



Facultad Metalurgia- Electromecánica

Departamento de Eléctrica

Trabajo de Diploma

En opción al Título de Ingeniero Eléctrico

Título: *Restablecimiento de la funcionalidad del banco de prueba de generadores sincrónico del laboratorio de máquinas eléctricas*

Autor: *Alberto García Labrada*

Tutor: *Dr. C Ignacio Romero Rueda*

2015-2016

“Año 58 de la Revolución”

Declaración de autoridad.

Yo Alberto García Labrada.

Autor de este Trabajo de Diploma tutorado por el Dr. C. Ignacio Romero Rueda y consultado por el Ing. Yetsy Silva Cala, certifico la propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

Alberto García Labrada
(Diplomante)

Dr. C. Ignacio Romero Rueda
(Tutor)

Restablecimiento de la funcionalidad del banco de prueba de generadores sincrónico del laboratorio de máquinas eléctricas



Alberto García Labrada

PENSAMIENTO

Le corresponde a los profesionales de hoy no solo conocer las dificultades sino también en el campo de las ciencias.

CHÉ

Restablecimiento de la funcionalidad del banco de prueba de generadores sincrónico del laboratorio de máquinas eléctricas



Alberto García Labrada

DEDICATORIA

Dedico este trabajo:

- *A mi madre (Sonia Labrada Labrada)*
- *A mi padre (Alberto García Labrada)*
- *A mi hermana (Anaisa García Labrada)*
- *A toda mi familia en general y amistades, que depositaron su confianza en mí.*
- *A todos los profesores, que durante 5 años me dotaron de conocimiento.*
- *A los estudiantes que para ellos está diseñado*
- *A la revolución cubana.*

AGRADECIMINETOS

Agradecimientos.

La gratitud es deber de todos ser humano; quien ha recibido beneficio, no puede vivir de espalda e indiferente de quien le ha ayudado, Nada más justo será en estos momentos agradecer a mis padres y hermana, por haberme formado como hombre honesto y capaz, a mis amigos y compañeros de trabajo que con su constancia y esmero contribuyeron a la culminación de este trabajo, a mi tutor Dr. C. Ignacio Romero Rueda y mi consultante Yetsy silva cala por la dedicación paciencia y ayuda brindada durante la realización del trabajo, en fin a la revolución cubana. No se puede dejar de mencionar a nuestra Revolución, que gracias a ella contamos con todos los medios posibles para llegar a ser buenos profesionales.

A todos muchas gracias.

RESUMEN

En el presente trabajo se ofrece un análisis sobre las pruebas y ensayos que se pueden realizar sobre una Máquina sincrónica [Máquina Eléctrica Rotatoria II (MERII)] en sus dos regímenes de trabajo, el mismo está enfocado en el banco de prueba para generadores sincrónicos del laboratorio de máquinas eléctrica del instituto superior minero metalúrgico de Moa.

Para consolidar los conocimientos adquiridos en la asignatura de Máquinas Eléctricas Rotatorias II es necesario ejercitar los conocimientos teóricos en el banco de prueba del laboratorio. Este trabajo recoge la propuesta para mejorar la situación actual que presenta esta instalación, así como una guía actualizada para la realización de los laboratorios.

SUMMARY

In this paper an analysis of the trials and tests that can be performed on a synchronous machine [rotating electrical machine II (MERII)] in two working regimes, it is focused on the test bench for synchronous generators offered electrical machines laboratory metallurgical mining higher institute of Moa. To consolidate the knowledge acquired in the course of Rotary Electrical Machines II is necessary to exercise the theoretical knowledge in the laboratory test bench. This work includes the proposal to improve the current situation presents this facility as well as a date for conducting laboratory guide.

Índice	pág.
INTRODUCCION GENERAL	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE ENSAYOS Y PRUEBAS DE LA ASIGNATURA MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATORIA II	4
1.1. Descripción el laboratorio de máquinas eléctricas	6
1.1.2. Levantamiento del puesto de trabajo de MERII	8
1.2. Prácticas de laboratorio	8
1.2.1. Característica de vacío del generador sincrónico.....	8
1.2.2. Característica de cortocircuito del generador sincrónico.....	9
1.2.3. Característica externa del generador sincrónico	10
1.3. Determinación de los parámetros de la máquina sincrónica.....	11
1.3.1. Reactancia sincrónica	12
1.3.2. Valores de reactancia sincrónica para generadores de polos salientes	13
1.3.3. Resistencia de armadura de la máquina	14
1.3.4. Razón de cortocircuito.....	14
1.3.5. Prueba de deslizamiento para determinar las reactancias sincrónicas de eje directo y de eje de cuadratura simultáneamente	15
1.3.6. Reactancia y la Resistencia de secuencia negativa.....	16
1.3.7. Reactancia de secuencia cero	16
1.3.8. Impedancia subtransitoria	16
1.4. Conexión y operación de generadores sincrónicos en paralelo con un gran sistema de potencia.....	19
1.4.1. Operación en paralelo con el sistema	20
1.5. Operación en paralelo de generadores sincrónicos.....	22
1.6. Motor sincrónico	23
1.6.1. Arranque del motor sincrónico	23
1.6.2. Característica en v del motor	24
CONCLUSIONES	25
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.	29
	VI

Introducción	29
2.1. Pasos para la realización de las pruebas	29
2.2. Realización de la característica de vacío	30
2.3 Realización de la característica de cortocircuito.	32
2.4. Práctica 2 determinación de parámetros de la máquina sincrónica.....	35
2.5. Práctica 3 conexiones y operación en paralelo con un gran sistema de potencia.	38
2.6 Práctica 4 motor sincrónico.....	40
2.7 Conclusiones:	42
CAPÍTULO 3. RESULTADOS OBTENIDOS	43
3.1. Preparación para el trabajo de laboratorio.....	43
3.2. Realización del trabajo.....	44
3.3. En la realización del informe a presentar se debe de incluir los siguientes datos.	44
3.4. Medidas de seguridad para el trabajo en el puesto de laboratorio:	45
3.5. Valoración social del trabajo	47
3.6 Conclusiones	49
Conclusiones Generales.....	50
Recomendaciones.....	51
Bibliografía	52
Anexos	53

INTRODUCCION GENERAL

De acuerdo con estudios realizados se ha podido comprobar que la mayor cantidad de energía eléctrica generada a nivel mundial corresponde a los generadores sincrónicos. Dada la importancia económica que tiene la generación de energía eléctrica es de vital importancia la correcta realización de cada uno de sus ensayos y pruebas tanto así como su mantenimiento, ya que esto le incrementaría su vida útil y le permite trabajar a plena capacidad.

En Cuba, según la Unión Nacional Eléctrica (UNE) la generación de energía eléctrica a gran escala donde se calientan las líneas de transmisión que forma parte del Sistema Eléctrico Nacional y a pequeña escala, se emplean alternadores acoplados a motores de combustión interna, que se utilizan como equipos de emergencia en hospitales, aeropuertos, centrales telefónicas entre otras, y que entran en servicio en el momento que falta la tensión de la red (grupos electrógenos). También se aplican estos grupos en el suministro de energía a instalaciones remotas o aisladas, alejadas de las redes de distribución, como es el caso de ciertas aplicaciones rurales: subestaciones de rebombeo, cooperativas, etc. Como ya se ha indicado antes, las Máquinas Eléctricas Rotatorias II (MERII) son susceptibles de funcionar también convirtiendo la energía eléctrica en mecánica, lo que da lugar al régimen de marcha como motor síncrono. Estos motores se emplean en aquellos accionamientos industriales que requieren velocidades de transmisión constantes, teniendo además la ventaja frente a los motores asíncronos de poder regular simultáneamente el factor de potencia (fp) con el cual trabaja, lo que es de gran importancia en cierto tipo de industrias ya que se evita la colocación de condensadores para reducir la potencia reactiva absorbida por la instalación. Cuando la máquina síncrona trabaja con fp capacitivo se dice que funciona como compensador o condensador síncrono, mejorando el fp de la red.

En el trabajo con las MERII es muy común para su mantenimiento la realización de ensayos y pruebas para ver su funcionamiento, determinación de las pérdidas, rozamientos, calentamiento excesivo y demás causas fuera de lo normal en el funcionamiento de la máquina.

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos por su sigla en inglés (IEEE) en la norma (IEEE, 1983) ofrecen las recomendaciones prácticas para el trabajo con generadores sincrónicos. La IEEE-11ROTATING ELECTRICAL MACHINES 2 {IEEE Standard 112., 2004 #78}, estándar para el ensayo de generadores sincrónicos especifica el procedimiento para la realización de las mismas.

Con la presencia del banco de pruebas de generadores sincrónicos (BPGS) en el instituto una vez puesto en funcionamiento y los resultados de investigaciones de autores que han dedicado tiempo y esfuerzo en el tema se pueden desarrollar “ciertas” pruebas sobre él. Con estas posibilidades reales de investigación se puede desarrollar con excito la mayoría de los ensayos y pruebas sobre las MERII.

Situación problemática:

El banco de prueba instalado en el laboratorio de máquinas eléctricas es obsoleto, de tecnología soviética, los dispositivos de pruebas están fuera de rango y especificaciones, no existen procedimientos, normas o documento alguno que sirva de guía para realizar los ensayos del banco de prueba del generador sincrónico.

Problema de investigación:

Se dificulta la realización de las prácticas de laboratorio en el banco de pruebas de generadores sincrónicos para el logro de las habilidades en la asignatura MERII.

Campo de acción:

Metodología para realizar los ensayos en el banco de pruebas de generadores sincrónicos.

Objeto de estudio:

Banco de prueba del generador sincrónico.

Hipótesis:

Si se restablece la funcionalidad del banco de prueba de máquina sincrónica y se establece una metodología para realizar los ensayos, es posible realizar las prácticas de laboratorio de la asignatura MERII y que los estudiantes adquieran las habilidades correspondientes a la misma.

Objetivo general:

Restablecer la funcionalidad del banco de prueba del generador sincrónico y establecer la metodología para realizar los ensayos para garantizar que se realicen las prácticas de laboratorio.

Objetivos específicos:

- Describir el tema para establecer el estado del arte y desarrollar los procedimientos
- Escribir los procedimientos de prueba para realizar cada uno de los ensayos
- Recuperar la funcionalidad de los elementos dañados

Tareas específicas:

- Consultas a la literatura relacionada con las máquinas sincrónicas
- Mejoras del puesto de trabajo. Así como definir las posibles prácticas a realizar
- Edición de los materiales complementarios para realizar las prácticas de laboratorio

Aportes del trabajo:

- Procedimiento para la realización y documentación de las pruebas y ensayos a las MERII
- Aplicación del procedimiento desarrollado como herramienta predictiva

CAPÍTULO 1. Marco teórico

*Restablecimiento de la funcionalidad del banco de prueba de
generadores sincrónico del laboratorio de máquinas eléctricas*



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE ENSAYOS Y PRUEBAS DE LA ASIGNATURA MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATORIA II

Introducción

Dada la gran diversidad de libros y artículos de diferentes autores y por ende de diferentes bases y puntos de vista, es necesario realizar un estudio de los antecedentes bibliográficos que se han publicado relacionados con el objeto de estudio para tener una visión más clara de los ensayos en generadores sincrónicos que sin duda son de gran importancia para el desarrollo de la ciencia y la técnica y por supuesto para el país.

Alfredo Santana Gálvez en conjunto con Ángel Costa Montiel en su libro “Prácticas de máquinas eléctricas III” del año 1988 describen de una metodología para la realización de las pruebas y características de las MERII. Varios trabajos de diplomas se han realizados en el instituto sobre el tratamiento de la disciplina de máquinas eléctricas, una tesis que recoge las principales pruebas que se pueden realizar sobre la disciplina de Máquinas Eléctricas todos los textos muy bien centrados en el tema y de muy buena calidad.

El banco de ensayos y pruebas para las MERII del laboratorio de esta asignatura en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMM), presenta problemas para su explotación: es de tecnología soviética de los años 70, carece de piezas de repuesto, los instrumentos de mediciones están fuera de rango y especificaciones técnicas.

En este capítulo se realizará de forma clara y precisa un análisis de cada una de los ensayos y característica que se realizarán en el puesto de trabajo de generadores sincrónicos (BPGS) del laboratorio de máquinas eléctricas del ISMM.

El material ha sido elaborado sobre la base de las experiencias y resultados alcanzados por un sin número de autores que han plasmado sus conocimientos en destacas obras referidas al tema, las obras son las siguientes.

- Prácticas de laboratorios de máquinas eléctricas III. Colectivo de autores. Redactado por Alfredo Santana Gálvez y Ángel Costa Montiel. Editorial Pueblo y Educación, 1988.
- IEEE guide: Test procedures for Synchronous Machines. March 11, 1882.
- Máquinas Eléctricas, sexta edición. Redactado por A. E. FitzGerald y Charles Kingsley, Jr. Impreso en ADAMSA Impresiones SA, ciudad México en enero 2004.
- IEC 2004, rotating electrical machines. International Electrotechnical commission.
- Máquinas eléctricas, Quinta Edición. Redactado por Jesús Fraile mora. Impreso McGraw-Hill Interamericana de España, S.A.U.
- Electric Machinery Fundamentals, 5th Edition. Redactado por Stephen J. Chapman. Copyright © 2012 McGraw-Hill, Inc.
- Pruebas de máquinas eléctricas, única edición. Redactado por F. Tiberio. Editorial vicens-vives.
- Prácticas de máquinas eléctricas y transformadores, única edición. Redactado por Luis F. Martínez García. Editorial pueblo y educación.

Sería muy difícil de comprender los ensayos que se realizan a una MERII si antes no se definen de forma breve y precisa, como cualquier otro convertidor electromecánico están sometidas al principio de reciprocidad electromagnética, pudiendo funcionar tanto en régimen generador como en régimen motor. Sin embargo, en la práctica de las instalaciones eléctricas es más frecuente su empleo como generadores, para producir energía eléctrica de corriente alterna (alternadores) en las centrales eléctricas a partir de fuentes primarias de energía hidráulica, térmica o nuclear. Su velocidad de rotación n (r.p.m.) está vinculada

fuertemente con la frecuencia de la red de corriente alterna con la cual trabaja, se define por la expresión $n = \frac{60 f}{P}$ donde p es el número de pares de polos de la máquina.

El funcionamiento de una MERII se basa en el surgimiento de tres campos magnético importantes, el campo fundamental creado por la corriente de excitación, campo magnético de armadura creado por el sistema trifásico de corrientes que atraviesan la armadura y un campo resultante creado por la interacción de los dos campos mencionados anteriormente.

Las MERII se clasifican en dos tipos, de polos salientes que son máquinas de baja velocidad, gran número de polos, utilizadas con turbinas hidráulicas. Las MERII de polos interiores, estas son máquinas de altas velocidades, su número de polos oscila entre 2 o 4 polos y son usadas acopladas a turbinas de gas o vapor.

Las MERII, al igual que los demás tipos de máquinas eléctricas cuentan con dos devanados, un devanado trifásico en el estator, inductor o parte fija y un devanado alimentado con corriente continua o inducido, para la excitación de la máquina nada más se induce un voltaje en el devanado de excitación que en el mejor de los casos si se excita con un pulso de corriente directa traerá más beneficios que al excitar con un pulso variable en el tiempo porque se introduce contenido de armónico en la excitación, excitando así con una señal sucia o perjudicial para el sistema.

1.1. Descripción del laboratorio de máquinas eléctricas (LME)

El laboratorio de máquinas eléctricas (LME) perteneciente a la carrera de ingeniería eléctrica se encuentra ubicado en el 1er piso al final del pasillo a la derecha del edificio docente número dos en la facultad de Metalurgia - Electromecánica del Instituto Superior Minero Metalúrgico Dr. C. Antonio Núñez

Jiménez, el cual presenta dimensiones de 15m de largo, 11m de ancho y 2.20m de alto. El mismo tiene como objetivo desarrollar en los estudiantes las habilidades de la disciplina de Máquinas eléctricas mediante experimento que se realizan sobre las máquinas eléctricas, cuenta con dos puestos de trabajo, uno que estudia los motores de inducción y transformadores y un puesto de trabajo número dos que estudia las MERII. El puesto de trabajo número dos que es el objeto de estudio de este trabajo está constituido por un generador sincrónico acoplado a un motor de corriente directa que funciona como motor primario del generador, un auto transformador como fuente de suministro de energía, cuenta con tres interruptores uno de alimentación general, encendido del motor primario, conexión del generador al sistema eléctrico de potencia (SEP). Las mediciones se realizan con voltímetros y amperímetros todos analógicos, fuera de rango y especificaciones. Un fascímetro para determinar la secuencia de fase y sincronoscopio, uno de lámparas y uno de aguja.

El LME lleva más de 10 años sin prestar servicio a estudiantes por clausura, en este trabajo se rescatará tanto al BPGS como a las prácticas de laboratorio que se realizan. Dada la condición económica que presenta el país en estos momentos difíciles no se pueden llevar a cabo todas las prácticas posibles a realizar sobre una MERII pero si las más importante y básicas desde el punto de vista de estudiante para que pueda ver, topar, trabajar con una Máquina eléctrica física y que adquiera experiencia que en una práctica virtual no va a conseguir. Para su reestructuración se trabaja con los medios que se encuentran en desuso en el LME y que estén en mejor estado o que por lo menos funcione mejor que los instalados en el BPGS

Debido al poco uso del LME, la escasez de mantenimiento y la falta de recursos, en el momento de comenzar la recuperación el mismo se encontraba prácticamente deteriorado y desprovisto de elementos para el correcto funcionamiento.

Levantamiento del puesto de trabajo de MERII

Durante la inspección realizada en el BPGS se encontraron los siguientes defectos:

1. Rectificación de corriente en mal estado
2. Cableado en mal estado
3. Extremadamente sucio
4. Empalmes deteriorados por la corrosión
5. Voltímetro de pared con el cristal roto
6. Voltímetro de pared con poco rango para la conexión estrella(0-250)V
7. Conectores sin aislamiento en la cabeza
8. Filtraciones dentro del LME

1.2. Prácticas de laboratorio

Existen múltiples prácticas de laboratorios y pruebas que se realizan sobre una MERII, pruebas de aceite, pruebas de aislamiento, pruebas de temperaturas, pero dada las condiciones del país, del instituto y por ende del LME solo se puede realizar las prácticas que a continuación se describen.

1.2.1. Característica de vacío del generador sincrónico.

La característica de vacío o de circuito abierto, consiste en colocar el generador en vacío es decir sin carga alguna manteniendo la velocidad constante, relaciona la excitación de la máquina con el voltaje interno generado en condiciones de vacío. Para construir esta característica se emplea una fuente que suministre corriente de excitación desde 0 hasta un 125% del voltaje nominal. La figura 1.1. Muestra una característica de circuito abierto típica. Nótese que al principio la curva es casi perfectamente lineal, hasta que se observa cierta saturación con corrientes de campo más altas. El hierro no saturado en el marco de la máquina síncrona tiene una reluctancia muchos de miles de veces menor a la reluctancia en el entrehierro,

por lo que al principio casi toda la fuerza magnetomotriz pasa a través del entrehierro y el incremento del flujo resultante es lineal. Cuando finalmente se satura el hierro, la reluctancia en éste se incrementa de manera notoria y el flujo se incrementa mucho más despacio con el incremento en la fuerza magnetomotriz. La porción lineal de la característica se llama línea de entrehierro de la curva característica.

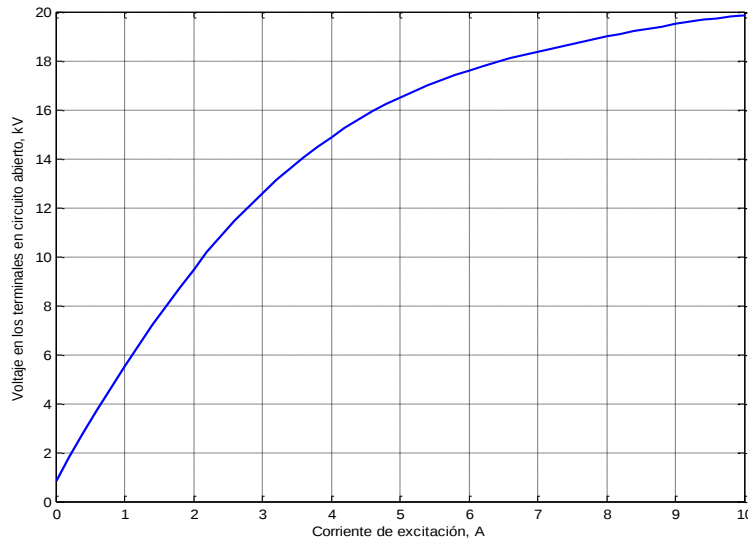


Figura 1.1. Característica de vacío de un generador síncrono.

1.2.2. Característica de cortocircuito del generador síncrono

Es aquella que relaciona la corriente de excitación con la corriente de armadura a velocidad nominal, en corto circuito, la impedancia de la máquina es prácticamente reactiva pura ya que la resistencia de armadura es despreciable en comparación con la reactancia. Por esto, la reacción de armadura es completamente desmagnetizante, provocando que el flujo resultante en la máquina sea relativamente pequeño. En estas condiciones, para valores normales de excitación, la máquina no estará saturada y por tanto la característica de cortocircuito es una línea recta ver la figura 1.2

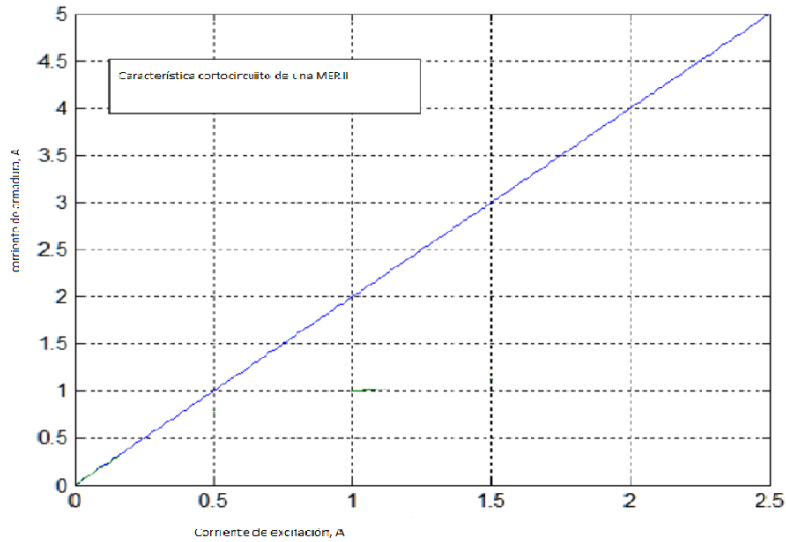


Figura 1.2. Característica de cortocircuito de un generador síncrono

1.2.3. Característica externa del generador síncrono

Se entiende por característica externa del generador síncrono a la curva que relaciona el voltaje terminal con la corriente de armadura para una corriente de excitación y factor de potencia constantes, a velocidad nominal y se construye a partir de las características y pruebas señaladas anteriormente.

Si el factor de potencia es inductivo, el voltaje terminal del generador síncrono disminuye con la carga debido a:

- La caída en la resistencia de armadura (la cual es muy pequeña y casi siempre se desprecia).
- La caída en la reactancia de filtración del estator.
- El efecto desmagnetizante de la reacción de armadura.

Si el factor de potencia es capacitivo, el voltaje terminal tiende a disminuir las caídas de voltaje en la impedancia interna de la máquina, pero el efecto magnetizante de la reacción de armadura provoca un incremento de la excitación resultante, que es mayor mientras más capacitivo sea, con lo cual la caída de voltaje es mucho menor en estos casos, llegando inclusive a incrementarse con la

10

carga para determinados valores de factor de potencia. Para la construcción de esta característica suponemos conocidas la reactancia de dispersión de armadura y la Fuerza magneto motriz de reacción de armadura (F_a). Suponemos que la corriente nominal ocurre al voltaje terminal que aparecía en la máquina si quitamos la carga, este no es otro que el voltaje terminal o fem de excitación el cual depende exclusivamente de la corriente de excitación.

Se denomina regulación de voltaje o variación de voltaje con la carga al aumento de voltaje terminal cuando se desconecta la carga de un generador sincrónico que se encontraba trabajando a corriente nominal. Se expresa en por ciento del voltaje nominal o de plena carga como se muestra a continuación.

$$U = \frac{U_0 - U_n}{U_n} * 100\% \quad 1.1$$

U_0 -Voltaje de vacío

U_n - Voltaje nominal

Como es lógico pensar, la regulación de voltaje depende del factor de potencia, pudiendo hacerse negativa en el caso de carga capacitiva. La regulación de voltaje debe de hallarse para el factor de potencia nominal de la máquina.

1.3. Determinación de los parámetros de la máquina sincrónica

En el estudio de las máquinas sincrónicas es de gran importancia analizar y calcular determinados parámetros que definen su comportamiento en un sistema eléctrico de potencia, o sea, índice de sus características de trabajo o diseño. A continuación se describe los parámetros más importantes y su procedimiento para el cálculo.

1.3.1. Reactancia sincrónica

Al parámetro que define el efecto inductivo total de la máquina en estado estable. Se le consideran dos componentes: la debida al flujo de filtración de la armadura $X_{\delta a}$ esta depende del tamaño del entrehierro de la máquina, la disposición del devanado de campo, la estructura del polo y su grado de saturación, esta se puede considerar prácticamente constante en turbogeneradores su valor típico esta alrededor de 0.1 pu, y en máquinas de rotor salientes su valor máximo es de 0.3 pu y la debida al flujo magnetizante que atraviesa los polos "reactancia magnetizante" X_a . Depende del número de vueltas del devanado del estator, de la reluctancia del circuito magnético principal, como dicha reluctancia depende del grado de saturación de la máquina la reactancia magnetizante también dependerá del grado de saturación. Al aumentar la excitación resultante en la máquina aumenta la reluctancia, ya que disminuye la permeabilidad y disminuye por tanto la reactancia magnetizante. El análisis de la reactancia sincrónica es diferente en una máquina de rotor cilíndrico y en una máquina de polos saliente.

En el primer caso, si despreciamos el efecto de los dientes, dicha reactancia no depende de la posición del rotor en relación con el flujo giratorio del entrehierro. En este caso se definen dos valores de reactancia; la reactancia sincrónica no saturada y la reactancia sincrónica saturada. La primera se calcula a partir de la zona lineal de la característica de vacío (suponiendo que no hay saturación) y de la característica de cortocircuito. Para cualquier valor de corriente de excitación se divide el voltaje de vacío entre la corriente de cortocircuito que corresponde a esa excitación ver anexo 2 Para calcular la reactancia sincrónica saturada se divide el voltaje nominal entre la corriente de cortocircuito que corresponde a la excitación que da voltaje nominal en vacío, por lo que se puede observar que la reactancia sincrónica no saturada es mayor que la saturada.

Se debe aclarar que en la ordenada de la característica de vacío se coloca los voltajes de fase ya que los valores de reactancia y de resistencia de la máquina se definen siempre por fase Ver ecuación 1.2 y 1.3.

$$X_{dnosat.} = \frac{V_0}{I_{cc}} \quad 1.2$$

$$X_{dsat.} = \frac{V_n}{I_{cc}} \quad 1.3$$

1.3.2. Valores de reactancia sincrónica para generadores de polos salientes

Reactancia sincrónica de eje directo X_d

Es la que presenta la máquina cuando el flujo giratorio del estator coincide con el eje directo su valor es igual a:

$$X_d = X_{\delta a} + X_{ad} \quad 1.4$$

Donde

$X_{\delta a}$ - reactancia de dispersión de armadura.

X_{ad} - reactancia magnetizante de eje directo.

La reactancia sincrónica de eje en cuadratura X_q

Es la que presenta la máquina cuando el flujo giratorio del estator coincide con el eje de cuadratura su valor es igual a:

$$X_q = X_{\delta a} + X_{aq} \quad 1.5$$

$X_{\delta a}$ - reactancia de dispersión de armadura.

X_{ad} - reactancia magnetizante de eje en cuadratura.

1.3.3. Resistencia de armadura de la máquina

Es la resistencia óhmica por fase del devanado del estator. Su valor tiene importancia para calcular la eficiencia de la máquina y la constante de tiempo del devanado de la armadura. Oscila entre (0.003; 0.01) pu, por tanto, su valor es despreciable en cálculos de voltaje y en diagrama fasoriales. Puede calcularse aplicando un voltaje de CD a los devanados y midiendo la corriente. Este valor debe corregirse para la temperatura de trabajo.

1.3.4. Razón de cortocircuito

Se denomina razón de corto circuito (ecuación 1.6) a la relación que existe entre la corriente de excitación para producir voltaje nominal en vacío y la corriente de excitación para producir corriente nominal en cortocircuito como se ve en el anexo 2.

$$RCC = \frac{I_{exc.o}}{I_{exc.cc}} \quad 1.6$$

La razón de cortocircuito depende del tamaño del entrehierro de la máquina. Al aumentarlo se tiene que hacer circular más corriente por el campo para el mismo voltaje por lo cual $I_{exc.o}$ aumenta mucho menos que $I_{exc.cc}$ ya que la fuerza f_{mm} que se encarga de vencer la reluctancia del entrehierro en cortocircuito es solo una pequeña parte de la excitación de los polos. Una mayor corriente de excitación necesaria para producir el mismo voltaje significa mayor calentamiento del rotor y por tanto la necesidad de hacer una máquina más grande para poder disipar dicho calor. Por tanto, un valor grande de RCC es índice de una máquina grande y costosa. También podemos ver que al aumentar el entrehierro disminuye

la reactancia de la máquina y disminuye la variación del voltaje con la carga. La RCC de las máquinas de rotor cilíndrico es menor que las de polo salientes debido al menor entrehierro. En el primer tipo de máquinas la RCC varía de (0.4-0.7) en las segundas de (1.0-1.4)

1.3.5. Prueba de deslizamiento para determinar las reactancias sincrónicas de eje directo y de eje de cuadratura simultáneamente

La reactancia sincrónica de eje directo puede calcularse de la misma forma que la reactancia sincrónica de la máquina de polos interiores ya que en condiciones de corto circuito la corriente es prácticamente inductiva y el flujo del estator coincide con el eje directo. Para calcular ambas reactancias simultáneamente se utiliza la llamada "**prueba de deslizamiento**" que consiste en aplicar voltaje trifásico reducido al estator de la máquina en circuito abierto y girando en el mismo sentido del campo a una velocidad ligeramente superior o inferior a la sincrónica

Al ir variando periódicamente la reactancia de la máquina la corriente del estator, leída por el amperímetro, irá variando también periódicamente, será máxima cuando la reactancia sea la de eje en cuadratura y mínima cuando la reactancia sea de eje directo. El voltaje terminal será mínimo ante la reactancia de eje en cuadratura y máximo ante la reactancia de eje directo. Las variaciones del voltaje terminal se deben a las variaciones de la caída de voltaje en la línea al variar la corriente, por tanto puede decirse que en esta prueba, utilizando las ecuaciones 1.7 y 1.8 se obtiene los valores de reactancia sincrónica de eje directo y eje en cuadratura:

$$X_d = \frac{V_{min}}{I_{min}} \quad 1.7$$

$$X_q = \frac{V_{max}}{I_{max}} \quad 1.8$$

1.3.6. Reactancia y la Resistencia de secuencia negativa

Las corrientes de secuencias negativas provocan flujos que giran en sentido contrario a la rotación de la máquina, para determinar las impedancias que ofrece la máquina a dichas corrientes, debemos hacerlas girar en sentido contrario al campo y aplicarle voltaje reducido leyendo voltaje, corriente y potencia. El devanado de campo debe estar en cortocircuito. Al girar el campo con respecto del rotor, con una frecuencia doble que la línea, se inducirán corrientes en dichos devanados cuyos flujos impiden que el flujo del estator los penetre teniendo este que irse por trayectorias de alta reluctancia. El flujo encontrará, por tanto, alternadamente la trayectoria subtransitoria de eje directo y de eje en cuadraturas. Esto quiere decir que la impedancia de secuencia negativa es aproximadamente igual al valor promedio entre las subtransitoria de eje directo y de eje en cuadratura

1.3.7. Reactancia de secuencia cero

Para medir esta impedancia se aplica un voltaje reducido a la máquina con los tres devanados del estator conectados en serie. Se mide el voltaje, corriente y potencia.

Para la medida de la reactancia de secuencia cero los tres devanados de la armadura son puestos en serie y se cierra el circuito de tal modo que circule corriente nominal a través de ellos. La relación entre el voltaje en uno de los devanados y la corriente que circula por él da como resultado la impedancia de secuencia cero, debido a que la resistencia de secuencia cero es despreciable.

1.3.8. Impedancia subtransitoria

La impedancia subtransitoria es la que ocurre en el instante inicial del corto circuito simétrico súbito y depende, por tanto, de las características de comportamiento eléctricas y magnéticas de la máquina en condiciones transitorias.

Desde el punto de vista electromagnético los devanados de la máquina se comportan como elementos inductivos a través de los cuales circula el flujo magnético producido por las corrientes que circulan por dichos devanados. De esto puede concluirse que el comportamiento transitorio de la máquina debe de analizarse a partir de las leyes físicas correspondientes a los circuitos o elementos inductivos. Entre esta la más importante es la llamada ley o principio de concatenaciones de flujo constante, la cual plantea que las concatenaciones de flujo de un circuito inductivo no puede cambiar instantáneamente.

Como consecuencia de esta ley se puede decir que el flujo del primario no podrá atravesar el secundario, teniendo que irse, por tanto, a través de trayectorias de alta reluctancia. Como la inductancia de un devanado es inversamente proporcional a la reluctancia del circuito magnético que le corresponde, se saca en conclusión que, en el instante inicial, la inductancia del devanado primario será considerablemente más pequeña que cuando se alcanza el funcionamiento estable. Al ocurrir un corto circuito trifásico súbito en una máquina sincrónica el flujo del devanado del estator no puede atravesar los devanados de campo y amortiguador debido a que las concatenaciones de flujo de estos devanados no pueden cambiar instantáneamente. Debido a esto el flujo del estator tendrá que irse necesariamente por trayectorias de mayor reluctancia. Esto provoca que la reactancia de la máquina en este momento sea pequeña en comparación con la sincrónica varía entre (0,1-0,3) pu. Debido a esto, la corriente puede llegar a ser de 10 a 15 veces la nominal. La resistencia en este instante es mayor que la de armadura debido a las corrientes inducidas en los devanados del rotor que al reflejarse en el estator reflejan también las resistencias de dichos devanados tal y como ocurre en un transformador en corto circuito.

Para determinar la impedancia subtransitoria se aplica voltaje reducido a dos fases de la máquina con el rotor parado y su devanado en cortocircuito ver figura 2.2. En este caso, las condiciones en el cortocircuito magnético de la máquina son

similares a las que ocurren en el cortocircuito súbito, ya que las corrientes inducidas en los devanados del rotor impiden que el flujo del estator penetre en ellas. Leyendo el voltaje, la corriente y la potencia suministrada al circuito para distintas posiciones del rotor podemos calcular la resistencia y la reactancia subtransitoria mediante las expresiones (1.10 – 1.14):

$$Z_d = \frac{V}{2I_{m\acute{a}x}} \quad 1.9$$

$$Z_q = \frac{V}{2I_{m\acute{a}x}} \quad 1.10$$

$$R_d = \frac{P_d}{2I_{m\acute{a}x}^2} \quad 1.11$$

$$R_q = \frac{P_q}{2I_{m\acute{a}x}^2} \quad 1.12$$

$$X_d = \sqrt{Z_d^2 - R_d^2} \quad 1.13$$

$$X_q = \sqrt{Z_q^2 - R_q^2} \quad 1.14$$

donde:

Z_d , X_d , R_d Son la impedancia, reactancia y resistencia subtransitoria de eje directo.

Z_q, X_q, R_q Son la impedancia, reactancia y la resistencia subtransitoria de eje en cuadratura.

$I_{m\acute{a}x}$ Es la máxima corriente leída.

$I_{m\acute{i}n}$ Es la mínima corriente leída.

P_d Es la potencia leída para corriente máxima.

P_q Es la potencia leída para corriente mínima.

Para la realización de esta práctica se construirá una tabla como se muestra en la tabla 1

Tabla 1. Tabla para completar con las mediciones realizadas en la práctica.

$V_{M\acute{a}x}$	$V_{m\acute{i}n}$	$I_{m\acute{a}x}$	$I_{m\acute{i}n}$	P_q	P_d

Esta tabla será abastecida con mediciones para cada uno de los valores indicados y una vez bien definidos los valores se calcularán las reactancias, resistencias e impedancias pertinentes para el eje directo y eje en cuadratura respectivamente.

Las reactancias subtransitorias de eje directo y eje de cuadratura no se diferencian mucho, pero la de eje directo es menor debido a la mayor reluctancia del circuito magnético. La reactancia subtransitoria de eje directo oscila de (0.07-0.15) pu en turbogeneradores y de (0.15-0.35) pu en hidrogeneradores.

1.4. Conexión y operación de generadores sincrónicos en paralelo con un gran sistema de potencia

Para conectar el generador sincrónico en paralelo con un sistema de potencia deben de observarse ciertos requisitos no solo concernientes a la velocidad y

voltaje antes de la conexión, sino también relativos al momento apropiado para cerrar el disyuntor que pone al generador a trabajar en el sistema; dichos requisitos son los siguientes:

- La secuencia de los voltajes por fase del generador debe de ser igual a la del sistema, De no ser así se imposibilita la sincronización.
- La frecuencia del generador debe de ser igual a la del sistema con esto se logra que el generador entre suministrando una pequeña cantidad de potencia activa y su velocidad automáticamente se igualará a la del sistema.
- El voltaje del generador debe ser aproximadamente igual al del sistema, para evitar la circulación de grandes corrientes en el momento de la sincronización. Si el voltaje es superior al del sistema la máquina entra suministrando potencia reactiva al mismo, si es inferior entra recibiendo potencia reactiva del mismo.

Para asegurarse todas estas condiciones se cumplen, es necesario montar un circuito de sincronización que comprende de un voltímetro y un frecuencímetro con un interruptor doble polo doble tiro, un secuencímetro cuando se sincroniza por primera vez y un dispositivo especial para determinar cuándo es el momento apropiado de sincronización. Este Último dispositivo puede construirse empleando lámparas o sencillamente, utilizando el sincronoscopio, instrumento que al conectarse debidamente al generador y al sistema indica mediante una aguja el instante correcto de la sincronización y además, si el generador va atrasado o adelantado respecto al sistema.

1.4.1. Operación en paralelo con el sistema

Al sincronizar un generador con el sistema se pretende que aquel suministre a este, tanta potencia activa como reactiva de acuerdo con los requerimientos de los consumidores, por tanto, se analizará cómo se regula la entrega de potencia activa y reactiva del generador. Un sistema eléctrico es muy grande en comparación con el generador, tanto la frecuencia como voltaje generado puede

tomarse como constantes. Se partirá de un estado de carga determinado, para el cual se muestran el diagrama fasorial en el anexo 2 y a partir de él se analizará la forma de regular la entrega de potencia activa y reactiva al sistema. Si se desprecian las magnitudes de reactancia de dispersión de armadura $X_{\delta a}$ y resistencia de armadura R_a debido a que son pequeñas, puede considerarse que $E_{\delta} \cong U$.

En el estado de carga considerando, la potencia activa y reactiva entregada por el generador al sistema viene dada por las ecuaciones 1.15 para el caso de la potencia activa y por la 1.16 para la potencia reactiva:

$$P = 3UI \cos \varphi = 3UI_a \quad 1.15$$

$$Q = UI \sin \varphi = 3UI_r \quad 1.16$$

Si se aumenta la corriente del generador tanto la F_{mm} del campo como F_0 como el voltaje de excitación E_0 deben de aumentar, ahora bien, la potencia que entrega del motor primario no cambia puesto que no se ha actuado sobre él, el ángulo θ debe de disminuir al fin de mantener la potencia constante, como se ve en el diagrama vectorial, la F_{mm} de reacción de armadura F_a debe de aumentar su valor absoluto y cambiar su posición en el espacio, esto provoca un incremento de la corriente, de tal forma, que la componente activa permanezca constante. Por tanto, la potencia reactiva suministrada ha aumentado. Ni el voltaje generado, ni la f_{mm} resultante F_{δ} varían ya que los fija el sistema.

Si se aumenta la potencia que suministra el motor primario. Inicialmente la máquina se acelera ya que el par mecánico es mayor que el electromagnético. Después de un proceso transitorio se equilibra nuevamente los pares, pero ahora el generador entrega una mayor cantidad de potencia activa al sistema. Ni F_0 a E_0

ya que se ha actuado sobre la excitación. El ángulo θ aumenta hasta θ_2 . La corriente y su componente activa aumentan. La potencia activa suministrada disminuye debido al aumento de θ .

Para aumentar la potencia reactiva entregada al sistema se deberá aumentar la excitación de la máquina y para aumentar la potencia activa se deberá actuar sobre el motor primario aumentando su potencia.

1.5. Operación en paralelo de generadores sincrónicos

En la práctica anterior se habló de la operación en paralelo de un generador sincrónico en un sistema grande de potencia, esto significa que la capacidad total de los generadores que conforman el sistema es demasiado grande comparado con nuestro generador y que el voltaje y la frecuencia no varía con la carga del generador. Cuando se analiza un sistema formado por pocos generadores con capacidades similares no sucede lo mismo, para este caso cualquier variación en las condiciones de carga o excitación de una de las máquinas se reflejan en la frecuencia y el voltaje del sistema y en la carga suministrada por las demás máquinas que forman el sistema. A continuación, se verá como varía la frecuencia y el voltaje de un solo generador ante variaciones en la carga, potencia del motor primario y excitación, para después entrar a considerar los efectos de la operación en paralelo.

En cuanto al voltaje, para una carga inductiva, disminuye, al aumentar la carga. En los generadores modernos de baja razón de cortocircuito el voltaje varía mucho con la carga, esto obliga a disponer en la máquina de medios automáticos de regulación de voltaje. Con respecto al comportamiento de la frecuencia, esta depende de la característica velocidad-par, velocidad-potencia de salida del motor primario. En la mayoría de los motores primarios es tal que la velocidad disminuye al aumentar la carga. Si se supone una caída lineal de la velocidad con la carga. Tanto en las turbinas de vapor como en los motores eléctricos usados en el laboratorio, dicha característica puede variarse y trasladarse casi paralelamente a

sí misma. La característica A de un motor primario que se encuentra acoplado a un generador sincrónico que es capaz de entregar 50kW a 60 Hz, si por una razón dada la potencia que demanda la red aumenta digamos 60kW su frecuencia disminuye en unos cuantos Hz. Si se desea mantener la frecuencia a 60 Hz es necesario subir la característica hasta la B de forma tal que se entreguen los 60 kW a 60Hz.

Si se trabaja con dos generadores conectados en paralelo 1 y 2. Inicialmente el sistema formado por dos generadores alimenta una carga determinada a 60 Hz, la potencia que va a entregar cada generador quedará distribuida entre los dos generadores hasta satisfacer las necesidades de la carga manteniendo la frecuencia en 60Hz, si se incrementase el valor de la carga, la frecuencia baja hasta 57Hz, para ese momento los generadores deben de suplir la carga requerida y para mantener la frecuencia constante a 60Hz se debe de cambiar la característica del motor primario hasta que supla el incremento de la carga y la frecuencia retorne a los 60Hz. En casos similares, al generador 1 se le llama generador que lleva la frecuencia. En cuanto a la repartición de potencias reactivas, la máquina que tenga un regulador de voltaje más rápido absorberá mayor aumento reactivo. Para resolverlo se debe de actuar sobre la excitación, o sea, sobre de referencia del regulador.

1.6. Motor sincrónico

1.6.1. Arranque del motor sincrónico

Un motor sincrónico no puede arrancar por si solo ya que la inercia del motor y la carga es tan grande en comparación con la velocidad de rotación del flujo del entrehierro que a los polos del rotor les resulta imposible de seguir a los polos del flujo del estator creándose un par electromagnético pulsante de valor promedio cero que impide el arranque del motor. Un método utilizado para el arranque de los motores sincrónicos es situar una jaula de ardilla o devanado amortiguador en el rotor. Al conectar el motor como línea de devanado se cortocircuita a través de

una resistencia para evitar la inducción de voltaje excesivamente alto en dicho devanado y el motor arranca como si fuera de inducción. Al llegar a un valor de velocidad del 90 al 96 % de la sincrónica, se conecta el circuito de alimentación de cd del rotor con lo cual la velocidad aumenta y si la carga es la apropiada para el motor, después de unas cuantas oscilaciones alcanza la velocidad sincrónica, estableciéndose en este valor.

El valor de la resistencia de la jaula de arranque es tan grande su importancia para la aplicación del motor. Si la carga requiere un alto momento de arranque, la resistencia debe de ser grande, para poder suministrarlo, ahora bien, esto dificulta el proceso de sincronización ya que la máquina se estabiliza como motor. Si los requerimientos del arranque no son críticos es preferibles usar una jaula de baja con lo cual se facilita la sincronización del motor.

1.6.2. Característica en v del motor

Las características en v del motor sincrónico expresan la relación entre la corriente de armadura I_A y la corriente de excitación I_{ex} de los polos para una carga mecánica (potencia de salida) constante. Ver Figura 1.3

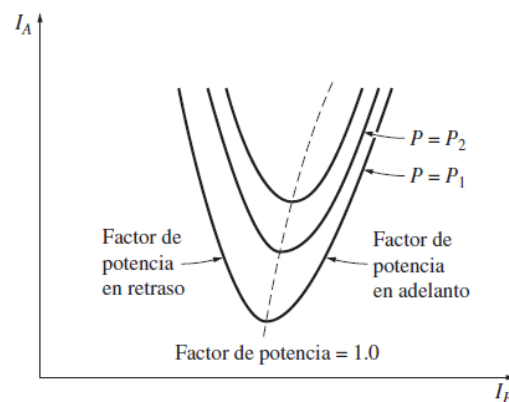


Figura 1.3. Característica en v del motor sincrónico

En el siguiente diagrama vectorial se tendrá en cuenta:

1. El voltaje aplicado al motor V_{red} es constante, o sea, que no varía ni con la carga ni con la excitación. Debido a esto E_{γ} es también constante. $U_{red} \approx E_{\gamma}$
2. La magnitud del fasor $-E_0$ y el vector F_0 la fija la corriente de excitación de la máquina.
3. La potencia de salida de la máquina está dada por las siguientes expresiones:

$$P \approx V_{red} I \cos \varphi \quad 1.17$$

$$P \approx \frac{V_{red} E_0}{X_s} \sin \theta \quad 1.18$$

Despreciando las pérdidas y la potencia de reluctancia.

4. Para una carga mecánica fija la componente activa de la corriente I_{ac} no varía al variar la excitación.

Conclusiones

En el desarrollo de este capítulo se ha recogido la forma más breve y precisa de la información sobre las principales características y pruebas que se les realizan a los generadores sincrónicos de las cuales se ha hecho alusión en su desarrollo.

- Se hizo una breve reseña de la estructura básica, tipos que existen, destino y campo de aplicación y se abordó sobre el principio y regímenes de funcionamiento de los generadores sincrónicos.
- Se dio a conocer la importancia social de la implementación del laboratorio de MERII.

- Se estableció el criterio de diferentes autores contribuyentes en el estudio del tema.
- La reactancia de eje directo es mayor que la reactancia de eje en cuadratura ya que la reluctancia de su circuito magnético es menor.
- La reactancia de eje en cuadratura no varía apreciablemente con la saturación ya que una gran parte de la trayectoria de su flujo es de aire.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Restablecimiento de la funcionalidad del banco de prueba de generadores sincrónico del laboratorio de máquinas eléctricas

CAPÍTULO 2. Materiales y métodos.

Introducción

A lo largo de la historia de las MERII ha sido de vital importancia la realización de ensayos para obtener determinados parámetros o tener una visión más clara de su funcionamiento en la industria en el desarrollo de este capítulo se expondrá una metodología clara y precisa de cómo realizar cada una de las pruebas relacionada con generadores sincrónicos.

2.1. Pasos para la realización de las pruebas

- Realizar las conexiones de acuerdo con el circuito que se propone
- Realizar las mediciones de las variables en estudio
- Confeccionar las tablas necesarias de acuerdo a las variables medidas
- Obtener los gráficos resultantes
- Desarrollar el informe a presentar en caso de ser necesario

La MERII que se utiliza para las mediciones de los parámetros es un generador sincrónico del laboratorio de máquinas eléctricas del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Esta máquina es trifásica de polos salientes y su chapa queda recogida en la tabla 2.

Potencia aparente (KVA)	5
Numero de fase	3
Velocidad nominal (rpm)	1200
Frecuencia (Hz)	60
Tensión, v (Δ,Y)	220/380
Corriente, A (Δ,Y)	13.1/7.6
Corriente de excitación, (Δ,Y)	4.5/3.05

Tabla 2. Datos de chapa del generador en estudio

2.2. Realización de la característica de vacío

Para la realización de estas pruebas es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Realizar las conexiones de acuerdo al esquema que aparece a continuación e interpretar la forma de realización de la prueba de circuito abierto que se expone en el capítulo 1.2.1:

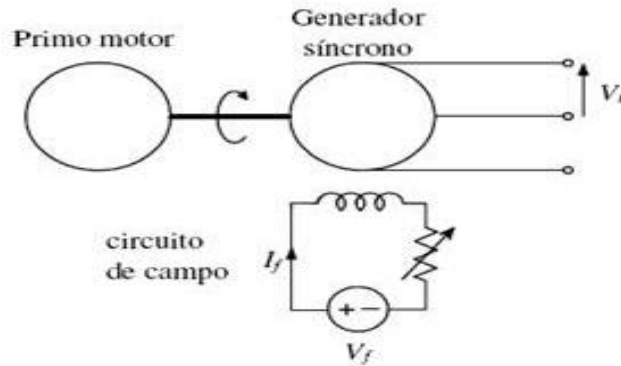


Figura 2.1. Circuito a montar para la realización del ensayo de vacío

Realizar las mediciones de las variables: corriente de excitación y voltaje generado.

- ## 2. Mediciones de las variables.

Las variables pueden ser medidas directamente desde los instrumentos analógicos situados en el panel.

Tabla 3. Tipos de instrumentos para la realización de las mediciones.

Corriente de excitación	Amperímetro analógico tipo magneto eléctrico de bobina móvil (0-4)A
Voltaje de salida	Voltímetro analógico tipo magneto eléctrico de bobina móvil de 0- 250v

3. Confeccionar las tablas usando los parámetros medidos.

Llenar la siguiente tabla con los datos obtenidos anteriormente.

Tabla 4. Mediciones realizadas para el ensayo de vacío

I_{exc} (A)	0	0.4	0.8	1	1.4	1.8	2	2.4	2.8	3	3.2	3.4
U_f (v)	0	84.2	167.9	183.9	251	308.9	330.9	366	396	406	413	420.1

4. Confeccionar los gráficos resultantes de las mediciones.

Una vez realizadas las mediciones de las variables en estudio se procede a obtener la característica de vacío del generador sincrónico, se puede llegar a ella mediante la función plot(v,A) en matlab una vez que se hallan definido las variables o en el Excel de Microsoft.

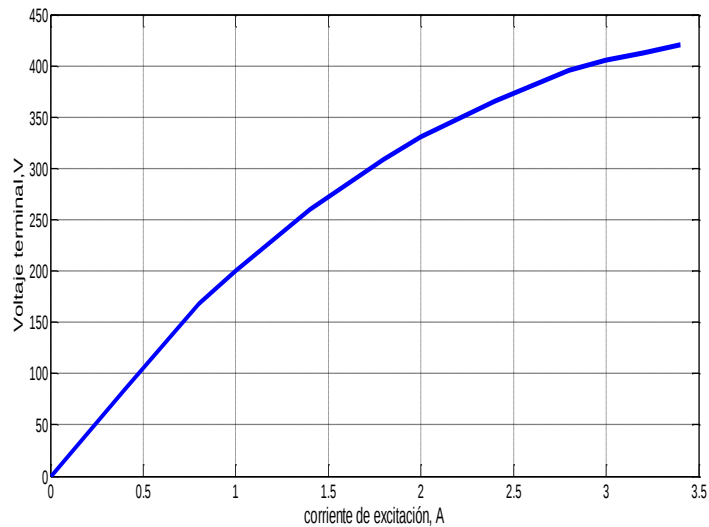


Figura 2.2. Característica de vacío obtenida para la máquina en estudio

Una vez realizadas las mediciones y obtenida la característica de circuito abierto se hace posible determinar el voltaje interno generado para cualquier corriente de excitación.

2.3 Realización de la característica de cortocircuito.

1. Realizar las conexiones de acuerdo al esquema mostrado en la figura 2.3. como se describe en el capítulo 1.2.2. relacionado con la característica de cortocircuito.

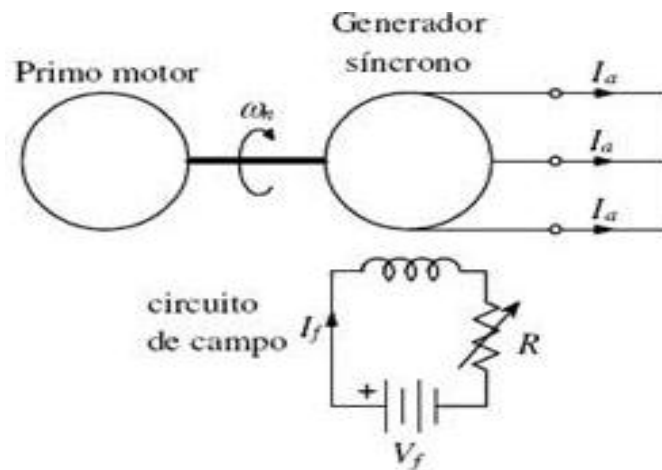


Figura 2.3. Circuito para la realización del ensayo de cortocircuito

2. Realizar las mediciones de las variables: corrientes de excitación y corriente de armadura.
 - Se debe de tener en cuenta que al cerrar el interruptor S, La corriente de excitación debe ser cero al conectar el motor para evitar la circulación de altas corrientes transitorias si cerramos dicho interruptor con la máquina excitada.
 - Tomar valores de corrientes de excitación para un 25%, un 50%, un 100%, y un 125% de la corriente nominal a velocidad nominal.
 - Las variables pueden ser medidas directamente desde los instrumentos analógicos situados en el panel.

Corriente de excitación	Amperímetro analógico tipo magneto eléctrico de bobina móvil de 0 a 4A.
Corriente de armadura	Amperímetro analógico tipo magneto eléctrico de bobina móvil de 0 a 40A.

Tabla 5. Instrumentos para la realización de las mediciones de las variables

3. Confeccionar las tablas usando los parámetros medidos.

Llenar la siguiente tabla con los datos obtenidos en las mediciones realizadas por los instrumentos de medición mencionados anteriormente.

Tabla 6. Mediciones realizadas durante la realización del ensayo de vacío

I_{exc} (A)	0	0.4	0.8	1	1.8	2.4	3
I_a (A)	0	2.4	4.5	5.4	9.4	12.6	15.5

4. Una vez realizadas las mediciones se ha de obtener la característica de cortocircuito como se muestra y la figura 2.4 en la cual se observa el comportamiento de una MERII trabajando en cortocircuito, esta curva se puede obtener con la función `plot(lcc,A)` en matlab o mediante el Excel Microsoft.

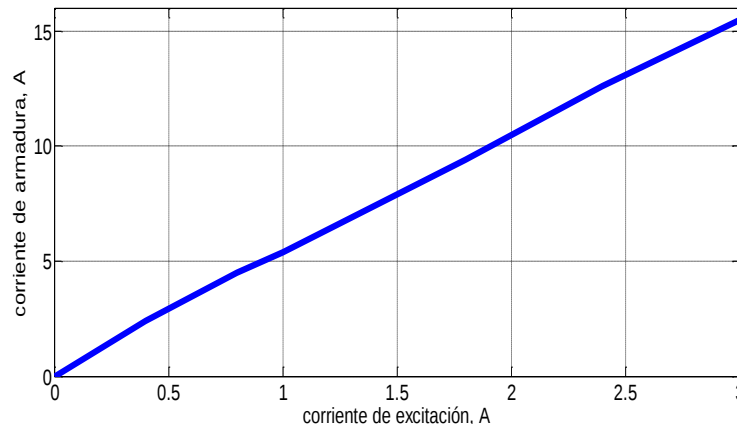


Figura 2.4 característica de cortocircuito obtenida para la máquina en estudio. Como se puede apreciar el comportamiento de esta característica es una línea recta pero ¿Por qué? Se puede analizar que el voltaje terminal $V_f=0$ por tanto la corriente de armadura $I_a = \frac{E_g}{R_a + jX_s}$ debido a que B_s casi cancela B_r , el campo magnético neto B_{net} es muy pequeño (corresponde únicamente a las caídas resistivas e inductivas internas). Debido a que el campo magnético neto en la máquina es tan pequeño, la máquina no está saturada y la característica de cortocircuito es lineal. En el anexo 6 se muestra el diagrama fasorial, circuito equivalente, comportamientos de campos magnéticos para la MERII trabajando en cortocircuito (considerar revisión)

El informe se debe realizar de la siguiente forma.

1. Datos nominales de las máquinas utilizadas.
2. Circuitos montados y resultados obtenidos.
3. Característica de vacío del generador síncrono a velocidad nominal.
4. Característica de cortocircuito del generador síncrono a velocidad nominal.
5. Cálculo del voltaje interno generado (E_a)
6. Cálculo de la reactancia síncrona. (X_s)
7. Determinar la característica externa del generador
8. Calcular la resistencia de corto circuito.

9. Cálculo de la regulación de voltaje del generador síncrono para plena carga y factor de potencia 0.8 en atraso y en adelanto.
10. Se agregan los puntos mostrados en capítulo 3.3

2.4. Práctica 2 determinación de parámetros de la máquina síncrona

1. Se montará el circuito siguiente para la realización de la práctica, siempre siguiendo cada una de las medidas de seguridad definidas en el capítulo 3.4.

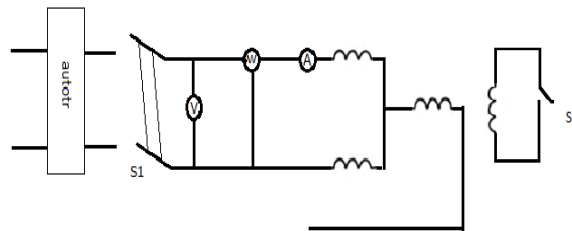


Figura 2.5 Circuito para la realización de la prueba

2. Para las mediciones de los valores máximos y mínimos de las variables de tensión, corriente y potencia se utiliza un amperímetro de gancho el cual se conectarán dos de sus pinzas a los terminales del estator en las fases A y B para determinar los valores de tensión, y se abrazará con el gancho uno de los conectores para determinar la corriente que circula a través de él.



Figura 2.6. Amperímetro de gancho

3. Llenar las tablas con las mediciones obtenidas.

Las mediciones siguientes se realizaron para distintos valores de tensión en la alimentación, y el desarrollo de la práctica para los cálculos se escogió el 3er caso.

Tabla 7. Muestra de mediciones realizadas para el desarrollo de la práctica

$V_{m\acute{a}x}$ (v)	$V_{m\acute{i}n}$ (v)	$I_{m\acute{a}x}$ (A)	$I_{m\acute{i}n}$ (A)	$P_{m\acute{a}x}$ (w)	$P_{m\acute{i}n}$ (w)
8.8	6.6	1.2	0.6	18.1	5.35
17	19.6	3.2	0.8	107.54	15.1
27.3	30	5.4	1.4	277.8	39.7

4. Calcular la resistencia subtransitoria para eje directo y para eje en cuadratura.

Para el cálculo de las resistencias subtransitorias de ejes directo y en cuadratura se utilizarán las fórmulas 1.12 y 1.13 respectivamente, utilizando las mediciones realizadas en la tabla anterior, para su realización se procederá de la siguiente manera.

Para el caso del eje directo se está hablando de valores máximos donde se relacionan corriente y potencia, la corriente es igual a 5.4A y el valor de potencia para esta corriente es de 277.8w, ya tomados los valores se procede al cálculo.

$$R_d = \frac{P_d}{2I_{m\acute{a}x}^2} = \frac{277.8}{2 * 5.4^2} = 4.76 \Omega$$

Para el caso de eje en cuadratura la relación potencia corriente se mantiene pero se trabaja con valores mínimos, en este caso la corriente es de 1.4 A y la potencia 39.7 w como se puede observar en la tabla 7 se procede con la ecuación 1.13.

$$Rq = \frac{P_q}{2I_{\min}^2} = \frac{39.7}{2 \cdot 1.4^2} = 10.12 \Omega$$

5. Calcular la impedancia de eje directo y para eje en cuadratura.

Para el cálculo de las reactancia subtransitorias de ejes directo y en cuadratura se utilizarán las formulas 1.10 y 1.11 respectivamente, utilizando las mediciones realizadas, ejecutándose de la siguiente forma.

Para el caso de eje directo se relaciona la corriente máxima con la tensión de eje directo procediéndose de la siguiente manera.

$$Z_d = \frac{V}{2I_{\max}} = \frac{27.3}{2 \cdot 5.4} = 294.84 \Omega$$

Para el caso del eje en cuadratura se trabaja de la misma forma pero con valores mínimos.

$$Z_q = \frac{V}{2I_{\min}} = \frac{30}{2 \cdot 1.4} = 10.7 \Omega$$

6. Calcular la reactancia subtransitoria para eje directo y para eje en cuadratura.

Para el cálculo de las reactancia subtransitorias de ejes directo y en cuadratura se utilizarán las formulas 1.14 y 1.15 respectivamente, utilizando las mediciones realizadas, ejecutándose de la siguiente forma.

Para el caso de eje directo se utiliza la fórmula 1.14 que relaciona la impedancia de eje directo y a la resistencia de eje directo

$$X_d = \sqrt{Z_d^2 - R_d^2} = \sqrt{294.84^2 + 4.76^2} = \sqrt{86953.28} = 294.88 \Omega$$

$$X_q = \sqrt{Z_q^2 - R_q^2} = \sqrt{10.7^2 + 10.12^2} = \sqrt{216.90} = 14.72 \Omega$$

El informe debe de estar compuesto de la siguiente manera

Restablecimiento de la funcionalidad del banco de prueba de generadores sincrónico del laboratorio de máquinas eléctricas

- Datos nominales de la máquina utilizada.
- Circuitos montados y resultados obtenidos. Deben de incluirse la característica de vacío y cortocircuito obtenidas en la primera práctica y el cálculo de la razón de corto circuito.
- Tabla donde se muestren los parámetros calculados en valor óhmico.
- Se agregan los puntos mostrados en capítulo 3.3

2.5. Práctica 3 conexiones y operación en paralelo con un gran sistema de potencia.

Una vez que han sido corregidas las tres condiciones para la sincronización se puede pasar a sincronizar el generador con el sistema

- Secuencia de fase (A, B, C)
- Frecuencias del generador y el sistema deben de ser iguales. (60Hz)
- Voltaje del generador y el sistema tiene que ser iguales en el momento de sincronizar.

Para la realización de esta práctica se procederá de la siguiente manera.

1. Se montará el circuito que aparece en la figura 2.7, el esquema sirve para sincronizar y operar un generador sincrónico en paralelo con un gran sistema de potencia. El circuito consiste básicamente de un generador sincrónico acoplado a un motor de cd que le sirve de motor primario. En el circuito de fuerza del generador se encuentra un instrumento trifásico que mide tensión, corriente, potencia activa y potencia reactiva y un interruptor que conecta el generador al sistema. En el circuito de medición y control se tiene un sincronoscopio, un voltímetro, un frecuencímetro.
2. Se arrancará el motor de CD y se llevará la máquina a una velocidad ligeramente superior a la sincrónica del generador a 60Hz. Para comprobar la velocidad se utilizará un tacómetro. Se comenzará a suministrar

excitación de CD al generador y se le ajustará el voltaje hasta que coincida con el voltaje del sistema de potencia. Se comprobará que la secuencia del generador es la misma que la del sistema mediante un secuencímetro.

3. Teniendo preparadas todas las condiciones se procederá a sincronizarla con el sistema de potencia para este caso se realizará mediante la utilización del sincronoscopio.
4. Con la máquina en paralelo con el sistema se le llevará mediante la excitación a suministrar la potencia reactiva que se indique en la practica
5. Se aumentará la potencia entregada por el MP, con esto se tiende a aumentar la velocidad en el conjunto motor-generador lo cual no puede ocurrir pues el generador está conectado a un gran sistema de potencia que le fija la velocidad sincrónica, esta polémica trae como resultado que motor al disminuir su velocidad recibe más corriente aumentando así su potencia. La potencia activa se llevará según lo indique la práctica.
6. Actuando simultáneamente sobre el MP y la excitación del generador se podrá irán disminuyendo progresivamente la potencia activa y reactiva hasta hacerlas casi cero. En este instante se abre el interruptor de fuerza S1 de este modo el generador fuera del sistema.

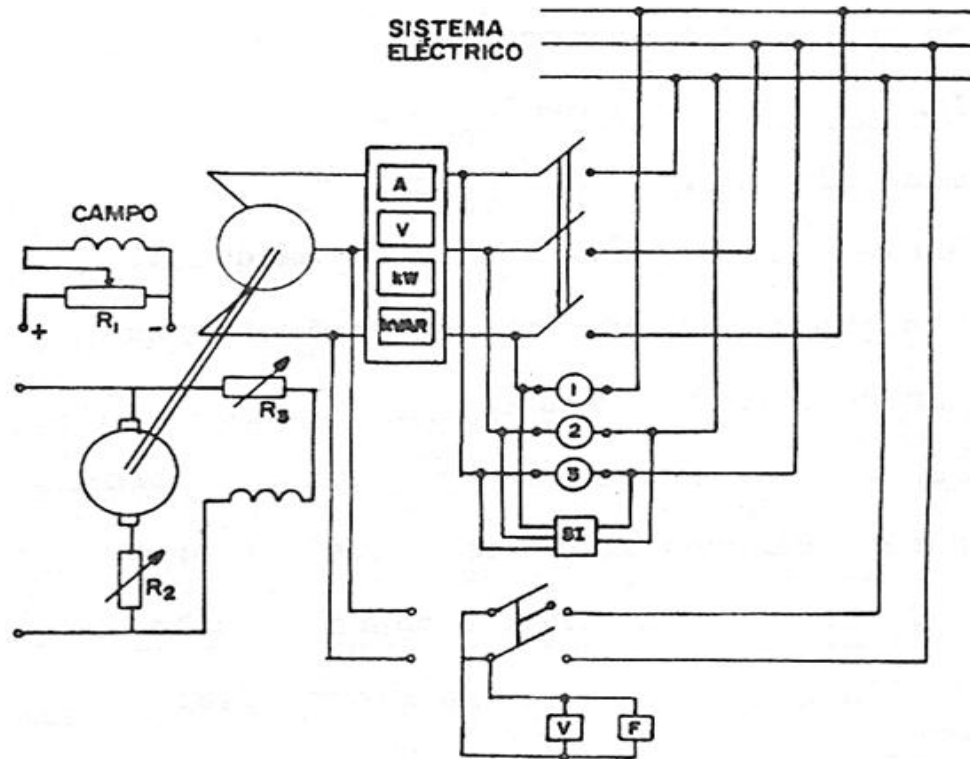


Figura 2.7. Esquema para la sincronización

2.6 Práctica 4 motor síncrono.

Para el caso de la máquina en estudio puesto que no tiene manera de arrancar como motor de la conexión en paralelo con el SEN se pasará a trabajar como motor instantáneamente alimentándose de la red y se realizará la práctica de la característica en v del motor síncrono relacionando esta corriente de excitación corriente de armadura y para una potencia de salida constante.

1. Procedimiento para explotar la MERII en régimen de trabajo como motor. Se montará el circuito que aparece a continuación (figura 2.8), el cual cuenta de un motor síncrono y un motor de corriente directa acoplado a el que le sirve de carga. La carga se varía con la excitación del generador y la resistencia del banco.

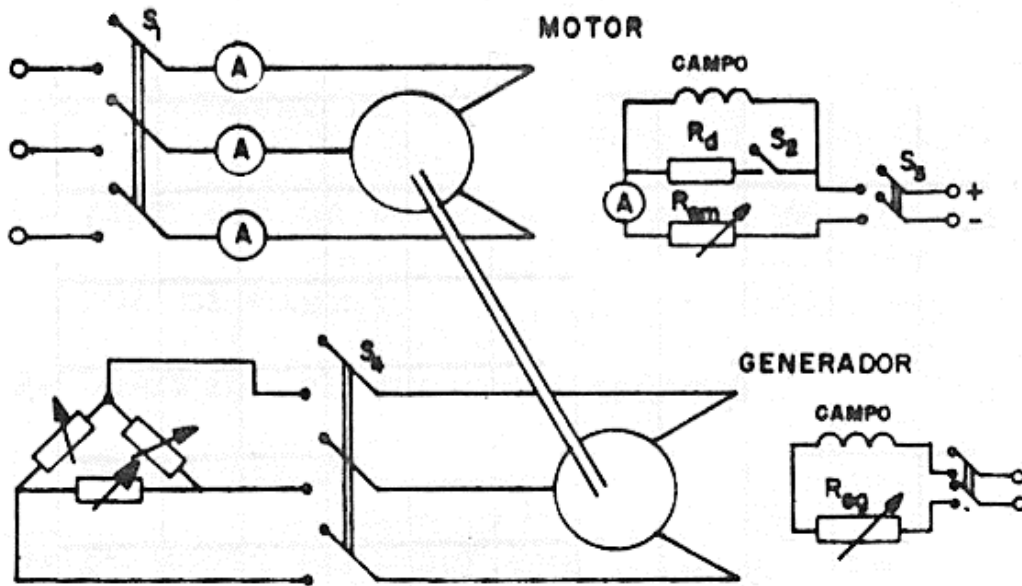


Figura 2.8. Circuito a montar para la realización de la práctica

1. Se pondrá a la máquina en régimen de trabajo como motor una vez sincronizado dejándolo trabajando y alimentándose de la red como carga.
2. Se tomarán puntos para construir la característica en v para distintos valores de potencia de salida, la potencia de salida se determina leyendo el momento en el eje mediante la balanza del electrodinamómetro y multiplicándola por la velocidad sincrónica. Se utiliza la siguiente tabla.
3. Se observará el péndulo del motor y la forma de reducirlo.

El informe se realizará de la siguiente manera:

1. Datos nominales de la máquina utilizada.
2. Circuitos montados y resultados obtenidos.
3. Característica en v del motor sincrónico, incluyendo característica de $f_p=1$ y zonas de trabajo.
4. Se agregan los puntos mostrados en capítulo 3.3

2.7 Conclusiones:

- ✚ Durante la realización del capítulo se definieron de forma precisa cada una de las prácticas de laboratorio de MERII a realizar en el laboratorio de MERII del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, se muestran cálculos necesarios para la obtención de parámetros del circuito equivalente y se brindan resultados obtenidos en forma de valores y gráficos.
- ✚ Se crearon y plasmaron las diferentes metodologías para el puesto de trabajo de MERII, así como un análisis de cada práctica a desarrollar.

Capítulo 3. Resultados obtenidos

Restablecimiento de la funcionalidad del banco de prueba de generadores sincrónico del laboratorio de máquinas eléctricas

CAPÍTULO 3. Resultados obtenidos

Introducción: El desarrollo de este capítulo tiene como objetivos principales establecer un conjunto de parámetros necesarios para desarrollar actividades prácticas durante la realización de las prácticas de laboratorios que se realizan sobre una MERII, las cuales garantizarán el correcto desempeño de las prácticas así como la protección del personal y los equipos además de la valoración social del trabajo, con la finalidad de evaluar los resultados alcanzados.

3.1. Preparación para el trabajo de laboratorio.

Al realizar el trabajo de laboratorio hay que imaginarse claramente el objetivo de la práctica y el carácter de los hechos y cuestiones que se estudian. En cada trabajo se cita la literatura recomendada.

Al estudiar los principios técnicos debemos calcular el régimen dado del esquema eléctrico, acompañado de una breve explicación del mismo y de las fórmulas a utilizar.

Según los resultados del cálculo, si es necesario, representarlos mediante diagramas o gráficos, que muestren los rangos de variación de las magnitudes que deberán ser medidas. Además se debe confeccionar las tablas necesarias para tomar dichas magnitudes en la práctica, las cuales deben ser construidas para seis u ocho mediciones de cada magnitud en aquellos casos que se requiera construir curvas de dependencia funcional, en caso contrario bastará con tomar uno o dos valores solamente. Luego deberá confeccionarse el esquema del circuito que se utilizará en la práctica indicando los puntos de conexión de los instrumentos de medición.

Los cálculos con breves explicaciones, el programa de realización de la práctica, los gráficos y diagramas de valores calculados, los esquemas de funcionamiento del circuito, así como las tablas preparadas para tomar los datos, conformarán un

informe previo del trabajo que el estudiante deberá presentar al profesor antes de comenzar el trabajo así como el correspondiente a la práctica anterior.

3.2. Realización del trabajo

Resulta indispensable para la realización de cada práctica que se realice:

- Conocer los equipos del puesto de trabajo.
- Elegir los instrumentos de medición adecuados de acuerdo al rango de variación de las magnitudes a medir, previamente determinadas.
- Montar el esquema del circuito eléctrico con el que se trabajará.
- Avisar al profesor para verificación del montaje.
- Antes de conectar el esquema debemos regular las fuentes de alimentación al mínimo (posición inicial).
- Comprobar el esquema al conectar el circuito verificando los límites de variación de las magnitudes interesadas. En caso de existir anomalías (tensiones y corrientes muy grandes o bajas) desconectar el circuito y revisar para conocer las causas.

3.3. En la realización del informe a presentar se debe de incluir los siguientes datos.

- Nombre de la práctica.
- Nombres y apellidos del estudiante, así como su número en la lista.
- Fecha de realización.
- Tablas y diagramas obtenidos.
- Comparación entre los resultados obtenidos en los cálculos y en el experimento.
- Enumeración de los instrumentos de medición y equipamiento empleado.

- Realizar las actividades que se especifican en cada práctica según se orienta en el **Capítulo 2**
- Conclusiones.

Los diagramas o curvas del informe se trazan a partir de los puntos obtenidos en los cálculos o en los experimentos según el caso. Los datos resultantes del experimento generalmente tienen alguna variación con respecto al valor real de la magnitud medida, debido a causas imposibles de prever (fluctuación de la tensión, errores en la medición).

Es por ello que al construir una curva a partir de los datos del laboratorio, puede ocurrir cierta dispersión de los mismos. La curva debe pasar entre los puntos del experimento y debe ser una línea suave. Además es necesario escoger una escala a conveniencia, indicando en cada eje de coordenadas las magnitudes que representan y las unidades en que aparecen graduadas.

3.4. Medidas de seguridad para el trabajo en el puesto de laboratorio:

Para un correcto desempeño de los laboratorios cada estudiante y el profesor a cargo deben seguir estrictamente con diferentes medidas y obligaciones en beneficio a su seguridad personal así como en aras de conservar y proteger el puesto de trabajo.

Medidas de seguridad durante el trabajo en el puesto de prácticas de generadores sincrónicos:

- Usar las herramientas y accesorios adecuados.
- Todo el piso del banco de prueba debe estar rodeado por manta eléctrica con resistencia superior a los 1000Ω .
- Solo debe estar en el área el/los estudiantes que estén realizando las conexiones.
- Energizar el circuito después que las conexiones y partes hayan sido supervisadas por el técnico de laboratorio que esté al frente del grupo.

- No tocar los conductores, instrumentos y partes de la máquina que no estén aislados.
- No desmontar las conexiones sin comprobar que el interruptor está en la posición de desconectado.
- No trabajar con ropa húmeda.
- Trabajar durante la práctica con las manos limpias y secas.
- No frenar las máquinas con el pie o las manos para detenerlo rápidamente.
- No tocar ninguna pieza en movimiento.
- Cerciorarse que la ropa no tenga partes pendientes antes de acercarse a la máquina.
- No poner sobre el puesto de trabajo objetos ajenos a la práctica.
- No sobrepasar los valores de voltaje e intensidad de la corriente que se orienta.
- No golpear sobre los diferentes mecanismos de la máquina.

Obligaciones de los estudiantes antes del trabajo en el laboratorio:

- Estudiar la guía de trabajo de laboratorio y contestar las preguntas de control.
- Conocer el orden de realización de la práctica.
- Preparar el protocolo de realización del trabajo (nombre y objetivos del trabajo, esquemas, tablas, fórmulas de cálculo).
- Hacer los cálculos necesarios para los regímenes de trabajo de los circuitos de investigación indicados en la guía.

Obligaciones de los estudiantes durante el trabajo en el laboratorio:

- Mostrar al profesor el protocolo preparado.
- Demostrar conocimiento sobre las preguntas de control.
- Solo al recibir autorización del profesor debe montar los aparatos de medición y demás componentes del circuito eléctrico previsto.
- Después de la verificación del profesor debe conectar el circuito eléctrico previsto y comprobarlo.

- Establecer los parámetros necesarios del circuito y hacer la investigación en relación con el programa de trabajo.
- Mostrar al profesor los resultados del experimento y al recibir su autorización debe desconectar el esquema.
- Prestar la debida atención a la realización de las prácticas y mantener el chequeo de los instrumentos de medición.
- Desconectar el interruptor principal del puesto de trabajo ante cualquier anomalía que se presente en el circuito objeto de estudio.
- Mantener la organización y limpieza de los puestos de trabajo y el local.
- El protocolo de investigaciones de cada estudiante debe ser firmado por el profesor y debe ser entregado al mismo.
- La evaluación de cada trabajo se hará teniendo en cuenta la calidad de los resultados obtenidos, las respuestas a las preguntas de control y las habilidades en el trabajo con el puesto.

Obligaciones del técnico de laboratorio:

- Poner en conocimiento de los estudiantes el reglamento de realización y las medidas de seguridad del trabajo.
- Orientar a los estudiantes sobre las particularidades y objetivos del trabajo a realizar y facilitarles la guía a utilizar con una semana de antelación.
- Organizar el control del estado de preparación de los estudiantes para realizar el trabajo.
- Ofrecer las explicaciones necesarias a los estudiantes durante el desarrollo de la práctica.
- Comunicar la calificación de los trabajos y hacer los análisis de los errores cometidos.

3.5. Valoración social del trabajo

Este material servirá tanto para los profesores que específicamente imparten la asignatura de MERII como para los estudiantes. Estos últimos podrán disponer del

mismo en formato digital, posibilitando un compendio más completo que las notas que pueden recibir durante las actividades del aula y relacionar la teoría con la práctica, al mismo tiempo que disponen de una guía de estudio para la realización de cada práctica.

La forma en que se presentan las actividades donde el estudiante se considera protagonista permite valorar con precisión la fortaleza y debilidades de cada uno de ellos y en consecuencia actuar.

Por parte del docente le facilita contar con un nuevo documento de preparación para los estudiantes que le servirá de guía de estudio.

El trabajo presentado además de su importancia para el estudiante y profesor, también tiene su significado en cuanto, a que, constituye una documentación necesaria para la realización de los laboratorios de MERII.

3.6 Conclusiones

- Durante el transcurso del capítulo se ha cumplido con los objetivos propuestos.
- Se muestra cómo preparar el informe para el laboratorio por parte de los estudiantes.

Conclusiones Generales

- Se cumplió con los objetivos propuesto
- Se presentó un resumen de la estructura básica, tipos y campo de aplicación de los generadores sincrónicos.
- Se logra presentar como estado del arte el criterio de diferentes autores que han dedicado su tiempo en el estudio del tema para el caso de los ensayos de vacío y cortocircuito de los generadores sincrónicos.
- Se referencian diferentes prácticas a escala de laboratorio plasmando una visión o idea de cómo funciona en la industria, así como la sincronización de un generador con el sistema eléctrico nacional o la conexión en paralelo entre generadores sincrónicos.
- Se demuestra que la práctica de la máquina sincrónica en régimen motor se hace de vital importancia dada su importancia en el manejo de reactivos mostrándose cuando adsorbe o cede los mismos en su característica en v.

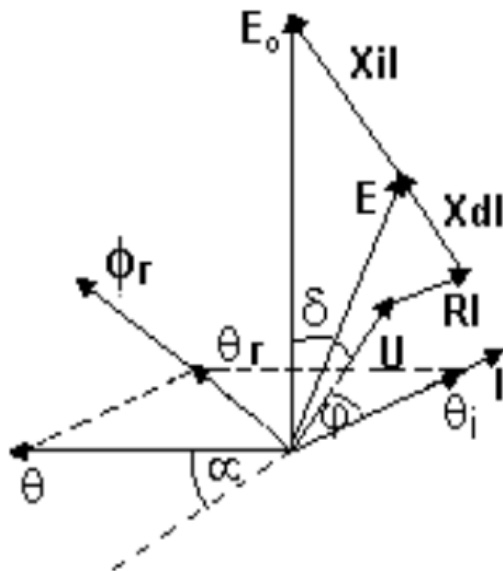
Recomendaciones

- Realizar las prácticas de laboratorios de MERII con el cuarto año de la carrera ingeniería eléctrica.
- Mantener y explotar con los estudiantes el BPGS.
- Reclutar estudiantes interesados con el tema, para el trabajo en el BPGS en su tiempo libre.
- Seguir perfeccionando el BPGS para la realización de otras prácticas en cursos posteriores.

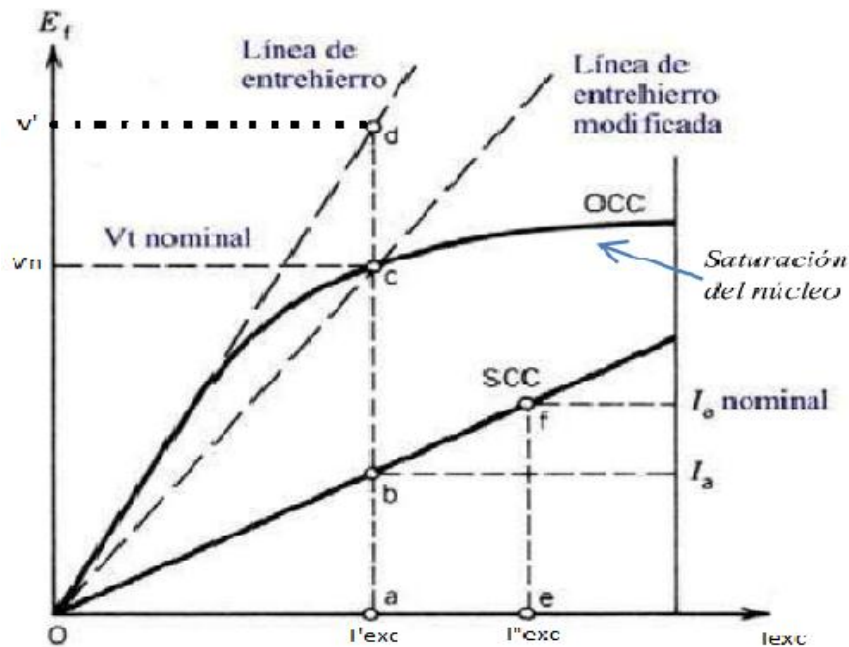
Bibliografía

- Prácticas de laboratorios de máquinas eléctricas III. Colectivo de autores. Redactado por Alfredo Santana Gálvez y Ángel Costa Montiel. Editorial Pueblo y Educación, 1988.
- IEEE guide: Test procedures for Synchronous Machines. March 11, 1882.
- Máquinas Eléctricas, sexta edición. Redactado por A. E. FitzGerald y Charles Kingsley, Jr. Impreso en ADAMSA Impresiones SA, ciudad México en enero 2004.
- IEC 2004, rotating electrical machines. International Electrotechnical commission.
- Máquinas eléctricas, Quinta Edición. Redactado por Jesús Fraile mora. Impreso McGraw-Hill Interamericana de España, S.A.U.
- Electric Machinery Fundamentals, 5th Edition. Redactado por Stephen J. Chapman. Copyright © 2012 McGraw-Hill, Inc.
- Pruebas de máquinas eléctricas, única edición. Redactado por F. Tiberio. Editorial vicens-vives.
- Prácticas de máquinas eléctricas y transformadores, única edición. Redactado por Luis F. Martínez García. Editorial pueblo y educación.

Anexos



Anexo 1. Diagrama vectorial de un generador sincrónico

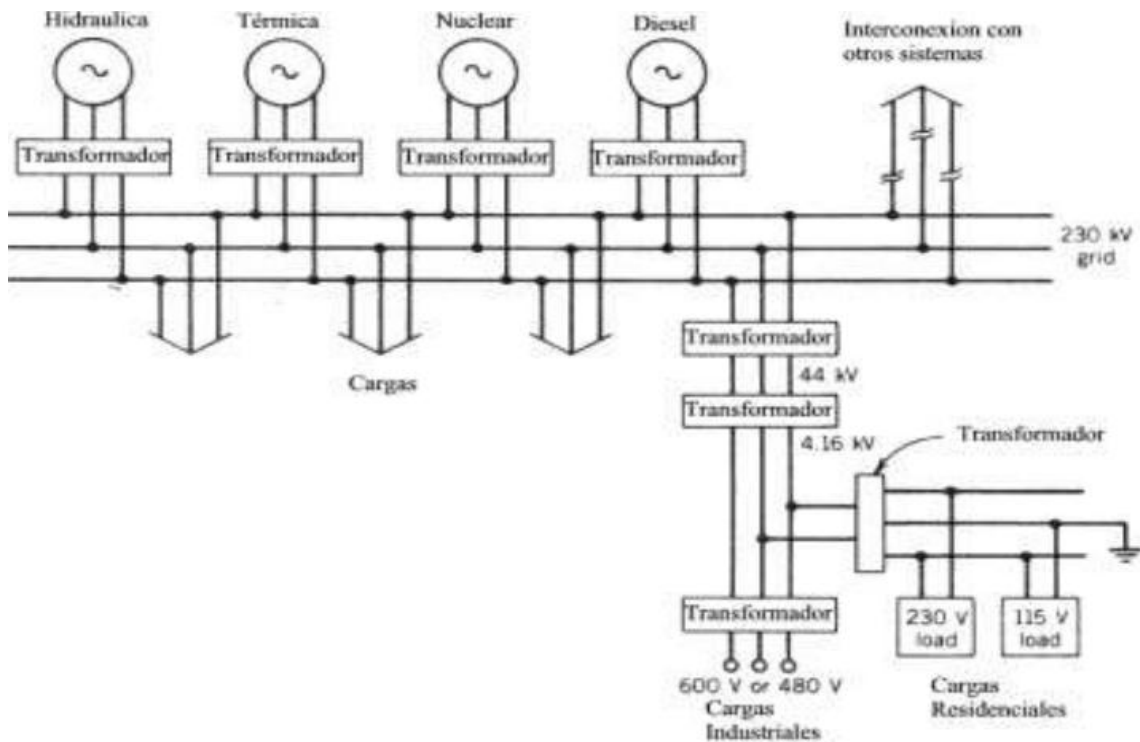


Anexo 2 Característica externa del generador sincrónico

Restablecimiento de la funcionalidad del banco de prueba de generadores sincrónico del laboratorio de máquinas eléctricas

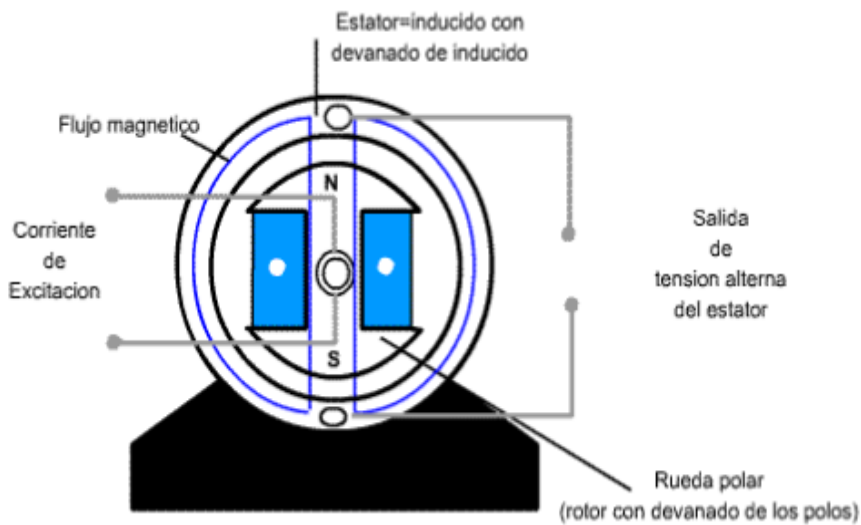


Anexo 3. Rotor de un generador sincrónico de polos salientes

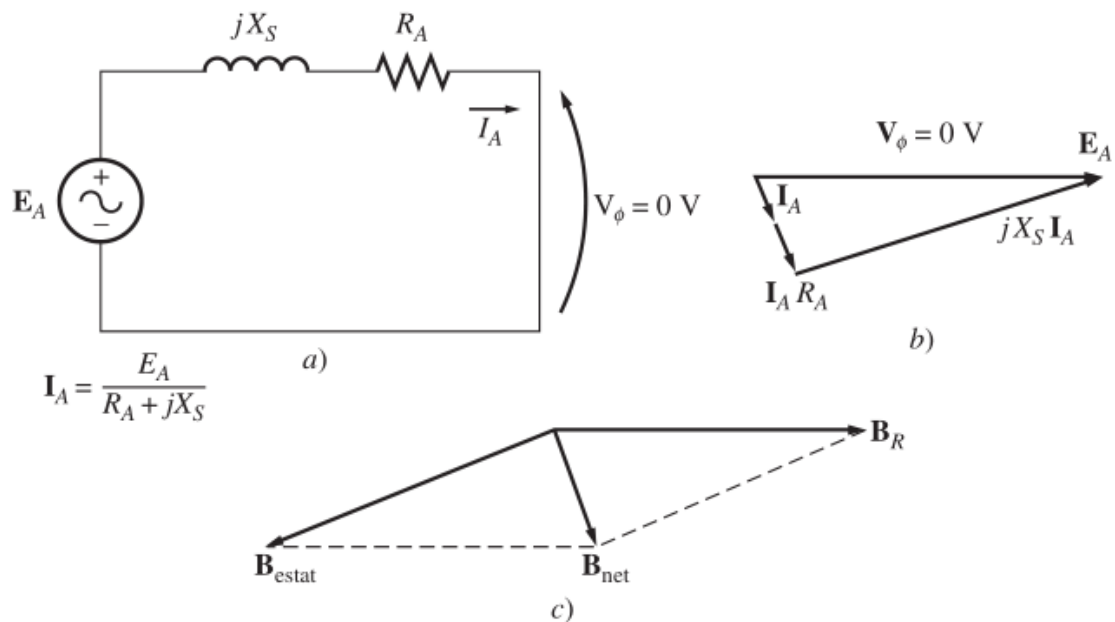


Anexo 4 Sistema interconectado de energía eléctrica.

Restablecimiento de la funcionalidad del banco de prueba de generadores sincrónico del laboratorio de máquinas eléctricas



Anexo 5. Esquema básico de una máquina síncrona.



Anexo 6. a) Circuito equivalente de un generador durante la prueba de cortocircuito b) diagrama fasorial resultante c) campos magnéticos durante la prueba