

# MÁQUINAS SINCRÓNICAS, MAQUINAS SÍNCRONAS

Preguntas, Problemas, Ejemplos y Ejercicios

# Parte I

# Preguntas.

**Ejemplo 1.** Qué es el Alternador.

El alternador es una máquina eléctrica que transforma la energía mecánica en energía eléctrica bajo la forma de corriente alterna.

**Ejemplo 2.** Como se produce la fuerza electromotriz alterna senoidal.

Se basa en el fenómeno de inducción electromagnético y puede realizarse de dos formas:

1) Mediante el giro de unos conductores, devanado inducido; en un campo magnético fijo, campo inductor. Ver figura.

2) Mediante el giro de unos electroimanes, inductores; cuyo flujo magnético incide sobre unos conductores fijos, devanado inducido. Ver figura. Es el sistema utilizado por los alternadores de gran potencia.

**Ejemplo 3.** La constitución del alternador de inducido fijo.

Consta básicamente de dos partes. Ver figura.

1) Sistema inductor móvil o rotor: formado por los núcleos polares y las bobinas que en conjunto forman la rueda polar, con los anillos y escobillas por donde se conecta la línea de alimentación en corriente continua al devanado inductor.

2) Sistema inducido fijo o estator: formado por una corona de chapa magnética con ranuras en las que van alojadas los conductores que forman los tres devanados, en el alternador trifásico, cuyos principios y finales están conectados a la placa de bornes.

En el mismo eje del alternador suele ir un generador de corriente continua, dínamo excitatriz, de pequeña potencia y que produce la corriente de alimentación del devanado inductor.

**Ejemplo 4.** Cómo es la producción de un sistema trifásico de fuerzas electromotrices. Devanado inducido.

En el alternador de inducido fijo, se producen tres fuerzas electromotrices desfasadas entre sí un tercio de período en tres conductores separados entre sí  $120^\circ$  eléctricos y/o  $\frac{1}{3}$  de la distancia entre polos del mismo nombre, teniendo en total elinducido de un alternador de  $p$  pares de polos  $360.p$  grados eléctricos, porque en una vuelta de la rueda polar pasan bajo un conductor  $p$  polos del mismo nombre. Ver figura

En la práctica cada fase del devanado inducido del alternador está formado por varios conductores formando bobinas, conectadas de forma

que se sumen las fuerzas electromotrices engendradas en los conductores. El bobinado de cada fase es abierto, con un principio y un final.

Las fases son idénticas en su valor de impedancia y desfasadas entre sí el ángulo característico del sistema,  $120^\circ$  eléctricos en el devanado trifásico. Las bobinas del devanado están reunidas formando grupos, que pueden ser según su forma:

a) Concéntricos: Los lados activos de una misma fase, situados bajo polos consecutivos, unidos por cabezas iguales.

b) Excéntricos: Los lados activos de una misma fase, situados bajo polos consecutivos, unidos por cabezas iguales.

Según la manera de conexión de los grupos de bobinas de una misma fase, el devanado puede ser conectado:

a) Por polos: Final de un grupo conectado con el final del siguiente, dejando sin conectar el principio del primer grupo y el principio del último, que serán el principio y el final respectivamente de la fase.

b) Por polos consecutivos: Final de un grupo conectado con el principio del siguiente, dejando sin conectar el principio del primer grupo y el final del último, que serán el principio y el final respectivamente de la fase.

**Problema 5.** Un alternador trifásico tiene un inductor y/o una rueda polar de 12 polos y el estator tiene 72 ranuras en las cuales está colocado el devanado inducido. Cálculo: a) Número de ciclos de la fem inducida en los conductores del devanado inducido en cada vuelta de la rueda polar. b) Distancia en ranuras entre principios de fase para tener un desfase de  $\frac{1}{3}$  de período o  $120^\circ$  eléctricos entre las fases del devanado inducido. c) Número de ranuras por polo. d) Número de ranuras por polo y por fase.

Solución.

a) El número de ciclos en una vuelta completa de la rueda polar es igual al número de pares de polos  $p = 6$ .

b) Los grados eléctricos que corresponden a una rotación son:

$$p * 360 = 6 * 360 = 2160^\circ$$

Como en la rotación completa, un polo pasa sobre todas las ranuras, se puede establecer la proporción

$$\frac{2160}{72} = \frac{120}{N_{120}}$$

La distancia en ranuras entre principios de fase

$$N_{120} = \frac{72 * 120}{2160} = 4 \text{ ranuras}$$

c) El número de ranuras bajo cada polo inductor

$$\frac{72}{12} = 6 \text{ ranuras/polo}$$

d) El número de ranuras que bajo cada polo corresponden a cada fase.

$$\frac{6}{3} = 2 \text{ ranuras/polo/fase}$$

**Ejemplo 6.** Velocidad Síncrona, velocidad del alternador.

Para que las fuerzas electromotrices inducidas en los conductores sean de frecuencia fija de  $50Hz$ , es necesario que el alternador mantenga una velocidad fija, velocidad síncrona; según el número de polos.

La velocidad síncrona es directamente proporcional al valor de la frecuencia que se desea obtener e inversamente proporcional al número de pares de polos  $p$  de la máquina, porque al pasar en cada vuelta de la rueda polar  $p$  polos del mismo nombre bajo un mismo conductor se realizan en éste  $p$  ciclos eléctricos.

$$n_1 = \frac{60 * f}{p}$$

$n_1$  = Velocidad síncrona en rpm.

$f$  = Frecuencia en Hz.

$p$  = Pares de polos del inductor.

**Problema 7.** En una central hidroeléctrica las turbinas giran a  $300rpm$ . Calcular el número de polos del alternador acoplado a la turbina, la frecuencia es de  $50Hz$ .

La velocidad síncrona del alternador

$$n_1 = \frac{60 * f}{p}$$

De donde

$$p = \frac{60 * f}{n_1}$$

Obtenemos los pares de polos

$$p = \frac{60 * 50}{300} = 10 \text{ pares}$$

Y los polos serían

$$2p = 2 * 10 = 20 \text{ polos}$$

**Ejemplo 8.** Valor de la fuerza electromotriz generada por fase.

En una bobina, dentro de un campo magnético de variación senoidal se engendra una fem senoidal.

La fem electromotriz engendada por fase en un devanado.

La fem engendada por fase en un devanado es:

En una bobina, dentro de un campo magnético de variación senoidal, se engendra una fem alterna senoidal. Su variación de flujo en un cuarto de período es de cero a flujo máximo.

La fem media en una espira es:

$$E_m = \frac{\Phi_{max}}{\frac{T}{4}} = 4 \frac{\Phi_{max}}{T} = 4 * f * \Phi_{max}$$

Siendo la fem eficaz para una variación senoidal

$$E_f = 1,11 * E_m$$

Entonces la fem eficaz por fase, teniendo en cuenta el bobinado nos queda

$$E_f = 4,44 * K_a * K_d * f * N_f * \Phi_{max}$$

Siendo:

$\Phi_{max}$  = Flujo magnético máximo que abarca una bobina, flujo útil por polo.

$N_f$  = Número de espiras por fase.

$f$  = Frecuencia de la fem.

$K_d$  = Coeficiente de distribución del bobinado, que suele ser de un valor de 0,96 para los devanados trifásicos.

$K_a$  = Coeficiente de acortamiento, que es menor a la unidad.

**Ejemplo 9.** Qué es el bobinado inductor. Excitación del alternador

Es el bobinado que rodea las piezas polares y es recorrido por corriente continua. Los alternadores de potencia son de inductor giratorio.

Los inductores son de dos formas:

a) Inductores de polos salientes: Para máquinas de bajas velocidades, menores a  $500rpm$ , por lo cual son de gran número de polos. Por ejemplo en máquinas y/o Turbinas Hidráulicas.

b) Inductores de polos lisos: Para máquinas de alta velocidad, mayores a  $1500rpm$ , por lo cual son de uno o dos pares de polos. Por ejemplo Turboalternadores, movidos por una turbina de vapor o combustible líquido o gas.

Para mejorar el sincronismo del alternador en el funcionamiento en paralelo, en la rueda polar se instala un devanado amortiguador, constituido por barras de cobre que atraviesan las expansiones polares en sentido axial y puestas en corto circuito mediante dos anillos.

La producción de corriente continua para alimentar el devanado inductor que genera el campo magnético, excitación del alternador se realiza de la siguiente formas:

a) Mediante Dínamo excitatriz acoplada al eje del alternador.

b) Mediante excitatriz piloto, que a su vez alimenta a la dínamo excitatriz. Ambas acoplada al eje del alternador, este sistema mejora la regulación de tensión con tiempos de actuación muy cortos.

c) Mediante alternador auxiliar acoplado al eje del alternador. El alternador auxiliar es de inducido móvil y su tensión se rectifica mediante bloque rectificador unido al eje, por lo que el sistema no tiene escobillas.

d) Mediante autoexcitación. El alternador, con elevado magnetismo remanente en las piezas polares, es excitado a partir de su salida en corriente alterna por medio de un sistema rectificador.

### **Ejemplo 10.** Cómo es la regulación de tensión del alternador.

La fem engendrada en los conductores del inducido es directamente proporcional al valor del flujo magnético del inductor. Se regula la tensión del alternador variando dicho flujo mediante la regulación de la intensidad de alimentación del devanado inductor, intensidad de excitación  $I_{exc}$ .

La curva de vacío del alternador, es la curva de la fem por fase en función de la intensidad de excitación para velocidad de giro constante.

$$E_f = f(I_{exc})$$

Los alternadores llevan reguladores automáticos de tensión.

**Ejemplo 11.** Definir Impedancia Síncrona.

Cada fase del alternador se considera formado por una Resistencia  $R_f$  y una Reactancia  $X_f$  llamada Reactancia Síncrona, que incluye la reactancia propia de las bobinas y la reactancia debida a la reacción del inducido al funcionar el alternador en carga.

La impedancia por fase

$$Z_f = \sqrt{R_f^2 + X_f^2}$$

es la impedancia síncrona y se calcula por medio de dos ensayos:

a) Ensayo en Vacío: Mediante el cual se obtiene la curva de vacío  $E_f = f(I_{exc})$ , para una velocidad de rotación constante.

b) Ensayo en cortocircuito: Mediante el cual se obtiene la gráfica de  $I_{cc} = f(I_{exc})$ , obtenida de cortocircuitar la salida del alternador para la misma velocidad de la máquina que en el ensayo de vacío.

La impedancia síncrona para una velocidad e intensidad de excitación determinada

$$Z_f = \frac{E_f}{I_{cc}}$$

**Ejemplo 12.** Describir Diagrama Vectorial y circuito equivalente.

El circuito equivalente por fase, consiste en una fuente de tensión alterna senoidal  $E_f$  en serie con la resistencia de fase  $R_f$  y con la reactancia de fase  $X_f$ . En los alternadores de gran potencia la resistencia de fase es mucho menor que la reactancia de fase, por lo que se suele simplificar el circuito equivalente suprimiendo la resistencia. El diagrama vectorial por fase, es la representación gráfica de la ecuación del circuito equivalente, para el circuito equivalente simplificado la ecuación es

$$E_f = U_f + X_f I_f$$

En el diagrama vectorial la potencia activa  $P$  que suministra el alternador puede representarse por el segmento AB.

En el diagrama vectorial la potencia reactiva  $Q$  que suministra el alternador puede representarse por el segmento AA.



**Ejemplo 13.** Como es el acoplamiento en paralelo de alternadores trifásicos.

Para acoplar un alternador a una red trifásica es necesario que se cumplan las condiciones siguientes:

1) Igualdad de frecuencias del alternador y de la red. Se observa mediante frecuencímetros.

2) Igualdad de tensiones del alternador y de la red. Se observa mediante voltímetros.

3) Igualdad orden de sucesión de fases entre el alternador y la red.

4) En el instante de conexión las tensiones homólogas del alternador y de la red deben estar en fase. Se observa con un sincronoscopio.

**Ejemplo 14.** El funcionamiento del motor Síncrono.

El alternador es reversible, conectado a una red de corriente alterna