



## Máquina de inducción

---

### A. INTRODUCCIÓN

El motor de inducción trifásico es, por un considerable margen, el motor de C.A. más ampliamente utilizado. Su construcción es simple y requiere poca mantención. El motor con rotor del tipo “jaula de ardilla” conectado directamente a la red es generalmente el elegido cuando se requiere velocidad sustancialmente constante. No obstante, la electrónica de potencia permite hoy día disponer de fuentes de tensión de magnitud y frecuencia ajustables, lográndose así un fácil control de velocidad de motores de jaula de ardilla, cubriendo campos de aplicación que antes eran propios de los motores de CC.

Existen también diseños especiales de motores de inducción, útiles para determinadas aplicaciones. Por ejemplo, se fabrican motores con doble jaula o con “barras profundas”, que permiten lograr un elevado torque de partida y baja corriente de partida, debido a que en el transitorio de arranque la alta frecuencia en el rotor provoca una alta resistencia rotórica. También se fabrican motores de rotor bobinado, los que se usan cuando las condiciones de partida resultan severas, pues permiten adicionar resistencias en serie con los enrollados del rotor, para lo cual dicha máquina debe disponer de anillos rozantes. No obstante, también estos tipos de motores están siendo reemplazados por motores de jaula de ardilla controlados electrónicamente.

Por otra parte, la máquina de inducción conectada a la red y movida por una máquina motriz a velocidad mayor que la síncrona, entrega potencia a la red, comportándose como generador de inducción.

En el laboratorio se ensayarán métodos de partida, se harán pruebas para determinar los parámetros del circuito equivalente y se obtendrán las características de funcionamiento típicas del motor de inducción trifásico. La carga mecánica se simulará con un generador de C.C. de excitación independiente, alimentando una resistencia  $R$  variable (Figura 1). Adicionalmente, se experimentará el control de velocidad de un motor de jaula de ardilla, mediante un variador electrónico de frecuencia.

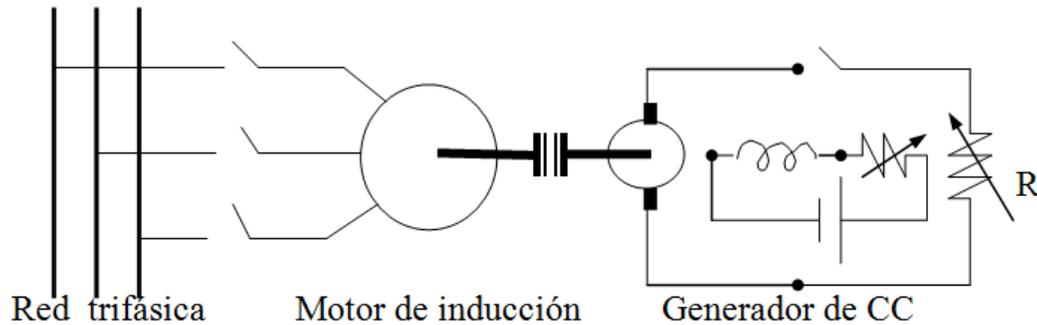


Figura 1: Grupo motor de inducción – generador CC

Antes de describir el trabajo de laboratorio propiamente tal, se indican los aspectos fundamentales del control electrónico de velocidad de motores de inducción trifásicos.

La velocidad de un motor de inducción trifásico, o velocidad del rotor, está dada por:

$$n_r = (1-s)n_s \text{ [rpm]}$$

Donde  $s$  es el deslizamiento (el que vale aproximadamente cero si el motor está en vacío, sin carga mecánica) y  $n_s$  es la velocidad sincrónica o del campo magnético rotatorio, que depende de la frecuencia  $f$  [Hz] del voltaje de alimentación y del número de polos  $p$  del motor, en la forma:

$$n_s = \frac{120f}{p} \text{ [rpm]}$$

Así, es posible controlar la velocidad del motor si se alimenta con un voltaje de frecuencia  $f$  controlable. Esto puede lograrse con un equipo electrónico denominado “variador de frecuencia”, el que se alimenta desde la red de frecuencia fija  $f_0$  ( $= 50 \text{ Hz}$ ) y entrega en su salida un voltaje trifásico de frecuencia  $f$  controlable, con el que se alimenta el motor (Figura 2).

Usualmente los variadores están diseñados de manera tal, que cuando su operación se ajusta a una frecuencia  $f$ , automáticamente éste modifica la magnitud del voltaje de salida, de modo que  $\frac{V}{f} = cte$  (para que no se sature el núcleo). Así,  $V = \left(\frac{V_0}{f_0}\right) f$ , en que  $V_0$  es el voltaje de la red.

Normalmente los variadores se diseñan para un rango de  $f$  entre 0 y  $2f_0$ . Así, es posible controlar la velocidad del motor aproximadamente entre 0 y 2 veces la velocidad nominal. (Frecuencias mayores significarían velocidades muy altas que podrían dañar mecánicamente al motor).

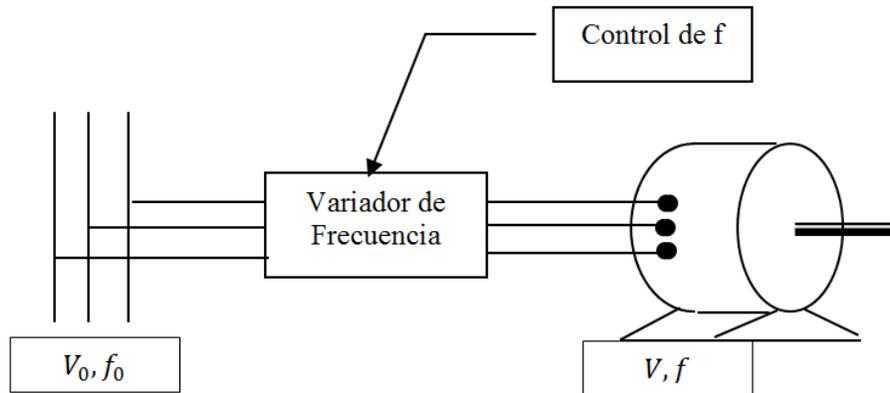


Figura 2: Motor de inducción controlado por variador de frecuencia

## B. OBJETIVOS

Los objetivos más importantes de esta experiencia son:

- Conocimiento de las características constructivas y de la disposición de los distintos elementos de la máquina.
- Destacar las características no eléctricas de la máquina, como son las mecánicas, las térmicas y las aplicaciones de la máquina.
- Conocimiento práctico de la máquina de inducción y dominio de la operación de máquinas de inducción de jaula de ardilla y/o de rotor bobinado.
- Verificación de la teoría, validez y limitaciones de los modelos considerados y de las relaciones de ellos obtenidas.
- Conocimiento de las curvas características de la máquina de inducción, operando como motor y como generador.
- Introducir al alumno en el conocimiento de los valores y rangos típicos, relacionados con máquinas de inducción.
- Dominio de los distintos sistemas de partida de motores de inducción (directo, estrella-delta, con resistencias adicionales en rotor para caso de rotor bobinado, y electrónico o partidador suave).
- Conocimiento de los sistemas de control, de velocidad y/o torque, en particular control electrónico.



## C. ACTIVIDADES

### C.1. Reconocimiento del equipo

Identifique todos los elementos de la máquina. Estudie las características de placa, conexiones y tipo de rotor del motor a ensayar. Identifique las bobinas y la designación de sus bornes.

### C.2. Pruebas de partida

Experimente el método de partida Y/ $\Delta$  y/o agregando resistencias al rotor (si la máquina fuera de rotor bobinado), con el motor en vacío. Mida la corriente de partida (peak) y la de régimen permanente.

### C.3. Determinación de parámetros del modelo

Efectúe las pruebas necesarias para obtener los parámetros del circuito equivalente de la máquina de inducción.

### C.4. Prueba de carga

Obtenga la característica con carga de la máquina de inducción, operando como motor. Mida potencia, tensiones, corrientes y velocidad, para diversas condiciones de carga en el eje del motor (considere la eficiencia del motor CC).

## CONFECCIONAR INFORME PARCIAL

### C.5. Generador de inducción conectado a la red

Haga trabajar la máquina de inducción como generador conectado a la red. Obtenga la velocidad requerida controlando adecuadamente la máquina impulsora (motor de CC). Determine la característica potencia generada vs deslizamiento.

### C.6. Partidor suave

Experimente la partida del motor con un equipo de electrónica de potencia llamado “partidor suave”, con el motor en vacío. Mida la corriente de partida. (OBS: Previo a la experiencia, estudie el funcionamiento de un regulador de tensión AC).

### C.7. Control de velocidad con variador de frecuencia

Incorpore un variador electrónico de frecuencia entre la red y el motor (sin carga). Observe cómo varía la velocidad de operación al modificarse la frecuencia.



- Para diferentes valores de  $f$  (10, 20, 30, 40, 50 Hz), mida  $V$  (voltaje de salida del variador),  $f$ , potencia, corriente de línea y velocidad del eje del motor.
- Observe la forma de onda del voltaje y/o de la corriente que entrega el variador. Notar que no es sinusoidal.

### CONFECCIONAR INFORME FINAL

#### D. ADVERTENCIAS

- Cuidado con las partes rotatorias.
- En C.5, antes de trabajar como generador conectado a la red, verificar por separado que ambas máquinas tengan el mismo sentido de giro.
- En **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, procurar mantener la velocidad lo más constante posible, ya que aún con una pequeña reducción de velocidad, la máquina puede pasar de generador a motor de inducción.

#### E. ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL INFORME

1. Informe de los métodos de partida experimentados e indique cual fue el adoptado. Explique brevemente los criterios de su elección.
2. Grafique el torque, la corriente del estator, el factor de potencia y el rendimiento como funciones del deslizamiento (o de la velocidad de giro). Compare cuantitativamente con las curvas predichas por el circuito equivalente. Proponga una forma alternativa de calcular los parámetros del circuito equivalente a partir de los resultados. Aproveche también los datos de placa. Comente.
3. Comente acerca de la potencia reactiva y su variación al modificar la potencia activa en operación como generador. Comente posibles aplicaciones de la máquina de inducción como generador conectado a la red.
4. Haga un análisis de datos del control electrónico de velocidad:
  - a. Considerando que el motor en vacío puede representarse aproximadamente por una reactancia  $X = 2\pi fL$ , calcule  $L$  para condición nominal (220V, 50 Hz). Con este valor evalúe teóricamente la corriente  $I$  para las distintas frecuencias y compare con los valores experimentales de  $I$ .
  - b. Evalúe las velocidades de operación esperadas para las diferentes frecuencias y compárelas con las velocidades medidas.
  - c. Discuta las diferencias entre valores teóricos y experimentales encontrados en los puntos anteriores.
  - d. Comente las ventajas y desventajas de este control de velocidad. Averigüe en particular, previo a la experiencia de laboratorio, los efectos nocivos que tendría el hecho que la alimentación del motor no sea sinusoidal.



Universidad de Chile  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
Departamento de Ingeniería Eléctrica  
EL5204 – Laboratorio de equipos y dispositivos eléctricos  
Semestre otoño 2011

## F. REFERENCIAS

- [1] M. Liwshitz-Garik y C.C. Whipple, “Máquinas de Corriente Alterna”, Compañía Editorial Continental, S.A., México, 1971.
- [2] A. Fitzgerald y C. Kingsley, Jr., “Electric Machinery”, 2<sup>nd</sup> Ed., Mc. Graw Hill, 1961.
- [3] A. Langsdorf, “Teoría de las Máquinas de Corriente Alterna”, Mc Graw Hill, 1971.
- [4] M. Kostenko y L. Piotrovsky, “Máquinas Eléctricas” Tomo I, Montaner 1968.
- [5] “Máquinas Eléctricas”, Publicación C/5, Depto. de Ingeniería Eléctrica, U. de Chile, 1983. (Parte “Máquinas de inducción Trifásicas”).
- [6] J. Romo, L. Vargas: Texto “Apuntes EL42C, Conversión Electromecánica de la Energía”, Depto. Ing. Eléctrica, U. de Chile, 1<sup>a</sup>ed.2003, 2<sup>a</sup>ed. 2007.