right|^2 = 5367\ W$

$\eta_n := \frac{P_n}{P_{1n}} = 88,84\ \%$ $\eta'_n := \frac{P_n}{P_n + P_{epn} + P_0} = 88,84\ \%$ Verifica

TENSIONE V_1 PER AVERE C_n ALLA VELOCITÀ n_1

scorrimento alla velocità n_1

$s_1 := \frac{n_0 - n_1}{n_0} = 6,33\ \%$ $C_n := \frac{3 \cdot R_{12} \cdot \left|I_{12n}\right|^2}{s_n \cdot \Omega_0} = 493,51\ Nm$

tensione V_1

$C_n = \frac{V_1^{\ 2}}{\Omega_0 \cdot Z \cdot \left(s_1 \cdot \frac{Z}{R_{12}} + \frac{R_{12}}{s_1 \cdot Z} + 2 \cdot \frac{R_1}{Z}\right)}$ $Z := \sqrt{R_1^{\ 2} + X^2} = 1,15\ \Omega$

$V_1 := \sqrt{C_n \cdot \Omega_0 \cdot Z \cdot \left(s_1 \cdot \frac{Z}{R_{12}} + \frac{R_{12}}{s_1 \cdot Z} + 2 \cdot \frac{R_1}{Z}\right)} = 535,81\ V$

MACCHINE ELETTRICHE	**12 febbraio 2026**
Cognome Nome: _____	Matricola: _____

ESERCIZIO

Di un trasformatore trifase si conoscono potenza, tensioni e frequenza nominali, rispettivamente pari a $P_n = 630$ kVA, $V_{1n} = 15$ kV, $V_{2n} = 400$ V, $f = 50$ Hz; sono inoltre noti i valori percentuali di corrente e perdite a vuoto $i_0 = 1.28\%$, $p_0 = 0.23\%$ e tensione e perdite in corto circuito $v_{cc} = 4.4\%$, $p_{cc} = 0.54\%$. Sapendo che il trasformatore alimenta un carico equilibrato erogando una potenza attiva $P_e = 400$ kW con una corrente $I_2 = 723$ A ed una tensione ai morsetti $V_2 = 397$ 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 _____

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

$P_n := 630\ \text{kVA}$ $V_{1n} := 15\ \text{kV}$ $V_{2n} := 400\ \text{V}$ $f := 50\ \text{Hz}$ $i_0 := 1,28\ \%$ $p_0 := 0,23\ \%$

$v_{cc} := 4,4\ \%$ $p_{cc} := 0,54\ \%$ $P_e := 400\ \text{kW}$ $V_2 := 397\ \text{V}$ $I_2 := 723\ \text{A}$

SOLUZIONE

Grandezze nominali

$I_{1n} := \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_{1n}} = 24,249\ \text{A}$ $k := \frac{V_{1n}}{V_{2n}} = 37,500$ $I_{2n} := k \cdot I_{1n} = 909,33\ \text{A}$

Parametri del ramo derivato

$cos\varphi_0 := \frac{p_0}{i_0} = 0,17969$ $\varphi_0 := \text{acos}\left(cos\varphi_0\right) = 79,648\ °$ $I_0 := i_0 \cdot I_{1n} = 0,3104\ \text{A}$ $P_0 := p_0 \cdot P_n = 1449\ \text{W}$

$I_a := I_0 \cdot cos\varphi_0 = 0,0558\ \text{A}$ $I_\mu := I_0 \cdot \sin\left(\varphi_0\right) = 0,3053\ \text{A}$

$I_0 := I_0 \cdot \mathbf{e}^{-j \cdot \varphi_0} = (0,0558 - 0,3053 \cdot \text{i})\ \text{A}$ $R_0 := \frac{V_{1n}}{\sqrt{3} \cdot I_a} = 155,28\ \text{k}\Omega$ $X_0 := \frac{V_{1n}}{\sqrt{3} \cdot I_\mu} = 28,363\ \text{k}\Omega$

Parametri del ramo serie

$cos\varphi_{cc} := \frac{p_{cc}}{v_{cc}} = 0,1227$ $\varphi_{cc} := \text{acos}\left(cos\varphi_{cc}\right) = 82,950\ °$ $Z_{1cc} := \frac{v_{cc} \cdot V_{1n}}{\sqrt{3} \cdot I_{1n}} = 15,7143\ \Omega$

$R' := Z_{1cc} \cdot cos\varphi_{cc} = 1,9286\ \Omega$ $X' := Z_{1cc} \cdot \sin\left(\varphi_{cc}\right) = 15,5955\ \Omega$

Parametri del carico riportati al primario

$cos\varphi_e := \frac{P_e}{\sqrt{3} \cdot V_2 \cdot I_2} = 0,8046$ $\varphi_e := \text{acos}\left(cos\varphi_e\right) = 36,430\ °$ $V_{12} := k \cdot V_2 = 14887,5\ \text{V}$ $I_{12} := \frac{I_2}{k} = 19,28\ \text{A}$

$Z_{1e} := \frac{V_{12}}{\sqrt{3} \cdot I_{12}} = 0,4458\ \text{k}\Omega$ $R_{1e} := Z_{1e} \cdot cos\varphi_e = 0,3587\ \text{k}\Omega$ $X_{1e} := Z_{1e} \cdot \sin\left(\varphi_e\right) = 0,2647\ \text{k}\Omega$

Tensione di alimentazione e corrente assorbita al primario

$Z_{1t} := \left(R' + R_{1e}\right) + j \cdot \left(X' + X_{1e}\right) = (360,623 + 280,3384 \cdot \text{i})\ \Omega$ $\varphi_{12} := \arg\left(Z_{1t}\right) = 37,8605\ °$

$V_1 := \sqrt{3} \cdot \left|Z_{1t}\right| \cdot I_{12} = 15253,3401\ \text{V}$ $I_{12} := I_{12} \cdot \mathbf{e}^{-j \cdot \varphi_{12}} = (15,2217 - 11,8329 \cdot \text{i})\ \text{A}$

$I'_0 := I_0 \cdot \left(\frac{V_1}{V_{1n}}\right) = (0,0567 - 0,3105 \cdot \text{i})\ \text{A}$ $I_1 := I'_0 + I_{12} = (15,2784 - 12,1434 \cdot \text{i})\ \text{A}$

$\left|I_1\right| = 19,5165\ \text{A}$ $\varphi_1 := -\arg\left(I_1\right) = 38,478\ °$

Rendimento

$P_{ep} := 3 \cdot R' \cdot \left|I_{12}\right|^2 = 2150,6565\ \text{W}$ $P'_0 := P_0 \cdot \left(\frac{V_1}{V_{1n}}\right)^2 = 1498,3586\ \text{W}$ $\eta := \frac{P_e}{P_e + P_{ep} + P'_0} = 99,096\ \%$

SOLUZIONE APPROSSIMATA

$\Delta V_{12} := \sqrt{3} \cdot \left|I_{12}\right| \cdot \left(R' \cdot cos\varphi_e + X' \cdot \sin\left(\varphi_e\right)\right) = 361,0866\ \text{V}$ $V_1 := V_{12} + \Delta V_{12} = 15248,5866\ \text{V}$

$I'_0 := I_0 \cdot \left(\frac{V_1}{V_{1n}}\right) = (0,0567 - 0,3104 \cdot \text{i})\ \text{A}$ $I_1 := I'_0 + I_{12} = (15,2784 - 12,1433 \cdot \text{i})\ \text{A}$

$\left|I_1\right| = 19,5164\ \text{A}$ $\varphi_1 := -\arg\left(I_1\right) = 38,4778\ °$

Rendimento

$P_{ep} := 3 \cdot R' \cdot \left|I_{12}\right|^2 = 2150,6565\ \text{W}$ $P'_0 := P_0 \cdot \left(\frac{V_1}{V_{1n}}\right)^2 = 1497,4249\ \text{W}$ $\eta := \frac{P_e}{P_e + P_{ep} + P'_0} = 99,0962\ \%$

MACCHINE ELETTRICHE	**17 giugno 2026**
Cognome Nome: _____	Matricola: _____

ESERCIZIO

In un trasformatore trifase ($P_n = 630$ kVA, $V_{1n} = 33$ kV, $V_{2n} = 400$ V, collegamento Dy11) le resistenze misurate tra due terminali del primario e del secondario sono rispettivamente R_{AB} =22.64 Ω e R_{ab} =2.97 mΩ.

Alimentando il primario alla tensione V_{1n} e collegando al secondario un carico con fattore di potenza $\cos\varphi_e$ =0.79, il trasformatore lavora con grado di carico α =0.72, dando luogo ad una variazione di tensione da vuoto a carico $\Delta v_{\%} = 3.3\%$. In questa stessa condizione di carico, la corrente e la potenza assorbita risultano rispettivamente I_1 =8.0 A e $P_1 = 351.6$ kW.

Si chiede di determinare (facendo riferimento al circuito equivalente semplificato riferito al primario con collegamento a stella):

- la tensione sul carico V_2 e l'impedenza di carico $\dot{Z}_e = R_e + jX_e$ (impedenze collegate a stella);
- i parametri R' e X';
- la tensione e le perdite di corto circuito $v_{cc\%}$ e $p_{cc\%}$;
- i parametri del circuito equivalente R_0 e X_0;
- 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) 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.
2) Funzionamento a carico di un generatore sincrono: definizione e rappresentazione vettoriale delle varie grandezze elettriche (f.m.m. di eccitazione e di reazione di indotto, f.e.m. a vuoto e corrente) nelle diverse condizioni di carico (f.m.m. di indotto in quadratura, puramente smagnetizzante, puramente smagnetizzante e per una condizione generica); andamento al traferro ed effetto della posizione reciproca delle f.m.m. su coppia e scambio di potenza reattiva; scomposizione della f.m.m. di indotto e significato delle diverse componenti.

RITIRATO |_| Firma _____

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

Dati d'ingresso

$P_n = 630\text{kVA}$ $V_{1n} = 33\text{kV}$ $V_{2n} = 400V$ $R_{AB} = 22.64\Omega$ $R_{ab} = 2.97\text{m}\Omega$

$\cos\varphi_e = 0.79$ $\alpha = 0.72$ $\Delta v_{\%} = 3.3\%$ $P_1 = 351.6\text{kW}$ $I_1 = 8.00\text{A}$

Soluzione

Dati nominali

$I_{1n} = \frac{P_n}{\sqrt{3}\cdot V_{1n}} = 11.02\text{A}$ $K = \frac{V_{1n}}{V_{2n}} = 82.50$ $I_{2n} = K \cdot I_{1n} = 909.3\text{A}$

Resistenza degli avvolgimenti riportata al primario

$R_1 = \frac{R_{AB}}{2} = 11.32\Omega$ $R_2 = \frac{R_{ab}}{2} = 1.485\text{m}\Omega$ $R_{12} = K^2 \cdot R_2 = 10.11\Omega$

Corrente, tensione ed impedenza di carico

$I_{12} = \alpha \cdot I_{1n} = 7.936\text{A}$ $\Delta V_{12} = \Delta v_{\%} \cdot V_{1n} = 1089\text{V}$ $V_{12} = (V_{1n} - \Delta V_{12}) = 31910\text{V}$

$V_2 = \frac{V_{12}}{K} = 386.8\text{V}$ $\varphi_e = \arccos(\cos\varphi_e) = 37.81°$ $\sin\varphi_e = \sin(\varphi_e) = 0.6131$

$Z_{1e} = \frac{V_{12}}{\sqrt{3}\cdot I_{12}} = 2322\Omega$ $R_{1e} = Z_{1e} \cdot \cos\varphi_e = 1834\Omega$ $X_{1e} = Z_{1e} \cdot \sin\varphi_e = 1423\Omega$

$R_e = \frac{R_{1e}}{K^2} = 0.26\,95\Omega$ $X_e = \frac{X_{1e}}{K^2} = 0.2091\Omega$

Resistenza, reattanza e tensione di cortocircuito

$R' = R_1 + K^2 \cdot R_2 = 21.43\Omega$ $\Delta V_{12} = \sqrt{3} \cdot I_{12} \cdot (R' \cdot \cos\varphi_e + X' \cdot \sin\varphi_e)$ $Z_{\Delta 12} = \frac{\Delta V_{12}}{\sqrt{3}\cdot I_{12}} = 79.23\Omega$

$X' = \frac{Z_{\Delta 12}}{\sin\varphi_e} - \frac{R'}{\tan(\varphi_e)} = 101.6\Omega$ $Z_{1cc} = \sqrt{R'^2 + X'^2} = 103.8\Omega$ $V_{1cc} = \sqrt{3} \cdot Z_{1cc} \cdot I_{1n} = 1983V$

Tensione e perdte di cortocircuito

$v_{cc} = \frac{V_{1cc}}{V_{1n}} = 6.008\%$ $P_{1cc} = 3 \cdot R' \cdot {I_{1n}}^2 = 7809W$ $p_{cc} = \frac{P_{1cc}}{P_n} = 1.240\%$

Corrente assorbita

$\varphi_{12} = \arctan\left(\frac{X'+X_{1e}}{R'+R_{1e}}\right) = 39.42°$ $I_{12} = I_{12} \cdot e^{-i\cdot\varphi_{12}} = (6.131 - 5.039 \cdot i)A$ $\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}\cdot V_{1n}\cdot I_1} =$

0.7689

$\varphi_1 = \arccos(\cos\varphi_1) = 39.74°$ $I_1 = I_1 \cdot e^{-i\cdot\varphi_1} = (6.151 - 5.115 \cdot i)A$

Parametri ramo derivato

$I_0 = I_1 - I_{12} = (0.02047 - 0.07578 \cdot i)A$ $I_a = \text{Re}(I_0) = 0.02047A$ $I_\mu = -\text{Im}(I_0) = 0.07578A$

$R_0 = \frac{V_{1n}}{\sqrt{3}\cdot I_a} = 930.8\text{k}\Omega$ $X_0 = \frac{V_{1n}}{\sqrt{3}\cdot I_\mu} = 251.4\text{k}\Omega$ $P_0 = \frac{{V_{1n}}^2}{R_0} = 1170W$

Calcolo corrente e tensione con $\alpha = \alpha_P$

$\alpha' = \alpha'_P$ $V'_{12} = V_{1n}$ $I'_{12} = \frac{V'_{12}}{\sqrt{3}\cdot|Z_{1e}|} = 8.207A$ $Z'_{12} = \sqrt{(R' + R_{1e})^2 + (X' + X_{1e})^2} = 2402\Omega$

$V'_1 = \sqrt{3} \cdot Z'_{12} \cdot I'_{12} = 34140V$

Potenza e rendimento con $\alpha = \alpha_P$

$P'_0 = \left(\frac{V'_1}{V_{1n}}\right)^2 \cdot P_0 = 1252W$ $P'_{ep} = 3 \cdot R' \cdot |I'_{12}|^2 = 4.329\text{kW}$ $P'_e = 3 \cdot R_{1e} \cdot |I'_{12}|^2 = 370.6\text{kW}$

$\eta' = \frac{P'_e}{P'_e + P'_0 + P'_{ep}} = 98.52\%$

MACCHINE ELETTRICHE	**3 settembre 2026**
Cognome Nome: _____	Matricola: _____

ESERCIZIO

Un motore asincrono trifase ($\mathbf{2p = 4}$ **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 di una singola fase di statore (scollegata dalle altre) $\boldsymbol{R_{fase} = 0.225\ \Omega}$;
- 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 $\boldsymbol{V_{cc} = 55.8\ V}$, corrente assorbita $\boldsymbol{I_{1cc} = 70\ A}$, potenza attiva assorbita $\boldsymbol{P_{acc} = 1938}$ **W**;
- funzionamento in condizioni nominali: corrente assorbita $\boldsymbol{I_{1n} = 67.4\ A}$ con fattore di potenza $\boldsymbol{\cos \varphi_{1n} = 0.8206}$.

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) 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) 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_____

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

$V_n := 400\ V$ $f := 50\ Hz$ $p := 2$ $I_0 := 33,1\ A$ $P_0 := 2100\ W$ $R_{fase} := 0,225\ \Omega$

$V_{cc} := 55,8\ V$ $I_{1cc} := 70\ A$ $P_{acc} := 1938\ W$ $I_{1n} := 67,4\ A$ $cos\varphi_{1n} := 0,8206$

Soluzione

Fattore di potenza e corrente a vuoto

$cos\varphi_0 := \frac{P_0}{\sqrt{3}\cdot V_n \cdot I_0} = 0,09157$ $\varphi_0 := acos\left(cos\varphi_0\right) = 84,75\ °$ $I_0 := I_0 \cdot e^{-i\cdot\varphi_0} = (3,031 - 32,96\cdot i)\ A$

Impedenza a vuoto

$Z_0 := \frac{V_n}{\sqrt{3}\cdot\left|I_0\right|} = 6,977\ \Omega$ $X_0 := \frac{Z_0}{\sin\left(\varphi_0\right)} = 7,006\ \Omega$ $R_0 := \frac{Z_0}{cos\varphi_0} = 76,19\ \Omega$

Velocità sincrona *Resistenza di una fase di statore*

$\Omega_0 := \frac{2\cdot\pi\cdot f}{p} = 1500\ rpm$ $R_1 := \frac{R_{fase}}{3} = 75,00\ m\Omega$

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

Fattore di potenza e corrente assorbita a rotore bloccato

$cos\varphi_{1cc} := \frac{P_{acc}}{\sqrt{3}\cdot V_{cc}\cdot I_{1cc}} = 0,2865$ $\varphi_{1cc} := acos\left(cos\varphi_{1cc}\right) = 73,35\ °$ $I_{1cc} := I_{1cc}\cdot e^{-i\cdot\varphi_{1cc}} = (20,05 - 67,07\cdot i)\ A$

Corrente a vuoto, perdite a vuoto e corrente nel ramo serie a rotore bloccato

$I_{0cc} := \frac{V_{cc}}{V_n}\cdot I_0 = (0,4228 - 4,598\cdot i)\ A$ $P_{0cc} := \left(\frac{V_{cc}}{V_n}\right)^2 \cdot P_0 = 40,87\ W$ $I_{12cc} := I_{1cc} - I_{0cc} = (19,63 - 62,47\cdot i)\ A$

Potenza trasmessa = perdite rotoriche a rotore bloccato e resistenza di rotore

$P_{tcc} := P_{acc} - P_{0cc} - 3\cdot R_1\cdot\left|I_{12cc}\right|^2 = 932,4\ W$ $R_{12} := \frac{P_{tcc}}{3\cdot\left(\left|I_{12cc}\right|\right)^2} = 72,49\ m\Omega$

Impedenza ramo serie a rotore bloccato, resistenza rotorica (alt.) e reattanza di dispersione

$Z_{1cc} := \frac{V_{cc}}{\sqrt{3}\cdot I_{12cc}} = (0,1475 + 0,4694\cdot i)\ \Omega$ $R_{12} := Re\left(Z_{1cc}\right) - R_1 = 72,49\ m\Omega$ $X := Im\left(Z_{1cc}\right) = 0,4694\ \Omega$

Analisi in condizioni nominali

Fattore di potenza *Corrente assorbita* *Potenza attiva assorbita*

$\varphi_{1n} := acos\left(cos\varphi_{1n}\right) = 34,86\ °$ $I_{1n} := I_{1n}\cdot e^{-i\cdot\varphi_{1n}} = (55,31 - 38,52\cdot i)\ A$ $P_{en} := \sqrt{3}\cdot V_n\cdot\left|I_{1n}\right|\cdot cos\varphi_{1n} = 38,32\ kW$

Corrente e impedenza nel ramo serie

$I_{12n} := I_{1n} - I_0 = (52,28 - 5,558\cdot i)\ A$ $Z_{1fn} := \frac{V_n}{\sqrt{3}\cdot I_{12n}} = (4,368 + 0,4644\cdot i)\ \Omega$ $Re\left(Z_{1fn}\right) = R_1 + \frac{R_{12}}{s_n}$

Scorrimento *Velocità*

$s_n := \frac{R_{12}}{Re\left(Z_{1fn}\right) - R_1} = 1,688\ \%$ $\Omega_n := \Omega_0\cdot\left(1 - s_n\right) = 1475\ rpm$

Potenza meccanica *Rendimento*

$P_n := 3\cdot R_{12}\cdot\frac{1 - s_n}{s_n}\cdot\left|I_{12n}\right|^2 = 35,00\ kW$ $\eta_n := \frac{P_n}{P_{en}} = 91,33\ \%$

Analisi in condizioni nominali (con bilancio potenza)

Potenza reattiva assorbita *Potenza reattiva a vuoto* *Corrente ramo serie*

$Q_{en} := P_{en}\cdot\tan\left(\varphi_{1n}\right) = 26686,95\ W$ $Q_0 := P_0\cdot\tan\left(\varphi_0\right) = 22836\ W$ $I_{12n} := \sqrt{\frac{Q_{en} - Q_0}{3\cdot X}} = 52,295\ A$

Potenza attiva ramo serie *Scorrimento*

$3\cdot\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s_n}\right)\cdot I_{12n}^2 = P_{en} - P_0$ $R_1 + \frac{R_{12}}{s_n} = \frac{P_{en} - P_0}{3\cdot I_{12n}^2} = 4,415\ \Omega$ $s_n := \frac{R_{12}}{\frac{P_{en} - P_0}{3\cdot I_{12n}^2} - R_1} = 1,67\ \%$

Velocità *Potenza meccanica* *Rendimento*

$\Omega_n := \Omega_0\cdot\left(1 - s_n\right) = 1475\ rpm$ $P_n := 3\cdot R_{12}\cdot\frac{1 - s_n}{s_n}\cdot\left|I_{12n}\right|^2 = 35,01\ kW$ $\eta_n := \frac{P_n}{P_{en}} = 91,36\ \%$

MACCHINE ELETTRICHE	**15 settembre 2026**
Cognome Nome: _____	Matricola: _____

ESERCIZIO

Di un trasformatore trifase si conoscono potenza, tensioni e frequenza nominali, rispettivamente pari a $P_n = 800$ kVA, $V_{1n} = 20$ kV, $V_{2n} = 400$ V, $f = 50$ Hz; sono inoltre noti i valori percentuali di corrente e perdite a vuoto $i_0 = 1.35\%$, $p_0 = 0.21\%$ e tensione e perdite in corto circuito $v_{cc} = 4.8\%$, $p_{cc} = 0.52\%$. Sapendo che il trasformatore alimenta un carico equilibrato erogando una potenza attiva $P_e = 525$ kW con un fattore di potenza $\cos\varphi_e = 0.876$ A ed una tensione ai morsetti $V_2 = V_{2n}$, 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';
- i parametri dell'impedenza equivalente del carico riferiti al primario R_{1e}, X_{1e};
- 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) 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, dimostrazione non richiesta ma apprezzata).

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 _____

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

DATI

$P_n := 800\ \text{kVA}$ $V_{1n} := 20\ \text{kV}$ $V_{2n} := 400\ \text{V}$ $f := 50\ \text{Hz}$ $i_0 := 1,35\ \%$ $p_0 := 0,21\ \%$

$v_{cc} := 4,8\ \%$ $p_{cc} := 0,52\ \%$ $P_e := 525\ \text{kW}$ $V_2 := 400\ \text{V}$ $\cos\varphi_e := 0,876$

SOLUZIONE

Grandezze nominali

$I_{1n} := \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_{1n}} = 23\ \text{A}$ $k := \frac{V_{1n}}{V_{2n}} = 50$ $I_{2n} := k \cdot I_{1n} = 1200\ \text{A}$

Parametri del ramo derivato

$\cos\varphi_0 := \frac{p_0}{i_0} = 0,16$ $\varphi_0 := \text{acos}\left(\cos\varphi_0\right) = 81\ °$ $I_0 := i_0 \cdot I_{1n} = 0,31\ \text{A}$ $P_0 := p_0 \cdot P_n = 1680\ \text{W}$

$I_a := I_0 \cdot \cos\varphi_0 = 0,05\ \text{A}$ $I_\mu := I_0 \cdot \sin\left(\varphi_0\right) = 0,31\ \text{A}$

$I_0 := I_0 \cdot \mathbf{e}^{-j \cdot \varphi_0} = (0,05 - 0,31 \cdot \text{i})\ \text{A}$ $R_0 := \frac{V_{1n}}{\sqrt{3} \cdot I_a} = 240\ \text{k}\Omega$ $X_0 := \frac{V_{1n}}{\sqrt{3} \cdot I_\mu} = 37\ \text{k}\Omega$

Parametri del ramo serie

$\cos\varphi_{cc} := \frac{p_{cc}}{v_{cc}} = 0,11$ $\varphi_{cc} := \text{acos}\left(\cos\varphi_{cc}\right) = 84\ °$ $Z_{1cc} := \frac{v_{cc} \cdot V_{1n}}{\sqrt{3} \cdot I_{1n}} = 24\ \Omega$

$R' := Z_{1cc} \cdot \cos\varphi_{cc} = 2,6\ \Omega$ $X' := Z_{1cc} \cdot \sin\left(\varphi_{cc}\right) = 23,86\ \Omega$

Parametri del carico riportati al primario

$I_2 := \frac{P_e}{\sqrt{3} \cdot V_2 \cdot \cos\varphi_e} = 870\ \text{A}$ $\varphi_e := \text{acos}\left(\cos\varphi_e\right) = 29\ °$ $V_{12} := k \cdot V_2 = 20000\ \text{V}$ $I_{12} := \frac{I_2}{k} = 17\ \text{A}$

$Z_{1e} := \frac{V_{12}}{\sqrt{3} \cdot I_{12}} = 0,67\ \text{k}\Omega$ $R_{1e} := Z_{1e} \cdot \cos\varphi_e = 0,58\ \text{k}\Omega$ $X_{1e} := Z_{1e} \cdot \sin\left(\varphi_e\right) = 0,32\ \text{k}\Omega$

Tensione di alimentazione e corrente assorbita al primario

$Z_{1t} := \left(R' + R_{1e}\right) + j \cdot \left(X' + X_{1e}\right) = (587,27 + 345,77 \cdot \text{i})\ \Omega$ $\varphi_{12} := \arg\left(Z_{1t}\right) = 30,49\ °$

$V_1 := \sqrt{3} \cdot \left|Z_{1t}\right| \cdot I_{12} = 20421,56\ \text{V}$ $I_{12} := I_{12} \cdot \mathbf{e}^{-j \cdot \varphi_{12}} = (14,91 - 8,78 \cdot \text{i})\ \text{A}$

$I'_0 := I_0 \cdot \left(\frac{V_1}{V_{1n}}\right) = (0,05 - 0,31 \cdot \text{i})\ \text{A}$ $I_1 := I'_0 + I_{12} = (14,96 - 9,09 \cdot \text{i})\ \text{A}$

$\left|I_1\right| = 17,5\ \text{A}$ $\varphi_1 := -\arg\left(I_1\right) = 31,29\ °$

Rendimento

$P_{ep} := 3 \cdot R' \cdot \left|I_{12}\right|^2 = 2334,66\ \text{W}$ $P'_0 := P_0 \cdot \left(\frac{V_1}{V_{1n}}\right)^2 = 1751,57\ \text{W}$ $\eta := \frac{P_e}{P_e + P_{ep} + P'_0} = 99,23\ \%$

SOLUZIONE APPROSSIMATA

$\Delta V_{12} := \sqrt{3} \cdot \left|I_{12}\right| \cdot \left(R' \cdot \cos\varphi_e + X' \cdot \sin\left(\varphi_e\right)\right) = 413,08\ \text{V}$ $V_1 := V_{12} + \Delta V_{12} = 20413,08\ \text{V}$

$I'_0 := I_0 \cdot \left(\frac{V_1}{V_{1n}}\right) = (0,05 - 0,31 \cdot \text{i})\ \text{A}$ $I_1 := I'_0 + I_{12} = (14,96 - 9,09 \cdot \text{i})\ \text{A}$

$\left|I_1\right| = 17,5\ \text{A}$ $\varphi_1 := -\arg\left(I_1\right) = 31,29\ °$

Rendimento

$P_{ep} := 3 \cdot R' \cdot \left|I_{12}\right|^2 = 2334,66\ \text{W}$ $P'_0 := P_0 \cdot \left(\frac{V_1}{V_{1n}}\right)^2 = 1750,11\ \text{W}$ $\eta := \frac{P_e}{P_e + P_{ep} + P'_0} = 99,23\ \%$