

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y FORMALES

PROGRAMA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA-
ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA



“DISEÑO, FABRICACIÓN Y ANÁLISIS DEL MODULO ALTERNADOR – MOTOR ASÍNCRONO CONTROLADO POR VARIACIÓN DE FRECUENCIA”

Tesis presentada por los Bachilleres:

VALDEZ RODRÍGUEZ, Julio Cesar

CUSIRRAMOS CARNERO, José Miguel

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

AREQUIPA – PERÚ
2013

A mis padres Julio y Eva por sus sacrificios, apoyo constante, sabios consejos, cariño y amor, los Amo.

*A mi hermana por sus consejos e invaluable amor fraternal
A toda mi familia que nunca dejo de creer mí y siempre me dio su apoyo incondicional.*

*Dedicatoria Especial a una persona que ya no está a mi lado físicamente, pero está presente en cada cosa que hago, que siempre soñó con este momento y sé que lo disfruta y me cuida desde el cielo, para ti
Mi Mama Raquelita.*

*A Dios por darme sabiduría y perseverancia.
Gracias a ellos, podre cumplir mis metas.*

Julio Cesar Valdez Rodríguez.

A mis padres José Luis y Margarita por sus sacrificios y apoyo constante a lo largo de mi formación profesional.

A mi hermana Danitza por sus consejos e invaluable amor fraternal.

A mi esposa Raquel por su comprensión, amor y apoyo.

A mis hijas Mikeila y Selena por ese gran amor que solo un hijo te puede dar.

A Dios por darme sabiduría y perseverancia.

Gracias a ellos, podre cumplir mis metas.

José Miguel Cusirramos Carnero.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	I
PRESENTACIÓN	VI
RESUMEN	VII
ABSTRACT.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	IX
CAPÍTULO I: GENERALIDADES.....	1
1.1 Planteamiento Teórico.....	1
1.1.1 Título de la tesis.....	1
1.1.2 Descripción	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Alcances y Limitaciones	3
CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO	4
2.1. Máquinas Eléctricas	4
2.2. Clasificación de las Máquinas Eléctricas Rotativas	5
2.3. Máquina Síncrona.....	5
2.3.1. Definición	5
2.3.2. Clasificación de las Máquinas Síncronas	6
2.4. Máquina Síncrona Trifásica	9
2.4.1. Construcción de la Máquina Síncrona.....	9
2.4.2. Principio de Operación de la Máquina Síncrona de Rotor Cilíndrico	12
2.4.3. Sincronización de la Máquina Síncrona a una red infinita.....	21
2.4.4. Valores nominales de la máquina sincrónica.....	23
2.4.5. Circuito equivalente de la máquina sincrónica.....	27
2.5. Curvas características de la Máquina Síncrona:.....	29
2.5.1. Característica en vacío:.....	29
2.5.2. Característica de cortocircuito (c.c.):.....	30
2.5.3. Característica en carga:.....	30
2.5.4. Característica externa:	31
2.5.5. Curva de regulación:.....	32

2.6. Pérdidas Eléctricas	33
2.6.1. Pérdidas Eléctricas en el Cobre	33
2.6.2. Pérdidas en el Núcleo.	34
2.6.3. Pérdidas Mecánicas.	34
2.6.4. Pérdidas Dispersas Misceláneas	34
2.6.5. Diagrama de Flujo de Potencia.....	34
2.7. Disposición de las Bobinas en el Motor Síncrono	35
2.8. Designación, Conexión y Marcado de Terminales.	37
2.8.1. Designación de los terminales	37
2.8.2. Conexión de Terminales	39
2.8.3. Datos de Placa.....	39
2.9. La máquina asíncrona.....	41
2.9.1. Definición	41
2.10. Clasificación de las Máquinas Asíncronas.....	41
2.11. Motor asíncrono trifásico	44
CAPÍTULO III: DESCRIPCION y ELABORACION DE GUIAS DE PRACTICAS DEL MÓDULO ALTERNADOR – MOTOR ASÍNCRONO CONTROLADO POR VARIACIÓN DE FRECUENCIA	68
3.1. Datos Técnicos de las Máquinas Utilizadas	68
3.1.1. Datos del Generador Síncrono.....	68
3.1.2. Datos del Motor Asíncrono	69
3.2.Descripción del Módulo de Laboratorio de Máquinas Eléctricas Síncronas.....	69
3.3.Objetivos de las Prácticas de Laboratorio.	70
3.4.Tipo de Prácticas Recomendables.	71
3.5.Aparatos de Tipo General que debe poseer un Laboratorio y Precisión de los aparatos a utilizar.....	71
3.6. Precisión de los Aparatos a utilizar	73
3.7. Precauciones en las Prácticas	73
3.8. Conocimiento previo de la Práctica a realizar.	73
3.9. Montaje del Circuito y elección de los Calibres de los aparatos.....	74
3.10. Repaso del montaje.	75
3.11. Alimentación del Circuito, Manipulación y Lectura de los valores.....	75
3.12. Guías de Prácticas de Laboratorio	76

PRÁCTICAS DE LABORATORIO N° 1:

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LOS BOBINADOS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN CON CORRIENTE CONTINUA..... 77

PRÁCTICAS DE LABORATORIO N° 2:

ENSAYO DE VACÍO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN 86

PRÁCTICAS DE LABORATORIO N° 3:

ENSAYO CORTO CIRCUITO O ROTOR BLOQUEADO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN..... 95

PRÁCTICAS DE LABORATORIO N° 4:

ARRANQUE Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD DEL MOTOR DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA CON VARIADOR DE FRECUENCIA ATV 312. 103

PRÁCTICAS DE LABORATORIO N° 5:

ARRANQUE Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD DEL MOTOR DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA CON VARIADOR DE FRECUENCIA ATV 312. 114

PRÁCTICAS DE LABORATORIO N° 6:

PARADA CONTROLADA POR INYECCIÓN DE CORRIENTE CONTINUA DEL MOTOR DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA CON EL VARIADOR DE FRECUENCIA ATV 312..... 124

CONCLUSIONES..... 148

RECOMENDACIONES 149

BIBLIOGRAFÍA 150

PRESENTACIÓN

El presente trabajo de investigación consta del diseño, fabricación y análisis del módulo alternador – motor asíncrono controlado por variación de frecuencia, instalado en el Programa Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica de la Universidad Católica de Santa María (U.C.S.M.), el mismo que tiene como objetivo principal servir como Módulo de enseñanza para los alumnos de pregrado, utilizando las guías de prácticas preparadas como parte del presente trabajo.

Además este módulo fue concebido con la idea de comprobar y reforzar los conocimientos adquiridos en los cursos teóricos en el área de las Máquinas Eléctricas y familiarizar al alumno en la comprensión y conceptualización de los conceptos básicos referente a la transformación de energía, como así también comprender el comportamiento de una maquina eléctrica rotativa síncrona, como además el comportamiento de la maquina asíncrona controlada por variación de frecuencia.

RESUMEN

En el capítulo primero se hace referencia a las generalidades del trabajo de investigación donde principalmente se hace hincapié a los objetivos y limitaciones que tiene el trabajo de investigación.

En el capítulo segundo se desarrolla el fundamento teórico de las máquinas eléctricas poniendo especial interés en las máquinas síncronas como asíncronas, donde se resaltan sus principales características técnicas.

En el capítulo tercero se muestran las principales características del módulo seguido de las recomendaciones para llevar a cabo unas buenas prácticas de laboratorio, de tal forma que los errores que se cometan en su desarrollo sean los mínimos.

Enseguida, se presentan las guías de prácticas de laboratorio, en una primera parte para el ensayo de los motores síncronos, seguida de los ensayos en el motor síncrono.

Finalmente, se enuncian las conclusiones, recomendaciones y bibliografía utilizada para la elaboración del presente trabajo de investigación.

ABSTRACT

In the first chapter refers to the generality of the research which primarily emphasizes the objectives and limitations of the research.

In the second chapter develops the theoretical foundation of electrical machines with special interest in synchronous and asynchronous machines, which highlights the main technical characteristics.

In the third chapter shows the main characteristics of the module followed by recommendations to perform good laboratory practices, so that the errors committed in its development are minimized.

Next, we present the laboratory practical guide, in a first part for testing synchronous machines followed by asynchronous motors.

Finally, we point to the conclusions, recommendations and references used for the preparation of this research.

INTRODUCCIÓN

El perfil profesional del Ingeniero Mecánico, Mecánico Electricista e Ingeniero Mecatrónico, está en continuo cambio debido al desarrollo tecnológico que evoluciona rápidamente, nuevas máquinas, nuevas tecnologías y nuevas aplicaciones exigen que la formación profesional de las carreras profesionales antes mencionadas sean las más adecuadas.

Por esta razón, es necesario incorporar en la formación de los futuros ingenieros, conceptos adecuados que flexibilicen el conocimiento de estas tecnologías en continuo desarrollo. Para cumplir con este cometido es indispensable romper con aquellos esquemas conceptuales que eran válidos cuando las máquinas eléctricas cumplían una función mucho más restringida.

La permanente necesidad de actualizar conocimientos, y la definición constante de nuevos objetivos hacen indispensable la revisión periódica de las nuevas tecnologías y aplicaciones en las máquinas eléctricas, y es nuestro anhelo que el material contenido en este trabajo de investigación colabore a simplificar la difícil labor del docente en el área de Máquinas Eléctricas, y el aún más complejo proceso de aprendizaje a los estudiantes de ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica, para esto hemos incluido en las guías de prácticas un número importante de ilustraciones, gráficos, diagramas y tablas para facilitar la elaboración de los informes finales de laboratorio y la comprensión de los conceptos teóricos que se imparten en los textos.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 Planteamiento Teórico

1.1.1 Título de la tesis

DISEÑO, FABRICACIÓN Y ANÁLISIS DEL MODULO ALTERNADOR – MOTOR ASÍNCRONO CONTROLADO POR VARIACIÓN DE FRECUENCIA

1.1.2 Descripción

a) Área de conocimiento

La aplicación del presente trabajo de investigación se encuentra en el área general de la Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica, específicamente en el área de las Máquinas Eléctricas Rotativas.

b) Identificación del Problema y Alternativas de Solución

La Universidad Católica de Santa María, para garantizar la formación profesional de los futuros Ingenieros Mecánicos, Mecánicos Electricistas y Mecatrónicos, requiere estar implementando continuamente sus laboratorios. Por cuyo motivo es que se propone plantear como proyecto de tema de tesis el “Diseño, fabricación y análisis del módulo alternador – motor asíncrono controlado por variación de frecuencia”

El mismo que servirá para estudiar y comprobar el comportamiento de la máquina síncrona en régimen generador, y la máquina asíncrona controlada por variación de frecuencia.

Como parte de nuestro trabajo, proponemos guías de prácticas de laboratorio que servirán para que los alumnos puedan relacionar la teoría impartida en clases, con el comportamiento real de las maquinas eléctricas. Además queda abierta la posibilidad de desarrollar futuras aplicaciones en las máquinas eléctricas, ya que en el referido modulo se pueden realizar ensayos en forma independiente y en forma conjunta acoplándolas mecánicamente, esto debido a la versatilidad del mismo.

c) **Tipo de Investigación**

El tipo de investigación es experimental, puesto que lo que se pretende es llevar a la práctica, los diferentes conocimientos teóricos adquiridos en las asignaturas del área de electricidad, específicamente en el área de las maquinas eléctricas rotativas.

1.2 **Objetivos**

1.2.1 **Objetivo General**

Efectuar el diseño, fabricación y posterior análisis de un módulo alternador - motor asíncrono controlado por variación de frecuencia, el cual será instalado en los laboratorios de Máquinas Eléctricas del Programa Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica de la Universidad Católica de Santa María, con el propósito de servir como módulo de instrucción a los alumnos de pregrado.

1.2.2 **Objetivos Específicos**

- Implementar el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.
- Desarrollar un conjunto de guías de prácticas para la utilización de dicho módulo de máquinas eléctricas, en la parte que corresponde a los laboratorios de máquinas electricas.

1.3 Alcances y Limitaciones

El alcance del presente trabajo de investigación es realizar un estudio del comportamiento de un una maquina síncrona, trabajando como alternador, como así también el comportamiento del motor asíncrono estimulado con variación de frecuencia.



CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Máquinas Eléctricas

Máquina eléctrica es un dispositivo que transforma la energía eléctrica en otro tipo de energía, o bien, en energía eléctrica pero con una presentación distinta, pasando esta energía por una etapa de almacenamiento en un campo magnético. Se clasifican en dos grandes grupos como son los transformadores y motores eléctricos.

Los generadores transforman energía mecánica en eléctrica, mientras que los motores transforman la energía eléctrica en mecánica haciendo girar un eje. El motor se puede clasificar en motor de corriente continua o motor de corriente alterna. Los transformadores y convertidores conservan la forma de la energía pero cambian sus características y principalmente sus magnitudes.

Desde una visión mecánica, las máquinas eléctricas se pueden clasificar en rotativas y estáticas. Las máquinas rotativas están provistas de partes giratorias, como las dinamos, alternadores, motores, mientras que las máquinas estáticas no disponen de partes móviles como los transformadores.

En las máquinas rotativas hay una parte fija llamada estator y una parte móvil llamada rotor. Normalmente el rotor gira en el interior del estator. Al espacio de aire existente entre ambos se le denomina entrehierro.

2.2. Clasificación de las Máquinas Eléctricas Rotativas

Se clasifican como muestra el siguiente diagrama:

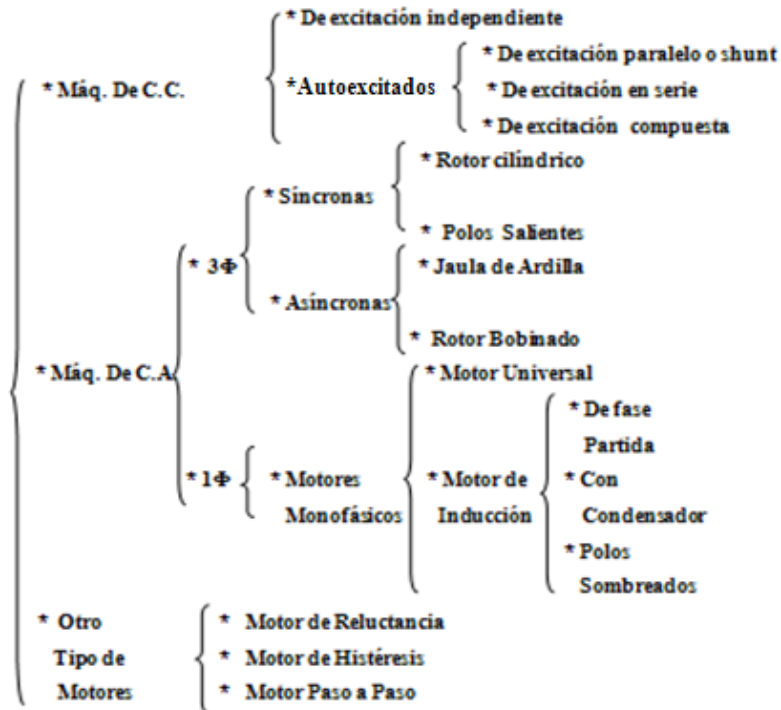


Fig. 2.1: Diagrama de clasificación de las máquinas eléctricas rotativas.

2.3. Máquina Síncrona

2.3.1. Definición

Como su nombre lo indica son máquinas capaces de operar sólo a la velocidad sincrónica, esto es a la velocidad mecánica equivalente a la velocidad de rotación producido por las corrientes del estator. Estas máquinas operando como generador son usadas en las centrales para la generación de energía eléctrica (hidráulicas, térmicas o nucleares) en sistemas interconectados. En tales aplicaciones se les denominan generadores sincrónicos o alternadores y normalmente se operan con otras unidades en las distintas centrales, interconectadas entre sí.

En general la maquina sincrónica tiene en el estator el bobinado de armadura del tipo trifásico y en el rotor el enrollado de excitación alimentado con corriente continua.

Al aplicar un juego de corrientes trifásicas simétricas y equilibradas en el bobinado de estator, se genera un campo magnético rotatorio que gira a la frecuencia sincrónica (ω_s). Si por otro lado se tiene al rotor girando a $\omega_m = \omega_s$ y se inyecta una corriente continua, I_f , al campo, se producirá un campo magnético rotatorio producido por el giro mecánico también a la velocidad ω_s .

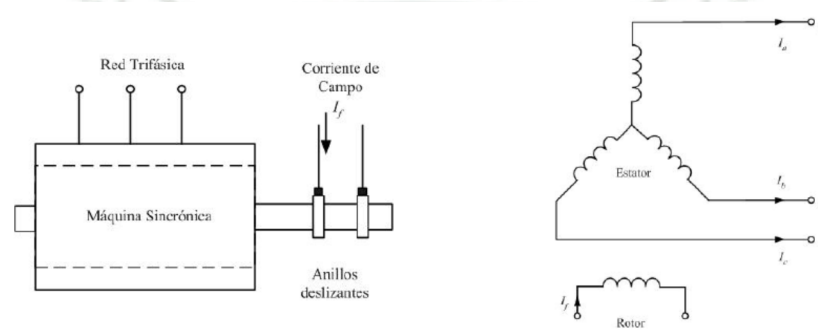


Fig. 2.2: Representación esquemática de la máquina sincrónica

2.3.2. Clasificación de las Máquinas Síncronas

a) Según el número de devanados en el estator

- **Monofásicos:** Tienen un sólo devanado en el estator y se utilizan en aplicaciones tanto en el hogar como en la industria

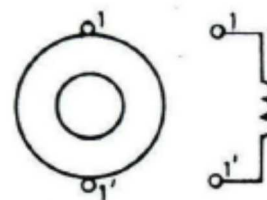


Fig. 2.3: Devanado monofásico.

- **Bifásicos:** Tienen dos devanados en el estator. Estos devanados están desfasados 90° en el espacio. Se suelen utilizar en aplicaciones de control de posición.

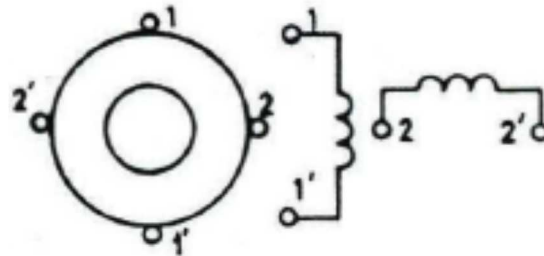


Fig. 2.4: Devanado bifásico.

- **Trifásicos:** Tienen tres devanados en el estator. Estos devanados están desfasados 120° en el espacio. Se suelen utilizar en aplicaciones industriales: máquinas-herramientas, grúas, bombas, ventiladores, etc.

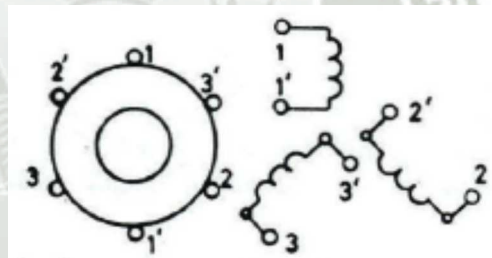


Fig. 2.5: Devanado trifásico.

b) Según el tipo de inducido:

- **Polos Salientes:** Se caracteriza por su uso en máquinas de baja velocidad. Se usa con turbinas hidráulicas.
- **Rotor cilíndrico:** Se caracteriza por su uso en máquinas de alta velocidad. Se usa con turbinas de gas o vapor.

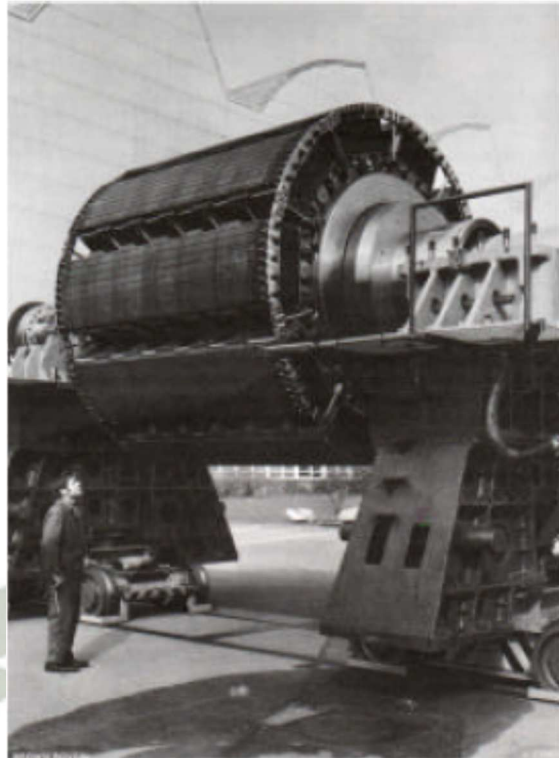


Fig. 2.6: Representación de un motor síncrono de polos saliente

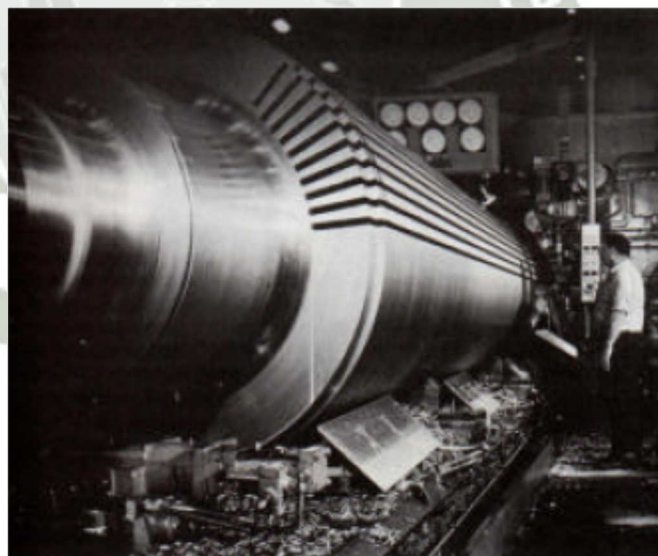


Fig. 2.7: Representación de un motor síncrono de rotor cilíndrico.

2.4. Máquina Síncrona Trifásica

2.4.1. Construcción de la Máquina Síncrona.

La máquina síncrona está compuesta básicamente de una parte activa fija que se conoce como inducido o estator y de una parte giratoria coaxial que se conoce como inductor o rotor. El espacio comprendido entre el rotor y el estator, es conocido como entrehierro.

Esta máquina tiene la particularidad de poder operar ya sea como generador o como motor.

Su operación como alternador se realiza cuando se aplica un voltaje de DC en el campo de excitación del rotor y a su vez éste es movido o desplazado por una fuente externa, que da lugar a tener un campo magnético giratorio que atraviesa o corta los conductores del estator, induciéndose con esto un voltaje entre terminales del generador.

Su operación como motor síncrono se realiza cuando el estator es alimentado con un voltaje trifásico de AC y consecutivamente el rotor es alimentado con un voltaje de DC.

a) Estator

Los generadores síncronos o alternadores son máquinas sincrónicas que se usan para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica de corriente alterna.

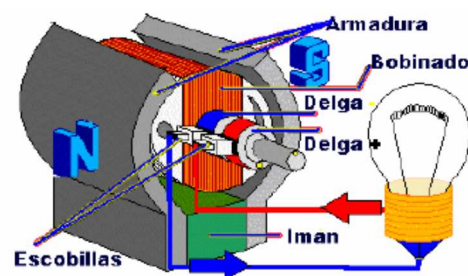


Fig. 2.8: Partes de una máquina síncrona.

El generador síncrono consiste en un electroimán girando, llamado rotor cilíndrico generalmente, al lado de una bobina, estator conectado en estrella el cual por efecto de la rotación del rotor va a inducir tensión trifásica en el estator, para esto tiene que haber una velocidad relativa entre el rotor (también llamado campo) y el estator (o armadura).

Si en un generador síncrono se aplica al embobinado del rotor una corriente continua, se producirá un campo magnético en el rotor. Entonces el rotor del generador se impulsará por medio de un motor primario, lo cual producirá un campo magnético rotatorio dentro de la máquina. Este campo magnético rotatorio inducirá un sistema trifásico de voltajes dentro del embobinado del estator del generador.

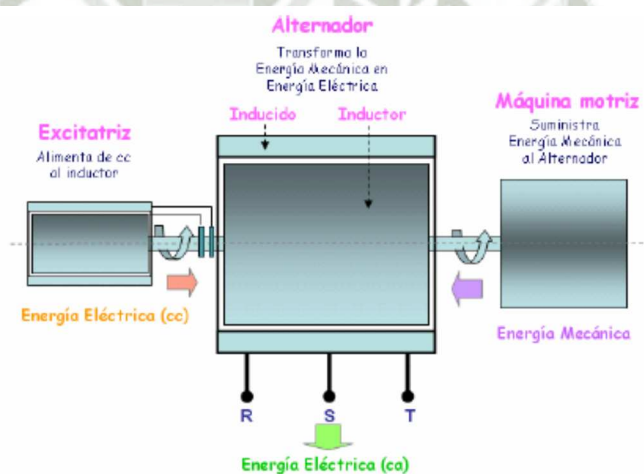


Fig. 2.9: Representación esquemática de funcionamiento del estator.

b) Rotor

El rotor de un generador síncrono es un gran electroimán y los polos de éste pueden ser construidos de formas salientes o no salientes, dependiendo del tipo de aplicación donde se requiera.

Los rotores de polos no salientes (lisos) se utilizan en rotores de dos y cuatro polos, mientras que los rotores de polos salientes se utilizan en

rotors de cuatro o más polos. Puesto que el rotor está sujeto a campos magnéticos variables, se construye con láminas delgadas agrupadas para reducir las pérdidas por corrientes parásitas



Fig. 2.10: Estructura general de una máquina síncrona

Se debe suministrar una corriente DC al circuito de campo del rotor. Puesto que el rotor está girando, se requiere un arreglo especial para entregar potencia DC a sus devanados de campo.

Existen dos maneras comunes de suministrar potencia de corriente directa al devanado de campo y son:

Suministrando potencia DC desde una fuente externa hacia el rotor por medio de escobillas y anillos rozantes.

Suministrando potencia de DC desde una fuente especial montada directamente en el eje del generador síncrono.

A todo este sistema de suministro de potencia DC se le denomina excitatriz.

2.4.2. Principio de Operación de la Máquina Síncrona de Rotor Cilíndrico

La corriente de campo I_f establece en el entrehierro una distribución senoidal de flujo en el entrehierro φ_f (mediante una geometría especial del polo magnético o la distribución del bobinado de campo en el caso rotor cilíndrico). Asimismo la corriente de los bobinados trifásicos del estator produce un flujo φ_a . Parte de este flujo enlaza sólo los bobinados de estator y no enlaza el bobinado de campo, a este flujo de le denomina flujo de fuga o dispersión. La mayor parte de φ_a , denominada flujo de reacción de armadura φ_{ar} , se establece en el entrehierro y enlaza el bobinado de campo. El flujo resultante φ_r es por lo tanto debido a la interacción entre flujos φ_f y φ_a . Cada una de estas componentes induce tensiones en los bobinados del estator E_f debida a φ_f y E_a debida a φ_{ar} y la tensión E_r debida al flujo resultante φ_r . La tensión E_f se determina para la condición de circuito abierto, esto es, para una velocidad de operación se obtiene la relación entre la corriente de campo y la tensión inducida. La tensión E_{ar} , conocida como ‘voltaje de reacción de armadura’ depende de φ_{ar} y de aquí de la magnitud y posición de la corriente de armadura I_a .

De acuerdo a la ley de voltajes, se tiene:

$$E_r = E_{ar} + E_f \quad \text{Ec. 2.1}$$

$$E_f = -E_{ar} + E_r \quad \text{Ec. 2.2}$$

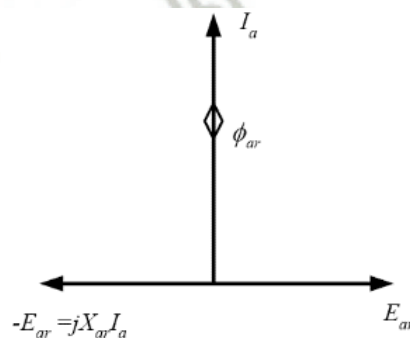


Fig 2.11: Definición de la reactancia de reacción de armadura.

Del diagrama fasorial de la fig. 2.11, el voltaje E_{ar} atrasa al flujo ϕ_{ar} o (I_a) en 90° . Por lo tanto, I_a atrasa al fasor $-E_{ar}$ en 90° . En la ecuación 2.2, el voltaje $-E_{ar}$ puede ser representado como una caída de voltaje a través de una reactancia X_{ar} debida a la corriente I_a . Luego, la ecuación 2.2 puede ser escrita como:

$$E_f = jX_{ar}I_a + E_r \quad \text{Ec. 2.3}$$

La reactancia X_{ar} es conocida como reactancia de reacción de armadura o reactancia de magnetización y se muestra en la figura 2.12 (a):

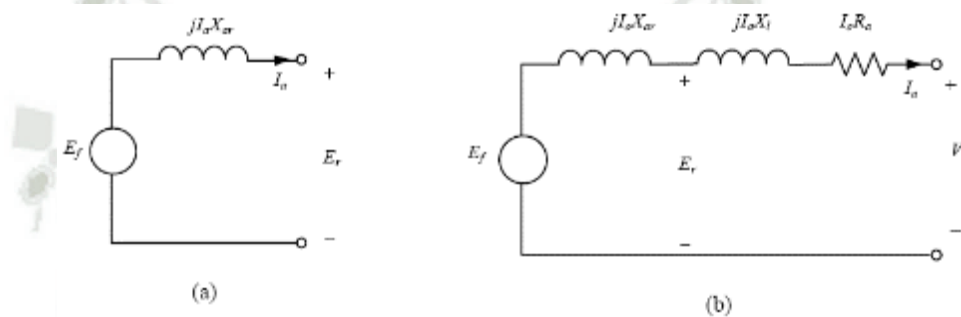


Fig 2.12: Circuito equivalente. a) Voltaje de excitación. b) Voltaje en terminales.

Si la resistencia del bobinado de estator y el flujo de fuga se incluyen en el circuito equivalente el resultado se expresa en la figura 2.12 (b).

Si las dos reactancias son combinadas en una el circuito equivalente se reduce al mostrado en la figura 2.11, donde:

$$X_s = X_{ar} + X_l \quad \text{Ec. 2.4}$$

Esta reactancia se denomina reactancia sincrónica y toma en cuenta el efecto del flujo de fuga y de magnetización producida por la corriente del estator. El diagrama fasorial mostrando la relación entre los voltajes y corrientes para ambas condiciones como generador y como motor se muestra en la figura 2.14.

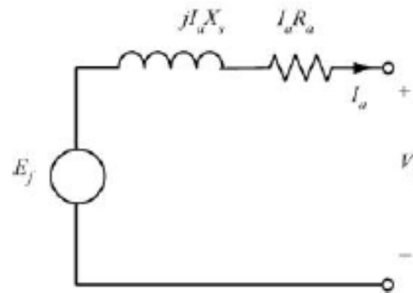


Fig. 2.13: Circuito equivalente de la Máquina Síncrona de Rotor cilíndrico.

El diagrama fasorial representa la relación de cantidades por fase considerando el voltaje terminal V_t como referencia. Para el modo de operación generador de la máquina síncrona, la figura 2.13 muestra la corriente fluyendo hacia la carga. Dos condiciones de operación, sobreexcitado ($E_f > V$) y subexcitado son mostrados en los diagramas fasoriales.

En el primer caso la corriente de campo se controla de manera que el voltaje E_f en módulo sea mayor que la tensión en bornes de la máquina V_t , de esta manera la corriente de armadura resulta en retraso, figura 2.14 (a). Esta condición de operación corresponde al de un generador sobreexcitado. Si por el contrario la corriente de campo se reduce de manera que $|E_f|$ es menor que $|V_t|$, la corriente de armadura adelanta al voltaje terminal, figura 2.14 (b).

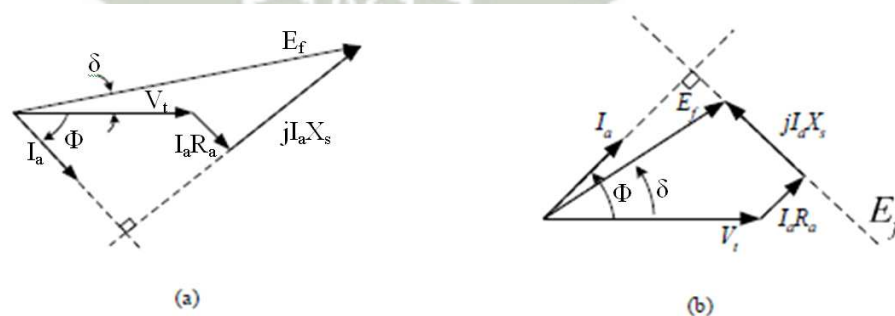


Fig. 2.14: Diagrama fasorial. a) Generador sobreexcitado. b) Generador subexcitado.

Es importante notar que el ángulo δ (ángulo de potencia) entre V_t y E_f es positivo para modo generador y negativo para modo motor, y juega un rol importante en la transferencia de potencia y estabilidad de la maquinaria.

a) Potencia y Torque

Una máquina síncrona normalmente se encuentra conectada a una red cuyo voltaje y frecuencia son constantes. Existe un límite de la potencia que el generador puede entregar a la barra infinita y un torque máximo que puede ser aplicado al motor sin perder sincronismo.

En el circuito equivalente de la figura 2.15, el voltaje V_t es considerado como referencia por lo que la tensión inducida se expresa $|E_f| \angle \delta$ y la impedancia serie como:

$$Z_s = R_a + jX_s = |Z_s| \angle \theta_s \quad \text{Ec. 2.5}$$

Luego la potencia aparente compleja en los terminales de la máquina es:

$$S = V_t I_a^* \quad \text{Ec. 2.6}$$

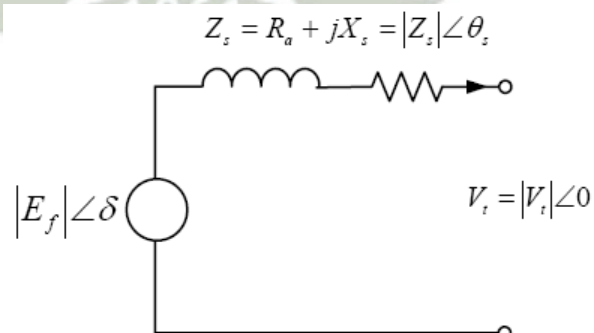


Fig. 2.15: Diagrama fasorial considerando voltaje en terminales como referencia.

Donde I_a^* es el valor complejo conjugado de I_a . De la figura 2.15 se tiene que:

$$I_a^* = \left| \frac{E_f - V_t}{Z_s} \right|^* \quad \text{Ec. 2.7}$$

$$I_a^* = \frac{E_f^*}{Z_s^*} - \frac{V_t^*}{Z_s^*} \quad \text{Ec. 2.8}$$

$$I_a^* = \frac{|E_f| \angle -\delta}{|Z_s| \angle -\theta_s} - \frac{|V_t| \angle 0}{|Z_s| \angle -\theta_s} \quad \text{Ec. 2.9}$$

$$I_a^* = \left| \frac{E_f}{Z_s} \right| \angle (\theta_s - \delta) - \left| \frac{V_t}{Z_s} \right| \angle \theta_s \quad \text{Ec. 2.10}$$

Luego, introduciendo la ecuación (2.10) en (2.6) se obtiene:

$$S = \frac{|V_t| |E_f|}{|Z_s|} \angle (\theta_s - \delta) - \frac{|V_t|^2}{|Z_s|} \angle \theta_s \left[\frac{VA}{fase} \right] \quad \text{Ec. 2.11}$$

A partir de la expresión anterior la potencia activa y reactiva se calcula como:

$$P = \frac{|V_t| |E_f|}{|Z_s|} \cos(\theta_s - \delta) - \frac{|V_t|^2}{|Z_s|} \cos \theta_s \left[\frac{W}{fase} \right] \quad \text{Ec. 2.12}$$

$$Q = \frac{|V_t| |E_f|}{|Z_s|} \sen(\theta_s - \delta) - \frac{|V_t|^2}{|Z_s|} \sen \theta_s \left[\frac{VAR}{fase} \right] \quad \text{Ec. 2.13}$$

Si la resistencia de armadura, R_a se desprecia, se tiene que $Z_s = X_s$ y $\theta_s = 90^\circ$, luego P y Q para el caso 3ϕ :

$$P_{3\phi} = 3 \frac{|V_t| |E_f|}{|X_s|} \sen \delta \quad \text{Ec. 2.14}$$

$$P_{3\phi} = P_{m\acute{a}x} \text{sen } \delta \text{ [W]} \quad \text{Ec. 2.15}$$

Donde:

$$P_{m\acute{a}x} = 3 \frac{|V_t| |E_f|}{|X_s|} \quad \text{Ec. 2.16}$$

Asimismo:

$$Q_{3\phi} = 3 \frac{|V_t| |E_f|}{|X_s|} \cos \delta - 3 \frac{|V_t|^2}{|Z_s|} \text{ [VAR]} \quad \text{Ec. 2.17}$$

Debido a que en este análisis se han despreciado las pérdidas en el estator, luego se tiene que la potencia desarrollada en los terminales es igual a la potencia de entrehierro. El torque electromagnético desarrollado por la máquina es:

$$T = \frac{P_{3\phi}}{\omega_s} \quad \text{Ec. 2.18}$$

$$T = \frac{3}{\omega_s} \frac{|V_t| |E_f|}{|X_s|} \text{sen } \delta \quad \text{Ec. 2.19}$$

Idéntico resultado puede ser obtenido a partir del diagrama fasorial. Despreciando R_a se tiene, el diagrama fasorial pasa a ser el mostrado en la figura 2.16.

Del diagrama fasorial se tiene que:

$$X_s I_a \cos \delta = E_f \text{sen } \delta \quad \text{Ec. 2.20}$$

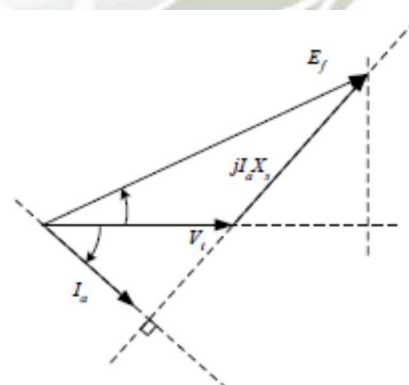


Fig. 2.16: Diagrama fasorial motor síncrono con $R_a = 0$.

Despejando la componente activa de la corriente de armadura:

$$I_a \cos \delta = \frac{E_f}{X_s} \operatorname{sen} \delta \quad \text{Ec. 2.21}$$

Por lo que la potencia activa 3ϕ se calcula como:

$$P = 3V_t I_a \cos \delta \quad \text{Ec. 2.22}$$

$$P = 3 \frac{V_t E_f}{X_s} \operatorname{sen} \delta \quad \text{Ec. 2.23}$$

y el torque:

$$T = \frac{P_{3\phi}}{\omega_s} = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_t E_f}{X_s} \operatorname{sen} \delta \quad \text{Ec. 2.24}$$

Se observa que ambos, $P_{3\phi}$ y T_g , varían senoidalmente con el ángulo δ , figura 2.17 (a). La carga de la máquina puede ser gradualmente incrementada hasta los valores máximos $P_{m\acute{a}x}$ y $T_{m\acute{a}x}$ conocido como 'límite de estabilidad estática'. La máquina perderá sincronismo si el ángulo de torque es mayor de 90° . Notar que dado que V_t es constante, el torque máximo puede incrementarse aumentando la excitación E_f (aumentando la corriente de campo I_f).

Como la velocidad de la máquina sincrónica es constante (ω_s), la característica torque velocidad resulta ser una línea recta como se indica en la figura 2.17 (b).

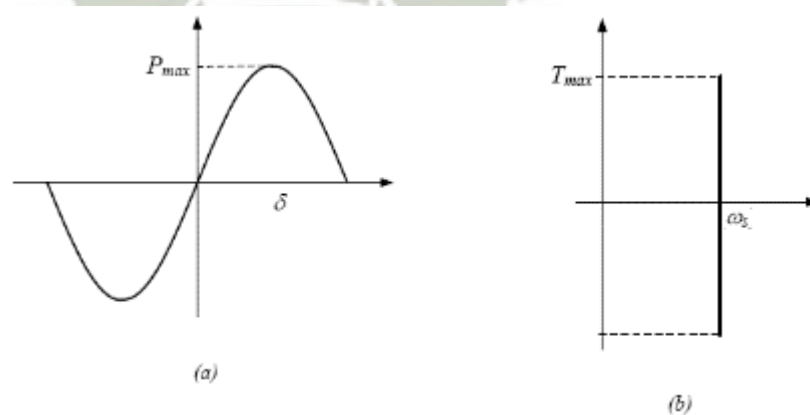


Fig. 2.17: Característica. a) Potencia-ángulo. b) Torque-velocidad.

b) Determinación de la Reactancia Sincrónica X_s .

La reactancia sincrónica es un parámetro determinante en la operación de las Máquinas Síncronas. Esta se puede determinar realizando dos pruebas: circuito abierto y corto circuito.

- **Prueba de circuito abierto.**

Para esta prueba la máquina sincrónica es llevada a la velocidad sincrónica. Con el circuito de armadura (bobinado de estator) en circuito abierto, figura 2.18 (a) se mide la variación de la tensión en terminales V_t (que resulta igual a E_f) respecto de la corriente de campo. La curva resultante, se conoce como ‘*característica de circuito abierto*’ (OCC). Debido a que los terminales están abiertos, ésta curva muestra la variación del voltaje de excitación E_f con la corriente de campo I_f . Notar que a medida que la corriente de campo aumenta el circuito magnético muestra los efectos de la saturación. La línea que pasa a través de la sección lineal de la OCC se denomina ‘*línea de entrehierro*’.

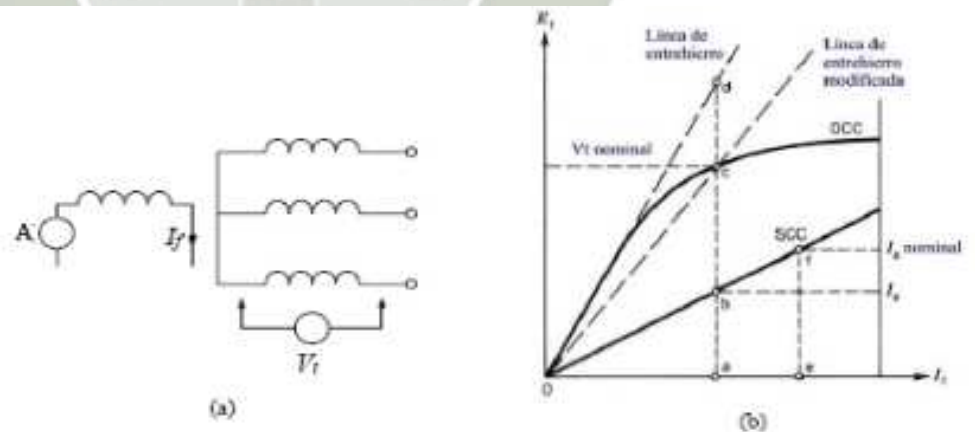


Fig. 2.18: Prueba de circuito abierto. a) Diagrama circuital. b) Línea de entrehierro.

- **Prueba de corto circuito.**

Para esta prueba se realiza el arreglo de la figura 2.19, se conectan amperímetros en cada fase y se cortocircuitan los terminales del bobinado de estator. La máquina se lleva a la velocidad sincrónica, se varía la corriente de campo y se registra su valor, el promedio de las corrientes de armadura se mide en este proceso. La variación de esta corriente respecto de la corriente de campo se muestra en la figura 2.18 (b), y representa la ‘*característica de cortocircuito*’ (SCC) de la máquina sincrónica. Notar que esta característica es una línea recta. Esto se debe al hecho que debido a la condición de cortocircuito el flujo presente en la máquina es bajo, por lo que no entra en saturación.

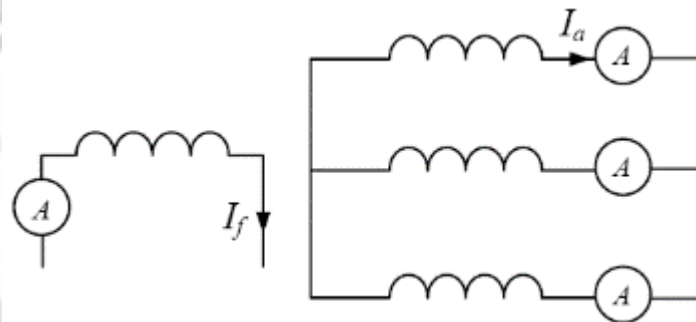


Fig. 2.19: Prueba de corto circuito. Diagrama circuitual.

- **Reactancia Sincrónica no saturada.**

El valor de la reactancia sincrónica, X_s para la condición no saturada se calcula a partir de la línea de entrehierro y de la característica de corto circuito de la máquina para un valor particular de I_f , esto es (si $R_a \approx 0$).

$$X_{S(\text{no sat})} \approx \frac{E_{da}}{I_{ba}} \quad \text{Ec. 2.25}$$

Donde I_{ba} se obtiene de la figura 2.18 (b).

- **Reactancia Sincrónica saturada**

Para operación cercana al voltaje nominal (V_t nominal) se asume que la máquina sincrónica opera en un nivel no saturado de acuerdo a una 'línea de entrehierro modificada' definida como una línea recta que pasa por el origen y el valor nominal de voltaje de la característica de circuito abierto como se muestra en la figura 2.18 (b). De acuerdo a esta aproximación el valor de la reactancia sincrónica a voltaje nominal se calcula como:

$$X_{S(\text{sat})} = \frac{E_{ca}}{I_{ba}} \quad \text{Ec. 2.26}$$

2.4.3. Sincronización de la Máquina Síncrona a una red infinita

En un sistema eléctrico los generadores son conectados o desconectados de la red infinita dependiendo de la demanda.

Antes de que el alternador sea conectado a la barra infinita se deben cumplir un conjunto de condiciones para un mínimo efecto en la máquina como en el sistema de potencia, esto es:

- Igualdad de voltajes
- Igual frecuencia
- Igual fase
- Igual secuencia de fases

El *sincronoscopio* (figura 2.20) es un instrumento que permite verificar la secuencia y la fase entre el sistema de voltajes de la máquina entrante y el sistema de. La posición de la aguja indica la diferencia de fase entre el voltaje de la maquina entrante y la red. La dirección de giro del indicador muestra si el alternador gira más rápido o más lento respecto del sistema, esto es si la frecuencia de la maquina es mayor o menor que la frecuencia de la red. Cuando el indicador se mueve lentamente (es decir las frecuencias son casi iguales) y pasa por el punto de cero fase (posición

vertical) el conector se cierra, quedando el generador en paralelo con la red.



Fig. 2.20: Sincronoscopio.

Un segundo mecanismo para sincronizar el generador al sistema eléctrico es a través de las “Lámparas de Sincronización”, en la figura 2.21 se muestra en forma esquemática el setup para realizar la corrección con las lámparas.

Con la fuente motriz se ajusta la velocidad tal que la frecuencia del alternador sea lo más cercano a la frecuencia de la red. La corriente de campo I_f se ajusta de manera que los voltajes V_{AB} y V_{ab} sean similares. Si la secuencia de fase es correcta, las lámparas tendrán el mismo brillo y oscilarán, de acuerdo a la diferencia de frecuencias, todas a la vez. Si la secuencia de fases es incorrecta, las lámparas brillarán alternadamente (una después de la otra), por lo que se debe intercambiar dos terminales del generador.

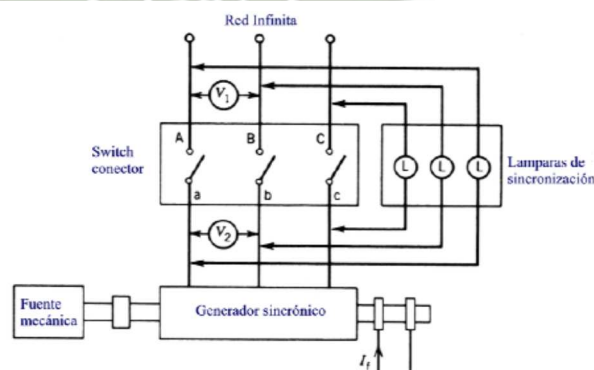


Fig. 2.21: Lámparas de sincronización.

2.4.4. Valores nominales de la máquina sincrónica

Tanto los transformadores, las máquinas de corriente continua, las máquinas de inducción como las máquinas sincrónicas poseen un conjunto de valores nominales o datos de placa que determinan sus límites de operación en régimen permanente.

Los valores nominales están definidos por los límites térmicos del convertidor. Si estos límites de temperatura son excedidos durante períodos prolongados de tiempo, se produce un rápido envejecimiento del aislamiento de la máquina y un deterioro prematuro de la misma. Los datos de placa de las máquinas sincrónicas son los siguientes:

a) **La corriente nominal de armadura:**

Está determinada por las pérdidas Joule de las bobinas del estator, y por las características térmicas de la máquina. Las características físicas y químicas de los materiales utilizados en el aislamiento de los devanados de armadura, definen la máxima temperatura de operación que permiten estos materiales sin que se produzca una degradación prematura de los mismos.

El sistema de intercambio de calor juega un papel importante porque a medida que aumenta la capacidad de extracción de calor, es posible incrementar las pérdidas sin aumentar la temperatura máxima de las bobinas.

El fabricante define durante la etapa de diseño, y posteriormente en el banco de pruebas, el valor máximo de la corriente de armadura que no excede la temperatura máxima del aislamiento con el sistema de refrigeración utilizado por la máquina. Durante la operación de la máquina este valor puede ser sobrepasado por un cierto tiempo, aun cuando exceder la corriente nominal de armadura durante periodos prolongados de tiempo o en régimen permanente, reduce la vida útil de la máquina.

b) La tensión nominal de armadura:

La tensión nominal está determinada por las pérdidas en el material magnético de la máquina. Las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas dependen de la densidad de flujo máximo en el hierro. La tensión aplicada a las bobinas es aproximadamente igual a la fuerza electromotriz en el devanado cuando se desprecian las pérdidas resistivas. La fuerza electromotriz en las bobinas es igual a la derivada con respecto al tiempo de los enlaces de flujo. Para excitaciones sinusoidales de las bobinas de la máquina se obtiene a partir de la ley de Faraday la siguiente expresión:

$$V_e = E_e = \sqrt{2\pi f} \cdot N_e \cdot \varphi_{m\acute{a}x} = 4,44f \cdot N_e \cdot A \cdot \varphi_{m\acute{a}x} \quad \text{Ec. 2.27}$$

Como en la expresión 2.27, la frecuencia f , el número de vueltas de la bobina N_e , y el área A de la sección transversal del enrollado son constantes, la densidad de flujo máximo depende directamente de la tensión de armadura. Por esta razón el fabricante define un valor nominal de la tensión de armadura que permite utilizar una densidad de flujo cercana al codo de saturación del material magnético, donde las pérdidas del hierro son relativamente reducidas. En la práctica las densidades de flujo de diseño se encuentran entre 1,0 y 1,4 Wb/m^2 para los materiales ferromagnéticos de grano no orientado utilizado habitualmente en la construcción de las máquinas eléctricas rotativas.

c) La potencia aparente nominal:

La potencia aparente nominal resume en un valor de mérito la corriente y tensión nominal de armadura aun cuando no representa en sí mismo un límite térmico. En el sistema trifásico balanceado, la potencia aparente nominal es:

$$S_n = 3V_n^{l-n} \cdot I_n^l = \sqrt{3}V_n^{l-l} \cdot I_n^l \quad \text{Ec. 2.28}$$

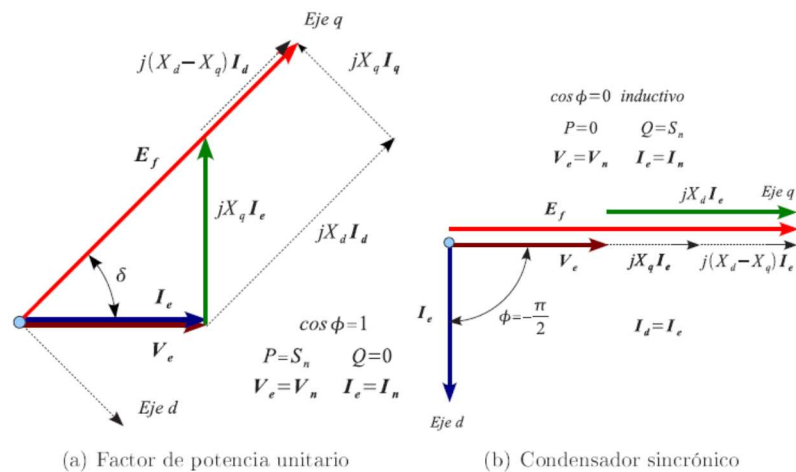


Fig. 2.22: Operación de la máquina con potencia aparente nominal con $\cos \phi$ unitario y puramente inductivo.

La máquina sincrónica puede operar con potencia aparente nominal en infinitos puntos, con diferentes ángulos de desfase entre la tensión y la corriente de armadura.

En la figura 2.22 se representan los diagramas fasoriales de la máquina para dos factores de potencia notables: unitario y cero inductivo. En el segundo caso se observa que es necesaria una fuerza electromotriz mayor.

d) El factor de potencia nominal:

En la figura 2.23 se observa que para mantener un factor de potencia inductivo es necesaria una mayor fuerza electromotriz producida por el flujo del campo de la máquina sincrónica. La fuerza electromotriz depende directamente de la corriente I_f que circula por la bobina del campo. Aun cuando esta bobina maneja una pequeña fracción de la potencia aparente nominal de armadura, las pérdidas resistivas del conductor producen calentamiento local en la misma.

Como la corriente de campo está limitada a un valor máximo en régimen permanente, también queda limitada la máxima fuerza electromotriz producida por la corriente de campo. A medida que se reduce el factor de potencia de la máquina durante la operación a potencia aparente nominal, se incrementa la fuerza electromotriz necesaria para mantener el punto de operación. El factor de potencia para el cual la fuerza electromotriz producida por el campo es máxima se define como factor de potencia nominal.

El fabricante en lugar de expresar el valor máximo de la corriente de campo, indica en los datos de placa el valor del factor de potencia nominal, que es el mínimo factor de potencia con el cual la máquina puede operar con tensión y corriente nominal sin exceder la temperatura máxima de las bobinas del campo.

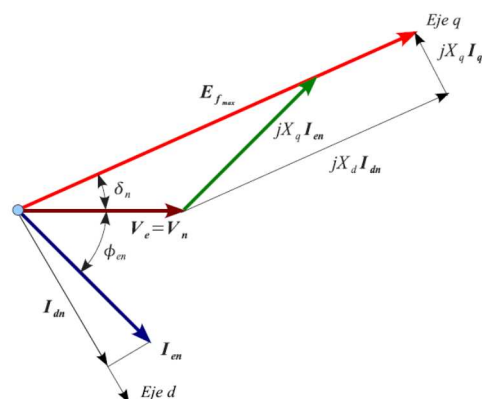


Fig. 2.23: Máquina síncrona en el punto nominal de operación.

e) La corriente de campo nominal:

La corriente de campo nominal es aquella que produce la tensión nominal en la armadura de la máquina síncrona cuando esta se encuentra en vacío y girando a la velocidad nominal. Esta corriente es inferior a la corriente máxima del campo definida por el factor de potencia nominal en las condiciones nominales de operación.

f) La velocidad nominal:

El rotor de la máquina síncrona gira en régimen permanente a una velocidad mecánica exactamente igual a la velocidad angular del campo magnético rotatorio del estator. Esta velocidad depende de la frecuencia de la red eléctrica y del número de pares de polos p de la máquina. La velocidad nominal de la máquina síncrona es:

$$\omega_n = \omega_{sin} = \frac{2\pi f}{p} \quad \text{Ec. 2.29}$$

2.4.5. Circuito equivalente de la máquina síncrona

A partir del modelo que define el comportamiento dinámico de las corrientes de la máquina síncrona en convención motor, se puede modelar la máquina mediante cuatro circuitos eléctricos acoplados por términos de generación y transformación, mediante transformadores y fuentes de tensión dependientes de corriente. En la figura 2.24 (a) se presenta el circuito equivalente de la máquina síncrona de polos salientes. Durante la operación equilibrada en régimen permanente, las corrientes i_d , i_q e i_f son constantes en el tiempo, y la corriente i_o es nula. De esta forma, el circuito desacoplado correspondiente a la secuencia cero no tiene influencia, y las inductancias del resto de los circuitos no producen caída de tensión.

La corriente del campo se puede calcular evaluando el cociente entre la tensión aplicada al campo y la resistencia de esta bobina. Los dos circuitos restantes, correspondientes al eje directo y cuadratura, están configurados tan sólo mediante resistencias y fuentes de tensión dependientes de corrientes que circulan por otros circuitos. Asociando con el eje real la polaridad positiva de la corriente y tensión del circuito correspondiente al eje directo, y con el eje imaginario la del circuito cuadratura, se representa en la figura 2.24 (b) el circuito equivalente fasorial de la máquina síncrona de polos salientes en régimen permanente equilibrado.

Si la máquina síncrona es de rotor liso, las reactancias del eje directo y del eje cuadratura son iguales y se denomina entonces reactancia síncrona X_s . Para máquinas síncronas de rotor liso se deduce de la siguiente relación:

$$V_e = V_d + jV_q = (R_e + jX_s)(I_d + jX_q) + jE_f = (R_e + jX_s)I_e + E_f \quad \text{Ec. 2.30}$$

En la figura 2.24 (c) se presenta el circuito equivalente en convención motor, de la máquina síncrona de rotor liso en régimen permanente equilibrado. El circuito equivalente de la máquina síncrona de rotor liso permite una interpretación simple de las ecuaciones. Esta máquina se comporta como una fuente equivalente de Thèvenin, cuya tensión de circuito abierto es la fuerza electromotriz que produce la corriente de campo sobre la armadura y la impedancia de Thèvenin está formada por la resistencia de las bobinas de armadura y por la reactancia síncronica. La caída reactiva modela la desmagnetización ocasionada por la circulación de la corriente de armadura.

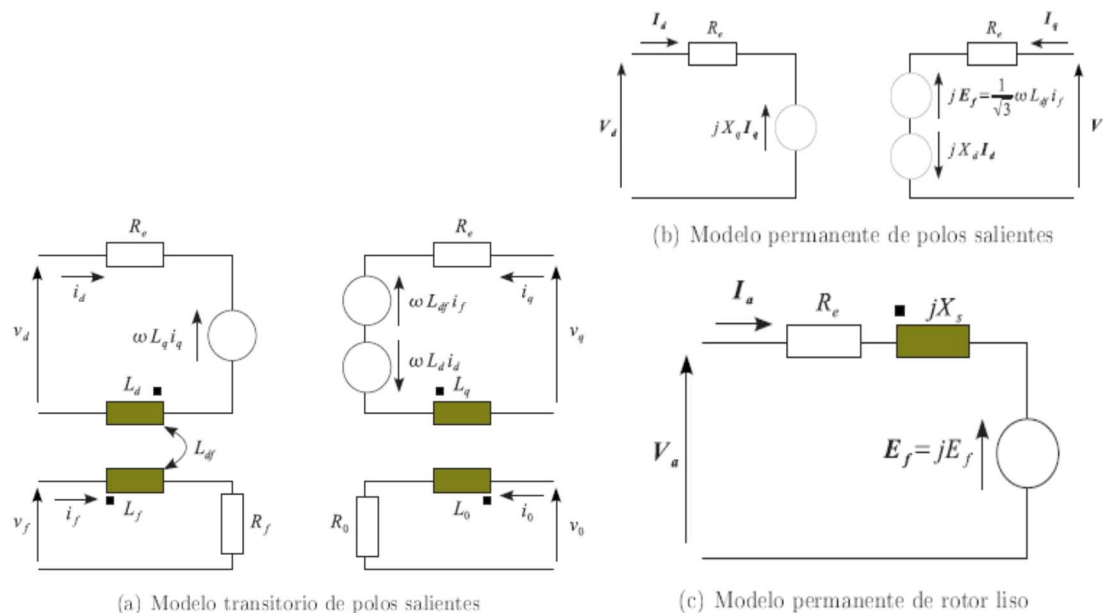


Fig. 2.24: Circuitos equivalentes de la máquina síncrona en convención motor.

2.5. Curvas características de la Máquina Síncrona:

2.5.1. Característica en vacío:

$$E_0 = f(I_{ex})$$

Estudia la dependencia de la fem en función de la corriente de excitación I_{ex} . Para ello, a la máquina se la tiene girando a la velocidad síncrona n_s sin carga. Esta curva, para bajos valores de excitación, es relativamente lineal, porque la fmm necesaria para vencer la reluctancia del hierro es prácticamente despreciable frente al aire del entrehierro. En cambio, para grandes valores de excitación, el circuito magnético se satura y tiende asintóticamente a un valor constante.

Si se traza una recta tangente a la curva en su primer tramo esta representa lo que se llama “línea del entrehierro” y determina su característica (recordar que la característica magnética en el aire es lineal). Para inducir una $E = \overline{OA}$ es necesaria una fmm $= \overline{OB}$, de la cual \overline{AC} es necesaria para hacer circular el φ a través del entrehierro (aire) y \overline{CD} en el hierro.

Esta curva sirve para:

- Conocer el grado de saturación del circuito magnético.
- Conocer el límite de I_{ex} y con ella el posterior dimensionamiento de la excitatriz.

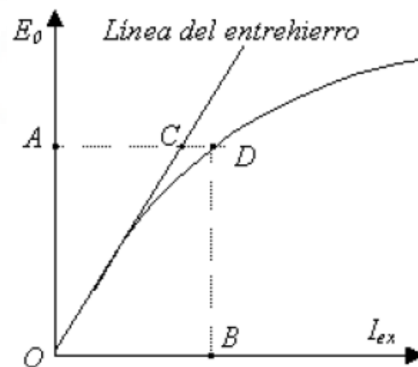


Fig. 2.25: Curva de saturación magnética.

2.5.2. Característica de cortocircuito (c.c.):

$$I = f(I_{ex})$$

Estudia la dependencia de la corriente de carga en función de la excitación. Las condiciones son:

- Bornes en DC
- Girando a velocidad nominal sincrónica (n_s)
- Corriente nominal I_n

Suponiendo:

- La caída óhmica despreciable ($R = 0$). Como la R es mucho menor que las reactivas, podemos despreciarla.
- La tensión: $U = 0$

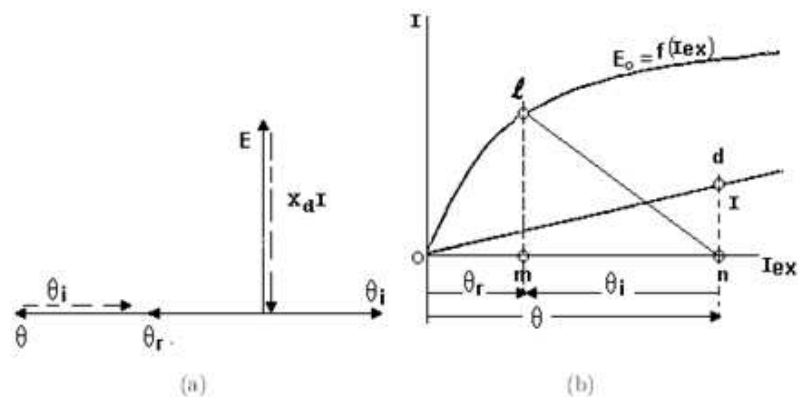


Fig. 2.26: Curva característica de corto circuito.

2.5.3. Característica en carga:

$$U = f(I_{ex})$$

Analiza la dependencia entre la tensión (U) y la excitación (I_{ex}) para $\cos\varphi$ e $I = constante$. Partiendo de la característica en vacío $E_0 = f(I_{ex})$, la de carga se diferencia por las caídas entre U y E .

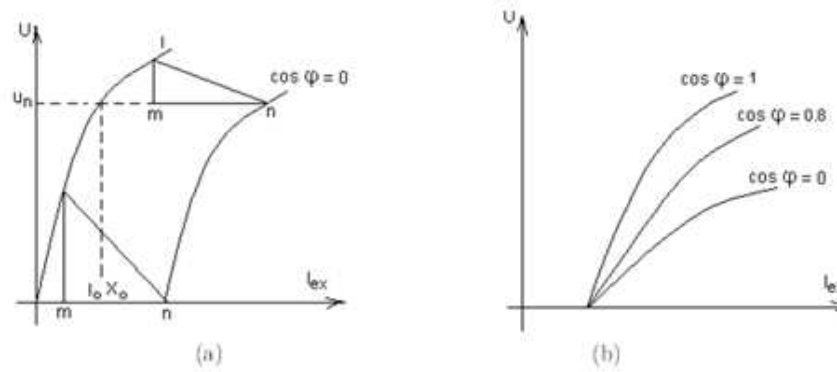


Fig. 2.27: Curva característica en carga.

Conociendo la característica en vacío y el triángulo de Potier se puede trazar la característica en carga a $\cos\varphi = 0$, porque en estas condiciones:

- La fmm de inducido es opuesta a la fmm del campo (reacción de inducido con carga inductiva pura) como en cortocircuito.
- Entonces para $I = cte$ la caída de tensión es constante ($\overline{m\bar{n}}$) y la reacción de inducido ($\overline{m\bar{n}}$) también es constante, luego el triángulo es constante, por consiguiente desplazándolo a lo largo de $E_0 = f(I_{ex})$ obtenemos $U = f(I_{ex})$ para $\cos\varphi = 0$.

Para otros estados de corriente, el triángulo varía y las curvas toman la forma de la figura, debiéndose estas variaciones a que, al aumentar I , aumenta $Z \cdot I$ y la reacción de inducido, la I_{ex} aumenta al disminuir el $\cos\varphi$ para mantener $U = cte$.

2.5.4. Característica externa:

$$U = f(I) \quad (I_{exc} = cte.; \cos\varphi = cte.)$$

Nos relaciona la tensión U en función de la corriente de carga I para excitación, frecuencia $U_{capacitiva}$ y $\cos\varphi$ constantes. $\cos\varphi = 0$.

El generador ideal sería aquel tal que, bajo cualquier carga, mantuviese constante la tensión (línea de 0,8 trazos). Pero en las máquinas síncronas

sabemos que con carga capacitiva, por reacción de inducido, $\cos\varphi = 0$ los flujos se suman y por consiguiente aumenta la tensión (curvas superiores) hasta el extremo en *inductiva* cortocircuito que la tensión se hace cero.

Lo opuesto ocurre con cargas inductivas, en que los flujos se restan y la tensión disminuye (curvas inferiores).

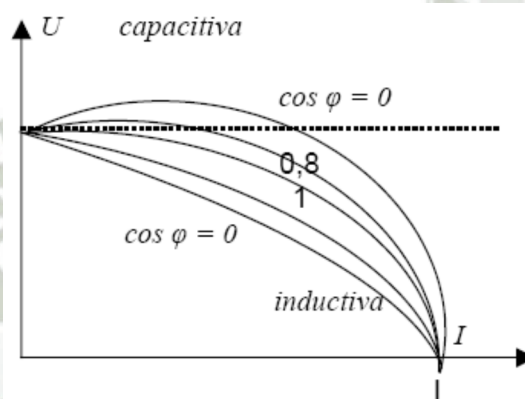


Fig. 2.28: Curva característica externa.

2.5.5. Curva de regulación:

$$I_{ex} = f(I)(E_o = cte; U = cte) ; I_{ex} = f(\cos\varphi)(I = cte; U = cte)$$

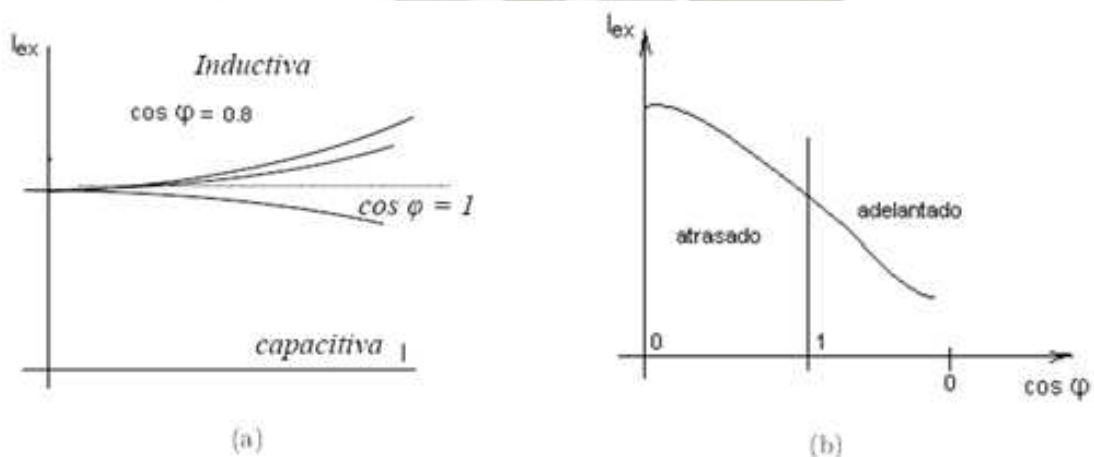


Fig. 2.29: Curva de regulación.

Estudia las relaciones entre la excitación y la corriente de carga y $\cos\varphi$ para U y $\cos\varphi = cte$ en el primer caso, e I y U cte. para el segundo. Nuevamente la característica ideal es aquella en que no existe.

Pero en la máquina síncrona, por reacción de inducido, con carga inductiva es necesaria aumentar la excitación para tener $U = cte$. Y viceversa con carga capacitiva. Lo mismo ocurre al variar el $\cos\varphi$.

Las tendencias de estas curvas se explican por la reacción de inducido.

2.6. Pérdidas Eléctricas

2.6.1. Pérdidas Eléctricas en el Cobre

Pérdidas que ocurren por calentamiento resistivo en los devanados del estator (armadura) y del rotor (campo) de la máquina. En una máquina trifásica, las *pérdidas en el cobre del estator (SCL)* están dadas por la ecuación:

$$P_{SCL} = 3I_A^2 R_A \quad \text{Ec. 2.31}$$

Donde I_A es la corriente que fluye en cada fase de la armadura y R_A es la resistencia de cada fase de la armadura.

Las *pérdidas en el cobre del rotor (RCL)* de una máquina alterna sincrónica están dadas por:

$$P_{RCL} = 3I_F^2 R_F \quad \text{Ec. 2.32}$$

Donde I_F es la corriente que fluye en el devanado de campo del rotor y R_F es la resistencia del devanado de campo. En general, la resistencia utilizada en estos cálculos es la del devanado a la temperatura normal de operación.

2.6.2. Pérdidas en el Núcleo.

Pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes parásitas ocurren en la parte metálica del motor. Estas pérdidas varían con el cuadrado de la densidad de flujo (B^2) y, para el estator, como la 1.5^{ava} potencia de la velocidad de rotación de los campos magnéticos ($n^{1.5}$).

2.6.3. Pérdidas Mecánicas.

En una máquina síncrona, son aquellas asociadas a los efectos mecánicos. Existen dos tipos básicos de pérdidas mecánicas: el *rozamiento mecánico* propiamente dicho y el *rozamiento con el aire*.

Las pérdidas por rozamiento son causadas por fricción en los cojinetes de las máquinas, en tanto que las pérdidas por rozamiento con el aire se deben a la fricción entre las partes móviles de la máquina y el aire encerrado en la carcasa del motor. Estas pérdidas varían con el cubo de la velocidad de rotación de la máquina.

Las pérdidas mecánicas y las pérdidas en el cobre de la máquina se agrupan con frecuencia bajo el nombre de *pérdidas rotacionales de vacío* (*sin carga*) de la máquina. En vacío toda la potencia de entrada debe utilizarse para superar estas pérdidas.

2.6.4. Pérdidas Dispersas

Son aquellas que no pueden situarse dentro de las categorías anteriores. Sin importar con qué cuidado se consideran pérdidas, algunas siempre se escapan de las categorías anteriores y por eso se agrupan como pérdidas dispersas. En la mayoría de las máquinas, estas pérdidas se toman convencionalmente como el 1 % de la plena carga.

2.6.5. Diagrama de Flujo de Potencia

Una de las técnicas más convenientes de considerar las pérdidas de potencia en una máquina es el diagrama de flujo de potencia.

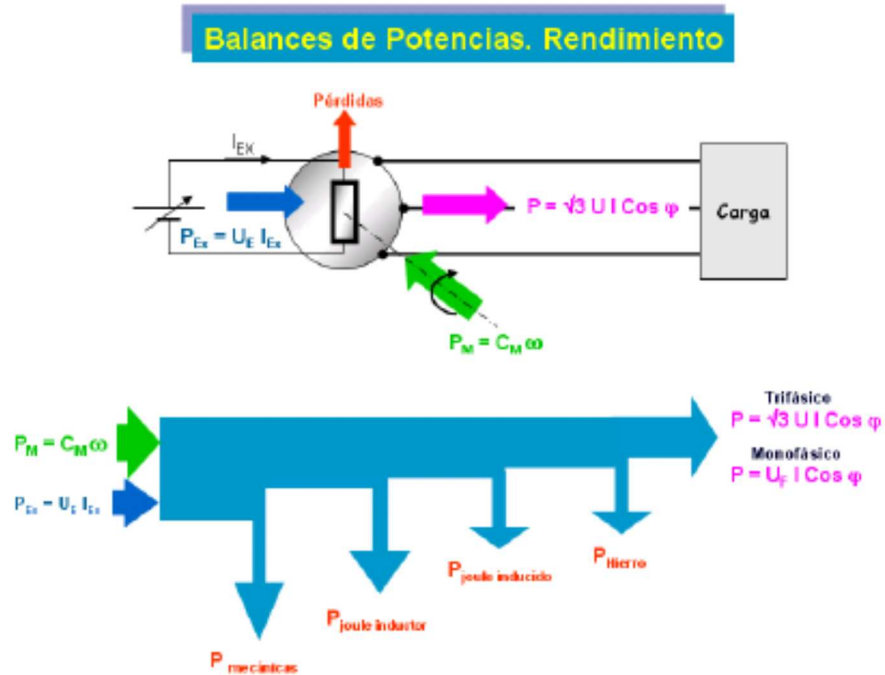


Fig. 2.30: Diagrama de flujo de potencia.

2.7. Disposición de las Bobinas en el Motor Síncrono

Generalmente, los fabricantes de motores síncronos trifásicos, en la caja de bornes de sus motores colocan el principio y el final de cada uno de los devanados del estator con el objeto de que el motor se pueda utilizar para dos tensiones de línea 380/220 V. El estator tiene un grupo de bobinas con seis terminales como puede verse en la figura 2.31.

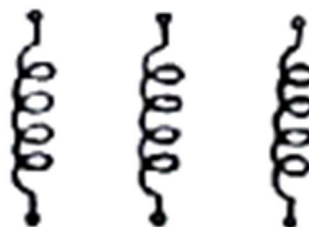


Fig. 2.31: Estator de un grupo de bobinas.

Como se sabe, las tres fases de una máquina con un solo grupo de bobinas se pueden conectar de dos formas distintas, en estrella para la mayor tensión (por ejemplo 380 V), y en triángulo o delta para la menor tensión (por ejemplo 220 V). Esto es lo que se denomina un motor normal de dos tensiones. Para una mejor comprensión puede verse las figuras 2.32 y 2.33.

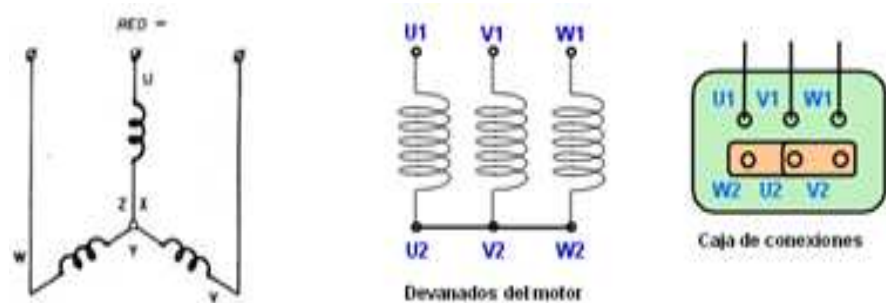


Fig. 2.32: Bobinas en conexión estrella.

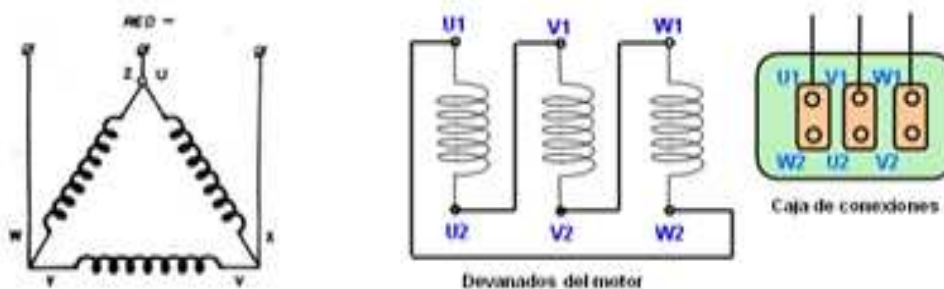


Fig. 2.33: Bobinas en conexión triángulo o delta.

Las máquinas pueden trabajar con varias tensiones, pero lo más importante es saber el peligro que se corre si se malogra el bobinado cuando se aplica equivocadamente una sobretensión produciendo la sobresaturación del núcleo con la consiguiente sobre corriente de magnetización que terminará quemando el aislamiento de la máquina.

De allí que se deba seguirse estrictamente las indicaciones dadas por el fabricante en la placa y en la contratapa de la caja de bornes de cada motor.

2.8. Designación, Conexión y Marcado de Terminales.

Existen dos sistemas universales, el europeo y el americano, cuyas diferencias se hacen notar en nuestro medio por cuanto aquí se trabaja con motores tanto americanos como europeos.

Los fabricantes europeos tienen por norma utilizar cajas de bornes donde los terminales de los bobinados, conectados a pernos, están montados en forma permanente y fácil de identificar con letras en el tablero aislante de soporte.

Además, ubican éstos de modo que mediante puentes cortos, pueden conectarse fácilmente las bobinas en cualquiera de las dos conexiones Y ó Δ .

2.8.1. Designación de los terminales

Según los países de origen, la industria eléctrica ha venido usando números y letras para marcar los terminales.

Cada sistema utiliza sus propias designaciones. Así, por ejemplo, para designar las líneas de suministro en la tabla 2.1 se da las letras que se suele utilizar en planos y en las instalaciones mismas.

Tabla 2.1: Designación normalizada de las líneas de suministro.

DESIGNACIÓN NORMALIZADA DE LAS LÍNEAS DE SUMINISTRO			
Sistema	Europeo	Inglés	Americano
Normas	DIN – VDE	BSS	NEMA
Líneas de suministro	R	L ₁	L ₁
	S	L ₂	L ₂
	T	L ₃	L ₃

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2.2 se muestra la designación normalizada que hacen los distintos sistemas en los terminales de bobinas de los motores.

Tabla 2.2: Designación normalizada de los terminales de bobinas de los motores.

DESIGNACIÓN NORMALIZADA DE LOS TERMINALES DE BOBINAS DE LOS MOTORES			
Sistema	Europeo	Inglés	Americano
Terminales bobinas Primer grupo	U	A1 (A)	T1
	V	B1 (B)	T2
	W	C1 (C)	T3
	X	A2	T4
	Y	B2	T5
	Z	C2	T6
Terminales bobinas Segundo grupo	U1	A3	T7
	V1	B3	T8
	W1	C3	T9
	X1	A4	T10
	Y1	B4	T11
	Z1	C4	T12

Fuente: Elaboración propia.

Estos cuadros de equivalencias facilitan la identificación de los terminales, teniendo en cuenta que éstos son siempre los mismos.

2.8.2. Conexión de Terminales

Las bobinas de estos motores son conmutables por el sistema estrella triángulo, lo que permiten alimentarlas directamente con cualquiera de las dos tensiones 380/220 V.

En la figura 2.34 se explica gráficamente la disposición de los seis terminales en la caja de bornes para la correspondiente configuración.

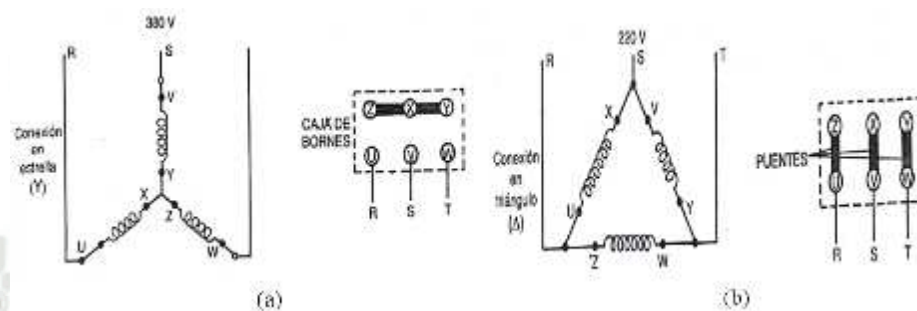


Fig. 2.34: Conexión de los terminales en motores trifásicos de un grupo de bobinas y seis bornes.

2.8.3. Datos de Placa

Indica del nombre comercial del fabricante, tipo de motor y el número de fabricación, todos los datos nominales de funcionamiento que sean importantes.

Como datos de placa vienen principalmente los siguientes:

- Potencia mecánica entregada (kW) en el eje, a plena carga.
- Configuración de las bobinas del estator y del rotor (si es de anillos).
- Tensión de la red de suministro (V).
- Intensidad de la corriente absorbida (A), a plena carga.
- El factor de potencia o $\cos\phi$, que expresa el desfase que se produce a potencia nominal entre la tensión y la corriente.

- La frecuencia (Hz) de la red de alimentación.
- La velocidad de giro del rotor (RPM), a plena carga.
- La clase de protección del motor. Se indica con una letra código.

Fabricante					
III	Mot.	N	628728		
Δ/Y	220/380	V	16.0 / 9.25		A
4	K	Cos	0.80	Cl. de ser.	
1415	rp	50	Hz		
Rotor	135	V	19.6	A	
Clase de aisl.	P21				

Fig. 2.35: Ejemplo de placa de características de un motor trifásico de rotor bobinado.

SIEMENS					
PE 21 PLUS™			PREMIUM EFFICIENCY		
MILL AND CHEMICAL DUTY QUALITY INDUCTION MOTOR					
ORD.NO.	51-502-033		DATE CODE	017	
TYPE	RG Z ESD		FRAME	284T	
H.P.	25		SERVICE FACTOR	1.15	
AMPS.	56.8/28.4		VOLTS	230/460	
R.P.M.	1750		HERTZ	60	
DUTY	CONT. 40° C AMB.		3 PH		
CLASS INSUL	F	NEMA Design B	K.V.A. CODE G	NEMA NOM EFF 93.0	
SH. END BRG.	50BC03JPP3		OPP. END BRG.	458C02JPP3	
Siemens Energy & Automation, Inc. Little Rock, AR				MADE IN USA	

Fig. 2.36: Ejemplo de placa SIEMENS, indicando las características del motor.

2.9. La máquinaasíncrona

2.9.1. Definición

Los motores asíncronos son máquinas rotativas de flujo variable y sin colector. El campo inductor está producido por corriente alterna. Generalmente el inductor está en el estator y el inducido en el rotor.

Son motores que se caracterizan porque son mecánicamente sencillos de construir, robustos y sencillos. Apenas requieren mantenimiento son baratos, no necesitan arrancadores (arrancan por sí solos al conectarles la red trifásica de alimentación) y no se ven sometidos a altas vibraciones por efecto de la transformación de energía eléctrica en mecánica. Estas son las principales ventajas que hacen que sea ampliamente utilizado en la industria.

Como inconvenientes más grave fué el control para regular su velocidad en amplios rangos cuando era necesario trabajar en aplicaciones como la tracción eléctrica (trenes de laminación, etc.) y fueron sustituidos por motores de c.c.. Actualmente gracias a las tecnologías recientes esto ya no es un problema, debido a que con el avance de la tecnología se está utilizando variadores de velocidad los mismos que constituyen una buena alternativa de solución.

2.10. Clasificación de las Máquinas Asíncronas

2.10.1. Según el número de devanados en el estator

- **Monofásicos:** Son motores eléctricos que como característica principal tienen un sólo devanado en el estator. Se utilizan en aplicaciones tanto en el hogar como en la industria.
- **Trifásicos:** Son motores eléctricos que como característica fundamental poseen tres devanados en el estator, estos motores eléctricos se suelen utilizar en aplicaciones industriales: máquinas-herramientas, grúas, bombas, ventiladores, etc.

2.10.2. Según el tipo de inducido:

- **Rotor Bobinado:** Tiene un arrollamiento trifásico similar al situado en el estator, las tres fases se conectan en estrella enviando los tres terminales a unos anillos aislados entre sí.

Esta disposición hace posible la introducción de resistencias externas a cada una de las fases del rotor, para limitar las corrientes de arranque, mejorar las características del par y controlar la velocidad. Hoy en día la operación de arranque se realiza automáticamente por medio de contactores y relés de tiempo que van eliminando las resistencias adicionales, para eso debemos unir los tres anillos.

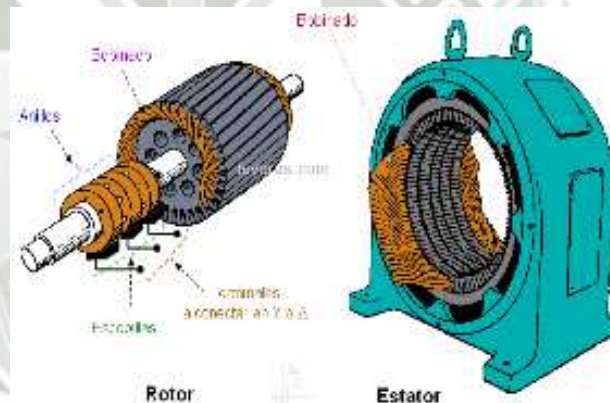


Fig. 2.37: Partes de un motor de rotor devanado

- **Rotor Jaula de Ardilla:** Los conductores del rotor están igualmente distribuidos por la periferia y están cortocircuitados con las barras en ambos extremos del rotor.

Para motores grandes, el devanado de jaula de ardilla se forma insertando barras conductoras pesadas (generalmente de cobre, aluminio o alguna de sus aleaciones) en las ranuras y después se suelda o atornilla a los anillos terminales.



Fig. 2.38: Sección de un motor de jaula de ardilla

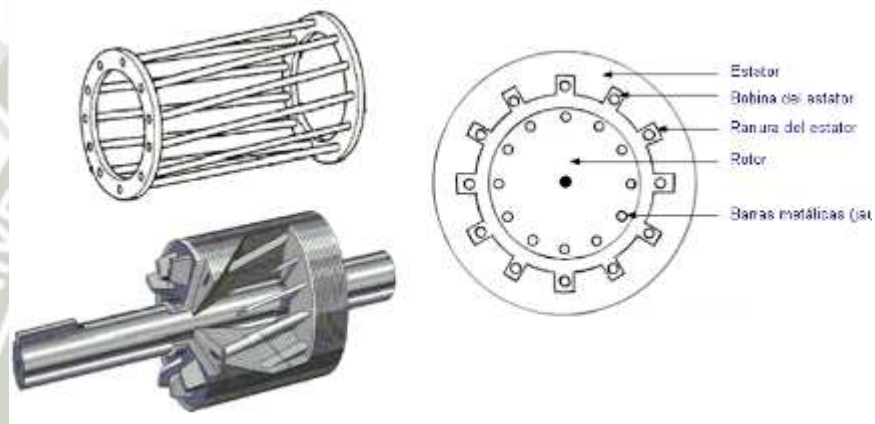


Fig. 2.39: Partes de un motor de jaula de ardilla

2.11. Motor Asíncrono Trifásico

2.11.1. Construcción del Motor de Rotor Bobinado.

a) Estator

El devanado exterior se llama estator y está formado por un conjunto de laminaciones de acero de alta permeabilidad prensada y delgada, con ranuras donde van alojados las bobinas para formar los devanados trifásicos a 120° en el espacio. La carcasa y el bastidor proporcionan apoyo mecánico al

motor y aunque está hecho de material magnético, no está diseñado para conducir flujo magnético

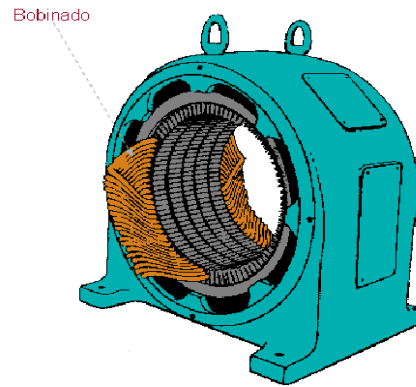


Fig. 2.40: Estator.

b) Rotor

El rotor también está compuesto de laminaciones delgadas, de acero sumamente permeable prensados sobre su eje y ranuradas donde se alojan los devanados igual que el estator pero los anillos están unidos por medio de un cable para que se cierre el circuito.

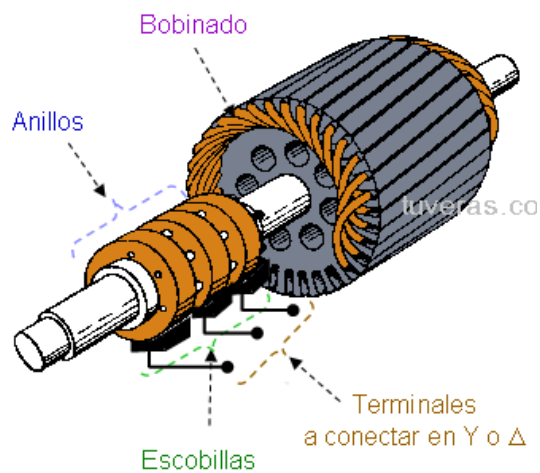


Fig. 2.44: El rotor.

2.11.2. Principio de Operación del Motor de Rotor Bobinado

Cuando el devanado del estator de un motor de inducción trifásico se conecta a una fuente de potencia trifásica, produce un campo magnético que:

- Es de magnitud constante.
- Gira alrededor de la periferia del rotor a la velocidad síncrona.

Si f es la frecuencia de la corriente en el devanado del estator y P es el número de polos, la velocidad síncrona del campo rotatorio es:

$$N_s = \frac{120 f}{P} \quad \text{Ec. 2.33}$$

En revoluciones por minuto (rpm), o

$$\omega_s = \frac{4\pi f}{P} \quad \text{Ec. 2.34}$$

En radianes por segundo.

El campo rotatorio induce fuerza electromotriz (f.e.m.) en el devanado del rotor. Como el devanado del rotor forma un lazo cerrado, la f.e.m. inducida en cada una de las bobinas da origen a una corriente inducida en ellas. Cuando la bobina conductora de corriente se introduce en un campo magnético, experimenta una fuerza o par que tiende a hacerla girar. Si el par de la carga es menor que el par de arranque, el rotor comienza a girar. La fuerza desarrollada y, por tanto, la rotación del rotor están en la misma dirección que el campo rotatorio.

Esto concuerda con la ley de inducción de Faraday. En condiciones sin carga, el rotor alcanza pronto una velocidad casi igual a la síncrona, pero nunca puede girar a ella porque sus bobinas parecerían estacionarias respecto al campo al campo rotatorio y no habría f.e.m. inducida en ellas.

En ausencia de una f.e.m. inducida en las bobinas del rotor, no habría corriente en los conductores de éste y, en consecuencia, tampoco experimentarían fuerza. En ausencia de una fuerza, el rotor tendería a disminuir su velocidad.

En cuanto el rotor comienza a reducir su velocidad el proceso de inducción se presenta de nuevo.

En resumen, el rotor recibe su potencia por inducción sólo cuando existe un movimiento relativo entre su velocidad y el campo rotatorio. Puesto que el rotor gira a una velocidad menor que la síncrona del campo rotatorio, un motor de inducción también se denomina motor asíncrono.

Sea N_r (o ω_r) la *velocidad mecánica del rotor* con cierta carga. Respecto al motor, el campo rotatorio se mueve hacia delante con una velocidad relativa de:

$$\begin{aligned} N_r &= N_s - N_m \\ \omega_r &= \omega_s - \omega_m \end{aligned} \quad \text{Ec. 2.35}$$

La *velocidad relativa* también se llama *velocidad de deslizamiento*. Se trata de la velocidad con la que el rotor se desliza hacia atrás de un punto en un polo giratorio ficticio con objeto de producir un par. No obstante, es práctica común expresar la velocidad de deslizamiento a la velocidad síncrona. Es decir:

$$\text{Ec. 2.36} \quad s = \frac{N_r}{N_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s}$$

$$s = \frac{N_s - N_m}{N_s} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad \text{Ec. 2.37}$$

Aunque con la ecuación anterior se obtiene el deslizamiento por unidad, es costumbre expresarlo como porcentaje de la velocidad síncrona (deslizamiento porcentual).

En términos de la velocidad síncrona y el deslizamiento por unidad, la velocidad mecánica del rotor puede expresarse como:

$$N_m = (1-s)N_s \text{ Ec. 2.38}$$

$$\omega_m = (1-s)\omega_s \text{ Ec. 2.39}$$

Cuando el rotor se encuentra estacionario, el deslizamiento por unidad es 1 y el rotor aparece exactamente como el devanado secundario en cortocircuito de un transformador. La frecuencia de la f.e.m. inducida en el devanado del rotor es la misma que la del campo rotatorio. Luego, la frecuencia de la f.e.m. inducida en el rotor es:

$$f_r = \frac{PN_r}{120}$$

$$f_r = \frac{P(N_s - N_m)}{120} = \frac{PN_s}{120} \left[\frac{N_s - N_m}{N_s} \right] \text{ Ec. 2.40}$$

$$f_r = s * f_s$$

La ecuación anterior destaca el hecho de que la frecuencia del rotor depende del deslizamiento del motor. En la inmovilidad, el deslizamiento es 1 y la frecuencia del rotor es la misma que la del campo rotatorio. Pero, la frecuencia del rotor decrece con la disminución del deslizamiento.

A medida que éste se acerca a cero, también lo hace la frecuencia del rotor. Un motor de inducción generalmente opera con bajo deslizamiento, por lo que la frecuencia de la f.e.m. inducida en el rotor es baja. Por tal razón, la pérdida del núcleo en el circuito magnético suele despreciarse.

Donde:

- N_s : Velocidad de giro síncrona (rpm)
- f : Frecuencia de la red (Hz)
- P : Número de polos
- N_r : Velocidad de giro mecánica del rotor (rpm)
- S : Deslizamiento (Adimensional)

2.11.3. Circuito Equivalente de un Motor Asíncrono.

Un motor asíncrono para su funcionamiento depende que el circuito del estator induzca voltajes y corrientes en el circuito del rotor (acción transformadora), por eso se le llama también motor de inducción.

Puesto que la inducción de voltajes y corrientes es esencialmente una operación de transformación; el circuito equivalente de un motor asíncrono, terminará por ser similar al circuito equivalente de un transformador. A un motor asíncrono se le da el nombre de máquina *individualmente excitada* (al contrario de máquina sincrónica doblemente excitada), puesto que la potencia se entregará únicamente al circuito del estator.

Como un motor asíncrono no tiene circuito de campo independiente su prototipo no tendrá una fuente de voltaje interno, como el voltaje generado internamente E_A de una máquina sincrónica.

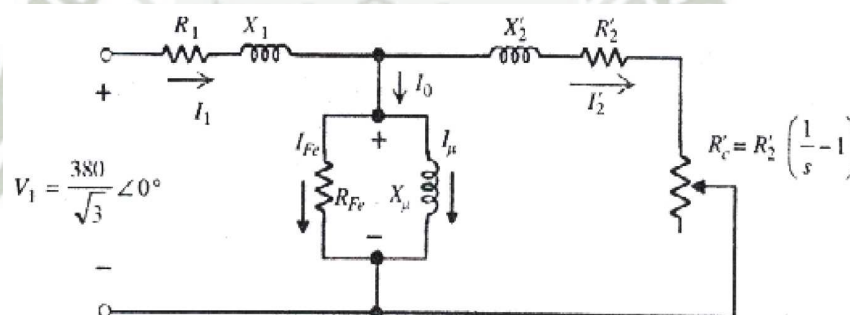


Fig. 2.42: Circuito equivalente de un motor asíncrono.

2.11.4. Ensayos del Motor Asíncrono

Los ensayos del motor asíncrono permiten determinar los parámetros del circuito equivalente y el comportamiento del Motor Asíncrono. Existen tres tipos de pruebas:

- a) Ensayo de Vacío.
- b) Ensayo de Cortocircuito o Rotor Bloqueado.
- c) Ensayo con Carga Eléctrica.

a) **Ensayo de Vacío o de Rotor Libre.**

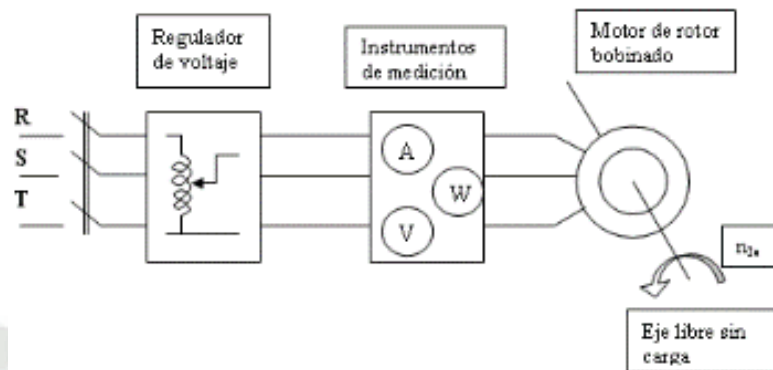


Fig. 2.43: Esquema de conexiones del ensayo de vacío.

Consiste en hacer funcionar el motor sin ninguna carga eléctrica (generador) en el eje, es decir, la máquina trabaja a rotor libre. Se debe alimentar a la tensión nominal de placa del motor asíncrono $V_{1n} = V_o = 220v$, bajando hasta tomar 5 o 8 lecturas. Midiendo al mismo tiempo la potencia absorbida P_o (total) y la corriente de vacío I_o (fase). Como el motor en vacío gira a una velocidad muy cercana a la del campo giratorio, lo que indica, desde el punto de vista del circuito de la figura 2.45, que la resistencia de carga R'_c tiene un valor muy elevado pero no infinito; como no se ejerce ningún par de carga en el eje, la potencia disipada en esta resistencia representa la pérdida en rozamiento y ventilación del motor. Como quiera además que I_2 es de pequeño valor debido a la alta impedancia de R'_c , se podrán despreciar las pérdidas en el cobre del devanado del rotor.

Denominando P_s las *pérdidas en el cobre del estator*, P_{Fe} a las *pérdidas en el hierro*, P_m las *pérdidas mecánicas* y P_o la *potencia de vacío*, se

cumplirá:
$$P_o = P_{Fe} + P_m + P_s \quad \text{Ec. 2.41}$$

Para determinar la P_m es necesario realizar las gráficas que luego las mencionaremos. Además la P_{rot} ($P_{rot} = P_o - P_s$).

La P_{Fe} ($P_{Fe} = P_{rot} - P_{mec}$), cual usaremos en las siguientes expresiones:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{Fe}}{3 \times V_{o.n} \times I_{0.n.f}} \quad \text{Ec. 2.42}$$

$$I_{Fe} = I_{0.n.f} \times \cos \varphi_0 \quad \text{Ec. 2.43}$$

$$I_u = I_{0.n.f} \times \text{sen } \varphi_0 \quad \text{Ec. 2.44}$$

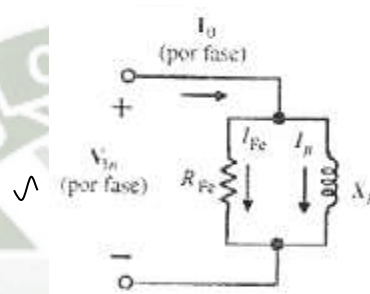


Fig.2.44: Circuito equivalente del ensayo en vacío.

De donde se deduce:

$$R_{Fe} = \frac{V_{o.n}}{I_{Fe}} \quad \text{Ec. 2.13}$$

$$X_u = \frac{V_{o.n}}{I_u} \quad \text{Ec. 2.14}$$

Donde:

- P_{rot} : Pérdidas rotacionales (W)
- $I_{0.n.f}$: Corriente de vacío nominal de fase (A)
- $V_{o.n}$: Tensión de vacío nominal (v)
- P_{Fe} : Pérdidas en el hierro (W)
- P_{mec} : Pérdidas mecánicas (W)
- $\text{Cos } \varphi_0$: Factor de potencia en vacío
- I_{Fe}, I_u : Corriente en el hierro y de magnetización (A)
- R_{Fe} : Resistencia por pérdidas en el hierro (Ω)
- X_u : Reactancia de magnetización (Ω)

b) **Ensayo de Rotor Bloqueado o Cortocircuito**

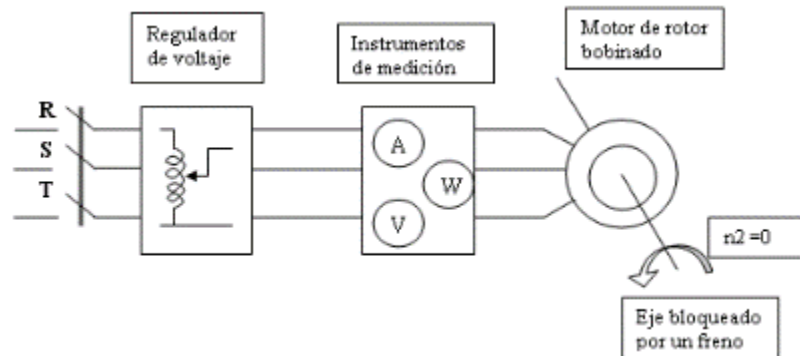


Fig. 2.45: Esquema de conexiones del ensayo de rotor bloqueado.

Este ensayo se realiza bloqueando el rotor impidiéndole que gire; es decir, $n_2 = 0$, por lo que se tendrá $s = 1$ y $R'_c = 0$. Al estator se le alimenta de corriente, partiendo de cero hasta alcanzar a la corriente nominal del motor asíncrono $I_{1cc} = I_{1n} = 5A$ (por fase), midiendo a la vez la tensión aplicada V_{1cc} (fase) y la potencia absorbida P_{cc} (total). La corriente de magnetización I_0 es despreciable frente a la corriente de rotor I'_2 porque $R'_c = 0$, el deslizamiento es la unidad y por la tensión pequeña.

El circuito equivalente se simplifica a la figura 2.46 que se obtiene al despreciar la rama en paralelo del esquema de la figura 2.42.

Con los datos obtenidos de los ensayos puede obtenerse el f.d.p. en cortocircuito:

$$\cos\varphi_{cc} = \frac{P_{cc.T}}{3 \times V_{1cc} \times I_{1n}} \quad \text{Ec. 2.45}$$

y de aquí resultan los valores:

$$R_{cc} = R_1 + R'_2 = \frac{V_{cc}}{I_{cc.n.f}} \times \cos \varphi_{cc}$$

Ec. 2.46

$$X_{cc} = X_1 + X'_2 = \frac{V_{cc}}{I_{cc.n.f}} \times \text{sen} \varphi_{cc}$$

Ec. 2.47

Sabiendo que $X_1 = X_2$, y R_1 es medido (Dato)

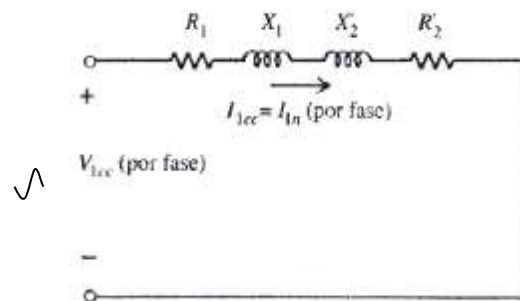


Fig. 2.46: Circuito equivalente del ensayo en cortocircuito.

Donde:

P_{ccT} : Potencia de cortocircuito total (W)

$\text{Cos} \varphi_{cc}$: Factor de Potencia

V_{cc} : Voltaje de cortocircuito por fase (v)

$I_{cc.n.f}$: Corriente de cortocircuito nominal de fase (A)

R_1, R'_2 : Resistencia del estator y rotor (Ω)

R_{cc}, X_{cc} : Resistencia y reactancia de cortocircuito (Ω)

X_1, X'_2 : Reactancia en el estator y rotor (Ω)

$V_L = V_{cc}$: Voltaje de línea (v)

c) Ensayo con Carga Eléctrica.

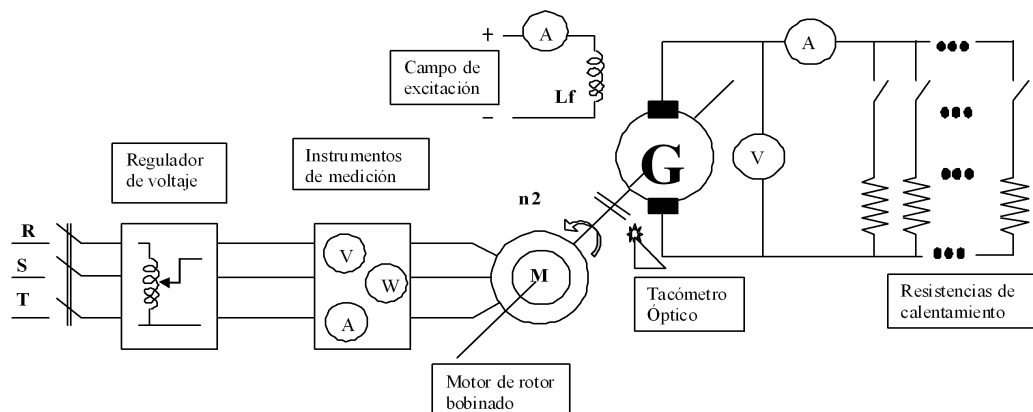


Fig. 2.47: Esquema de conexiones de un motor asíncrono y un generador d.c.

Este grupo de máquinas transformará la energía eléctrica trifásica de corriente alterna en energía mecánica, luego en energía de corriente continua y finalmente transformarse en energía calorífica.

Para determinar la potencia mecánica de salida que desarrolla el motor, lo obtenemos por el del flujo de potencia en el grupo, para ello se debe conocer la potencia de entrada y la eficiencia del motor a diferentes cargas eléctricas (generador) y se determina directamente con este ensayo de carga.

Se deben utilizar los instrumentos adecuados para este ensayo haciendo las conexiones necesarias al motor, al generador y las resistencias de calentamiento. El acoplamiento de los ejes de ambos deben estar perfectamente alineados.

Una vez revisada las conexiones mecánicas y eléctricas se arranca el motor por el método estrella-delta, dejar por unos minutos hasta que alcance las condiciones de lubricación de rodamientos del Generador DC. Luego la 1^{ra} lectura de carga será con el generador d.c. sin excitación; la 2^{da} lectura con excitación hasta tener el voltaje nominal

d.c. en la armadura; la 3^{ra} lectura y las demás con carga de resistencias de calentamiento conservando siempre el voltaje nominal d.c. Dichas resistencias deben estar ventiladas.

Una vez finalizado el ensayo de carga desconectar la alimentación y con la carga del generador en cero ($I_a = 0$), comprobar experimentalmente las corrientes de arranque con la configuración (Y- Δ) con la ayuda de una pinza amperimétrica que congele la lectura del salto de corriente.

2.11.5. Pérdidas y Diagrama de Flujo de Potencia

Un motor de inducción puede describirse básicamente como un transformador giratorio. Su alimentación es un sistema trifásico de voltajes y corrientes. Para un transformador corriente, su energía de salida es potencia eléctrica desde los embobinados secundarios.

Estos están, en un motor de inducción (el rotor), en cortocircuito, por lo cual no existe energía eléctrica de salida en los motores de inducción normal. En cambio, su energía de salida es mecánica. En la figura 2.48 se ilustra el diagrama de flujo de potencia, la relación entre la potencia eléctrica de entrada y la potencia mecánica de salida.

La potencia eléctrica de entrada al motor de inducción P_1 se da en forma de voltajes y corrientes trifásicas. Las primeras pérdidas que se encuentran en las máquinas son las pérdidas I^2R en el embobinado del estator (las *pérdidas en el cobre del estator* P_s). En seguida, se pierde cierta cantidad de potencia por histéresis y por corrientes parásitas en el estator ($P_{\text{núcleo}}$). La potencia que permanece en éste punto se traslada al rotor de la máquina, a través del entrehierro entre el estator y el rotor. Esta potencia se llama *potencia del entrehierro* P_{AG} de la máquina.

Después que la potencia se traslada al rotor, una parte de ella se pierde como pérdidas I^2R (las pérdidas en el cobre del rotor P_r) y el resto se convierte de eléctrica en mecánica (P_2). Por último, las pérdidas por rozamiento y por fricción del viento $P_{F\&W}$ y las pérdidas diversas P_{misc} se restan.

Las pérdidas en el núcleo de un motor de inducción vienen del circuito del estator y casi nada del circuito del rotor. Puesto que un motor de inducción funciona normalmente a una velocidad cercana a la sincrónica, el movimiento relativo de los campos magnéticos sobre la superficie del rotor es bastante lento y las pérdidas del núcleo del rotor son mínimas comparadas con las pérdidas del núcleo del estator.

Como la fracción más grande de estas pérdidas viene del circuito del estator, todas ellas se agrupan en ese punto del diagrama. Estas pérdidas están representadas en el circuito equivalente del motor de inducción, por la resistencia R_c (o la conductancia G_c).

Cuanta más *alta* sea la velocidad de un motor de inducción, más *altas* son serán las pérdidas por fricción, por vendaval y las pérdidas diversas. Por otro lado, cuanto *más alta sea la velocidad del motor* (hasta n_{sinc}), *más bajas sus pérdidas en el núcleo*. Por eso, estas tres categorías de pérdidas se juntan y se les da el nombre de **pérdidas rotacionales**.

Las pérdidas rotacionales totales de un motor se consideran constantes, frecuentemente aun con velocidad variable, puesto que las componentes de las pérdidas cambian con direcciones opuestas, al presentarse un cambio de velocidad.

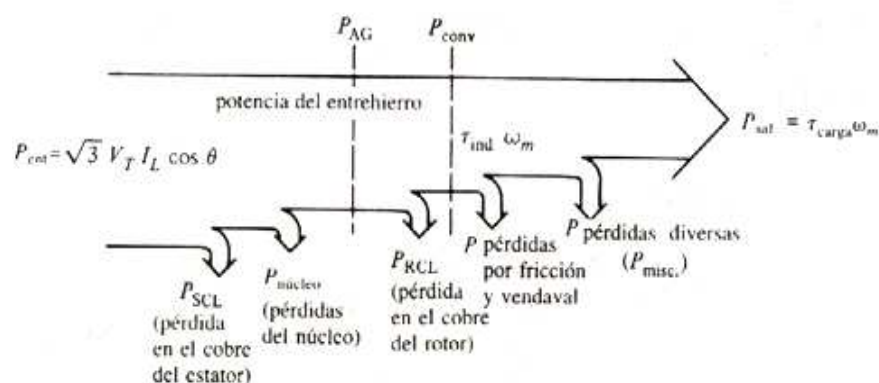


Fig. 2.48: Diagrama del flujo de potencia en un motor de inducción

Teniendo en cuenta el diagrama del flujo de potencia en un motor de inducción y el circuito equivalente; podemos determinar la potencia del estator:

$$P_s = 3 \times I_1^2 \times R_1 \quad \text{Ec. 2.48}$$

Hallamos también las pérdidas rotacionales:

$$P_{rot.} = 3 \times I_0^2 \times R_0 \quad \text{Ec. 2.49}$$

Luego determinamos las pérdidas en el cobre del rotor:

$$P_r = 3 \times I_2^2 \times R_2 \quad \text{Ec. 2.50}$$

Asimismo, hallamos la potencia de salida:

$$P_2 = 3 \times I_2^2 \times R_2' \times \left(\frac{1}{s} - 1\right) \quad \text{Ec. 2.51}$$

Finalmente hallamos a partir de los datos anteriores, la potencia de entrada:

$$P_1 = P_2 + P_s + P_{rotacionals} + P_r \quad \text{Ec. 2.52}$$

Donde:

P_s, P_r : Potencia en el estator y rotor (W)

$P_{rot.}$: Potencia rotacional (W)

P_1, P_2 : Potencia de entrada y salida del Motor Asíncrono (W)

η : Eficiencia del Motor Asíncrono (Adimensional)

2.11.6. Par de Rotación

Si es P_s la potencia mecánica útil desarrollada por el motor y n la velocidad en r.p.m. a la que gira el rotor, el par útil o torque en N.m en el árbol de la máquina será el cociente entre P_s y la velocidad angular de giro $\omega = 2\pi n/60$, expresando en r.p.m.:

$$T = \frac{P_2}{2\pi \frac{n}{60}}$$

Ec. 2.53

De la definición de deslizamiento se deduce:

$$s = \frac{n_s - n_{mec}}{n_s} \Rightarrow n_{mec} = n_s(1 - s)$$

Ec. 2.54

Y la expresión del par se convierte en:

$$T = \frac{P_2}{2\pi \frac{n_1}{60}(1-s)}$$

Ec. 2.55

De la ecuación 2.51 y sustituyendo en la ecuación 2.55 tenemos como resultado:

$$T = \frac{3 \times \frac{R'_2}{s} \times I_2'^2}{2\pi \frac{n_1}{60}}$$

Ec. 2.56

Por la Ley de Ohm en el circuito equivalente de la figura 2.46 el módulo de la corriente I_2' vale:

$$I_2' = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{CC}^2}}$$

Ec. 2.57

Donde se ha llamado X_{CC} a las reactancia $X_1 + X_2$. Sustituyendo la ecuación 2.57 en la ecuación 2.56 se obtiene el torque nominal:

$$T_{nom.} = \frac{3 \times \frac{R'_2}{s} \times V_1^2}{2\pi \frac{n_s}{60} \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{CC}^2 \right]}$$

Ec. 2.58

Que expresa el valor del par electromagnético producido por la máquina en función de los parámetros del motor.

Para determinar el torque de arranque se obtiene haciendo $s = 1$ en la ecuación 2.57.

$$T_{arr} = \frac{3 \cdot V_1^2 \cdot R'_2 / \omega_{\sin c}}{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2} \quad \text{Ec 2.59}$$

Se observa en la ecuación 2.57 que el par se hace cero cuando $s = \pm\infty$; por otra parte, el par se hace infinito cuando $s = 0$ y la característica $T = f(s)$ presenta unos máximos en los que debe cumplirse:

Derivando la ecuación 2.57 e igualándolo a cero; despejamos s_m :

$$\frac{dT}{ds} = 0 \Rightarrow s_m = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{CC}^2}} \quad \text{Ec. 2.60}$$

Sustituyendo la ecuación 2.60 en la ecuación 2.58 se obtiene el valor del par máximo de la máquina:

$$T_{MÁX} = \frac{3 * V_f^2}{\left(2\pi \frac{n_s}{60}\right) \times 2 \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{CC}^2} \right]} \quad \text{Ec. 2.61}$$

Asimismo reemplazando $s = 1$ en la ecuación 2.57 obtenemos la corriente de arranque:

$$I_{arr} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad \text{Ec. 2.62}$$

Donde:

- I_{arr} : Corriente de arranque (A)
- ω_n : Velocidad de giro nominal en el eje del Motor (rad/seg)
- n_2 : Velocidad de giro en el eje del Motor (rpm)
- n_s : Velocidad de giro sincrónico (rpm)
- S : Deslizamiento del motor (Adimensional)
- $T_{máx.}$: Torque máximo (N.m)

T_{arr} : Torque de arranque (N.m)

T_{nom} : Torque nominal (N.m)

V_1 : Tensión de alimentación (v)

s_n : Deslizamiento nominal.

/ P = Número de polos

n_s : Velocidad sincrónica (rpm)

n_n : Velocidad nominal de placa del Motor (rpm)

2.11.7. Disposición de las Bobinas en el Motor Asíncrono

Generalmente, los fabricantes de motores asíncronos trifásicos, en la caja de bornes de sus motores colocan el principio y el final de cada uno de los devanados del estator con el objeto de que el motor se pueda utilizar para dos tensiones de línea 380v. / 220v.

Como se sabe, las tres fases de una máquina con un solo grupo de bobinas se pueden conectar sólo de dos formas distintas, en estrella para la mayor tensión (por ejemplo 380 V.), y en triángulo para la menor tensión (por ejemplo 220 V.). Esto es lo que se denomina un motor normal de dos tensiones. Para una mejor comprensión puede verse la figura 2.49-2.50.

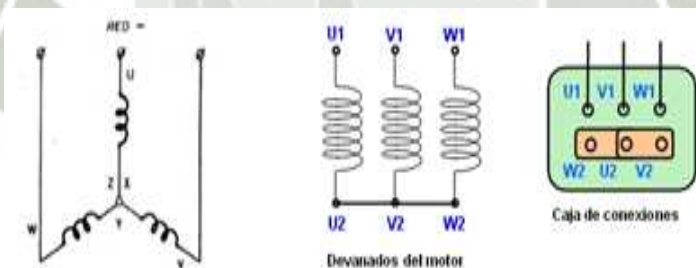


Fig. 2.49: Las bobinas en conexión estrella.

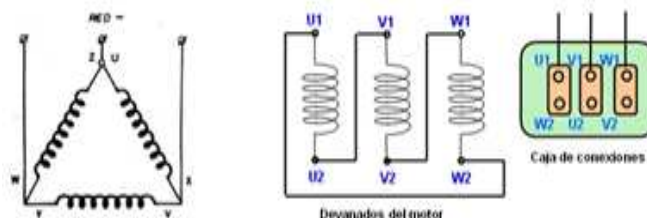


Fig. 2.50: Las bobinas en conexión triángulo.

Las máquinas pueden trabajar con varias tensiones, pero lo más importante es saber el peligro que se corre si se malogra el bobinado cuando se aplica equivocadamente una sobretensión produciendo la sobresaturación del núcleo con la consiguiente sobre corriente de magnetización que terminará quemando el aislamiento de la máquina.

De allí que se deba seguirse estrictamente las indicaciones dadas por el fabricante en la placa y en la contratapa de la caja de bornes de cada motor.

2.11.8. Designación, Conexión y Marcado de Terminales.

Existen dos sistemas universales, el europeo y el americano, cuyas diferencias se hacen notar en nuestro medio por cuanto aquí se trabaja con motores tanto americanos como europeos.

Los fabricantes europeos tienen por norma utilizar cajas de bornes donde los terminales de los bobinados, conectados a pernos, están montados en forma permanente y fácil de identificar con letras en el tablero aislante de soporte.

Además, ubican éstos de modo que mediante puentes cortos, pueden conectarse fácilmente las bobinas en cualquiera de las dos conexiones Y ó Δ .

Los fabricantes americanos, en cambio, tiene por norma prolongar los terminales de las bobinas hasta la caja de bornes, utilizando chicotes independientes, flexible y aislados, convenientemente identificados.

a) Designación de los terminales

Según los países de origen, la industria eléctrica ha venido usando números y letras para marcar los terminales.

Cada sistema utiliza sus propias designaciones. Así, por ejemplo, para designar las líneas de suministro en la Tabla 2.3 se da las letras que se suele utilizar en planos y en las instalaciones mismas.

Tabla 2.3 Designación normalizada de las líneas de suministro

Designación normalizada de las líneas de suministro			
Sistema	Europeo	Inglés	Americana
Normas	DIN - VDE	BSS	NEMA
Líneas de suministro	R	L1	L1
	S	L2	L2
	T	L3	L3

En la Tabla 2.3 se muestra la designación normalizada que hacen los distintos sistemas en los terminales de bobinas de los motores.

Tabla 2.3 Designación normalizada de los terminales de bobinas de los motores

Designación normalizada de los terminales de bobinas de los motores			
Sistemas	Europeo	Inglés	Americano
Terminales bobinas primer grupo	U	A1 (A)	T1
	V	B1 (B)	T2
	W	C1 (C)	T3
	X	A2	T4
	Y	B2	T5
	Z	C2	T6
Terminales bobinas segundo grupo	U1	A3	T7
	V1	B3	T8
	W1	C3	T9
	X1	A4	T10
	Y1	B4	T11
	Z1	C4	T12

Estos cuadros de equivalencias facilitan la identificación de los terminales, teniendo en cuenta que éstos son siempre los mismos.

b) Conexión de Terminales

Las bobinas de estos motores son conmutables por el sistema estrella triángulo, lo que permiten alimentarlas directamente con cualquiera de las dos tensiones 220v/380v.

En la figura 2.51 se explica gráficamente la disposición de los 6 terminales en la caja de bornes para la correspondiente configuración.

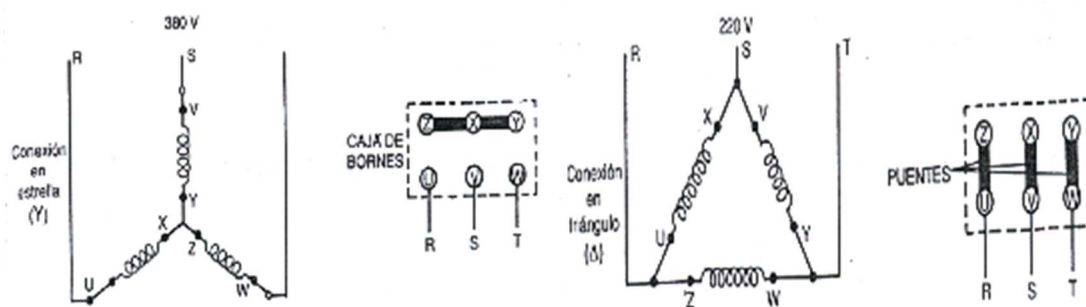


Fig. 2.51: Conexión de los terminales en motores trifásicos de un grupo de bobinas y seis bornes.

2.11.9. Control de la corriente de arranque

A los efectos de reducir la corriente que toma en el momento de arranque este tipo de motores, la cual puede afectar a las instalaciones anexas al mismo, los sistemas que se utilizan son los siguientes:

a) Arranque directo

Se puede realizar siempre que la red pueda suministrar la corriente de arranque, sin afectar otras instalaciones anexas (como computadoras, flujo luminoso en instalaciones de iluminación por efectos de la caída de tensión, etc).

Se utiliza normalmente en motores de pequeña potencia.

b) Arranque a tensión reducida

Para reducir la corriente de arranque, se aplica a los motores en el momento de arranque una tensión menor a la nominal o de plena potencia. Se debe tener en cuenta que la cupla motora se ve reducida con el cuadrado de la tensión aplicada, por lo que se debe verificar que la cupla resistente sea inferior a esta.

c) Arranque estrella-triángulo

El mismo consiste en arrancar el motor con sus bobinados conectados en estrella y luego que alcanza una cierta velocidad, cambiar la conexión a triángulo, recibiendo plena tensión.

Con esto se logra reducir la corriente de la línea a la tercera parte, pero también la cupla se reduce a la tercera parte.

d) Arranque por variación de la resistencia del rotor

Este método de arranque sólo se puede aplicar a motores de rotor devanado equipado con anillos deslizantes. Estos anillos van montados sobre el eje y están completamente aislados de este como se comprueba fácilmente, al introducir una resistencia adicional en el devanado del rotor, se disminuye la corriente de arranque con relación a la corriente absorbida por el método de arranque directo.

Procedimiento: inicialmente introducir una resistencia adicional que haga que el par de arranque sea el máximo. Posteriormente, ir reduciendo la resistencia adicional hasta cero.

Este método presenta los siguientes inconvenientes:

- Aumenta el tiempo de arranque
- Es un método caro puesto que los motores de rotor devanado son más caros que los de jaula de ardilla.
- Aumentan las pérdidas debido a la potencia disipada en la resistencia adicional

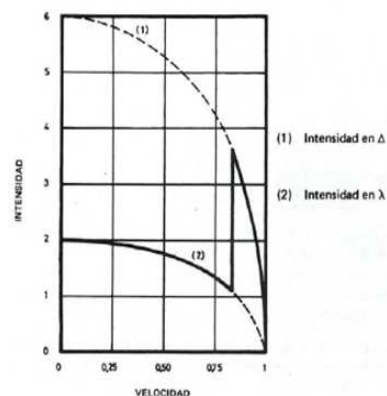


Fig. 2.52: Curvas de intensidad – velocidad

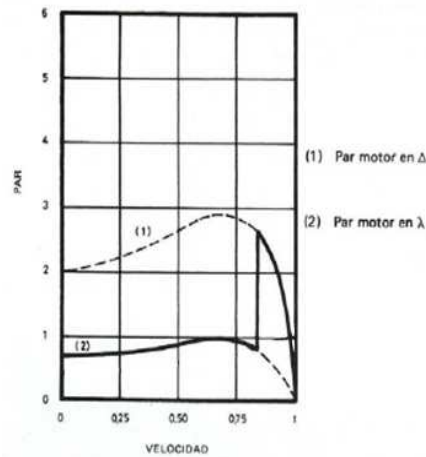


Fig. 2.53: Curvas de par – velocidad

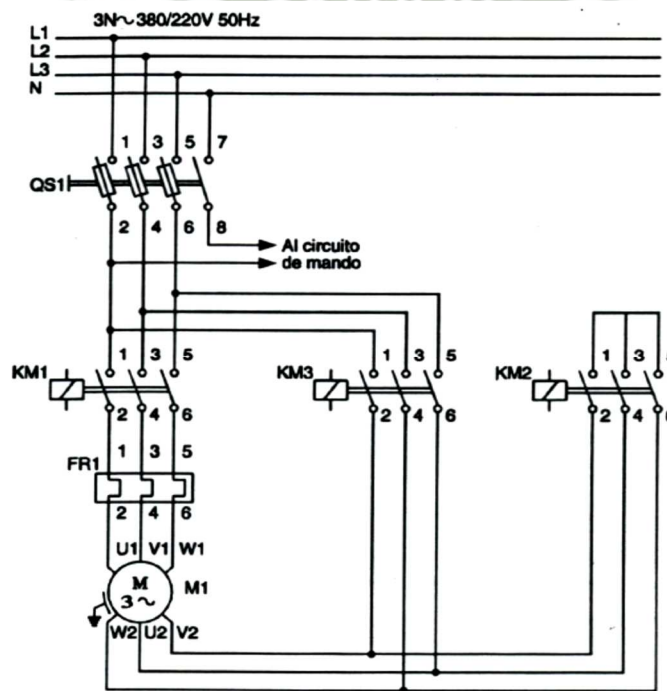


Fig. 2.54: Diagrama de fuerza del método de arranque estrella – delta

2.11.10. La Inversión de Marcha

En muchos casos y aplicaciones el motor asíncrono trifásico, ya instalado, requiere que el sentido de giro sea invertido en forma definitiva o periódica, según el caso. La única forma de invertir el sentido de giro del motor

consiste en conmutar (intercambiar) dos conductores de línea cualesquiera de los que están conectados al estator. Véase la figura 2.55

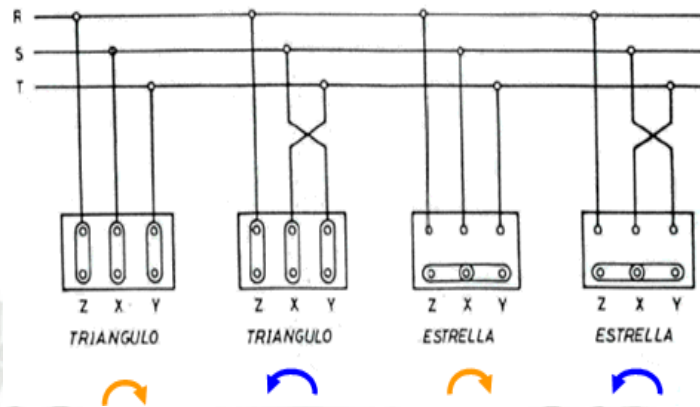


Fig. 2.55: *Inversión de sentido de giro de un motor asíncrono trifásico*

Como se sabe, los motores asíncronos funcionan bajo el principio de la existencia de un campo magnético giratorio inductor en el estator que es el que en definitiva arrastra al rotor. Dicho campo gira de acuerdo a la secuencia de fases impuesta por las corrientes que circulan por sus devanados.

En la figura 2.56 se explica en forma fasorial el principio de la inversión de la secuencia de fases de las corrientes al producirse el intercambio en sólo dos terminales de bobinas del estator.

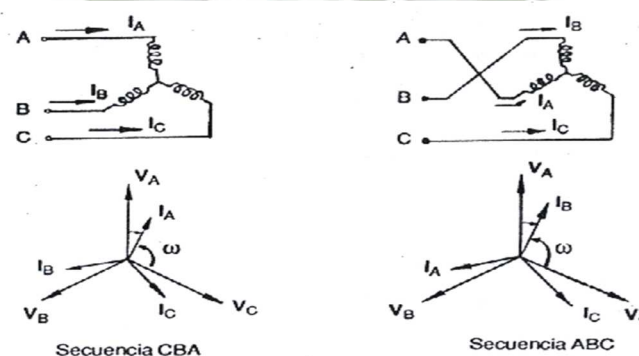


Figura 2.56: *Explicación fasorial del cambio de giro*

Téngase en cuenta que de volverse a intercambiar otras dos líneas cualesquiera, el motor volverá a girar en el mismo sentido inicial.

2.11.11. Datos de Placa

Indica del nombre comercial del fabricante, tipo de motor y el número de fabricación, todos los datos nominales de funcionamiento que sean importantes.

Como datos de placa vienen principalmente los siguientes:

- Potencia mecánica entregada (kW) en el eje, a plena carga.
- Configuración de las bobinas del estator y del rotor (si es de anillos).
- Tensión de la red de suministro (V).
- Intensidad de la corriente absorbida (A), a plena carga.
- El factor de potencia o $\cos \phi$, que expresa el desfase que se produce a potencia nominal entre la tensión y la corriente.
- La frecuencia (Hz) de la red de alimentación.
- La velocidad de giro del rotor (RPM), a plena carga.

2.11.12 Mantenimiento del Módulo y Motor Asíncrono Trifásico

El mantenimiento adecuado al motor y al módulo es el Mantenimiento del Tipo Preventivo, el cual consta de inspección, revisión, lubricación y limpieza rutinaria de cada componente.

Comprobaciones antes y durante la operación.

Medir las resistencias de cada devanado del estator y rotor para evitar fugas de corriente.

Realizar las prueba de aislamiento de la carcasa con los devanados mencionados utilizando el megóhmetro.

Fijarse en las conexiones del motor con el tablero de control y el generador.

El sistema de lubricación para los cojinetes debe comprobarse y los anillos deben probarse para ver que se muevan libremente. Toda la máquina, en particular sus espacios de aire, deben inspeccionarse para ver que no tengan materias extrañas.

Escúchese cualquier ruido anormal cuando el motor aumente la velocidad.

Debe proporcionarse lubricación adecuada a los cojinetes y el generador debe conservarse limpia y seca. Además, los devanados del estator y rotor deben inspeccionarse periódicamente.

Revisar el estado de los carbones y los anillos del Motor Asíncrono.

Verificar el funcionamiento de todos los accesorios del Módulo de Control de Máquinas Asíncronas. Asimismo realizar limpieza del módulo periódicamente.



CAPÍTULO III

DESCRIPCION Y ELABORACION DE LAS GUIAS DE PRACTICA PARA EL MÓDULO ALTERNADOR – MOTOR ASÍNCRONO CONTROLADO POR VARIACIÓN DE FRECUENCIA

3.1. Datos Técnicos de las Máquinas Utilizadas

3.1.1. Datos del Generador Síncrono.

Voltaje Y / Δ	:	380 / 220 V.
Corriente Nominal	:	9.5 A. / 16.4 A.
Cos φ	:	0.8
Frecuencia	:	60 Hz.
Potencia	:	5 Kw
Velocidad de giro	:	1800 rpm
Voltaje de Excitación	:	82 V.
Corriente de Excitación	:	3.6 A.
Número de Polos	:	4
Protección/Aislamiento	:	IP21 clase B.

3.1.2. Datos del Motor Asíncrono

Voltaje Nominal	:	380/220 V.
Corriente Nominal	:	25 A.
Velocidad de giro	:	1800 rpm.
Número de Polos	:	4
Protección/Aislamiento	:	IP21 clase F.



Fig. 2.62: Módulo alternador-motor asíncrono

3.2. Descripción del Módulo de Laboratorio de Máquinas Eléctricas Síncronas

Con objeto de que un alumno establezca un previo contacto con el laboratorio, a continuación se van a describir los elementos de instalaciones más importantes de que consta éste.

En lo relativo al tipo de máquinas, se pueden distinguir los siguientes:

- a) Máquina asíncrona controlada por variación de frecuencia
- b) Alternador trifásico. Está previsto para ser conectado en estrella o en triángulo. Según sea el montaje elegido, generará las tensiones de 220 ó 380 Voltios.

Todas estas máquinas están proyectadas para una potencia nominal de 5 kW, con una velocidad de giro de 1800 r.p.m.

Están montadas en una bancada única y pueden acoplarse o separarse mediante acoplamientos flexibles, con lo cual cualquiera de los motores puede mover al conjunto y si el ensayo lo requiere, se desacoplan y se ponen en marcha independientemente.

Las tensiones de trabajo 220/380 están clasificadas en el Reglamento de Instalaciones Eléctricas como baja tensión.

Teniendo en cuenta que el mismo Reglamento considera como tensión peligrosa a partir de los 24 V. Todos los aparatos hay que ponerlos a tierra, pues una descarga a 380 V podría dar lugar a un serio accidente: esto obliga al alumno a una atención y sentido de la responsabilidad conveniente a su actividad para un próximo futuro.

Teniendo en cuenta que las tensiones de los motores son de 220/380 V. se tienen, independientemente autotransformadores del laboratorio, que ayudaran a dar protección y seguridad al usuario.

3.3. Objetivos de las Prácticas de Laboratorio.

Afortunadamente, hoy día se estima que la enseñanza tecnológica lleve acabo paralelamente un complemento, lo más extenso posible, de práctica en talleres y laboratorio. A nuestro parecer, con una enseñanza de numerosas prácticas se consiguen los siguientes objetivos: primero afianzar los conocimientos adquiridos en las clases teóricas; segundo perder el miedo al manejo de los aparatos; tercero, comprobar que las enseñanzas teóricas tienen su aplicación real y que no son simples especulaciones científicas.

3.4. Tipo de Prácticas Recomendables.

Las prácticas más recomendables son aquellas que sean una aplicación con confirmación de las distintas partes de que consta la asignatura correspondiente.

Desgraciadamente esto en muchos casos, no es posible, debido a que los elementos necesarios serían, a veces muy costosos o el desarrollo de la práctica sería muy laborioso.

El orden de realización de los ejercicios prácticos debe ser, aproximadamente, posterior al que se siga en las enseñanzas teóricas. Sin embargo, algunas veces, es tal vez recomendable realizar alguna práctica anticipándose a su estudio teórico. Fuera de estos casos excepcionales se debe procurar no alterar el orden a que nos referimos.

Por otra parte, las prácticas deben de ser variadas, aun cuando sean elementales; es decir, ver algo de cada una de las partes de la técnica que se estudie. No es lógico realizar pocas prácticas, aunque éstas sean muy complejas, si con ellas sólo se han efectuado las medidas correspondientes a una parte limitada de lo tratado en la asignatura.

3.5. Aparatos de Tipo General que debe poseer un Laboratorio y Precisión de los aparatos a utilizar.

Aparte de los elementos que son necesarios para un cierto número de prácticas concretas, es necesario poseer algunos aparatos que sirvan de base o complemento para muchos de los montajes por su gran versatilidad y que deberán tenerse en gran número y con características suficientes para las necesidades previstas. Entre ellos estimamos como más convenientes.

- Analizadores de redes.
- Multímetros es decir aparatos universales para medir tensiones e intensidades tanto en corriente alterna como en corrientes continuas, con una extensa gama de calibres. A ser posible, estos instrumentos llevarán óhmetro incorporado.

- Reóstatos de cursor, tanto para grandes intensidades (5 a 15 A) y baja resistencia como para pequeñas intensidades (0,1 a 0,4 A) y altas resistencias, así como otros de valores intermedios. La potencia de disipación de dichos elementos podrá estar comprendida entre 100 y 1000 vatios.
- Cargas resistivas, inductivas y capacitivas, monofásicas y trifásicas, regulables, para cargas de 3 ó 5 kilovatios. con posibilidad de acoplar sus resistencias en estrella o triángulo.
- Tacómetros eléctricos y mecánicos.
- Contactores trifásicos con enclavamiento y relés térmicos.
- Fuentes de alimentación de corriente alterna trifásica y corriente continua, regulables desde 0 hasta la tensión máxima, con una potencia del orden de 2 ó 3 kilovatios (o según sea la potencia que precisan las máquinas).
- Cosfímetros (fasímetros) para 5-10 y 150-450V, con $\cos\phi$ de 0,2-1.
- Medidores de aislamiento de 1 000 V y 0 – 1 000M Ω (megómetro).
- Frecuencímetros de 40-50-60 Hz para 150-450V
- Interruptores y conmutadores mono y tripolares para algunos amperios de corte y tensiones de 250 V
- Cables de conexión con terminales de banana autoconectable a los que se puede adicionar un terminal plano.
- Miliamperímetros para intensidades de 100 a 1 000 mA.
- Amperímetros para intensidades de 0.5 - 10 amperios.
- Voltímetros para tensiones de 30 - 400 voltios.
- Vatímetros para 2,5 - 10 A y 75 – 150 - 450 V.

3.6. Precisión de los Aparatos a utilizar

Cuánto más precisos sean los elementos que se manejen tanto mejor quedará realizada la práctica.

Creemos que lo importante en los aparatos a manejar por alumnos es su robustez y su fácil y claro manejo, quedando en segundo lugar la calidad. Es preferible disponer de muchos aparatos de calidad media que de unos pocos excelentes.

3.7. Precauciones en las Prácticas

Es imprescindible y conveniente que las prácticas que se propongan sean realizadas escrupulosamente con anterioridad por el personal del laboratorio y con los mismos aparatos que han de utilizarse posteriormente por los alumnos. De esta forma, se evitara(n) desagradables contratiempos y se tendrá ocasión de conocer las pequeñas o grandes dificultades que han de encontrar los alumnos en el desarrollo normal de la práctica. Tanto las instalaciones, como los aparatos deberán ser comprobados con antelación para asegurarse que se hallan en buenas condiciones de utilización, evitando con ello paralizaciones y desorientaciones en el desarrollo de la práctica.

La experiencia enseña que para ejecutar una práctica de máquinas eléctricas es preciso disponer, como mínimo, de una hora para las de tipo elemental, necesiándose incluso hasta dos horas en aquellas prácticas de tipo más complejo. Por ello es conveniente prever dos horas, aun cuando, en algunas ocasiones, el trabajo a realizar se finalice en menos tiempo.

3.8. Conocimiento previo de la Práctica a realizar.

Este conocimiento no deberá limitarse al enunciado de las prácticas sino que, mediante apuntes, guiones, explicaciones orales u otros métodos se pongan en conocimiento del alumnado la finalidad de la práctica, la utilidad de la medida, en qué casos se suele emplear dicho método, circuito eléctrico a establecer las precauciones que deberán tomarse en el montaje y duración la ejecución, forma de recopilar datos, presentación de resultados, consecuencias que cabe sacar de

éstos, errores máximos cometidos, etc. No obstante debe poseer el alumno un texto de prácticas que le oriente en la realización de la práctica, antes de comenzar ésta, es conveniente que el profesor, maestro, etc. del laboratorio indique a los alumnos sobre que particularidades más sobresalientes tendrán que prestar la máxima atención, dándose instrucciones complementarias sobre aspectos de la cuestión que no estén consignados en el texto. De todas formas, estas explicaciones no deben durar, salvo casos excepcionales, más allá de diez o quince minutos, con objeto de no restar excesivo tiempo a la ejecución de la práctica propiamente dicha.

3.9. Montaje del Circuito y elección de los Calibres de los aparatos.

Con el esquema de conexionado a la vista se irá comprobando si los elementos disponibles en el puesto de trabajo son los suficientes y adecuados. Una vez comprobando este extremo, se situarán los aparatos de tal manera que, a ser posible, ocupen posiciones relativas semejantes a como se encuentren en el esquema simplificado de los apuntes.

Únanse, después, los aparatos entre sí, procurando que los cables de conexión tengan longitudes apropiadas, esto es, ni muy largas que enmarañarían el conexionado, ni muy cortas, que darían a un amontonamiento de instrumentos; debe evitarse, además, empalmes entre los cables de conexiones.

Otro extremo muy importante es emplear las conexiones de la sección adecuada según la intensidad que se prevea ha de circular por ellos.

Por exceso de sección nunca se peca, pero hay que tener en cuenta que los cables gruesos suelen tener poca flexibilidad y sus terminales, normalmente, son excesivamente grandes, aparte de que la alimentación a un miliamperímetro, por ejemplo, sería ridícula si se hiciese con un cable de 16 mm², pongamos por caso.

Es sumamente importante que el conexionado entre cables y terminales de aparatos se haga con gran cuidado, asegurándole que la presión entre terminal y terminal sea buena, esta precaución es necesaria, sobre todo en circuitos por los

que haya de circular gran intensidad o por aquellos en que la tensión aplicada es pequeña.

Los aparatos no se deberán situarse en posiciones forzadas ni en un plano distinto al que hayan de trabajar normalmente, y debe procurarse que las lecturas de mandos, escalas, etc. sean visibles de frente.

Algunos de los instrumentos de que se dispone puede que tengan varios alcances o campos de medida. En ese caso deberán conectarse de forma que las primeras medidas que se vayan a realizar con ellos queden comprendidas convenientemente en los alcances escogidos y las lecturas que se hagan sean fácilmente legibles.

3.10. Repaso del montaje.

El alumno debe acostumbrarse (por muy sencillo que sea el esquema) a comprobar el correcto montaje de instrumentos. Debe hacerse cuidadosamente, siguiendo hilo a hilo, apretando los terminales, comprobando alcances, etc. Si al verificar el conexionado surge la duda de si el circuito que se comprueba no es el correcto, deberá empezar de nuevo la revisión. Si en el puesto de trabajo hay más de un alumno, la comprobación la hará aquel que menos haya intervenido en la manipulación del conexionado.

3.11. Alimentación del Circuito, Manipulación y Lectura de los valores.

Si existe posibilidad, es muy conveniente que al aplicar tensión al montaje realizado ésta sea, en principio, de valores bajos. Una vez comprobado que no existe anomalía alguna deberá irse incrementando el valor de la tensión hasta el valor deseado.

Tanto durante este primer período de alimentación como durante la manipulación de los distintos aparatos deberán observarse atentamente los instrumentos de medida, por si sus indicaciones señalan alguna anomalía. Téngase en cuenta que una maniobra podría eliminar total o parcialmente una resistencia, pongamos por caso que protegía algún elemento, el cual quedará sometido a unos valores de intensidad o tensión inaceptables para su buen funcionamiento.

Así, pues, las maniobras deberán ser realizadas con medida, evitando cambiar bruscamente las características eléctricas del circuito. Préstese especial cuidado al manipular las cajas de décadas: es frecuente, al mover un mando, reducir en exceso el valor de la resistencia intercala.

Las lecturas de los diversos instrumentos se harán con gran atención ya que, en definitiva, de esta operación depende el resultado de las medidas o ensayos que se estén realizando. En primer lugar, si se trata de aparatos de desviaciones (voltímetros, amperímetros, etc.) deben leerse evitando los errores de paralaje de la aguja, procurando apreciar las décimas de división.

Cuando en la práctica intervengan dos o más instrumentos no es aconsejable que realice la lectura un sólo individuo, sino que convendrá que cada aparato sea leído por una persona diferente; pues es muy posible que durante el tiempo que ha de transcurrir entre una y otra lectura, las condiciones del circuito varíen, bien por una modificación en la fuente de alimentación (que es lo más probable) ó por factores propios del circuito (calentamiento), o bien por alguna conexión defectuosa.

La anotación de los datos obtenidos se hará con cuidado en las casillas correspondientes de un cuadro o encasillado, que habrá de ser preparado al efecto previamente y cuyas columnas se encabezarán con las indicaciones pertinentes, pudiendo ser éstas en abreviaturas pero sin que puedan dar lugar a interpretaciones erróneas, convendrá dejar una o dos casillas sin encabezar por si son necesarias para otras anotaciones que no se hubieran previsto con antelación.

3.12. Guías de Prácticas de Laboratorio

A continuación se describirán las prácticas de laboratorio sugeridas a realizarse con el Modulo, indicando las nociones teóricas previas, descripción de los equipos necesario para su ejecución, la realización de la práctica en sí, indicaciones de la manera como debe plantearse la práctica a los estudiantes para un mejor aprovechamiento y la presentación de los resultados.

PRÁCTICA DE LABORATORIO N° 1

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LOS BOBINADOS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN CON CORRIENTE CONTINUA.

1. OBJETIVOS

- Determinar la resistencia de los devanados del estator del motor de inducción a la temperatura ambiente con corriente continua.
- Determinar la temperatura de los devanados del estator del motor de inducción en forma indirecta a través de la medición de la resistencia con corriente continua.
- Determinar la influencia del efector pelicular en las resistencias de los devanados del estator al paso de la corriente alterna.

2. INTRODUCCIÓN

La determinación de la resistencia (resistividad o conductividad) de una muestra es de gran utilidad en muchos experimentos. Generalmente estamos interesados en investigar como varía la resistencia (o conductividad) en función de algún otro parámetro, por ejemplo la temperatura, la frecuencia, etc. Para medir una resistencia de valores intermedio (entre unos micro Ohms ($\mu\Omega$) a unas decenas de Ohms (Ω), tal vez lo más simple es usar un microhmetro o óhmetro y conectar como se indica en la figura 1.

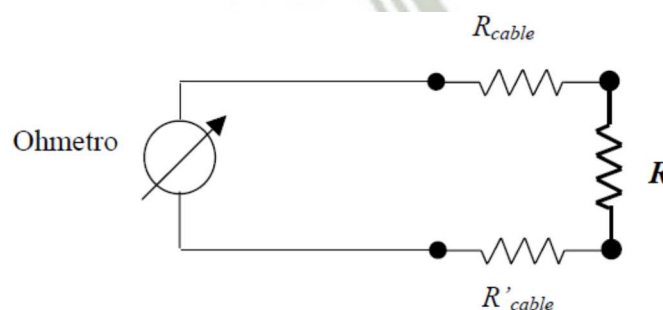


Fig. 1: Circuito a montar

También es posible determinar la resistencia en forma directa a través del ensayo de alimentación desde una fuente de corriente continua, midiendo a tensión y corriente de corriente y por la ley de ohms se calcula la resistencia eléctrica en corriente continua.

$$R_{dc} = \frac{V_{dc}}{I_{dc}}$$

Variación de la resistencia con la temperatura del conductor. La resistividad (ρ) varía con la temperatura según la relación

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot \left(\frac{T_2 + T_0}{T_1 + T_0} \right)$$

Donde:

ρ_1 y ρ_2 - resistividad del conductor a la temperatura T_1 y T_2 , respectivamente;

T_0 - constante de temperatura: 234,5 para el cobre y 228 para el aluminio

También se puede utilizar en función de la variación de la temperatura y la naturaleza de cada material

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot [1 + \alpha(T_2 - T_1)]$$

Donde:

α - coeficiente de temperatura del material, en (1/oC); para el cobre y aluminio

$\alpha = 3.9 \cdot 10^{-3}$

Por lo general, esta expresión se aplica a las resistencias.

$$R_2 = R_1 \cdot \left(\frac{T_2 + T_0}{T_1 + T_0} \right)$$

$$R_2 = R_1 \cdot [1 + \alpha(T_2 - T_1)]$$

Efecto pelicular o efecto piel de los conductores

El efecto pelicular es el fenómeno responsable del incremento de la resistencia aparente de un conductor eléctrico en función al aumento de la frecuencia de la corriente eléctrica que circula por ella.

$$R_{ac} \geq R_{dc}$$

El conductor con el paso de corriente continua, la corriente se distribuye en forma uniforme a lo largo de toda la sección del conductor eléctrico. En corriente alterna esta distribución ya no se cumple. En realidad a medida que aumenta la frecuencia de la corriente alterna que circula por el conductor induce campos magnéticos en su entorno externo e interno (induciendo fem parásitas), el campo magnético en centro del conductor también aumenta llevando el aumento de la reactancia en esta zona central del conductor.

Este aumento de la reactancia central conlleva a que la corriente tienda a desplazarse a distribuirse por la periferia del conductor; lo implica una disminución del área de la sección transversal efectiva del conductor que significa un aumento de la resistencia aparente.

El área por la cual la corriente eléctrica alterna se distribuye es designada como el área aparente, y depende de la frecuencia de alternancia.

Vamos a demostrar la relación existente entre la resistencia efectiva y la resistencia aparente de un conductor eléctrico.

Las expresiones de la resistencia c.a. y de c.d. de un determinado conductor están dados por las ecuaciones

$$R_{dc} = \rho \cdot \frac{l}{S_{real}}$$

$$R_{ac} = \rho \cdot \frac{l}{S_{aparente}}$$

Relacionando las expresiones de resistencia ac y dc, y teniendo en cuenta que l y ρ son constantes se obtiene la relación.

$$\frac{R_{ac}}{R_{dc}} = \frac{S_{real}}{S_{aparente}}$$

Despejando la resistencia de ac, se obtiene

$$R_{ac} = \frac{S_{real}}{S_{aparente}} \cdot R_{dc}$$

Las áreas efectivas y aparentes están relacionada por

$$S_{real} = \pi \cdot R^2$$

$$S_{aparente} = \pi \cdot R^2 - \pi \cdot r^2$$

$$r = R - \lambda$$

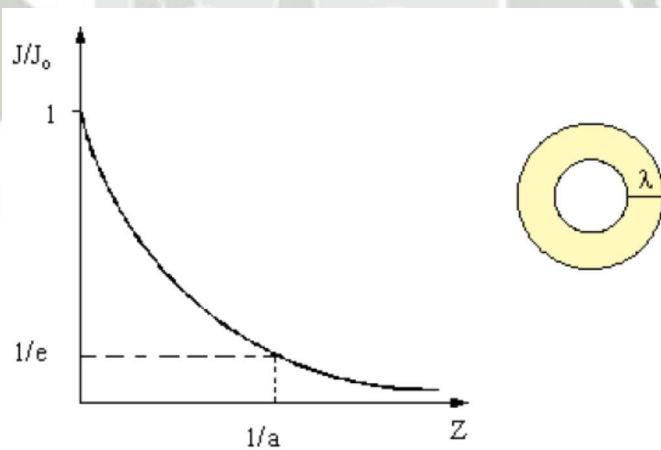


Fig. 2. Distribución de la corriente en la piel del conductor y distancia de penetración.

$$R_{ac} = \frac{\pi \cdot R^2}{\pi \cdot R^2 - \pi \cdot (R - \lambda)^2} \cdot R_{dc}$$

Distancia de penetración o profundidad superficial

En la superficie del conductor la densidad J es igual a la J_0 , pero a medida que nos acercamos al interior del conductor, la densidad relativa de la corriente disminuye de forma exponencial. De la gráfica se puede definir como la distancia de penetración λ como el valor en que se produce una atenuación de $1/e$, es decir, de un 63% del valor de densidad.

$$\lambda = \frac{1}{a} = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu}}$$

Podemos concluir que la resistencia de AC de un determinado conductor aumenta a medida que aumenta el valor de la frecuencia de la corriente alterna que circula por ella.

3. MATERIALES, INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EQUIPOS

Los siguientes dispositivos, equipos, instrumentos y materiales serán necesarios para la realización de la práctica:

Item	Cantidad	Descripción	Código
1	1	Motor de inducción de 10 HP, 440/380/220 V, 60 Hz, 1750 rpm	
2	3	Microohmímetro MPK5 (o puente Wheastone).	
3	1	Multitester para verificación de circuitos	
4	1	Kit de cables flexibles AWG 14 ó 2.5 mm ²	
5	1	Termómetro de mercurio o digital	

4. PROCEDIMIENTO

- a) Montar el circuito de medición de las resistencias equivalentes de los devanados de estator de la fig a o fig b según configuración de conexiones del motor para su tensión nominal. Tener en cuenta la temperatura ambiente y que el motor no haya sido utilizado por un buen tiempo.

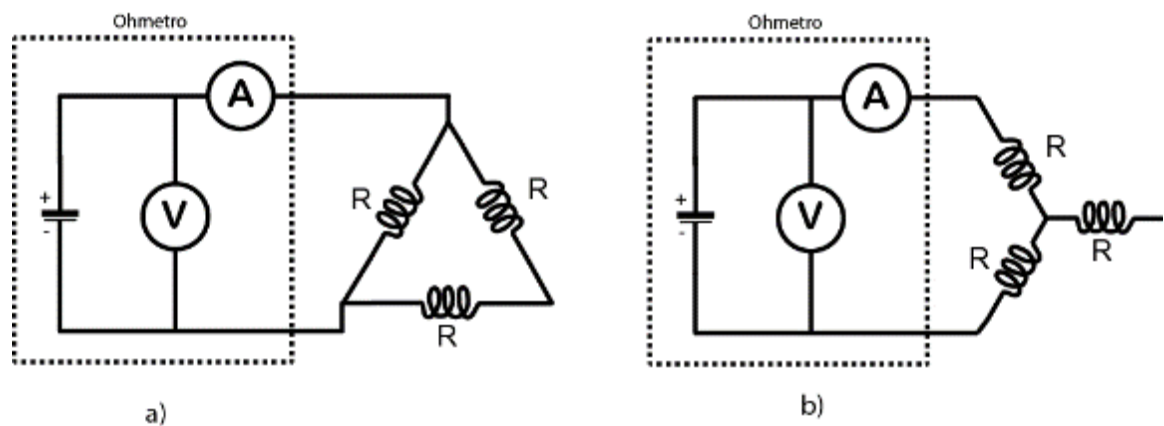


Fig. 3. Conexión del ensayo de medición de resistencia en corriente continua

Con fuente de corriente continua se aplica una corriente continua de forma que la intensidad máxima que circule en este ensayo sea, aproximadamente, la nominal I_n midiendo seguidamente, mediante un voltímetro y un amperímetro, la tensión aplicada y la intensidad que circula.

Caso de ser conectada las fases en triángulo, la resistencia equivalente R_{eq} entre los puntos de medición, tendrán por valor $(2/3)*R$, como puede observarse en la fig.xx. Caso de ser conectada las fases en estrella, la resistencia equivalente R_{eq} entre los puntos de medición, tendrán por valor $2*R$, como puede observarse en la fig.xx Se efectuarán tres medidas intercambiando las mediciones en los bornes de entrada, para después tomar la media aritmética.

Tabla 1: Registro de mediciones de resistencias

item	Θ_1 [°C]	L1-L2 [Ω]	L1-L3[Ω]	L2-L3[Ω]	R_{eq} [Ω]	R_s [Ω]
1						
2						
3						

- b) Montar el circuito de la fig. 3, teniendo cuidado con las conexiones, las escalas de los instrumentos de medición. Una vez verificado el montaje del circuito por el instructor arranque y haga funcionar el motor inducción por un buen tiempo unos 20 minutos.

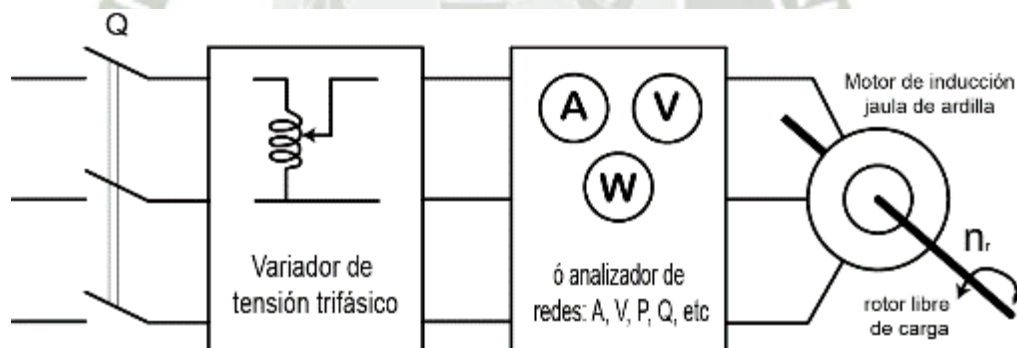


Fig. 4. Montaje de arranque y operación del motor de inducción.

Una vez desconectado de la red el motor de inducción realiza el registro de las mediciones de la resistencia en corriente continua en la tabla 2. Estos resultados permitirán determinar la variación de la temperatura de los devanados del estator después de funcionamiento.

Tabla 2: Registro de mediciones de resistencias

ítem	L1-L2 [Ω]	L1-L3[Ω]	L2-L3[Ω]	R _{eq} [Ω]	R _s [Ω]	Θ ₂ [°C]
1						
2						
3						

5. CUESTIONARIO PARA LA DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- 5.1. Explique el circuito empleado para la capturar experimental de la resistencia en corriente continua.
- 5.2. Explique en casos se realiza conexiones en estrella y triangula y de las relaciones de tensión y corriente en estas configuraciones.
- 5.3. Que otros instrumentos de medición conoce que permita la medición de la resistencia eléctrica en corriente continua.
- 5.4. Calcule la resistencia del estator para una temperatura de operación de 75 °C.
- 5.5. En qué caso debemos considerar la variación de la resistencia por la frecuencia de operación y como se resuelve evitar el efectos pelicular de los conductores tecnológicamente. De algunos ejemplos.

6. INVESTIGACIÓN COMPLEMENTARIA

- 6.1. Investigue y compruebe tipos de conductores de inductores de alta frecuencia del orden de kHz y MHz empleados en los convertidores de frecuencia.

7. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

Plantea en forma personal y clara un mínimo de cinco (5) conclusiones de la experimentación.

Plantea en forma personal y clara un mínimo de tres (3) observaciones para mejorar la experiencia de las prácticas de estas pruebas.

8. BIBLIOGRAFÍA

Al final de todo documento o informe técnico se hace referencias a la bibliografía empleada y la normalización respectiva. Dar las referencias bibliográficas de su informe de la práctica; por ejemplo:

1. Jesús Fraile Mora, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ra. edición, 2008.
2. Fitzgerald A. E. Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ra. edición, 2003.
3.

APENDICE

Suplemento que se incluye al final del informe de un trabajo de investigación.

ANEXO

Adjunte todo material relacionado con la redacción del informe de práctica que ayude a comprender la información presentada.

PRÁCTICA DE LABORATORIO N° 2

1 ENSAYO DE VACÍO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

1. OBJETIVOS

- a) Determinar los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción en estado estacionario o permanente.
- b) Estimar las pérdidas rotacionales, núcleo y eléctricas durante la operación en vacío o sin carga acoplada al eje.

2. INTRODUCCIÓN

Los métodos de ensayos necesarios para evaluar y pronosticar las condiciones de operación real del motor asincrónico después de fabricación, reparación, mantenimiento, o acondicionamiento son el método directo e indirecto. Estos métodos dependen de la capacidad de las fuentes de alimentación, equipos e instrumentos del laboratorio de ensayos y de la potencia del motor.

Método directo de carga es aplicado para motores menores de 15 kW. (20 HP) según capacidad de instrumentos de laboratorio. Consiste en realizar ensayos bajo condiciones de carga nominal de motor tomando lectura de los parámetros eléctricos y mecánicos necesarios. En calidad de carga se puede acoplar un freno Prony, un generador de a.c, un freno electromagnético (corrientes parásitas), una máquina pendular, etc. La exactitud dependerá del dispositivo de carga y de la precisión de los instrumentos de medición siendo esta la máquina pendular la más adecuada

Método indirecto de carga para motores de mayor potencia. En los motores mayor potencia no es posible el método directo por lo mencionada anteriormente. Consiste en realizar dos ensayos básicos el de vacío y de rotor bloqueado (o corto circuito). Antes de realizar los ensayos primero se determinó la resistencia de los devanados del estator en frío por fase a través del método directo o indirecto de medición de resistencias en corriente continua, y se toma lectura de la temperatura ambiente.

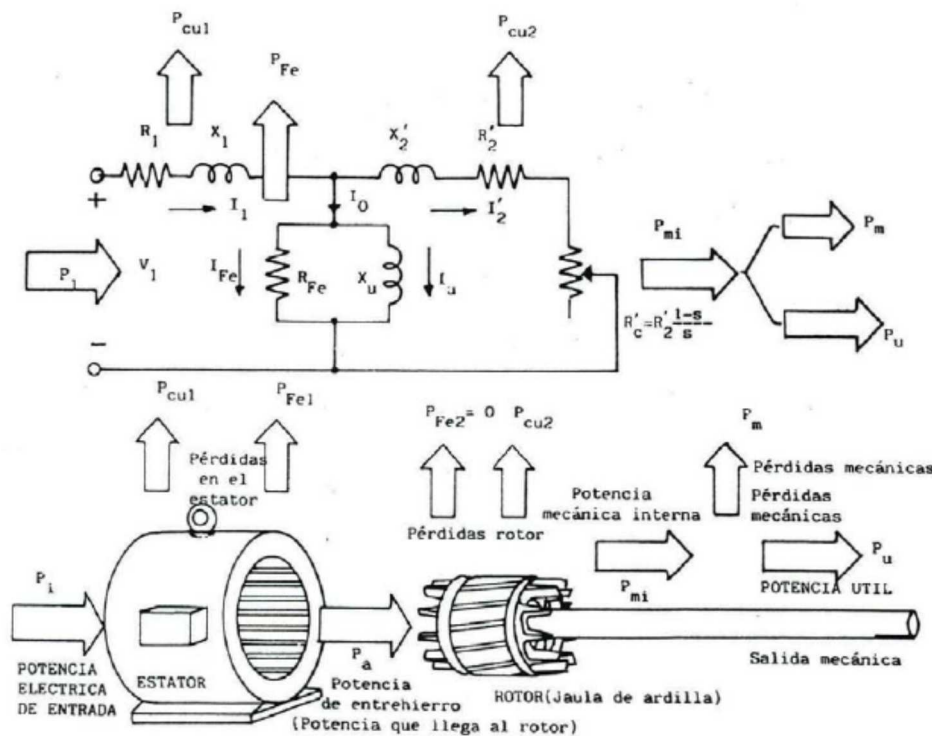


Fig. 1. Circuito equivalente exacto y pérdidas de potencia en el motor de inducción.

Ensayo de vacío o sin carga de rotor libre.

Consiste en hacer funcionar el motor sin ninguna carga mecánica en el eje, es decir, la máquina trabaja a rotor libre. Se aplica tensión nominal al estator midiendo la potencia absorbida P_o y la corriente de vacío I_o . Existe una gran diferencia entre el ensayo de vacío del motor de inducción y el correspondiente al del transformador. Del circuito equivalente del motor de inducción nótese si en esta prueba la velocidad del rotor fuera la velocidad de sincronismo $n_2=n_1$, el deslizamiento sería igual a cero, lo que indicaría, en el circuito equivalente exacto de la fig , la resistencia de la carga R_2 se hace infinita y en consecuencia la I_2 del rotor sería cero o circuito del rotor abierto.

Sin embargo, el motor de inducción no puede girar a la velocidad de sincronismo, ya a I_2 nula no existiría ningún par electromagnético en el eje. Lo que sucede realmente es que el motor sin carga gira a una velocidad muy cercana del campo giratorio del estator y desde el punto de vista del circuito equivalente la resistencia del rotor o de carga tiene un valor elevado pero no infinito. Como no hay carga en el eje, la potencia disipada en esta resistencia representa las pérdidas de

rozamiento en los rodamientos y de ventilación del motor. Como quiera además que I_2 es de valor reducido debido a la alta impedancia de R_2 lo que nos permite despreciar las pérdidas en el cobre del devanado del rotor. Denominando P_{Cu1} las pérdidas en el cobre del estator, P_{Fe} a las pérdidas en el hierro y P_{mec} a las pérdidas mecánicas se tiene la expresión.

$$P_0 = P_{Cu1} + P_{Fe} + P_{mec}$$

Para determinar cada una de las pérdidas anteriores es preciso completar este ensayo de vacío con medidas adicionales como la determinación de la resistencia por fase del estator con corriente continua y así determinar las pérdidas en el cobre P_{Cu1} . En la práctica, para considera el efecto pelicular de los conductores se suele aumentar el valor anterior en 10% a 20%. Norma IEEE 112-1996.

Para determinar la P_{Fe} y P_{mec} es preciso alimentar el motor por una tensión variables, iniciando desde el 120% V_n del valor nominal reduciendo hasta unos 30% V_n ; en cada escalada de tensión de mide los valores de P_0 , I_0 y V_1 . Y a partir de estas potencia se deducen las pérdidas rotacionales o constantes ($P_{Fe}+P_{mec}$) en cada etapa.

$$P_{rot} = P_{Fe} + P_{mec} = P_0 - P_{Cu1} +$$

Al representar las pérdidas rotacionales ($P_{Fe}+P_{mec}$) en función de V_1 se obtiene una curva de tipo parabólico, como se indica en la fig. Extrapolando la curva hasta que corte el eje de la ordenada se obtiene para $V_1=0$ el valor de las pérdidas mecánicas P_{mec} ; ya las pérdidas en el hierro son nulas a existir flujo magnético $V_1=0$. El valor de las pérdidas en el hierro a la tensión nominal está determinado por la diferencia entre las pérdidas rotacionales ($P_{Fe}+P_{mec}$) y las pérdidas mecánicas (P_{mec}) a la tensión nominal V_n fig a. Para minimizar errores en la extrapolación de la curva parabólica de la curva fig a, es práctico representar rotacionales ($P_{Fe}+P_{mec}$) en función de la tensión al cuadrado (V_1^2), tal como se muestra en la fig b. Lo que resulta en un función lineal, cuya ordenada en el origen representa las pérdidas mecánicas del rotor (P_{mec}).

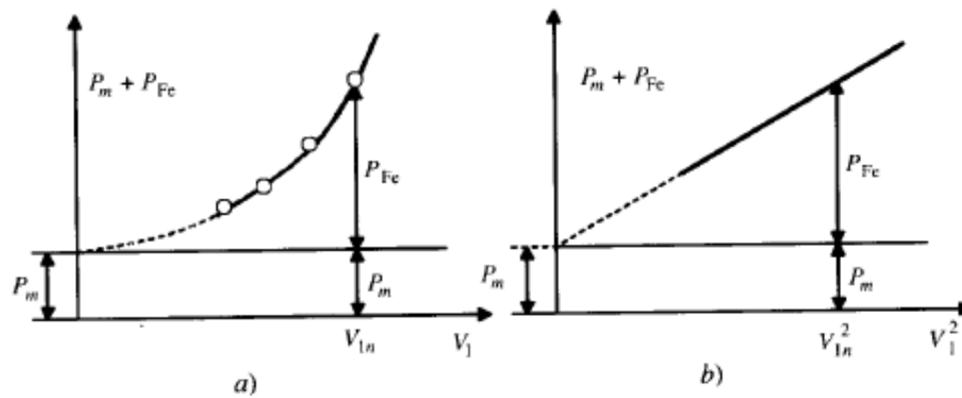


Fig. 2. Separación de pérdidas de mecánicas de las pérdidas rotacionales.

Conocidas las pérdidas (P_{Fe}) se puede calcular los parámetros de la rama en paralelo del circuito equivalente, como se muestra en la fig que observará la potencia (P_{Fe}) de acuerdo con las siguientes expresiones.

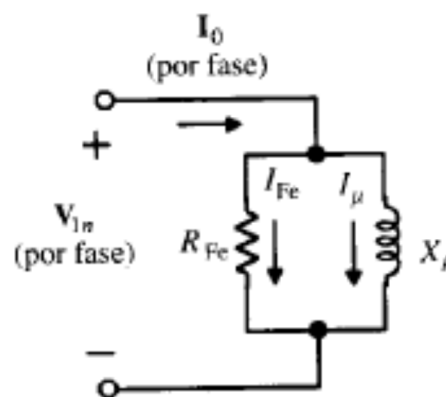


Fig. 3. Circuito equivalente de la rama en paralelo de circuito equivalente.

$$\cos(\varphi_0) = \frac{P_{Fe}}{m_1 \cdot V_{1n} \cdot I_0}$$

$$I_{Fe} = I_0 \cdot \cos(\varphi_0)$$

$$I_{\mu} = I_0 \cdot \text{sen}(\varphi_0)$$

La resistencia de pérdidas del hierro y la reactancia de magnetización

$$R_{Fe} = \frac{V_{1n}}{I_{Fe}} \quad X_{\mu} = \frac{V_{1n}}{I_{\mu}}$$

3. MATERIALES, INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EQUIPOS

Los siguientes dispositivos, equipos, instrumentos y materiales serán necesarios para la realización de la práctica:

Item	Cantidad	Descripción	Código
1	1	Regulador de tensión trifásico (variac) 380 V, 25 A	
2	1	Motor de inducción de 10 HP, 440/380/220 V, 60 Hz, 1750 rpm	
3	1	Amperímetro de c.a. 25 A	
4	1	Voltímetro de c.a. de 600V	
5	1	Vatímetro trifásico 50 A, 600 V.	
6	1	Analizador de redes trifásico 380 V, 50 A	
7	1	Microohmímetro MPK5 (o puenteWheastone)	
8	1	Tacómetro óptico digital	
9	1	Multitester para verificación de circuitos	
10	1	Kit de cables flexibles AWG 14 ó 2.5 mm ²	
11	1	Termómetro de mercurio o digital	
12			
13			

4. PROCEDIMIENTO

- a) Montar el circuito de la fig.2, teniendo cuidado con las conexiones, las escalas de los instrumentos de medición. Una vez verificado el montaje del circuito por el instructor arranque y haga funcionar el motor inducción a tensión nominal V_{1n} por un buen tiempo unos 20 minutos para establecer las condiciones de lubricación de sus respectivos rodamientos.

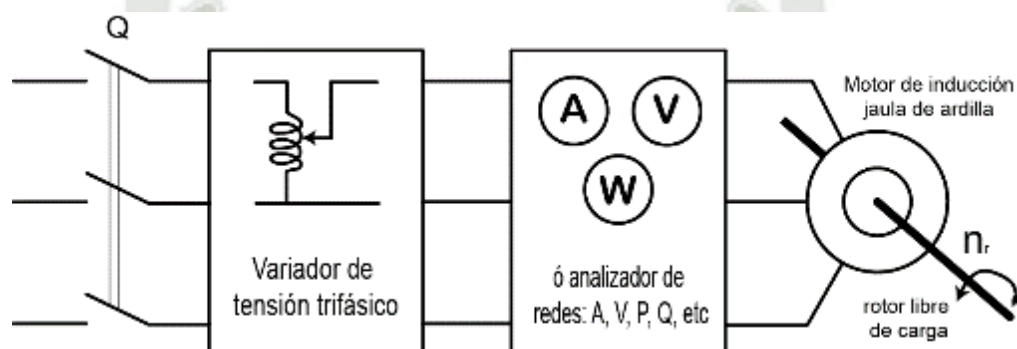


Fig. 4. Montaje de circuito para el ensayo de vacío del motor de inducción.

Este ensayo se inicia tomando lecturas desde tensiones del 120 % de U_{1n} y reduciéndola hasta unos 45% de U_{1n} , justo cuando la corriente se eleva en este ensayo se eleva. Tomar unas 10 lecturas incluir una relectura que pertenezca a la U_{1n}

Una conectado a la red el motor de inducción realiza el registro de las mediciones de las los instrumentos de medición en la tabla 1. Estos resultados permitirán determinar la variación de la temperatura de los devanados del estator después de funcionamiento.

Tabla 1. Registro de las mediciones con los instrumentos.

#	Voltmetro1			Amperímetro			Watímetro			Variables mecanicas			F
	div	C _v	V	A	C _A	A	div	C _w	W	rpm	T[Nm]	s	Hz
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													

5. CUESTIONARIO PARA LA DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- 5.1. Dar la relación de los valores promedios o totales por fase de las lecturas de los instrumentos de medición en el ensayo de vacío en forma tabulada.

- 5.2. Graficar las pérdidas rotacionales en función a la tensión del estator y separar las pérdidas rotacionales, pérdidas mecánicas y perdidas en el hierro de ensayo de vacío.
- 5.3. Con las pérdidas deducidas determinar los parámetros de la ramas en paralelo de circuito equivalente del motor de inducción y dar en forma tablada para cada registro de medición.
- 5.4. A partir de los datos registrados del ensayo de vacío trazar las curvas P_0 vs U_{10} , P_{rot} vs U_{10} , I_0 vs U_{01} , $\cos(\varphi_0)$ vs V_{10} , rpm vs V_{10} .

6. INVESTIGACIÓN COMPLEMENTARIA

- 6.1. Investigue y compruebe a través del osciloscopio la forma de la onda de corriente del ensayo de vacío I_0 y de la tensión de alimentación a la frecuencia de nominal.

7. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

Plantea en forma personal y clara un mínimo de cinco (5) conclusiones de la experimentación.

Plantea en forma personal y clara un mínimo de tres (3) observaciones para mejorar la experiencia de las prácticas de estas pruebas.

8. BIBLIOGRAFÍA

Al final de todo documento o informe técnico se hace referencias a la bibliografía empleada y la normalización respectiva. Dar las referencias bibliográficas de su informe de la práctica; por ejemplo:

1. Jesús Fraile Mora, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ra. edición, 2008.
2. Fitzgerald A. E. Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ra. edición, 2003.
3.

APENDICE

Suplemento que se incluye al final del informe de un trabajo de investigación

ANEXO

Adjunte todo material relacionado con la redacción del informe de práctica que ayude a comprender la información presentada.



PRÁCTICA DE LABORATORIO N° 3

2 ENSAYO CORTO CIRCUITO O ROTOR BLOQUEADO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

1. OBJETIVOS

- Determinar los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción en estado estacionario o permanente.
- Estimar las pérdidas eléctricas de los bobinados del estator y rotor.

2. INTRODUCCIÓN

El circuito equivalente de un motor de inducción tiene como objetivo, al igual que el caso del transformador, el obtener un circuito que explique el comportamiento de la máquina, pero en que no aparezca la acción transformadora entre los circuitos del primario y secundario, lo cual trae consigo el reducir las magnitudes de un devanado al otro, generalmente del rotor al estator, como es mostrado en fig. 1.

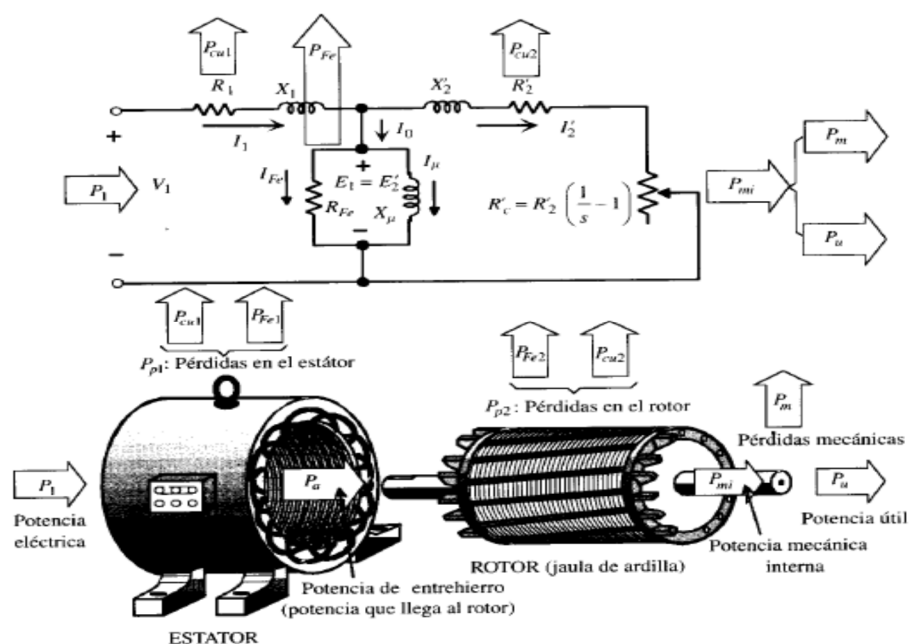


Fig. 5. Circuito equivalente exacto y distribución de las pérdidas de potencia.

Ensayo corto circuito o de rotor bloqueado.

Este ensayo se realiza bloqueando el rotor e impidiendo que gire, es decir para $n=0$, por lo que tendrá $s=1$, $R_2'=0$, lo nos indica que el motor se comporta como un transformador con el secundario en corto circuito. Al estator se aplica una tensión creciente, partiendo de cero, hasta que la corriente que circule por los bobinados del estator sea la corriente nominal $I_{cc}=I_{1n}$, midiendo a la vez la tensión aplicada V_{1cc} y la potencia total absorbida P_{cc} . La corriente de vacío I_0 es despreciable e comparación al I_{1n} debido a la pequeña tensión de corto circuito obteniéndose el circuito equivalente de la fig.xx, que se obtiene al despreciar la rama paralela del circuito equivalente exacto. y hacer $R_c'=0$ debido a que el deslizamiento es igual a la unidad.

De las mediciones realizadas durante este ensayo se puede obtener el factor de potencia del ensayo de rotor bloqueado.

$$\cos(\varphi_{cc}) = \frac{P_{cc}}{m_1 \cdot V_{1cc} \cdot I_{1n}}$$

Y de ahí resulta los parámetros del circuito equivalente.

$$Z_{cc} = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}}$$

$$R_{cc} = R_1 + R_2' = Z_{cc} \cdot \cos(\varphi_{cc})$$

$$X_{cc} = X_1 + X_2' = Z_{cc} \cdot \text{sen}(\varphi_{cc})$$

En conclusión, el ensayo de corto circuito permite obtener los parámetros de la rama serie del motor. Si se ha determinado la R_1 con un ensayo de c.c. se puede obtener R_2' , valor que es necesario conocer estará incluido en la resistencia de carga. Si se desea utilizar el circuito equivalente exacto es necesario repartir la cantidad X_{cc} entre X_1 y X_2' según el tipo de motor. A falta de información se puede elegir que $X_1=X_2'$.

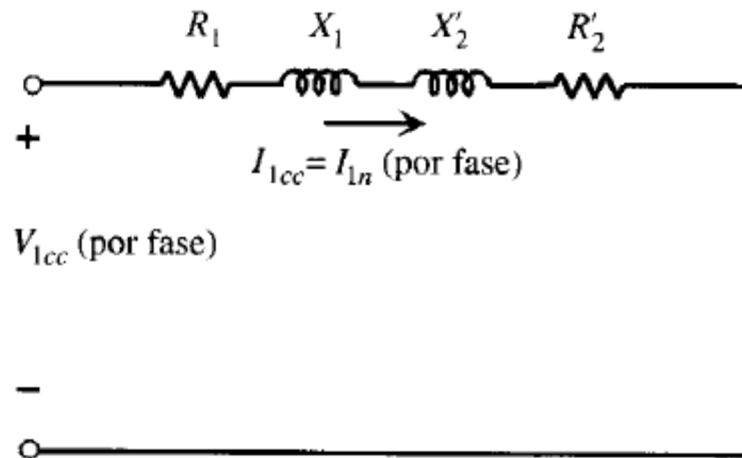


Fig. 6. Circuito equivalente de la rama en paralelo de circuito equivalente.

En el ensayo de rotor bloqueado no funciona el sistema de ventilación por tener justamente la velocidad del rotor ($n_2=0$) cero, por tanto después de esta prueba de rotor bloqueado la temperatura de los devanados verá incrementada T_2 , esta temperatura se determina en forma indirecta a través de resistencia medida al final del ensayo.

Si esta temperatura $T_2=T_{cc}$ resulta menor a la temperatura de operación del motor se corrige la resistencia equivalente de corto circuito a la temperatura de operación (75°C) por la siguiente relación.

$$R_{75} = R_{cc} \cdot [1 + \alpha(T_{75} - T_{cc})]$$

Donde $\alpha=0,0041$ - coeficiente de temperatura en la resistencia de cobre comercial. Y así mismo también se corrige la impedancia equivalente.

$$Z_{cc} = \sqrt{R_{cc75}^2 + X_{cc}^2}$$

En consecuencia también la tensión de corto circuito $U_{cc} = I_{1n} Z_{cc}$ y las pérdidas del cobre $P_{cc}=m \cdot I_{1n}^2 \cdot R_{cc}$. Para el circuito equivalente se debe tener presente los parámetros a corrientes nominales.

3. MATERIALES, INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EQUIPOS

Los siguientes dispositivos, equipos, instrumentos y materiales serán necesarios para la realización de la práctica:

Item	Cantidad	Descripción	Código
1	1	Regulador de tensión trifásico (variac) 380 V, 25 A	
2	1	Motor de inducción de 10 HP, 440/380/220 V, 60 Hz, 1750 rpm	
3	1	Amperímetro de c.a. 25 A	
4	1	Voltímetro de c.a. de 600V	
5	1	Vatímetro trifásico 50 A, 600 V.	
6	1	Analizador de redes trifásico 380 V, 50 A	
7	1	Microohmímetro MPK5 (o puente Wheastone)	
8	1	Tacómetro óptico digital	
9	1	Multitester para verificación de circuitos	
10	1	Kit de cables flexibles AWG 14 ó 2.5 mm ²	
11	1	Termómetro de mercurio o digital	
12			
13			

4. PROCEDIMIENTO

- a) Montar el circuito de la fig.2, teniendo cuidado con las conexiones, las escalas de los instrumentos de medición. Bloquear el rotor con algún dispositivo de freno mecánico. Y además ajustar los alcances de los instrumentos para corriente nominal, se prefiere realizar este ensayo en conexión estrella y en la posición del rotor que indique una mayor. Una vez verificado el montaje del circuito por el instructor alimente con tensión creciente desde cero hasta el valor de la corriente nominal.

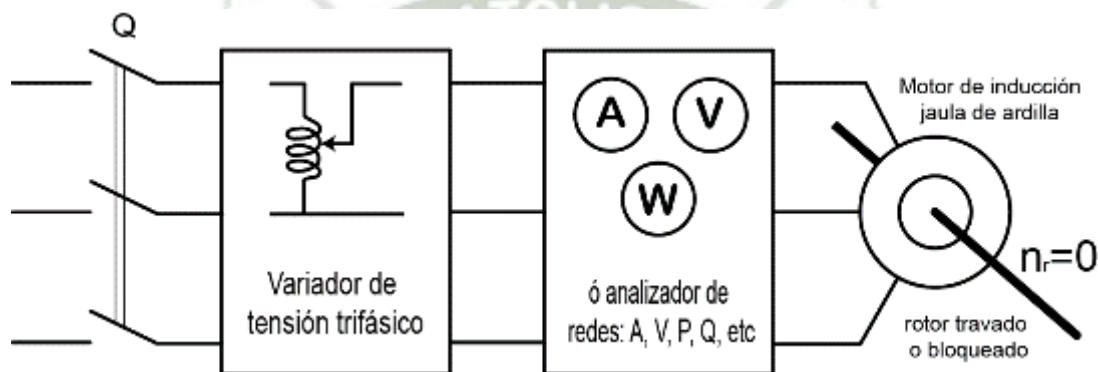


Fig. 7. Montaje de circuito para el ensayo de rotor bloqueado.

Este ensayo se inicia tomando lecturas desde tensiones del 120 % de I_{1n} y reduciéndola hasta 0. Tomar unas 10 lecturas incluir una lectura que pertenezca a la I_{1n} .

Una vez terminada la toma de lecturas de los instrumentos se procede inmediatamente a medir las resistencias de los devanados para poder determinar indirectamente la temperatura de los bobinados durante el ensayo de corto circuito a través del nuevo valor resistencia.

El registro de las lecturas de las los instrumentos de medición se llevan a la tabla 1. Estos resultados permitirán determinar la variación de la temperatura de los devanados del estator después del ensayo.

Tabla 1. Registro de lecturas de los instrumentos.

#	Voltmetro1			Amperímetro			Watímetro			Variables mecanicas			f
	div	C _v	V	A	C _A	A	div	C _w	W	rpm	T[Nm]	s	Hz
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													

5. CUESTIONARIO PARA LA DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Dar la relación de los valores promedios o totales por fase de las lecturas de los instrumentos de medición en el ensayo de rotor bloqueado en forma tabulada.

- 5.2. A partir de los datos calculados de rotor bloqueado trazar las curvas P_{cc} vs U_{cc} , I_{cc} vs U_{cc} , $\cos\phi_{cc}$ vs U_{cc} . e indicar el punto correspondiente a la corriente nominal I_{1n} . (En papel milimetrado y graficar de curvas).
- 5.3. A partir de las lecturas del ensayo de rotor bloqueado calcular para la corriente nominal los parámetros por fase de: Z_{cc} , R_{cc} . y X_{cc} . haciendo las correcciones necesarias para la temperatura normalizada de operación de 75°C , según corresponda.
- 5.4. A partir de los parámetros anteriores determinar el circuito equivalente exacto incluyendo la resistencia de la rama de magnetización del motor correspondiente a los valores nominales.
- 5.5. Con este circuito equivalente trazar o graficar las curvas características de torque vs velocidad del rotor y Corriente del estator vs velocidad del rotor. Resaltar los puntos características como son: Torque y corriente de arranque, torque máximo, torque y corriente nominal y torque de vacío.
- 5.6. Con la ayuda de cálculos necesarios determinar las curvas características operación torque de salida vs potencia de salida (en el árbol de rotor), corriente del estator vs potencia de salida, factor de potencia vs potencia de salida, rendimiento vs potencia de salida y velocidad del rotor vs potencia de salida.

6. INVESTIGACIÓN COMPLEMENTARIA

- 6.1. Investigue y compruebe a través del osciloscopio la forma de la onda de corriente del ensayo de rotor bloqueado y de la tensión de alimentación a la frecuencia de nominal.

7. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

Plantea en forma personal y clara un mínimo de cinco (5) conclusiones de la experimentación.

Plantea en forma personal y clara un mínimo de tres (3) observaciones para mejorar la experiencia de las prácticas de estas pruebas.

8. BIBLIOGRAFÍA

Al final de todo documento o informe técnico se hace referencias a la bibliografía empleada y la normalización respectiva. Dar las referencias bibliográficas de su informe de la práctica; por ejemplo:

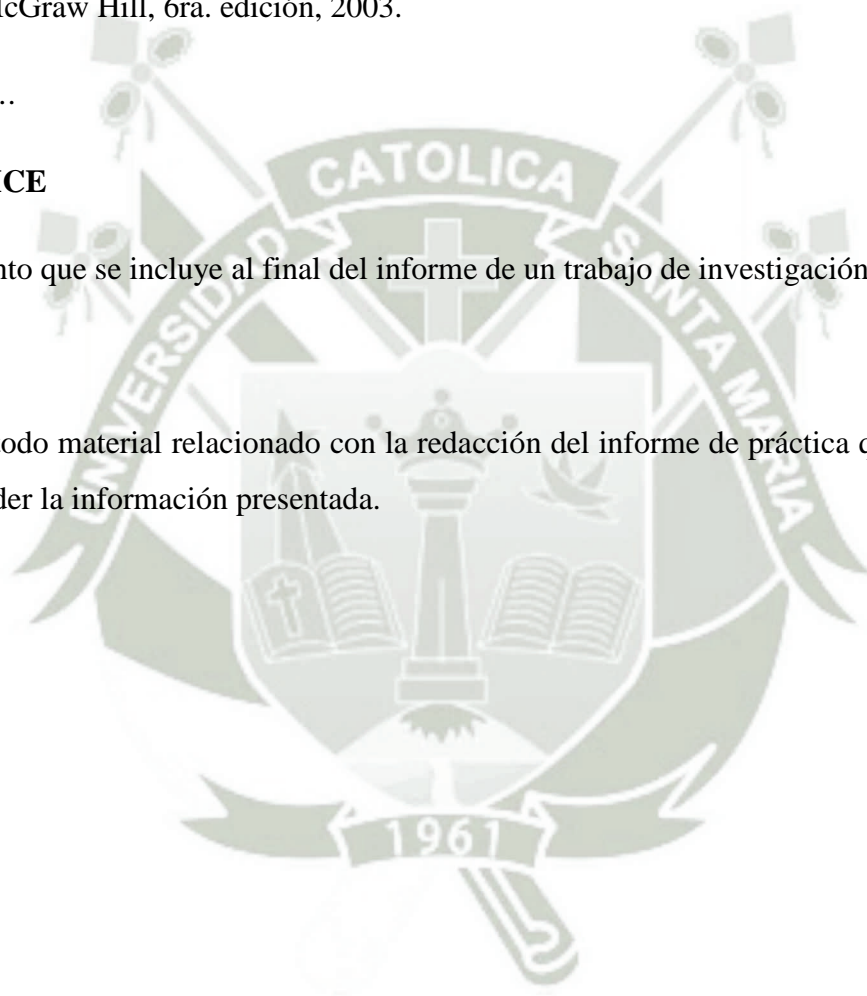
1. Jesús Fraile Mora, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ra. edición, 2008.
2. Fitzgerald A. E. Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ra. edición, 2003.
3.

APENDICE

Suplemento que se incluye al final del informe de un trabajo de investigación

ANEXO

Adjunte todo material relacionado con la redacción del informe de práctica que ayude a comprender la información presentada.



PRÁCTICA DE LABORATORIO N° 4

3 ARRANQUE Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD DEL MOTOR DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA CON VARIADOR DE FRECUENCIA ATV 312.

1. OBJETIVOS

- a) Conocer los parámetros básicos del ALTIVAR ATV312 para la puesta en marcha.
- b) Tomar en cuenta las normas de seguridad del ATV312 antes y durante su arranque y operación.
- c) Conocer las prestaciones básicas del ATV312 y la guía de explotación. Ya que las prácticas se describen para su correcta operación.

2. INTRODUCCIÓN

Balance de potencias del motor.

La máquina asíncrona en el régimen de motor, realiza la conversión de la energía eléctrica en mecánica, que se transmite desde el estator a rotor a través del entrehierro. Como todo proceso de conversión esta inevitablemente ligado con pérdidas en las diferentes etapas de la conversión. Aquí vamos de analizar el balance energético que se produce en el funcionamiento como motor.

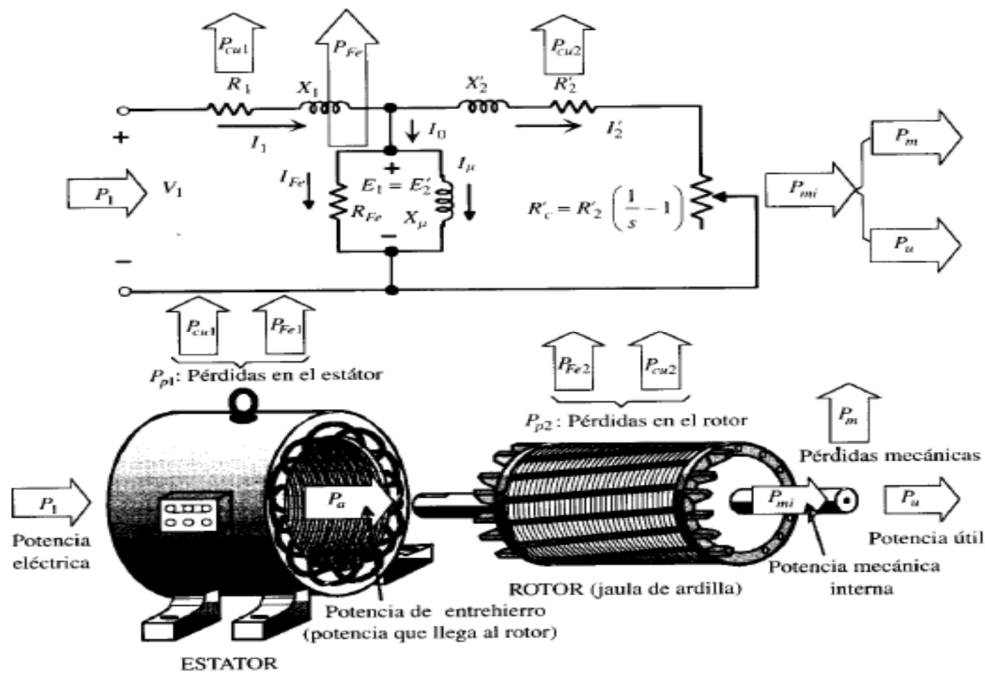


Fig. 8. Circuito equivalente exacto y distribución de las pérdidas de potencia.

La potencia que la máquina absorbe de la red es:

$$P_1 = m_1 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1)$$

Esta potencia que llega al estator una parte se disipa en forma de calor por el efecto Joule en sus devanados, cuyo valor es:

$$P_{Cu1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2$$

Y otra parte se pierde en el hierro del núcleo del estator PFe. La suma de ambas pérdidas representa la disipación en estator Pp1:

$$P_{p1} = P_{Cu1} + P_{Fe1}$$

Como quiera que las frecuencias de las corriente en el rotor son muy reducidas, debido a los pequeños valores de deslizamientos ($f_1=60$ Hz, $f_2=3$ Hz), podemos prácticamente considerar que el hierro del estator es el único origen de las pérdidas ferromagnéticas. Así estas pérdidas se pueden escribir:

$$P_{Fe} = m_1 \cdot E_1 \cdot I_{Fe1} \approx m_1 \cdot V_1 \cdot I_{Fe1}$$

La potencia electromagnética que llega al rotor a través del entrehierro tendrá una magnitud:

$$P_a = P_1 - P_{p1} = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe}$$

En rotor también existen pérdidas debido al efecto Joule en las barras de la jaula de ardilla, y el valor es:

$$P_{Cu2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 = m_1 \cdot R_2' \cdot I_2'^2$$

Las pérdidas en el hierro son despreciables debido al pequeño valor de la frecuencia f_2 , la potencia que llegará al árbol de la máquina, será denominada potencia mecánica interna P_{mi} :

$$P_{mi} = P_a - P_{Cu2}$$

Y considerando las pérdidas mecánicas de rozamiento y ventilación la potencia útil que transmitirá por el eje del rotor está dado por:

$$P_u = P_{mi} - P_m$$

Así, podemos obtener el rendimiento a partir de la estas relaciones.

$$\eta = \frac{P_u}{P_1} = \frac{P_u}{P_u + P_m + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_{Cu1}}$$

Existe algunas relaciones de potencias importante que conocer por ejemplo el cociente de P_{Cu2} t P_{mi} que resulta:

$$\frac{P_{Cu2}}{P_{mi}} = \frac{s}{1-s}$$

Por otro parte, la potencia que atraviesa el entrehierro se puede escribir como.

$$P_a = P_{mi} + P_{Cu2} = m_1 \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot I_2'^2 = \frac{P_{Cu2}}{s} = \frac{P_{mi}}{1-s}$$

Estas relaciones facilitan el estudio y la estimación de pérdidas y rendimiento de motores de inducción muy rápido.

Par del motor de inducción.

Si P_u es la potencia mecánica útil desarrollada por el motor y n la velocidad en rpm a la que gira el rotor. El par útil o torque en Nm en el árbol de la máquina será el cociente entre P_m y la velocidad angula de giro expresado en rpm.

$$T = \frac{P_u}{\omega} = \frac{P_u \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n}$$

Si se desprecian las pérdidas mecánicas del rotor, la potencia útil coincide con la potencia mecánica interna desarrollada y el par desarrollado resulta

$$T = \frac{P_{mi} \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n}$$

De la definición de deslizamiento se puede deducir

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \Rightarrow n = n_1 (1 - s)$$

La expresión de par desarrollado se convierte en

$$T = \frac{P_{mi} \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot (1 - s)}$$

Relacionando P_{mi} con la potencia del entrehierro se tiene:

$$T = \frac{P_a \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n_1}$$

También se puede expresar:

$$T = \frac{m_1 \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot I_2'^2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1}{60}}$$

Pero del circuito equivalente aproximado el módulo de la corriente en rotor vale:

$$I_2' = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{cc}^2}}$$

Donde $X_{cc} = X_1 + X_2$, así reemplazando en la ecuación se obtiene el par electromagnético producido por la máquina en función de los parámetros del motor:

$$T = \frac{m_1 \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot V_1^2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1}{60} \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{cc}^2 \right]}$$

De la expresión se observa que el par se hace cero cuando $s=0$ y $s=\pm\infty$; por otra parte la característica del para $T=f(s)$ presenta unos máximos en el se cumple la igualdad:

$$\frac{dT}{ds} = 0 \Rightarrow s_{crit} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2}}$$

El signo "+" expresa par máximo como motor y "-" como generador.

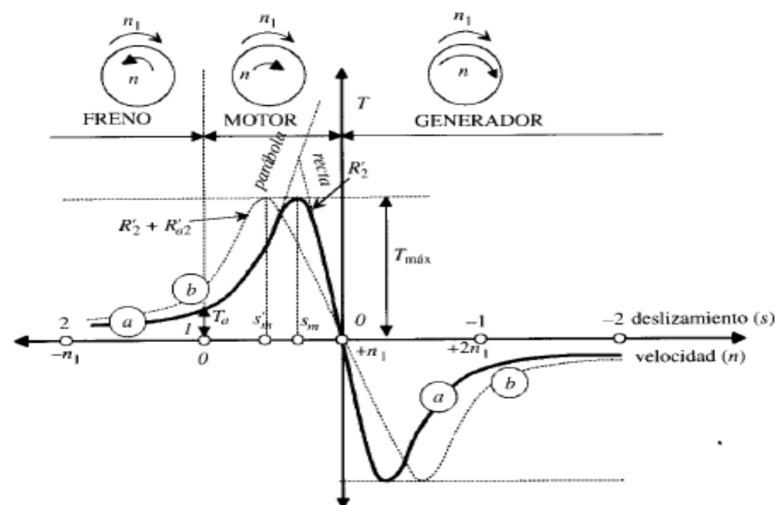


Fig. 2. Características de par-velocidad de la máquina asíncrona y zona de operación.

Así, se puede el valor del par máximo de la máquina:

$$T_{\max} = \pm \frac{m_1 \cdot V_1^2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1}{60} \cdot 2 \cdot \left[\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2} \right]}$$

Como puede observarse que el par máximo no depende de la resistencia del rotor, sin embargo valor del deslizamiento en la cual se obtiene el par máximo es proporcional a la resistencia del rotor. Este es aplicable para motores de inducción con rotor bobinado o de anillos deslizantes, en la que se puede conseguir par máximo a velocidad deseada.

3. MATERIALES, INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EQUIPOS

Los siguientes dispositivos, equipos, instrumentos y materiales serán necesarios para la realización de la práctica:

Item	Cantidad	Descripción	Código
1	1	Regulador de tensión trifásico (variac) 380 V, 25 A	
2	1	Motor de inducción de 10 HP, 440/380/220 V, 60 Hz, 1750 rpm	
3	1	Amperímetro de c.a. 25 A	
4	1	Voltímetro de c.a. de 600V	
5	1	Vatímetro trifásico 50 A, 600 V.	
6	1	Analizador de redes trifásico 380 V, 50 A	
7	1	Microohmímetro MPK5 (o puente Wheastone)	
8	1	Tacómetro óptico digital	
9	1	Multitester para verificación de circuitos	
10	1	Kit de cables flexibles AWG 14 ó 2.5 mm ²	
11	1	Termómetro de mercurio o digital	
12	1	Generador síncrono de 5 kW, 380V, 60 Hz, FP 0.84	
13	1	Banco de resistencias de calentamiento de 7.2 kW, 380 V.	

4. PROCEDIMIENTO

- a) Acoplar mecánicamente las flechas de los rotores del motor y del generador, comprobar una perfecta alineación mecánica de ejes y montar las conexiones de fig. 3. Observe que el motor se alimenta directamente de la fuente de energía a través de dispositivos de arranque de motor.
- b) Al montar el circuito de la fig.3, teniendo cuidado con las conexiones, las escalas de los instrumentos de medición. Acoplar el motor de inducción con el generador síncrono a través de una brida mecánica, a fin de accionar y transmitir energía mecánica al generador y convertir esta energía en eléctrica de corriente alterna. A la vez este generador tendrá una carga de calentadores eléctricos. Una vez verificado el montaje del circuito por el instructor alimente con tensión nominal y aumente la carga del generador hasta llegar al valor de la corriente nominal del motor de inducción.

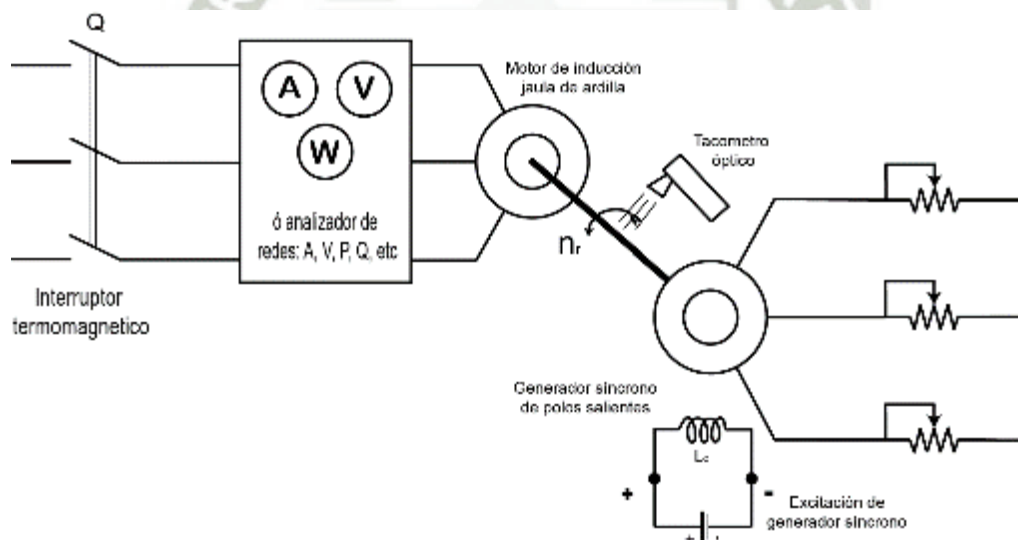


Fig. 3. Montaje de circuito para el ensayo del motor en condiciones de carga.

Verificar los alcances respectivos de los instrumentos de ac y dc para este ensayo del motor con carga nominal incluso superior, hacer las conexiones necesarias de la máquina de carga el generador síncrono con respectiva excitación.

Este grupo de máquinas transformará la energía eléctrica de corriente alterna en energía de corriente alterna para luego transformarse en energía calorífica, en la

que el motor asincrónico es el motor primario del generador. Para determinar la potencia de salida mecánica que desarrolla el motor se obtiene por deducción del flujo de potencia en el grupo, para ello se debe de conocer la eficiencia del generador a diferentes cargas y se determina directamente con este ensayo de carga.

Una vez verificada por el instructor del laboratorio todas las conexiones, arrancar el motor por algún método de arranque, dejar por unos minutos hasta alcanzar las condiciones de lubricación de rodamientos del grupo motor-generador. Luego la 1ra. lectura de carga será con el generador de sin excitación; la 2da. lectura con excitación hasta tener voltaje nominal en la armadura o estator. La 3ra lectura y los demás son para cargas de 25, 50, 75, 100, 125 % de su potencia nominal del motor y con carga de resistencias de calentamiento conservando siempre el voltaje de nominal, las resistencias de calentamiento debe tener disipadores o ventiladores auxiliares.

Todas la tomas de lectura llevar a la siguiente tabla 1 y tabla 2.

Tabla 1. Registro de lecturas de los instrumentos de medición del motor.

#	Voltímetro1			Amperímetro			Watímetro			Variables mecanicas			f
	div	C _v	V	A	C _A	A	div	C _w	W	rpm	T[Nm]	s	Hz
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													

Tabla 2. Registro de lecturas de los instrumentos de medición del generador síncrono.

#	Voltímetro1			Amperímetro			Watímetro			Excitación			f
	div	C _v	V	A	C _A	A	div	C _w	W	V _{cd} [V]	I _{cd} [A]		Hz
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													

5. CUESTIONARIO PARA LA DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Con la ayuda de cálculos necesarios determinar las curvas característica
operación teórica: torque de salida vs potencia de salida (en el árbol de

rotor), I vs-potencia de salida, FP vs potencia de salida, rendimiento vs potencia de salida y velocidad vs potencia de salida.

- 5.2. Dar la relación de los valores promedios o totales calculados de las lecturas en la experiencia con carga y del flujo de potencia del grupo motor-generator en forma tabulada.
- 5.3. Con los datos del ensayo con carga determinar las **curvas características de operación experimentales**: torque de salida vs potencia de salida (en el árbol de rotor), I vs potencia de salida, FP vs potencia de salida, rendimiento vs potencia de salida y velocidad vs potencia de salida.
- 5.4. Dar los errores porcentuales de los rendimientos teóricos y experimentales *para* diferentes cargas: 120%, 100%, 75%, 50% y 25% de P_{2n} .
- 5.5. Realice una relación de semejanzas y diferencias entre las máquinas eléctricas que conforman el grupo, utilice criterios de principio funcionamiento, partes constructivas y de pérdidas (características de operación).
- 5.6. Cuáles son las consideraciones que debemos de tener para hacer operar la máquina asíncrono en régimen de como generador a partir de los esquemas de conexionado del ensayo con carga.

6. INVESTIGACIÓN COMPLEMENTARIA

- 6.1. Investigue y determina como generar energía eléctrica a partir de una máquina asíncrona en mini centrales y generación autónoma.

7. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

Plantea en forma personal y clara un mínimo de cinco (5) conclusiones de la experimentación.

Plantea en forma personal y clara un mínimo de tres (3) observaciones para mejorar la experiencia de las prácticas de estas pruebas.

8. BIBLIOGRAFÍA

Al final de todo documento o informe técnico se hace referencias a la bibliografía empleada y la normalización respectiva. Dar las referencias bibliográficas de su informe de la práctica; por ejemplo:

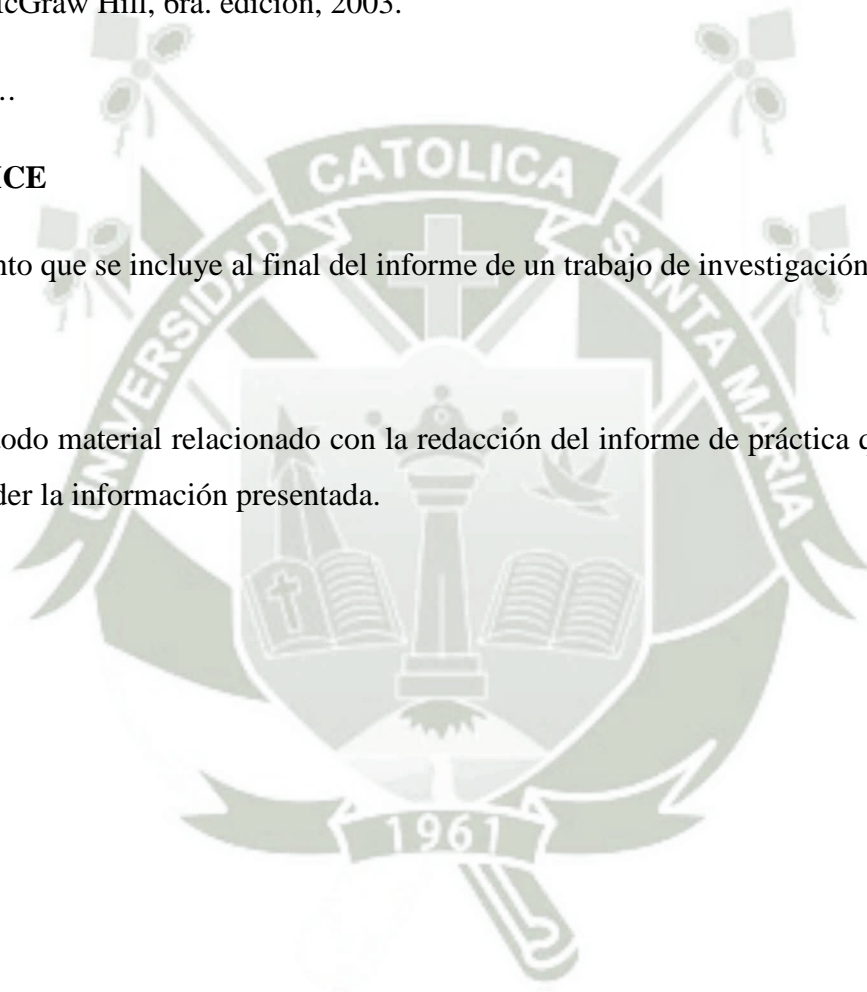
1. Jesús Fraile Mora, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ra. edición, 2008.
2. Fitzgerald A. E. Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ra. edición, 2003.
3.

APENDICE

Suplemento que se incluye al final del informe de un trabajo de investigación

ANEXO

Adjunte todo material relacionado con la redacción del informe de práctica que ayude a comprender la información presentada.



PRÁCTICA DE LABORATORIO N° 5

4 ARRANQUE Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD DEL MOTOR DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA CON VARIADOR DE FRECUENCIA ATV 312.

1. OBJETIVOS

- a) Conocer los parámetros básicos del variador de frecuencia ATV312 para la puesta en marcha.
- b) Tomar en cuenta las normas de seguridad del ATV312 antes y durante su arranque y operación.
- c) Conocer las prestaciones básicas del ATV312 y su respectiva guía de explotación.

2. INTRODUCCIÓN

- 1) El variador de frecuencia ATV 312 es un convertidor de frecuencia para motores asíncronos trifásicos 200...600 V de 0,18 a 15 kW. Es resistente, de dimensión reducida y fácil de instalar. Sus funciones integradas están especialmente adaptadas para responder a las aplicaciones de máquinas industriales sencillas.

Después de desconectar la tensión del ALTIVAR, esperar un minuto antes de intervenir en el aparato. Este tiempo corresponde a la constante de tiempo de descarga de los condensadores.

En explotación, el motor puede pararse suprimiendo las órdenes de marcha o la consigna de velocidad, mientras que el variador queda bajo tensión. Si la seguridad del personal exige evitar cualquier arranque intempestivo, este bloqueo electrónico es insuficiente: prever un corte del circuito de potencia.

- 2) El variador de frecuencia está compuesto por dispositivos de seguridad que pueden ordenar la parada del convertidor en caso de detectar falla y por tanto la parada del motor. El motor puede también sufrir una parada por bloqueo mecánico. Finalmente, las variaciones de tensión, cortes de alimentación por las fases, etc. pueden igualmente originar paradas.

Es importante conocer los posibles fallos que pueden ocurrir para solucionarlos. Se detallan a continuación los más comunes. De producirse algunas de estas fallas aparecerán en la pantalla sus respectivos símbolos de información según la guía de explotación.

OCF [SOBRECORRIENTE]

SCF [CORTOCIRCUITO DEL MOTOR]

SOF [SOBREVELOCIDAD]

OHF [SOBRECALENTAMIENTO DEL VARIADOR]

OPF [PÉRDIDA FASE MOTOR]

PHF [PÉRDIDA FASE DE LA RED]

OSF [SOBRETENSIÓN DE RED]

CFE [CONFIGURACIÓN INCORRECTA]

3. MATERIALES, INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EQUIPOS

Los siguientes dispositivos, equipos, instrumentos y materiales serán necesarios para la realización de la práctica:

Item	Cantidad	Descripción	Código
1	1	Fuente de alimentación o regulador de tensión trifásico (variac) 380 V, 25 A	
2	1	Motor de inducción de 10 HP, 440/380/220 V, 60 Hz, 1750 rpm	
3	1	Amperímetro de c.a. 25 A	
4	1	Voltímetro de c.a. de 600V	
5	1	Vatímetro trifásico 50 A, 600 V.	
6	1	Analizador de redes trifásico 380 V, 50 A	
7	1	Microohmímetro MPK5 (o puente Wheastone)	
8	1	Tacómetro analógico u óptico digital	
9	1	Multitester para verificación de circuitos	
10	1	Kit de cables flexibles AWG 14 ó 2.5 mm ²	
11	1	Termómetro de mercurio o digital	
12	1	Generador síncrono de 5 kW, 380V, 60 Hz, FP 0.84	
13	1	Banco de resistencias de calentamiento de 7.2 kW, 380 V.	
14	1	Módulo convertidor de frecuencia ATV312.	
15	1	Juego de cables de NH de 4 mm ²	

4. PROCEDIMIENTO

- 4.1. Una vez revisado y comprendido la guía de explotación del ATV312, montar el circuito de la fig.1.
- 4.2. Una vez verificado el montaje del circuito por el instructor conecte la fuente de alimentación y presione el pulsador o interruptor de encendido para alimentar con tensión nominal al convertidor de frecuencia y aparecerá en el visualizador "rdy" que significa variador de frecuencia listo para funcionar.

4.3. Verificar que los datos de placa del motor de inducción coinciden con la configuración del convertidor en el menú de control "drC" del convertidor, para poder arrancar el motor. Caso contrario continúe con el siguiente paso.

rdy→mode →drC

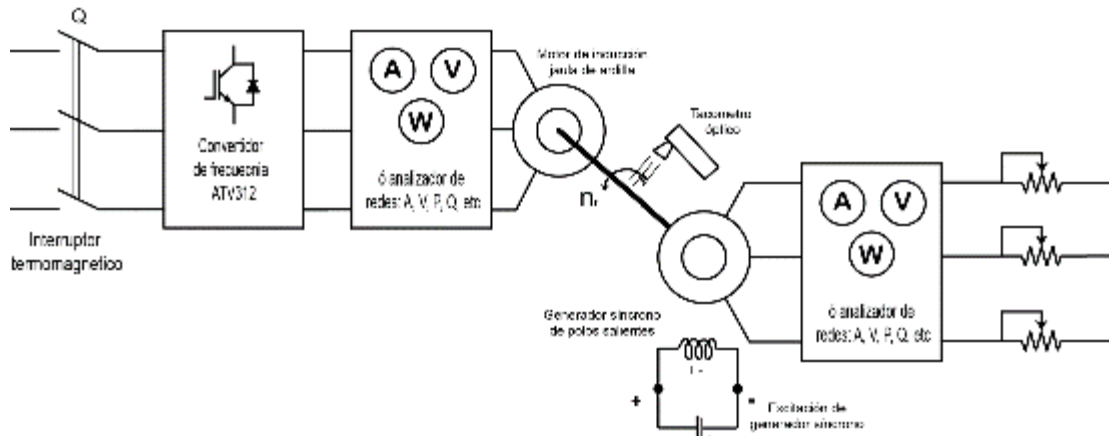


Fig. 1. Esquema de montaje de ensayo del MI con variador de frecuencia.

4.4. Los parámetros de control del motor se pueden modificar en parada del convertidor, para acceder a las modificaciones seleccionar "drC" girando la perilla del variador y presione por 2 segundos entonces aparecerán todos los submenús:

rdy→mode →drC (control del motor)→...

"bFr"- Frecuencia estándar de la red de alimentación del variador de frecuencia [60Hz NEMA]: Este ajuste debe coincidir con la frecuencia del motor como regla. Asegúrese de que este ajuste sea el adecuado para el motor y la aplicación.

"UnS" - Tensión nominal del motor [380 V]: Tal como aparece en la placa del motor. Cuando la tensión de línea sea inferior a la tensión nominal del motor, ajuste [Tensión nominal Motor] (UnS) con el valor de la tensión de línea aplicada a los bornes del variador.

"FrS" - Frecuencia nominal del motor [60 Hz]: Aparece en la placa del motor. Rango de 10 a 500 Hz.

"**nCr**" - Intensidad nominal del motor [16 A]: Tal como aparece en la placa del motor. la I_n deber estar acorde con la intensidad nominal del variador de frecuencia que se indica en la guía de instalación y en la placa de características del variador.

"**nSP**" - Velocidad nominal del motor [1750 RPM]: Tal como aparece en la placa del motor. Rango de 0 a 32760 rpm.

"**COS**" - Factor de potencia del motor [0.90]: Coseno Phi o factor de potencia que figura en la placa del motor. Rango de 0,5 a 1.0.

4.5. Ahora es turno del ajuste de parámetros básicos del motor:

rdy→mode →SEt (ajustes) →....

"ACC"- Tiempo de aceleración del rotor para alcanzar la velocidad establecida y controlada por el variador de frecuencia[30 s].

"dEC"- Tiempo de desaceleración del rotor para alcanzar la parada total del accionamiento por el variador de frecuencia[30 s].

"LSP"- Velocidad mínima del motor en Hz establecida y controlada por el variador de frecuencia [20 Hz].

"HSP"- Velocidad máxima del motor en Hz establecida y controlada por el variador de frecuencia [72 Hz].

"ItH"- Intensidad de corriente térmica debe ser la misma de intensidad nominal del motor. Es una medida de protección que establecerá el variador de frecuencia [I_n , en A].

4.6. Configuraciones de control de referencia y entradas y salidas del convertidor de frecuencia:

rdy→mode →CrL (control) →....

"FrI"-Canal de referencia 1 o control de referencia de las entradas analógicas (AI1, AI2 y A13), →AIUI - modo de control por terminal la rueda de navegación del display del convertidor.

Configuraciones del entradas y salidas del motor:

rdy→mode →I_O (in/out) →....

"tCC"-Control de comando a 2, a 3 hilos o perilla local, como se control por la perilla →LOC -o control local aceptamos.

4.7 Y finalmente, estamos listo "rdy" para el arranque y las pruebas del motor de inducción controlado por variador de frecuencia.

Presione por unos 2 segundos el botón "esc" para activar el control por la perilla local.

Arranque el motor "RUN" y varíe la velocidad con la perilla de navegación la velocidad del motor. Puede intentar desde un mínimo al máxima velocidad. Podemos ajustar y dejarlo a velocidad de 50 Hz.

4.8. Parada del motor se efectúa con "STOP" y el rotor se desacelerando con tiempo programado.

4.9. Una vez ajustados y configurados los parámetros anteriores, arrancar el motor dando una orden de marcha mediante votos "RUN" sentido directo y velocidad a corriente ser puede controlar mediante el potenciómetro y se visualiza en la pantalla del variador. Medir la corriente en el arranque y registrarlo: **I arranque en vacío=**

4.10 Accionando la perilla de navegación podemos regular de velocidad del motor de inducción. La velocidad (frecuencia aplicada al motor) de giro se puede visualizar en el parámetro "rFr".

4.11. Medir las tres corrientes de línea indicadas en el amperímetro, la velocidad del motor en vacío y anote en la tabla 1.

- 4.12 Reduzca la velocidad a mínimo y apague el variador con el pulsador en el guarda motor y desconecte de la fuente de alimentación con el interruptor general.
- 4.13 Acoplar el eje del generador síncrono al motor de inducción por medio una brida mecánica. el generador síncrono debe estar conectada a un banco de resistencia trifásicos para emular la carga mecánica del motor de inducción. Conectar la fuente de alimentación al variador a tensión nominal arranque el convertidor de frecuencia del motor durante 3 segundos y mida la corriente de arranque a plena carga a 60 Hz. **I arranque a plena carga a 60 Hz =**
- 4.14 Repetir los procedimientos 4.5, 4.6 y 4.7 para cada de los pares anotados en la tabla 1 y compare los resultados para sacar sus conclusiones.

Tabla 1. Registro de lecturas de los instrumentos de medición del motor.

#	Voltmetro1			Amperímetro			Watímetro			Variables mecanicas			f
	div	Cv	V	A	CA	A	div	Cw	W	rpm	T[Nm]	T(Nm)	Hz
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													

Tabla 2. Registro de lecturas de los instrumentos de medición del generador síncrono.

#	Voltmetro1			Amperímetro			Watímetro			Excitación			f
	div	C _v	V	A	C _A	A	div	C _w	W	V _{cd} [V]	I _{cd} [A]		Hz
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													

4.15. Finalmente paramos el motor de inducción mediante algunas de siguientes formas:

- Disminuyendo la velocidad con la consigna analógica (con el potenciómetro). El motor disminuirá progresivamente de velocidad hasta la velocidad mínima "LSP". Para un valor de consigna 0. (a la velocidad de 0.5 Hz se efectúa un frenado por corriente continuo automático).

- Eliminando la orden de marcha, presionando el botón de "stop", el motor se parará en el tiempo establecido en el parámetro de frenado "dEC" del variador.

4.16. Una que deje de funcionar los ventiladores del convertidor podemos desconectar la fuente de alimentación.

5. CUESTIONARIO PARA LA DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Dar la relación de los valores promedios o totales calculados de las lecturas en la experiencia del motor con el variador de frecuencia en vacío en forma tabulada.

5.2. Dar la relación de los valores promedios o totales calculados de las lecturas en la experiencia del motor con el variador de de frecuencia con carga en forma tabulada.

5.4. Explique y fundamente porque la corriente del convertidor de frecuencia se mantiene constante al variar la velocidad del motor.

5.5. De una relación de las ventajas y desventajas de las aplicaciones de los convertidores de frecuencia en la industria.

5.6. Cuáles son las consideraciones de seguridad y protección de los operarios que debemos de tener para hacer operar los accionamientos electrónico-electromecánicos.

6. INVESTIGACIÓN COMPLEMENTARIA

6.1. Investigue y determine como influye negativamente los armónicos producidos por los convertidos estáticos en base a semiconductores de potencia en las redes eléctricas y medidas se deben de tener en cuenta.

7. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

Plantea en forma personal y clara un mínimo de cinco (5) conclusiones de la experimentación.

Plantea en forma personal y clara un mínimo de tres (3) observaciones para mejorar la experiencia de las prácticas de estas pruebas.

8. BIBLIOGRAFÍA

Al final de todo documento o informe técnico se hace referencias a la bibliografía empleada y la normalización respectiva. Dar las referencias bibliográficas de su informe de la práctica; por ejemplo:

1. Jesús Fraile Mora, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ra. edición, 2008.
2. Fitzgerald A. E. Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ra. edición, 2003.
3.

APENDICE

Suplemento que se incluye al final del informe de un trabajo de investigación

ANEXO

Adjunte todo material relacionado con la redacción del informe de práctica que ayude a comprender la información presentada.

PRÁCTICA DE LABORATORIO N° 6

5 PARADA CONTROLADA POR INYECCIÓN DE CORRIENTE CONTINUA DEL MOTOR DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA CON EL VARIADOR DE FRECUENCIA ATV 312.

1. OBJETIVOS

- a) Conseguir una parada rápida y precisa del rotor de motor inducción con el variador de frecuencia ATV312.
- b) Conocer las aplicaciones industriales de control de la velocidad y torque y la manera en que influyen dentro de los procesos industriales.

2. INTRODUCCIÓN

- 1) En muchas ocasiones, máquinas de ciclos rápidos, procesos de paro de emergencia, etc. será necesario conseguir una parada rápida del motor y de la máquina que acciona.

En algunas aplicaciones reales la carga tiende, por su propia inercia, a «arrastrar el motor». En este caso la inyección de c.c. actúa como «freno magnético».

La inyección de corriente continua hacia las bobinas del motor permite gestionar el control de un freno electromagnético en sincronización con el arranque y la parada del motor para evitar sacudidas o desvíos. La lógica de control de freno se gestiona con el variador. Esta función es destinada a las aplicaciones de mantenimiento con movimientos equipados con frenos electromagnéticos (durante la elevación) y a las máquinas que necesiten un control de freno de parking (máquinas con desequilibrio mecánico).

- 2) El convertidor de frecuencia ATV312 dispone de un par de frenado del 30% del par nominal. En caso de necesitar un par de frenado superior (hasta el 150% del par nominal) es necesaria la conexión de una resistencia de frenado adicional.

3. MATERIALES, INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EQUIPOS

Los siguientes dispositivos, equipos, instrumentos y materiales serán necesarios para la realización de la práctica:

Item	Cantidad	Descripción	Código
1	1	Fuente de alimentación o regulador de tensión trifásico (variac) 380 V, 25 A	
2	1	Motor de inducción de 10 HP, 440/380/220 V, 60 Hz, 1750 rpm	
3	1	Amperímetro de c.a. 25 A	
4	1	Voltímetro de c.a. de 600V	
5	1	Vatímetro trifásico 50 A, 600 V.	
6	1	Analizador de redes trifásico 380 V, 50 A	
7	1	Microohmímetro MPK5 (o puente Wheastone)	
8	1	Tacómetro analógico u óptico digital	
9	1	Multitester para verificación de circuitos	
10	1	Kit de cables flexibles AWG 14 ó 2.5 mm ²	
11	1	Termómetro de mercurio o digital	
12	1	Generador síncrono de 5 kW, 380V, 60 Hz, FP 0.84	
13	1	Banco de resistencias de calentamiento de 7.2 kW, 380 V.	
14	1	Módulo convertidor de frecuencia ATV312.	
15	1	Juego de cables de NH de 4 mm ²	

4. PROCEDIMIENTO

- 4.1. Una vez revisado y comprendido la guía de explotación del ATV312, montar el circuito de la fig.1.
- 4.2. Una vez verificado el montaje del circuito por el instructor conecte la fuente de alimentación y presione el pulsador o interruptor de encendido para alimentar con tensión nominal al convertidor de frecuencia y aparecerá en el visualizador "rdy" que significa variador de frecuencia listo para funcionar.
- 4.3. Verificar la configuración del variador de frecuencia en el menú de control del motor que los datos de placa del motor de inducción coinciden en el menú de control "drC" del convertidor, para poder arrancar el motor. Caso contrario continúe con el siguiente paso.

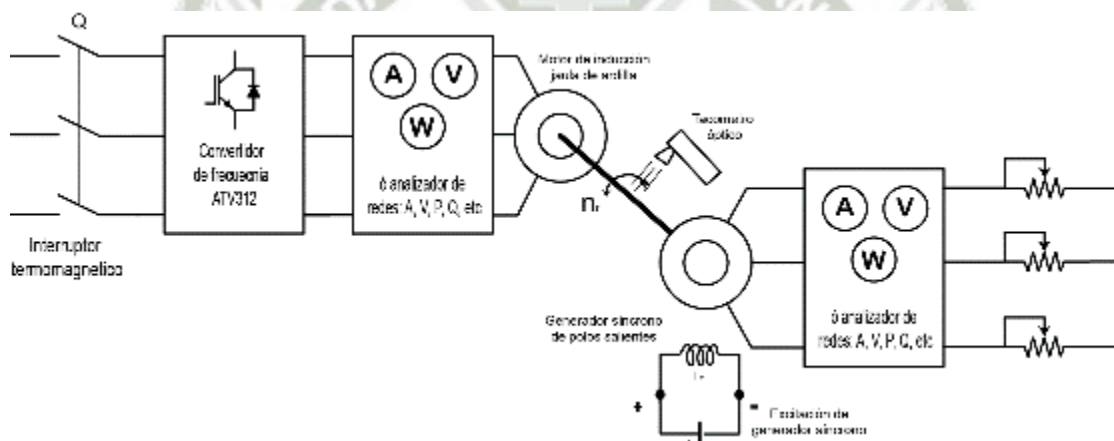


Fig. 1 Esquema de montaje de ensayo del MI con variador de frecuencia.

- 4.4. Los parámetros de control del motor se pueden modificar en parada del convertidor, para acceder a las modificaciones seleccionar "drC" girando la perilla del variador y presione por 2 segundos entonces aparecerán todos los submenús:

rdy→mode →drC (control del motor)→...

"bFr"- Frecuencia estándar de la red de alimentación del variador de frecuencia [60Hz NEMA]: Este ajuste debe coincidir con la frecuencia del motor como regla. Asegúrese de que este ajuste sea el adecuado para el motor y la aplicación.

"**UnS**" - Tensión nominal del motor [380 V]: Tal como aparece en la placa del motor. Cuando la tensión de línea sea inferior a la tensión nominal del motor, ajuste [Tensión nominal Motor] (UnS) con el valor de la tensión de línea aplicada a los bornes del variador.

"**FrS**" - Frecuencia nominal del motor [60 Hz]: Aparece en la placa del motor. Rango de 10 a 500 Hz.

"**nCr**" - Intensidad nominal del motor [16 A]: Tal como aparece en la placa del motor. la In deber estar acorde con la intensidad nominal del variador de frecuencia que se indica en la guía de instalación y en la placa de características del variador.

"**nSP**" - Velocidad nominal del motor [1750 RPM]: Tal como aparece en la placa del motor. Rango de 0 a 32760 rpm.

"**COS**" - Factor de potencia del motor [0.90]: Coseno Phi o factor de potencia que figura en la placa del motor. Rango de 0,5 a 1.0.

4.5. Ajuste de parámetros básicos de frenado del motor:

rdy→mode →SEt (ajustes) →....

"**ACC**"- Tiempo de aceleración del rotor para alcanzar la velocidad establecida y controlada por el variador de frecuencia[30 s].

"**dEC**"- Tiempo de desaceleración del rotor para alcanzar la parada total del accionamiento por el variador de frecuencia[5 s].

"**LSP**"- Velocidad mínima del motor en Hz establecida y controlada por el variador de frecuencia [20 Hz].

"**HSP**"- Velocidad máxima del motor en Hz establecida y controlada por el variador de frecuencia [72 Hz].

"ItH"- Intensidad de corriente térmica debe ser la misma de intensidad nominal del motor. Es una medida de protección que establecerá el variador de frecuencia [In, en A].

4.6. Configuraciones de control de referencia y entradas y salidas del convertidor de frecuencia:

rdy→mode →CrL (control) →....

"FrI"-Canal de referencia 1 o control de referencia de las entradas analógicas (AI1, AI2 y A13), →AIUI - modo de control por terminal la rueda de navegación del display del convertidor.

Configuraciones de las entradas y salidas del motor:

rdy→mode →I_O (in/out) →....

"tCC"-Control de comando a 2, a 3 hilos o perilla local, como se control por la perilla →LOC -o control local aceptamos.

4.7 Y finalmente, estamos listo "rdy" para el arranque el grupo y realice las siguientes pruebas del motor de inducción controlado por variador de frecuencia.

Presione por unos 2 segundos el botón "esc" para activar el control por la perilla local.

Arranque el motor "RUN" y varíe la velocidad con la perilla de navegación la velocidad del motor. Puede intentar desde un mínimo al máxima velocidad. Podemos ajustar y dejarlo a velocidad de 50 Hz.

4.8. Parada del motor se efectúa con "STOP" y el rotor se desacelerando con tiempo programado.

4.9 Accionando la perilla de navegación podemos regular de velocidad del motor de inducción. La velocidad (frecuencia aplicada al motor) de giro se puede visualizar en el parámetro "rFr".

4.10. Medir las tres corrientes de línea indicadas en el amperímetro, la velocidad del motor en vacío y anote en la tabla 1.

4.11. Establecer la velocidad a máximo y de la parada de la velocidad de giro con el pulsador "STOP" del convertidor de frecuencia y verifique el tiempo que llega detenerse el rotor del grupo motor-generator.

Tabla 1. Registro de lecturas de los instrumentos de medición del motor.

#	Voltímetro1			Amperímetro			Watímetro			Variables mecánicas			f
	div	C _v	V	A	C _A	A	div	C _w	W	rpm	T[Nm]	T(Nm)	Hz
1													
2													
3													

Tabla 2. Registro de lecturas de los instrumentos de medición del generador síncrono.

#	Voltímetro1			Amperímetro			Watímetro			Excitación			t
	div	C _v	V	A	C _A	A	div	C _w	W	V _{cd} [V]	I _{cd} [A]		s
1													
2													
3													

5. CUESTIONARIO PARA LA DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- 5.1. Dar la relación de los valores promedios o totales calculados de las lecturas en la experiencia del motor con el variador de frecuencia en carga en forma tabulada.
- 5.2. Explique y fundamente porque la inyección corriente continua crea en los devanados del estator un freno electromagnético.
- 5.3. Cuáles son las consideraciones de seguridad y protección de los operarios que debemos al detener en casos de emergencia los accionamientos electrónico-electro-mecánicos.

6. INVESTIGACIÓN COMPLEMENTARIA

- 6.1. Investigue y determine como es principio de funcionamiento del freno electromagnético y que aplicaciones tiene en la industria de ensayo de motores eléctricos.

7. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

Plantea en forma personal y clara un mínimo de cinco (5) conclusiones de la experimentación.

Plantea en forma personal y clara un mínimo de tres (3) observaciones para mejorar la experiencia de las prácticas de estas pruebas.

8. BIBLIOGRAFÍA

Al final de todo documento o informe técnico se hace referencias a la bibliografía empleada y la normalización respectiva. Dar las referencias bibliográficas de su informe de la práctica; por ejemplo:

1. Jesús Fraile Mora, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ra. edición, 2008.
2. Fitzgerald A. E. Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ra. edición, 2003.

CONCLUSIONES

- Podemos mencionar que nuestro módulo, posee características que son de gran utilidad en el adiestramiento del alumno en el área de las máquinas eléctricas; es decir, que dicho módulo ha sido concebido para analizar el comportamiento de una máquina eléctrica rotativa.
- A través de pruebas constantemente realizadas, podemos garantizar el buen funcionamiento de las máquinas eléctricas y dispositivos de control y del conjunto que conforma el módulo.
- A través de las guías de prácticas se podrá experimentar el funcionamiento, características de operación, rendimiento y conexiones eléctricas en el arranque de las máquinas eléctricas rotativas a través de sus ensayos respectivos.
- Por último, se cumple con los objetivos planteados al iniciar el desarrollo de nuestra tesis.

RECOMENDACIONES

- Se debe de tener en conocimiento previo de las prácticas a realizar.
- El operador del módulo deberá examinar detenidamente los elementos que se ponen a su disposición, con objeto de conocer las características más importantes
- El alumno debe acostumbrarse (por muy sencillo que sea el esquema) a comprobar el correcto montaje para la realización de los ensayos.
- Antes de efectuar la práctica, el alumno ya deberá de tener los cálculos previos, de tal forma que estos puedan permitir la mejor elección de la posición de los instrumentos en el circuito, para un mejor desarrollo de la práctica.
- Referente a la distribución de alumnos en los puestos de trabajo debe hacerse de forma que todos tomen parte activa y continua en las operaciones. Se recomienda un número de alumnos que no excedan de 4 por grupo; así será también más sencillo para el profesor explicar y desarrollar el tema a tratar.

BIBLIOGRAFÍA

1. Control máquinas Eléctricas Irving L. Kosow 1996
2. Máquinas Eléctricas y Transformadores Irving L. Kosow 1996
3. Maquinas Eléctricas Toma 2 – A. V. Ivanov-Smolenski 1980
4. Maquinas Eléctricas Jesús Fraile Mora 2003
5. Prácticas de Laboratorio de Maquinas eléctricas J. Palacios Vergel 1986.
6. Maquinas Eléctricas M.M. Kastman. 1995.
7. Guía de Laboratorios de Maquinas Eléctricas y accionamientos eléctricos. M.M. Kastman. 2001.
8. Guía de Laboratorios de Maquinas Eléctricas. M.C. Tanca V. 2002.