Interrogación 3

IEE2213 Máquinas Eléctricas

13 de diciembre de 2023

Nombre: _____

Cuenta con **2 horas** para responder en este mismo documento. Sólo el uso de **calculadora** y un **formulario personal** en una hoja tamaño carta por una cara está permitido. No puede utilizar ningún material adicional (celulares, apuntes, libros, etc.). Antes de comenzar la prueba apague su teléfono celular y déjelo en su bolso o mochila (no en el bolsillo).

Parte I. (50 %) Selección múltiple, Verdadero y Falso, Respuestas Breves

Selección Múltiple con N alternativas: Correcta (+3) Incorrecta (-3/(N-1)) Omitida (0)

1. Una máquina síncrona de rotor cilíndrico está conectada a una barra infinita y funcionando como generador sub-excitado con $E_g = V$ cuando repentinamente la potencia mecánica se reduce a la mitad por falla mecánica. Entonces se puede afirmar con certeza que:

   (a) La máquina pasa a funcionar como generador sobre-excitado.
   (b) La máquina continua funcionando como generador sub-excitado.
   (c) El factor de potencia disminuye.
   (d) El ángulo de carga aumenta.

   RESPUESTA: B

2. El efecto del tamaño del entrehierro en una máquina de inducción está de alguna manera representado en el circuito equivalente por:

   (a) R_{eq} y X_{eq}
   (b) R'_r y X_{eq}
   (c) X_m y X_{eq}
   (d) R_p y R'_r

   RESPUESTA: C

3. Se tienen dos motores jaula de ardilla trifásicos idénticos, a excepción del material utilizado en los cables del estator, donde uno es de aluminio y el otro es de cobre, entonces:

   (a) El motor de aluminio será mas eficiente.
   (b) El motor de aluminio tendrá mayor torque de partida.

(c) El motor de aluminio funcionará con un mayor deslizamiento máximo.

(d) El motor de aluminio tendrá menor torque máximo.

RESPUESTA: D

4. En una máquina de inducción de doble jaula:

   (a) La jaula externa tiene mayor resistencia y reactancia que la jaula interior.
   (b) La jaula externa tiene menor resistencia y reactancia que la jaula interior.
   (c) La jaula externa tiene mayor resistencia y menor reactancia que la jaula interior.
   (d) La jaula externa tiene menor resistencia y mayor reactancia que la jaula interior.

   RESPUESTA: C

5. El parámetro G (inductancia rotacional) de una máquina de corriente continua incluye:

   (a) El diámetro y largo del rotor, además del entrehierro.
   (b) Los números de vueltas de las bobinas del rotor y estator.
   (c) El tipo de fierro utilizado en la construcción de la máquina.
   (d) Todas las anteriores.

   RESPUESTA: D

6. Tanto la máquina síncrona como la máquina de inducción pueden funcionar como generador o motor. Sin embargo, la máquina síncrona es la más utilizada para generación eléctrica debido a que:

   ____ (V/F) La máquina síncrona es más eficiente.
   ____ (V/F) La máquina de inducción **NO** puede generar reactivos.
   ____ (V/F) La máquina síncrona requiere menos mantención.

   RESPUESTA: V / V / F

7. Un vehículo de la fórmula E posee una máquina de inducción. Al comienzo de la carrera la batería se descarga aún cuando el conductor frena, pero luego de algunas vueltas la batería es cargada cada vez que el conductor frena.

   Lo anterior se explica porque al comienzo, la máquina funciona como _____ (motor/generador/freno), y luego opera como _____ (motor/generador/freno).

   RESPUESTA: freno / generador

8. La reacción de armadura es el efecto que tiene la fmm del rotor sobre el campo resultante total en una máquina DC. Una solución es utilizar _____, pero hace a la máquina mas voluminosa y pesada. Otra solución es poner _____, que son bobinas en el estator, conectadas en serie con el rotor.

   Estas soluciones son para desplazar el _____ , tal de evitar que se genere _____ en el colector.

RESPUESTA: devanados compensadores / interpolos / desplazar el neutro, neutralizar reacción inducido / chispas - cortocircuito devanado

9. Respecto de la frecuencia de deslizamiento ω_s y el deslizamiento s en una máquina de inducción de un par de polos, se tiene que:
   ____ (V/F) ω_s representa la diferencia relativa entre la frecuencia de alimentación y la frecuencia rotórica.
   ____ (V/F) s posee una magnitud levemente superior a cero en operación nominal.
   ____ (V/F) s modifica el valor de la resistencia rotórica.

   SOLUCION: V/V/F

10. La máquina DC corresponde a un familia de máquinas que poseen distintas características.

    ____ (V/F) El motor serie es utilizado para sistemas de tracción debido al alto torque de partida.
    ____ (V/F) El motor compound aditivo largo tiene menor torque que un motor serie con la misma rama serie.
    ____ (V/F) La diferencia entre el compound largo y corto no es significativa.
    ____ (V/F) La máquina de excitación separada es la más fácil de controlar.

    Pregunta 12: V/F/V/V

Parte II. Desarrollo (50 %)

Problema 1: Máquina Síncrona

Un generador sobre-excitado de polos salientes con 14 polos, conectado en estrella y de valores nominales 120 MVA, 13.2 kV, 50 Hz y un factor de potencia igual a 0.8 se encuentra conectado a una red de 50 Hz y 13.2 kV. Se sabe que la reactancia directa del generador es de 0.62 Ω y la reactancia en cuadratura es de 0.4 Ω.

1. Calcule el voltaje interno generado en la máquina si esta se encuentra operando en condiciones nominales.

2. Calcule la regulación de voltaje para esta máquina.

3. Determine el ángulo de carga al cual la máquina entrega su máxima potencia y luego compare el resultado anterior para una Máquina Síncrona de rotor cilíndrico con reactancia de inducido igual a la reactancia directa.

Solución:

1. Primero se calcula la corriente del inducido o de armadura $\mathbf{I_A}$:

$$I_A = \frac{S^{3\phi}\sqrt{3}}{3 \cdot V_\phi} = \frac{120\ MVA}{\sqrt{3} \cdot 13.2\ kV} = 5248.6\ A$$

$$\mathbf{I_A} = I_A \angle -\arccos(0.8) = 5248.6 \angle -36.87°$$

Luego, la ecuación dada el circuito equivalente del generador de polos salientes es:

$$\mathbf{E_A} = \frac{\mathbf{V}_\phi}{\sqrt{3}} + R_s\mathbf{I_A} + jX_d\mathbf{I_d} + jX_q\mathbf{I_q}$$

Para encontrar las corrientes $\mathbf{I_d}$ e $\mathbf{I_q}$, primero debemos determinar el ángulo de carga δ correspondiente al fasor $\mathbf{E_A}$. Para ello se tiene el siguiente diagrama fasorial:

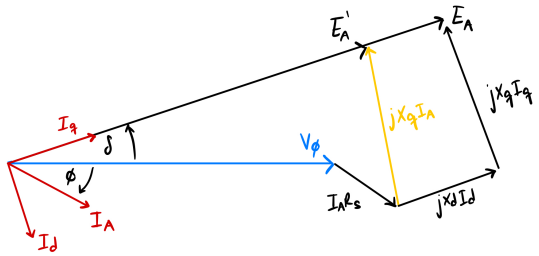


Figura 1: Diagrama fasorial máquina síncrona

Del diagrama anterior se obtiene que la corriente en cuadratura sigue a al fasor $\mathbf{E_A}$:

$$\mathbf{E_A}' = \frac{\mathbf{V}_\phi}{\sqrt{3}} + jX_q\mathbf{I_A} = 7261.02\angle 0° + j0.4 \cdot 5248.6\angle -36.87° = 9038\angle 10.71°$$

Luego las corrientes:

$$\mathbf{I_q} = I_A \cos(|\phi| + |\delta|)\angle\delta = 3540.5\angle 10.71°$$

$$\mathbf{I_d} = I_A \sin(|\phi| + |\delta|)\angle\delta - 90° = 3875\angle -79.29°$$

Finalmente, el voltaje generado:

$$\mathbf{E_A} = 7261.02\angle 0° + +j(0.62)3875\angle -79.29° + j(0.4)3540.5\angle 10.71° = 9890\angle 10.71°$$

2.

$$\epsilon = \frac{|\mathbf{E_A}| - |\mathbf{V}_\phi/\sqrt{3}|}{|\mathbf{V}_\phi/\sqrt{3}|} \cdot 100\,\% = 29.8\,\%$$

3. La potencia puede calcularse por medio de:

$$P^{3\phi} = \frac{3|\mathbf{E_A}||\mathbf{V}_\phi/\sqrt{3}|}{X_d}\sin(\delta) + \frac{3|\mathbf{V}_\phi/\sqrt{3}|^2}{2}(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d})\sin(2\delta)$$

$$P^{3\phi} = 364.7\sin(\delta) + 77.3\sin(2\delta)\ MW$$

$$\frac{\partial P^{3\phi}}{\partial \delta} = 364.7\cos(\delta) + 154.6\cos(2\delta) = 0$$

utilizando la identidad:

$$\cos(2\theta) = 2\cos^2(\theta) - 1$$

$$\frac{\partial P^{3\phi}}{\partial \delta} = 364.7\cos(\delta) + 2 \cdot 154.6\cos^2(\delta) - 154.6 = 0$$

realizando la sustitución:

$$u = \cos(\delta) = 0.329$$

podemos resolver la ecuación cuadrática para u y así encontrar el ángulo de carga que me entrega la potencia máxima:

$$\delta_{max} = \arccos(u) = 70.79^\circ$$

por último la potencia máxima entregada será:

$$P^{3\phi}_{max} = 392.43\ MW$$

Luego, la expresión para la potencia de una máquina síncrona de rotor cilíndrico:

$$P^{3\phi} = \frac{3|\mathbf{E_A}||\mathbf{V}_\phi/\sqrt{3}|}{X_s}\sin(\delta)$$

notamos que esta potencia toma su valor máximo para un:

$$\delta_{max} = 90^\circ$$

Y la potencia máquina que puede entregar este generador será:

$$P^{3\phi}_{max} = 347.47\ MW$$

Problema 2: Máquina AC

Considere un motor de inducción trifásico de 4 polos de rotor bobinado, conectado en estrella y alimentado con 2300V, 50 Hz. A este se le realizaron las siguientes pruebas de vacío y rotor bloqueado.

Prueba	$I_{\phi 1}$	$Voltaje_{f-n}$	$Potencia_{\phi 1}$
?	7.7 A	1329 V	956 W
?	50.3 A	268 V	6067 W

1. Calcule los parámetros del circuito equivalente y dibuje el circuito referido al estator con estos valores. Para sus cálculos considere $X_s = 2\Omega$ y $R_s = 1\Omega$.

2. Considerando que el motor experimenta un torque en el eje equivalente a T = 1500Nm, calcule su deslizamiento y su velocidad mecánica.

3. Considere que ahora se agrega una resistencia en el rotor de $R = 1\Omega$, y la relación de vueltas es $a = 1$. Sabiendo que el nuevo deslizamiento es de $s = 0.07$, cual es el torque que ejerce la maquina.

4. Considerando este ultimo caso con resistencia, que corriente circula por el estator. Para sus cálculos desprecie la rama de excitación.

Solución:

1. Con la prueba de Vacío calculamos el factor de potencia.

$$cos(\varphi) = \frac{P_o}{V_o \cdot I_o} = 0.0935 \Rightarrow \varphi = 84.63^\circ \tag{1}$$

Luego R_m es:

$$R_m = \frac{V_o}{I_o \cdot \cos(84.63)} = 1843\Omega \tag{2}$$

Luego X_m es:

$$X_m = \frac{V_o}{I_o \cdot \sin(84.63)} = 173.23\Omega \tag{3}$$

Ahora con la prueba de rotor bloqueado calculamos el factor de potencia.

$$cos(\varphi) = \frac{P_b}{V_b \cdot I_b} = 0.45 \Rightarrow \varphi = 63.2538^\circ \tag{4}$$

La rama de excitación se deprecia ya que el voltaje aplicado al primario es muy pequeño.

$$\frac{V_b}{I_b \angle \varphi} = Z_{eq} = 2.3978 + 4.758j \tag{5}$$

Con lo entregado por el enunciado tenemos:

$$R_s = 1; \quad R'_r = 1.3978; \quad R_\Phi = 1843.19; \quad X_\Phi = 173.23; \quad X_s = 2; X'_r = 2.758 \tag{6}$$

2. Dado que tenemos 4 polos (2 pares), debemos calcular primer w_s.

$$w_s = \frac{50Hz \cdot 2\pi}{2} = 50\pi$$

$$T_{3\phi} = \frac{3R'_r}{s\omega_s} \frac{V_e^2}{\left(R_e + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + X_{eq}^2}$$

$$150 = \frac{3 \cdot 1.3978}{s \cdot \pi \cdot 50} \frac{1329^2}{\left(1 + \frac{1.3978}{s}\right)^2 + 4.758^2} \tag{7}$$

Resolviendo llegamos a dos valores.

$$s = 0.0726 \qquad s = 1.13896$$

Dado que s va de 1 a 0 como motor, nos quedamos con s = 0.0726.

$$w_m = w_s(1-s)$$
$$w_m = 145.68[\frac{rad}{s}]$$
$$w_m = 1385[rpm]$$

3. Resolvemos como antes, pero ahora para el torque y agregamos la nueva resistencia.

$$T_{3\phi} = \frac{3(R_r^{'}+1)}{s\omega_s}\frac{V_e^2}{\left(R_e + \frac{R_r^{'}+1}{s}\right)^2 + X_{eq}^2}$$

$$T = 912Nm$$

Sin olvidar que este es el torque trifásico, por lo que para despejar la corriente en la ecuación de potencia se debe dividir por 3.

4. Sabemos que la potencia mecánica se puede obtener dada la siguiente ecuación.

$$(I_r^{'})^2 \cdot R_e^{'}\frac{(1-s)}{s} = \frac{Torque}{3}\cdot w_m$$

$$w_m = (1-s)w_s = 146.084$$

$$(I_r^{'})^2 \cdot (1.3978+1)\frac{(1-0.07)}{0.07} = \frac{912}{3}\cdot 146.084$$

$$I_r^{'} = 37.4A$$

Si despreciamos la rama de excitación:

$$I_s = I_r^{'} = 37.4A$$

Problema 3: Máquina DC

Se desea diseñar un motor en configuración shunt, el cual es alimentado en sus bornes mediante un voltaje DC fijo de 400 [V]. Algunos parámetros fijos de construcción son:

- $N_r = 100$ y $N_s = 2500$. Con N_s y N_r la cantidad de vueltas en el estator y rotor.
- $R_c = 2 * R_a$. (Resistencia de campo y armadura respectivamente).

El voltaje inducido E_g es 150 V cuando el motor opera en su punto **nominal**.

Además, el diseño a realizar debe cumplir que el motor opere en condiciones **nominales** para las siguientes dos cargas de manera **independiente**:

$$T_1 = \frac{3000}{w_m} \tag{8}$$

$$T_2 = \frac{w_m}{25} \tag{9}$$

Es decir, si el motor opera con la carga T_1 por si sola, este estará en condiciones nominales, al igual que si opera solo con la carga T_2.

Para el diseño se le pide que encuentre los valores nominales de:

a) Torque y velocidad

b) Corriente de campo y armadura (1 pto.)

c) Resistencia de armadura y campo (1 pto.)

d) Inductancia rotacional (1 pto.)

e) Flujo magnético del campo (1 pto.)

f) Reluctancia del entre-hierro (0.5 pto.)

g) Relación entre el largo y área del entre-hierro (0.5 pto.)

Solución: Se conocen las ecuaciones clásicas para una máquina DC, las cuales son:

$$T = G \cdot i_a \cdot i_c \tag{10}$$

$$E_g = G \cdot w_m \cdot i_c \tag{11}$$

En (10) es posible despejar G y reemplazarlo en (11), obteniendo lo siguiente:

$$E_g = \frac{T \cdot w_m}{i_a} \tag{12}$$

Y reemplazando la ecuación de torque de carga 1 en 12 es posible obtener la corriente de armadura para dicha condición.

$$i_a = 20 \ [A]$$

Ahora que conocemos la corriente de armadura que necesitamos, podemos calcular mediante la rama de la armadura la resistencia necesaria:

$$E_g + i_a \cdot R_a = 400[V] \tag{13}$$

$$R_a = 12.5 \ [\Omega]$$

Y recordando que se pide que la resistencia de campo es el doble que la de armadura:

$$R_c = 25 \ [\Omega]$$

Como una de las condiciones es que los torques para ambas cargas sean iguales, es posible igualar los dos torques de carga:

$$\frac{w_m}{25} = \frac{3000}{w_m} \tag{14}$$

Que despejando y eligiendo arbitrariamente el valor positivo de velocidad:

$$w_m = 273.861 \ [\frac{rad}{s}]$$

$$w_m = 43.5864 \ [Hz]$$

$$w_m = 2615.18 \ [rpm]$$

Conociendo entonces la velocidad nominal de la máquina, la corriente de armadura y E_g, es posible obtener el torque a partir de 12.

$$T = 10.9545 \ [Nm]$$

Para calcular la corriente de campo, es simplemente despejar la corriente en la rama shunt del circuito, obteniendo:

$$i_c = \frac{V_{dc}}{R_c}$$

$$i_c = 16\ [A]$$

La inductancia rotacional es posible despejarla a partir de (11) o (10), ya que recordamos que todo lo calculado además de cumplir con las especificaciones, también se busca que sean las características nominales de la máquina. Reemplazando se obtiene:

$$G = 34.2327\ [mH]$$

Aún falta calcular la relación entre el largo y el área del airgap, para esto se hará uso de las siguientes ecuaciones:

$$\Phi_c = \frac{N_s \cdot i_c}{\Re} \tag{15}$$

$$G = \frac{N_s \cdot N_r}{\Re} \tag{16}$$

Despejando en ambas N_s y luego igualando es posible obtener el valor del flujo magnético:

$$\phi_c = \frac{G\ i_c}{N_r}$$

Donde tenemos valores conocidos:

$$\Phi_c = 5.47723\ [mWb]$$

Ahora, con los datos obtenidos hasta ahora, es posible calcular la reluctancia del entrehierro ya sea ocupando (15) o (16), obteniendo con 15:

$$\Re = 7302970\ [\frac{A}{Wb}]$$

Para finalizar, recordando que la reluctancia se define como $\Re = \frac{l}{A \cdot \mu_0}$ es posible obtener la relación entre el largo y el área del entrehierro, resultando en:

$$\frac{l}{A} = 9.17718\ [\frac{1}{m}]$$

Finalizando con el diseño de la máquina Shunt.