Dpto. de Ingeniería Eléctrica
E.T.S. de Ingenieros Industriales
Universidad de Valladolid

2003/2004

MÁQUINAS ELÉCTRICAS:

MÁQUINA SÍNCRONA

3º DE INGENIEROS INDUSTRIALES

Boletín de Problemas

MÁQUINA SÍNCRONA

Problemas propuestos

1. De un motor síncrono trifásico de 50 CV, 380 V, 10 polos, 50 Hz, conectado en estrella, se conocen los siguientes datos:

Impedancia síncrona:	0,4 + j 5 Ω por fase
Pérdidas rotatorias (que se suponen constantes) :	2,5 kW
Resistencia del inductor:	40 Ω

Se fija la intensidad de excitación en 5 A, de forma que cuando el motor suministra su potencia nominal el factor de potencia del motor es de 0,8 en adelanto. Calcular, en estas condiciones, el rendimiento del motor.

2. Un motor síncrono trifásico, de 380 V, 50 Hz, 30 kVA, factor de potencia 0,8 en adelanto y conectado en estrella, tiene una impedancia síncrona por fase de 1 + 2j Ω. Sus pérdidas totales mecánicas y magnéticas, supuestas constantes, ascienden respectivamente a 0,6 y 0,4 kW. Inicialmente, su eje está alimentando una carga de 15 CV y el factor de potencia es de 0,8 en adelanto. Partiendo de esta situación inicial, se desea conocer en qué proporción hay que variar el flujo para que la potencia en el eje aumente un 20 por 100 y la intensidad de línea se mantenga en el valor de la carga anterior.

3. Un motor síncrono trifásico de 4 polos, tiene una resistencia de inducido despreciable y una reactancia síncrona de 3 Ω/fase. Está conectado a una red de 2000 V, 50 Hz. La excitación es constante y produce una f.e.m. de 1150 V/fase. Calcular la potencia activa absorbida de la línea, el factor de potencia y el par desarrollado en el eje si la corriente del inducido es de 200 A.

4. Un motor síncrono trifásico conectado en estrella, con 4 polos, 50 Hz, 380 V, tiene una impedancia síncrona por fase de 0,04 + 0,4 j Ω. La intensidad de excitación se fija para que la tensión inducida sea de 450 V, siendo la potencia de entrada al motor, en estas condiciones, de 140 kW. Calcular:

a) La intensidad de entrada.

b) El par interno.

5. En la central eléctrica de un aeropuerto existen dos grupos electrógenos de $6\sqrt{3}$ kV en paralelo que alimentan una carga trifásica equilibrada de 4000 kW con factor de potencia en retardo de 0,9. Los generadores síncronos de ambos grupos están conectados en estrella y tienen impedancias síncronas, por fase, de Z1 = 0,6 + j 10 Ω para uno y Z2 = 0,4 + j 11 Ω para el otro. En determinadas circunstancias la potencia que suministran ambos generadores es la misma y el número 1 tiene una corriente por el inducido de 130 A en retardo. Calcular las tensiones inducidas de ambos generadores y la corriente por el inducido del generador número 2 y su factor de potencia.

6. Un motor síncrono trifásico hexapolar, conectado en estrella, tiene una resistencia de campo de 30 Ω y se supone despreciable la resistencia eléctrica efectiva del devanado del estator. Las conclusiones obtenidas al ensayar la máquina como generador impulsado a 1000 r.p.m. son las siguientes: en vacío, la tensión inducida compuesta en función de la intensidad de excitación viene dada por $E = 40\ I_e$. En cortocircuito, la intensidad por el inducido en función de la intensidad de excitación viene dada por $I_{cc} = 66\ I_e$. En unas condiciones determinadas, el motor suministra una potencia en el eje de 57 CV a una carga mecánica, estando conectado a una red trifásica de 220 V, 50 Hz, de la cual absorbe 48 kVA, con factor de potencia 0,9 en adelanto. En dichas condiciones, calcular:

a) La reactancia síncrona.

b) La intensidad de excitación.

c) Las pérdidas rotatorias.

d) El par interno.

e) El rendimiento del motor.

7. Un alternador trifásico tiene una resistencia de inducido despreciable y una reactancia síncrona de 30 Ω/fase. Está acoplado a una red de potencia infinita de 11 kV y desarrolla 4000 kVA con f.d.p. unidad. Si se aumenta la f.e.m. un 20% permaneciendo constante la entrada de potencia a la máquina motriz. Determinar el nuevo f.d.p. con que trabajará la máquina y la potencia aparente que suministra. Justifíquese cómo se conectaría el alternador, ¿en estrella o en triángulo?.

8. Una máquina síncrona, octopolar, conectada en estrella, tiene una reactancia síncrona por fase de 6 Ω. Funcionando como motor se conecta a una red trifásica de tensión desconocida a 50 Hz, absorbiendo una corriente de 105 A con un factor de potencia en retardo de 0,8 y suministrando una potencia de 865 kW. La máquina se conecta como alternador con el mismo valor de la corriente de excitación que anteriormente como motor, y proporciona una tensión de 6000 V a una carga trifásica equilibrada con factor de potencia 0,6. Calcular:

a) La tensión de la red de alimentación al motor.

b) La potencia de la carga conectada al generador.

9. Las siguientes pruebas se refieren a un alternador trifásico conectado en estrella de 400 V:

Vacío: tensión 400 V y excitación de 6 A

Cortocircuito: I_{cc} = 400 A, I_{ex} = 4,5 A

I_{cc} = 800 A, I_{ex} = 9,5 A

La característica de cortocircuito se supone lineal. La resistencia entre dos terminales cualesquiera es de 0,3 Ω. Utilizando el método de la "impedancia síncrona saturada", calcular el porcentaje de regulación para un f.d.p. de 0,8 en retardo, siendo la corriente de plena carga de 50 A.

10. Un motor síncrono trifásico conectado en estrella, de 50 CV, 380 V, 10 polos, 50 Hz, tiene una reactancia síncrona por fase de 1 Ω. Suponiendo despreciables las pérdidas, se pide calcular:

a) El par interno con la carga nominal y el factor de potencia unidad.

b) Manteniendo constante la intensidad de excitación en el valor fijado en el apartado a), la intensidad y el factor de potencia para que el par interno sea máximo, así como el valor de este par.

11. La instalación eléctrica de un hangar, que se considera equilibrada, consume 15 kW con un factor de potencia de 0,8 en retardo. La tensión de alimentación es trifásica a 220 V, 50 Hz. Para corregir el factor de potencia a 0,96 en retardo, se ha decidido utilizar un motor síncrono trifásico hexapolar a 220 V de 6,5 CV, cuyo estator está conectado en triángulo. La curva de magnetización de esta máquina da los siguientes valores:

I_e (a)	*0,5*	*1*	*1,25*	*1,5*	*2*	*3*	*4*
E_i (V)	83	166	208	220	250	290	320

siendo la resistencia del circuito de excitación 50 Ω. El motor en vacío a 220 V, 50 Hz, con una intensidad de excitación de 1,25 A consume 2,2 A. Un ensayo en cortocircuito da una corriente por el inducido de 25,4 A, con una intensidad de excitación de 1,5 A. Calcular la intensidad de excitación del motor para alcanzar el factor de potencia deseado trabajando a plena carga, así como la potencia absorbida en la excitación del motor. Se supondrá despreciable la resistencia del devanado del estator.

12. Dos alternadores idénticos de 5000 kVA, 6,6 kV, conectados en estrella funcionan en paralelo con las mismas excitaciones y se reparten por igual una potencia activa de 8 MW a 6,6 kV con f.d.p. 0,8 inductivo. Las resistencias de los inducidos son despreciables y las reactancias síncronas por fase valen 17,4 Ω. Se pide:

a) Calcular las f.e.m.s de línea de cada generador.

b) Si la f.e.m. de uno de los generadores se reduce un 15% determinar la f.e.m. que tendrá que generarse en el otro para evitar un cambio en la tensión en barras y un suministro adicional de vapor a "cada uno".

c) Calcular en las condiciones del apartado anterior las corrientes suministradas por cada generador y sus f.d.p.

13. Una industria absorbe una potencia activa de 2000 kW con f.d.p. 0,6 inductivo de una red de 6000 V. Se coloca un motor síncrono conectado en estrella que va a desarrollar una potencia activa de 400 kW con rendimiento 0,8 para elevar el f.d.p. de la instalación a la unidad. Se pide:

a) Determinar la potencia aparente del motor síncrono y el f.d.p. con el que trabaja.

b) Si el motor tiene una resistencia de inducido despreciable y una reactancia síncrona de 2 Ω/fase, estando la curva de vacío determinada por la ecuación:

$$E_o = \frac{9000\, I_e}{30 + I_e}$$

donde E_o se expresa en voltios de línea, e I_e en amperios de excitación. Calcular la f.e.m. E_o del motor y la excitación necesaria en el inductor.

14. Un motor síncrono trifásico a 220 V, 50 Hz, con seis polos y conectado en estrella, tiene una impedancia síncrona por fase de 0,25 + 2j Ω. La intensidad de excitación de este motor se ajusta para que la tensión inducida alcance un valor de 1,5 veces su tensión nominal y el factor de potencia en adelanto sea de 0,8. Calcular:

a) La potencia interna.

b) El par de salida sabiendo que las pérdidas rotatorias, supuestas constantes, ascienden a 300 W.

c) Rendimiento del motor en las condiciones del apartado anterior.

15. Un motor síncrono trifásico de 400 V., 6 polos, 50 Hz., conectado en estrella, tiene una impedancia síncrona de 0,5 + j 4 Ω./fase. Absorbe una corriente de 15 A. con f.d.p. unidad cuando funciona con una cierta excitación. Si se aumenta el par de carga hasta que la corriente de línea sea de 60 A., permaneciendo constante la excitación, hallar el par total desarrollado y el nuevo f.d.p.

16. Dos alternadores idénticos conectados en estrella, están acoplados en paralelo alimentando una carga aislada. Ambas máquinas, tienen sus resistencias de inducido despreciables y sus reactancias síncronas son de 10 Ω/fase. Las f.e.m.s. generadas por cada alternador son E_1 = 6700 V/fase y E_2 = 6500 V/fase estando la f.e.m. E_2 adelantándose 10º eléctricos respecto a E_1. Si la carga absorbe una corriente total de 500 A que está desfasada 37º en retraso respecto a la f.e.m. E_1, calcular:

a) La tensión en la barra común a ambas máquinas en voltios por fase.

b) Las corrientes suministradas por cada alternador con sus f.d.p.

c) El f.d.p. de la carga.

17. Un motor síncrono trifásico de 6600 V conectado en estrella, trabaja con tensión constante y excitación constante. Su impedancia síncrona es 2 + j 20 Ω/fase. Cuando la entrada es de 1000 kW, el f.d.p. es de 0,8 capacitivo. Hallar el f.d.p. cuando se aumenta la entrada hasta 1500 kW.

18. Dos alternadores idénticos de 15 MVA, 6,6 kV, 50 Hz. conectados en estrella, están acoplados en paralelo, suministrando en conjunto a una red aislada una potencia de 20 MW con f.d.p. 0,8 inductivo. Ambos generadores tienen resistencias de inducido despreciables y reactancias síncronas de un valor de 2,83 Ω/fase. Sabiendo que la potencia activa se reparte pro igual entre ambos generadores y que el primero tiene una f.e.m. de 11484 V de línea, calcular:

a) Las corrientes suministradas por cada generador con sus f.d.p respectivos.

b) La f.e.m. generada por el segundo alternador.

19. Un generador síncrono de 20 kVA, 380 V, 50 Hz, conectado en estrella, tiene una impedancia síncrona por fase de 0,4 + 1,4 j Ω y una resistencia del inductor de 4 Ω. Cuando el generador suministra su potencia nominal con un factor de potencia de 0,8 en retardo, la intensidad de excitación es de 5 A y las pérdidas rotatorias, supuestas constantes, son 0,5 kW. En dichas condiciones de carga, calcular:

a) La potencia de entrada al generador.

b) El rendimiento del generador.

20. Un generador síncrono trifásico conectado en estrella de 6600 V, 50 Hz, tiene una resistencia del inducido despreciable y una reactancia síncrona constante. La curva de vacío está definida por la ecuación.

$$E_o = \frac{12210\ I_e}{85 + I_e}$$

donde E_o expresa la f.e.m. de línea e I_e la corriente de excitación. Se conecta la máquina a una red de potencia infinita; una vez efectuado el acoplamiento y sin cambiar la corriente de excitación, se abre el distribuidor de agua a la turbina hasta que el alternador suministra a la red una potencia activa de 10 MW. En esta situación se aumenta la corriente de excitación un 50% respecto al valor de conexión sin modificar la potencia de entrada a la máquina motriz comprobándose entonces que se obtiene un f.d.p. 0,8 inductivo. Calcular:

a) La reactancia síncrona del alternador.

b) El f.d.p. con el que trabaja la máquina antes de cambiar la excitación y entregando la potencia de 10 MW.

21. Un alternador trifásico conectado en estrella tiene una resistencia de inducido despreciable y una reactancia síncrona de 10 Ω./fase. Está acoplado a una red de potencia infinita de 11 kV y se sabe que desarrolla una potencia con f.d.p. 0,673 inductivo, siendo el ángulo de potencia δ = 10º. Calcular:

a) La f.e.m. de línea producida por el generador.

b) La potencia activa que suministra el alternador a la red.

c) Regulación de tensión del alternador.

22. Un alternador trifásico conectado en estrella tiene una resistencia del inducido despreciable y una reactancia síncrona de 8 Ω/fase. La curva de vacío está definida por la ecuación:

$$E_o = \frac{20240\ I_e}{42 + I_e}$$

donde E_o expresa la f.e.m. de línea e I_e la corriente de excitación. Se conecta el generador a una red de potencia infinita de 11 kV suministrando en un momento dado una potencia activa de 3810 kW con f.d.p. unidad. En esta situación se aumenta la "corriente de excitación" un 50% sin modificar la apertura de distribuidor de turbina. Calcular:

a) La intensidad del inducido y su f.d.p. en estas condiciones.

b) La potencia activa máxima que podrá ceder la máquina a la red antes de perder el sincronismo con el nuevo valor de la excitación.

c) La intensidad y el f.d.p. en el caso anterior.

23. Un generador síncrono trifásico conectado en estrella de 6600 V, tiene una impedancia síncrona de 0,4 + j 6 Ω/fase. Calcular la regulación de la máquina cuando suministra una potencia de 1000 kW a la tensión nominal con f.d.p.: a) 0,866 inductivo, b) unidad, c) 0,866 capacitivo.

24. Un alternador trifásico, conectado en estrella, tiene una impedancia síncrona de j10 Ω y está conectado a una red de potencia infinita de 11000 V suministrando una corriente de 220 A con f.d.p. unidad. Sin cambiar la entrada de potencia a la máquina motriz, se eleva la f.e.m. un 25%. Calcular:

a)La intensidad del inducido y su f.d.p. en estas condiciones.

b) La potencia activa máxima que podrá ceder la máquina a la red antes de perder el sincronismo, con el nuevo valor de la excitación.

c) La intensidad y su f.d.p. en las condiciones del apartado anterior.

25. Un alternador trifásico conectado en estrella de 1000 kVA, 4600 V, tiene una impedancia síncrona de 2 + j 20 Ω/fase. Determinar la regulación a plena carga con factores de potencia: a) unidad, b) 0,75 inductivo.

26. Un alternador trifásico de 5000 kVA, 6600 V, conectado en estrella, tiene una curva de vacío definida por la ecuación:

$$E_o = \frac{7400\ I_e}{85 + I_e}$$

donde E_o se expresa en voltios por fase e I_e representa la corriente de excitación. La resistencia y reactancia de disposición del inducido por fase son 0,2 Ω y 1 Ω, respectivamente. Se obtiene la corriente de plena carga en cortocircuito con una excitación de 20 A. Calcular:

a) El margen de excitación necesario para dar una tensión nominal constante desde vacío a la plena carga con f.d.p. 0,6 inductivo.

b) Si las pérdidas en el hierro, por fricción y rozamiento con el aire ascienden a un total de 100 kW y las bobinas de campo están alimentadas con una excitatriz a 200 V, calcular el rendimiento a plena carga con f.d.p. 0,6.

27. La resistencia efectiva de un alternador monofásico de 2200 voltios, 50 c/s, y 440 KVA es de 0,5 Ω. Una determinada corriente de excitación produce una corriente en el inducido de 200 A en cortocircuito, y una f.e.m. en circuito abierto de 1160 voltios. Hallar la impedancia y la reactancia síncrona saturada.

28. Un alternador trifásico de 1500 kVA, 6600 V, conectado en estrella, tiene una curva de vacío definida por la ecuación:

$$E_o = \frac{12210\ F_e}{4250 + F_e}$$

donde E_o se expresa en tensión de línea y F_e representa la f.m.m. de excitación en AV/polo. La resistencia y reactancia de dispersión del inducido, por fase, son 0,6 Ω y 2,3 Ω, respectivamente. Se obtiene la corriente de plena carga en cortocircuito con una excitación de 2500 A-V/polo (este es un modo de dar la reacción del inducido a plena carga). Cuando la máquina está girando a plena carga con f.d.p. 0,8 inductivo, determinar:

a) La f.e.m. resultante, E_r, de línea.

b) La corriente de excitación necesaria en el inductor si se sabe además que la máquina tiene polos salientes devanados con 190 espiras cada uno.

c) Si en la situación de los apartados anteriores se desconecta repentinamente la carga, ¿cuál será el valor de la tensión de línea que aparecerá en bornes de la máquina?.

d) ¿Cuánto vale la regulación de tensión de la máquina?.

29. Un alternador trifásico conectado en triángulo de 2300 V y 2500 KVA, tiene una resistencia de 0,1 Ω/fase y una reactancia síncrona de 1,5 Ω/fase. El alternador se regula para dar su tensión nominal en vacío. Calcular:

a) La tensión en bornes necesaria para que circule la corriente nominal para cos ψ = 0,6 en atraso, siendo ψ el ángulo entre I_L y U_L.

b) La regulación del alternador en estas condiciones.

30. Una planta industrial consume una potencia media de 400 kW, a 380 V, con un f.d.p. de 0,7. Con ocasión del montaje de un nuevo motor de 150 CV para el accionamiento de un compresor de aire se desea mejorar el factor de potencia a base de utilizar para el accionamiento del compresor un motor síncrono. Hallar:

a) La potencia aparente absorbida por el motor síncrono, funcionando en vacío, para elevar el factor de potencia del sistema eléctrico de la planta a 0,95. Las pérdidas del motor síncrono en vacío son de 5 kW.

b) La potencia aparente del mismo motor cuando acciona a plena carga el compresor, para que el coseno total sea de 0,9. El rendimiento del motor en estas condiciones vale 0,9

c) Las corrientes de la red después del incremento del factor de potencia a 0,95 y 0,9 respectivamente.

MÁQUINA SÍNCRONA

Problemas resueltos

PROBLEMA 1

Un motor síncrono trifásico tiene las siguientes características: Tensión nominal 220 V, Frecuencia 50 Hz, Impedancia síncrona por fase 0,25 + 2j Ω, 6 Polos, Conexión en Estrella. La intensidad de excitación de este motor se ha ajustado para que la fuerza electromotriz inducida en vacío sea 1,5 veces su tensión nominal y el factor de potencia en adelanto 0,8. En esta situación de carga del motor, se pide:

A. Potencia y par interno desarrollados por el motor.

B. Potencia y par de salida, sabiendo que las pérdidas mecánicas por rozamiento son 300 W. Se puede suponer que estas pérdidas son constantes.

C. Potencia consumida y rendimiento del motor.

Solución

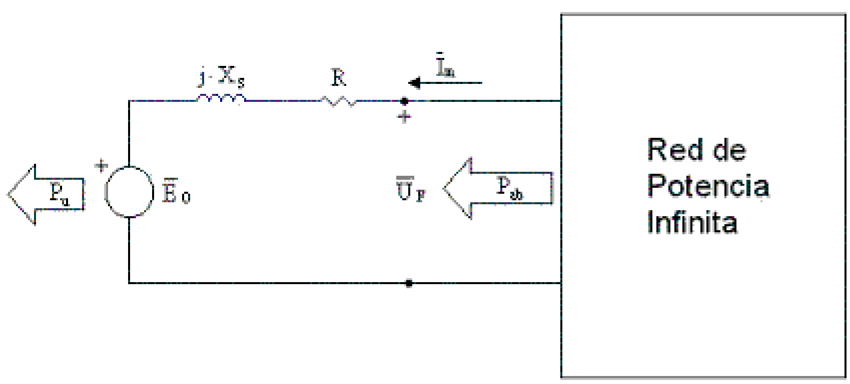
Apartado A

Antes de comenzar a solucionar el problema es necesario realizar las siguientes suposiciones:

- El motor está conectado a una red de potencia infinita, es decir, la tensión y frecuencia en bornes del motor va a ser constante.

- El motor está alimentado a su tensión nominal.

El circuito equivalente por fase del motor, teniendo en cuenta las suposiciones anteriores es el siguiente:



La potencia interna desarrollada por el motor viene determinada por la siguiente expresión:

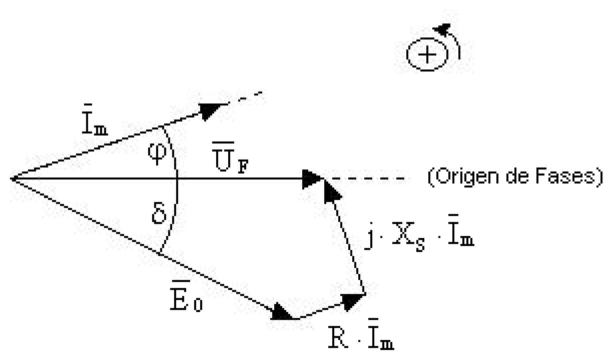
$$P_i = 3 \cdot E_{o,f} \cdot I_{m,f} \cdot \cos\left(\varphi_{E_{o,f}, I_{m,f}}\right)$$

$E_{o,f}$ es el valor de fase de la fuerza electromotriz inducida en vacío. $I_{m,f}$ es el valor de fase de la corriente consumida por el motor. $\varphi_{Eo,f,\ Im,f}$ es el ángulo que forman los dos fasores anteriores. En el circuito equivalente del motor es conocida la tensión de alimentación, que además tomamos como origen de fases, y el módulo de la fuerza electromotriz inducida en vacío.

$$\overline{U}_f = \frac{220}{\sqrt{3}} \angle 0^{\circ} \quad V$$

$$\overline{E}_{0,f} = 1,5 \cdot \frac{220}{\sqrt{3}} = 190,53 \quad V$$

Como el módulo de la fuerza electromotriz inducida en vacío es mayor que la tensión en bornes del motor, éste estará sobreexcitado. Es conocido el factor de potencia del motor, que es el desfase entre la corriente que está consumiendo y la tensión de alimentación. Con estos datos se puede dibujar el siguiente diagrama fasorial:



En el diagrama las únicas dos incógnitas son el módulo de la corriente del inducido, $I_{m,f}$, y el ángulo de carga δ. Se pueden calcular a partir de la caída de tensión del alternador.

$$\overline{U}_f = \overline{E}_{o,f} + \overline{Z}_s \cdot \overline{I}_M$$

Si se separan la parte real e imaginaria se obtiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas.

$$\frac{220}{\sqrt{3}} \angle 0^{\circ} = 190,53 \angle -\delta + \left(0.25 + j \cdot 2\right) \cdot I_{m,f} \angle +36,87^{\circ}$$

$$\frac{220}{\sqrt{3}} = 190,53 \cdot \cos\left(\delta\right) - I_{m,f}$$

$$0 = -190,53 \cdot sen\left(\delta\right) + 1,75 \cdot I_{m,f}$$

La resolución de este sistema de ecuaciones ofrece dos pares de posibles soluciones. El ángulo de par nos va a servir para determinar que solución es la correcta:

$$\delta = -84,38^{\circ}$$

$$\delta = +24,89^{\circ}$$

Teniendo en cuenta el criterio de signos escogido el ángulo de par correcto es el segundo. En estas condiciones la corriente que está consumiendo el motor es:

$$I_{m,f} = 45,82 \quad A$$

Para calcular la potencia interna desarrollada por el motor es necesario, como se ha visto antes, conocer al ángulo que forman los fasores de la fuerza electromotriz inducida en vacío y la corriente consumida por el motor:

$$\widehat{E_{o,f} \cdot I_{m,f}} = \varphi + \delta = 24,89^{o} + 36,87^{o} = 61,76^{o}$$

La potencia interna desarrollada por el motor, con los datos obtenidos, es la siguiente:

$$\begin{aligned} P_i &= 3 \cdot E_{o,f} \cdot I_{m,f} \cdot \cos\left(\varphi_{E_{o,f}, I_{m,f}}\right) \\ &= 3 \cdot 190,53 \cdot 45,82 \cdot \cos\left(61,76^{o}\right) \\ &= 12392,35 \quad W \end{aligned}$$

El par interno del motor se puede calcular fácilmente si previamente conocemos su velocidad de giro. Al tratarse de una máquina síncrona, la velocidad de giro es la de sincronismo, impuesta por la frecuencia de la red de alimentación y el número de pares de polos de la máquina.

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \quad r.p.m.$$

$$\Omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_s}{60} = 104,72 \quad rad/s$$

Por lo tanto, el par interno será:

$$M_i = \frac{P_i}{\Omega_s} = 118,34 \quad N \cdot m$$

Apartado B

En este segundo apartado se pide calcular la potencia y el par útil que realmente está proporcionando el motor. Parte de la potencia interna desarrollada por el motor se emplea en vencer las pérdidas mecánicas por rozamiento.

$$P_u = P_i - P_{mec} = 12392,35 - 300 = 12092,35 \quad W$$

El par útil se obtiene a partir de la potencia útil calculada anteriormente:

$$M_u = \frac{P_u}{\Omega_s} = 115,47 \quad N \cdot m$$

Apartado C

El rendimiento es la relación entre la potencia útil del motor y la potencia que está consumiendo. Ésta es fácil de calcular puesto que ya se conoce la corriente que consume el motor y la tensión de alimentación del mismo:

$$P_{ab} = 3 \cdot U_f \cdot I_{m,f} \cdot \cos(\varphi) = 3 \cdot \frac{220}{\sqrt{3}} \cdot 45,82 \cdot 0,8 = 13966,72 \quad W$$

No hay que olvidar que el estator del motor está conectado en estrella. Entonces, el rendimiento queda:

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ab}} \cdot 100 = 88,73\%$$

Un motor síncrono de 745 kW, 4 polos, 50 Hz, y 4200 V, conectado en estrella, tiene una resistencia efectiva del inducido de 0,16 Ω/fase y una reactancia de sincronismo de 1 Ω/fase. Su curva de vacío responde a la ecuación:

$$E_o = \frac{3500\ I_e}{50 + I_e}$$

en donde E_0 está dado en voltios por fase y siendo I_e la corriente de excitación.

Calcular:

a) La fem. inducida en vacío funcionando a plena carga con f.d.p. unidad y rendimiento del 90%.

b) La fem. inducida en vacío funcionando al 10% de sobrecarga con un f.d.p. de 0,95 adelantado y rendimiento del 90%.

c) La corriente de excitación en ambos casos.

Solución

Notación empleada

R	Resistencia del inducido.
X_S	Reactancia síncrona.
Z_S	Impedancia síncrona.
P_u	Potencia útil del motor.
P_{ab}	Potencia activa eléctrica consumida por el motor.
E_0	F.e.m. inducida en vacío. Valor de fase.
$E_{0\ Línea}$	F.e.m. inducida en vacío. Valor de línea.
U_F	Tensión en bornes del motor. Valor de fase.
I_M	Intensidad de corriente consumida por el motor.
η	Rendimiento del motor.

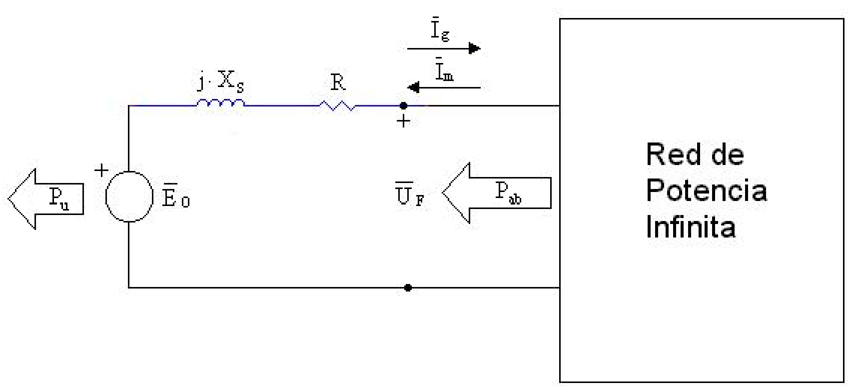
Nota

En este problema la máquina síncrona funciona como motor, y por lo tanto el dato de la potencia nominal corresponde a la potencia útil del motor.

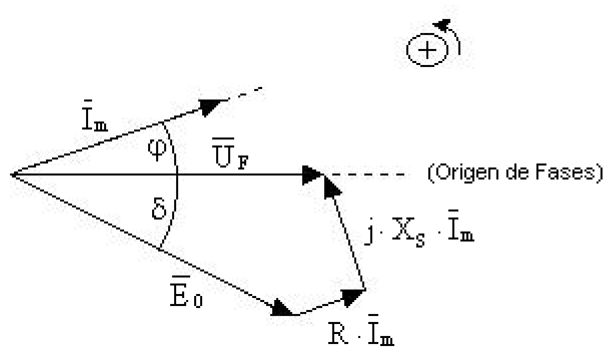
$$P_u = 735\ kW$$

Apartado A

En el primer apartado del problema se pide calcular la f.e.m. inducida en vacío, funcionando el motor a plena carga, con factor de potencia unidad y rendimiento del 90%. El motor estará alimentado por una red de potencia infinita, que mantiene constante la tensión y la frecuencia en bornes de la máquina, y que proporcionará toda la potencia que demande el motor. La siguiente figura corresponde al circuito equivalente por fase del motor síncrono. Se ha dibujado el sentido que tendría la corriente I en el caso de que la máquina funcionase como generador o como motor. También se indica el sentido del flujo de la potencia activa consumida por el motor, y la entregada por éste a la carga, que es la potencia útil. La potencia útil del motor será menor que la potencia consumida debido a la pérdidas de potencia.



El funcionamiento como motor se caracteriza por que la f.e.m. inducida en vacío E_0 forma un ángulo δ negativo con la tensión en bornes de la máquina. El diagrama fasorial por fase de la máquina funcionando como motor es el siguiente:



Se ha tomado como origen de fases la tensión en bornes de la máquina U_F. La ecuación fasorial del motor por fase es la siguiente:

$$\overline{U}_F = \overline{E}_0 + \overline{Z}_S \cdot \overline{I}_M$$

Z_S es la impedancia síncrona de la máquina, y U_F es la tensión en bornes de la máquina en valor de fase.

$$\overline{U}_F = \frac{4.200}{\sqrt{3}} \angle 0^o \ (V)$$

$$\overline{Z}_S = R + j \cdot X_S = 0{,}16 + j \cdot 1 \ (\Omega/Fase)$$

Para poder calcular E_0 nos falta conocer la intensidad que esta absorbiendo el motor. Podemos calcular la potencia que está consumiendo el motor por que conocemos el rendimiento. La potencia que el motor está entregando a la carga es la potencia nominal del motor porque está trabajando a plena carga.

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ab}}$$

$$P_{ab} = \frac{P_u}{\eta}$$

$$P_{ab} = \frac{745 \ kW}{0{,}9}$$

$$P_{ab} = 827{,}78 \ kW$$

Una vez encontrado la potencia activa que está consumiendo el motor, gracias a que se conoce el factor de potencia a plena carga, se puede calcular el valor de la corriente I_M.

$$P_{ab} = 3 \cdot U_F \cdot I_M \cdot \cos\varphi$$

$$I_M = \frac{P_{ab}}{3 \cdot U_F \cdot \cos\varphi}$$

$$I_M = \frac{827{,}78 \cdot 10^3 \ (W)}{3 \cdot \frac{4.200}{\sqrt{3}} (V) \cdot 1} = 113{,}79 \ A$$

Teniendo en cuenta que el factor de potencia es 1, la expresión fasorial de la corriente consumida por el motor, en la forma módulo-argumento, es la siguiente:

$$\overline{I}_M = 113{,}79\angle 0º \ A$$

Ya se conoce el valor de todas las variables necesarias para calcular la f.e.m. inducida en vacío.

$$\overline{E}_0 = \overline{U}_F - \overline{Z}_S \cdot \overline{I}_M$$

$$\overline{E}_0 = \frac{4.200}{\sqrt{3}}\angle 0º - (0{,}16 + j \cdot 1) \cdot 113{,}79\angle 0º$$

$$\overline{E}_0 = 2.409{,}35\angle -2{,}71º \ V$$

$$E_{0\,Línea} = 2.409{,}35 \cdot \sqrt{3} = 4.173{,}12 \ V$$

Apartado B

En este segundo apartado también hay que calcular la f.e.m. inducida en vacío. Pero ahora el motor está trabajando con un 10% de sobrecarga, con un f.d.p. de 0,9 en adelanto y un rendimiento del 90%. Si la máquina está funcionando con un 10% de sobrecarga la potencia útil, la que el motor entrega a la carga, es 1,1 veces la potencia nominal.

$$P_u = 1{,}1 \cdot 745 = 819{,}5 \ kW$$

En este caso la potencia que consume el motor también se obtiene a partir del rendimiento, y es la siguiente:

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ab}}$$

$$P_{ab} = \frac{P_u}{\eta}$$

$$P_{ab} = \frac{819{,}5}{0{,}9} = 910{,}56 \ kW$$

La corriente consumida por el motor se calcula como en el apartado A, pero en este caso el factor de potencia vale 0,95.

$$P_{ab} = 3 \cdot U_F \cdot I_M \cdot \cos\varphi$$

$$I_M = \frac{P_{ab}}{3 \cdot U_F \cdot \cos\varphi}$$

$$I_M = \frac{910{,}56 \cdot 10^3\ (W)}{3 \cdot \frac{4.200}{\sqrt{3}}(V) \cdot 0{,}95} = 131{,}76\ A$$

La expresión fasorial de la corriente consumida por el motor, en la forma módulo-argumento, es la siguiente:

$$\overline{I}_M = 131{,}76\angle 18{,}19^{o}\ A$$

El argumento de I_M es el arco coseno de 0,95, y lleva el signo positivo porque el f.d.p. es en adelanto. La f.e.m. inducida en vacío vale entonces:

$$\overline{E}_0 = \overline{U}_F - \overline{Z}_S \cdot \overline{I}_M$$

$$\overline{E}_0 = \frac{4.200}{\sqrt{3}}\angle 0^{o} - (0{,}15 + j \cdot 1{,}1) \cdot 131{,}76\angle 18{,}19^{o}$$

$$\overline{E}_0 = 2.449{,}52\angle -3{,}08^{o}\ (V)$$

$$E_{0\,Línea} = 2.449{,}52 \cdot \sqrt{3} = 4.242{,}69\ (V)$$

Apartado C

Utilizaremos la curva de vacío del motor para calcular la corriente de excitación en los apartados A y B. Recordar que la f.e.m. inducida en vacío en la curva de vacío está expresada en voltios por fase.

Apartado A.

$$E_0 = \frac{3.500\ I_e}{50 + I_e}$$

$$2.409{,}35 = \frac{3.500\ I_e}{50 + I_e}$$

$$I_e = 110{,}45\ A$$

Apartado B.

$$E_0 = \frac{3.500\ I_e}{50 + I_e}$$

$$2.449{,}52 = \frac{3.500\ I_e}{50 + I_e}$$

$$I_e = 116{,}59\ A$$

PROBLEMA 3

Un alternador trifásico está conectado en estrella a una red de potencia infinita de 6.600 V. Se ha ajustado la excitación para que la f.e.m. inducida en vacío sea 6.000 V. Se desprecia la resistencia del inducido. La reactancia síncrona se considera constante y tiene un valor de 6 Ω.

a) Determinar la potencia activa máxima que en estas condiciones puede suministrar el alternador sin perder la estabilidad.

b) Cuando el alternador está suministrando la potencia activa máxima, ¿cuánto vale el ángulo de potencia?

c) Dibujar el diagrama fasorial del alternador para esta situación.

d) Hallar, en esta misma situación, la corriente que circula por el inducido y su factor de potencia.

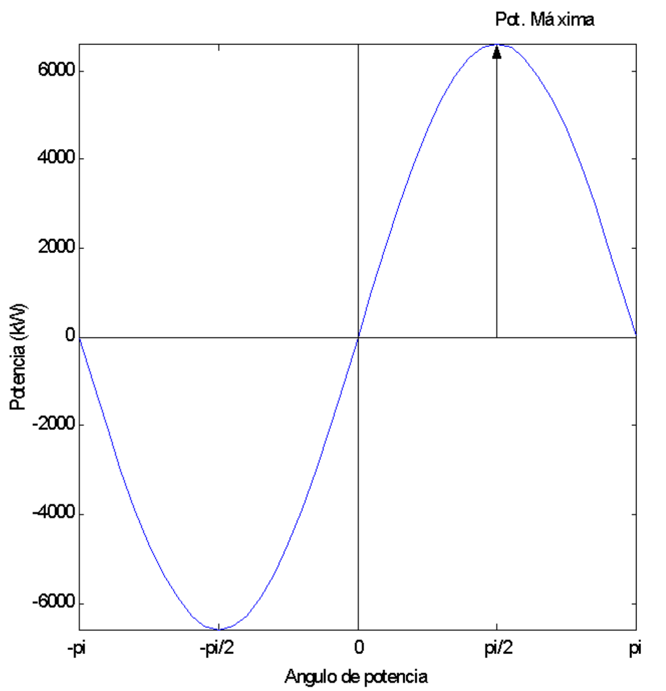
Solución

Apartado A

En las condiciones descritas en el enunciado del problema se puede utilizar la siguiente fórmula para encontrar la potencia activa que entrega el alternador a la red:

$$P = 3 \cdot \frac{E_0 \cdot U}{X_S} \cdot \operatorname{sen}\delta$$

Las tensiones están expresadas en valores de fase. U, tensión en bornes del alternador, viene impuesta por la red de potencia infinita, y por tanto se considera constante. Si no se modifica la excitación del alternador, la f.e.m. inducida en vacío E_0 se mantiene constante, que es lo que ocurre en este problema. Si no se indica lo contrario, también se considera invariable la reactancia síncrona X_S. Con estas condiciones, si aumenta la potencia que tiene que suministrar el alternador a la red, varia el ángulo de potencia δ. Se puede representar la potencia activa del alternador en función de este ángulo.



Observando la gráfica se entiende fácilmente porque la potencia activa máxima que puede entregar el alternador a la red viene dada por la siguiente expresión:

$$P_{max} = 3 \cdot \frac{E_0 \cdot U}{X_S} = 3 \cdot \frac{\frac{6.000}{\sqrt{3}} \cdot \frac{6.600}{\sqrt{3}}}{6}$$

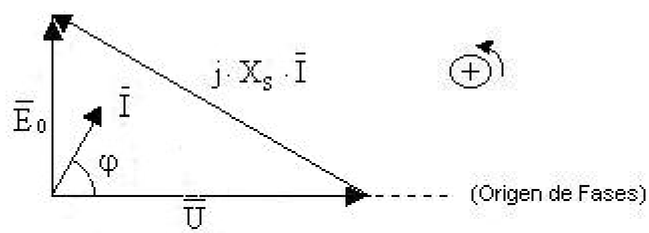
$$P_{max} = 6.600 \text{ kW}$$

Apartado B

Cuando el alternador está entregando la potencia máxima a la red el ángulo de potencia δ es de 90º.

Apartado C

Teniendo en cuenta que la f.e.m. inducida en vacío E_0 y la tensión en bornes forman un ángulo de 90º, el diagrama fasorial por fase del alternador cuando entrega la máxima potencia es el siguiente, si se toma como origen de fases U:



Apartado D

Los fasores de las tensiones de fase del diagrama son los siguientes:

$$\overline{U} = \frac{6.600}{\sqrt{3}} \angle 0º \text{ V}$$

$$\overline{E}_0 = \frac{6.000}{\sqrt{3}} \angle 90º \text{ V}$$

La corriente que circula por el inducido del alternador I se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\overline{E}_0 = \overline{U} + j \cdot X_S \cdot \bar{I}$$

$$\bar{I} = \frac{\overline{E}_0 - \overline{U}}{j \cdot X_S} = \frac{\frac{6.000}{\sqrt{3}}\angle 90º - \frac{6.600}{\sqrt{3}}\angle 0º}{j \cdot 6}$$

$$\bar{I} = 858{,}29\angle 47{,}73º \text{ A}$$

$$\cos\varphi = \cos(47{,}73º) = 0{,}67 \ (\text{Capacitivo})$$

Un generador síncrono de 1.500 kVA de potencia, tensión nominal 6,6 kV, conectado en estrella, tiene unos valores de X_d = 26,14 Ω/fase y X_q = 17,42 Ω/fase. El generador funciona a plena carga y factor de potencia de 0,8 inductivo. Calcular la f.e.m. inducida en vacío. Calcular, también, el ángulo de carga y los valores de intensidad según el eje directo y en cuadratura. Despreciar la resistencia y la saturación.

Solución

Notación empleada

V	Tensión en bornes de la máquina. Valor de fase.
V_{nl}	Tensión nominal del generador. Valor de línea.
E_0	F.e.m. inducida en vacío. Valor de fase.
E_{0L}	F.e. m. inducida en vacío. Valor de línea.
E_{pd}	F.e.m. inducida de reacción de inducido según el eje directo.
E_{pq}	F.e.m. inducida de reacción de inducido según el eje cuadratura.
I	Corriente del inducido.
I_d	Componente de la corriente de inducido I según el eje directo.
I_q	Componente de la corriente de inducido I según el eje cuadratura.
S_n	Potencia nominal del generador síncrono.
I_n	Corriente nominal del generador síncrono.
R	Resistencia del inducido.
X_σ	Reactancia de dispersión.
X_d	Reactancia síncrona del eje directo.
X_q	Reactancia síncrona del eje cuadratura.
θ	Angulo de carga.
F_e	F.m.m. de excitación.
F_i	F.m.m. de la reacción de inducido.
F_d	Componente de la f.m.m. de la reacción de inducido según el eje directo.
F_q	Componente de la f.m.m. de la reacción de inducido según el eje cuadratura.

En el enunciado de este problema se proporcionan los valores de dos reactancias síncronas: una de eje directo X_d y otra de eje de cuadratura X_q. De esta forma nos están indicando que esta máquina síncrona es de polos salientes.

Mientras que el entrehierro en las máquinas síncronas de rotor cilíndrico es prácticamente de espesor constante, el de las máquinas de polos salientes es mucho mayor en el eje de cuadratura o transversal (región media entre dos polos consecutivos) que en el eje directo. Debido a la diferencia de reluctancia entre ambos circuitos magnéticos, el correspondiente al eje directo y el de cuadratura, la consideración de una sola reacción de inducido conduce a resultados poco precisos sobre la regulación de tensión en estas máquinas.

En las máquinas de polos salientes se definen dos ejes. Uno se denomina *eje directo o longitudinal* y coincide con el eje de simetría de cada polo saliente. El otro eje tiene la dirección del eje de simetría de la región entre dos polos consecutivos de distinta polaridad, y se denomina *eje cuadratura o transversal*. La reacción de inducido F_i puede descomponerse en dos componentes según los dos ejes mencionados anteriormente: f.m.m. de reacción en eje directo o longitudinal F_d, y f.m.m. de reacción en eje cuadratura o transversal F_q, como se muestra en la figura 4.1.

De esta forma se independizan totalmente los dos circuitos magnéticos obteniendo regulaciones de tensión que se acercan más a la realidad. En la figura 31.1 se muestra un alternador de polos salientes en el que solo se ha considerado una bobina en el estator *aa'*. La f.m.m. giratoria tiene la referencia del eje de esta bobina. La f.m.m. de reacción de inducido F_i se ha descompuesto en dos valores: F_d en el eje directo, y F_q en el eje cuadratura. Existen, por tanto, tres fuerzas magnetomotrices que interaccionan en la máquina: la f.m.m. de excitación F_e, y las dos componentes de la f.m.m. de la reacción de inducido F_d y F_q. Resulta muy cómodo considerar que cada una de las tres f.m.m.s anteriores crea su propio flujo, independiente del flujo creado por las demás f.m.m.s. Este flujo crea a su vez su propia f.e.m. inducida. Las dos componentes de la reacción de inducido según el eje directo y el eje cuadratura crean los flujos Φ_d y Φ_q respectivamente. Estos dos flujos producen a su vez las f.e.m.s. de reacción de inducido de eje directo E_{pd} y cuadratura E_{pq}. En la figura 31.2 se muestran estas ideas en un diagrama.

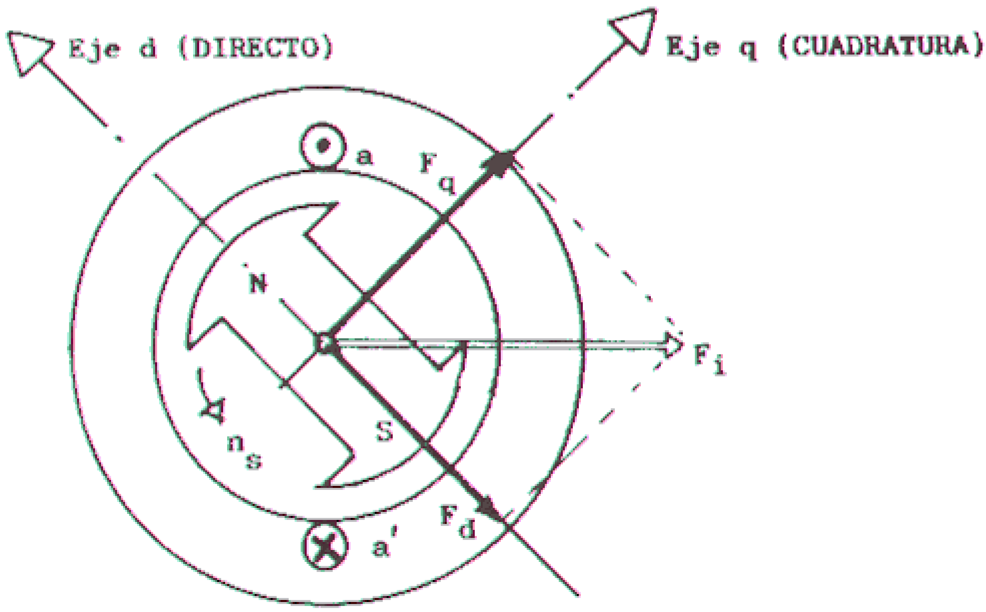


Figura 4.1

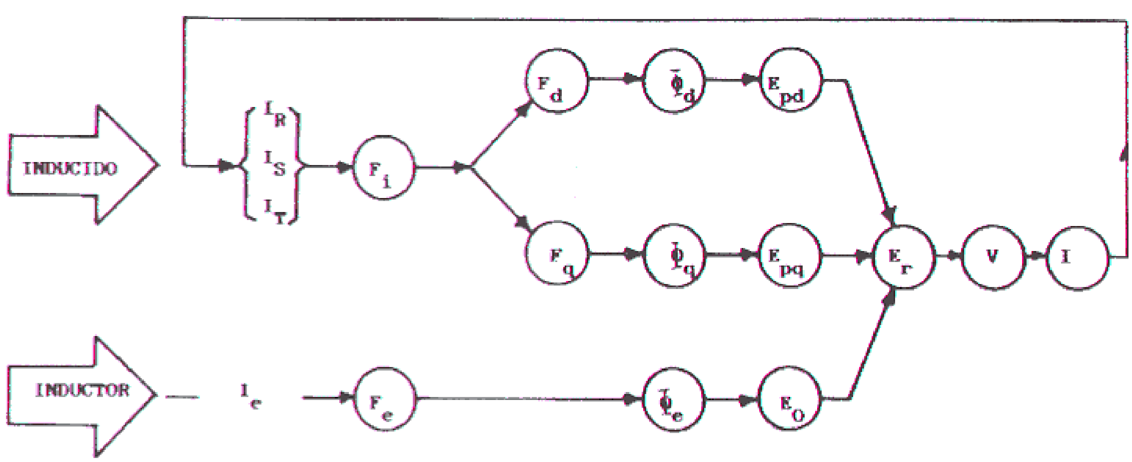


Figura 4.2

Las f.e.m.s. de reacción de inducido de eje directo y eje cuadratura, de un modo análogo a lo que ocurría con la máquina síncrona de rotor cilíndrico, tendrán la siguiente expresión:

$$\overline{E}_{pd} = -j\,X_{pd}\;\overline{I}_d$$
$$\overline{E}_{pq} = -j\,X_{pq}\;\overline{I}_q$$

En las dos expresiones anteriores, I_d e I_q son las componentes de la corriente del inducido en los ejes directo y cuadratura:

$$\overline{I} = \overline{I}_d + \overline{I}_q$$

Debe tenerse en cuenta que la f.e.m. de vacío E_0 producida por el inductor actúa en el eje cuadratura q, puesto que debe ir retrasada 90º respecto a la línea de los polos.

Si R es la resistencia del inducido, X_σ la reactancia de dispersión y V la tensión en bornes de la máquina, se cumple una igualdad fasorial parecida a la que se obtenía en el análisis lineal de la máquina síncrona de rotor cilíndrico que ahora estará afectada por las dos componentes de f.e.m.:

$$\overline{E}_0 = \overline{V} + R\,\overline{I} + j\,X_\sigma\;\overline{I} + j\,X_{pd}\;\overline{I}_d + j\,X_{pq}\;\overline{I}_q$$

En muchos casos, por simplicidad, se puede despreciar la resistencia del inducido R. En la expresión anterior se puede sustituir I por su descomposición según los ejes directo y cuadratura.

$$\overline{E}_0 = \overline{V} + j\left(X_\sigma + X_{pd}\right)\overline{I}_d + +j\left(X_\sigma + X_{pq}\right)\overline{I}_q$$

Por analogía con el método de Behn-Esschenburg en la que se definía la reactancia síncrona, en este caso resultan dos reactancias síncronas: una de eje directo X_d y otra de eje cuadratura X_q. La última expresión, entonces se transforma en:

$$\overline{E}_0 = \overline{V} + j\,X_d\;\overline{I}_d + j\,X_q\;\overline{I}_q$$

El diagrama fasorial correspondiente a esta expresión se encuentra representado en la gráfica 4.3 donde se ha tomado como referencia el eje q, que es donde debe estar alineado la f.e.m. de vacío E_0.

Después de esta introducción teórica pasamos a solucionar el problema planteado en el enunciado. Nos proporcionan los datos de un generador síncrono de polos salientes, y nos dicen que despreciemos la resistencia R del inducido y la saturación. Las incógnitas que debemos resolver son la f.e.m. inducida en vacío, y el ángulo que forma con la tensión en bornes de la máquina V, o lo que es lo mismo, el ángulo de carga. Así mismo debemos encontrar las componentes de la corriente del inducido según los ejes directo y cuadratura.

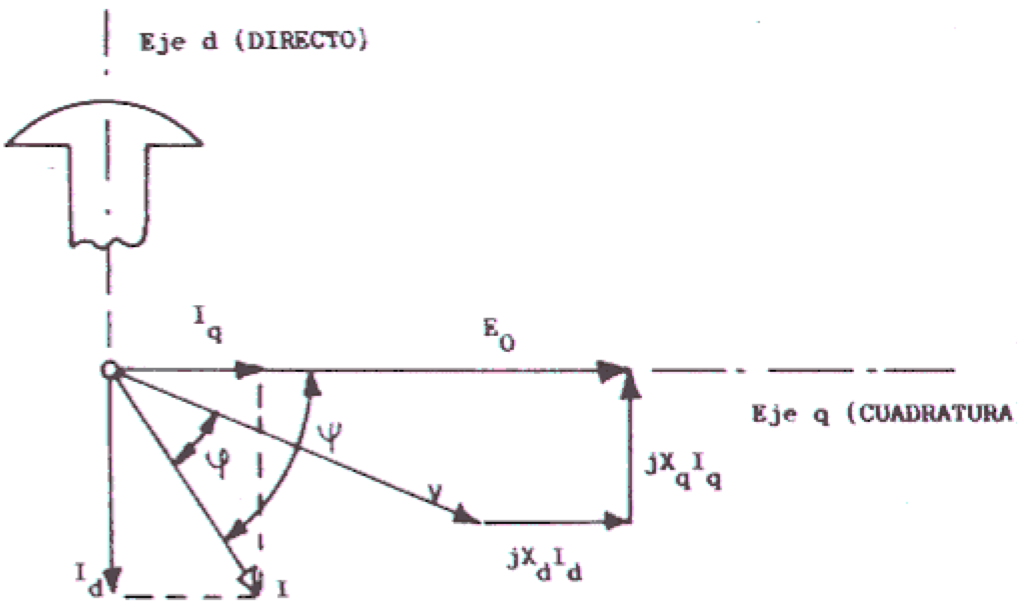


Figura 4.3

Primero vamos a dibujar el diagrama fasorial de fase, correspondiente a la situación de plena carga, con un factor de potencia 0,8 inductivo. Este diagrama nos va a ayudar a resolver el problema.

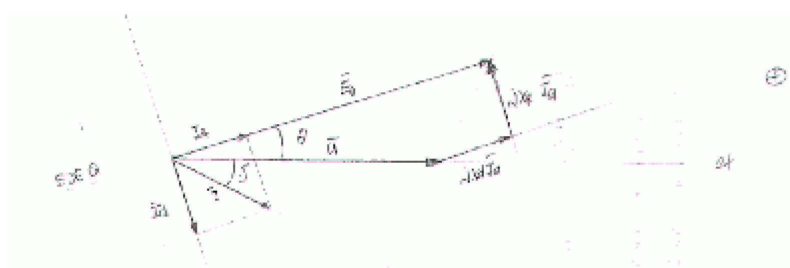


Figura 4.4

En el diagrama fasorial anterior todas las magnitudes son de fase. La tensión en bornes de la máquina V se ha tomado como origen de fases, y el sentido positivo es el contrario al movimiento de las agujas de un reloj. La corriente de inducido I está retrasada respecto a V un ángulo δ, que corresponde al factor de potencia 0,8 inductivo de la situación de plena carga. La f.e.m. inducida en vacío E_0 forma un ángulo θ con la tensión V. Éste se conoce como ángulo de carga. La dirección de E_0 coincide, como es obvio, con la dirección del eje cuadratura *q*. El eje directo *d* es perpendicular al eje *q*. También se han representado las dos componentes de la corriente de inducido I según los ejes directo y cuadratura, y las caídas de tensión en las dos reactancias síncronas. El ángulo δ es conocido, puesto que corresponde al factor de potencia 0,8.

$$\cos\delta = 0{,}8$$
$$\delta = \operatorname{arc}\cos(0{,}8)$$
$$\delta = 36{,}87^{\circ}$$

Observando el diagrama fasorial se pueden encontrar las siguientes expresiones para los módulos de las componentes de la corriente de inducido según los ejes directo y cuadratura: I_d e I_q respectivamente.

$$I_d = I \cdot \operatorname{sen}(\delta + \theta)$$
$$I_q = I \cdot \cos(\delta + \theta)$$

En el diagrama fasorial conocemos el ángulo δ, la tensión en bornes de la máquina V, y las reactancias síncronas X_d y X_q. A partir de los datos del enunciado podemos calcular el módulo de la corriente de inducido I. Como el diagrama corresponde a la situación de plena carga, sabemos que la corriente de inducido es la nominal.

$$S_n = \sqrt{3} \cdot V_{nL} \cdot I_n$$
$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot V_{nL}}$$
$$I_n = \frac{1{,}5 \cdot 10^6 \ (VA)}{\sqrt{3} \cdot 6.600 \ (V)}$$
$$I_n = 131{,}22 \ (A)$$

La corriente de plena carga I es , por tanto, de 131,22 A.

$$I = 131{,}22 \ (A)$$

Si se observa el diagrama fasorial, la proyección de V sobre el eje de cuadratura coincide con la la caída de tensión $X_q I_q$.

$$V \cdot \operatorname{sen}(\theta) = X_q \cdot I_q$$

En la ecuación anterior se puede sustituir I_q por su expresión en función del módulo de la corriente del inducido I, y del coseno de los ángulos δ y θ.

$$V \cdot \operatorname{sen}(\theta) = X_q \cdot I \cdot \cos(\delta + \theta)$$

En esta ecuación la única incógnita es el ángulo de carga θ. V es la tensión en bornes de la máquina en valor de fase. El dato proporcionado en el enunciado del problema, como siempre, es un valor de línea. Entonces, empleando la última ecuación podemos encontrar el ángulo de carga:

$$\frac{6.600}{\sqrt{3}}(V)\cdot sen(\theta)=17{,}44(\Omega/Fase)\cdot 131{,}22(A)\cdot\cos(36{,}87^{o}+\theta)$$

$$sen(\theta)=0{,}6\cdot\cos(36{,}87^{o}+\theta)$$

$$sen(\theta)=0{,}6\cdot(\cos(36{,}87^{o})\cos(\theta)-sen(36{,}87^{o})sen(\theta))$$

$$sen(\theta)=0{,}6\cdot(0{,}8\cdot\cos(\theta)-0{,}6\cdot sen(\theta))$$

$$sen(\theta)\cdot(1+0{,}6^{2})=0{,}6\cdot 0{,}8\cdot\cos(\theta)$$

$$tag(\theta)=\frac{0{,}6\cdot 0{,}8}{1+0{,}6^{2}}=0{,}35$$

Resolviendo la última ecuación se encuentra que el valor del ángulo de carga es:

$$\boxed{\theta=19{,}44^{o}}$$

Una vez encontrado este dato ya podemos calcular las dos componentes de la corriente de inducido según los ejes directo y cuadratura.

$$I_{d}=I\cdot sen(\delta+\theta)=131{,}22\cdot sen(36{,}87^{o}+19{,}44^{o})$$

$$I_{d}=109{,}19\ (A)$$

$$I_{q}=I\cdot\cos(\delta+\theta)=131{,}22\cdot\cos(36{,}87^{o}+19{,}44^{o})$$

$$I_{q}=72{,}79\ (A)$$

Para completar la resolución del problema, queda calcular la f.e.m. inducida en vacío E_0. Al igual que se hizo anteriormente para encontrar el ángulo de carga, se va a utilizar el diagrama fasorial para obtener una relación que nos permita calcular el valor de E_0. Se puede observar que el módulo de E_0, es igual a la suma de la caída de tensión X_dI_d más la proyección de V sobre el eje cuadratura.

$$E_{0}=V\cdot\cos\theta+X_{d}\cdot I_{d}$$

Todos los valores son conocidos en la ecuación anterior salvo el módulo de E_0.

$$E_{0}=\frac{6.600}{\sqrt{3}}(V)\cdot\cos(19{,}44^{o})+26{,}14(\Omega/Fase)\cdot 109{,}19(A)$$

$$\boxed{E_{0}=6.447{,}29\ (V)}$$

Hay que recordar que el valor de E_0 calculado es un valor de fase. El correspondiente valor de línea se obtendrá multiplicando el valor de fase por la raíz cuadrada de 3.

$$\boxed{E_{0L}=11.165{,}88\ (V)}$$

Soluciones

Problemas seleccionados

MÁQUINA SÍNCRONA

1. I_e = 3,29 A; P_{exc} = 534 W.

2. 6,45 %.

3. 667,5 kW; 0,963 inductivo; 4250 Nm.

4. a) I_m = 228,53 A; b) M_i = 851,39 Nm.

5. 11822 V; 11426 V; 132 A, f.d.p. = 0,94 en atraso.

6. a) X_s = 0,35 Ω/fase; b) I_{exc} = 6,56 A; c) P_{mec} = 1248 W; d) M_i = 412,53 Nm; e) η = 94,29 %.

7. 0,95 inductivo; 7292 kVA.

8. a) I_m = 228,53 A; b) M_i = 851,39 Nm.

9. 8,23 %.

10. a) M_i = 585,69 Nm; b) M_{imax} = 2371,65 Nm; I_{Mimax} = 315,27 A; cosφ = 0,72.

11. I_e = 3,29 A; P_{exc} = 534 W.

12. a) E_{01} = 17936,56 V; E_{02} = 17936,56 V; b) E_{02} = 20868,03 V; c) I_1 = 379,28 A; cosφ_1 = 0,92 (Inductivo); I_2 = 515,47 A; cosφ_2 = 0,68 (Inductivo).

13. a) S_{MS} = 500 – j 2666,67 kVA; b) E_0 = 6890,91 V (Valor de línea); I_e = 98,02 A.

14. a) P_i = 12392,35 W; b) $M_{útil}$ = 115,47 Nm; c) η = 88,73 %.

15. M = 310,11 N.m.; cos φ = 0,91 (inductivo).

16. a) u = 5245,41 V/fase; b) I_1 = 218,79 A; cosφ_1 = 0,84 (Inductivo); I_2 = 289,74 A; cosφ_2 = 0,98 (Inductivo); c) cosφ_{carga} = 0,95 (Inductivo).

17. 0,9356 capacitivo.

18. a) I_1 = 1203,78 A; cosφ_1 = 0,73 (Inductivo); I_2 = 1000,33 A; cosφ_2 = 0,87 (Inductivo); b) E_{02} = 9949,71 V.

19. a) $P_{entrada}$ = 17,708 kW; b) η = 90,35 %.

20. a) X_s = 0,9357 Ω/fase; b) cosφ = 0,9941 (Capacitivo).

21. a) E_0 = 13854,5 V; b) P = 2646,36 kW; c) ε = 25,95 %.

22. a) $I = 246{,}58$ A; $\cos\varphi = 0{,}81$ (Inductivo); b) $P_{max} = 18275{,}05$ kW; c) $I_{Pmax} = 1245{,}09$ A; $\cos\varphi_{Pmax} = 0{,}77$ (Capacitivo).

23. a) 9,67 %; b) 1,85 %; c) - 5,94 %.

24. a) $I_2 = 281{,}57$ A; $\cos\varphi = 0{,}78$ (Inductivo); b) $P_{max} = 16$ MW; c) $I_{Pmax} = 1053{,}17$ A; $\cos\varphi_{Pmax} = 0{,}80$ (Capacitivo).

25. a) 44,6 %; b) 81,5 %.

26. a) $I_{e0} = 90{,}23$ A; $I_{epc} = 182{,}45$ A; b) $\eta_{pc} = 92{,}27$ %.

27. $X_{ss} = 5{,}778\ \Omega$; $Z_{ss} = 5{,}8\ \Omega$.

28. a) $E_r = 7030{,}78$ V; b) $I_e = 40{,}06$ A/polo; c) $U = E_0 = 7834{,}96$ V; d) $\varepsilon = 18{,}71$ %.

29. a)$U = 2001{,}35$ V; b) $\varepsilon = 14{,}92$ %.

30. a) $S_{motor} = 275{,}01\angle{-88{,}96^{o}}$ kVA; b) $S_{motor} = 197{,}62\angle{-51{,}63^{o}}$ kVA; c) $I_a = 647{,}72$ A; $I_b = 882{,}34$ A.

Bibliografía y lecturas recomendadas

- Ortega Gómez, Guillermo. "*Problemas resueltos de máquinas eléctricas*". Thomson, 2002.
- Sanz Feito, Javier. "*Máquinas eléctricas*". Prentice Hall, 2002.
- Fraile Mora, Jesús. "*Máquinas eléctricas*". McGraw-Hill, 2002.
- Ras, Enrique. "*Transformadores de potencia, de medida y de protección*". Marcombo, 1994.
- Cathey, Jimmie J. "*Electric machines: analysis and design applying Matlab*". McGraw-Hill, 2001.
- Ostovic, Vlado. "*Computer-Aided Analysis of Electric Machines: A Mathematica Approach*". Prentice Hall, 1994.