

### Tercera Guía de Ejercicios EL 7032 Primer Semestre 2020, RCD.

1) Un generador DFIG se debe sincronizar y conectar a una red eléctrica que tiene los siguientes voltajes: fase-neutro  $V_a=311\cos(\omega t)$ ,  $V_b=311\cos(\omega t+2\pi/3)$ ,  $V_c=311\cos(\omega t+4\pi/3)$ . Los parámetros de la máquina son:

$R_r=0.525\Omega$ ,  $R_s=0.398$ ,  $L_s=0.0835H$ ,  $L_m=0.0796$ ,  $L_r=0.0825$ . La velocidad sincrónica es de 1000rpm y el generador puede operar entre 700 y 1300rpm.

Desafortunadamente, un joven ingeniero efectúa las pruebas de cortocircuito y rotor bloqueado en la máquina, cometiendo los siguientes errores:

*La inductancia de dispersión del rotor tiene un error de +20% y la resistencia de rotor esta sobreestimada en un 15%.*

- Deduzca las ecuaciones necesarias para sincronizar un generador DFIG, alimentado desde el rotor, a una red cuyos voltajes son medidos e ingresados al sistema de control.
- ¿Cuál es la diferencia de tensión, entre el estator del DFIG y la red, al sincronizar y conectar la máquina en  $t=320ms$  a una velocidad de 1150rpm? .
- ¿Cuáles ecuaciones se podrían utilizar para calcular la evolución de la corriente de estator en el caso de a)?. Plantee estas ecuaciones y justifique sus razonamientos.
- Si se conecta la máquina en  $t=400ms$ , ¿cuál es la velocidad, considerando todo el rango de operación, donde la diferencia de tensión entre el estator del DFIG y la red es máxima?
- Repita a) considerando que el transductor de velocidad se encuentra descalibrado y con un error de -5%.

2) Un generador DFIG, de 8 polos 50Hz, debe acoplarse a una turbina eólica con un perfil de aspa con  $C_{pmax}=0.4$  (máximo valor de coeficiente de potencia) y una razón óptima de punta de aspa de 7.0 ( $\lambda=\omega R/V$ ). Utilizando estas características se pide:

- Diseñe un sistema eólico de 500kW operando a una velocidad de viento nominal de  $14ms^{-1}$ . Especifique los convertidores para operar en un rango de velocidad de  $\pm 25\%$  alrededor de la sincrónica. Encuentre el tamaño del gear-box y el máximo torque que se produce en el lado de alta y baja velocidad del gear-box.

- b) Dibuje el sistema de control del generador asumiendo que el rotor opera a factor de potencia unitario. Explique cómo se obtiene la corriente de torque y de que depende.
- c) Si el sistema ya diseñado está operando con una velocidad de viento de  $7\text{ms}^{-1}$ , encuentre la máxima potencia reactiva que puede entregar a la red el convertidor front-ent.
- 3) Para el generador DFIG utilizado en 1), diseñe y dibuje los lazos de corriente incluyendo compensaciones, para obtener una frecuencia natural de 100Hz. No es necesario utilizar computador para lograr el diseño (usted decida el coef. de amortiguamiento).
- 4) Se tiene un perfil de aspa, para aplicaciones eólicas, cuyo coeficiente de torque puede obtenerse de la siguiente “piece-wise linearisation”.

*if ( $\lambda \leq 3$ )  $C_t = 0.0$ ;*  
*else if ( $(\lambda > 3) \& (\lambda \leq 6)$ )  $C_t = (0.013890 * \lambda) - 0.04167$ ;*  
*else if ( $(\lambda > 6) \& (\lambda \leq 7)$ )  $C_t = (0.003330 * \lambda) + 0.02169$ ;*  
*else if ( $(\lambda > 7) \& (\lambda \leq 8.3)$ )  $C_t = -(0.002541 * \lambda) + 0.06279$ ;*  
*else if ( $(\lambda > 8.3) \& (\lambda \leq 20)$ )  $C_t = -(0.003564 * \lambda) + 0.07129$ ;*  
*else if ( $\lambda > 20$ )  $C_t = 0.0$ ;*

Donde  $\lambda = \lambda$  es la razón de punta de aspa o tip-speed ratio. La potencia de la turbina se puede calcular como:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi C_p R^2 V^3$$

Donde  $C_p = \lambda C_t$ ,  $\rho = 1.25$ ,  $R$  es el radio de la turbina en metros,  $V$  la velocidad del viento en mts/seg y  $\lambda = \omega R / V$ , con  $\omega$  como la velocidad angular de las aspas. Se pide:

- a) Encuentre el valor de  $k_{opt}$  que relaciona la máxima potencia a extraer desde el viento, de acuerdo a la ecuación  $P_{max} = k_{opt} V^3$ .
- b) Reformule la ecuación de a) para encontrar la potencia máxima como una función de la velocidad rotacional de las aspas al cubo.
- c) Diseñe una turbina eólica para capturar 2.0MW a 12mts/seg utilizando el perfil del aspa descrito anteriormente.
- d) Para la turbina diseñada en b) encuentre el máximo torque producido por la turbina eólica. A qué valor de  $\lambda$  se produce este torque?.
- e) Se debe utilizar un generador de doble excitación de 1000 rpm de velocidad sincrónica para operar con esta turbina eólica. El máximo slip permitido es de un 30%. Diseñe la razón de la caja de engranajes (gear-box) que ser utilizado con este generador. Cuál es la potencia de la máquina de doble excitación a utilizar con esta turbina?. Cuál es la potencia requerida en los convertidores back to back? .

5) Un generador DFIG, de 10 polos, 50Hz, debe acoplarse a una turbina eólica con un perfil de aspa con  $C_{pmax} = 0.4$  (máximo valor de coeficiente de potencia) y una razón óptima de punta de aspa de 7.0 ( $\lambda = \omega R/V$ ). Utilizando estas características se pide:

- Si se cuenta con una caja de engranajes que amplifica en 77 veces la velocidad de las aspas de la turbina. ¿Cuál debería ser la potencia máxima capturada por la turbina acoplada a este generador cuando la velocidad del viento es de  $9\text{ms}^{-1}$ ?. Considere en este caso que la máquina DFIG puede operar con  $\pm 25\%$  de deslizamiento.
- ¿Cuál debería ser la potencia de los convertidores back-to-back utilizados en el rotor si la máquina DFIG puede operar en el intervalo  $[400-800]\text{rpm}$ ?. Rediseñe la turbina para esta nueva condición considerando la misma caja de engranajes.

6) Un generador DFIG tiene los siguientes parámetros:

$$R_r = 0.525\Omega, R_s = 0.398\Omega, L_s = 0.0835\text{H}, L_0 = 0.0796\text{H}, L_r = 0.0825\text{H}.$$

La razón de vueltas se asume como unitaria. Para la estimación del flujo de estator se utiliza un integrador modificado  $F(s)$  con función de transferencia:

$$F(s) = \frac{1}{s+a} \quad (1)$$

Donde  $a$  se calcula para atenuar cualquier componente continua que se encuentre en la medición por un factor de  $1/30$ . Se implementa control vectorial orientado en el flujo de estator  $\hat{\underline{\psi}}$  estimado utilizando  $F(s)$ . Se pide

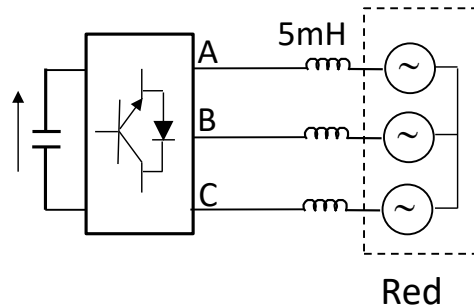
- El sistema de control se encuentra operando a 50Hz, con un valor efectivo de flujo (constante) de aproximadamente  $220/(2\pi \times 50)$ . Encuentre las corrientes directa y en cuadratura reales en el rotor cuando el convertidor del lado de la máquina está operando con referencias  $i_d^* = -3\text{A}$  e  $i_q^* = 10\text{A}$ , valores efectivos. ¿Cuál es la corriente de estator para esa condición?.
- Un científico entusiasta propone un “revolucionario” sistema de control basado en conectar el estator a una red de baja frecuencia de 10Hz, manteniendo flujo nominal al reducir la magnitud del voltaje en forma proporcional a la frecuencia. Si el integrador modificado  $F(s)$  es el mismo calculado en (1), encuentre las ecuaciones para sincronizar correctamente la máquina DFIG a la red.
- Para un generador de doble excitación controlado vectorialmente con orientación flujo de estator, demuestre que:

$$i_{rq} = -\frac{L_s}{L_0} \frac{|\underline{\psi}_s \otimes \underline{i}_s|}{|\underline{\psi}_s|} \quad \text{y} \quad i_{rd} = \left[ \left( \sqrt{i_{r\alpha}^2 + i_{r\beta}^2} \right)^2 - i_{rq}^2 \right]^{1/2}$$

Donde el símbolo  $\otimes$  representa el producto cruz entre dos vectores.

7) Se tiene un conversor front-end alimentando una red trifásica desbalanceada y con alto THD. La fundamental es de 50Hz y se encuentra que el vector de voltaje es:

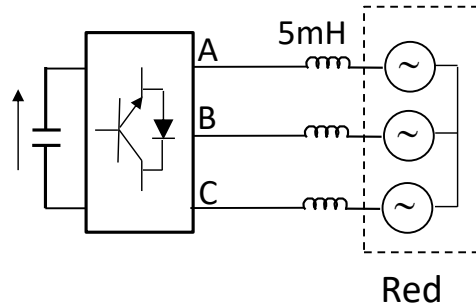
$$\underline{v}_g = 311e^{j\omega_e t} + 30e^{-j(\omega_e t + 0.1\pi)} - 15e^{-j5\omega_e t} + 7e^{j(7\omega_e t + 0.2\pi)}$$



El voltaje del enlace dc es 600v y está bien regulado por un puente de diodos de seis pulsos (no mostrado en la figura). El conversor entrega una corriente balanceada de  $10e^{j(\omega_e t + 0.05\pi)}$  a la red. Se pide:

- Encuentre la corriente de ripple en el condensador. Identifique además los componentes de frecuencia existentes.
  - Encuentre la corriente reactiva que no se refleja en el lado de continua.
  - Dibuje un esquema de filtro activo para que el conversor opere con solo corriente continua en el lado dc. ¿Cuáles son las corrientes que debería suministrar este filtro activo?
- 8) Se debe diseñar un PLL para conectar el conversor front-end mostrado en la pregunta 3 a la red desbalanceada y distorsionada.
- Diseñe el PLL para una frecuencia natural de 80Hz (lazo cerrado)  $\zeta=0.8$ , utilizando el modelo de pequeña señal discutido en los apuntes y diapositivas.
  - Utilice simulación para obtener el desempeño del PLL al operar con la tensión desbalanceada y distorsionada de 3).
  - ¿Cuáles son las frecuencias que se observan en el error obtenido al aplicar el producto cruz en las señales de entrada?
  - ¿Cómo son las formas de onda en las salidas de frecuencia y posición del PLL?. ¿Son señales aceptables?
  - Reduzca la frecuencia natural del PLL a 15Hz y obtenga nuevamente c) y d).
- 9) Se logra mejorar la red del sistema mostrado en la pregunta 3. Se ha eliminado la distorsión de voltaje y ahora la tensión de la red (fase neutro) es de:

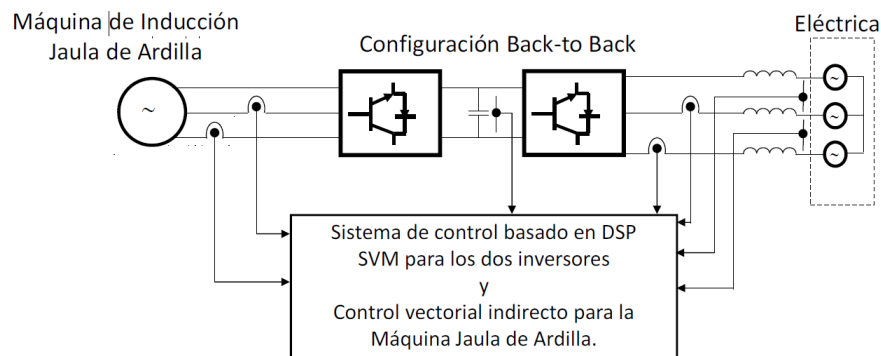
$$\underline{v}_g = 311e^{j\omega_e t} + 30e^{-j(\omega_e t + 0.1\pi)}$$



El voltaje del enlace dc es 600V y también está bien regulado por un puente de diodos de seis pulsos (no mostrado en la figura). La corriente que se suministra a la salida es desbalanceada y tiene la forma  $10e^{j(\omega_e t + 0.05\pi)} + I_{m2}e^{-j(\omega_e t + \theta)}$ .

- ¿Es posible regular una corriente de secuencia negativa, en magnitud y ángulo, de forma de entregar a la red una potencia activa sin oscilaciones de doble frecuencia? (nótese que no se permiten oscilaciones de doble frecuencia en la potencia reactiva).
- Encuentre la potencia reactiva para esa condición.
- ¿Se podría señalar que de esa forma se reduce considerablemente la corriente de ripple en el condensador dc?

10) Dado el siguiente esquema de generador/motor:



Los parámetros del sistema son:

|                     |                     |                              |                  |
|---------------------|---------------------|------------------------------|------------------|
| $R_s = 0.567\Omega$ | $R_r = 0.733\Omega$ | $L_r = 0.13953H$             | $L_s = 0.13953H$ |
| $L_0 = 0.1353H$     | $J = 0.1Kgm^2$      | $B = 0.01N\cdot m/rads^{-1}$ | $C = 2000\mu F$  |

La tensión nominal del enlace DC es de 620V y los condensadores de este enlace tienen una capacidad de 2000 $\mu F$ . El convertidor del lado de la red está conectado utilizando una inductancia de  $L = 8mH$  y resistencia despreciable. La tensión de la red es 380V (rms) y la corriente magnetizante de la máquina es 5A efectivos.

- Diseñe el sistema de control del enlace de corriente continua para regular la tensión de 620V con una frecuencia natural de lazo cerrado de 15Hz y  $\zeta = 0.707$ .

- b) La tensión de la red es  $v_g = 311e^{j\omega_e t}$  (311 es el valor peak fase neutro. El valor efectivos es 220V) con el  $\omega_e$  correspondiente a  $f_e=50\text{Hz}$ . El conversor front-end entrega una potencia 3 $\phi$  de  $S=3\text{kW}+j3\text{kVar}$  a la red. Si la máquina está operando a 850rpm estime el valor de la corriente de torque en el lado de la máquina.
- c) La red es débil y en algunas horas del día existe un desbalance y la tensión de la red cambia a  $v_g = 311e^{j\omega_e t} + 25e^{-j\omega_e t}$ . Si se opera el sistema de forma de obtener corrientes balanceadas en la máquina y en el conversor front-end. ¿Cuál sería la onda de potencia en el dc-link si el sistema entrega a la red una potencia media de  $S=3\text{kW}+j3\text{kVar}$ ?
- d) Para mantener las señales del dc-link en corriente continua se decide controlar la corriente de torque de la máquina de inducción manteniendo la corriente magnetizante balanceada y sinusoidal. Si la máquina se encuentra operando a 1000rpm, ¿cuál debería ser la corriente de torque  $i_{qs}$  para que en las condiciones de b) no existan señales de 100Hz en el dc-link?, ¿Qué pulsaciones de torque se producen en esa condición?