



Dpto. de Ingeniería Eléctrica

E.T.S. de Ingenieros Industriales

Universidad de Valladolid



2003/2004

MÁQUINAS ELÉCTRICAS:

MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

3º DE INGENIEROS INDUSTRIALES

Boletín de Problemas

MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

Problemas propuestos

1. Un motor derivación toma una corriente de 20 A cuando gira a 1000 r.p.m., siendo la tensión de alimentación de 200 V. La resistencia de inducido es de 0,1 Ω y la resistencia de campo de 100 Ω . Suponer que el flujo es proporcional a la corriente de excitación. Calcular la corriente absorbida y la velocidad si el par de carga se reduce a la mitad y se ha colocado una resistencia de 0,25 Ω en el circuito de inducido y otra de 25 Ω en el circuito de campo.

2. Se dispone de un motor de corriente continua tipo shunt. Su circuito de excitación consta de 2000 espiras con una resistencia de 210 ohmios, siendo la resistencia total del devanado inducido de 0,5 ohmios. A 1000 r.p.m. se obtiene la siguiente curva de vacío:

E_0 (V)	4	300	340
I_e (A)	0	1,75	2

Determinar el número de espiras con que habría que dotar a un arrollamiento de excitación adicional en serie para que, funcionando como motor compuesto aditivo de conexión corta, desarrolle un par en el eje de 165 Nm alimentado desde una fuente de corriente continua a 425 V y consumiendo 50 A. La resistencia del devanado de excitación serie tiene un valor de 0,1 ohmios. Se puede considerar que la máquina tiene devanado de compensación y que la caída de tensión en las escobillas es despreciable.

3. Un motor en derivación de corriente continua de 50 HP, 250 V, 1200 r.p.m. con devanados de compensación, tiene una resistencia de armadura (incluyendo escobillas, devanados de compensación e interpolos) de 0,06 Ω . Su circuito de campo tiene una resistencia total de 50 Ω , el cual produce una velocidad de vacío de 1200 r.p.m. Hay 1200 espiras por polo en el devanado de campo en derivación. Calcular:

- La velocidad del motor cuando la corriente de entrada es de 100 A.
- La velocidad del motor cuando la corriente de entrada es de 200 A.
- La velocidad del motor cuando la corriente de entrada es de 300 A.
- Utilizar estos datos para graficar la característica par - velocidad de este motor.

4. Un motor en derivación de corriente continua de 2 polos, 250 V, 1200 r.p.m. tiene una corriente nominal de inducido de 170 A y una corriente nominal de campo de 5 A. Cuando el rotor está bloqueado una tensión inducida 10,2 V produce una corriente de 170 A y una tensión de campo de 250 V produce una corriente de campo de 5 A. En vacío y con una tensión en bornes de 240 V, la corriente de inducido es de 13,2 A y la corriente de campo es de 4,8 A. Admítase que las pérdidas mecánicas se mantienen prácticamente constantes y que la caída de tensión en cada una de las escobillas es de 1 V. Se pide determinar el rendimiento del motor cuando funciona en condiciones nominales.

5. En un laboratorio se dispone de un motor Shunt de 220 V. Se le realizan unas pruebas y se observa que desarrolla una determinada potencia a 1100 r.p.m. y absorbe una corriente de inducido de 80 A. Su resistencia de inducido es de 0,3 Ω y el par de carga al que se le somete permanece constante. A continuación, a dicho motor, se le somete a una segunda prueba reduciéndole el flujo un 25% de su valor nominal. Suponiendo las pérdidas mecánicas de 3000 W constantes y la curva de magnetización recta, se pide:

- a) Explicar claramente los fenómenos que tienen lugar en el motor.
- b) Calcular la potencia útil del motor.
- c) Antes de las variaciones de velocidad, hallar la f.e.m., la corriente de inducido y el par.
- d) Determinar los valores finales de la corriente de inducido y la velocidad.

6. Un motor tipo derivación de 250 V que desarrolla 20 CV a 1000 r.p.m. absorbe una corriente de inducido de 75 A. La resistencia del inducido es de 0,25 Ω y el par de carga permanece constante. Si se reduce el flujo un 20% de su valor normal antes de los cambios de velocidad, hallar el valor instantáneo de la corriente del inducido y el par. Determinar el valor final de la corriente en el inducido y la velocidad (curva de magnetización recta). Tómese 1 CV = 736 W.

7. Un motor shunt de corriente continua de 10 CV y 200 V tiene un rendimiento a plena carga del 80 % y las resistencias de los circuitos inducido y excitación son de 0,2 y 125 Ω respectivamente. Si a este motor se le conecta en serie con el inducido una resistencia de 0,8 Ω , permaneciendo constante el par electromagnético y la resistencia del campo de excitación, se pide:

- a) La velocidad del motor a plena carga.
- b) La potencia consumida en vacío.

8. Dos motores de corriente continua, M1 y M2, de excitación serie, idénticos en construcción, excepto en el entrehierro, son probados independientemente con una misma tensión de alimentación de 750 V, resultando que, para un mismo consumo de 200 A, las r.p.m. medidas fueron $n_1 = 600$ y $n_2 = 500$. Sabiendo que la resistencia interna medida en los bornes de la máquina es, en ambas, 0,1 Ω . Se pide:

a) ¿Qué velocidad resultaría para el mismo consumo de 200 A al acoplarlos mecánicamente sobre un mismo eje estando conectados eléctricamente en serie entre sí a la misma red de 750 V?

b) ¿Cuál sería la tensión en los bornes de cada máquina para el acoplamiento anterior.?

9. Un determinado vehículo de tracción eléctrica utiliza como elemento motriz un motor shunt de corriente continua que se alimenta mediante una batería de 48 V. El motor debe de funcionar a una velocidad entre 500 y 1500 r.p.m., y se pretende que, variando la resistencia de campo, pueda actuar como freno, transformando la energía mecánica en eléctrica y entregándola a la batería, que se supone mantiene entre sus bornes un potencial constante de 48 V. La curva de magnetización del motor a 500 r.p.m. es:

I_c (A)	1	2	3	4	5	6	7	8
E_i (V)	12,5	19,6	26,8	33,7	40,0	45,3	50,0	54,2

La resistencia total del circuito del inducido es $R_i = 0,1 \Omega$, la resistencia del devanado de campo es $R_c = 6 \Omega$ y las pérdidas rotatorias pueden suponerse constantes e igual a 300 W. Se imponen como condiciones extremas el que el motor pueda actuar como freno a 500 r.p.m., extrayendo 5 CV de potencia mecánica de las ruedas del vehículo, y el que pueda actuar como motor de 1500 r.p.m., entregando también 5 CV de potencia mecánica. Calcular el valor de la resistencia de campo R_{cp} en estas dos condiciones extremas.

10. Un motor de 7,46 kW, 230 V., Shunt, tiene una velocidad a plena carga de 1200 r.p.m. La resistencia del inducido es de $0,3 \Omega$ y la del campo 180Ω . El rendimiento a plena carga es del 86%. Se pide calcular:

a) La velocidad del motor en vacío, si en estas condiciones su entrada total es de 600 w.

b) Valor de la resistencia serie que hay que añadir al inducido para reducir su velocidad a 1000 r.p.m. cuando da el par de plena carga con toda la corriente de campo.

11. Un motor derivación de 4 polos, funciona con 400 V de tensión en bornes y absorbe una corriente de 50 A. Su velocidad es de 500 r.p.m. La resistencia del inducido es de $0,6 \Omega$ y su devanado, del tipo ondulado simple, está compuesta de 516 conductores. El arrollamiento de excitación posee una resistencia de 220Ω . Determinar el flujo por polo con las características indicadas, despreciando la caída de tensión en las escobillas.

12. Un motor de corriente continua, de excitación en paralelo, absorbe una corriente a una determinada velocidad. Posteriormente se desea aumentar la velocidad, lo cual puede hacerse disminuyendo la corriente de excitación, o aumentando la tensión de alimentación. Suponiendo despreciables las pérdidas del motor, decir cuál sería aproximadamente la corriente eléctrica absorbida, a una velocidad doble de la inicial, en función de la corriente I , en los siguientes casos:

- a) Si se modifica solamente la corriente de excitación, siendo constante el par.
- b) Si se modifica solamente la tensión de alimentación, siendo constante el par.
- c) Si se modifica solamente la corriente de excitación, siendo constante la potencia suministrada.
- d) Si se modifica solamente la tensión de alimentación, siendo constante la potencia suministrada.

13. Un motor tipo derivación de 250 V, gira en vacío a 1000 r.p.m. y absorbe una corriente de 5 A. La resistencia total del inducido es de $0,2 \Omega$ y la del campo en derivación de 250Ω . Calcular la velocidad cuando esté cargado y tome una corriente de 50 A, sabiendo que la reacción del inducido debilita el campo un 3%.

14. Un motor derivación de 4 kW, 120 V, 1500 r.p.m. tiene a plena carga un rendimiento total del 82 % y unas pérdidas en sus devanados inductor e inducido del 4 y 5 %, respectivamente, de la potencia absorbida. Determinar:

- a) La f.e.m. inducida a plena carga.
- b) El par motor interno en Nm.

15. Un motor tipo derivación de 250 V tiene una resistencia de inducido de $0,5 \Omega$ y una resistencia de campo de 350 W. Cuando mueve a 600 r.p.m. una carga cuyo par es constante, el inducido absorbe 20 A. Si se desea elevar la velocidad de 600 a 800 r.p.m. ¿qué resistencia debe insertarse en el circuito de excitación suponiendo que la curva de magnetización sea una línea recta?

16. Un motor derivación acoplado a una bomba centrífuga absorbe 60 A a la tensión 110 V. Determinar la potencia útil y el rendimiento del motor, sabiendo que este motor en vacío, sin la bomba, absorbe 5 A de la red y que las resistencias en caliente de sus devanados son:

$$\text{Inductor, } R_d = 40 \text{ W}$$

$$\text{Inducido, } R_i = 0,10 \text{ W}$$

Despreciar la caída y pérdidas en las escobillas y admitir que la velocidad en carga es sensiblemente igual a la de vacío.

17. Un motor tipo derivación de 250 V tiene una corriente de inducido de 20 A cuando gira a 1000 r.p.m. venciendo el par de plena carga. La resistencia del inducido es de $0,5 \Omega$. ¿Qué

resistencia debe insertarse en serie con el inducido para reducir la velocidad a 500 r.p.m. con el mismo par, y cuál será la velocidad si el par de carga se reduce a la mitad, estando dicha resistencia en circuito?. Supóngase que el flujo permanece constante.

18. Por el inducido de una dinamo, con excitación en paralelo, de 220 V, circulan 40 A, siendo la velocidad de giro de 500 r.p.m. La resistencia del inducido es de $0,25 \Omega$ y la del campo de excitación 100Ω , existiendo además, en serie con el bobinado del mismo, un reóstato. La curva de magnetización de la dinamo a 500 r.p.m. es:

I_e (A)	0,25	0,50	0,75	1,00	1,50	2,00
-----------	------	------	------	------	------	------

E_i (V)	71	133	170	195	220	230
-----------	----	-----	-----	-----	-----	-----

Se pide:

- La resistencia del reóstato en las condiciones indicadas.
- La tensión en vacío si la velocidad se reduce a 250 r.p.m. con el reóstato cortocircuitado.

19. Un motor serie, con un circuito magnético no saturado y con una resistencia despreciable, absorbe 50 A a 500 V cuando gira a una cierta velocidad con una carga dada. Si el par de carga varía con el cubo de la velocidad, hallar la resistencia necesaria para reducir la velocidad: a) un 50 %, b) un 20 %.

20. La velocidad de un motor derivación de 20 CV, 230 V, absorbiendo de la red la corriente de 75 A, es de 1200 r.p.m. La resistencia del circuito de excitación es de 128Ω y la del inducido $0,12 \Omega$. Con miras a reducir su velocidad, manteniéndose constante la corriente de la red, se intercala en serie con el inducido una resistencia de 1Ω . Calcular:

- La nueva velocidad de giro del motor.
- La relación de los pares motores con y sin resistencia adicional.
- La potencia que se pierde en la resistencia adicional en valor absoluto y en relación a la que absorbe el inducido.
- El rendimiento eléctrico del inducido con y sin resistencia adicional.

(Despreciar la caída de tensión en las escobillas.)

21. Dos máquinas de corriente continua, excitación derivación, A y B, idénticas, se acoplan mecánicamente y se conectan en paralelo sobre una línea a 230 V. La máquina A tiene su excitación ajustada a 1,3 A y la B a 1,4 A. La resistencia de inducido, incluida la de contacto de

las escobillas, es de $0,1 \Omega$ en cada máquina. La velocidad de funcionamiento del grupo es de 1200 r.p.m. Se pregunta:

- ¿Cuál de estas dos máquinas trabaja como motor y cuál como generador y por qué razón?
- ¿Cuánto valen las pérdidas combinadas mecánicas y en el hierro, de ambas máquinas?
- ¿Pueden ambas máquinas, simultáneamente, funcionar como generadores a la velocidad de 1200 r.p.m. Justificar la respuesta.

La característica de vacío de esta máquinas a 1000 r.p.m. comprende los siguientes puntos:

I_c	=	1,3	1,4	A
E_0	=	186,7	195,9	V

22. Se dispone de un motor derivación de 200 V, cuya excitación se mantiene constante. El circuito de inducido tiene en serie un reóstato de arranque. Calcular el número de secciones de este reóstato y las resistencias de cada sección, sabiendo que la resistencia del inducido es de $0,5 \Omega$ y que las corrientes en este circuito deben estar comprendidas: a) entre 25 y 50 A; b) entre 35 y 50 A.

Sugerencia: demostrar las siguientes relaciones:

$$\frac{R_T}{R_i} = \gamma^n; \quad \frac{R_K}{R_{K-1}} = \gamma$$

donde R_T representa la resistencia total del circuito del inducido: propia + reóstato de arranque, R_i es la resistencia del inducido; R_{K-1} y R_K son las resistencias totales del circuito del inducido hasta las secciones K-1 y K respectivamente del reóstato de arranque y γ es el cociente I_{max} / I_{min} del inducido en el proceso de arranque.

23. Un motor de corriente continua, con excitación independiente de un imán permanente, tiene una resistencia eléctrica en el inducido de $0,1 \Omega$. La tensión máxima que se puede aplicar al inducido es de 220 V y la corriente máxima que puede pasar por sus devanados es 100 A en régimen estacionario. La constante de proporcionalidad de la tensión inducida es $0,15 \text{ V/rpm}$.

Obtener la expresión del par interno del motor en función de la velocidad para diferentes tensiones de alimentación. Hacer una representación gráfica del par frente a la velocidad para las tensiones de 50, 100 y 200 V.

24. Un motor serie de corriente continua está diseñado de forma que la variación de su flujo medio por polo es lineal con la intensidad de excitación. En vacío, el motor consume de una red de 220 V, 20 A. Sabiendo que la resistencia interna, medida en los bornes de la máquina, es de $1,2 \Omega$, se pide obtener, cuando el motor se alimenta de una fuente de 220 V, la expresión de la

potencia de salida en función de n/n_0 (donde n es la velocidad del motor y n_0 su velocidad en vacío). Dibujar la curva obtenida interpretando su representación.

25. Un motor de corriente continua, con excitación constante, conectado a 30 V y con una resistencia del inducido de $29 \text{ m}\Omega$, tiene una constante de proporcionalidad de la tensión inducida de $0,0114 \text{ V/rad.p.s.}$ Calcular el par máximo que puede obtenerse de dicho motor y la velocidad de giro del mismo en esas condiciones.

26. Dos máquinas de corriente continua, idénticas pero de excitación independiente distinta, se ensayan por un método llamado de Hopkinson. Dicho método consiste en acoplarlas sobre el mismo eje mecánico y conectar los inducidos en paralelo a una red de continua. Los inductores se alimentan con excitación independiente, conectándolos a la misma red, de modo que una de las máquinas trabaje como motor y la otra como generador. Los resultados de este ensayo son los siguientes:

Tensión de la red:	100 V.
Corriente en el inducido del motor	400 A.
Corriente en el inducido del generador	340 A
Corriente de excitación del moto	4,5 A
Corriente de excitación del generador	5,2 A.
Resistencia de cada inducido	$0,02 \Omega$

Suponiendo que las dos máquinas tienen las mismas pérdidas mecánicas, dibujar un esquema del citado ensayo y determinar, los rendimientos de cada una de ellas en los dos casos siguientes:

- a) Sin tener en cuenta la excitación.
- b) Teniendo en cuenta la excitación.

27. Un motor de excitación serie se alimenta de una red de alimentación de corriente continua de la que absorbe 100 A cuando gira a una velocidad de 600 r.p.m., siendo en este caso 90 V la fuerza electromotriz inducida. Cuando el mismo motor consume 200 A con una fuerza electromotriz inducida de 80 V, calcular:

- a) La tensión de la red de alimentación.
- b) Velocidad de giro del motor.
- c) Par desarrollado por la máquina.

Para resolver el problema puede considerarse que la máquina no está saturada, que posee devanado de compensación y que la caída de tensión en las escobillas es despreciable.

28. Un motor de excitación derivación en unas determinadas condiciones de funcionamiento consume 10 kW de potencia a una tensión de 100 V. Se conoce que la resistencia del devanado de excitación y del inducido son 100 y 0,05 ohmios respectivamente. Se reduce la tensión de alimentación a 80 voltios sin variar la potencia consumida por el motor. Se pide calcular la relación entre las velocidades en ambas condiciones de carga.

Para resolver el problema puede considerarse que la máquina no está saturada, que posee devanado de compensación y que la caída de tensión en las escobillas es despreciable.

29. Un motor de excitación serie alimentado a 220 Voltios consume una corriente de 30 amperios cuando gira a 1000 r.p.m. La resistencia del inductor es de 0,2 ohmios y la resistencia del devanado de excitación es de 0,4 ohmios. Se pide:

a) Calcular la corriente consumida y la velocidad de giro del motor si para incrementar el par desarrollado por el motor en un 30 % se conecta en paralelo con el devanado de excitación una resistencia externa de valor 0,1 ohmios.

b) Calcular el valor de la resistencia de un devanado adicional externo en paralelo con el inducido del motor para que, funcionando como motor de excitación compuesta, desarrolle el par deseado a la velocidad de 760 r.p.m. circulando 30 A por el inducido.

Para resolver el problema puede considerarse que la máquina no está saturada, que posee devanado de compensación y que la caída de tensión en las escobillas es despreciable.

30. Un tranvía eléctrico es movido por dos motores iguales de corriente continua de excitación serie. Estos motores tienen 4 polos y se conectan eléctricamente en serie. La resistencia eléctrica total en bornes de cada motor es de 0,1 ohmios. El tranvía tiene un peso de 10000 kg, y presenta en su desplazamiento un rozamiento equivalente al 1,5% de su peso. En un momento determinado, el tranvía tiene que subir una rampa que tiene un desnivel de 4 cm por metro recorrido. El tranvía debe subir esta pendiente con una aceleración de 35 cm/s^2 . En el instante en el que el tranvía alcanza la velocidad de 15 km/h, se pide:

a) La fuerza aplicada en las llantas de las ruedas.

b) La potencia desarrollada por cada motor.

c) Velocidad de giro de los motores, sabiendo que las ruedas tienen 80 cm de diámetro y son accionadas mediante un engranaje reductor de relación 1 a 5.

d) Rendimiento de los motores si la tensión de red es de 1000 V y consumen 45 A.

e) El flujo magnético de cada motor, en las condiciones del apartado c, sabiendo que el devanado inducido tiene 315 espiras por polo y 2 circuitos en paralelo.

Considerar que la máquina tiene devanado de compensación y que es despreciable la caída de tensión en las escobillas.

31. Se dispone de un motor de corriente continua, compensado, con una resistencia de inducido de 0,2 ohmios cuya característica de vacío a 1000 r.p.m. es la siguiente:

E_0 (V)	3	250	300	325
$N I_c$ (A)	0	1500	3000	6000

Conectado a una red a la tensión de 400 V y circulando una intensidad de 50 A por su devanado inducido, el motor desarrolla un par de 150 Nm. En estas circunstancias, determinar:

- Si el devanado de excitación fuese en derivación, ¿qué resistencia tendrá el mismo si se sabe que el arrollamiento es de 1000 espiras?
- Si el devanado de excitación fuese en serie, ¿cuántas espiras deberá tener el mismo?

Despreciar la caída de tensión en las escobillas.

32. Un motor de excitación serie compensado, tiene en todo instante unas pérdidas por efecto Joule de 100 W iguales a las pérdidas mecánicas. Las resistencias de excitación e inducido no varía. Teniendo en cuenta que podemos despreciar la caída de tensión en las escobillas, se pide:

- El valor de la fuerza electromotriz inducida y de la potencia útil que proporciona funcionando como motor alimentado a 100 V y absorbiendo 1 kW.
- El valor de la carga (Ω) a la que alimenta cuando funciona como generador si absorbe por el eje el valor de la potencia pedida en el apartado anterior.

33. Se dispone de un motor excitación serie cuya resistencia total es de 0,5 ohmios. Alimentado a la tensión de 220 V cuando la intensidad que absorbe de la red es de 40 A y la velocidad 750 r.p.m., el efecto de la reacción de inducido supone una caída de tensión de 50 V. Determinar la tensión a la que habría que alimentar el motor para que, absorbiendo 40 A, la velocidad fuera de 600 r.p.m. en los siguientes casos:

- Si la máquina está compensada.
- Si la máquina no está compensada.

Considerar despreciable la caída de tensión en las escobillas y que el núcleo magnético no está saturado.

34. Se dispone de un motor de excitación derivación cuya resistencia de inducido es de 0,2 ohmios. Se alimenta a una tensión de 320 V consumiendo de la red 100 A. En estas condiciones el efecto de la reacción de inducido supone una reducción del 10% del flujo de vacío y la velocidad alcanzada es de 1000 r.p.m. Determinar la velocidad que alcanzaría si estuviese compensado y desarrollara el mismo par motor. Se desprecia la caída de tensión en las escobillas.

35. Una noria de feria es accionada por un motor de corriente continua de excitación serie que es alimentado por una dinamo de excitación derivación cuyo eje es accionado por un motor de inducción conectado a la red. La dinamo dispone de un regulador automático de excitación que permite ajustar y mantener su tensión en bornes en el valor deseado.

El motor tiene una resistencia total de inducido de 0,05 ohmios, siendo 0,15 ohmios la resistencia del devanado de excitación. Se sabe que, cuando circulan por él 10 A, desarrolla un par en el eje de 8,89 Nm. El devanado inducido de la dinamo tiene una resistencia de 0,2 ohmios, y sus pérdidas mecánicas son de 100 W. La noria tiene un radio de 20 m y está acoplada al motor de excitación serie mediante una reductora de relación 1:40.

En un cierto instante, la noria funciona de manera que la dinamo absorbe 6700 W y el regulador está ajustado para que su tensión en bornes sea de 110 V, lo que corresponde a una resistencia total de su rama derivación de 22 ohmios. Se pide:

- a) Calcular la velocidad en km/h de las cabinas de la noria, situadas en la periferia de la misma.
- b) Ante la competencia de otras atracciones, el encargado decide ajustar el regulador de la dinamo para que su tensión en bornes sea de 409 V y así aumentar la velocidad de giro. Calcular la velocidad, en km/h, a la que pasan a desplazarse las cabinas.
- c) Asustado por los gritos de pánico de los usuarios, el encargado aplica un freno que hace que el par resistente en el eje del motor aumente al doble. Calcular la nueva velocidad de las cabinas en km/h.
- d) Como el freno se está calentado y el regulador de la dinamo se ha atascado en los 409 V, el encargado quita el freno y, para disminuir la excitación del mismo, puente el devanado inductor del motor excitación serie con un cable de resistencia 0,001 ohmios. ¿Ha sido una buena idea?

Considerar que las máquinas de c.c. poseen devanado de compensación, que es despreciable la caída de tensión en las escobillas y que el circuito magnético del motor de c.c. no está saturado.

36. Los devanados inducido e inductor de un motor serie de c.c. compensado de 600 V tienen unas resistencias de 0,22 y 0,08 Ω respectivamente. La tensión en vacío a 1000 r.p.m., obtenida alimentando independientemente el inductor con una intensidad de 50 A, es de 557 V. Las pérdidas mecánicas a 1000 r.p.m. ascienden a 540 W y se suponen variables linealmente con la velocidad. Se desprecia la caída de tensión en las escobillas. Calcular:

- a) La velocidad de giro del motor cuando consume una corriente de 40 A, y la potencia desarrollada por el motor en este caso.
- b) El par inicial de arranque cuando la corriente se limita a 60 A, por inserción de un reóstato en serie con el inducido.

c) El valor que debe tener el reóstato en paralelo con el devanado serie para que el motor suministre un par interno de 220 Nm a 1200 r.p.m.

37. Un motor de c.c. de excitación independiente, de 220 V tiene una intensidad asignada de inducido de 70 A. Su velocidad en vacío es de 1450 r.p.m. y la plena carga el 92% de la anterior. Funcionando a plena carga el par externo invierte su sentido y su valor pasa a ser la mitad del de plena carga. Se desea hacer un frenado reostático con una intensidad de frenado igual a 2,5 veces la asignada. Calcular el valor que debe tener el reóstato de frenado y la velocidad final mínima que se podría alcanzar, una vez suprimida toda la resistencia adicional. (Despreciar la caída de tensión en las escobillas, la reacción de inducido y las pérdidas mecánicas.

38. Un motor serie compensado tiene una resistencia de inducido de $0,3 \Omega$ y de inductor de $0,2 \Omega$. Su curva de vacío, a 800 rpm, se puede aproximar por la expresión $E = 6 I_s$, siendo I_s la intensidad que circula por el devanado serie. Funciona normalmente a 1000 rpm, alimentado a 400 V.

a) Calcular la mínima tensión a la que podrá arrancar una carga que presenta un par en reposo de 600 Nm.

b) Durante el funcionamiento normal, se produce una subida de tensión de hasta 425 V al tiempo que el par resistente se multiplica por dos. Calcular la resistencia que hay que poner en paralelo con el inductor para que siga girando a 1000 rpm.

c) ¿Cuál es el máximo par que puede producir en frenado reostático con una corriente máxima de 150 A?

39. Un motor de excitación compuesta de 36 kW, 500 V tiene un rendimiento a plena carga de 0,87 p.u. y gira a 900 rpm accionando una carga de par constante excitado sólo por el devanado derivación. La resistencia del inducido es de $0,4 \Omega$, la del devanado derivación de 250Ω y la del devanado serie de $0,1 \Omega$. Se quiere utilizar el devanado serie para elevar la velocidad a 960 rpm. Calcular la corriente de inducido y el rendimiento en las nuevas condiciones de funcionamiento.

40. Un motor derivación de c.c. se alimenta a 230 V y acciona una bomba centrífuga a 1200 rpm absorbiendo una corriente de 83,5 A. Con la bomba en seco (sin agua en la cámara del rodete) se comprueba que para que gire a esa misma velocidad es preciso aplicar una tensión de 216 V, siendo entonces la corriente absorbida de 6,5 A. La resistencia del inducido es de $0,15 \Omega$ y la del inductor de 174Ω , y la caída de tensión en escobillas es de 2 V. Calcular:

a) La potencia útil suministrada a la bomba.

b) El rendimiento del motor.

c) El par de arranque a la tensión asignada si la corriente de arranque se limita a 83,5 A mediante la inserción de una resistencia en serie con el inducido.

d) El valor que debe tener dicha resistencia.

MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

Problemas resueltos

PROBLEMA 1

Un motor shunt de corriente continua de 30 CV se conecta a una línea de 230 V para accionar una bomba. Con dicha bomba conectada, consume una corriente de línea de 83,5 A, y gira a una velocidad de 1200 r.p.m. Si se quiere que el motor gire en vacío a la misma velocidad, es necesario que la tensión de alimentación se reduzca a 216 V, siendo el consumo de 6,5 A. Los datos del motor son los siguientes:

Resistencia del devanado de inducido, sin incluir las escobillas: $0,15 \Omega$.

Resistencia del devanado de excitación: 174Ω .

Caída de tensión total en las escobillas, independiente de la carga: 2 V.

Las pérdidas en el hierro se desprecian.

Se pide:

- A. La potencia, en CV, suministrada por el motor a la bomba.
- B. El rendimiento del motor con la bomba conectada, especificando cada una de las pérdidas que se producen.

Solución

Hipótesis

Antes de resolver el problema es necesario realizar una serie de simplificaciones e hipótesis sobre el funcionamiento de la máquina. Primero se va a considerar que la máquina no trabaja saturada. Por otro lado, no se aporta en el enunciado ninguna información sobre si hay que considerar la reacción inducida. Por lo tanto, también se considera que es despreciable. El enunciado del problema indica que se desprecien las pérdidas en el hierro. El otro tipo de pérdidas que hay que considerar son las mecánicas. En principio, no hay ningún indicio que permite poder despreciarlas.

Apartado A

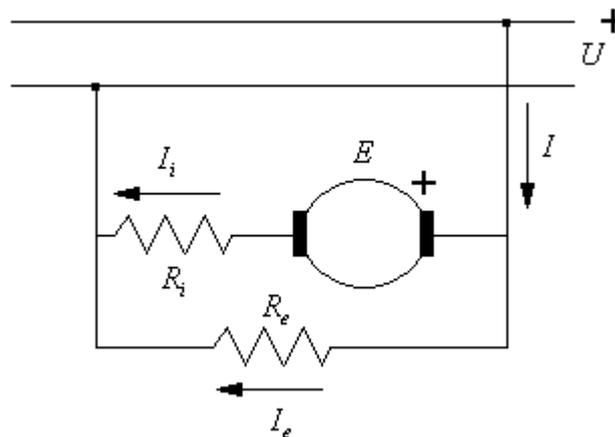
En este apartado se pide la potencia útil del motor cuando está accionando la bomba. En esta situación de carga del motor se conocen los siguientes datos:

$$U = 230 \text{ V}$$

$$I = 83,5 \text{ A}$$

$$n = 1200 \text{ r.p.m.}$$

El circuito eléctrico equivalente del motor shunt, con el que se va a trabajar, es el siguiente:



Utilizando las leyes de Kirchoff sobre el circuito de la figura, es posible calcular la corriente del inducido, la corriente de excitación y la fuerza electromotriz inducida:

$$U = R_e \cdot I_e$$

$$I_e = \frac{U}{R_e} = 1,32 \text{ A}$$

$$I_i = I - I_e = 83,5 - 1,32 = 82,18 \text{ A}$$

$$U = E + R_i \cdot I_i + 2 \cdot U_E$$

$$E = U - R_i \cdot I_i - 2 \cdot U_E = 215,67 \text{ V}$$

Para determinar la potencia útil del motor es necesario realizar un balance de potencias al mismo. La potencia consumida se emplea en transmitir una potencia mecánica útil a la bomba, y en vencer las pérdidas: pérdidas por efecto Joule en el inducido y en el devanado de campo, pérdidas en las escobillas y pérdidas mecánicas. Las pérdidas en el hierro no se incluyen porque se ha considerado que son despreciables. Con los datos disponibles se pueden calcular las siguientes potencias:

- Potencia consumida por el motor:

$$P_{ab} = U \cdot I = 230 \cdot 83,5 = 19205 \text{ W}$$

- Potencia de pérdidas en las escobillas:

$$P_{esc} = U_e \cdot I_i = 2 \cdot 82,18 = 164,36 \text{ W}$$

- Potencia de pérdidas en el devanado de campo:

$$P_{exc} = R_e \cdot I_e^2 = 174 \cdot 1,32^2 = 304,02 \text{ W}$$

- Potencia de pérdidas por efecto Joule en el devanado del inducido:

$$P_{cu,i} = R_i \cdot I_i^2 = 0,15 \cdot 82,18^2 = 1013 \text{ W}$$

Las pérdidas mecánicas en principio son desconocidas. Además no se conoce si son constantes o variables con la velocidad. No obstante, en el enunciado se proporcionan los datos de funcionamiento del motor en vacío. En esta situación el motor gira a la misma velocidad, 1200 r.p.m., que en la situación de carga. Por lo tanto, aunque las pérdidas mecánicas sean dependientes de la velocidad, van a ser iguales en las dos situaciones de funcionamiento del motor presentadas en el enunciado. Para determinar estas pérdidas es necesario efectuar un balance de potencias al motor funcionando en vacío. En esta situación, la potencia útil es nula. La potencia que consume el motor se emplea totalmente en compensar las pérdidas que se producen en el motor. Primero, con la ayuda del circuito eléctrico equivalente, es necesario determinar las siguientes magnitudes: corriente del inducido, corriente de excitación y la fuerza electromotriz inducida.

$$U = R_e \cdot I_e$$

$$I_e = \frac{U}{R_e} = 1,24 \text{ A}$$

$$I_i = I - I_e = 6,5 - 1,24 = 5,26 \text{ A}$$

$$U = E + R_i \cdot I_i + 2 \cdot U_E$$

$$E = U - R_i \cdot I_i - 2 \cdot U_E = 213,21 \text{ V}$$

Con los datos anteriores se pueden calcular las siguientes potencias:

- Potencia consumida por el motor:

$$P_{ab} = U \cdot I = 216 \cdot 6,5 = 1404 \text{ W}$$

- Potencia de pérdidas en las escobillas:

$$P_{esc} = U_e \cdot I_i = 2 \cdot 5,26 = 10,52 \text{ W}$$

- Potencia de pérdidas en el devanado de campo:

$$P_{exc} = R_e \cdot I_e^2 = 174 \cdot 1,24^2 = 268,14 \text{ W}$$

- Potencia de pérdidas por efecto Joule en el devanado del inducido:

$$P_{cu,i} = R_i \cdot I_i^2 = 0,15 \cdot 5,26^2 = 4,15 \text{ W}$$

Entonces, las pérdidas mecánicas se pueden calcular de la siguiente forma:

$$P_{ab} = P_{mec} + P_{esc} + P_{exc} + P_{cu,i}$$

$$P_{mec} = P_{ab} - (P_{esc} + P_{exc} + P_{cu,i}) = 1121,20 \text{ W}$$

Se puede comprobar que las pérdidas mecánicas son iguales a la potencia mecánica interna desarrollada por el motor en vacío. Ya es posible determinar la potencia útil del motor funcionando en carga:

$$P_{ab} = P_u + P_{mec} + P_{cu,i} + P_{esc} + P_{exc}$$

$$P_u = P_{ab} - (P_{mec} + P_{cu,i} + P_{esc} + P_{exc})$$

$$P_u = 16602,44 \text{ W} = 22,26 \text{ CV}$$

Apartado B

En el apartado A se han calculado los datos necesarios para responder a este apartado. Por lo tanto no es necesario realizar ninguna operación nueva. El rendimiento será el siguiente:

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ab}} \cdot 100 = \frac{16602,44}{19205} \cdot 100 = 86,45\%$$

Las pérdidas del motor cuando está accionando la bomba también se han determinado en el apartado A, y son las siguientes:

- Potencia de pérdidas en las escobillas:

$$P_{esc} = 164,36 \text{ W}$$

- Potencia de pérdidas en el devanado de campo:

$$P_{exc} = 304,02 \text{ W}$$

- Potencia de pérdidas por efecto Joule en el devanado del inducido:

$$P_{cu,i} = 1013 \text{ W}$$

- Pérdidas mecánicas:

$$P_{mec} = 1121,20 \text{ W}$$

PROBLEMA 2

Se conocen los siguientes datos de un motor de corriente continua: excitación serie, 4 polos, 250 V de tensión nominal de alimentación, el número de conductores en el devanado inducido es de 496, el devanado de inducido es de tipo ondulado, el flujo por polo es $2,2 \cdot 10^{-2}$ Wb, las pérdidas mecánicas por rozamiento son 810 W, la resistencia del inducido es de $0,19 \Omega$, y la resistencia de campo es de $0,14 \Omega$.

Cuando el motor consume 50 amperios, calcular:

- a) El par interno desarrollado por la máquina.
- b) La velocidad de giro del motor.
- c) El par útil.
- d) El rendimiento del motor.

Solución

Apartado A

Para resolver este apartado solo es necesario emplear la siguiente fórmula, que nos proporciona el par interno desarrollado por la máquina en función de parámetros constructivos del motor, de la corriente del inducido y del flujo por polo:

$$M_i = C_2 \cdot I_i \cdot \hat{\phi}$$

C_2 es una constante que solo depende de parámetros constructivos de la máquina. Se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$C_2 = \frac{2p}{2a} \cdot \frac{N}{2\pi}$$

Todas las variables que aparecen en esta expresión son proporcionadas en el enunciado del problema. N es el número de conductores del devanado del inducido: 496. $2p$ es el número de polos, que en este caso son 4. $2a$ es el número de ramas en paralelo presentes en el devanado del inducido. Depende del tipo de devanado. En este caso es de tipo ondulado y por tanto $2a$ toma el valor 2.

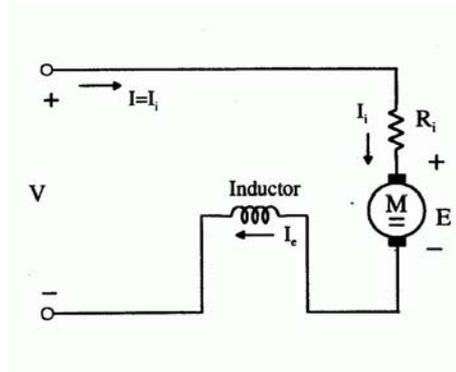
$$C_2 = \frac{4}{2} \cdot \frac{496}{2\pi} = 157,88$$

El flujo por polo es también un dato del problema. Para que el par venga expresado en Nm es necesario que este flujo venga expresado en Wb. Como en el enunciado el flujo viene en esta unidad no es necesario realizar ningún cambio. Por último queda la corriente de inducido. Conocemos la corriente total que consume el motor. Al ser de excitación serie, la corriente de inducido y la corriente total coinciden.

$$\begin{aligned} M_i &= C_2 \cdot I_i \cdot \hat{\phi} \\ M_i &= 157,88 \cdot 2,2 \cdot 10^{-2} \cdot 50 \\ M_i &= 173,76 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Apartado B

Existen varios procedimientos para determinar la velocidad de giro del motor. Nosotros vamos a determinar primero la fuerza electromotriz inducida, E , y a partir de ella calcularemos n . Nuestra herramienta para resolver el problema es el circuito eléctrico equivalente del motor, dibujado en la siguiente figura.



Circuito eléctrico equivalente del motor de excitación serie.

Se puede obtener la fuerza electromotriz inducida empleando la segunda ley de Kirchoff:

$$\begin{aligned}
 U &= E + (R_i + R_{es}) \cdot I \\
 E &= U - (R_i + R_{es}) \cdot I \\
 E &= 250 - (0,19 + 0,14) \cdot 50 \\
 E &= 233,5 \text{ V}
 \end{aligned}$$

La fuerza electromotriz inducida es proporcional al producto de la velocidad de giro del motor por el flujo creado por polo. La constante de proporcionalidad depende de parámetros constructivos del motor.

$$\begin{aligned}
 E &= C_1 \cdot n \cdot \hat{\phi} \\
 C_1 &= \frac{2p}{2a} \cdot \frac{N}{60}
 \end{aligned}$$

En el sistema de dos ecuaciones anterior, todo es conocido salvo la velocidad de giro, que tendrá el siguiente valor:

$$\begin{aligned}
 E &= C_1 \cdot n \cdot \hat{\phi} = \frac{2p}{2a} \cdot \frac{N}{60} \cdot n \cdot \hat{\phi} \\
 n &= \frac{E}{\frac{2p}{2a} \cdot \frac{N}{60} \cdot \hat{\phi}} = \frac{233,5}{\frac{4}{2} \cdot \frac{496}{60} \cdot 2,2 \cdot 10^{-2}} \\
 n &= 641,95 \text{ rpm}
 \end{aligned}$$

Si la fuerza electromotriz se expresa en voltios y el flujo en Wb, la velocidad de giro se obtiene en rpm.

Apartado C

El par útil se puede obtener a partir de la potencia útil una vez conocida ya la velocidad de giro del motor. La potencia útil del motor es igual a la potencia interna desarrollada por la máquina menos las pérdidas por rozamiento.

$$P_u = P_i - P_{mec}$$

La potencia interna es igual al producto del par interno por la velocidad de giro, expresada en radianes por segundo, o bien, como el producto de la fuerza electromotriz inducida y la corriente del inducido.

$$P_i = M_i \cdot \Omega = E \cdot I_i = 11675 \text{ W}$$

La potencia y el par útil quedan:

$$P_u = P_i - P_{mec} = 10865 \text{ W}$$

$$P_u = M_u \cdot \Omega = M_u \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n$$

$$M_u = \frac{P_u}{\frac{2\pi}{60} \cdot n} = 161,62 \text{ Nm}$$

Apartado D

Para determinar el rendimiento es necesario conocer la potencia eléctrica que está consumiendo el motor.

$$P_{ab} = U \cdot I = 250 \cdot 50 = 12500 \text{ W}$$

La potencia útil obtenida del motor se calculó en el apartado anterior. Por lo tanto, el rendimiento de la máquina es:

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ab}} \cdot 100 = 86,92\%$$

PROBLEMA 3

Un motor serie de corriente continua de 220 V, absorbe 40 A cuando gira a 700 r.p.m. La resistencia del inducido es de $0,15 \text{ } \Omega$, y la resistencia de campo o de excitación es de $0,10 \text{ } \Omega$. Se supone que el flujo magnético por polo es directamente proporcional a la corriente de campo. Calcular:

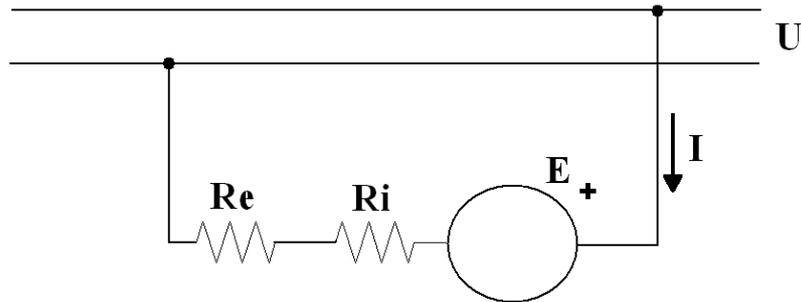
1. La velocidad de giro del motor,
2. La corriente consumida por el motor,

en la siguiente situación de funcionamiento:

- El par de carga se incrementa un 50% con respecto a la característica de funcionamiento inicial descrita en el enunciado.
- Se reduce la corriente de excitación conectando una resistencia externa en paralelo con el devanado de excitación. Esta resistencia externa es de igual valor que la resistencia de excitación.

Solución

Tenemos un motor de corriente continua con excitación serie, y cuyo circuito eléctrico equivalente es el siguiente:



Circuito eléctrico equivalente del motor DC de excitación serie.

Conocemos el valor de las dos resistencias que aparecen en el circuito eléctrico anterior:

- A. Resistencia del inducido: $R_i = 0,15 \Omega$.
- B. Resistencia de campo o de excitación: $R_{ex} = 0,10 \Omega$.

Como corresponde a un motor de este tipo, ambas resistencias son del mismo orden de magnitud. Conocemos el funcionamiento del motor en unas determinadas condiciones de carga. Se modifican algunas condiciones de funcionamiento, y nos piden, la nueva velocidad de giro del motor y la corriente que consume. Las condiciones son las siguientes:

- El par de carga del motor se incrementa un 50%.
- La corriente de excitación se ve reducida a la mitad, al colocar en paralelo con el devanado de campo, una resistencia externa de su misma magnitud.

Intentaremos plantear las ecuaciones que definen el comportamiento del motor en las dos situaciones de carga descritas. Pero antes expondremos las hipótesis necesarias para solucionar el problema:

- A. Despreciamos la caída de tensión en las escobillas.
- B. Despreciamos las pérdidas mecánicas. El interno de la máquina coincidirá entonces con el par útil o de carga.
- C. El flujo por polo es proporcional a la corriente de excitación.

D. Se desprecia la reacción de inducido.

En la primera situación de carga conocemos los siguientes datos:

- Tensión de alimentación: 220 V.
- Corriente consumida: 40 A.
- Velocidad de giro: 700 r.p.m.

Con esta información podemos calcular:

- a) El par desarrollado por el motor.
- b) La constante de proporcionalidad de la fuerza electromotriz inducida.
- c) La constante de proporcionalidad del par interno.

Si se emplea la segunda ley de Kirchoff en el circuito eléctrico equivalente, se puede obtener el valor de la fuerza electromotriz inducida:

$$\begin{aligned}U &= E + (R_i + R_e) \cdot I \\E &= U - (R_i + R_e) \cdot I \\E &= 220 - (0,15 + 0,10) \cdot 40 \\E &= 210 \text{ V}\end{aligned}$$

La fuerza electromotriz inducida es proporcional al flujo por polo y a la velocidad de giro:

$$E = C_1 \cdot n \cdot \Phi$$

Hemos supuesto que el flujo por polo es proporcional a la corriente de excitación. En este caso, al ser excitación tipo serie, la corriente de excitación y la del inducido coinciden. Por lo tanto el flujo es proporcional a la corriente que consume el motor:

$$\Phi = K \cdot I$$

Si sustituimos esta expresión en la ecuación de E, obtenemos:

$$E = C_1 \cdot n \cdot (K \cdot I) = (C_1 \cdot K) \cdot n \cdot I = K_1 \cdot n \cdot I$$

Podemos, entonces, obtener el valor de la constante de proporcionalidad K_1 :

$$K_1 = \frac{E}{n \cdot I} = \frac{210}{700 \cdot 40} = 0,0075$$

También necesitaremos el valor del par desarrollado por la máquina. Como hemos despreciado las pérdidas mecánicas, el par interno y el par de la carga son iguales. Podemos emplear la potencia interna para determinar el par de carga:

$$P_i = E \cdot I = M_i \cdot \Omega = M_i \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n$$
$$M_i = \frac{E \cdot I}{\frac{2\pi}{60} \cdot n} = \frac{210 \cdot 40}{\frac{2\pi}{60} \cdot 700} = 114,59 \text{ Nm}$$

También sabemos que el par interno desarrollado por la máquina es proporcional al flujo por polo y a la corriente que circula por el inducido:

$$M_i = C_2 \cdot \Phi \cdot I_i$$

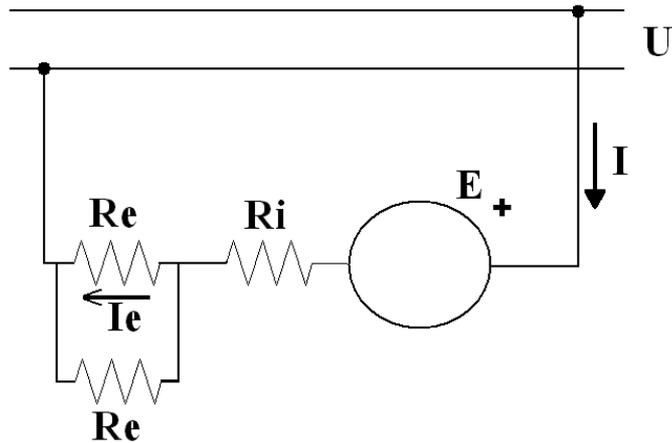
La corriente del inducido es también la corriente consumida por el motor y el flujo proporcional a la corriente de excitación.

$$M_i = C_2 \cdot K \cdot I \cdot I = K_2 \cdot I^2$$

Es posible, también, calcular el valor de la constante de proporcionalidad K_2 :

$$K_2 = \frac{M_i}{I^2} = \frac{114,59}{40^2} = 0,0716$$

Una vez hechas las modificaciones en el circuito eléctrico del motor, éste queda como se muestra en la siguiente figura:



Se ha conectado en paralelo con R_{ex} una resistencia de igual valor, cuyo único objetivo es reducir la corriente de excitación, que ya no será igual a la corriente del inducido. En este caso, la corriente de excitación queda reducida a la mitad. Solo la corriente que circula por R_{ex} crea el campo magnético de la máquina. La corriente que circula por la resistencia externa conectada en paralelo, no contribuye a la creación de este campo.

El par de carga se incrementa un 50% respecto al que vencía el motor anteriormente. El nuevo par interno que debe desarrollar la máquina es el siguiente:

$$M_i' = 1,5 \cdot M_i = 1,5 \cdot 114,59 = 171,89 \text{ Nm}$$

El par interno es proporcional al flujo por polo y a la corriente del inducido. El flujo por polo es proporcional a la corriente de excitación. Al colocar la resistencia externa hemos reducido a la mitad la corriente de excitación:

$$I_{ex} = \frac{I}{2}$$

Por lo tanto, el flujo por polo ahora es proporcional a $I/2$. El par interno entonces será:

$$M_i' = C_2 \cdot \Phi \cdot I = C_2 \cdot K \cdot \frac{I}{2} \cdot I = K_2 \cdot \frac{I^2}{2}$$

La constante K_2 es la misma que hemos determinado con anterioridad debido a que depende de características constructivas del motor. Como conocemos el nuevo par que vence la máquina, con la expresión anterior es posible calcular la corriente que está consumiendo la máquina:

$$I' = \sqrt{\frac{2 \cdot M_i'}{K_2}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 171,89}{0,0716}}$$

$$\boxed{I' = 69,28 \text{ A}}$$

Esta es una de las variables que se pedía en el enunciado del problema. Nos queda determinar la velocidad. Primero vamos a calcular la fuerza electromotriz inducida:

$$E' = U - R_i \cdot I' - R_{ex} \cdot \frac{I'}{2} = 206,14 \text{ V}$$

Como sabemos, E es proporcional al flujo por polo y la velocidad giro de la máquina. El flujo por polo, ahora es proporcional a la corriente del inducido dividida por 2.

$$E' = C_1 \cdot n \cdot \Phi = C_1 \cdot n \cdot K \cdot \frac{I}{2} = K_1 \cdot n \cdot \frac{I}{2}$$

La constante K_1 fue determinada con anterioridad. En la fórmula anterior se puede despejar la velocidad y obtener su nuevo valor:

$$n' = \frac{E'}{K_1 \cdot \frac{I'}{2}} = \frac{206,14}{0,0075 \cdot \frac{69,28}{2}}$$

$$\boxed{n' = 793,45 \text{ r.p.m.}}$$

Otra alternativa consiste en emplear la potencia interna.

$$P_i = E' \cdot I' = M_i' \cdot \Omega = M_i' \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n'$$

$$n' = \frac{E' \cdot I'}{M_i' \cdot \frac{2\pi}{60}}$$

Soluciones

Problemas seleccionados

1. $I = 12,85 \text{ A}$; $n = 1236,5 \text{ r.p.m.}$
3. a) $n = 1172,64 \text{ r.p.m.}$; b) $n = 1143,84 \text{ r.p.m.}$; c) $n = 1115,04 \text{ r.p.m.}$
4. $\eta = 82,25\%$
8. a) $n = 265,26 \text{ r.p.m.}$; b) $U_1 = 342,74 \text{ V}$, $U_2 = 407,27 \text{ V}$
10. a) $n_0 = 1257,69 \text{ r.p.m.}$; b) $R_{\text{SERIE}} = 1 \Omega$
11. $0,043 \text{ Wb/polo}$
12. a) $P = 2I$; b) $P = I$; c) $P = I$; d) $P = I/2$
13. $n = 993,70 \text{ r.p.m.}$
14. a) $E = 113,75 \text{ V}$; b) $M_i = 28,26 \text{ Nm}$
15. $R_{\text{ad}} = 123,64 \Omega$
16. $P_u = 5722,75 \text{ W}$; $\eta = 86,7 \%$
17. $R_{\text{ad}} = 6 \Omega$; $n = 770,83 \text{ r.p.m.}$
18. a) $R_{\text{REOSTATO}} = 10 \Omega$; b) $U = 93,75 \text{ V}$
19. a) $R = 23,28 \Omega$; b) $R = 5,98 \Omega$.
20. a) $n = 803 \text{ r.p.m.}$; b) 1; c) $5358,24 \text{ W}$, $31,83\%$; d) $96,18\%$, $64,35\%$
21. a) Máquina A: motor, Máquina B: generador; b) $1410,72 \text{ W}$; c) No
23. $M_i = 14,32(U - 0,15n)$
25. $M_{\text{MAX}} = 11,79 \text{ Nm}$; $n_{\text{MAX}} = 0 \text{ r.p.m.}$
26. $\eta_{\text{MOTOR}} = 91,39\%$; $\eta_{\text{GENERADOR}} = 93,01\%$
38. a) $U_{\text{min}} = 45,8 \text{ V}$; b) $R_d = 0,224 \Omega$; c) $T_{\text{mi}} = -1611 \text{ Nm}$.
39. a) $I_i = 88,2 \text{ A}$; $\eta = 85,14\%$
40. a) $P_u = 16600 \text{ W}$; b) $\eta = 86,44\%$; c) $M_{\text{arr}} = 139,4 \text{ Nm}$; d) $R_{\text{adicional}} = 2,62 \Omega$

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.