

TECNOLOGÍA ELÉCTRICA. UNIDAD DIDÁCTICA 3

CONCEPTOS BÁSICOS A RETENER Y PROBLEMAS RESUELTOS

1.- CARACTERÍSTICAS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA

- Las máquinas síncronas son máquinas eléctricas cuya velocidad de rotación n está vinculada con la frecuencia de la red con la que trabaja f mediante la siguiente expresión:

$$n = 60f/p$$

donde p es el número de pares de polos de la máquina

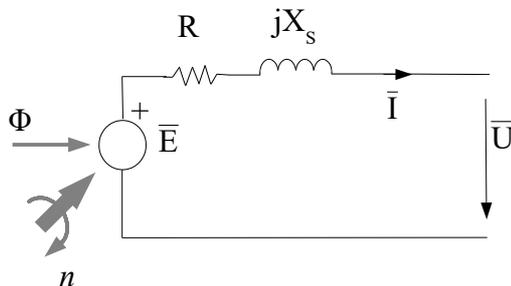
- Estas máquinas puede funcionar en régimen motor o en régimen generador, es decir, transformando energía eléctrica en mecánica o mecánica en eléctrica. Si se emplean como generadores para producir corriente alterna se denominan alternadores.

Aplicaciones como motor	Aplicaciones como generador
En accionamientos industriales que requieren velocidades de transmisión constantes	En los grupos electrógenos junto a motores de combustión interna Acopladas a las turbinas hidráulicas o térmicas para generar energía eléctrica

- Las máquinas síncronas están formadas por:
 - Un **devanado inductor** en forma de arrollamiento o distribuido entre ranuras y alimentado por **corriente continua** que da lugar a los polos (colocado normalmente en el **rotor**, sobre todo en las máquinas más grandes)
 - Un **devanado inducido** distribuido formando un arrollamiento trifásico recorrido por **corriente alterna** (colocado en el **estátor** sobre todo en las máquinas más grandes)
- Según la forma constructiva del rotor se pueden clasificar en **polos salientes** o **rotor liso**. Si se desea obtener velocidades altas para una determinada frecuencia es mejor tener menos polos por lo que es más adecuado el rotor liso.

2.- FUNCIONAMIENTO EN CARGA. CIRCUITO EQUIVALENTE.

- La máquina se comporta como una fuente real de tensión, con una tensión de vacío o interna \bar{E} y una impedancia interna \bar{Z}_s , compuesta por la resistencia de los devanados R y la reactancia síncrona o de dispersion X_s



Circuito equivalente máquina síncrona

donde aplicando la segunda Ley de Kirchhoff

$$\bar{U} = \bar{E} - (R + jX_s)\bar{I}$$

$$U \angle 0^\circ = E \angle \delta - (R + jX_s)I \angle -\varphi$$

Es importante resaltar que el ángulo formado entre la tensión de vacío (\bar{E}) y la tensión de salida en bornes del alternador (\bar{U}) se denota como δ y se denomina **ángulo de potencia**, y las potencias generadas por el alternador se pueden expresar en función de este parámetro:

$$P = 3[(U \cdot E)/X_s] \sin \delta$$

$$Q = 3U[(E \cos \delta - U)/X_s]$$

donde E y U son los valores de fase de las tensiones en módulo.

Otra magnitud característica de la máquina es la **regulación de tensión ε** que se define:

$$\varepsilon = (E - U)/U \%$$

3.- PROBLEMAS RESUELTOS.

P1.- Un alternador trifásico conectado en estrella de 1000 kVA, 4600 V tiene una impedancia sincrónica de $2 + j20 \Omega/\text{fase}$. Determinar la regulación a plena carga para un factor de potencia unidad.

Con los datos de potencia y tensión podemos calcular la corriente a plena carga del alternador:

$$I = S/(\sqrt{3} \cdot U) = 1000000/(\sqrt{3} \cdot 4600) = 125,5 \text{ A}$$

Resolviendo el circuito equivalente podemos calcular la tensión interna del alternador \bar{E} , para distintos valores de factor de potencia o lo que es lo mismo, para distintos valores de δ . La tensión interna del alternador es la fuerza electromotriz necesaria por fase.

$$E \angle \delta = U \angle 0^\circ + (R + jX_s)I \angle -\varphi \text{ que en valores numéricos}$$

$$\begin{aligned} a) \quad \bar{E} &= (4600/\sqrt{3}) \angle 0^\circ + (2 + j20) \cdot 125,5 \angle 0^\circ \text{ ya que } \cos(0) = 1 \\ \bar{E} &= 2655,8 \angle 0^\circ + 20,09 \angle 84,28^\circ \cdot 125,5 \angle 0^\circ = 2655,8 \angle 0^\circ + 2521,3 \angle 84,28^\circ = 2907,1 + j2508,7 = \\ &= 3839,89 \angle 40,79^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

que corresponde a una tensión de línea de $E_{línea} = \sqrt{3} * E = 6650,88 \text{ V}$ y la regulación será:

$\varepsilon = (E - U)/U = (6650,88 - 4600)/4600 = 44,58 \%$ donde hemos empleado las tensiones nominales o de línea

b) De igual modo

$$\bar{E} = (4600/\sqrt{3}) \angle 0^\circ + (2 + j20) * 125,5 \angle -41,4^\circ \text{ ya que } \arccos(0,75) = 41,4^\circ$$

operando

$$\bar{E} = 4820,24 \angle 20,86^\circ \text{ V que corresponde a una tensión de línea de } E_{línea} = 8348,9 \text{ V}$$

$$\varepsilon = (E - U)/U = (8348,9 - 4600)/4600 = 81,49 \%$$

P2.- Un alternador trifásico tiene una impedancia síncrona de $0 + j5 \Omega$ y está conectado a una red de potencia infinita de 6600 V. La excitación es tal que la f.e.m inducida en vacío es de 6000 V. Determinar la potencia activa máxima que en estas condiciones podrá suministrar la máquina sin que exista pérdida de estabilidad. Calcular también la corriente de inducido y el factor de potencia para dicha carga.

El valor de fase de la tensión y de la f.e.m generada es:

$$E = 6000/\sqrt{3} = 3464,1 \text{ V}$$

$$U = 6600/\sqrt{3} = 3810,5 \text{ V}$$

La expresión de la potencia activa en función del ángulo de potencia:

$$P = 3[(U * E)/X_s] \text{sen} \delta \text{ que será máxima si } \text{sen} \delta = 1, \text{ es decir, } \delta = 90^\circ$$

$$P_{\max} = 3 * [(U * E)/X_s] = 3 * [(3810,5 * 3464,1)/5] = 7920 \text{ kW}$$

Para calcular la corriente de inducido resolvemos el circuito equivalente:

$$E \angle \delta = U \angle 0^\circ + (R + jX_s) I \angle -\varphi$$

$$3464,1 \angle 90^\circ = 3810,5 \angle 0^\circ + 5j(I \cos(-\varphi) + j I \text{sen}(-\varphi)) = 3810,5 \angle 0^\circ - 5I \text{sen}(-\varphi) + j5I \cos(-\varphi)$$

IMPORTANTE tenemos que calcular I y φ y lo podemos hacer igualando en la ecuación anterior las partes reales por un lado y las imaginarias por otro. Es decir, la ecuación queda:

$$j3464,1 = 3810,5 - 5I \text{sen}(-\varphi) + j5I \cos(-\varphi)$$

$$\left. \begin{array}{l} 3810,5 - 5I \text{sen}(-\varphi) = 0 \\ j3464,1 = j5I \cos(-\varphi) \end{array} \right\} \begin{array}{l} I \text{sen}(-\varphi) = 762,1 \\ I \cos(-\varphi) = 692,8 \text{ (*)} \end{array}$$

$$\text{dividiendo ambas expresiones } \tan(-\varphi) = 762,1/692,8 = 1,1 \quad -\varphi = \arctan(1,1) = 47,7^\circ$$

y el factor de potencia $\cos(\varphi) = \cos(-47,7) = 0,673$

Despejando en (*) podemos hallar la intensidad:

$$I = 1029,4 \text{ A}$$

Comprobamos otro modo de calcular la potencia activa:

$$P = \sqrt{3}UI\cos(\varphi) = \sqrt{3}*6600*1029,4*0,673 = 7919,6 \text{ W}$$

P3.- Un alternador trifásico conectado en estrella tiene una resistencia de inducido despreciable y una reactancia síncrona de $30 \Omega/\text{fase}$. Está acoplado a una red de potencia infinita de 11 kV y desarrolla 4000 kVA con factor de potencia unidad. Si se aumenta la f.e.m. en un 20% , permaneciendo constante la entrada de potencia a la máquina motriz, determinar el nuevo factor de potencia con el que trabajará la máquina y la potencia aparente que suministra.

Calculamos la corriente que suministra a la red

$$I = S/(\sqrt{3}*U) = 4000000/(\sqrt{3}*11000) = 209,9 \text{ A}$$

Aplicando la ecuación del circuito equivalente calculamos la f.e.m inicial para un $\cos(\varphi) = 1$, $\varphi = 0^\circ$

$$\bar{E} = (11000/\sqrt{3})\angle 0^\circ + j30) * 209,9\angle 0^\circ = 6350,8\angle 0^\circ + 6297\angle 90^\circ = 8943,4\angle 44,7^\circ \text{ V}$$

El modulo de la nueva f.e.m inducida será:

$$\bar{E}' = 1,2*8943,4 = 10732,08 \text{ V}$$

Como la entrada de potencia a la máquina permanece constante, inicialmente

$$P = \sqrt{3}UI \cos(\varphi) = \sqrt{3}*11000*209,9\cos*1 \approx 4000 \text{ kW}$$

como también podemos expresar $P = [(U*E)/X_s]\text{sen}\delta$ tenemos

$$4000000 = 3*[(6350,8* 10732,08)/30]\text{sen}\delta \text{ de donde } \text{sen}\delta = 0,586 \text{ y } \delta = 35,9^\circ$$

escribiendo la ecuación de la f.e.m para este caso:

$$E \angle \delta = U \angle 0^\circ + (R+jX_s)I \angle -\varphi$$

$$10732,08\angle 35,9 = 6350,8\angle 0^\circ + j30I\angle -\varphi$$

$$8693,43 + j6292,9 = 6350,8 - 30I \text{sen}(-\varphi) + j30I \cos(-\varphi)$$

igualando partes reales e imaginarias

$$\left. \begin{array}{l} -2342,63 = 30I\text{sen}(-\varphi) \\ 6292,9 = 30I \cos(-\varphi) \\ = 223,7 \text{ A} \end{array} \right\} \begin{array}{l} I\text{sen}(-\varphi) = -78,08 \\ I \cos(-\varphi) = 209,76 \end{array} \quad \tan(-\varphi) = -0,372 \quad -\varphi = -20,4 \quad \cos(\varphi) = 0,937$$

$$\text{y la nueva potencia aparente } S = \sqrt{3}UI = \sqrt{3}*11000*223,7 = 4262 \text{ kVA}$$

4.- ASPECTOS PRÁCTICOS. PLACA DE CARACTERÍSTICAS DE UN GENERADOR SÍNCRONO

En la placa de características de un generador síncrono o alternador debemos encontrar los siguientes valores:

- Frecuencia
 - Velocidad de giro
 - Factor de potencia
 - Tensión en bornes
 - Potencia aparente (kVA)
 - Corriente de excitación
 - Modo de conexión del inducido
- } permite calcular el nº de polos
 } permite calcular la corriente a plena carga



Comprobad los valores de intensidad de la placa a partir de los valores de tensión y potencia!!