

EL6000 – Generación de Energía Eléctrica con Fuentes Renovables

Pauta Control 1

Pregunta 1

Pauta por: Jannik Haas

Responda las siguientes preguntas:

1. **(0.75 puntos)** Indique qué entiende por deslizamiento en una máquina de inducción.

Deslizamiento una medida de la velocidad relativa entre el campo magnético producido por las corrientes inyectadas en el estator y la velocidad mecánica del rotor por unidad de la velocidad del campo:

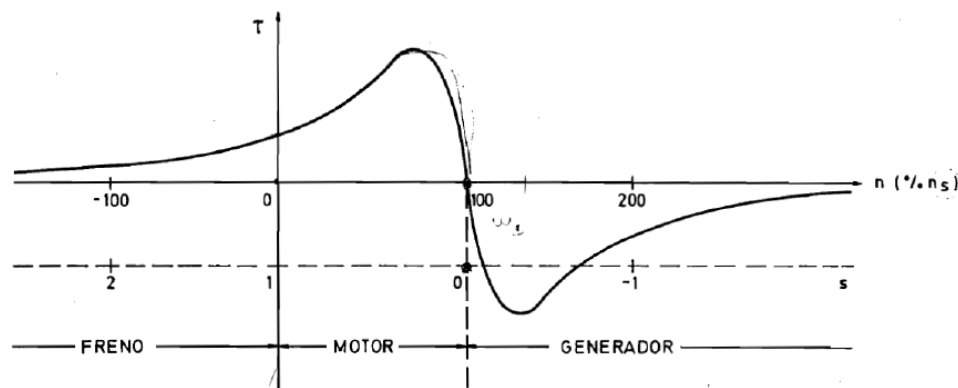
$$s = \frac{\omega - \omega_r}{\omega}$$

Donde:

ω = velocidad del campo magnético rotatorio producido por el estator $\left(\frac{120f}{p}\right)$

ω_r = velocidad del rotor

Este efecto sólo sucede en máquinas de inducción y el torque de la máquina sincrónica puede escribirse en función del deslizamiento, obteniéndose la siguiente figura:



2. **(0.75 puntos)** Indique si es posible que el generador sincrónico sea de velocidad variable conectado a una red eléctrica, ¿por qué?

Por su construcción, el generador sincrónico y la red, sincronizan sus frecuencias. Así al conectarlo directamente a la red, sus frecuencias –en caso de no coincidir– se ajustan. Como la red eléctrica tiene una inercia infinita (muy grande en comparación con sólo 1 un generador sincrónico), es ésta que dictará la frecuencia ($50[Hz] \Rightarrow 1500[rpm]$ para máquina de 4 polos, por ejemplo). Por lo tanto la máquina no puede girar a velocidad variable. Lo que determina la potencia entregada finalmente, es el torque que se ejerce en su eje y no la velocidad a la que gira.

Mediante electrónica de potencia es posible conectar – de forma indirecta – una máquina sincrónica con velocidad variable a la red, como sucede a veces con los generadores eólicos.

3. **(0.75 puntos)** Explique por qué el voltaje inducido en una máquina C.C. es proporcional a la corriente de campo.

En la ley de Ampere se observa que el campo magnético es proporcional a la corriente que alimenta el campo:

$$\oint B \, dA = \mu_0 I_c$$

Además la ley de Faraday-Lenz indica que el voltaje inducido depende de la variación del flujo magnético en el tiempo:

$$\varepsilon = - \frac{d\phi}{dt}$$

Recordando que $\phi = \iint B \, dA$ se observa finalmente que el voltaje inducido es proporcional a la corriente del campo, lo cual se ilustra en la siguiente ecuación:

$$E = G\omega I_c$$

4. **(0.75 puntos)** Discuta la veracidad de: “La tecnología eólica actual tiene una potencia máxima en el rango de 1500 – 5000[kW]”.

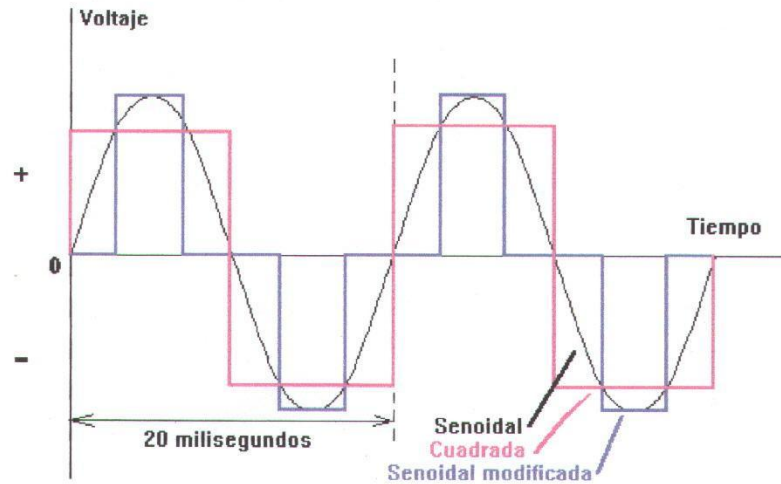
Actualmente la tecnología eólica efectivamente se ubica entre los 1,5 a 5 [MW] de potencia máxima. Esta restricción resulta por el potencial limitado del recurso eólico, la restricción de eficiencia teórica (59%) de aprovechamiento del flujo y la dificultad de construir torres y aspas -a bajo peso- más grandes y resistentes a esfuerzos de torque (para permitir mayores fuerzas de sustentación y arrastre). Hay que recordar que se trata de la potencia máxima. Finalmente la potencia entregada depende del campo de viento. Por ejemplo el parque Eólico Canela tiene generadores de 1,65[MW].

5. **(0.75 puntos)** Explique la función de un rectificador, de un inversor y de un transformador.

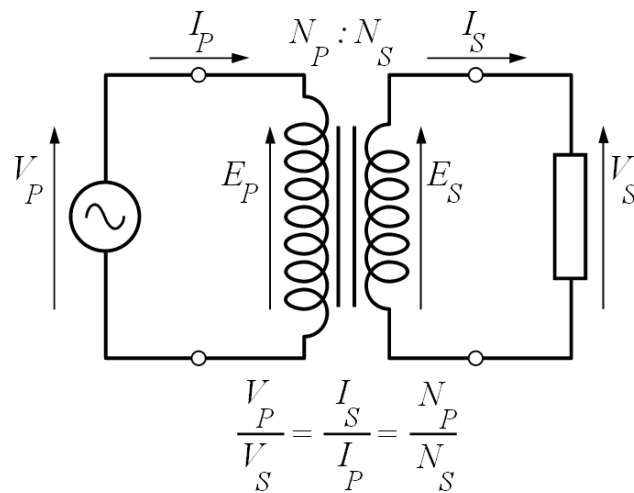
El rectificador transforma de corriente alterna a continua. En el caso de una fuente monofásica se aprecia una onda en forma de “m” (tipo McDonalds). Al agregar un condensador se llega a un acercamiento de recta, pero se puede seguir distinguiendo rizaduras. En el caso de una fuente trifásica, incluso sin condensadores, ya se llega a un buen acercamiento de recta. Al adicionar un filtro se puede corregir las rizaduras.

Un inversor transforma corriente continua a alterna. Uno simple consta de un oscilador que controla a un transistor, el cual se utiliza para interrumpir la corriente entrante y generar una onda cuadrada. Esta onda cuadrada alimenta a un transformador que suaviza su forma, haciéndola parecer un poco más una

onda senoidal y produciendo el voltaje de salida necesario. Las formas de onda de salida del voltaje de un inversor ideal debiera ser sinusoidal.



Un transformador solo modifica la amplitud de la onda de voltaje y corriente de entrada. Para mantener la potencia transmitida, el voltaje y la corriente dependen de la siguiente forma en función del número de vueltas de cada enrollado¹:



¹ P: primario, S: secundario.

6. **(0.75 puntos)** ¿Qué es el campo magnético?

El campo magnético es un campo de fuerzas en una región del espacio en la cual una carga eléctrica que se desplaza a cierta velocidad, sufre los efectos de fuerzas perpendiculares y proporcionales tanto a la velocidad con que se desplaza la carga, como al campo.

7. **(0.75 puntos)** ¿Qué tipo de máquina recomendaría para una bomba de extracción de agua de pozo?

Debido a la variabilidad de la cantidad de agua y a la altura a la que esta se encuentra en un pozo, es que una máquina debe ser capaz de variar su velocidad para sacar agua siempre de la forma más óptima posible. Ahora en la práctica es poco común que se haga “de la forma más óptima” y simplemente se saca toda el agua que se pueda, por ello se utiliza una máquina de inducción que sólo necesita ser alimentada con corriente alterna en el estator y no es necesario realizar ninguna transformación.

Por otro lado, aprovechando el uso típico de máquinas de inducción en esta aplicación, es que se siguen utilizando al querer ser más óptimos, agregando electrónica de potencia para su control.

Recordar que de usar una máquina de continua hubiese sido necesario rectificar la red alterna y de utilizar una máquina sincrónica es necesario alimentar la excitación con corriente continua.

8. **(0.75 puntos)** Explique dos fenómenos que demuestren la interacción entre la electricidad y el magnetismo.

Ámbar. Aguja. Globo. Motor. Inducción eléctrica...
Explicar brevemente las interacciones respectivas.

Pregunta 2

Pauta por: Ignacio Polanco

1. Una máquina de corriente continua conexión shunt se utiliza en laboratorio para mover una máquina sincrónica y así generar electricidad a la red. Los parámetros de la máquina de corriente continua son $R_a = 3,9[\Omega]$, $R_f = 452,6[\Omega]$, $G = 1,66[H]$ y es alimentada con $V = 220[V]$. Suponiendo que la máquina sincrónica es perfectamente eficiente y que posee 2 pares de polos, responda:

a. **(1.5 puntos)** ¿Cuál es el procedimiento utilizado para entregar energía a la red eléctrica?

- **(0.5 puntos)** Armar circuito de alimentación y partida máquina continua. Armar conexiones de excitación máquina síncrona. Conexiones salida máquina sincrónica-sincronoscopio-red infinita.
- Hacer partir la máquina C.C.
- **(0.5 puntos)** Mover la excitación de la máquina C.C. y de la máquina A.C. hasta tener frecuencia y tensión a la salida de la máquina A.C iguales a la red infinita.(Excitación máquina C.C. para la frecuencia y excitación máquina A.C para la tensión)
- **(0.5 puntos)** Esperar el momento oportuno para sincronizar (Todas las ampolletas del sincronoscopio deben estar apagadas al mismo tiempo).

b. **(1.5 puntos)** ¿Cuál debe ser la velocidad, en rpm, que debiera tener la máquina de corriente continua para entregar 1[kW] a la red antes de conectar la máquina sincrónica?

Utilizando los modelos equivalentes de la máquina C.C con conexión Shunt se tiene que:

$$\frac{V}{R_f} = \frac{220}{R_f} = I_f$$

$$V = 220 = I_a R_a + E \Rightarrow I_a = \frac{220 - E}{R_a}$$

Imponiendo que la potencia mecánica en el eje es de 1[kW] se tiene que:

$$1000 = E I_a = E \left(\frac{220 - E}{R_a} \right)$$

Ahora bien, la tensión inducida E es:

$$E = G \omega I_f = \frac{G \cdot \omega \cdot 220}{R_f}$$

Por lo que se tiene la siguiente ecuación de segundo grado:

$$1000 = \frac{G \cdot \omega \cdot 220}{R_f} \left(\frac{220 - \frac{G \omega 220}{R_f}}{R_a} \right)$$

Reemplazando los valores de los parámetros, se despeja la velocidad del eje

$$w_1 = 24.1 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \rightarrow n_1 = 230.14 [\text{rpm}]$$

$$w_2 = 248.55 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \rightarrow n_2 = 2347.48 [\text{rpm}]$$

(0.5 pto) por plantear correctamente las ecuaciones y llegar al resultado en rpm

Para seleccionar una de las velocidades se debe pensar en que para que la máquina sincrónica pueda actuar como generador debe tener una velocidad mayor a $1500 [\text{RPM}]$, es decir, la velocidad que debe tener la máquina C.C para inyectar $1 [\text{kW}]$ a la red es n_2 .

Es importante notar que la transferencia de potencia mecánica desde el eje a la red, de manera intacta, se debe exclusivamente a que la eficiencia, en este caso, de la máquina sincrónica es 100%.

(1 pto) por discernir correctamente la velocidad.

- c. **(0.5 puntos)** ¿Cuál es la verdadera velocidad, en rpm, que tendrá el grupo motor – generador al ser conectado a la red?

Dado que la máquina sincrónica opera solo a la velocidad de la red y sabiendo que es de 4 polos o dos pares de polos se pueden usar las siguientes expresiones:

$$n[\text{rpm}] = \frac{120f}{p} = 120 \frac{50}{4} = 1500 [\text{rpm}]$$

(0.5 pto) por resultado correcto

- d. **(0.5 puntos)** ¿Qué función cumple la “excitación” de la máquina sincrónica?

La excitación de la máquina sincrónica, cuando está desconectada de la red tiene la función de regular el nivel de tensión en bornes.

(0.5 pto) por resultado correcto (explicación simple).

2. Elija un tipo de Energía Renovable No Convencional (ERNC) que ud. conozca y explique la manera de obtener energía eléctrica a partir de ella:

Esta pregunta es de libre planteamiento, sin embargo la restricción es tener que explicar una ERNC (que no sea solar, dado que no hay una máquina eléctrica asociada). Además, el diagrama de elementos debe ser coherente.