



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

**GUÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LÍMITES DE OPERACIÓN,
CURVA DE CAPACIDAD, PRUEBAS Y MANTENIMIENTO
PREDICTIVO DE GENERADORES SÍNCRONOS**

MANUEL EDUARDO MARTÍNEZ MARROQUÍN

Asesorado por Ing. David Cordon Cornel

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2003

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**GUÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LÍMITES DE OPERACIÓN, CURVA
DE CAPACIDAD, PRUEBAS Y MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE
GENERADORES SÍNCRONOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MANUEL EDUARDO MARTÍNEZ MARROQUÍN

ASESORADO POR ING. DAVID CORDÓN CORNEL
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2003

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazmira Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Edgar Florencio Montúfar Urizar
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Durán Córdova
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González López
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

GUÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LÍMITES DE OPERACIÓN, CURVA DE CAPACIDAD, PRUEBAS Y MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE GENERADORES SÍNCRONOS

Tema que fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 17 de julio de 2003.

Manuel Eduardo Martínez Marroquín

DEDICATORIA

A:

Dios

Mi tía Ileana

Por su amor y su incondicional apoyo a lo largo de mi vida y mi carrera

Mis padres

Manuel y Rosa por su apoyo en momentos importantes.

Mis hermanos

Isabel, Jennifer, Gaby y Luis.

Mis tíos, primos

Con mucho cariño.

Mis amigos y compañeros

Por su apoyo y consejos durante mi carrera.

AGRADECIMIENTOS

- A toda mi familia, por su apoyo y sus consejos durante toda mi vida y en especial en mi carrera universitaria.
- Al personal de Puerto Quetzal Power L.L.C., por su apoyo durante mi práctica laboral y la realización de este trabajo de graduación.
- Al Ing. David Córdon por su amistad y su asesoría en este trabajo de graduación.

2.1.3	Determinación del lugar geométrico de la máxima corriente de excitación (calentamiento del rotor)	12
2.1.4	Determinación del lugar geométrico de la mínima corriente de excitación (flujos residuales)	13
2.15	Determinación del límite práctico para estabilidad permanente	14
2.2	Obtención de la carta de operación para un generador de polos salientes	15
2.2.1	Determinación del lugar geométrico de la máxima corriente de excitación (calentamiento del rotor)	17
2.2.2	Determinación del lugar geométrico de la mínima corriente de excitación (flujos residuales)	18
2.2.3	Determinación del límite práctico para estabilidad permanente	18

3. PRUEBAS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL GENERADOR SÍNCRONO

3.1	Prueba de vacío	21
3.2	Prueba de cortocircuito	24
3.3	Prueba de deslizamiento	25
3.4	Determinación de los parámetros de reactancias síncronas (x_d , x_q)	28
3.4.1	Determinación de la reactancia síncrona en el eje directo (x_d)	28
3.4.2	Determinación de la reactancia síncrona en el eje de cuadratura (x_q)	29
3.4.5	Prueba de calentamiento	30

4. DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CAPACIDAD POR MEDIO DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS A UN GENERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES	33
4.1 Datos del generador síncrono de polos salientes	33
4.2 Prueba de vacío	34
4.3 Prueba de cortocircuito	35
4.4 Prueba de calentamiento	36
4.5 Interpretación de los resultados de las pruebas	39
4.6 Construcción de la curva de capacidad para el generador con los datos obtenidos	40
4.7 Construcción de la curva de capacidad a partir de los datos de fábrica	44
5. MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE GENERADORES SÍNCRONOS	47
5.1 Introducción	47
5.2 Definición de los diversos tipos de mantenimiento	49
5.2.1 Mantenimiento reactivo (correctivo) (RM)	49
5.2.2 Mantenimiento preventivo (PM)	49
5.2.3 Mantenimiento predictivo (PDM)	49
5.3 La tecnología del mantenimiento predictivo	50
5.4 Síntomas típicos de mal funcionamiento	53
5.4.1 Desbalance	54
5.4.2 Desalineamiento de ejes	54
5.4.3 Rodamientos defectuosos	55
5.4.4 Cojinetes en planos defectuosos	55
5.4.5 Excentricidad	55

5.4.6	Cojinetes antifricción defectuosos	56
5.4.7	Cojinete de fricción defectuoso	56
5.4.8	Problemas eléctricos	56
5.5	Programa de mantenimiento predictivo	57
5.5.1	Personal que necesita información	57
5.5.2	Información necesaria	58
5.5.3	Información de la operación de la máquina	58
CONCLUSIONES		61
RECOMENDACIONES		63
BIBLIOGRAFÍA		65
APÉNDICE		67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Carta de operación de un generador de polos lisos	2
2.	Diagrama fasorial (generador de polos lisos)	4
3.	Potencia activa contra ángulo de torque	5
4.	Carta de operación de un generador de polos lisos	6
5.	Lugar geométrico de la máxima corriente de armadura	11
6.	Límite de la potencia máxima de la turbina	11
7.	Máxima corriente de excitación	12
8.	Mínima corriente de excitación	13
9.	Límite de estabilidad permanente con margen de seguridad	14
10.	Carta de operación para generador síncrono de polos lisos	15
11.	Cardioides Legamón de Pascal	16
12.	Lugar geométrico de la máxima excitación	17
13.	Límite teórico y práctico de estabilidad permanente	19
14.	Carta de operación para generador síncrono de polos salientes	20
15.	Curva de vacío	23
16.	Conexión para prueba de vacío	23
17.	Curva de cortocircuito	24
18.	Conexión para prueba de cortocircuito	25
19.	Conexión para prueba de deslizamiento	26
20.	Variaciones de tensión y corriente (prueba de deslizamiento)	27
21.	Curvas características de vacío y cortocircuito	28
22.	Curva característica de la temperatura del bobinado de armadura contra la corriente de armadura al cuadrado	31

23.	Curva de vacío del generador síncrono bajo prueba	35
24.	Curva de cortocircuito para el generador bajo prueba	36
25.	Curva de carrera térmica	39
26.	Curva de capacidad para el generador puesto a prueba	43
27.	Curva de capacidad para generador bajo prueba, con relación de cortocircuito de 0.73 y factor de potencia 0.80	44
28.	Curva de capacidad del generador síncrono basados en los datos de fábrica	45
29.	Vista lateral del generador síncrono bajo prueba	67
30.	Vista completa del generador y el interior de la barcaza	68

TABLAS

I.	Valores obtenidos de la prueba de vacío	34
II.	Valores obtenidos de la prueba de cortocircuito	36
III.	Valores obtenidos de la prueba de calentamiento o carrera térmica	38

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
δ	Ángulo de torque definido entre el voltaje en bornes y la FEM
E_f	Voltaje de excitación
FEM	Fuerza electromotriz
f.p.	Factor de potencia
I_a	Corriente de armadura o corriente de estator
I_{exc}	Corriente de excitación
P	Potencia activa
Q	Potencia reactiva
S	Potencia aparente
V	Voltaje en terminales de armadura
X_d	Reactancia síncrona del eje directo
X_q	Reactancia síncrona del eje de cuadratura
X_s	Reactancia síncrona generador polos lisos

GLOSARIO

Armadura	Nombre común que recibe el estator de una máquina eléctrica.
Campo	Nombre común que recibe el rotor de una máquina eléctrica.
Generador síncrono	Máquina eléctrica que transforma energía mecánica en energía eléctrica, trabajando a velocidad de sincronismo.
IEC	<i>International Electromechanical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineering</i>
Polos lisos	Se le denomina así a los generadores que poseen un entrehierro uniforme.
Polos salientes	Se le denomina así a los generadores que poseen un entrehierro no uniforme, y por lo tanto poseen una dirección preferida de magnetización.
Potencia activa	Potencia en Watts que entrega un generador eléctrico. También llamada potencia real.

Potencia reactiva	Potencia en Volt-amperes reactivos(VAR) que entrega o absorbe una máquina eléctrica.
Predictivo	Se le llama así a cualquier proceso o sistema que tiene la propiedad de predecir sucesos o situaciones para el cual esta programado.
Reactancia síncrona	Resultado del producto de la inductancia del estator y la frecuencia en r.p.m., además también se puede definir como el recíproco de la relación de cortocircuito.
Relación de cortocircuito	Relación de la corriente de campo necesaria para el voltaje nominal a circuito abierto con respecto a la corriente de campo necesaria para dar corriente nominal de armadura de cortocircuito.
Reluctancia	Parámetro físico que depende de la distancia, el área efectiva y la permeabilidad del entrehierro de una máquina eléctrica.
VAR	Volt-amperio reactivo.

RESUMEN

Los límites de operación de una máquina eléctrica son muy importantes y en este trabajo se detallan cada uno de los parámetros de operación, así como, su obtención y lugar geométrico en un gráfico conocido como curva de capacidad o carta de operación.

Se puede obtener dicha carta de operación por medio de pruebas que se le realizan al generador síncrono o a partir de los datos originales del mismo. Las pruebas que se detallan son las de vacío, cortocircuito, deslizamiento y carrera térmica.

El método de pruebas fue utilizado para obtener la curva de capacidad para un generador síncrono, obteniéndose datos de corriente, voltaje, temperatura. La construcción de dicha curva se encuentra detallada, así como, las ecuaciones a utilizar.

El grado exactitud del método de pruebas es bastante alto y su utilidad para conocer el funcionamiento de un generador bastante utilizado.

Además se tiene la presentación de una alternativa para el mantenimiento de un generador, llamado mantenimiento predictivo, que hoy en día a empezado a ser muy utilizado.

OBJETIVOS

General

Proveer una guía para determinar los principales parámetros de operación, curva de capacidad y mantenimiento para generadores síncronos.

Específicos

1. Dar a conocer los límites de operación de los generadores síncronos.
2. Proveer las ecuaciones necesarias para obtener la curva de capacidad de un generador síncrono.
3. Desarrollar las diversas pruebas necesarias para poder obtener la curva de capacidad de un generador síncrono.
4. Mostrar el mantenimiento predictivo para generadores síncronos como una alternativa de mantenimiento.

INTRODUCCIÓN

Debido a la importancia de los generadores síncronos en las plantas de generación de energía eléctrica, es importante conocer el límite de operación de los mismos, tal como la corriente de armadura máxima, corriente de excitación máxima, corriente de excitación mínima, ángulo de torque máximo, así como la obtención de la curva de capacidad o carta de operación.

Existen dos tipos de generadores síncronos, los de polos salientes y los de polos lisos, y es importante conocer la forma de calcular sus límites, ya que existe una diferencia importante debido a su fabricación y funcionamiento.

Antes de que un generador síncrono entre a formar parte de un sistema por primera vez, es importante que a este se le realicen una serie de pruebas para determinar ciertos parámetros eléctricos que son importantes, dichas pruebas también deben realizarse cada vez que sea necesario, por lo general después de un mantenimiento mayor o total del generador, las pruebas a considerar serían, la prueba de vacío, la prueba de cortocircuito, la prueba de deslizamiento, la determinación de los parámetros de reactancias síncronas y la prueba de calentamiento.

El costo elevado de los generadores síncronos y su importancia en el mercado de generación, nos lleva a considerar un punto crucial en la vida del generador, su mantenimiento, se tienen por lo menos tres tipos de mantenimientos, correctivo, preventivo y predictivo, de mayor importancia los dos últimos por el ahorro que pueden dar, el mantenimiento predictivo será estudiado en este trabajo de graduación.

1. LÍMITES DE OPERACIÓN DE LOS GENERADORES SÍNCRONOS

La operación de un generador síncrono es limitada principalmente por el calentamiento de los devanados estatórico y rotórico, el sobrecalentamiento de estos devanados repercute en la vida útil de la máquina, se dice que por cada 10°C que se excede la temperatura nominal del devanado, el tiempo promedio de la máquina se acorta a la mitad. Por esta razón, una máquina síncrona no puede ser sobrecargada a menos que sea absolutamente necesario.

Otras limitaciones para la operación del generador es la estabilidad estática de la máquina dada por el ángulo de torque máximo, la excitación mínima permisible y la potencia máxima entregada por la máquina motriz.

1.1 Corriente de armadura máxima

Es la corriente máxima permisible en el estator impuesta por el calentamiento del estator y la consiguiente vida útil del aislamiento. En la figura 1, se muestra este lugar geométrico como una semicircunferencia de radio igual a la potencia aparente máxima (kVA), este valor viene dado por el producto de la tensión nominal y la corriente máxima permisible de armadura.

1.2 Potencia máxima de la máquina motriz (turbina)

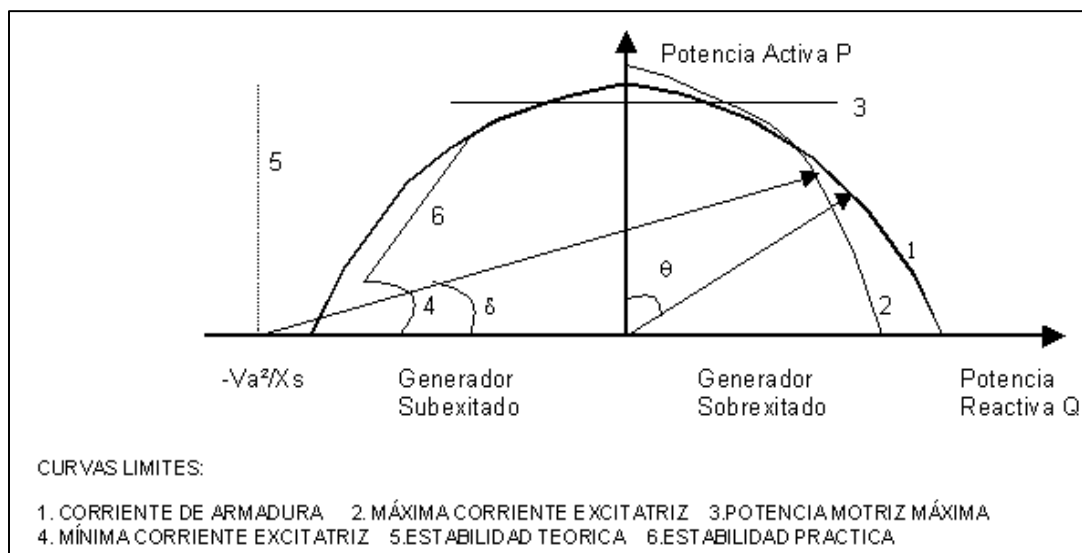
Este límite está determinado por la capacidad de la máquina motriz debido a limitaciones propias de fabricación, esta restricción impide entregar más que cierta cantidad de potencia máxima.

El lugar geométrico de este límite se representa mediante una recta paralela al eje Q, a una distancia de magnitud igual a la potencia máxima de la turbina. En la figura 1 se puede observar como este lugar geométrico limita la potencia activa que puede entregar al generador.

1.3 Corriente de excitación máxima

Existe un valor máximo permisible de corriente de excitación impuesto por un lado por el calentamiento del rotor, o por características propias de la excitatriz. Este valor de corriente de excitación induce en el estator una FEM máxima el cual genera un límite de potencia aparente entregada por el generador (para el caso de polos lisos se representa mediante una circunferencia y en el caso de polos salientes mediante la forma polar de un Legamón de Pascal el cual se puede apreciar en la figura 1).

Figura 1. Carta de operación de un generador de polos lisos



Fuente: Ing. Ronal Antara. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono.

En esta figura se puede ver como queda limitada la operación de la máquina en el cuadrante donde el generador está sobreexcitado, considerado así debido a que en esta parte el generador está entregando potencia reactiva al sistema.

1.4 Corriente de excitación mínima

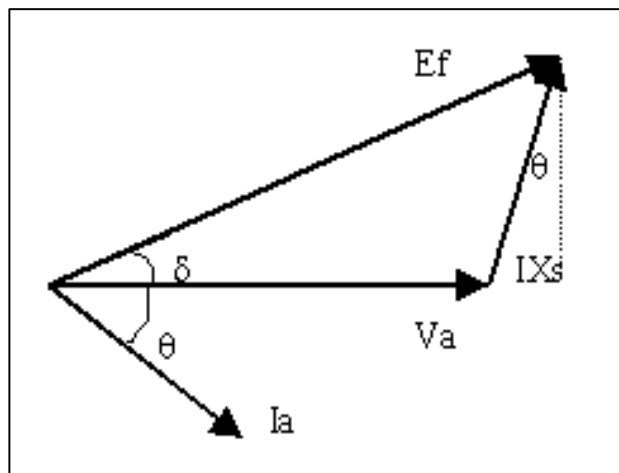
La excitatriz del generador es una máquina de corriente continua, por ello es imposible anular los flujos residuales (magnetismo remanente); por eso, aunque se anule la excitación siempre habrá una FEM mínima inducida para contrarrestar esos flujos residuales. En la práctica cuando no se conoce el valor de la corriente mínima de excitación, se estima un 5 a 10% de la excitación necesaria con carga nominal. El lugar geométrico de este límite es una curva semejante a la corriente de excitación máxima, el límite para una mínima corriente de excitación se muestra en la figura 1.

1.5 Ángulo de torque máximo (límite de estabilidad permanente)

La potencia producida por un generador síncrono depende del ángulo δ definido entre la tensión en bornes del generador y la FEM inducida, véase el diagrama fasorial en el cual no se ha considerado la resistencia de armadura, ver la figura 2. El ángulo δ se le conoce como ángulo de torque y la potencia máxima que puede suministrar el generador de acuerdo a la figura 3 corresponde a un $\delta = 90^\circ$, la potencia máxima expresada por esta ecuación determina el límite de estabilidad estática del generador. Normalmente, los generadores no se acercan a este límite, siendo los ángulos típicos de torque entre 15° y 20° a plena carga.

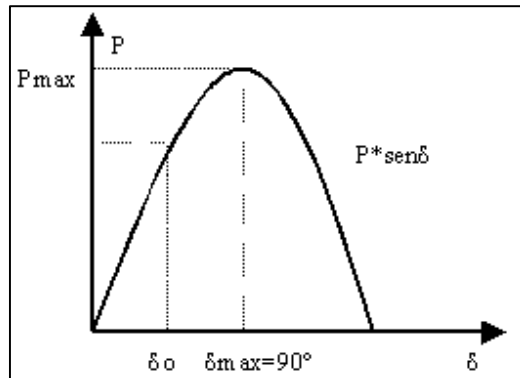
Cualquier intento de transmitir una potencia hace aumentar el ángulo δ en más de 90° , lo que disminuye la potencia provocando inestabilidad y pérdida del sincronismo. El lugar geométrico de este límite se representa por un paraboloides para el caso del rotor de polos salientes, sin embargo para el caso de polos lisos será una recta paralela al eje Q. No es aconsejable operar el generador, justo en este límite teórico, debido a las perturbaciones del sistema que puedan ocurrir, en tal sentido se recomienda definir un límite práctico de seguridad como límite de estabilidad permanente. Este se obtiene trasladando la curva para una menor potencia en 10% a 20% de la capacidad nominal de la máquina.

Figura 2. Diagrama fasorial (generador de polos lisos)



Fuente: Ing. Ronal Antara. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono.

Figura 3. Potencia activa contra ángulo de torque

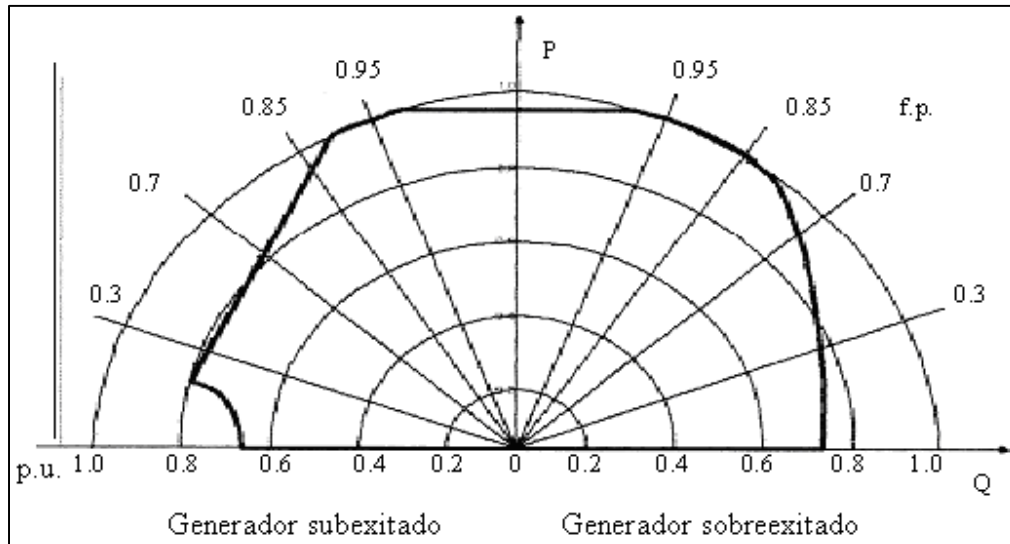


Fuente: Ing. Ronal Antara. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono.

1.6 Curva de capacidad del generador

Después de haber impuesto las restricciones que limitan la operación del generador, la curva resultante es el límite de operación del generador el cual determina la región sobre la cual se asegura una operación confiable de la máquina, ver la figura 4. A la curva de capacidad también se le conoce como carta de operación del generador y en el se pueden determinar las diferentes combinaciones de megavatios y megavars que pueden ser producidos por el generador a diferentes factores de potencia y ángulos de torque (δ). Los vars positivos son suministrados por el generador y es la zona de sobreexcitación donde el generador funciona con factor de potencia inductivo, y los vars negativos son alimentados dentro del generador desde el sistema de energía y es la zona de subexcitación donde el generador trabaja con factor de potencia capacitivo.

Figura 4. Carta de operación de un generador de polos lisos



Fuente: Ing. Ronal Antara. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono.

No podemos mantener la misma potencia aparente a un factor de potencia mas bajo, debido al límite de temperatura del bobinado del rotor. La capacidad del generador es reducida a un bajo factor de potencia en retraso.

En la zona subexcitada una corriente de excitación muy baja puede hacer que el rotor salga fuera de paso, debido a la pérdida de torque magnético. Si el generador sufriera una pérdida completa de campo, el generador seguiría entregando potencia activa por el accionamiento de la turbina, pero retiraría potencia reactiva del sistema para mantener la excitación, esto conduciría a una baja tensión en los terminales del generador produciendo un sobrecalentamiento en el hierro del estator, en este caso el relé de pérdida de campo puede ser usado para dar alarma o iniciar la desconexión de la unidad.

Durante una perturbación en un sistema de energía interconectado de gran tamaño, puede ocurrir que el sistema llegue a ser desconectado en áreas separadas; en algunas áreas tendremos demasiada generación disponible y en otras habrá generación insuficiente si una distribución de carga no se realiza inmediatamente; el generador sufrirá caídas de frecuencia, de tensión y un aumento de la corriente en el estator y puede producir un sobrecalentamiento del mismo. El regulador de tensión aumentará la excitación en el generador para elevar la tensión de línea, y esto puede conducir al sobrecalentamiento del rotor. Para proteger al rotor un relé de sobrecorriente puede ser instado en el circuito de excitación. Del mismo modo el bobinado del estator puede ser protegido del sobrecalentamiento por la instalación de un relé de sobrecorriente de tiempo extremadamente inverso, fijado para operar justo cuando el límite térmico de corto tiempo del bobinado del estator sea alcanzado.

2. DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD PARA GENERADORES SÍNCRONOS

En esta parte se determinará y analizará el método para construir la carta de operación del generador síncrono de polos lisos así como para el de polos salientes.

2.1 Obtención de la carta de operación para un generador de polos lisos

Para determinar los límites de funcionamiento del generador, partiremos de las ecuaciones de potencias específicas para el generador síncrono de rotor de polos lisos; estas ecuaciones son las siguientes:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \dots\dots\dots(1)$$

$$P = \frac{V \cdot E_f \cdot \text{Sen} \delta}{X_s} \dots\dots\dots(2)$$

$$Q = \frac{V \cdot E_f \cdot \text{Cos} \delta}{X_s} - \frac{V^2}{X_s} \dots\dots\dots(3)$$

Luego operando estas ecuaciones encontramos:

$$P^2 + \left(Q + \frac{V^2}{X_s} \right)^2 = \left(\frac{V \cdot E_f}{X_s} \right)^2 \dots\dots\dots(4)$$

Esta ecuación representa un círculo con centro en:

$$Q = - V^2/X_s \dots \dots \dots (5)$$

y radio:

$$r = V * E_f / X_s \dots \dots \dots (6)$$

Donde:

P: Potencia activa (W)

Q: Potencia reactiva (VAR)

V: Tensión en terminales (V)

E_f: Fuerza electromotriz inducida (V)

δ: Ángulo de torque

X_s: Reactancia síncrona (Ω)

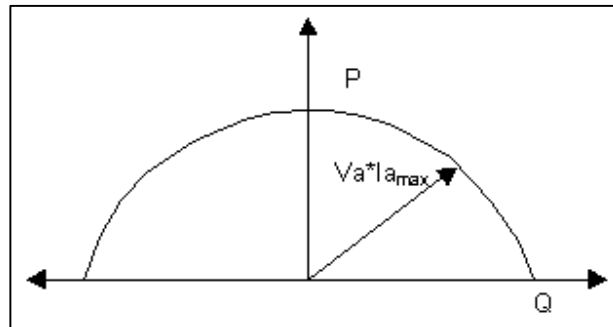
2.1.1 Determinación del lugar geométrico de la máxima corriente de armadura (calentamiento del estator).

En una hoja milimetrada trazar un eje de coordenadas cartesianas, donde la abscisa corresponderá a la potencia reactiva y la ordenada a la potencia activa. Ahora a partir de la ecuación (1) se puede definir el lugar geométrico como una semicircunferencia en el semiplano positivo P con centro en el origen y radio de potencia máxima, ver la figura 5.

La potencia máxima esta dada por el valor de la tensión nominal y la máxima corriente de armadura, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$S = V * I_{a_{máx}}$$

Figura 5. Lugar geométrico de la máxima corriente de armadura

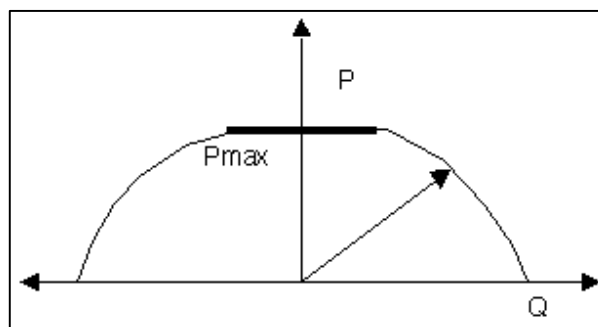


Fuente: Ing. Ronal Antara. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono.

2.1.2 Determinación del lugar geométrico de la máxima potencia activa

De acuerdo con la capacidad de la máquina motriz (turbina), podemos determinar este límite trazando una recta paralela al eje Q distante en una magnitud igual a la potencia activa máxima impuesta por la turbina, ver la figura 6.

Figura 6. Límite de la potencia máxima de la turbina

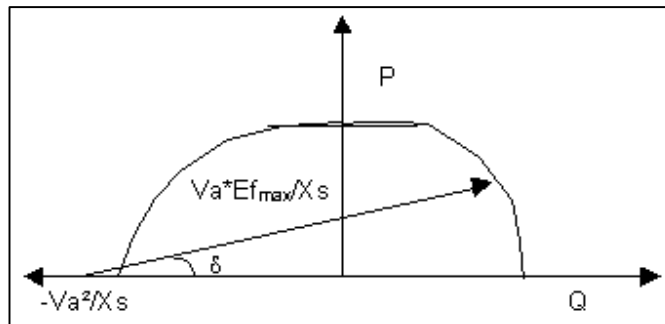


Fuente: Ing. Ronal Antara. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono.

2.1.3 Determinación del lugar geométrico de la máxima corriente de excitación (calentamiento del rotor).

La corriente de excitación máxima trae consigo un valor máximo de la fuerza electromotriz inducida. El lugar geométrico de este límite se representa como una semicircunferencia en el semiplano positivo P de centro en el punto $(-V^2/X_s, 0)$ de acuerdo a la ecuación (4) ver la figura 7.

Figura 7. Máxima corriente de excitación



Fuente: Ing. Ronal Antara. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono.

Para determinar el radio de la semicircunferencia, medir la distancia comprendida entre el punto $(-V^2/X_s, 0)$ y el origen de coordenadas. Esta distancia corresponde a la excitación donde la FEM inducida es igual a la tensión nominal ($E_f = V_n$) para ($\delta = 0$). El valor de la distancia obtenida en centímetros del paso anterior corresponde al equivalente de la corriente de excitación que induce aquella FEM. A partir de la curva de vacío se determina la corriente de excitación que induce en la armadura una FEM igual al valor de la tensión nominal.

Luego se puede encontrar la corriente de excitación máxima a partir de la siguiente relación:

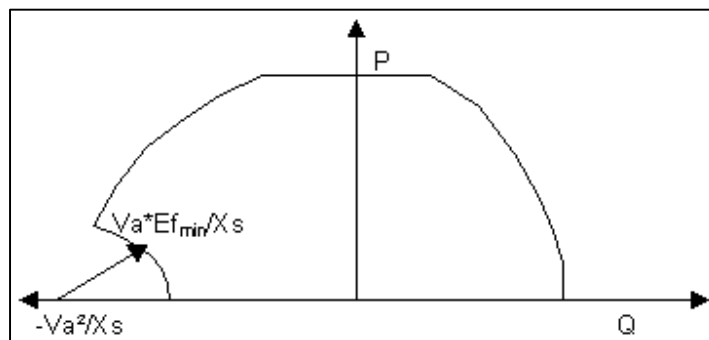
$$\frac{I_{exc} (Ef = Vn) [A]}{I_{exc} \text{ máx. [A]}} = \frac{I_{exc} (Ef = Vn) [cm]}{I_{exc} \text{ máx. [cm]}}$$

Con el equivalente en centímetros de la corriente de excitación máxima, se determina el radio de la semicircunferencia de excitación constante máxima.

2.1.4 Determinación del lugar geométrico de la mínima corriente de excitación (flujos residuales).

Proceder como en el caso anterior con la diferencia de que el radio se determinara con el valor de la corriente mínima de excitación. En la practica cuando no se conoce el valor de esta corriente mínima de excitación, se estima entre un 5 a 10% de la excitación necesaria con carga nominal. Ver la figura 8.

Figura 8. Mínima corriente de excitación

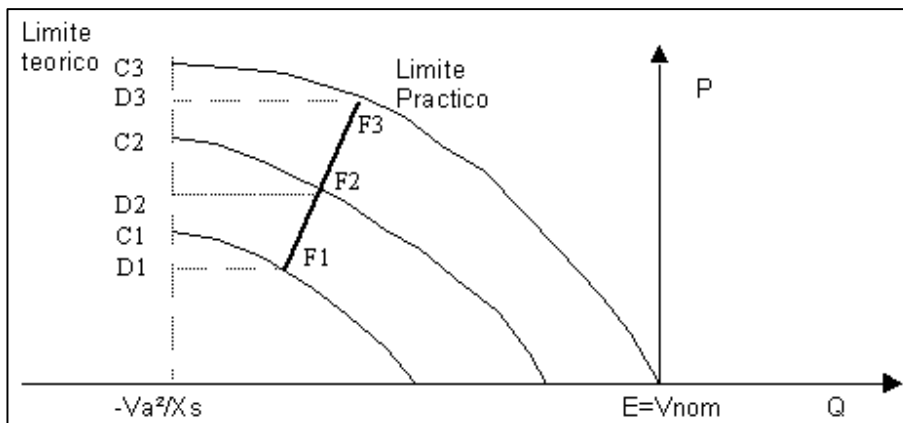


Fuente: Ing. Ronal Antara. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono.

2.1.5 Determinación del límite práctico para estabilidad permanente

El ángulo máximo que se puede obtener para una carga máxima es cuando δ es igual a 90° ; este límite teórico corresponde a una recta paralela al eje P, y que pasa por el punto $(-V^2/X_s, 0)$. El límite práctico se obtiene trazando circunferencias para diferentes valores de potencia, tal como se muestra en la figura 9, luego a partir de la intersección de estas circunferencias con el límite de estabilidad teórica, puntos denominados con la letra c, se decreta cada potencia máxima en un 10 o 20% de la potencia activa nominal. Los puntos d obtenidos se trasladan horizontalmente, hasta interceptar con la circunferencia correspondiente, obteniéndose los puntos f. El lugar geométrico resultante de la unión de los puntos f, corresponde al límite de estabilidad permanente práctico.

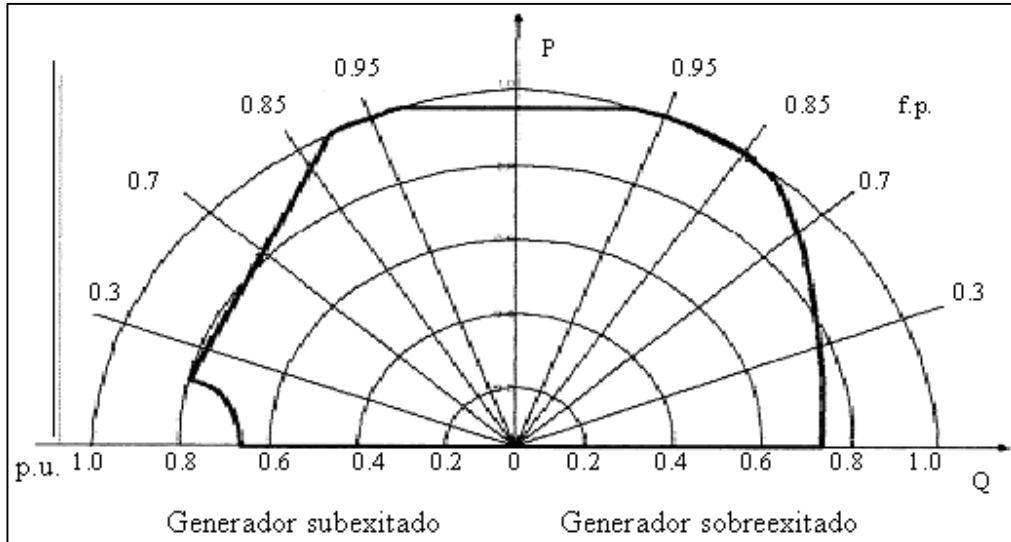
Figura 9. Límite de estabilidad permanente con margen de seguridad



Fuente: Ing. Ronal Antara. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono

Finalmente, la carta de operación completa para el generador de polos lisos, se presenta en la figura 10.

Figura 10. Carta de operación para generador síncrono de polos lisos



Fuente: Ing. Ronal Antara. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono.

2.2 Obtención de la carta de operación para un generador de polos salientes

El método para determinar los límites de operación de un generador síncrono de polos salientes es similar al caso anterior, la diferencia radica en la obtención de las curvas de excitación y límite de estabilidad permanente. Las ecuaciones específicas para un generador síncrono de polos salientes son las siguientes:

$$P = \frac{(V \cdot E_f + V^2 (\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d})) \cos \delta}{X_d} \sin \delta \dots \dots \dots (7)$$

$$Q + \frac{V^2}{X_q} = \frac{(V \cdot E_f + V^2 (\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d})) \cos \delta}{X_d} \sin \delta \dots \dots \dots (8)$$

Definiendo la ecuación en coordenadas polares, tenemos:

$$R = \frac{V \cdot E_f}{X_d} + V^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos \delta \dots \dots \dots (9)$$

Entonces:

$$P = r \cdot \text{Sen} \delta \dots \dots \dots (10)$$

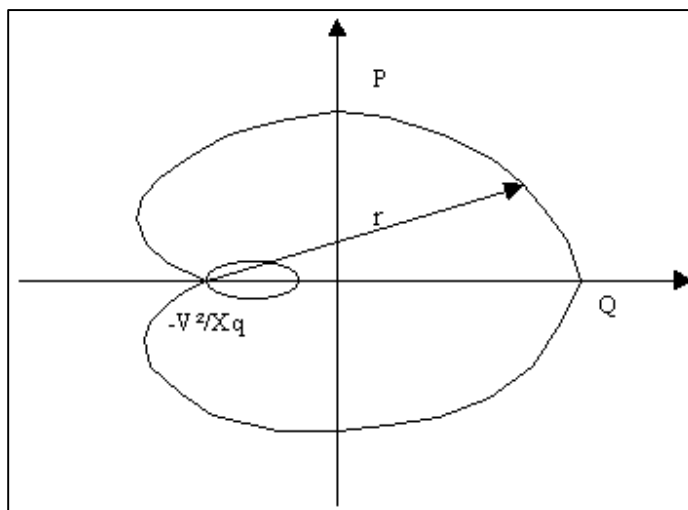
$$Q + V^2/X_q = r \cdot \text{Cos} \delta \dots \dots \dots (11)$$

Luego se tiene que:

$$P^2 + (Q + V^2/X_q)^2 = r^2 \dots \dots \dots (12)$$

Esta expresión representa la forma polar de un cardiode perteneciente a la familia de los caracoles de Pascal o Legamón de Pascal, ver la figura 11.

Figura 11. Cardiode Legamón de Pascal



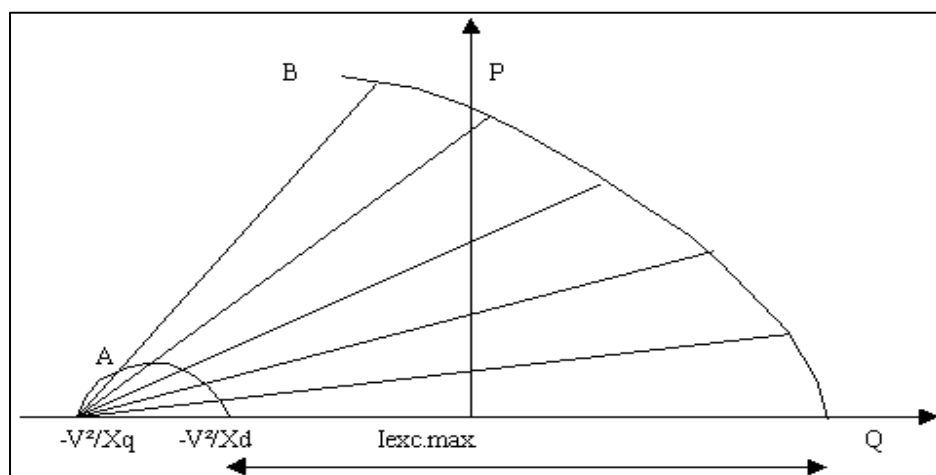
Fuente: Ing. Ronal Antara. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono.

La determinación de los lugares geométricos correspondientes a la máxima corriente de armadura y al límite de la turbina, se determinan de la misma manera que en la del generador de polos lisos. Por tanto en esta parte nos avocaremos a la determinación de los lugares geométricos de los puntos de excitación y estabilidad permanente.

2.2.1 Determinación del lugar geométrico de la máxima corriente de excitación (calentamiento del rotor)

Graficar una semicircunferencia de diámetro igual a $V^2(1/X_q - 1/X_d)$; esta semicircunferencia corresponde al lugar geométrico de los puntos de excitación cero, a partir del cual la excitación del campo comienza a aumentar. Medir la distancia comprendida entre el punto $(-V^2/X_d, 0)$ y el origen de coordenadas; esta distancia corresponde a la excitación donde la FEM inducida es igual a la tensión nominal ($E_f = V_n$) para un ángulo de torque igual a cero, ver la figura 12.

Figura 12. Lugar geométrico de la máxima excitación



Fuente: Ing. Ronal Antara. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono.

El valor de la distancia obtenida en centímetros del paso anterior corresponde al equivalente de la corriente de excitación que induce aquella FEM. A partir de la curva de vacío determinar la corriente de excitación que induce en la armadura una FEM igual al valor de la tensión nominal. Determinar la corriente de excitación máxima a partir de la siguiente relación:

$$\frac{I_{exc} (E_f = V_n) [A]}{I_{exc \text{ máx.}} [A]} = \frac{I_{exc} (E_f = V_n) [cm]}{I_{exc \text{ máx.}} [cm]}$$

Con el equivalente en centímetros de la corriente de excitación máxima, determinar el radio del cardiode de excitación constante máxima. Obtener el lugar geométrico del cardiode variando el ángulo del torque (δ) y manteniendo el trazo AB constante en magnitud; es decir desplazar el punto A sobre la circunferencia, ver la figura 12.

2.2.2 Determinación del lugar geométrico de la mínima corriente de excitación (flujos residuales)

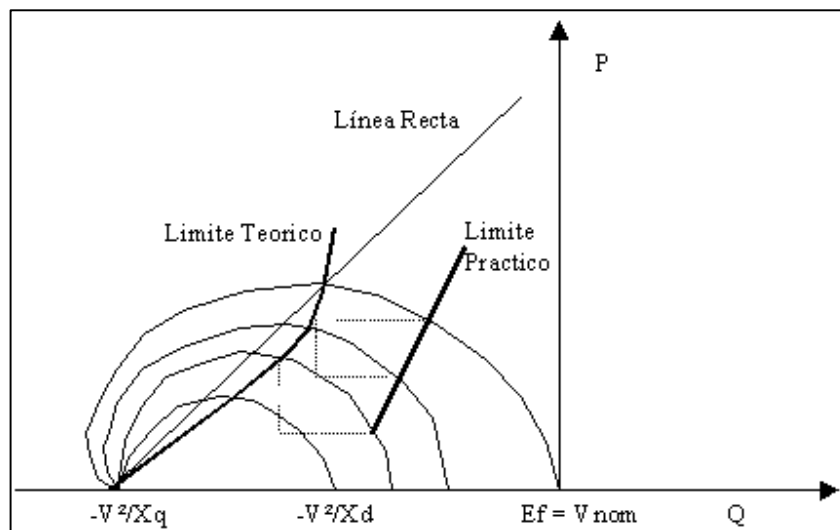
Se determina en forma similar al caso anterior, con la diferencia que se utiliza la corriente de excitación mínima en vez de la máxima. En la practica cuando no se conoce el valor de esta corriente mínima de excitación, se estima un 5 ó 10% de la excitación necesaria con carga nominal.

2.2.3 Determinación del límite practico para estabilidad permanente

Para determinar este límite, el primer paso consiste en graficar cardiodes para distintos valores de E_f (mínimo 4), luego trazar líneas rectas a partir del origen de aquellas.

Los nuevos puntos de intercepción se trasladan verticalmente hasta la intercepción con su línea recta correspondiente, ver la figura 13. El lugar geométrico del límite teórico de estabilidad permanente esta dado por la intersección de los nuevos puntos encontrados en el paso anterior. Fijar un límite de seguridad disminuyendo el límite teórico entre 10% a 20% de la potencia nominal. Bajar una línea vertical desde las curvas de excitación con la disminución fijada en el paso anterior, trasladar los puntos resultantes de la disminución horizontalmente hasta interceptar la curva de excitación constante correspondiente, la unión de los puntos resultantes corresponde al límite práctico, ver la figura 13.

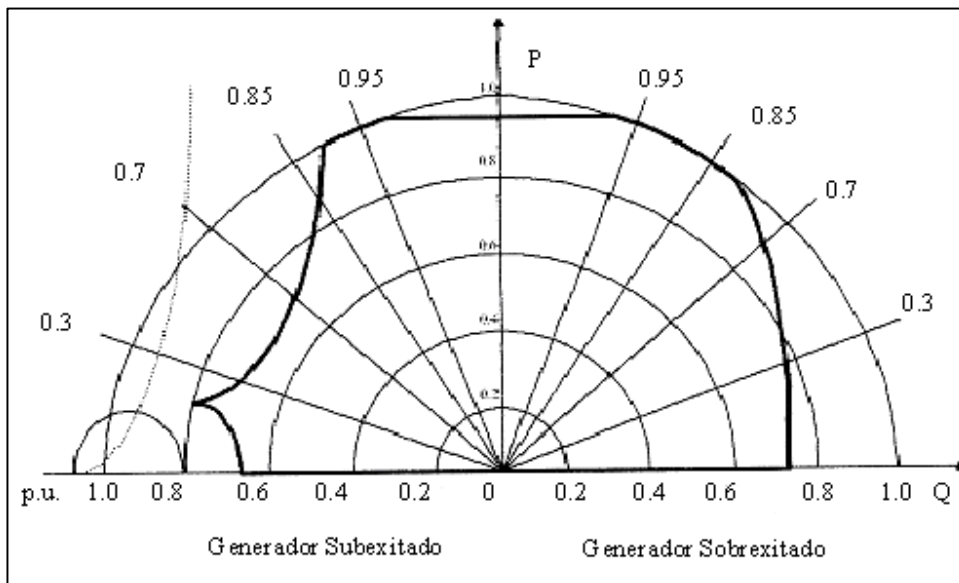
Figura 13. Límite teórico y práctico de estabilidad permanente



Fuente: Ing. Ronal Antara. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono.

Finalmente la carta de operación para un generador síncrono de polos salientes se muestra en la figura 14.

Figura 14. Carta de operación para generador síncrono de polos salientes



Fuente: Ing. Ronal Antara. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono.

3. PRUEBAS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL GENERADOR SÍNCRONO

En esta parte se verán las pruebas a realizar para la obtención de parámetros eléctricos necesarios en la construcción de la curva de capacidad del generador. Los parámetros a encontrar, para el caso del generador de polos lisos es la reactancia síncrona, y en el caso de generadores síncronos de polos salientes son la reactancia síncrona en eje directo y la reactancia síncrona en el eje de cuadratura.

Las pruebas a realizarse están acorde con las recomendaciones de la IEEE Std 115-1995 o IEC 60034-4 y son las siguientes:

- Prueba de vacío
- Prueba de cortocircuito
- Prueba de deslizamiento
- Prueba de calentamiento (carrera térmica)

3.1 Prueba de vacío

Esta prueba consiste en obtener valores de tensión en el estator a circuito abierto cuando se excita el rotor el cual esta girando a la velocidad síncrona. Algunas recomendaciones para la obtención de estos valores y la distribución de la toma de lecturas son las siguientes:

- a) Tomar seis lecturas por debajo del 60% de la tensión nominal del estator incluida el cero de excitación.

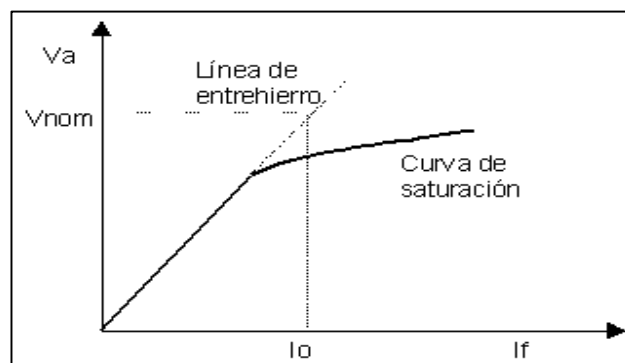
- b) Entre el 60% y 110% tomar para cada incremento de 5% de la tensión nominal (mínimo 10 puntos). En este rango se encuentra el codo de saturación y por tanto es conveniente tener varios puntos que nos permitan una mejor resolución de la curva.
- c) Por encima del 110% se debe tomar por lo menos dos puntos hasta llegar aproximadamente al 120% de la tensión nominal o en todo caso al máximo permitido por el fabricante.
- d) La lectura de la tensión entre líneas, debe tomarse de las tres fases con el fin de verificar el balance de fases. Estas lecturas deben realizarse bajo condiciones constantes de excitación y velocidad.
- e) El generador debe mantenerse operando en un determinado punto de tensión por varios minutos para permitir que se estabilice la velocidad y la excitación, pues una variación de estos puede causar un error de lectura.
- f) Cuando la tensión sobrepase el 110% las lecturas deben realizarse lo más rápido posible.

La curva característica de vacío puede graficarse para solo una tensión de línea o con el promedio de las tensiones de fase, para cada valor de la corriente de excitación, ver la figura 15. El diagrama de conexión esta detallado en la figura 16.

Con esta curva característica es posible hallar la tensión generada internamente para cualquier corriente de campo del generador. Nótese que al comienzo la curva es casi perfectamente lineal decayendo a mayores corrientes de campo.

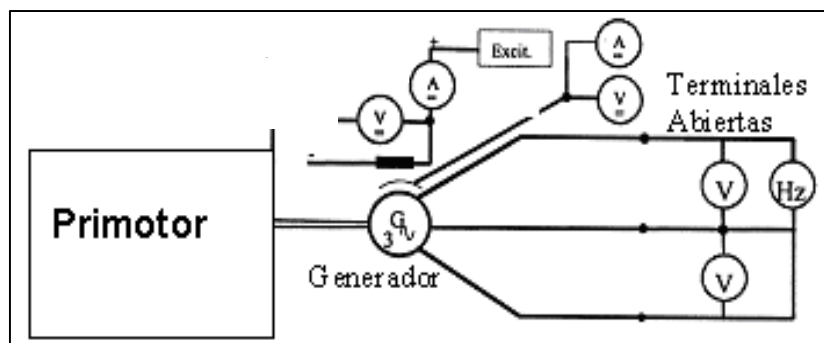
Esto se debe a que al principio el hierro no saturado de la armadura de la máquina síncrona presenta una reluctancia varios miles de veces más pequeña que la reluctancia del entrehierro, así que al principio casi toda la fuerza magnetomotriz se establece sobre el entrehierro, dando como resultado el aumento del flujo en forma lineal. Cuando se satura el hierro, su reluctancia aumenta dramáticamente, el flujo aumenta con mayor lentitud con el incremento de la fuerza magnetomotriz. La parte recta y su extensión se denomina línea del entrehierro.

Figura 15. Curva de vacío



Fuente: Ing. Ronal Antara. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono.

Figura 16. Conexión para prueba de vacío

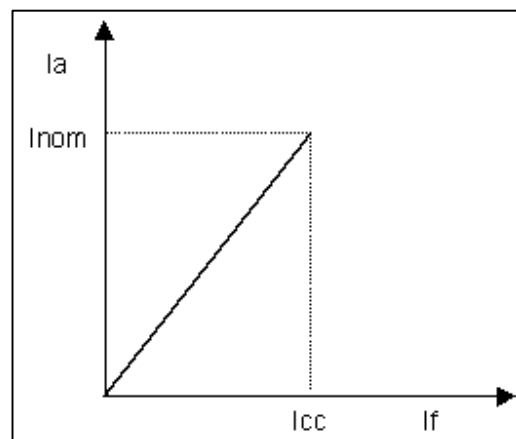


Fuente: ABB Industry Oy. Synchronous machines description of type tests

3.2 Prueba de cortocircuito

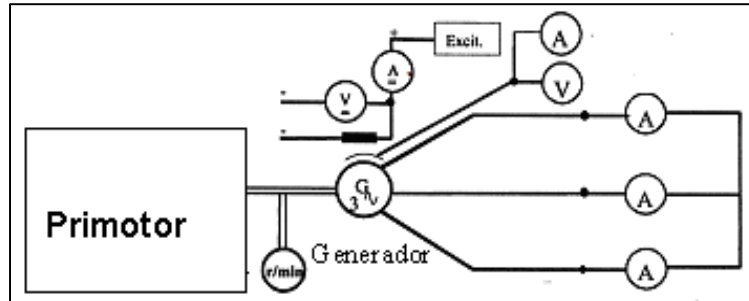
La prueba de cortocircuito consiste en obtener valores de corriente de armadura debido a la excitación (I_f) en el rotor cuando este se encuentra girando a la velocidad síncrona. Las lecturas a registrar de la corriente de armadura serán para los valores de 125%, 100%, 75%, 50% y 25% del valor nominal de la corriente de armadura. La prueba con el valor máximo tradicional de 125% debe ser obtenido por el mismo fabricante, debido a que el enfriamiento en el estator en algunas máquinas no permite una operación sobre el 100% de la corriente nominal sin que exista riesgo de daño en la máquina. La gráfica derivada del ensayo de cortocircuito se conoce como característica de cortocircuito y se puede observar en la figura 17, el cual es prácticamente rectilíneo. El diagrama de conexión esta indicado en la figura 18.

Figura 17. Curva de cortocircuito



Fuente: Ing. Ronal Antara. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono.

Figura 18. Conexión para prueba de cortocircuito

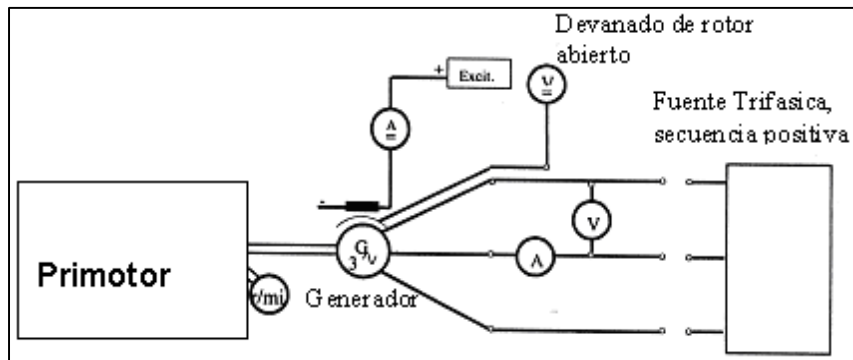


Fuente: ABB *Industry Oy. Synchronous machines description of type tests*

3.3 Prueba de deslizamiento

La prueba de deslizamiento consiste en hacer girar el rotor a una velocidad ligeramente diferente a la velocidad síncrona, con el circuito de campo abierto y los bobinados del estator energizados con una fuente de potencia trifásica, de secuencia positiva, balanceada, a frecuencia nominal y tensión debajo del codo de saturación vista en la curva de vacío (aproximadamente a un 25% de la tensión nominal). El esquema de la prueba se observa en la figura 19. Se deben registrar lecturas de la corriente de armadura, tensión de armadura y la tensión inducida en el rotor mediante un voltímetro. También es posible utilizar oscilogramas u osciloscopios. La diferencia de velocidades entre el campo giratorio que las corrientes del inducido generan y la velocidad del rotor, da lugar a que alternativamente los ejes del campo del inducido coincidan con los polos inductores o estén en cuadratura con estos.

Figura 19. Conexión para prueba de deslizamiento



Fuente: ABB Industry Oy. Synchronous machines description of type tests

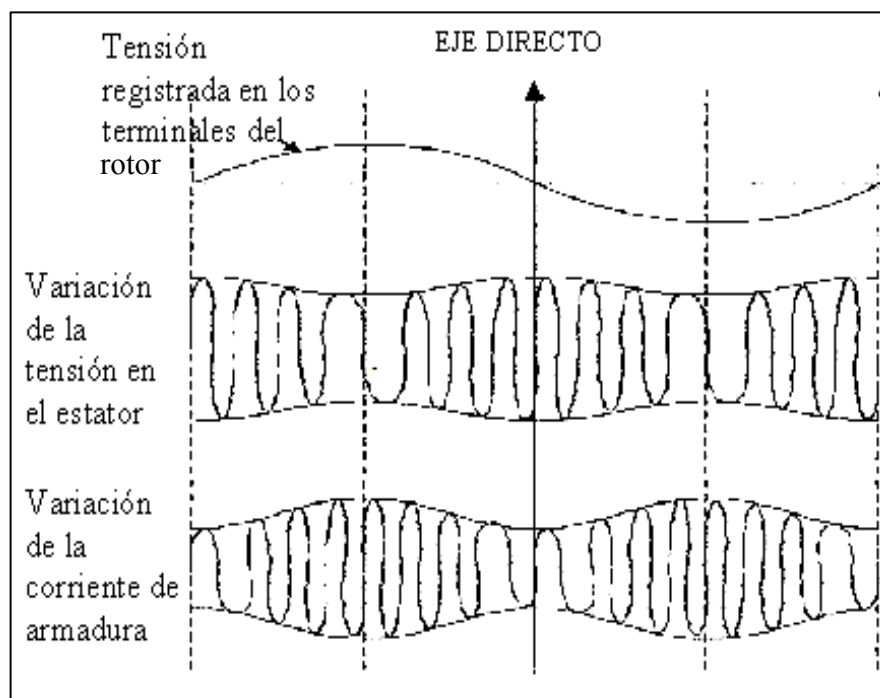
Cuando ambos ejes coinciden, la fuerza magnetomotriz del inducido actúa sobre el circuito longitudinal de reluctancia mínima, por lo tanto el flujo será máximo, en tanto que cuando están en cuadratura actúa sobre el circuito transversal de reluctancia máxima. A continuación se dan algunas recomendaciones para la ejecución de esta prueba:

- a) En la práctica se presentan dificultades para mantener constante la velocidad cercana a la velocidad síncrona, debido al efecto de los polos salientes y a las corrientes inducidas en los devanados de amortiguamiento los cuales producen torques pulsantes. En estos casos es recomendable realizar una serie de lecturas para diferentes deslizamientos partiendo del deslizamiento más pequeño con el cual se logra mantener la velocidad constante.
- b) La velocidad de giro del rotor puede ser mayor o menor respecto de la velocidad síncrona, se pueden tomar lecturas para deslizamientos de 1%, 2% y 3%.

- c) La tensión inducida en el circuito de campo puede tomar valores altos debido a deslizamiento grandes. Estos casos se presentan para deslizamientos mayores al 5%.

Se registran lecturas simultáneas por los valores máximo y mínimo de tensión y corriente de la armadura. La tensión mínima y la corriente máxima ocurren cuando la tensión en el campo es máxima, mientras que sucede lo contrario cuando la tensión en el campo para por cero, ver la figura 20.

Figura 20. Variaciones de tensión y corriente (prueba de deslizamiento)



Fuente: Ing. Ronal Antara. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono.

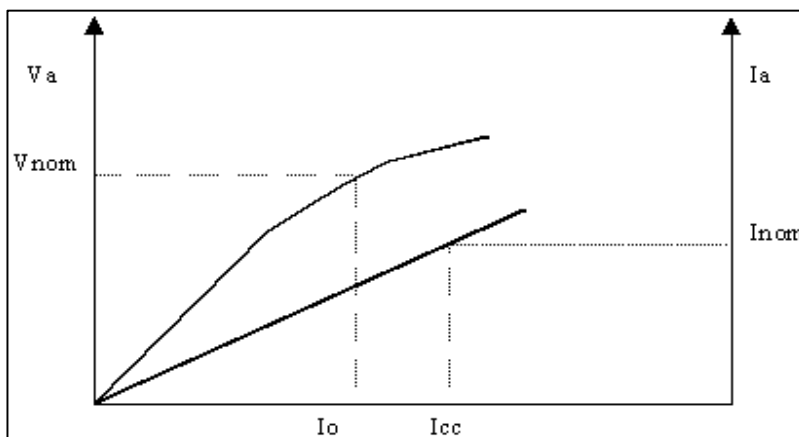
3.4 Determinación de los parámetros de reactancias síncronas (x_d , x_q)

En esta parte se detallan los pasos a seguir para determinar las reactancias síncronas en un generador de polos salientes, cabe mencionar que el caso de un generador de polos lisos la reactancia síncrona es igual a la reactancia en el eje directo por lo que solo bastara con encontrar este parámetro.

3.4.1 Determinación de la reactancia síncrona en el eje directo (x_d)

La reactancia síncrona no saturada se calcula a partir de las curvas características de vacío y cortocircuito tal como se muestra en la figura 21.

Figura 21. Curvas características de vacío y cortocircuito



Fuente: Ing. Ronal Antara. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono.

Por tanto la reactancia síncrona en el eje directo no saturada se determinara a partir de la siguiente relación:

$$X_d = I_{cc}/I_o$$

Donde:

X_d : Reactancia síncrona en el eje directo no saturado.

I_{cc} : Corriente de cortocircuito para la corriente nominal en la armadura.

I_o : Corriente de vacío no saturada para la tensión nominal en la línea del entrehierro.

Este valor también equivale a la reactancia síncrona para el caso del generador de polos lisos.

3.4.2 Determinación de la reactancia síncrona en el eje de cuadratura (x_q)

Para la determinación de este parámetro se hará uso de los resultados obtenidos en la prueba de deslizamiento así como el valor de X_d encontrado en el paso anterior. A partir de los valores máximos y mínimos de la corriente y tensión de armadura obtenidas de la prueba de deslizamiento, podemos encontrar las reactancias sincrónicas saturadas X_{ds} y X_{qs} mediante las siguientes relaciones:

$$X_{ds} = E_{\text{máx}}/I_{\text{mín}} \quad X_{qs} = E_{\text{mín}}/I_{\text{máx}}$$

Luego el valor de la reactancia en cuadratura no saturada se determinará a través de la siguiente relación:

$$X_q = X_d (X_{qs}/X_{ds}) = X_d (E_{\text{mín}}/E_{\text{máx}})(I_{\text{mín}}/I_{\text{máx}})$$

Todos los valores de reactancias encontrados están dados en por unidad sin embargo, si el objetivo es encontrar el valor de la reactancia síncrona en el eje de cuadratura no saturado, se pueden utilizar los valores reales de tensión y corriente, debido a que estos solo expresan una relación en la ecuación.

3.5 Prueba de calentamiento

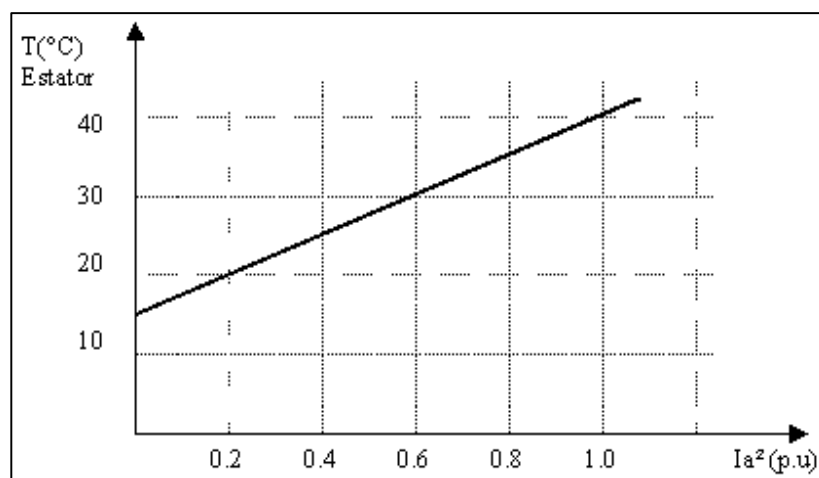
La prueba de calentamiento se realizan para determinar el incremento de temperatura bajo alguna referencia, esta temperatura de referencia puede ser la temperatura ambiente o temperatura de ambiente interno. Tal temperatura depende del modo mediante el cual la máquina es refrigerada. Las practicas internacionales sugieren que el término Temperatura Refrigerante es una forma aceptable de describir esta condición referencial.

La prueba se realiza con la máquina operando en cualquiera de las muchas condiciones de carga, la información requerida es el incremento de temperatura en puntos específicos de carga. El método preferido para hacer la prueba de temperatura es mantener constante las condiciones específicas de la corriente de armadura, potencia, tensión y frecuencia hasta que la máquina alcance una temperatura constante, mientras tanto se deben ir tomando lecturas cada media hora o menos.

La máquina debe operar sin el regulador de tensión para lograr que la corriente de excitación sea constante. Sin embargo la experiencia ha demostrado que es difícil mantener constante la tensión, algunos procedimientos viables han buscado superar este problema graficando la potencia aparente al cuadrado en lugar de la corriente al cuadrado todo en por unidad, contra el incremento de la temperatura, ver la figura 22.

El uso de la potencia presenta limitaciones para ciertos diseños de máquinas en las cuales se dan pérdidas diferentes a tensiones diferentes o pérdidas desiguales para corrientes diferentes.

Figura 22. Curva característica de la temperatura del bobinado de armadura contra la corriente de armadura al cuadrado



Fuente: Ing. Ronal Antara. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono

Se presentan las siguientes recomendaciones para las pruebas de calentamiento:

- a) Mantener la tensión en bornes entre $\pm 2\%$ del valor específico durante la prueba.
- b) Realizar una serie de pruebas con varios valores de tensión cerca del valor específico e interpolar los resultados utilizando métodos de regresión lineal.

c) Se deben registrar temperaturas para diferentes valores de corriente de armadura o en su defecto potencia, por ejemplo 25%, 50%, 75% y 100% del valor nominal.

Finalmente a partir de esta prueba podemos determinar el límite de corriente máxima en la armadura, tomando en cuenta la clase de aislamiento, los valores máximos de temperatura aceptables de acuerdo a la operación y los incrementos de temperatura cuando varia la corriente o en todo caso la potencia.

4. DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CAPACIDAD POR MEDIO DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS A UN GENERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES

4.1 Datos del generador síncrono de polos salientes

Los siguientes datos corresponden al generador número 11 de la barcaza ENRON 2 de la planta Puerto Quetzal Power L.L.C. situada en Puerto Quetzal, Escuintla, Guatemala. Ver fotografías del generador en el apéndice 1.

- Marca : ABB
- Tipo : HSG 900LS10
- Polos : 10
- Potencia aparente nominal : 7375KVA
- Factor de potencia : 0.8
- Voltaje nominal : 13800V
- Frecuencia : 60Hz
- Corriente nominal : 309A
- Velocidad nominal : 720rpm
- Velocidad de embalamiento : 864rpm
- Relación de cortocircuito : 0.77
- Clase de aislamiento : F
- Excitación sin carga : 3.0A / 25.5V
- Excitación a plena carga : 9.4A / 80.0V
- X_d : 1.30 p.u.
- X_q : 0.625 p.u.

4.2 Prueba de vacío

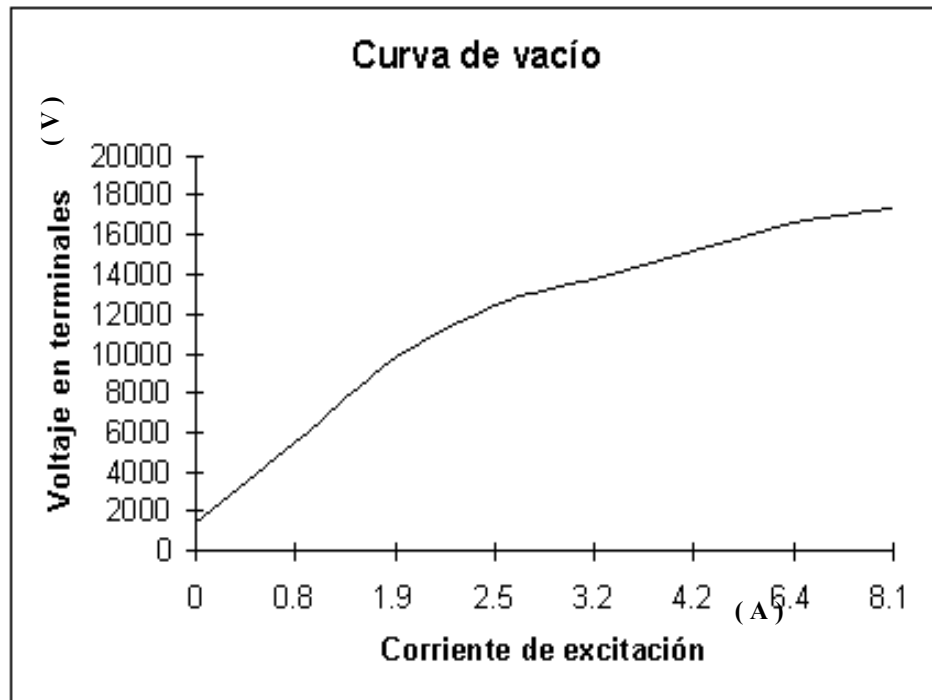
Para obtener los valores de la prueba en vacío, se realizó la conexión que se presenta en la figura 16, a velocidad sincrónica, debido al costo que representa tener a un generador de una potencia aparente de 7.3MVA trabajando en vacío, se utilizaron las especificaciones IEC 60034-4 equivalentes a IEEE115, dichas especificaciones son las utilizadas por la empresa que realiza las pruebas de montaje de este tipo de generadores. Ahora los valores que nos interesan son 1.3, 1.2, 1.1, 1.0, 0.9, 0.7, 0.4, 0.1 veces el voltaje nominal del generador, o valores que se aproximen lo más posible, se debe tomar en cuenta que el punto de cero excitación tendrá un valor de tensión, debido a la remanencia magnética. El panel que da el resultado de voltaje contra corriente de excitación, nos da el promedio de las tres fases, evitándonos el medir cada fase y realizar un promedio.

Los datos obtenidos en la prueba de cortocircuito del generador síncrono de polos salientes son los siguientes:

Tabla I. Valores obtenidos de la prueba de vacío

RELACIÓN	VOLTAJE (V)	CORRIENTE DE EXCITACIÓN (A)
1.26	17400	8.1
1.2	16600	6.4
1.1	15180	4.2
1	13800	3.2
0.9	12420	2.5
0.7	9732	1.9
0.4	5508	0.8
0.1	1440	0

Figura 23. Curva de vacío del generador síncrono bajo prueba



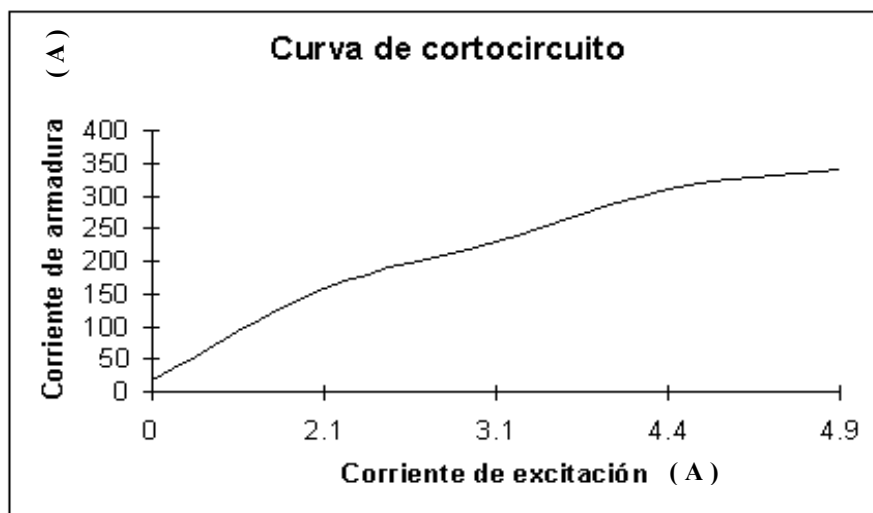
4.3 Prueba de cortocircuito

Para la prueba de cortocircuito se utilizó la conexión que aparece en la figura 18, a velocidad sincrónica, también se utilizó el criterio de IEC 60034-4, considerando 1.1, 1.0, 0.75, 0.50, 0.25 veces la corriente de armadura nominal. Los valores obtenidos en esta prueba son:

Tabla II. Valores obtenidos de la prueba de cortocircuito

Relación	Corriente de Armadura (A)	Corriente de Excitación (A)
1.1	341	4.9
1	310	4.4
0.74	229	3.1
0.51	158	2.1
0.05	18	0.0

Figura 24. Curva de cortocircuito para el generador bajo prueba



4.4 Prueba de calentamiento

Para dicha prueba se obtuvieron los datos del generador cuando se le practica la prueba de carga o proceso de carga, en este proceso se le fijan valores de potencia por periodos de 40 minutos para monitorear valores importantes para la operación del generador.

Los datos obtenidos son para potencias de 1MW, 2MW, 3MW, 4MW, 5MW, donde se obtuvieron corrientes en los devanados de armadura y su respectiva temperatura. Los datos obtenidos son los siguientes para la fase A:

Donde (I_a) es la corriente de armadura de la fase A en amperios y T es la temperatura del devanado de la fase A en °C.

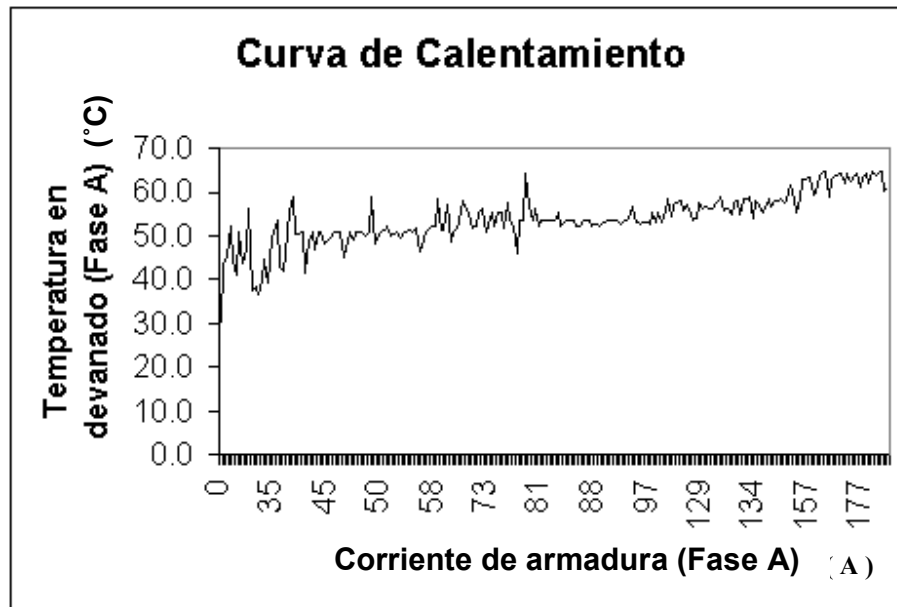
Se utilizó el valor normal de corriente de armadura, sin elevar este valor al cuadrado para realizar la gráfica de temperatura contra corriente de armadura, los puntos donde hay cambios abruptos de temperatura se deben a los períodos de descanso de la máquina.

Debido a que estos datos fueron obtenidos durante un proceso en el cual la máquina es llevada a un valor de potencia y se le deja por 40 minutos y luego se le lleva al vacío durante 10 minutos, podemos observar que hay puntos en los cuales la temperatura pareciera tener abruptos comportamientos, si se aíslan los datos para determinados valores, eliminando los datos en los cuales la máquina era llevada al vacío, podríamos obtener una gráfica más lineal.

Tabla III. Valores obtenidos de la prueba de calentamiento o carrera térmica

la (amp.)	T	la	T	la	T	la	T
0	30.6	48	51.0	73	55.4	91	53.5
16	43.3	48	50.9	74	52.2	91	55.2
19	45.6	48	50.9	74	55.2	93	56.7
19	52.2	49	50.1	74	55.2	94	52.9
20	44.3	49	51.0	75	51.6	94	52.9
22	40.9	49	58.9	75	57.4	95	53.0
22	50.8	50	48.1	76	53.6	95	53.2
23	43.8	50	49.4	76	52.0	97	52.7
25	47.2	50	51.0	78	46.0	97	55.3
25	56.4	50	51.1	78	53.5	106	53.1
28	37.7	50	52.1	78	53.5	112	55.4
28	38.6	51	50.2	78	64.5	114	53.3
29	36.6	51	50.6	78	56.8	120	55.9
29	40.2	51	51.0	79	53.4	120	58.6
29	44.8	52	49.8	79	56.5	123	54.4
30	39.4	52	51.0	80	52.3	123	57.0
31	49.9	53	51.1	81	53.5	123	57.7
35	50.8	53	51.2	81	53.5	123	58.0
35	53.6	54	51.0	81	53.6	124	55.7
36	42.7	54	51.8	81	53.6	124	57.3
37	42.2	55	46.4	81	53.6	125	56.0
38	51.0	56	47.8	81	55.3	126	53.6
38	55.9	56	51.0	82	52.1	127	54.2
38	59.0	56	51.2	82	53.1	128	57.6
39	50.5	57	52.0	82	53.5	129	56.0
40	50.3	58	52.2	82	53.6	129	56.8
41	51.0	59	58.3	83	53.5	130	56.1
42	41.6	60	51.3	84	52.0	130	56.3
42	49.3	61	51.4	85	52.4	130	57.2
42	51.0	61	57.0	87	53.5	130	58.1
43	46.8	63	48.7	87	53.5	131	58.8
43	50.8	63	50.9	87	53.6	131	55.7
44	50.9	63	51.5	87	52.3	131	56.4
45	48.4	64	53.5	88	52.5	132	54.7
45	49.2	64	57.8	88	52.4	132	57.4
45	49.6	65	55.6	88	52.6	132	57.9
45	50.8	66	55.3	89	53.3	133	54.9
46	50.8	69	51.7	89	53.5	133	58.3
46	50.9	70	52.1	89	53.6	133	58.5
47	45.1	70	55.2	89	53.6	133	58.7
47	47.5	70	56.4	90	53.6	134	53.8
47	50.9	73	50.9	91	52.7	134	58.2

Figura 25. Curva de carrera térmica



4.5 Interpretación de los resultados de las pruebas

- El valor de corriente de excitación que proporciona un voltaje nominal en terminales es 3.2A.
- El valor de corriente de excitación que proporciona una corriente de armadura nominal es de 4.4A.
- La relación de cortocircuito para este generador es $3.2/4.4 = 0.73$
- Por lo tanto el valor de X_d es igual al inverso de la relación de cortocircuito $1/0.73 = 1.37p.u.$

- El valor correspondiente a X_q lo obtenemos por una simple relación proporcional, $X_q = 0.66p.u.$
- La potencia de la máquina primotora esta en el rango de 5.5 a 6.2 MW.
- Podemos notar una pequeña disminución en la relación de cortocircuito lo cual se puede interpretar como un leve aumento en la reactancia tanto del eje directo como del eje de cuadratura, esto a su vez también afecta las curvas de vacío y cortocircuito, alcanzándose la saturación del generador en un punto mas bajo. Existe una disminución en la capacidad de la máquina de entre el 3 al 5% de la capacidad original. Además al disminuir la relación de cortocircuito, a un valor dado de potencia activa corresponderá un menor valor de potencia reactiva que con el valor original.
- La disminución en la capacidad del generador se debe a muchos factores:
 - Sobrecalentamientos que ha sufrido el generador
 - Ambiente marino
 - Ambiente de altas temperaturas
 - Probables operaciones inadecuadas
 - Envejecimiento natural de los materiales que lo constituyen

4.6 Construcción de la curva de capacidad para el generador con los datos obtenidos

Los pasos a seguir para la construcción de dicha curva de capacidad son los mismos que se nombran en los puntos 2.1 y 2.2, tomando en cuenta lo siguiente:

- a) Valor de la potencia del primotor entre 5.5 y 6.2MW

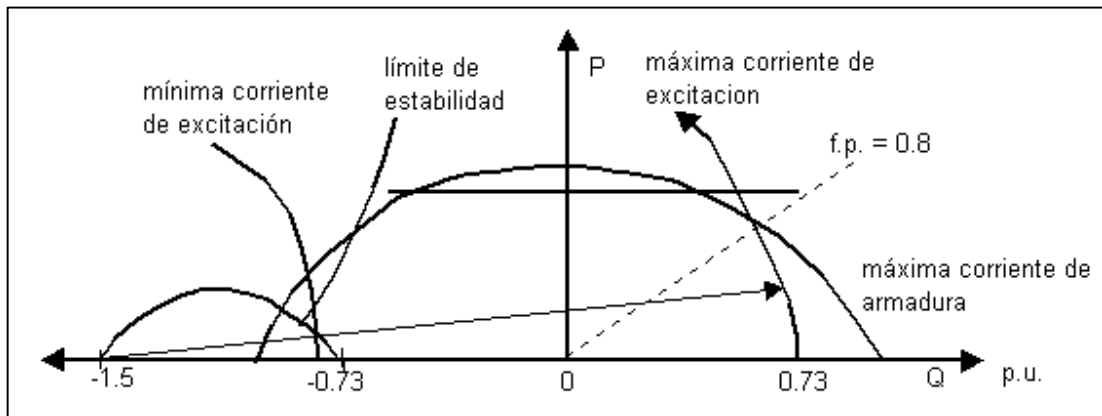
- b) Valor de la relación de cortocircuito de 0.73
- c) Valor de reactancias $X_d = 1.37$ y $X_q = 0.66$ p.u.
- d) Considerar los nuevos puntos de corriente de excitación para determinar corriente de excitación máxima y mínima.
- e) En esta carta de operación nos interesa el cuadrante donde tenemos al generador trabajando con un factor de potencia en atraso (inductivo), donde entrega tanto potencia activa como potencia reactiva.
- f) La parte que corresponde a la estabilidad, ya que se encuentra en el cuadrante donde el generador trabaja con factor de potencia en adelanto y a mínima corriente de excitación, solo se representara el lugar geométrico donde debe estar.
- g) Consideraremos 13,800 Voltios como 1p.u. y 309 Amperios como 1p.u., esto quiere decir que la capacidad del generador 7375KVA es igual a 1p.u.
- h) Los datos a graficar son los siguientes:
- El valor de $-V_a^2/X_q$ es igual a $-1/0.66 = -1.51$ p.u. que corresponde al punto más alejado del origen de donde parte el radio para la corriente máxima de excitación y la corriente mínima de excitación.
 - El valor de $-V_a^2/X_d$ es igual a $-1/1.37 = -0.73$ p.u.

- Para calcular el valor de la corriente de excitación máxima utilizamos $V_a \cdot E_{a_{m\acute{a}x}} / X_q$, el valor de V_a es 1p.u., el valor de X_q es 0.66p.u., ahora el valor de $E_{a_{m\acute{a}x}}$ se calcula de la curva de vacío, utilizando los valores que se encuentran después del punto de saturación y aplicando una sencilla regla de tres, obtenemos que el valor máximo de E_a se alcanza cuando la corriente de excitación es máxima, es decir 9.4A, este valor es aproximadamente 20.192KV, que equivale a $20.192/13.8 = 1.47$ p.u., así ya tenemos todos los valores para calcular el radio de corriente de excitación máxima, el radio es igual a $1 \cdot 1.47 / 0.66 = 2.23$ p.u., a partir del punto -1.51 p.u., lo cual da en el eje Q un valor de 0.73p.u., como valor máximo del radio sobre ese eje, y partir de ahí se traza una circunferencia hasta que intercepte la curva de corriente de armadura máxima.
- La corriente de armadura máxima se representa como una semicircunferencia de radio 1p.u.
- Dado que la potencia máxima que puede entregar el primotor es de 6.2MW, trazamos una línea paralela al eje Q, igual a $6.2/7.375 = 0.84$ p.u. como valor máximo de P en un factor de potencia igual a 1.
- La corriente mínima de excitación se calcula con la siguiente expresión $V_a \cdot E_{a_{m\acute{i}n}} / X_q$, para conocer el valor de $E_{a_{m\acute{i}n}}$ debemos estimar un valor de corriente de excitación mínima entre 5 y 10% del valor de carga nominal, de igual manera nos auxiliamos de la curva de vacío, y para una corriente de excitación de entre 0.8 y 0.94A, obtenemos un voltaje de 6.47KV, lo cual corresponde a 0.47p.u.

- Ahora el radio para la corriente de excitación mínima es $1 \cdot 0.47 / 0.66 = 0.71$, lo que corresponde al punto -0.8 sobre el eje Q, desde ese punto trazar una circunferencia hasta que intercepte la curva de corriente de armadura máxima.

La estabilidad práctica de la máquina debe encontrarse entre el valor de corriente mínima de excitación y el punto donde se intercepta la corriente de armadura máxima y la potencia del primotor, ya que este tipo de generadores son para suministrar tanto potencia activa como reactiva al sistema, difícilmente llegue a tener un factor de potencia en adelanto, por lo cual el límite de estabilidad puede colocarse sin ningún problema entre los puntos antes mencionados.

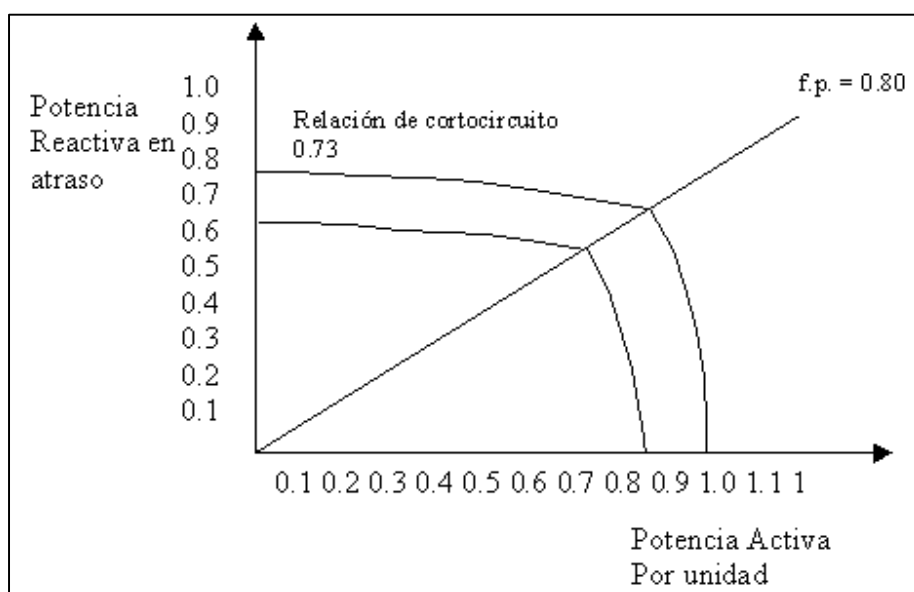
Figura 26. Curva de capacidad para el generador puesto a prueba



A continuación se presenta otra forma de presentar la curva de capacidad, este tipo de curva es la que encontramos comúnmente en libros, donde no se considera la potencia de la máquina primotora. Sólo se utiliza la relación de cortocircuito y el factor de potencia, para marcar los puntos. Para una potencia activa de 1 p.u. corresponderá una potencia reactiva de $1 \cdot 0.73$ donde 0.73 es la relación de cortocircuito.

El punto donde ambas circunferencias se encuentran es el punto del factor de potencia del generador. Y así se trazan las demás circunferencias para distintos valores de potencia activa.

Figura 27. Curva de capacidad para generador bajo prueba, con relación de cortocircuito de 0.73 y factor de potencia 0.80



4.7 Construcción de la curva de capacidad a partir de los datos de fábrica

Para elaborar esta curva se deben seguir los pasos del inciso anterior, los datos que cambian son los siguientes:

- a) Valor de relación de cortocircuito 0.77
- b) Valor de $X_d = 1.30p.u.$

c) Valor de $X_q = 0.625 \text{ p.u.}$

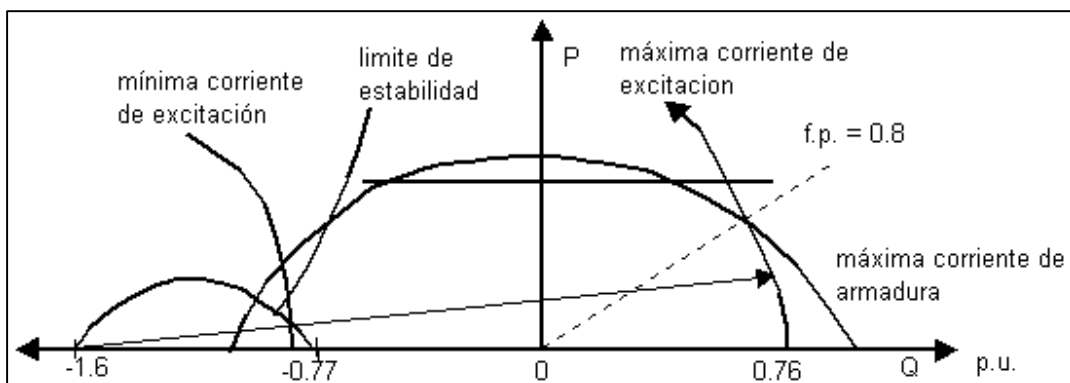
d) Todos los demás valores se pueden considerar los mismos.

e) Los datos a graficar son los siguientes:

- $-V_a^2/X_d$ es igual a $-1/1.30 = -0.77 \text{ p.u.}$
- $-V_a^2/X_q$ es igual a $-1/0.625 = 1.6 \text{ p.u.}$
- Radio de corriente de excitación máxima $V_a \cdot E_{a_{\text{máx}}}/X_q$ igual a $1 \cdot 1.47/0.625 = 2.36 \text{ p.u.}$ equivalente a 0.76 p.u. en el eje Q
- Radio de corriente de excitación mínima $V_a \cdot E_{a_{\text{mín}}}/X_q$ igual a $1 \cdot 0.47/0.625 = 0.75$ equivalente a -0.85 p.u. en el eje Q.

La curva de capacidad quedaría de la siguiente manera:

Figura 28. Curva de capacidad del generador síncrono basados en los datos de fábrica



Luego de obtener ambas curvas de capacidad podemos ver una pequeña diferencia en el radio de máxima corriente de excitación, así como en la relación de potencia activa y potencia reactiva, a un valor de relación de cortocircuito de 0.77, tenemos 0.77 veces la potencia activa como valor de la potencia reactiva, y a un valor de 0.73 tenemos 0.73 veces la potencia activa como valor de la potencia reactiva, entonces a partir de las curvas de vacío y cortocircuito podemos deducir el cambio en la capacidad del generador con el tiempo.

5. MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE GENERADORES SÍNCRONOS

5.1 Introducción

Debido a los altos costos de mantenimiento que se recargan en los costos de generación, se ha hecho necesario implementar un sistema de mantenimiento diferente a los tradicionales, es decir correctivo y preventivo, que se basa en el estado mecánico de los equipos llamado mantenimiento predictivo.

Los programas de mantenimiento predictivo en generadores síncronos basados en inspecciones mecánicas han sido mejorados por la adición de instrumentos y monitores de vibración, aunque el mantenimiento preventivo ha sido valioso para aumentar la producción y disminuir los tiempos de parada imprevistos, la filosofía de mantenimiento ha evolucionado y la medición directa de la condición de la máquina, es ahora base de los programas de mantenimiento predictivo.

El estudio de los generadores se puede asociar a dos fenómenos que son la vibración y el ruido, cada generador tendrá un nivel de ruido y vibración que puede considerarse normal, si estos niveles aumentan o llegan a ser excesivos, es posible que se deba a un problema mecánico debido a estas características de las máquinas, el mantenimiento predictivo tiene como instrumento fundamental el análisis vibratorio.

El mantenimiento predictivo presenta las siguientes ventajas que la caracterizan sobre otros equipos de mantenimiento.

- a) Incremento en la seguridad de la central: Monitoreo permanente o período de vibración, puede detectar potenciales e incipientes transformaciones destructivas de energía que pone en peligro al personal en planta.
- b) Reducción de costos de mantenimiento: El mantenimiento predictivo garantiza una disminución de costo en el equipo de monitoreado como una función real de la condición de la máquina en el tiempo. El inventario de repuestos puede ser reducido si el generador es apropiadamente monitoreado.
- c) Vida útil de la máquina: Cuando la parte rotativa del generador es monitoreado este podrá operar continuamente hasta que la condición real indique el termino de la vida útil.
- d) Mayor disponibilidad del generador: Las paradas serán programadas sólo cuando sea estrictamente necesario, sin interrupciones sorpresivas de la producción y sin problemas de un mantenimiento imprevisto.
- e) Bajos costos en seguros: Como el sistema de monitoreo garantiza la protección del equipo, los riesgos asumidos son menores, esta característica implica una disminución en los costos de las pólizas.
- f) Incremento de la utilidad: Todos los numerales anteriores enmarcan una disminución real de los costos.

5.2 Definición de los diversos tipos de mantenimiento

5.2.1 Mantenimiento Reactivo (Correctivo) (RM)

El mantenimiento reactivo es un conjunto de actividades que tienen por objeto corregir una falla o avería. Se opera la máquina hasta que falle y luego se hace la reparación. Generalmente el mantenimiento reactivo se deriva a empresas o talleres particulares.

5.2.2 Mantenimiento Preventivo (PM)

El mantenimiento preventivo es un conjunto de actividades predefinidas y repetitivas, destinado a evitar o reducir fallas en los equipos, minimizar los tiempos muertos de paralización por fallas intempestivas, con el fin de mejorar la confiabilidad de los equipos y la calidad de producción. Está basado en inspecciones periódicas programadas que incluyen ajustes y reemplazos de partes desgastadas y generalmente incluye el arme y desarme del equipo programado.

5.2.3 Mantenimiento Predictivo (PDM)

El mantenimiento predictivo emplea varias tecnologías para determinar la condición del equipo o de los componentes, mediante la medición y el análisis de la tendencia de parámetros característicos de funcionamiento, con el objeto de detectar, analizar y corregir problemas potenciales en los equipos antes que se produzca una falla. Se trata de un sistema de advertencia temprana que nos indica que algo está sucediendo en el equipo, antes de que se pueda oír o estimar.

Los métodos de mantenimiento predictivo implican la capacidad de determinar cuando un generador o componente puede necesitar mantenimiento o reparación. Por lo general, un problema detectado por medio del PDM se puede corregir en un costo entre el 1 al 10% de lo que hubiera costado reparar la avería de un equipo o una reparación global.

5.3 La tecnología del mantenimiento predictivo

En muchas empresas, más del 50% de todas las averías de los equipos se deben a fallas de los rodamientos.

Técnicas de PDM

1. Análisis de vibraciones / monitoreo de vibraciones

Herramientas : Transductores, acelerómetro, detector de impulsos, sondas ultrasónicas, medidores de vibraciones, detector de vibraciones, conjuntos equilibradores, recopilador portátil de datos.

Miden las vibraciones de equipos giratorios, con el objeto de detectar un exceso de vibración que pueda provocar averías en los equipos o en sus componentes. El análisis de las tendencias se emplea para predecir fallas. Software se utiliza para efectuar análisis.

2. Métodos de impulso excitador

Herramientas : Transductores, acelerómetro, detector de impulsos, sondas ultrasónicas, medidores de vibraciones, detector de vibraciones, conjuntos equilibradores, recopilador portátil de datos.

Miden fundamentalmente los impulsos de excitación generados por los cojinetes utilizadas para predecir la resistencia de los rodamientos.

3. Análisis espectrográfico de aceite

Herramientas : Viscosímetro, medidor, espectrómetro, paquete de prueba de lubricación.

Análisis del estado del aceite y del combustible, viscosidad, contaminación, oxidación y determinación de la necesidad de un cambio de aceite.

4. Análisis ferrográfico de partículas

Herramientas : Ferrógrafo de lectura directa, ferrógrafo analítico, ferroscoPIO.

Identificación de diversas aleaciones de partículas de desgaste ferroso y no ferroso y detectan la pieza que presenta un desgaste anormal.

5. Inspección infrarroja

Herramientas : Explorador infrarrojo, cámara de infrarrojo, radiómetro de imágenes térmicas de infrarrojo, termómetro láser de infrarrojo.

Imágenes de infrarrojo de todas las áreas o de los componentes que indican una distribución exacta de la temperatura.

6. Ensayo ultrasonico

Herramientas : Explorador ultrasónico, transmisor ultrasónico, auricular acústico, registradores.

Detecta y mide los niveles de sonido y señales acústicas con el objeto de inspeccionar cojinetes, detectar perdidas de gas, aire, líquidos en trampas de vapor como válvulas o intercambiadores de calor.

7. Termografía medición de temperatura

Herramientas : Termómetros compactos de infrarrojo, con visor de láser, termómetro de bolsillo, termómetro bimetálico de aire/superficie, indicadores de temperatura, termocoplas.

Mide la temperatura de la superficie del generador y de sus componentes.

8. Análisis acústico

Herramientas : micrófono, analizador de frecuencias, medidores de nivel de sonido.

Mide los sonidos normalmente inaudibles para el oído humano, con el objeto de detectar deterioros en los cojinetes y problemas similares. Es también apropiado para medir los niveles de sonido de los equipos, líneas de proceso de la planta en general.

9. Ensayo no destructivo

Herramientas : Termografía infrarroja, liquido penetrante, partícula magnética, ensayo ultrasónico, radiografías.

Prueba los componentes del equipo que resultan sospechosos (por su antigüedad, fragilidad, etc.), estructuras de soporte de carga, etc.

10. Análisis de rayos x

Herramientas : Equipo de rayos X.

Verifica la existencia de grietas, la composición, las inclusiones, etc., en los componentes del equipo, material estructural, producto, parte del ensayo no destructivo.

11. Resistencia eléctrica

Herramientas : Prueba de Megger, analizador de bobinado, medidor de sobretensión, osciloscopio.

Realiza ensayos sobre la integridad dieléctrica del aislamiento entre giros, bobinas y fases. Verifica la existencia de cortocircuitos.

12. Ensayo con tinta penetrante

Herramientas : Diversas tintas, equipos de vacío o de presión.

Verifica la existencia de perdidas, grietas o fracturas en los materiales y sistemas hidráulicos. También se lo emplea en ensayos no destructivos.

Fuente: Ing. Ronal Antara. Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Mantenimiento predictivo de generadores síncronos

5.4 Síntomas típicos de mal funcionamiento

Obtenidos los datos necesarios sobre las amplitudes y frecuencias de una máquina determinada, se efectúa una comparación de las lecturas realizadas contra las frecuencias características de la máquina.

El análisis en frecuencia es el método utilizado para determinar las causas de vibración y detectar el elemento de la máquina causante de tales vibraciones. Esto se logra relacionando las medidas de las frecuencias discretas de la máquina, con las frecuencias características de la misma. A continuación se describen los parámetros mecánicos más comunes en las máquinas, haciendo uso del análisis de frecuencia.

5.4.1 Desbalance

El desbalance es tal vez la causa más común de las vibraciones, la magnitud de la vibración es directamente proporcional a la cantidad de desbalance existente. Generalmente, la mayor amplitud de vibración se registra en el sentido radial (horizontal o vertical) pero en el caso de motores en voladizo puede ocurrir que la máxima amplitud se produzca en el sentido axial, siendo las amplitudes radiales también elevadas.

5.4.2 Desalineamiento de ejes

Es un problema tan común como el desbalance. Como el pandeo de un eje produce efectos semejantes a los del desalineamiento angular. Existen tres tipos posibles de desalineamiento de los acoplamientos:

- Desalineamiento angular, donde las líneas de centros de los ejes se interceptan formando un ángulo.
- Desalineamiento radial, ocurre cuando las líneas de centros de los ejes son paralelas entre sí, pero se hallan no centrados.
- Desalineamiento combinado, cuando se presentan las dos condiciones anteriores conjuntamente.

5.4.3 Rodamientos defectuosos

Los rodamientos (cojinetes antifricción) con defectos en las pistas o elementos rodantes, normalmente ocasionan vibraciones de alta frecuencia, cosa que suele producirse a velocidades varias veces superiores a la velocidad rotatoria del eje que soportan. Generalmente, estas frecuencias se hallan entre 20 y 50MHz.

5.4.4 Cojinetes en planos defectuosos

Los problemas que se encuentran con los cojinetes planos y que producen niveles de vibración elevados, por lo general están asociados con juegos excesivos en los cojinetes, producido por desgaste o por problemas de lubricación. Un cojinete plano con juego excesivo puede permitir un desbalance o desalineamiento relativamente pequeño, u otra fuerza vibratoria, que origine golpeteos y desajustes mecánicos. Cuando se sospeche de daños en cojinetes planos, lo más práctico es efectuar una inspección de los mismos.

5.4.5 Excentricidad

La excentricidad es otra cosa que comúnmente da origen a la vibración en la maquinaria. Este caso no debemos entender por excentricidad una redondez defectuosa sino mas bien el estado que se da cuando la línea central (rotacional) de un eje no es idéntica a la línea central (geométrica) del rotor. Es por eso que se recomienda equilibrar un rotor sobre sus propios cojinetes.

5.4.6 Cojinetes antifricción defectuosos

Los cojinetes antifricción defectuosos de pista, bola o rodillo normalmente ocasionan una vibración de alta frecuencia, cosa que suele producirse a una velocidad varias veces la velocidad rotatoria.

5.4.7 Cojinete de fricción defectuoso

Los problemas que se presentan en los cojinetes de fricción y que producen niveles vibración o ruidos elevados, por lo general son el resultado del juego excesivo de los cojinetes o problemas de lubricación.

5.4.8 Problemas eléctricos

La vibración ocasionada por los problemas eléctricos, normalmente se debe a fuerzas magnéticas desiguales, que pueden obedecer a lo siguiente:

- a) Que el generador no es redondo
- b) Muñones de armadura excéntricos
- c) Desalineamiento del rotor
- d) Barra rota
- e) Devanados abiertos o en cortocircuito

5.5 Programa de mantenimiento predictivo

5.5.1 Personal que necesita información

Personal de operación: Los operadores son responsables en primer por la seguridad y eficiencia en la operación de la planta, así que ellos requieren cierta información, que incluye valores promedio de vibración, niveles de alarma, tendencia de vibración y variables de proceso entre otros. Si un problema esta desarrollándose en una máquina no será responsabilidad del operador diagnosticar el problema específico, esta será labor del departamento predictivo.

Departamento de Mantenimiento mecánico: Los ingenieros de mantenimiento son típicamente responsables por el mantenimiento, paradas programables y labores de reparación. El objetivo fundamental será reducir el número de paradas, extendiéndose el tiempo de operación de la máquina y por lo tanto reduciendo el costo de mantenimiento. Los ingenieros requieren la información para determinar hasta cuando una máquina puede operar, cuál es el tipo de fallas y cuándo será programado el mantenimiento.

Departamento de Mantenimiento predictivo: Los especialistas en máquinas rotativas tienen el objetivo de prevenir serios problemas en máquinas antes de que ello ocurra. Un especialista en máquinas rotativas usualmente requiere un historial completo de la máquina. Esta información es adicionada a la ya existente para el personal de operación y departamento de mantenimiento.

5.5.2 Información necesaria

- Variables de proceso
- Temperatura de cojinetes
- Análisis de lubricantes
- Valores promedio de vibración
- Información dinámica de vibración en estado

5.5.3 Información de la operación de la máquina

- Información continuamente monitoreada
- Información en líneas periódicamente monitoreadas
- Información durante el arranque o parada

Si tenemos acceso a esta información podemos obtener las siguientes ventajas:

1. Se puede asegurar el sistema al mas bajo costo.
2. Se puede asegurar la correcta información, que puede ser obtenida por el personal adecuado en el menor tiempo y formatos apropiados.

Así con toda esta tecnología y conceptos básicos, se puede implementar como mantenimiento alternativo, el mantenimiento predictivo. El costo inicial de este mantenimiento es elevado, pero una vez puesto en marcha, su funcionamiento y su eficiencia en la detección de probables fallos en el generador síncrono, ayuda a reducir costos y mantener repuestos necesarios y no en exceso.

CONCLUSIONES

1. Debido a la importancia de los generadores síncronos en los sistemas de generación de energía eléctrica, es fundamental conocer los parámetros de operación del generador, así como la curva de capacidad del mismo, para no llevar al generador a un punto de operación inapropiado.
2. Practicarle pruebas al generador después de un determinado tiempo de funcionamiento, nos dará información importante acerca de su funcionamiento.
3. La realización de las pruebas de cortocircuito y vacío, nos permite conocer como esta operando actualmente la máquina, ya que con estas pruebas se puede conocer la relación de cortocircuito y a la vez obtener la curva de capacidad del generador.
4. La prueba de carrera térmica, nos da una idea del calentamiento al que se somete la máquina a determinados valores de corriente o potencia, esto a la vez nos permite conocer los límites de operación por temperatura, para que la vida útil de la máquina sea prolongada, dichas temperaturas no deben sobrepasar estos límites.
5. Debido a los altos costos de operación de los generadores, así como los altos costos de mantenimiento, es factible adoptar como alternativa el mantenimiento predictivo, que tiene una inversión inicial elevada, pero que reduce los costos de mantenimiento a largo plazo.

RECOMENDACIONES

1. Debido al avance de la tecnología, es importante tomar en cuenta los nuevos productos para la realización de pruebas y mediciones, así como los distintos programas para computadora, para el análisis de generadores en línea.
2. Conocer el funcionamiento básico de un generador síncrono es importante, hoy en día podemos encontrar mucha información en el internet, sobre su funcionamiento, capacidad, importancia y muchos temas relacionados con la generación de energía eléctrica por medio de generador síncronos.
3. Día a día con mas las empresas que adoptan el mantenimiento predictivo como una alternativa, lo que hace que sea importante conocer la tecnología utilizada para la medición de parámetros en línea, así como mediciones fuera de línea.
4. Cuando se tenga que realizar una serie de pruebas a un generador síncrono, es de vital importancia conocer los datos del fabricante y los diagramas de conexión del mismo, para evitar accidentes o un daño permanente a la máquina, también una mala conexión nos puede llevar a obtener datos erróneos, que no nos darán una información valida del funcionamiento del generador.

BIBLIOGRAFÍA

1. Antara, Ronal. **Protocolo de pruebas del generador síncrono.**
Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Diciembre 2000. 64pp.
2. Antara, Ronal. **Mantenimiento predictivo de generadores síncronos.**
Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. Diciembre 2000. 21pp.
3. Fitzgerald, A.E. y otros. **Máquinas Eléctricas.** 5^a. ed. México: Editorial McGraw-Hill, 1992. 653pp.
5. ABB Industry Oy. ***Synchronous machines description of type tests.***
ABB Group, 2000. 31pp.
6. ABB Stromberg Drives. ***Synchronous generators type HSG.*** ABB Group,
1992. 14pp.
7. Chapman, Stephen J. **Máquinas Eléctricas.** México: Editorial McGraw-Hill
1992.
8. Mcpherson, George. **Introducción a máquinas eléctricas y transformadores.** México: Editorial Limusa, 1987.

APÉNDICE

Figura 29. Vista lateral del generador síncrono bajo prueba

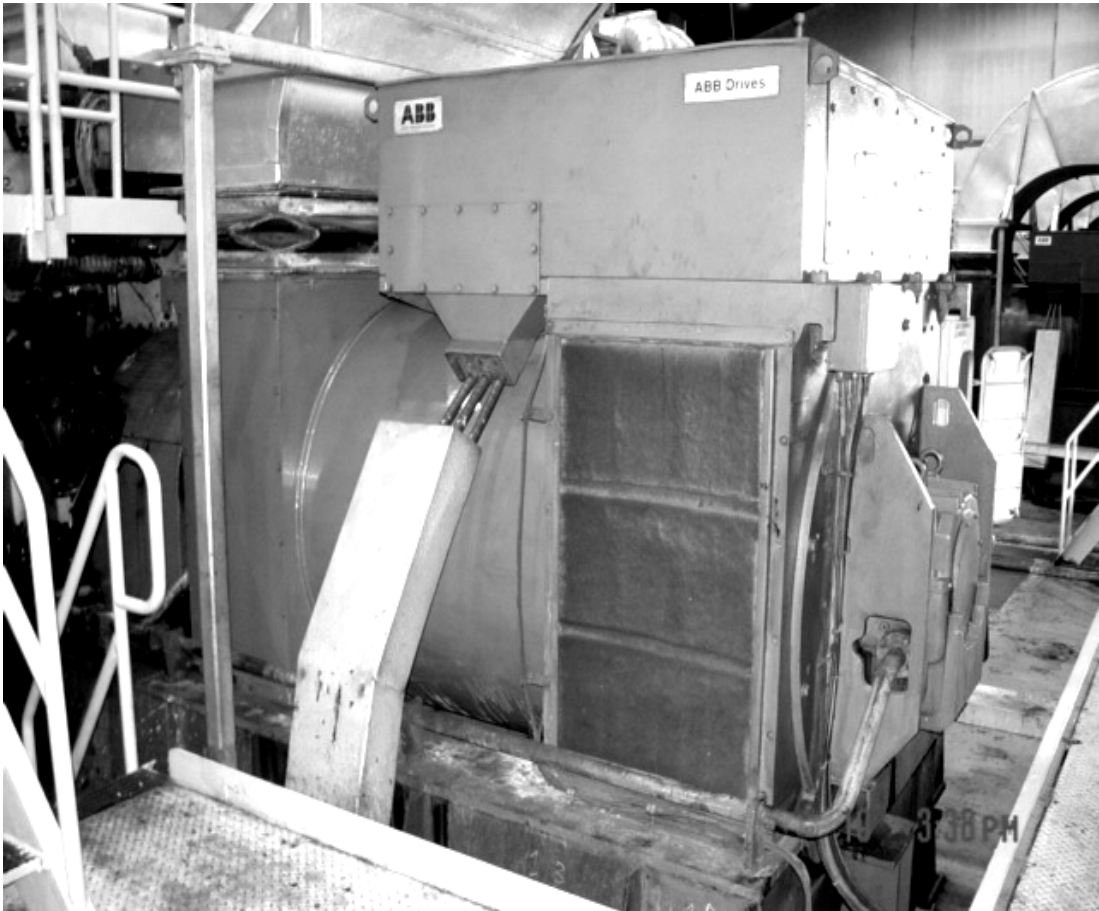


Figura 30. Vista completa del generador bajo prueba y el interior de la barcaza.

