

CURVA DE CAPACIDAD DE UN GENERADOR SINCRONO

Existen ciertos límites básicos en la velocidad y en la potencia que puede obtenerse de un generador síncrono, los cuales suelen expresarse como especificaciones nominales (ratings) de la máquina. El objetivo de las especificaciones nominales es el de evitar el deterioro del generador, ocasionando por la utilización incorrecta del mismo. Toda máquina tiene sus especificaciones marcadas en una placa de características adheridas a ella.

Las especificaciones nominales típicas de la máquina síncrona son:

Tensión, frecuencia, velocidad, potencia aparente (kVA), factor de potencia, corriente de campo y factor de servicio. A continuación dichas especificaciones y las relaciones entre sí serán analizadas.

Especificaciones de Tensión, Velocidad y Frecuencia

La frecuencia nominal del generador síncrono depende del sistema al cual va a ser conectado. Las frecuencias comúnmente utilizadas en los sistemas de potencia son 50 Hz (en Europa y Asia, etc.) 60 Hz (en América), 40 Hz (en aplicaciones de control y de propósito especial). Una vez fijada la frecuencia de operación, solamente existe una velocidad posible para un cierto número de polos, puesto que están relacionados mutuamente por medio de la ecuación:

$$f = n \times p / 120$$

Tal vez, el valor nominal más obvio es el voltaje de operación para el cual fue diseñado el generador. Este depende del flujo, de la velocidad de rotación y de la construcción mecánica de la máquina. Cuando se dan el tamaño mecánico de la carcasa y la velocidad, si se desea obtener mayor voltaje es necesario mayor flujo en la máquina. Sin embargo, el flujo no puede aumentarse indefinidamente ya que existe una corriente máxima de campo.

Otra consideración que fija límite a la tensión es el valor de ruptura del aislamiento de los arrollamientos: la tensión de funcionamiento normal no pueden ser muy próximos al valor de perforación.

¿Es posible operar un generador a una frecuencia diferente de su frecuencia nominal?

Por ejemplo, es posible operar a 50 Hz un generador de 60 Hz? La respuesta es sí, siempre y cuando se acumulen ciertos requisitos. Básicamente, el problema es que en toda máquina hay un flujo máximo posible, y como $E_{Gf} = K \phi n$, el máximo E_{Gf} posible cambia cuando lo hace la velocidad.

Concretamente, si un generador de 60 Hz debe ser operado a 50 Hz, entonces su voltaje de operación necesita ser disminuido al 50/60 u 83.3 por ciento de su valor original. El caso contrario se presenta cuando un generador de 50 Hz deba funcionar a 60 Hz.

Especificaciones de Potencia y de Factor de Potencia

Existen dos factores que señalan el límite de potencia de las máquinas eléctricas. Uno de dichos factores es el par mecánico del eje de la máquina y el otro, el calentamiento de sus devanados. Todos los motores y generadores síncronos comerciales tienen el eje de suficiente rigidez mecánica para soportar una carga permanente mucho mayor que la potencia nominal de la máquina. Por lo tanto, el límite de capacidad en régimen permanente queda determinado por el calentamiento de los devanados de la máquina.

En el generador síncrono hay dos arrollamientos, y cada uno de ellos necesita estar protegido del sobrecalentamiento: son los devanados de armadura y de campo. La máxima corriente permisible en la armadura fija la potencia aparente nominal de la máquina, teniendo en cuenta que la potencia aparente S se expresa como:

$$S = 1.7321 \times V_n \times I_a$$

Donde:

V_N	=	Tensión nominal (Kv)
I_A	=	Corriente
S	=	Potencia Aparente (KVA)

Si ya ha sido fijada la tensión nominal, entonces la máxima corriente de armadura permitida determina los kA nominales del generador.

Es importante anotar que, desde el punto de vista del calentamiento del devanado de armadura, no tiene importancia el factor de potencia de la corriente de armadura. El efecto calorífico de la pérdida en el cobre del estator se expresa por:

$$P_{CU} = 3 I_A^2 R_A$$

y es independiente del factor de potencia de la carga.

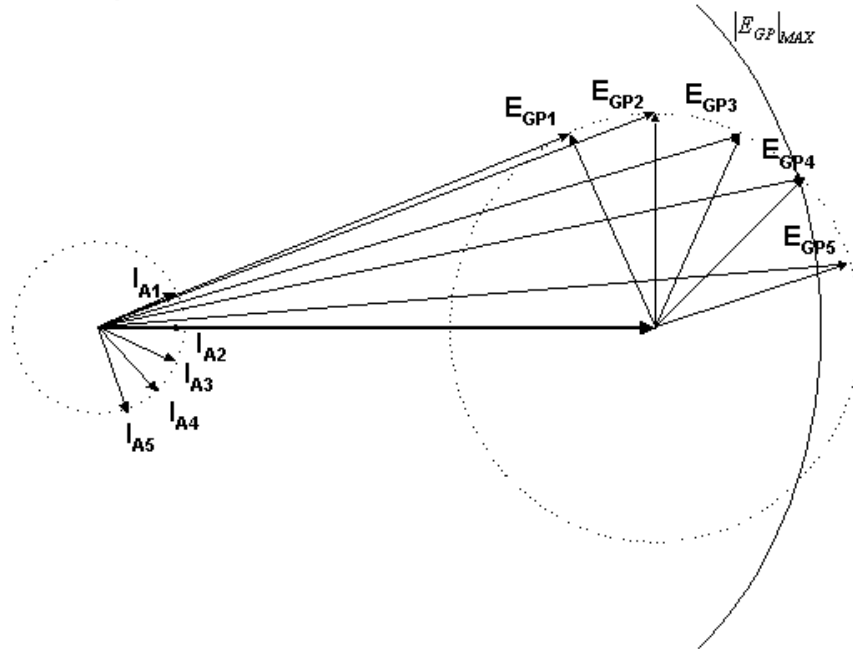
El otro arrollamiento es el del campo. Las pérdidas en el cobre del devanado de campo están dadas por:

$$P_{Cu_r} = I_F^2 R_F$$

así que el máximo calentamiento permitido fija la máxima corriente del campo (I_F) de la máquina; como $E_{gf} = K \phi n$ también determina la magnitud máxima de E_{gf} .

El efecto de tener límites máximos de I_F y de E_{gf} conlleva directamente a establecer restricción sobre el mínimo factor de potencia permisible del generador cuando funciona a su capacidad (KVA) nominal. En la figura siguiente se representa el diagrama fasorial de un generador síncrono con voltaje y corrientes nominales. Como lo indica la figura, la corriente puede tomar muchas posiciones diferentes. El voltaje interno generado E_{gf} es la de un generador síncrono con voltaje y corriente nominales. Como lo indica la figura, la corriente I_a , puede tomar muchas posiciones diferentes. El voltaje interno generado E_{gf} es la suma de V y $jI_a X_s$. Obsérvese que E_{gf} supera a $E_{gf-máx}$ para algunos ángulos de atraso de la corriente: podría quemarse el devanado de campo del generador si éste se hiciera funcionar con corriente nominal de armadura a estos factores de potencia. El ángulo de I_a que exige la magnitud máxima

permisible de E_{gf} cuando V se mantiene en el valor nominal, es el que fija el factor de potencia del generador. Es posible hacer funcionar el generador a un factor de potencia menor (más atrasado) que el nominal, pero disminuyendo los kVA suministrados por el generador.



La corriente límite del campo determina el factor de potencia nominal del generador

Curvas de Capacidad del Generador Síncrono

Los límites de calentamiento del estator y del rotor, junto con cualquier otra limitante externa que exista sobre el generador síncrono, pueden representarse gráficamente mediante el diagrama de potencias del generador. El diagrama de potencias es el gráfico de la potencia compleja $S = P + jQ$, y se deriva del diagrama fasorial del generador, suponiendo que V se mantiene constante en el valor nominal de la máquina.

La Fig. 3.45 indica el diagrama fasorial del generador síncrono funcionando a voltaje nominal con un factor de potencia inductivo. En el extremo de V_{TP} se ha trazado un sistema de coordenadas rectangulares cuyos ejes están marcados en voltios. Sobre dicho diagrama el segmento vertical AB tiene longitud $X_s I_A \cos \theta$, y el segmento horizontal OA $X_s I_A \sin \theta$. La potencia activa entregada por el generador es:

$$P = 3 V_{TP} I_A \cos \theta$$

La potencia reactiva entregada corresponde a:

$$Q = 3 V_{TP} I_A \text{ Sen } \theta$$

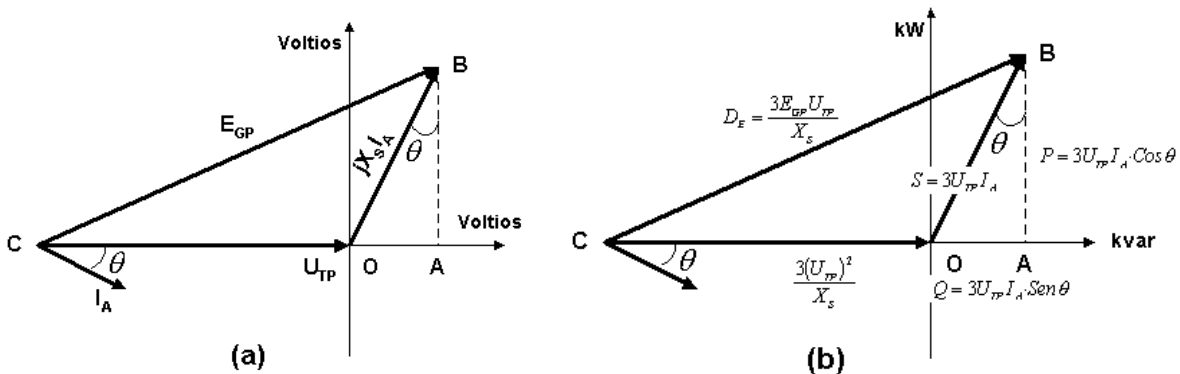
Y la potencia aparente en la salida del generador es

$$S = 3 V_{TP} I_A$$

Así los ejes vertical y horizontal de la figura pueden ser recalibrados en unidades de potencia activa y reactiva. El factor de conversión requerido para cambiar los ejes de voltios a unidades de potencia (VA) es $3 V/X_S$:

$$P = 3V I_A \cos \theta = \frac{3V}{X_S} (X_S I_A \cos \theta)$$

$$Q = 3V I_A \sin \theta = \frac{3V}{X_S} (X_S I_A \sin \theta)$$



Deducción de la curva de capacidad del generador sincrónico:
(a) diagrama fasorial del generador. (b) la conversión a unidades de potencia

Respecto a los ejes de voltaje, el origen del diagrama fasorial queda a $-V_{TP}$ sobre el eje horizontal; por lo tanto, sobre el eje de potencias dicho origen está en

$$Q = \frac{3V}{X_S} (-V_{TP})$$

$$Q = -\frac{3V^2}{X_S}$$

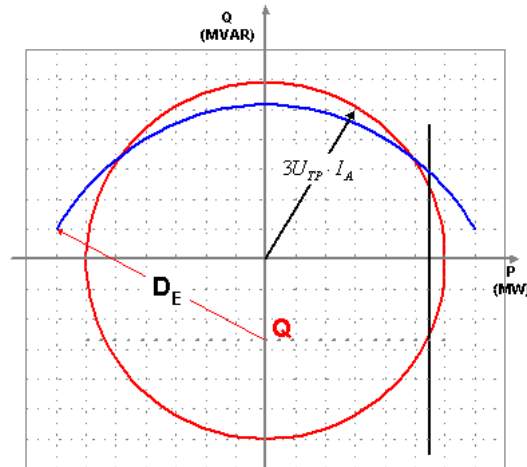
En la Zona Lineal

La corriente del campo es proporcional, al flujo de la máquina, y el flujo es proporcional a $E_{GP} = K\phi$. La longitud correspondiente a E_{GP} en el diagrama de potencia es:

$$D_E = \frac{3E_{Gf} V}{X_S}$$

La corriente de armadura I_A es proporcional a $X_S I_A$, y la longitud correspondiente a $X_S I_A$ en el diagrama de potencias es $3 V I_A$.

Consiste en un a gráfica de P contra Q, con la potencia activa P sobre el eje horizontal y la potencia reactiva Q sobre el eje vertical. Las líneas de corriente de armadura I_A constante, aparecen como líneas de $S = 3 V I_A$ constante, las cuales corresponden a círculos concéntricos con centro en el origen. Las líneas de corriente de campo constantemente corresponden a líneas de E_{gf} constante, las cuales se indican como círculos de magnitud e $E_{Gf} V/X_A$, con centro en el punto.



Capacidad sobre el cual se ha representado el límite de potencia del primotor

El límite de la corriente de armadura aparece como el círculo de I_A nominal o de kVA nominales; y el límite de la corriente de campo aparece como el círculo correspondiente a los valores nominales de I_F o de E_{gf} . Cualquier punto ubicado dentro de estos dos círculos corresponde a puntos de funcionamiento seguro para el generador.

Sobre el diagrama también pueden indicarse otras restricciones tales como la potencia máxima del motor primo y el límite de estabilidad estática.

Ejemplo de aplicación

Un generador síncrono de rotor cilíndrico, es movido por una turbina a gas de 95,36 MW. con el devanado del estator en estrella, y tiene los siguientes datos:

$S_n = 119.2 \text{ Mva}$, $P_n = 95.36 \text{ Mw}$, $U_n = 13.8 \text{ Kv}$, $\text{Cos}\Phi_n = 0.8$, $I_n = 8987 \text{ A}$, $F = 60 \text{ Hz}$
 $\text{RPM}_n = 3600$ $p = 2$ polos

Las reactancias son:

$X_d = 2227.3 \%$ $X'_d = 24.2\%$ $X''_d = 14.8\%$ $X_2 = 20.3\%$ $X_0 = 8.7\%$
 $X_d = 3.6315 \Omega$ $X'_d = 0.3866 \Omega$ $X''_d = 0.2365 \Omega$ $X_2 = 0.3243 \Omega$ $X_0 = 0.139 \Omega$

Relación de cortocircuito (K_c) = 0,49

Impedancia nominal : $Z_n = V_n^2/S_n = 1.598 \Omega$

- Dibuje la curva de capacidad de este generador incluyendo el límite de potencia de la turbina. El generador no puede operar a una potencia de carga mayor al 92,5% de la máxima correspondiente a cualquier corriente de campo dado.
- ¿Puede este generador suministrar una corriente de 4850 A con un factor de potencia de 0,5 en atraso? ¿Por qué?
- ¿Cuál es la potencia reactiva máxima que puede producir este generador?
- Si el generador entrega 80 MW de potencia real, ¿Cuál es la máxima potencia reactiva que puede entregarse simultáneamente?

Solución

La máxima corriente del generador se halla de: $S_n = 1.7321 \times U_n \times I_{an}$

$$I_{an} = S_n / 1.7321 \times U_n = 119.2 \text{ Mva} / 1.7321 \times 13.8 \text{ kV} = 4987 \text{ A}$$

La máxima potencia aparente posible es 119,2 MVA, la cual determina la máxima corriente segura en el estator.

El centro de los círculos Q está en:

$$Q = -3 \times V^2 / X_s = -3 \times (13800/1.7321)^2 / 3.6315 = 52.44 \text{ MVAR}$$

El tamaño máximo de E_{gp} se determina por medio de:

$$\bar{E}_{gp} = \bar{U}_{tp} + jX_s I_N$$

$$\bar{E}_{gp} = \frac{13,8KV}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ + 3,63 \angle 90^\circ \times 4987 \angle -\text{Arc Cos}(0,8)$$

$$\bar{E}_{gp} = \frac{13,8KV}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ + 18,14 \text{ KV} \angle 53,13$$

$$\bar{E}_{gp} = 18833,5 + j14488,1$$

$$\bar{E}_{gp} = 23761,4 \angle 37,57^\circ = 23,76 \text{ KV} \angle 37,57^\circ$$

$$\bar{E}_{g\phi} = \bar{U}_{tp} + jX_s I_N$$

$$\bar{E}_{g\phi} = \frac{13,8KV}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ + 3,63 \angle 90^\circ \times 4987 \angle -\text{Arc Cos}(0,8)$$

$$\bar{E}_{g\phi} = \frac{13,8KV}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ + 18,14KV \angle 53,13$$

$$\bar{E}_{gp} = 18833,5 + j14488,1$$

$$\bar{E}_{gp} = 23761,4 \angle 37,57^\circ = 23,76KV \angle 37,57^\circ$$

Por lo tanto, la magnitud de la distancia proporcional a \bar{E}_{gp} es:

$$D_E = \frac{3E_{gp} U_{tp}}{X_s}$$

$$D_E = \frac{3(237614) \left(\frac{13800}{\sqrt{3}} \right)}{3,63146} = 156,4$$

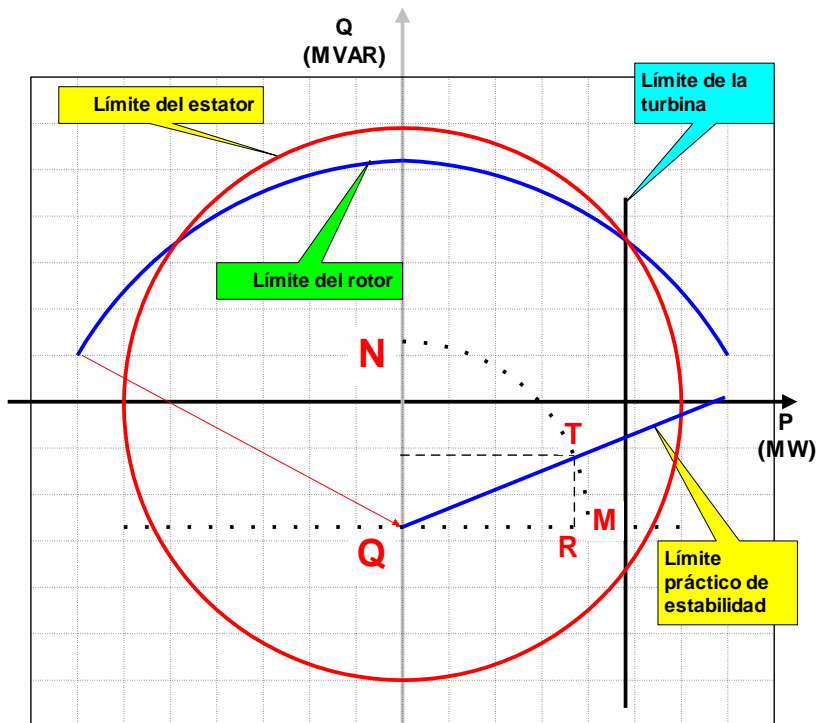
$D_E = 156,4 \text{ MVAR}$

Nosotros sabemos que el límite teórico de estabilidad ocurre cuando el ángulo de potencia $\delta = 90^\circ$ y se representa por una recta perpendicular al eje de la potencia reactiva en el punto Q.

Para cualquier círculo con centro en Q (círculo de E_{gf} constante) por ejemplo, el círculo de arco MN la máxima potencia práctica es 92,5%. En este caso

Máxima Potencia Práctica = $0,925 \times 80 \text{ MW} = 74 \text{ MW}$. que es la longitud de la recta \overline{QR}

La línea de potencia constante \overline{RT} correspondiente 74 MW corta al círculo de excitación constante en el punto "T".



Curva de capacidad del generador síncrono

Entonces T es un punto sobre el límite práctico de estabilidad pueden obtenerse otros puntos de este límite de estabilidad de forma similar trazando otros círculos de E_{gf} constante.

Nótese que en este caso particular, \overline{QR} se especifica como el 92,5% de \overline{QN} . Esto significa que el límite práctico de estabilidad será, por geometría, una recta.

No obstante, a veces el límite práctico de estabilidad se especifica de forma tal que el margen \overline{NR} entre los límites de potencia teórico y práctico es una cantidad constante. Esto causa que el límite práctico de estabilidad sea una curva.

Una corriente de 4850A, con un factor de potencia de 0,5 en atraso, produce una potencia activa de:

$$P = \sqrt{3} \times 13,8 \times 4850 \times 0,5 \text{ KW}$$

$$P = 57,96 \text{ MW}$$

y una potencia reactiva de:

$$Q = \sqrt{3} \times 13,8 \times 4850 \times \text{sen}\phi \text{ KVAR}$$

$$\text{donde } \phi = \arccos(0,5) = 60^\circ$$

$$Q = 100,4 \text{ MVAR}$$

Localizando este punto en el diagrama de capacidad, se ve que está dentro de la curva de límite del estator, pero fuera de la curva límite de campo, por lo cual este punto no cumple con las condiciones de funcionamiento seguro.

Cuando la potencia activa entregada por el generador es cero, la potencia reactiva máxima que puede entregar el generador será:

$$DE_{\text{máx}} = 156,4 \text{ MVAR} - 52,44 \text{ MVAR} = 103,96 \text{ Mvar}$$

Si el generador está entregando 80 MW de potencia activa, la máxima potencia reactiva que podrá entregar es de 80 MVAR. Este valor se puede hallar entrando al diagrama de capacidad con 80 MW y siguiendo la línea de megavatios constantes hasta encontrar el límite. El factor limitante en este caso es la corriente de campo; ya que el estator puede entregar hasta 88,37 MVAR para esa condición.

Operación por poco tiempo y factor de servicio

La limitación más importante del generador sincrónico en funcionamiento estacionario, la constituye el calentamiento de sus devanados de armadura y de campo. Sin embargo, el límite de calentamiento normalmente se presenta a una carga muy inferior de la potencia máxima, que tanto magnética como mecánicamente, es capaz de entregar al generador. De hecho, un generador sincrónico normal está capacitado para suministrar hasta el 300 por ciento de su potencia nominal durante cierto tiempo (hasta que se quemen sus devanados).

Esta capacidad de sobrecarga es aprovechada para alimentar picos momentáneos de carga durante el arranque de motores o durante transitorios de cargas similares. También es posible trabajar un generador a potencia mayor que la nominal durante periodos de tiempo mayores, siempre y cuando los devanados no lleguen a calentarse excesivamente antes de quitar la

sobrecarga. Por ejemplo, un generador que pueda suministrar indefinidamente IMW, sería capaz de entregar 1.5 MW durante un minuto sin presentar calentamiento serio, y durante tiempos progresivamente mayores para menores niveles de sobrecarga. Sin embargo, la carga debe ser, finalmente eliminada o se sobrecalentarán los devanados. Mientras mayor sea la sobrecarga, menor tiempo la máquina puede soportar.

La máxima sobretemperatura que puede soportar una máquina depende de la clase de aislamiento del aislamiento de sus devanados. Hay cuatro clases normalizadas A, B, F y H. A pesar de que existe alguna variación en la temperatura aceptable, dependiendo de la construcción particular de la máquina y del método de medición de la temperatura, estas clases generalmente corresponden a aumentos de temperatura de 60°C, 80°C, 105°C y 125°C, respectivamente, sobre la temperatura del ambiente.

Mientras más alta sea la clase del aislamiento de una máquina, mayor es la potencia que puede obtenerse en ella sin sobrecalentar sus arrollamientos.

El sobrecalentamiento de los devanados es un problema muy serio en motores o generadores. Una vieja regla establece que por cada 10°C que se exceda la temperatura nominal del devanado, el tiempo promedio de vida de la máquina se acorta a la mitad. Los materiales aislantes modernos son menos susceptibles a la ruptura, pero las sobretemperaturas todavía acortan drásticamente sus vidas. Por esta razón, una máquina sincrónica no debería ser sobrecargada a menos que sea absolutamente necesario. Una pregunta relacionada con el problema del sobrecalentamiento es: ¿qué tan exactamente se conocen las exigencias de potencia de una máquina? Antes de su instalación, generalmente sólo existen cálculos aproximados de carga. Por esta razón, las máquinas de propósito general normalmente tienen un factor de servicio. El factor de servicio se define como la razón entre la verdadera potencia máxima de la máquina y su valor nominal de placa. Un generador que tenga un factor de servicio igual a 1.15 realmente puede hacerse funcionar indefinidamente al 115 por ciento de su carga nominal sin perjuicio alguno. El factor de servicio de una máquina proporciona un margen de error en el caso de que las cargas fueran calculadas deficientemente.