



*Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. Antonio Núñez Jiménez
Facultad Metalurgia-Electromecánica*

*Tesis presentada en opción al título de
Ingeniero Eléctrico*

*Revitalización del puesto GA-2FB para generación
asincrónica.*

Autor: Wilber Martínez Torres

Tutor: Ing. Carlos Ernesto Cruz Rodríguez

Moa 2017

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Con relación al contenido de la presente tesis, el autor es responsable y certifica la propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa Dr. "Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer el uso que estime pertinente con los resultados.

Para que así conste firmamos la presente:

A los _____ días del mes de _____ del _____

(Diplomante)

Ing. Carlos Ernesto Cruz Rodríguez

Pensamiento

Pensamiento



"Las ideas no necesitan ni de las armas, en la medida en que sean capaces de conquistar a las grandes masas".

Fidel Castro Ruz

Agradecimientos

Agradecimientos

Agradezco:

A mi madre Yamila Torres, por el inmenso amor que me ha dado toda la vida, por su apoyo maternal y cariño y por depositar en mí toda la confianza del mundo.

A mí querida hermana por ayudarme y apoyarme siempre.

A toda mi familia que siempre me ha apoyado, a Héctor, Mayda, Teresa, Yanisleidis, Barley, Cadena, Hectorin en fin a todos.

A mi compañera Teresa Esteris que siempre me ha dado su amor y apoyo incondicional en todo momento.

A todos mis amigos que me apoyaron.

A mi tutor Carlos Ernesto cruz, por guiarme y por apoyarme.

A todos muchas gracias.

Dedicatoria

Dedicatoria

Le dedico este trabajo de diploma a mi querida madre que ha sido siempre muy especial para mí, a mi hermana que la quiero mucho en fin a toda mi familia y a mi novia Teresa por siempre estar al lado mío en todo momento.

Resumen

Resumen

Los generadores asíncronos se utilizan para la recuperación de la energía de frenado y su introducción en la red ("frenado por recuperación"), así como para generar energía eléctrica. Aquí, los factores de revoluciones y potencia son independientes. Para la generación de electricidad, el generador asíncrono necesita una red de alimentación (generador asíncrono excitado por red) o una batería de condensadores conectada en paralelo con funcionamiento en isla (generador asíncrono excitado por condensadores o de autoexcitado). Estos generadores tienen varias ventajas como: muy económico durante el funcionamiento, adaptación a los distintos usos y especificaciones del cliente, incluyendo la energía hidroeléctrica, los generadores de banco de pruebas y de redes de a bordo, mantenimiento más económico y reducido en comparación con generadores síncronos tradicionales entre otras. Este trabajo recoge las principales pruebas a realizar en el laboratorio para la asignatura de máquinas eléctricas asíncronas, accionamiento eléctrico así como la actualización del puesto para su funcionamiento.

ABSTRACT

Asynchronous generators are used for the recovery of the braking energy and its introduction into the network ("braking for recovery"), as well as for generating electrical energy. Here, the revolutions and power factors are independent. For the generation of electricity, the asynchronous generator requires a mains supply (asynchronous generator excited by network) or a capacitor bank connected in parallel with island operation (asynchronous generator excited by capacitors or self-excited). These generators have several advantages as: Very economical during operation, adaptation to different uses and customer specifications, including hydropower, test bench generators and on-board networks, more economical and reduced maintenance compared to traditional synchronous generators, among others. This work includes the main tests to be performed in the laboratory for the subject of asynchronous electric machines, electric drive as well as the update of the station for its operation.

Tabla de contenido

Contenido

INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL.....	9
1.1 Estado del arte.	9
1.2 Aspectos teóricos de la Generación Asincrónica.....	9
1.3 Funcionamiento de la máquina asincrónica como generador.....	9
1.4 Pequeñas observaciones a tener en cuenta al analizar la generación asincrónica:	17
1.4.1 Factores que afectan la frecuencia generada.....	17
1.4.2 Excitación y tensión generada.	18
CAPÍTULO 2. REVITALIZACIÓN DEL PUESTO.....	21
2.1. Caracterización del puesto	21
2.2 Situación del puesto de trabajo.	21
2.3 Calculo de la capacitancia de excitación.	22
2.3.1 Determinación de los parámetros a partir de pruebas de vacío y de rotor bloqueado [7].....	22
2.3.1 Ensayo en vacío y Rotor Bloqueado al motor de 3kW.....	31
2.3.2 Ensayo a Rotor Bloqueado.....	32
2.5 Trabajo de reconstrucción y perfeccionamiento del puesto GA-2FB.....	34
CAPÍTULO 3. ANALISIS DE RESULTADOS Y VALORACIÓN SOCIAL.....	36
Introducción.....	36
3.1 Fundamentación.....	36
3.2 Esquema didáctico de conexión	36
3.3 Descripción del funcionamiento.....	38
3.4 Operación del puesto de ensayo	39
3.6 Medidas para un correcto funcionamiento:.....	39
3.7 Aplicaciones	40
3.8 Medidas de seguridad	40
3.9 Recomendaciones para la operación	42
CONCLUSIONES GENERALES.....	44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46

ANEXOS	48
--------------	----

Introducción

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe un extenso y continuo desarrollo de las máquinas asincrónicas atendiendo a su complejo régimen de trabajo y amplia utilización tanto en industrias como en los hogares. El conocimiento de este tipo de máquina es de vital importancia para los estudiantes de Ingeniería Eléctrica por lo que la realización de experimentos prácticos en un laboratorio de forma simultánea a la adquisición de conocimientos teóricos, constituye una tarea fundamental adoptada por las más prestigiosas universidades del mundo para consolidar los objetivos que se pretenden alcanzar.

En Cuba los motores de inducción son las máquinas rotatorias más usadas por lo que dentro de los programas por lo que se rigen la enseñanza de este tipo de máquinas contemplan la necesidad de la realización de prácticas de laboratorio tanto virtuales como físicos y para esto todas las universidades cuentan con locales especializados para dichos trabajos [1].

A los motores asincrónicos se le realizan una gran cantidad de prácticas, como son las pruebas de vacío y de corto circuito, pero en ocasiones las universidades no cuentan con los equipamientos necesarios para esto y por lo tanto no pueden cumplir en su totalidad sus objetivos. Al tener este problema se ven en la necesidad de adaptarse a las posibilidades que le brinda la tecnología con la que se cuenta siendo esto un obstáculo para el desarrollo de los estudiantes [2]. En el caso del Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa el puesto de laboratorio GA-2FB es de los que presentan dificultades para que los estudiantes puedan prepararse correctamente. Según la información y los materiales con los que se cuentan es posible realizar un conjunto de mejoras para lograr el funcionamiento óptimo del laboratorio.

Sobre la base de esta realidad se establece los elementos esenciales de la metodología de la investigación: el problema, la hipótesis y los objetivos.

Problema de investigación:

No se puede realizar prácticas en el puesto GA-2FB de generación asincrónica.

Hipótesis del trabajo:

Si se logra revitalizar el puesto GA-2FB de generación asincrónica se podrán realizar práctica par

Objeto de estudio:

Puesto de laboratorio GA-2FB de generación asincrónica

Campo de acción:

Revitalización del puesto

Objetivo general:

Revitalizar el puesto GA-2FB de generación asincrónica y así permitir que se puedan realizar prácticas de laboratorio.

Objetivos específicos:

1. Consultar las literaturas relacionadas con el objeto de estudio y el campo de acción para establecer tanto el estado del arte como facilitar el desarrollo de la investigación.
2. Realizar los cálculos de la capacitancia y reconstruir el puesto.
3. Realizar la valoración social del trabajo y proponer las medidas de seguridad.

Tareas de investigación

1. Consultas a la literatura relacionadas con el objeto de estudio y el campo de acción para establecer tanto el estado del arte como facilitar el desarrollo de la investigación.
2. Calcular la capacitancia y realizar las mejoras del puesto.
3. Realizar la valoración social del trabajo y proponer las medidas de seguridad.

Capítulo 1

Marco teórico conceptual

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

1.1 Estado del arte.

[3] trabajo de diploma con el título Actualización del puesto de laboratorio para la asignatura de máquinas asincrónicas donde recoge las principales pruebas a realizar en el laboratorio para la asignatura de máquinas eléctricas asincrónicas, así como la actualización del puesto para la realización de los ensayos.

[4], Instructivo con el título Generadores de inducción en las prácticas de laboratorios, (España) donde se describe una sencilla práctica de laboratorio. En ella se utilizan una máquina de inducción funcionando como generador y una de corriente continua. La práctica que se realiza no requiere de ningún instrumento especial, es simple de realizar y fácilmente comprensible.

1.2 Aspectos teóricos de la Generación Asincrónica.

La máquina asincrónica constituye una máquina de corriente alterna en la que la velocidad de rotación del rotor es menor que la del campo magnético del estator y depende de la carga, al igual que otras máquinas eléctricas tienen propiedad de ser reversible, es decir, pueden funcionar tanto como motor y como generador. Los generadores asincrónicos son usualmente utilizados en sistemas de energía eólica e Hidráulica, para suministrar la energía adicional a una carga en una red remota que posee una línea de transmisión aislada. Ser fuertes y baratos constituye sus mayores ventajas en esta aplicación, así como que la máquina primaria que mueve no necesita operar a velocidad sincrónica, sin embargo, debe ser equipada con un control que le permita incrementar la velocidad en correspondencia con el aumento de las cargas eléctricas conectadas a él.

1.3 Funcionamiento de la máquina asincrónica como generador.

Para su funcionamiento como generador es necesario que estén dadas algunas condiciones tales como:

- Se necesita hacer girar la maquina por encima de la velocidad sincrónica. Teóricamente, la velocidad en el régimen generador, puede variar en un amplio margen (n_s, n_r, ∞) , en realidad velocidades grandes de rotación no son admisibles debido a las condiciones de resistencia mecánica. Este proceso físicamente se explica de la siguiente manera: El campo gira en sentido inverso respecto al régimen motor ocurriendo una inversión del sentido de las corrientes del rotor respecto al régimen motor, como consecuencia varían los signos de la fem del rotor y de la componente activa de la corriente de este, trayendo consigo que varíe el signo del momento rotacional, o sea este último actúa en contra del sentido de rotación y será de frenaje. A consecuencia de la rotación de la corriente del rotor casi 180° , también gira en sentido de rotación de las agujas del reloj de la corriente del primario y la potencia del primario varían de signo, significando esto que ahora la maquina no consume como régimen motor, sino que entrega a la red corriente y potencia activa, o sea, trabaja en el régimen generador y convierte la energía mecánica consumida por el eje en potencia eléctrica.
- Se requiere de un deslizamiento negativo para esta operación, conllevando a que la cantidad $(1-s)$ sea mayor que la unidad pero solo ligeramente. En este caso el deslizamiento no debe ser menor que el deslizamiento critico debido a que en esta región el funcionamiento de la maquina se toma inestable. De acuerdo con las condiciones de restricción de las perdidas, del calentamiento y de la conservación de una eficiencia, en este régimen son posibles valores de deslizamiento del mismo orden que en régimen motor, este puede tomar valores entre $(-0.02$ y $-0.05)$ para su funcionamiento óptimo, necesitándose que este muestre valores lo más cercano posible a cero para así disminuir las perdidas, alcanzando un rendimiento la máquina.

La ecuación de la velocidad de rotación de la maquina está directamente relacionada con el deslizamiento.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (1.1)$$

Como puede apreciarse en la fórmula expuesta, (n_r) será la velocidad del rotor que debe crecer por encima de la velocidad del campo magnético del estator (n_s) hasta hacer el deslizamiento (s) negativo, de esta manera puede encontrarse la cuantía de velocidad (N_s) que hay que proporcionar por el eje de la máquina para ponerla a generar (Figura 1.1) e incluso encontrar la óptima superior para no fatigar mecánicamente a la máquina y hasta dicha velocidad prefijando un valor de deslizamiento a conveniencia entre 0 y s_{crit} para disminuir las pérdidas.

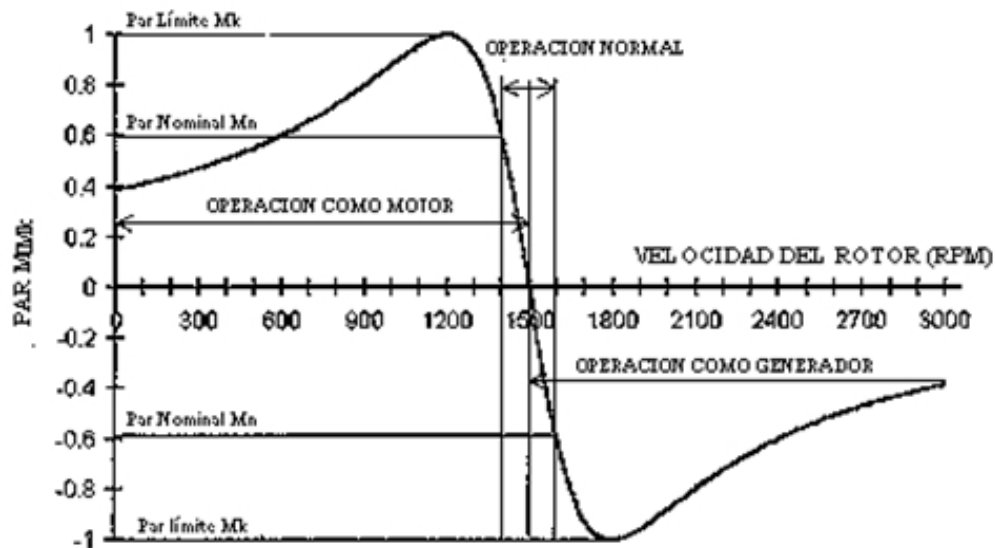


Figura 1.1 Características mecánica de la maquina asíncrona.

Esta máquina en su funcionamiento como generador puede ser operada de las formas siguientes:

- Generador de inducción (asíncrono) conectado a línea

- Generador de inducción autónoma

El generador trabajando en paralelo a la línea, consume de esta una corriente (I_l) igual a la magnetización (I_m), al tiempo que produce una corriente activa (I_a) en fase con la tensión de línea (U_a), que es entregada y consumida por las cargas eléctricas conectadas. La red al tener potencia infinita respecto al generador impone la frecuencia, en este caso solo se vela porque las tensiones sean iguales para el paso de régimen de motor del generador asincrónico, esta actúa como compensador de reactivos debido a la creación de su campo principal lo hace con el reactivo circulante en la línea y puede asumir así potencia reactiva inductiva de la misma magnitud de la que puede entregar, el esquema se muestra en la (Figura 1.1) cuando el interruptor K_2 está abierto y K_3 se encuentra cerrado. Si el generador asincrónico trabaja alimentando a una red local aislada, es decir, de forma autónoma, el reactivo necesario hay que proporcionarlo condensadores, constituyendo su excitación con la cual se regula la tensión y de esta misma forma debe asegurar la velocidad constante o variable en función de la carga para mantener la frecuencia. Cuando a sus terminales se conecta un banco de transformadores con una capacidad tal que la corriente consumida por ellos (I_c), sea igual en magnitud pero desfasadas 180° respecto a la corriente de la línea se logra anular la corriente de magnetización consumida de la red cuando el interruptor K_2 está cerrado y K_3 está abierto. Desde aquí se deduce:

$$\begin{aligned} I_l + I_c &= 0 \\ I_l &= -I_c \end{aligned} \tag{1.2}$$

Una explicación gráfica de lo anterior se puede ver en la (Figura 1.2) donde lo antes expuesto se muestra de forma vertical:

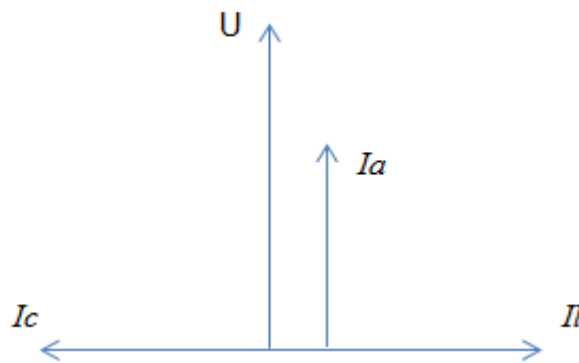


Figura 1.2 Diagrama Vectorial

Una vez establecido el sistema y la carga de los condensadores el sistema estará en condiciones de trabajar de forma autónoma y con autoexcitación de la red. En este caso la maquina consume una corriente ($I_l = I_m$) y los condensadores consumen una corriente ($I_c = I_l$).

Como explicación se establece que la corriente (I_m) va a ser consumida por la máquina para crear un campo magnético, como consecuencia de la generación surgirá una corriente activa (I_a) y una reactiva, de la primera se alimentaran la cargas eléctricas y la segunda será consumida por los condensadores, que luego aportan una corriente ($I_c = I_m$), cerrándose de esta manera el ciclo de funcionamiento autónomo.

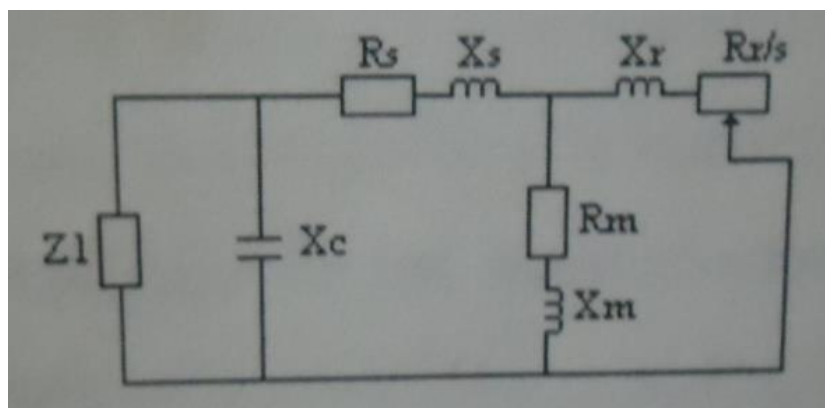


Figura 1.3 Esquema equivalente de un Generador Asíncrono.

Reactancia de los condensadores.

$$X_c = \frac{1}{\omega_s * C} \quad (1.3)$$

Corriente de los condensadores.

$$1 = \frac{E_{rem}}{X_s} = E_{rem} * C * \omega_s \quad (1.4)$$

Potencia de los condensadores.

$$Q = X_c * I_c^2 \quad (1.5)$$

Dónde:

ω_s : Velocidad del estator en rad/seg.

E_{rem} : Fem que surge debido a las características magnéticas propias del material del cual están constituidas las máquinas.

Las propias características constructiva de la maquina traerá consigo la existencia de un lujo de magnetización remanente en el hierro, que durante la rotación del rotor induce una fem remanente (E_{rem}) que provoca una corriente (I_c) en los condensadores, la cual circulando por el enrollado del estator de la maquina amplifica su flujo magnético. Como resultado la fem inducida y la corriente en los condensadores aumentan.

En la (Figura 1.4) se muestra como varia la fem inducida en el estator de la maquina respecto a la corriente de Magnetización (I_m) o con respecto a la corriente de los condensadores, en forma de una curva de vacío o de magnetización $(X_{\sigma_s} + X_m) * I_c$ la variación del voltaje del condensador respecto a su corriente ($U_c = I_c * X_c$) está determinada por la recta, mostrando a su vez el proceso de autoexcitación de forma escalonada.

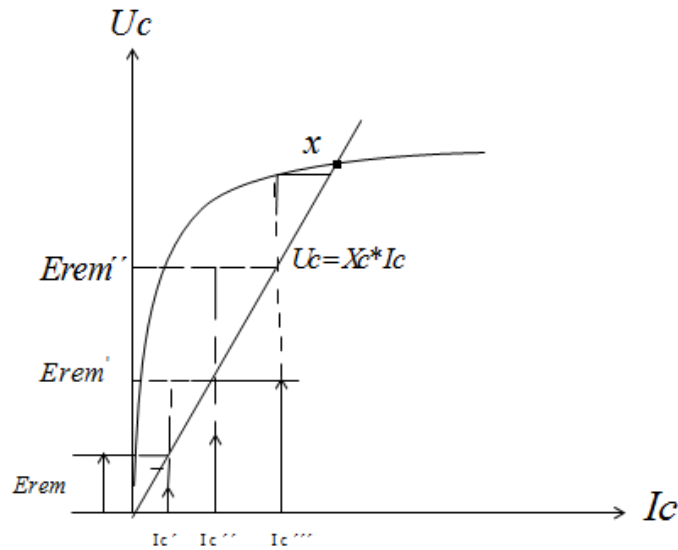


Figura 1.4 Proceso de autoexcitación de un generador asincrónico.

Haciendo un análisis más profundo tenemos que:

$$I_c = \frac{E_{rem}}{X_c} \quad (1.6)$$

Esta corriente inducirá en el estator una fem (E_1), provocando esta a su vez una corriente (I_c'') que dará lugar a otra fem en el estator (E_1''), continuándose este proceso hasta que al aumentar en gran medida la saturación la reactancia de magnetización disminuya tanto que dé lugar a igualarse a la tensión del condensador (punto x en la Figura 1.4).

De lo explicado anteriormente se deduce que:[1]

1. Los condensadores serán fuentes de corriente reactivas de magnetización para el generador ($I_L = I_m$)
2. La máquina asincrónica consume de la red corriente reactiva inductiva y entrega una corriente activa.
3. Los condensadores consumen de la red o del generador una corriente capacitiva desfasada 180° a la corriente inductiva útil del generador

4. La capacidad de ese banco de condensadores varía en dependencia de la carga conectada.

Si la carga es puramente activa la potencia de los condensadores debe igualarse a la potencia reactiva de magnetización del generador. Si esta es ahora compleja (R–L) se necesita aumentar la potencia de estos para que cubra también la potencia reactiva de la carga. Si por el contrario, la carga entonces es (R–C) se necesitara entonces de una menor potencia de estos.

De forma general la capacidad necesaria para la obtención de la tensión nominal del generador asincrónico con conexión de diferente tipo de cargas a sus terminales estará dada por la siguiente expresión:

$$Q_c = \frac{m_s * U_c^2}{X_c} = Q_g + Q_L = P_g * tg \varphi_g + P_L * tg \varphi_L \quad (1.7)$$

Tomándose a ($P_{nom} = P_g = P_L$) tenemos que:

$$C = \frac{P_{nom} * (tg \varphi_g + tg \varphi_L)}{2 * \pi * f * m * U_c^2} \quad (1.8)$$

Dónde:

PL: potencia activa de la carga

Pg: potencia activa del generador

Pnom: potencia nominal del sistema

Qg: potencia reactiva consumida por el generador

Qc: potencia reactiva que aportan los condensadores

Ql: potencia reactiva consumida por las cargas eléctricas

C: Capacidad de los condensadores

m: número de fases del estator

f: frecuencia

El proceso de autoexcitación de la máquina se produce por la carga del condensador al valor de la fem remanente producto del flujo remanente propio de hierro de la máquina y luego la respectiva descarga en la bobina del estator, para

un mejor entendimiento de este proceso se realizara el siguiente análisis, ayudado de su esquema equivalente, el cual se confeccionó con los parámetros obtenidos a través de los ensayos de cortocircuito y vacío previamente realizados a la máquina en cuestión (Figura 1.4) se determinaran las magnitudes y relaciones que caracterizan su régimen de trabajo. Aquí se tendrán en cuenta parámetros como la reactancia de dispersión del rotor y del estator ($X_{\sigma r}, X_{\sigma s}$) y la reactancia de magnetización (X_m) para así determinar la capacidad de los condensadores mediante las ecuaciones siguientes:

$$X_{\sigma_1} + X_m) * I_c = X_c * I_c \quad (1.9)$$

De lo expuesto anteriormente se deduce que la capacidad necesaria para la excitación del generador para una determinada frecuencia se calculara para la siguiente expresión:

$$C = \frac{1}{\omega_0 (X_L + X_m)} \quad (1.10)$$

X_s : inductancia del estator

X_m : inductancia de magnetización

1.4 Pequeñas observaciones a tener en cuenta al analizar la generación asincrónica:

1.4.1 Factores que afectan la frecuencia generada.

Trabajando el generador bajo condiciones nominales se puede observar como la reactancia inductiva y la tensión inducida por el entrehierro va a ser proporcionales a la frecuencia angular, mientras que la reactancia capacitiva variara inversamente [5].

Referido a la parte que le pertenece el generador en las curvas de las características mecánicas de la maquina (figura 1.1) se mostrará que el

deslizamiento será pequeño y negativo. Las cargas eléctricas no pueden ser incrementadas más allá del punto en el cual el momento desarrollado es máximo y el deslizamiento es crítico ya que en este punto la operación se torna inestable y la generación no es posible. La frecuencia de salida estará dada por:

$$f = \frac{p^* \omega}{2^* \pi^* (1-s)} \quad (1.11)$$

Donde el número de pares de polos está representado por (p).

Desde que el deslizamiento es negativo la cantidad (1- s) será mayor que la unidad, pero solo ligeramente. La frecuencia entonces dependerá primeramente de velocidad de rotación a la que está sometido el rotor y tendrá una pequeña disminución con el aumento de las cargas eléctricas.

1.4.2 Excitación y tensión generada.

Para que la tensión de salida sea desarrollada cuando un generador asincrónico aislado es sometido a una velocidad por eje, dos condiciones deben existir. La primera es que el núcleo del rotor debe tener algún magnetismo remanente, y la segunda es que la maquina debe tener suficiente excitación capacitiva conectada a sus terminales. El núcleo del rotor no necesita estar altamente magnetizado, usualmente la previa operación de la maquina habrá dejado el rotor con suficiente magnetismo, sino conectado una batería acumuladora a dos terminales cualesquiera del estator de la maquina con rotor estacionario lograría lo mismo.

Para un aumento de la corriente en la carga y la corriente del estator para frecuencia constante y un carácter activo o activo inducido de la carga, la tensión del generador tiende a disminuir por dos razones:

- Por la disminución de la caída de tensión ($I_1 * Z_1$) en la bobina del estator
- Por la disminución de la fem (E_1) como resultado de la disminución del flujo magnético de la máquina.

Esto último se entiende como: por el aumento de la carga disminuye la reactancia de la rama de magnetización, lo que provoca una disminución de la corriente de

magnetización. Si se mantiene constante la velocidad de rotación del rotor del generador y aumenta la carga, ahora la tensión disminuye con la disminución de la frecuencia. Para la estabilización de la tensión en estos casos se puede regular la velocidad de rotación o la corriente en la rama de magnetización. El método más utilizado consiste en la variación de la potencia reactiva, la cual circula en la maquina desde los condensadores, en este método se actúa directamente sobre la capacidad o la tensión del condensador.

Capítulo 2

Actualización del puesto

CAPÍTULO 2. REVITALIZACIÓN DEL PUESTO

2.1. Caracterización del puesto

El puesto de trabajo GA-2FB se encuentra en el laboratorio de Electrónica de potencia del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa y se utiliza para generación asincrónica. Este puesto cuenta con los siguientes componentes: Dos máquinas de inducción trifásicas de tensión nominal: 220/440 V, corriente nominal 12.15/6.07 A, una potencia nominal de 3 kW y 1710 rpm; una conexión estrella / estrella con factor de potencia de 0.9, uno trabajando como motor primario y el otro haciendo función de generador. A demás se cuenta con un analizador de redes y un variador de velocidad Altivar 18.

2.2 Situación del puesto de trabajo.

La instalación de un puesto de trabajo eléctrico requiere de diversas condiciones indispensables para su correcto funcionamiento con el objetivo de evitar que se produzcan averías en los componentes que lo conforman: motores, conductores, fuentes de alimentación, interruptores, equipos de medición y otros, trayendo como consecuencias la destrucción total o parcial de estos elementos a la vez que pueden resultar dañadas las personas que se encuentren trabajando en el área. El estudio realizado en el puesto GA-2FB para conocer su situación nos permitió comprobar que entre las principales deficiencias presentes en el mismo se encuentran las siguientes:

- Los conductores están fuera de norma y en muy mal estado, algunos están sueltos y sin aislar convirtiéndose en un peligro para la seguridad del puesto por lo que los estudiantes no pueden realizar las conexiones correspondientes a la función del puesto de forma segura.
- Los transformadores de corrientes están sin conectar.
- El analizador de redes no está funcional esto no permite la realización de mediciones en el puesto.

- Las conexiones del variador no están correctamente instalados.
- No se cuenta con el banco de capacitores que requiere el generador del puesto de trabajo lo que impide su correcto funcionamiento.
- La pizarra se encuentra en mal estado y se encuentra en peligro de rotura ya que esta suelta.

2.3 Calculo de la capacitancia de excitación.

El cálculo de la capacitancia de excitación se hará por el método analítico según la ecuación (1.10), para lo cual es necesario conocer algunos parámetros del circuito equivalente de la máquina de inducción [6].

2.3.1 Determinación de los parámetros a partir de pruebas de vacío y de rotor bloqueado [7]

En el libro Fitzgerald [7], para el ensayo en vacío desprecia la resistencia de magnetización y en su lugar opera con la reactancia, considerando el deslizamiento ideal (cero), con lo cual desaparece la rama del circuito equivalente que representa al rotor, sin embargo durante el ensayo a rotor bloqueado le da mayor importancia a la determinación de la impedancia del rotor, no desprecia la reactancia de magnetización.

Los parámetros de circuito equivalente necesarios para determinar el desempeño de un motor de inducción polifásico sometido a carga se pueden obtener a partir de los resultados de una prueba de vacío, una prueba con el rotor bloqueado y a través de mediciones de las resistencias de cd de los devanados del rotor. Las pérdidas por carga parásita también pueden ser calculadas por medio de pruebas que no requieren cargar el motor. No obstante, aquí no se describen las pruebas de pérdidas por carga parásita.

a). Prueba de vacío

Al igual que la prueba de circuito abierto en un transformador, la prueba de vacío en un motor de inducción proporciona información respecto de la corriente excitadora y de pérdidas sin carga. Esta prueba generalmente se realiza a

frecuencia nominal y con voltajes polifásicos balanceados aplicados a las terminales del estator. Se toman lecturas a voltaje nominal después de que el motor ha estado funcionando durante un tiempo suficientemente largo para que los cojinetes se lubriquen de forma adecuada. Se supondrá que la prueba de vacío se realiza con el motor funcionando a su frecuencia eléctrica nominal f_n , y se obtienen las siguientes mediciones:

V_{1nl} = Voltaje de línea a neutro [V]

I_{1nl} = Corriente de línea [A]

P_{nl} = Potencia de entrada eléctrica polifásica *total* [W]

En máquinas polifásicas es más común medir el voltaje de línea a línea, por lo tanto, el voltaje fase a terminal neutra debe ser calculado (dividiendo entre $\sqrt{3}$ en el caso de una máquina trifásica).

Sin carga, la corriente del rotor es solo un valor muy pequeño pero necesario para producir un par suficiente para vencer las pérdidas por fricción y rozamiento con el aire asociadas con rotación. Por consiguiente, la pérdida en el rotor sin carga I^2R es insignificante. A diferencia del núcleo magnético continuo en un transformador, la trayectoria magnetizadora en un motor de inducción incluye un entrehierro, el cual incrementa de manera significativa la corriente excitadora requerida. De este modo, en contraste con el caso de un transformador, cuya pérdida I^2R sin carga en el primario es insignificante, es posible observar la pérdida I^2R sin carga en el estator de un motor de inducción debido a que esta corriente excitadora es más grande[8].

Si se ignoran las pérdidas I^2R en el rotor, la *pérdida rotatoria* P_{rot} , en condiciones normales de operación se puede determinar restando las pérdidas I^2R en el estator de la potencia de entrada sin carga:

$$P_{rot} = P_{nl} - n_{ph} I_{1nl}^2 R_1 \quad (1.12)$$

La pérdida rotatoria total a frecuencia y voltaje nominales bajo carga en general se considera que es constante e igual a su valor sin carga. Observe que la resistencia del estator R_1 , varía con la temperatura de su devanado. Por lo tanto, cuando se aplique la ecuación, se debe tener cuidado de utilizar el valor correspondiente a la temperatura de la prueba de vacío.

Advierta que las consideraciones presentadas aquí ignoran las pérdidas en el núcleo y la resistencia por pérdidas en el núcleo asociadas, además asignan todas las pérdidas sin carga la fricción y rozamiento con el aire. Es posible realizar varias pruebas para separar las pérdidas por fricción y rozamiento con el aire de las pérdidas en el núcleo. Por ejemplo, si el motor no está energizado, se utiliza un motor externo para propulsar el rotor hasta la velocidad de vacío y la pérdida rotatoria será igual a la potencia de salida del motor propulsor requerida. Por otra parte, si el motor se pone a funcionar sin carga a su velocidad nominal y después se desconecta de manera repentina del suministro de corriente, la reducción de la velocidad de motor será determinada por las pérdidas rotacionales como

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = -T_{rot} = -\frac{P_{rot}}{\omega_m} \quad (1.13)$$

Por consiguiente, si se conoce la inercia J del rotor, es posible determinar las pérdidas rotacionales a cualquier velocidad ω_m partir de la reducción de velocidad resultante como sigue:

$$P_{rot}(\omega_m) = -\omega_m J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (1.14)$$

Por lo tanto, las pérdidas rotacionales a velocidad nominal se pueden determinar evaluando la ecuación cuando el motor primero se desconecta cuando funciona a velocidad nominal.

Si las pérdidas rotacionales sin carga se determinan de esta manera, la pérdida en el núcleo se establece como:

$$P_{m\acute{u}cleo} = P_{nl} - P_{rot} - n_{ph} I_{1nl}^2 R_1 \quad (1.15)$$

En este caso es la pérdida en el núcleo sin carga total correspondiente al voltaje de la prueba sin carga (por lo general voltaje nominal).

En condiciones de vacío, la corriente del estator es relativamente baja y, hasta en una primera aproximación, se puede ignorar la caída de voltaje correspondiente a través de la resistencia del estator y la reactancia de dispersión. Conforme a esta aproximación, el voltaje a través de la resistencia por pérdidas en el núcleo será igual al voltaje sin carga de línea a neutro y la resistencia por pérdidas en el núcleo se determina como:

$$R_c = \frac{n_{ph} V_{nl}^2}{P_{nucleo}} \quad (1.16)$$

Siempre que la máquina funcione próxima a la velocidad y voltaje nominales, la corrección o ajuste asociado con la separación de las pérdidas en el núcleo, que se incorpora de manera específica en la forma de una resistencia por pérdidas en el núcleo en el circuito equivalente, no provocará una diferencia significativa en los resultados de un análisis. Por consiguiente, es común ignorar la resistencia por pérdidas en el núcleo y simplemente incluir las pérdidas en el núcleo junto con las pérdidas rotacionales. Por simplicidad analítica, se continuará este acercamiento en el resto del texto. No obstante, si es necesario, el lector encontrará que es relativamente simple modificar las deducciones restantes para incluir de manera apropiada la resistencia por pérdidas en el núcleo.

Debido a que el deslizamiento sin carga es muy pequeño, la resistencia del rotor reflejada, R_2/s_{nl} es muy grande. La combinación en paralelo de las ramas del rotor y las ramas de la magnetización se convierten en jX_m en paralelo con X_2 que es una reactancia en derivación por la reactancia de dispersión X_2 en resistencia muy alta, y la reactancia de esta combinación en paralelo es casi igual a X_m . Por consiguiente, la reactancia aparente X_{nl} medida en las terminales del estator en vacío es casi igual a $X_l + X_m$, la cual es la autorreactancia X_{11} del estator, es decir:

$$X_{nl} = X_{11} = X_l + X_m \quad (1.17)$$

Por lo tanto, la reactancia propia del estator se determina a partir de las mediciones en vacío. La potencia reactiva sin carga Q_{nl} se establece como:

$$Q_{nl} = \sqrt{S_{nl}^2 - P_{nl}^2} \quad (1.18)$$

Donde

$$S_{nl} = n_{ph} \cdot V_{1nl} \cdot I_{1nl} \quad (1.19)$$

Es la entrada de potencia aparente sin carga.

La reactancia de vacío X_{nl} se calcula entonces con Q_{nl} e I_{1nl} como:

$$X_{nl} = \frac{Q_{nl}}{n_{ph} I_{1nl}^2} \quad (1.20)$$

Por lo general, el factor de potencia sin carga es pequeño (es decir, $Q_{nl} \gg P_{nl}$) de modo que la reactancia sin carga es casi igual a la impedancia sin carga:

$$X_{nl} \approx \frac{V_{1nl}}{I_{1nl}} \quad (1.21)$$

b). Prueba de rotor bloqueado

Al igual que la prueba en cortocircuito en un transformador, la prueba de rotor bloqueado en un motor de inducción proporciona información con respecto a las impedancias de dispersión. El rotor se bloquea de modo que no pueda girar (por consiguiente, el deslizamiento es igual a la unidad), y aplica voltajes polifásicos

balanceados a las terminales del estator. Se supondrá que las siguientes mediciones se obtuvieron con la prueba de rotor bloqueado:

V_{1br} = Voltaje de línea a neutro [V]

I_{1br} = Corriente de línea [A]

P_{br} = Potencia de entrada eléctrica polifásica total [W]

f_{br} = Frecuencia de la prueba de rotor bloqueado [Hz]

En algunos casos también se mide el par con el rotor bloqueado.

El circuito equivalente en condiciones de rotor bloqueado es idéntico al de un transformador en cortocircuito. No obstante, un motor de inducción es más complicado que un transformador, porque su impedancia de dispersión puede ser afectada por la saturación magnética de las trayectorias del flujo de dispersión y por la frecuencia del rotor. La impedancia con el rotor bloqueado también puede ser afectada por la posición del rotor, aunque este efecto en general es pequeño en el caso de los rotores de jaula de ardilla.

El principio rector es que la prueba de rotor bloqueado debe realizarse en condiciones donde la corriente y la frecuencia del rotor sean aproximadamente iguales a las de una máquina en funcionamiento, cuyo desempeño requiera ser evaluado posteriormente. Por ejemplo, si existe interés en las características con deslizamientos cercanos a la unidad como en el arranque, la prueba de rotor bloqueado deberá ser realizada a frecuencia normal y con la corriente próxima a los valores que se presentan al arranque. Pero, si hay interés en las características de funcionamiento normal, la prueba de rotor bloqueado deberá efectuarse con un voltaje reducido, lo cual da por resultado una corriente nominal; también es necesario reducir la frecuencia, puesto que los valores de resistencia e inductancia de dispersión efectivas del rotor a bajas frecuencias de éste, son correspondientes a pequeños deslizamientos que pueden diferir de manera notable de sus valores a frecuencia normal, en particular en el caso de rotores de barras profundas o de jaula doble.

La norma 112 de IEEE [9] sugiere una frecuencia para la prueba de rotor bloqueado de 25% de la frecuencia nominal. La reactancia de dispersión total a

frecuencia normal se obtiene con este valor de prueba, al considerar que la reactancia es proporcional a la frecuencia. A menudo, los efectos de la frecuencia son insignificantes en motores normales de menos de 25 hp, y entonces, la impedancia con el rotor bloqueado se puede medir de forma directa a frecuencia normal. La importancia de mantener las corrientes de prueba próximas a su valor nominal se deriva del hecho de que la saturación afecta de manera significativa estas reactancias de dispersión.

Con base en las mediciones con el rotor bloqueado, es posible encontrar la reactancia con el rotor bloqueado a partir de la potencia reactiva con el rotor bloqueado:

$$Q_{rb} = \sqrt{S_{rb}^2 - P_{rb}^2} \quad (1.22)$$

Dónde:

$$S_{rb} = n_{ph} V_{1rb} I_{1rb} \quad (1.23)$$

Es la potencia aparente total con el rotor bloqueado. La reactancia con el rotor bloqueada, corregida a la frecuencia nominal, se calcula entonces como:

$$X_{rb} = \left(\frac{f_r}{f_{rb}} \right) \frac{Q_{rb}}{n_{ph} I_{1rb}^2} \quad (1.24)$$

La resistencia con el rotor bloqueado se calcula con la potencia de entrada a rotor bloqueado como:

$$R_{rb} = \frac{P_{rb}}{n_{ph} I_{1rb}^2} \quad (1.25)$$

Una vez que se determinan estos parámetros, es posible establecer los parámetros del circuito equivalente. En condiciones de rotor bloqueado, se puede obtener una expresión para la impedancia de entrada al estator (con $s=1$) como sigue:

$$\begin{aligned} Z_{rb} &= R_1 + jX_1 + (R_2 + jX_2) \text{ en paralelo con } jX_m \\ &= R_1 + R_2 \left(\frac{X_m^2}{R_2^2 + (X_m + X_2)^2} \right) + j \left(X_1 + \frac{X_m (R_2^2 + X_2 (X_m + X_2))}{R_2^2 + (X_m + X_2)^2} \right) \end{aligned} \quad (1.26)$$

En este caso se supuso que las reactancias están a sus valores de frecuencia nominal. Con aproximaciones apropiadas (por ejemplo, si se supone $R_2 \ll X_m$), la ecuación se reduce y:

$$Z_{rb} = R_1 + R_2 \left(\frac{X_m}{(X_m + X_2)} \right)^2 + j \left(X_1 + X_2 \left(\frac{X_m}{(X_m + X_2)} \right) \right) \quad (1.27)$$

$$Z_{rb} = R_1 + R_2 \left(\frac{X_m}{(X_m + X_2)} \right)^2 + j \left(X_1 + X_2 \left(\frac{X_m}{(X_m + X_2)} \right) \right) \quad (1.28)$$

Así, la resistencia aparente en condiciones de rotor bloqueado está dada por:

$$R_{rb} = R_1 + R_2 \left(\frac{X_m}{(X_m + X_2)} \right)^2 \quad (1.29)$$

Y la reactancia con el rotor bloqueado a frecuencia nominal aparente por:

$$X_{rb} = \left(X_1 + X_2 \left(\frac{X_m}{(X_m + X_2)} \right) \right) \quad (1.30)$$

De acuerdo con las ecuaciones, la reactancia de dispersión del rotor X_2 y la resistencia R_1 se determinan como:

$$X_2 = (X_{br} - X_1) \left(\frac{X_m}{(X_m + X_1 - X_{br})} \right) \quad (1.31)$$

$$R_2 = (R_{rb} - R_1) \left(\frac{X_m + X_2}{X_m} \right)^2 \quad (1.32)$$

Para lograr la máxima precisión que se obtiene con la prueba de vacío, de ser posible, el valor de la resistencia del estator R_1 utilizado en la ecuación deberá ser corregido al valor correspondiente a la temperatura de la prueba de rotor bloqueado.

Si se sustituye X_m de la ecuación en la ecuación se obtiene:

La ecuación expresa la reactancia de dispersión del rotor X_2 en función de las cantidades medidas X_{nl} y X_{rb} y la reactancia de dispersión del rotor. No es posible hacer una medición adicional con la cual se puedan determinar X_1 y X_2 de manera única. Por fortuna el desempeño del motor es afectado relativamente poco por la manera en la que la reactancia de dispersión total se distribuye entre el estator y el rotor. La norma 112 de IEEE [9] recomienda la distribución empírica mostrada en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Distribución empírica de reactancias de dispersión en motores de inducción.

Clase de Motor	Descripción	Fracción de $X_1 + X_2$	
		X_1	X_2
A	Par de arranque normal, corriente de arranque normal	0.5	0.5
B	Par de arranque normal, corriente de arranque baja	0.4	0.6
C	Par de arranque alto. corriente de arranque baja	0.3	0.7
D	Par de arranque alto. alto deslizamiento	0.5	0.5
Rotor devanado	El desempeño varía con la resistencia del rotor	0.5	0.5

Si se desconoce la clase del motor, es común suponer que X_1 y X_2 sean iguales.

Una vez que se determina la relación fraccionaria entre X_1 y X_2 , se sustituyen en la ecuación (1.33) y X_2 (por consiguiente X_l) se calcula en función de X_{nl} y X_{rb} resolviendo la ecuación cuadrática resultante.

Entonces se determina la reactancia magnetizadora X_m con la ecuación.

$$X_m = X_{nl} - X_l \quad (1.33)$$

Por último, con la resistencia del estator conocida y los valores de X_m y X_2 que ahora se conocen, se calcula la resistencia R_2 con la ecuación.

2.3.1 Ensayo en vacío y Rotor Bloqueado al motor de 3kW

Para estos ensayos solo se calcularon los elementos del circuito equivalente necesarios para el cálculo de la capacitancia de excitación para el generador.

Tabla 2.2 Datos obtenidos de la prueba en vacío al motor de 3kW

$V_0 (V)$	$I_0 (A)$	Fp	$P_0 (W)$
217	4,86	0,11	150

Calculamos la Z_0 según la ecuación vemos que:

$$Z_0 = \frac{V_0}{I_0} \quad (1.34)$$

$$Z_0 = 4.45\Omega$$

Hayamos a R_0 con la ecuación:

$$R_0 = \frac{P_{10}}{3I_0^2} \quad (1.35)$$

$$R_0 = 2.11\Omega$$

R_m según la ecuación:

$$R_m = R_0 - R_1 \quad (1.36)$$

$$R_m = 0.91\Omega$$

X_0 Según la ecuación:

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \quad (1.37)$$

$$X_0 = 44.59\Omega$$

2.3.2 Ensayo a Rotor Bloqueado

En el ensayo a rotor bloqueado como el valor de tensión suministrado es pequeño, la f.e.m que se origina es pequeña también, por ello el flujo que la crea, a su vez, será pequeño y por tanto pueden despreciarse las pérdidas en el acero que este

provoca; de acuerdo con esto, toda la potencia que consume la máquina durante el ensayo se utiliza para compensar las pérdidas en el cobre del estator y el rotor.

Tabla 2.3 Datos obtenidos en el ensayo de rotor bloqueado

$V_{cc}(v)$	$I_{cc} (A)$	F_{pcc}	$P_{cc} (w)$
47,89	12,15	0,12	69,82

Se puede encontrar la reactancia de la rama de magnetización teniendo en cuenta la ecuación obteniéndose que:

$$\begin{aligned}
 X_m &= \frac{V_{1n}}{I_m} \\
 X_m &= \frac{V_0}{I_m} \\
 X_m &= 405.61\Omega
 \end{aligned}
 \tag{1.38}$$

Y X_{cc} sería:

$$\begin{aligned}
 X_{cc} &= X_1 + X_2 \\
 X_{cc} &= \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \sin \varphi_{cc} \\
 X_{cc} &= 3,97\Omega
 \end{aligned}
 \tag{1.39}$$

Según la [IEEE [9]] y como se recoge en la **Tabla 2.1** los valores de las reactancia de los devanados serían:

$$X_1 = X_2 = 4,98\Omega \tag{1.40}$$

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{1}{\omega_0 (X_L + X_m)} \\
 C &= \frac{1}{376,8(405,61 + 4,98)} \\
 C &= 6,46\mu F
 \end{aligned}
 \tag{1.41}$$

2.4 Conexión del banco de condensadores.

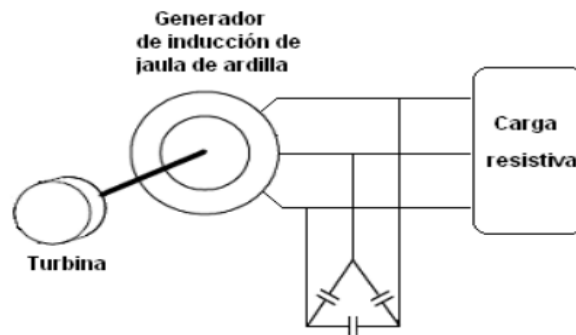


Figura 2.1 Conexión del banco de capacitores

2.5 Trabajo de reconstrucción y perfeccionamiento del puesto GA-2FB.

Durante el perfeccionamiento y reconstrucción del puesto se utilizaron los materiales que se encontraban disponibles en el laboratorio y se desempeñaron los siguientes trabajos para dejarlo en óptimas condiciones para la realización de las prácticas:

Los conductores fueron cambiados utilizando calibres que soporten las potencias que se manejan en el puesto, además las conexiones fueron aisladas para evitar cortos circuitos y accidentes.

Se conectó un autotransformador que permite la conexión del primario fijo con tensión de 240 Volts y un secundario con posibilidades de regulación desde 0 hasta 240 Volts, esto es necesario para la obtención de los parámetros del circuito equivalente.

Se realizaron los cálculos necesarios para obtener los valores de capacitancia que son requeridos para lograr el correcto funcionamiento del generador asincrónico.

La pizarra fue reparada atornillándose y asegurándose, logrando con esto que se pueda trabajar con confianza.

Capítulo 3

Análisis de Resultados y

Valoración Social

CAPÍTULO 3. ANALISIS DE RESULTADOS Y VALORACIÓN SOCIAL

Introducción

En este capítulo se realiza la práctica del montaje para el ensayo del generador asincrónico de jaula de ardilla, respondiendo a la voluntad del departamento de eléctrica del ISMM por la realización de laboratorios reales y el uso de tecnología de avanzada que fomente los conocimientos de última generación en el campo de la electricidad, independientemente que el puesto tiene un fin específico permite la realización de un sinnúmero de prácticas en las disciplinas de accionamiento y maquinas eléctricas, al tiempo que se pueden realizar investigaciones profundas para estudios superiores.

3.1 Fundamentación

Experimentar la maquina asincrónica como generador para las por las posibilidades que ofrece para el suministro de energía, sobre todo aplicadas a las fuentes primarias de energía renovable, todavía se conoce poco de las potencialidades y de deficiencias del generador asincrónico, el comportamiento de la frecuencia con la velocidad de rotación y de la tensión con la capacidad de excitación. El montaje práctico de un puesto de ensayo permitirá el estudio del generador asincrónico a fondo y su funcionamiento con variación real de la carga, la instalación facilita la obtención de las curvas de dependencia matemáticas entre las distintas magnitudes para el análisis y estudio concreto de esta máquina [5].

3.2 Esquema didáctico de conexión

La forma didáctica de conexión del puesto de ensayo posee esquemáticamente detallado un esquema eléctrico general que permite al estudiante o investigador ubicarse físicamente de las conexiones del circuito interno, de todas formas, es necesario para el mantenimiento o reparaciones conocer el circuito eléctrico real de conexión, con los símbolos y esquemas normalizados.

La función fundamental del puesto de ensayo para Generación Asíncrona con rotor en cortocircuito (GA-2FB) es la obtención e investigación de la generación asíncrona, independientemente de que dicho puesto permite un sinnúmero de prácticas de otras materias y disciplinas. Para que un motor asíncrono genere, la velocidad de rotación debe ser mayor a la velocidad de sincronismo. La velocidad de generación se puede imponer por medio de un motor primario acoplado por el eje con el generador y lograr que su velocidad sea mayor, el hecho de utilizar un variador de velocidad por frecuencia como fuente de alimentación del motor permite regular su velocidad en un amplio diapasón y de manera cómoda, económica, y de forma suave algo importante para la estabilidad de la generación en los momentos de cambio permitiendo apaciguar los procesos transitorios que se producen durante los cambios de nivel en la generación.

Es conocido que la excitación de un generador asíncrono se realiza por el estator y con fuentes de potencia reactiva que consisten en marcos de condensadores para régimen autónomos o la red para casos de sincronizarlos al sistema, en el esquema se representa por el banco de condensadores C que por medio del interruptor K2 permite ver el proceso de generación y autoexcitación del generador asíncrono al tiempo que en estado abierto permite ensayar al motor primario teniendo como carga prácticamente de vacío el peso del rotor del generador asíncrono que en estas condiciones es solo un motor más.

El puesto de trabajo posee en la superficie externa un esquema eléctrico didáctico que permite al estudiante o investigador una ubicación circuital simplificada del esquema eléctrico real de conexión para la generación asíncrona, una conexión elemental que ubica cada elemento físico del puesto con el lugar que ocupa en el esquema eléctrico y la función que realiza, la figura es fielmente lo que se representa en las partes frontales del panel con sus respectivas nomenclaturas o identificación.

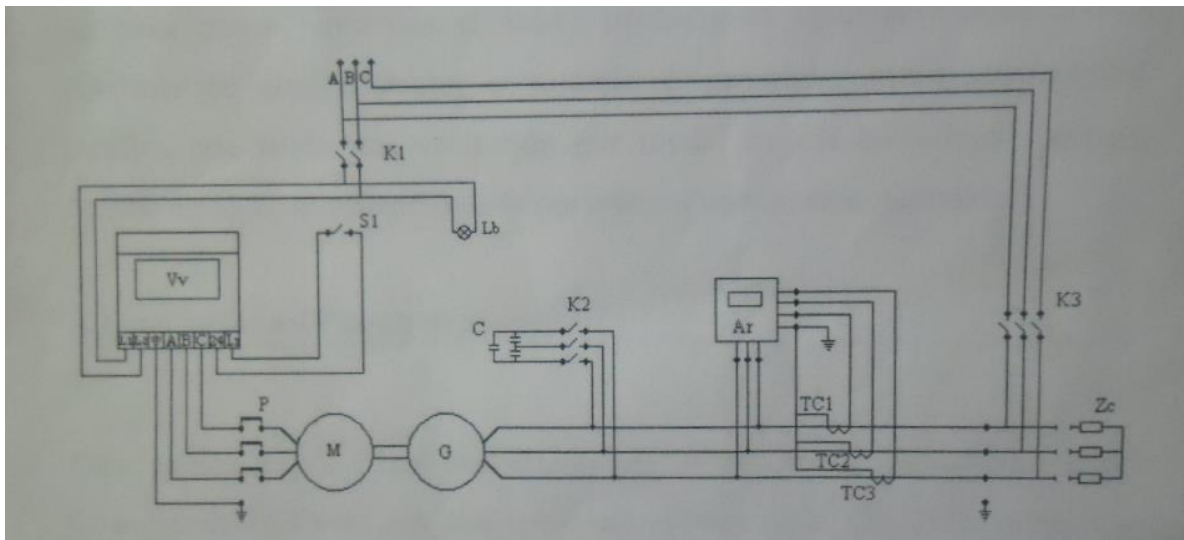


Figura 3.1 Esquema didáctico de conexión del puesto.

El esquema facilita la ubicación espacial de los diferentes elementos del circuito y técnicamente el acceso a determinados elementos del circuito como por ejemplo la excitación y la posibilidad de otros usos independientes de variador de velocidad y la conexión o sincronismo a la red ofreciendo facilidad de experimentación.

3.3 Descripción del funcionamiento

La generación asincrónica se logra cuando el motor primario impone una velocidad de rotación mayor a la velocidad de sincronismo. El variador de velocidad permite obtener distintas velocidades de rotación en un amplio rango incluso muy por debajo de la de sincronismo permitiendo encontrar el valor exacto a partir del cual comienza la generación, el rango por encima en el cual es factible dicha generación, el variador de velocidad sustituye a un autotransformador o incluso simular de forma experimental un rotor eólico junto con el motor primario el cual se expone a una corriente de aire, el motor secundario o generador entregara energía siempre que posea una excitación por medio de condensadores cuando trabaje en régimen aislado o de la red cuando trabaja en sincronismo.

3.4 Operación del puesto de ensayo

Para operar y poner en funcionamiento el puesto de laboratorio para generación asincrónica con rotor en cortocircuito (GA-2FB) , debe ser conectado el interruptor K1 (ver figura monolineal), que a su vez energiza la lámpara Lb indicando que el puesto está bajo energía listo para proceder a las pruebas del laboratorio le llega alimentación al variador (Vv)y este previamente programado con los datos de chapa del motor (M), se acciona el interruptor de arranque S1 hacia la derecha (On) lo que trae consigo que a través de los bornes de conexión (P) instalada a la salida del (Vv) le llegue tensión al motor (M) y este alcance la velocidad prefijada en el variador (Vv), transcurrido 5 segundo se conecta el interruptor K2 este provoca que se le aplique la excitación al generador (G) a través de condensadores(C) como fuente de potencia reactiva para que así logre su funcionamiento autónomo. Mediante el analizador digital de redes EMM-4e (Ar) conectado a la salida del generador (G) se podrá obtener la información de diferentes parámetros eléctricos (tensión de línea y fase, intensidad, factor de potencia, potencia activa, reactiva y aparente, frecuencia, temperatura, energía activa y reactiva), por lo que queda listo el sistema para la instalación de carga en el mismo, mediante los bornes de conexión situados a la salida del generador, ya lista la generación se puede proceder a la sincronización al SEN mediante el interruptor K3.

3.6 Medidas para un correcto funcionamiento:

- No operar el interruptor S1 sin antes operar K1.
- No arrancar con cargas elevadas.
- Cerciorarse que el interruptor K3 esté abierto antes de operar como generador.
- En caso de utilizarse el variador con otro motor se debe abrir el puente P.
- Para ver el efecto de autoexcitación, conectar K2 después de transcurrido el tiempo de respuesta del analizador de redes.

- En caso del variador poner la señal OHF, indicando bloqueo cerciorar que los contactos del puente P estén bien ajustados.
- No accionar K2 con cargas conectadas.
- No conectar la carga antes de la excitación por K2.
- Operar a K3 solo un tiempo después de estabilizada la generación.
- Conectar la carga externa a través de un interruptor que permita arrancar al vacío.

3.7 Aplicaciones

GA-2FB es un puesto de ensayo multiuso que permite estudiar la generación asincrónica como una de las formas más baratas para producir energía eléctrica, además de permitir la facilidad de implementación de varia pruebas para diferentes régimen de trabajo, el comportamiento del generador al conectársele la carga e implementar la sincronización del mismo a la red del Sistema Energético Nacional (SEN).

El puesto fue especialmente diseñado para investigaciones científicas pero por sus características se puede generalizar para otras aplicaciones relacionadas con las diferentes prácticas de laboratorio de la disciplina de accionamiento eléctrico y maquinas eléctricas.

3.8 Medidas de seguridad

Durante la realización de diferentes prácticas de laboratorio se tiene que tener en consideración ciertas normas de seguridad, encaminadas a la protección física del personal contra riesgos de accidentes eléctricos, así como la protección de equipos y medios de laboratorio frente a las malas operaciones que pueden dañarlos parcial o totalmente. Estas medidas son de estricto cumplimiento por parte del personal que hace uso del puesto del laboratorio, no prestar atención o no cumplir cabalmente con las mismas es una violación que podría acarrear daños

o perjuicios imprescindibles tanto para la vida humana o para el puesto de laboratorio,

1. El personal deberá ser instruido en las normas de seguridad antes de la realización del puesto de laboratorio.
2. No energizar el puesto de trabajo sin previa supervisión y autorización del responsable de la práctica.
3. Evitar el contacto directo de cualquier parte del cuerpo, con el circuito bajo tensión.
4. No realizar cambios en las conexiones sin a ver consultado con el responsable de la práctica y a ver desconectado el interruptor principal K1.
5. Ajustar los bornes de conexión cuando no se estén usando.
6. Trabajar durante la realización de las prácticas, con las manos limpias y secas.
7. Mantener el puesto de trabajo solo con los medios necesarios (no colocar bolsos, carteras, libros, pinzas u otro objeto que puedan provocar averías o daños en los circuitos).
8. No abandonar el puesto o trasladarse a otro sin autorización del responsable de la práctica y sin desconectarlo.
9. Prestar la debida atención a la realización de la práctica y mantener la vigilancia sobre las indicaciones de los instrumentos de mediciones.

10. No golpear bajo ningún concepto los diferentes dispositivos eléctricos que conforman el sistema.

3.9 Recomendaciones para la operación

Para garantizar que este puesto de ensayo adquiriera una mayor durabilidad y un mayor nivel de enseñanza e investigación para los estudiantes y profesores se recomiendan:

1. Lograr implementar la modernización del puesto de ensayo, de manera tal que se logren un sinnúmero de usos e investigaciones.
2. Realizar el mantenimiento al puesto según lo establecido en el manual de mantenimiento y reparaciones para evitar daños y deterioro del mismo.
3. Implementar los pasos a seguir para la puesta en funcionamiento del puesto de ensayo para generación asincrónica.
4. Lograr incluir el puesto como práctica de laboratorio en las asignaturas de máquinas eléctricas y accionamiento eléctrico.
5. Confeccionar los procedimientos y guía para realizar los laboratorios e investigaciones.
6. Tener en cuenta las medidas de seguridad descritas en el presente manual.

Conclusiones

Durante la realización de este capítulo se ha realizado una valoración social del trabajo y se ha hecho un resumen las principales medidas que deben cumplir los estudiantes y profesores durante el trabajo de laboratorio. También se pudo registrar los pasos que deben estar registrados en el informe que se debe entregar en cada práctica. Todo esto permitirá que se puedan realizar en orden las prácticas y evitara accidentes.

Conclusiones generales

CONCLUSIONES GENERALES

- Se realizó una búsqueda en los principales libros con los que se trabaja en la asignatura de Máquinas eléctricas en el instituto, determinando que las principales pruebas realizadas son: ensayo en vacío, ensayo a rotor bloqueado.
- Se desarrolló el cálculo de la capacitancia
- Se desarrolló una valoración de los resultados obtenidos en los ensayos lo que demuestra la veracidad de la metodología y se estableció un conjunto de normas que rigen el comportamiento a seguir en el laboratorio.

Referencias bibliográfica

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. R. Arcelles, "GENERADOR DE INDUCCIÓN AUTOEXCITADO CON CAPACITOR SHUNT Y AUTOREGULADO CON CAPACITOR SERIE PARA UTILIZACIÓN EN PLANTAS AUTONOMAS DE GENERACION EOLICA.," 2012.
- [2] S. J. Chapman, "Máquinas eléctricas," 2012.
- [3] C. E. Cruz, "Actualización del puesto de laboratorio para la asignatura de máquinas asincrónicas ." ingeniería 2016.
- [4] G. R. Burgos Payán, Vallejo Saura, "Instructivo con el título Generadores de inducción en las prácticas de laboratorios,España.."
- [5] L. C. Hernández, "Actualización y perfeccionamiento de puestos del Laboratorio de Máquinas Eléctricas ", Instituto Minero Metalurgico de Moa, 2001.
- [6] J. M. VíCtor Bonilla , Cristhian o spina ,ArGemiro C ollazos ,VíCtor s ánChez ,Ramiro o rtiz *, "Métodos para el cálculo de capacitores de autoexcitación para el generador asíncrono.," 2014.
- [7] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr. Stephen D. Umans, *Máquinas Eléctricas*, Sexta edición ed., 2004.
- [8] F. Tiberio, "Pruebas sobre Máquinas Eléctricas," 1965.
- [9] IEEE, "IEEE 112 Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.," vol. 112, ed, 2004.

Anexos

ANEXOS

Anexo 1: Manual EMM4e-485-caste V1.1

MULTIMETRO DIGITAL

EMM-4ep485



INTRODUCCIÓN

El multimetro digital de redes eléctricas EMM-4e485 mide todos los parámetros eléctricos presentes en la red. Permite visualizar más de 30 parámetros eléctricos gracias a sus 4 pantallas de LED que garantizan una perfecta y simultánea lectura.

Un simple panel frontal completa la selección intuitiva de los diferentes parámetros eléctricos ofreciendo gran cantidad de información.

Los analizadores de redes eléctricas EMM-4e485 sustituyen las funciones de voltímetros, amperímetros, fasímetros ($\cos \varphi$), vatímetros (potencia activa, reactiva y aparente), frecuencímetros, termómetros, contadores de energía, etc... permitiendo un gran ahorro económico, una reducción de las dimensiones y una mayor sencillez de utilización, ya que un único aparato cubre todas las necesidades de medición en un cuadro eléctrico.

Para usos de líneas MT, se sugiere se utilicen los modelos EMM-4ep485

Viene preparado para montaje en panel y es de dimensiones reducidas (96x96 mm). Existiendo también la versión modular EMM-D4e485 para montaje en carril DIN, equivalente a 6 módulos de 17,5 mm.

Estos modelos tienen comunicación vía RS485 y un Software propio para su mejor aprovechamiento y versatilidad en utilización.

MEDICIONES

TENSION DE LINEA	(V-kV)	$V_{L1-N} - V_{L2-N} - V_{L3-N} - \Sigma V$
TENSION ENTRE FASES	(V-kV)	$V_{L1-L2} - V_{L2-L3} - V_{L3-L1} - \Sigma V_{L-L}$
INTENSIDAD	(A-kA)	$I_{L1} - I_{L2} - I_{L3} - \Sigma I$
FACTOR DE POTENCIA	($\cos \varphi$)	$P.F._{L1} - P.F._{L2} - P.F._{L3} - \Sigma P.F._L$
POTENCIA ACTIVA	(W-kW-MW)	$P_{L1} - P_{L2} - P_{L3} - \Sigma P_L$
POTENCIA REACTIVA	(Var-kVA-MVA)	$Q_{L1} - Q_{L2} - Q_{L3} - \Sigma Q_L$
POTENCIA APARENTE	(VA-kVA-MVA)	$S_{L1} - S_{L2} - S_{L3} - \Sigma S_L$
FRECUENCIA	(Hz)	F_{L1}
ENERGÍA ACTIVA	kWh	ΣkWh
ENERGÍA REACTIVA	kVArh	$\Sigma kVArh$
VALORES MAXIMOS	Potencia activa media	$\Sigma P_{L \text{ max media (15)}}$
	Potencia activa	$\Sigma P_{L \text{ max}}$

INSTALACIÓN

Lea cuidadosamente las instrucciones de este manual antes de instalar el analizador de redes.

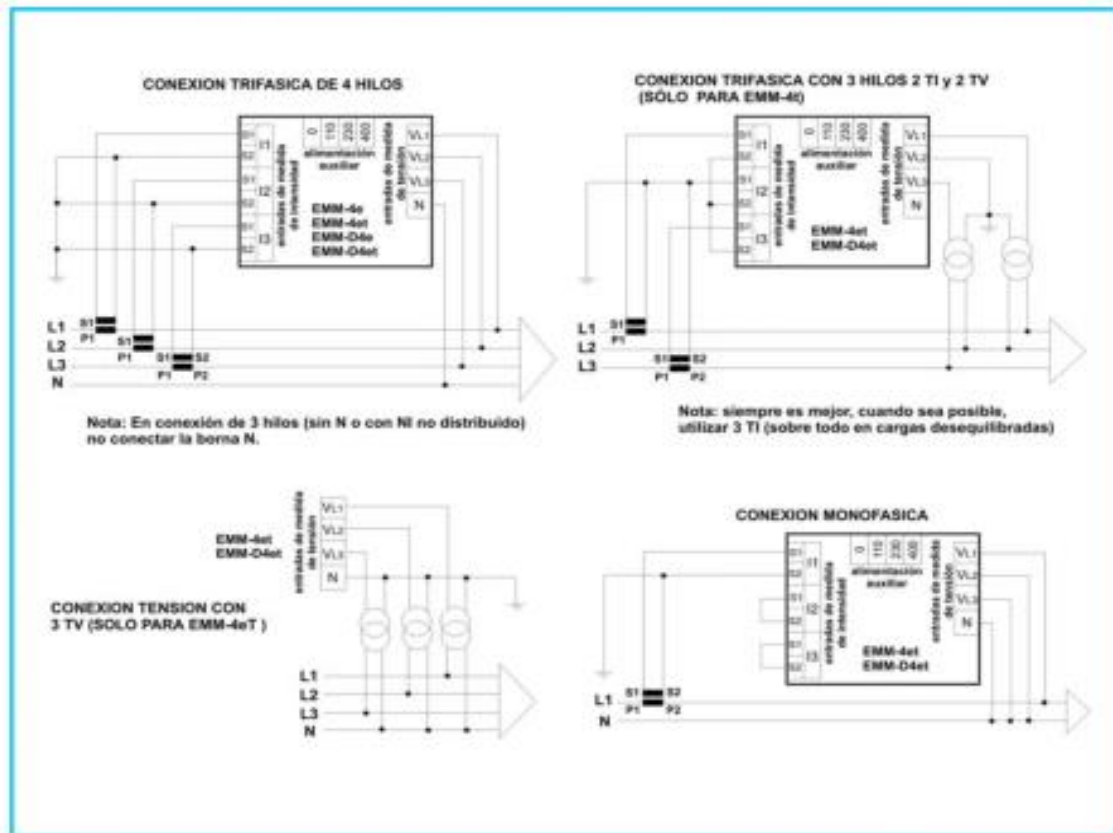
El instrumento descrito en este manual ha sido diseñado para ser usado por personal cualificado.

Este instrumento ha sido fabricado y diseñado de acuerdo a la norma IEC 1010. Con el fin de mantener estas condiciones y asegurar su correcto uso, el usuario debe seguir las instrucciones de este manual.

Antes de la instalación, verificar que todo está intacto y no ha sufrido daño alguno durante su transporte. Asegúrese de que la tensión auxiliar y la tensión principal sean compatibles con las del aparato.

La alimentación auxiliar del aparato no debe ser llevada a tierra. El mantenimiento y/o reparación debe ser realizado solo por personal cualificado y autorizado.

ESQUEMA DE CONEXIONES



CONEXIÓN

- ALIMENTACIÓN AUXILIAR

Dispone de 4 terminales para la conexión de la alimentación auxiliar siendo disponibles las siguientes tensiones:

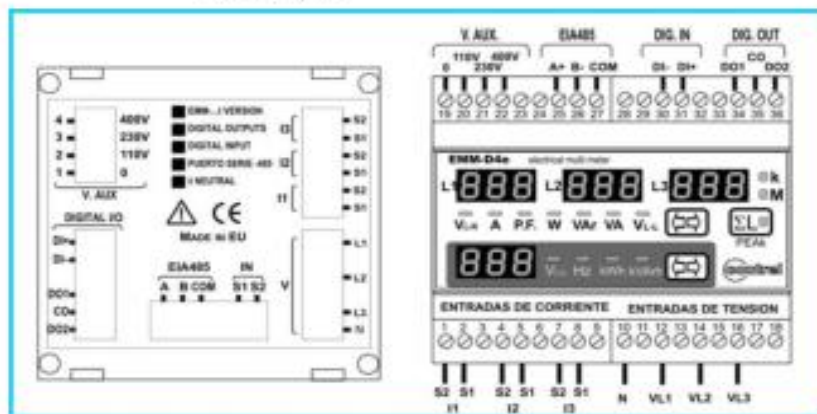
0 - 110 = 100-125 V (50-60Hz)
 0 - 230 = 220-240 V (50-60Hz)
 0 - 400 = 380-415 V (50-60Hz)

Es posible, por ejemplo tomar la alimentación de la red de medida utilizando fase y neutro, en un sistema de 4 hilos, entre fases en un sistema de 3 hilos sin neutro o bien de un TV, en aplicaciones de MT (sólo en las versiones EMM...T)

- ENTRADAS DE MEDIDA DE TENSION

Dispone de 4 terminales para la conexión del sistema de 3 hilos mas neutro. La tensión máxima entre fases no debe ser superior a 500 Vrms.

En el caso de sistemas de tres hilos (con o sin neutro no distribuido) simplemente no conectar el neutro N.



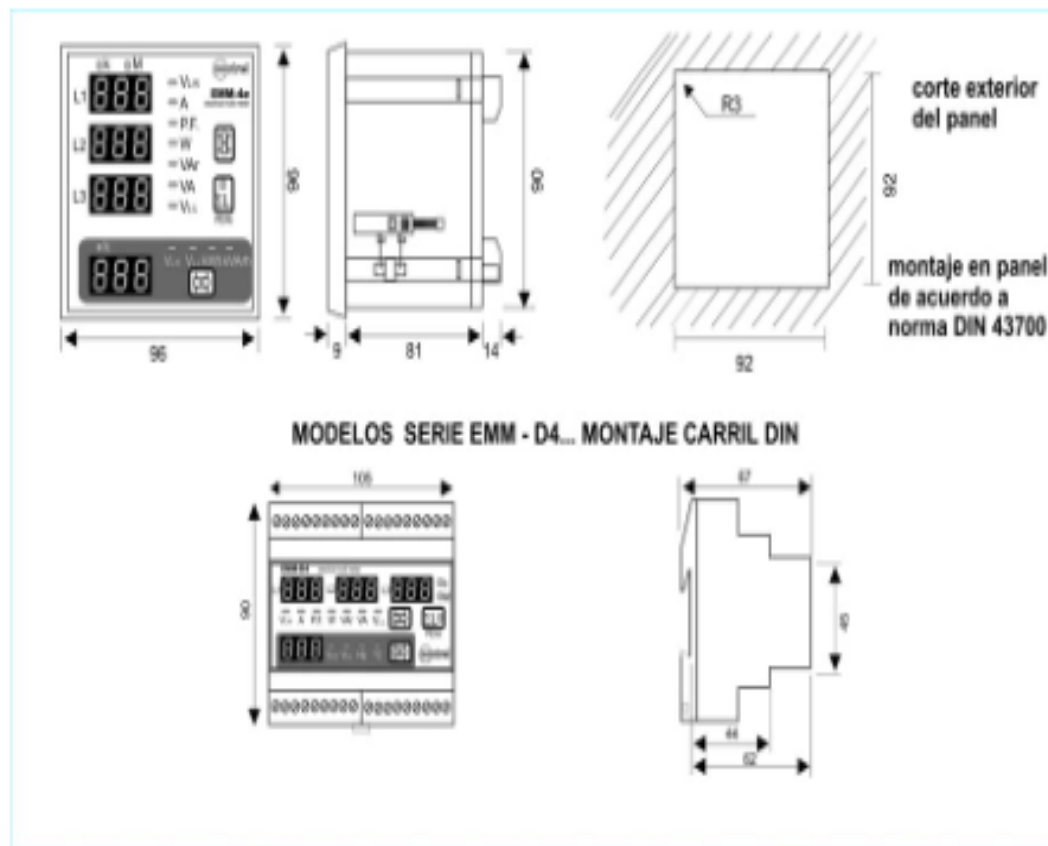
Manual de Instrucciones del EMM-4ep 485

- ENTRADAS DE MEDIDA DE INTENSIDAD

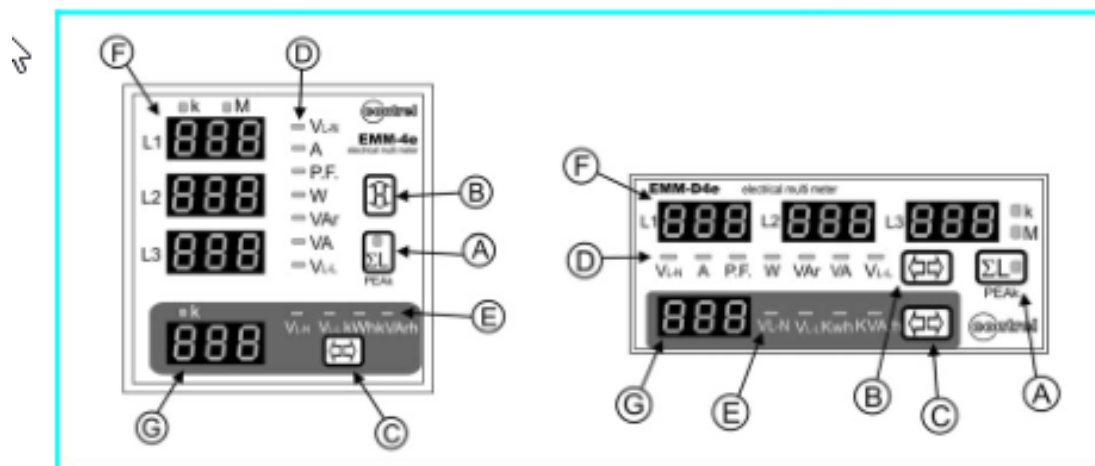
Dispone de 6 terminales para la conexión de los transformadores de intensidad (TI) externos con secundario 5A. Sólo en la versión EMM-4t es posible la conexión en líneas de media tensión utilizando los portuneros TV externos; también es posible el uso de 2 TI en líneas de 3 hilos (conexión trifase Aaron). Es totalmente necesario el uso de TI externos, a excepción de las versiones EMM-....t.

NOTA: Es fundamental respetar la secuencia de las fases, las conexiones entre las entradas de tensión e intensidad no deben ser invertidas (por ejemplo, el TI instalado en la fase L1 debe corresponder con la entrada I1) y al mismo tiempo no es correcto invertir los terminales S1 y S2 considerando que la medida del factor de potencia puede no ser fiable.

DIMENSIONES



DESCRIPCIÓN DEL PANEL FRONTAL



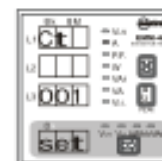
CONTROL Y VISUALIZACIÓN

- A** Pulsador para la visualización de los parámetros eléctricos del sistema trifásico ó valores de pico con el correspondiente LED de indicación..
- B** Pulsador para la selección de los parámetros eléctricos a visualizar en el display F.
- C** Pulsador para la selección del parámetro eléctrico a visualizar en el display G.
- D** LED de indicación del parámetro eléctrico visualizado en el display F.
- E** LED de indicación del parámetro eléctrico visualizado en el display G
- F** 3 displays para la visualización de las mediciones eléctricas realizadas en cada fase.
Cuando el LED ΣL está encendido, solo el display principal estará activo mostrando los valores de las mediciones eléctricas seleccionadas del sistema trifásico.
El LED k y M muestran el factor de multiplicación eventual (k = 1.000, M = 1.000.000)
Si se selecciona, indica también los valores de los contadores de energía activa y reactiva.
- G** Display para la visualización de la medición eléctrica indicada por el LED E.
Los valores de tensión son referidos a un sistema trifásico.
El LED k indica si la lectura es en kilos (x1.000).
- A+C** Presionando ambos simultáneamente, se pasa al modo de programación, al menú de visualización de los valores pico y de los contadores de energía.

PUESTA A PUNTO

PROGRAMACION DE LA RELACION DE TRANSFORMACION DE LOS TRANSFORMADORES DE INTENSIDAD

El ratio de la relación de transformación debe ser programado mediante los pulsadores frontales: Después de conectar la tensión auxiliar, esperar algunos segundos (durante el encendido, todos los LED y displays parpadearán alternativamente dependiendo del firmware). Presionar simultáneamente los botones **A** y **C**, en la pantalla **G** aparecerá el mensaje **set UP** ; presionar el pulsador **A** para acceder al menú de programación; en la pantalla **G** aparecerá el mensaje **set** ; en la primera y segunda pantalla **F** el mensaje **CT RAT** (relación de transformación de los TI), en la tercera pantalla **F** el valor de relación de transformación (establecido como 1 por el fabricante). Mantener presionado el botón **B** para incrementar el valor o presionar el botón **C** para disminuir el valor (la variación se efectúa unidad por unidad). Para acelerar la operación, teniendo presionado constantemente el botón **B** o **C**, la variación se efectuará sucesivamente por decenas o centenas.



Manual de Instrucciones del EMM-4ep 485

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

MEDICIONES Y PRECISIÓN

Tensión	Valor eficaz RMS de la tensión de fase y la tensión entre fases del sistema Rango de medida: 20 – 500 Vrms entre fases (290 Vrms entre fase y neutro) Precisión: $\pm 0.5\%$ ± 1 dígito Visualización: 0.02 – 50 kV	
Intensidad	Valor eficaz de la intensidad y valor medio de la intensidad del sistema Rango de medida: 0.02 – 5 Arms Precisión: $\pm 0.5\%$ ± 1 dígito Visualización: 0.02 – 9.99 kA	
Frecuencia	Frecuencia de la fase L1 Rango de medida: 40 – 500 Hz Precisión: $\pm 0.5\%$	
Potencia	Potencia activa, reactiva y aparente del sistema Rango de medida: 0.01 – 9990 kW, 0.01 – 9990 kVAr, 0.01 – 9990 kVA Precisión: $\pm 1\%$ ± 1 dígito	
Factor de potencia	Factor de potencia de cada fase y del sistema (media) Rango de medida: -0.1 +0.1 Precisión: $\pm 1\%$ ± 1 dígito	
Energía	Energía activa y reactiva del sistema trifásico Rango de medida: 0 – 9999999.9 kWh (kVArh) Clase 2 (IEC 1036)	

ALIMENTACIÓN AUXILIAR, ENTRADAS

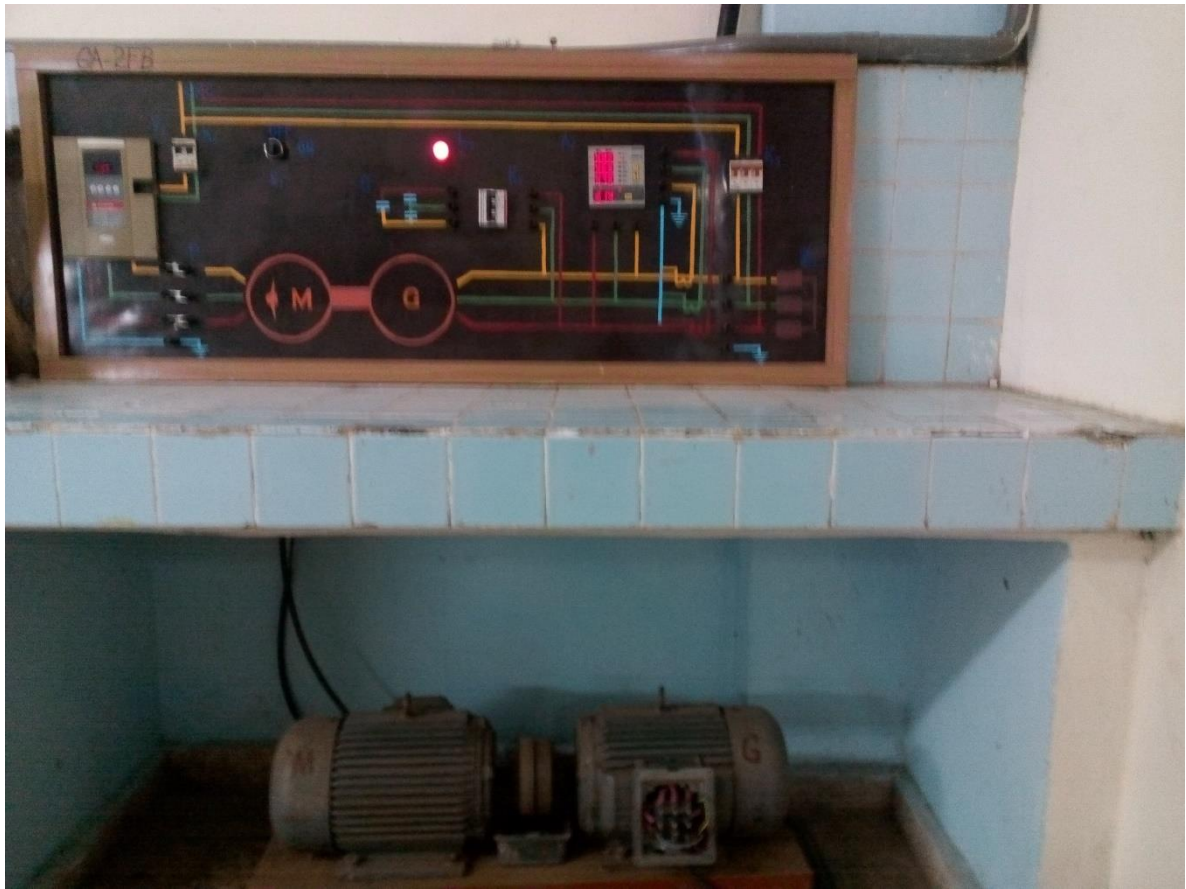
Alimentación auxiliar	100-125 / 220-240 / 380-415 V (50-60 Hz) Autoconsumo: 3 VA
Entradas de medida de tensión	De 20 a 500 V entre fases Sobrecarga permanente: 20% Impedancia de entrada: 1M Ω
Entradas de medida de intensidad	De 0.02 a 5 A Sobrecarga permanente: 30% Para TI externos con secundario /5A, primario programable de 5 a 10.000A.

ESPECIFICACIONES GENERALES

Displays	4 displays con LED rojos de 3 dígitos de 8 segmentos 3 botones para la selección de la medición y la programación de ratio de transformación de los TI
Datos mecánicos	Grado de protección: IP52 en el frontal (IP50 per EMM-D4...) Tamaño del frontal: DIN 96 x 96 (6 módulos para EMM-D4...) - Peso: 0.5 kg. Máxima sección para embornar: 2.5 mm ²
Ambiente	Temperatura de funcionamiento: -10 +60°C Temperatura de almacenaje: -10 +60°C Humedad: <90% Aislamiento: 3 kV (1 min)
Normativas marcados	y CEI EN 50081-2, CEI EN 50082-1 CEI EN 61010-1

Para cualquier duda o problema no reflejado en este manual, contacte con nuestro servicio de asistencia técnica. El fabricante declina cualquier responsabilidad por daños ocasionales en personas o cosas como resultado del uso erróneo o indebido del aparato.

Anexo 2: Puesto de laboratorio



Anexo 3: Motor y generador del puesto

