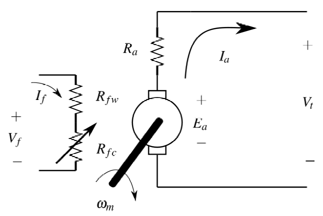
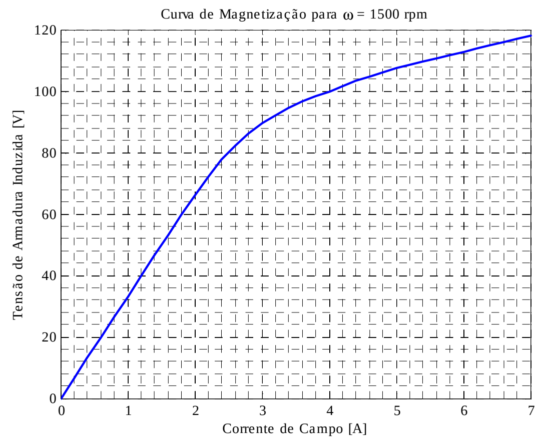
Questão 1 – P1 – 1s2011

QUESTÃO 1 (4,0 pontos) Uma máquina de corrente contínua apresenta os seguintes dados de placa: potência: 6 kW; tensão do enrolamento de armadura: 120 V; tensão do enrolamento de campo paralelo (shunt): 120 V; resistência do enrolamento de armadura: 0,18 Ω; resistência do enrolamento de campo paralelo (shunt): 24 Ω; reostato de controle de excitação: 0 – 30 Ω; número de espiras do enrolamento de campo paralelo (shunt): 1000 espiras por pólo; conexão independente. Quando submetida em laboratório ao ensaio em vazio, tendo sido acionada em 1500 rpm, a curva de magnetização abaixo é obtida. Deseja-se que esta máquina opere como gerador independente, acionada por uma pequena turbina a gás em 1800 rpm.

Conexão INDEPENDENTE



A máquina opera em 1800 rpm, porém a curva de magnetização foi levantada em 1500 rpm.



Questão 1 – P1 – 1s2011

(a) Calcule a faixa de valores de tensão terminal em vazio na qual o gerador é capaz de operar. (0,5 ponto)

RESPOSTA:

A corrente de campo é dada por:

$$I_f = \frac{V_f}{R_{fc}+R_{fw}} = \frac{120\text{V}}{R_{fc}+24\Omega}$$

Para R_{fc} variando entre 0 e 30 Ω temos:

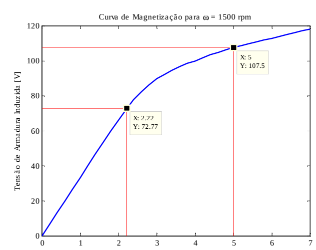
$$I_f^a = \frac{120\text{V}}{(R_{fc}+24)\Omega} = \frac{120\text{V}}{(0+24)\Omega} = 5\text{A}$$

$$I_f^b = \frac{120\text{V}}{(R_{fc}+24)\Omega} = \frac{120\text{V}}{(30+24)\Omega} = 2{,}22\text{A}$$

Da curva de magnetização em 1500 rpm temos:

$$I_f = 2{,}22\text{A} \Rightarrow E_a^{1500} = 72\text{V}$$

$$I_f = 5\text{A} \Rightarrow E_a^{1500} = 108\text{V}$$



Visto que a máquina foi acionada em 1800 rpm, temos:

$$E_a^{1800} = E_a^{1500}\cdot\left(\frac{1800}{1500}\right) = 72\cdot\left(\frac{1800}{1500}\right) = 86{,}4\text{V}$$

$$E_a^{1800} = E_a^{1500}\cdot\left(\frac{1800}{1500}\right) = 108\cdot\left(\frac{1800}{1500}\right) = 129{,}6\text{V}$$

O gerador é capaz de operar em vazio com tensão terminal na faixa 86,4 – 129,6 V.

Questão 1 – P1 – 1s2011

(b) Em qual valor o reostato de controle de corrente de campo deve ser posicionado para que a tensão terminal do gerador em vazio seja de 120 V? (0,75 ponto)

RESPOSTA:

Em vazio a tensão terminal de 120 V equivale à tensão induzida interna de 120 V. Para que tenhamos uma tensão interna de 120 V em 1800 rpm, devemos ter:

$$E_a^{1500} = E_a^{1800} \cdot \left(\frac{1500}{1800}\right) = 120 \cdot \left(\frac{1500}{1800}\right) = 100\text{V}$$

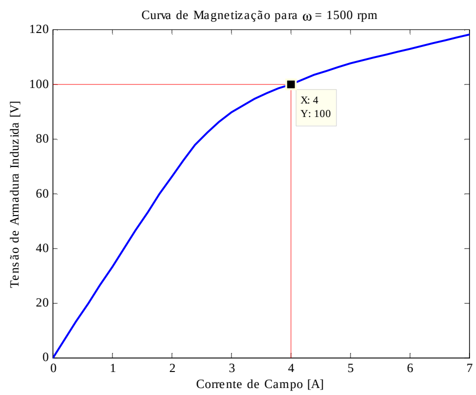
O fluxo capaz de induzir 100 V em 1500 rpm é o mesmo capaz de induzir 120 V em 1800 rpm. Pela curva de magnetização, a corrente de campo que produz tal fluxo é:

$$E_a^{1800} = 120\text{V} \Rightarrow I_f = 4\text{A} \Rightarrow E_a^{1500} = 100\text{V}$$

O reostato de controle de campo da máquina deve ser ajustado então para:

$$R_{fc} = \frac{V_f}{I_f} - R_{fw} = \frac{120\text{V}}{4\text{A}} - 24\Omega = 6\Omega$$

O reostato deve ser ajustado em 6 Ω.



Questão 1 – P1 – 1s2011

(c) O reostato é ajustado no valor do item anterior. Considere que em plena carga a reação de armadura da máquina é equivalente a uma desmagnetização $I_{f(RA)}$ = 400 mA. Qual a regulação de tensão do gerador em plena carga? (0,75 ponto)

RESPOSTA:

Em plena carga e com o reostato ajustado em 6 ohms, o efeito líquido da corrente de campo é:

$$I_f^{eff} = I_f - I_{f(\text{RA})} = 4\text{A} - 0{,}4\text{A} = 3{,}6\text{A}$$

Da curva de magnetização, para I_f = 3,6 A e ω_m = 1500 rpm temos:

$$I_f = 3{,}6\text{A} \Rightarrow E_a^{1500} = 97\text{V}$$

Como a máquina opera em 1800 rpm temos:

$$E_a^{1800} = E_a^{1500} \cdot \left(\frac{1800}{1500}\right) = 97 \cdot \left(\frac{1800}{1500}\right) = 116{,}4\text{V}$$

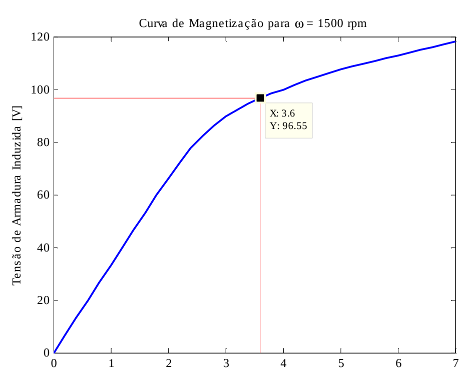
A tensão terminal em plena carga vale, portanto:

$$V_T = E_a - R_a I_a = 116{,}4 - 0{,}18 \cdot 50 = 116{,}4 - 9 = 107{,}4\text{V}$$

Logo, a regulação de tensão do gerador é:

$$r = \frac{V_T^0 - V_T^{FL}}{V_T^{FL}} = \frac{120 - 107{,}4}{107{,}4} = \frac{12{,}6}{107{,}4} = 11{,}73\%$$

O gerador tem regulação de tensão terminal de 11,73%.



Questão 1 – P1 – 1s2011

Deseja-se agora que esta máquina opere com regulação de tensão nula em plena carga. Para esta configuração, uma vez ajustado o valor do reostato não se altera mais sua posição. Para isso será necessário projetar um enrolamento série. Com base nisso obtenha:

(d) O número de espiras necessário para que a regulação de tensão do gerador a plena carga seja nula. (1,0 ponto)

RESPOSTA:

Para que a regulação de tensão em plena carga seja nula a tensão terminal em vazio e em plena carga devem ser iguais a 120 V:

$$E_a^{FL} = V_T^{FL} + R_a I_a^{FL} = 120 + 0{,}18 \cdot 50 = 129\text{V}$$

$$E_a^0 = V_T^0 = 120\text{V}$$

Do item (b), para que a tensão terminal em vazio seja 120 V, o reostato deve ser posicionado em 6 Ω e a corrente no enrolamento de campo shunt será de 4 A. Para a tensão terminal em plena carga valer 120 V, a corrente de campo efetiva deve ser tal que induziria na armadura, em vazio, uma tensão de 129 V. Do item (a) esse valor é de aproximadamente 5 A. Temos, portanto:

$$I_f^{eff} = I_f + \frac{N_{sr}}{N_{sh}} I_a - I_f^{RA} \Rightarrow 5 = 4 + \frac{N_{sr}}{1000} 50 - 0{,}4 \Rightarrow N_{sr} = 28 \text{ espiras}$$

O enrolamento série deve ter 28 espiras.

Questão 1 – P1 – 1s2011

(e) A eficiência da máquina nessas condições. Considere que as perdas rotacionais são de 270 W e a resistência do enrolamento série projetado é desprezível. (1,0 ponto)

RESPOSTA:

Para calcular a eficiência temos:

Potência de saída em plena carga com V_T = 120 V e I_a = 50 A → P_{out} = 6 kW

Perdas elétricas (ôhmicas) no circuito de armadura → $R_a I_a^2 = 0{,}18 \cdot 50^2 = 450\text{W}$

Perdas mecânicas (rotacionais) → 270 W

Potência no enrolamento shunt → V_F = 120 V e I_f = 4 A → P_f = 480 W

Deve ser fornecido ao gerador, portanto: 6000 + 450 + 270 + 480 = 7,2 kW. Logo, P_{in} = 7,2 kW.

A eficiência é a relação entre a potência de saída e a potência de entrada.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{6000}{7200} = 83{,}33\%$$

O rendimento da máquina é de 83,33%.

Questão 2 – P1 – 1s2011

QUESTÃO 2 (3,0 pontos) Um motor de corrente contínua com conexão série possui os seguintes dados de placa: potência: 7,5 hp; tensão: 120 V; resistência do enrolamento de armadura: 0,20 Ω; resistência do enrolamento de campo série: 0,16 Ω. Em plena carga a velocidade de operação do motor é de 1050 rpm. As perdas no núcleo são de 200 W e as perdas mecânicas em plena carga são de 240 W. Assuma linearidade do circuito magnético da máquina. Dado: 1 hp = 746 W.

(a) Em plena carga, qual o torque eletromagnético desenvolvido pela máquina e qual o torque mecânico disponível para acionamento da carga? (1,0 ponto)
(b) Qual o valor da corrente de armadura e da tensão induzida de armadura em plena carga? (1,0 ponto)
(c) Qual o torque de partida que a máquina é capaz de desenvolver? (1,0 ponto)

ATENÇÃO: 7,5 hp é a potência de SAÍDA, aquela que está disponível no eixo da máquina para acionar a carga mecânica após todas as perdas. Não é a potência de entrada!

Questão 2 – P1 – 1s2011

RESPOSTA:

(a) Em plena carga temos:

P_{load} = 7,5 hp $\qquad$ ω_m = 1050 rpm

Logo, o torque exigido pela carga é de:

$$T_{load} = \frac{P_{load}}{\omega_m} = \frac{7{,}5 \cdot 746\text{W}}{1050 \cdot \left(2\pi/60\right)\text{rad/s}} = \frac{5595\text{W}}{109{,}96\text{ rad/s}} = 50{,}88\text{ N.m}$$

A potência eletromagnética convertida em mecânica pela máquina é a potência de saída mais as perdas mecânicas e as perdas no núcleo:

$$P_{em} = 5595 + 200 + 240 = 6035\text{ W}$$

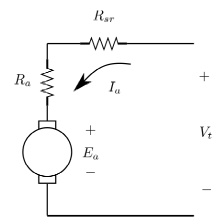
Logo, o torque eletromagnético desenvolvido pela máquina é de:

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_m} = \frac{6035\text{W}}{109{,}96\text{ rad/s}} = 54{,}89\text{ N.m}$$

A máquina desenvolve um torque de 54,89 N.m dos quais 50,88 N.m estão disponíveis para acionamento da carga mecânica. Os 4 N.m restantes são gastos para suprir as perdas rotacionais.

Questão 2 – P1 – 1s2011

(b) Do circuito elétrico equivalente da máquina temos:



$$V_T = E_a + (R_a + R_{sr}) \cdot I_a$$

Multiplicando ambos os lados da equação por I_a:

$$V_T \cdot I_a = E_a \cdot I_a + (R_a + R_{sr}) \cdot I_a^2$$

Arranjando novamente a equação temos:

$$I_a^2 - \frac{V_T}{(R_a + R_{sr})} I_a + \frac{E_a I_a}{(R_a + R_{sr})} = 0$$

O valor $E_a.I_a$ é a potência eletromagnética convertida em mecânica calculada no item (a). Substituindo os valores V_T = 120 V, $R_a + R_{sr}$ = 0,36 Ω e $E_a I_a$ = 6035 W temos:

$$I_a^2 - 333{,}33 I_a + 16763{,}89 = 0$$

Resolvendo a equação de 2º grau acima temos:

I_a = 61,72 A ou I_a = 271,61 A

A primeira solução é a que corresponde ao ponto de operação da máquina em plena carga. Para esse valor de I_a a tensão induzida de armadura vale:

$$E_a = V_T - (R_a + R_{sr}) \cdot I_a = 120 - (0{,}20 + 0{,}16) \cdot 61{,}72 = 97{,}78\text{V}$$

A corrente de armadura é de 61,72 A e a tensão induzida de armadura é de 97,78 V.

Questão 2 – P1 – 1s2011

(c) Para o motor série temos:

$T = KI^2$

Dos itens (a) e (b) temos:

Quando T = 54,89 N.m então I = 61,72 A. Logo, a constante K vale:

$$K = \frac{T}{I^2} = \frac{54{,}89}{61{,}72^2} = 0{,}0144 \frac{\text{N.m}}{\text{A}^2}$$

A corrente de partida da máquina vale:

$$I_p = \frac{V_T}{(R_a + R_{sr})} = \frac{120}{0{,}36} = 333{,}33\text{A}$$

Portanto, na partida a máquina é capaz de desenvolver torque eletromagnético de:

$T = KI^2$ = 0,0144 . 333,33² = 1600,92 N.m

A máquina é capaz de desenvolver 1600,92 N.m na partida.

ATENÇÃO: No motor DC o fluxo φ é criado pela corrente de armadura e, portanto, depende da carga que a máquina aciona. Não podemos considerar $K_a \varphi$ constante para qualquer valor de corrente de armadura!

Questão 3 – P1 – 1s2011

QUESTÃO 3 (3,0 pontos) Um motor de corrente contínua tem o seguintes dados: 50 hp, 200 V, 1800 rpm, conexão paralela, resistência do circuito de armadura = 0,15 Ω. Dado: 1 hp = 746 W.

(a) Estime a corrente de partida direta dessa máquina em pu. (0,5 ponto)
(b) Deseja-se que a corrente de armadura durante a partida seja limitada na faixa de valores de 200 a 400 A. Determine a quantidade e o valor de cada um dos resistores que deve ser projetado na caixa de partida da máquina. (1,5 ponto)
(c) Determine os valores da velocidade da máquina nos instantes de chaveamento dos resistores da caixa de partida. (1,0 ponto)

RESPOSTA:

(a) A corrente de partida direta em pu pode ser estimada por:

Valor da corrente de partida direta em Ampères:

$$I_a^p = \frac{V_T}{R_a} = \frac{200}{0,15} = 1333,33\text{A}$$

A corrente nominal da máquina em Ampères é de aproximadamente:

$$I_a^{rated} = \frac{P}{V_T} \approx \frac{50 \cdot 746}{200} = 186,50\text{A}$$

Portanto, a corrente de partida direta é da ordem de:

$$I_a^p(\text{pu}) = \frac{1333,33}{186,50} = 7,15\text{pu}$$

A corrente de partida direta é da ordem de 7,15 pu.

Questão 3 – P1 – 1s2011

(b) Visto que a corrente máxima admissível na armadura é de I_a = 400 A e na partida ω_m = 0 e, portanto, E_a = 0, o valor da resistência externa de armadura inicialmente necessária é dado por:

$$R_{ae1} = \frac{(V_T - E_a)}{I_{a(máx)}} - R_a = \frac{(200-0)\text{V}}{400\text{A}} - 0,15\Omega = 0,35\Omega$$

Conforme a máquina acelera e ganha velocidade, a tensão induzida na armadura aumenta e a corrente de armadura é reduzida. Ao chegar a I_a = 200 A, uma parte da resistência R_{ae1} externa é "bypassada" e a corrente subirá novamente para, no máximo, I_a = 400 A. Neste instante a tensão induzida na armadura vale:

$$E_a = V_T - (R_{ae1} + R_a) \cdot I_a = 200\,\text{V} - (0,35 + 0,15)\Omega \cdot 200\,\text{A} = 100\,\text{V}$$

O novo valor da resistência externa de armadura necessária R_{ae2} será:

$$R_{ae2} = \frac{(V_T - E_a)}{I_{a(máx)}} - R_a = \frac{(200-100)\text{V}}{400\text{A}} - 0,15\Omega = 0,10\Omega$$

A máquina continua então acelerando e ganhando velocidade até que a corrente de armadura seja novamente reduzida a 200 A. Nesse instante, a tensão induzida terá atingido o valor:

$$E_a = V_T - (R_{ae1} + R_a) \cdot I_a = 200\,\text{V} - (0,10 + 0,15)\Omega \cdot 200\,\text{A} = 150\,\text{V}$$

Se "bypassarmos" completamente a resistência externa nesse instante (de R_{ae2} = 0,10 Ω para R_{ae3} = 0) a corrente de armadura saltará para:

$$I_a = \frac{V_T - E_a}{R_{ae3} + R_a} = \frac{200-150}{0,15} = \frac{50\text{V}}{0,15\Omega} = 333,33\text{A}$$

Abaixo, portanto, do limite admissível de 400 A. Neste ponto a máquina continuará acelerando até que, em regime, a corrente de armadura atinja o seu valor proporcional à carga que o motor aciona.

Para o acionamento desta máquina são necessárias 2 resistências na caixa de partida, cada uma valendo 0,25 Ω e 0,10Ω.

Questão 3 – P1 – 1s2011

A velocidade da máquina é dada por:

$$\omega_m = \frac{E_a}{K_a\phi}$$

Sabendo-se que quando E_a = 200 V a velocidade é ω_m = 1800 rpm, a constante $K_a\varphi$ pode ser determinada por:

$$K_a\phi = \frac{E_a}{\omega_m} = \frac{200}{1800} = 0{,}11\ \text{V/rpm}$$

Portanto, a velocidade nos instantes de chaveamento das resistências externas é:

$$\omega_m^a = \frac{E_a}{K_a\phi} = \frac{100}{0{,}11} = 900\ \text{rpm}$$

$$\omega_m^b = \frac{E_a}{K_a\phi} = \frac{150}{0{,}11} = 1350\ \text{rpm}$$

A velocidade nos instantes de chaveamento das resistências é 900 e 1350 rpm.