Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica
IEE2213 - Máquinas Eléctricas
Segundo Semestre de 2021

Interrogación 02

Conversión, Campo Magnético Rotatorio y Máquina Síncrona

10 de Noviembre de 2021

Nombre: _____ RUN: _____

Indicaciones Generales

1. Solo podrá tener sus lápices, goma y corrector en su escritorio o algún otro elemento de apoyo de esa índole como regla, escuadra, transportador, etc.
2. No utilice hojas adicionales para el desarrollo de su prueba. Se le proveerá de hojas suficientes para el desarrollo.
3. No utilice formularios adicionales.
4. Puede utilizar una calculadora de tipo NO PROGRAMABLE.
5. No se permite el uso del celular, ni ningún otro dispositivo electrónico durante la prueba (tablet, reloj inteligente, etc). La hora y el tiempo restante de la prueba, serán proyectados en la sala.
6. Antes de comenzar la prueba apague su teléfono celular y déjelo en su bolso o mochila (no en el bolsillo).
7. La prueba consta de una primera parte teórica y una segunda parte de ejercicios. Ambas partes podrán ser resueltas de forma libre por el estudiante durante todo el tiempo que dure la interrogación, siempre y cuando indique claramente qué pregunta responde. El puntaje total es de 60 puntos.
8. Responda de forma ordenada y **solo en las hojas de desarrollo**. Las hojas de enunciado no serán corregidas.
9. La escala de evaluación es del 60 % con nota entre $1.0 - 7.0$ en función del puntaje obtenido.
10. La prueba tiene una duración de 150 minutos.

1. Sección Teórica (25 Puntos)

Argumente con la información técnica que permita validar su respuesta y su cocimiento en la temática.

1. Considerando el siguiente diagrama de una máquina básica:

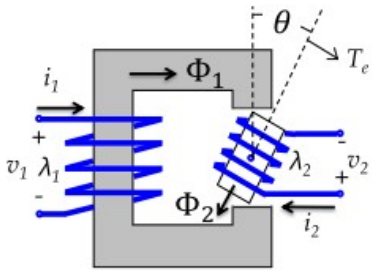


Figura 1: Circuito General Máquina Básica.

a) Determine una ecuación en función del ángulo θ para las inductancias propias de cada enrollado y para la inductancia mutua entre el enrollado de estator y rotor.
b) Determine una ecuación general de torque identificando claramente los términos para **Torque Mutuo** y **Torque de reluctancia**.
c) Determine una nueva expresión de torque si reemplazamos el rotor de la Fig. 1 por un rotor cilíndrico. Considere que dicho rotor tiene un único enrollado en la misma posición que el de la Fig. 1.
d) Determine una nueva expresión de torque si reemplazamos el rotor de la fig. 1 por un rotor con 4 polos (dos pares de polos) solo de materíal ferromagnético (sin enrollados).
e) Considere que el rotor y el estator de la Fig. 1 son cilíndricos. Considere que alimenta el enrollado estatórico con una corriente AC: $i_1 = I_1 cos(\omega_t)$ y el enrollado rotórico con un corriente DC: $i_2 = I_{DC}$. Determine cual es la relación que se debe cumplir entre ω y ω_m (velocidad del rotor) para que exista torque medio (considere solo un par de polos).
Hint:
$sin(\alpha \pm \beta) = sin(\alpha)cos(\beta) \pm cos(\alpha)sin(\beta)$
$cos(\alpha \pm \beta) = cos(\alpha)cos(\beta) \mp sin(\alpha)sin(\beta)$

2. Considere que tiene un estator cilíndrico como el de la Fig. 2 (desprecie el rotor), el cual tiene tres enrollados estatóricos, desplazados en 120° mecánicos entre ellos.

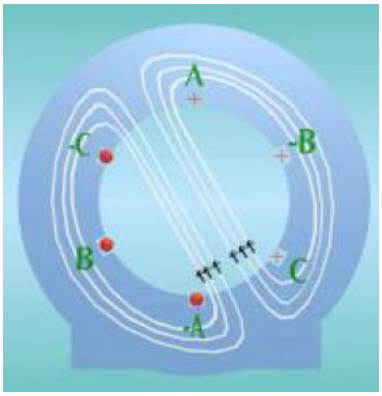


Figura 2: Estator Cilíndrico máquina trifásica.

a) Determine analíticamente una expresión para la fuerza magnetomotriz equivalente cuando cada uno de estos enrollados se alimenta con corrientes sinusoidales desplazadas en 120° eléctricos.
b) Dibuje un nuevo estator, considerando que solo puede utilizar dos enrollados (denominados α y β), para poder obtener un a fuerza magnetomotriz equivalente a la obtenida en la pregunta anterior. Identifique claramente la posición mecánica de cada enrollado.
c) Determine una expresión analítica para las corrientes i_α e i_β tal que la fuerza magnetomotriz resultante sea un campo magnético rotatorio de magnitud constante y frecuencia de 700Hz.

2. Sección Teórica (25 Puntos)

Argumente con la información técnica que permita validar su respuesta y su cocimiento en la temática.

1.a) Las inductancias propias del enrollado 1 L_{11} y del enrollado 2 L_{22}, pueden ser expresadas como:

$$L_{11} = L_a + L_b \cos 2\theta$$

$$L_{22} = L_c + L_d \cos 2\theta$$

Esto se debe a que, como se muestra en la Fig. 1, cuando el rotor se encuentra alineado con el estator ($\theta = 0$ y $\theta = 180$), para ambos devanados se genera un camino magnético de menor reluctancia y por ende de mayor inductancia. Esto se refleja en la Fig. 3. En donde L_a y L_c son congruentes con $0.5(L_d + L_q)$ y L_b y L_d con $0.5(L_d - L_q)$.

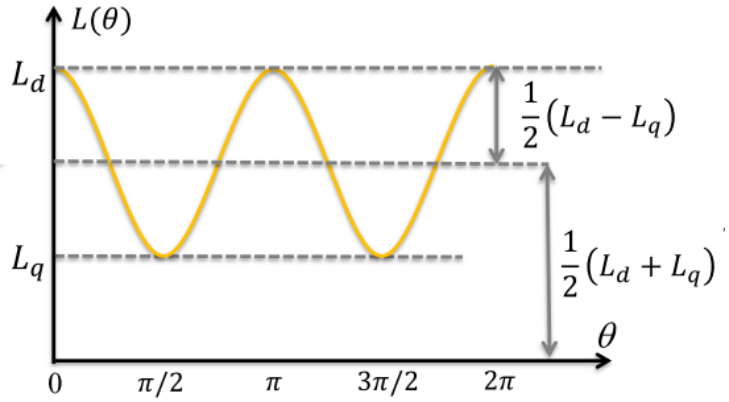


Figura 3: Dinámica de inductancia propia.

Cuando el rotor se encuentra en la posición que produce un entrehierro de mayor envergadura en el camino magnético de los flujos enlazados por cada bobina ($\theta = 90$ y $\theta = 270$), el valor de la reluctancia es máximo y, en consecuencia, la inductancia es mínima.

En el caso de la inductancia mutua entre estator y rotor, esta presenta valor nulo cuando los flujos de ambos enrollados son perpendiculares ($\theta = 90$ y $\theta = 270$). Además, presenta un máximo cuando los flujos están alineados en el mismo sentido ($\theta = 0$) y un mínimo cuando son opuestos ($\theta = 180$). Como resultado, la inductancia mutua puede ser expresada como:

$$L_{12} = L_{21} = L_m \cos\theta$$

1.b) En el caso en que se consideran dos devanados, asumiendo un núcleo lineal, la coenergía del sistema puede ser establecida como:

$$W'_m(i,x) = \frac{1}{2}[i]^T[L(\theta)][i]$$

En donde $[i]$ e $[L]$ corresponden a las matrices de corrientes e inductancias de los devanados. La primera de ellas, para este caso, de $2x1$ y la segunda de $2x2$.

El torque eléctrico producido por una máquina de dos enrollados, en consecuencia, puede ser obtenido como:

$$T_e = \frac{d}{d\theta}W'_m(i,\theta) = \frac{1}{2}[i]^T\frac{d}{d\theta}[L(\theta)][i]$$

Considerando las matrices:

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{22} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix}$$

$$[i] = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

El torque queda expresado como:

$$T_e = \frac{1}{2}i_1^2\frac{dL_{11}}{d\theta} + i_1 i_2\frac{dL_{12}}{d\theta} + \frac{1}{2}i_2^2\frac{dL_{22}}{d\theta}$$

En donde el primer y tercer término corresponden al torque de reluctancia, es decir, es producido debido a la variación de la reluctancia asociada a la inductancia propia de cada devanado. El segundo término es el torque mutuo, el cual es producido por la variación del flujo mutuo.

1.c) Para el caso de un rotor cilíndrico, la inductancia L_{11} es constante, debido a que la estructura del rotor permite que el camino magnético para el flujo propia del enrollado del estator es invariante y, en consecuencia, no varía ni la reluctancia ni la inductancia. Así, teniendo en cuenta la expresión previa de torque, este puede ser reescrito para un rotor cilíndrico como:

$$T_e = i_1 i_2\frac{dL_{12}}{d\theta} + \frac{1}{2}i_2^2\frac{dL_{22}}{d\theta}$$

1.d) En el caso de que se produzca un aumento a un número de cuatro polos y que la máquina no presente enrollados en el rotor, la expresión de torque:

$$T_e = \frac{1}{2}i_1^2\frac{dL_{11}}{d\theta} + i_1 i_2\frac{dL_{12}}{d\theta} + \frac{1}{2}i_2^2\frac{dL_{22}}{d\theta}$$

Debe ser modificada debido a que $i_2 = 0$. En dicho caso, el torque eléctrico queda expresado como:

$$T_e = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_{11}}{d\theta}$$

Además, se debe efectuar una modificación en la dinámica de las inductancias de tal forma que el ángulo θ' correspondiente a P polos sea:

$$\theta' = \frac{P}{2}\theta$$

1.e) Si el estator y el rotor son cilíndricos, los torques de reluctancia son nulos debido a que las inductancias propias de ambos devanados son constantes y, en consecuencia, solo existe torque mutuo. Así, el torque es obtenido como:

$$T_e = i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d\theta}$$

Reemplazando los valores de L_{12}, i_1 e i_2 se obtiene:

$$T_e = L_m I_{DC} I_1 \cos(\omega t) \frac{d\cos(\theta)}{d\theta} = -L_m I_{DC} I_1 \cos(\omega t)\,\mathrm{sen}(\theta)$$

La posición angular θ de la máquina puede ser expresa en función de la velocidad angular y de la posición inicial como:

$$\theta = \omega_m t + \delta$$

Reemplazando se obtiene:

$$T_e = -L_m I_{DC} I_1 \cos(\omega t)\,\mathrm{sen}(\omega_m t + \delta)$$

De esta forma, teniendo en cuenta la identidad trigonométrica:

$$\cos x \,\mathrm{sen}\, y = \frac{1}{2}[\mathrm{sen}(x+y) - \mathrm{sen}(x-y)]$$

El torque puede ser expresado como:

$$T_e = -L_m I_{DC} I_1 \cdot \frac{1}{2}[\mathrm{sen}(\omega t + \omega_m t + \delta) - \mathrm{sen}(\omega t - \omega_m t - \delta)]$$

El torque medio de la máquina es obtenido al integral en un periodo de tiempo T:

$$T_m = -L_m I_{DC} I_1 \cdot \int_0^T \left[\frac{1}{2}[\mathrm{sen}(\omega t + \omega_m t + \delta) - \mathrm{sen}(\omega t - \omega_m t - \delta)]\right] dt$$

Notar que, la expresión solo presenta valor medio si $|\omega| = |\omega_m|$. A modo de ejemplo, si ambas velocidades son iguales en signo, entonces:

$$T_m = -L_m I_{DC} I_1 \cdot \frac{1}{2} \operatorname{sen} \delta$$

2.a) Dadas las corrientes sinusoidales:

$$\begin{aligned} i_a(t) &= I_m \cos(\omega t) \\ i_b(t) &= I_m \cos(\omega t - 120) \\ i_c(t) &= I_m \cos(\omega t + 120) \end{aligned}$$

Las FMM de cada una de las fases está dado por:

$$\begin{aligned} F_a(t) &= F_m \cos(\omega t) \cos(\theta) \\ F_b(t) &= F_m \cos(\omega t - 120) \cos(\theta - 120) \\ F_c(t) &= F_m \cos(\omega t + 120) \cos(\theta + 120) \end{aligned}$$

Utilizando la identidad trigonométrica:

$$\cos x \cos y = \frac{1}{2}[\cos(x + y) + \cos(x - y)]$$

Así, las FMMs se simplifican a:

$$\begin{aligned} F_a(t) &= \frac{1}{2} F_m [\cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t - \theta)] \\ F_b(t) &= \frac{1}{2} F_m [\cos(\omega t - 120 + \theta - 120) + \cos(\omega t - 120 - \theta + 120)] \\ F_c(t) &= \frac{1}{2} F_m [\cos(\omega t + 120 + \theta + 120) + \cos(\omega t + 120 - \theta - 120)] \end{aligned}$$

Sumando las expresiones se obtiene:

$$F_s = \frac{3}{2} F_m \cos(\omega t - \theta)$$

Expresión correspondiente al teorema de Ferraris. Se debe considerar que, en términos simplificados:

$$F_m = \frac{N}{2} I_m$$

2.b) En la Fig. 4 se muestra la disposición que deben tener los devanados para la nueva disposición.

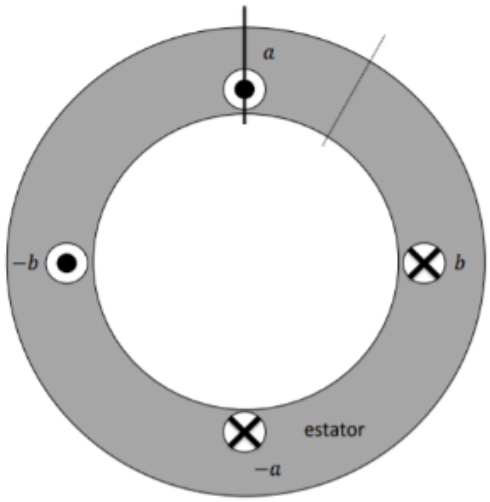


Figura 4: Estator cilíndrico con devanados en cuadratura.

Considerando las corrientes de la forma:

$$i_\alpha(t) = I_n \cos(\omega t)$$
$$i_\beta(t) = I_n \cos(\omega t - 90)$$

Las FMMs de los enrollados pueden ser obtenidas como:

$$F_\alpha(t) = \frac{1}{2} F_n [\cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t - \theta)]$$
$$F_\beta(t) = \frac{1}{2} F_n [\cos(\omega t - 90 + \theta - 90) + \cos(\omega t - 90 - \theta + 90)]$$

Al sumar las expresiones, se obtiene:

$$F_{sn} = F_n \cos(\omega t - \theta)$$

Considerando que:

$$F_n = \frac{N_n}{2} I_n$$

El campo magnético rotatorio será igual si:

$$F_s = F_{sn} \rightarrow \frac{3}{2} F_m = F_n \rightarrow \frac{3}{2}\frac{N}{2} I_m = \frac{N_n}{2} I_n$$

2.c) Para obtener un CMR de magnitud constante y frecuencia de 700 Hz, se deben aplicar corrientes de amplitud constante, ya sea I_m o I_n, dependiendo del caso, y la frecuencia ω debe ser la representación angular de la frecuencia eléctrica objetivo, es decir, $\omega = 2\pi \cdot 700$ rad/s.

3. Problema 1 (25 puntos)

La topología de la Fig. 5, está compuesta por un núcleo magnético que presenta una pierna central con una parte móvil que puede efectuar un movimiento horizontal sin desplazarse verticalmente. Además, en la pierna central no móvil, existe un enrollado que presenta N número de vueltas.

El núcleo es cilíndrico de radio r a lo largo de toda su longitud. La pieza móvil se encuentra separada a una distancia x del núcleo central en el eje horizontal y a una distancia y del núcleo en el eje vertical positivo y negativo, como se indica en la Fig. 5.

Considere que se aplica una corriente continua I de 10 mA en el devanado, que el número de vueltas N es igual a 500 y que el núcleo presenta un comportamiento ideal (permeabilidad infinita). Además, la distancia y es de 1 mm mientras que la distancia x es variable. El radio r del núcleo es 5 cm.

1. (5 puntos) Dibuje el circuito magnético equivalente del sistema y obtenga la expresión genérica para la inductancia del enrollado en función de la distancia x.

2. (5 puntos) Obtenga la expresión para la fuerza ejercida por el sistema de conversión en función de la distancia x. Desprecie el efecto de fuerzas asociadas a esfuerzos mecánicos, al efecto del roce y debido a la gravedad.

3. (5 puntos) Considerando que la bobina posee una resistencia de 100 Ω, calcule la tensión que debe ser aplicada al bobinado para mantener una corriente constante de 10mA, mientras la distancia de la pieza móvil se mueve entre 5mm a 2.5 mm en un tiempo de 15 ms. Considere que la inductancia varía de forma lineal durante el tiempo en que la pieza móvil se está desplazando.

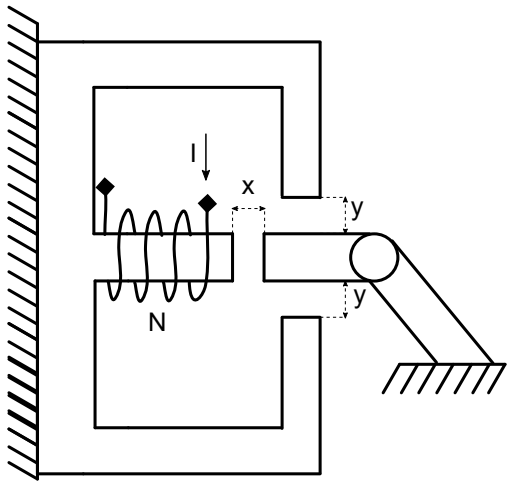


Figura 5: Topología de conversión para Problema 1.

4. Problema 1 - Solución

1. El circuito magnético equivalente del sistema se describe en la Fig. 6, en donde $\Re_x$ y $\Re_y$ corresponden a las reluctancias producidas por los entrehierros asociados a la distancia x e y, respectivamente.

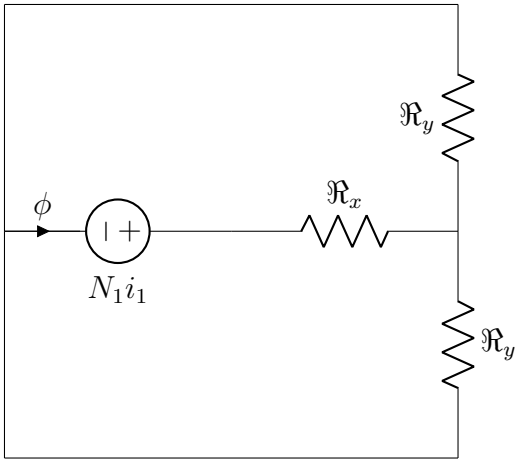


Figura 6: Circuito magnético equivalente para Problema 1.

La inductancia del sistema puede ser determinada mediante la expresión:

$$L = \frac{N^2}{\Re}$$

En donde $\Re$ corresponde a la reluctancia equivalente del circuito magnético. En consecuencia, la reluctancia equivalente puede ser obtenida a partir del circuito magnético como:

$$\Re = \Re_x + \Re_y \parallel \Re_y = \Re_x + \frac{\Re_y}{2} = \frac{x}{\mu_0 \pi r^2} + \frac{y}{2\mu_0 \pi r^2} = \frac{2x + y}{2\mu_0 \pi r^2}$$

Finalmente, la expresión para determinar el valor de la inductancia del sistema puede ser obtenida como:

$$L = \frac{N^2}{\frac{2x+y}{2\mu_0 \pi r^2}} = \frac{2N^2 \mu_0 \pi r^2}{2x + y}$$

2. Dado que la curva de imantación del sistema presenta una característica lineal, la energía y la co-energía magnética son equivalentes y pueden ser definidas como:

$$W'_m = W_m = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}\frac{2N^2\mu_0\pi r^2}{2x+y}I^2$$

La fuerza ejercida es obtenida haciendo uso de su relación con la co-energía como:

$$F = \frac{\partial W'_m(I,x)}{\partial x}$$

Reemplazando la expresión de la co-energía y derivando respecto a x, la fuerza es calculada como:

$$F = \frac{1}{2}I^2\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{2N^2\mu_0\pi r^2}{2x+y}\right)\hat{x} = \frac{1}{2}I^2\left(\frac{-2\cdot 2N^2\mu_0\pi r^2}{(2x+y)^2}\right)\hat{x} = -\frac{2I^2N^2\mu_0\pi r^2}{(2x+y)^2}\hat{x}$$

En donde $\hat{x}$ representa un vector unitario en el eje x.

3. Considere el circuito eléctrico equivalente del sistema mostrado en la Fig. 7.

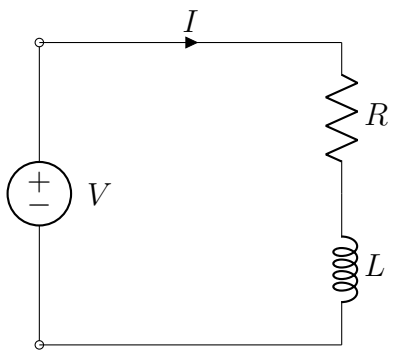


Figura 7: Circuito eléctrico equivalente para Problema 1.

A partir de éste, es posible establecer las ecuaciones de mallas para la determinación del voltaje V como:

$$V = RI + \frac{\partial}{\partial t}(LI)$$

Dado que se desea mantener una corriente constante en el devanado, la derivada parcial respecto de esta variable es nula, entonces la expresión previa es simplificada como:

$$V = RI + (\frac{\partial L}{\partial t}I + \frac{\partial I}{\partial t}L) = RI + (\frac{\partial L}{\partial t}I + 0\cdot L) = RI + \frac{\partial L}{\partial t}I$$

Considerando una relación lineal entre la variación de inductancia y del tiempo, la derivada parcial del valor de inductancia puede ser simplificada como:

$$\frac{\partial L}{\partial t} \approx \frac{\Delta L}{\Delta t}$$

En consecuencia, la tensión que debe ser aplicada al devanado, considerando la presencia de la resistencia del enrollado, puede ser establecida como:

$$V = RI + \frac{\Delta L}{\Delta t} I$$

En base a la expresión obtenida para la fuerza (F) es posible concluir que, al aplicar una corriente al devanado, la pieza móvil presentará un movimiento en el sentido $\hat{x}$, es decir, tenderá a juntarse con la pierna central del núcleo. Por este motivo, para el caso en estudio en este apartado, $L(0) = L_{x=0.005}$ y $L(t_1) = L_{x=0.0025}$, con t_1 igual a 15 ms. Así, se obtiene:

$$\frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{L_{x=0.0025} - L_{x=0.005}}{t_1 - 0}$$

Y, por lo tanto, la tensión es expresada como:

$$V = RI + \frac{L_{x=0.0025} - L_{x=0.005}}{t_1 - 0} I$$

Calculando cada inductancia en función de la posición, se obtiene:

$$L_{x=0.0025} = \frac{2 \cdot 500^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 0.05^2}{2 \cdot 0.0025 + 0.001} = 0.8225[H]$$

$$L_{x=0.005} = \frac{2 \cdot 500^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 0.05^2}{2 \cdot 0.005 + 0.001} = 0.4486[H]$$

Finalmente, la tensión requerida es obtenida como:

$$V = 100 \cdot 0.01 + \frac{0.8225 - 0.4486}{0.015 - 0} \cdot 0.01 = 1.25[V]$$

5. Problema 3 (20 Puntos)

Se tiene un motor síncrono trifásico de rotor cilíndrico conectado a una barra infinita de 2300 [V] entre fases en estrella. La máquina presenta un potencia nominal y frecuencia eléctrica de 1 [MVA] y 50 [Hz], respectivamente. La máquina eléctrica cuenta con 10 polos y su reactancia sincrónica X_s es igual a 7,3 [Ω]. Las pérdidas en la máquina son despreciables. El motor síncrono absorbe 760[kW] y opera con un factor de potencia de 0,85 capacitivo.

1. (7 puntos) Determine el voltaje inducido E_g y la corriente I_a que circula desde la red eléctrica al motor.

2. (8 puntos) a) Dibuje el diagrama fasorial de la máquina para el punto de operación obtenido en el punto 1, indicando claramente el módulo y ángulo de cada vector; b) Determine si el motor está sobreexcitado o subexcitado; c) Explique que debe suceder con la magnitud de la tensión E_g para que el motor invierta el flujo de potencia reactiva y que variable de la máquina puedo controlar para que esto sea posible.

3. (5 puntos) Determine la velocidad de giro del rotor en rad/s y en RPM. Calcule el torque electromagnético generado.

6. Problema 3 - Solución

1. A partir del circuito equivalente del motor síncrono mostrado en la Fig. 8, se obtiene la ecuación 1.

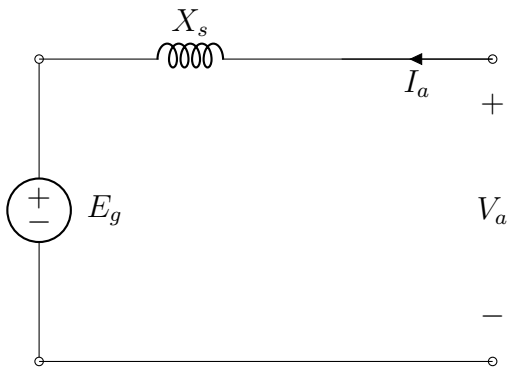


Figura 8: Circuito equivalente simplificado de motor sincrónico conectado a una barra infinita.

$$E_g = V_a - jX_s I_a \tag{1}$$

La corriente en la máquina se obtiene a través de la expresión de potencia compleja suministrada a la máquina eléctrica desde la red teniendo en cuenta a la tensión de la barra infinita V_a como referencia angular. La potencia compleja es calculada en primera instancia, notar que en ella se considera un ángulo negativo debido a que se trata de un factor de potencia capacitivo. Esto potencia resulta en:

$$S = \frac{P}{FP}\angle - \arccos FP = \frac{760000}{0.85}\angle - \arccos 0.85 = 894.12\angle - 31.8^o[kVA] \tag{2}$$

La corriente, en consecuencia, es calculada como:

$$S = 3V_a I_a^* \rightarrow I_a = \left[\frac{S}{3V_a}\right]^* = \left[\frac{894120\angle - 31.8^o}{3 \cdot \frac{2300}{\sqrt{3}}}\right]^* = 224.4\angle 31.8^o[A] \tag{3}$$

Una vez obtenida la corriente I_a se hace uso de la ecuación 1 para obtener la FEM inducida en el motor sincrónico. Esta tensión resulta en:

$$E_g = \frac{2300}{\sqrt{3}} - j7.3 \cdot 224.4\angle 31.8^o = 2596\angle - 32.43[V] \tag{4}$$

2. El diagrama fasorial del sistema se muestra en la Fig. 9. En donde se observa que la tensión V_a corresponde a la tensión de referencia. La corriente calculada I_a, se encuentra en adelanto respecto del voltaje debido a que el motor inyecta reactivos a la red eléctrica.

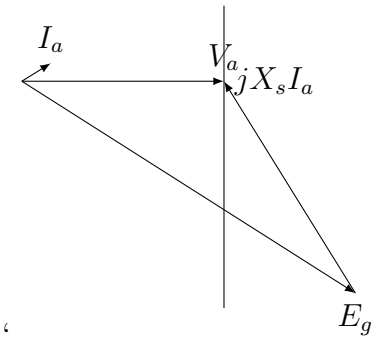


Figura 9: Diagrama fasorial de tensiones y corrientes de máquina sincrónica.

La tensión inducida E_g, al estar en un punto de operación como motor, se encuentra en atraso respecto de la tensión V_a debido a que al actuar como motor se transforma en un carga para la barra infinita. Así mismo, al inyectar reactivos a la red, dicha tensión E_g presenta una magnitud tal que su vector se ubica a la derecha de la línea vertical.

Cuando la tensión E_g se encuentra a la derecha de dicha línea la máquina entrega reactivos a la red eléctrica, mientras que cuando se encuentra a la izquierda esta absorbe reactivos de la red. Cuando E_g se posiciona sobre la línea vertical, esta opera con factor de potencia unitario. En este caso, la máquina se encuentra operando como motor sincrónico sobre-excitado o motor capacitivo.

Para que la máquina comience a absorber reactivos, la tensión E_g debe disminuir su magnitud de tal forma que su vector se posicione a la izquierda de la línea vertical. Dependiendo del punto de operación, esto se puede producir tanto con una disminución del módulo del ángulo δ o con un aumento de este. La magnitud de la potencia activa y reactiva en la máquina, en consecuencia, es susceptible tanto a la variación del ángulo δ como de la magnitud de E_g. En general, se puede decir que la potencia activa es más susceptible a la variación del ángulo δ y que la potencia reactiva es más susceptible a la variación del módulo de E_g.

Con el fin de controlar el módulo de E_g, es necesario tener acceso al devanado del rotor con el fin de modificar la magnitud de la tensión de excitación del rotor con el fin de controlar la magnitud de la corriente en dicho rotor. Esto se debe a que la tensión inducida E_g es directamente proporcional a la magnitud de la corriente en el devanado del rotor.

3. La velocidad sincrónica de giro de la máquina es obtenida teniendo en cuenta la frecuencia eléctrica f de la red eléctrica y el número de pares de polos (P_p) del motor. De esta forma dicha velocidad puede ser obtenida como:

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{P_p} = \frac{2\pi \cdot 50}{5} = 62,83[\text{rad/s}] \tag{5}$$

Así mismo, esta velocidad puede ser expresa en términos de revoluciones por minuto (RPM) utilizando la siguiente relación:

$$\omega_s = \frac{60 f}{P_p} = \frac{60 \cdot 50}{5} = 600[RPM] \tag{6}$$

El torque eléctrico en el eje de la máquina, puede ser obtenido considerando la potencia trifásica absorbida por la máquina y la velocidad de giro del eje ω_s. De esta forma, dicho torque puede ser calculado como:

$$T = \frac{P}{\omega_s} = \frac{760000}{62,83} = 12096[Nm] \tag{7}$$