



DISCIPLINA: SEL 0422 – Máquinas Elétricas

PROFESSOR: Luís Fernando Costa Alberto

LISTA DE EXERCÍCIOS - Nº 1

Obs.: A maior parte destes exercícios foi retirada do livro texto “An Introduction to Electrical Machines and Transformers”, dos autores McPherson & Laramore.

- 1) Mostrar que a expressão do campo girante $f_1 = f_a + f_b + f_c$ é $f_1(t, \theta_e) = \frac{3}{2} F_{\max} \cos(\omega_e t - \theta_e)$, sendo:

$$f_a(t, \theta_e) = F_{\max} \cos \omega_e t \cos \theta_e,$$

$$f_b(t, \theta_e) = F_{\max} \cos(\omega_e t - 120^\circ) \cos(\theta_e - 120^\circ),$$

$$f_c(t, \theta_e) = F_{\max} \cos(\omega_e t - 240^\circ) \cos(\theta_e - 240^\circ)$$

Onde: $F_{\max} = F_{\max} = F_{\max} = F_{\max}$.

- 2) Considere um gerador síncrono trifásico de 14 pólos e com um diâmetro interno do estator de 92 cm e com um enrolamento estatórico de dupla camada. O passo da bobina é igual a sete passos de ranhuras. Para uma determinada condição de carga, o fluxo magnético no entreferro por polo é 0,15 Wb. Considere o número de espiras por bobina $N_c=1$ e a frequência igual a 60 Hz.
- Encontre: γ e ρ em graus elétricos e graus mecânicos.
 - Desenhe um conjunto de 18 ranhuras para 2 dos 14 polos (Figura 1) e localize os lados das bobinas para todas as três fases nessas ranhuras colocando por exemplo as letras $a_1, a_1', b_1, b_1', c_1, c_1'$ nos locais apropriados.
 - Calcule K_p (fator de passo), K_d (fator de distribuição) e K_w (fator de enrolamento).
 - Qual a velocidade de operação deste gerador para que gere tensão elétrica com frequência de 60Hz.
 - Calcule $|E_\phi|$, a tensão induzida em cada fase do enrolamento do estator, e a tensão de linha se a conexão dos enrolamentos está em Y.

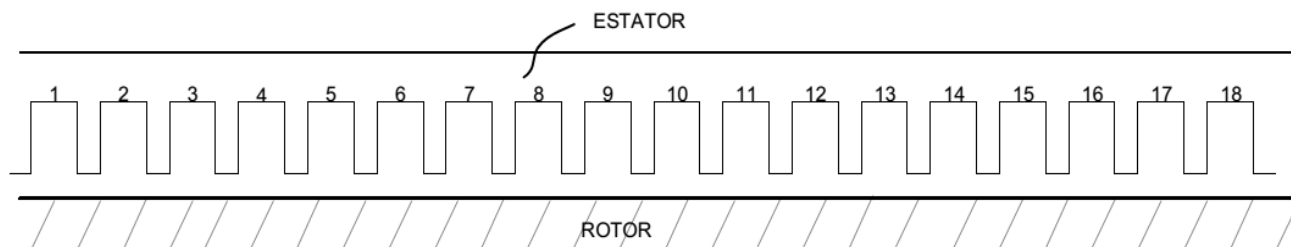


Figura 1 - Enrolamento planificado do enrolamento estatórico de dupla camada com 18 ranhuras.

- 3) Estudamos em sala de aula o enrolamento de duas camadas no estator de um motor de indução. No enrolamento em dupla camada (dado em aula) o número de bobinas é igual ao número de ranhuras, pois cada ranhura contém dois lados de bobinas. Considere um enrolamento de estator com apenas uma camada, ou seja, cada ranhura aloca apenas um lado de uma bobina. Dado que a máquina é trifásica e de 2 pólos, e que existem 12 ranhuras, pede-se:



- O número de bobinas do enrolamento do estator?
- Qual é o número de bobinas por fase por polo?
- Complete o enrolamento do estator abaixo (Figura 2), utilizando para as fases as letras a, b, c e numerando as bobinas de cada grupo. Por exemplo, para a primeira bobina da fase a, utiliza-se a_1 para um lado da bobina e a_1' para o outro lado. Para isto, considere que as bobinas possuam passo pleno, ou seja, tem seus lados distanciados de 180 graus elétricos.
- Considerando que a tensão induzida em cada bobina seja de $10 V_{rms}$ e que a máquina esteja ligada em Y, calcule a tensão de linha da máquina.

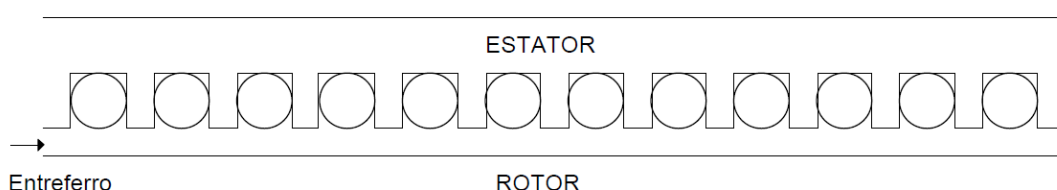


Figura 2 - Diagrama planificado do enrolamento estatórico de uma camada de uma máquina de indução trifásica de 2 polos.

- Em condições equilibradas, correntes circulam no estator de uma máquina síncrona trifásica (60Hz) de seis polos, produzindo um valor de pico da componente fundamental da FMM de uma fase de 400 Amperes-espiras. Para uma determinada condição de operação, o valor de pico da FMM produzida pelo enrolamento de campo do rotor é 600 Amperes-espiras e $\beta = 120^\circ$.
 - Escreva a expressão para a força magnetomotriz f_a produzida pela fase a utilizando a equação: $f_a = (F_{a1} \cos \omega_e t) \cos \frac{P}{2} \theta_1$, onde θ_1 é dado em ângulos mecânicos e ω_e é a frequência angular ($2 \cdot \pi \cdot f$) da corrente no enrolamento do estator.
 - Escreva a expressão para f_1 , a componente fundamental da FMM produzida pelo enrolamento do estator.
 - Qual é a velocidade do rotor em radianos por segundo? Rotações por minuto?
 - Encontre $|\vec{R}|$, δ_{SR} e δ_{FR} , conforme Figura 3, sendo β o ângulo entre $\vec{F}_2$ e $\vec{F}_1$, δ_{SR} o ângulo entre $\vec{F}_1$ e $\vec{R}$ e δ_{FR} o ângulo entre $\vec{F}_2$ e $\vec{R}$.

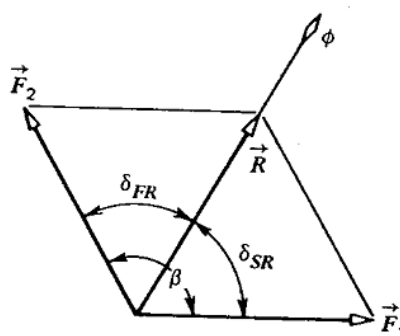


Figura 3- Vetores das FMM em uma máquina síncrona.



- 5) O diâmetro externo de um rotor é de 74 cm e o comprimento axial é de 152 cm. A máquina possui quatro polos, e a densidade de fluxo na superfície exterior do rotor é dada por $1.2 \cos \theta_{2e}$, onde θ_{2e} é medido em graus elétricos.
- Encontre o fluxo por polo.
 - Se $|\vec{R}|$ é 22.000 amperes-espiras, calcule P_p .
 - Encontrar a tensão rms induzida em uma bobina se a frequência é de 60 Hz, o passo da bobina é 150° elétricos, e cada bobina possui 2 espiras.
- 6) Para uma determinada máquina tem-se $|f_2| = 800$ amperes-espiras, $|f_1| = 300$ amperes-espiras, $\beta = 126,9^\circ$ e $P_p = 1,505 \cdot 10^{-4}$ Wb/amperes-espiras (ou seja, H/espiras²). Encontre o fluxo por polo no entreferro produzido pela FMM resultante $\vec{R}$.
- 7) Uma máquina trifásica 2.300 V, 2 polos, possui 42 ranhuras no estator. Cada ranhura acomoda dois condutores em um enrolamento de dupla camada, de modo que $N_c = 1$ espira. O passo da bobina é de 17 ranhuras. Considere que cada enrolamento de fase seja ligado em dois caminhos paralelos. Isto é, os dois grupos da fase são ligados em paralelo em vez de serem ligados em série. Como N_ϕ é definido como sendo o número de espiras por fase conectadas em série, temos que neste caso, N_ϕ é dado por $\frac{1}{2} p n N_c$.
- Encontre o passo de ranhura (γ) e o passo de bobina (ρ) em ângulos elétricos.
 - Encontre os fatores: K_p (fator de passo), K_d (fator de distribuição) e K_w (fator de enrolamento).
 - Encontre N_ϕ para esta máquina.
 - Encontre ϕ , fluxo por polo, necessário para gerar uma tensão de fase de 1386 V (ou seja, $2400 / \sqrt{3}$) a 3600 rotações por minuto.
- 8) Num determinado motor de indução trifásico, $N_{l1} = 350$ espiras $\left[N_{l1} = \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{4}{\pi} \right) (N_{\phi 1} / p) \sqrt{2} k_{w1} \right]$. Sob certas condições de operação, o pico de F_2 (MMF do rotor) é de 1800 A-espiras e a corrente de magnetização I_ϕ é de 3 A_{rms}. O fator de potência em relação ao circuito do rotor é 0.94, atrasado. Encontre I_1 , a corrente rms do estator.
- 9) Um motor de indução trifásico com rotor bobinado tem as três fases do rotor ligado em Y. Com o rotor em circuito aberto e parado, a tensão entre os anéis deslizantes é de 152.4 V quando a tensão de fase do estator é de 220 V. Encontre as relações de espiras de tensão e corrente, a_E e a_I . Sendo:

$$a_E = \frac{N_{E1}}{N_{E2}} \quad a_I = \frac{N_{I1}}{N_{I2}}$$